



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학박사 학위논문

상대론적 시·공간에 대한
논리경험주의의 철학적 해명

2023년 2월

서울대학교 대학원
협동과정 과학사 및 과학철학 전공
강 형 구

상대론적 시·공간에 대한
논리경험주의의 철학적 해명

지도교수 천 현 득

이 논문을 이학박사 학위논문으로 제출함
2022년 10월

서울대학교 대학원
협동과정 과학사 및 과학철학 전공
강 형 구

강형구의 박사 학위논문을 인준함
2022년 12월

위 원 장 홍 성 욱 (인)

부위원장 천 현 득 (인)

위 원 고 인 석 (인)

위 원 양 경 은 (인)

위 원 이 정 민 (인)

국문초록

나는 이 논문에서 상대성 이론에 대한 철학적 분석을 통해 논리경험주의 시공간 철학이 형성되는 과정과 그 의의를 규명한다. 논리경험주의를 대표하는 철학자인 슈리크(Schlick), 카르납(Carnap), 라이헨바흐(Reichenbach) 모두 상대론적 시간과 공간에 대한 심도 있는 철학적 분석을 수행했다. 나는 라이헨바흐를 중심으로 논리경험주의 시공간 철학의 형성 과정을 규명함으로써, 이와 관련하여 최근의 몇몇 논자들이 제시한 주장들을 비판적으로 검토하고 논박하며 지금까지 잘 알려지지 않은 논리경험주의 시공간 철학의 의의를 새롭게 밝힌다. 특히 나는 논리경험주의를 대표하는 라이헨바흐 시공간 철학의 핵심이 물리적 기하학의 ‘규약주의’가 아닌 ‘경험주의’이며, 그가 시간과 공간의 ‘인과적 이론’을 제시하며 인간의 경험을 통해 파악할 수 있는 ‘시간과 공간의 물리적 객관성’을 옹호했음을 보인다.

첫째, 나는 상대성 이론이 리만(Riemann), 헬름홀츠(Helmholtz), 푸앵카레(Poincare)로 이어진 시간과 공간을 물리적으로 사유하는 전통 아래에서 발전되었으며, 아인슈타인(Einstein)의 사고 과정 및 논리경험주의의 시공간 철학 또한 이러한 관점에서 잘 이해될 수 있음을 보인다. 시간과 공간을 물리적으로 사유하는 관점에서 보면 상대론은 뉴턴 이후 개념적이고 수학적 차원에서 모든 자연과학 지식의 전제가 되었던 시간과 공간을 강체 막대, 자연 시계, 빛 신호와 같은 물리적 물체(과정)를 통해 물리적으로 구현한 이론이다. 시간과 공간의 물리적 구현이 진행된 역사적 과정과 철학적 의의를 서술함으로써 나는 상대성 이론이 등장하게 된 철학적 배경을 역사적으로 재구성함과 더불어 이러한 논의가 어떻게 이후 논리경험주의의 시공간 철학 논의에 반영되어 창조적으로 변형되었는지를 보인다.

둘째, 나는 라이헨바흐가 『상대성 이론과 선험적 지식』(1920년)에서

제시한 ‘상대화된 선험성’ 개념의 의의와 한계를 비판적으로 검토한다. 라이헨바흐는 상대론의 등장을 근거로 칸트의 선험성 개념을 수정하여 ‘구성적(동등화) 원리들’이 역사적으로 변동 가능하다고 진단했다. 이에 관해 프리드먼(Friedman)은 라이헨바흐가 이후 솔리크(Schlick)와의 서신 교환을 통해 ‘상대화된 선험성’ 대신 ‘규약’이란 용어를 채택하면서 구성적 원리가 가진 칸트적 의의를 잃었다고 진단했다. 나는 프리드먼의 진단을 부분적으로 인정하면서도 1920년부터 라이헨바흐의 ‘상대화된 선험성’ 개념은 칸트 고유의 선험성 개념과 구분되는 ‘경험적’ 성격을 가졌음을 보인다. 더 중요한 것은 라이헨바흐가 ‘상대화된 선험성’ 개념을 매개로 ‘과학적 지식의 분석’이라는 새로운 철학적 방법론에 도달했고, 이후 이 방법론을 바탕으로 상대론적 시간과 공간을 ‘경험주의’ 관점에서 상세하게 분석해나갔다는 것이다.

셋째, 나는 라이헨바흐가 『상대성 이론의 공리화』(1924년)에서 제시한 상대론적 시공간의 공리체계적 재구성이 시공간의 경험적 객관성 문제를 규명하기 위한 것이었음을 보인다. 라이헨바흐는 빛 신호를 이용한 위상적(topological) 공리와 계량적(metrical) 공리로 빛 기하학을 구성한 후, 빛 기하학과 측정 물체의 강성(rigidity)을 이용해 특수 상대론 속 시공간 질서를 구성했다. 이후 그는 중력을 다루는 일반 상대론에서 계량적 공리가 성립하지 않아도 위상적 공리는 성립하며, 위상적 공리는 인과적 빛 신호에 기반함을 보임으로써, 여전히 인과적 질서인 시공간이 경험을 통해 객관적으로 파악됨을 보였다. 이는 일반 상대론에 이르러 시공간의 물리적 객관성이 사라졌다는 아인슈타인의 주장에 대한 ‘철학적 교정’이었다. 또한 이는 시공간에 대한 논리경험주의의 분석 결과가 비일관적이고 모순된다는 리크먼(Ryckman)의 평가에 반하는 합리적 결론이었다.

넷째, 나는 ‘물리적 기하학의 경험적 결정 가능성’에 관한 라이헨바흐와 아인슈타인 사이의 논쟁을 검토한 후, 이 논쟁이 시간과 공간을 물리적으로 사유하는 전통 내에서 이루어진 ‘경험주의’와 ‘규약주의’

사이의 논쟁이었음을 보인다. 이러한 해석을 통해 나는 기하학 전통에 기반한 라이헨바흐의 입장과 해석학 전통에 기반한 아인슈타인의 입장이 서로 달랐으므로 둘 사이의 논쟁이 ‘귀머거리의 대화’라고 진단했던 지오바넬리(Giovanelli)를 논박한다. 이 논쟁은 기초 측정 물체 정의의 이론 의존성에도 불구하고 물리적 기하학을 경험적으로 결정할 수 있는지에 관한 ‘진정한’ 논쟁이었다. 이에 관해 하워드(Howard)는 푸앵카레(Poincare)와 뒤엠(Duhem)의 전체론적 규약주의에 입각해 기초 측정 물체의 정의에 이론적 요소가 개입된다는 아인슈타인의 철학적 관점을 옹호했다. 이에 대해 나는, 객관적 시험 절차를 통해 측정 물체 정의가 갖는 이론 의존성을 적절한 수준에서 제어할 수 있으므로, 이론 의존성에도 불구하고 여전히 물리적 기하학이 경험적으로 결정될 수 있다는 라이헨바흐의 경험주의 관점을 옹호함으로써 ‘경험주의’와 ‘규약주의’ 관점 사이의 균형을 찾고자 한다.

결국 나는 라이헨바흐로 대표되는 논리경험주의 시공간 철학이 상대론적 시공간에 대한 ‘경험주의’ 관점을 제시하였음을 주장한다. 이 철학은 상대론을 시간과 공간을 물리적으로 구현한 이론이라 해석하면서, 여전히 ‘경험’을 통해 시간과 공간의 객관적인 인과 구조가 파악될 수 있다고 본다. 또한 이 철학은 상대론 이후에 제시되는 혁신적인 물리학 이론이 상대론과 마찬가지로 측정 기준 물체를 통해 직접 확인될 수 있는 새로운 경험적 내용을 가져야 함을 요구한다. 이는 측정 물체의 이론 의존성으로 인해 이론 전체만이 경험적 내용을 가진다고 보고, 측정 물체에 대한 이론적 설명을 통해 이론의 ‘완전성’을 추구한 아인슈타인의 세련된 ‘규약주의’ 입장과 대등한 것이었다.

주요어 : 논리경험주의 시공간 철학, 물리적 기하학의 경험주의와 규약주의,
시공간의 인과적 구조, 시공간의 경험적 객관성

학 번 : 2011-30086

목 차

제1장. 서론	1
제2장. 상대성 이론과 시·공간의 철학적 문제들	7
제1절. 서론	7
제2절. 특수 상대성 이론 : 시간과 공간의 ‘운동학’	9
제3절. 일반 상대성 이론 : 시간과 공간의 ‘동역학’	20
제4절. 상대론이 제기한 시간과 공간의 철학적 문제들	32
제5절. 결론	41
제3장. 슐리크의 상대론 해설과 카시러의 철학적 도전 ...	43
제1절. 서론	43
제2절. 슐리크 : 아인슈타인과 상대론의 ‘철학적 대리자’	46
제3절. 카시러 : 상대론을 ‘논리적 관념론’에 포섭하려는 시도 ...	52
제4절. 슐리크, 카시러의 신칸트주의적(관념론적) 해석에 반대하다 ...	61
제5절. 결론	65
제4장. ‘상대화된 선험성’과 ‘과학적 지식 분석’의 방법론 ...	69
제1절. 서론	69
제2절. ‘상대화된 선험성’ 개념 : 그 출현 배경과 의의	72
제3절. ‘이성 분석’에서 ‘과학적 지식 분석’으로의 이행 ...	77
제4절. 갈림길 : ‘상대화된 선험성’과 ‘과학적 지식 분석’ ...	79
제5절. 결론	89

제5장. 카르납의 규약주의 시공간 철학 : 형성과 전개	91
제1절. 서론	91
제2절. 『공간』 : 규약 중심의 논리적 재구성과 논쟁의 ‘해소’	94
제3절. 『공간』 이후 카르납의 이론 일반적 인식론 프로그램	102
제4절. 카르납 시공간 철학의 규약주의적 특성	107
제5절. 결론	114
제6장. 라이헨바흐의 경험주의 시공간 철학 연구	117
제1절. 서론	117
제2절. 상대론적 시공간의 ‘구성적 공리체계’ : 그 경험적 특성 ...	121
제3절. ‘일치(coincidence)’ 개념의 경험적 의미 해명	128
제4절. 특수 상대론 : 빛, 시계, 막대로 구현된 시공간의 질서	132
제5절. 일반 상대론 : 시공간 위상적 질서의 경험적 파악 가능성 ...	139
제6절. 경험주의 시공간 철학의 특징 : ‘규약주의’와의 비교 ...	144
제7절. 결론	151
제7장. 경험주의, 규약주의, 물리적 기하학의 경험적 결정 가능성 ...	156
제1절. 서론	156
제2절. ‘보편력 제거’ : 물리적 기하학 결정의 기본 전제	159
제3절. 일반 상대론 속 물리적 기하학의 경험적 결정 문제 ...	164
제4절. 상대론적 시공간의 경험주의적 재구성에 대한 비판 검토 ...	168
제5절. 물리적 기하학에 관한 라이헨바흐-아인슈타인 논쟁	179
제6절. 결론	200

제8장. 결론	202
참고문헌	209
보론. ‘공간’의 경험적 탐구 : 리만, 헬름홀츠, 푸앵카레 ...	221
제1절. 서론	221
제2절. 리만 : 물리적 세계 속 길이 단위 물체의 출현 ...	222
제3절. 헬름홀츠 : 자유 운동 원리와 공간의 경험적 측정 ...	229
제4절. 푸앵카레 : 물리적 기하학의 규약적 특성	237
제5절. 결론	244
Abstract	246
감사의 글	250

제1장. 서론

현대과학철학의 모태인 논리경험주의(Logical Empiricism)는 20세기 전반기에 등장한 아인슈타인(Einstein, 1879-1955)의 상대성 이론 속 시간과 공간에 대한 철학적 분석과 함께 형성되었으며, 그 결과 논리경험주의 고유의 시공간 철학이 수립되었다. 나는 본 논문에서 한스 라이헨바흐(Hans Reichenbach, 1891-1953)의 시공간 철학을 중심으로 논리경험주의 시공간 철학의 형성 과정과 의의를 철학사적으로 분석하여 그 의의를 밝힌다. 특히 나는 이 논문을 통해 논리경험주의 시공간 철학의 대표자인 라이헨바흐가 시간과 공간을 바라보는 철학적 관점이 ‘경험주의’에 속하며, 그가 물리적 기하학의 경험적 결정 가능성 및 경험을 통한 시간과 공간의 객관적 파악 가능성을 옹호했음을 보인다.

철학적 사유는 아인슈타인이 상대성 이론을 개발하는 과정에서 핵심적인 역할을 담당했다. 본 논문의 2장에서는 시간과 공간을 물리적으로 고찰하는 철학적 사유가 구체적으로 특수 및 일반 상대론을 전개하는 과정에서 어떤 역할을 했는지 보인다. 이와 동시에 상대론을 통해 시간과 공간에 관련된 어떤 철학적 문제들이 새로이 제기되었는지 살펴본다. 뉴턴(Newton, 1642-1727)이 제시한 절대적이고 수학적인 시간과 공간 개념이 여러 철학적 논란을 낳았던 것과 유사하게, 막대와 시계 및 빛 신호를 이용해 시간과 공간을 물리적으로 탐구하는 상대론에서도 이와 관련된 중요한 철학적 문제들이 제기되었다. 설혹 상대론이 1919년 이래 예측적으로 성공적인 이론임이 입증되었을지라도, 상대론이 제기한 시간과 공간의 철학적 문제들은 별도의 철학적 분석과 해명을 요구했다.

상대론에 대한 철학적 해석을 제시한 최초의 논리경험주의자는 모리츠 쉐리크(Moritz Schlick, 1882-1936)다. 본 논문의 3장에서는 쉐리크의 상대론 해석이 갖는 의의와 한계를 다룬다. 쉐리크는 1917년 저작 『현대 물리학의 시간과 공간』에서 푸앵카레의 ‘규약주의’를 발전시킨 관점에서 상대론적 시간과 공간의 철학적 의의를 해설했다. 쉐리크는 관측이 가능한 ‘점-일치’의 총체를 보존하는 복수의 동등한 개념적 체계가 있을 수 있고, 상대론에서의 시간과 공간은 우리의 물리적 세계상을 가장 ‘단순하게’ 만들기 때문에

규약적으로 선택되었다고 설명했다. 이러한 술리크의 철학적 해설은 아인슈타인의 관점과 상당히 부합했으므로 아인슈타인의 열렬한 지지를 받았다. 하지만 1921년 카시러(Cassirer, 1874-1945)가 제시한 신칸트주의적이고 관념론적인 상대론 해석은 상대론의 경험적 의의를 더 부각하여 철학적으로 해명할 필요성을 제기했다.

라이헨바흐가 1920년의 교수자격 취득논문 『상대성 이론과 선험적 지식』에서 제시한 ‘상대화된 선험성’ 개념은 술리크, 라이헨바흐, 카시러, 카르납(Rudolf Carnap, 1891-1970)이 철학적으로 만나고 헤어지는 지점이다. 본 논문의 4장에서는 특히 이 개념을 기점으로 라이헨바흐와 카르납이 갈라지는 모습을 보인다. 두 사람 모두 철학적 경력을 칸트주의 인식론에서 시작했지만, 이들은 상대론을 계기로 칸트적 인식론에 대한 대안을 제시하거나 이를 상당히 변환시킨다. 라이헨바흐는 상대론에 의해 ‘필연적 참’인 선험성이 유지될 수 없고 ‘대상 개념을 구성’하는 선험성만이 유지될 수 있다고 진단했다. 이러한 진단으로부터 ‘과학 지식의 분석’이라는 방법론적 결론을 도출한 라이헨바흐는 ‘경험주의’ 관점에서 상대론적 시간과 공간을 철학적으로 재구성하고 해명하는 작업으로 나아갔다. 이후 라이헨바흐가 떠난 ‘상대화된 선험성’ 개념을 다시 찾은 것은 언어를 철학을 표방한 카르납이다. 그는 과학 언어의 의미론적 규칙과 함께 ‘상대화된 선험성’ 개념을 채용하게 되었으며 이는 카르납 특유의 ‘규약주의’와 결합한 것이었다.

본 논문의 5장에서는 ‘상대화된 선험성’ 개념으로부터 다시 시공간 철학의 논의로 돌아와, 술리크 이후 규약주의 관점을 발전시킨 카르납의 시공간 철학을 논한다. 카르납의 1921년 박사학위 논문 『공간』은 그 특유의 ‘중재’하고 ‘해소’하는 ‘규약주의’를 보여준다. 그의 철학적 ‘중재’와 논쟁 ‘해소’는 이중적으로 진행된다. 첫째, 그는 공간을 ‘형식적’, ‘직관적’, ‘물리적’ 공간으로 구분함으로써 수학자, 철학자, 물리학자 사이를 중재하고 이들 사이의 논쟁을 해소한다. 둘째, 그는 ‘계량 규정’과 ‘계량적 공간 규정’을 선택이 가능한 ‘규약’으로 보고 각각의 선택이 갖는 장단점을 규명함으로써 유클리드 기하학을 채택하는 물리학자와 비유클리드 물리학을 채택하는 물리학자 사이를 중재하고 이들의 논쟁을 해소한다. 이와 같은 관용적 규약주의의 관점과 더불어 카르납은 이론 일반적인 과학 지식 재구성의

프로그램을 추구해 나갔다. 솔리크는 이를 지지했지만, 이후 아인슈타인은 조금씩 이러한 철학적 프로그램을 경계하기 시작했다.

본 논문의 핵심 장은 6장과 7장이다. 6장에서는 라이헨바흐의 경험주의 시공간 철학의 내용과 의의를 상세히 다루고, 7장에서는 ‘물리적 기하학의 경험적 결정 가능성’이라는 주제로 라이헨바흐의 ‘경험주의’ 철학이 아인슈타인의 ‘규약주의’ 철학과 논쟁하는 과정을 보인다. 라이헨바흐의 경험주의 시공간 철학이 갖는 주요 특징은 크게 두 가지이다. 첫째, 그는 상대론적 시공간을 공리체계로 재구성하여 분석함으로써, 일반 상대론에 이르러 시간과 공간 좌표가 직접적인 측정의 의미를 잃고 시간과 공간은 물리적 객관성을 상실했다는 아인슈타인의 주장이 갖는 의미와 타당성을 구체적으로 해명했다. 둘째, 그의 시공간 철학은 일종의 ‘경험주의’(헬름홀츠의 입장)에 입각해 상대론적 시간과 공간의 의의를 조명했다. 그는 시계와 막대 없이 빛 신호만으로 시간과 공간의 질서를 수립할 수 있으며, 중력장이 존재할 때 시간과 공간의 ‘위상적 질서’는 유지되는 반면 시간과 공간의 ‘계량적 질서’는 측정 물체를 통해 ‘경험적으로 결정됨’을 보였다.

논문의 7장에 이르러 ‘경험주의’ 관점과 ‘규약주의’ 관점 사이의 쟁점은 시계, 막대, 빛 신호와 같은 측정 물체(과정)로 집중된다. 측정 물체의 문제는 아인슈타인에게 여러모로 중요했다. 왜냐하면 측정 물체는 특수 및 일반 상대론의 기초 개념이자 이 이론에 경험적 의미를 부여해주는 핵심 요소였지만, 측정 물체 역시 미시적인 물리 구조를 갖추고 있기에 상대론이 설명 없이 가정하고 있는 측정 물체의 이상화된 행태(시간 및 길이 단위의 독립성)에 대한 추가적인 설명이 요구되었기 때문이다. 그리고 이러한 ‘추가적 설명의 요구’(완전성)가 상대론 이후 통일장 이론 추구에서 중요한 역할을 한다는 사실이 밝혀지면서, ‘경험주의’와 ‘규약주의’의 철학적 쟁점은 헬름홀츠와 푸앵카레에게서 그랬던 것처럼 또다시 측정 물체의 인식적 지위 문제로 집중되었다.

헬름홀츠의 연장선 위에 있는 라이헨바흐의 ‘경험주의’는 여전히 측정 물체(과정)를 통한 물리적 기하학의 경험적 결정 가능성을 옹호했다. 비록 아인슈타인이 주장하는 것처럼 측정 물체 정의에 이론이 일부 적재되어 있더라도, 특정한 종류의 실험을 거듭함으로써 정의의 이론 적재성(순환성)을

극복하고 물리적 기하학을 객관적인 수준에서 경험적으로 결정할 수 있다는 것이다. 이에 대해 아인슈타인은, 설혹 그렇다고 하더라도 측정 물체의 이상적 행태를 이론적으로 설명하는 ‘완전성 추구’를 내세우며 경험적인 내용은 동등하더라도 좀 더 ‘완전한’ 이론을 선호한다는 일종의 변형된 ‘규약주의’를 내세웠다. 이에 대해 라이헨바흐는, 설혹 그와 같이 더 ‘완전한’ 이론을 추구하더라도 그러한 완전한 이론이 형식상의 완전성 추구에 그치지 않고 상대론에서처럼 측정 물체의 물리적 행태에 대한 새로운 경험적 예측을 제시하기를 요구함으로써 이에 맞섰다.

이상과 같은 논리경험주의 시공간 철학은 시간과 공간을 물리적으로 사유하는 전통에 속하며 이를 시작한 인물은 리만(Riemann, 1826-1866)이다. 따라서 논리경험주의 시공간 철학의 의의를 정확하게 이해하기 위해서는 리만, 헬름홀츠(Helmholtz, 1821-1894), 푸앵카레(Poincare, 1854-1912)를 거치며 공간을 물리적으로 고찰하는 전통이 어떻게 계승 및 발전하는지를 검토할 필요가 있다. 이 전통 아래에서 헬름홀츠는 ‘경험주의’ 관점, 푸앵카레는 ‘규약주의’ 관점을 대표하며, 두 관점 모두 이후 아인슈타인이 상대성 이론을 개발하는 과정에서 중요한 역할을 했다. 본 논문 마지막에 수록된 ‘보론’에서는 이상과 같이 공간을 물리적으로 사유하는 전통을 역사적으로 개괄함으로써 본론의 논의를 위한 배경지식을 마련한다.

논리경험주의 시공간 철학의 형성 과정과 의의를 이상과 같이 역사적으로 재구성함으로써 얻을 수 있는 과학철학적 성취는 다음과 같다. 아인슈타인이 복잡한 물리적 추론 과정을 통해 얻은 중력장 방정식을 이후 변분 원리에 기반하여 형식적으로 유도한 이래, 오늘날 대부분의 경우 일반 상대론의 인식적 의의에 대한 설명이 수학적 형식 이론에 기반하여 이루어지고 있다. 그러나 아인슈타인은 상대론을 발표한 직후까지도 물리적 관점에 기반하여 상대론의 의의를 해석했고, 실제로 그는 여러 글에서 ‘헬름홀츠적 사고’가 없었다면 일반 상대론에 이르지 못했을 것임을 여러 차례 지적한 바 있다. 따라서 보론과 논문 2장에서의 논의는 오늘날 비교적 낮게 평가되고 있는, 상대론의 수학적 형식론과 대비되는 이 이론의 ‘경험적 의의’를 재조명하여 부각하는 역할을 한다.

논문 3장에서의 논의는 왜 술리크의 상대론 해석이 아인슈타인으로부터

강력한 지지를 받았으며 그 해석의 철학적 한계는 무엇이었는지를 비교적 상세하게 설명한다. 특히 이 논의에서 나는 술리크의 상대론 해석이 아인슈타인의 ‘점-일치’ 논증과 관련된 논의를 비교적 상세히 제시했다는 점에서 다른 해석과 차별화되며, 그가 푸앵카레의 규약주의를 상대론에 걸맞게 변형시킨 일종의 ‘규약주의’ 관점을 내세웠음을 보인다. 이는 술리크의 상대론 해석에 관한 기존의 과학철학 논의에서 찾아보기 힘든 주장이다.

논문 4장은 ‘상대화된 선험성’ 개념에 관한 프리드먼(Friedman)의 주장을 수정 및 보완한다. 프리드먼은 라이헨바흐가 1920년 이후 술리크와의 서신 교환을 통해 ‘상대화된 선험성’ 개념 대신 ‘규약’ 개념을 채택하면서 이론 구체적인 ‘구성 원리’에서 이론 일반적인 ‘규약’으로 철학적 입장을 선회했고, ‘상대화된 선험성’ 개념의 원래 의의는 이후 카르납의 언어철학을 통해 계승된다고 평가했다. 이에 대해 나는 1920년 이후에도 ‘구성 원리’에 대한 라이헨바흐의 강조는 유지되며, 라이헨바흐는 ‘규약주의’가 아닌 ‘경험주의’ 관점으로 입장을 선회하였고, 프리드먼이 주장하는 바와 같은 칸트적인 ‘선험성’ 개념은 이미 라이헨바흐의 1920년 저서에서도 찾아보기 힘들음을 주장한다. 다만 나는 칸트적인 ‘선험성’ 개념이 라이헨바흐보다는 카르납의 언어철학과 가깝다는 프리드먼의 주장을 수용한다.

논문 5장에서는 카르납의 시공간 철학을 ‘규약주의’ 관점으로 규정하고, 그의 ‘규약주의’가 푸앵카레 및 술리크가 제시한 ‘규약주의’의 연장선 위에 있음을 보인다. 분명 카르납의 규약주의가 ‘물리적 세계상의 단순성’을 주장한 술리크의 규약주의와 비교하여 계량 규정과 계량적 공간 규정에 초점을 맞추며 좀 더 구체화 된 형태를 띠는 것은 사실이지만, 이와 같은 카르납의 분석이 상대론적 시간과 공간의 실재를 정확하게 반영한다고 보기는 어렵다. 기존의 과학철학 논의에서는 카르납 시공간 철학이 갖는 칸트적 의의 혹은 당대의 철학 사조였던 현상학과 카르납 시공간 철학 사이의 관계 등에 초점을 맞춘 경향이 있다. 본 논문의 독창성은 카르납의 시공간 철학을 푸앵카레, 술리크와 더불어 ‘규약주의’ 관점에 위치시키며 이를 라이헨바흐의 ‘경험주의’ 관점과 비교 및 대조하는 데 있다.

논문의 6장에서는 라이헨바흐 시공간 철학의 주된 특징이 ‘경험주의’였음을 상세히 밝힌다. 특히 그가 1924년 저서 『상대성 이론의 공리화』에서

수립한 상대론적 시공간의 구성적 공리체계가 어떤 의미에서 경험적인 성격을 갖는 것인지를 보였다. 라이헨바흐의 경험주의 시공간 철학이 헬름홀츠 및 아인슈타인의 철학과 비교하여 진일보한 것은 그가 시계, 막대 같은 물질적 측정 도구보다 단순한 물리적 과정인 ‘빛 신호’를 중시했다는 데 있다. 빛 신호를 이용한 빛 기하학만으로 특수 상대론적 시공간 질서가 구성되며 물질적 측정 도구들은 이 질서를 따른다는 것, 일반 상대론에 이르면 시공간의 계량적 질서가 경험적으로 결정되나 여전히 빛 신호로 수립되는 위상적 질서는 일정하게 유지됨을 보인 것은 빛 신호의 중요성에 대한 그의 강조를 잘 보여준다. 라이헨바흐 시공간 철학이 물리적 기하학의 ‘규약주의’에 속한다는 일반적인 평가와 달리 일종의 ‘경험주의’에 속함을 보이는 것은 논문 6장의 독창적인 기여이다.

라이헨바흐와 아인슈타인 사이의 논쟁을 다루는 논문 7장의 철학적 기여는 크게 세 가지이다. 첫째, 라이헨바흐의 경험주의 시공간 철학이 상대론적 시간과 공간에 대한 부적절한 철학적 해석이었다는 리크먼(Ryckman)의 주장을 논박한다. 둘째, 라이헨바흐와 아인슈타인 사이의 논쟁이 서로 다른 수학적 전통에 속하는 ‘귀머거리의 대화’였다는 지오바넬리(Giovanelli)의 주장을 논박한다. 셋째, 아인슈타인의 규약주의적 전체론 입장을 옹호하는 하워드(Howard)의 비판에 대해, 여전히 라이헨바흐가 대표하는 경험주의적 관점을 건설하게 옹호할 수 있음을 보인다. 전반적으로 논문 7장은 논리경험주의 시공간 철학에 대한 일부 논자들의 부정적인 평가에 대항하여 이의 합리성과 타당성을 옹호함으로써 ‘경험주의’ 관점과 ‘규약주의’ 관점 사이의 균형을 맞추고 있다.

결국 본 논문을 통해 나는 논리경험주의 시공간 철학의 형성과 의의를 철학사적 관점에서 재조명하여 이를 긍정적으로 재평가한다. 특히 나는 상대론적 시간과 공간에 대한 라이헨바흐의 경험주의적 철학이 갖는 의의와 타당성을 옹호한다. 그의 관점은 상대론에 이르러서도 여전히 우리의 경험을 통해 시간과 공간의 객관적인 인과적 구조를 파악할 수 있고 물리적 기하학의 계량적 형태는 경험을 통해 객관적으로 결정될 수 있다는 ‘경험주의’였다. 그러한 ‘경험주의’는 아인슈타인의 세련된 ‘규약주의’에 충분히 맞설 수 있는 건설한 철학적 관점이었다.

제2장. 상대성 이론과 시·공간의 철학적 문제들¹⁾

제1절. 서론

시간과 공간을 물리적으로 사유하는 전통에서 보면 아인슈타인의 상대성 이론이 갖는 의의는 다음과 같다. 뉴턴의 고전 역학에서는 시간과 공간 개념이 구체적인 물리학 이론으로 제시되지 않고 이론의 기본 가정으로 전제된다. 뉴턴 역학에서는 시간의 간격과 공간의 기하학적 형태가 세계의 모든 곳에서 같다고 가정되므로, 굳이 구체적인 측정 물체를 도입하여 시간과 공간에 대한 별도의 물리학 이론을 수립할 필요가 없다. 이에 반해 아인슈타인의 상대론은 시간과 공간 개념을 강체 막대, 자연 시계, 빛 신호와 같은 구체적인 물리적 사물(과정)과 함께 논하는 물리학 이론이다.²⁾ 이전까지 수학적이고 세계 밖에서 전제되던 시간과 공간 개념은 상대론을 통해 구체적인 사물들의 모습을 띠고 물리적 세계 안으로 들어왔다.

뉴턴의 이론이 유클리드 기하학과 같은 ‘광역적’ 시공간 이론이었다면, 아인슈타인의 이론은 미분기하학과 같은 ‘국소적’ 시공간 이론이었다. 뉴턴 이론의 시간과 공간이 모든 종류의 기준계에서 같았다면, 상대성 이론에서 시간과 공간은 구체적인 기준계에서 시계와 막대로 측정하고 기준계에 따라서 달라질 수 있게 되었다. 아인슈타인의 특수 상대론(1905년)은 세계 속 상대적으로 등속 운동하는 기준계에서 공간 측정의 결과(강체 막대)와 시간 측정의 결과(자연 시계)가 어떠한지를 기술하는 물리학 이론이었으며,

-
- 1) 이 장에서의 논의는 강형구 (2021a)에 기초하고 있음을 밝힌다.
 - 2) 상대성 이론을 강체 막대, 자연 시계, 빛 시계에 관한 이론이라고 설명하는 경우는 적지 않다. 다만 대부분 이 이론이 이러한 구체물들에 관한 이론임을 강조하기보다는 이 이론이 얻은 형식적 단순성, 대칭성, 불변성을 강조한다. 예를 들어 물리학 역사가 율니켈과 맥코마크는 다음과 같이 말한다. “빛 신호, 시계, 강체 자에 대한 진술로 이루어진 이론으로서 상대성 이론은 물리학의 특정한 법칙들이 로렌츠 변환에서 불변이기를 요구했고 이전에는 독립적으로 보인 특정한 법칙들을 관련지었다.” 크리스타 율니켈·러셀 맥코마크, 구자현 옮김 (1986/2014) 제4권, 72쪽. 그러나 나는 오히려 상대성 이론이 구체물들에 관한 이론이라는 것, 특히 시간과 공간 개념을 구체적인 측정 물체들을 통해 물리적으로 구현한 이론이라는 것을 더 강조할 필요가 있다고 주장한다.

일반 상대성 이론(1915년, 1916년)은 이러한 측정 기준 물체의 행태에 관한 기술을 가속 운동하는 좀 더 일반적인 계로 확장하는 물리학 이론이었다.

이처럼 시간과 공간 개념을 물리적으로 고찰하는 관점에서 상대론을 바라볼 경우, 어떤 의미에서 아인슈타인의 이론이 리만이 1854년에 제시했던 혁신적인 개념을 진정한 물리학 이론으로 구현한 것이었는지 이해할 수 있다. 또한 우리는 이와 같은 관점을 바탕으로 특수 상대론과 일반 상대론의 주요 특징들 또한 재서술할 수 있다. 실제로 상대론에서 등장하는 주요 원리들인 ‘상대성 원리’, ‘최초 신호로서의 빛 원리’, ‘등가 원리’는 이와 같은 시간과 공간의 물리적 구현을 가능하게 했던 핵심적인 경험 원리들이었다. 아인슈타인은 이러한 경험 원리들과 더불어 물리적인 직관에 기반한 추론을 통해 상대성 이론을 구축해나갔는데, 이 과정에서 그는 헬름홀츠(Helmholtz)와 푸앵카레(Poincare)가 제시한 바 있던 개념적 자원들을 십분 활용하고 창조적으로 변형시켰다.³⁾

다만 일반 상대성 이론은 시간과 공간을 물리적으로 구현함과 더불어 뉴턴의 중력 이론을 대체하는 새로운 ‘중력 이론’이기도 했기에, 아인슈타인은 이러한 새로운 중력 이론을 구축하기 위해 많은 시간과 노력을 들였다. 비록 일반 상대론과 관련된 아인슈타인의 개념적 추론은 시간과 공간을 물리적으로 고찰하는 관점에서 직관적으로 진행되었지만, 이를 통해 그가 얻은 통찰은 정식적인 수학적 형식론을 갖추어야 할 뿐만 아니라 기존에 잘 확립된 물리학의 원리(에너지 보존) 및 고전 역학의 성과(고전적 중력 이론)와 정량적인 측면에서 양립할 수 있어야 했다. 또한 새 중력 이론은 당시까지 알려져 있던 변칙적 현상(anomaly)인 수성의 근일점 운동 결핍값을 정확하게 유도해야 했다.

그러나 이는 상대성 이론을 가능하게 한 기본적인 추론이 시간과 공간을 물리적으로 고찰하는 맥락에서 이루어졌음을 부정하지 못한다.⁴⁾ 따라서

3) 나는 시간과 공간을 물리적으로 사유하는 전통에 관해 ‘보론’에서 상세히 논하고 있다.

4) 율니켈과 맥코마크는 아인슈타인이 물리학에 사용되는 복잡한 수학적 기법을 의심스럽게 생각하다가 이후 점차 수학적 형식론의 중요성을 강조하게 된 것을 “수학의 횡보를 들었다”라고 긍정적으로 평가했다. 크리스타 율니켈·러셀 맥코마크, 구자현 옮김 (1986/2014) 제4권, 246-274쪽 참조. 그러나 나는 이러한 긍정적인 평가를 유보하며, 오히려 수학적 형식론에 대한 아인슈타인의 과도한 강조가 이후 물리학 이론의 경험적 기반에 대한 건전한 비판을 약하게 만들었다고 본다.

상대론 개발 과정에서의 수학적 형식론의 중요성을 인정하되, 오직 수학적인 추론만으로는 상대론에 이르지 못했을 것임을 잊어서는 안 된다. 오히려 상대론 속 시간과 공간의 의미 및 이 이론이 시간과 공간에 대해 제기한 여러 철학적 문제들은 수학적 형식론의 차원이 아니라 시간과 공간을 물리적으로 고찰하는 직관적인 사유의 맥락 속에서 정확하게 이해될 수 있다. 나는 이번 장에서 시간과 공간을 물리적으로 고찰한 이론으로서 상대성 이론이 갖는 주요 특징들을 상세히 설명하고자 한다.

이와 더불어 우리가 주목해야 하는 것은, 마치 뉴턴의 고전 역학이 그러했던 것과 마찬가지로 아인슈타인의 상대성 이론 또한 시간과 공간에 대한 중요한 철학적 문제들을 제기했다는 점이다. 시간과 공간을 바라보는 뉴턴의 절대적 관점이 여러 논란을 낳았듯, 시간과 공간의 물리적 객관성이 사라졌다는 아인슈타인의 철학적 주장 및 시간과 공간의 특성을 드러내는 탐지 물체로서 강체 막대와 자연 시계에 대해 아인슈타인이 표출한 불만은 상대성 이론에 고유한 시간과 공간의 철학적 문제들을 제기했다. 따라서 이번 장의 또 다른 중요 목표는 상대론적 시간과 공간에 대한 아인슈타인의 ‘철학적’ 입장을 비판적으로 검토하는 것이다. 내가 볼 때 결국 뉴턴과 마찬가지로 아인슈타인 역시 뛰어난 물리학자였지만 그의 철학적 입장에는 논란의 여지가 많았으며 그렇기에 상대론이 제시한 철학적 논쟁점들에 대한 추가적인 철학적 해명이 필요한 상황이었다.

제2절. 특수 상대성 이론 : 시간과 공간의 ‘운동학’

아인슈타인이 1905년에 제시한 특수 상대성 이론의 의의를 설명하는 전형적인 방식은 다음과 같다. 이 이론은 이전까지는 역학(mechanics)에만 적용되던 상대성의 원리를 전자기적 현상에까지 확장하여 기존의 전자기학 속에서 볼 수 있었던 일종의 ‘비대칭성’을 없앴다. 또한 이 이론과 더불어 특수 상대성 원리는 모든 물리학이 만족시켜야 하는 근본 원리로서 격상되었다.⁵⁾

5) 이와 같은 특수 상대성 이론의 형식적 특성으로 인해 베를린의 물리학자 막스 플랑크(Max Planck, 1858-1947)는 초기에 이 이론을 적극적으로 지지했다. 플랑크는 헬름홀츠의 제자였으며 스승으로부터 물리학적 탐구 속 철학적 사유를 중요하게 생각하는 관점을 물려받았다. 특수 상대론에 대한 플랑크의 지지와 이유에 대해서는 크리스타 용니켈·러셀 매코마크, 구자현 옮김 (1986/2014) 제4권, 72-85쪽 참조.

이 과정에서 아인슈타인은 전기장과 자기장이 독립적으로 존재하지 않고 기준계에 따라 그 존재가 상대적이며, 오직 이 둘의 결합인 전자기장만이 기준계 독립적으로 존재한다는 결론을 내렸다. 또한 아인슈타인은 특정한 물리적 사건에 할당하는 시간과 공간 간격의 값이 기준계 사이의 상대 운동에 따라 달라진다는 결론을 내렸다. 비록 전기장과 자기장의 존재가 기준계에 상대적이더라도 전자기장의 객관성이 유지되듯, 기준계에 따라 물리적 사건의 시간과 공간 좌표값이 달라지더라도 두 기준계 사이의 시간과 공간 좌표값을 연결하는 변환 공식은 객관적으로 결정된다(로렌츠 변환).⁶⁾

특수 상대성 이론의 의의에 대한 이상과 같은 전형적인 설명은 분명 타당하지만, 이러한 설명은 시간과 공간을 물리적으로 고찰하는 이론으로서 상대론이 갖는 주요 특징들을 간과하게 만들 위험이 있다. 시간과 공간을 물리적으로 구현한다는 관점에 기초해 특수 상대론을 바라보면, 앞서 제시한 전형적 설명과는 다른 방식으로 이 이론의 철학적 의의와 문제들을 이해할 수 있다. 아인슈타인은 특수 상대론에서 명시적으로 ‘공간은 측정 막대로 측정하는 것’이고, ‘시간은 시계로 측정하는 것’이라는 입장을 내세운다.⁷⁾ 이러한 입장이 경험주의 혹은 실증주의적인 성격을 띠고 있는 것은 사실이다. 전혀 경험되거나 측정될 수 없는 뉴턴의 절대적이고 추상적인 시간과 공간의 개념을 부정하고, 시간과 공간 역시 구체적으로 경험되고 측정되어야 함을 주장하기 때문이다. 그러나 이보다는 아인슈타인 이전에 시간과 공간을 구체적 물리적 대상을 통해 구현하는 물리적 이론이 없었다는 점에 좀 더

6) 이러한 전형적 설명은 아인슈타인 자신으로부터 비롯된다. 특히 1920년대 후반 이후의 설명에서 그는 상대성 원리를 중심으로 상대론을 설명한다. 하지만 아인슈타인은 상대론이 제시된 직후부터 1920년대 초반까지 ‘강제 막대와 자연 시계의 운동학’이라는 경험주의적 관점을 강조했다. 예를 들어 그의 1905년 및 1916년 논문, 그가 1916년 말경에 대중을 위해 집필했던 상대성 이론 저술, 그의 1923년 노벨상 수상 강연 등에서 이러한 기록을 찾을 수 있다. 그런 의미에서 본 논문에서 제시하는 나의 해석적 관점은 새롭고 독창적이거나 아인슈타인 스스로 제시했던 초기 상대론 해석으로 회귀한 것이라 보아야 한다.

7) 시간과 관련하여 아인슈타인은 특수 상대론 논문에서 이렇게 말한다. “공간상의 점 A에 시계가 있다면, 점 A에 있는 관찰자는 사건들과 동시에 시계 바늘의 위치를 읽음으로써 A 바로 근처에 있는 사건들의 시간을 측정할 수 있다.” 임경순 편저 (1997), 160쪽. 공간과 관련해서는 다음과 같이 말한다. “...시간을 맞춘 시계들을 정지한 계에 놓고, 관찰자는 측정될 막대의 두 끝이 일정한 시간 t에서 정지계의 어떤 지점들에 놓이는지를 확인한다.” 같은 책, 163쪽.

주의를 기울일 필요가 있다.

구체물을 이용한 시간과 공간의 운동학 이론을 구축하기 위해 우리가 가장 쉽게 생각할 수 있는 기준계는 단연 관성계이다. 관성계는 우리가 생각할 수 있는 가장 단순한 형태의 기준계이기 때문이다. 이제 우리는 리만과 헬름홀츠의 정신을 따라, 이 기준계의 시간과 공간을 구체적인 기준 물체를 이용하여 측정하고 그 기하학적 형태를 결정하고자 한다. 그런데 우리는 리만이 광역적 기하학에서 국소적 기하학으로 이행했던 것처럼, 처음부터 모든 관성계에서 같은 시간과 공간이 성립한다고 가정하지 않으려 한다. 각각의 관성계마다 시계와 막대에 의한 구체적인 측정이 수행되어야 한다. 우리가 단일한 기준계가 아니라 서로 다른 복수의 관성계가 존재함을 받아들인다면, 이 관성계들 사이의 관계를 성립시키기 위한 가장 기본적인 물리적 원리가 ‘특수 상대성 원리’이다. 이 원리에 따르면 물리 법칙을 기술할 때 그 형식은 관성계 A와 관성계 B 모두에서 같게 나타난다.

이 원리와 더불어 시간과 공간의 운동학을 수립하기 위해 꼭 필요한 것이 ‘가장 빠른 물리적 신호’이다. 이러한 신호는 하나의 관성계 A에서 다양한 물리적 현상들을 기술하는 데 필요할 뿐만 아니라, 관성계 A가 다른 관성계 B와 맺는 관계를 기술하기 위해서도 필요하다. 아인슈타인은 빛이 가장 빠른 물리적 신호이며 그 운동 방향에 상관없이 일정한 속력으로 움직인다고 가정함으로써, 빛 신호를 통해 서로 다른 관성계 A와 B에 있는 관측자가 물리적인 정보를 소통할 수 있게 했다. 각 관성계에 있는 관측자는 이상적인 측정 도구인 강체 막대와 자연 시계를 갖고 있고, 서로 다른 관성계 사이의 소통은 빛 신호를 통해 이루어진다. 만약 물리적 세계 속에 관성계들만이 존재한다고 가정한다면, 이제 시간과 공간은 각각의 관성계에서 시계와 막대를 써서 측정하는 것으로 바뀌었다.

상대론에 대한 기존의 설명에 기초하면 아인슈타인이 ‘특수 상대성 원리’와 ‘광속 일정의 원리’를 이론의 새로운 두 기둥으로 삼은 ‘논리적 근거’를 제시하기가 쉽지 않다.⁸⁾ 다수의 법칙 중 유독 이 두 개의 법칙을

8) 예를 들어, 상대성 이론의 역사가인 노튼(Norton) 또한 특수 상대론이 기존의 전자기 동역학으로부터 자연스럽게 파생되어 나온 것임은 설득력 있게 보이고 있지만, 왜 아인슈타인이 시간의 개념을 재정의해서 새로운 동역학을 구축했는지는 제대로 설명하지 못하고 있다. 노튼에 따르면 시간의 개념을 재형성한 것은 ‘예외적이고

근본적인 ‘원리’의 수준으로 격상시킨 점은 아인슈타인의 ‘물리적 직관’ 및 ‘창조성’의 발현이라고 설명할 수 있을 뿐이다. 다만 우리는 당시 마흐(Mach)가 물리학의 근본 법칙 또한 인간의 사유가 새로운 경험적 사실들에 적응하는 과정에서 변화할 수 있다고 본 점,⁹⁾ 푸앵카레(Poincare) 역시 물리학의 근본 법칙들이 선택이 가능한 ‘규약’이라 보았다는 점¹⁰⁾으로부터 중요한 착상을 얻었을 것으로 추측할 수 있다. 이 두 원리를 전제했을 때 특수 상대성 원리를 전자기적 현상에까지 확대 적용할 수 있을 뿐만 아니라 실험적으로 새로운 예측까지 할 수 있음을 확인한 후 아마 아인슈타인은 자신의 직관이 옳았다고 판단했을 것이다. 이와 함께 관측 불가능한 에테르를 전제하지 않아 전자기장을 실어 나르는 별도의 역학적 매질 또한 불필요하게 되었다.

그러나 시간과 공간을 물리적으로 고찰하는 관점에서 보면, 시간과 공간을 관성계의 군(group) 속에서 국소적인 것으로 만들기 위해 가장 필수적인 두 가지의 원리가 ‘특수 상대성 원리’와 ‘빛 원리’임을 비교적 잘 이해할 수 있다. 왜냐하면 서로 동등한 복수의 관성계를 물리 법칙의 기술 관점에서 차별할 이유가 없으며(특수 상대성), 물리적 현상 기술 및 서로 다른 관성계 사이의 소통을 위해서는 가장 빠른 물리적 신호(빛 원리)가 필수적이기 때문이다. 실제로 아인슈타인이 시간과 공간을 물리적으로 고찰하는 관점에서 특수 상대론을 고안했음을 추측할 수 있는 중요한 언급이 있다. 대개 그는 논문 초반에 철학적 고찰을 제시한 후 논문 후반부에서 물리적 논의를 전개해 나가는데, 그는 1905년 특수 상대론 논문의 초입에서 이렇게 말한다.

...여기서 발전될 이론은 모든 전자기동역학과 마찬가지로 **강체의 운동학**에 근거하는데, 왜냐하면 그와 같은 이론의 그 어떤 주장도 **강체(좌표), 시계, 전자기적 과정 사이의 관계와 관련되어야 하기 때문**이다. 이러한 상황에 대한 불충분한 고찰이 현재의 움직이는 물체의 전자기동역학이 직면한 난점들의 근원에 놓여 있다.¹¹⁾

필사적인 사고’였다. Norton, John. (2014), pp. 99-100. 그러나 시간과 공간을 물리적으로 고찰하는 맥락에서 보면 특수 상대론과 관련된 아인슈타인의 사고 흐름과 그 의의를 보다 더 정합적이고 자연스럽게 이해할 수 있다.

9) 에른스트 마흐, 고인석 옮김 (1883/2014), 18-19쪽 참고.

10) 푸앵카레의 규약주의적 관점에 관해서는 본 논문의 ‘보론’의 제4절인 “푸앵카레 : 물리적 기하학의 규약적 특성”에서의 논의를 참고할 것.

또한 아인슈타인은 일반 상대론을 체계적으로 제시하는 그의 1916년 논문에서도 다음과 같이 말한다.

...왜냐하면 심지어 특수 상대성 이론에 따라서도 기하학의 법칙들은 정지해 있는 강체 물체들의 가능한 상대적 위치들과 관계된 법칙들로서 직접적으로 해석되어야 하기 때문이다. 그리고 좀 더 일반적인 방식으로 말하자면, **운동학의 법칙들은 측정 물체와 시계 사이의 관계를 기술하는 법칙들로서 해석되어야 한다.**¹²⁾

이러한 관점 전환이 이루어지면 기존에 가정된 여러 개념에 변화가 필요해진다. 예를 들어, 유한한 속도를 가진 빛 신호를 이용하는 까닭에 특정한 물리적 사건에 대한 동시성 판단이 관성계 A와 관성계 B에서 달라진다면, 동시성 판단에 기반하여 한 기준계에 있는 물체의 길이를 측정하는 방식을 사용할 때 관성계 A에서 정지해 있는 특정한 물체의 길이 l에 대한 관성계 A와 B에서의 판단이 두 계의 상대 속도에 따라 달라진다. 따라서 아인슈타인의 운동학은 동시성, 물체의 길이 등에 관한 정의들을 새롭게 제시하게 되었다.

이처럼 시간과 공간을 물리적으로 고찰하는 운동학을 개발하는 과정에서 자연스럽게 아인슈타인은 서로 다른 관성계에서 강체 막대, 자연 시계와 같은 측정 물체들이 서로의 관점에서 보이는 행태에 대해 추론했으며, 이러한 추론의 기반이 된 것이 특수 상대성 원리와 빛 원리였다. 특수 상대론의 진정한 혁신성은 시간과 공간을 측정하는 기준 물체의 행태를 물리적 고찰의 대상으로 삼아 두 개의 경험 원리를 바탕으로 물리적 추론을 진행하여 새로운 운동학을 구축한 데 있다. 이러한 유형의 사고를 위한 개념적 자원이 리만, 헬름홀츠, 푸앵카레에 의해 이미 마련되어 있었지만, 시계와 막대의 행태를 다루는 ‘정식적인 물리적 운동학’을 수립한 것은 아인슈타인만의 독창적인 업적이었다.¹³⁾

11) Einstein, Albert. (1905), p. 38. 강조는 나의 것이다.

12) Einstein, Albert. (1916), p. 112. 강조는 나의 것이다.

13) 물론 시간과 공간의 운동학을 상징하는 ‘로렌츠 변환’의 명칭이 물리학자 로렌츠

이와 관련하여 주목해야 하는 것은 특수 상대론 속 강체 막대와 자연 시계가 극히 ‘이상화된 도구’라는 점이다. 비록 시간 및 길이 간격의 측정값이 기준계에 따라서 달라진다고 하더라도, 강체 막대는 주변의 그 어떤 물리적 영향과도 무관하게 그 길이 단위를 일정하게 유지한다고 전제되며, 자연 시계 역시 강체 막대와 유사하게 그 시간 간격을 일정하게 유지한다고 전제된다. 만약 A와 B라는 두 관성계가 있다고 할 때, A의 관측자는 자신이 가진 강체 막대와 자연 시계의 단위가 늘 일정하게 유지된다고 가정하며, 이는 B의 관측자 역시 마찬가지다. 그런데 실제 물리적 세계에서 이런 이상적인 측정 물체와 정확하게 대응하는 물리적 과정을 찾기 어렵다. 모든 종류의 물리적 영향에서 자유롭고 완벽한 이상적인 강체와 시계는 물리적 세계에 실제로 존재하지 않기 때문이다.¹⁴⁾

또한 우리는 특수 상대론 속 기준 물체에 의한 측정 결과가 물리적 사건의 좌표와 직접적으로 대응한다는 점에 주목할 필요가 있다.¹⁵⁾ 한 관성계의 관측자는 측정 도구를 사용한 측정 결과를 시간과 공간의 좌표값과 직접적으로 대응시킨다. 만약 X 좌표축과 나란한 방향으로 강체 막대를 통해 여섯 번 측정했다면, 해당 물리적 사건의 X 좌표값은 ‘6’이다. 또한 어떤 물리적 사건을 관측했을 때 관측자의 시계가 ‘4’라는 값을 가리키고 있다면, 그 물리적 사건의 시간 좌표는 ‘4’이다. 실천적 관점에서 볼 때 모든 물리적 현상들에 이러한 절차를 적용하는 것은 거의 불가능하지만, 특수 상대론에서는 적어도 원리적으로 이러한 절차 적용이 가능하다고

(Lorentz)로부터 비롯된 것에서 알 수 있듯, 새로운 운동학을 기술하는 수학적 변환 이론은 로렌츠와 푸앵카레에 의해 이미 상당히 발전되어 있었다. 하지만 아인슈타인의 진정한 혁신은 푸앵카레까지 진행된 ‘공간’에 대한 물리적 고찰을 ‘시간’에까지 확장하여 이를 통해 ‘시간’과 ‘공간’ 모두를 다루는 운동학을 새로운 개념 틀 아래에서 수립한 데 있다.

- 14) 측정 물체의 이상화된 특성에 관한 이와 유사한 인식론적 물음을 이미 리만, 헬름홀츠, 푸앵카레의 저술들 속에서 찾을 수 있다. 본 논문의 ‘보론’을 참조할 것.
- 15) 좌표와 측정 결과 사이의 직접적 대응 여부는 아인슈타인이 일반 상대성 이론을 탐구하는 과정에서 사후적으로 그 중요성을 깨닫게 된 문제이다. 자신의 자서전적 기록을 비롯한 여러 문헌에서 아인슈타인은 이에 대해 언급했다. 이에 관한 대표적인 예로 임경순 편저 (1997), 142쪽을 참고하라. “일반 상대성 이론을 구성하는 데 왜 7년이 더 필요했는가? 그 주된 이유는, 좌표는 직접적인 측량의 의미를 가져야만 한다는 생각에서 스스로 벗어나는 일이 그리 쉽지 않다는 사실에 있다.” 알베르트 아인슈타인, 홍수원·구자현 옮김 (2003), 337쪽에서도 아인슈타인은 이와 비슷한 언급을 했다.

전제한 후 추론을 진행한다. 요약하면, 특수 상대론 속 모든 물리적 현상들의 좌푯값은 ‘직접적인 측정의 의미’를 갖는다. 특수 상대론의 주요 결론인 동시성의 상대성, 시간 간격과 길이 간격의 상대성 역시 이와 같은 직접적인 측정의 의미를 전제한다. 좌표와 측정 사이의 이와 같은 대응 문제는 이후 일반 상대론에서 중요한 철학적 쟁점으로 떠오르게 된다.

특수 상대론 속 기준 물체에서 볼 수 있는 다른 중요한 특징은 이들이 물리학 이론의 ‘기초 개념’이라는 것이다. 특수 상대론은 이상화된 측정 도구인 강체 막대와 자연 시계가 존재한다고 가정하지만 이에 대한 별도의 근거를 제시하고 있지는 않다. 다만 우리는 자연 속에서 강체와 유사하게 위치 변화 및 물리적 영향에도 불구하고 그 길이를 일정하게 유지하는 몇몇 물체들을 찾을 수 있으며, 시계 또한 마찬가지다. 이상화된 측정 도구에 대한 추론은 다수의 경험적 증거들을 가지고 있지만 이러한 증거들만으로는 완벽하게 이상적인 측정 도구의 존재를 정당화할 수 없다. 그런 의미에서 측정 도구는 일종의 이상화된 ‘정의(definition)’의 성격을 갖는다.¹⁶⁾ 문제는 이런 이상화된 측정 도구 정의를 통해 상대론적 운동학이 경험적 의미를 얻는다는 데 있다. 상대론적 운동학이 실제로 경험에 합치하는지는 물리적 세계에서 찾을 수 있는 근사적 측정 도구(막대와 시계)를 통한 실질적인 측정을 통해 판단하게 된다.

다음으로 우리는 빛 신호를 사용해서 이루어지는 아인슈타인의 ‘동시성’ 정의가 갖는 중요한 특징을 좀 더 자세히 살펴보자. 특수 상대론 논문에서 아인슈타인은 근방에서의 동시성 판단, 즉 공간상의 한 점에서 두 사건이 교차하는 ‘일치(coincidence)’에 대해서 별도의 문제를 제기하지 않았다. 대신 아인슈타인이 새롭게 제시한 것은 멀리 떨어져 있는 두 사건 사이의 동시성 정의였다. 점 A에 위치하는 관찰자 O_1 이 점 B에서 일어나는 사건에 대해 파악하고자 한다고 해 보자. 관찰자 P는 빛 신호를 시각 t_1 에 점 B로 송출하고, 점 B에서는 P가 송출한 빛 신호를 거울로 반사하여 다시 관찰자 P로 보내, 관찰자 P는 되돌아온 빛 신호를 시각 t_3 에 수신한다. 이때 과연

16) 특수 상대성 이론에서 전제하는, 이상화된 강체 막대와 자연 시계가 실제로 물리 세계에 존재하는지의 문제는 특수 상대론이 제시된 직후부터 물리학자들 사이에서 중요한 논란이 되었다. 이에 관해서는 지오바넬리(Giovanelli)의 다음 논문을 참고하라. Giovanelli, Marco. (2014).

빛 신호가 점 B에 도달한 시각 t_2 은 언제일까? 아인슈타인은 이에 대해 간단히 $(t_1+t_3)/2$ 라고 정의했다.¹⁷⁾ 이 정의는 빛 신호의 속도가 점 A에서 점 B로 갈 때와 점 B에서 점 A로 올 때 같다고 전제하고 있다.

그런데 이 문제는 보기보다 간단하지 않다. 우리는 사전에 빛 속도의 일정을 전제할 수 없는데, 왜냐하면 A와 B 사이를 이동하는 빛 속도 측정은 논리적으로 A와 B 사이의 동시성을 전제하기 때문이다. 그러므로 우리는 A에서 B로 갈 때와 B에서 A로 갈 때 빛의 속도가 달라지는 가능성을 사전에 배제할 수 없다. 예를 들어, 우리가 알 수 없는 이유로 인해 A에서 B로 갈 때의 빛 속력이 B에서 A로 갈 때의 빛 속력보다 4배 클 수 있다. 분명 이러한 전제 아래에서 물리적 현상 기술은 상당히 복잡해지겠지만, 적어도 이러한 가능성을 경험을 근거로는 배제할 수는 없다. 기준계 A에서 경험할 수 있는 사실은 빛이 가장 빠른 신호라는 사실, 빛이 시각 t_1 에 출발하여 시각 t_3 에 되돌아왔다는 사실 뿐이기 때문이다. 이로부터 멀리 떨어져 있는 두 사건의 동시성은 우리가 직접적으로 관측할 수 있는 물리적 사실이 아니라 일종의 ‘정의’라는 결론이 도출된다($t_2=t_1+\epsilon(t_3-t_1)$, $0<\epsilon<1$). 이에 따라 아인슈타인의 동시성 정의는 유일하게 가능한 정의가 아니라 여러 가능한 정의 중 하나의 좋은 선택지($\epsilon=1/2$ 인 경우)가 된다.¹⁸⁾

아인슈타인의 운동학이 이전까지의 논의와 차별화되는 중요한 점은 공간뿐만 아니라 시간 또한 물리적으로 고찰했다는 데 있고, 이 과정에서 핵심적인 역할을 한 것이 ‘빛 신호’이다. 그런데 빛 신호와 관련해서도 강체 막대의 ‘자유 운동 원리’에서와 비슷한 가정이 개입된다. 강체 막대가 운동하는 과정에서 그 길이 단위를 일정하게 유지한다고 가정하는 것처럼, 빛 신호의 속도 역시 왕복 운동 간에 일정하게 유지된다고 가정하는 것이다. 이러한 가정은 일종의 ‘정의’이다. 빛 신호가 왕복 운동하면서 그 속도를

17) 알베르트 아인슈타인, 임경순 편역 (1997), 「움직이는 물체의 전기역학에 관하여」 중 157-193쪽, I. 운동학 부분의 1. 동시성의 정의.

18) 동시성 정의가 갖는 이와 같은 임의적 성격은 아인슈타인의 1905년 논문에서 명료하게 표명되지 않았다. 이후 이를 명료하게 표명하고 공식화한 것은 라이헨바흐(Hans Reichenbach)의 저술들이었다. 이에 관한 대표적인 예가 그의 『시간과 공간의 철학』이다(한스 라이헨바흐, 이정우 옮김, 1928/1958/1986). 이후 맬러먼트(Malament)는 몇 가지 합리적 제약 조건들을 추가할 경우, 동시성을 일의적으로 결정하여 그 임의성을 제거할 수 있다는 주장을 제시했다(Malament, 1977).

일정하게 유지하는지는 경험적으로 확인할 수 없기 때문이다. 이처럼 길이 기준 물체의 길이 단위, 시간 기준 물체의 시간 단위, 빛 신호의 단일 방향 속도가 임의의 관성 기준계에서 일정한 것은 참도 거짓도 아닌 일종의 ‘정의’라고 볼 수 있다.¹⁹⁾

또한 아인슈타인은 기준계 A에 상대적으로 운동하는 기준계 B 위에 있는 단위 막대 길이를 기준계 A의 관점에서 ‘정의’해야 한다고 보았다. 기준계 B 위에 있는 단위 막대의 길이를 기준계 A의 관점에서 동시적인 두 사건 사이의 거리로서 정의한 것이다.²⁰⁾ 동시성의 새로운 정의를 통해서 서로 상대적으로 등속 운동하고 있는 두 계에서 특정한 물리적 현상에 대한 동시성 판단이 서로 달라짐을 보인 아인슈타인은, 길이 측정에 대한 새로운 정의를 도입할 때 길이 간격 또한 동시성과 마찬가지로 기준계의 운동 상태에 따라 함께 변하는(공변) 양임을 보였다. 이는 자연스러운 귀결이었다. 동시성 판단이 달라지면 이에 의존하는 길이 간격 역시 달라지기 때문이다.

이처럼 특수 상대론적 운동학에서 특히 ‘정의의 문제’가 발생했던 것은 이 운동학이 시간과 공간 개념을 측정 물체들로 구체화하여 하나의 운동학 이론으로 만드는 과정에서 발생한 문제였다. 동시성 정의, 빛의 단일 방향 속도 일정의 정의, 운동하는 다른 기준계에 놓인 단위 막대 길이의 정의 등이 이에 관한 대표적 예이다. 왜 이런 정의의 문제가 발생했는지, 왜 이런 정의가 필요한 것인지는 특수 상대성 이론이 제시된 당시부터 많은 논란이 있었지만, 시간과 공간을 물리적으로 고찰하는 맥락에서 보면 이에 대한 비교적 정합적인 설명을 제공할 수 있다.

아인슈타인은 특수 상대성 원리, 광속 일정의 원리, 동시성의 정의, 길이 간격의 정의를 토대로 상대적으로 등속 운동하는 두 기준계 사이의 새로운 좌표 변환식을 도출해 내었는데, 그 결과는 수학적으로 이미 알려져 있던 ‘로렌츠 변환(Lorentz Transformation)’과 같았다. 이 변환을 적용하면

19) 빛 신호 속도 일정이 일종의 ‘정의’임을 명시적으로 표명한 것은 라이헨바흐의 다음 저작이다. 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020). 다만 빛 신호 속도 일정의 ‘정의’가 강체 막대 및 자연 시계 ‘정의’와 갖는 유사성을 지적하는 것은 나의 해석이 갖는 독창성이라 할 수 있다.

20) 알베르트 아인슈타인, 임경순 편저 (1997), 「움직이는 물체의 전기역학에 관하여」 중 157-193쪽, 1. 운동학 부분, 2. 길이와 시간의 상대성에 관하여.

정지한 도체의 관점에서 서술한 법칙이 등속 운동하는 자석의 관점에서 서술한 법칙과 같은 수학적 형식을 갖게 된다. 결과적으로 전기장 성분과 자기장 성분은 기준계의 운동 상태에 따라 달라지나 그 둘의 결합체인 전자기장은 달라지지 않으며, 시간 간격과 길이 간격은 기준계의 운동 상태에 따라 달라지지만 $x^2+y^2+z^2-c^2t^2$ 의 값은 기준계와는 무관한 불변하는 값을 갖게 된다.²¹⁾

하지만 특수 상대성 이론의 의의는 시간과 공간을 물리화하는 맥락에서 다음과 같이 요약할 수 있다. 리만이 길이 측정 단위 물체의 개념을 제시하여 공간을 물리화하는 가능성을 열었고, 헬름홀츠는 단위 물체의 자유 운동 개념을 도입하여 실천적(practical) 기하학이 가능하게 만들었으며, 푸앵카레는 물리적 기하학의 ‘규약성’ 논의를 통해 시간과 공간의 물리적 이론을 수립할 수 있는 배경을 조성했다. 주로 공간에 집중되어 있던 논의를 시간으로까지 확장하여 시간과 공간을 그 대상으로 하는 정식적인 운동학 이론을 만든 것이 아인슈타인이다. 움직이는 시계와 막대의 운동학을 구성하기 위한 물리적 원리가 특수 상대성 원리와 빛 원리였다. 특수 상대론은 리만이 자신의 1854년 강연에서 제안한 공간의 물리화 개념의 실질적인 물리적 구현물이었다.

흥미로운 것은 특수 상대론에서도 리만이 제시한 기초 측정 도구의 핵심적 특성은 변하지 않았다는 것이다. 리만은 길이 측정 단위가 위치에 독립적이라 했고, 헬름홀츠는 이를 측정 단위 물체의 자유 운동 원리로서 해석했다. 유사하게 길이에 대한 논의를 시간에 대한 논의로 이행할 수 있다. 시간 단위 측정 물체의 자유 운동 원리를 가정할 수 있는 것이다. 특수 상대성 이론에서 강체 막대, 자연 시계는 이러한 단위 불변성을 정확히 유지한다. A 기준계에서의 강체 막대 길이 및 자연 시계 단위는 변하지 않으며, B 기준계에서도 마찬가지다. A 기준계에서 볼 때의 B 기준계의 강체 막대 길이 및 자연 시계 단위가 A 기준계의 막대 및 시계와 달라 보일 뿐이다. B 기준계의 강체 막대와 자연 시계를 A 기준계로 가져오면, 두 막대와 두 시계의 단위는

21) 팀 모들린(Tim Maudlin)은 그의 책에서 처음부터 특수 상대성 이론을 4차원 시공간을 토대로 제시하는데, 이와 같은 그의 제시는 오늘날 특수 상대성 이론을 제시하는 표준적인 방식이기는 하지만 특수 상대성 이론의 역사적이고 철학적인 맥락을 왜곡할 위험이 있다. Maudlin, Tim. (2012)의 4장 참고.

다시금 일치한다.

특수 상대론은 기초 측정 물체의 행태에 대한 추가적인 물리적 ‘설명’을 제공하지 않는다. 기초 측정 물체의 기본적인 행태는 사전에 그러하다고 ‘전제’된다. 아인슈타인은 이러한 전제 아래에서 시간과 공간을 기술하는 구체적인 운동학 이론을 구성했을 뿐이다. 특수 상대론은 오직 관성계에서만 적용되기에 시간과 공간을 물리적으로 구현하는 첫 번째 단계라고 할 수 있었다. 그리고 이런 특수 상대론만으로도 여러 가지 주목할만한 물리적 귀결들이 도출되었다는 점은 놀라운 일이었다.

특수 상대성 이론은 1905년에 제시된 이후 시간이 지남에 따라 조금씩 물리학자들 사이에서 인정받기 시작했다. 그리고 이 이론과 더불어 여러 철학적 문제들이 새로이 제기되었다. 왜 특정한 두 법칙을 물리학 전체의 근본 원리로서 ‘승격’시켜야 했을까? 아마도 특수 상대론의 실질적인 물리적 성공이 이 물음에 대한 하나의 답이 될 수 있을 것이다. 하지만 왜 우리가 특수 상대론에서 등장하는 새로운 형태의 ‘정의들’(동시성, 길이의 정의)을 수용해야 하는지,²²⁾ 왜 우리가 이 이론에서 등장하는 추상화되고 이상화된 기초 측정 물체들(강체 막대, 자연 시계)의 행태를 받아들여야 하는지는 여전히 의문으로 남아 있었다. 또한 특수 상대론이 제시된 직후 물리학자들은 과연 관성계가 아닌 가속 운동 기준계에서도 이러한 측정 물체들의 이상적인 행태가 유지될 것인지(강성(rigidity)을 유지하는지)의 문제를 제기했다.

비록 특수 상대론에는 물리학 이론의 수학적 대칭성 제고와 같은 여러 장점이 있었지만, 이상과 같은 주된 이유로 인해 이 이론은 과학자들 사이에서 여전히 논란이 되었다. 즉, 이 이론에 대한 별도의 철학적 해명이 필요한 상황이었다.²³⁾ 중요한 것은 이러한 해명이 물리학적이라기보다는 철학적인

22) 존 노튼(John Norton)은 아인슈타인이 상대성 원리를 전기동역학 전체에 적용하려는 시도에서 거듭 실패하자 마지막에 어쩔 수 없는 상황에서 빛 신호와 시계를 이용해서 동시성에 대한 분석을 했다는 과학사적 해석을 한 바 있다. Norton (2014), pp. 72-102. 노튼의 이와 같은 언급은 그의 논문 결론 부분에서 찾아볼 수 있다.

23) 특수 상대성 이론이 경험적으로 성공적임이 밝혀지고 수학적으로 물리학 이론의 대칭성을 높였다고 하더라도, 1920년대에 이 이론의 철학적 의의에 관한 논란은 계속 이어졌다. 이러한 논란을 잘 보여주는 저서로 이 시기 라이헨바흐의 논문들을 모은 다음의 저서를 참고하라. Reichenbach, Hans. (2006), edited by Steven Gimbel and Anke Walz., *Defending Einstein : Hans Reichenbach's writings on space, time and motion* (Cambridge University Press).

성격을 가져야 했다는 데 있다. 이미 물리학자 로렌츠가 ‘막대 수축 가설’과 ‘국소 시간’ 개념을 도입하여 경험적으로 관측된 사실들을 특수 상대론과 동등한 수준에서 기술하는 이론을 내놓은 상황이었으므로, 아인슈타인은 물리학과는 차별화되는 철학적 관점에서 자신의 이론을 정당화할 필요가 있었다.

제3절. 일반 상대성 이론 : 시간과 공간의 ‘동역학’

아인슈타인이 1905년에 제시한 특수 상대성 논문은 특정한 물리적 현상을 ‘설명’하는 논문이라기보다는 물리학의 토대가 되는 기본 원리들을 변경하고 시간 간격과 길이 간격 측정에 관한 특정한 정의들을 새롭게 제시함으로써, 궁극적으로는 ‘상대성 원리’를 역학의 영역에서 나아가 전자기학을 포함한 물리학의 모든 영역으로 확장하는 논문이었다. 아인슈타인은 특수 상대론을 통해 물리학의 법칙들이 ‘갈릴레이 변환’이 아니라 ‘로렌츠 변환’을 따르는 방식으로 재공식화 되어야 함을 주장했다. 이후 아인슈타인은 기존의 물리학 법칙들을 로렌츠 변환의 관점에서 재구성하는 작업을 진행했고, 그 과정에서 우리에게 잘 알려진 공식인 $E=mc^2$ 또한 유도해낼 수 있었다.²⁴⁾

그런데 아인슈타인이 특수 상대론을 바탕으로 물리학을 재구성하는 과정에서 중력의 문제는 잘 해결되지 않았다. 뉴턴의 중력 법칙은 두 물체 사이의 거리와는 관계없는 일종의 ‘원격 작용(action at a distance)’을 전제하는데, 이는 물리적 신호 속도의 상한이 빛의 속도임을 전제하는 특수 상대론의 관점에서 수용하기 어려웠다. 또한 특수 상대론에 따르면 기준계의 운동 상태에 따라 특정한 물리적 현상의 동시성 여부 및 길이 간격이 달라지므로, 서로 중력 상호작용을 하는 두 물체 각각에서 측정된 시간 간격과 길이 간격이 달라지면 힘의 크기 역시 달라질 것이었다. 이는 작용과 반작용의 크기가 같다는 뉴턴의 운동 제3 법칙을 위배하는 것이다. 이처럼 특수 상대론의 관점에서 중력 법칙을 재공식화 하는 작업은 아인슈타인을 비롯한 몇몇 물리학자들이 진지하게 고민한 문제였고 쉽게 해결되지 않고 있었다.²⁵⁾

24) 알베르트 아인슈타인, 홍수원·구자현 옮김 (2003), 249-251쪽. 임경순 편저 (1997), 30-34쪽.

25) 19세기 말에서 20세기 초에 중력은 여러 물리학자가 논하던 보편적 주제였으며, 아인슈타인이 특수 상대론을 중력 현상에까지 확장하고자 한 것은 자연스러운

이러한 상황에서 아인슈타인에게 이론 전개의 돌파구를 열어준 것은 1907년에 그가 스위스 특허청 사무실에서 떠올린 ‘등가 원리(equivalence principle)’ 사고 실험이다.²⁶⁾ 일정한 중력장 아래에서 자유 낙하 중인 기준계 A가 있고, 이 중력장에 붙잡혀 지표면 위에 정지해 있는 기준계 B가 있다. 기준계 A를 국소계라고 가정할 경우, A 위에 있는 관측자 a는 (일시적으로) 아무런 힘도 받지 못하기 때문에 자신이 일종의 ‘관성계’ 위에 있다고 생각한다. 이에 반해 기준계 B에 있는 관측자 b는 a를 보며 a가 관성 운동을 하는 것이 아니라 중력을 받아 낙하하고 있다고 생각한다. 아인슈타인에 따르면 관측자 a와 b 모두 자신의 기준계가 자연법칙을 기술할 수 있는 합법적인 기준계라고 생각한다. 왜냐하면 관측자 a는 자신이 관성계에 있다고 생각하고, 관측자 b는 자신이 매우 안정적이기 때문에 물리 법칙 기술에 문제가 없는 ‘정적인(static)’ 장 아래에 있다고 생각하기 때문이다.²⁷⁾ 물론 a와 b의 상황이 완전히 대칭적인 것은 아니다. 관측자 a는 자유 낙하 중이므로 아무런 힘을 느끼지 않지만, 관측자 b는 중력장에 속박되어 자신에게 작용하는 힘을 느끼고 있기 때문이다.

이 사고 실험을 통해 아인슈타인은 중요한 착상을 얻었다. 자유 낙하하는 기준계 A의 입장에서 관측자 a에는 중력장이 존재하지 않지만, 기준계 B에서 관측자 a를 보면 a에는 중력장이 작용한다. 즉, 중력장의 존재는 어떤 기준계에서 보느냐에 따라 달라지는 상대적인 양이다. 이는 곧 관성장(inertial field)의 존재 역시 어떤 기준계에서 보느냐에 따라서 달라짐을 의미한다. 기준계 A의 관점에서 볼 때 관측자 a에는 관성장이 존재하지만(관성 운동 중이므로),

물리적 행보였다. 다양한 중력 이론 및 아인슈타인이 아브라함, 노르트스트룀과 경쟁하며 중력 이론을 개발했던 과정을 서술하고 있는 다음의 저술을 참고할 것. 크리스타 옴니켈·러셀 매코마크, 구자현 옮김 (1986/2014) 제4권, 224-245쪽.

26) 이 사고 실험에 관해서는 아인슈타인이 여러 번 설명하고 그 중요성을 강조한 바 있다. 대표적인 예를 들자면 다음과 같다. 홍성욱·이상욱 외 (2004), 202-203쪽. 이 책에서 저자 이관수·김재영은 아인슈타인이 1921년에 『네이처』에 기고하기 위해 썼지만 출판되지 않은 원고 초고를 인용하고 있다.

27) 지구 위의 일정한 중력장과 같은 정적인 장 아래에 있는 기준계 역시 물리 법칙을 기술하는 합법적인 기준계로 수용하는 것은, 직관적으로는 바람직해 보이지만 논리적으로는 필연적이지 않다. 하지만 지구 위에 거주하고 있는 인간이 지금까지 비교적 성공적인 물리학을 수립해 왔다는 사실은 지구와 같은 정적인 장 아래의 기준계를 합법적 기준계로 승인하게 만드는 중요한 경험적 근거이다.

기준계 B에서 보면 관측자 a에는 관성장이 존재하지 않는다. 이러한 생각은 아인슈타인에게 특수 상대론에서의 상황을 떠올리게 했다. 특수 상대론을 통해 전기장과 자기장 성분은 기준계의 운동에 따른 상대적 양이 되고 그 둘의 결합인 전자기장이 불변하는 양이 되었다. 마찬가지로 아인슈타인은 중력장 성분과 관성장 성분이 기준계의 운동에 따라 상대적이지만 이 둘을 결합한 관성중력장은 기준계와 무관하게 불변할 것이라고 사고했다.²⁸⁾

등가 원리 사고 실험을 통해 아인슈타인이 얻은 또 하나의 중요한 착상은 등가속도 운동을 통해 중력장을 모사할 수 있으리라는 생각이었다.²⁹⁾ 우주 속 다른 질량들로부터 아주 멀리 떨어져 있어 마치 관성 운동을 하고 있다고 여길 수 있는 작은 우주선을 생각한다. 이 우주선이 관성 운동을 멈추고 특정 방향으로 일정한 크기(g)의 가속 운동할 경우, 이 우주선 속 관측자는 우주선의 가속 방향과 반대 방향으로 작용하는 힘을 느낄 것이다. 하지만 관측자는 이 힘이 우주선의 가속 운동에 의한 것인지(관성력), 아니면 갑자기 우주선 근처에 커다란 질량체가 다가와 이로부터 발생한 중력장에 의한 것인지 구분할 수 없다. 즉, 국소적 영역에서는 기준계의 일정한 가속 효과를 중력장의 효과와 구분할 수 없다.

이상과 같이 1907년 ‘등가 원리 사고 실험’에서 중요한 착상을 얻은 아인슈타인이 일반 상대성 이론으로 나가도록 결정적인 계기를 제공해 준 것은 그가 1912년에 떠올린 ‘회전 원판 사고 실험’이었다.³⁰⁾ 이 사고 실험의 중요성은 비교적 잘 알려져 있으나,³¹⁾ 이 실험이 우리가 지금까지 살펴본

28) 일반 상대성의 역사를 상세히 연구한 물리학사가 미셸 얀센은 아인슈타인이 등가 원리 사고 실험을 통해서 관성장과 중력장을 관성중력장으로 통합할 수 있을 것이라 착상하게 된 과정을 자세히 보였다. 이러한 연구에 대한 비교적 평이한 설명으로 다음을 참고할 것. Janssen, Michel. (2014), "No Success Like Failure... : Einstein's Quest for General Relativity, 1907-1920", pp. 167-227.

29) 이러한 착상에 대해서 아인슈타인 자신이 여러 번 상세하게 설명한 바 있다. 이에 관한 대표적인 예를 들면 다음과 같다. 알베르트 아인슈타인, 장현영 옮김 (1916/1960/2012), 72-76쪽 (“상대성 이론의 일반적 가정을 위한 논의로서 관성 질량과 중력 질량의 등가성”).

30) 이 사고 실험에 관해서는 아인슈타인이 여러 번 설명하고 그 중요성을 강조한 바 있다. 대표적인 예를 들자면 다음과 같다. 알베르트 아인슈타인, 장현영 옮김 (1916/1960/2012), 83-87쪽 (“회전하는 좌표계에서 측정자와 시계의 행동”). 알베르트 아인슈타인, 홍수원 · 구자현 옮김 (2003), 284쪽.

31) 얀센(Janssen) 역시 회전 원판 사고 실험이 아인슈타인에게 중요한 발견법적 안내를

시간과 공간을 물리적으로 소유하는 맥락에서 얼마나 중요했는지에 대한 설명은 찾아보기 어렵다.³²⁾ 간단히 말해, 특수 상대론이 상대적으로 등속 운동하는 기준계인 관성계 및 이들 사이에서 볼 수 있는 시계와 막대의 행태에 관한 것이었다면, 일반 상대론은 기준계의 범위를 확대하여 상대적으로 가속 운동하는 기준계에서 볼 수 있는 시계와 막대의 행태를 기술하는 이론이다. 이러한 일반적인 이론이 ‘중력 이론’이 될 수 있었던 것은 앞서 살펴본 ‘등가 원리’라는 경험적 원리가 존재했기 때문이다.

이제 이러한 관점에서 회전 원판 사고 실험을 자세하게 검토해 보자.³³⁾ 아인슈타인은 앞서 살펴본 ‘등가 원리 사고 실험’에 따라 일정한 가속 운동과 일정한 중력장의 효과가 같다고 가정했다. 이제 그는 지구의 지름과 같이 커다란 지름을 가진 거대한 원판을 생각한다. 원판은 중심을 기준으로 일정한 각속도로 원운동 한다. 원판의 외부에 있어 원판의 회전에 영향을 받지 않는 기준계 A의 관측자 a를 생각한다. 그리고 원판 가장자리에 있어 원판의 빠른 회전에 영향을 받는 기준계 B의 관측자 b를 생각한다. 그런데 관측자 b와 비교하면 원판의 크기가 매우 크므로, 관측자 b는 자신이 일정한 속도로 회전하는 원판 가장자리에 있음을 인지하지 못한다. 이는 마치 우리가 자전 및 공전하는 지구 위에 있으면서 실제로 미소 시공간 영역에서는 지구의 회전을 인지하지 못하는 것과 유사하다. 이를 다음과 같은 방식으로 표현할 수 있다. 물리학 속 관측자는 시공간 속 국소적

제공했음을 강조하고 있다. Janssen, Michel. (2014)의 2절에서의 논의 참조.

32) 프리드먼은 이 사고 실험의 철학적 의의에 관해 자신의 저서 『이성의 역학』에서 비교적 자세한 설명을 하고 있다. 마이클 프리드먼, 박우석·이정민 옮김 (2001/2012), 163-167쪽. 문제는 프리드먼이 최종적으로 채용된 아인슈타인의 형식 이론에 의해 결과적으로 “일반 상대론의 최종 형식이 이전까지의 모든 논의를 부질없이 만들어 버린 측면이 있다”라고 평가한다는 것이다. 나는 이 지점에서 프리드먼과는 약간 다른 관점을 취한다. 여전히 일반 상대론에 있어 수학적 형식론보다는 아인슈타인의 경험주의적 사고가 더 중요했다고 보는 것이다.

33) 회전 원판 사고 실험에 대한 설명은 여러 문헌에서 자주 제시되고 있다. 하지만 의외로 이 회전 원판 사고 실험이 자연 시계, 강제 막대, 빛 신호와 같은 구체적인 측정 도구와 어떤 연관을 가지는지, 이 사고 실험이 이전까지 리만, 헬름홀츠, 푸앵카레가 전개했던 사고의 과정과 어떤 관계를 맺는지에 대한 상세한 설명을 찾아보기 어렵다. 내가 본 논문에서 제시하는 세부적인 설명의 의의는 ‘독창성’에 있는 것이 아니라 회전 원판 사고 실험의 의의를 구체적으로 해명하고 그것이 이전 사상가들의 사유와 갖는 관계를 밝히는 데 있다.

영역(광역적 영역과 대조된다)에 속해 있다.

이제 관측자 a와 b가 측정 기준 막대를 활용하여 원판의 원주율을 측정한다고 가정하자. 관측자 a는 측정 막대를 가지고 원판 외부에서 원판이 그리는 원의 지름과 둘레를 측정하므로, 원판의 원주율(지름과 둘레의 비율)은 평면에서의 π 값(3.141592...)을 나타낼 것이다. 하지만 관측자 a가 관측자 b를 보면 원판 가장자리의 빠른 운동 속도로 인해 b의 측정 막대 길이가 줄어들기 때문에(특수 상대론에 근거함), 관측자 b는 관측자 a보다 원판 둘레를 더 많이 횡수로 측정하게 된다. 중요한 것은 여기서 관측자 a와 관측자 b가 다음과 같은 사실에 동의한다는 데 있다. 관측자 a의 경우, 관측자 b가 원둘레의 한 점에서 출발하여 다시 그 점으로 돌아왔다는 것에 대해 관측자 b와 동의한다. 여기서 원둘레의 한 점에서 출발하여 그 점으로 되돌아오는 것은 일종의 ‘일치(coincidence)’임을 주목하자. 관측자 a, b 모두 이러한 ‘일치’에 동의한다면, 관측자 b의 원둘레 측정 결과에 대해서 관측자 a와 관측자 b는 동의하게 된다. 그러므로 관측자 b 역시 원둘레를 재었을 때 자신이 관측자 a보다 더 많은 횡수의 측정을 했다고 판단한다. 결과적으로 관측자 b가 측정하는 원판의 원주율이 평면에서의 π 값(관측자 a가 측정하는 값)보다 더 크다는 사실에 관측자 a와 관측자 b 모두 동의하는 것이다.

그렇다면 같은 원판의 원주율을 관측자 a는 π 로 측정하고 관측자 b는 π 보다 큰 값으로 측정한 이유에 대해 a와 b는 어떻게 답할까? 앞서 언급했듯 a의 입장에서는 b의 운동으로 인해 b의 측정 막대가 줄어들어 원주율 차이가 발생했다고 답할 것이다. 만약 b가 a의 이와 같은 답변을 수용한다면 문제는 일어나지 않는다. 하지만 앞서 제시했던 등가 원리 사고 실험에서 정적(static)인 중력장에 있던 관측자 b가 자신의 기준계 역시 물리 법칙을 기술하는 합법적인 기준계라고 주장했던 것처럼, 이번에도 b는 자신이 속한 기준계인 회전 원판 가장자리³⁴⁾ 역시 물리 법칙 기술에 있어 a가 속한 기준계와 동등하다고 주장한다. b는 자기가 가지고 있는 측정 막대와 자연 시계가 정상적으로 작동한다고 판단한다. 비록 가속으로 인해 일정한 크기의 힘을 받고 있기는 하지만, b는 이러한 힘이 기초 측정 도구의 물리적 작동 방식에 영향을 미치지 않는다고 가정한다. b가 볼 때 여전히 길이 단위 및

34) 각속도가 일정할 때, 회전 원판은 ‘정상 상태(stationary)’의 중력장과 같다.

시간 단위는 변하지 않는다. 오히려 변하는 것은 b 주변 시공간의 곡률이다. 더 정확히 말해, 주변 시공간 곡률의 변화는 b 에게 직접 인지되지 않고 강체 막대 및 자연 시계에 의한 측정 결과를 통해 b 에게 간접적으로 드러난다. 그러므로 이때 막대, 시계와 같은 측정 도구는 시공간 곡률 변화의 ‘탐지체(detector)’ 역할을 하는 것이다.³⁵⁾

나는 이상과 같은 회전 원판 사고 실험에서 주목할 만한 몇몇 사항들을 지적하겠다. 첫째, 여전히 이 사고 실험에서도 아인슈타인은 기초 측정 물체의 ‘단위 불변성’을 가정하고 있다. 그리고 이 가정은 특수 이론에서 보다 더 강한 논리적 비약을 포함한다. 왜냐하면 회전 원판의 경우 기초 측정 물체가 회전 원판의 가속 운동을 통해 명시적으로 ‘힘’을 받고 있음에도 불구하고, 사고 실험에서는 이 ‘힘’이 기초 측정 물체의 행태에 아무런 물리적 영향을 미치지 않음을 전제하고 있기 때문이다. 만약 회전 원판의 크기가 아주 작아지거나 회전의 속도가 아주 빨라져서 힘의 크기 또한 상당히 커질 경우, 여전히 기초 측정 물체의 행태가 유지된다고 보장할 수 있을까? 지구 혹은 태양 주변 중력장 정도의 크기에서는 기초 측정 물체가 그 계량적 행태를 유지한다는 이러한 가정이 성립한다고 볼 수 있다 하더라도, 이보다 중력장 세기가 훨씬 더 커지면 과연 어떻게 될 것인가? 그렇기에 이 사고 실험에서 기초 측정 물체의 행태에 대한 아인슈타인의 전제는 일종의 ‘사변적 추측(speculative conjecture)’이었으며, 그는 이러한 사변적 특성을 감수하며 혁신적 추론을 진행했다.³⁶⁾

둘째, 기초 측정 물체에 관한 이러한 가정은 정확하게 리만, 헬름홀츠의 가정과 같다.³⁷⁾ 여전히 회전 원판 사고 실험에서도 기초 측정 물체의 단위 불변성이 전제되고 있는 셈이다. 만약 이러한 가정이 없었다면 아인슈타인은

35) “강체와 시계의 변화는 속력에만 의존하고 가속에는 의존하지 않는다고 가정”함으로써(알베르트 아인슈타인, *고중속 움직임* (1922/2011), 128쪽 각주) 강체와 시계가 이와 같은 시공간 곡률의 탐지체가 될 수 있다. 이런 가정을 해야 특수 상대론적 시공간이 일반 상대론의 기초가 될 수 있을 뿐 아니라, 상대론의 수학을 일반화된 미분기하학과 연결할 수 있다.

36) 시계와 막대를 바라보는 아인슈타인의 관점이 시간의 흐름에 따라 어떤 면모를 보이는지는 Giovanelli, Marco. (2014)에서의 논의를 참조할 것.

37) 내 생각에 이는 아주 중요한 측면이며 앞으로의 과학철학 논의에서도 주목할 필요가 있다. 이는 경험적 특성을 가진 ‘기초 측정 물체의 단위 불변성’과 수학적 특성을 가진 ‘다양체 내에서의 단위 불변성’ 사이의 일치를 어떻게 해석할지의 문제이다.

새로운 중력 이론을 개발하는 과정에서 리만 이후 개발된 해석적 미분기하학을 활용할 수 없었을 것이다. 미분기하학에서도 길이 척도인 미소 길이 단위 불변성을 전제하고 있기 때문이다. 하지만 물리적 대상과의 정확한 대응을 고려하지 않는 추상적 수학 이론의 기초 전제를 물리학의 기초 개념에까지 확대하는 것은 분명 일종의 논리적 비약이다. 그리고 이러한 종류의 비약이 물리학 이론을 구성하는 과정에서 꼭 필요하긴 하다. 이런 비약을 하지 않으면 물리학적 직관을 수학적 형식 이론으로 번역할 수 없기 때문이다. 그러나 우리가 잊어서는 안 되는 점은 수학적 개념과 물리적 개념 사이의 이와 같은 대응이 필연적이지 않으며 일종의 논리적 비약이었다는 사실이다.

셋째, 회전 원판 사고 실험에서 아인슈타인은 푸앵카레의 사고 노선(규약주의)보다는 헬름홀츠의 사고 노선(경험주의)을 따랐지만, 이때도 푸앵카레가 제시한 ‘보편력’에 관한 고려가 진지하게 등장한다는 점이다. 관측자 b는 푸앵카레처럼 자신의 측정 막대에 일종의 ‘체계적 힘’(계량적 힘 혹은 보편력)이 작용하여 막대 길이가 줄어들었으므로 원주율 측정 결과가 달라졌다고 판단하고 여전히 원주율은 π 라고 주장할 수 있다. 하지만 아인슈타인은 이와 같은 추론을 거부했다. 왜냐하면 그렇게 되면 물리학 법칙 기술에서 관측자 a와 관측자 b는 서로 대등하지 않게 되기 때문이다. 관측자 a의 경우 ‘체계적 힘’이 작용하지 않지만, 관측자 b의 경우 이러한 힘이 작용하며 힘의 크기는 b의 상황(원판의 회전 속도)에 따라서 달라진다.³⁸⁾ 더 나아가, 적어도 국소적 영역에서 이 힘을 무시하더라도 다른 물리 법칙들을 기술하는 것에는 문제가 없는 것으로 보인다(경험적 사실). 따라서 상대성 원리를 일반화하고자 했던 아인슈타인은 푸앵카레의 ‘체계적 힘’을 도입하여 불필요하게 물리학을 복잡하게 만들기보다, 헬름홀츠의 관점을 수용하여 기준계 사이의 좀 더 일반적인 대칭성을 획득하고자 했다.

그렇기에 아인슈타인 자신이 일반 상대론을 개발하는 데 헬름홀츠의 기하학적 관점이 필수적이었다고 말하는 것에는 ‘합리적인 이유’³⁹⁾가 있다.

38) 아인슈타인이 이에 대해서 명시적으로 언급하고 있지는 않으며, 이러한 해석은 내가 아인슈타인의 사고를 재구성한 결과로 제시하는 것이다.

39) 아인슈타인은 헬름홀츠를 단지 명목상으로만 언급한다는 지오바넬리의 해석이 억지스럽고 부자연스럽게 여겨지는 것은 바로 이와 같은 이유 때문이다. 이와 관련하여 특히 Giovanelli, Marco. (2017)에서의 논의를 참조.

구체적으로 아인슈타인은 다음과 같이 말한다.

...나는 방금 제시한 기하학의 관점에 특별한 의의를 부여한다. 왜냐하면 그것이 없었다면 나는 상대성 이론을 구성할 수 없었을 것이기 때문이다. 그것이 없었다면 다음과 같은 고찰은 불가능했을 것이다. 어떤 관성계에 대하여 상대적으로 회전하고 있는 기준계에서 강체의 배열 법칙은 로렌츠 수축 때문에 유클리드 기하학의 규칙과 일치하지 않는다. 그리하여 우리가 동등한 자격을 갖는 계로서 비관성계를 받아들인다면 우리는 유클리드 기하학을 포기해야 한다. 위의 해석이 토대가 되지 않았다면 일반적인 공변 방정식으로의 전이 과정에서 결정적인 진보는 틀림없이 이룩될 수 없었을 것이다.⁴⁰⁾

여기서 우리는 헬름홀츠만큼이나 푸앵카레가 아인슈타인에게 중요한 통찰을 제공했다는 점을 잊어서는 안 된다. 왜냐하면 푸앵카레가 제시했던 개념인 ‘보편력’의 특성을 바로 중력, 더 정확하게는 가속 운동을 통해 모사된 중력이 보여주고 있기 때문이다. 이 상황에서 우리가 ‘보편력’을 제거하는 이유는 이 힘이 기준계 A와 기준계 B를 비대칭적으로 만들기 때문이다. 바로 이와 같은 ‘상대성’의 추구가 푸앵카레와 달리 우리가 보편력을 포기하도록 만들었다고 볼 수 있다.

그러면 회전 원판 사고 실험에서의 관측자 a와 관측자 b는 등가 원리 사고 실험에 등장하는 두 관측자와 어떻게 대응하는가? 등가 원리 사고 실험에서 자유 낙하 중인 관측자 a는 자유 낙하하는 동안 관성계와 같으므로 회전 원판 사고 실험에서의 관측자 a(원판 외부)와 대응한다.⁴¹⁾ 등가 원리 사고 실험에서 중력장 아래에 붙잡혀 있는 관측자 b는 일정한 힘을 받으며 회전 원판 가장자리에 있는 관측자 b와 대응한다. 이를 토대로 우리는 다음의 결론을 도출할 수 있다. 자유 낙하 중인 기준계 A에서 볼 때 기준계

40) 아인슈타인, 홍수원·구자현 옮김 (2003), “기하학과 경험” 중 284쪽.

41) 일반 상대성 이론에 이르면 중력장 아래에서 자유 낙하하는 계들만이 ‘지역적 관성계’로서의 지위를 얻게 되며, 물리학의 법칙은 이러한 ‘지역적 관성계’를 기준으로 기술된다. 이와 관련하여 아인슈타인은 다음과 같이 말한다. “기준 좌표계 K에 대해 특수 상대성 이론의 유효성을 가정할 수 있기 때문에 이 고찰에서 회전하지 않는 기준 관성 좌표계를 기준 좌표계로 사용해야 한다(중력장의 영향을 받는 기준 좌표계 K’에 대해).” 알베르트 아인슈타인, 장현영 옮김 (1916/2012), 86쪽의 주석 21 참조.

B의 공간 곡률은 편평하지 않다. 그런데 가속 운동하는 기준계 B는 중력장 아래에 있다고 할 수 있으므로 중력장이 있는 공간의 곡률은 편평하지 않을 것이고, 중력장이 있는 공간에서 측정 막대의 길이는 자유 낙하 중인 국소 기준계 A의 측정 막대 길이와 비교할 때 이보다 짧을 것이다. 비슷한 논의가 시계의 간격에도 적용된다. 중력장이 있는 곳의 시계는 관성계의 시계에 비해 더 느리게 갈 것이다. 기준계 A에서 볼 때 기준계 B에서의 길이 및 시간 측정 도구의 행태는 기준계 A에서와는 달라진다. 기준계 A가 볼 때 기준계 B 속 측정 도구 행태 변화의 진정한 이유는 중력장 (혹은 가속 운동)이지만, 이러한 변화를 실질적으로 드러내는 것은 기준계 B의 길이 및 시간 측정 결과이다.

이상과 같은 추론 결과로 다음과 같은 ‘정성적인’ 결론을 얻을 수 있다.⁴²⁾ 관성계에 상대적인 중력장의 영향은 시공간 곡률로 대체할 수 있고, 이러한 대체가 이루어지면 관성 운동하는 기준계와 중력장의 영향 아래 가속 운동하는 기준계는 물리 법칙의 기술에서 서로 동등하다. 이제 문제는 이러한 정성적인 수준의 개념을 실질적인 중력 이론으로 구현하는 것이었다. 아인슈타인은 민코프스키(Minkowski)의 4차원 시공간 형식화에서 나아가 일반적인 미분기하학의 수학 도구를 활용하여, 질량 및 에너지 분포에 따라 변화하는 곡률이 중력의 효과를 표현하며 이 효과를 측정 도구(강체 막대 및 자연 시계)를 이용하여 측정할 수 있게 만드는 중력의 장방정식을 개발해야 했다. ‘등가 원리’, ‘일반 공변성’, ‘고전 중력 이론의 근사적 재현’, ‘에너지 보존 및 운동량 보존 법칙 준수’라는 네 개의 제약 조건을 바탕으로 아인슈타인은 물리적이고 직관적인 통찰을 수학적 물리 이론으로 만들기 위해 악전고투했다.⁴³⁾

이 과정에서 아인슈타인은 광범위한 공변성을 만족시키는 장방정식을 채택할 것인지의 문제를 두고 고민에 빠졌는데, 이때 그를 막아 세운 것이

42) 아인슈타인의 사고 실험에 따른 정성적인 결론을 설명하는 문헌들은 많다. 아인슈타인 본인의 설명으로는 다음을 참고하라. 알베르트 아인슈타인, 장현영 옮김 (1916/2012), 79-83쪽 (“22. 일반 상대성 원리로부터의 몇 가지 추론”) 참조.

43) 아인슈타인이 중력장 방정식을 발견하는 과정을 실제 아인슈타인이 남긴 기록을 토대로 상세하게 재구성한 저서로 Renn, Juergen & Janssen, Michel. (2022)를 참조. 이 책에서 렌과 안센은 노튼(Norton)의 주장과 달리, 아인슈타인이 장방정식을 개발하는 결정적인 단계에서는 ‘수학적 전략’보다는 ‘물리적 전략’이 주된 영향력을 행사했다고 주장하고 있다.

이른바 ‘구멍 논증(hole argument)’이었다.⁴⁴⁾ 장방정식이 광범위한 공변성을 만족시킬 경우, 물질과 에너지가 분포하지 않는 시공간 상의 작은 영역 속 계량을 기술하는 복수의 방식이 존재한다. 즉, 해당 영역의 시공간 계량을 기술하는 계량 함수 $g_{\mu\nu}$ 가 있다고 할 때, 이 함수의 임의적 미분동형사상 $g'_{\mu\nu}$ 역시 그 영역을 기술하는 계량 함수가 될 수 있다. 그러므로 일반적으로 공변하는 중력장 방정식은 이 영역을 기술하는 복수의 계량 함수를 허용한다 (미결정성). 그런데 계량 함수는 문제가 되는 시공간의 영역에서 기초적인 측정 도구들이 보이는 행태를 기술하는 것으로 생각되므로, 복수의 계량 함수가 가능하다는 것은 이러한 측정 도구들의 행태가 임의로 달라짐을 의미했다. 그렇기에 아인슈타인은 이와 같은 이론 미결정성을 수용하기 어렵다고 보고, 광범위한 공변성을 만족하는 장방정식 대신 ‘좌표 제약(coordinate restriction)’을 부여하여 이러한 미결정성을 불러일으키지 않는 장방정식을 찾고자 했다.⁴⁵⁾

이러한 상황을 타개하는 데 결정적인 역할을 한 것은 물리학에서 좌표가 갖는 의의와 역할에 대한 아인슈타인의 다음과 같은 생각이었다. 좌표와 물리적 현상 간에는 직접적 대응이 이루어지지 않는다. 좌표는 물리적 현상에 붙이는 일종의 ‘이름표’이다. 같은 물리적 현상 P에 대해서 이름표 A를 붙일 수 있지만, 다른 이름표 B를 붙일 수도 있다. ‘구멍 논증’에서 문제가 되는 점은 작은 시공간 영역에 여러 종류의 이름표를 붙일 수 있다는 것이지만, 이름표가 곧 실질적인 물리적 내용을 의미하는 것은 아니다. 아인슈타인은 이때 실질적인 물리적 내용이 ‘점-일치(point-coincidence)’라고 보았다. 미분동형사상에 의해 시공간 상의 작은 영역을 기술하는 복수의

44) 구멍 논증에 관해서는 상대론 역사 연구자들에 의해서 많은 연구가 이루어졌다. 그리고 이에 대한 나의 서술은 독창적인 것이 아니며 오직 본문의 후속 논의를 위한 예비적인 성격만을 갖는다. 구멍 논증에 대한 개괄적인 설명으로는 Maudlin, Tim. (2012)의 제6장을 참조. 또한 구멍 논증에 대한 논의를 통해 제기된 철학적 문제들에 대한 유용한 개괄로 천현득 (2010), 「시공간의 본성에 관하여 : 구멍 논변을 중심으로」, 『과학철학』 제13권 제2호 (한국과학철학회) 참조.

45) 존 노튼 등의 일반 상대성 역사 연구에 의해 밝혀진 바에 따르면, ‘구멍 논증’은 아인슈타인이 일반 상대성 이론의 전개 과정에서 스스로 제기한 철학적 논증이었다. 이론 미결정성이 일종의 문제라고 판단하기 위해서는 이와 관련된 특정한 철학적 관점이 전제되어야 한다. 양경은의 논문은 아인슈타인이 구멍 논증을 연구할 때 물리학적 사고뿐만 아니라 철학적 사고를 병행했음을 설득력 있게 보여주고 있다. 양경은 (2017), 「공간의 본성에 대한 라이프니츠-클라크 논쟁과 홀 논변」, 『철학연구』 제144집 (대한철학회) 참조.

계량 함수가 가능하더라도, 이러한 사상이 기초 측정 도구들을 통해 ‘관측이 가능한(observable) 점-일치들의 총체’를 변화시키지는 않는다. 만약 관측이 가능한 점-일치들의 총체가 불변한다면, 관측이 가능하지 않은 특정 시공간 영역을 기술하는 복수의 계량 함수들이 가능하다 하더라도 각각의 경우 이론의 실질적인 경험적 내용은 정확히 같으므로 문제가 되지 않는다.⁴⁶⁾

아인슈타인은 이와 같은 ‘점-일치 논증’을 무기로 삼아 광범위한 공변성을 갖는 중력장 방정식을 채택했고,⁴⁷⁾ 이 방정식을 토대로 뉴턴 물리학의 관점에서는 계산하지 못했던 수성의 근일점 운동을 성공적으로 계산해낼 수 있었다. 또한 추가로 그는 자신의 새로운 장방정식을 입증할 수 있는 두 가지의 새로운 예측, 즉 태양 근처에서의 별빛의 겉보기 위치 변화와 태양 빛의 적색 편이 현상을 예측했다. 이중 첫 번째 예측은 1919년 영국의 천문학자이자 물리학자 에딩턴(Eddington)의 일식 관측 결과를 통해 입증되었고, 이를 통해 그의 중력장 방정식은 예측적으로 성공임이 확인되었다.

‘구멍 논증’과 ‘점-일치 논증’이 시간과 공간에 대한 우리의 논의에서 중요한 것은 다음과 같은 이유에서다. 스스로 ‘구멍 논증’을 제시하고 이를 ‘점-일치 논증’으로 극복하는 과정에서 아인슈타인은 일반 상대론에 이르러 특수 상대론에서와 달리 물리학에서 사용하는 좌표가 직접적 측정의 의미를 갖지 않는다고 생각하게 되었다.⁴⁸⁾ 우리가 기초 측정 도구의 단위 불변성을 기본 전제로서 받아들인다고 하더라도, 점-일치들의 총체가 보존되는 한에서

46) 이러한 아인슈타인의 입장은 그가 1916년에 제출한 다음의 논문에서도 잘 드러난다. Einstein, Albert. (1916/1952), "The Foundation of the General Theory of Relativity", in *The Principle of Relativity* (Dover), pp. 109-164. 특히 제3절 "시공간 연속체"에서 아인슈타인은 우리의 모든 시공간적 검증은 시공간에서의 일치(coincidence)를 결정하는 것과 같으며, 기준계(좌표계)의 도입은 그와 같은 일치들의 총체를 기술할 수 있게 하는 역할만을 담당할 뿐이라고 주장한다.

47) 물론 아인슈타인의 실제 사고 과정은 더 복잡했다. 특히 크리스토펠(Christoffel) 기호의 사용을 선택한 점이 결정적인 역할을 했다. 이에 관해서는 앞서 언급한 Renn, Juergen & Janssen, Michel. (2022)의 5장 논의를 참조.

48) 아인슈타인의 여러 기고문에서 이와 관련된 언급을 찾을 수 있다. 예를 들어 그는 다음과 같이 말한다. "...일반 상대성 이론을 구성하는 데 왜 7년이 더 필요했는가? 그 주된 이유는, 좌표는 직접적인 측량의 의미를 가져야만 한다는 생각에서 스스로 벗어나는 일이 그리 쉽지 않다는 사실에 있다... 좌표의 비선형 변환을 허용하게 되면 좌표의 직접적인 측정의 의미를 잃어버리게 된다." 『100년 만에 다시 찾는 아인슈타인』 (사이언스북스, 1997)의 "나의 비망록" 중에서.

이 전제를 만족하는 여러 종류의 좌표계 중 하나를 선택하는 것은 자유롭고 임의적이다. 이를 달리 말하면 ‘구멍 논증’의 상황에서 가능한 여러 좌표계 중 하나의 좌표계를 다른 좌표계로 변환하는 것은 이론의 실질적 내용에 영향을 미치지 않는 ‘수동적’ 변환이다. 이때 좌표계는 물리학 속에 포함되어 있지만 이론의 실질적인 경험적 내용에는 영향을 미치지 않는 일종의 ‘수학적 여분 구조’가 된다.

아인슈타인이 물리학의 좌표가 직접적인 측정의 의미를 갖지 않는다고 생각하게 된 다른 이유도 있다. 일반 상대론에서도 여전히 물리학 기술의 기준계는 국소적 관성계이며, 좌표 기술은 이러한 국소적 관성계를 기준으로 삼는다. 예를 들어 정적인 중력장에 붙잡혀 고정된 기준계 A의 관측자 a는, 자신의 길이 측정 도구와 시간 측정 도구의 단위가 일정하다고 관측한다. 그러나 중력장 아래에 있는 관측자 a 역시 국소적 관성계를 기준으로 물리학을 서술하므로, 그는 좌표로 표현되는 기준계 A의 단위 길이가 국소적 관성계와 비교할 때 더 짧고, 좌표로 표현되는 기준계 A의 단위 시간은 국소적 관성계와 비교할 때 더 길다고 서술한다. 이는 관측자 a의 관점에서 좌표로 표현된 시간과 공간의 간격이 시계와 막대를 이용한 측정 결과와 직접적으로 대응하지 않음을 의미한다. 이는 곧 기준계 A의 시공간 계량이 국소적 관성계의 시공간 계량과 다르다는 말과 같지만, 여전히 시공간 계량 평가의 기준이 국소적 관성계임은 변하지 않는다. 아인슈타인은 이를 국소적 관성계가 아닌 중력장에 속박된 기준계에서 좌표가 직접적 측정의 의미를 잃게 된다고 보았다.

이상과 같이 살펴본 것처럼, 아인슈타인은 일반 상대론을 통해 시간과 공간에 대한 물리적 사유를 관성계에서 가속 운동하는 기준계에까지 확장하는데 성공했다. 원칙상 이 작업은 회전 원판 사고 실험만으로도 가능했다. 이 사고 실험은 관성계를 기준으로 가속 기준계의 가속도 크기에 따라 시공간 곡률이 달라짐을 알려주기 때문이다. 가속 운동의 효과와 중력의 효과가 동등하다는 경험적 사실(등가 원리)은 이러한 일반화가 새로운 중력 이론이 될 가능성을 열었고, 이는 특히 중력 또한 전자기력과 마찬가지로 장이론적 표현이 가능함을 의미했다. 원격 작용으로서의 중력 개념을 장이론을 통해 연속적으로 표현할 수 있음을 깨달았을 때 아인슈타인은 큰 행복을 느꼈을 것이다. 그러나 시간과 공간의 운동학을 일반화하여 중력 이론을 도출한

것의 중요성은 이러한 중력과 결부를 통해 새 이론의 경험적 입증 가능했다는 것이었다. 만약 이 이론이 중력과 결부되지 않았다면 중력으로부터 비롯되는 현상인 수성의 근일점 운동, 태양 빛의 적색 편이 등에 대해 입증이 가능한 정량적 계산을 하지 못했을 것이다.

1915년 11월에 아인슈타인이 중력장 방정식을 발표함으로써 시간과 공간을 물리적으로 기술하는 작업은 일단락되었다. 그러나 여전히 이 이론이 시간과 공간에 대해 갖는 함의가 무엇인지는 문제가 되었다. 이는 뉴턴의 고전 역학이 제시된 후 고전 역학 속 시간과 공간의 본성이 여러 학자에게 중요한 철학적 문제를 제기한 것과 유사했다.

제4절. 상대론이 제기한 시간과 공간의 철학적 문제들

시간과 공간에 대해 뉴턴의 고전 역학이 제기한 철학적 문제들은 아인슈타인의 상대성 이론이 제기한 철학적 문제들과는 달랐다. 하지만 아인슈타인과 뉴턴 사이에 비슷한 점은 있다. 두 사람 모두 시간과 공간의 본성에 대한 자신의 철학적 관점을 명시적으로 표명했고, 이러한 이들의 철학적 관점이 당대의 학자들 사이에 많은 논란을 불러일으켰다. 이 절에서는 상대성 이론이 발표된 후 이 이론 속 시간과 공간의 본성에 대해 제기된 중요한 철학적 문제들을 자세히 살펴보도록 하겠다.

1915년 11월에 최종적인 중력장 방정식을 발표한 이후, 아인슈타인은 1916년 3월에 제출한 논문 “일반 상대성 이론의 기초”에서 자신의 이론에 논리적 타당성을 부여하고 체계적인 방식으로 이론을 전개하고자 했다.⁴⁹⁾ 특히 우리가 주목해야 하는 것은 논문의 첫 번째 부분인 “상대성 공준에 대한 근본적 고찰”이다. 아인슈타인은 상대성 원리를 가속 운동하는 기준계에까지 확장할 필요성에 대해 논하며, 이를 위해 ‘등가 원리 사고 실험’과 유사한 상황을 제시했다. 상대성 원리의 일반화를 표현하는 수학적 조건인 일반 공변성을 제시한 후, 아인슈타인은 운동학의 법칙들이 더는 측정 막대와 시계의 관계를 기술하는 것으로 해석되지 않고 시간과 공간 좌표가 직접적인

49) Einstein, Albert. (1916/1952), "The Foundation of the General Theory of Relativity", in *The Principle of Relativity* (Dover), pp. 109-164.

물리적 측정의 의미를 갖지 못하게 되었음을 주장했다. 더 나아가 그는 일반 공변성의 요구가 “시간과 공간에 남아 있던 물리적 객관성의 마지막 잔여물을 없앤다”⁵⁰⁾고 주장했다. 그에 따르면 우리의 모든 시공간적 검증은 시공간의 ‘일치(coincidence)’를 결정하는 것이며, 좌표계의 도입은 그러한 일치들의 총체를 기술하는 도구 역할을 한다.

앞 절의 논의에서 살펴본 것처럼, 아인슈타인은 기초 측정 물체의 행태와 관련한 회전 원판 사고 실험을 등가 원리 사고 실험과 결합하여 일반 상대론 속 시간과 공간에 관한 ‘정성적인’ 결론에 도달했다. 이후 그는 이러한 정성적인 결론을 미분기하학을 이용한 실질적인 물리학 이론으로 구현해 나가는 과정에서 ‘구멍 논증’에 부딪혔고, 이를 ‘점-일치 논증’으로 극복하는 과정을 통해 좌표계가 갖는 임의적 성격 및 일반 상대론에 이르러 물리적 좌표가 직접적인 측정의 의미를 상실함을 발견했다.

중요한 것은 아인슈타인이 자신의 이론적 결과를 바탕으로 철학적으로 민감할 수 있는 “시간과 공간의 물리적 객관성 상실”을 주장했다는 점이다. 이는 뉴턴이 절대적인 시간과 공간 개념을 주장한 것과 비슷한 정도의 과장을 일으켰다.⁵¹⁾ 우리가 살펴본 것처럼 아인슈타인은 일반 공변성 추구를 위해 몇몇 비약적인 가정을 했다. 그는 물리학 법칙을 기술하는 것에서 정적(static) 혹은 정상 상태(stationary)의 중력장 아래에 있는 국소 기준계가 관성계와 동등하다고 가정했고, 기초 측정 물체의 행태가 임의의 가속 운동에 영향을 받지 않는다고 가정했다. 더 나아가 그는 일반 공변성 추구 과정에서 좌표가 직접적인 측정의 의미를 잃게 되자 결과적으로 시간과 공간의 물리적 객관성이 상실되었다는 과감하면서도 논란의 여지가 많은 철학적 주장을 제시한 것이다.

그간 풀지 못했던 수성의 근일점 운동 문제를 해결하고, 정적(static) 중력장이라 할 수 있는 태양 근처에서의 겉보기 별 위치 변화 및 빛의

50) Einstein, Albert. (1916/1952), 제3절 “시공간 연속체” 중 117쪽을 참고.

51) 아인슈타인의 일반 상대론이 경험적으로 입증된 전후로, “시간과 공간의 물리적 객관성이 사라졌다”는 아인슈타인의 언급은 여러 학자의 논의 주제가 되었다. 1922년 프랑스 파리에서 아인슈타인이 베르그송과 시간의 실재성을 주제로 한 논쟁은 그 대표적 사례이다. 또한 솔리크, 카시러, 카르납, 라이헨바흐 등과 같이 상대성 이론의 철학적 의의를 논한 학자들 대부분이 이 주제에 대해 심각하게 논하고 있다.

적색 편이를 예측한 것은 아인슈타인 중력장 방정식의 성공을 뜻했다. 이는 뉴턴이 자신의 중력 이론으로 케플러의 세 가지 행성 법칙을 성공적으로 설명해낸 것과 유사했다. 뉴턴의 이론 속에서 수학적이고 절대적인 시간과 공간 개념 및 원격 작용으로서의 중력 개념이 철학적으로 문제가 되었듯, 아인슈타인의 일반 상대성 이론 속에서도 여러 개념이 여전히 철학적으로 논란이 되었다. 우리가 논리적 비약을 감수하면서도 일반 공변성을 추구해야 하는 이유는 무엇인가? 왜 중력장이 있는 경우에도 기초 측정 물체들은 그 행태를 그대로 유지하는가? 과연 일반 공변성 추구를 통해 물리적 시간 공간 좌표가 직접적인 측정의 의미를 잃는다고 해서 시간과 공간이 물리적 객관성을 잃는 것인가? 과연 아인슈타인이 말하는 것처럼 물리적 객관성을 갖는 것은 관측이 가능한 ‘점-일치(point-coincidence)’들의 총체에 지나지 않으며 좌표계는 오직 이름표의 역할만을 담당하는가?

비록 아인슈타인의 일반 상대론은 새로운 중력 이론으로서 이전까지 설명되지 않았던 중력적 현상을 잘 설명하고 몇몇 과감한 예측을 제시한 성공적인 이론이었지만, 이 이론 속에는 철학적으로 정당화 혹은 해명되지 않아 정당하게 의문을 제기할 수 있는 여러 요소가 포함되어 있었다. 그리고 이런 요소들에 대한 철학적인 검토는 상대성 이론이 제출된 ‘물리학 논문’ 속에서는 진행되기 어려웠다. 실질적으로 물리학 논문은 그와 같은 철학적 검토까지를 요구하지 않기 때문이다. 그렇기에 상대성 이론을 바탕으로 아인슈타인이 제기한 ‘시간과 공간의 물리적 객관성 상실 논제’는 물리학자 뿐만 아니라 철학자와 여러 분야의 학자들 사이에서 논란을 일으켰다.⁵²⁾ 아인슈타인이 시간과 공간의 본성에 대해 제시한 철학적 주장이 물리학 이론을 넘어서는 광범위한 의의를 담고 있었기 때문이다.

이와 더불어 아인슈타인 본인이 제기한 시간과 공간에 관한 주요 철학적 문제는 상대성 이론 속 기초 측정 물체의 인식적 지위였다. 아인슈타인

52) 이와 관련하여, 아인슈타인은 1922년에 프랑스 학자들의 초청으로 파리를 방문하여 철학자 베르그송(Bergson)과 시간의 본성에 대한 유명한 논쟁을 벌였다. 이 논쟁의 배경 및 경과와 그 귀결에 대한 자세한 과학사적 서술로 Canales, Jimena. (2015), *The Physicist and the Philosopher : Einstein, Bergson, and the Debate That Changed Our Understanding of Time* (Princeton University Press)를 참고할 것.

본인이 여러 번 언급했듯,⁵³⁾ 이 이론 속에서 전제되고 있는 강체 막대와 자연 시계의 이상적 행태는 이론의 전제로서 가정될 뿐 이론이 이를 설명 해주지 않고 있다. 그런데 강체 막대와 자연 시계 역시 복잡한 물리적 구조물이므로, 아인슈타인은 강체 막대와 자연 시계가 이론의 잠정적인 전제일 뿐이며 이에 대한 추가적인 이론적 설명이 제시될 필요가 있다고 생각했다. 좀 더 일반적인 장방정식이 기초 측정 물체의 행태마저도 설명 해줄 수 있으리라 희망할 수 있었지만, 당시 새롭게 개발되고 있던 양자 이론이 측정 물체의 이상적 행태에 대한 별도의 설명을 제공해줄 수 있을지도 모르는 상황이었다.

아인슈타인은 상당히 ‘철학적’인 물리학자였으며 자신의 철학적 관점을 설명하는 여러 문헌을 남겼다.⁵⁴⁾ 그는 상대성 이론의 발전 과정에 대해 대략 다음과 같이 서술했다. 첫째, 상대론은 패러데이(Faraday)와 맥스웰(Maxwell)에 의해서 정식화된 ‘장(field)’의 물리학(역학적 관점과 대비)을 일관되게 추진한 결과다.⁵⁵⁾ 물리학자들이 전자기적 현상에 대한 수학적 설명을 추구하면서 점차 역학적 세계관은 쇠퇴했고, 전미분 방정식이 아닌 편미분 방정식으로 기술되는 ‘장’의 물리학을 일관되게 추구한 결과 상대론이 등장했다. 둘째, 상대론은 물리학의 기초적인 개념들을 구체적이고 실험적인 측정 과정과 연결되도록 정의함으로써 등장할 수 있었다. 이에 대한 대표적인 예가 동시성 정의, 움직이는 막대의 길이 정의이다. 셋째, 상대성 이론은 ‘구성 이론’이 아닌 ‘원리 이론’으로서, 수학적으로 정식화될 수 있는 일반화된

53) 우리는 잘 알려진 아인슈타인의 논문 “기하학과 경험”, 아인슈타인의 노벨상 수상 강연(1923년)을 비롯한 여러 문헌에서 아인슈타인이 기초 측정 물체의 인식적 지위 문제를 논하고 있음을 알 수 있다. 이와 관련한 가장 최근의 논의로 Giovanelli. (2014)의 논의를 참고할 것.

54) 물리학과 철학에 관련한 아인슈타인의 견해는 주로 다음의 저서 속에서 찾을 수 있다. 알베르트 아인슈타인, 홍수원·구자현 옮김 (2003), 『나의 세계관』(중심) 중 “과학에 대한 공헌” 부분 및 임경순 편저 (1997)에 수록된 아인슈타인의 자서전적 기록인 “나의 비망록(Autobiographical Note)”.

55) 존 노튼(John Norton) 역시 아인슈타인은 특수 상대성 이론이 맥스웰의 전기동역학을 발전시킨 결과 등장하게 되었음을 설득력 있게 제시하고 있다. Norton, John. (2014), “Einstein’s Special Theory of Relativity and the Problems in the Electrodynamics of Moving Bodies That Led Him to It” in *Cambridge Companion to Einstein* (Cambridge University Press), pp. 72-102. 특히 그의 논문 3절 “로렌츠의 대응 상태 정리” 및 4절 “특수 상대성을 향한 아인슈타인의 길” 참조.

원리(광속 일정의 원리, 특수 상대성의 원리, 일반 공변성의 원리)를 발견하여 이를 새롭게 물리학의 가장 근본적인 원리로 삼음으로써 가능했다.⁵⁶⁾

하지만 아인슈타인은 일관된 장의 물리학을 추구한다고 해서 논리적으로 상대론이 도출된다고 보지는 않았다. 예를 들어 특수 상대성 원리와 광속 일정 원리를 이론의 근본적인 두 원리로 설정하는 것에는 논리적 필연성이 없기 때문이다.⁵⁷⁾ 아인슈타인은 물리학에서 본질적인 것과 그렇지 않은 것을 구분하는 자신의 물리적 직관에 대한 강한 믿음을 갖고 있었고, 그와 같은 직관은 아인슈타인이 전자기적 현상에 관한 기존의 비대칭적 설명이 갖는 문제를 탐지하게끔 이끌었다. 실제로 아인슈타인의 이론 전개에서 중심적 역할을 했던 상대성 원리 혹은 공변성 원리는 물리학 이론의 불필요한 비대칭성을 제거함으로써 물리학을 개념적으로 더 대칭적이고 단순한 것으로 만든다. 이처럼 아인슈타인의 물리적 직관은 물리학의 기초를 단순하게 만드는 데 초점이 맞춰져 있다. 대칭성이 전제되면 비대칭성을 설명하기 위한 조건 혹은 부연 설명을 추가할 필요가 없어지므로 물리학은 더 단순해진다.⁵⁸⁾

아인슈타인이 상대론을 통해 얻은 전기장과 자기장의 통합, 중력장과 관성장의 통합은 이러한 대칭성과 단순성의 추구로부터 얻은 결과였다. 하지만 아인슈타인은 특수 이론에서 일반 이론으로 이행하면서 물리학 이론이 직접적인 측정 결과와 맺는 관계에 대해 초기와 다른 관점을 갖게 되었다. 특수 상대론에서 로렌츠 변환식을 유도할 때 아인슈타인이 강조하는 것은 실험적 측정 결과를 일반화한 원리(광속 일정의 원리)와 실험적 측정 과정을 통해 구체적으로 지시될 수 있는 정의(동시성 정의)이다. 이렇듯 물리학의 원리와 정의가 경험 또는 실험과 명료하게 연결되는 것이 특수 상대론의 핵심이었다. 특수 상대론에서 시간과 공간 좌표의 값은 시계가 지시하는

56) 아인슈타인, 홍수원·구자현 옮김 (2003) 중 1919년에 아인슈타인이 쓴 “상대성 이론이란 무엇인가?”를 참조.

57) 아인슈타인, 홍수원·구자현 옮김 (2003) 중 1936년에 아인슈타인이 쓴 “물리학과 실재”를 참조. 이 글에서 아인슈타인은 다음과 같이 말한다. “개념이 형성되고 연결되는 방법과 우리가 그것을 감각 경험에 대응시키는 방식에 대하여 선형적으로 말할 수 있는 것은 아무것도 없다... 필요한 전부는 한 묶음의 규칙을 정하는 것이다... 이 규칙은 그 자체가 임의적인 게임의 규칙에 비유될 수 있다.”

58) 물리학의 기초를 단순하게 만드는 것의 중요성에 대한 아인슈타인의 언급은 여러 문헌에서 어렵지 않게 찾을 수 있다. 알베르트 아인슈타인, 홍수원·구자현 옮김 (2003), 328쪽, 332쪽, 344-345쪽, 380-381쪽.

눈금, 막대로 측정된 길이를 통해 직접적인 물리적 의미를 얻는다. 비록 로렌츠 변환을 통해서 아인슈타인이 물리학 이론의 대칭성을 제고시킨 것은 사실이나, 특수 상대론에서는 수학적 단순성에 버금갈 정도로 기초 개념에 관련된 경험적 명료성이 중요한 역할을 차지한다.⁵⁹⁾

하지만 일반 상대론에 이르면 상황은 달라진다. 일반 공변성이라는 수학적이고 형식적인 조건을 만족시키기 위한 추론을 진행한 결과, 물리학 방정식의 시공간 좌표들이 갖던 직접적인 물리적 의미 즉 측정 결과로서의 의미가 상실되었다. 시간과 공간 좌표가 직접적인 측정의 의미를 상실함으로써 중력장이 존재하는 특정 기준계에서 측정 도구를 통해 얻은 측정 결과가 물리적 좌표와 연결되기 위해서 이론(중력장 방정식)에 의한 해석을 거쳐야 하는 상황이 된 것이다. 이를 토대로 아인슈타인은 우리가 경험에 기반해서 직관적으로 갖는 시간과 공간의 표상을 물리적이고 객관적인 것이 아닌 심리적인 것으로 간주해야 한다는 결론에 다다랐다. 그렇기에 그는 일반 상대성 이론에 이르러 시간과 공간에 남아 있던 물리적 객관성의 마지막 잔여물이 사라졌다고 주장한 것이다.⁶⁰⁾

여러 정황을 볼 때 아인슈타인이 일반 상대론 추구 과정에서 수학적 형식 이론의 강력함을 거듭 확인했음은 분명하다. 등가 원리 사고 실험, 회전 원판 사고 실험에서의 물리적 착상을 수학적인 형식 이론으로 해석하여

59) 특수 상대성과 관련하여 아인슈타인이 경험주의자인 흄(Hume)과 마흐(Mach)를 언급하는 것도 바로 그와 같은 이유에서다. 임경순 편저 (1997), 136쪽 참조. 아인슈타인은 이렇게도 말한다. “사고의 근본적인 개념들을 플라톤의 올림포스 경기장에서 자연과학으로 끌어내릴 필요가 있었을까? 이것들의 세속적인 가계도를 왜 밝히려고 하는 것일까? 해답은 이것들에 붙여 있던 금기들로부터 이 개념들을 자유롭게 하기 위해서다. 이렇게 해야 개념이나 관념의 형성에 있어서 더 큰 자유를 이룩할 수 있다. 이것이 흄과 마흐가 갖는 불후의 영예다. 이 사람들은 이 비판적인 개념을 도입했다.” 알베르트 아인슈타인, 장현영 옮김 (1916/2012), 151-152쪽.

60) 물론 “시간과 공간에 남아 있던 물리적 객관성의 잔여물이 사라졌다”는 아인슈타인의 언급에 대해 이와는 다른 해석이 가능하다. 예를 들어 좌표를 이용해 수학적으로 표현되는 ‘4차원 시공간 점’을 아인슈타인이 말하는 시간과 공간이라고 볼 수 있으며, ‘시간과 공간의 물리적 객관성 상실’은 물리학에서의 좌표의 역할에 대한 아인슈타인의 인식 변화와 그 궤적을 같이 한다는 것이다. 이러한 관점에서 서술된 논문으로는 다음을 참고하라. Lusanna, Luca. (2018), Lusanna, Luca. and Pauri, Massimo. (2006b). 그러나 이러한 해석은 왜 아인슈타인이 시간과 공간의 물리적 객관성에 대해 제시한 주장이 그토록 많은 ‘철학적’ 논쟁을 낳았는지는 잘 설명하지 못한다는 단점을 갖는다.

공식화하는 과정이 지난했기 때문이다. 비록 이론 전개를 위한 결정적인 착상은 물리적 직관에서 비롯되었지만, 최종적으로 이론은 특정한 수학적 조건들을 만족하는 방식으로 형식화되었다. 특수 상대론이 전기장과 자기장의 상대성을 전자기장으로 통합한 장의 이론이었듯, 일반 상대론은 중력장과 관성장의 상대성을 중력관성장으로 통합한 장의 이론이었다. 만약 상대론이 장의 이론이라는 물리학 프로그램을 추구한 성공적 이론이었다면, 다음 단계는 전자기장과 중력관성장을 통합하는 것임을 예측할 수 있다.

이상과 같이 살펴본 아인슈타인의 철학적 관점이 여러 측면에서 우리에게 많은 시사점을 던져 주는 것은 사실이다. 그러나 아인슈타인의 철학적 관점은 실제로 이론을 개발하는 물리학자를 위한 ‘발견법적 동기 제공’의 역할을 했지만, 그의 주된 목적이 자신의 이론이 제기한 철학적 문제들을 정확하게 ‘해명’하는 것은 아니었다. 물리학자는 특정한 시점에서 자신의 이론 추구를 위해 특정한 철학적 사고방식을 활용할 수 있고 이것이 그의 이론 추구 및 정당화에 큰 도움이 되지만, 이후의 시점에서 이전과는 다른 방식으로 이론을 추구하면서 예전에 자신이 활용했던 철학적 사고방식과 상반되는 사고방식을 활용할 수 있다. 이러한 점에서 아인슈타인을 ‘인식론적 기회주의자(epistemological opportunist)⁶¹⁾라고 평가할 수 있다.

물리학자로서 아인슈타인이 보여준 독보적 창조성은 부정할 수 없다. 오히려 아인슈타인의 ‘인식론적 기회주의자’의 면모가 혁신적인 물리학 이론 창조에 중요하게 작용했다. 특수 상대론을 예로 들어보자. 첫째, 이 이론은 이전까지 근본 원리라고 여겨지지 않았던 두 법칙(광속 일정, 특수 상대성)을 물리학 전체를 아우르는 근본 원리로서 격상시켰다. 이는 물리학의 법칙을 바라보는 푸앵카레의 관점⁶²⁾으로부터 영향을 받았을 것으로 추측된다. 둘째, 아인슈타인은 이 이론 속 시간과 공간을 자연 시계와 강체 막대를 통해 철저히 경험주의적으로 정의하며, 이는 흄, 마흐의 영향을 반영한다. 셋째, 우리는 이 이론 속에 등장하는 측정 물체의 이상적 행태에 관한

61) Schilpp, Paul Arthur. (1951), p. 684에서 아인슈타인 자신이 이러한 ‘인식론적 기회주의자’라는 표현을 사용한 바 있다. 지오바넬리(Giovanelli) 역시 아인슈타인이 막대와 시계의 인식론적 의의에 대해 보인 이중적인 태도가 일종의 ‘기회주의적’ 태도였다고 평가하고 있다. Giovanelli, Marco. (2017)의 7.2. 참조.

62) 물리학 법칙을 규약으로 바라보는 푸앵카레의 관점에 관해서는 본 논문의 ‘보론’ 참조.

가정에서 리만과 헬름홀츠의 사고⁶³⁾를 읽을 수 있다. 전체적으로 아인슈타인은 이상과 같은 여러 이질적인 요소를 복합적으로 결합하면서 ‘직관적’인 추론을 통해 자신의 이론을 전개해 나갔다.

일반 상대론 또한 이와 유사하다. 첫째, 등가 원리 사고 실험, 회전 원판 사고 실험을 통해 상대성 원리를 일반화하고 새로운 중력 이론을 개발할 수 있겠다는 판단은 아인슈타인의 창의적이고 명료한 물리적 직관을 통해 가능했다. 특히 이 이론에서 등가 원리가 물리학 이론의 새로운 기초로 수립된 것은 주목할 만한 사건이었다. 둘째, 아인슈타인은 자연 시계와 강체 막대에 관한 물리적이고 직관적 사고를 통해 추론했지만, 이 추론에도 논리적 비약이 있었다. 셋째, ‘구멍 논증’ 및 ‘점-일치 논증’에서 볼 수 있듯 아인슈타인의 일반 상대론 개발 과정에서 철학적 사고는 핵심적인 역할을 담당했다. 그러나 아인슈타인은 철학적 사고에 머물러 있지 않은 않았다. 그는 자신의 추론이 옳은지 그른지는 결국 철학이 아니라 물리학이 판단할 것이라 보았다.⁶⁴⁾ 결과적으로 그는 자신의 장방정식으로 수성의 근일점 운동을 제대로 계산할 수 있었고, 이를 통해 자신의 추론이 옳음을 확신했다. 이처럼 일반 상대론은 물리적 직관, 철학적 사고, 논리적 비약, 경험적 타당성 여부 확인 등과 같은 여러 요소가 결합하여 만들어진 이론이다.

아인슈타인에게 철학이 물리학 이론 추구를 위한 ‘발견법적(heuristic)’ 역할을 담당했음을 볼 수 있는 또 하나의 사실은, 그가 일반 상대론을 개발하는 과정에서 자신이 행했던 실질적인 추론 과정을 ‘사후적으로 왜곡해서 해석’했다는 것이다. 일반 상대론 이후 아인슈타인은 통일장 이론을 추구했는데, 이 과정에서는 특수 및 일반 상대론에서와 달리 이론 탐구의 지침이 될 ‘경험적 원리’가 없었다. 따라서 아인슈타인은 철저하게 수학적 형식론의 관점에서 여러 장방정식의 다양한 가능성을 검토하는 방식으로 탐구해나갔고, 이러한 ‘수학 중심’의 이론 탐구는 자신의 과거 연구에 대한 해석에 사후적으로 반영되었다. 아인슈타인은 자서전적 글에서 일반 상대론이 전적으로 수학적 고려를 통해 개발될 수 있었다고 회고했지만,⁶⁵⁾ 아인슈타인이 남긴 문헌에

63) 측정 물체(빛 신호, 자연 시계, 강체 막대)의 단위 불변성에 관한 전체를 뜻한다.

64) Janssen, Michel. (2014) 참고.

65) 아인슈타인은 다음과 같이 말했다. “나는 중력 이론으로부터 다른 중요한 것을 배웠다. 즉 경험적 사실들을 아무리 많이 모아도 그렇게 복잡한 방정식들이 설정

관한 역사적 연구는 이와 반대였음을 보였다.⁶⁶⁾ 이는 아인슈타인이 모든 종류의 개념적 자원을 철저히 물리학 이론 탐구를 위해 사용했으며, 필요할 경우 그는 사실적 내용마저도 자신의 물리학 탐구를 위해 적절히 왜곡해서 기억했다는 점을 잘 보여준다.

결론적으로 아인슈타인은 새로운 이론 추구를 위해서 철학적 사고를 적절한 시점에 유용하게 활용했지만, 자신이 구축했고 이미 그 성공이 증명된 이론이 제기한 중요한 철학적 문제들에 대한 체계적인 검토와 해명을 제시하고자 하지는 않았다.⁶⁷⁾ 하지만 이러한 체계적인 검토와 해명은 아인슈타인 자신에게도 중요했다. 왜냐하면 상대론은 시간과 공간이라는 중요한 철학적 주제를 다루는 이론이며, 특히 시간과 공간의 본성 문제는 물리학 이론 차원을 넘어서 많은 분야의 여러 학자와 일반 사람들에게도 큰 영향을 미칠 것이기 때문이다. 이를 고려하면 우리는 왜 아인슈타인이 상대론에 대한 철학자들의 분석에 깊은 관심을 가졌는지, 왜 특정한 철학적 분석에 대해서는 조심스럽게 반대하면서도 다른 철학적 분석에 대해서는 적극적 동의를 표명했는지 이해할 수 있다. 그것은 그가 ‘인식론적 기회주의자’의 관점을 취하며 상대론을 개발했으면서도, 그 자신조차 이 이론의 철학적 의의 해명이 필요하다고 생각했기 때문이다.

되지는 않는다는 것이다... 중력장의 방정식과 같이 그렇게 난해한 방정식들은 오직 방정식들을 완전하게 혹은 거의 완전하게 결정하는, 논리적으로 단순한 수학적 조건을 발견함으로써만이 찾을 수 있다. 일단 충분히 강력한 형식적 조건들을 가지게 되면, 이론을 설정하는 데에는 사실에 관한 약간의 지식만이 필요할 뿐이다. 중력 방정식의 경우에 그것은, 연속적인 변환군에 관한 불변성과 함께, 방정식들을 거의 완벽하게 결정하는 공간 구조의 표현인 대칭 텐서와 4차원성이다.” 임경순 편저 (1997), 152-153쪽.

66) Janssen, Michel & Juergen Renn. (2015) 참고.

67) 스텐퍼드 철학 백과사전의 “아인슈타인의 과학철학” 항목에서 하워드와 지오바넬리는 아인슈타인이 스스로를 ‘인식론적 기회주의자’라고 언급했음에도 불구하고 그가 논리경험주의보다는 더 유연하고 합리적인 철학적 관점을 가졌다고 평가하고 있다. 그러나 내 생각에 과학사적 연구는 아인슈타인이 이론적 탐구를 위해 자신의 구미에 맞게 철학적 논증을 사용하고 자신의 과거 업적마저도 왜곡해서 해석했음을 점차 더 확실하게 보여주고 있다. 즉, 아인슈타인이 자신을 ‘인식론적 기회주의자’라고 부른 것은 진정 자신에 대한 올바른 평가였다.

제5절. 결론

물리적 공간(기하학)의 본성을 구체적인 측정 기준 물체의 물리적 행태에 의해 파악해야 한다는 것은 리만의 독창적인 개념이었으며, 이 개념은 물리적 기하학의 문제로 정식화되어 헬름홀츠와 푸앵카레에 의해 발전되었다. 이러한 기하학 철학의 논의와는 별도로 미분기하학의 수학 이론이 크리스토펠, 리치에 의해 발전되었다. 특수 상대성 이론을 4차원 시공간 개념으로 형식화한 민코프스키의 관점으로 인해 미분기하학을 물리학과 결합할 수 있었던 것은 사실이다. 그러나 상대성 이론의 핵심은 이전까지 수학적이고 추상적으로만 다루었던 시간과 공간의 개념을 측정 막대, 자연 시계 같은 구체적인 물리적 사물에 결부시켜 시간과 공간을 다루는 실질적인 물리학 이론을 구현한 데 있다. 즉, 상대성 이론의 핵심은 시간과 공간을 표상했던 기하학의 ‘물리적 구현’이다.

물리학은 시간과 공간을 기하학적으로 표상하며, 이러한 기하학적 표상을 구체적 측정 물체로 구현한 실질적인 최초의 물리학 이론이 상대성 이론이다. 이번 장에서 나는 이러한 관점 아래에서 특수 및 일반 상대론 속에서 찾을 수 있는 시간과 공간의 물리적 측면들을 살펴보았다. 리만, 헬름홀츠, 푸앵카레로 이어진 물리적 사유의 전통은 아인슈타인이 특수 및 일반 상대론을 전개해 나가는 과정에서 핵심적인 역할을 했다. 리만, 크리스토펠, 리치를 통해 발전한 해석적인 전통은 물리적 사유의 전통 아래에서 진행된 직관적인 추론을 정식 물리학 이론으로 구현하기 위한 형식적 도구를 제공해주었다. 그러나 상대론을 전적으로 ‘해석적 전통’의 산물이라 보면 이 이론의 여러 측면을 정확하게 이해할 수 없으며, 역사 속에 등장하는 주요 인물들이 남긴 저술의 해석에 관한 여러 어려움⁶⁸⁾을 초래하게 된다.

아인슈타인이 매우 ‘철학적’인 물리학자였던 것은 분명하다. 그러나 그가 성공적인 물리학자였다고 해서 체계적인 철학적 입장을 제시한 것은 아니었다. 아인슈타인은 철저히 물리학적 목적을 위해 철학적인 개념 자원들을

68) 대표적인 예로 아인슈타인이 헬름홀츠적 사고의 성격이 분명하게 드러나는 회전 원판 사고 실험을 언급하면서 “위의 해석이 토대가 되지 않았다면 일반적인 공변 방정식으로의 전이 과정에서 결정적인 진보는 틀림없이 이룩될 수 없었을 것이다” (알베르트 아인슈타인 지음, 홍수원·구자현 옮김 (2003), 284쪽)라고 말하는 것을 상식적인 수준에서 해석하기 어렵게 된다.

활용한 인물이었으며, 그런 의미에서 그는 그 자신의 표현처럼 ‘인식론적 기회주의자’였다. 이것은 물리학자로서 칭찬할 만한 덕목이었지만, 상대론의 의미 특히 이 이론이 시간과 공간에 대해 함축하는 바를 체계적으로 해명하는 일은 물리학과는 별개의 문제였다. 특히 시간과 공간의 객관성 문제, 측정 기준 물체의 인식적 지위 문제는 철학적으로 중요했고 이에 관한 여러 철학적 논쟁을 낳았다.

이제 상대론적 시간과 공간의 의미 해명은 물리학이 아닌 철학의 영역으로 넘어간다. 그리고 아인슈타인 본인이 이러한 철학적 담론이 진행되는 과정에서 중요한 역할을 담당했다. 그는 초기에 쉐리크, 라이헨바흐와 같은 논리경험주의 시공간 철학을 적극적으로 옹호했으며, 이후 그는 본인 스스로 일종의 ‘규약주의’ 관점을 대표하며 라이헨바흐의 ‘경험주의’ 관점과 논쟁을 벌이게 된다. 시간과 공간을 물리적으로 사유하는 전통 속에서 헬름홀츠의 ‘경험주의’와 푸앵카레의 ‘규약주의’가 상호작용하며 아인슈타인이 상대론을 수립하는 데 결정적인 역할을 했다면, 이후 두 관점 사이의 철학적 대화는 상대론적 시간과 공간의 의미에 관한 논리경험주의의 철학적 논의 및 물리적 기하학에 관한 라이헨바흐와 아인슈타인 사이의 철학적 논쟁으로까지 이어졌다. 이제 나는 본 논문의 후속 논의를 통해 이와 같은 철학적 대화가 어떻게 진행되었는지를 단계적이고 구체적으로 살펴볼 것이다.

제3장. 쉘리크의 상대론 해설과 카시러의 철학적 도전⁶⁹⁾

제1절. 서론

모리츠 쉘리크(Moritz Schlick, 1882-1936)⁷⁰⁾는 논리경험주의 과학철학 형성 과정에서 중요한 역할을 했을 뿐만 아니라, 상대론적 시간과 공간의 철학적 의의 규명을 위한 핵심적인 역할을 했다. 1916년 3월 아인슈타인의 일반 상대론 논문이 출판되었기에, 그의 1917년 저작 『현대 물리학의 시간과 공간』은 상대론이 완성된 직후에 출판되었다고 할 수 있다. 우리가 주목할 필요가 있는 것은 쉘리크가 당시 아인슈타인과 활발하게 의견을 교환하는 가운데 자신의 저작을 집필했다는 사실이다. 물리학 박사이자 물리학자 플랑크(Plank)의 제자였던 쉘리크는 상대론을 물리적 측면에서뿐만 아니라 철학적 측면에서도 잘 이해하고 있었다. 그런 쉘리크의 1917년 저작에 대해 아인슈타인은 예외적일 정도로 우호적인 평가를 남겼다. 약간 과장해서 말해, 아인슈타인의 물리학 논문이 상대론을 ‘물리적’으로 서술했다면 쉘리크의 저작은 이 이론을 ‘철학적’으로 서술하는 일종의 ‘쌍둥이’였다. 쉘리크는 실로 아인슈타인의 ‘철학적 대리자’였다.⁷¹⁾

그런데 흥미로운 점은 쉘리크의 책이 논리경험주의 시공간 철학의 ‘대표’ 저작은 아니라는 것이다. 실제로 상대론적 시간과 공간의 의의에 대한 논리경험주의의 철학적 분석을 대표하는 것은 쉘리크 이후 등장한 철학자 한스 라이헨바흐(Hans Reichenbach)와 그의 책 『시간과 공간의 철학』이다. 쉘리크는 1917년 이후 상대론에 대한 상세한 분석을 담은 저술을 출판하지 않았다. 논리경험주의의 형성 과정에서 쉘리크가 핵심

69) 이 장에서의 논의는 강형구 (2021b)에 그 바탕을 두고 있음을 밝힌다.

70) ‘인식론자’였던 헬름홀츠의 제자였던 이론물리학자 막스 플랑크로부터 박사학위를 받았던(1904년) 쉘리크는 이후 철학자로 전향하여(1910년) 과학 지식에 기반한 새로운 철학을 전개하여 논리경험주의의 비엔나 학파의 대표자가 된다. 비엔나 대학 부임(1922년) 이후 예나 대학의 신예 철학자 루돌프 카르납을 영입하고 그를 내세워 비엔나 학파의 논리실증주의를 미국으로 전파하는 데 중요한 역할을 했다.

71) 이상욱 (2009)은 쉘리크의 상대론 해석을 일종의 ‘규약주의적’ 해석으로 올바르게 평가하고 있다(160쪽). 다만 그는 자신의 논문에서 쉘리크의 상대론 해석에 대한 상세한 의미 규명을 진행하고 있지는 않다.

역할을 한 것을 부정할 수는 없지만, 결과적으로 그는 논리경험주의 시공간 철학 형성을 위해 중요한 매개 역할을 한 인물로서 기억된다. 상대론에 대한 쉘리크의 해석 및 상대론을 신칸트주의적으로 해석했던 카시러(Cassirer)에 대한 쉘리크의 비판적인 논평은 이러한 매개 과정에서 핵심적인 역할을 했으며, 본 장의 주된 논의 주제가 될 것이다.

쉘리크의 『현대 물리학의 시간과 공간』은 흥미로운 저작이다. 이 저작은 아인슈타인이 물리학 논문에서는 상세히 표현할 수 없었던 철학적 주제들 대부분을 다루고 있기 때문이다.⁷²⁾ 특히 주목할만한 점은, 이 책이 아인슈타인이 ‘구멍 논증’에 의해 직면했던 문제와 이를 ‘점-일치 논증’에 의해서 극복해낸 철학적 사유 과정을 비교적 상세하게 서술하고 있다는 점이다. 적어도 이 문제에 관한 한 쉘리크의 서술은 논리경험주의의 저작 중 가장 상세하게 이루어졌다. 또한 아인슈타인이 ‘구멍 논증’을 ‘점-일치 논증’으로 대응할 때 중요하게 참고한 것으로 보이는 개념인 ‘동등화의 유일성(univocalness of coordination)’을 철학적으로 제시한 것은 바로 쉘리크였다. 이에 따르면 유일한 ‘일치’를 유도하는 복수의 이론 체계가 있을 때 이들은 모두 같은 정도로 참이며 동등하다. 이러한 쉘리크의 개념은 아인슈타인이 자신의 ‘점-일치’ 논증을 전개할 때 중요한 역할을 했다.⁷³⁾

이처럼 쉘리크의 상대론 해석은 이론의 내용에 충실하면서 그 철학적인 의의에 대한 해명을 중심으로 이루어졌다. 그런데 이후 상대론의 철학적인 의의에 대한 논의를 전환하는 중요한 사건이 일어났다. 당시 독창적 과학 사상으로 명성이 높던 철학자 카시러(Ernst Cassirer, 1874-1945)가 자신의 책 『실체와 기능』 부록으로 「아인슈타인의 상대성 이론」(1921년)을 출판한 것이다.⁷⁴⁾ 카시러는 19세기 수학과 물리학의 발전 과정을 연구했으며,

72) 사실 아인슈타인은 자신의 물리학 논문이 갖는 철학적 설명의 빈약함을 보완하기 위해 그 스스로가 1916년 12월에 좀 더 철학적인 서술의 성격을 가진 상대성 이론 해설서를 집필했다. 알베르트 아인슈타인, 장현영 옮김 (1916/2012). 그러나 그 책조차도 상대론의 철학적 쟁점들에 대한 충분한 설명이라고 보기는 어려웠다.

73) 토머스 오버던(Thomas Oberdan)이 2017년에 스텐퍼드 철학 백과사전에 집필한 “모리츠 쉘리크(Mortiz Schlick)” 항목 중 5절의 내용을 참고. 상대론의 역사를 연구하는 위르겐 렌(Juergen Renn) 또한 아인슈타인이 쉘리크와의 의견 교환을 통해 점-일치 논증을 착상했을 것이라 주장했다.

74) 카시러의 철학 수업을 수강한 바 있던 라이헨바흐의 저작 『상대성 이론과 선험적 지식』은 1920년에 출판되었고 이는 카시러의 저작과 거의 같은 시기에 출간된

과학에 관한 해박한 지식과 이해를 갖추고 있었다. 그런 그는 상대론이 ‘자연의 기능적 단일성’ 추구 과정을 잘 보여주는 대표적 사례이며 자신의 신칸트주의적 관점(논리적 관념론)과 부합한다고 해석했다. 이러한 카시러의 해석에 쉘리크는 위기를 느꼈는데, 왜냐하면 카시러의 해석이 상대론의 핵심적인 ‘경험적 요소’를 경시하거나 왜곡하는 것으로 여겨졌기 때문이다.

쉘리크가 볼 때 카시러의 ‘논리적 관념론’은 상대론의 ‘형식적 측면’을 부각하는 반면 이 이론의 ‘경험적 측면’을 정당하게 평가하지 않았다. 하지만 마흐가 표방한 ‘현상주의(phenomenalism)’의 관점에서 상대론의 철학적 의의를 해석하는 것 역시 적절하지 않아 보였다. 그렇기에 특정한 철학적 체계에 맞도록 억지 해석을 하지 않으면서도 상대론의 경험적 측면을 정당하게 드러낼 수 있는 새로운 철학적 분석이 필요했다. 이러한 상황에서 쉘리크가 카시러와 대비하여 지지한 철학자는 젊은 라이헨바흐(Reichenbach)였다. 물론 라이헨바흐의 1920년 저작 『상대성 이론과 선험적 지식』은 칸트적 요소를 포함하고 있었지만, 쉘리크는 라이헨바흐가 제시한 ‘상대화된 선험성’ 개념이 선험성을 ‘역사화’하고 좀 더 ‘경험’을 강조하는 방식으로 상대론의 철학적 의의를 해명할 수 있을 것이라 보았다.

쉘리크의 1917년 저서, 카시러의 1921년 저서, 카시러의 저술에 대한 쉘리크의 1921년 논평 모두 상대론에 대한 철학적 해석의 역사 속에서 중요한 이정표가 된다. 본 장에서 나는 이러한 쉘리크와 카시러의 저술 및 그 의의를 상세하게 검토할 것이다. 그리고 이러한 검토는 앞선 장에서 논의한 바 있는, 리만-헬름홀츠-푸앵카레-아인슈타인으로 이어진 시간과 공간의 물리적 고찰이라는 논의를 배경으로 이루어질 것이다. 특히 이번 장을 통해서 나는 상대론적 시간과 공간에 대한 쉘리크의 철학적 분석이 갖는 의의와 한계를 드러낼 것이다.

이론의 창시자인 아인슈타인의 관점에 최대한 부합하도록 이루어진 쉘리크의 철학적 분석은 일종의 전체론적 ‘규약주의’의 관점을 취했다. 하지만 쉘리크의 분석이 상대론적 시간과 공간의 철학적 의의에 대한 ‘체계적인 분석’이라고 보기는 어려웠다. 오히려 쉘리크는 아인슈타인이

것이였다. 그러나 라이헨바흐는 당시 무명의 철학자였고 카시러보다 칸트주의에 더 비판적이었다. 따라서 쉘리크가 볼 때 라이헨바흐는 카시러와 달리 자신이 향후 협력해야 할 철학적 관점을 갖고 있었다.

표명하지 않았던 그의 철학적 입장을 좀 더 친절하게 해설한 것이었다. 이후 카시러의 관념론적 해석이 제시되자 쉘리크와 아인슈타인은 카시러의 해석에 동의하기 어려운 핵심적인 요소가 있음을 탐지했다. 상대론의 경험적 측면보다는 형식적 측면을 더 강조했던 카시러의 상대론 해석은, 쉘리크가 취했던 전체론적 규약주의와 구별되면서도 상대론의 경험적 측면을 더 적절하게 반영하는 새로운 철학적 분석을 요구하게 되었다.

제2절. 쉘리크 : 아인슈타인과 상대론의 ‘철학적 대리자’

아인슈타인의 특수 상대론을 적극적으로 옹호했던 대표적 물리학자는 플랑크(Planck)였다.⁷⁵⁾ 그는 특수 상대성 논문이 제출된 후 이 논문이 학자들의 관심을 크게 끌지 못했던 시기부터 이에 관심을 가졌고, 본인 자신이 특수 상대론에 관한 논문을 발표했을 뿐만 아니라 라우에(Laue)와 같은 제자들 또한 이를 연구하라고 독려했다. 쉘리크는 그런 플랑크로부터 물리학 박사학위를 받은 후 철학으로 전향한 인물이다. 그는 플랑크의 영향 아래 상대론을 철학적으로 고찰했고 1915년에 “상대성 원리의 철학적 의의”⁷⁶⁾라는 논문을 발표하여 아인슈타인의 관심을 끌었다. 이후 쉘리크와 아인슈타인은 다수의 서신을 교환하였고, 쉘리크가 1917년 출간한 『현대 물리학의 시간과 공간』⁷⁷⁾(이후 『시간과 공간』이라 칭함)은 아인슈타인 본인으로부터 큰 호평을 받았다. 쉘리크가 이 책에서 아인슈타인의 철학적 관점을 상당히 정확하게 해설하고 있기 때문이었다.

쉘리크에 따르면 아인슈타인은 특수 상대론을 통해 경험적으로 의미가 없는 에테르 개념을 폐기하고 물리학 이론의 ‘단순성’을 높였다.⁷⁸⁾ 우리가

75) 임경순 편저 (1997), 30-32쪽 참조. 플랑크는 특수 상대론이 물리학의 보편성과 단순성을 뒷받침한다고 보고 이를 지지했다.

76) Oberdan, Thomas. (2017), “Moritz Schlick” in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*의 4절. 이 논문에서 쉘리크는 아인슈타인과 로렌츠의 이론이 경험을 기술함에 있어서는 동등하지만 아인슈타인의 이론이 실재를 좀 더 ‘단순’하게 기술한다고 보았다. 이와 같은 ‘전체론적 규약주의’의 관점이 아인슈타인의 동의를 얻었으며 이는 그의 1917년 저작에까지 이어진다.

77) Schlick, Moritz. (1917/1920) 참조.

78) Schlick (1917/1920)의 2장 “상대성의 특수 원리” (23-35쪽).

주목해야 하는 것은 쉐리크가 리만, 헬름홀츠, 푸앵카레의 기하학 철학 전통 아래에서 ‘공간의 상대성’에 대해 논의하고 있는 부분이다.⁷⁹⁾ 세계 A가 이와는 다른 세계 B로 변환할 경우, 만약 세계 속 대상들 사이의 모든 변화가 같은 방식으로 일어난다면 세계 A 속에 있던 관찰자는 세계 B로 옮겨가더라도 자신이 속한 세계가 A에서 B로 변했는지 알아차리지 못할 것이다. 쉐리크는 이를 수학적으로 다음과 같이 표현한다. “완벽하게 임의적인 일대일 점 변환에 따라 상호 변환될 수 있는 두 세계 A, B는 물리적 실재성에 있어서 동등하며, 이때 두 세계는 연속적으로 일대일 대응한다.”⁸⁰⁾

쉐리크에 따르면 우리는 이러한 상황을 세계 A에서 세계 B로 ‘세계’가 달라졌다고 말하는 대신, 세계는 같은 가운데 세계를 기술하는 ‘좌표계’가 A에서 B로 변환되었다고 말할 수 있다.⁸¹⁾ 그렇게 되면 이제 좌표계 A와 좌표계 B 사이에서 어떤 좌표계를 채택할 것인지에 관한 ‘선택’의 문제가 남는다. 쉐리크에 따르면 우리는 좌표계 A와 좌표계 B 중 세계를 더 ‘단순하게’ 기술하는 좌표계를 선택할 것이다.

이러한 쉐리크의 논의가 아인슈타인 자신이 겪었던 ‘구멍 논증’ 및 ‘점-일치 논증’의 맥락과 유사한 맥락에서 이루어지고 있다는 점에 주목하자. 앞선 2장에서 살펴보았듯 ‘구멍 논증’에서도 물질과 에너지가 없는 작은 영역에 상호 일대일 점 변환이 가능한 복수의 계량 함수를 할당할 수 있었기 때문이다. 만약 이처럼 변환이 가능한 상황을 세계 A에서 세계 B로의 변환 즉 ‘세계 변환’이라고 생각하면 문제가 심각해진다. 특정한 물리적 세계가 오직 상호 변환 가능성에 의해 이와 ‘다른’ 별도의 물리적 세계로 바뀐다고 가정하는 것은 인식적으로 부담스럽기 때문이다. 다행히도 우리에게는 다른 선택지가 있다. 이 상황을 객관적인 물리적 세계가 변하는 것으로 보는 것이 아니라, 물리적 세계를 기술하는 ‘이름표’인 좌표계만 변할 뿐이라고 볼 수 있기 때문이다.

앞서 논의된 공간의 상대성이 수학적 측면에 초점을 맞추었다면, 이후

79) Schlick (1917/1920)의 3장 “공간의 기하학적 상대성에 관한 논의” (37-42쪽) 및 4장 “공간적 상대성에 관한 수학적 공식화” (43-46쪽).

80) Schlick (1917/1920), p. 43.

81) Schlick (1917/1920), p. 45.

슐리크는 ‘경험에서 기하학과 물리학의 분리 불가능함’을 논한다.⁸²⁾ 이미 푸앵카레가 보인 바 있듯, 경험은 물리적 기하학이 무엇인지를 증명하지 못하고 단지 어떤 기하학을 이용했을 때 물리 법칙들이 가장 단순한지 말해줄 뿐이다. 따라서 슐리크는 우리가 ‘증명’이라는 기준이 아닌 ‘단순성’이라는 기준으로 물리적 기하학을 선택해야 한다고 말한다. 푸앵카레는 수학적으로 가장 단순한 유클리드 기하학을 선택하는 물리학이 가장 단순할 것으로 추측했지만, 슐리크에 따르면 아인슈타인은 비유클리드 기하학을 선택하는 물리학이 더 단순함을 보였다.⁸³⁾

그렇다면 아인슈타인이 보인 물리학의 ‘단순성’은 무엇인가? 이에 대해 슐리크는, 아인슈타인이 옹호한 ‘운동에 대한 관계론적 관점’이 우리의 세계상을 더 단순화시킨다고 답했다.⁸⁴⁾ 왜냐하면 우리에게서 물리적 현상을 기술하는 기준계로서 등속 운동 기준계와 가속 운동 기준계를 구분할 인식론적 근거가 없기 때문이다. 슐리크가 볼 때 아인슈타인은 임의의 기준계에서 표현된 물리적 법칙이 다른 기준계에서 표현된 물리적 법칙과 같은 형식을 가져야 한다는 일반 공변성 원리를 추구함으로써 푸앵카레가 생각했던 것보다 높은 수준의 이론적 단순성을 성취해 냈다.⁸⁵⁾

슐리크는 아인슈타인이 ‘구멍 논증’을 극복하는 데 사용한 ‘점-일치 논증’을 철학적으로 상세하게 서술한다.⁸⁶⁾ 우리는 세계 속에서 두 점-사건들 사이의 ‘일치(점-일치, point-coincidence)’만을 관측할 수 있고, 물리적 법칙들은 이와 같은 일치들을 다룬다. 그런데 하나의 세계상에서 연속적 일대일 변환(미분동형사상)을 통해 다른 세계상으로 변환되어도 모든 점-일치들은 교란되지 않고 보존된다. 그렇기에 관측할 수 있는 점-일치들을 보존하는 모든 세계상은 물리학의 관점에서 동등하다.⁸⁷⁾

슐리크에 따르면 일반 공변성이 구현됨으로써 물리학 전체는 단순해지고 점-일치들 역시 보존된다. 하지만 그 결과 물리적 좌표들 사이의 차이가

82) Schlick (1917/1920)의 5장 “경험에서 기하학과 물리학의 분리불가능성” (47-50쪽).
 83) Schlick (1917/1920), pp. 49-50.
 84) Schlick (1917/1920)의 6장 “운동의 상대성과 이것이 관성 및 중력과 맺는 관계” (51-57쪽).
 85) Schlick (1917/1920), p. 53.
 86) Schlick (1917/1920)의 7장 “상대성의 일반적 공준과 시공간 연속체의 측정 결정” (59-67쪽).
 87) Schlick (1917/1920), p. 62. 이와 같은 슐리크의 서술에서 주목할만한 부분은 슐리크가 아인슈타인의 표현을 대부분 ‘그대로 사용’하며 이를 ‘해설’하고 있다는 것이다.

물리적 측정 도구가 지시하는 간격과 직접적으로 대응되지 않게 되었으며, 이는 ‘공간과 시간이 그 마지막 남은 객관성을 잃게 되었음’을 의미한다.⁸⁸⁾ 이러한 서술은 아인슈타인이 자신의 논문에서 주장한 것과 정확히 같다. 쉐리크는 모든 운동과 가속이 상대적이라는 주장이 시간과 공간이 물리적 객관성을 갖지 않는다는 주장과 동등하다고 본다.⁸⁹⁾ 그는 상대론에 이르러 시간과 공간은 측정되지 않고 물리적 사건들을 배열하기 위한 틀만을 제공하게 되었다고 결론 내린다.

마지막으로 쉐리크는 물리학의 객관적 시간과 공간이 인간의 주관적 시간 및 공간 경험과 갖는 관계를 분석한다.⁹⁰⁾ 쉐리크에 따르면 우리는 감각을 통해 직관적이고 심리적인 시간과 공간을 경험하며, 이후 이를 재료로 삼아 물리적이고 객관적인 시공간 다양체를 구성한다. 감각적 시간과 공간으로부터 물리적 시간과 공간을 구성하는 과정에서 일종의 ‘개념적 구성’이 일어나기 때문에, 감각적 시공간과 물리적 시공간은 서로 대응하나 일대일 대응인 것은 아니다. 서로 다른 개인 간에 시공간에 대한 감각적 내용은 차이가 있더라도 이들이 경험하는 ‘점-일치’는 공통되므로, 이러한 객관적 ‘점-일치’를 동등하게 설명할 수 있는 복수의 이론들(세계상들)이 존재할 수 있다. 이러한 복수의 이론들이 사실들의 세계를 ‘유일하게 지시’하는 한 모두 옳지만, 우리는 이러한 이론 중 가장 ‘단순’하면서 그 안에 ‘임의성의 요소를 최소로 갖는’ 이론을 선택한다. 쉐리크에 따르면 이와 같은 ‘단순성’을 성취한 이론이 아인슈타인의 이론이다.⁹¹⁾

이상과 같은 쉐리크의 상대론 분석에서 첫째로 주목해야 하는 점은, 적어도 쉐리크의 책에서는 물리적 기하학의 문제가 측정 물체의 정의 및 그 행태에 관한 논의와 직접적으로 결부되어 있지 않다는 것이다. 쉐리크는 만약 우리가 좌표계 A와 좌표계 B 사이에서 선택할 수 있다면 둘 중 물리 법칙을 ‘단순하게’ 만드는 좌표계를 선택한다고 주장했다. 그리고 이러한 ‘단순성’을 성취하는 것은 물리학에 대한 ‘관계론적’ 관점이다. 우리가 앞에서 살펴보았듯, 특수 상대론에서 일반 상대론으로 이행하는 과정에는

88) Schlick (1917/1920), p. 65.

89) Schlick (1917/1920)의 8장 “새로운 이론의 근본 법칙이 갖는 의미 해명과 그 의의” (69-77쪽).

90) Schlick (1917/1920)의 10장 “철학과의 관계” (87-96쪽).

91) Schlick (1917/1920), p. 95.

강체 막대, 자연 시계와 관련한 일련의 중요한 추론 과정이 개입되어 있었다. 하지만 술리크는 이에 대한 구체적인 분석 없이 ‘관계론적’ 관점의 단순성에 대해서 언급하고 있다.⁹²⁾ 이는 전반적으로 아인슈타인의 입장에 부합하는 설명이었지만 시간과 공간을 물리적으로 구현한 이론으로서의 상대론의 주된 특징을 서술하는 분석이라 보기는 어려웠다.

둘째, 최소한 이 책에서 술리크가 물리적 기하학에 관해 기술하는 상황은 이후 논리경험주의의 표준적인 ‘물리적 기하학의 규약주의’와 일치하지 않는다. 논리경험주의의 표준적인 규약주의에 따르면, 물리적 기하학의 결정은 합동성(congruence) 정의를 위한 측정 단위의 규약적 선택에 의존한다. 만약 우리가 강체 막대로 합동성을 정의할 때 특정한 기하학 G 가 물리적 기하학으로 귀결된다고 해도, 이와는 다른 기준 물체로(예를 들어 신축성 있는 고무줄) 합동성을 정의한다면 이와는 다른 형태의 기하학인 G' 을 물리적 기하학으로 얻는다. 이처럼 측정 단위 선택에 의존적이라는 점에서 물리적 기하학은 규약적이라는 것이 ‘기하학적 규약주의’다. 그런데 술리크의 논의는 이와는 다소 다르다. 술리크는 기준 측정 물체의 행태에 대한 별도의 언급 없이, 귀결되는 물리학의 ‘단순성’만을 언급할 뿐이다.⁹³⁾

셋째, 술리크의 서술에서 두드러지는 측면은 아인슈타인이 ‘구멍 논증’ 및 ‘점-일치 논증’을 통해 겪었던 일련의 사고 과정을 상세히 서술한다는 점이다. 사실 아인슈타인의 두 논증은 이후 상대성 이론의 역사 연구에서 비로소 재발견되었을 정도로 상대론에 관한 철학적 논의에서 잘 등장하지 않았다. 그런데 아인슈타인이 중력장 방정식을 완성하는 과정에서 결정적인 역할을 한 것은 바로 이 두 논증이였다. 술리크는 1915년 당시 ‘동등화의 유일성을 만족하면 서로 다른 두 개념 체계의 경험적 참됨은 같다’는 개념을 발전시키고 있었고, 이 개념은 아인슈타인에게 ‘점-일치 논증’을 위한 유용한

92) 물론 술리크가 측정 물체의 합동성 정의나 회전 원판 사고 실험에 대해서 언급하고 있기는 하다(예를 들어, Schlick (1920), pp. 60-61.) 그러나 그의 설명 또한 아인슈타인 본인이 제시한 설명과 비슷한 수준에서 진행되고 있어, 이를 아인슈타인이 제시한 설명과는 차별화되는 철학적 ‘해명’이라고 보기 어렵다.

93) 우리가 이후 살펴보겠지만, 이와 같은 표준적인 ‘물리적 기하학의 규약주의’ 관점은 술리크 이후 카르납이 발전시킨다. 카르납은 술리크보다 더 구체적으로 계량 규정 M 과 계량적 공간 규정 R 을 제시하며, ‘단순성’의 기준을 M 에도 적용할 수 있고 R 에도 적용할 수 있다고 설명한다. 본 논문의 5장에서 논의할 것을 참조할 것.

단서를 제공해주었다. 그렇기에 술리크는 아인슈타인이 미처 자신의 물리학 논문에서 표현하지 못했던 철학적 사고 과정을 대신 표현하는 일에 관한 가장 적합한 철학자였다.

넷째, 아인슈타인이 물리학 논문 속에서 거친 형태로 제시한 철학적 주장들을 술리크가 대부분 수용하고 이를 위한 설명을 덧붙였다는 것도 중요한 특징이다. 물리학을 전체적으로 단순하게 만드는 일반 공변성이 추구되더라도 물리적 객관성의 담지자인 점-일치들의 총체는 보존되며, 대신 시간과 공간 좌표가 직접적인 측정의 의미를 잃게 된다. 이는 곧 시간과 공간이 물리적 객관성을 잃게 된 것이라는 술리크의 설명은 실로 아인슈타인의 주장을 의심 없이 수용하는 것이었다. 비록 마지막에 술리크가 주관적 시간 공간과 객관적 시간 공간을 구분하며 시간과 공간에 대한 주관적 경험의 존재를 인정하기는 하지만, 결국 그는 인간이 경험하는 시간과 공간을 ‘주관적 영역’에 소속시킴으로써 경험을 통해 파악할 수 있는 객관적인 요소는 ‘점-일치’들로 국한되고 말았다.

다섯째, 술리크의 서술에는 ‘귀결되는 물리적 법칙의 단순성’과 같은 주요 개념들이 다수 등장하지만, 이 개념들에 대한 그의 상세한 철학적 해명을 찾아보기 어렵다. 이는 이 책이 기본적으로 상대론을 해설하는 ‘대중서’이기도 했지만, 술리크는 물리학에서 훈련받은 후 철학으로 전향했던 까닭에 당시 새롭게 형성되고 있던 ‘분석적 철학’에 익숙하지 않았기 때문일 수도 있다. 결과적으로 술리크의 책을 철학적 관점에서 진행된 철저하고 상세한 분석이라고 부르는 어려웠다. 실제로 술리크 자신이 아인슈타인에게 보낸 서한에서도 알 수 있듯, 이 저서는 “일반 상대성 이론에 대한 해설에 지나지 않으며, 시간과 공간이 물리학 속에서 객관성을 잃었다는 논제에 대한 상세한 규명”⁹⁴⁾은 아니었다.

술리크는 자신의 저서를 통해 아인슈타인과 상대론의 훌륭한 ‘철학적 대리자’로 자리매김할 수 있었다. 이 책에서 술리크는 아인슈타인이 물리학 논문에서 서술하지 않았던 철학적 사고 과정을 비교적 충실하게 서술함과 동시에, 아인슈타인이 제기했던 여러 철학적 주장들을 대부분 수용하고

94) Oberdan, Thomas. (2017), “Moritz Schlick” in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*의 6절 참조.

이를 추가로 설명하는 면모를 보였다. 그런 이유로 아인슈타인은 이 책을 극찬했고 이후 새로운 과학 사상가로서 솔리크를 적극적으로 지원하게 되었다. 전반적으로 솔리크는 일종의 전체론적 ‘규약주의’의 입장에서 상대론의 의의를 해설했고, 이는 아인슈타인의 관점과 유사한 것이었다. 푸앵카레는 경험적으로 동등한 복수의 물리적 기하학이 있을 때 ‘수학적 단순성’을 기준으로 선택한다고 보았는데, 솔리크는 이 논리를 ‘물리적 단순성’을 기준으로 선택한다고 상대론에 맞게 변형했다. 이때 ‘물리적 단순성’을 구현하는 것은 상대론의 ‘일반 공변성’을 구현하는 물리적 세계상이다.

이처럼 솔리크가 아인슈타인의 ‘철학적 대리인’으로서 명실상부하게 인정받은 상황에서, 두 사람 모두에게 위협이 되는 중요한 철학적 사건이 일어났다. 당시 과학 사상가로서 높은 명성을 얻고 있던 에른스트 카시러가 1921년에 상대성 이론의 철학적 의의에 대해 논하는 단행본 수준의 저서를 출판한 것이 바로 그것이었다. 신칸트주의적인 색채가 강한 ‘논리적 관념론’의 관점에서 상대론을 해석한 카시러의 입장은 솔리크와 아인슈타인에게 하나의 중요한 철학적 도전으로 여겨졌다.

제3절. 카시러 : 상대론을 ‘논리적 관념론’에 포섭하려는 시도

에른스트 카시러(Ernst Cassirer, 1874-1945)는 ‘칸트의 비판 철학이 상대론과 부합하는지 판단하는 문제’에 대해 긍정적으로 답한 철학자다.⁹⁵⁾ 그는 신칸트주의의 영향 아래 이를 발전시킨 철학자였는데, 특히 자연과학에서의 대상 개념이 어떻게 발전했는지를 역사철학적으로 고찰했다. 그는 1906년 베를린 대학에서 “현대의 철학과 과학에서의 지식 문제”를 주제로 교수자격을 취득했고, 이후 베를린 대학에서 수학, 물리학 같은 정밀과학의 발전이 갖는 인식론적 의의를 연구했다. 그 결과 카시러는 1910년 『실체와 기능(Substance and Function)』을 출판했다. 그는 19세기까지의 물리학

95) 카시러는 한국에서 ‘상징 형식의 철학자’로서 잘 알려져 있다. 그런데 카시러의 초기 철학 연구는 과학사와 과학철학 연구에 집중되어 있고, 그의 상징 형식의 철학 또한 이와 같은 과학사·과학철학 연구에 기반한다고 보는 것이 옳을 것이다. 특히 그의 『르네상스 철학에서의 개인과 우주』(1927년)는 과학혁명을 플라톤주의적으로 해석하며 코이레(A. Koyre) 등의 과학사 연구자들에게 큰 영향을 미쳤다.

발전으로 인해 실체로서의 사물의 특성이 아니라 사물이 다른 사물들과 맺는 ‘기능적(함수적) 관계’를 다루게 되었다고 진단하고, 이런 기능적 관계가 수학적 언어로 표현된다고 보았다. 당시 새롭게 출현한 상대성 이론에 큰 관심을 가졌던 카시러는 1921년 「인식론적 관점에서 고찰한 아인슈타인의 상대성 이론」⁹⁶⁾을 자신의 책 『실체와 기능』의 부록으로 출판했고, 이는 이후 상대론에 대한 신칸트주의적 분석의 대표 저작으로 자리매김하며 쉐리크의 상대론 해석에 중요한 철학적 도전을 제기했다.

카시러가 제시한 ‘신칸트주의적 상대론 해석’의 주요 특징은 무엇인가? 이에 답하기 위해서는 그의 저술 「인식론적 관점에서 고찰한 아인슈타인의 상대성 이론」(이하 「상대성 이론」으로 약칭)을 자세하게 검토해야 한다. 먼저 카시러는 측정 개념과 대상 개념에 대해 논한다.⁹⁷⁾ 그는 당시 많은 논란이 된 아인슈타인의 철학적 주장 “시간과 공간으로부터 물리적 객관성의 잔여물이 사라졌다”를 인용하며 과연 이때의 ‘물리적 객관성’이 무엇인지 묻는다.⁹⁸⁾ 카시러가 볼 때 중요한 것은 물리적 객관성이 ‘감각 지각의 대상이 갖는 실재성’이 아니라는 점이다. 카시러는 물리학자 플랑크가 “측정이 가능한 것만이 존재한다”고 언급한 것을 예로 들면서 물리학에서는 측정이 가능할 때 비로소 물리적 대상으로 상정되고 있음을 주목한다.

흥미로운 것은 측정 가능성에 대한 카시러의 독특한 해석이다. 카시러가 볼 때 측정은 단순한 지각의 복제물이 아니라 특정한 ‘이론적 가정’ 혹은 ‘구성’을 전제한다. 그리고 이러한 이론적 전제들은 감각으로부터 비롯되는 것이 아니라 ‘사고의 공준’으로서 세계에 도입된다. 예를 들어 뉴턴의 운동 제1 법칙인 ‘관성의 법칙’은 측정을 가능하게 하는 법칙이다. 왜냐하면 이 법칙은 특정한 상황에서 외부적 힘이 존재하는지를 우리에게 알려주기 때문에 이를 가정해야 측정 자체가 가능해지기 때문이다. 따라서 카시러에 따르면 진정한 측정 도구는 물질적인 도구가 아니라 ‘측정이 전제하는 원리들과 공준들’이며, 측정을 새롭게 정의하면 우리는 세계에 대한 새로운 그림을 얻게 된다.⁹⁹⁾ 또한 카시러는 새로운 측정 정의를 통해 이전까지의

96) Cassirer, Ernst. (1921/1953), *Einstein's Theory of Relativity* (Dover), pp. 409-456.

97) Cassirer (1921/1953)의 제1장 “측정 개념과 대상 개념” (351-366쪽).

98) Cassirer (1921/1953), p. 356.

99) Cassirer (1921/1953), p. 364.

개념 체계가 새로운 개념 체계에 비교해 오직 근사적으로만 성립함이 밝혀진다고 보았다. 결국 문제의 초점을 ‘측정의 대상’이 아니라 ‘측정의 원리’로 옮김으로써, 카시러는 측정의 경험적 측면보다 측정 원리의 ‘구성적(constitutive) 측면’을 더욱 강조한 셈이다.

카시러는 자연에 대한 설명이 단일하지 않던 19세기 말의 물리학 상황을 지적하며, 아인슈타인이 상대론을 통해 ‘자연의 단일성’을 회복하는 데 성공했다고 해석한다.¹⁰⁰⁾ 서로 상대적으로 등속 운동하는 기준계는 물리 법칙을 기술하는 데 있어 동등하다는 것이 특수 상대성 원리인데, 이 원리는 역학에는 잘 적용되었던 반면 맥스웰과 로렌츠의 전자기 법칙에는 적용이 되지 않는 듯 여겨졌다. 또한 빛의 속도 측정을 통해 정지한 에테르 속 지구 운동을 탐지하려는 모든 시도는 실패로 돌아갔다. 여기서 우리가 주목해야 하는 점은 이러한 상황을 카시러가 해석하는 독특한 방식이다. 카시러가 볼 때 이 두 사례는 ‘자연에 대한 단일한 설명’을 위협하는 사례들이며¹⁰¹⁾ 아인슈타인은 이러한 위협을 해결한 인물이다.

이처럼 ‘측정을 가능하게 하는 원리’의 중요성을 강조했던 카시러는, 아인슈타인이 “문제가 되는 상황을 일종의 공준으로 바꿈으로써”¹⁰²⁾ 자연의 단일성 회복 문제를 해결했다고 해석한다. 즉, 아인슈타인은 문제가 된 광속 불변의 원리와 특수 상대성의 원리를 오히려 물리학 이론의 두 근본 원리로 삼음으로써, 이전까지는 절대적 값을 갖는 논리적 상수였던 시간과 공간의 측정값을 상대적인 것으로 바꾸는 대가를 치르면서 ‘자연의 단일성’을 다시금 성취한 것이다¹⁰³⁾. 비록 시간 간격과 길이 간격이 기준계의 운동 상태에 따라 달라질지 모르나, 로렌츠 변환 아래에서 물체의 엔트로피, 전기 전하량 등은 변하지 않으며 자연법칙의 일반 형식 또한 유지된다.

100) Cassirer (1921/1953)의 제2장 “상대성 이론의 경험적, 개념적 기초” (367-386쪽).

101) Cassirer (1921/1953), p. 370. 카시러는 구체적으로 다음과 같이 말한다. “이러한 두 사례에서 자연에 대한 설명의 단일성, 자연 개념 그 자체의 단일성은 파괴된 것처럼 보인다.”

102) Cassirer (1921/1953), p. 371. 여기서 카시러는 괴테(Goethe)가 한 다음의 말을 인용하고 있다. “이론적이고 실용적인 삶에 있어서 가장 위대한 기교는 **문제를 공준**으로 바꾸는 데 있다. 이 방법을 통해 우리는 성공한다.”

103) 이처럼 카시러는 특수 상대론의 두 기초 원리가 도입된 이유를 적절한 근거를 들어 설명하지 못한다. 이는 내가 제시한 시간과 공간의 ‘물리화’의 관점에서 이와 대비되는 합리적인 설명을 제시하는 것과 대조적이다.

카시러에 따르면 상대론을 통해 이론의 고정된 점이 시간과 공간에서 광속 불변의 원리와 상대성의 공준으로 바뀌었지만, 이를 통해 다시 자연의 단일한 설명이 가능해졌다.¹⁰⁴⁾

카시러가 볼 때 일반 상대론의 발전에서 가장 중요한 역할을 한 것은 ‘상대성의 원리’이다. 그런데 다시금 문제는 카시러가 이 원리를 해석하는 방식이다. 카시러는 상대성 원리를 물질적 원리가 아닌 ‘형식적 원리’라고 해석하고, 아인슈타인이 형식적 원리인 상대성의 원리를 물질적 원리인 광속 일정의 원리보다 더 우위에 두었음을 강조한다.¹⁰⁵⁾ 특수 상대성 원리는 선호되는 좌표계를 등속 운동 좌표계로 한정하였으나 이러한 제한은 인식론적 관점에서 볼 때 만족스럽지 않다. 상대성 원리를 더 일반화하면 선호되는 좌표계 없이 모든 좌표계가 물리 법칙의 서술에서 동등해진다. 바로 이런 일반적이고 보편적인 특성으로 인해 상대성 원리는 형식적인 수준으로까지 상승할 수 있었다. 카시러는 아인슈타인이 형식적 원리인 상대성 원리를 수학적 원리인 일반 공변성으로 변환한 후, 이와 같은 일반 공변성을 추구함으로써 결과적으로 자연 설명의 단일성을 더욱 심화시킬 수 있었다고 해석했다.

카시러는 지식의 개념이 절대적 개념에서 관계론적 개념으로 바뀌었고, 이제 지식은 ‘실체’들의 ‘절대적인 속성’을 다루는 것이 아니라 ‘대상’들 사이의 수학적 ‘기능(함수, 관계)’을 다루게 되었다는 자신의 철학적 관점을 상대성 이론이 잘 지지하고 있다고 주장한다.¹⁰⁶⁾ 상대론에 이르면 감각적으로 지각되는 시간 간격과 공간 간격이 물리적 객관성을 잃지만, 이 이론이 ‘자연 과정의 결정성’을 포기하는 것은 아니다. 왜냐하면 여전히 무한히 많은 서로 다른 기준계들이 로렌츠 변환이라는 공통 규칙을 통해 서로 정량적이고 관계적으로 연결되기 때문이다.¹⁰⁷⁾ 카시러에 따르면 상대론은 모든 가능한 기준계에 적용되는 경험의 포괄적이고 최종적인 법칙을 제시했으므로, 결과적으로 이 이론은 자연법칙의 단일성을 통해 자연 과정에 대한 전체적인 관점을 확보할 수 있었다. 감각 자료의 복수성과 다양성이

104) Cassirer (1921/1953), p. 374.

105) Cassirer (1921/1953), pp. 378-379.

106) Cassirer (1921/1953)의 제3장 “진리의 철학적 개념과 상대성 이론” (387-393쪽).

107) Cassirer (1921/1953), p. 392.

경험에 대한 단일한 개념으로 통합된 것이다.

카시러는 상대성 이론이 자연의 단일성을 이론 또 다른 측면들을 주목한다. 뉴턴의 물리학에서는 텅 비어 있는 공간과 짝 차 있는 물체라는 두 개의 이질적인 요소가 세계를 구성했다. 이에 대해 칸트는 물질을 거리를 통해 작용하는 힘들의 순수한 상호작용으로 설명함으로써, 하인리히 헤르츠(Heinrich Hertz)는 칸트와 달리 물질들 사이의 운동 개념을 통해 힘 개념을 제거함으로써 자연에 대한 단일한 설명을 추구했다.¹⁰⁸⁾ 그런데 카시러가 볼 때 아인슈타인의 상대론에 이르면 공간, 힘, 물질이 서로 분리되지 않으며 이들은 모두 계량 장(metrical field)의 표현으로 볼 수 있으므로, 자연에 대한 단일한 설명이 성취되었다고 볼 수 있다. 또한 상대론은 이전까지 두 가지의 분리된 원리였던 에너지 보존 법칙과 질량 보존의 법칙을 하나의 단일한 법칙으로서 통합해내기도 했다.¹⁰⁹⁾

더 나아가 카시러는 상대론에서의 시간과 공간이 비판적 관념론에서의 시간과 공간 개념과 합치한다고까지 진단했다.¹¹⁰⁾ 뉴턴의 절대 시간과 절대 공간을 부정한 칸트는 시간과 공간을 대상이 아닌 인간 지식의 원천이자 경험 가능성의 조건으로 간주했다. 칸트에 따르면 시간과 공간은 외적 직관의 단순한 형식에 지나지 않으며, 이 형식은 우리가 자연의 단일성을 결정할 수 있게 하는 일종의 규준이다. 카시러가 볼 때 이와 같은 칸트의 시간 공간 개념은 상대론의 시간 공간 개념과 ‘부합한다.’ 아인슈타인은 경험을 통해 지각되는 시간과 공간의 물리적 객관성이 사라졌다고 주장했는데, 카시러가 볼 때 이는 시간과 공간을 대상이 아니라 외적 직관의 형식으로 본 비판적 관념론의 관점과 ‘일관된다.’¹¹¹⁾

더 나아가 카시러에게 상대론은 시간과 공간의 ‘기능적 단일성’을 입증하는 사례이다. 카시러는 비판적 관념론에서 시간과 공간은 좌표가 아니라 좌표의 전제 역할을 하는 ‘직관 형식’이며, 이러한 ‘직관 형식’은 곧 모든 임의적인 대입에 대해 자연의 보편 법칙들이 그 형식을 유지해야 한다는

108) Cassirer (1921/1953), pp. 394-395.

109) Cassirer (1921/1953)의 제4장 “물질, 에테르, 공간” (394-408쪽).

110) Cassirer (1921/1953)의 제5장 “비판적 관념론과 상대론에서의 시간과 공간 개념” (409-429쪽).

111) Cassirer (1921/1953), p. 412.

일반 공변성의 원리와 같다고 해석한다. 카시러는 사고의 전제인 일반 공변성의 원리가 시간과 공간에 대해 관측된 사실들에 새로운 해석을 부여한 것이 상대론의 본질적인 성취라고 평가한다.¹¹²⁾

카시러가 볼 때 상대론이 다루는 것은 물리적 다양체 내의 다양한 측정 관계들이다.¹¹³⁾ 공간, 시간, 물리적으로 실재하는 대상 사이에는 상호 분리 불가능한 측정 관계가 있으며, 이러한 측정 관계들은 비유클리드 기하학의 언어 속에서 가장 단순하고 정확한 수학적 표현을 얻는다. 여기서 주목해야 하는 것은 이 기하학이 표현하는 실재가 존재의 세계가 아닌 ‘법칙들과 관계들’이라는 것이다. 카시러에 따르면 우리의 일반적 생각과 달리 물리적 기하학의 구조는 존재의 세계와 직접적인 상관관계를 갖지 않는다. 우리는 물리적 경험 전체를 물리학의 공리 전체 체계와 비교할 수 있을 뿐이다.¹¹⁴⁾

카시러에 따르면 일반 상대론은 비유클리드 기하학을 물리적 측정들 사이의 관계에 적용함으로써 자연 현상의 단일성을 유지하고 상대성의 보편적 공준을 충족시킬 수 있었다. 결과적으로 상대성 이론은 지적이고 체계적인 완전성을 얻음과 동시에, 우리가 세계에 대한 직관적이고 단순한 관점을 포기하도록 만들었다. 상대론을 통해 시간과 공간은 일종의 ‘선형적 함수’, 즉 ‘보편적이고 관념적인 관계’가 되었으며¹¹⁵⁾ 그 ‘경험적이고 직관적인 특성’을 잃게 되었다.

그렇다면 상대성 이론은 실재와 어떤 관계를 맺고 있을까?¹¹⁶⁾ 카시러에 따르면 물리학은 측정 가능성의 관점과 전제 아래 현상을 고찰하며 존재와 과정을 순수한 구조 또는 수들의 질서로 나타낸다. 물리학의 임무는 모든 것을 수로 번역하고, 모든 질적 특성을 양으로 번역하고, 모든 개별적인 형식들을 보편적인 질서로 번역하는 것이다.¹¹⁷⁾ 이제 물리학에서 계량적 시간과 공간은 주관적이고 현상적인 시간 및 공간과 구분된다. 그렇다면 우리가 직접적으로 경험하는 시간 및 공간과 물리학에서의 시간 및 공간 중 무엇이

112) Cassirer (1921/1953), p. 428.

113) Cassirer (1921/1953)의 제6장 “유클리드 기하학과 비유클리드 기하학”(430-444쪽).

114) Cassirer (1921/1953), p. 434.

115) Cassirer (1921/1953), p. 441.

116) Cassirer (1921/1953)의 제7장 “상대성 이론과 실재의 문제” (445-456쪽).

117) Cassirer (1921/1953), p. 449.

진정한 시간과 공간을 표현할까?

이 물음에 대해 카시러는 경험적 시공간과 물리적 시공간 모두 필요하며 어느 시공간이 옳다고 말할 수 없다고 답한다.¹¹⁸⁾ 카시러가 볼 때 두 종류의 시간과 공간은 상징적 동물인 인간이 세계를 이해하기 위해서 사용하는 서로 다른 상징체계이다. 카시러는 객관적 관점과 주관적 관점 모두를 인정할 수 있다고 주장한다. 수리물리학적 관점에서는 정성적인 특성들이 소거되지만, 이에 반해 심리학적 관점에서 중요한 것은 정성적인 특성들이며 수학적 매개 개념들은 임의적인 규약들에 지나지 않는다.

슐리크의 철학적 해석과 비교할 때 이상과 같은 카시러의 철학적 분석은 상대론의 내용을 충실하게 따랐다기보다는 자신의 철학적 입장을 중심에 두고 상대론을 비판적으로 분석했다고 평가할 수 있다. 카시러의 분석에서 상대론은 자연과학적 지식이 다루는 대상이 실체 개념에서 기능 개념으로 변화했음을 잘 보여주는 중요한 사례로서 취급된다. 이러한 큰 틀 아래에서 카시러는 기존에 명시적 정의 없이 가정되었던 시간 공간 개념을 상대성 이론이 ‘측정’을 통해 새롭게 정의한 것을 ‘대상 개념의 변화’로 읽는다. 이러한 새로운 정의를 통해 물리학이 다루는 대상은 시간과 공간 그 자체가 아니라 이에 관련된 측정 결과들임이 두드러지게 나타난다. 카시러는 ‘자연에 대한 단일한 설명의 추구’라는 궁극적인 목적을 추구한 결과 상대론이 등장했다고 평가하는데, 이 또한 자신의 인식론적 입장인 ‘논리적 관념론’을 전제하고 있다. 카시러에 따르면 물리학적 탐구 대상을 실체에서 기능으로 변화시키는 과정에서 물리학의 자연 설명은 더 포괄적이고 단일하게 변화한다.

비록 카시러가 상대론의 내용을 비교적 잘 이해하고 있다고 하더라도, 그의 저서가 보이는 가장 큰 특징은 칸트의 비판적 관념론을 계승한 자신의 ‘논리적 관념론’을 상대론에 비추어 적극적으로 옹호하는 것에 있다. 상대론에 의해서 제기된 칸트주의에 대한 대표적인 비판은 다음과 같다. 칸트는 유클리드 기하학의 공리들이 갖는 선험성을 옹호했으나 상대론은 비유클리드 기하학을 물리적 기하학으로 채택했다. 따라서 칸트가 주장했던 ‘선험적 종합 판단’은 반박되었다. 그러나 카시러가 볼 때 칸트는 공간을 ‘공존의

118) Cassirer (1921/1953), p. 454.

순수 형식'이고 시간을 '계열의 순수 형식'이라고 생각했으므로, 칸트 입장에서 이보다 더 강한 주장인 '공간의 유클리드적 성격'을 선험적이라고 받아들일 필요가 없다. 칸트가 선험적이라고 생각한 것은 실제로 수학자 펠릭스 클라인(Felix Klein, 1849-1925)이 제시한 에를랑겐 프로그램 속 '군(group)'의 개념이었다고 해석할 경우, 여전히 우리는 칸트가 비유클리드 기하학을 수용할 수 있다고 볼 수 있다.¹¹⁹⁾

이종관은 카시러의 철학적 분석이 갖는 중요한 한계를 지적했다.¹²⁰⁾ 그에 따르면 일반 상대론의 발전 과정에서 아인슈타인이 '등가 원리(equivalence principle)' 사고 실험을 토대로 리만 기하학을 이용하여 중력의 문제를 해결하는 게 핵심적인 역할을 했는데 이에 대한 카시러의 서술이 충분하지 않았다는 것이다. 이러한 이종관의 지적은 부분적으로 타당하다. 카시러의 입장에서는 '등가 원리' 사고 실험을 통해 일반 공변성을 도출한 것을 자신의 철학적 분석에 포함하려 하지 않았을 것이다. 왜냐하면 '등가 원리' 사고 실험은 경험적 직관에 기초하고 있지만, 카시러는 일반 공변성 원리가 상대론 내에서 선험적이고 형식적으로 기능하는 것을 더 중요하게 평가하고 그 의의를 강조했기 때문이다.

이와 관련해 조나단 에버렛(Jonathan Everett)은 이와 같은 카시러의 단점을 보완하고자 시도했다.¹²¹⁾ 에버렛은 1907년부터 1912년까지 아인슈타인이 등가 원리를 점진적으로 발전시키는 동시에 일반 공변성을 만족시키는 중력 이론을 발전시키는 과정을 비교적 설득력 있게 서술하고 있다. 에버렛의 서술 속에서 등가 원리는 경험에 기초한 원리임에도 불구하고 형식적 원리인 일반 공변성을 만족시키는 과정에서 결정적인 역할을 담당한다. 이렇듯 에버렛의 논문을 통해 등가 원리에 관해 카시러의 서술이 갖는 단점을 부분적으로 보완할 수 있다. 하지만 문제는 에버렛의 역사적 재구성이 반드시 카시러의 입장을 지지하지는 않는다는 데 있다. 설혹

119) 이 문제에 대해 논하는 마야 르브노프의 다음 논문을 참조. Lovrenov, Maja. (2006). 실제로 카시러는 물리적 기하학이 직관적 성격을 갖지 않고 물리적 대상들 사이에 성립하는 수학적 관계만을 나타낸다고 보았다.

120) 이종관 (2010), 「시간공간의 상대성과 인식의 통일성 : 카시러의 철학으로 본 상대성이론의 인식론적 의미」, 『현상학과 현대철학』 44 (한국현상학회), 89-114쪽.

121) Everett, Jonathan. (2018).

에버렛이 말하는 것처럼 아인슈타인의 등가 원리가 고전 물리학에서 충분히 수용할 수 있는 원리였다 하더라도, 이 원리를 이론의 중심축으로 삼은 것은 상대론의 독창적인 측면이자 고전 물리학과 중요하게 차별화되는 지점이었다. 따라서 상대론의 발전에 대한 에버렛의 역사적 재구성은 카시러의 ‘규제적(regulative)’ 접근법이 아닌 다른 접근법 역시 옹호할 수 있다는 문제가 남는다.¹²²⁾

무엇보다 중요한 것은 등가 원리 사고 실험에 기반하여 일반 상대론을 전개해 나갔던 아인슈타인의 사고 과정이 카시러가 생각하는 ‘자연의 단일성 추구’와 정확히 들어맞지는 않는 것처럼 보인다는 것이다. 등가 원리 사고 실험은 중력 질량과 관성 질량의 동등성이라는 잘 알려진 경험적 사실에 기초한다. 아인슈타인이 비유클리드 기하학으로 나아가게 하는 결정적 계기를 제공한 회전 원판 사고 실험 역시 강제 막대와 자연 시계라는 경험적 대상을 전제로 한 사고 실험이었다. 따라서 아인슈타인의 실제 사고 과정은 카시러가 말하는 것처럼 자연의 단일한 설명을 위한 수학적 일반성의 추구 과정과는 달랐다. 비록 사고 실험의 최종 결론인 일반 공변성이 수학적으로 정식화될 수 있다 하더라도, 우리는 물리학에서 결정적 역할을 하는 사고 실험의 결과가 어떤 결론을 도출할 것인지 사전에 수학적으로 정확히 예측할 수 없다. 따라서 일반 공변성 원리를 칸트적인 ‘규제적 원리’에 대한 근사로서 해석하는 것은 상대론이 제시된 이후 덧붙일 수 있는 사후적 해석일 뿐이다.

이처럼 카시러의 저서 『상대성 이론』은 신칸트주의적 인식론(논리적 관념론)이 상대론에 관한 적절한 철학적 해명을 제시하는지의 문제를 명시적으로 제기했다. 그리고 카시러는 상대론의 구체적 내용을 근거로 신칸트주의적인 ‘논리적 관념론’을 주장했다. 당시 상대론에 대한 철학적 해설로 명성을 얻었던 쉘리크는, 이러한 카시러의 해석을 진지하게 받아들이고 이에 대해 자신의 관점을 표명할 필요를 느꼈다. 과연 상대론에 대한 쉘리크의 해석은 카시러의 해석과 어떤 관계에 있나? 과연 쉘리크는 카시러가 상대론에 대해 제시한 카시러식의 신칸트주의적(관념론적) 해석에 동의할 것인가?

122) 예를 들어 라이헨바흐와 같이 이를 ‘동등화 원리들’의 변화로 읽을 수 있다. 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015), 강형구 (2020)에서의 논의 참조.

제4절. 술리크, 카시러의 신칸트주의적(관념론적) 해석에 반대하다

이러한 상황 속에서 술리크는 카시러의 저술이 출판된 직후인 1921년에 「상대성 이론에 대한 비판적 또는 경험적 해석?」이라는 제목으로 카시러의 『상대성 이론』에 대한 상세한 논평을 발표했다.¹²³⁾ 이 논평은 매우 중요하다. 왜냐하면 술리크의 논평 이후로 논리경험주의의 시공간 철학이 신칸트주의적 입장과 분리되고 차별화되어 본격적으로 발전하기 시작했기 때문이다. 결과적으로 술리크는 카시러가 제시한 관념론적인 상대론 해석에 반대하고, 신칸트주의적 관념론과는 차별화되는 방식으로 상대성 이론의 철학적 의의 특히 상대론적 시간과 공간의 경험적 의의를 해명하는 것이 필요하다는 결론에 이르렀다.¹²⁴⁾

이 논평에서 술리크는 과연 칸트주의가 새로운 물리학이 제시한 세계상을 포괄할 수 있을 정도의 강함과 유연함을 갖는지 묻는다. 술리크는 이 물음에 대해 부정적 관점을 취하며, 상대론은 칸트주의적 관점에서가 아닌 ‘경험주의적 관점’에서 해석해야 한다고 본다. 그러나 술리크는 마흐가 제시한 강한 종류의 경험주의인 ‘현상주의적 관점’을 취하지는 않는다. 술리크는 칸트주의적 관점과 현상주의적 관점 사이의 양자택일을 주장한 카시러의 주장과 달리, 두 관점 사이에 ‘제3의 길’이 있음을 주장한다.

술리크는 관측과 측정에 특정한 원리들이 전제되며 이 원리들이 물리적 대상의 개념을 구성한다는 카시러의 주장을 받아들인다. 또한 그는 이러한 원리들로 인해 마흐의 감각주의적이고 현상주의적인 입장을 끝이끝대로 받아들이기 어렵다는 사실 또한 인정한다. 하지만 술리크가 볼 때 이러한

123) Schlick, Moritz. (1979), “Empirical or Critical Interpretation of Modern Physics?” in H. Mulder and B. van de Velde-Schlick, eds. *Mortiz Schlick : Philosophical Papers. vol. I.* (Dordrecht: Reidel, 1979).

124) 카시러의 저술에 대한 술리크의 1921년 논평이 이후 논리경험주의 시공간 철학에 구체적으로 어떤 영향을 미쳤는지를 상세하게 논하는 연구는 현재로서 찾을 수 없는 상황이다. 대부분 술리크가 카시러에 반대하여 논리적 관념론과 엄격한(마흐식의) 경험주의 사이에 제3의 길이 있음을 주장했다는 것에 대해 언급한다. (대표적인 예로, Oberdan. (2017) 참고) 그러나 내 생각에 술리크의 논평이 이후의 시공간 철학 발전에 끼친 영향에 대한 좀 더 상세한 연구가 필요하다. 아래에서 제시되는 나의 해석은 이에 대한 하나의 ‘가능한 해석’이 될 것이다.

원리들은 카시러가 말하는 ‘선험적 종합 원리’라기보다는 ‘구성적 원리’이고, 이러한 구성적 원리들은 푸앵카레가 말한 ‘가설’ 또는 ‘규약’이라 볼 수 있다. 그렇다면 구체적으로 솔리크는 왜 상대론에 대한 신칸트주의적인 해석에 반대하여 경험주의적 해석을 옹호할까?

우선 솔리크는 칸트 스스로가 유클리드 기하학과 갈릴레이 역학의 공리들이 선험적 성격을 갖고 있다고 믿었음을 지적한다. 그러나 상대론의 등장으로 인해 유클리드 기하학과 갈릴레이 역학의 공리들이 타당하지 않음이 밝혀짐으로써 칸트의 믿음 또한 옳지 않았음이 드러났다. 물론 카시러를 포함한 신칸트주의자들 역시 칸트가 제시한 형태 그대로의 칸트주의를 옹호하기는 어렵다는 사실을 인정한다. 하지만 솔리크가 보기에 신칸트주의자들의 문제는 이들이 새롭게 등장한 물리학 이론을 근거로 ‘순수 시간’과 ‘순수 공간’의 개념을 재해석하는 데 있다. 솔리크에 따르면 이러한 재해석은 결과적으로 ‘새롭게 등장한 이론에 비추어’ 이루어지므로, 새로운 이론이 실제로 등장하지 않는 이상 이들이 말하는 ‘순수 시간’과 ‘순수 공간’ 개념은 실질적인 내용을 갖지 못한다.

과연 상대론 내의 어떤 원리를 관념론자들이 주장하는 ‘선험적 종합 원리’라고 말할 수 있을까? 아인슈타인이 강조한 ‘점-일치(point-coincidence)’ 개념인가? 혹은 새로운 기하학에서 전제하고 있는 연속적인 ‘선-요소(line element)’ 개념인가? 이 물음들에 대해 솔리크는 부정적으로 답한다. ‘점-일치’ 역시 경험에 기반한 개념이므로 선험적으로 타당하다고 말할 수 없다. ‘선-요소’의 경우 이미 수학적으로 불연속적 공간 결정이 가능성이 밝혀져 있으며, 우리가 양자(quantum) 이론의 불연속성을 고려하면 이를 선험적으로 타당하다고 할 수 없다. 솔리크가 볼 때 결국 카시러를 비롯한 신칸트주의자들은 ‘자연의 단일성’ 개념에 호소하겠지만, 자연의 단일성 개념은 그 자체로 추상적일 뿐이며 그것이 구체적 내용을 얻기 위해서는 실제적인 물리학 이론에 호소해야 한다. 솔리크에 따르면 우리는 자연의 단일성 개념이 ‘경험을 통해 확인’되기 때문에 믿는 것이지, 경험과는 별도로 구분되는 ‘초월적 연역’을 통해 믿는 것이 아니다.¹²⁵⁾

125) 이와 같은 솔리크의 논지와 전반적으로 같은 평가가 라이헨바흐의 1922년 논문인 “상대성에 대한 논의의 현재 상태 : 비판적 탐구”에 제시되고 있다는 점을 주목할 필요가 있다(Reichenbach. (1922) 참고). 결국 솔리크와 라이헨바흐가 동의한

이상과 같은 카시러에 대한 논평에서 솔리크가 의도한 것은 상대론에 대한 신칸트주의적 해석을 완전하게 논박하는 것이 아니었다. 대신 솔리크는 상대론에 대한 신칸트주의적 해석이 유일하게 가능한 철학적 해석이 아니며, 경험주의적 해석 또한 이와 비견될 만큼의 타당성을 가질 수 있음을 주장하고자 했다. 솔리크가 볼 때 아인슈타인이 상대론에 이르러 시간과 공간이 그 물리적 객관성을 상실한다고 주장하기는 했지만, 칸트주의자인 카시러가 해석하는 것처럼 시간과 공간이 단순한 형식에 불과하게 되는 것은 아니다. 또한 일반 공변성은 운동의 관계론적 관점이라는 마호적인 경험적 통찰을 그 근거로 하므로, 이를 카시러와 같이 수학적이고 형식적인 제약 조건으로서만 이해해서는 안 된다. 마지막으로 솔리크는 상대론에 대한 라이헨바흐의 저서 『상대성 이론과 선험적 지식』을 언급하며, 우리가 구성적 원리들을 ‘가설’ 혹은 ‘규약’으로서 받아들인다면 비판적 관념론과 다른 경험주의적 관점에서 상대론을 철학적으로 해석할 수 있음을 주장한다. 결국 이 논평을 통해 솔리크는 상대론에 대한 신칸트주의적 해석에 대항하기 위해 상대론의 경험적인 측면을 강조하는 철학적 분석이 추가로 필요함을 인지하게 된 것이다.

아인슈타인 역시 카시러에 대한 이상과 같은 솔리크의 비판에 대해 전반적으로 동의했다.¹²⁶⁾ 비록 일반 상대론을 추구하는 과정에서 카시러가 말한 것처럼 일반 상대성을 일반 공변성으로 수학적으로 공식화한 게 중요한 역할을 한 것은 사실이지만, 우리가 지금껏 살펴본 것처럼 아인슈타인의 사고 전개에서는 강제 막대, 자연 시계와 같은 구체적인 물리적 과정 및 우리의 경험에 기초한 원리들(상대성 원리, 최초 신호로서의 빛 원리, 등가 원리)을 활용한 사고 실험이 수학적 형식론 이전에 핵심적인 역할을 담당했기 때문이다. 이처럼 구체적 물리 과정, 경험 원리, 사고 실험을 토대로 완성된 상대론을 ‘자연의 형식적 단일성 추구’ 결과로 해석하는 것은, 아인

결정적인 부분은 오직 경험을 통해서만 자연의 단일성이 확인되므로 논리적 관념론에서 주장하는 (규제적인) ‘자연의 단일성’은 사후적이고 공허하다는 것이다. 두 사람이 ‘상대화된 선험’ 개념 대신 ‘규약’ 개념을 사용하기로 합의한 것은, 이와 비교할 때 다소 ‘사소한’ 동의라고 할 수 있다.

126) 이는 아인슈타인이 카시러에게 보낸 편지와 그가 솔리크와 나눈 서신 교환의 내용을 통해 알 수 있다. 이와 관련하여 Howard. (1991), p. 54, p. 56 참조. 전반적으로 아인슈타인은 카시러에 대한 솔리크의 논평과 유사한 관점을 취하고 있다.

슈타인이 볼 때 카시러가 상대론의 경험적 의의를 왜곡하고 특정한 철학적 관점에 일방적으로 부합하는 방식으로 해석하는 것처럼 여겨졌다.¹²⁷⁾

술리크가 볼 때 상대론에 대한 카시러의 신칸트주의적(관념론적) 해석은, 일반 상대론에서 물리적 좌표가 그 직접적인 측정의 의미를 잃는 것이 곧 시간과 공간이 그 물리적 객관성을 잃는 것을 의미하는지의 문제를 경험주의의 관점에서 더 상세하게 탐구할 필요성을 느끼게 했다. 비록 술리크 역시 주관적 시간 및 공간을 객관적 시간 및 공간과 구분하긴 했지만, 술리크는 객관적 시간 및 공간 또한 주관적 시간 및 공간 경험으로부터 ‘구성’된다고 보는 관점을 취하고 있었기 때문이다. 그렇기에 그는 시간과 공간으로부터 경험적 요소를 제거하고, 시간과 공간을 ‘순수 형식’으로 보는 카시러의 관점을 수용할 수 없었을 것이다. 그러므로 술리크는 상대론 속 시간과 공간의 의미를 우리의 경험과 연결하는 추가적인 철학적 논의가 필요하다고 결론 내렸다.

이상과 같은 술리크와 카시러 사이의 의견 차이와 관련하여 비교적 최근의 논자인 리크먼(Ryckman)은 카시러가 일반 공변성 원리를 일종의 ‘규제적 원리’로서 강조했다는 점을 높이 평가했다.¹²⁸⁾ 리크먼에 따르면 강체 막대와 자연 시계를 이용하여 일반 상대성의 인식적 의미를 포착하고자 했던 논리경험주의의 입장은 이후의 이론 물리학 발전에 따라 그릇되었음이 밝혀졌다. 이와 달리 일반 상대성의 인식적 의미는 그것의 수학적 원리인 일반 공변성에서 찾아야 하고, 카시러가 논리적 관념론의 입장에서 이러한 일반 공변성 원리를 강조하였으므로, 그의 일반 상대성 해석이 논리경험주의에 비해 더 적절한 철학적 해석이었다는 것이다.¹²⁹⁾

하지만 이후 라이헨바흐가 논리경험주의 시공간 철학을 발전시키면서 강체 막대, 자연 시계, 빛 신호와 같은 구체적인 물리적 과정(대상)을 중심으로 시공간의 공리체계를 재구성한 것은, 상대론이 측정 물체를 통해 시간과

127) 아인슈타인의 이러한 관점은 1933년 허버트 스펜서 강연에서 그의 다음과 같은 언급에서도 알 수 있다. “...개념과 원리는 인간 지성의 자유로운 창안물이기에 인간 정신의 본성에 의해서나 다른 선형적인 방식으로 정당화될 수 없습니다.”

128) Ryckman, Thomas. (2018), “Early Philosophical Interpretations of General Relativity” from *Stanford Encyclopedia of Philosophy* 중 3장 “칸트적, 신칸트주의적 해석” 참조.

129) Ryckman, Thomas. (2005)의 2장(13-46쪽) 참고.

공간 개념을 물리적으로 구현한 이론임을 감안할 때 자연스러운 철학적 분석이었다. 또한 이후의 상대론 발전에도 불구하고 여전히 구체적인 물리적 과정(빛 운동, 질점의 자유 운동)을 통해서 시공간 계량을 경험적으로 결정하고 있으므로 논리경험주의 시공간 철학의 오류가 밝혀졌다고 보기도 어렵다. 만약 리크먼이 그렇게 판단한다면 이는 그가 논리경험주의 시공간 철학의 핵심을 물리적 기하학의 ‘규약주의’로서 파악하고 있기 때문이다.¹³⁰⁾

리크먼은 카시러가 비판적 관념론의 관점에서 강조한 일반 공변성 개념이 이후의 물리학 발전과도 부합함을 강조했다. 하지만 이와 같은 그의 해석은 앞서 술리크가 카시러의 해석에 대해 지적한 것과 정확히 같은 종류의 문제를 갖는다. 물리학 이론 속 특정한 개념이 규제적인 원리인지 그렇지 않은지는 역사적 발전 과정에서 제시되는 구체적인 물리학 이론의 등장을 통해 드러날 뿐이다. 그런데 우리는 미래 물리학 발전에 따라 이전까지 구성적이라 여겨졌던 원리가 더 이상 구성적이지 않음이 밝혀질 가능성을 배제하지 못한다. 이에 대해 카시러와 리크먼은 다음과 같이 답할 것이다. 정밀과학은 점점 더 수학화되고, 순수 수학은 좀 더 일반화되는 방식으로 변화하여 이전까지의 수학적 개념들을 일종의 근사로 만들도록 발전하는 까닭에, 우리는 미래의 그 어떤 시점에서든 그 시점의 정밀과학이 그 이전 시점의 정밀과학보다 개념적으로 더 단순함을 보일 수 있다. 하지만 이런 해석은 늘 실제로 이루어지는 물리학의 이론적 발전에 의존하는 일종의 ‘사후 처방’이란 특성을 여전히 가지고 있게 될 것이다.

제5절. 결론

지금껏 과학철학의 역사, 특히 논리경험주의의 역사에서 아인슈타인, 상대론, 논리경험주의자(술리크, 라이헨바흐, 카르납) 사이의 관계는 중요한 관심 주제가 되어 왔다. 역사적 탐구를 통해 아인슈타인이 초기에 논리경험주의의 상대론 해석을 적극적으로 지지하였으나 점차 논리경험주의의

130) 내가 볼 때 논리경험주의 시공간 철학의 핵심은 ‘시공간에 대한 인과적 이론’이라는 점이며, 세계 속 인과적 과정(계량적 특성과 대비)의 실재성을 긍정했다는 데 있다. 이러한 나의 관점은 본 논문의 6장에서 더 상세하게 제시될 것이다.

철학적 입장과 거리를 두었다는 사실이 밝혀졌다. 비교적 최근에는 아인슈타인이 뒤엠(Duhem)의 전체론적 입장에 가까웠다고 평가하는 관점(하워드)과 상대론에 대한 카시러의 철학적 해석이 논리경험주의의 철학적 해석보다 더 타당했다는 관점(리크먼)이 제시되었다. 하지만 이러한 해석들은 상대론을 리만에서 시작하여 발전한 ‘시간과 공간의 물리적 구현’이라는 맥락에서 이해해야 한다는 점을 간과하고 있다.

술리크의 『현대 물리학의 시간과 공간』(1917년)은 실로 여러모로 중요한 저서였다. 술리크 자신이 ‘동등화의 유일성’이라는 개념을 통해 아인슈타인이 ‘점-일치 논증’을 제시하는 데 핵심적인 역할을 했고, 그는 아인슈타인이 물리학 논문에서는 제시하지 못했던 철학적 입장에 대한 설명을 아인슈타인의 ‘대리자’인 양 친절하게 제시했다. 특히 술리크의 저서는 상대론이 발표된 직후에 출판된 저서 중 ‘구멍 논증’ 및 ‘점-일치 논증’에 대한 상세한 철학적 해명을 담고 있는 독특한 저서였다. 실로 이는 적지 않은 철학적 성취였으며, 물리학자가 아닌 철학자로서 술리크의 위상을 높였다. 그러나 술리크 본인이 인정했듯 그의 저서는 대중적이었고 상대론의 핵심 문제인 시간과 공간의 물리적 객관성 문제 및 측정 기준 물체의 인식적 의의에 관한 상세한 철학적 분석을 담고 있지 않았다. 아인슈타인이 술리크의 책을 크게 환영했던 것은 술리크의 책이 자신의 철학적 주장들 대부분을 수용하며 이를 상세하게 해명해주었기 때문이다.

이러한 상황에서 신칸트주의적 관점에서 집필된 카시러의 1921년 저서 『아인슈타인의 상대성 이론』은 아인슈타인과 술리크에게 도전장을 던졌다. 카시러는 정밀과학의 수학적 발전을 통해 점점 과학적 개념들이 경험적이고 직관적인 특성을 잃는 대신 물리적 대상 사이의 기능적(함수적) 관계를 정량적이고 수학적인 방식으로 기술함으로써 점차 자연 설명의 단일성이 제고된다고 해석했다. 또한 카시러는 상대론이 자신의 신칸트주의적 인식론인 논리적 관념론을 지지하는 동시에 마흐의 엄격한 현상주의적 관점을 지지하지 않는다고 주장했다. 이러한 카시러의 주장은 수학과 물리학에 대한 상당한 수준의 이해를 바탕으로 한 것이었기에 더 위협적이었다. 하지만 술리크와 아인슈타인은 이러한 카시러의 해석이 상대론적 시간과 공간이 갖는 경험적 특성을 공정하게 평가하지 못하고 과도하게 관념론에 치우친

해석이라고 보았다.

상대론이 시간과 공간을 물리적으로 구현한 이론이었던 것만큼 이와 관련하여 가장 논란이 된 것은 시간과 공간의 인식적 의미에 관한 문제들이었다. 그렇기에 상대론 속 시간과 공간의 경험적 의미를 좀 더 체계적으로 해명할 필요가 있었다. 그런데 마흐의 현상주의적 관점은 이러한 해명에 적합하지 않아 보였다. 왜냐하면 현상주의적 관점은 이상화된 측정 물체들의 행태에 대한 가정, 상대성 원리와 같은 물리학 원리들, 시간과 공간의 물리적 운동학을 수립할 때 요구되는 정의의 의미 등을 설명하는 데 있어 적절치 않기 때문이다.

만약 솔리크가 카시러에 대한 1921년의 논평 이후 경험을 강조하는 관점에서 상대론적 시간과 공간을 추가로 분석하는 저서를 집필하여 출판했다면 논리경험주의 시공간 철학의 대표자는 솔리크가 되었을 것이다. 그러나 솔리크는 『현대 물리학의 시간과 공간』 이후 그러한 저서를 집필하지 않았다. 솔리크는 상대론에 대한 철학적 해설로 명성을 얻고 플랑크와 아인슈타인의 지지를 얻어 비엔나 대학의 철학 교수¹³¹⁾로 부임한 후, 물리학 이론에 대한 구체적인 철학적 분석 작업과 다소 거리를 두기 시작했다. 솔리크의 뒤를 이어 상대론 속 시간과 공간의 문제에 대한 체계적인 철학적 분석을 제시한 학자는 이후 논리경험주의의 대표자가 된 두 학자인 라이헨바흐(Reichenbach)와 카르납(Carnap)이었다.

카시러가 신칸트주의를 변환함으로써 이를 부활시켜 과학적 인식론의 기반으로 삼으려고 했다면, 젊은 라이헨바흐는 같은 시기에 카시러와 유사한 신칸트주의적 문제의식에서 출발하여 칸트주의와의 결별이라는 다른 결론에 다다랐다. 라이헨바흐에 따르면 상대론은 칸트의 ‘선형적 종합’ 개념뿐만 아니라 ‘이성의 분석’이라는 칸트의 철학적 방법론 또한 유지될 수 없음을 보였다. 과학적 인식론이 칸트와 다른 방법론을 택해야 한다는 결론을 내린 점에서 라이헨바흐는 솔리크와 입장을 함께 했다.

그런데 솔리크 이후 등장한 라이헨바흐와 카르납의 시공간 철학을 본격적으로

131) 이 자리는 마흐(Mach)와 볼츠만(Boltzmann)이 담당한 바 있었던 “귀납적 과학의 역사와 철학” 교수 자리였다. 이때가 1922년 경이다. 솔리크가 비엔나 대학 부임 이후 왜 물리학에 대한 구체적인 철학적 분석을 멈추었는지는 향후 추가적인 철학사적 연구가 필요한 흥미로운 주제이다.

다루기 전에 우리가 살펴보아야 할 중요한 개념은 라이헨바흐가 1920년에 제시한 ‘상대화된 선험성(relativized a priori)’이다. 이 개념은 카시러의 ‘자연의 단일성 추구’ 개념과 대조되며 칸트식 과학 인식론이 유지될 수 없음을 지지하는 강력한 근거이다. 또한 이 개념은 근래의 철학자 프리드먼(Friedman)에 의해 21세기 ‘과학적 철학’을 위한 핵심적 지침으로 부활했다. 따라서 다음 장에서 나는 ‘상대화된 선험성’ 개념이 출현하게 된 맥락 및 그 철학적 의의와 한계가 무엇인지를 상세히 논하고자 한다.

제4장. ‘상대화된 선형성’과 ‘과학적 지식 분석’의 방법론¹³²⁾

제1절. 서론

근래의 과학철학의 논의에서는 1910년-1920년경에 오스트리아의 비엔나와 독일의 베를린에서 등장하여 1930년경에 이르러 정점에 달하고 이후 분과학문으로서의 과학철학이 성립하는 데 결정적인 역할을 한 “논리경험주의(logical empiricism)”에 대한 역사적 재평가가 활발하게 이루어지고 있다. 특히 과학철학자 마이클 프리드먼(Michael Friedman)은 『논리실증주의를 다시 생각한다(Reconsidering Logical Positivism)』¹³³⁾에서 콰인(W. V. Quine) 이후 형성된 논리경험주의에 대한 전형적인 부정적 평가에 반대했다. 그는 논리경험주의를 좀 더 정확한 문맥에서 종합적으로 이해한다면 논리경험주의의 철학적 기획이 상당히 합리적이었을 뿐만 아니라 오늘날의 과학철학에도 중요한 함축을 가짐을 주장했다. 뒤이어 프리드먼은 『이성의 역학(Dynamics of Reason)』을 통해 콰인 이후 철학계를 지배하고 있는 ‘철학의 자연화’ 경향에 반대하면서, 자연과학과 밀접하게 관련되면서도 여전히 자연과학과는 차별화되는 ‘과학적 철학’의 이념을 재정립하고자 했다.¹³⁴⁾

이처럼 논리경험주의의 역사를 재조명하고 다시 쓰고자 하는 프리드먼의 관점에서 새롭게 부활하고 재조명되어야 할 필요가 있는 중요한 철학자는 단연 루돌프 카르납(Rudolf Carnap)이다. 프리드먼은 카르납의 언어철학에서 볼 수 있는 ‘상대화된 선형성’의 개념을 강조하며, 카르납이 자신의 철학에서 포용한 이 개념을 과학철학자 토머스 쿤(Thomas Kuhn, 1922-1996)의 역사적 관점과 결합하고자 시도했다. 프리드먼에 따르면 ‘과학적 철학’의 중요한 기능은 철학 고유의 성찰을 통해 선형적이고 구성적인 원리들을 과학에 제공함으로써 과학이 새로운 혁신을 이룰 수 있도록 개념적 가능성의

132) 이 장에서의 논의는 강형구 (2020)에서의 논의를 바탕으로 하고 있다.

133) Friedman, M. (1999), *Reconsidering Logical Positivism*, New York : Cambridge University Press.

134) 마이클 프리드먼, 박우석·이정민 옮김 (2001/2012), 『이성의 역학 : 새로운 과학적 철학을 위한 서설』 (서광사) 참조.

공간을 제공하고, 이후 새로운 원리들을 전제하는 과학이 과학자 공동체 내에서 합리적으로 수용될 수 있도록 정당화하는 것이다. 이처럼 프리드먼의 서술에서 중요한 역할을 하는 ‘상대화된 선험성’ 개념이 처음 출현한 것은 카르납과 함께 논리경험주의를 대표하는 한스 라이헨바흐(Hans Reichenbach)의 1920년 저서 『상대성 이론과 선험적 지식』이다.

프리드먼은 과학의 역사적 전개에 따라 변화할 수 있으면서도 여전히 과학적 지식의 기초가 되어 구성적인 역할을 맡는 선험적 원리들의 존재를 철학적으로 포착했다는 점에서 라이헨바흐의 ‘상대화된 선험성’ 개념을 높이 평가한다. 하지만 프리드먼은 라이헨바흐가 1920년의 『상대성 이론과 선험적 지식』 출판 이후 시작한 술리크와의 서신 교환을 통해 ‘상대화된 선험성’ 개념 대신 푸앵카레(Poincare)의 ‘규약’ 개념을 사용하게 되었고, 이를 통해 결과적으로는 원래 자신이 제시한 ‘상대화된 선험성’ 개념이 갖고 있던 이론 구체적인 ‘구성적 원리들’의 철학적 중요성을 잃게 되었다고 서술한다. 이러한 프리드먼의 역사적 재해석 속에서 라이헨바흐 이후 ‘상대화된 선험성’ 개념을 철학적으로 부활시키는 것은 언어철학을 주창한 카르납이다.

이상과 같은 프리드먼의 역사적 서술은 두 가지 점에서 문제가 있다. 첫째, ‘상대화된 선험성’ 개념은 당시 새롭게 떠오르고 있던 과학철학이 이전까지의 칸트주의 인식론적 기획에 중요한 문제가 있음을 지적하고 이를 상당 부분 변혁시키려 했음을 잘 보여준다는 점에서 분명 중요하지만, 내가 볼 때 이 개념의 중요성에 대한 프리드먼의 강조에는 다소 과장된 측면이 있다. 구성적 원리들이 역사적으로 상대화되고 변화 가능하다는 결론은 상대성 이론의 ‘역사적 의의’를 철학적으로 평가하는 데 필요한 것이었지만, 이전 장에서 살펴본 카시러의 관념론적 상대론 해석이 제시된 이후 더 중요한 것은 상대론 속 시간과 공간의 경험적 의의에 대한 구체적이고 상세한 철학적 분석을 제시하는 것이었다.¹³⁵⁾

둘째, 프리드먼은 라이헨바흐가 1920년 이후 ‘상대화된 선험성’ 및 ‘구성적 원리’ 개념이 원래 갖고 있던 의의를 상실하고 술리크와 함께 이론 일반적인 의미에서 물리적 기하학을 바라보는 ‘규약주의’ 입장으로 선회했다고 평가

135) 카시러에 대한 술리크의 1921년 논평이 상대론적 시공간의 경험적 내용에 대한 더 상세한 철학적 해석을 촉발했고 이것이 라이헨바흐의 시공간 철학에도 영향을 미쳤다는 것이 나의 해석이며, 이에 관해서는 앞 장인 제3장에서의 논의를 참고하라.

했는데, 이러한 평가는 라이헨바흐에 대한 공정한 평가라 할 수 없다. 왜냐하면 1920년 이후의 저작들에서도 라이헨바흐는 물리학 속 ‘구성적 원리들을 식별하여 드러내는 것’이 과학 인식론의 중요한 임무임을 강조했다기 때문이다. 상대론적 시공간에 대한 분석 속에서 그가 경험적 진술과 임의적 정의를 구분했지만, 여전히 그는 이론 구체적인 분석 및 재구성 과정에서 물리학을 구성하는 역할을 하는 특정한 원리들을 받아들이며 물리적 지식의 위계적 질서를 긍정하고 있다. 또한 1920년 이후 라이헨바흐가 전개한 상대론적 시공간의 철학은 푸앵카레와 솔리크에서 볼 수 있는 ‘규약주의’적 특성보다는 헬름홀츠에게서 볼 수 있는 ‘경험주의’적 특성을 더 강하게 나타내고 있다.

라이헨바흐의 『상대성 이론과 선험적 지식』은 새로운 과학철학의 시작을 알리는 일종의 ‘과도기적’ 저서였다. 아인슈타인의 ‘철학적 대리인’과도 같았던 솔리크에 대해 카시러가 상대론에 대한 신칸트주의적(관념론적) 해석으로 도전한 상황에서, 라이헨바흐의 저서는 칸트를 넘어 새로운 ‘과학적 철학’으로 나아가는 일종의 징검다리 역할을 했다. 라이헨바흐는 『상대성 이론과 선험적 지식』에서 카시러와는 달리 칸트식의 ‘이성에 대한 분석’이 아닌 ‘과학적 지식의 분석’이라는 새로운 철학적 방법론을 제시했다. 그렇기에 이는 새로운 철학을 알리는 ‘시작’에 지나지 않았고 우리가 더 주목해야 하는 것은 그 후 라이헨바흐가 진행한 시공간의 ‘경험주의적 분석’이다.

내가 본 장에서 보이고자 하는 것은 크게 두 가지이다. 우선 나는 프리드먼의 철학적 재구성 속에서 부분적으로만 그 모습을 드러내는 라이헨바흐의 『상대성 이론과 선험적 지식』을 좀 더 정확하게 재구성할 것이다. 이러한 재구성을 통해 프리드먼의 서술 속에서는 발견할 수 없었던 이 책의 중요한 측면들이 드러날 뿐만 아니라, 이 책의 강조점이 이후의 저서 『상대성 이론의 공리화』와 연결되는 지점들을 발견할 수 있을 것이다. 다음으로 나는 라이헨바흐가 1920년 이후에도 여전히 과학 이론의 토대가 되는 구성 원리 개념을 유지하고 있을 뿐만 아니라 상대론적 시공간에 대한 ‘경험주의적’ 관점을 발전시켰음을 보이겠다. 이를 통해 나는 라이헨바흐가 1920년 이후 상대화된 선험성 개념 고유의 의의를 잃어버리고 솔리크와 함께 이론 일반적인 규약주의로 철학적 관점을 전향했다는 프리드먼의 해석에 문제가 있음을 보일 것이다.

제2절. ‘상대화된 선형성’ 개념 : 그 출현 배경과 의의

라이헨바흐는 1915년에 에를랑겐 대학에서 박사학위를 취득했다. 그는 자신의 박사학위 논문에서 확률의 법칙이 자연과학 탐구에서 칸트가 말한 일종의 ‘선형적 종합 판단’의 역할을 한다고 주장했으며, 이 논문은 명백히 칸트적 인식론의 연장선에 있었다. 제1차 세계대전에 참전한 후 학계를 떠나 베를린의 통신회사에서 공학자로 근무하던 라이헨바흐가 다시 대학으로 돌아와 교수자격 취득논문을 집필하도록 만든 결정적 계기는 아인슈타인의 상대론이었다. 칸트의 인식론을 승계 및 발전시켜 이를 과학지식의 인식론으로 유지할 수 있을 것이라 믿었던 여러 학자 중 하나였던 라이헨바흐에게 상대론은 하나의 충격이자 도전이었다. 상대론에 관한 독립적 연구 및 1919년 베를린 대학에서 열린 아인슈타인의 첫 번째 일반 상대론 세미나에 참석한 이후, 라이헨바흐는 상대론에 대한 본격적인 ‘철학적 분석’을 시작했다.

1920년 출판된 라이헨바흐의 교수자격 취득논문 『상대성 이론과 선형적 지식』은 아인슈타인에게 헌정된 책¹³⁶⁾으로서, 이후 라이헨바흐가 진행할 상대론에 대한 철학적 분석의 서곡 역할을 한다. 이 책에서 그가 다루고 있는 핵심 물음은 “어떻게 칸트의 선형적 원리들이 상대성 이론에 의해 반박될 수 있었는가?”이다. 1919년 5월 29일에 실시된 에딩턴(Eddington)의 일식 관측을 통해 아인슈타인의 중력장 방정식이 제시한 예측이 입증된 것을 감안하면, 라이헨바흐의 이 물음은 상대론이 경험적으로 잘 입증된 이론임을 전제한다. 이는 칸트가 뉴턴 물리학의 타당성을 가정한 후 “어떻게 순수 수학과 순수 자연과학이 가능한가?”라는 물음을 던진 것과 유사하다. 물론 위의 두 질문 사이에는 중요한 차이가 있다. 칸트는 뉴턴 물리학의 기초가 이후에도 자연과학의 유일한 기초 역할을 할 것이라 믿었지만, 라이헨바흐는 상대론이 뉴턴의 물리학을 대체한 상황에서 그러한 대체가 어떻게 이루어질 수 있었는지 묻고 있다.

136) 아인슈타인의 첫 번째 일반 상대론 세미나(참석 인원은 5명 내외의 소수였다)에 참석한 이후 라이헨바흐와 아인슈타인은 평생 친근한 관계를 유지하게 된다. 이 과정에서 상대론적 시공간의 철학적 의의에 관한 아인슈타인의 주된 대화 상대자는 슐리크에서 라이헨바흐로 바뀐다.

먼저 라이헨바흐는 특수 및 일반 상대론이 어떤 방식으로 칸트의 선험적 원리들과 모순을 일으켰는지를 분석한다. 특수 상대론이 전제하는 원리들은 “균일하게 움직이는 좌표계들의 상대성 원리”, “불가역적인 인과성의 원리”, “접촉에 의한 작용의 원리”, “표준적 귀납의 원리”이고, 이는 칸트적 의미에서 선험적 원리들이다. 그런데 이 원리들이 “근사적 이상의 원리” 및 “절대적 시간의 원리”와 결합하면 실험적 관측 결과들과 모순을 일으킨다.¹³⁷⁾ 여기서 “근사적 이상의 원리”는 “절대적 시간의 원리”와 밀접한 관계를 갖는다. 전자의 원리에 따르면 우리는 조금씩 속도를 올려 무한대의 속도로 전파하는 물리적 과정(신호)을 얻을 수 있고, 이를 통해 후자인 절대적 시간의 원리를 만족시킬 수 있기 때문이다. 물리학의 실험 결과들을 통해 이 두 원리는 성립하지 않음이 밝혀졌다. 이 원리들을 반증으로부터 구해낼 방법이 없지 않지만, 그러한 구제를 위해서는 특수 상대론이 전제하는 다른 원리를(예를 들어 “접촉에 의한 작용의 원리”나 “표준적 귀납의 원리”) 포기해야 한다. 만약 특수 상대론의 경험적 타당성을 전제하면 이 이론은 칸트적 의미의 선험적 원리인 “근사적 이상의 원리” 및 “절대적 시간의 원리”와 양립 불가능하다.

이와 유사한 논증이 일반 상대론에 대해서도 제시된다. 일반 상대론은 물리적 기하학이 유클리드 기하학이 아닌 비유클리드 기하학임을 주장하고 있으며, 이러한 주장은 균일한 장의 좌표계에서 비균일한 장의 좌표계로 이행하는 것과 연관되어 있다.¹³⁸⁾ 유클리드 기하학을 유지하면서도 이러한 이행은 가능하다. 왜냐하면 두 조건, 즉 “(a) 균일한 장에서는 이론이 특수 상대성 이론과 동등하게 되어야만 한다.”, “(b) 이론은 모든 조건에서 유클리드적 좌표를 선택하는 것을 허용해야만 한다.”¹³⁹⁾를 만족하는 이론을 구성할 수 있기 때문이다. 그런데 라이헨바흐에 따르면 일반 상대론에서 아인슈타인은 위의 두 조건과 다른 조건인 “(c) 장의 모든 점에서, 이론은 무한소 영역에서 특수 상대성 이론을 만족시켜야 한다.”를 사용했고, 이 조건 (c)는 조건 (b)와 양립 불가능하다.¹⁴⁰⁾

137) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015), 『상대성 이론과 선험적 지식』 (지식을만드는지식), 36쪽.

138) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015), 37쪽.

139) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015), 39쪽.

아인슈타인이 제시한 조건 (c)는 중력장의 연속성, 공간의 균질성, 등가 원리(principle of equivalence)에 의존한다. 따라서 일반 상대론은 다음과 같은 원리들의 집합을 전제한다. “특수 상대성의 원리”, “표준적 귀납의 원리”, “일반적 공변의 원리”, “법칙들의 연속성 원리”, “물리적 크기들의 연속성 원리”, “공간의 균질성의 원리”. 이 집합에 칸트의 선험적 원리인 “공간의 유클리드적인 성격의 원리”¹⁴¹⁾가 추가되면 원리들 상호 간의 양립 불가능성이 발생한다. 즉, 공간의 유클리드적 특성은 일반 상대론이 전제하는 원리들과 양립 불가능하다. 만약 일반 상대론이 경험적으로 타당하면 공간의 유클리드적 특성을 포기해야 한다.

이처럼 라이헨바흐는 특수 및 일반 상대론이 전제하는 원리들이 칸트적인 의미에서의 몇몇 선험적 원리들과 양립 불가능하고, 만약 상대성 이론의 경험적 타당성이 충분히 입증되었다면 후자의 원리들은 유지될 수 없음을 철학적 분석을 통해 논증했다. 상대론의 원리들에 의해 칸트의 원리 중 일부가 대체된 것을 잘 수립된 사실로서 받아들이기로 하자. 그렇다면 과연 어떤 방식으로 상대론의 원리들이 칸트적인 선험적 원리들을 대체할 수 있었는지 설명해야 하는 문제가 남는다. 칸트에 따르면 선험적 원리들은 경험의 대상을 정의하는 ‘경험의 전제 조건’인데, 어떻게 새로운 물리학 이론의 등장으로 경험의 전제가 되는 선험적 원리 중 일부가 포기되고 이들이 새로운 원리들에 의해 대체되었을까?

물리학은 수학적 방정식을 그 언어로 사용하지만 수학과 달리 외부 세계를 다룬다. 수학에서는 사전에 두 집합을 이루는 원소들을 완전히 정의한 후 각 집합의 원소들 사이에 대응 관계를 수립할 수 있지만, 물리학에서는 수학과는 상황이 달라진다. 인간은 외부 세계라는 집합의 구성원들이 무엇인지 정확히 알지 못하기 때문에, 특정한 방식으로 수학 방정식과 외부 대상들을 ‘동등화(또는 조율, coordination)’해야 한다.¹⁴²⁾ 물리학은

140) 비균일한 중력장에서 서로 다른 영역 A와 B가 상대적으로 가속 운동한다고 하자. A의 미소 영역에서 K_1 을 관성계로 간주할 수 있고, B의 미소 영역에서 K_2 를 관성계로 간주할 수 있을 때(조건 C), 공간의 유클리드적 특성을 유지하려면 (조건 B) K_1 과 K_2 이 서로 상대적으로 등속 운동해야 한다. 그러나 A와 B가 상대적으로 가속 운동을 하므로 이는 성립하지 않는다.

141) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015), 44쪽.

142) 라이헨바흐는 ‘동등화’의 개념이 술리크의 1918년 저서 『지식의 일반 이론

이와 같은 ‘동등화’를 통해서 외부 세계의 대상들을 ‘정의’하지만, 이러한 과정이 완전히 임의적인 방식으로 이루어지는 것은 아니다. 특정 물리적 사건을 지시하는 정량적 숫자는 다양한 추론 절차들을 통해 도출 가능한데, 이 숫자 값을 ‘유일’하게 만드는 관계가 세계에 대한 적절한 동등화의 관계라 할 수 있다. 예를 들어, 이론에 기초한 추론이 태양 주변의 빛 굴절 값을 1.75호초로 도출하고 실험 관측을 통한 추론이 같은 굴절 값을 10호초로 도출했다면, 이 경우 ‘동등화의 유일성 조건’이 충족되지 못한 것이다.¹⁴³⁾

수학과 차별화되는 물리적 지식의 특성인 ‘동등화’에 관한 논의 이후, 라이헨바흐는 칸트의 선험성 개념을 두 부분으로 나누고 두 부분 중 하나만을 유지할 수 있다고 주장한다. 칸트 선험성 개념의 한 부분은 “필연적으로 (언제나) 참”이며, 다른 부분은 “대상 개념을 구성하는 것”이다. 여기서 후자의 부분인 “대상 개념을 구성한다는 것”의 의미는 구체적으로 무엇일까? 만약 수학과 구분되는 물리적 지식의 특성이 외부 세계 속 대상들과의 ‘동등화’에 있다면, 그러한 동등화의 ‘유일함’을 가능하게 만들어주는 특정한 원리들이 존재한다. 이 원리들에 관해 라이헨바흐는 다음과 같이 말한다.

그러한 원리들은 동등화된 개념들이 어떻게 구조들과 과정들 속으로 결합할 수 있는지를 결정해 주는 것이어야 한다. 그들은 궁극적으로 실제적인 대상들과 실제적인 사건들을 정의할 것이다. 우리는 그 원리들을 경험에 관한 구성적 원리 (constitutive principle)라고 부를 것이다.¹⁴⁴⁾...

...동등화를 결정함을 통해서, 동등화의 원리들은 실재의 개별적인 성분들을 정의하며 이러한 의미에서 실재의 대상을 **구성한다**. 칸트의 말로 표현하면, “오직 그것들을 통해서만 경험의 대상을 사유할 수 있다.”¹⁴⁵⁾

라이헨바흐는 이같이 ‘경험을 구성’하는 동등화의 원리들에 관해 대표적인 사례들을 제시한다. 그가 제시하는 첫 번째 예는 “확률의 원리”(표준적

(The General Theory of Knowledge)』에서 제시되고 있음을 언급한다.

143) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015), 63쪽.

144) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015), 70쪽.

145) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015), 75쪽.

귀납의 원리)이다. 이 원리는 물리적 상수(constant)를 정의하는 원리이자 동등화의 유일성을 위한 기초가 되는 원리로서, “한 부류의 측정된 값들이 언제 동일한 상수와 관계된다고 간주되는지 정의한다.”¹⁴⁶⁾ 다음에 제시되는 것은 “동일성 지속의 원리”인데, 이는 한 사물이 시간이 지남에 따라서 자신과 같게 남아 있는 것을 정의하는데 필요한 원리이다. 세 번째로 제시되는 동등화의 원리는 “시간과 공간”이다. 시간과 공간이 전제된 이후라야 비로소 세계 속 물리적 사건이 물리적 기술 속에서 정확히 정의될 수 있기 때문이다. 네 번째로 제시되는 사례는 “산술의 공리들”이다. 비록 산술의 공리들은 수학적이지만, 이 공리들이 물리적 대상들 사이의 관계를 정의하는 데 사용되면 일종의 동등화 원리로서 그 역할을 담당한다.¹⁴⁷⁾

이제 라이헨바흐는 선험성의 두 부분을 결합하고자 했던 칸트의 입장을 다음과 같이 재공식화한다. 만약 동등화의 원리들이 칸트의 생각처럼 “필연적으로(언제나) 참”이 되려면, 동등화의 원리들로 구성된 그 어떤 일관적인 체계도 동등화의 유일성을 만족시킬 수 있어야 한다. 하지만 새로운 물리학(상대론)의 등장과 더불어 새롭게 제시된 동등화의 원리들은 기존의 원리들과 양립 불가능함이 밝혀졌다. 기존 원리인 “근사적 이상의 원리”, “절대적 시간의 원리”, “공간의 유클리드적 성격의 원리”는 상대론이 전제하는 원리들의 집합과 양립 불가능하다.

우리는 상대론의 경험적 타당성을 부정함으로써 기존의 원리들을 고수하고자 시도할 수 있으나 이를 위해서는 경험적 관측의 결과가 전제하는 “표준적 귀납의 원리(확률의 원리)”를 부정해야 하며, 표준적 귀납의 원리가 부정되면 과학에서 그 어떤 동등화의 유일성도 확보될 수 없다. 이러한 점에서 표준적 귀납의 원리는 동등화의 원리들 사이에서도 특별하다. 이 원리의 중요성에 대해 라이헨바흐는 다음과 같이 말한다.

...모든 다른 동등화 원리들 중에서도 표준적인 귀납의 원리는, 그것이 동등화의 유일성을 정의한다는 사실에서 구분된다. 만약 유일성이 유지되어야 한다면, 귀납의 원리보다는 모든 다른 동등화 원리들을 포기해야 한다.¹⁴⁸⁾

146) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015), 76쪽.

147) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015), 77-78쪽.

148) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015), 97쪽.

물리학의 특징인 동등화의 유일성을 유지하고자 할 때 우리는 관측을 통해 확인된 경험적 사실들과 일관되지 않은 특정 원리들을 탐지할 수 있다. 이러한 이유로 우리는 칸트가 제시한 선험성 개념의 첫 번째 부분, 즉 “필연적으로(언제나) 참”인 부분을 포기해야 하는 상황에 이르렀다. 그런데 만약 기존의 동등화 원리들이 포기되는 경우가 발생하여 대상 개념을 구성하는 새로운 동등화 원리들을 채택할 경우, 우리는 이전 원리들에 기초해 얻었던 외부 세계에 대한 지식을 잃게 되는 것 아닐까? 이러한 우려에 대해 라이헨바흐가 제시하는 해결책은 “연속적 근사의 방법”이다. 이에 따르면 우리는 옛 동등화 원리를 하나의 근사로 여길 수 있는 새로운 원리를 ‘귀납적’으로 찾을 수 있고 이를 잘 보여주는 사례가 상대론이다.

...모든 경험들은 단순히 근사적인 법칙들이므로, 그들은 예전의 원리들에 의해서 성립될 수 있다. 이러한 방법은 경험의 전체성이 좀 더 일반적인 원리를 귀납적으로 입증할 수 있는 가능성을 배제하지 않는다. 지금까지 사용되어 온 원리들에 대한 연속적인 근사를 표현하는 새로운 동등화 원리들을 귀납적으로 찾는 것은 논리적으로 허용 가능하고 기술적으로도 가능하다.¹⁴⁹⁾

제3절. ‘이성 분석’에서 ‘과학적 지식 분석’으로의 이행

순수 이성 비판을 통해 자연과학적 지식의 불변하는 선험적 구성 원리를 규명하고자 하는 칸트의 기획이 실패했다면, 향후 자연과학의 인식론은 어떤 방법을 이용해 어떤 종류의 작업을 해야 하는지의 문제가 남는다. 이에 대해 라이헨바흐가 내놓은 새로운 방법론은 “이성”이 아닌 “과학적 지식 분석”의 방법론이다.¹⁵⁰⁾ 철학은 과학적 지식의 논리적 분석을 통해 과학에 등장하는 다양한 가설들을 계층화시키고 분류한 후, 이 지식 내에

149) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015), 100쪽.

150) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015), 109쪽에서 라이헨바흐는 다음과 같이 말한다. “실증적인 과학들이 끊임없이 경험과 접촉함으로써 발견된 결과들은 특정한 원리들을 전제한다. 이 원리들을 논리적 분석을 통해서 감지하는 것이 철학의 임무다.”

등장하는 동등화(구성적) 원리들과 연결 원리들을 구분한다. 이를 통해 우리는 현재의 과학 속에서 ‘대상을 구성하는 부분’이 어떤 것인지를 명료하게 알 수 있다. 이때의 선험성은 이후의 경험 과학 발전에 따라 변화해 나간다는 의미에서 ‘상대화된 선험성(relativized a priori)’이다.

‘상대화된 선험성 규명’과 더불어 철학적 분석을 통해 규명될 수 있는 내용이 있다. 그것은 바로 특정 과학적 지식 체계 속에 등장하는 ‘임의적 요소들’을 밝히는 것이다.¹⁵¹⁾ 경험 과학적 지식은 경험뿐만 아니라 이성적 요소들을 포함하고 있으며, 이러한 이성적 요소들은 지식 내에 포함된 ‘임의적 요소’를 통해서 그 자신을 드러낸다. 예를 들어, 뉴턴의 물리학과 특수 상대론에서 유클리드적 계량은 ‘동등화의 원리’이자 일종의 ‘임의적 요소’이다. 경험은 우리에게 유클리드적 계량과 비유클리드적 계량 중 어떤 계량을 선택해야 하는지 강요하지 못하며, 이러한 선택은 오직 이성에 의해서만(예를 들어 ‘단순성’과 같은 기준에 의해) 이루어질 수 있다. 그러나 일반 상대론에 이르면 상황이 달라진다. 일반 상대론에서는 한 점에서의 계량이 그 점에 있는 에너지-변형력과 물리적 관계를 맺기 때문에, 이제 계량은 특수 상대론에서와 달리 ‘동등화 원리’로서 기능하지 않고 일종의 ‘연결 원리’가 된다.¹⁵²⁾

이상과 같은 논의를 통해 라이헨바흐는 새로운 과학적 인식론이 할 수 있는 두 가지의 주된 기능이 무엇인지를 밝혔다. 첫째, 현재 우리가 가진 경험 과학적 지식(물리학) 속에서 동등화 원리들과 연결 원리들을 구분하고, 동등화 원리들(상대화된 선험성) 속에 구현된 대상 개념을 살핀다. 둘째, 우리의 경험 과학적 지식 속에 포함된 ‘임의적 요소들’을 밝힘으로써 과학 지식 구성에서 인간 이성이 하는 역할을 파악한다.

중요한 것은 라이헨바흐가 『상대성 이론과 선험적 지식』에서 상대론적

151) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015), 127쪽.

152) 1920년 저서에서의 이와 같은 설명은 라이헨바흐가 상대론적 시공간에 대한 경험주의적 분석을 수행한 이후 출판한 1924년 저서에서 좀 더 자세하게 구체화된다. 우리는 빛 신호를 이용해서 서로 상대적으로 정지해 있는 점들을 모아 좌표계를 구성할 수 있지만, 이 점들 사이에 성립하는 기하학적 관계가 유일하게 유클리드적인 것은 아니다. 우리는 비유클리드적 관계가 아닌 유클리드적 관계를 만족하는 점들을(단순성을 근거로) 추가로 ‘추려낼’ 수 있을 뿐이며, 바로 그런 의미에서 물리적 기하학은 ‘규약적’이다. 논문 6장에서의 논의를 참고할 것.

시간과 공간에 대한 철학적 분석이 완결되었다고 보지는 않았다는 점이다. 그가 볼 때 이 책의 논의는 칸트의 인식론이 직면한 문제를 진단하고 이후의 과학적 인식론이 나아갈 방향을 설정하는 역할을 담당할 뿐이다. 특히 그는 비록 아인슈타인이 상대론을 창안하였다고 하더라도 과학자의 관점이 아닌 철학자의 관점에서 상대론 속 시간과 공간의 경험적인 의의에 관해 좀 더 철저한 철학적 분석이 이루어질 필요가 있다고 판단했다. 이러한 견해는 그의 다음과 같은 언급에서 알 수 있다.

...상대성 이론에 대한 분석은 본질적으로 아인슈타인 자신에 의해서 수행되었다. 그의 모든 저서에서 아인슈타인은 그가 그로부터 자신의 이론을 연역했던 원리들을 공식화했다. 그러나 물리학자가 그의 원리를 수립하는 것과 관련된 관점은 철학자의 그것과는 다르다. 물리학자는 가장 단순하고 가장 포괄적인 근본 가정들을 목표로 한다. 철학자는 이러한 가정들을 질서 짓고, 그것들을 특수한 원리, 일반적 원리, 연결의 원리, 동등화의 원리로 분류하고 싶어 한다. 앞으로 이러한 철학적 관점에서의 일정한 탐구가 상대성 이론을 위해서 수행되어야 한다.¹⁵³⁾

제4절. 갈림길 : ‘상대화된 선험성’과 ‘과학적 지식 분석’

서론에서 언급했듯 프리드먼은 논리경험주의의 역사를 연구함으로써 논리경험주의를 칸트 철학을 잇는 ‘과학적 철학’의 계승자로 재해석했다. 특히 그는 라이헨바흐가 제시한 ‘동등화 원리(coordination principle)’의 중요성에 주목했다.¹⁵⁴⁾ 라이헨바흐는 상대론의 등장으로 칸트의 선험성 개념 중 일부가 포기되지만 ‘대상을 구성하는 역할’을 담당하는 동등화 원리들을 과학 지식 속에서 식별할 수 있음을 보였다. 이때 구성적인 역할을 하는 ‘동등화 원리들’은 경험적인 ‘연결 원리들’과 구분된다. 프리드먼에 따르면 이 구분은 이후 1934년에 과학 언어의 ‘분석적 부분(L-규칙)’과 ‘중합적 부분(P-규칙)’을 구분하는 카르납의 언어틀 철학으로 이어진다.¹⁵⁵⁾

153) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015), 108-109쪽.

154) Friedman, M. (1999)의 1부 1-4장에서의 논의, 특히 3장의 논의 참조.

155) Carnap, Rudolf. (1937) 참조.

프리드먼에 따르면 술리크는 상대론의 철학적 의의를 설명하는 저술(1917년) 및 자신의 새로운 인식론(1918년)을 출판할 때까지만 해도 과학적 철학이 ‘과학적 지식의 토대를 분석하고 정당화하는 역할’을 한다고 보았으며, 이는 술리크의 1921년 베를린 대학 강연에서도 드러난다.¹⁵⁶⁾ 하지만 술리크가 1922년 오스트리아 비엔나 대학에 부임하고 비트겐슈타인의 『논리철학론』에 접하게 된 후 그는 전형적인 ‘논리실증주의’의 입장으로 전향한다. 프리드먼에 따르면 라이헨바흐는 『상대성 이론과 선험적 지식』 출판 이후 술리크와 서신 교환을 하게 되었는데, 이 과정에서 술리크는 라이헨바흐에게 ‘상대화된 선험성’ 개념 대신 푸앵카레가 사용한 ‘규약’ 개념을 사용하자고 제안했다. 프리드먼은 이러한 서신 교환을 통해 1922년에 이르러 라이헨바흐가 ‘상대화된 선험성’ 개념을 사용하지 않게 되며, 이 과정에서 지식의 구성적 측면을 유지하는 동등화 원리들의 의의를 잃게 되었다고 해석했다.¹⁵⁷⁾

프리드먼에 따르면 술리크와의 서신 교환 이전에 라이헨바흐가 갖고 있던 ‘상대화된 선험성’ 개념은 상대론에 특수한 것이었을 뿐만 아니라, 물리적 기하학을 바라보는 라이헨바흐의 관점은 푸앵카레의 규약 개념과 차별화되는 것이었다. 라이헨바흐에 따르면, 특수 상대론과 관련하여 대상 개념을 구성하는 역할을 하는 ‘동등화의 원리’들이 존재하고 그중 하나가 ‘유클리드적 계량의 원리’이다. 하지만 특수 상대론에서 ‘동등화의 원리’였던 이 공리는 일반 상대론에 이르러 그 옳고 그름을 경험적으로 판단할 수 있는 ‘연결 원리’로 바뀐다. 일반 상대론에서 물리적 기하학이 ‘연결 원리’로 변화함에 따라, 물리적 기하학은 푸앵카레가 주장한 ‘규약성’을 잃게 된다.¹⁵⁸⁾ 이와 같은 분석에서는 ‘동등화의 원리’와 ‘연결의 원리’ 사이의 명확한 구분에 따른 물리적 지식 내의 계층적 질서가 유지되며, 물리적 기하학의 규약성은 이론의 후속 발전(일반 상대론)에 따라 포기된다.

하지만 술리크가 라이헨바흐에게 제안한 푸앵카레의 ‘규약’ 개념은 이론

156) Friedman, Michael. (1999), pp. 42-45.

157) *Reconsidering Logical Positivism*의 3번째 논문 “Geometry, Convention, and Relativized A Priori” (59-70쪽)를 참조. 돈 하워드(Don Howard)는 이같은 프리드먼의 해석을 받아들이면서도, 술리크와 라이헨바흐가 수용한 전체론적 입장이 콰인과 아인슈타인이 수용한 전체론적 입장과 차별화되며, 이로 인해 아인슈타인과 술리크-라이헨바흐의 입장 차이가 발생했다고 본다. Howard, Don. (2014) 참조.

158) Friedman, Michael. (1999), pp. 66-67.

일반적이며 원리상 그 규약적 특성을 어떤 경우에도 유지할 수 있다. 푸앵카레는 물리적 기하학이 경험을 통한 그 어떤 측정 결과에 의해서도 결정적으로 반박되지 않을 것이라 보았다. 실제로 우리가 관측하는 것은 기하학 자체가 아니라 이를 드러내는 물리적 측정 도구들이기 때문에, 우리가 유클리드 기하학에 반하는 측정 결과를 관측했다고 하더라도 측정 도구와 관련된 물리학 법칙들을 조정함으로써 유클리드 기하학을 계속 견지할 수 있기 때문이다. 물리적 기하학(G)은 항상 물리학의 법칙(P)과 더불어서 경험적 관측 결과와 상호작용하므로, 우리는 어떤 상황에서도 P를 수정하여 G를 유지할 수 있다. 물리적 기하학과 물리학의 법칙이 결합한 전체(G+P)만이 경험과 비교될 수 있으므로, 이와 같은 푸앵카레의 규약주의는 전체론적 성격을 띠며 라이헨바흐가 『상대성 이론과 선험적 지식』에서 제시한 바 있는 물리적 지식의 계층화된 구조를 포기하게 한다. 그러한 까닭에 프리드먼은 라이헨바흐가 ‘상대화된 선험성’ 대신 ‘규약’이란 용어를 채택한 것이 단순한 용어상의 변경이 아닌 의미심장한 철학적 입장 전환을 뜻한다고 보았다.¹⁵⁹⁾

...오직 이와 아주 다른 개념(1920/1965)만이 진정한 상대화된 선험성을 제공하며, 따라서 라이헨바흐가 슈리크의 견해를 1922년에 수용했을 때 사실상 그는 상대화된 선험성을 포기한 것이다.¹⁶⁰⁾

그러나 문제는 라이헨바흐의 철학적 입장 전환에 대한 이상과 같은 프리드먼의 해석이 문헌상의 증거들과 부합하지 않는다는 것이다. 『상대성 이론과 선험적 지식』은 『상대성 이론의 공리화』, 『시간과 공간의 철학』으로 이어지는 상대론에 관한 라이헨바흐의 철학적 분석 3부작 중 첫 번째 저작이다. 따라서 라이헨바흐가 『상대성 이론과 선험적 지식』 이후 ‘상대화된 선험성’ 개념의 의의를 잃어버리는지 그렇지 않은지의 여부는 상대론에 대한 그의 이후 저술을 통해 판단해야 한다.

라이헨바흐는 『상대성 이론과 선험적 지식』의 출판 이후 상대론 속 시간과 공간의 경험적 내용을 구체적으로 규명하기 위해 이 이론에 대한

159) Friedman, Michael. (1999), pp. 67-68.

160) Friedman, Michael. (1999), p. 68.

‘구성적 공리화(constructive axiomatization)’ 작업을 진행했다. 이와 같은 공리화 작업에 대해 라이헨바흐는 1933년에 아래와 같이 서술한다.

슈투트가르트에서 나는 상대성 이론에 관한 나의 연구를 계속 진행했고 그 결과 상대론적 시공간 이론에 대한 공리체계를 구성할 수 있었다. 내가 볼 때 이 공리체계의 가치는, 이 체계가 상대성 이론에 대해 철학적으로 올바른 정당화를 제공한다는 데 있다. 비록 아인슈타인이 상대성 이론을 구성할 때 일반적이고 본능적으로 이 이론의 철학적인 요소들을 정확하게 이해했다고 하더라도, 그의 저술에서는 인식론적인 관점으로부터 비롯된 의식적이고 체계적인 연구를 찾기는 어려웠다. 나의 판단에 이 공리체계의 결정적인 성과는, 상대성 이론은 시간의 인과적 이론에 기초해야만 하며, 더 나아가 물리학은 특정한 종류의 동등화(상관성correlation) 정의들을 필요로 한다는 생각이었다. 더 나아가, 빛 기하학을 구성함으로써 나는 상대성 이론에서 단순히 정의하는 진술들을 자연의 내용에 관해서 주장하는 진술들로부터 분리할 수 있었다.¹⁶¹⁾

이러한 라이헨바흐의 서술에서 확인할 수 있는 두 가지 사실이 있다. 첫째, 라이헨바흐의 공리체계는 『상대성 이론과 선험적 지식』에서의 ‘이론 특수한’ 철학적 분석을 유지·발전시키고 있다는 점이다. 둘째, 구성적 공리화를 통해서 라이헨바흐는 특수 상대론과 일반 상대론의 공통된 기초가 되는 것이 ‘시간의 인과적 이론’임을 밝혔다. 이는 상대론에 이르러서도 변하지 않는 물리적 세계의 기초 구조가 ‘인과적 구조’임을 의미한다. 우리는 라이헨바흐에게서 이론 특수한 철학적 분석과 이론을 위계적으로 분석하는 방식이 이후 계속 유지되고 있음을 알 수 있으며, 이는 라이헨바흐가 ‘이론 일반적 규약주의’로 전향했다는 프리드먼의 주장이 옳지 않음을 보여준다.

라이헨바흐는 자신이 제시한 공리들을 ‘자연의 내용에 관하여 주장하는 진술’이라 설명하고 있는데, 이러한 진술을 ‘일반적인 경험적 진술’로 오해할 수 있다. 하지만 라이헨바흐가 제시하는 공리들은 일반적인 경험적 진술 이라기보다 시간과 공간의 실질적인 경험적 내용을 집약하는 기초 진술들

161) Reichenbach, Hans (1978), “Autobiographical Sketches for Academic Purposes”, *Selected Writings 1909-1953 Volume 1* (D. Reidel Publishing Company), pp. 1-8. 이 인용에서의 강조는 나의 것이다.

이라는 의미에서 일종의 ‘구성 원리들’이다.¹⁶²⁾ 예를 들어 라이헨바흐는 ‘시간 순서의 공리’, ‘시간 비교의 공리’, ‘페르마의 공리’, ‘정상 상태 및 순환 이동 공리’, ‘공간 계량에 관한 유클리드의 공리’ 등 5개의 빛 공리들을 제시한다.¹⁶³⁾ 이 공리들은 특수 상대론적 시간과 공간의 경험적 내용을 집약하며, 이후 시간과 공간에 관한 정리들은 이 공리들을 근거로 도출된다. 이 공리들이 ‘동등화의 원리’라는 것은 ‘공간 계량에 관한 유클리드의 공리’가 공리 속에 포함되어 있다는 사실에서 알 수 있다. 시공간에 관한 여러 정리를 증명하는데 이 공리들이 직접 사용되므로,¹⁶⁴⁾ 공리들은 시공간 이론의 위계적 구조에서 기초 역할을 한다.

단, 『상대성 이론과 선험적 지식』에서 라이헨바흐가 예시한 바 있던 ‘동등화 원리들’ 모두가 시공간 공리체계의 공리들에 명시적으로 반영된 것은 아니다. 예를 들어, ‘특수 상대성의 원리’, ‘일반적 공변의 원리’, ‘표준적 귀납의 원리’ 등은 공리체계의 공리들에 명시적으로 포함되어 있지 않다. 그러나 공리들에 포함되지 않은 ‘동등화 원리들’ 역시 여전히 ‘인식적 원리들’로서 공리들 속에 전제¹⁶⁵⁾되어 있으며, 공리들의 타당성을 판단하거나 시공간의 정리를 증명하는 데 사용된다. 따라서 여전히 이 원리들은 상대론을 ‘구성하는’ 역할을 담당하고 있다.

라이헨바흐의 공리체계에서 정리들은 공리들만으로 도출되지 않는다. 임의적인 성격을 갖는 정의들(동등화 정의들)이 덧붙여져야 정리들이 도출될 수 있다. 이러한 정의의 대표적인 예로 ‘동시성의 정의’가 있다.¹⁶⁶⁾ 라이헨바흐는 5개의 빛 공리를 제시한 이후 추가로 5개의 물질 공리들을 제시한다. 물질 공리는 강제 막대와 자연 시계와 같은 측정 물체들이 앞서 제시한 빛 공리들이 서술하는 빛의 기하학을 따름을 말한다.¹⁶⁷⁾ 공리, 정의,

162) 물리학은 순수한 개념 체계인 수학과는 다르다. 물리학의 그 어떤 공리도 경험적인 성격을 가지기에 모든 물리학적 공리는 경험적 명제이면서 동시에 그 이론을 떠받치는(구성하는) 역할을 할 수 있다.

163) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 39-96쪽.

164) 예를 들어, 공리 I 과 II는 정리 3을 증명하는 데 사용된다. 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 52-53쪽.

165) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 7쪽.

166) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 78쪽.

167) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 157-167쪽.

정리가 복잡하게 얽히는 공리체계 속에 정의를 위치시킴으로써, 라이헨바흐는 푸앵카레 및 술리크의 전체론적 규약주의와 차별화되는 이론 구체적이고 위계적 방식으로 이론의 규약적 특성을 해명한다.

이상과 같이 1924년에 제시된 라이헨바흐의 구성적 공리체계를 살펴볼 경우, ‘상대화된 선험성 개념’ 대신 푸앵카레의 ‘규약’ 개념을 채택함으로써 1922년 이후 라이헨바흐가 전체론적 규약주의를 수용하여 물리적 지식의 위계적 구조를 부정하게 되었다는 프리드먼의 평가가 부적절함을 알 수 있다.¹⁶⁸⁾ 다만 라이헨바흐가 1920년 이후 칸트적인 ‘선험성’ 개념을 잃어버렸다는 프리드먼의 진단은 부분적으로 옳다. 문제는 라이헨바흐가 제시한 ‘상대화된 선험성’ 개념이 이미 1920년부터 칸트적인 선험성에서부터 상당히 떨어져 있었다는 것이다. 왜냐하면 라이헨바흐는 1920년에 기존의 ‘구성 원리’(절대적 시간의 원리, 공간의 유클리드적 성격의 원리)가 새로운 경험적 압력에 의해 반박되고 ‘귀납적 방법’에 의해 새로운 ‘구성 원리’로 대체되었다고 보았기 때문이다.

이와 달리 프리드먼이 생각하는 ‘상대화된 선험성’과 이를 구현하는 원리는 경험적이라기보다는 더 수학적이고 형식적인 특성을 갖는다. 예를 들어 프리드먼은 라이헨바흐가 1920년경에 제시했던 특수 상대론에서의 구성 원리가 편평한 민코프스키 시공간이었으며, 일반 상대론에서의 구성 원리가 무한소 리만 다양체였다고 재해석한다.

...(특수 상대성 이론에서) 유클리드적 공간 기하학, 로렌츠 운동학, 더 일반적으로 민코프스키 시공간 구조가 동등화의 공리로서 간주되며 구성적 선험이다... 일반 상대성 이론에서 우리는 다시 한 번 배경이 되는 시공간 틀을 최종적으로 교정한다. 이제 오직 무한소 로렌츠 다양체 구조-몇몇 혹은 다른 (유사) 리만 계량을 허용할 정도로 충분한-가 구성적 선험이 된다.¹⁶⁹⁾

168) 프리드먼은 라이헨바흐와 달리 카르납이 특정한 언어틀 내에서 규약적인 것과 사실적인 것, 구성적인 것과 경험적인 것 사이의 구분을 유지했다고 주장했는데, 실제로 라이헨바흐 역시 이러한 구분을 유지했음은 그의 이후 저술을 살펴볼 때 명백하다. 그러므로 라이헨바흐와 카르납을 구분하는 핵심은 그와 같은 구분이 아니라 구성 원리를 바라보는 두 사람 사이의 관점 차이이다. Friedman, Michael. (1999)의 결론 부분 참조.

169) Friedman, Michael. (1999), p. 62.

이처럼 물리적 기하학의 ‘수학적인 측면’에 주목할 때 프리드먼과 같이 구성 원리를 수학적 방식으로 해석할 수 있다. 실제로 프리드먼이 말하는 구성 원리의 기능은 “추상적·수학적 표상과 이 표상으로 기술하려는 구체적 경험 현상을 중계하는 일이다. 이로써 동등화(조율) 원리는 칸트가 처음 확정한 구성 기능을 담당하며 진정한 의미의 구성적 선행이라고 불릴 만하다.”¹⁷⁰⁾ 그렇기에 프리드먼의 해석에서 구성 원리들은 경험과는 차별화되고 고도로 형식적인 특성을 갖는다.

그러나 문제는 구성 원리에 관한 프리드먼의 해석이 라이헨바흐의 입장과 일치하지 않는다는 데 있다. 실제로 1920년 『선행적 지식』에서 라이헨바흐가 제시했던 구성적 원리들은 “균일하게 움직이는 좌표계들의 상대성 원리”, “불가역적인 인과성의 원리”, “접촉에 의한 작용의 원리”, “표준적 귀납의 원리”, “일반적 공변의 원리”, “법칙들의 연속성 원리”, “물리적 크기들의 연속성 원리”, “공간의 균질성의 원리” 등이다. 이 원리들은 실질적인 물리적 내용을 갖고 있어, 프리드먼이 말하는 것처럼 경험과 다소 거리가 있고 형식적인 성격이 강한 원리라고 보기 어렵다.

프리드먼이 말하는 ‘선행 원리’는 경험을 통해 촉발되었다 하더라도 경험을 통해 정당화되거나 반박되지는 않는, 고도로 형식적이고 추상적인 원리이다. 그렇기에 이러한 ‘선행 원리’는 경험을 통해 결정되지 않으며 규약적으로 선택된다. 프리드먼이 ‘선행 원리’를 비경험적인 것으로 제시하는 데에는 중요한 이유가 있다. 그렇게 제시해야 칸트의 ‘선행’ 개념이 유지될 수 있을 뿐만 아니라 급격한 세계관의 변화를 뜻하는 쿤(Kuhn)의 패러다임(paradigm) 개념을 수용할 수 있기 때문이다. 하지만 라이헨바흐는 이미 1920년부터 이러한 의미에서의 ‘선행’ 개념을 받아들이지 않는다. 라이헨바흐가 말하는 ‘상대화된 선행성’은 과학적 지식 속에서 ‘구성적’인 역할을 하는 원리일 뿐, 이 원리가 프리드먼이 말하는 것처럼 경험과 격리된 ‘선행’적 성격을 갖는 것은 아니다.¹⁷¹⁾

170) 마이클 프리드먼, 박우석·이정민 옮김 (2001/2012), 122쪽.

171) 물론 이 지점에서 어떤 경험적 명제가 ‘구성적’ 역할을 하기 위해서는 필수적으로 경험과 다소 격리되어야 하지 않는가 하는 반론이 제기될 수 있을 것이다. 이에 대해 나는, 설혹 구성적인 명제라도 엄격한 경험적 시험이 가능하다고 말할 것이다.

더 중요한 것은, 라이헨바흐가 ‘상대화된 선험성’ 원리의 ‘구성적’ 측면을 강조했을 뿐만 아니라 이 개념을 매개로 결과적으로는 ‘과학적 지식의 분석’이라는 방법론적 결론에 도달했다는 데 있다. 그랬기에 그는 이후 개별적인 과학적 지식, 특히 상대론적 시간과 공간에 대한 상세한 철학적 분석을 경험주의의 관점에서 진행하게 되었으며, 구성적 원리들 또한 좀 더 분화되고 그 경험적 성격도 더 분명하게 드러나게 되었다.

신칸트주의적 문제의식으로부터 시작했으니 라이헨바흐는 카시러와는 다른 길을 선택했고, 이러한 선택에 ‘상대화된 선험성’ 개념은 중요한 역할을 했다. 카시러는 정밀과학의 발전이 ‘자연의 기능적 단일성 성취’라는 일관된 방향을 향한다고 보았지만, 라이헨바흐가 볼 때 카시러의 이런 주장은 과도하고 추상적이었다. 상대론을 통해 물리학 이론을 떠받치는 구성적 원리들이 변화한 것은 부정할 수 없는 역사적 사실이다. 설혹 구성적 원리들의 변화가 ‘연속적 근사의 방법’이라는 제약 아래에 놓인다고 하더라도, 이는 느슨한 방법론적 제약일 뿐 향후 새로운 경험적 사실에 직면해 현재의 구성적 원리가 어떤 다른 원리로 대체될지 알 수 없다. 이런 상황에서 카시러가 내세우는 ‘자연의 기능적 단일성 추구’는 추상적일 뿐만 아니라 상대론의 경험적 의의를 충분히 설명하지 못한다.

선험성이 역사적으로 상대화되고, 그러한 상대화가 오직 실질적인 과학의 발전 속에서 구체적으로 드러나는 것이라면, 과연 과학적 인식론의 고유한 역할은 어디에서 찾을 수 있을까? 이 물음에 대해 라이헨바흐는 ‘과학자와는 차별화되는 철학적 분석과 해명’이라는 답을 내놓았다. 과학자가 창조적인 직관을 통해 새로운 경험에 부합하는 새로운 과학 이론을 제시하였더라도, 이 이론의 인식론적 의의에 대한 과학자의 해명은 철학적인 관점에서 볼 때 만족스럽지 않을 수 있다. 실제로 아인슈타인이 자신의 물리학 논문 속에서 시간과 공간의 철학적 의의에 관해 주장한 바가 그러했다. 아인슈타인은 상대론과 더불어 시간과 공간에 관한 여러 중요한 철학적 문제들을 제기했지만, 이 문제들에 대한 아인슈타인의 답변은 인식론적 관점에서 볼 때 여전히 논란의 여지가 있었다.

그렇기에 칸트가 ‘이성의 분석’이라는 새로운 철학적 방법론을 통해 일종의 ‘코페르니쿠스적 전환’을 감행했다면, 20세기 초까지의 자연과학

발전을 통해 칸트의 방법론이 유효하지 않음이 밝혀진 이상 우리는 다시 철학적 방법론을 전환해야 한다. 그것이 ‘이성의 분석’으로부터 ‘과학적 지식의 분석’으로의 이행이다. 이와 같은 분석을 통해 현재 우리가 가진 과학적 지식을 떠받치는 구성적 원리들이 무엇인지, 과학적 지식 속 경험적 내용과 임의적 요소들이 무엇이며 이들이 서로 어떻게 연결되어 있는지가 상세하게 드러날 것이다. 이러한 명료화의 작업이 이루어지면 과학적 지식의 경험적 의의와 관련된 중요한 문제들에 답할 수 있을 뿐만 아니라, 향후 과학적 지식이 새로운 경험에 맞닥뜨렸을 때 이론의 어떤 부분을 조정할 수 있을지 더 분명하게 파악할 수 있을 것이다.

그러므로 라이헨바흐에게 ‘상대화된 선험성’ 개념은 새로운 과학적 철학의 길을 열어주고 향후 진행되어야 하는 철학적 탐구의 방향을 제시해주는 역할을 했다. 이 개념이 가리킨 방향은 ‘과학적 지식에 대한 구체적인 분석과 해명’이었고, 라이헨바흐는 이후의 철학적 분석 작업을 통해서 이를 실제로 이행하고자 했다. 칸트의 ‘이성 분석’이 ‘18세기 정밀과학의 부흥’이라는 역사적 사실에 대한 철학적 대응이었던 것처럼, ‘20세기 정밀과학의 혁명’이라는 역사적 사실에 대한 철학적 대응은 ‘20세기 정밀과학의 철학적 분석’이었다. 라이헨바흐가 제시한 ‘상대화된 선험성’ 개념은 ‘이성 분석’이라는 칸트의 방법론에서 벗어나 새로운 철학적 방법론을 수립하기 위한 하나의 징검다리 역할을 했다. 이 개념이 과학적 지식의 변천을 설명하는 하나의 ‘도구’로 활용될 수는 있겠으나, 설령 그와 같이 역사적인 방식으로 이 개념을 사용하려고 해도 이를 위해서는 먼저 과학적 지식에 대한 철학적 분석 및 그 결과가 선행할 필요가 있다.

라이헨바흐와 함께 논리경험주의를 대표하는 철학자 카르납은 다른 경로로 더 늦은 시기에 ‘상대화된 선험성’ 개념에 도달했다. 프리드먼이 말하는 카르납 특유의 ‘언어를 철학’, 특정한 과학 언어 속에 등장하는 ‘L-규칙’은 프리드먼이 생각하는 칸트적인 ‘선험성’ 개념과 가깝다. 카르납의 언어철학에 따르면 특정한 과학 언어에서 ‘L-규칙’이 미리 정해져 있지 않을 때 그 언어 속에서 등장하는 경험적 진술들에는 의미가 부여될 수 없다. 다만 ‘L-규칙’이 칸트적인 선험성과 다른 점은, 우리에게 다수의 과학 언어 L_1, L_2, \dots 중 하나를 선택할 수 있는 여지가 있으며 이때의

선택은 ‘인식적(epistemological)’이 아닌 ‘실천적(practical)’ 성격을 갖는다는 데 있다.¹⁷²⁾ 프리드먼은 언어를 철학의 이러한 측면에 대해 다음과 같이 말한다.

...1934년 『언어의 논리적 구문론』 ... 과학적 철학은 이제 과학논리 (Wissenschaftslogik)로 과학 언어 전체의 논리적 구조와 관계에 대한 메타 논리 수준의 탐구이다... 반면 어떤 언어나 언어들을 선택해야 하는가의 문제는 외적 문제이다. 여기서는 정당성이나 진리의 문제는 아예 생기지 않고 다만 이러저러한 목적에 적합한지에 관한 규약과 실용성의 문제만이 남는다.¹⁷³⁾

카르납은 쿤처럼 과학사 탐구를 통해 ‘상대화된 선택성’ 개념에 도달한 것이 아니다. 솔리크, 라이헨바흐와 마찬가지로 카르납은 상대성 이론 속 ‘공간 개념’을 철학적으로 상세하게 분석하며 철학적 경력을 시작했다. 여기서 우리는 왜 카르납이 라이헨바흐와 비슷한 철학적 분석의 길을 걸으면서도 결론적으로 라이헨바흐에게서는 매개 개념에 지나지 않았던 ‘상대화된 선택성’ 개념에 도달했는지 의문을 제기할 수 있다. 하지만 라이헨바흐와 카르납 사이에는 중요한 차이가 있었다. 그것은 과학적 지식의 철학적 분석에서 ‘규약’의 중요성을 바라보는 관점 차이였다. 이미 카르납은 자신의 1921년 박사학위 논문에서부터 ‘계량 규정’과 ‘계량적 공간 규정’의 선택이 궁극적으로 ‘규약적’인 것이라고 보았다. 과학적 지식의 핵심적인 개념과 원리를 ‘규약적’인 것이라 봄으로써 카르납은 푸앵카레의 규약주의를 더 심화시켰으며, 이에 따라 카르납의 언어를 철학은 칸트가 제시했던 것에 가까운 ‘선택성’을 유지하게 되었다. 결국 ‘상대화된 선택성’은 라이헨바흐와 카르납이 서로 엇갈린 지점이었다. ‘규약’에 대한 시각 차이로 인해 라이헨바흐는 ‘상대화된 선택성’에서 멀어졌고 이후 카르납은 이 개념을 자신의 철학 속 핵심 요소로 받아들였다.

172) Friedman, Michael. (1999), pp. 68.

173) 마이클 프리드먼, 박우석·이정민 옮김 (2001/2012), 46-47쪽.

제7절. 결론

『상대성 이론과 선험적 지식』은 논리경험주의의 형성 과정에서 결정적 역할을 한 중요한 저서였다. 술리크가 아인슈타인을 대변하여 상대론의 철학적 의의를 해설한 상황에서 카시러는 신칸트주의적 인식론을 유지하는 방식으로 상대론을 해석하려 했다. 라이헨바흐는 칸트주의적 문제의식에서 출발했음에도 불구하고 카시러와는 다른 철학적 경로를 선택했으며 이 책은 이러한 그의 선택을 상징하는 이정표다. ‘상대화된 선험성’, ‘구성적 원리들의 변화’, ‘연속적 근사의 방법’, ‘동등화로서의 인식’ 등과 같은 개념들은 향후 진행될 구체적인 과학 지식 분석을 위한 예비로 마련되었다. 따라서 ‘상대화된 선험성’ 개념의 중요성에 대한 프리드먼의 강조는 사뭇 과장되었다. 또한 이 개념의 핵심을 ‘구성 원리의 기능과 역할’이라고 볼 경우, 1920년 이후 라이헨바흐의 철학에서 이 개념 고유의 의의가 상실되었다는 프리드먼의 평가는 정정되어야 한다.

다만 카르납 또한 ‘상대화된 선험성’ 개념을 이후 자신만의 방식으로 철학적으로 구현했고 이것이 라이헨바흐보다는 좀 더 칸트적인 ‘선험’에 가까웠다는 점에서 프리드먼의 주장이 전적으로 틀린 것은 아니다. 그런 의미에서 ‘상대화된 선험성’ 개념은 라이헨바흐뿐만 아니라 카르납에게도 중요한 철학적 이정표 역할을 했다. 하지만 카르납이 ‘상대화된 선험성’ 개념에 다다르게 된 경로와 그 의의는 라이헨바흐와는 달랐다. 실제로 카르납은 과학적 지식에서 ‘규약’이 차지하는 역할을 강조하는 동시에, 기호논리학을 경험주의와 결합하는 일반적인 인식론적 기획(리셀에 의해 암시된 바 있는)을 추구하며 자신의 인식적 관점을 수정 및 보완하는 과정에서 이 개념에 도달하게 되었다. 또한 이후 카르납이 추구한 과학철학 탐구의 방향 역시 라이헨바흐와는 다소 다른 것이었다.

라이헨바흐와 카르납은 새롭게 부상하고 있던 젊은 철학자였다.¹⁷⁴⁾ 이미 물리학을 전공하여 박사학위를 받은 후 철학으로 전향한 술리크와

174) 라이헨바흐와 카르납은 모두 1891년생이다. 술리크는 1882년생으로, 1879년생인 아인슈타인과는 친구뻘이 되는 인물이었다. 아인슈타인과 술리크에 비할 때 라이헨바흐와 카르납은 10년 정도 젊은 세대에 속했다.

달리, 이들은 처음부터 기호논리학과 수학 및 물리학과 밀접하게 연계된 새로운 방식의 철학을 전공하여 어렵게 학위를 받고 당대의 학자들로부터 인정받아 자신들의 철학적 탐구를 진행해나가야 하는 상황이었다. 실제로 라이헨바흐와 카르납 사이에는 유사한 점이 많았다. 카르납 또한 라이헨바흐와 마찬가지로 칸트 철학적 문제의식으로부터 철학적 탐구를 시작했고, 그의 박사학위 논문 역시 칸트적인 관점에서 새로운 물리학이 제기한 공간의 문제를 철학적으로 검토하는 것이었다. 하지만 과학적 지식 속 ‘규약’의 역할과 의의를 바라보는 두 사람의 관점 차이가 결과적으로 두 사람의 철학적 입장을 갈라놓게 했다.

라이헨바흐 본인이 언급한 것처럼 그의 시공간 철학의 핵심은 ‘시공간의 인과적 이론’이며 ‘물리적 기하학의 규약주의’가 아니었다.¹⁷⁵⁾ 이에 반해 물리적 기하학을 바라보는 카르납의 규약주의적 관점은 그의 박사학위 논문 이후 그의 경력 말기에 이르기까지 크게 변하지 않았다. 라이헨바흐 사후 논리경험주의의 대표자로 자리매김한 카르납은 물리학의 철학적 기초에 관한 자신의 저서에서 「공간의 구조」라는 장(章, chapter)을 집필했는데, 이 장에 표현된 카르납의 관점 역시 여전히 규약주의적인 것이었다는 사실을 이를 분명하게 보여준다. 이제 나는 다음 장에서 카르납의 규약주의 시공간 철학이 형성되는 과정과 그 의의를 자세히 살펴볼 것이다.

175) 이에 대해서는 논문의 제6장과 제7장에서 자세히 논할 것이다. 라이헨바흐는 공간 질서가 시간 질서로 환원되며, 시간 질서는 인과적 과정인 빛 신호를 통해 물리적으로 정의되므로, 시공간의 질서는 물리적 세계의 인과적 질서라는 결론에 다다랐다. 이러한 인과적 질서는 시공간의 계량적 질서가 변동하는 일반 상대론적 상황에서도 유지된다. 물리적 기하학의 ‘규약성’을 강조하는 것은 라이헨바흐가 아니라 카르납이며, 이와 대조적으로 라이헨바흐는 제거할 수 없는 ‘규약성’을 최소화함으로써 물리적 기하학의 경험적 결정 가능성을 옹호했다고 봐야 한다.

제5장. 카르납의 규약주의 시공간 철학 : 형성과 전개

제1절. 서론

상대론의 철학적 의의를 전체론적 규약주의 관점에서 대중적 수준으로 해설하는 것에 성공했던 슐리크는 상대론을 신칸트주의적 관념론에 기반해 해석하고자 하는 카시러의 입장에 반대했다. 하지만 1921년 이후 당시 새롭게 시작하고 있던 ‘과학적 철학(scientific philosophy)’의 전면에 등장하고 있던 것은 다른 두 명의 젊은 철학자였다. 이들은 논리경험주의의 대표 철학자라고 인정받는 한스 라이헨바흐(Hans Reichenbach, 1891-1953)와 루돌프 카르납(Rudolf Carnap, 1891-1970)이었다. 두 사람 모두 상대론에 큰 관심을 가지고 그들의 철학적 경력 초기에 상대론을 중심으로 당대의 물리학적 지식을 집중적으로 분석했다. 이는 라이헨바흐의 1920년 교수 자격 취득논문이 『상대성 이론과 선험적 지식』 176)이었고, 1921년에 제출된 카르납의 박사학위 논문이 『공간』 177)이었다는 사실에서 대표적으로 드러난다.

사실상 우리는 상대론의 철학적 분석 및 그 결론과 관련하여 라이헨바흐와 카르납 사이에 다수의 공통점이 있음을 발견한다. 두 사람 모두 상대론에 대한 분석을 통해 시공간의 계량적 질서보다 위상적 질서가 더 기초적이며, 공간의 질서는 시간의 질서로 환원될 수 있으며, 공간의 3차원성은 인과성을 전제할 때 귀결된다는 결론을 내렸다. 또한 두 사람 모두 시공간 이론의 공리적 체계를 구성하고자 시도하여 그 성과를 얻었고, 이들이 상대론의 시공간에 대해 도출한 철학적 결론들은 그와 같은 공리체계 구성의 결과라고 볼 수 있다. 상대론의 철학적 함의에 대한 라이헨바흐와 카르납 사이의 결보기 의견 일치는 라이헨바흐의 『시간과 공간의 철학』 영문판에 쓴 카르납의 서문¹⁷⁸⁾과 카르납 본인이 쓴 『물리학의 철학적 기초』의 일부 내용¹⁷⁹⁾을 통해 더 강화되었다.

176) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015) 참조.

177) Carnap (1922/2019) 참조. 1921년에 제출된 후 1922년에 출판되었다.

178) 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986) 참조.

179) 루돌프 카르납, 윤용택 옮김 (1966/1993). 특히 물리학적 기하학을 다루는 이

하지만 이러한 표면적 의견 일치와 달리, 상대론을 철학적으로 분석해 나가는 라이헨바흐와 카르납의 입장이 정확히 일치하지는 않았다. 실제로 1920년대 전반기에 라이헨바흐와 카르납이 상대론을 비롯한 당시의 물리적 지식을 철학적으로 분석한 논문들을 자세히 검토할 경우, 둘 사이의 철학적 유사점보다는 중요한 차이점이 드러난다. 이와 같은 철학적 차이의 단서는 두 사람이 상대성 이론에 대해 집필한 최초의 저술에서 찾을 수 있다. 라이헨바흐는 『상대성 이론과 선험적 지식』에서, 물리학자와는 차별화되는 철학자의 관점에서 상대론을 인식론적으로 ‘정밀하게 분석’하고 ‘재구성’해야 할 필요성을 지적했다.¹⁸⁰⁾ 이와 대비하여 카르납은 박사학위 논문인 『공간』에서 공간 개념을 세 개의 하위 개념들로 분석한 후, 이러한 하위 개념들 사이의 논리적 관계 및 계량적 공간이 갖는 ‘규약적 특성’을 이해한다면 공간과 관련하여 학자들 사이에서 불필요하게 이루어지고 있는 논쟁을 ‘해소’할 수 있다고 주장했다.

라이헨바흐는 상대론이 이전까지의 중력 이론인 뉴턴의 이론뿐만 아니라 당시에 경쟁하던 다른 물리학 이론들보다 우월함을 적극적으로 받아들였고, 상대론에 대한 여러 종류의 비판들에 대항하면서 이 이론의 경험적이고 철학적인 타당성을 옹호했다. 이러한 과정에서 라이헨바흐는 상대론적 시공간의 철학적 재구성 및 정당화 작업을 ‘경험주의’ 관점에서 진행했는데, 이때 ‘구성적 공리화(constructive axiomatization)’의 방법을 사용했다. 이 구성적 공리화는 상대론적 시공간 이론에 대한 ‘합리적 재구성’이었다. 그는 상대론적 시간과 공간의 경험적 내용과 임의적 요소를 식별하여 이 이론의 경험적 타당성을 옹호하기 위해 합리적 재구성을 진행했고, 공리 체계를 떠받치는 공리들의 ‘경험적 타당성’이 상대론적 시공간의 인식적 객관성을 ‘철학적으로 정당화’한다고 보았다.

이와 대조적으로 카르납은 상대론만을 옹호하고자 하지 않았다. 오히려 그는 푸앵카레가 제시한 ‘규약주의(conventionalism)’의 관점을 일반화시켜 수용하고 더 과격화하여, 물리학 이론은 우리가 좀 더 확실하게 받아들이는 직관적이고 감각적인 경험 위에 인위적으로 덧붙여지는 임의적이고 규약적인

책의 제3부를 참조.

180) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015) 참조.

구성물이라고 보았다. 카르납이 볼 때 물리학 이론은 인간 지성의 구성적 활동을 통해 수립되며 이 과정에는 규약적 선택이 필연적으로 개입하므로, 상대론은 유일하게 옳은 이론이 아니라 여러 가능한 구성적 결과물 중 구체적인 이유에 의해 고를 수 있는 하나의 이론적 선택지에 지나지 않는다. 카르납은 기호논리학을 방법론적 도구로 삼은 철학적 분석을 통해, 물리학 이론의 어떤 부분에서 구성과 규약적 선택이 필요하며 이때 특정한 규약적 선택이 갖는 의의 혹은 장단점이 무엇인지를 선명히 드러내고자 했다.

1920년대 초에 제시된 라이헨바흐의 교수자격 취득논문과 카르납의 박사학위 논문은 거의 비슷한 출발점에 있었다. 그러나 이렇듯 비슷한 출발점에서 시작한 두 사람의 철학적 탐구는 점차 다른 방향을 향하며 멀어지기 시작했다. 라이헨바흐는 상대론적 시공간의 경험적 타당성을 적극적으로 옹호하면서도 시간과 공간에 관해 인식론적으로 추가적인 해명이 필요한 문제들을 철학적으로 분석하고 재구성했다. 이에 반해 카르납은 물리적 지식 속 ‘규약’의 역할을 강조하면서 여러 물리 이론적 관점들을 관용적으로 포용하는 관점을 취함과 더불어, 기호논리학과 경험주의를 접목하여 과학적 지식을 포함한 인간의 지식 전체를 논리적으로 재구성하는 ‘일반 인식론의 기획’을 추진해나갔다.

이번 장에서 나는 카르납이 상대론적 시공간에 대한 철학적 분석에서 시작하여 어떤 과정을 통해 이론 일반적인 인식론적 기획을 추진해나갔는지를 살펴보고자 한다. 이와 더불어 나는 카르납이 제시한 시공간 철학의 주요 특징이 라이헨바흐의 ‘경험주의’와는 대비되는 ‘규약주의’였음을 보일 것이다. 카르납은 박사학위 논문에서부터 과학적 지식의 ‘규약’적인 측면을 강조하면서, 이러한 과학적 지식의 ‘규약’적 특성으로 인해 철학적 분석은 성찰적인 관점에서 과학에 관한 인식적 논쟁을 ‘해소’할 수 있다는 관점을 취했다. 이러한 ‘규약 중심적’ 관점을 취함으로써 카르납은 특정 물리학 이론의 인식적 기초에 대한 상세한 분석으로 나아가기보다는, 다소 일반적인 관점에서 물리학 이론 속에 등장하는 기초적 규약들의 인식적 의미를 규명하는 작업으로 나아갔다. 이후 이러한 카르납의 ‘일반적이고 논리적 재구성 중심의 철학적 분석’은 현대 과학철학이 보이는 두 유형의 철학적 탐구 방식 중 하나의 방식으로 자리를 잡게 된다.

제2절. 『공간』 : ‘규약 중심의 논리적 재구성과 논쟁의 ‘해소’

논리경험주의를 상징하는 철학자 루돌프 카르납(Rudolf Carnap)은 자신의 학문적인 경력 초기에 상대론의 철학적 의의를 심도 있게 분석했다. 예나 대학에서 수학, 물리학, 철학을 공부했던 그는 고틀로프 프레게(Gottlob Frege, 1848-1925)의 수리논리학 강의로부터 큰 영향을 받았고, 브루노 바우흐(Bruno Bauch, 1877-1942)의 칸트 철학 강의를 수강했다. 이후 카르납은 실험물리학 전공으로 박사과정에 입학했지만, 이후 ‘물리적 기하학의 공리화’라는 주제로 박사학위 논문을 쓰려고 했다. 하지만 물리학과에서는 철학적이란 이유로, 철학과에서는 물리학적이라는 이유로 그의 논문 제안을 수용하지 않았다. 결국 그는 1921년 신칸트주의자 바우흐의 지도로 「공간 : 과학 이론에의 공헌」이라는 제목의 박사학위 논문을 철학과에 제출했다.

카르납의 「공간」에 대한 기존의 철학사적 논의는 이 논문이 당대의 다른 철학적 사조와 갖는 관계에 주목하는 경향이 있다. 예를 들어 스톤(Stone)은 카르납의 논문이 에드문트 후설(Edmund Husserl, 1859-1938)의 현상학(phenomenology) 논의로부터 큰 영향을 받았으며, 이와 동시에 이 논문 속에서 후설의 논의로부터 분기되어 카르납의 후기 철학에까지 이어지는 지점들이 무엇인지를 지적하고 있다. 물론 스톤의 논의처럼 「공간」을 후설을 비롯한 당대의 다른 철학적 사상가들의 논의와 연계하여 분석하는 것에는 중요한 의의가 있다. 그러나 카르납의 「공간」은 당시 상대론이라는 새로운 물리학 이론이 제시한 시간과 공간의 철학적 문제를 그가 어떤 방식으로 분석하고자 했고 어떤 결론을 내리는지를 잘 보여주는 논문이므로, 오히려 우리는 슐리크와 라이헨바흐 같은 논리경험주의자의 상대론 분석과 카르납의 논문을 비교 분석하며 카르납의 철학에서 볼 수 있는 독특한 특징을 발견하고자 노력하는 것이 좋을 것이다.¹⁸¹⁾

카르납은 「공간」에서 공간 개념에 대한 수학자, 물리학자, 철학자 사이의

181) 이상욱 (2009)은 카르납의 상대론적 공간 해석에 대해 간략하게 언급한 바 있다 (161쪽). 카르납의 입장이 “신칸트주의와 규약주의를 결합했다”라고 보는 그의 평가는 대체로 옳으나 그가 카르납의 공간론에 대한 상세한 분석을 제시하고 있지는 않다.

논쟁이 끊이지 않고 있는 것은 이들이 사실상 서로 다른 공간 개념에 대해서 논의하고 있기 때문이라 진단한다. 그에 따르면 ‘공간’ 개념을 좀 더 자세히 분석하여 ‘형식적 공간(formal space)’, ‘직관적 공간(intuitive space)’, ‘물리적 공간(physical space)’이라는 세 개의 하위 개념들로 나눌 수 있다. 만약 이렇게 공간 개념을 세 가지 하위 개념으로 나누고 각각의 공간 개념이 갖는 의미 및 이들 사이에 성립하는 관계를 논리적으로 명료화하여 설명할 경우, 서로 다른 학문을 하는 학자들 사이의 불필요한 논쟁은 종식될 것이다. 이처럼 카르납은 철학자의 관점에서 ‘공간’의 개념을 분석하여 논리적으로 재구성하여 이 개념을 명료화한 후, 이를 통해 서로 논쟁하는 관점 사이를 철학적으로 중재함으로써 이 논쟁을 ‘해소(dissolve)’하는 방식으로 논의를 펼치고자 했다.¹⁸²⁾

제일 먼저 카르납이 논하는 것은 ‘형식적 공간(formal space)’이다.¹⁸³⁾ 형식적 공간 이론인 수학적 기하학은 추상적 관계의 이론이다. 힐베르트(Hilbert)가 유클리드 기하학을 형식적으로 공리화 했듯, 수학적 기하학에서 등장하는 ‘점’, ‘선’과 같은 정의들은 경험적 내용을 가질 필요가 없는 순수한 구조적 정의들이다. 이들은 정의들 사이의 관계를 통해 기능하므로 ‘함축적 정의(implicit definition)’이다. ‘점’ 대신 ‘의자’나 ‘책상’이라는 용어를 사용해도 용어들 사이에 특정한 형식적 관계가 충족되면 어떤 용어를 사용하는지는 문제가 되지 않는다. 이처럼 함축적 정의를 통해 구성된 형식적 기하학의 공리 중 대상들의 위상적 관계만을 포함하는 공리들로 구성된 기하학이 형식적인 위상적(topological) 기하학(R_{nt})이며 임의의 n 차원을 가질 수 있다. 그러나 우리는 위상적 기하학에만 머물러 있을 수 없다. 우리가 형식적인 위상적 기하학에 ‘직선임’에 대한 ‘임의적 규정’ 혹은 ‘규약’을 부가하면 ‘사영적(projective) 기하학(R_{np} 또는 R_{3p})’이 되며, ‘거리 관계’에 대한 ‘임의적 규정(계량 규정)’을 부가하면 ‘계량적(metrical) 기하학(R_{nm} 또는 R_{3m})’이 된다. 이때 ‘직선임’ 혹은 ‘거리 관계’에 대한 규정이 그 본성상 임의적인

182) 실제로 이러한 ‘명료화’ 및 ‘논쟁 해소’는 이후의 카르납 저작들에서도 빈번하게 확인할 수 있는 카르납 철학의 독특한 스타일이다. 카르납의 초기 철학에서 기하학 및 공간에 대한 그의 박사학위에서의 논의가 차지하는 중요성에 대해서는 모먼의 다음 논문을 참고. Mormann (2008), pp. 43-64.

183) Carnap (1922), pp. 27-127. 중 “형식적 공간” (pp. 31-53) 참조.

규약이라는 사실에 주목하자.

‘형식적 공간’ 다음으로 카르납이 논하는 것은 ‘직관적 공간(intuitive space)’이다.¹⁸⁴⁾ 카르납에 따르면 직관적 공간의 공리들은 경험으로부터 도출되는 것이 아니라 인간의 인식 능력을 통해 ‘즉각적으로 파악’되며, 인간의 모든 공간적 경험을 위한 ‘조건’으로서 기능한다. 하지만 인간의 인식 능력은 광범위한 공간이 아닌 ‘국소적(local) 영역’의 공간만을 즉각적으로 파악할 수 있으므로, 직관적 공간의 공리들은 오직 국소적 공간 영역에만 적용된다. 따라서 광역적인 직관적 공간을 구성하기 위해서는 추가로 ‘임의적 규정’들이 규약적으로 덧붙여져야 한다. 직관적 공간에서 가장 기본이 되며 다른 공간들의 공통분모가 되는 공간은 형식적 공간에서와 마찬가지로 ‘위상적 공간(R_m)’이다. 이 위상적 공간은 기하학적 대상들 사이의 위상적 관계(연결성)들만 다루며, 추가적인 계량 규정이 부가되거나 이에 관한 경험적 기반을 얻을 필요가 없다. 이제 위상적 공간에 대상들 사이의 ‘거리를 규정’하는 ‘임의적인 계량 규정’이 덧붙으면 직관적인 계량적 공간(R_{mm})이 된다. 그런데 중요한 점은 이와 같은 ‘계량 규정’이 갖는 ‘규약적 특성’이다. 카르납에 따르면 이때 덧붙는 계량 규정은 경험과 무관하다는 의미에서 ‘경험 독립적’이다.¹⁸⁵⁾

우리가 「공간」에서 가장 주목해야 하는 부분은 ‘물리적 공간’에 대한 카르납의 논의이다.¹⁸⁶⁾ 물리적 공간 이론은 경험 속에서 파악되는 개별적인 물리적 대상들 사이에 어떤 기하학적 관계가 유지되는지를 확립해야 한다. 만약 우리가 측정의 오류 또는 측정 도구의 부정확성을 무시할 수 있다고 가정하면, 우리는 먼저 물리적 공간에서 직선이 어떻게 식별될 수 있는지의 문제를 다루어야 한다. 우리는 빛 광선이나 단위 막대 등과 같은 물리적 대상들을 이용해서 직선을 식별하는데, 이러한 식별은 이미 빛 광선과

184) Carnap (1922) 중 “직관적 공간” (pp. 55-70) 참조.

185) 벵고에치아(Bengoetxea, Juan., 2019)는 카르납이 「공간」에서 직관적인 위상적 공간을 형식적 공간과 물리적 공간의 기초로 상정하였다는 점에서 그의 철학의 전형적인 특성인 ‘규약주의적 관용’과 대비되는 직관의 ‘객관성’을 강조한 바 있다. 그러나 우리가 이후 살펴볼 것처럼, 카르납이 1920년대에 집필한 다른 논문들에서 그가 직관 또는 경험의 객관성보다는 이론 구성의 ‘규약성’을 더 강조한다는 것을 부정하기는 어려울 것이다.

186) Carnap (1922) 중 “물리적 공간” (pp. 71-127) 참조.

단위 막대가 직선임을 가정하고 있다. 즉, 우리에게는 직선성을 통해 경험적 대상을 측정할 수 있는 일종의 ‘규정들(stipulations)’이 필요한데, 중요한 것은 이러한 규정들이 궁극적으로 ‘자유롭게 선택’된다(규약)는 것이다. 이러한 규정은 두 가지 방식으로 이루어질 수 있다. 첫 번째 방법은 특정한 ‘자연적 대상’ 혹은 ‘과정’을 직선이라고 규정한다. 두 번째 방법은 특정한 ‘기준 단위’를 ‘계량 단위’로서 규정한다.

카르납은 이들 중 두 번째 방법인 계량 단위 규정에 초점을 맞춘다. 단위 막대의 길이가 온도 등의 영향을 받지 않는다고 가정하는 계량 규정 M_0 이 있고, 온도 등의 영향을 받는다고 가정하는 계량 규정 M_1 이 있다. M_0 를 택하면 계량 규정은 단순하나 자연법칙이 복잡해지고, M_1 을 택하면 계량 규정은 M_0 에 비해 복잡하나 자연법칙이 단순해진다. 우리가 실제로 그 회전을 지각하지 못함에도 불구하고 지구의 자전과 공전을 수용하여 천체의 운동 현상을 단순하게 설명하는 것처럼, 아마 우리는 자연법칙을 단순하게 만들어주는 계량 M_1 을 계량 M_0 대신 선택할 것이다. 그러나 카르납은 ‘경험의 사실들이 우리에게 특정한 계량 규정을 선택하도록 강요하지는 못함’을 강조한다. 카르납에 따르면 계량 규정 M_0 와 M_1 모두 경험적 사실들과 합치한다는 점에서 계량 선택은 ‘자유롭고’ ‘경험에 독립적’이다. 계량 규정의 선택이 ‘단순성’을 고려한다는 점에서 그 선택이 전적으로 임의적이지는 않지만, 이러한 선택이 경험으로부터 ‘강요’되지 않는다는 의미에서 여전히 그 규약적 특성은 유지된다.

다만 카르납은 경험적 대상들 사이에 성립하는 ‘위상적 관계들’은 계량 규정 선택 없이 경험으로부터 직접 파악된다고 보며, 이러한 입장은 그가 신칸트주의적인 철학으로부터 큰 영향을 받았음을 보여준다. 이는 역으로 오직 물리적인 위상적 공간만이 우리가 경험을 통해 직면하는 것들을 별도의 임의적 규정 없이 재현한다고 말할 수 있게 해준다. 카르납이 볼 때 위상적 관계들에 대한 진술만이 모든 가능한 변환들 아래에서 불변하고 그런 의미에서 ‘사실적 기반’에 대한 ‘순수한 진술’에 해당한다. 이에 반하여 사영적 진술들과 계량적 진술들은 모든 가능한 변환들 아래에서 변화하므로 사실적 기반에 대한 순수한 진술이 아니다. 그렇기에 카르납은 자연에 대한 계량적 공간이 우리가 특정한 계량 규정을 선택하고 부여함으로써 귀결된다고

보았다. 계량 규정을 선택하지 않는 한, 우리는 자연적 사물들 사이에 성립하는 위상적 관계들만을 경험적으로 파악할 수 있을 뿐이다.

카르납은 계량 규정의 ‘규약적 특성’을 더 선명하게 보여주기 위해 지구의 표면 E 를 ‘구면’이 아니라 ‘평면’으로 간주하는 사례를 제시한다. 지구 표면을 평면으로 간주하기 위해서는 기존의 일상적인 계량 M_1 이 아닌 새로운 계량 M_s 가 필요하며, 이 계량의 특성은 측정 막대의 길이가 지구 표면에서의 위치에 따라서 달라진다고 가정한다는 것¹⁸⁷⁾이다. 카르납은 새로운 계량 규정 M_s 를 이용하면 계량 규정 M_1 을 사용할 때의 자연법칙들과는 다른 자연법칙들을 얻게 되지만, 역학의 기초적 개념들을 기존의 방식과는 다른 방식으로 정의하면 역학의 에너지 원리 및 해밀턴의 원리와 같은 자연의 근본 원리들이 여전히 그 타당성을 유지하게끔 만들 수 있음을 보인다. 이를 통해 그는 기존에 우리에게 익숙한 것과 아주 다른 계량 규정을 물리적 공간으로 선택한다고 하더라도 경험의 모든 사실을 모순 없이 나타낼 수 있음을 보이고자 했다.

경험의 사실적 기반을 T , 계량적 규정을 M , 계량적 공간 구조를 R 이라 할 경우, 세 요소 중 두 개가 주어지면 나머지 하나가 결정된다. 이들 중 사실적 기반인 T 는 지각적 경험을 통해 유일하게 주어지지만, 계량적 규정 M 과 계량적 공간 구조 R 은 자유롭게 선택할 수 있다. 이제 다음과 같은 문제가 발생한다. 만약 계량적 공간 구조 R 과 계량 규정 M 을 자유롭게 선택할 수 있다면, 과연 어떤 관점에서 혹은 어떤 근거로 R 과 M 을 선택해야 할까? 우선 계량적 공간 구조 R 을 생각해 보자. 우리는 아마 복수의 공간 구조 중 수학적으로 가장 단순한 유클리드적 공간 구조를 선택할 것이다. 다음으로 계량적 규정 M 을 고려해 보자. 우리는 아마 어떤 물리적 영향에 대해서도 변하지 않는 강체 막대의 계량 규정을 선호할 것이다. 왜냐하면 이것이 가장 단순한 계량 규정이기 때문이다. 그러나 카르납이 볼 때 물리학자들은 R 의 관점에서 혹은 M 의 관점에서의 선택을 고집하지 않는다. 물리학자들은 구성되는 물리학 이론 전체가 가장 ‘단순’해지는 방식으로 계량적 규정 M 또는 계량적 공간 구조 R 을 ‘선택’한다.

187) 이때 측정 막대에 작용하는 ‘체계적’인 힘은 푸앵카레가 말한 종류의 힘(모든 물체에 같은 방식으로 작용하여 이를 식별할 수 없는)이며, 이 힘은 이후 ‘보편력(universal force)’ 또는 ‘계량적 힘(metrical force)’라고 불리게 된다.

원리상 계량적 공간 구조 R 은 자유롭게 선택되고 경험과 독립적이지만, 과학적 실천에서 R 에 대한 선택은 ‘경험의 사실적 기반 T ’ 및 ‘단순성의 공준’에 기초해서 이루어진다. 이를 잘 보여주는 것이 일반 상대론에서 등장하는 비유클리드 기하학이다. 카르납에 따르면 우리가 일반 상대론을 가정할 때 다음과 같은 두 가지의 상황이 가능하다. 첫째, 계량을 우리가 일반적으로 사용하는 M_1 로 선택한다. 이 경우 M_1 을 따르는 측정 막대는 중력장에서의 위치나 방향으로부터 영향을 받지 않고 그 강성(rigidity)을 유지한다. 다만 이때 태양 가까이 갈수록 공간 곡률의 값이 더 강한 정도로 음의 값을 나타내게 된다. 둘째, 계량을 유클리드적인 M_e 로 선택한다. 이는 유클리드 공간 구조 R 로 귀결된다. 그런데 이 경우 단위 막대는 중력장 내의 위치와 방향으로부터 영향을 받아 그 길이를 변경하며, 문제는 이러한 영향이 물체들의 개별적인 특성과 관계없이 모든 물체에 같은 방식으로 적용된다는 점이다(보편력, universal force).

그렇다면 과연 계량 M_1 과 M_e 중 어떤 계량을 선택할 것인가? 이 상황에서 카르납이 내리는 결론은 주목할만하다. 그에 따르면 이 상황에서 어떤 계량을 선택할지는 사실에 의해서 결정되는 문제가 아니라 편리함에 비추어 ‘선택’되어야 하는 문제다. 카르납에 따르면 일반 상대론에서 물리학자들이 M_1 을 선택하는 까닭은 이 선택으로 인해 물리학 이론의 전체 체계가 더 ‘단순’해지기 때문이다. 그러나 중요한 것은 이와 같은 물리학자들의 선택이 ‘유일하게 옳은 선택은 아니라는 것’이다. 상대론을 지지하지 않는 물리학자들은 상대론자들과는 다른 이유로 계량 M_e 를 선택할 수 있고 이러한 선택이 ‘잘못된 것’이라고 말할 수는 없다.

지금까지의 논의를 종합해 보자. 카르납에 따르면 우리는 직관적인 위상적 공간 R'_{nt} 에 대한 즉각적(직관적)인 파악으로부터 암시를 받아 이 공간에 형식적인 위상적 공간 R_{nt} 의 규칙들을 적용한다. 또한 우리는 직관적인 위상적 공간 R'_{nt} 에 근거하여 물리적인 위상적 공간 R''_{nt} 를 구체화한다. 우리는 물리학을 수립하기 위해 위상적 공간에서 계량적 공간으로 나아가 갈 때 임의적인 계량 규정을 자유롭게 선택한다. 다만, 형식적 공간과 직관적 공간이 아닌 물리적 공간의 경우 계량 규정의 선택은 경험적 사실에 기초한 ‘단순성 판단’을 통해 이루어진다. 그러나 카르납은 ‘단순성 판단’이 유일한

계량 규정의 선택을 강요한다고 보지 않는다. 그러므로 가능한 복수의 계량 규정 중 특정한 규정을 선택하는 것이 다른 선택에 비해 옳다고 말할 수 없으며, 각각의 선택에는 그 나름의 합리적인 이유가 있다.

카르납이 볼 때 수학자, 물리학자, 철학자 사이에서 공간에 대한 논란이 계속되는 이유는 수학자와 물리학자가 주로 형식적 또는 물리적 공간을 논하지만, 철학자는 주로 직관적 공간을 논하기 때문이다. 그러나 직관적인 위상적 공간이 다른 공간들의 공통되는 기초이며 위상적 공간으로부터 계량 규정 선택을 통해 계량적 공간이 도출됨을 이해한다면 학자들 사이의 논쟁은 일어나지 않을 것이다. 카르납은 ‘직관적인 계량적 공간’이 아닌 ‘직관적인 위상적 공간’을 공간 개념의 기초로 삼음으로써 직관적 공간이 공간 개념의 기본 형식이라는 칸트적 인식론을 구체화하면서, 이와 동시에 수학자와 물리학자가 옹호하는 특정한 계량적 공간이 ‘규약적 선택’에 의해 귀결된 것임을 보이려고 했다. 카르납에 따르면 우리에게 확실한 것은 경험의 사실적 기반 T이고 이는 인간의 직관을 통해 파악된다. 경험의 사실적 기반 T로부터 사영적 공간과 계량적 공간으로 나가기 위해서는 선택의 자유를 허용하는 ‘규약’들을 채택해야 한다.

카르납이 쓴 「공간」의 주된 목적은 상대론을 다른 이론들과 대비하여 편들어 옹호하는 것이 아니었다. 우리는 물리적 공간의 위상적인 특성을 경험에 비추어 직접 파악하지만, 이를 넘어서 계량적 공간을 구성할 때 우리에게 원칙적인 ‘선택’의 자유가 주어진다. 우리는 유클리드적 계량 M_e 를 선택할 수 있지만, 이와 달리 측정 막대의 강성(rigidity)을 유지하는 계량 M_1 을 선택할 수 있다. 이때의 계량 선택은 ‘단순성’ 판단을 통해 이루어 지지만, 한 입장의 단순성 판단이 다른 입장의 단순성 판단과 비교할 때 더 옳은 것은 아니다. M_e 를 선택하는 데에는 나름의 이유가 있으며 M_1 을 선택하는 것 또한 마찬가지다. 결국 카르납은 철학적 분석을 통해 상대론을 지지하는 사람이 M_1 을 선택하는 이유가 무엇인지, 상대론을 반대하는 사람이 M_e 를 선택하는 이유가 무엇인지를 구체적으로 밝힘으로써 서로 경합하는 두 입장 사이를 철학적으로 ‘중재’하여 논쟁을 ‘해소’하고자 했다.

이러한 카르납의 철학적 분석은 그가 물리적 기하학에 관한 푸앵카레의 ‘규약주의’를 계승하면서도 ‘규약주의’를 일반 상대론의 경험적 성공에 부합

하는 방식으로 변형시켰음을 보여준다. 푸앵카레는 어떤 경우에도 물리학자들이 ‘수학적 단순성’을 근거로 유클리드 기하학을 채택하리라 믿었지만, 1915년에 제시된 일반 상대론은 정식으로 비유클리드 기하학을 물리적 기하학으로 채택했다. 카르납은 일반 상대론을 통해 푸앵카레의 생각이 반박되고 ‘물리적 기하학의 경험적 결정 가능성’이 긍정되었다고 보기보다는, 규약주의를 더 유연하게 변형시킴으로써 여전히 규약주의적 관점을 견지할 수 있으리라 보았다.¹⁸⁸⁾ 카르납은 ‘물리적 기하학’을 ‘계량 규정 M ’과 ‘계량적 공간 구조 R ’로 구분한 후, 여전히 이들의 선택은 규약적이며 물리학자에 따라 다른 선택을 할 수 있다고 보았다. 또한 카르납은 물리학자들이 ‘수학적 단순성’이 아닌 ‘물리학 전체의 단순성’을 기준으로 비유클리드 기하학을 선택했음을 지적했다.¹⁸⁹⁾

상대론의 출현에 따른 물리적 기하학의 상황을 이상과 같이 ‘규약’ 중심으로 바라본 카르납의 입장은, 상대론 속 비유클리드 기하학의 사용을 일방적으로 편들지 않으면서도 ‘물리학 전체의 단순성’을 위해 비유클리드 기하학이 물리학에서 채택되었다고 설명함으로써 철학적으로 문제가 되는 상황을 논리적으로 재구성하고 해명하는 카르납 특유의 규약주의적 관점을 제시했다. 다만 문제는 이와 같은 카르납의 논리적 재구성이 상대론적 시간과 공간이 갖는 복잡한 측면들에 대한 다소 단순하고 부정확한 해명이었다는 데 있다. 실제로 상대론적 시간과 공간은 등가 원리 사고 실험, 회전 원판 사고 실험, 물리학에서 좌표와 측정 사이의 관계 등에 관한 일련의 사고 과정을 통해 귀결된 것이었다. 그런 의미에서 상대론에서 비유클리드 기하학은 카르납이 제시하는 설명에서처럼 ‘단순성’이라는 ‘단순한’ 기준에 의해 채택된 것이 아니었다.

188) 이러한 카르납의 입장은 푸앵카레에 대한 라이헨바흐의 공격으로부터 푸앵카레를 옹호하는 그의 언급에서도 확인할 수 있다. 푸앵카레가 유클리드 기하학만을 물리적 기하학으로서 옹호하지 않았으며, 만약 계량 규정이 정해지면 물리적 기하학은 경험적으로 결정될 수 있었다고 보았다는 것이다. 루돌프 카르납, 윤용택 옮김 (1966/1993), 208쪽 참조. 그러나 나는 이러한 카르납의 푸앵카레 해석이 자신의 규약주의적 입장에 비춘 다소 편향된 해석이라고 생각한다. 왜냐하면 푸앵카레가 유클리드 기하학을 물리적 기하학으로 선호했고 어떤 경우에도 이를 선택할 것이라고 보았음은 여러 문헌적 증거들로 볼 때 명확하기 때문이다.

189) 프리드먼 또한 카르납의 입장을 ‘계량적 규약주의(metrical conventionalism)’라 부르며 그것이 푸앵카레와 차별화되는 관점이었다고 본다. Friedman (1999), p. 49.

제3절. 『공간』 이후 카르납의 이론 일반적 인식론 프로그램

이상과 같이 카르납은 상대론적 시간과 공간에 대한 구체적인 경험주의적 재구성과 해명보다는 물리학 이론 속 규약적 요소의 중요성을 강조하며 특정한 규약적 요소를 선택하는 구체적인 이유가 무엇인지를 밝히고자 했고, 이러한 입장은 물리학자이자 철학자였던 덩글러(Dingler)에 대한 그의 평가에서도 잘 드러난다. 실제로 라이헨바흐는 상대론을 반대하는 덩글러의 급진적인 규약주의를 강력하게 비판한 바 있다.¹⁹⁰⁾ 이에 반해 덩글러에 대한 카르납의 평가는 라이헨바흐보다 더 관대하다.

카르납은 1921년 논문 「무엇이 자연법칙들을 유지하게 하는가?」¹⁹¹⁾에서 덩글러의 입장을 ‘비판적 규약주의’라 칭한다. 덩글러는 물리학의 기본 원리가 전적으로 규약에 의존한다는 급진적인 주장을 펼쳤으며, 이때 규약의 선택은 ‘최대 단순성의 원리’에 근거한다. 비록 덩글러는 ‘최대 단순성의 원리’에 근거하여 유클리드 기하학을 물리학적 기하학으로 선택해야 한다는 결론을 내리고 상대론을 부정했지만, 카르납이 볼 때 덩글러와 같이 굳이 상대론을 부정하는 것에까지 나아갈 필요는 없다. 우리는 그저 상대론과 비유클리드 기하학을 선택한다면 그러한 선택의 이유가 무엇인지, 상대론이 아닌 물리학 이론과 유클리드 기하학을 선택한다면 그러한 선택의 이유가 무엇인지를 구체적으로 밝히는 수준에서 멈춘 후 실질적인 선택은 물리학자들에게 맡길 수 있다. 카르납에 따르면 그러한 철학적 해명 후 이루어지는 물리학자들의 선택은 실천적인 근거에 의해 규약적으로 이루어지므로 더 이상의 철학적 분석이 불가능하다. 철학적 분석이 이와 같은 규약적 선택의 지점에 이르면 더 이상 옳고 그름의 판단은 이루어지지 않는다.

카르납은 철학적으로 문제 혹은 논란이 되는 상황에서 과학적 지식 속 규약이 등장하는 지점과 그 의의를 해명함으로써 불필요한 논쟁의 중재자 역할을 하기 위해 과학 이론을 논리적으로 재구성하는 것이 새로운 철학의 역할이라 생각했다. 이러한 그의 입장은 1923년의 논문 「물리학의 임무와

190) Reichenbach (1922), 덩글러의 급진적 규약주의에 대한 라이헨바흐의 비판 참조.

191) Carnap (1921) 참조.

최대 단순성 원리의 적용에 대하여」 192)에서도 잘 드러난다. 카르납은 물리학 구성을 위해 세 가지의 약정(stipulation), 즉 공간 공준, 시간 공준, 인과적 법칙이 필요함을 강조한다. 카르납에 따르면 이것들이 일종의 약정(규약)인 이유는 이에 관한 선택지가 유일하지 않기 때문이다. 예를 들어 우리는 미리 공간을 유클리드적 체계로서 약정할 수 있지만, 강제 개념을 특정하게 규정함으로써 이에 따라 귀결되는 비유클리드적 체계를 받아들일 수도 있다. 카르납은 공간에서 살펴본 규약적 특성을 시간에까지 적용한다. 그에 따르면 시간에 관련해도 우리는 어떤 물리적 체계를 시간 주기의 기준으로 선택할지에 대한 자유를 갖는다. 더 나아가 카르납은 ‘인과성’에도 규약성을 적용한다. 인과적 법칙 역시 특정한 법칙을 미리 인과적 법칙으로서 ‘전제’할 수 있지만, 이와 달리 세계 속 물리적 실체들의 분포를 먼저 가정한 후 이를 근거로 이들 사이에 적용되는 인과적 법칙을 ‘추론’할 수 있기 때문이다.¹⁹³⁾

만약 이처럼 공간 공준, 시간 공준, 인과적 법칙이 근본적인 측면에서 ‘규약’ 혹은 ‘약정’이라면, 우리에게 선택을 안내할 수 있는 방법론적 원리가 필요하며 카르납은 이를 ‘최대 단순성의 요구’라 부른다. 하지만 중요한 것은 이 원리가 단일한 선택을 강요하지 않는다는 것이다. 예를 들어 최대 단순성의 원리를 기하학적 체계에 적용하면 유클리드적 체계를 선택하게 되지만, 이 원리를 세계 기술에 적용하면 이보다 덜 단순한 기하학적 체계를 사용하는 상대성 이론을 선택하게 된다.

카르납에 따르면 완결된 물리학은 세 권의 책으로 구성된다. 1권은 ‘공리적 체계’, 2권은 공리적 체계와 물리적 상태 기술을 연결하는 일종의 ‘사전’, 3권은 세계의 ‘물리적 상태 기술’이다. 방법론적 원리인 최대 단순성의 원리는 이러한 세 권의 책 중 1권에 적용될 수 있지만 2권과 3권에도 적용될 수 있다.¹⁹⁴⁾ 최대 단순성의 원리를 물리학의 어떤 요소에 적용해야 하는지는

192) Carnap (1923) 참조. 이 논문은 이후 과학철학자 수피(Suppe)에 의해 과학 이론에 대한 논리경험주의의 ‘수용된 견해(received view)’가 명시적으로 표출된 최초의 논문이라고 평가된다. 하지만 나는 카르납의 이 논문을 좀 더 역사적인 관점에서 맥락적으로 분석할 때 이와 다른 시사점을 도출할 수 있다고 생각한다.

193) Carnap (1923), pp. 211-217.

194) Carnap (1923) pp. 217-221. 2권과 3권은 서로 밀접한 관계를 갖기 때문에 최대 단순성 원리의 적용에 있어 늘 서로 연계된다.

강요할 수 없다. 최대 단순성의 원리를 1권에 적용하면 유클리드적 체계와 뉴턴의 운동 법칙들을 유지하게 되지만, 이 원리를 2권 및 3권에 적용하면 일반 상대론을 얻는다. 이 선택 역시 옳은 선택과 그른 선택으로 구분되지 않으며, 우리는 철학적 분석을 통해 특정한 선택이 이루어지는 구체적 근거를 명시하여 제시할 수 있을 뿐이다.

이처럼 카르납은 물리학 이론에서 규정 또는 규약이 근본적인 역할을 하며 이들은 유일하게 선택되지 않기 때문에 원리적인 선택의 자유를 허용한다고 보았다. 실제로 우리는 물리학에서 특정한 규약 선택이 갖는 이점이 무엇인지를 밝히거나, 여러 규약 사이에 성립하는 논리적 관계가 무엇인지를 밝히는 방식의 철학적 작업이 카르납의 후속 논의들에서 계속 이어지는 것을 확인할 수 있다. 카르납은 1924년 논문 「공간의 3차원성과 인과성 : 두 허구 사이의 논리적 연결에 관한 탐구」¹⁹⁵⁾에서 공간의 3차원성과 인과성 모두 우리의 직접적인 경험 속에서는 찾아볼 수 없는 일종의 ‘허구’, 즉 ‘규약’을 통해 얻은 산물이라는 관점을 취한다. 우리의 감각 인상들의 세계인 1차적 세계는 2+1차원(공간+시간)이지만, 물리적 세계인 2차적 세계는 3+1차원(공간+시간)이며, 3차원 공간은 우리가 경험을 통해 직접적으로 파악하는 것이 아니라 또 하나의 허구인 ‘물리적 인과성’을 전제했을 경우 얻을 수 있는 논리적 귀결에 지나지 않는다.

1926년 논문 「공간의 속성들이 시간의 속성들에 의존하는 것에 관하여」¹⁹⁶⁾에서 카르납은 공간적 질서의 위상적 속성들이 시간적 질서 및 일치(coincidence)의 위상적 속성들로부터 ‘논리적’으로 귀결될 수 있음을 보인다. 이 논문에서도 공간과 시간 질서를 일종의 ‘허구적인 구성물’이라고 보는 카르납의 입장은 여전히 유지된다. 카르납은 일종의 ‘규약’이며 논리적으로 재구성될 수 있는 ‘공간적 질서’의 ‘위상적 속성’들이, 그 또한 ‘규약’이자 논리적으로 재구성될 수 있는 ‘시간적 질서’의 위상적 속성들 및 ‘일치’라는 논리적 관계를 상호 결합하여 논리적으로 도출될 수 있음을 개략적으로 보이고자 했다.

이제 우리는 카르납이 1920년대 초기부터 1926년경까지 추진했던 철학적

195) Carnap (1924) 참조.

196) Carnap (1926), “On the Dependence of the Properties of Space on those of Time” 참조.

기획을 다음과 같이 요약할 수 있다. 물리학 이론은 경험을 통해 확실하게 파악할 수 있는 감각 인상들의 1차적 세계(경험의 사실적 기반) 위에 구성 작용을 통해 허구적이고 규약적이며 논리적인 개념적 요소들이 덧붙여짐으로써 구성된다. 철학의 임무는 논리적 분석을 통해 이러한 각각의 관점에서 특정한 허구적 규약들을 선택하는 근거가 무엇인지를 밝히거나, 과학적 지식에 등장하는 특정한 규약들 사이에 성립하는 논리적 관계가 무엇인지를 밝히는 것이다. 이러한 철학적 해명이 이루어지면 특정한 이론 혹은 개념에 대해 서로 다른 관점을 가진 학자들 사이의 불필요한 논쟁은 성공적으로 ‘해소’된다. 이와 더불어, 논리적 도구를 이용해 합리적으로 재구성하면 과학적 지식의 토대는 결과적으로 우리의 감각을 통해 직접적으로 파악되는 인상들로 환원될 수 있다. 이와 같은 카르납의 철학적 기획은 그가 쉘리크의 초청에 따라 비엔나 대학으로 거취를 옮긴 후 쉘리크의 지도 아래에서 1926년에 제출한 교수자격 취득논문 「물리적 개념 형성」(197)에 잘 드러나 있다.

카르납에 따르면 물리적 개념 형성은 세 단계로 이루어진다. 첫째 단계는 질적 단계로서 이 단계에서 우리는 사물들과 그 속성을 경험적으로 지각한다. 둘째 단계는 양적 단계로서, 이 단계에서 우리는 2개의 ‘위상적 규약’과 3개의 ‘계량적 규약’을 도입함으로써 물리적 크기를 정의하고, 이렇게 정의된 물리적 크기들로부터 다른 양들을 유도한다. 우리는 이러한 양적 단계를 거치며 물리적 세계를 수학적으로 기술할 수 있게 된다. 셋째 단계인 추상적 단계에서 세계는 4차원적 우주로 표상된다. 그러나 우리가 최종적으로 이러한 추상적 이론을 얻는다고 하더라도, 추상적 이론에서의 양적 진술들은 우리가 1단계에서 경험적으로 접하는 감각 지각적인 질적 진술들로 ‘유일하게 번역’(동등화의 유일성)될 수 있다. 그렇기에 비록 물리학 이론이 추상화되더라도 이론과 세계 사이의 관계는 유지되며, 추상적 이론의 확실성을 담보하는 것은 바로 우리의 감각 경험을 통해 얻은 질적 진술들이 된다.

비록 카르납이 박사학위 논문에서 ‘공간’이라는 특수한 주제를 다루었고 상대론적 공간의 문제를 상세하게 논의했다 하더라도, 과학이 제기한 철학적 문제 상황을 대하는 카르납의 방식은 이후 크게 변하지 않았다. 이미 카르납은 「공간」에서 ‘규약’의 중요성을 강조하며 푸앵카레가 제시한 ‘규약주의’의

197) Carnap (1926), “Physical Concept Formation”을 참조.

기획을 더 강화하고 발전시키고자 했다. 우리의 직접적인 감각 지각적 경험 위에 덧붙는 직선성 규정이나 계량 규정을 일종의 ‘규약’이라고 본 카르납은, 이와 유사한 관점을 점진적으로 물리적 지식의 다른 영역들에 까지 확장하고자 했다.

공간에 관한 논의에서 카르납은 공간의 ‘계량적 규정’뿐만 아니라 ‘계량적 공간 규정’ 또한 일종의 규약이라고 주장하며 논의 영역을 확장했다. 또한 그는 ‘규약’의 개념을 시간과 인과성에 적용했고, 경험적 명제들을 정량화시키는 데 필요한 기본 단위들의 ‘규약성’ 또한 강조했다. 결과적으로 카르납은 우리의 감각 지각적 경험을 통해 직접적으로 파악되는 명제들을 기반으로 성립하는 모든 종류의 과학적 명제들이 기초적인 ‘규약들’을 ‘선택함’으로써 논리적인 방식으로 ‘구성’되는 과정을 철학적으로 해명하고자 했다. 그렇기에 우리는 카르납이 푸앵카레가 시작한 규약주의 프로그램을 지식의 모든 영역에 전방위적으로 확장하는 철학적 기획을 강력하게 추진했다고 평가할 수 있다.

카르납의 이러한 일반적인 철학적 탐구는 동시에 전통적인 의미에서 ‘경험주의’적인 것이기도 했다. 카르납은 흄(Hume)과 마흐(Mach)가 정성적인 수준에서 그 방향과 방법을 제시한 경험주의의 인식론 프로그램을, 19세기에 등장하여 발전한 기호논리학을 이용하여 체계적으로 수립하고자 했다.¹⁹⁸⁾ 이제 철학은 기호논리학이라는 강력한 방법론의 힘을 빌려, 복잡한 과학적 명제들이 어떤 방식으로 인간의 직접적인 감각 지각적 명제들과 연결되는지를 ‘논리적’인 형태로 제시할 수 있었다. 비록 이와 같은 논리적 재구성이 일종의 ‘개요(스케치)’에 지나지 않는다고 하더라도, 이와 유사한 철학적 분석과 재구성의 작업이 이후 추가로 상세히 진행되어 계속 성공을 거둔다면 모든 인간의 과학적 지식을 인간의 경험에 근거 지으려던 전통적인 경험주의의 기획이 20세기에 들어서 비로소 성공할 수 있으리라 기대하게 했다.

198) 카르납이 이러한 경험주의적 인식론 프로그램을 추진하는 데 러셀(Russell)의 『철학에서 과학적 방법론을 위한 영역으로서 외부 세계에 대한 우리의 지식』(1914년)이 중요한 역할을 했음은 잘 알려져 있다.

제4절. 카르납 시공간 철학의 규약주의적 특성

상대론을 바라보는 라이헨바흐와 카르납의 입장 사이에는 유사점이 많이 있었다. 두 사람 모두 기호논리학의 기법을 적극적으로 이용해서 상대론을 분석하고 재구성했다. 또한 두 사람 모두 상대론에 대한 분석을 통해 시공간의 위상적 질서가 계량적 질서보다 더 근본적이고, 공간 질서는 시간 질서에 의해서 환원할 수 있으며, 공간의 3차원적 성격은 인과성의 귀결이라는 결론에 이르렀다. 이와 같은 여러 유사점으로 인해 많은 경우 라이헨바흐와 카르납은 상대론의 철학적 함의에 대해 대체로 유사한 관점을 갖고 있다고 평가되어왔다.

그러나 이러한 유사성에도 불구하고 둘 사이에는 중요한 철학적 차이가 있었다. 무엇보다 중요한 차이는 두 사람이 상대론적 시간과 공간의 의의를 규명하는 방식에 있다. 라이헨바흐는 상대론 속 시간과 공간의 경험주의적 의미를 ‘합리적으로 재구성’한 ‘구성적 공리체계’를 내세웠다. 그는 이러한 경험주의적 재구성의 결과로 상대론적 시간과 공간의 실질적인 내용을 담고 있는 소수의 경험적 명제들을 추려내고, 이를 통해 시간과 공간의 경험적 의미를 구체화하여 제시할 수 있었다. 라이헨바흐가 볼 때 어떤 물리학 이론에 관한 인식적 문제들을 물리학자보다 더 전문적으로 다룰 수 있는 사람이 철학자이며, 철학자는 고유의 분석적 방법을 사용하여 이 이론의 핵심이 되는 경험적 사실들과 임의적 정의들을 구분한다. 이러한 분석 작업을 마치면 문제가 되는 이론의 실질적인 경험적 내용을 분명하게 제시할 수 있다. 더 나아가 철학 고유의 분석 작업의 결론이 물리학자 자신의 철학적 결론과도 일정 부분 상치될 수 있다. 이를 통해 철학적 분석의 결과는 이론을 창시한 물리학자의 철학적 견해가 가진 오류를 교정할 수 있다.

이와 같은 철학적 입장을 전개하면서 라이헨바흐는 논리경험주의의 전통적인 구분으로 알려진 ‘발견의 맥락(context of discovery)’과 ‘정당화의 맥락(context of justification)’ 구분을 도입했다. 라이헨바흐가 볼 때 아인슈타인은 철학적 분석과 물리학적 직관을 동시에 사용하면서 상대성 이론에 도달했지만, 이 이론이 제출된 이후 이 이론이 말하는 시간과 공간 개념의 의미에 대한 체계적인 의미 규명을 제시하지 않았다. 라이헨바흐가 자신의

1924년 저작 『상대성 이론의 공리화』를 상대론적 시간 및 공간에 대한 ‘철학적 정당화’라고 평가한 것은, 자신의 공리체계에서 상대론적 시공간 이론이 기초하고 있는 경험적 사실들과 임의적 정의들이 구분됨으로써 상대론적 시공간의 경험적 근거가 명백하게 밝혀졌다고 보았기 때문이다. 그는 공리인 경험적 사실들을 우선에 두고 임의적 정의들은 공리들에 덧붙기 때문에 임의적 정의들이 이론의 경험적 내용에는 영향을 미치지 못한다고 보았다.¹⁹⁹⁾

카르납은 상대론에 대해 라이헨바흐와 다른 관점을 취했다. 카르납은 박사학위 논문 「공간」에서 상대론만을 유일한 옳은 이론이라고 편들지 않았다. 경험의 사실적 기반, 계량 규정, 계량적 공간 규정이 있을 때 경험의 사실적 기반은 우리에게 직접적으로 주어지지만, 계량 규정이나 계량적 공간 규정은 우리가 규약적으로 선택한다. 상대론의 계량 규정 혹은 계량적 공간 규정은 특정한 ‘단순성 판단’에 의해 귀결되는 가능한 결과 중 하나일 뿐이며, 그렇기에 우리는 상대론과는 다른 계량 규정 혹은 계량적 공간 규정을 선택할 수 있다. 이를 통해 우리는 여러 가지 다양한 이론적 입장들 사이에서 하나의 입장만을 편들지 않고 이 입장들 사이를 철학적으로 중재할 수 있다. 이와 같은 카르납의 철학적 중재는 과학 이론의 논리적 재구성을 바탕으로 물리학 이론 속 ‘규약(convention)’ 혹은 ‘약정(stipulation)’의 기능을 강조함으로써 가능했다. 만약 물리학을 구성하는 과정에서의 중요한 선택이 원칙적으로 ‘규약적’이라면, 이는 그 선택이 유일무이하지 않으며 다른 선택 역시 그만큼 타당할 수 있음을 의미한다.

카르납이 이와 같은 철학적 중재자로서 역할을 하기 위해 사용한 것은 물리학 이론에 대한 ‘논리적 재구성’의 방법이었다. 카르납에 따르면 모든 사람이 인정할 수 있는 감각 지각적 기반 위에 다양한 방식으로 규약들이 도입되면서 물리학 이론이 구성된다. 이때의 ‘구성’ 과정은 임의적이고 규약적이므로, 우리는 여러 가지 다양한 방식으로 이론 체계를 구성할 수 있다. 카르납은 ‘물리적 개념 형성 과정’을 논리적으로 재구성함으로써 이와 같은 상황을 잘 드러냈다. 카르납이 볼 때 철학은 다양한 종류의

199) 이때의 경험적 사실들은 1차적 지각내용이 아니라 이미 일정 부분 이론을 포함하고 있는 사실들이며, 그런 의미에서 ‘이론 적재적’ 사실들이다. 이러한 사실들은 논의의 순환성 문제를 피하도록 상대론 이전의 물리학적 지식만을 포함한다.

물리학 이론들을 아우를 수 있는 일반적 이론 구성의 과정을 논리적으로 재구성한다. 이러한 논리적 재구성이 이루어지면, 하나의 물리학 이론을 편들지 않고 각각의 물리학 이론이 특정한 규약을 선택하는 구체적인 이유를 보임으로써 이들 사이의 갈등을 해소할 수 있다.

물리적 기하학을 바라보는 카르납의 ‘규약주의적 관점’은 「공간」 이후에도 크게 변하지 않았다. 그리고 이러한 그의 관점은 라이헨바흐의 경험주의적 관점과 다른 것이었다. 어떤 의미에서 라이헨바흐의 시공간 철학이 ‘규약주의’가 아닌 ‘경험주의’에 속하는 것인지에 대해서 나는 본 논문의 6장과 7장에서 좀 더 자세히 분석할 것이다. 다만 이 장에서는 어떤 과정을 통해 물리적 기하학을 바라보는 카르납의 입장이 라이헨바흐의 입장과 대동소이하다는 평가를 받게 되었는지, 왜 카르납의 시공간 철학이 상대론적 시공간에 대한 불충분한 철학적 분석인지를 설명하고자 한다.

먼저 살펴볼 것은 1928년에 독일어로 출판되었던 라이헨바흐의 『시간과 공간의 철학』이 영문판(1958년)으로 출간되었을 때 쓴 카르납의 서문이다. 카르납은 이 서문에서 물리적 기하학의 문제를 간략하게 제시한 후, 아인슈타인이 물리학에 비유클리드 기하학을 사용함으로써 물리학 전체를 ‘단순’하게 만들었다고 말한다. 우리는 계량 측정의 방법을 정한 후 물리적 기하학을 경험적으로 결정할 수 있지만, 물리적 기하학을 미리 전제한 후 이에 맞게 계량 측정과 관련한 보편적 힘을 도입할 수도 있다는 것이다. 그는 물리적 기하학의 경험적 특성과 규약적 특성에 관한 철학적 분석이 술리크, 라이헨바흐, 자신 등에 의해 1920년대에 이루어졌음을 밝힌 후, 라이헨바흐의 책이 그와 같은 분석을 ‘체계적으로 정리’한 저술이라 평가한다. 카르납에 따르면 라이헨바흐의 책은 “기하학에 대한 경험주의적 개념의 개발에 있어서 중요한 이정표”이다. 특히 그는 라이헨바흐가 제시한 ‘보편력 제거의 원리’라는 일반적인 방법론적 원리의 중요성을 강조한다. 이는 우리가 모든 보편력을 사라지게 하는 이론의 형태를 채택해야 한다는 원리이다.²⁰⁰⁾

그런데 문제는 이러한 카르납의 서문이 라이헨바흐의 시공간 철학이 갖는 핵심적인 특징을 제대로 설명하지 않고 있다는 데 있다. 라이헨바흐는 ‘구성적 공리체계’를 수립함으로써 빛 기하학만으로 특수 상대론적 시공간의

200) 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986), 11-14쪽.

질서를 수립할 수 있으며 물질의 기하학은 빛 기하학을 따름을 보인 것, 일반 상대론에 이르러 시공간의 계량적 질서는 성립하지 않더라도 위상적 질서는 여전히 성립하며 이 질서가 곧 세계 속 경험적인 인과적 질서임을 보인 것이 자신의 시공간 철학의 가장 중요한 성과라고 보았다. 그런데 카르납의 서문은 라이헨바흐의 시공간 철학 중 카르납 자신의 규약주의적 관점에 부합하는 부분만 선택적으로 강조하고 있다. 카르납의 말처럼 라이헨바흐가 합동성 정의의 규약성을 인정하면서 이 정의에서 ‘보편력 제거의 원리’를 방법론적으로 채용하고 있기는 하다. 그러나 이와 같은 라이헨바흐의 입장은 물리적 지식 속에서 ‘규약’의 역할과 범위를 최소화하기 위한 것이었지, 카르납처럼 ‘규약주의’의 인식론을 전방위로 확대하고자 한 것이 아니었다.

또한 라이헨바흐는 특수 상대론적 시공간에서는 물리적 기하학의 계량적 형태가 ‘규약적’이지만, 일반 상대론적 시공간에서는 이 형태가 더 이상 규약적으로 상정되지 않고 측정 물체들을 통해 경험적으로 결정된다고 보았다. 만약 우리가 ‘보편력 제거의 원리’를 방법론적으로 도입하여 시계와 막대의 정의를 받아들일 경우, 물리적 기하학의 규약적 선택 여지는 없어지며 철저히 경험적으로 결정된다는 것이다.

특수 상대론적 시공간에서 찾을 수 있는 물리적 기하학의 ‘규약성’은 ‘보편력 제거’를 전제하는 시계 및 막대와 같은 측정 물체의 정의 속에 유입되는 필요불가결한 요소이지만, 라이헨바흐 시공간 철학의 핵심은 이러한 ‘규약주의’가 아니었다. 빛 신호를 통한 빛 기하학의 구성 가능성, 빛 기하학과 물질 기하학의 합치, 시공간의 계량적 질서에 대한 위상적 질서의 우선성, 인과적 구조인 시공간 질서의 경험적 파악 가능성 등이 라이헨바흐 시공간 철학의 핵심적 요소였다. 물론 짧은 분량의 서문에서 카르납이 자신의 철학적 관점을 위주로 서술한 것을 잘못이라 할 수는 없다. 하지만 이러한 카르납의 서문은 라이헨바흐 시공간 철학의 핵심을 제대로 드러내지 못했을 뿐만 아니라, 독자들이 카르납의 ‘규약주의’ 시공간 철학을 라이헨바흐의 ‘경험주의’ 시공간 철학과 일치하는 것으로 오해하게 만드는 중요한 계기를 제공했다.

카르납이 ‘규약주의’ 시공간 철학을 그의 경력 말년까지 유지했음을 잘 보여주는 것은 그의 1966년 저작 『물리학의 철학적 기초』이다. 라이헨

바흐 사후 명실공히 논리경험주의의 대표적인 철학자가 된 카르납은 이 책에서 물리학적 지식을 바라보는 자신의 완숙한 철학적 관점을 평이하게 서술하고 있다. 이 책에서 우리는 40년이 넘는 시점에서 물리적 기하학을 바라보는 카르납의 철학적 관점이 그의 박사학위 논문과 크게 달라지지 않았다는 사실을 발견한다. 여전히 카르납은 우리가 ‘계량 규정’뿐만 아니라 ‘계량적 공간 규정’을 규약적으로 선택할 수 있으며, 우리에게 익숙한 계량 규정(측정 물체의 ‘강성’을 유지)을 선택하면 물리학 전체가 ‘단순’해지는 까닭에 상대론에서 이 계량을 선택했다고 설명한다.

...이론 T2를 선택하면 유클리드 기하학이 유지된다. 하지만 그럴 경우에 우리는 중력장에서 빛의 굴절을 기술해 줄 새로운 광학 법칙들을 고안해야 한다. 다른 한편 이론 T1에서, 우리는 비유클리드 기하학을 채택하게 되고, 진공 속에서 빛은 중력장에 의해 굴절되지 않는다는 고전적인 가정이 유지 되게 된다.²⁰¹⁾

...그렇다면 아인슈타인과 그의 지지자들은 어떤 근거에서 복잡한 비유클리드 기하학을 선택하는가? ...그것을 선택함으로써 인해서 생기는 물리학의 총체적 체계에서 **전체적으로 간단**하기 때문이다... 일단 비유클리드적인 접근 방법을 채택하게 되면, **물리학의 법칙들은 상당히 간단해진다.**²⁰²⁾

결국 카르납은 물리적 기하학이 칸트가 생각했던 ‘선형적 종합’이 아니라는 결론을 내린다. 순수한 수학적 기하학은 분석적이며, 물리학에 적용되는 기하학은 종합적이다. 다만 우리가 어떤 ‘규약’을 사용하는지에 따라 귀결 되는 물리적 기하학이 달라진다.²⁰³⁾

이제 우리는 카르납의 상대론 분석이 갖는 한계를 살펴보자. 카르납의 박사학위 논문은 상대론 속 공간 결정 과정을 논리적으로 재구성하고 있지만, 이러한 재구성은 실제 이론 전개 과정에 비할 때 상당히 단순하며 일부는 왜곡된 부분도 있다. 앞서 살펴보았듯, 카르납은 공간적 계량 구조

201) 루돌프 카르납, 윤용택 옮김 (1966/1993), 207쪽.

202) 루돌프 카르납, 윤용택 옮김 (1966/1993), 212쪽. 강조는 나의 것이다.

203) 루돌프 카르납, 윤용택 옮김 (1966/1993), 제18장에서의 논의 참조.

R에 속하는 유클리드적 계량 M_e 와 계량 규정 M에 속하는 M_1 사이의 선택이 ‘규약적’이며, 이때의 선택은 ‘단순성’ 판단에 따른다고 간단하게 설명했다. 그러나 이는 상대론에 이르러 물리적 기하학을 비유클리드적인 것으로 선택한 것에 관한 충실한 설명이라 보기 어렵다.

우선 특수 상대론과 일반 상대론에서의 상황을 구분하자. 특히 중력장이 없는 특수 상대론의 상황에서 이루어지는 R와 M의 규약적 선택을 살펴보자. 이때의 특징은 우리가 측정 물체의 강성을 유지하는 계량 규정 M_1 을 선택했을 경우 유클리드적 계량 M_e 를 얻는다는 데 있다. 또한 M_e 는 불변하는 까닭에 이를 일종의 ‘구성 원리’라고 말할 수도 있다. 하지만 일반 이론에서는 상황이 달라진다. 만약 우리가 특수 이론에서처럼 계량 규정 M_1 을 선택할 경우, 공간적 계량 구조 R은 특수 이론에서처럼 불변하는 것이 아니라 물질과 에너지의 양에 따라 변화하게 된다. 그리고 이와 같은 결론은 우리가 이미 살펴보았듯 아인슈타인의 등가 원리 사고 실험 및 회전 원판 사고 실험에 의한 것이다. 그러므로 일반 이론에서는 공간적 계량 구조가 ‘선택’될 수 없다. 공간적 계량 구조는 아인슈타인의 중력장 방정식에 의해서 예측되며, 그 예측이 기초 측정 도구의 물리적 행태에 의해 입증(확인)될 수 있을 뿐이다.

카르납은 ‘단순성’ 판단을 통해 선택이 이루어진다고 주장하지만, 그는 자신이 말하는 ‘단순성’이 무엇인지에 대한 상세한 해명을 제시하지 않고 있다. “물리학의 법칙 전체를 단순하게 만든다”, 혹은 카르납이 말하는 “이상적인 물리학 3권 중 2권(사전)과 3권(물리적 상태 기술)을 단순화한다”는 설명은 너무 포괄적이라 이에 대한 추가적인 해명이 요구된다. 실로 단순성에 대한 이와 같은 ‘단순한 설명’은 1917년 솔리크가 제시한 단순성에 관한 설명에서 크게 나아지지 않았다. 하지만 물리학에서 중요한 역할을 차지하는 ‘단순성’이 이렇게 간략히 설명될 수 있는 개념은 아닐 것이다. 적어도 이 지점에서 카르납이 ‘단순성’에 대한 자기 나름의 추가적인 해명을 제시해야 하는 것은 분명해 보인다.

더 중요한 문제는 카르납이 오직 공간만을 다루고 있다는 것이다. 이는 시간과 공간을 결합한 시공간을 다루는 상대론을 충분히 반영하지 못한다. 우리가 앞서 살펴보았듯 상대론의 중요한 개념적 혁신은 리만, 헬름홀츠,

푸앵카레를 통해 공간 개념을 물리적으로 사유한 것에서 더 나아가 시간 개념까지 포함하여 시간과 공간을 다루는 정식 물리 이론을 수립한 데 있었다. 그런데 카르납의 철학적 논의는 공간이라는 주제에 국한되어 있어 시간으로까지 그 외연을 넓히지 못했으며, 이는 그가 상대론적 시공간의 철학적 의의를 충실히 반영하지 못했음을 뜻한다.

물론 박사학위 이후 카르납이 별도의 논문을 통해 시간과 공간 사이의 관계를 다루고 있기는 하다. 그러나 이때의 논의는 논리적 개념이자 일종의 ‘규약’인 시간과 공간 사이에 성립하는 ‘논리적 관계’에 대한 것이었을 뿐 물리적 관점에서의 논의가 아니었다. 그런데 상대론에서 실질적으로 중요한 것은 시간과 공간의 ‘물리적’인 관계 맺음이다. 따라서 카르납의 ‘논리적 재구성’은 상대론의 시간과 공간이 갖는 물리적인 내용에 충실한 철학적 분석으로서 중요한 한계를 갖는다고 할 수 있다.

카르납의 철학적 기획의 또 다른 중요한 한계는 그가 추진한 ‘구성’의 기획이 갖는 ‘일반성’으로부터 비롯된다. 카르납은 인간이 1차적인 감각 지각들로부터 시작해서 추상적인 물리학 이론들을 구성해나가는 과정을 논리적 방식으로 재구성하고자 했다. 그러나 이와 같은 일반적인 수준의 논리적 재구성은 개별 물리학 이론들이 가진 구체적인 내용에 대한 충실한 반영이 이루어지지 않는 까닭에 과학의 실제와 유리되고 구체적인 사례들에 근거한 여러 가지 반론에 노출될 확률이 높다. 실제로 카르납의 이와 같은 논리적 재구성 작업은 후대의 과학철학자들에 의해 과학 이론에 대한 ‘수용된 견해(received view)’로 받아들여졌는데, 이는 이후 논리경험주의에 대한 심각한 비판을 낳는 원인을 제공했다.

1920년대에 행한 일련의 철학적 분석 작업을 거치며 라이헨바흐와 카르납은 하나의 갈림길에 직면하여 서로 다른 길을 선택했다. 라이헨바흐는 상대론 속 시간과 공간을 경험주의적인 관점에서 더 상세하게 분석하는 길을 택했고, 카르납은 푸앵카레의 규약주의를 발전시키며 마흐의 경험주의와 러셀의 기호논리학을 결합하여 감각 지각을 바탕으로 과학적 지식 일반을 논리적으로 재구성하는 길을 택했다. 분명 과학 이론 일반에 공통되는 인식론적 프로그램은 그 나름의 가치를 가지며, 특히 이는 우리의 과학적 세계상을 전반적으로 기술하는 데 큰 도움이 된다. 그러나 이러한 일반적인 인식론

프로그램을 추진하기 이전에 상대론적 시공간에 대한 좀 더 상세한 철학적 재구성과 분석이 필요했다. 또한 상대론이 시간과 공간 개념을 측정 물체들과 함께 물리적 세계에 도입하여 이를 실질적으로 구현한 이론이었다고 보는 관점이 옳다면, 기호논리학을 방법으로 삼고 감각 지각과 규약에 의존하는 카르납의 분석은 이에 대한 적절한 철학적 해명이라고 보기 어려웠다.

제5절. 결론

1920년경 시작된 라이헨바흐와 카르납의 상대론 분석은 그 문제의식 및 중요한 주제들에 대한 최종적인 결론 또한 유사하였으나, 결국 1928년에 이르러 두 사람은 다소 상반되는 특성을 가진 철학적 결과물을 세상에 선보인다. 라이헨바흐가 1928년에 출판한 저작 『시간과 공간의 철학』은 상대론적 시공간 이론에 대한 논리경험주의적 분석을 대표한다. 이 책은 철저히 상대론이라는 구체적인 이론 속 시공간의 철학적 본성을 규명한 책으로, 저자 본인이 ‘현대의 시공간 철학은 상대성 이론 속 시공간 철학임’을 명백하게 인정하고 있다.²⁰⁴⁾ 이 책은 슐리크의 1917년 저작 『현대 물리학의 시간과 공간』과 더불어 논리경험주의의 상대론 분석을 상징한다. 슐리크의 저서가 규약주의의 관점에서 시공간의 철학적 본성에 대한 아인슈타인 자신의 견해들을 대부분 수용하여 해설한 것과는 대조적으로, 라이헨바흐의 저서는 경험주의의 관점에서 구체적인 분석 과정을 통해 상대론적 시공간을 재구성하고 있으며, 최종적으로는 아인슈타인과 달리 시공간의 경험적 객관성을 긍정하고 있다.

이와 대비하여 카르납은 1928년에 『세계의 논리적 구조』²⁰⁵⁾를 출판했다. 박사학위 논문에서부터 물리학 이론 속 약정과 규약의 중요성을 강조한 카르납은, 감각 지각들로부터 시작해서 임의적인 규약들을 덧붙여 가며 추상적인 물리학 이론을 구성해가는 과정을 논리적으로 재구성하고자 했다. 이는 상대론에만 국한되지 않는 일반적인 철학적 기획이었으며, 이와

204) 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986)의 서문에 제시된 라이헨바흐의 관련 언급 참조.

205) Carnap (1928) 참조.

같은 기획 아래 비엔나 학파의 ‘과학적 세계상’이 탄생했다. 카르납은 푸앵카레의 규약주의를 발전시켜 여러 과학 이론 중 하나의 이론을 편들지 않고 이들 사이를 논리적으로 중재하면서도, 이와 더불어 기호논리학을 경험주의 인식론과 결합함으로써 인간의 과학적 지식 전체를 감각 지각에 기반하여 논리적으로 재구성하고자 시도했다.²⁰⁶⁾ 분명 이와 같은 일반 인식론의 추구는 중요하지만, 적어도 상대론적 시공간에 대한 체계적 분석이 이루어지지 않은 상황에서 카르납이 이러한 일반적인 인식론 프로그램을 추구했던 것은 분명해 보인다.²⁰⁷⁾

상대론에 대한 철학적 분석에서 시작한 라이헨바흐와 카르납이 서로 다른 과학적 철학 개념에 이른 이와 같은 상황에서 나는 카르납의 규약주의적 시공간 철학 및 인식론 프로그램을 비판적으로 검토했다. 나는 근본적인 물리학 이론(상대성 이론)이 시간과 공간에 대해 제기한 철학적으로 중요한 문제들이 여전히 정확하게 해결되지 않아 여러 논란을 불러일으키는 상황에서, 이 이론에 대한 간략하고 다소 부정확한 논리적 재구성(카르납)보다는 이보다 더 철저한 철학적 분석과 합리적 재구성을 통해 이러한 문제들에 대한 보다 명료한 답변을 제시하는 것이 필요하다는 결론을 내렸다. 실로 새로운 철학은 좀 더 겸손한 태도로 과학적 지식 속에 파고 들어가 이를 더 상세하게 분석할 필요가 있었다.

바로 이와 같은 이론 구체적인 철학적 분석의 길을 선택했기에, 라이헨바흐는 상대론의 시공간 철학을 대표하는 논리경험주의자가 될 수 있었다. 결과적으로 그의 이런 선택이 성공적이었던 이유는 구체적인 철학적 분석 과정에서 자연스럽게 그의 철학적 논의가 리만-헬름홀츠-푸앵카레-아인슈타인으로 이어지는 시간과 공간의 물리적 사유 전통 아래로 편입될 수

206) 고인석 (2010) 역시 슈리크와 카르납이 규약주의와 경험주의를 바탕으로 이론 일반적인 논리적 재구성 프로그램을 진행하였으며, 이는 노이라트의 사회 실천적인 통합 과학 운동과 차별화되는 이론적 노선이었음을 보인 바 있다.

207) 라이헨바흐와 카르납이 1922년경에 학술대회에서 처음 만난 이후, 둘 사이에 꾸준한 학술적 교류가 이루어진 것은 사실이다. 그렇기에 둘 사이의 관계를 대립적인 것으로 바라보기보다는, 서로 분업 및 협업하여 라이헨바흐가 이론 구체적인 인식론을 추진했고 카르납이 이론 일반적 인식론을 추진했다고 바라볼 수 있다. 하지만 최근의 과학철학사 연구는 이러한 가능성이 틀렸음을 보여주고 있다. 이에 관한 대표적인 예로 Stadler, Friedrich. (2011) 참조.

있었기 때문이다. 이후의 논의에서 상세하게 드러나겠지만, 라이헨바흐는 상대론 속 시간과 공간의 본성에 대해 분석하는 과정에서 강체 막대, 자연 시계, 빛 광선과 같은 구체적인 물리적 과정을 통해 물리적인 시간과 공간 질서를 철학적으로 재구성했다. 이러한 구체적인 물리적 사물들을 활용하여 분석을 진행하였기에 라이헨바흐의 시공간 철학은 ‘규약주의’가 아닌 ‘경험주의’적 성격을 가질 수 있었다.

이제 우리는 카르납의 규약주의적 시공간 철학에 관한 논의를 떠나, 라이헨바흐가 새롭게 구축한 경험주의 시공간 철학의 내용을 자세히 살펴 보려 한다. 이를 위해 나는 라이헨바흐가 상대론적 시공간을 체계적으로 재구성하고 분석한 성과인 그의 『상대성 이론의 공리화』(1924년)를 상세하게 검토할 것이다. 그의 대표작 『시간과 공간의 철학』(1928년)과 비교할 때 과학철학자들에게 비교적 덜 알려진 이 책은 실제로 그의 시공간 철학을 진정으로 대표하는 독창적 저서이며, 시공간과 관련된 몇몇 첨예한 철학적 문제들에 관한 자신의 관점이 상세하게 제시되어 있다. 그렇기에 라이헨바흐의 시공간 철학을 정확하게 확인하고 평가하기 위해서는 그의 『공리화』에 대한 상세한 검토가 필요하며, 이는 다음 장에서 우리가 탐구해야 하는 중요한 주제가 된다.

제6장. 라이헨바흐의 경험주의 시공간 철학 연구²⁰⁸⁾

제1절. 서론

아인슈타인이 1905년과 1916년²⁰⁹⁾에 특수 및 일반 상대성 이론을 발표하고 1919년에 일반 상대론이 제시한 태양 근처에서의 별빛의 굴절각을 예측한 위차 변화에 대한 예측이 입증되어 대서특필 된 이후, 무엇보다도 아인슈타인이 주장한 “시간과 공간의 경험적 객관성 상실”이 학자들 사이에서 논란이 되었다. 뉴턴의 물리학에서는 시간과 공간의 모든 점에 있는 모든 관측자에게 시간 간격과 길이 간격이 같다고 가정되므로 시간과 공간은 불변하는 절대적인 양이며 실재한다고 말할 수 있었다. 따라서 상대론이 등장한 이후에도 시간과 공간의 물리적 객관성을 유지하려던 일군의 학자들은 시간 간격과 길이 간격의 불변성을 유지하는 방법을 제시하고, 아인슈타인이 특수 상대론에서 제시했던 동시성 정의 및 길이 정의의 인위성 내지는 허구성을 지적함으로써 이를 공격하고자 했다.²¹⁰⁾

반면, 일반 상대성 이론의 일반 공변성 및 중력장 방정식이 시간과 공간의 경험적 객관성에 대해 갖는 함축에 대해 반론을 제기한 학자는, 그것이 진정 문제가 되는 상황이었지만 비교적 많지 않았다. 아인슈타인은 당시의 학자들에게 그다지 친숙하지 않던 텐서 해석(tensor analysis)이란 수학적 언어를 사용했다. 그 수학적 언어의 낯설과 난해함 때문에 일반 상대론은 많은 경우 ‘추상적인 수학 이론’으로 받아들여졌고, 이 이론의 인식론적 함축에 대한 논의는 실제로 이론을 이해하는 일부의 학자들에게로 제한되었다. 그런데 실제로 아인슈타인이 ‘시간과 공간의 경험적 객관성 상실’을 주장하게 만든 것이 일반 상대론의 조건인 ‘일반 공변성’이었으므로, 이 주장에 대한 정확한 검토를 위해서는 일반 상대론 속 시간과 공간에

208) 이 장에서의 논의는 강형구 (2022d)에서의 논의를 바탕으로 하고 있다.

209) 아인슈타인이 최종적인 중력장 방정식을 제출한 것은 1915년 11월이지만 그가 종설 논문인 “일반 상대성 이론의 기초”를 제출한 것이 1916년 3월이기에, 나는 본 논문에서 일반 상대성 이론이 등장한 시기를 1916년으로 지정한다. 하지만 논자들에게 따라 일반 상대론의 등장 시기를 1915년이라고 기술할 수 있다.

210) 이와 관련한 논의로 Reichenbach (1922, 1978)을 참조할 것.

대한 상세한 철학적 분석이 불가피한 상황이었다.

상대론에 대한 라이헨바흐의 철학적 논의는 1920년 이후 상대론을 통해 제시된 시간과 공간의 ‘경험적 객관성’에 대한 논의로 집중되었다. 앞선 논의에서 살펴본 것처럼, 라이헨바흐는 『상대성 이론과 선험적 지식』에서 동등화의 개념, 구성적 원리들의 변화, 발견법적(heuristic) 지침으로서의 ‘연속적 근사의 방법’ 등과 같은 일반적 주제들에 관해 논한 바 있다. 하지만 상대론을 통해 ‘시간과 공간의 경험적 객관성 또는 실재성’의 문제가 첨예한 철학적 문제로 대두되자 라이헨바흐는 이 문제를 집중적으로 분석하기 시작했다. 시간과 공간의 본성에 관한 논의는 뉴턴과 라이프니츠의 시대 때부터 이어져 온 유래 깊은 철학적 논의로서, 비유클리드 기하학이 대두된 19세기에는 리만, 헬름홀츠, 마흐, 푸앵카레로 그 철학적 논의의 전통이 이어진 상황이었다. 라이헨바흐는 이러한 철학적 전통의 논의 속에서 ‘시간과 공간’에 초점을 맞춰 논의를 전개해 나갔다.

상대론의 근본적인 의의는 자연 시계, 강체 막대, 빛 신호와 같은 구체적인 물리적 사물(과정)을 통해 시간과 공간 개념을 정식 물리학 이론으로 구현한 데 있으며, 상대론에서 핵심적으로 전제하는 경험적 원리(상대성 원리, 빛 원리, 등가 원리) 및 임의적 정의(동시성, 다른 기준계에 놓인 물체의 길이 등) 역시 이와 같은 시간과 공간을 ‘물리적으로 사유하는 관점’에서 그 의의를 이해할 필요가 있다. 이러한 물리적 사유는 리만이 제시한 혁신적 개념의 연장선상에서 이해할 수 있다. 리만, 헬름홀츠, 푸앵카레를 거치며 공간과 시간 개념을 물리적으로 다루는 정식 물리학 이론이 구현될 준비가 이루어졌고, 아인슈타인은 실제로 그와 같이 시간과 공간을 다루는 정식 물리학 이론을 수립한 것이다.

이와 더불어 뉴턴과 마찬가지로 아인슈타인 역시 자신이 제시한 시간과 공간 이론의 철학적 의의를 구체적으로 해명할 필요가 있었다. 그의 탐구의 주된 목적은 물리학 추구에 있었던 반면 자신이 수립한 이론의 철학적 의미 규명에 있지는 않았으므로 이는 그를 비난하고자 하는 것이 아니다. 비록 한 이론의 철학적 의미 규명은 그 이론이 제시된 이후 이루어지지만, 이러한 철학적 의미 규명에는 이론과는 독립적인 의의가 있다. 왜냐하면 상대론의 중심 주제인 시간과 공간은 인간이라면 누구나 친숙하게 경험하며

자연히 관심을 가지게 되는 보편적인 주제이기 때문이다. 따라서 상대론이 제시된 후 시간과 공간에 대한 우리의 경험과 관련하여 상대론적 시공간이 갖는 의미를 추가로 철학적인 관점에서 해명할 필요가 있었다.

상대론은 경험과학에서의 시간과 공간을 시계와 막대를 통해 측정할 수 있는 것으로 만들었으며 이는 부정할 수 없는 역사적 사실이다.²¹¹⁾ 상대론과 함께 시간과 공간은 상대적으로 등속 혹은 가속 운동하는 기준계 위에서 시계와 막대라는 구체적 물리적 대상 및 빛 신호라는 물리적 과정을 통해 물질적으로 구현되었다. 그랬기에 만약 상대론적 시간과 공간에 대한 추가적인 해명이 이루어진다면, 기준계, 시간과 공간을 측정하는 기준 물체, 구체적인 물리적 측정 과정에 초점을 맞춘 경험주의 관점에서의 철학적 해명이 이루어질 필요가 있었다.

정확히 이러한 경험적 특성을 가진 상대론적 시공간의 철학적 분석이 라이헨바흐가 제시한 『상대성 이론의 공리화』(1924년)다.²¹²⁾ 그는 상대론적 시공간 재구성 속에서 관성 혹은 가속 기준계 위의 관측자가 빛 신호, 자연 시계, 강체 막대를 이용해 시공간의 위상적 질서와 계량적 질서를 구성하는 과정을 구체적으로 기술한다. 이러한 재구성을 위해 그가 사용한 것은 수학에서 사용되는 ‘공리화(Axiomatization)’의 방법이었다. 공리화는 이론의 기초가 되는 일군의 공리들과 정의들을 조직화하여 이론의 실질적 내용을 하나의 공리체계로 집약하는 방법이다. 어떤 이론을 공리화하면 그 이론의 전체 구조가 명료해진다. 이론에서 증명되지 않고 전제되어야 하는 가장 기초적인 명제들이 무엇인지가 공리들을 통해 구체화 되고,

211) 물론 상대론적 시공간의 의미를 ‘운동 법칙의 관점’에서 이해할 수도 있다. 뉴턴이 관성 법칙을 근본적인 운동 법칙으로 제시한 후, 결과적으로 아인슈타인의 상대론은 관성 법칙의 일반화이며 빛 원리와 등가 원리 또한 이의 연장선에 있다는 것이다. 이를 시공간의 ‘동역학적 견해’라 부를 수 있는데, 문제는 이러한 관점에서는 리만으로부터 아인슈타인에게로 이어지는 ‘시간과 공간의 물리화’라는 개념적 혁신의 맥락을 정확하게 포착하지 못한다는 데 있다.

212) Howard (1991), pp. 74-75, p. 98-99. 하워드(Howard)는 라이헨바흐와 슐리크가 신칸트주의에 대항하는 경험주의적 입장을 발전시켜 나가면서 이론의 경험적 부분과 규약적·정의적 부분을 선명하게 구분하게 되었다고 진단한 바 있다. 이에 반해 나의 입장이 하워드와 다른 지점은, 시간과 공간의 ‘물리화’ 맥락에서 상대론이 갖는 철학적 의미를 정확하게 규명하기 위해서는 라이헨바흐와 같은 경험주의적 관점의 시공간 분석이 필요하며 이러한 분석이 적절하다고 보는 데 있다.

이론에서 등장하는 개념들의 의미 또한 정의들을 통해 명료하게 규정되기 때문이다. 또한 한 이론이 공리체계로 재구성되면 그 이론의 참됨은 이론의 공리들로 집약되므로, 이론 전체의 타당성 판단은 이론이 전제하는 공리들의 타당성 판단으로 환원된다.

만약 상대론 속 시간과 공간에 관련된 내용을 공리체계로 재구성할 수 있다면 상대론적 시간과 공간의 핵심 내용을 공리체계에 집약할 수 있다. 따라서 우리는 이 체계 속 공리들을 검토하고 평가함으로써 상대론이 시간과 공간에 대해 말하는 경험적 내용이 구체적으로 무엇인지, 과연 이 이론이 경험적으로 타당한지 그렇지 않은지를 명확하게 판단할 수 있다. 또한 이러한 공리체계 속에 공리가 아닌 정의들이 등장한다면 이 정의들의 의미와 특성이 무엇인지 구체적으로 밝힐 수 있다. 라이헨바흐의 상대론적 시공간 분석이 갖는 의의는 그가 시간과 공간을 물리적으로 고찰하는 맥락에서 상대론적 시간과 공간이 갖는 경험적 의미를 공리체계적 재구성의 방법론을 이용하여 ‘해명’한 것에 있다.²¹³⁾

라이헨바흐의 시공간 철학이 갖는 핵심적 특징은 그것이 상대론적 시공간에 대한 ‘경험주의적’ 재구성이며, 그 핵심 결론은 여전히 상대론에 이르러서도 인간이 경험을 통해 물리적 세계의 객관적인 ‘인과적 구조’를 파악할 수 있다는 것이다. 또한 우리는 지금까지의 시공간 철학 논의에서 다루어진 주요 주제인 ‘물리적 기하학’과 관련해서 라이헨바흐가 ‘규약주의’가 아닌 ‘경험주의’적 관점을 취했음을 확인할 수 있다. 왜냐하면 그는 중력장이 존재하고 변화하는 일반적 상황에서 시공간의 계량적 형태를 구체적인 측정 물체(시계, 막대, 빛 신호)를 이용하여 경험적으로 결정해야 한다고 보았기 때문이다. 또한 라이헨바흐 시공간 철학의 또 다른 중요한 공헌은 ‘일반 상대성에 이르러 좌표가 직접적인 측정의 의미를 잃는’ 것의 경험적 의미를 구체적으로 규명하면서도 여전히 시공간 구조의 경험적 파악 가능성을 긍정한 데 있다. 이는 앞서 살펴본 카시러의 관념론적 상대론 해석에 대한 하나의 반론이기도 했다.

213) 하워드(Howard), 리크먼(Ryckman), 지오바넬리(Giovanelli)와 같은 최근의 논자들은 『시간과 공간의 철학』(1928년)보다는 『상대성 이론의 공리화』(1924년)가 라이헨바흐의 가장 독창적인 시공간 철학을 담고 있음은 인정하면서도, 그러한 독창성의 핵심인 시공간 공리체계의 ‘경험적 의의’를 제대로 밝혀내지는 못했다.

제2절. 상대론적 시공간의 ‘구성적 공리체계’ : 그 경험적 특성

이제 우리는 상대론적 시공간 이론에 대한 라이헨바흐의 구성적 공리 체계를 구체적으로 살펴보도록 하자. 라이헨바흐는 1920년대 초반을 기준으로 여전히 “상대성 이론의 기초적 개념들이 다소 모호한 상태로 남아 있음”²¹⁴⁾을 지적하며, 시계, 강체, 일치 등의 개념들이 명료화되지 않은 채 사용되고 있음을 비판한다. 따라서 그는 ‘공리화의 방법’을 이용해서 상대론적 시공간의 경험적인 의미를 명료하게 드러내고자 한다.

우선 그는 공리체계 속 공리들의 논리적 지위에 관해 논한다. 수학에서의 공리들은 일종의 ‘함축적 정의(implicit definition)’로서 임의적인 정의에 지나지 않는다. 이에 반해 물리학에서의 공리화는 두 가지 방식으로 진행될 수 있다. 첫 번째 방식은 ‘연역적(deductive) 공리화’다. 이는 가장 일반적인 ‘변분 원리(variational principle)’에서 시작하여 세부 사항들을 연역하는 방식의 공리화다.²¹⁵⁾ 이러한 공리화에서는 공리가 추상적이라 이를 직접적으로 입증하기 어렵지만, 공리로부터 수학적 추론을 통해 귀결되는 개별 진술들은 실험(경험)을 통해 입증할 수 있다. 이러한 개별 진술들이 입증되면 공리들을 ‘확률적으로 참’이라 판단한다.

물리학에서 ‘연역적 공리화’와 달리 공리화가 이루어질 수 있는 두 번째 방법이 있는데, 그것을 ‘구성적(constructive) 공리화’라 부른다. ‘구성적 공리화’에서의 공리들은 추상적인 진술이 아니라 경험적 관측이 가능한 사실들이므로 그 경험적 특성은 비교적 명백하며, 이 공리들의 입증 또는 반증 여부에 따라 어떤 귀결이 도출되는지 편리하게 검토할 수 있다.²¹⁶⁾ 1919년의 강연에서 아인슈타인은 ‘구성 이론(constructive theory)’과 ‘원리

214) 한스 라이헨바흐 지음, 강형구 옮김, 『상대성 이론의 공리화』 (지식을만드는지식, 2020년), x iii. 라이헨바흐의 『공리화』는 1924년에 최초로 출판되어 그 영어 번역본이 1969년에 출판된 후 한글 번역본이 2020년에 출판되었다. 앞으로의 인용은 한글 번역본의 쪽수를 기준으로 삼을 것이다.

215) 이러한 대표적 예로, 아인슈타인은 일반 상대성 이론을 발표한 이후 별도로 변분 원리에 기초하여 자신의 중력장 방정식을 수학적으로 도출한 바 있다(1916년).

216) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 6쪽.

이론(principle theory)'을 구분했다.²¹⁷⁾ 아인슈타인에 따르면 직관적으로 이해가 가능한 기초적인 물리적 과정들을 기반으로 순차적으로 내용을 구성해가는 이론이 '구성 이론'이며 이의 대표적 예로 통계역학이 있다. 이와 달리 경험적 사실들로부터 일반화된 보편적 원리들을 이론의 전제로 가정한 후, 이러한 원리들을 기반으로 내용을 전개해 나가는 이론을 '원리 이론'이라 한다. 아인슈타인은 자신의 상대론이 '구성 이론'이 아닌 '원리 이론'에 속한다고 평가했다.

이 지점에서 라이헨바흐는 아인슈타인의 입장과 상반되는 관점에서 상대론적 시간과 공간을 재구성하고 있음에 주목하자. 아인슈타인은 중력장 방정식을 발견한 이후 수학적 형식론의 중요성을 강조하며 중력장 방정식을 변분 원리에 기반하여 다시 수학적으로 유도했다. 그런데 시간과 공간을 물리적으로 사유하는 관점에서 보면, 수학적 형식론은 물리적인 사유를 배경으로 한 사고 실험의 결론을 세계에 적용이 가능한 물리 이론으로 구현하는 '징검다리' 혹은 '도구'의 역할을 했을 뿐이다. 또한 일반 상대론이 제기한 여러 가지 철학적 문제들을 규명하기 위해서는, 시간과 공간을 물리적으로 사유하는 맥락에서 이 이론 속 시간과 공간을 인식론적으로 재구성하고 해명할 필요가 있었다. 수학적 변분 원리에 기반한 '연역적 공리화'의 방법을 택하지 않고 관측이 가능한 구체적인 대상 혹은 과정에 기반한 '구성적 공리화'의 방법을 택한 것은 시공간을 바라보는 라이헨바흐의 경험주의적 관점에서 비롯된 것이었다.

라이헨바흐는 아인슈타인이 1915년 11월에 최종적인 중력장 방정식에 도달한 후인 1916년 3월에 이 이론에 대한 설명을 제공할 때 일종의 '역사적 방식'의 증명을 이용했다고 평가한다.²¹⁸⁾ 이러한 역사적 증명에서 물리학자는 가장 일반적인 원리들로부터 개별적인 진술들을 도출해 낸다(연역적 공리화). 하지만 철학자는 '발견의 맥락'에 관한 이러한 증명에 만족하지 못하며, 상대론적 시간과 공간의 경험적 내용을 구체적으로 해명하기 위해 '정당화의 맥락'에서 상대론을 합리적으로 재구성한다. 공리들을 경험적 진술들로

217) 아인슈타인, 홍수원·구자현 옮김 (2003)의 기고문 “상대성 이론이란 무엇인가?”, 273-280쪽 참조.

218) Reichenbach, Hans. (2006), "On the Physical Consequences of the Axiomatization of Relativity", in *Defending Einstein* (Cambridge University Press), pp. 171-194.

재구성함으로써 이 이론 속 시간과 공간이 수학적 이론과 달리 외부의 물리적 세계에 관해 주장하는 바가 무엇인지를 경험주의의 관점에서 분명하게 규명할 수 있다. 라이헨바흐가 자신의 구성적 공리화를 통해 비로소 상대론적 시간과 공간에 대한 ‘철학적 정당화’가 제시되었다고 주장한 것은 이러한 이유 때문이었다.²¹⁹⁾

하지만 이처럼 구성적 방식으로 공리를 설정하는 것에는 중요한 문제가 있다. 왜냐하면 “사실적 진술은 이미 하나의 해석이며 그 자체로 하나의 이론”²²⁰⁾이기 때문이다. 우리는 물리적 측정 도구의 지시를 해석할 때 특정한 과학 이론을 사용한다. 예를 들어 이론을 사용한 해석을 거쳐야 비로소 우리는 전류계를 보고 “전류계의 눈금이 움직인다”라고 말하지 않고 “전류가 증가한다”라고 판단한다. 또한 “사실적 진술들은 인식론적 원리들을 전제”한다.²²¹⁾ 이러한 원리들에 대한 예로 “실험이 연속적으로 반복되는 경우 항상 같은 결과를 낳으리라는 과정”, “인과성의 가정”, “귀납의 원리” 등을 들 수 있다.²²²⁾ 이처럼 기초적인 사실적 진술마저 이론을 포함하며 특정한 인식적 원리들을 전제하므로, 혹자는 개별적 진술에 대한 입증은 불가능하며 이론 전체에 대한 입증 외에 다른 입증이 존재하지 않는다고 우려할 수 있다. 이를 현대적으로 풀어 말하면, 관측 진술의 이론적재성으로 인해 개별적인 과학적 명제는 경험적 의미를 갖지 못하고 이론 전체만 경험적 의미를 갖는지 물을 수 있다.²²³⁾

하지만 라이헨바흐는 이와 같은 우려를 부정한다. 비록 우리가 특정한 사실을 설명하는 데 있어 기존의 이론이 아닌 새로운 이론을 사용한다고 하더라도, 새로운 이론이 특정한 사실을 해석하는 때 정량적으로는 기존의 이론과 실질적인 차이를 드러내지 않을 수 있다. 이에 대해 그는 다음과

219) Reichenbach, Hans. (1978), “Autobiographical sketches for academic purposes”, pp. 2-3.

220) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 6쪽.

221) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 7쪽.

222) 이 대목은 라이헨바흐가 1920년 이후 상대화된 선형 원리의 구성적 성격이 갖는 의의를 잃어버렸다는 프리드먼의 주장이 옳지 않음을 잘 보여준다.

223) 이는 곧 과학 이론의 경험적 내용은 이론 속 개별적인 명제가 아니라 과학 이론 전체가 갖는다는 전체론적 입장과 같다. 아인슈타인(Einstein)은 그의 경력 후기에 이와 같은 관점을 취한 것으로 보이며, 이러한 관점은 철학자 콰인(Quine)의 전체론적 입장과의 일맥상통한다.

같은 예를 든다. 설혹 강한 중력장에서 빛이 직진하는 것이 아니라 휘어진다고 가정하더라도, 망원경에서의 빛의 움직임은 직진할 때와 휘어질 때 일반적인 실험적 상황에서 실질적인 정량적 차이를 나타내지 않을 것이다. 이는 “특정한 사실들은 다른 사실들보다 더 기초적이고, 이는 특정한 한계 안에서 이 사실들에 대한 해석이 이론적인 개념들에 의존하지 않음”²²⁴⁾을 뜻한다. 그러므로 일상적 사실은 우리에게 확실한 것으로 여겨진다. 이는 일상적 사실들이 비교적 ‘부정확’하므로 ‘모든 과학 이론에 상대적으로 불변함’을 뜻한다.

라이헨바흐는 상대론적 시공간의 구성적 공리체계 속 등장하는 공리들이 위와 같은 의미에서의 ‘기초적인 사실들(elementary facts)’이라고 주장한다. 이 사실들은 상대론을 전제하지 않도록 선택되며, 이전 이론과 새로운 이론이 적용될 때 둘 사이에 주목할 만한 정량적인 차이를 나타내지 않는다는 조건을 만족시킨다. 라이헨바흐에 따르면 공리들은 “상대성 이론 이전의 과학과 역학 실험으로부터 도출될 수 있는 방식으로 선택되었으며, 상대성 이론을 사용하지 않고서도 시험할 수 있다.”²²⁵⁾ 따라서 구성적 공리체계 속 공리들은 연역적 공리화의 공리와 달리 ‘경험적 명제들’이다. 하지만 주의해야 하는 점이 있다. 수학적 혹은 연역적 공리화에 친숙한 사람은 구성적 공리화의 경험적 명제들을 왜 ‘공리’라고 불러야 하는지 이해하지 못할 수 있다. 그러나 이 공리들은 다른 명제들과 달리 물리학 이론에서 논리적인 메타 원리로서 기능하므로²²⁶⁾ 공리라고 합당하게 불릴 수 있다.

그렇다면 라이헨바흐가 이전에 주장했던, 대상 개념을 구성하는 동등화의 원리들은 어떻게 되었는가? 이와 관련하여 프리드먼과 리크먼은 라이헨바흐가 슈리크와의 서신 교환을 통해 ‘동등화 원리들’ 대신 ‘동등화 정의들’을 사용함으로써 동등화 원리의 “대상 구성적 특징”을 잃어버리고 이론 일반적 규약주의로 입장을 전환했다고 평가했음은 앞서 살펴본 바 있다.²²⁷⁾ 그러나 이와 같은 평가는 적절하지 않다. 왜냐하면 『상대성 이론의 공리화』에서는

224) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 8쪽.

225) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 9쪽.

226) Reichenbach, Hans. (1925/2006), p. 172. 이는 공리들이 이론 내에서 ‘구성적’ 역할을 한다는 것을 뜻한다. 이를 좀 더 풀어서 말하면, 공리들은 ‘동등화의 유일성’을 만족시키는 역할을 담당한다고 할 수 있다.

227) Friedman (1999)의 3장, Ryckman (2005)의 3장, 4장의 논의를 참조할 것.

구성적 역할을 하는 동등화 원리들이 1920년 『선형적 지식』과 비교할 때 더 구체적으로 제시되기 때문이다. 이제 동등화 원리들은 구성적 체계 속 공리들이기도 하고, 공리들 속에 표현된 사실적 진술들이 전제하는 인식적 원리들이기도 하다. 예를 들어 빛의 신호가 물리적으로 가장 빠른 신호임을 주장하는 공리 III, 공간 계량의 유클리드적 성격을 주장하는 공리 V는 이론의 기초가 되는 동등화 원리이다. 사실적 진술들인 공리들이 전제하는 ‘인과성의 원리’, ‘표준적 귀납의 원리’ 또한 동등화 원리들이다.²²⁸⁾

따라서 『선형적 지식』에서 등장했던 대상 개념을 구성하는 동등화 원리들은 구성적 공리체계의 공리들 및 이 공리들 속 사실들이 전제하는 인식적 원리들이다. 물론 『상대성 이론의 공리화』에서 ‘동등화 정의 (coordinative definition)’가 명시적으로 논의되고 있는 것은 사실이다. 그런데 이 ‘동등화 정의’는 이제 이론을 구성하는 ‘임의적 요소’로서 나타난다. 라이헨바흐는 『선형적 지식』에서 물리학 이론 속 경험적 내용과 임의적 요소들을 식별하는 작업이 필요하다고 주장했는데, 1924년에 이르면 이와 같은 임의적 요소가 ‘동등화 정의’로서 분석된다. 임의적인 ‘동등화 정의’는 공리체계 속에서 물리적 대상을 ‘정의’한다. 그러므로 ‘동등화 정의’ 역시 우리의 이론 체계를 구성하는 데 능동적이고 중추적인 역할을 맡는다.

라이헨바흐의 구성적 공리체계에서 공리들은 경험적 진술들 가운데 이론 내에서 메타적 원리로서 기능하는 진술들이며, 이 공리들 속 사실들은 특정한 인식론적 원리들을 전제하므로, 공리들과 인식론적 원리들 모두 대상 구성의 역할을 하는 동등화 원리들이다. 이에 더해 물리적 개념을 정의하는 임의적인 동등화 정의 또한 대상을 구성한다. 공리, 인식적 원리, 동등화 정의 모두 공리체계 내에서 대상 구성의 기능을 맡는다. 다만 공리와 인식적 원리는 경험적 입증이 가능한 데 반해, 동등화 정의는 수학 개념을 물리적 세계와 연결하면서도 그 자체로는 경험적 입증이 가능하지 않다. 이는 동등화 정의가 공리와 인식적 원리에 비해 좀 더 ‘형식적인 기능’을 담당하고 있음을 뜻한다.²²⁹⁾

228) 이와 관련하여 강형구의 논문 (2020), 특히 19-20쪽에서의 논의를 참고할 것.

229) 그러나 동등화 정의마저도 순수하게 형식적인 정의는 아니다. 1920년 이후 라이헨바흐가 말하는 ‘구성적 원리’ 또는 ‘상대화된 선형’은 순수한 이성적 혹은 형식적 요소가 아니라 어떤 방식으로든 경험과 밀접한 관련을 맺고 있다.

“물리적 정의는 수학적 정의를 ‘실재의 조각’에 연결함으로써 구성”²³⁰⁾ 되므로 ‘함축적(implicit)’ 정의가 아닌 ‘동등화(coordynative)’ 정의 또는 ‘실질적(real)’ 정의라 불린다. 동등화 정의의 문제는 이를 통해 연결되는 물리적 사물이 ‘해석’을 통해 경험으로부터 구성되는 데 있다. 따라서 이는 기초적 사실들에서와 마찬가지로의 어려움에 직면한다. 이에 대한 라이헨바흐의 해결책은 “정확도가 중요하지 않고 특별히 상대론적인 정의를 사용하지 않는 동등화 정의를 사용”²³¹⁾하는 것이다. 이 방법을 사용함으로써 임의적인 동등화 정의에 제약이 가해진다. 또한 동등화 정의에는 인과성 원리와 같은 인식론적 원리를 만족시켜야 한다는 추가적 제약이 붙는다. 더 나아가 동등화 정의는 외부 대상에 대한 지시의 ‘유일성 조건’을 만족시켜야 한다. “동등화를 유일하게 만드는 조건들이 무엇인지는 선형적으로 발견될 수 없다. 이 조건들은 오직 공리들에 포함된 사실들로부터 도출될 수 있다.”²³²⁾ 즉, 경험적 명제인 공리들은 동등화 정의의 유일성을 만족하게 하는 전제 역할을 한다.

구성적 공리체계로 재구성된 시공간 이론에서 이 이론의 경험적 참을 결정하는 것은 오직 공리들뿐이다. 정의들은 본성상 임의적이기 때문에 서로 다른 정의들을 사용하면서도 공통된 공리들을 갖는 이론들은 그 내용상 서로 동등하다. 그렇다면 과연 상대론의 ‘단순성’은 무엇인가? 라이헨바흐가 볼 때 상대론 속 단순성은 대부분 ‘기술적 단순성(descriptive simplicity)’이며 이는 이론의 경험적 참과는 무관하다. 설혹 우리가 아인슈타인의 동시성 정의와 다르게 더 복잡한 동시성 정의를 사용하여 이론이 더 복잡해진다고 하더라도, 경험적 참됨의 측면에서 단순한 이론과 복잡한 이론 사이에는 차이가 없다. 이러한 ‘기술적 단순성’과 대비되는 것이 ‘귀납적 단순성(inductive simplicity)’인데, 이는 ‘확률의 원리’와 관련된다.²³³⁾ 이러한 두 종류의 단순성과 관련하여 라이헨바흐는 다음과 같이 말한다.

...위에서 제시된 두 종류의 단순성에 대한 혼동 때문에 많은 사이비 문제들이

230) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 11쪽.

231) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 12쪽.

232) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 13쪽.

233) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 18-19쪽.

발생했다. 왜 가장 단순한 이론이 참인지에 대한 물음, 유클리드 기하학이 단순하기 때문에 참이라고 불릴 수 있는지에 대한 물음 등등이 그러한 사이비 문제들을 대표하는 예다. 시공간의 영역에서 상대성 이론에 등장하는 모든 단순한 특성은 기술적인 단순성에 속하기 때문에 이 이론의 참과는 관련이 없고, 이 이론의 참은 오직 이 이론의 공리들과만 관계된다. 오직 중력에 대한 상대론적인 이론에서만 귀납적 단순성이 특정한 역할을 담당하는 것이다.²³⁴⁾

라이헨바흐에 따르면 시간과 공간에 관련한 상대론의 단순성은 임의적인 동등화 정의의 단순성과 관련되므로 이론의 참과는 관련이 없다. 그렇다면 ‘중력에 대한 상대론적인 이론에서 귀납적 단순성이 특정한 역할을 담당한다’라는 라이헨바흐의 주장은 어떤 의미일까? 특수 상대론의 시간과 공간 질서는 원칙적으로 일반 상대론에서도 적용된다. 이때 중요한 제약 조건은 특수 상대론의 시간과 공간 계량이 오직 ‘미분적으로(differentially)’ 적용된다는 것이다. 시공간 영역이 확장되면 중력장의 영향 아래에 있는 시공간 영역과 그렇지 않은 시공간 영역은 차이를 보이며 이러한 차이는 측정 도구들이 보이는 물리적 행태를 통해 드러난다. 이때 측정 도구의 물리적 행태에 대한 경험적 측정과 식별은 ‘귀납의 원리’를 전제하므로, 중력이 있을 때의 시공간 곡률 혹은 물리적 기하학의 형태 결정은 경험적으로 이루어지며 이때 ‘귀납적 단순성’이 그 역할을 한다.

이상과 같이 경험적 명제들로서 공리를 설정하고 이에 임의적인 정의들을 덧붙여 구성한 시공간의 공리체계는 분명 ‘경험적 특성’을 갖는다. 상대론적 시공간의 핵심 내용을 경험적 명제들에 집약할 경우, 우리는 시공간이 어떤 의미에서 경험적인지 그것이 과연 경험적으로 타당한지를 명확하게 진술할 수 있다. 물론 임의적인 특성을 갖는 규약적 ‘정의’가 등장하며 이것이 공리체계에서 핵심 역할을 하는 것은 사실이지만, 이때 ‘정의’는 임의적 성격을 가지므로 시공간의 경험적 참됨에 영향을 미치지 못한다. 중요한 것은 시공간의 공리체계에서 ‘물리적 기하학’에 관련된 진술이 ‘정의’가 아닌 ‘공리’라는 점이다. 비록 시공간의 물리적 기하학이 유클리드적이라는 공리는 특수 상대론에 국한해서 유효하지만, 이는 특수

234) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 19쪽. 강조는 나의 것이다.

상대론에서 볼 수 있는 일정한 형태의 물리적 기하학이 임의적인 ‘규약적 선택’에 의한 것이 아니라 ‘경험적 사실’에 기반한 것임을 뜻한다.

‘보편력 제거’라는 규약적이고 방법론적인 원리가 개입되는 부분은 기초 측정 물체인 강체 막대와 자연 시계의 ‘정의’이며, 이러한 정의는 시간과 공간의 ‘경험적 내용’에 영향을 미치지 못한다. 그렇기에 상대론적 시공간에 대한 라이헨바흐의 경험주의적 재구성에서 물리적 기하학은 경험과 무관한 방식으로 사전에 ‘규약적’으로 ‘선택’되는 것이 아니다. 실제로 우리는 특수 상대론적 상황에서 경험을 통해 유클리드적 기하학의 계량 관계를 만족시키는 시공간의 점들을 항상 적절히 ‘추려내어’ 좌표계를 구성할 수 있고, 일반 상대론적 상황에서는 매 경우 시공간의 계량적 형태가 어떤지를 구체적인 측정 물체를 통해 경험적으로 결정한다. 이렇듯 중력장이 있는지와는 무관하게 시공간의 질서는 ‘경험’을 통해 파악 및 결정된다.

제3절. ‘일치(coincidence)’ 개념의 경험적 의미 해명

1916년 아인슈타인이 ‘관측이 가능한 점-일치들의 총체만이 물리적 객관성을 갖는다’라고 주장한 후 여러 논자가 ‘점-일치(point-coincidence)’ 또는 ‘일치(coincidence)’의 개념을 사용해 왔지만, 이 개념의 의의를 정확히 분석 및 규명하여 사용한 논자는 드물었다. 앞선 논의에서 살펴본 바 있는 슐리크, 카시러, 카르납 모두 점-일치의 개념을 상대론에 관한 철학적 논의에서 사용하긴 했지만, 정작 이들 중 그 누구도 ‘일치’ 개념의 경험적 의미가 무엇인지를 상세하게 해명하지 않았다. 이에 반해 라이헨바흐는 그의 『상대성 이론의 공리화』의 4절을 통해 ‘일치’ 개념의 경험적 의미를 규명하고 있다. 이제 나는 그가 제시하는 ‘일치’의 의미를 상세히 살펴볼 것이다.

우선 ‘주관적 일치’와 ‘객관적 일치’를 구분하자. 예를 들어, 한 천문학자가 망원경을 통해 별의 위치를 측정한 시각과 시계의 시각이 일치하는 것은 주관적 일치이며 이는 일종의 심리학적 현상이다. 이에 반해 관찰자의 심리적 상태와는 독립적으로 두 사건이 일치하는 것이 객관적 일치인데, 예를 들어 빛 광선과 톱니바퀴 이빨의 일치,²³⁵⁾ 빛 광선과 다른 광선의 일치

235) 물리학자 피조(Fizeau, 1819-1896)가 빛의 속도를 측정할 때 사용했던 방법이다.

또는 간섭이 있다. 이러한 객관적 일치에 관하여 인간의 마음은 그와 같은 점 사건을 기록한다. ‘주관적 일치’가 ‘객관적 일치’의 기초가 되는 것은 사실이지만, 전자로부터 후자가 직접적으로 도출되지 않는다. 물리학에서의 객관적 일치는 ‘지각’되는 것이 아니라 ‘추론’되는 것이다. 상대론은 ‘일치’를 기초적인 사실로 간주하지만, 이때의 일치는 직접적으로 지각되는 ‘주관적 일치’가 아니라 지각으로부터 추론되어야 하는 ‘객관적 일치’다. 따라서 상대론의 일치 또한 해석으로부터 독립적이지 않다.

주관적 일치는 직접적이지만 부정확하므로, 주관적 일치로부터 객관적 일치로 이행하면서 비로소 일치는 정확하게 결정된다. “모든 물리적 관찰이 일치로 환원될 수 있다는 주장은 오직 주관적 일치에만 유효하다.”²³⁶⁾ 상대론이 다루는 일치는 주관적 일치가 아닌 객관적 일치이므로, 이와 같은 주관적 일치에로의 환원 가능성이 상대론에 대한 정당화가 될 수 없다. 다만 상대론이 객관적 일치를 기초적 사실들로 간주하여 이를 토대로 시간과 공간의 이론을 구축하는 것은 아래와 같은 이유로 정당화될 수 있다. “객관적 일치는 매우 다양하고 많은 해석에 관해 상대적으로 불변”인 것으로 남으므로, 이는 우리가 앞서 살펴보았던 ‘기초적 사실들’이라 할 수 있다. 하지만 라이헨바흐는 물리적 질서 관계를 이러한 ‘객관적 일치’로 환원해야 할 절대적 필연성은 없다고 본다. 또한 “일치의 개념이 언제까지나 물리학 개념 형성의 기본 요소가 될 것이라고 주장할 수도 없다”라고 평가한다.²³⁷⁾

다음으로 라이헨바흐는 객관적 일치의 개념을 세부적으로 규명한다. 우선 ‘직접적으로 관찰이 가능한’ 객관적 일치가 있는데, 이를 ‘1차 수준의 객관적 일치(objective coincidences of the first degree)’라 부른다. 이러한 일치는 직관적으로 주어진 기초적 사실들로서, 자 눈금과 지침의 일치 등이 이를 나타내는 사례다. 다음으로 원자 이하 수준의 차원에 존재하는 ‘2차 수준의 객관적 일치’가 있다. 이는 1차 수준의 일치와는 달리 직접적 관찰이 가능하지 않고 일치에 대한 해석에 이르기 위해 더 복잡한 이론들이 사용된다. 이에 대한 예로 음극선관에서 백열층이 발생하는 것으로부터

236) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 30쪽. 이는 간접적으로 실증주의에 대한 반론이기도 하다. 과학적 지식의 근본 토대가 실증주의가 말하는 주관적 감각 지각이 될 수 없음을 주장하고 있기 때문이다.

237) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 30쪽.

이온의 충돌을 추론하는 것을 들 수 있다. 1차 수준에서 2차 수준의 일치로 이행하면서 일치와 관련된 공간적 점은 더 작아진다. 하지만 객관적 일치는 무한소가 아닌 유한한 시공간 영역에 제한되므로, 일치를 임의로 더 작은 영역까지 확장할 수 있는지는 확실하지 않다.

객관적 일치의 시간적이고 공간적인 질서는 우리가 직접 관찰하는 시공간적 질서로부터 ‘추론’되는 것임에도 불구하고 우리는 이를 직접 파악할 수 있다. 그러나 이와 같은 시간과 공간의 질서를 2차 수준의 객관적 일치와 관련되는 무한소의 질서라고 보기 어렵다. 오히려 무한소 질서는 특정한 규칙들을 사용해서 일치에 관해 1차 수준에서 관측된 사실들과 ‘연결’되는 것이 바람직하다. 그런데 원자 이하 규모에 대해서는 시간과 공간 질서를 1차 수준에서처럼 우리의 직접적 지각으로부터 추론할 수 없다. 이로부터 원자 이하 규모에서 우리가 직관적으로 파악할 수 있는 시간과 공간의 질서가 유지되는지를 판단할 수 없다는 결론이 따른다.²³⁸⁾

이상과 같은 ‘일치’ 개념의 해명은 철학적 측면에서 중요하다. 우선 ‘일치’는 경험적인 개념임을 주목하자. 주관적 일치와 객관적 일치 모두 경험을 토대로 하고 있기 때문이다. 그런데 물리학에서 사용하는 일치는 주관적 일치가 아니라 객관적 일치이며, 주관적 일치에서 객관적 일치로의 이행에는 이론에 기반한 해석이 개입할 뿐만 아니라 측정의 오차에 관한 불확실성 즉 일종의 확률 판단이 개입한다. 물리학자 플랑크는 “측정되는 것만이 존재한다”고 주장했고 이때의 측정은 ‘객관적 일치’이다. 이러한 맥락에서 아인슈타인이 말하는 ‘관측이 가능한 점-일치들의 총체’는 측정을 통해 경험적으로 파악될 수 있는 내용을 의미한다. 그렇기에 ‘일치’마저도 확실성을 갖지는 않는다. 물리학에서 수용하는 객관적 일치에도 이론적 해석과 체계적인 관측 오차가 개입하기 때문이다.

또한 ‘점-일치’는 단순한 수학적 개념이 아니다. 물리학 이론이 경험적 의미를 얻으려면 이론 속 수학적 개념이 경험과 연결되어야 한다. 그런 까닭에 ‘일치의 질서’를 1차 수준과 2차 수준으로 구분하여 논하는 것은

238) 경험에 기반한 우리의 직관적 질서가 미시적 세계에까지 적용될 수 있는지에 관한 이러한 우려와 유사한 논의를 리만과 헬름홀츠에게서도 찾을 수 있다. 이에 관해서는 본 논문의 ‘보론’을 참조할 것. 이는 라이헨바흐가 시간과 공간의 물리화 전통 아래에서 그 사유를 잇고 발전시키고 있음을 보여주는 또 하나의 사례이다.

중요하다. 상대론 속 시간과 공간의 바탕이 되는 개념은 1차 수준의 객관적 일치와 연결되는 시간과 공간의 측정 개념이다. 그런데 문제는 이러한 측정 역시 일종의 물리적 절차 혹은 과정을 전제하며, 이는 무한소 수준으로 작아지는 2차 수준의 시간과 공간 질서를 배경으로 한다는 점이다. 예를 들어 측정 막대와 자연 시계는 복잡한 물리적 구조물이며 미시적인 2차 수준의 시간과 공간 질서를 토대로 한다. 그런데 미시적 세계에 대한 우리의 물리적 지식은 완벽하지 않으므로, 1차 수준의 객관적 일치의 전제가 되는 기초 물리적 과정은 ‘경험적 사실’로서 수용된다.

‘일치’ 개념에 대한 이상과 같은 분석은 왜 아인슈타인이 상대론을 제시한 후 이 이론의 개념적 기초 역할을 하는 측정 도구들(막대, 시계)의 인식론적 지위에 대해 고민했는지 이해할 수 있게 해준다. ‘일치’ 개념은 물리적 기초 개념이 경험이 가능한 물리적 과정과 어떻게 연결되어야 하는지에 관한 논쟁적 개념이었으며 이에 관한 인식론적 해명이 필요했다. 라이헨바흐의 해명은 ‘경험주의적’인 것이었고 이를 마흐 혹은 카르납이 지지한 ‘현상주의적 관점’이라고 보기는 어렵다. 왜냐하면 물리학에서 다루는 ‘일치’는 ‘주관적 일치’가 아닌 ‘객관적 일치’이며, 이러한 객관적 일치에 이르기 위해 일정한 이론적 해석과 추론이 개입되기 때문이다.

만약 물리학에서 다루는 ‘일치’가 ‘객관적 일치’이며 이러한 객관적 일치에 이르는 과정에 이론적 추론이 개입될 뿐만 아니라 체계적인 확률적 오차 또한 감안해야 한다면, 현상적인 감각 지각(주관적 일치)으로의 환원을 통해 지식의 ‘확실성’을 보장하려는 시도는 그 의의를 잃는다. 대신 ‘객관적 일치’의 강조는 문제가 되는 이론의 경험적 기초가 되는 명제들이 구체적으로 무엇인지를 명시적으로 규명하도록 요구한다. 만약 현상적인 감각 지각을 특정한 이론의 토대로서 내세울 수 없다면, 우리는 과연 그 이론에서 기초가 되고 구성적인 역할을 하는 경험적 명제들이 무엇인지를 따져 물어야 하기 때문이다. 이제 우리는 다음과 같이 묻는다. 과연 상대론적 시간과 공간의 기초를 이루는 경험적 명제들은 무엇인가? 과연 그 명제들이 경험적으로 타당한가? 이들은 상대론과 경쟁하는 다른 이론의 경험적 명제들과는 어떤 관계를 맺고 있는가?

제4절. 특수 상대론 : 빛, 시계, 막대로 구현된 시공간의 질서

라이헨바흐는 물리적 세계 속 움직이는 기준계 위에 있는 관측자가 빛, 자연 시계, 강체 막대와 같은 구체적 물리적 대상과 과정을 이용하여 어떻게 시간과 공간의 질서를 수립하는지를 재구성한다.²³⁹⁾ 우리는 기준계 위의 관측자가 자신에 대해 상대적으로 정지해 있는 점들을 파악하여 시간과 공간의 질서를 확립하고 관성계를 구성한 후, 자신이 속한 계에 대해 상대적으로 등속 운동하는 기준계에 관한 시간과 공간 질서를 구성하는 구체적인 과정을 살펴보아야 하며, 이것이 특수 상대론적 시공간 질서의 구성이다. 우리는 이러한 특수한 상황에서의 시공간 질서를 전제한 후 비로소 일반 상대성과 같이 좀 더 유한한 시공간 영역 속 중력장 아래에 있는 기준계 위의 관측자가 시간과 공간 질서를 구성해가는 구체적 과정을 논할 수 있다.

특수 상대론에서 등장하는 시간과 공간에 대한 공리체계는 다음과 같이 구성된다. 공리들은 두 가지 부류로 나누어지는데, 첫째 부류의 공리들(공리 I-V)을 ‘빛 공리들’이라고 부른다. 이 공리들은 빛의 운동에 관한 사실들을 진술한다. 빛 공리들은 동시성의 개념 없이도 공식화될 수 있으며, 강체 막대 및 자연 시계와 같은 물리적 측정 도구를 요구하지 않는다. ‘이전’과 ‘이후’의 개념을 수립한 뒤(정의 1) 제시되는 첫 번째 빛 공리는 ‘시간 순서의 공리’이다. 시간 순서의 정의는 두 사건 사이의 인과적 연관에 기초하며, 이때 시간 순서는 인간의 의식 속 경험되는 시간적 연속과 같다.²⁴⁰⁾ 이는 시간의 객관적 순서가 인간의 경험을 통해 파악될 수 있음을 뜻한다. 시간 순서의 공리를 구성하는 공리들의 세부 내용은 다음과 같다. “공리 I,1. 점 P에서 그 출발과 복귀가 일치하는 신호 사슬(연쇄)은 존재하지 않는다.” “공리 I,2. 점 P에서 일어나는 그 어떤 두 사건 E_1 과 E_2 에 대해서도 그 출발이 E_1 (또는 E_2)과 일치하고 그 복귀가 E_2 (또는 E_1)와 일치하는

239) 라이헨바흐가 1921년에 집필하여 제출한 논문인 “아인슈타인의 시공간 이론의 공리화에 대한 보고”에서는 1924년 저서에서와는 다른 내용으로 공리들과 정의들이 제시되고 있다. 그러나 공리들이 빛 공리들과 물질 공리들로 분리되며, 오직 빛 공리들만으로 구성된 빛 기하학이 시공간의 계량 관계를 결정할 수 있다는 라이헨바흐의 입장은 이때부터 계속 유지되고 있음을 알 수 있다.

240) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 46쪽.

하나의 신호가 언제나 존재한다.” “공리 I,3. 점 P에서의 사건들은 선형 연속체를 이룬다.”²⁴¹⁾ 이처럼 ‘시간 순서의 공리’는 내가 속한 기준계에서 모든 물리적 사건들이 순서대로 일어나며 이러한 사건들의 순서를 물리적 신호를 통해 경험적으로 식별할 수 있음을 말한다.

두 번째 빛 공리는 ‘시간 비교의 공리’다. 내가 속한 점에서 물리적 사건들의 순서를 정하는 것만으로는 물리학을 구성할 수 없다. 시간 비교의 공리를 통해 서로 다른 두 점에서 같은 시간 값을 갖는 사건을 결정할 수 있다. “공리 II,1. 실질점 P에서 임의의 시각 t가 주어졌을 경우, 주어진 실질점 P’에 도착하게 되는 하나의 신호를 P로부터 시각 t에 송출할 수 있다.” “공리 II,2. 실질점 P’에서 임의의 시각 t’이 주어졌을 경우, 주어진 실질점 P로부터 하나의 신호가 송출되어 실질점 P’에 시각 t’에 도달하게 할 수 있다.” “공리 II,3. 점 P와 점 P’ 사이에 신호 tt’이 존재한다면, $t_1' > t'$ 인 t_1' 각각에 대해, $t_1 > t$ 가 존재해서 신호 $t_1 t_1'$ 이 존재한다.” “공리 II,4. 시각 t에 P에서 P’으로 가는 신호가 존재한다면, $t_0 < t$ 인 t_0 각각에 대해, 점 P에서 시각 t에 출발한 그 어떤 다른 신호들보다도 P’에 빠르게 도착하는, 점 P에서 시각 t_0 에 출발하는 신호가 존재한다.” “공리 II,5. PP’P가 시각 t에 점 P를 떠나는 신호일 경우, 시각 t에 떠나는 모든 신호 PP’P가 점 P에 t_1 이후에 도착하는, $t_1 > t$ 인 t_1 이 존재한다.” “공리 II,6. 시각 t에 P를 떠나는 첫 번째 신호들에 대해 $\overline{PP'P} = \overline{PP'P} = \overline{PP'P'P}$ 일 경우, 시각 t에 떠나는 다른 최초 신호적 사슬들에 대해서도 $\overline{PP'P'P} = \overline{PP'P'P}$ 가 성립한다.”²⁴²⁾ 이처럼 ‘시간 비교의 공리’는 내가 속한 것이 아닌 다른 임의의 점에 물리적 신호를 보내고 받을 수 있고, 이러한 물리적 신호 중 ‘가장 빠른 신호’가 존재한다는 것을 말한다.

동시성 정의는 공리 II,4. 이후에 비로소 제시된다. “정의 2. 점 O에서 시각 t_1 에 최초의 신호를 보내고 이것이 P에서 반사되어 시각 t_3 에 돌아 오게끔 하자. 그러면 최초의 신호가 P에 도달하는 순간은 다음과 같은 시각 값을 갖는다. $t_2 = t_1 + \epsilon(t_3 - t_1)$, $0 < \epsilon < 1$. 이때 ϵ 는 모든 점 P에 대해 같은 값을 가져야 하는 임의적인 요소다.”²⁴³⁾ 또한 우리가 주목해야 하는 것은

241) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 48-49쪽.

242) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 51-63쪽.

243) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 58-59쪽.

공리들과 정의들을 통해 도출되는 정리 8과 정리 9의 내용이다. 정리 8에 따르면 “신호들을 동기화하기 위한 시간 차이는 결코 0이 될 수 없으며”²⁴⁴⁾ 이는 공리 II,5의 직접적 귀결이다. 정리 9에 따르면 “모든 물리적 과정 (신호, 인과적 사슬)에 연속적인 양(positive)의 시간 간격이 할당되는 방식으로 동시성이 정의될 수 있다.”²⁴⁵⁾

이상과 같은 공리 I 과 공리 II가 빛 공리 중 ‘시간 순서의 위상적 공리’이다. 이 공리들은 내가 속한 점에서 일어나는 모든 물리적 사건들이 순서를 가지고 일어나며, 이러한 순서를 경험적으로 식별할 수 있음을 말한다. 또한 내가 속한 점과 다른 점에 가장 빠른 물리적 신호를 보내고 받을 수 있으며, 이러한 신호의 송수신을 통해 나와 떨어진 점에서의 ‘동시성’을 정의할 수 있음을 말한다. 이처럼 가장 빠른 물리적 신호를 통한 실질점 (물리적 점) 사이의 연결과 시간 비교(순서)를 다루고 있으므로 이 공리들을 ‘위상적(topological)’ 공리들이라 부른다. 다만 이 공리들은 아직 ‘가장 빠른 물리적 신호’가 구체적으로 어떤 신호인지 말하지 않는다. 세 번째 빛 공리에 이르러 비로소 최초의 물리적 신호는 빛 신호임이 주장된다 (페르마(Fermat)의 공리). “공리 III. 첫 번째 신호들은 직접적인 빛 신호들이다.”²⁴⁶⁾

이처럼 빛 신호를 통해 내가 속한 물리적 점과 다른 물리적 점들 사이에서 신호 송수신이 가능하게 되었으므로, 이제는 구체적으로 나와 상대적으로 정지해 있는 점들을 모아서 특정한 공간 좌표계를 만들 필요가 생긴다. 관측자가 자신 주변의 적절한 실질점(real point)들을 추려 공간 좌표계를 만들 수 있게 해주는 네 번째와 다섯 번째 공리를 ‘계량적(metrical) 빛 공리’라 부른다. “공리 IV,1(정상 상태 공리). A에서의 계량을, A와 연관된 점 체계²⁴⁷⁾가 그 각각의 점들에서 그것들이 연관된 체계로 귀결될 수 있도록 선택하는 것이 가능하다. 그러한 점 체계는 언제나 현존한다.”²⁴⁸⁾ “공리 IV,2(순환 이동 공리). 정상 상태인 체계 중에서 다음과 같은 성질을 갖는

244) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 63쪽.

245) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 66쪽.

246) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 73쪽.

247) 여기서 점 A와 “연관된” 점 체계는 \overline{APA} 가 시간에 따라서 변하지 않는 점 P들의 모임이다.

248) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 77쪽.

‘정적인(static)’ 체계를 선택하는 것이 가능하다. 만약 정지된 체계의 점 A에서 두 빛 신호를 닫힌 삼각형 궤의 경로 ABCA를 따라 서로 반대 방향으로 보내면, 두 신호는 동시에 돌아온다.”²⁴⁹⁾ 내가 빛을 쏘고 받았을 때 회귀 시간이 일정하여 나로부터 상대적으로 정지해 있고, 또한 나와 다른 점의 입장에서든 나에게 빛을 쏘고 받았을 때 회귀 시간이 일정한 점들만을 모아 좌표계를 만들 수 있다. 더 나아가 이들 중에서 닫힌 경로의 서로 다른 두 방향에서 빛을 쏘고 받았을 때 걸리는 시간이 같은 점들을 추가로 추려낼 수 있다.

이후 다섯 번째 빛 공리가 제시된다. “공리 V. 정의되는 공간적 기하학이 3차원 유클리드 공간이 되도록, A에 상대적으로 정지된 계를 선택하는 것이 가능하다.”²⁵⁰⁾ 이는 우리가 네 번째 빛 공리를 통해 빛 신호의 송수신 시간이 일정하고 빛 신호의 순환 이동 시간이 일정한 점들을 추려낸 후, 이 점들에서 또다시 3차원 유클리드 기하학을 만족시키는 점들을 별도로 ‘추려낼 수 있음’을 뜻한다. 이러한 빛 공리들이 우리가 경험적으로 파악할 수 있는 물리적 과정에 의해 정의되었음에 주목하자. 빛 신호의 송수신 및 신호가 출발했다 돌아오는 시간에 대한 측정만으로 특정한 점들의 집합을 추려내어 물리학을 서술할 수 있는 좌표계를 만들었다. 이상과 같이 빛 공리인 공리 I-V에 의해 구성되는 물리적 기하학을 “빛 기하학”이라 부른다.

그런데 빛 기하학을 통해 정의되는 점들의 집합은 유일성을 만족하긴 하지만 물리적 ‘관성계’의 집합을 유일하게 결정하지는 않는다. 빛 신호를 통해 구성된 점들의 집합은 관성계보다 그 외연이 더 넓고 일반적이다. 따라서 이 집합으로부터 물리학에서 사용하는 관성계로 집합의 범위를 좁히기 위해 강체 막대, 자연 시계와 같은 물질적 사물들을 추가로 사용해야 한다. 이때 추가된 강체 막대와 자연 시계는 관성계 결정에 있어 제한적인 역할인 점들 사이의 연결 가능성 혹은 ‘강성(rigidity)’을 보장하는 역할을 담당한다. 따라서 빛 기하학을 구성할 수 있다는 사실은 여전히 중요하다. 이는 구조적으로 복잡한 물리적 대상인 강체 막대와 자연 시계 없이, 비교적 단순한 물리적 과정인 빛 신호만을 사용해도 특수 상대론적

249) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 87쪽.

250) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 95쪽.

시공간 질서를 구성할 수 있음을 뜻하기 때문이다. 예를 들어 우리는 빛 기하학의 공리들을 이용해서 서로 다른 관성계 사이의 관계를 수학적으로 기술하는 로렌츠 변환(Lorentz Transformation)을 도출할 수 있다.²⁵¹⁾ 이에 따라 우리는 특수 상대론에서 제시된 시간과 공간 개념의 핵심 주장을 빛 기하학의 용어로 다음과 같이 구체화할 수 있다. ‘시간과 공간의 계량적 구조는 갈릴레이 계량 결정에 따라 조정되는 것이 아니라 빛 기하학적 계량 결정에 따라 조정된다.’

공리 I-V로 구성되는 첫 번째 부류의 공리들이 ‘빛 공리’라면, 공리 VI-X으로 구성되는 두 번째 부류의 공리들은 ‘물질 공리’라 불린다. 물질 공리를 제시하기 위한 정의 속에서 비로소 기초 측정 물체인 ‘강체 막대’와 ‘자연 시계’ 개념이 등장한다. 정의상 자연 시계는 ‘단한 주기적 계’이고, 강체 막대는 ‘외부적 힘들에 단혀 있는’ 고체 막대이다. 그런데 이러한 ‘단혀 있음’을 정의할 때 우리는 모든 물질에 같은 방식으로 영향을 미치고 그것을 차폐할 수 있는 벽을 세울 수 없는 힘인 ‘계량적 힘’(‘물리적 힘’과 대비되며 이후 ‘보편력’이라 불림)의 문제에 부딪힌다. 예를 들어 만약 이러한 계량적 힘의 존재를 인정할 경우, 지구를 직육면체라 볼 수도 있고 이와 다른 형태 또한 허용할 수 있게 됨으로써 지구의 기하학적 형태에 관한 ‘미결정성(indeterminacy)’ 문제가 발생한다.²⁵²⁾

여기서 라이헨바흐는 ‘정의’를 통해 ‘계량적 힘이 존재하지 않는다’고 가정한다.²⁵³⁾ 기초 측정 물체인 강체 막대와 자연 시계의 ‘정의’에 ‘보편력 제거’라는 방법론적 원리를 적용한 것이다. 여기서 우리가 주목해야 하는 두 가지 사실이 있다. 첫째, 비록 ‘보편력 제거’가 일종의 방법론적 원리이며 이의 적용이 일종의 ‘규약적’ 선택이라 하더라도, 이 원리를 적용하지 않는 것을 정당화할 수는 없다는 것이다. 왜냐하면 이 원리를 적용하지 않을 때 과학적 지식 속 미결정성이 발생할 뿐만 아니라 이론이 불필요하게 복잡

251) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 130-139쪽.

252) 이러한 상황이 카르납의 「공간」에서는 물리적 기하학에 관한 ‘규약주의적 관점’을 옹호하는 데 활용되었음을 기억하라. 본 논문 제5장에서 논의할 것.

253) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 160쪽. 이것은 ‘보편력 제거’라는 방법론적 원리이다. 이후 상세히 논하겠지만, 이와 같은 ‘보편력 제거’는 ‘측정 기준 물체의 단위 불변성’이라는 수학적이면서도 물리학적인 근본 가정에 대한 일종의 ‘철학적 해명’이라 볼 수 있다.

해지기 때문이다. 둘째, 이후 자세히 살펴보겠지만 일반 상대론적 상황에서는 정의를 통해 보편력이 제거된 측정 물체들을 전제한 후 시공간의 계량을 경험적으로 측정한다. 그러므로 이때는 추가로 보편력을 도입하여 특정한 물리적 기하학을 규약적으로 선택할 수 있는 여지가 없어진다.²⁵⁴⁾ 결과적으로 우리는 측정 물체에 관한 정의에서 보편력(계량적 힘)을 존재하지 않는다고 전제함으로써 이론적 미결정성을 피하고 이른바 ‘기술적 단순성(descriptive simplicity)’을 얻는다.

이제 보편력 제거를 통해 기초 측정 물체를 정의했으므로, 기초 측정 물체인 시계와 막대가 특수 상대론적인 상황에서 어떤 행태를 보이는지 기술하는 물질 공리들의 내용을 구체적으로 살펴보자. “공리 VI.1. 주어진 장소에서 정지해 있고 길이가 같은 두 개의 강체 막대는, 닫힌 계 내에서 서로 다른 경로로 이동해도 언제 어디서든 같은 방법으로 측정되었을 때 같은 길이를 갖는다.” “공리 VI.2. 같은 장소에서 정지해 있고 근방 비교에서 그 단위가 같은 두 개의 자연 시계는, 닫힌 계 내에서 서로 다른 경로로 이동해도 언제 어디서든 같은 방법으로 측정되었을 때 같은 단위를 갖는다.”²⁵⁵⁾ 이 공리는 리만이 제시한 ‘측정 기준 물체 단위의 일정함’을 명시적으로 기술하고 있으며, 막대뿐만 아니라 시계를 도입함으로써 시간까지 이 논의를 확장한다. 측정 물체에 작용하는 물리적 식별이 가능한 힘들은 교정을 통해 제거되고 물리 법칙의 조정을 통해 규약적으로 도입될 수 있는 보편력(계량적 힘)은 정의를 통해 제거되었으므로, ‘측정 단위 일정성’의 공리인 공리 VI을 제시할 수 있는 것이다.

나머지 공리인 공리 VII, VIII, IX, X은 강체 막대와 자연 시계로 구성되는 기하학이 앞서 수립했던 빛의 기하학과 같음을 주장한다. “공리 VII. 정의 12에 따라 서로 상대적으로 정지해 있는 점들만이 강체 막대에 의해 연결될 수 있다.” “공리 VIII. 강체 막대로 측정했을 때 같은 두 간격 AB와 AC는 정의 10에 따라 측정되었을 때 빛 기하학적으로도 같다.” “공리 IX. 강체 막대에 의해 균일하게 움직이는 계로 운송된 단위는 정의 16에 따라 이동된

254) 이러한 ‘물리적 기하학의 경험적 결정 가능성’ 문제에 대해서는 이후 7장에서 좀 더 자세하게 논의하겠다.

255) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 161쪽.

단위와 같다.” “공리 X. 빛 신호의 이동 시간 \overline{ABA} 를 A에서 자연 시계를 이용해 측정하는 경우, AB의 길이가 강체 막대를 이용해 측정했을 때 같다면, 자연 시계로 측정된 시간은 어디서나 항상 같다.”²⁵⁶⁾ 이는 강체 막대, 자연 시계라는 기초 측정 도구가 보이는 물리적인 행태가 빛 신호를 통해 구성된 시공간의 질서(위상적, 계량적)를 따른다는 것을 의미한다.

이상과 같은 총 10개 부류의 공리들이 특수 상대론에서의 시간과 공간이 갖는 경험적 내용을 완성한다. 이는 특수 상대론 속 등장하는 시간과 공간의 의미를 경험주의의 관점에서 재구성한 것이다. 이 공리들은 물질적 사물들이 인간의 간섭 없이 빛 기하학에 맞게 스스로 조정함을 주장한다. 물질적 사물들은 빛 기하학으로 정의된 로렌츠 변환에 맞게 ‘조정(adjustment)’되며, 라이헨바흐는 이러한 물질적 사물들의 조절을 ‘장(field)에의 조절’로서 설명할 수 있다고 본다. “나침반의 바늘이 나침반의 주변 환경에 있는 자기장에 맞게 스스로 조정하는 것처럼(비록 방향만을 조정하더라도), 측정 막대와 시계는 그것의 단위 길이를 계량 장(metrical field)에 맞게 조절한다.”²⁵⁷⁾

중요한 것은 물질적 사물들이 빛 기하학에 맞게 조절되는지 아니면 고전적인 갈릴레이 변환에 맞게 조절되는지는 경험적 시험에 의해 평가될 수 있으며, 그런 의미에서 물리적 기하학은 ‘규약적’이 아니라 ‘경험적’이라는 사실이다. 빛 공리 I-V는 경험적으로 잘 입증되었다고 볼 수 있으며, 물질 공리 VI-X 또한 그 경험적 타당성을 의심하기 어려운 공리들이다. 그러므로 특수 상대론의 시간과 공간은 ‘기술적 단순성’에 의해서가 아니라 ‘경험적 타당성’에 의해 고전 이론 속 시간과 공간을 ‘대체’했다고 볼 수 있다. 특수 상대론의 시간과 공간에 대한 공리들은 경험적으로 타당한 명제들이며 규약적으로 선택된 명제들이 아니다.

이상과 같은 특수 상대론적 시공간 질서의 재구성은 아인슈타인의 물리학 이론에서는 볼 수 없는 합리적 재구성이면서도 시간과 공간을 물리적으로 고찰하는 사유의 맥락과 잘 부합한다. 공리체계의 형식을 빌리긴 했지만, 결과적으로 라이헨바흐의 논의 속에 등장하는 관측자는 다른 관측자와 빛 신호를 주고받을 수 있고, 이상적인 강체 막대와 자연 시계를 사용하며,

256) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 162-163쪽.

257) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 166쪽.

무엇보다도 빛 신호를 통해서 시간과 공간의 위상적 질서와 계량적 질서를 수립한 후 자신과 상대적으로 정지해 있는 점들을 모아 좌표계(관성계)를 구성할 수 있는 관측자이다. 또한 이 관측자는 자신의 관성계와 이에 대해 등속 운동하는 다른 관성계 사이에 성립하는 계량적 관계인 ‘로렌츠 변환’ 역시 빛 기하학을 바탕으로 유도해낼 수 있다.

리만, 헬름홀츠, 푸앵카레의 기하학 철학이 주로 공간(막대)에 관련된 것이었다면, 라이헨바흐의 논의 속에서 ‘빛’이 중심적 위치를 차지한다는 것을 주목하자. 처음에 빛은 강체 막대와 자연 시계를 가지고 상대적으로 운동하는 기준계들 사이를 ‘연결’하는 신호로서 도입되었지만, 시간 질서와 공간 질서 모두 인과적 과정인 빛 신호를 통해 구성될 수 있음이 새롭게 밝혀졌다. 이는 시간과 공간을 물리적으로 구현하는 주된 주인공이 강체 막대와 자연 시계가 아닌 ‘빛’이며, 이를 통해 강체 막대와 자연 시계 개념이 전제하는 복잡한 물리적 구조의 문제를 상당 부분 피할 수 있음을 뜻한다. 하지만 여전히 측정 단위의 일정성을 유지하는 물질의 ‘강성(rigidity)’은 관성계를 구성하거나 중력장 아래에서의 물리적 기하학을 경험적으로 결정할 때 필수적이므로, 빛 이외의 물질적 측정 기준 물체의 필요성이 완전히 사라진 것은 아니다.

제5절 일반 상대론 : 시공간 위상적 질서의 경험적 파악 가능성

특수 상대론의 시간과 공간 질서는 중력장이 없는 상황의 질서이다. 하지만 이러한 상황은 특수하고 이상적이므로, 중력장이 존재하며 그 크기가 계속 변화하는 일반적인 상황에서 시간과 공간의 질서를 경험적으로 어떻게 파악할 수 있는지를 논의할 필요가 있다. 우리는 일반 상대론의 물리적 주장을 다음과 같은 세 부류로 나누어 볼 수 있다. “1. 특정한 속성들을 가진 시공간 계량을 빛, 강체 막대, 자연 시계를 이용해 구성할 수 있다는 주장. 2. 모든 자연법칙이 이 계량에 상대적으로 공변한다는 주장. 3. 이 계량의 계수들인 $g_{\mu\nu}$ 가 중력 이론을 유도한다는 주장.”²⁵⁸⁾ 이러한 세 부류의 주장에서 두 번째와 세 번째의 주장이 일반 상대론의 핵심임은 분명하다.

258) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 250쪽.

두 번째 주장은 ‘일반 공변성 원리’로서, 등속 기준계든 가속 기준계든 상관없이 모든 자연법칙이 같은 수학적 형식으로 기술된다는 원리이다. 세 번째 주장은 시공간의 기하학적 형태를 통해 중력 현상을 설명 및 예측하는 일반 상대론의 핵심 주장이며, 이는 이전까지의 중력 이론에서는 찾아볼 수 없었던 상대론만의 혁신적인 면모였다.

그렇지만 우리의 관심 대상인 시간과 공간이 갖는 경험적인 의의에 관한 주장은 두 번째, 세 번째 주장이 아닌 첫 번째 주장이다. 따라서 라이헨바흐는 세 부류의 주장 중 첫째 주장에 대해서 철학적으로 분석한다. 왜냐하면 적어도 시간과 공간에 관해서는 “첫째 주장이 다른 두 주장의 논리적이고 직관적인 토대를 구성”²⁵⁹⁾하기 때문이다. 여기서 첫 번째 주장은 특수 상대론보다 더 일반적인 기준계에서도 관측자가 구체적인 물리적 과정인 빛 신호, 강체 막대, 자연 시계를 통해 시공간의 계량을 구성할 수 있다고 주장한다. 우리는 상대적으로 등속 운동하는 기준계에서 가속 운동하는 기준계로 적용 범위를 넓히면서도 여전히 물질적 도구(시계, 막대)와 물리적 과정(빛 신호)을 통해 시간과 공간의 객관적 질서를 수립할 수 있다.

일반 상대론 속 시간과 공간에 관한 공리는 특수 상대론에서 공리 집합이 10개였던 것과 대조적으로 오직 1개다. 왜냐하면 일반 상대론에서는 오직 미분적인(미소) 영역 즉 국소적인 시공간의 영역에서만 특수 상대론적 시공간 질서가 성립한다고 가정하기 때문이다. “공리 XI.1. 공리 I-X까지는 시작점인 모든 실질점 P의 작은 영역에서 적용되며, 그와 같은 점들에서만 적용된다. 이러한 근사는 영역이 줄어들수록 제한 없이 커진다.” “공리 XI.2. 실질점 P에서 영원히 정지해 있는 시계와 측정 막대는 P에서 미분적으로 정지해 있는 시계 및 측정 막대와 같은 방식으로 움직인다.”²⁶⁰⁾ 그런데 과연 공리 XI이 아인슈타인의 일반 상대론에 의해 실제로 주장되었을까? 이 지점에서 중요한 문제가 제기된다. 강체 막대와 자연 시계는 특수 상대성 이론의 맥락에서, 즉 관성계에서만 정의되었다. 그런데 과연 우리는 측정 물체가 힘을 받는 중력장 아래에서도 특수 상대론에서와 같은 강체 막대와 자연 시계가 존재한다는 것을 정당화할 수 있을까?

259) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 251쪽.

260) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 251-252쪽.

이에 대해 라이헨바흐는 기준계의 시공간 범위 축소와 함께 측정 도구 내부적인 물리적 힘이 외부적인 물리적 지지력과 비교할 때 무한대로 커져 “두 힘 사이의 비율이 0이 된다”고 상정함으로써(정의 25) 이를 해결한다.²⁶¹⁾ 설혹 중력장이 존재하더라도, 측정 물체에 작용하는 외부 힘이 내부 힘에 비해 무시할 만큼 작으면 측정 물체가 중력장이 없는 경우에서와 같이 작동한다는 것이다. 그러면 최소한 미분적인 시간 영역과 공간 영역에서는 특수 상대성에서의 시공간 계량(공리 I-X)이 성립한다고 전제할 수 있다. 그러나 이러한 미분적인(무한소의) 시간과 공간 영역은 극한적인 경우이며, 중력장이 존재하고 변하는 실제 세계에서는 찾아보기 힘든 비현실적 상황이다. 따라서 우리는 중력장이 존재하는 일반적 상황에서 시공간 공리들이 성립하는지, 이때 여전히 성립하는 공리들은 무엇이며 그렇지 않은 공리들은 무엇인지 물을 수 있다.

우리가 제일 먼저 고려해야 하는 것은 중력장이 가장 안정적인 형태를 띠는 ‘정적 장(static field)’의 경우이다. 예를 들어 짧은 시간 간격 동안에 태양 또는 지구 표면에서 볼 수 있는 중력장(태양 또는 지구의 회전을 무시할 수 있는)을 이러한 정적 장이라 할 수 있다. 이러한 정적인 장은 다음과 같은 4가지 조건들에 의해 정의된다. “ g_{uv} 는 x_4 에 대해 독립적이다. $g_{\alpha 4}=0$ ($\alpha=1, 2, 3$). $d\sigma^2 = g_{\alpha\beta}dx_\alpha dx_\beta$ 는 양의 한정된 값을 갖는다. $g_{44}<0$.”²⁶²⁾ 이와 같은 정적 장에서는 빛 공리 중 I-IV가 적용되지만, 빛 기하학의 유클리드적 특성을 주장하는 공리 V는 더 이상 적용되지 않는다. 이는 물리적 기하학이 유클리드적이지 않으므로 빛 기하학을 이용해서 정적 장을 유일하게 정의하는 것이 불가능함을 뜻한다. 즉, 정적 장에서의 시공간 계량은 미결정적이며, 계량을 결정하기 위해서는 자연 시계, 강체 막대, 빛 광선과 같은 물질적 도구를 통한 측정이 추가로 필요하다. 정적 장에서 시계는 균일하게 움직이지만 시간 단위는 자연 시계에 의해 운송되지 못하며 위치에 의존한다. 또한 강체 막대의 특성 길이는 관성계에서의 특성 길이와 같지 않다. 다만 정적 장에서는 동시성의 전이성이 적용되기 때문에, 강체 막대의 기하학은 여전히 ds 의 기하학이라 할 수 있다.

261) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 262쪽.

262) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 283쪽.

‘정적 장’ 다음으로 고려되는 좀 더 일반적인 중력장은 ‘정상 상태의 장(stationary field)’이다. 아인슈타인의 ‘회전 원판 사고 실험’에서 등장하는 회전 원판이 정상 상태의 장을 나타내는 대표적 사례에 해당한다. 이 장의 속성들은 다음과 같은 조건들에 의해 주어진다. “ $g_{\mu\nu}$ 는 x_4 에 대해 독립적이다. $g_{\alpha 4} \neq 0$ ($\alpha=1, 2, 3$). $d\sigma^2 = g_{\alpha\beta} dx_\alpha dx_\beta$ 는 양의 한정된 값을 갖는다. $g_{44} < 0$.” 정상 상태의 장에서는 공리 IV,2인 순환 이동 공리가 적용되지 않으므로, 이 계에서의 ‘동시성’은 관성계에서와는 다른 의미이며 보존되지 않는다. 또한 정상 상태의 장에서는 정적 장과 달리 강체 막대의 특성 길이가 $d\sigma$ 와 같지 않다. 따라서 우리는 $d\sigma$ 의 기하학으로부터 직접적으로 강체 막대의 기하학을 추론하지 못한다.²⁶³⁾

이를 좀 더 구체적으로 살펴보자. 회전 원판에서 $d\sigma$ 의 기하학은 유클리드적이지만 강체 막대의 특성 길이는 $d\sigma$ 가 아니므로 강체 막대의 기하학은 비유클리드적이다. 따라서 우리는 강체 막대의 길이가 중심으로부터의 반경 거리에 따라서 달라지며 반경과 수직 방향으로 작용하는 ‘계량적 힘의 영향’을 받는다고 보게 된다. 하지만 이는 3차원 공간의 관점에서 강체 막대의 기하학을 바라볼 때 얻게 되는 결론이다. 우리는 ‘일반 공변성 원리’가 성립한다고 가정하고 있으므로, 정상 상태의 장에서도 일반 공변성을 담보하는 4차원적 ds^2 은 불변하며 보편력이 작용하지 않는다. 즉, 우리는 3차원 강체 막대에 작용하는 ‘계량적 힘’을 상정함으로써 4차원적 ds^2 에 대한 계량적 힘을 0으로 설정한다는 이점을 갖는다.²⁶⁴⁾ 그리고 바로 이러한 면모가 중력을 일종의 ‘보편력’이라고 간주하게 만드는 근거가 된다. 다만 우리는 이러한 ‘보편력’이 오직 ‘간접적’으로만 드러난다는 점에 주목한다. 이때 우리는 강체 막대의 기하학이 물리 법칙을 기술하는 기준이 되는 $d\sigma$ 의 기하학과 같지 않기 때문에 강체 막대에 ‘체계적인 힘’이 작용한다고 간접적으로 추론할 수 있을 뿐이다.²⁶⁵⁾

이상과 같이 살펴본 ‘정적 계’와 ‘정상 상태의 계’는 중력장의 세기가 시간과는 독립적으로 일정하게 유지되는 경우였다면, 다음으로 제시되는 좀

263) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 301쪽.

264) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 312쪽.

265) 이는 일반 상대론에서도 여전히 물리 법칙을 기술하는 기준계가 국소적 관성계이며, 관성계와 비관성계 사이의 구분 또한 여전히 유지된다는 사실을 반영한다.

더 일반적인 계인 ‘실질계(real system)’에서는 중력장의 세기가 시간에 따라서 변한다. 이러한 ‘실질계’는 구체적으로 다음 조건들을 만족시킨다. “ $g_{44} < 0$. $d\sigma^2 = g_{\alpha\beta} dx_\alpha dx_\beta$ 는 양의 한정된 2차 형식을 갖는다. $g_{\mu\nu}$ 는 실수이고 미분가능하다. 오직 $g_{\mu\nu}$ 의 결보기 특이점만 나타날 수 있다.”²⁶⁶⁾ 이 계에서는 $g_{\mu\nu}$ 가 독립적이지 않고 시간에 따라 변화하므로, 정상 상태의 공리인 공리 IV,1는 성립하지 않는다. 하지만 이러한 실질계에서도 여전히 위상적 공리인 공리 I 과 공리 II는 타당하며, 이는 시간과 공간이 실질계에서도 최소한의 위상적 질서는 유지함을 의미한다. 또한 실질계에서는 모든 인과적 과정이 시간의 같은 방향에서 발생한다는 ‘인과성(causality)의 조건’도 유효하다. 더 나아가, 무한소 영역에서 특수 상대성 이론이 성립한다는 것만을 요구하는 ‘가장 일반적으로 허용이 가능한 계’에서도 시공간의 위상적 공리인 공리 I 과 공리 II의 타당성은 여전히 유지된다. 따라서 우리는 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

...일반 상대성 이론에서의 시간과 공간은 비록 계량과 전이적 동시성이 없다고 하더라도 특수 이론에서와 동일한 것을 의미한다고 말할 수 있다. 위상적 특성들은 계량적 특성들보다 더 일정한 것으로 드러나며, 특수 이론에서 일반 이론으로의 전이는 단지 계량적 특성들의 포기를 나타낸다. **시간과 공간의 근본적인 위상적 특성은 그대로 남아 있다.**²⁶⁷⁾

이상과 같이 중력장이 존재하는 일반 상대론적 상황에 이르면 시간과 공간의 물리학은 더 이상 ‘운동학’에 머무르지 않고 ‘동역학’으로 바뀐다. 왜냐하면 질량과 에너지는 기준계의 가속을 일으키고, 기준계의 가속이 일어날 때 그 가속도의 크기에 따라 시간과 공간을 측정하여 드러내는 물리적 물체(과정)인 빛 신호, 강체 막대, 자연 시계의 구체적인 행태가 변화하기 때문이다. 그리고 측정 물체의 이러한 행태 변화를 기술하는 방정식이 아인슈타인의 중력장 방정식이다. 아인슈타인의 통찰이 혁신적이었던 이유는 이전에는 중력장의 존재가 계량적 사물들(빛 신호, 강체

266) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 314쪽.

267) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 341쪽. 강조는 나의 것이다.

막대, 자연 시계)의 행태에 경험적 식별이 가능한 변화를 만들어낼 것이라 예상하지 못했기 때문이다. 이제 중력장 아래에서 시공간의 계량적 질서는 특수 상대론에서와 달리 동역학을 따르게 되었다. 그러나 이 질서는 미분적으로 특수 상대론적 시공간 질서를 전제하므로, 여전히 특수 상대론적 시공간 질서는 일반 상대론적 시공간 질서의 기초가 된다.

중력장에서의 시공간 계량 질서는 질량-에너지에 따라서 변화하며 아인슈타인의 중력장 방정식은 이러한 변화를 성공적으로 기술한다. 따라서 라이헨바흐의 철학적 분석은 중력장 아래에서 여전히 시공간이 갖는 경험적인 의미를 규명하는 문제에 초점이 맞춰져 있다. 그가 강조하는 것은 두 가지이다. 첫째, 중력장이 있을 때 물리적 기하학(시공간의 계량적 형태)은 측정 물체(과정)를 통해 경험적으로 결정된다. 그리고 이러한 경험적 결정을 예측하는 방정식이 중력장 방정식이다. 둘째, 중력장에 따라 시공간의 계량적 형태가 변화하더라도 시공간의 위상적 질서는 유지되며 이 질서는 여전히 경험적으로 파악된다. 따라서 우리는 우리가 경험하는 시간과 공간이 중력장의 존재에도 불구하고 여전히 객관적이라고 말할 수 있다.

제6절. 경험주의 시공간 철학의 특징 : ‘규약주의’와의 비교

논리경험주의의 시공간 철학의 주요 특징은 ‘규약주의’일까 ‘경험주의’일까? 우선 지적해야 하는 것은 ‘규약주의’와 ‘경험주의’가 양립 불가능하지는 않다는 점이다. ‘규약주의’는 주어진 경험적 사실만으로는 우리가 수립하고자 하는 이론적 구성물이 단일하게 결정되지 않으므로 일종의 ‘규약적 선택’을 통해 이론이 결정된다고 본다. ‘규약주의’에서는 과학적 지식 속 ‘규약’의 역할과 중요성을 강조하는 것이지, 과학적 지식의 실질적 기반이 ‘경험’임을 부정하지 않는다. 이와 대칭적으로 ‘경험주의’ 역시 과학적 지식 속에 ‘규약’이 개입됨을 수용한다. 예를 들어 과학적 지식 속에 빈번하게 등장하는 여러 종류의 ‘정의’들 중 특정한 정의는 경험적 내용이 없고 ‘임의적(arbitrary)’ 혹은 ‘정의적(definitional)’ 내용만 담고 있을 수 있다. ‘경험주의’는 지식 속에 등장하는 이러한 규약적 요소를 긍정하지만, 규약주의와 달리 이 요소들이 지식 구성에서 오직 ‘제한적 역할’만을 담당할 뿐이라 본다.

그러므로 ‘규약주의’와 ‘경험주의’는 서로 양립 불가능하지 않으면서도 ‘규약’의 역할과 중요성을 서로 다른 정도로 강조하는 점에서 구분된다. 이 점을 염두에 두면서 시간과 공간에 대한 논의로 주의를 돌려보자. 우리가 논의하는 대상이 물리학적 의미에서의 시간과 공간이라면 ‘규약주의’는 물리적 시간과 공간을 수립하는 과정에서 ‘규약’이 핵심적인 역할을 한다고 본다. 이에 반해 ‘경험주의’는 물리적 시간과 공간의 수립에서 ‘경험적인 사실들’이 핵심적인 역할을 하지만 이에 반해 ‘규약’은 오직 제한적인 역할을 할 뿐이라 본다. 시간과 공간의 물리적 고찰을 위해 중요한 역할을 한 헬름홀츠와 푸앵카레를 이 관점에서 각각 ‘경험주의’와 ‘규약주의’로 구분할 수 있다.

헬름홀츠는 물리적 공간에 대한 ‘경험주의’ 관점을 취했다. 왜냐하면 그는 ‘자유 운동 원리’를 만족하는 길이 측정 단위 물체를 움직여 물리적 공간의 기하학적 형태를 경험적으로 결정할 수 있다고 보았기 때문이다. 그에 반해 푸앵카레는 ‘규약주의’ 관점을 취했다. 왜냐하면 푸앵카레는 헬름홀츠가 의문 없이 가정하는 ‘자유 운동 원리’에 문제를 제기하고, 우리가 물리학의 법칙을 수정하면 운동하는 측정 물체의 길이(혹은 빛이 공간에서 전파되는 방식)를 체계적으로 변화시킬 수 있으므로 측정을 통해 경험적으로 귀결되는 물리적 기하학의 형태를 여전히 우리가 선호하는 형태로 조절할 수 있다고 주장했기 때문이다. 만약 물리학이 기하학을 이용하여 물리적 공간을 기술할 수밖에 없다면, 푸앵카레는 공간을 기술하는 물리적 기하학을 수립하는 데 이와 같은 ‘규약적 선택’이 결정적인 역할을 한다고 보았다.

비록 푸앵카레가 공간을 물리적으로 고찰하는 과정에서 중요한 역할을 했다고 하더라도 그가 물리적 공간의 기하학에 관한 ‘규약주의’ 관점을 취했다는 것은 분명하다. 왜냐하면 그는 물리적 공간에 관해 우리가 경험하는 사실들을 유클리드 기하학뿐만 아니라 비유클리드 기하학을 이용해서 기술할 수도 있으므로, 두 종류의 물리적 기하학 중 어떤 기하학을 선택할 것인지는 원칙적으로 자유롭다고 주장했기 때문이다. 물론 이때 푸앵카레는 일종의 ‘선택 기준’을 제시했다. 그는 물리적 기하학의 선택이 ‘규약적’이므로, 물리학자들은 언제나 ‘수학적 단순성’에 있어 비유클리드보다 뛰어난 유클리드 기하학을 선택할 것이라고 주장했다.

그런데 1915년 11월에 제시된 아인슈타인의 중력장 방정식은 명시적으로

비유클리드 기하학을 물리적 기하학으로 사용하고 있다. 그렇다면 일반 상대론은 푸앵카레의 입장을 반박하고 헬름홀츠의 입장을 옹호한 것일까? 이에 대해 슐리크는 자신의 1917년 저서에서 푸앵카레의 입장에서 상대론적 시간과 공간을 해석하고자 했다. 슐리크가 볼 때 상대론에 의해 비록 그 영역이 공간뿐만 아니라 시간에까지 확장되기는 했지만, 여전히 우리는 시간과 공간을 기술하는 물리적 기하학을 유클리드 기하학과 비유클리드 기하학 중에서 선택할 수 있다. 다만 이때의 선택 기준은 푸앵카레가 생각했던 ‘수학적 단순성’이 아니라 ‘물리적 단순성’이다. 비록 수학적으로는 유클리드 기하학보다 더 복잡해질지 모르겠으나, 비유클리드 기하학을 수용하면 뉴턴의 고전 물리학보다는 일반 공변성 원리를 만족하기에 물리적으로 더 단순한 세계상을 제공하는 일반 상대론을 얻을 수 있기 때문이다.²⁶⁸⁾ 일반 상대론이 ‘물리적 단순성’에 의해 비유클리드 기하학을 ‘선택’했다는 이와 같은 슐리크의 관점은 아인슈타인 자신의 관점과도 상당 부분 부합했다.

하지만 실제로 아인슈타인 본인은 다소 ‘이중적인 관점’을 취했다. 그의 이러한 이중적인 관점은 그의 1921년 강연 “기하학과 경험”에 잘 나타나 있다. 이 논문이 중요한 이유는 이 논문에서 상대론 속 물리적 기하학의 핵심 문제가 강제 막대, 자연 시계와 같은 기초 측정 물체의 인식적 지위에 있음을 아인슈타인 스스로가 명시적으로 드러내고 있기 때문이다. 먼저 아인슈타인은 ‘실천적 기하학’을 옹호한 헬름홀츠의 관점이 없었다면 일반 상대론이 전개될 수 없었음을 인정한다. 왜냐하면 그의 회전 원판 사고 실험은 측정 물체를 통해 물리적 기하학을 결정할 수 있다는 헬름홀츠의 입장을 명시적으로 전제하고 있기 때문이다. 하지만 아인슈타인은 푸앵카레의 입장이 ‘영원의 관점에서 볼 때’ 옳다고도 말한다. 왜냐하면 상대론이 전제하는 강제 막대와 자연 시계는 실제 세계에서 찾아볼 수 없는 극히 이상적인 물체이며, 이 물체는 물리적으로 복잡한 구조를 갖추고 있어 물리학에 경험적 내용을 제공하는 기초 개념으로 삼기에는 부적절한 것으로 여겨지기 때문이다.²⁶⁹⁾

아인슈타인의 이러한 ‘이중적 입장’은 상대론 속 시간과 공간을 ‘규약주의’

268) Schlick (1917/1920) 중 6장에서의 내용 참조. 또한 슐리크의 시공간 철학을 상세하게 논하고 있는 본 논문의 제3장에서의 논의를 참고하라.

269) 아인슈타인, 홍수원·구자현 옮김 (1921/2003), “기하학과 경험” 참조.

관점과 ‘경험주의’ 관점 모두에서 해석할 수 있는 여지를 남겼다. 다만 아인슈타인의 “기하학과 경험” 이후 논의의 초점은 추상적인 ‘수학적 단순성’ 또는 ‘물리적 단순성’ 개념이 아니라 강체 막대, 자연 시계와 같은 기초 측정 물체로 변화되었고, 실제로 기초 측정 물체에 대한 주목은 상대론적 시간과 공간의 핵심적인 인식적 문제에 제대로 접근한 것이었다. 이러한 상황에서 시공간을 ‘규약주의’로 해석하고자 한 대표적 인물이 카르납이며, 이런 카르납의 입장은 그의 1921년 박사학위 논문 「공간」 및 그가 1920년대 발표했던 다른 논문들에서 잘 드러난다.

박사학위 논문에서 카르납은 상대론이 비유클리드 기하학을 물리적 기하학으로 채택한 것은 이를 통해 ‘계량 규정’이 단순해지기 때문이라고 해석했다. 구체적으로 말해 상대론은 길이 측정 물체의 ‘강성(rigidity)’을 유지한다. 중력 이외 다른 힘들의 작용은 일종의 ‘교정’ 또는 ‘보정’을 통해 상쇄시키며, 중력에 의해서는 측정 막대가 영향을 받지 않고 그 길이를 유지한다고 가정한다. 이와 같은 방식으로 ‘계량 규정’을 단순화시킬 때 우리가 얻을 수 있는 이점들이 분명히 있다. 예를 들어 측정 막대가 보편적 변형을 겪는다고 가정할 경우, 우리가 기존에 강성을 유지하는 측정 막대를 기준으로 수립했던 다른 물리학 법칙들 또한 이에 따라 수정해야 한다는 복잡한 상황이 발생한다. 이처럼 카르납은 ‘계량 규정’의 단순성을 유지하면서 얻을 수 있는 이점을 구체적으로 제시했다는 점에서 슐리크보다 진일보한 논의를 펼쳤다고 볼 수 있다.²⁷⁰⁾

하지만 중요한 점은 카르납의 경우 ‘계량 규정 M’의 단순성 추구만이 우리의 유일한 선택지는 아니라고 보았다는 데 있다. 우리는 여전히 ‘계량적 공간 규정 R’의 단순성을 추구할 수 있으며, 그런 의미에서 유클리드 기하학을 물리적 기하학으로 유지할 수 있다. 다만 카르납의 규약주의가 푸앵카레의 규약주의와 달라진 지점은 다음과 같다. 푸앵카레의 경우 물리학자가 오직 ‘수학적 단순성’에 의해서 유클리드 기하학을 선택할 것이라고 주장했지만, 카르납은 ‘계량 규정’과 ‘계량적 공간 규정’ 모두에 ‘단순성’의 기준을 적용할 수 있으며, ‘계량 규정’에 단순성 기준을 적용했을 때 어떤 이점이 있고,

270) 카르납의 규약주의적 시공간 철학을 상세하게 설명하고 있는 본 논문 제5장에서의 논의를 참조하라.

‘계량적 공간 규정’에 단순성 기준을 적용했을 때 어떤 이점이 있는지를 구체적으로 보여주었다.

이러한 카르납의 ‘관용적 규약주의’는 그의 이후 논문에서 유지 및 발전된다. 1923년 논문²⁷¹⁾에서 그는 물리학을 이루는 3권의 책(1권 : 공리적 체계, 2권 : 1권과 2권을 연결하는 사전, 3권 : 물리적 상태 기술)에 대해 ‘최대 단순성 원리’를 적용하는 방법에 자유가 있음을 주장했다. 우리가 ‘최대 단순성 원리’를 1권에 적용하면 뉴턴 물리학이 귀결되지만 이를 2권과 3권에 적용하면 상대성 이론이 귀결된다. 그리고 이 원리를 물리학의 어떤 부분에 적용할지는 원칙적으로 자유롭다. 이처럼 카르납이 기본적으로 푸앵카레의 규약주의를 발전시키고 있다는 것은 그의 1924년 논문²⁷²⁾에서도 잘 드러난다. 푸앵카레는 물리학의 근본 법칙이나 인과율 역시 일종의 ‘규약’이라 보았는데, 카르납 역시 푸앵카레의 관점을 이어받으면서도 두 개의 규약인 ‘인과성’과 ‘공간의 3차원적 성격’ 사이에 어떤 논리적 관계가 성립하는지를 추가로 규명하고자 했기 때문이다.

이에 반해 라이헨바흐는 아인슈타인의 “기하학과 경험” 이후 ‘규약주의’가 아닌 ‘경험주의’ 관점을 취했고, 이는 푸앵카레보다는 헬름홀츠의 길을 따른 것이었다. 이번 장에서 살펴본 것처럼, 라이헨바흐는 상대론적 시간과 공간의 특성을 기술하는 11개 부류의 ‘경험적 명제들’을 ‘공리’들로서 제시했다. 빛 기하학의 위상적 공리들과 계량적 공리들 및 물질 공리들은 상대론 이전의 광학 및 역학 실험을 통해 그 경험적 타당성을 확인할 수 있는 경험적 진술들이다. 그리고 이러한 경험적 진술들이 상대론적 시간 및 공간 이론의 ‘내용’을 결정한다. 비록 ‘임의적 정의’들이 공리들 위에 덧붙여져서 공리체계가 구성되기는 하지만, 이 공리체계에서 더 핵심적인 것이 ‘정의’가 아니라 ‘공리’임은 분명하다. 시간과 공간의 공리체계에서 공리들을 ‘경험적 진술들’로 제시했다는 것은, 물리적 시간과 공간에 대해 라이헨바흐가 ‘규약주의’가 아닌 ‘경험주의’의 관점을 취했음을 보여주는 강력한 증거이다.

물론 라이헨바흐가 전적으로 헬름홀츠적인 경험주의를 제시한 것은 아니다. 왜냐하면 특수 상대론적 시간과 공간에 대한 라이헨바흐의 설명에는

271) 제목은 「물리학의 임무와 최대 단순성 원리의 적용에 대하여」이다.

272) 제목은 「공간의 3차원성과 인과성 : 두 허구 사이의 논리적 연결에 관한 탐구」이다. 본 논문 제5장에서의 논의 참조.

어느 정도 규약적 요소가 포함되어 있기 때문이다. 첫째, 강제 막대와 자연 세계 같은 ‘기초 측정 물체’의 정의에 일종의 규약이 포함된다. 왜냐하면 이 정의에 ‘보편력 제거의 원리’라는 방법론적 원리가 적용되며 이 원리를 적용할지 판단하는 것은 일종의 ‘규약적 선택’이기 때문이다. 둘째, 라이헨바흐의 공리 중 공간의 유클리드적 특성을 말하는 공리 V의 경우를 생각해 보자. 이 공리는 유클리드적 계량 관계를 만족시키는 점들을 모아 관성계를 만들 수 있지만, 실제로 공리 I-IV를 만족시키는 점들의 외연은 관성계보다 더 넓음을 말하고 있다. 헬름홀츠는 기초 측정 물체를 자유 운동시킴으로써 공간의 기하학적 형태를 경험적으로 결정할 수 있다고 보았지만, 이에 반해 라이헨바흐의 경우에는 빛 신호를 이용해서 우리가 사용하기 편리한, 유클리드적 계량 관계를 만족시키는 점들을 추려냈다.

하지만 여전히 라이헨바흐는 공간적 기하학이 일종의 경험적인 사실이라고 말한다. 왜냐하면 빛 기하학에서는 합동이 강제 물체를 사용하지 않고 빛 신호만을 이용해서 정의되었기 때문이다. 이에 관해 그는 구체적으로 다음과 같이 말한다.

...지금껏 우리가 제시한 정의들의 배열 속에서 공간적 기하학은 임의적인 사실이 아닌 경험적인 사실임을 알 수 있다. 왜냐하면 선분의 동일성이 기하학과는 독립적으로 정의되었기 때문이다. 동시에 이러한 결과는 유클리드 기하학이 모든 종류의 합동 비교에 전제되는 것이 아니라는 사실을 알려 준다. 합동은 강제 물체를 사용하지 않은 다른 방식으로, 즉 오직 빛의 속도만을 사용해 정의되었다.²⁷³⁾

또한 라이헨바흐는 물리적 기하학에 ‘규약적 요소’가 존재한다고 말하지만, 우리가 이와 다른 ‘규약적 선택’을 할 수 있음을 말하지는 않는다. 예를 들어 기초 측정 물체의 정의에 ‘보편력 제거의 원리’를 적용하는 것은 분명 규약적 요소를 포함하고 있지만, 우리가 이 원리를 적용하지 않을 수 있는 다른 근거를 발견하기는 어렵다. 왜냐하면 이 원리를 적용하지 않으면 비록 ‘기술적인 차원’에 지나지 않음에도 불구하고 물리학 이론이 불필요

273) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 96쪽. 강조는 나의 것이다.

하게 복잡해지기 때문이다. 또한 라이헨바흐는 공리 V에 대해서도 우리가 유클리드적 계량 관계를 고정할 수 있다면 굳이 비유클리드적 계량 관계를 고집할 필요가 없다는 관점을 취한다. 만약 물리학에서 기초적인 역할을 하는 ‘관성계’가 유클리드적 계량 관계를 전제하고 있다면 더욱더 그러할 것이다.

라이헨바흐가 제시한 특수 상대론적 시간과 공간의 공리체계에서 계량 관계를 유클리드적으로 설정할 수 있다는 것은, 적어도 중력이 존재하지 않는 상황에서 물리적 기하학의 형태가 규약적으로 ‘고정’될 수 있음을 뜻한다. 그런데 일반 상대론에 이르면 상황이 달라진다. 중력장이 고정되지 않고 일반화될수록 즉 시간에 따른 중력장 크기의 변동이 심해질수록 고정적으로 적용되는 시간과 공간의 공리들이 줄어들는다. 특히 중력장이 존재할 때 계량적 공리는 더 이상 적용되지 않는다. 이 지점에서 전통적인 의미의 물리적 기하학, 즉 물리적 기하학의 계량적 형태는 더욱더 경험적으로 바뀐다. 왜냐하면 중력장이 존재할 때 물리적 기하학을 나타내는 계량 계수들은 강체 막대, 자연 시계, 빛 신호 등 구체적인 물리적 절차를 통해 경험적으로 결정되어야 하기 때문이다. 이러한 계량 계수를 물질-에너지와 연결하여 예측하는 방정식이 아인슈타인의 중력장 방정식이다.

이는 곧, 계량 관계가 특수 상대론에서 ‘동등화 공리(원리)’였다가 일반 상대론에서 ‘연결 공리(원리)’로 바뀔을 의미한다.²⁷⁴⁾ 물론 이러한 경험적 결정에서 특수 상대론적 시간과 공간의 논의에서 제시된 기초 측정 물체의 정의가 전제되는 것은 사실이다. 즉, 물리적 기하학을 경험적으로 결정한다고 해도 이러한 경험적 결정을 위해 사용되는 강체 막대, 자연 시계, 빛 신호는 ‘보편력이 제거’된 것으로 가정된다. 그러나 우리에게 기초 측정 물체 정의에 사용된 ‘보편력 제거의 원리’를 거부할 합리적 근거가 없다면 우리는 이러한 경험적 결정 또한 거부할 수 없을 것이다.

라이헨바흐가 푸앵카레의 ‘규약주의’가 아닌 헬름홀츠의 ‘경험주의’를 따르면서 이를 변형 및 확장했다는 점은 일반 상대론적인 상황에 대한

274) 이러한 시각은 라이헨바흐의 1920년 저작 『상대성 이론과 선험적 지식』에서 제시된 바 있으며, 이것이 1924년 『상대성 이론의 공리화』에서도 유지되고 있음을 알 수 있다. 이는 라이헨바흐의 『선험적 지식』에 대한 프리드먼의 평가가 라이헨바흐의 1924년 저작에도 여전히 유효함을 뜻하는 것이기도 하다.

그의 설명에서 잘 드러난다. 헬름홀츠가 ‘길이 측정 물체’의 ‘자유 운동 원리’를 통해 공간의 기하학적 형태를 결정하고자 했다면, 라이헨바흐는 이를 시간으로까지 확장하면서 중력장이 있을 때 빛, 강체 막대, 자연 시계를 이용해서 시공간의 계량을 구체적으로 결정한다고 서술하고 있기 때문이다. 실제로 아인슈타인이 ‘회전 원판 사고 실험’에서 취한 관점이 바로 이와 같은 헬름홀츠의 ‘경험주의’적 관점이었다.

다만 아인슈타인이 ‘경험주의’ 관점을 자신의 ‘회전 원판 사고 실험’에서 ‘발견법적’으로 활용했다면, 라이헨바흐는 경험주의 관점 아래에서 시간과 공간의 경험적 내용을 체계적인 방식으로 자세하게 제시하고자 했다. 특히 그는 일반 상대론에 이르러 좌표가 직접적인 측정의 의미를 상실했다는 아인슈타인의 주장이 구체적으로 무엇을 의미하는지를 경험주의 관점에서 자세하게 밝혔다. 정적(static) 장, 정상 상태(stationary)의 장, 일반적인 계를 순차적으로 검토하며 각각의 경우 좌표와 측정 물체의 기하학이 서로 어떤 관계를 맺는지 규명했기 때문이다. 그 결과 그는 가장 일반적인 계에 이르러 시공간의 계량적 질서가 변하더라도 여전히 시공간의 위상적 질서가 유지되며 이 위상적 질서는 여전히 우리의 경험을 통해 파악된다는 결론에 다다랐다. 결과적으로 시공간의 위상적 질서와 계량적 질서 모두 우리의 ‘경험’을 통해 파악되는 셈이다.

제7절. 결론

1920년의 교수자격 취득논문 『상대성 이론과 선험적 지식』의 집필 이후 라이헨바흐는 슈투트가르트 공과대학에 재직하며 상대론적 시공간에 대한 분석을 통해 상대론 속 시간과 공간의 경험적인 의미를 체계적으로 규명함으로써 과학철학자로서 명성을 얻었다. 그의 시공간 철학을 대표하는 저서 『상대성 이론의 공리화』(1924년)는 경험주의 관점에서 이루어진 상대론적 시공간의 합리적 재구성과 의미 해명을 상징한다. 이번 장에서 자세히 살펴보았듯, 라이헨바흐의 시공간 철학은 리만, 헬름홀츠, 푸앵카레를 거쳐 아인슈타인에게로 이어진 시간과 공간의 물리적 사유 맥락 속에서 상대론적 시공간의 의미를 규명하고자 한 시도였다. 그 결과 라이헨바흐는

옛 스승인 플랑크와 아인슈타인의 지지를 받으며 1926년에 두 사람이 재직하고 있던 베를린 대학 물리학부의 물리 철학 교수로서 부임하게 된다.

라이헨바흐는 아인슈타인이 이론 물리학적 성취를 존중하면서도 철학자의 논리적 분석과 물리학자의 역사적 분석을 구분했다. 그는 물리학자가 물리적 직관을 발휘하여 본능적으로 이론을 개발하지만, 철학자는 ‘정당화의 맥락’에서 ‘합리적 재구성’을 통해 이 이론의 인식론적 의미를 물리학자보다 더 구체적이고 정확하게 밝힐 수 있다고 주장했다. 그렇기에 철학자의 분석 작업에 의해 얻어진 결론은 물리학자가 표명한 철학적 견해와 다를 수 있으며, 철학자는 물리학자의 철학적 견해를 더 정확하게 해명하거나 그 견해에 잘못된 점이 있을 때 이를 교정할 수 있다. 이처럼 라이헨바흐는 철학적 분석을 통해 과학자와 차별화되는 과학철학 고유의 지성적 작업 영역과 역할을 마련하려 했다.

특히 라이헨바흐는 『상대성 이론의 공리화』를 통해 상대론적 시간과 공간의 경험적인 의미를 자세하게 규명하고자 했다. 그는 상대론에서 핵심적인 역할을 하는 ‘일치’ 개념을 주관적 일치와 객관적 일치로 나누고, 객관적 일치는 ‘기초적 사실’이므로 수용할 수 있다고 보았다. 이때 ‘기초적 사실’은 감각을 직접 진술하지 않으며 이미 이론과 기초적인 원리들이 적재된 복잡한 경험적 진술이다. 다만 기초적 사실들은 정량적으로 정밀하지 않은 진술이기 때문에 모든 과학 이론들에 상대적으로 불변하는 기초의 역할을 할 수 있다.

상대론이 시간과 공간에 관해 주장하는 핵심은 특수하고 극한적인 상황에서 물질들의 계량적 행동이 빛 신호로 구성된 빛의 기하학(유클리드적인)을 따른다는 것이다. 중력장이 있는 경우에는 시간과 공간의 계량적 특성이 일의적으로 결정되지 않지만, 여전히 인과적인 빛 신호를 통해 수립되는 위상적인 시간과 공간의 질서는 물리적 사건들 사이에서 유지되며, 시간과 공간의 구체적인 기하학적 형태인 계량은 사전에 결정되지 않고 측정 도구에 의한 경험적인 측정을 통해 결정된다.

인간은 경험을 통해 계량적 관계뿐만 아니라 위상적 관계도 파악할 수 있다. 위상적 관계는 중력장이 있을 때도 시공간의 미소 영역을 넘어 유한한 영역에서 보편적으로 성립하므로, 일반 상대론에 이르더라도 여전히 우리는 시간과 공간의 객관적 특성을 경험적으로 파악할 수 있다. 이러한

라이헨바흐의 철학적 결론은 아인슈타인의 결론과 달랐다. 아인슈타인은 자신의 논문에서 시간과 공간에 남아 있던 물리적 객관성의 잔여물이 사라졌다고 주장했지만, 라이헨바흐는 자신의 철학적 분석을 근거로 여전히 경험을 통해 시간과 공간의 객관적인 물리적 구조를 파악할 수 있다고 주장했다. 이는 물리 이론에 대한 철학적 해석에 있어 철학자와 물리학자 사이의 의견 차이를 의미한다.²⁷⁵⁾

1916년의 일반 상대론 논문에서 시간과 공간의 경험적 객관성을 부정했던 아인슈타인은, 이후 라이헨바흐와 베를린 대학에 재직하던 1927년 경에 이르러 시간과 공간의 경험적 객관성에 관한 라이헨바흐의 철학적 입장을 수용했다. 예를 들어 그는 1927년에 쓴 “뉴턴의 역학이 이론 물리학의 발전에 끼친 영향”에서 다음과 같이 말한다. “이로써 공간과 시간은 그것들의 실재성을 박탈당한 것이 아니라 뉴턴이 그 당시 알려진 법칙을 구성하기 위해 공간과 시간에 부여하고자 했던 인과적 절대성-공간이 영향을 받지 않고 영향을 준다고 보는-을 박탈당한 것이다.”²⁷⁶⁾ 상대론의 창시자인 아인슈타인의 이러한 철학적 입장 수정은 논리경험주의 철학의 중요성취를 상징한다. 이는 ‘과학적 지식의 철학적 분석’이 과학과 차별화되는 철학 특유의 전문성을 가질 수 있음을 보인 것이었다.

1928년에 라이헨바흐는 자신이 발전시켰던 상대론적 시공간 이론의 공리체계를 토대로 당시까지 이루어진 시공간 철학 논의를 종합하는 저서 『시간과 공간의 철학』을 출판했다. 이후 이 책은 논리경험주의 시공간 철학을 대표하는 저서로 자리매김하게 된다. 이 책은 그의 이전 저작인 『공리화』에 비해 평이한 방식으로 시공간 철학의 여러 성과를 상세하게 해명하지만, 일반 상대론에서 다루는 가장 일반적인 계에서도 시간과 공간의 객관적 구조가 경험적으로 파악 가능하다는 그의 주장에는 변함이 없다. 본 장에서 보인 것처럼 ‘시공간의 인과적 이론’으로 귀결된 라이헨바흐의 시공간 철학은 헬름홀츠의 전통을 따르는 경험주의적 철학이었고, 그 점에서 그의 철학은 푸앵카레의 입장을 계승 및 발전시킨 카르납의 규약주의적 시공간 철학과는 차별화되는 것이었다. 두 사람의 시공간 철학이 지금까지의

275) 이는 뉴턴 물리학의 경험적 타당성을 받아들였던 칸트가 뉴턴이 제시했던 절대적 시간 공간 개념을 부정하고 시공간을 순수 직관의 형식이라 진단했던 것과 유사하다.

276) 아인슈타인, 홍수원·구자현 옮김 (2003), 310-311쪽 참조.

과학철학 논의에서 제대로 구분되지 않은 까닭은, 라이헨바흐 사후 논리 경험주의의 전반적인 입장이 카르납의 철학 중심으로 재구성되는 과정에서 라이헨바흐의 저술들이 부분적으로 해석²⁷⁷⁾되거나 제대로 분석되지 않았기 때문이다.²⁷⁸⁾

그러나 상대론적 시공간을 경험주의적으로 재구성한 이후에도 여전히 남는 문제가 있었다. 그것은 바로 빛 신호, 강체 막대, 자연 시계와 같은 기초 측정 물체의 이상적인 물리적 행태에 대한 가정과 관련된다. 왜 시간과 공간을 측정하는 물체들의 이상적인 행태가 기준계와 무관하게 일정하게 유지될까? 왜 일반 상대론에서처럼 변동하는 가속도가 존재하는 상황에서도 강체 막대는 그 단위 길이를 유지하고 자연 시계는 그 단위 시간을 유지할까? 우리는 상대론적 시공간의 기초 개념이자 이 이론에 경험적 내용을 제공하는 기초 측정 물체의 인식적 지위를 어떻게 평가해야 할까? 이는 아인슈타인 스스로가 상대론 직후부터 오랫동안 고민한 문제였다. 예를 들어 아인슈타인은 이렇게 말한다.

...엄밀히 말해서 자와 시계는, 이를테면 이론적으로 자기 충족적인 실재로서가 아니라, 기본 방정식(움직이는 원자들의 배열로 이루어진 대상)의 해로 표현되어야 할 것이다. 하지만 그 과정은 그 자체로 정당한 것이었다. 왜냐하면 자와 시계의 이론을 그러한 기반에 근거한 것으로 만들기 위해 그 이론의 가정들로부터 임의성이 없이 물리적 사건들에 대해 완전한 방정식을 도출해 낼 만큼 그 이론의 가정들이 그렇게 강력하지는 않다는 것이 맨 처음부터 분명했기 때문이다.²⁷⁹⁾

이후 이 문제는 1951년 무렵 ‘물리적 기하학의 경험적 결정 가능성 문제’로 정식화되어 라이헨바흐와 아인슈타인 사이의 철학적 논쟁을 일으켰다.

277) 라이헨바흐의 1928년 저작 『시간과 공간의 철학』에 대한 철학적 논의를 이 책의 1부를 중심으로 진행하는 것이 그 대표적인 사례이다.

278) 특히 과학철학자들은 지금까지 내가 본 논문에서 제시하는 것과 같은 수준으로 라이헨바흐의 1924년 저작 『상대성 이론의 공리화』에 대한 ‘경험주의적’ 관점에서의 상세한 분석을 제시하지 못했다.

279) 임경순 편저 (1997), 138쪽. 특히 지오바넬리의 논문은 기초 측정 물체의 행태와 인식적 위상에 대한 아인슈타인의 오랜 고민을 역사적 사료에 기초하여 잘 보여 주고 있다. Giovanelli, Marco. (2014)를 참조할 것.

과연 물리학에서 사용되는 측정 기준 물체인 빛, 막대, 시계는 동등화 정의 (coordinative definition)를 통해 비교적 명확한 경험적 내용을 얻어 그 결과 우리는 물리적 기하학을 경험적이고 객관적으로 결정할 수 있는 것일까? 아니면 측정 기준 물체의 정의에 이미 우리의 물리적 지식 전체가 상당히 반영되어 있어, 측정 물체를 통해 경험적 측정을 하더라도 그 결과는 임시적이고 잠정적이며 이후의 이론적 발전을 통해 변할 수 있을까? 이와 같은 ‘물리적 기하학의 경험적 결정 가능성’을 두고 벌어진 라이헨바흐와 아인슈타인 사이의 철학적 논쟁은 근래에 과학철학자들 사이에서 중요한 논의 주제가 되었으며, 따라서 나는 다음 장에서 이 주제를 중심으로 상대론적 시간과 공간의 경험적 의미에 대해 자세히 논하도록 하겠다.

제7장. 경험주의, 규약주의, 물리적 기하학의 경험적 결정 가능성²⁸⁰⁾

제1절. 서론

논리경험주의의 역사에서 1928년은 주목할 만한 해이다. 논리경험주의의 중심지였던 베를린과 비엔나에서 중요한 저서 두 권이 출간되었기 때문이다. 라이헨바흐는 1920년 이후 진행한 상대론적 시공간에 대한 철학적 분석 결과를 종합하여 『시간과 공간의 철학』²⁸¹⁾을 출간했고, 카르납은 1926년 비엔나 대학에 부임하며 제출했던 교수자격 취득논문 「물리적 개념 형성」을 토대로 『세계의 논리적 구조』²⁸²⁾를 출간했다. 이후 두 저서는 논리경험주의 과학철학의 두 전통을 형성한다. 하나는 구체적인 과학 이론 혹은 원리를 세부적으로 분석 및 명료화하는 전통이고, 다른 하나는 기호논리학을 주된 방법론으로 삼아 특정한 일반 주제(예를 들어 과학적 설명 혹은 확률 개념)를 논리적으로 분석 및 재구성하는 전통이다.

『시간과 공간의 철학』의 출간을 통해 라이헨바흐는 시공간의 철학적 논의에서 논리경험주의를 대표하는 학자로 자리매김했다. 19세기 전반에 가우스, 보여이, 로바첵스키에 의해 비유클리드 기하학이 개발된 후, 19세기 후반에 리만, 헬름홀츠, 푸앵카레에 의해 물리적 기하학에 대한 철학적 논의가 진행되었다. 20세기에 이르러 아인슈타인은 이 논의의 연장선상에서 상대론을 통해 시간과 공간 개념을 측정 도구로 물질화시켜 이에 관한 물리적 운동학(특수 상대론)과 동역학(일반 상대론)을 성공적으로 수립했다. 라이헨바흐는 19세기와 20세기 전반기를 통해 진행된 이상과 같은 시공간에 대한 철학적 논의를 자신의 책에서 종합했다고 볼 수 있다.

『시간과 공간의 철학』은 크게 두 가지의 특징을 갖는다. 먼저 19세기 이래로 여러 논자에 의해 진행된 시공간의 철학적 논의를 종합했다(1장, 2장). 다음으로 라이헨바흐 자신의 경험주의 시공간 철학을 좀 더 일반적이고 철학적인 방식으로 설명했다(3장).²⁸³⁾ 논리경험주의 시공간 철학을

280) 이번 장에서의 논의는 강형구 (2022c)에서의 논의를 근간으로 함을 밝힌다.

281) 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986). 이후 논의에서는 1986년 출판된 한글 번역본을 인용하겠다. 참고로 이 책의 초고는 1926년 무렵 거의 완성된 상황이었다.

282) Carnap (1928/1961) 참조.

283) 이와 대비하여 그의 1924년 저작 『상대성 이론의 공리화』는 비교적 수학적인

대표하는 이 책은 이후 과학철학 내의 시공간 철학 논의를 위한 기준점이 되었다. 그뤼엔바움(Gruenbaum), 새먼(Salmon), 반프라센(van Fraassen), 스클라(Sklar), 프리드먼(Friedman)과 같은 과학철학자들은 이 책을 전제로 삼고 이후 자신들의 시공간 철학 논의를 진행했다.

다른 한편, 이 책은 이후 등장한 논리경험주의의 비판자들에게 공격 대상이 되었다. 몇몇 학자들은 이 책이 물리적 기하학에 관한 규약주의를 대표하는 저작으로 평가한 후 이를 상대론에 대한 부적절한 철학적 해석이라는 이유로,²⁸⁴⁾ 다른 학자들은 이 책이 카르납의 철학과 함께 과학 이론에 대한 ‘공인된 견해(received view)’를 나타낸다고 비판했다.²⁸⁵⁾ 논리경험주의 철학의 몰락을 주장한 20세기 후반의 과학철학자들에게 『시간과 공간의 철학』은 일종의 오류이자 극복 대상으로 보였다. 하지만 사실상 이 책은 시공간의 철학에 대한 라이헨바흐의 가장 독창적인 저서가 아니었으며, 그의 독창적인 시공간 철학은 지금까지 과학철학 논의에서 빈번하게 논의된 이 책의 1장이 아니라 자신의 전문적 연구 결과(구성적 공리화의 결과)를 간략하게 요약하는 이 책의 3장에 수록되어 있다.

라이헨바흐 시공간 철학의 핵심은 일반적으로 알려진 것과 달리 물리적 기하학에 대한 ‘규약주의’가 아닌 ‘경험주의’였다. 무엇보다도 그는 경험주의의 관점에서 ‘경험적 명제들’을 공리로 삼아 상대론적 시간과 공간을 철학적 관점에서 재구성했으며, 일반 상대론에 이르러 물질적 대상들 사이의 계량 관계가 ‘구성적 원리’가 아닌 ‘연결 원리’로 바뀔 때 따라 시공간 계량이 기초 측정 도구들을 통해 경험적으로 결정됨을 보였다. 이와 더불어 라이헨바흐 시공간 철학의 핵심은 그 자신이 말한 바 있듯 ‘시공간의 인과적 이론’이었으며, 실제로 그는 인과적 질서를 대표하는 시간 질서가 공간 질서에 선행하며 공간 질서보다 더 근본적이라 주장했다.

후대의 과학철학자들이 라이헨바흐의 시공간 철학에 대해 비판하게 된 또 다른 중요한 원천은 아인슈타인이 말년에 쓴 짧은 글이다. 1951년 아인슈타인의 물리학과 철학을 주제로 한 논문집 『알베르트 아인슈타인 : 철학자-과학자』²⁸⁶⁾가 출판되었고, 이 책에 라이헨바흐의 논문 “상대성

성격이 강해 전문적임과 동시에 그 철학적 의의를 파악하기 쉽지 않았다.

284) 이를 대표하는 철학자로 프리드먼(Friedman, M.), 리크먼(Ryckman, T.), 하워드(Howard, D.)가 있으며, 비교적 최근에 활동하고 있는 철학자로 지오바넬리(Giovanelli, M.)가 있다.

285) 이를 대표하는 철학자로 수피(Suppe, F.)가 있다.

이론의 철학적 의의”가 수록되었다. 아인슈타인은 라이헨바흐의 이 논문에 대한 짧은 논평에서 처음에는 푸앵카레를, 나중에는 비실증주의자를 내세워 물리적 기하학에 대한 라이헨바흐의 경험주의적 입장을 비판하며 일종의 전체론적인 규약주의 관점을 제시했다. 이러한 아인슈타인의 비판적인 논평은 이후 하워드(Howard), 리크먼(Ryckman) 등 논리경험주의 시공간 철학의 비판자들에게 중요한 근거로 사용되었다.

상대론이 제시한 중요한 두 철학적 문제 중 하나는 시간과 공간 질서의 경험적 객관성 문제였고, 다른 하나는 강체 막대 및 자연 시계 등 측정 기준 물체가 이론에서 차지하는 인식적 위상 문제였다.²⁸⁷⁾ 앞선 논의에서 살펴보았듯, 첫째 문제와 관련한 철학적 해명은 라이헨바흐의 경험주의적 분석을 통해 비교적 명확하게 이루어졌다. 하지만 두 번째 문제 즉 측정 기준 물체의 위상에 관한 철학적 문제가 여전히 남아 있었다. 상대론은 수학적 시간과 공간 개념을 강체 막대, 자연 시계, 빛 신호와 같은 구체적인 물리적 물체(과정)를 통해 물리적으로 구현한 이론이다. 하지만 이 이론에 등장하는 측정 기준 물체의 이상적인 행태는 리만이 1854년에 제시했던 것과 달라지지 않았다. 여전히 측정 기준 물체의 길이 및 시간 단위는 시공간 속 위치와 독립적으로 변하지 않는 것(보편력 없음)으로 가정된다.

1921년 논문 “기하학과 경험”에서 경험주의와 규약주의 사이의 애매한 관점을 취했던 아인슈타인은 1951년에 이르러 경험주의적 시공간 이론을 제시한 라이헨바흐에게 대항하여 푸앵카레와 비실증주의자를 내세우며 전체론적 규약주의를 옹호했다. 특히 아인슈타인은 기초 측정 물체의 구조적 복잡성을 지적하며, 이러한 측정 물체의 물리적 행태는 설명 없이 전제되기보다 이론을 통해 설명되어야 한다는 ‘완전성’을 내세워 경험주의를 공격했다. 또한 그는 이미 기초 측정 물체의 정의 속에 상당한 이론적 지식이 반영되어 있으므로, ‘이론 적재된’ 측정 물체에 의해 이루어진 경험적 측정 결과는 결정적이지 않다고 주장했다. 이번 장에서 나는 물리적 기하학을 중심으로 이루어진 이와 같은 ‘라이헨바흐(경험주의)-아인슈타인(규약주의) 논쟁’을 자세히 살피고 그 철학적 의의를 따져볼 것이다.

286) Reichenbach (1951)에서의 논의 및 이 책의 후반부에 있는 아인슈타인의 논평 참조.

287) 아인슈타인이 활동하던 당시부터 ‘구성 이론(constructive theory)’과 ‘원리 이론(principle theory)’의 구분은 적지 않게 논의되었고, 특히 오늘날 과학철학자들 사이에서 두 종류의 이론 구분이 갖는 의의가 활발하게 논의되고 있다. 그러나 본 논문에서 나는 이 구분에 대해서는 상세히 다루지 않으려 한다.

제2절. ‘보편력 제거’ : 물리적 기하학 결정의 기본 전제

카르납은 『시간과 공간의 철학』 서문²⁸⁸⁾에서 아인슈타인이 물리학에 비유클리드 기하학을 사용함으로써 물리학 전체를 단순하게 만들었다고 했다. 우리는 계량 측정의 방법을 정한 후 물리적 기하학을 결정할 수 있지만, 물리적 기하학을 미리 전제한 후 이에 맞게 계량 측정과 관련한 보편적 힘을 도입할 수도 있다. 뒤이어 카르납은 라이헨바흐가 제시한 방법론적 원리인 ‘보편력 제거의 원리’가 갖는 중요성을 강조했다. 이는 우리가 모든 보편력을 사라지게 하는 형태의 이론을 채택해야 한다는 원리다.²⁸⁹⁾

상대론 속 물리적 기하학의 문제에 관한 카르납의 철학적 입장은 1921년 박사학위 논문 『공간』에서와 크게 달라지지 않았다. 5장에서 살펴본 바 있는 것처럼, 공간 개념에 대한 카르납의 분석은 푸앵카레의 규약주의를 계승했고 규약의 중요성과 역할에 대해 라이헨바흐의 경험주의와 대비되는 관점을 취했다. 하지만 라이헨바흐가 제시한 ‘보편력 제거의 원리’에 대한 카르납의 강조는 사뭇 합당해 보인다. 왜냐하면 이 원리를 측정 기준 물체의 행태를 정의하는 일종의 ‘방법론적 원리’로서 채택함으로써 물리적 기하학의 경험적 결정이 가능해지기 때문이다. 우리가 이 원리를 채택하는 이유는 강력하다. 만약 측정 기준 물체의 정의 속에 ‘보편력’의 개입을 허용하면 수용하기 어려운 이론적 미결정성과 복잡성이 발생하기 때문이다.

실제로 ‘보편력 제거의 원리’는 라이헨바흐 시공간 철학에서 핵심적인 위치를 차지한다. 우리가 물리적 세계의 특정 영역이 어떠한 기하학적 형태를 띠고 있는지 판단하기 위해서는 측정 도구의 행태에 대해, 특히 ‘합동(congruence)’이 언제 어떻게 성립하는지를 미리 약속해야 한다. 이 약속을 하지 않으면 세계의 기하학적 형태에 대한 측정 자체가 이루어질 수 없다. 하지만 우리는 철학적 관점에서 ‘보편력’의 존재에 관한 의심을 지울 수 없다. ‘보편력’(계량적metrical 힘)은 ‘미분력’(물리적physical 힘)과 구분되는 힘으로서, 모든 물체에 같은 방식으로 영향을 미치면서도 어떤

288) 1928년 독일어로 출판된 『시간과 공간의 철학』은 30년이 지난 1958년에 라이헨바흐의 아내 마리아에 의해 영어로 번역 출판되었고, 이때 영역판 서문은 라이헨바흐 사후 그의 UCLA 교수직을 이어받았던 카르납이 썼다.

289) 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986), 11-14쪽.

방식으로도 차폐시킬 수 없기 때문이다.²⁹⁰⁾

이러한 ‘물리적 기하학의 상대성’ 문제는 이러한 보편력과 관련하여 발생한다. 세계의 기하학적 형태는 합동의 정의에 의존한다. 그런데 만약 강체 막대를 이용하여 합동의 정의를 했을 때 이 정의를 바탕으로 실험하여 귀결되는 물리적 기하학이 비유클리드적이라고 하더라도, 우리는 강체 막대에 체계적으로 작용하는 특정한 보편력을 추가로 가정함으로써 물리적 기하학을 유클리드적인 것으로 유지할 수 있다. 이와 같은 상황을 다음과 같이 기술할 수 있다. G와 G’를 물리적 기하학, P와 P’를 물리 법칙들의 총체라 하자. 푸앵카레의 주장처럼 G 또는 G’는 결코 직접 경험에 직면하지 않으며, 오직 물리 법칙들과 결합한 G+P 또는 G’+P’만이 경험에 직면한다. 그런데 G+P와 G’+P’는 물리 세계를 기술하는 것에서 경험적으로 동등하며, 그런 의미에서 물리적 기하학의 상대성은 피할 수 없다. 우리는 G와 G’ 모두 선택할 수 있다.

푸앵카레는 G(유클리드 기하학)가 G’에 비해 수학적으로 단순할 경우 우리가 G(유클리드 기하학)를 유지할 것이라 주장했다. 하지만 라이헨바흐가 보기에 푸앵카레가 생각하지 못했던 것은 보편력 F이다. 위에서 제시한 공식화보다 더 정확한 문제 상황의 공식화는 $G+P=G'+P'$ 가 아니라 $G+P+F=G'+P'$ 이다. 하나의 기술에서는 보편력이 요구되지만 다른 기술에서는 보편력이 0이 되고, 이때 분명 보편력이 없는 기술이 좀 더 단순하다. 예를 들어 보편력을 전제하면 우리는 지구의 형태가 정육면체 또는 다른 임의적 공간 형태라고 주장할 수 있다. 이렇듯 보편력은 지구의 형태를 기술하는 물리적 기하학을 유일하게 결정하지 못하게 만든다.²⁹¹⁾

라이헨바흐는 더 나아가, 만약 $G+P+F$ 가 아니라 $G+P+F+A$ 가 되면 이는 우리에게 물리적 기하학으로서 G가 아니라 G’를 선택하게 만드는 더 좋은 근거를 제공함을 보인다. A는 ‘인과적 변칙성(causal anomaly)’으로서, 만약 G를 수용하면 우리는 보편력을 받아들여야 할 뿐만 아니라 물리학의 주요 원리인 ‘인과성 원리’를 위배하는 것마저 수용해야 한다. 그러므로 우리는 $G+P+F+A$ 대신 G’+P’를 받아들인다. 이상과 같은 논의는 푸앵카레의

290) 이러한 힘에 관한 논의는 이미 헬름홀츠와 푸앵카레의 저술에서 찾을 수 있다.

291) 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986), 58쪽. 라이헨바흐의 이 논의는 카르납의 박사학위 논문(1921년)을 참조한 것으로 보인다. 그러나 라이헨바흐가 카르납과 다른 점은 물리적 기하학으로서 유클리드 기하학을 유지할 때 일종의 미결정성이 발생하며 이를 피하는 선택이 더 바람직하다고 판단한다는 점에 있다.

규약주의에 대한 경험주의적 논박이다.²⁹²⁾ 푸앵카레는 $G+P$ 와 $G'+P'$ 가 서로 동등할 경우 둘 사이의 선택이 수학적 단순성에 근거하여 이루어지며, 결과적으로 $G+P$ 가 선택된다고 주장했다. 이에 반해 라이헨바흐는 $G+P+F+A$ 와 $G'+P'$ 는 경험적으로 서로 동등하지만 이론적 단순성에 있어 $G'+P'$ 를 선호할 좋은 근거가 있음을 주장했다. 우리는 수학적 단순성보다는 ‘보편력’과 ‘인과적 변칙성’을 제거하여 이론의 ‘물리적 단순성’을 높이는 물리적 기하학을 채택한다.

공간의 문제만큼이나 중요하게 다루어야 하는 것이 시간의 문제다. 우리가 경험적으로 시간을 측정하고자 할 때는 공간에서와 마찬가지로의 문제에 직면한다. 우리는 언제 특정한 시간 간격을 서로 같다고 판단할 것인지(시간 간격의 합동)에 대한 특정한 약속 혹은 정의를 전제해야만 시간 간격을 측정할 수 있다. 즉, “계기적인 시간 간격의 동일성은 지식의 문제가 아니라 정의의 문제이다.”²⁹³⁾ 강체 막대의 개념을 보편력을 제거하는 방식으로 정의한 것처럼, 라이헨바흐는 자연 시계 또는 주기적 계의 개념 역시 보편력을 제거하는 방식으로 정의한다.²⁹⁴⁾

이상과 같이 살펴보았듯 ‘보편력 제거의 원리’는 시간과 공간을 강체 막대 및 자연 시계라는 구체적인 물질적 과정에 구현하는 데 있어 핵심적인 역할을 차지한다. 아인슈타인 자신은 이 원리를 표명하고 철학적으로 논의한 바 없이 이를 일종의 자연스러운 가정으로서 전제했다. 이후 이 원리의 중요성은 논리경험주의의 철학적 분석, 특히 라이헨바흐의 분석을 통해 명시적으로 드러났다. 앞서 ‘보편적 제거의 원리’가 방법론적 원리로서 갖는 장점은 살펴보았으므로, 이제 나는 이 원리가 인식론적 측면에서 왜 중요한지를 더 자세하게 설명하고자 한다.

‘보편력 제거의 원리’는 길이 단위와 시간 단위 모두에 적용된다. 기준계 A의 관측자 a의 경우, 자신의 측정 기준 물체(강체 막대, 자연 시계)가

292) 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986), 94쪽. 혹자는 왜 ‘보편력 제거’ 및 ‘인과적 변칙성 제거’에 근거한 비유클리드 기하학의 배제가 규약주의에 대한 ‘경험주의적 논박’인지 물을 수 있을 것이다. 이에 대해 나는, 보편력 제거 및 인과적 변칙성 제거 모두 물리적 세계에 대한 우리의 ‘경험’에 기초한 방법론적 원리이며 이에 대한 대안적인 원리가 없기 때문이라고 답할 것이다.

293) 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986), 147쪽.

294) 그러나 라이헨바흐는 일종의 보편력이라 불 중력장이 세계 속에 언제 어디서나 존재하기 때문에, 강체 막대와 마찬가지로 자연 시계의 개념 역시 일종의 ‘근사 (approximation)’에 지나지 않음을 인정한다.

공간 속 어디에 있든지 그 단위를 일정하게 유지할 것이라 가정한다. 만약 관측자 a가 길이 단위가 되는 강체 막대 1과 강체 막대 2를 근방에서 비교한 뒤 그 길이가 같다고 확인했다면, 관측자 a의 입장에서는 두 막대를 서로 떼어 놓았을 때 자신이 가지고 있는 막대와 떨어진 다른 막대의 길이가 같은지의 여부를 직접적으로 알 수 있는 길이 없다. 다만 관측자 a가 막대 1을 갖고 있고 막대 2는 관측자 a로부터 떨어져 있을 때, 막대 2가 있는 곳에 관측자 a와 동등한 입장을 가진 관측자 b가 있다고 가정하면, 관측자 b 역시 단위 길이를 관측자 a와 같다고 판단하는 것이 ‘상대성 원리’에 부합한다. 비슷한 논의가 시간 단위에도 적용된다. ‘보편력 제거의 원리’에 따르면 자연 시계의 단위는 그 시계가 시공간 다양체 속 그 어떤 곳에 있던 해당 기준계의 관측자에게 일정하다고 보아야 한다.

이상과 같은 보편력 제거의 원리가 실질적으로 ‘측정 물체의 단위 독립성’이라는 리만의 가설과 그 내용이 같음을 주목할 필요가 있다. 실제로 ‘보편력 제거의 원리’는 리만의 수학적 가설을 물리적으로 구체화한 것이며 충분한 인식론적인 근거를 갖는다. 그런데 이 원리는 두 가지 문제를 제시한다. 첫째, 과연 이 원리가 성공적으로 적용된 측정 기준 물체의 물리적 구현물을 경험적으로 찾을 수 있을까? 둘째, 이 원리는 ‘보편력’과 대비되는 ‘미분력’²⁹⁵⁾을 구분하고, 물리적 지식에 기반하여 ‘미분력’을 최대한 제거한 이후 비로소 ‘보편력’을 정의를 통해 제거한다. 그렇다면 ‘보편력’ 제거 이전의 ‘미분력’ 제거 문제는 말끔하게 잘 해결된 문제인가?

첫째 문제의 경우, 세계에 대한 우리의 광범위한 경험은 앞서 제시된 우리의 인식적 고찰을 위배하지 않는 것처럼 보인다. 예를 들어 특정한 결정 물체(석염) 내의 분자 사이 거리는 그 물체의 시공간적 위치와 독립적으로 유지되며, 특정 원소의 스펙트럼 진동수 역시 그 원소의 시공간적 위치(혹은 과거 이력)와 독립적으로 일정한 진동수를 보인다. 이는 우리가 사는 물리적 세계 속에서 이상적인 측정 기준 물체(강체 막대, 자연 시계)라고 여겨질 수 있는 물리적 현상들이 실질적으로 존재하고 우리는 이러한 존재를 경험적으로 확인할 수 있음을 뜻한다.

둘째 문제의 경우에는 좀 더 조심스러운 분석을 할 필요가 있다. 우선 우리는 자연 속에서 이상적인 측정 기준 물체로서 기능하는 것처럼 보이는

295) 미분력(differential force)은 물체의 종류 혹은 성질에 따라 물체들 사이에 차별적인 방식으로 작용하는 힘이다. 이론적 지식과 경험적 실험을 통해 파악할 수 있다.

물체들을 찾을 수 있다. 이들이 측정 기준 물체로서 제대로 기능하는지는 우리의 다양한 경험적 측정을 통해서 직접 확인할 수 있다. 또한 우리는 이 물체들이 제대로 기능하지 못하고 상황에 따라 변하는지 확인할 수 있는데, 이러한 확인을 위해 굳이 복잡한 이론적 지식이 필요하지는 않다는 점이 중요하다. 우리의 용어를 사용하면 측정 물체에 일종의 ‘미분력’이 작용한 것인데, 이러한 ‘미분력’을 제거하기 위해 복잡한 이론적 지식의 사용이 필수적인 것은 아니다. 예를 들어 우리는 경험을 통해 특정 물체가 어떤 행태를 보이는지 확인할 수 있으므로, A 물체 대신 이보다 더 안정적인 B 물체를 측정 기준 물체로서 대체할 수 있다.

다행히 우리가 사는 자연 세계는 ‘미분력’ 제거의 문제를 복잡하게 하지 않는 것처럼 보인다. 우리가 일상적으로 사용하는 고체 물체나 주기적으로 운동하는 물체는 이상적인 측정 기준 물체에 충분히 근사하는 행태를 보이며, 실제로 과학이 발전하면서 우리는 분자 결정 사이의 거리 혹은 분자 스펙트럼의 진동수와 같은 더 좋은 측정 단위 물체(과정)를 발견할 수 있었기 때문이다. 그리고 이러한 측정 단위 물체의 새로운 발견 및 평가는 상세하고 완결된 이론적 지식을 요구하지 않는다. 만약 우리가 정밀한 측정 도구와 측정 방법을 갖고 있다면, 특정한 물체가 길이 혹은 시간 단위 기준 물체로 적합한지는 복잡한 이론적 지식에 과도하게 의존하지 않으면서도 비교적 정확하게 판단할 수 있다.

‘보편력 제거의 원리’는 물리적 기하학을 결정하기 위한 기본 전제이지만, 이 원리가 물리적 기하학을 ‘경험적으로 결정하는’ 것은 아니다. 오히려 이 원리는 물리적 기하학에 ‘제거할 수 없는 규약적 요소’가 일정 부분 포함되어 있음을 보여준다. 우리가 이 원리를 전제한다고 해도 물리적 기하학이 모든 경우에서 일정하거나 시간과 공간상의 위치에 따라 혹은 다른 요소들에 의존해 변화할 가능성은 여전히 열려 있다. 실제로 우리는 특수 상대론에서 시공간의 물리적 기하학을 유클리드적인 것으로 일정하게 유지할 수 있다. 이와 같은 결정이 ‘규약적’일 수 있는 이유는 이미 우리가 기초 측정 물체의 정의에서 ‘보편력 제거의 원리’를 전제하고 있기 때문이다. 특수 상대론의 상황에서 측정 기준 물체가 보이는 행태는 유클리드 기하학에 모순되지 않으며 ‘불변’한다. 그런데 ‘물리적 기하학의 경험적 결정 문제’는 일반 상대론의 상황에 이르러 더 중요해진다.

제3절. 일반 상대론 속 물리적 기하학의 경험적 결정 문제

일반 공변성 추구를 통해 물리학 속 시간과 공간 좌표가 직접적인 측정의 의미를 잃어버리고, 시간과 공간에 남아 있던 물리적 객관성이 사라졌다는 아인슈타인의 주장은 추가적인 분석과 명료화를 요구한 주장이었다. 라이헨바흐가 1924년에 『상대성 이론의 공리화』에서 제시한 구성적 공리체계는 이러한 추가적인 분석과 명료화의 결과였다. 실제로 그는 특수한 중력장에서부터 단계적으로 더 일반적인 중력장으로 이행하며, 각각의 단계에 따라 강체 막대와 자연 시계의 기하학이 어떻게 좌표의 기하학과 달라지는지를 자세하게 분석했다. 라이헨바흐의 1928년 저작 『시간과 공간의 철학』의 진정한 핵심은 이 책의 1, 2부가 아닌, 1924년에 그가 제시한 상대론적 시공간의 합리적 재구성 결과를 요약하고 있는 이 책 3부에서의 논의이다.

가속하는 계에서의 모든 관성 현상은 중력 현상으로 설명될 수 있고, 이 경우 해당하는 가속계를 정적(static) 또는 정상 상태(stationary)의 장 아래에 놓여 있는 것으로 간주할 수 있다. 이때 이러한 관성 현상을 중력 현상으로 설명할 수 있게 하는 기준계는 지역적 관성계이다. 즉, “뉴턴에 의하면 천문학적 관성계들이 모든 현상을 위한 정상적인 계의 균을 형성하는데 반해 아인슈타인은 정상적 계의 균을 형성하는 것은 지역적 관성계들이라고 주장한다... 지역적 관성계는 모든 다른 현상에 대한 실제적인 관성계다.”²⁹⁶⁾ 지역적 관성계는 일정한 중력장 아래에서 자유 운동하는 계다. 이와 같은 지역적 관성계 안에서는 특수 상대론에서 성립했던 빛 공리와 물질 공리가 적용된다.²⁹⁷⁾

지역적 관성계에서는 시공간 계량이 유클리드 기하학을 만족하지만, 중력장이 작용하는 기준계에서는 그렇지 않다. 일반적 리만 공간에서 평면의 선 요소(line element)는 $ds^2 = g_{\mu\nu}dx_\mu dx_\nu$ 이며, 이때 좌표들은 ‘번호 매김’의 ‘위상적 기능’을 담당하지만 ‘길이 측정’의 ‘계량적 기능’은 좌표가 아니라 계량 계수 $g_{\mu\nu}$ 가 담당한다. 여기서 중요한 것은 여전히 중력장에서도 강체 막대, 자연 시계, 빛에 의해 합동의 정의가 주어지며, 측정 도구에 의한 실험을 통해 모든 점의 $g_{\mu\nu}$ 가 결정된다는 것이다.²⁹⁸⁾ 이와 같은 일반 상대론

296) 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986), 265쪽.

297) 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986), 267쪽.

298) 아인슈타인의 중력장 방정식은 특정한 질량-에너지가 주어졌을 때 그것이 계량에

에서의 계량 결정은 “우리가 시계, 측정 막대, 빛에 기반을 둔 동등화 정의를 통해 계량을 구성했던 특수 상대성 이론에서 사용된 것과 똑같은 방법이다.”²⁹⁹⁾ 이때 주목해야 하는 것은 강체 막대, 자연 시계, 빛의 관성 운동 등 기초 측정 물체(과정)에 관한 정의에 ‘보편력 제거의 원리’가 적용되어 있다는 점이다.

가장 안정된 장인 정적(static) 중력장에서는 물리적 기하학이 유클리드적 특성을 띠는 공리(공리 V)가 성립하지 않는다. 정적 중력장에서는 “모든 곳에서 직접적으로 시간 측정에 대응하는 시간 좌표를 중력장 내에서 정의하는 것이 불가능”³⁰⁰⁾하지만, 측정 기구는 여전히 길이의 측정을 제공한다. 이보다 좀 더 일반적인 상황인 정상 상태(stationary)의 중력장(회전 원판)에서는 순환 이동 공리(공리 IV,2)가 적용되지 않으며, 이제는 공간적 합동성 또한 강체 막대로 정의되지 않는다. 한 장소에서 비교될 때 길이가 같은 막대는 분리되었을 때 그 길이가 같지 않다.

여기서 중요한 것은 이와 같은 서술이 앞서 ‘보편력 제거의 원리’에 관해 서술한 바와 모순되지 않는다는 것이다. 아인슈타인의 ‘회전 원판 사고 실험’에서 살펴본 것처럼, 분리된 막대와 함께 움직이는 관측자는 막대의 단위 길이가 일정하다고 간주한다. 오직 정지한 관측자의 관점에서 볼 때 3차원 공간에서 막대가 이동하면서 그 길이 단위가 변경되는 것으로 판단할 뿐이다. 정지한 관측자는 이러한 변경을 보편력 또는 계량적 힘에 의한 것으로 해석하지만, 이와 대비되는 4차원 시공간 다양체에서는 보편력이 제거된다.³⁰¹⁾ 왜냐하면 ‘일반 공변성 원리’가 이와 같은 보편력의 제거를 요구하기 때문이다. 이는 곧 회전하는 관측자의 관점에서 막대의 단위 길이는 여전히 일정하고 대신 그는 오직 시공간의 곡률이 달라질 뿐이라고 판단함을 의미한다. 이와 관련하여 라이헨바흐는 다음과 같이 말한다.

미치는 영향을 기술하는 방정식이며 실제로 $g_{\mu\nu}$ 의 값을 우리에게 제공한다. 그러나 구체적인 시공간 영역에서 그 값의 타당성 여부는 측정 도구를 사용한 실험을 통해 확인해야 한다. 그런 의미에서 여전히 일반 상대성 이론의 시공간 계량은 경험적으로 측정된다고 볼 수 있다.

299) 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986), 289쪽.

300) 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986), 299쪽.

301) 이는 ‘일반 공변성(general covariance)’ 조건에 따른 필연적인 결과이다. 또한 측정 도구에 체계적인 보편력이 작용한다고 판단하는 것은 오직 국소적 관성계의 관측자이다. 정상 상태의 중력장 아래에서의 관측자는 자신의 관측 도구에 문제가 없다고 판단할 것이다.

...공간의 측정은 동일하게 직관적이다. 측정은 연속적으로 놓인 강체 막대들에 의해서 이루어진다. 반경에 의존하는 교정 요소가 수직 방향의 막대에 주어져야만 한다. 이때의 교정은 계량적 힘(18절)의 특성들을 갖는 힘 효과에 대한 보상으로 해석될 수 있다. 우리가 이 교정을 0과 같다고 설정하지 않는 이유는-그렇게 하는 것이 가능하더라도- 4차원적 ds^2 에 대한 계량적 힘을 0으로 설정하는 것을 선호하기 때문이다. 이 경우 명백하게 계량적 힘들 중 오직 하나만이, 3차원 강체 막대의 계량적 힘이나 4차원적 시공간 간격의 계량적 힘 중 오직 하나만이 0으로 정의될 수 있다.³⁰²⁾

지역적 관성계에서 볼 때 가장 일반적인 중력장에서는 강함(rigidity)의 개념이 그 의미를 잃고 이제 더 이상 강체의 기하학은 존재하지 않게 된다. 이때도 빛 속도가 신호 속도의 상한임은 분명하나, 이제는 빛의 속도 값이 시공간 내의 점에 따라 달라진다. 왜냐하면 각각의 시공간 점에서 시간 및 물질-에너지의 변화에 따라 계량인 $g_{\mu\nu}$ 가 계속 달라지기 때문이다. 이러한 변화하는 중력장 아래에서는 강체의 기하학뿐만 아니라 빛 기하학 또한 존재하지 않는다. 여기서 ‘기하학이 존재하지 않음’이란, 모든 기준계에 공통으로 적용되는 기하학 즉 ‘구성 원리로서의 기하학’이 존재하지 않음을 뜻한다. 하지만 여전히 시공간의 개별적인 점들에는 계량의 값이 측정 기준 물체들의 물리적 행태에 의해 구체적으로 할당된다. 다만 이 값이 위치와 시간에 따라서 계속 변화할 따름이다.

그렇다면 과연 계량은 측정 기준 물체들에 의해 구체적으로 어떻게 결정되는가? 이러한 결정 과정에 대해 라이헨바흐는 아래와 같이 말한다.

...합동성의 동등화(좌표적) 정의는 다시 특수 상대성 이론에서처럼 시계, 막대, 빛에 의해 주어진다. 이 측정 기구들에 의해 실험된 간격 ds^2 은 단위로서 정의될 것이며 좌표계가 선택된 다음에는 그에 대응하는 $g_{\mu\nu}$ 가 계산된다. 그래서 우리는 미분적인 단위 길이들로 된 조직망을 구성한다. 시계는 $ds^2 = -1$ 을, 측정 막대는 $ds^2 = +1$ 을 그리고 빛은 $ds^2 = 0$ 을 제공한다. 우리는 실험을 통해서 모든 점에서 $g_{\mu\nu}$ 의 계수를 발견한다. 이 수에 의해 좌표 미분 계수는 간격이 1이 되도록 곱해져야 한다. $g_{\mu\nu}$ 의 수는 다시 함수로 결합된다.³⁰³⁾

302) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 312쪽.

303) 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986), 289쪽.

관측자는 자신의 기준계에서 빛 신호, 자연 시계, 강제 막대를 이용한 일련의 실험 절차를 진행함으로써 문제가 되는 텐서 $g_{\mu\nu}$ 의 계량 계수 16개를 모두 결정할 수 있다.³⁰⁴⁾

이처럼 중력이 포함된 일반 상대론에서는 특수 상대론에서와 달리 물질적 사물들이 항상 유클리드 기하학을 따른다고 말할 수 없고, 계량 관계는 고정된 것이 아니라 변화한다. 그러한 의미에서 물리적 기하학은 ‘경험적’이라 할 수 있다. 이제 특정한 시공간 영역의 기하학적 형태가 어떠한지 확인하기 위해서는 측정 막대, 자연 시계와 같은 계량적 도구(측정 도구)를 이용하여 실제로 시공간의 기하학적 형태를 측정해야 한다. 시공간의 기하학적 형태는 시간 및 물질 분포에 따라 달라진다. 아인슈타인의 중력장 방정식은 특정한 시공간 영역의 기하학적 형태를 물질과 에너지에 기초하여 ‘예측’하는 방정식이다. 아인슈타인의 방정식이 시공간 계량을 예측하더라도, 그 진위를 확인하기 위해서는 측정 도구를 통한 경험적 측정이 필요하다.

이상의 논의를 통해, 어떤 의미에서 일반 상대론 속 물리적 기하학이 진정 ‘경험적’인 것인지 명백하게 드러났다. 아인슈타인은 ‘보편력 제거의 원리’를 전제한 측정 기준 물체들(막대, 시계)의 물리적 행태를 사유함으로써 일반 공변성의 구현이라는 개념을 떠올렸으며, 물리적 기하학의 변화 가능성 및 이러한 변화 정도에 관한 경험적 결정은 측정 기준 물체들의 행태에 대한 실험적 확인을 통해서 비로소 완결된다. 아인슈타인의 중력장 방정식은 시공간의 물리적 기하학을 표상하는 계량 계수를 결정하는데, 이 방정식은 마치 뉴턴이 기존의 천문학적 관측 자료들을 잘 설명하는 자신의 중력 방정식을 추측한 것과도 같은 일종의 ‘추측’이었다. 아인슈타인의 중력장 방정식은 시공간에 놓인 물질과 에너지의 양에 따라 시공간의 계량이 달라짐을 예측하며, 이러한 예측이 옳은지 그른지는 측정 도구들을 통한 실험에 따라 확인해야 했다. 만약 이처럼 물리적 기하학이 측정 도구들을 통해 경험적으로 결정되는 것이 아니었다면, 1919년의 일식 관측은 결코 중력장 방정식의 이론적 예측을 경험적으로 입증할 수 없었을 것이다.

304) 이러한 결정 과정에 대한 자세한 논의로 이 열 (2003)의 47절(169-174쪽) 참조.

제4절. 상대론적 시공간의 경험주의적 재구성에 대한 비판 검토

이상과 같이 살펴본 것처럼 라이헨바흐의 시공간 철학은 상대론적 시간과 공간을 경험주의의 관점에서 체계적으로 재구성한 것이었다. 그의 재구성에서는 경험적 명제들이 공리로 사용되며, 이 명제들은 상대론적 시간과 공간의 실질적인 경험적 내용을 보장한다. ‘인과성 원리’, ‘상대성 원리’와 같은 인식론적 원리들은 공리 내의 사실 속에서 혹은 임의로 덧붙는 정의의 설정에서 기본 전제로서 기능한다. 또한 정의는 임의적이지만 ‘유일성’, ‘단순성’과 같은 특정한 조건들에 의해 강하게 제약된다.

공리와 정의에 기초하여 구성된 상대론적 시공간 공리체계의 주된 주장은 물질적 사물 없이 빛 신호만으로 특수 상대론의 시공간 질서를 구성할 수 있다는 것, 물질적 사물들은 빛 신호로 구성된 빛 기하학을 따르도록 조절된다는 것이었다. 일반 상대론에 이르면 무한소 시공간 영역에서 여전히 특수 상대론의 공리들이 적용되나, 중력장이 일반적일수록 기준계에서 적용되는 시공간 공리들의 수는 순차적으로 줄어든다. 하지만 가장 일반적인 장에서도 시간 순서의 위상적 공리들은 유효하다. 이는 일반 상대론에서 여전히 시간과 공간이 경험적 객관성을 갖는다고 말할 수 있는 근거가 된다.

이처럼 라이헨바흐는 상대론적 시간과 공간의 기초가 되는 경험적 명제들이 무엇인지, 이와 더불어 상대론이 사용하는 임의적 정의들이 무엇인지 구체화했다. 그 결과 그는 고전 물리학과 특수 상대론 사이의 본질적인 차이는 ‘물리적 신호 속도의 상한 여부’라는 경험적 사실이며, 그렇기에 둘 중 어떤 이론이 옳은지는 경험 또는 실험을 통해 식별할 수 있다는 결론을 내렸다. 또한 라이헨바흐는 일반 상대론에 이르러 물리적 좌표가 직접적인 측정의 의미를 잃는다는 아인슈타인의 주장³⁰⁵⁾이 갖는 의미를 상세히 밝혔다. 중력장의 유형을 ‘정적 장’, ‘정상 상태의 장’, ‘실질계’, ‘가장 일반적으로 허용이 가능한 계’로 나누고, 각각의 경우에서 시간과 공간 계량이 측정 도구들 및 좌표와 갖는 관계를 구체적으로 규명했기 때문이다. 라이헨바흐의 주된 목적은 이와 같은 인식론적 분석을 통해, 여전히 상대론 속에서도 시간과

305) 이에 관한 아인슈타인의 언급으로 그의 “나의 비망록”에서의 언급을 참조할 것. 임경순 편저 (1997), 『100년만에 다시 찾는 아인슈타인』 (사이언스북스), 142쪽.

공간의 객관적 구조가 경험적으로 파악 가능하다고 할 때 그 객관성의 의미가 무엇인지를 밝히려는 것이었다.

마르틴 캐리에르(Martin Carrier)³⁰⁶⁾는 이와 같은 라이헨바흐의 경험주의적 시공간 철학과 관련하여 비교적 심도 있는 철학적 논의를 전개했다. 특히 캐리에르는 물리적 기하학의 ‘구성’을 ‘완성’과 비교하며, 물리적 기하학의 완성이 구성과 비교할 때 더 합당한 방법론임을 주장했다.³⁰⁷⁾ 캐리에르가 볼 때 라이헨바흐는 경험할 수 있는 기초적인 사실들을 공리들로 삼아 물리적 기하학을 ‘구성’하고자 했던 반면, 아인슈타인은 이러한 구성의 방법을 넘어 물리적 기하학의 기초가 되는 계량 물체들의 행태를 이론을 통해 추가로 ‘설명’하고자 했다. 캐리에르에 따르면 공리가 되는 경험적 명제들의 내용을 명백한 사실로 이의 없이 받아들이는 것이 아니라 이론을 통해 이 명제들을 추가로 ‘설명’하는 것이 물리 이론을 좀 더 완전하게 한다.

우선 지적해야 하는 것은 물리적 기하학의 ‘구성’과 ‘완성’이 캐리에르가 제시하는 것처럼 두 개의 선택지 중 하나를 선택해야 하는 상황을 만들지는 않는다는 것이다. 철학적 관점에서 보면 물리적 기하학의 ‘구성’은 필수적인 작업이다. 이와 대조적으로 물리적 기하학의 ‘완성’은 이루어지면 좋긴 하지만 필수적인 작업은 아니다. 물리적 기하학의 ‘구성’이 필수적인 까닭은, 이를 통해 물리학에서의 시간과 공간이 갖는 실질적인 경험적 내용이 무엇인지를 공리들을 통해 구체적으로 드러낼 수 있기 때문이다. 물론 더 나아가 물리적 기하학의 ‘완성’을 이룬다면, 즉 이론을 통해 빛 신호, 강체 막대, 자연 시계와 같은 계량적 사물들이 왜 공리들 속에서도와 같은 경험적 행태를 보이는지를 추가로 설명한다면 이는 바람직할 것이다. 하지만 물리적 기하학을 이루는 공리들의 경험적 참됨 여부는 물리적 기하학이 ‘완성’되지 않은 상황에서도 객관적으로 평가할 수 있다. 예를 들어 우리는 강체 막대, 자연 시계, 빛 신호가 세계 속에서 보이는 행태를 현상적 수준에서 기술할 수 있으며, 그러한 기술의 경험적 참 또는 거짓 또한 객관적으로 판단할 수 있다.

또한 캐리에르가 간과하고 있는 것은, 라이헨바흐가 의도적으로 구성적

306) 캐리에르는 아인슈타인 논문집 편집 출간에도 중요한 역할을 한 바 있는 저명한 아인슈타인 연구자이다.

307) Carrier (1990), “Constructing or Completing Physical Geometry? On the relation between theory and evidence in accounts of space-time structure” 참조.

공리체계 속의 공리들을 상대론을 전제하지 않는 경험적 명제들(기초적 사실들)로 구성했다는 사실이다. 즉, 라이헨바흐는 상대론 속 시공간 이론의 공리들을 비상대론적 경험 진술들로 구성함으로써 순환성의 오류를 피하고자 했다. 라이헨바흐가 물리적 기하학의 ‘완성’을 거부한 것은 아니다. 그는 계량 물체의 행태를 설명하는 미시 세계의 이론이 제시되면 그러한 ‘완성’이 이루어질 수 있으리라고 보았다.³⁰⁸⁾ 다만 그는 특정한 이론에 경험적 내용을 제공하는 공리들을 분석 대상이 되는 이론을 전제하여 서술하는 것에 반대했다. 아인슈타인은 통일장 이론 프로그램의 관점에서 좀 더 일반적인 장방정식이 장이론 속 계량 물체들의 행태 또한 설명할 수 있어야 한다고 요구했던 반면, 라이헨바흐는 이와 달리 미시 세계를 기술하는 별도의 이론이 계량 물체들의 행태를 설명하는 것이 바람직하다고 보았다.

캐리에르는 물리적 기하학을 ‘완성’하는 것이 물리적 기하학의 규약성 문제를 해결할 수 있다고 본다.³⁰⁹⁾ 그에 따르면 라이헨바흐와 같이 보편력(계량적 힘)을 ‘정의’를 통해 제거하는 방법은 물리적 기하학의 규약성 문제를 제대로 해결한 것이 아니라 임시방편적인 처방을 내린 것에 불과하며, 이론을 통해 계량 물체들의 행태를 설명함으로써 비로소 규약성 문제는 해결될 수 있다. 그러나 캐리에르의 주장과 달리 계량 물체와 관련된 보편력은 ‘정의’와는 다른 방법으로는 제거될 수 없다. 더 정확하게 말하면, 설혹 캐리에르가 주장하는 것처럼 물리적 기하학의 ‘완성’이 계량 물체의 행태를 ‘설명’할 수 있다고 하더라도, 그러한 ‘설명’은 보편력을 제거한 형태의 계량 물체 정의에 기반해야 한다. 그렇기에 정의에 의한 보편력 제거의 방법은 가능한 우리가 사용할 수 있는 유일한 논리적 방법이다.³¹⁰⁾

일반적으로 라이헨바흐는 ‘물리적 기하학에 관한 규약주의’를 대표하는 것으로 알려져 있다. 우리는 물리적 시공간의 기하학적 형태를 강제 막대,

308) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 166쪽 참조. 또한 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986)의 328쪽을 참조할 것.

309) Carrier (1990), pp. 386-393.

310) 이러한 의미에서 그 어떤 종류의 과학적 지식도 그 안에 제거할 수 없는 일종의 ‘규약성’을 가진다. 그러나 이러한 의미의 규약을 수용하는 관점이 ‘규약주의’인 것은 아니다. 왜냐하면 이와 대조적으로 ‘규약주의’는 과학적 지식 구성 과정에서 당면하는 둘 이상의 선택지 가운데에서 우리가 내리는 선택이 기본적으로 ‘자유로움’을 주장하는 철학적 관점이기 때문이다.

자연 시계와 같은 계량 물체들의 행태를 통해 파악한다. 그런데 우리가 어떤 물체를 계량 물체로 선택할 것인지는, 어떻게 합동성의 정의를 설정할 것인지는 원칙적으로 자유로우므로(규약), 선택하는 계량 물체의 종류 및 합동성의 정의에 따라 물리적 기하학은 달라진다. 또한 이 계량 물체들이 물질의 종류에 무관하게 모든 물질에 같은 방식으로 작용하고 차폐할 방법 또한 없는 ‘보편력’을 받는다고 가정하면, 보편력을 다양한 방식으로 설정함으로써 이에 대응하는 다수의 물리적 기하학이 가능해진다. 여러 과학철학자는 라이헨바흐의 『시간과 공간의 철학』 1부에서 제시된 이상과 같은 논의를 근거로 그가 ‘물리적 기하학의 규약주의’를 옹호했다고 평가했다.

하지만 이러한 평가는 옳지 않다. 지금까지의 논의에서 살펴본 것처럼, 라이헨바흐가 옹호한 것은 중력이 없는 상황에서 시공간의 계량에 일정한 기하학적 형태를 부여할 수 있으며 이때의 기하학적 형태가 유클리드적이라는 입장이었다. 중력이 없는 상황에서 계량 물체를 정의할 때 우리는 보편력의 문제를 피할 수 없다. 정의상 보편력은 물체들의 종류와 무관하게 모든 종류의 물체들에 같은 방식으로 영향을 미쳐 차폐할 방법이 없으므로, 우리는 원칙적으로 보편력의 작용 여부를 알 수 없다. 그렇기에 우리는 계량 물체가 보편력을 받지 않는다고 전제하고 이를 계량 물체의 정의에 반영한다. 그런데 이러한 ‘보편력 제거’는 다른 선택지를 생각할 수 없는 강력한 방법론적 원리이며, 실질적으로 이 원리를 적용하지 않는 과학적 지식은 상상하기 어렵다. 그렇기에 더 중요한 것은 이 정의 아래에서 계량 물체들로 시공간을 측정하고 그 기하학적 형태를 경험적으로 결정한다는 사실이다.

중력이 있으면 물리적 기하학은 더욱 경험적인 것이 된다. 유클리드적 시공간 계량은 오직 미분적으로 적용될 뿐, 시공간의 간격이 유한하게 연장되면 시공간 계량 관계는 중력이 없을 때처럼 특정한 기하학적 형태를 띠는다고 전제할 수 없다. 중력이 있는 경우에는 중력이 없는 경우와 달리 시공간의 계량 관계가 일정하지 않고 시간에 따라서 혹은 대상 영역이 변화함에 따라서 계량 관계가 달라진다. 그러므로 중력이 있는 일반 상대론에서 시공간의 기하학적 형태는 더 경험적인 것으로 바뀐다. 중력이 없는 경우 시공간의 모든 점에서 유클리드 기하학의 계량 관계가 적용된다고 할 수 있지만, 중력이 있는 경우 시공간의 계량 관계가 무엇인지 구체적으로

확인하기 위해서는 실제로 계량 물체들을 이용해 측정해야 하기 때문이다. 이를 라이헨바흐의 표현을 빌려 표현하자면, 일반 상대론에서는 빛 기하학의 공리들에서 계량 공리들이 아닌 위상적 공리들만이 성립한다고 할 수 있다.

그러므로 일반 상대론 속 시공간 계량 관계에 대해 라이헨바흐는 규약주의적 관점이 아닌 경험주의적 관점을 취한 것으로 보아야 한다. 라이헨바흐가 계량 물체에 대한 정의 속에서 방법론적으로 보편력을 제거한 것은 사실이지만, 이것은 중력이 없는 경우인 특수 상대론에만 국한되며 이는 모든 종류의 과학적 지식에 포함된 규약이다. 일반 상대론에 이르면 계량 관계는 측정 물체들을 통한 경험적 측정을 통해 일의적으로 결정되며, 이 관계는 시공간의 영역에 따라 계속 변한다. 따라서 일반 상대론에서는 특수 상대론에서와 달리 일정한 형태의 물리적 기하학을 규약적으로 선택할 수 없다. 그렇기에 라이헨바흐는 상대론에서 시공간의 계량 관계가 측정 물체들을 활용한 경험적 측정을 통해 결정된다는 ‘경험주의적 관점’을 취했다.

이와 관련하여 과학철학자 스티븐 김벨(Steven Gimbel)이 라이헨바흐의 기하학적 규약주의에 대해 표명한 입장을 검토해 볼 필요가 있다.³¹¹⁾ 김벨은 라이헨바흐의 기하학적 규약주의가 ‘이론 일반적’인 것이 아니라 ‘이론 특수한’ 것이었음을 강조한다. 그에 따르면 물리적 기하학에 관한 라이헨바흐의 입장은 푸앵카레와 같은 이론 일반적인 것이 아니라 상대론이라는 구체적인 물리학 이론에 특수한 것이었으며, 라이헨바흐가 제시하는 동등화 정의들 역시 공리들 및 다른 정의들과 밀접한 연결 관계를 갖는 이론 특수한 것이었다. 이러한 김벨의 관점은 우리가 지금까지 살펴본 라이헨바흐의 경험주의적 시공간 철학이 갖는 이론 특수성과 충분히 부합한다.

그러나 문제는 김벨이 특수 상대론의 경우 동시성의 정의가 주어지면 물리적 기하학은 그 규약적 특징을 잃는다고 주장한 데 있다.³¹²⁾ 또한 그는 일반 상대론에서 중력이라는 보편력이 특수 상대론에서처럼 정의를 통해 제거될 수 없으므로 물리적 기하학이 규약적 특징을 갖는다고 주장했다. 구체적으로 김벨은 다음과 같이 말한다.

311) Gimbel, Steven. (2004), “Un-conventional wisdom : theory-specificity in Reichenbach’s geometric conventionalism” 참조.

312) Gimbel (2004), p. 472. 특히 김벨은 다음과 같이 말한다. “원거리 동시성이 완전히 결정되면 우리는 완전한 기하학을 얻는다.”

...라이헨바흐는 일반 상대성 이론의 경우 정의에 의해 보편력을 숨기는 것이 불가능함을 보이고자 했다... 유형 X의 힘이 추가적인 이성적 요소들을 요구하므로 기하학적 규약성이 귀결된다.³¹³⁾

아쉽게도 이러한 김벨의 주장은 유지될 수 없다. 우선 그의 첫 번째 주장을 검토해 보자. 비록 동시성 정의에 기반해서 민코프스키 시공간이 결정되더라도, 동시성의 정의 그 자체가 임의적이고 규약적이므로 그러한 정의에 기반한 시공간 계량 관계 또한 그 규약적 성격을 유지한다. 더 중요한 것은, 동시성의 정의가 주어짐에도 불구하고 특수 상대론 속 계량 물체의 정의에서 여전히 정의를 통해 보편력이 제거되므로, 그러한 의미에서 특수 상대론적 시공간 계량에는 여전히 규약적 속성이 남아 있다는 것이다.

중력이 존재하는 일반 상대론의 경우, 김벨의 주장과 달리 물리적 기하학은 경험적으로 결정된다. 분명 라이헨바흐가 일반 상대론에서 보편력이 제거되지 않는다고 언급하기는 했다.³¹⁴⁾ 그러나 그가 보편력이 제거되지 않는다고만 말한 것은 아니다. 이 경우 3차원 강체 막대에 보편력이 작용한다고 볼 수 있지만 4차원 시공간 간격에는 보편력이 적용하지 않기 때문이다. 이를 풀어 말하면, 보편력의 작용 여부는 계량 물체들에 직접적으로 드러나는 것이 아니라 계량 물체들을 통한 시공간 계량 관계의 경험적 측정을 통해 드러난다고 할 수 있다. 만약 그와 같은 측정 결과가 국소적 관성계에서와 같은 유클리드적 계량과 같지 않다면, 이로부터 우리는 간접적으로 보편력의 존재를 추론할 수 있다.

보편력은 계량 관계를 통해서 그 존재를 드러내며, 중력이라는 보편력은 시공간 곡률이라는 형식으로 표현된다. 이와 같은 상황에서는 시공간 기하학의

313) Gimbel(2004), pp. 475.

314) 한스 라이헨바흐 (1924/1965/2020)의 311-312쪽 참조. 회전 원판의 사례에 대해 라이헨바흐는 다음과 같이 말한다. “반경에 의존하는 교정 요소가 수직 방향의 막대에 주어져야 한다. 이때의 교정은 계량적 힘(18절)의 특성들을 갖는 힘 효과에 대한 보상으로 해석될 수 있다. 우리가 이 교정을 0과 같다고 설정하지 않는 이유는-그렇게 하는 것이 가능하더라도- 4차원적 ds^2 에 대한 계량적 힘을 0으로 설정하는 것을 선호하기 때문이다. 이 경우 명백하게 계량적 힘들 중 오직 하나만이, 3차원 강체 막대의 계량적 힘이나 4차원적 시공간 간격의 계량적 힘 중 오직 하나만이 0으로 정의될 수 있다.” 한스 라이헨바흐(1928/1958/1986)의 301쪽 참조.

계량적 형태가 규약적으로 결정되지 않고 경험적으로 결정된다. 이는 물리적 기하학에 관한 김벨의 주장과는 반대된다. 특수 상대론의 맥락에서는 물리적 기하학의 규약적 성격을 없앨 수 없지만, 여전히 이때 물리적 기하학은 경험적 사실들에 의해 뒷받침된다. 측정 기준 물체들의 정의 속에서 필수적인 규약적 속성을 수용한 후, 이러한 정의를 전제하는 일반 상대론에 이르면 물리적 기하학이 더욱 경험적인 것으로 변한다고 보아야 한다.

이제 나는 오늘날 상당히 영향력 있는 철학자 중 한 명인 토머스 리크먼(Thomas Ryckman)이 라이헨바흐의 공리체계에 대해 제시한 견해에 대해 논하겠다. 그는 저서 『상대성의 지배(The Reign of Relativity)』에서 상대론에 대한 20세기 전반기의 가장 유력했던 두 가지 철학적 해석인 ‘경험주의적 해석’과 ‘비판적 관념론의 해석’을 비교해서 논했다.³¹⁵⁾ 리크먼에 따르면 ‘경험주의적 해석’의 대표자는 논리경험주의의 대표자인 슐리크와 라이헨바흐였고, ‘비판적 관념론의 해석’의 대표자는 신칸트주의자였던 에른스트 카시러 및 헤르만 바일(Hermann Weyl)과 아서 에딩턴(Arthur Eddington)이었다. 리크먼은 이상과 같은 두 철학적 해석의 주요 특징을 상술한 후, 결론적으로 슐리크와 라이헨바흐의 경험주의적 해석보다는 카시러, 바일, 에딩턴의 비판적 관념론 해석이 상대론에 대한 더 합당한 철학적 해석이라는 결론을 내렸다. 이제 나는 이와 같은 리크먼의 해석을 검토한 후 그의 주장이 갖는 한계점을 보이고자 한다. 특히 리크먼은 상대론에 대한 라이헨바흐의 분석적 작업이 이 이론의 경험적 토대를 강제 막대와 자연 시계로 삼았다고 보고 이를 비판했는데, 이러한 리크먼의 비판은 라이헨바흐의 철학적 관점에 대한 오해로부터 비롯된다.

리크먼은 아인슈타인이 1921년 1월 27일에 행한 강연 “기하학과 경험”이 이후 논리경험주의의 철학을 대표하는 이정표가 되었다고 본다. 이 강연에서 아인슈타인은 수학적 기하학과 물리적 기하학을 구분하고, 수학적 기하학이 강제 막대 및 시계와 연결되면 물리적 기하학이 된다고 했다. 아인슈타인에 따르면 물리적 기하학은 수학이 아닌 경험 과학이다. 그리고 그는 물리적 기하학(실제적 기하학)의 개념(헬름홀츠가 제시한) 없이는

315) Ryckman (2005) 참조. 이 글의 배경이 되는 논문은 리크먼이 1994년에 발표한 다음의 논문이다. “Weyl, Reichenbach, and the Epistemology of Geometry”, *Studies in History and Philosophy of Science Vol. 25, No. 6*, pp. 831-870.

일반 상대론이 발전되지 않았을 것이라고 평가했다. 그는 회전 원판 사고 실험을 통해 물리적 기하학이 비유클리드적일 것임을 추론했는데, 이 사고 실험 속에서도 강제 막대와 자연 시계가 등장하여 핵심적인 역할을 담당했다. 아인슈타인은 자신의 중력 이론의 경험적 기초를 강제 막대와 자연 시계에 두고자 한 것이다.³¹⁶⁾ 리크먼에 따르면 아인슈타인의 이 글로부터 큰 영향을 받은 슈리크는 이전까지의 전체론적 입장³¹⁷⁾ 대신 경험주의적 입장에서 상대론적 시공간을 해석하게 되었다. 또한 슈리크는 헬름홀츠의 저술을 편집하여 출간하면서 헬름홀츠의 기하학 철학을 헬름홀츠 본인보다 더 경험주의적으로 해석하기에 이른다. 강제 막대와 자연 시계라는 측정 도구가 제시되면, 이 도구들을 통해 물리적 기하학을 경험적으로 결정할 수 있다고 보게 된 것이다.

리크먼은 이와 같은 슈리크의 관점 변화가 라이헨바흐에게 큰 영향을 미쳤다고 본다. 그는 라이헨바흐의 1924년 저작 『상대성 이론의 공리화』 속 포함된 내용을 비교적 상세하게 재구성한 후, 라이헨바흐가 강제 막대와 자연 시계를 중심으로 상대론에 접근했던 반면 바일은 동역학적 접근을 시도한 것으로 평가했다.³¹⁸⁾ 그런데 리크먼이 보기에 강제 막대와 자연 시계를 옹호하는 것은 말 앞에 수레를 두는 것과 유사하다.³¹⁹⁾ 강제 막대와 자연 시계 같은 측정 도구의 행태는 물리학 이론에 의해서 설명되어야 하지 이론의 전제가 되어서는 안 된다는 것이다. 또한 리크먼은 무한소 시공간 영역에서 특수 상대론이 적용된다는 라이헨바흐의 가정을 부적절한 외삽(extrapolation)이라 평가했다. 리크먼은 라이헨바흐가 가장 일반적인 상황에서는 강제 막대와 자연 시계를 통해 계량 결정을 할 수 없다는 ‘충격적인 결론’에 이르렀고, 이러한 충격적인 결말이 ‘실증주의적인 메타 과학의 오류’를 드러내는 것으로 보았다. 결국 리크먼은 강제 막대와 자연 시계를 중심에 둔, 상대론에 대한 슈리크와 라이헨바흐의 경험주의적 해석이

316) Ryckman (2005), "1921 : Critical or Empiricist Interpretation of the New Physics?" 참조.

317) 슈리크의 1917년 저서 『현대 물리학의 시간과 공간』에서 제시된 관점을 의미한다.

318) Ryckman (2005), "Einstein Agonists : Weyl and Reichenbach" 참조.

319) 리크먼은 여기서 로베르토 토레티(Roberto Torretti) 역시 이와 유사한 입장을 가졌음을 언급하고 있다. Ryckman, Thomas. (2005), p. 102.

타당하지 않다는 결론을 내렸다.

이상과 같은 리크먼의 입장에 대해서 우선 지적해야 하는 것은 라이헨바흐가 강체 막대와 자연 시계 중심의 해석을 제시하지 않았다는 것이다. 라이헨바흐는 자신의 구성적 공리화가 갖는 주요한 의의가 빛 신호를 통해 구성되는 빛 기하학이 물질의 기하학에 우선함을 보인 것이라 강조했다. 굳이 강체 막대와 자연 시계를 사용하지 않더라도 특수 상대론을 위한 시공간 질서의 기초를 수립할 수 있다는 것이다. 빛 기하학을 통해 관성계를 유일하게 결정하고자 할 때 강체 막대와 같은 물질적 사물들이 필요하긴 하지만, 이때 물질적 사물은 ‘강성’(단위)을 유지하는 제한적인 역할만을 담당한다. 이와 같은 라이헨바흐의 입장은 일반적인 중력장 아래에서 여전히 위상적인 빛 공리들이 성립함을 주장하는 데서도 드러난다. 라이헨바흐가 물질 공리들보다는 빛 공리들이 더 일반적이고 타당하다고 보았다는 것은 문헌상의 여러 증거를 볼 때 명백하다.

다음으로, 무한소의 시공간 영역에서 특수 상대론의 시공간 계량이 타당하다는 것은 결코 부적절한 외삽이 아니라 아인슈타인의 이론적 입장에 대한 충실한 반영이었다. 왜냐하면 이와 유사한 주장을 아인슈타인의 이론 속에서뿐만 아니라 아인슈타인의 여러 기고문에서 찾을 수 있기 때문이다.³²⁰⁾ 또한 이 문제와 관련해서 라이헨바흐는 구체적으로 다음과 같이 말하고 있다.

...이 결과는 결코 명백하지 않다. 가속이 막대를 변형할 수 있다. 더 정확하게 말해, 비율 $\frac{l}{l_0}$ 이 $\lim_{l \rightarrow 0} = 1$ 인 경우에조차도 1에 도달하지 않을 것이다.

그러나 $(\frac{l}{l_0})_{\lim_{l \rightarrow 0}} = 1$ 은 일반 상대성 이론의 가정이다. 예를 들어, 이 가정으로부터 정적 중력장에서의 막대와 시계의 행동과 관련된 아인슈타인의 잘 알려진 진술들이 도출된다. 이는 시계의 역설에 대한 해결법에도 전제되어 있다. 따라서 공리 XI.2는 상대성 이론에 의해 주장되었다.³²¹⁾

또한 미분기하학의 관점에서도 이 주장은 타당한데, 이는 마치 양의

320) 이에 관한 대표적인 예로 임경순 편저 (1997), 아인슈타인의 “나의 비망록”의 143쪽 참조.

321) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 259쪽.

곡률을 갖는 구면의 미소 영역이나 음의 곡률을 갖는 나팔선면의 미소 영역이 유클리드 기하학의 특성을 보이는 것과 같다. 또한 아인슈타인의 등가 원리는 미소 시공간 영역에서 가속 운동이 등속 운동과 동치임을 주장하며, 이는 미분적 공리 XI을 뒷받침해 준다. 등가 원리가 곧 일반 공변성의 원리는 아니며, 일반 공변성은 등가 원리로부터 수학적으로 추론되어야 하는 형식적 원리다. 수학적인 일반 공변성 원리가 직관적인 물리학 원리인 등가 원리보다 차별적으로 우월하지는 않다. 오히려 경험적인 시공간 계량 구성에서 등가 원리는 수학적인 일반 공변성 원리와 비교할 때 더 중요한 역할을 담당한다.

또한, 리크먼의 주장과 달리 라이헨바흐는 가장 일반적인 상황에서 강체 막대와 자연 시계를 통해 계량 결정을 할 수 없다는 결론을 내리지 않았다. 오히려 그 반대였다. 중력장이 없는 특수 상대론의 영역에서 우리는 언제나 유클리드적 계량을 사용할 수 있다. 그리고 이때 유클리드적 계량은 오직 빛 기하학만으로 결정된다. 하지만 중력장이 존재하는 일반 상대론의 영역에서는 특수 상대론에서처럼 특정한 계량을 일관되게 사용할 수 없다. 계량이 시간에 따라 물질과 에너지의 양 또한 계속 변동하기 때문이다. 그러므로 빛 신호만으로는 유한한 영역의 계량을 결정할 수 없으며, 강체 막대나 자연 시계를 이용한 경험적인 측정을 통해서만 구체적인 계량의 값을 결정할 수 있다. 이에 관해 라이헨바흐는 다음과 같이 말한다.

...중력장에서 $g_{\mu\nu}$ 의 절댓값을 결정하기 위해서는 자연 시계 또는 강체 막대와 같은 물질적 사물들이 필요하다. 여기에 일반 이론과 특수 이론의 차이가 있다.³²²⁾

강체 막대, 자연 시계가 아니라 빛의 운동 또는 자유 운동하는 물질 입자의 궤적에 대한 측정을 통해서도 계량의 값을 결정할 수 있다. 그러므로 리크먼의 주장과는 달리 중력장이 일반적으로 변할수록 더욱더 측정 도구(과정)를 통한 실제적인 시공간 계량 측정이 중요해진다. 다만 계량의 값은 물질과 에너지의 분포에 따라서 변할 수 있으므로, 시공간에서 항상 보편적

322) 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 272쪽. 참고로 이에 관한 주석에서 라이헨바흐는 “힘을 받지 않고 자유롭게 운동하는 질점의 경로는 물질적 사물의 자리를 대신할 수 있음”을 말하고 있다.

으로 적용되는 공리들은 시공간의 위상적인 공리들로만 한정되는 것이다.

아인슈타인이 강체 막대와 자연 시계를 이론에 의해서 설명되어야 하는 대상으로 간주했다는 것은 사실이다. 그는 강체 막대와 자연 시계는 비교적 복잡한 물리적 구조물이므로 장기적인 관점에서 볼 때 물리학 이론의 명백한 (독립적인) 경험적 기초로 삼기에는 부적절하다고 평가했다. 이 점에 대해 라이헨바흐 또한 아인슈타인에게 동의하였으며, 그 역시 물질의 성질을 규명하는 미시적인 이론이 제시되어야만 측정 도구들이 계량적 장에 맞게 ‘조절’되는 현상을 설명할 수 있으리라고 보았다.

하지만 물리학 이론의 기초와 타당성이 경험에 근거해야 한다는 사실에는 변함이 없다. 설혹 미래에 우리의 측정 도구가 강체 막대와 자연 시계가 아닌 다른 도구 혹은 다른 물리적 절차로 바뀐다고 하더라도, 이와 같은 새로운 도구 및 물리적 절차 역시 세계에 대한 경험적 측정을 해야 한다. 그리고 이를 위해서는 일종의 정의 또는 규약이 필요하다. 빛 신호나 자유 운동하는 물질 입자를 사용한다고 해도 상황은 변하지 않는다. 시간에 따라 빛 신호의 궤적이 어떻게 변화하는지, 시간에 따라 자유 운동하는 물질 입자의 궤적이 어떻게 변화하는지를 경험을 통해 측정해야 하기 때문이다. 빛 신호의 운동, 자유 운동하는 입자의 운동이 측지선 방정식을 통해 장 방정식으로부터 도출될 수 있는 것은 사실이지만, 그것이 이들에 대한 실제적인 경험적 측정의 필요성을 없애는 것은 아니다.

따라서 라이헨바흐의 경험주의적 시공간 철학을 상대론에 대한 부적절한 철학적 해석으로 평가하는 리크먼의 주장은 유지되기 어렵다. 라이헨바흐는 빛 기하학이 물질 기하학에 우선하며 물질들이 빛의 기하학을 따른다는 점을 주장했다. 또한 그는 중력장이 존재하는 일반적인 상황에서 빛 신호에 더해 측정 도구를 통한 실질적 측정이 추가되어야만 시공간의 계량이 경험적으로 결정된다는 것을 보였다. 그러므로 라이헨바흐가 강체 막대와 자연 시계에 기초해야 하는 경험주의적 해석으로부터 강체 막대와 자연 시계에 의해서는 계량이 결정되지 않는다는 ‘충격적인 결론’에 도달했다는 리크먼의 평가는 부적절한 것이었다.

제5절. 물리적 기하학에 관한 라이헨바흐-아인슈타인 논쟁

앞선 제4절에서 살펴본 라이헨바흐의 경험주의 시공간 철학에 대한 비판적인 논의의 주된 기원은 물리적 기하학의 경험적 결정 가능성에 관해 1951년에 이루어진 라이헨바흐-아인슈타인 논쟁이었다. 라이헨바흐는 1951년 출판된 『알베르트 아인슈타인 : 철학자-과학자』 323)에 “상대성 이론의 철학적 의의”라는 논문을 게재했고 아인슈타인은 이에 관한 짧으면서도 비판적인 논조의 논평을 남겼다. 지금까지 둘 사이에 일어난 이 논쟁에 관한 다양한 철학적 해석이 제시되었다. 특히 하워드(Howard)와 리크먼(Ryckman)은 라이헨바흐에 대한 아인슈타인의 비판이 상대론적 시공간에 대한 경험주의적 해석의 부적절함을 보여준다고 평가했다. 물론 아인슈타인이 라이헨바흐와는 다른 관점을 가졌던 것은 사실이다. 하지만 헬름홀츠의 경험주의와 푸앵카레의 규약주의가 물리적 기하학에 관한 철학적 논의라는 하나의 범주 아래에서 서로 철학적 논쟁을 벌인 것과 비슷하게, 라이헨바흐와 아인슈타인 또한 물리적 기하학에 대해 경험주의와 규약주의의 입장에서 서로 경합하는 철학적 논쟁을 했던 것으로 이 논쟁을 보는 것이 더 적절한 평가일 것이다.

나는 지금껏 이 논문에서 상대론을 시간과 공간을 물리적으로 구현한 이론이라고 해석 및 평가해 왔고, 이는 시간과 공간에 대한 ‘경험주의적’ 관점을 옹호한다. 실제로 리만의 1854년 강연에는 ‘경험주의적’ 측면과 ‘규약주의적’ 측면 모두 포함되어 있었다. 리만은 공간에 대한 논의를 측정 물체에 대한 논의로 ‘물질화’시키기도 했지만, 그가 제시한 ‘측정 물체의 단위 일정’을 일종의 규약이라고 여길 수도 있다. 리만이 제시한 개념적 가능성을 경험주의의 차원에서 발전시켰던 학자가 헬름홀츠였다면, 이를 규약주의의 차원에서 발전시킨 것은 푸앵카레였다. 그리고 이러한 철학적 담론과는 비교적 독립적으로 이차 미분 형식에 관한 순수한 수학적 이론을 발전시켰던 것이 수학자 크리스토펠과 리치였다.

흥미롭게도 최근 과학철학자 지오바넬리(Giovanelli)는 라이헨바흐-아인슈타인 논쟁을 해석하는 비교적 새로운 관점을 제시했다.³²⁴⁾ 그는 상대론과

323) 이 책에는 아인슈타인의 지적 자서전, 보어, 파울리(Pauli), 브리지먼(Bridgman), 바슐라르(Bachelard), 라이헨바흐, 프랑크(Frank) 등 물리학과 철학 분야의 저명한 학자들이 아인슈타인의 물리학과 철학에 대해 논한 글들이 실려 있다.

324) Giovanelli, Marco. (2013c) 참조.

관련한 두 전통을 ‘헬름홀츠적 전통’과 ‘리만적 전통’으로 구분한다. 헬름홀츠적 전통은 구체적인 측정 물체를 통해 시간과 공간을 철학적으로(직관적으로) 사유하는 전통이며, 리만적 전통은 ‘이차 미분 형식 표현 가능성’에 기반하여 형식적으로 구축된 수학 이론의 전통이다. 지오바넬리에 따르면 특수 상대론에서 아인슈타인은 헬름홀츠적 전통 아래에서 사유했지만, 일반 상대론에 이르면 이와 선명히 구분되는 리만적 전통 아래에서 사유하며 이론을 전개해 나갔다. 그런데 논리경험주의자인 슐리크와 라이헨바흐는 헬름홀츠적 전통에 기반한 일반 상대론 해석을 제시했으므로, 이들과 아인슈타인은 서로 다른 전통 아래에서 서로 양립 불가능하고 소통 불가능한 철학적 대화를 펼쳤다. 이에 관해 지오바넬리는 다음과 같이 말한다.

...나의 생각으로... 실제로 아인슈타인과 논리경험주의자들은 같은 문제에 대해서 논의한 것조차 아니었다. 현대 과학철학의 기념비적인 대화는 그것의 기원을 귀머거리의 대화에 빚지고 있다.³²⁵⁾

내 생각에 이와 같은 지오바넬리의 주장에는 일정 부분 중요한 통찰이 담겨 있지만 그의 주장을 곧이곧대로 수용하기는 어렵다. 기본적으로 리만은 1854년 논문에서 물리적 기하학을 바라보는 경험적 관점을 제시했다. 이런 경험적 관점은 경험주의와 규약주의로 발전했는데, 이를 대표하는 인물이 헬름홀츠와 푸앵카레다. 그리고 두 철학적 관점 모두 시간과 공간을 물리적으로 고찰하는 과정에서 중요한 역할을 했다. 상대론을 발전시킬 당시의 아인슈타인은 주로 경험주의에 기반해서 사고했지만, 그는 일반 상대론을 정식 물리학 이론으로 형식화할 때 자신의 물리적 통찰을 리만 이후 발전된 수학적 형식 이론과 접목해야 했다. 이후 아인슈타인은 새로운 경험 원리 없이 자신의 장이론 프로그램을 추구하기 위해 수학적 형식 이론의 중요성을 강조해야 했는데, 그 과정에서 자신의 이론적 관점을 정당화하기 위해 헬름홀츠가 아닌 푸앵카레의 손을 들었다.

물론 지오바넬리의 주장처럼 아인슈타인이 일반 상대론을 형식화하는 과정에서 크리스토펠과 리치가 발전시킨 수학 이론이 중요한 역할을 한 것은 사실이지만, 수학 이론이 아인슈타인에게 일반 상대론에 이르는 핵심 통찰을 제공한 것은 아니다. 이때 여전히 수학 이론은 아인슈타인 자신의

325) Giovanelli, Marco. (2013c), p. 3821.

물리적 통찰을 구현하는 도구적인 역할을 맡았을 뿐이다. 그렇기에 아인슈타인이 ‘리만적 전통’(수학적 전통) 아래에서 사고했다는 지오바넬리의 주장은 일종의 ‘과장’이며, 아인슈타인이 ‘헬름홀츠적 전통’(물리적 전통)과는 무관하다는 지오바넬리의 주장은 ‘오류’이다. 말년의 아인슈타인이 수학적 형식론의 중요성을 강조했다라는 점에서 지오바넬리의 해석에 일말의 진리가 담겨 있기는 하다. 그러나 ‘물리적 전통’과 ‘수학적 전통’을 구분하며 ‘수학적 전통’에 손을 들어주는 지오바넬리의 해석은 유지될 수 없다. 오히려 아인슈타인은 말년까지 ‘물리적 전통’ 아래에 있었으며, 그중에서도 구분되는 두 철학적 입장인 ‘경험주의’와 ‘규약주의’ 중 후자의 관점을 취했다고 보는 것이 옳바를 것이다. 이제 아래에 제시되는 논의에서 나는 이와 같은 나의 관점을 상세하게 설명하겠다.

라이헨바흐의 1951년 논문 “상대성 이론의 철학적 의의”에는 여러 내용이 포함되어 있다. 우선 라이헨바흐는 물리학 이론의 상세한 의미 규명 전문가가 물리학자가 아니라 철학자임을 주장한다.³²⁶⁾ 이러한 관점 아래 ‘발견의 맥락’과 ‘정당화의 맥락’이 구분된다. “과학철학자는 과학적 발견으로 이끈 사고 과정에는 큰 관심을 가지지 않는다. 그는 완성된 이론에 대한 논리적 분석을 구하는데, 이때 이 이론의 타당성을 수립하는 관계들을 포함한다. 즉, 그는 발견의 맥락에는 관심이 없고 정당화의 맥락에 관심이 있다.”³²⁷⁾ 새로운 법칙을 발견하고 그것의 참 거짓을 확인하는 물리학자는 ‘발견의 맥락’에서 작업하지만, 한 이론의 인식론적 의미 규명은 철학자가 ‘정당화의 맥락’에서 행한다. 19세기와는 대조적으로 20세기에 이르면 과학이 고도로 전문화되면서 한 사람이 과학적 작업과 철학적 분석을 모두 할 수 없게 되었다. 그래서 과학자와 철학자 사이의 ‘노동 분업’이 필요하다. ‘과학적 철학’은 시대의 필요에 따라 탄생한 것이다.

또한 라이헨바흐는 상대론을 가능하게 했던 중요한 역사적 공헌들에 대해 개괄³²⁸⁾하고, 아인슈타인이 동시성의 상대성 개념 및 빛이 가장 빠른

326) Reichenbach (1951), pp. 287-312. 라이헨바흐는 아인슈타인이 전문적인 철학자가 아님을 재차 강조한다. 라이헨바흐에 따르면 아인슈타인이 시간과 공간의 기초에 대한 논리적(철학적)인 분석을 해야 특정한 물리적 문제들을 해결할 수 있다는 것을 깨닫고 이러한 작업을 일부 수행한 것이 사실이다. 하지만 아인슈타인은 자신의 이론이 갖는 철학적 함축을 체계적으로 제시하지 않았고, 라이헨바흐가 보기에는 바로 이것이 아인슈타인의 강점이자 약점이었다. 새로운 물리학을 만드는 사람들은 자신들이 만든 물리학 속에 함축된 철학을 자세하게 설명하지 않는다.

327) Reichenbach (1951), p. 292.

물리적 신호라는 사실을 공리로 삼아 특수 상대론을 제시했음을 지적한다. 라이헨바흐가 볼 때 일반 상대론이 물리적 기하학에 대해 제시한 혁신적인 개념은, 물리적 기하학이 물질-에너지 분포의 함수가 된다는 것이었다. 라이헨바흐는 시간과 공간의 실재성에 대해서도 논한다. 시간과 공간의 관계론적 체계는 물리적 대상들 사이에 적용되는 관계들을 기술한다. 빛은 가장 빠른 신호이고 인과적 사슬의 가장 빠른 형태다. 시간과 공간의 구조는 인과적 사슬의 개념을 토대로 하며, 시간적 질서는 인과적 질서로 환원될 수 있다. 시간과 공간의 계량적 특성과 달리 유한한 영역에서 시간과 공간의 인과적 질서는 불변하며, 그런 의미에서 시간과 공간은 여전히 실재하며 이를 경험으로 파악할 수 있다.³²⁹⁾

이처럼 이 논문에는 라이헨바흐가 상대론을 철학적으로 분석한 후 얻은 여러 결론이 포함되어 있다. 그중 아인슈타인과의 논쟁을 불러일으킨 직접적인 원인이 된 것이 논문 2절의 내용이다. 논문 2절에서 라이헨바흐는 상대론을 통해 이전까지는 참 또는 거짓이 증명 가능하다고 여겨졌던 많은 진술이 ‘정의’에 지나지 않음이 밝혀졌음을 주목한다. 길이의 측정 단위 설정 문제, 합동성의 문제, 서로 다른 장소에서 일어나는 사건들의 동시성 문제는 사실의 문제가 아니라 정의의 문제다. 이러한 정의가 전제되어야 경험적 또는 실험적 측정이 가능해진다.

정의의 임의적 특성 때문에 A 정의뿐만 아니라 B 정의를 사용할 수 있다. 동등화 정의를 다르게 선택함으로써 같은 경험적 기초를 공유하는 복수의 이론 체계들이 가능해진다. 예를 들어 같은 물리적 공간이 있다고 하더라도 합동성의 정의를 서로 다른 방식으로 정의하면 서로 다른 물리적

328) 오컴의 면도날, 라이프니츠의 식별 불가능자 동일성 원리는 20세기에 이르러 논리경험주의가 제시한 ‘의미의 검증 이론(verification theory of meaning)’으로 발전했다. 라이프니츠는 인과적 질서로부터 시간적 질서가 비롯됨을 인식한 바 있고, 마흐는 회전 운동의 상대성을 통해 관성력 개념의 상대주의에 이르는 길을 마련했다. 기하학의 발전도 중요한 역할을 했다. 가우스, 보여이, 로바첵스키에 의해서 비유클리드 기하학이 발견되었고, 헬름홀츠는 물리적 기하학이 합동의 정의에 의존함을 파악했다. 또한 헬름홀츠는 시각화가 고체 물체들과 빛 광선에 대해 우리가 갖는 경험으로부터 비롯되는 것임을 발견했다.

329) Reichenbach (1951), pp. 305-306. 하지만 라이헨바흐는 상대성 이론에서 여전히 시간의 방향 문제가 해결되지 않았음을 지적한다. 이 이론 속에서 시간은 비대칭적이지만 비가역적이지 않다. 즉, 상대성 이론은 단일한 방향의 시간을 제시하고 있지 않다. 따라서 우리가 경험하는 시간의 방향성 문제는 여전히 철학적으로 해결되지 않은 채 남아 있다.

기하학이 귀결된다. 물론 두 이론 체계는 그 ‘단순성’에 있어 서로 구분될 수 있다. 이는 이론의 경험적 참에 관련된 단순성이 아니라 오직 세계를 기술하는 방식에서의 단순성이므로, 이를 ‘귀납적 단순성’과 대비되는 ‘기술적 단순성’이라 한다.³³⁰⁾

물리적 기하학의 선택은 합동의 정의가 구체화되지 않았을 경우 임의적이지만, 일단 합동의 정의가 설정되고 나면 물리적 공간에 어떤 기하학이 적용되는지는 경험적인 문제가 된다. 따라서 물리적 기하학에 대한 푸앵카레의 규약주의는 한계를 갖는다. 푸앵카레와 같이 물리적 기하학을 유클리드 기하학으로 고정하게 되면 합동성 정의에 사용되는 강체 막대의 행태를 설명하기 위해 ‘계량적 힘’ 또는 ‘보편력’을 도입할 수밖에 없게 되므로 이론이 불필요하게 복잡해지고, 더 나아가 인과적 변칙 사례가 발생하여 표준적인 인과성 조건을 만족하지 않는다. 경험적 참됨 측면에서 동등한 이론 T와 이론 T'가 있을 때, T와 달리 T'에는 보편력 F를 덧붙여야 할 뿐 아니라 인과적 변칙 사례 A 역시 발생한다. 이 경우 우리는 경험적인 측면에서 동등하더라도 T와 T' 중 T를 선택할 것이다. T는 보편력이 제거되어 T'보다 단순하며 T'과 달리 인과성의 원리를 만족시키기 때문이다.³³¹⁾

이처럼 라이헨바흐는 만약 우리가 ‘보편력 제거’를 통해 합동성의 정의를 선택하면, 이 정의에 기반하여 물리적 기하학을 경험적으로 결정할 수 있다고 보았다. 아인슈타인이 라이헨바흐에게 문제를 제기하는 것은 바로 이 지점이다. 그는 푸앵카레의 입을 빌려 다음과 같이 말한다. 강체 막대에 의한 합동의 정의를 하기 위해서는 유클리드 기하학을 전제한 물리학 법칙들을 사용해야 한다. 따라서 물리적 기하학에 대한 경험적 검증은 합동성의 정의를 전제하는 측정 물체에 국한되는 것이 아니라 물리학 법칙들 전체를 대상으로 한다. 그러므로 우리는 여전히 편리한 유클리드 기하학을 선택하면서 다른 법칙들을 조정할 수 있다.

이에 대해 아인슈타인은 라이헨바흐가 다음과 같이 대답하리라 추측한다. 실제의 물리적 대상들에 의해 근사될 수 있는 이상적인 강체 막대와 자연 시계는 잠정적으로 받아들일 수 있으며, 아인슈타인 또한 이들을 받아들임으로써 일반 상대론을 수립할 수 있었다. 문제가 되는 것은 수학적 기하학의 단순성만이 아니라 ‘물리학 전체의 단순성’이다. 따라서 ‘물리학 전체의

330) Reichenbach (1951), p. 296.

331) Reichenbach (1951), p. 298.

단순성'을 고려한다면 우리는 푸앵카레와 같이 계속 유클리드 기하학을 물리적 기하학으로 고수할 수 없다.³³²⁾

이상과 같이 라이헨바흐의 대응을 예상한 아인슈타인은 이제 푸앵카레가 아닌 '비실증주의자'의 입을 빌려 다음과 같이 말한다. 만약 우리가 물리학 전체의 단순성을 고려한다면, 개별적 진술들에 대한 의미의 검증가능성 원리는 유지될 수 없다. 물리학 이론의 개별적인 개념들과 주장들에 경험적 의미가 부여될 수 없으며 오직 물리학 이론 전체에 대해서만 경험적 의미가 부여될 수 있다. 이와 관련하여 아인슈타인을 대변하는 비실증주의자는 라이헨바흐와 대비하여 칸트 철학의 중요한 성과를 다음과 같이 서술한다. 우리 사고 속에서 주도적인 역할을 하는 몇몇 개념들이 존재하며, 이 개념들은 경험으로부터의 논리적 과정을 통해서만 도출될 수 없다. 특정한 개념들과 범주들은 필수 불가결한 사고의 요소이다.³³³⁾

이상과 같은 아인슈타인-라이헨바흐 논쟁을 어떻게 이해해야 할까? 지오바넬리는 이 논쟁을 일종의 '귀머거리의 대화'로 해석했다. 그에 따르면 수학자 리만이 일반적인 기하학인 리만 기하학(미분기하학)을 1854년에 제시한 이후, 두 가지 종류의 서로 다른 수학적 전통이 발전했다. 그중 하나가 '헬름홀츠적 전통'이다.³³⁴⁾ 헬름홀츠는 물리적 측정의 일반적 가정인 '강체 물체의 자유 운동 원리'를 가정할 때 이차 미분 형식(quadratic differential form)에 의해 정의된 간격 개념이 일정함을 보임으로써, 일정한 양 또는 음의 곡률을 가진 기하학이 곡률이 0인 유클리드 기하학을 대체하여 물리적 기하학으로 수용할 수 있음을 보였다. 이러한 헬름홀츠의 논의를 이은 것이 푸앵카레(Poincare)다. 푸앵카레는 "만약 복수의 물리적 기하학이 가능하다면, 실제로 우리는 어떤 근거로 특정한 물리적 기하학을

332) 그런데 이와 같은 아인슈타인의 추측은 정확히 말해 라이헨바흐가 아니라 솔리크와 카르납의 규약주의적 관점, 더 정확히 말해 그 자신이 이미 상대론을 개발한 후 이를 철학적으로 정당화할 때 취한 바 있었던 관점을 나타낸다고 봐야 한다.

333) Einstein, Albert. (1951), "Reply to criticisms", in *Albert Einstein : Philosopher-Scientist* (Tudor Publishing Company), p. 678.

334) Giovanelli(2013b), Giovanelli(2013c)를 참조할 것. 다만 내가 강조하고 싶은 것은, 지오바넬리의 주장과 달리 헬름홀츠가 보이고자 했던 핵심은 강체 물체의 자유 운동 원리를 가정할 경우 우리가 반드시 유클리드 기하학을 물리적 기하학으로 사용할 필요가 없다는 점이었다는 사실이다. 헬름홀츠는 실제의 물리적 대상들의 행태를 근거로 물리적 기하학을 탐구해야 한다고 보았고, 이는 진정한 '기하학의 물리화' 전통의 시작이었다.

채용하는가?”라고 물었다. 이에 대해 푸앵카레는 물리적 기하학의 선택이 이성 또는 경험에 강제되지 않으므로 일종의 ‘규약(convention)’에 근거하며, 우리는 수학적으로 가장 단순한 유클리드 기하학을 선택하여 채용한다고 답했다. 지오바넬리는 이상과 같은 리만-헬름홀츠-푸앵카레의 전통을 ‘수학적 전통’ 내의 ‘기하학적 전통’이라 부른다.

또 다른 수학적 전통은 수학자 크리스토펬(Christoffel), 리치(Ricci), 레비-치비타(Levi-Civita)에 의해 발전된 ‘해석적 전통’이다. 이들은 리만의 핵심적 개념을 해석적으로 발전시켜 ‘이차 미분 형식’에 관한 심화 연구를 진행했다. 이차 미분 형식을 $F = \sum g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu$ 로 표현할 때, 크리스토펬을 비롯한 수학자들은 이 형식을 독립변수의 대체를 통해 다른 미분 형식으로 변환하는 방법, 다양한 변환 중 단순히 변수들을 대체함으로써 이루어지는 겉보기 변환을 실질적 변환과 구분하는 방법 등을 연구했다.³³⁵⁾ 그런데 지오바넬리에 따르면 아인슈타인이 일반 상대론을 발전시키는 과정에서 영향을 받은 것은 헬름홀츠, 푸앵카레로 이어지는 ‘기하학적 전통’이 아닌 크리스토펬, 리치, 레비-치비타로 이어지는 ‘해석적 전통’이다. 더 나아가 지오바넬리는 ‘기하학적 전통’이 일반 상대론과 ‘관련이 없다’라고 주장한다. 3차원 강제 물체의 자유 운동 원리를 가정하는 헬름홀츠 및 푸앵카레의 입장은 변동이 가능한 곡률을 가진 리만 기하학과 수학적으로 양립 불가능하다는 것이다.³³⁶⁾

...우리가 “헬름홀츠적” 전통이라 부를 수 있는 19세기 기하학의 전통은 상대성의 출현에 그 어떤 유관한 역할도 하지 않았으며, 이 전통은 상대론이 제기한 철학적 문제들을 이해하는 데 전적으로 불충분하다. 아인슈타인의 이론에 개념적 원천을 제공한 것은 우리가 “리만적 전통”이라 부르는 것뿐이었다.³³⁷⁾

그런데 논리경험주의를 대표하는 술리크, 라이헨바흐는 일반 상대론의 철학적 의의를 헬름홀츠-푸앵카레로 이어지는 ‘기하학적 전통’ 아래에서 탐구했고, 이와 같은 전통은 실제로 일반 상대론의 논의 맥락인 ‘해석적

335) 텐서 해석학과 미분기하학의 발전에 관한 유용한 수학사적 개괄로서 다음을 참고하라. 모리스 클라인, 심재관 옮김 (1972/2016), 3권, 1573-1591쪽 (48장, 텐서 해석학과 미분기하학) 참조.

336) Giovanelli(2013b) 4절, Giovanelli(2017) 2.2절, 3.1절, 5.3절에서의 논의 참조.

337) Giovanelli(2013c), p. 3822.

전통'과는 무관하므로, 결과적으로 논리경험주의의 일반 상대론 해석은 '잘못된 수학적 전통' 아래에서 이루어진 '잘못된 논의'였다는 것이 지오바넬리의 주장이다. 이러한 논의의 연장선상에서 지오바넬리는 아인슈타인-라이헨바흐 논쟁에서도 아인슈타인이 '해석적 전통' 아래에서의 문제인 '측정 단위의 동일성 문제'를 다루고 있지만, 라이헨바흐는 '기하학적 전통' 아래에서의 문제인 '물리적 기하학의 규약성 문제'를 다루고 있으므로, 아인슈타인과 라이헨바흐는 서로 '귀머거리의 대화'를 하고 있으며 끝내 그들이 어떤 문제에 대해서 의견이 일치하지 못하는지에 대해서조차도 합의를 보지 못했다는 강한 해석을 제시했다.³³⁸⁾

이처럼 지오바넬리가 제시하는 '기하학적 전통'과 '해석적 전통' 구분에는 어느 정도 의미가 있지만, 내가 볼 때 두 전통이 선명히 구분되어 하나의 전통이 다른 전통과 관련이 없다는 지오바넬리의 주장은 성립할 수 없다. 리만 이후 리치와 크리스토펬에 의한 해석적인 미분기하학 발전이 순수한 수학적 맥락에서 이루어졌다면, 헬름홀츠는 리만이 제시한 통찰을 적극적으로 물리학과 접목하여 공간을 물리적인 것으로 사유하고자 했다. 또한 헬름홀츠에게 중요한 것은 '길이 측정 기준 물체의 자유 운동성 원리'였지, 그 물체가 세계 속에서 실질적인 3차원을 갖는다는 것이 아니었다. 헬름홀츠에 이어 푸앵카레와 라이헨바흐 역시 길이를 측정하는 강체 막대에 관해 논한 것은 사실이다. 그러나 강체 막대가 부피를 가진 3차원적 대상이긴 하지만 그 기본 기능은 1차원적 길이 측정이며 이를 통해 공간의 기하학적 형태를 식별한다. 만약 강체 막대에 관한 논의가 1차원적 길이 측정에 대한 것이라면 이는 일반 상대론과 무관할 수 없다.

상대론과 관련하여 아인슈타인의 사고 실험에 등장하는 것은 수학적 대상이 아닌 물리적 대상으로서의 강체 막대와 자연 시계이다. 추상적인 수학적 기하학을 구체적인 물리적 기하학으로 사용하기 위해서는 물리적 대상을 수학적 개념과 연결하는 과정이 필요하다. 지오바넬리는 리만 기하학에서 가정하고 있는 '측정 단위의 불변성 원리' 즉 다양체 위의 모든 점에서 길이의 단위(척도)가 일정하다는 원리가 일반 상대론에서 유지되고

338) Giovanelli(2013c) 4절, 6절, 7절에서의 논의 참조. 특히 7절에서 지오바넬리는 논리경험주의의 등장에 아인슈타인, 슈리크, 라이헨바흐 사이의 철학적 대화가 중요한 역할을 했음을 받아들이지만, 이들 사이의 대화는 놀랍게도 오해에 기반한 '귀머거리의 대화'였다는 결론을 내리고 있다.

있을 뿐만 아니라 이것이 자신이 말하는 ‘헬름홀츠적 전통’에서의 논의와 무관하다고 주장하고 있는데, 이는 사실이 아니다. 이와 관련된 중요한 논의가 아인슈타인 자신의 사고 과정에서 핵심적 역할을 했을 뿐만 아니라 논리경험주의의 경험주의적 전통 아래에서 실제로 이루어졌다.

수학이 아닌 물리학에서 측정 단위의 역할을 하는 것은 강체 막대와 자연 시계이다. 만약 강체 막대와 자연 시계의 강성(rigidity)이 유지된다고 가정한다면, 이는 측정 단위가 불변한다고 가정하는 것과 같다. 그런데 이와 같은 강성을 유지하기 위해서는, 우선 물질의 종류에 따라서 다르게 작용하는 각종 물리적 힘들(미분력)을 교정해야 하며, 물질의 종류와는 무관하게 같은 방식으로 작용하는 물리적 힘(보편력)을 ‘정의’에 의해 제거해야 한다. 이때 보편력은 오직 정의에 의해서만 제거된다. 왜냐하면 우리는 오직 한 점에서만 두 측정 물체를 직접 비교할 수 있을 뿐, 서로 떨어져 있는 두 측정 물체를 직접 비교하는 것은 ‘기술적’이 아니라 ‘논리적’으로 불가능하기 때문이다. 우리는 두 측정 물체가 떨어져 있을 때 각각의 물체에 보편력이 작용하지 않는다고 ‘정의’할 수 있을 뿐이다. 보편력이 작용하지 않는다는 것은 각각의 기준계에서 볼 때 측정 물체의 ‘강성’이 유지되어 측정 단위가 같다고 전제함을 의미한다.

논리경험주의 특히 라이헨바흐의 논의에서 강체 막대와 자연 시계와 같은 측정 물체에는 보편력이 작용하지 않는다고 정의하는데, 이러한 ‘보편력 제거의 원리’가 ‘측정 단위의 동일성 원리’와 동등한 역할을 담당한다. 그리고 이는 순수한 수학적 차원의 논의에 비해 진일보했다고 할 수 있다. 왜냐하면 ‘보편력 제거의 원리’를 채택하는 것은 실제적인 물리적 상황에 기초한 인식론적 고찰을 근거로 하기 때문이다. 한 점에서 비교해 서로 길이가 같은 두 강체 막대가 떨어졌다 다시 만났을 때 여전히 그 길이가 같다는 것은 더 이상의 설명이 불가능한 경험적 사실이다.

이에 대해 다음과 같은 반론이 제시될 수 있다. 일반 상대론에서 문제가 되는 중력이 바로 일종의 보편력 아닌가? 만약 중력을 제거할 수 없다면 앞서 말한 ‘보편력 제거의 원리’가 성립하지 않는 것 아닌가? 그러나 이러한 반론은 일종의 오해에서 비롯된다. 보편력으로서의 중력은 정의상 보편력이 제거된 측정 물체를 이용하여 측정된 시공간의 기하학적 형태 차이를 통해 나타난다. 우리가 시공간 영역 A에서 측정한 기하학적 형태가 기준 영역 B(민코프스키 영역)에서 측정한 기하학적 형태와 다를 경우, 이러한 차이의

근거를 중력에서 찾을 수 있다. 기준 영역 B의 관측자는 이러한 차이가 영역 A의 관측자가 가진 측정 물체에 작용하는 ‘보편력’ 때문이라고 해석할 수 있지만, 영역 A의 관측자는 자신의 측정 도구에 여전히 보편력이 작용하지 않는다고 판단한다. 그래야 A의 관측자 역시 물리 법칙을 기술하는 동등한 기준계에 속한다고 할 수 있기 때문이다. 이때 요구되는 원리는 ‘일반 공변성’이며, 이 원리의 적용 또는 제약으로 인해 4차원 시공간 간격은 그 불변성을 유지한다.

그러므로 ‘헬름홀츠적 전통’을 일반 상대론과는 관련 없는 별개의 전통으로 구분한 후, 아인슈타인과 논리경험주의자 사이의 진지한 철학적 대화를 ‘귀머거리의 대화’로 특성화한 지오바넬리의 주장은 유지되기 어렵다. 물론 ‘헬름홀츠적 전통’을 ‘리만적 전통’과 구분하려는 지오바넬리의 입장에는 일말의 진실이 담겨 있다. 전자는 시간과 공간 개념을 측정 물체에 구현하려는 ‘물리적 사유’의 전통이지만, 후자는 수학적 기하학을 해석학의 차원에서 형식적으로 발전시키려는 ‘순수 수학적’ 전통이기 때문이다. 그러나 아인슈타인의 진정한 독창성은 이상과 같은 두 이질적인 전통을 접목함으로써 새로운 물리학 이론을 도출한 데 있고, 그런 까닭에 상대론에 대한 철학적 해석 역시 이 두 전통 모두를 고려하여 이루어지는 것이 바람직할 것이다.

지오바넬리가 ‘헬름홀츠적 전통’과 ‘리만적 전통’을 서로 다른 ‘수학적 전통’이라 부르는 것 역시 문제가 있다. 왜냐하면 지오바넬리가 말하는 ‘헬름홀츠적 전통’은 시간과 공간을 물리적으로 사유하는 전통으로서 물리적 전통에 가까우며 이를 수학적 전통이라 보기 어렵기 때문이다. 물리학자였던 아인슈타인의 주된 관심은 물리학에 있었으며 수학 연구 그 자체에 있는 것은 아니었으므로 그를 ‘수학적 전통’에 있다고 보는 것은 곤란하다. 더 정확히 구분한다면 아인슈타인은 헬름홀츠 및 푸앵카레와 더불어 ‘물리적 전통’에서 물리적 기하학을 고찰했다. 아인슈타인은 상대론을 개발하는 과정에서 헬름홀츠와 더불어 ‘경험주의’적인 관점을 취했지만, 상대론 이후 통일장 이론을 추구하는 과정에서 푸앵카레와 더불어 ‘규약주의’적인 관점으로 입장을 전환했다고 평가하는 게 적절하다. 그런 입장 전환의 분기점은 그의 1921년 강연 “기하학과 경험”이었다.

시간과 공간 개념을 물리적으로 사유하는 전통 아래에 리만, 헬름홀츠, 푸앵카레, 아인슈타인, 슈리크, 카르납, 라이헨바흐를 포함하자. 리만은 이 전통을 최초로 시작했으며 그의 혁신적 제안에는 ‘경험주의’와 ‘규약주의’의

요소 모두 포함되어 있었다. 이로부터 헬름홀츠는 ‘경험주의’, 푸앵카레는 ‘규약주의’를 발전시켰으며, 아인슈타인에게서 이 두 입장이 결합했다. 초기에 아인슈타인은 좀 더 ‘경험주의’에 가까운 관점이었다가 이후 ‘규약주의’로 기울어진다.³³⁹⁾ 전체적으로 볼 때 술리크와 카르납의 시공간 철학이 일종의 ‘규약주의’에 속한다면, 라이헨바흐는 ‘경험주의’의 관점에서 상대론적 시간과 공간의 인식적 의의를 상세하게 규명했다. 만약 우리가 이상과 같이 상대론적 시공간에 대한 철학적 계보를 분류한다면, 물리적 기하학의 경험적 결정 가능성에 관한 라이헨바흐-아인슈타인 논쟁은 같은 전통 속에서 구분되는 두 개의 철학적 입장인 ‘경험주의’와 ‘규약주의’ 사이에서 이루어진 논쟁으로 이해할 수 있다.³⁴⁰⁾

또한 이러한 관점에서 보면 지오바넬리가 직면하는 철학사적 해석의 몇몇 중요한 난점들을 해결할 수 있다. 첫째, 과학철학의 역사에서 합리적인 두 대화 상대자인 라이헨바흐와 아인슈타인이 서로를 ‘오해’하고 ‘귀머거리의 대화’를 했다는 억지스럽게 해석할 필요가 없어진다. 물론 철학적 대화와 논쟁이 상대방의 입장을 전적으로 이해하고 수용하며 이루어지는 경우는 거의 없다. 하지만 적어도 중요한 논점이나 무엇이 논쟁 지점인지에 대해서는 서로 충분히 이해 및 합의한 후 대화와 논쟁을 진행한다고 보는 게 합리적이다.

둘째, 지오바넬리처럼 아인슈타인이 명목상으로는 ‘푸앵카레’를 말하지만 사실상 ‘바일’을 말하고 있다고 억지스럽게 해석할 필요가 없다. 예를 들어 지오바넬리는 다음과 같이 말한다.

...“기하학과 경험”에서 아인슈타인이 푸앵카레를 언급하는 것은 라이헨바흐의 개중에 어느 정도 영향을 미쳤을 것이다. 그러나 논리경험주의자들은 아인슈타인의 언급이 기하학적 규약주의를 옹호하는 논증이 아니라 바일의 전자기

339) 그런데 프리드먼의 경우 아인슈타인이 상대론을 개발할 당시부터 규약주의적 관점을 취했다고 본다. 마이클 프리드먼, 박우석·이정민 옮김 (2001/2012), 139쪽. 아인슈타인이 일종의 규약적 선택을 통해 등가 원리를 물리학의 기초 원리로 승격시켰다는 것이다. 하지만 상대론을 시간과 공간을 물리적으로 구현한 이론이라 보면 특수 이론에서 일반 이론으로의 이행은 비교적 자연스러워지기 때문에 프리드먼이 말하는 ‘규약적 요소’가 최소화될 수 있다.

340) 그렇다면 이 지점에서 다음과 같은 의문을 제기할 수 있다. 물리적 기하학의 ‘규약주의’에 속하는 술리크, 카르납, 아인슈타인 사이의 차이는 무엇이었는가? 이에 답하기 위해서는 더 자세한 연구가 필요하며, 나는 이러한 연구 과정에서 아인슈타인이 술리크와 카르납으로 대표되는 비엔나 학파의 논리실증주의에 반대한 이유가 상세하게 드러날 것이라고 예상한다.

이론에 대항하는 아인슈타인의 “측정 막대 반론”의 맥락에서 읽어야 한다는 것을 알아차리지 못했다.³⁴¹⁾

그런데 지오바넬리의 주장과 달리 실제로 아인슈타인은 ‘푸앵카레’를 말하면서 동시에 ‘바일’의 입장 또한 지시하고 있는 게 맞다. 왜냐하면 바일 역시 푸앵카레와 함께 일종의 ‘규약주의’적 관점을 갖고 있다고 볼 수 있기 때문이다.³⁴²⁾ 지오바넬리가 이런 방식으로 해석하지 못하는 것은 그가 푸앵카레와 헬름홀츠 모두 그가 말하는 ‘헬름홀츠적 전통’에 속한다고 해석하기 때문이며, 이런 그의 관점으로 인해 여러 난점이 발생함을 우리는 이미 앞선 논의에서 살펴보았다.

이처럼 라이헨바흐-아인슈타인 논쟁이 ‘귀머거리의 대화’가 아니라 ‘경험주의’와 ‘규약주의’ 사이의 진정한 논쟁이었다면, 과연 이 논쟁에서 문제가 되는 핵심 쟁점은 무엇인가? 앞서 살펴보았듯 라이헨바흐는 합동성의 정의가 이루어지면 물리적 기하학의 결정이 막대, 시계, 빛 신호와 같은 계량 물체(과정)들을 통해 경험적으로 가능하다고 주장했다. 이에 반해 아인슈타인은 합동성의 정의 역시 물리학 이론 전체를 고려하여 선택되므로, 특정한 합동성의 정의가 선택된 후 물리적 기하학이 경험적으로 결정되더라도 그 결정 결과가 확정적이지는 않음을 주장했다. 이와 같은 두 사람 사이의 논쟁을 ‘일반 상대론 속 막대와 시계의 지위에 대한 인식론적 문제’의 관점에서 읽어야 한다는 지오바넬리의 해석은 합당하다. 그가 지적하는 것처럼, 특수 상대론이 제시된 당시부터 이상적인 강체 막대와 자연 시계의 실질적인 구현 가능성은 물리학자들 사이에서 문제가 되었기 때문이다.³⁴³⁾ 가속 운동 기준계에서의 측정 물체들이 등속 운동 기준계에서와 같은 행태를 보일까? 기준계의 가속 운동이 측정 물체의 작동 방식에 영향을 미쳐야 하지 않을까?

그러나 이와 같은 의문점에도 불구하고 아인슈타인은 이상적인 강체 막대와 자연 시계의 행태를 전제하며 일반 상대론을 전개해 나갔다. 1912년 회전 원판 사고 실험 속 원판의 가장자리에 있는 관측자는 자신이 가속 운동하고 있음에도 불구하고 측정을 위해 사용하는 강체 막대와 자연 시계의 작동 방식이 정지해 있는 관측자의 강체 막대 및 자연 시계와 같다고

341) Giovanelli (2013b), p 1237.

342) 바일와 아인슈타인 모두를 ‘규약주의’의 범주로 분류할 수 있다고 할 때, 두 사람의 규약주의가 어떤 점에서 구분되는지를 밝히는 것도 흥미로운 연구 주제이다.

343) Giovanelli (2014), Giovanelli (2017) 4.1절에서의 논의 참조.

가정한다. 이러한 전제는 우리가 확인할 수 있는 경험적 사실들과 잘 일치하는 것처럼 보인다. 기초적인 길이 및 시간 측정 도구라고 할 수 있는 분자 사이의 격자 거리와 원자 스펙트럼의 진동수의 경우, 내부 결합력이 외부에서 작용하는 힘들에 비해 강력한 까닭에 그 행태가 기준계의 가속 운동에 독립적인 것처럼 여겨진다. 이는 원자 스펙트럼의 보편성에서 잘 드러난다. 우주 속 개별 원자들은 각각 다른 과거 이력을 갖고 있다. 하지만 자연에서는 두 원자의 종류가 같을 때 정확히 같은 스펙트럼선을 나타낸다. 우주 속 위치 및 과거 이력과 무관하게 같은 종류의 원자가 같은 스펙트럼을 나타내는 것은 측정 단위의 위치 독립성을 지지하는 강력한 경험적 증거이다.

일반 상대론은 이처럼 이상적인 계량적 측정 도구들이 위치 및 가속과 무관하게 같은 방식으로 작동한다고 전제한 후, 측정 도구들의 행태를 통해 측정되는 시공간의 계량 $g_{\mu\nu}$ 가 편평한 민코프스키 공간의 계량에 비해 나타내는 편차가 해당 시공간 영역에 존재하는 중력장을 드러낸다고 가정한다. 하지만 아인슈타인이 여러 번 강조한 것처럼 상대론에서 기초적인 계량적 측정 도구들은 ‘독립적인 개념’이다. 이 도구들의 행태, 구체적으로 이 도구들이 위치와 가속에 독립적으로 균일하게 움직이면서도 그 측정 결과를 통해 중력장의 존재 및 세기를 나타낸다는 사실은, 상대론에 의해 설명되지 않고 이론의 기본적인 전제로서 가정될 뿐이다.³⁴⁴⁾ 강제 막대와 자연 시계는 구조적으로 복잡하게 구성된 물리적 대상이므로, 이러한 물리적 대상이 왜 그와 같은 행태를 보이는지에 대한 추가적인 설명이 요구된다.

라이헨바흐 역시 계량적 측정 도구들의 행태가 추가로 설명되어야 한다는 점에 대해 아인슈타인과 같은 입장이었다. 그는 측정 도구의 미시물리적 행태를 분자 이하의 영역을 다루는 양자 이론이 규명해줄 수 있으리라고 생각했다. 그렇다면 아인슈타인과 라이헨바흐는 이 문제의 어떤 점에서 의견을 달리하고 있는가? 상대론 속 측정 도구의 행태에 대한 설명 문제에 관해 1920년대의 물리학자들은 크게 두 가지의 입장을 가졌다.³⁴⁵⁾ 그중 아인슈타인, 바일, 에딩턴과 같은 ‘연속적 장이론’을 추구했던 물리학자들은 도구를 통한 측정이 가능하지 않은 미시세계에서도 연속적 장이 존재한다고 가정하고 장방정식을 통해 측정 도구의 행태를 이론적으로 설명하고자 했다.³⁴⁶⁾

344) Giovanelli (2014) 참조.

345) Giovanelli (2014) 2.4절, 3절에서의 논의 참조.

346) 이와 달리 파울리, 하이젠베르크, 보어 같은 양자 물리학자들은 측정 또는 관측이 가능한 양들만을 받아들이고 이를 토대로 미시 세계에 대한 양자 이론을 구축

그런데 라이헨바흐는 이처럼 연속 이론을 추구하는 물리학자들에 대해 반대했다. 그 반대의 이유는 영문판에서 출판되지 않은 그의 『시간과 공간의 철학』 ‘부록’에서 잘 드러난다. “바일의 리만 공간 개념 확장과의 기하학적 해석”이라는 제목을 가진 이 부록에서 라이헨바흐는 실제로 바일의 이론 역시 물리적 세계 속 측정 물체와 경험적으로 동등화될 수 있음을 보인다. 중력장에 관해서는 측정 막대와 원자 시계가 그 지시자라면, 전자기장에 대해서는 단위 질량을 갖고 전기적 전하를 갖는 질점들의 속도 벡터가 그 지시자일 수 있다는 것이다.³⁴⁷⁾ 이처럼 라이헨바흐는 전기장을 중력장과 같이 ‘기하학화’하더라도, 단순한 수학적 기하학화에 머무르지 않고 전기장에 물리적 의미를 부여하는 ‘물리적 동등화’를 중력장에서처럼 이루어낼 수 있음을 보인 것이다.

하지만 라이헨바흐가 여기서 지적하는 것은, 전자기장에 물리적 대상을 동등화시켜 이를 기하학적으로 해석한다고 하더라도 이 해석은 전자기적 현상에 대한 기존의 경험적 지식에 대한 ‘수학적 재해석’일 뿐 새로운 지식을 우리에게 제공하지 못한다는 점이다. 상대론은 중력장의 기하학적 해석을 통해 기초 측정 물체인 막대와 시계의 행태에 대해 기존의 중력 이론이 예측하지 못했던 새로운 경험적 사실들을 예측했고 이것이 입증되었던 반면, 전자기장에 대한 바일의 기하학적 해석은 전하를 띤 질점의 속도 벡터와 관련하여 기존의 전자기학과는 차별화되는 새로운 경험적 사실들을 예측하지 못했기 때문이다.

라이헨바흐가 리만 기하학의 일반화를 통해 전자기장을 해석하려는 시도를 비판한 것은 다음과 같은 이유 때문이었다. 설혹 바일과 같이 전자기장을 기하학적으로 해석할 수 있다 하더라도, 이러한 해석은 등가 원리와 같은 ‘경험에 기초한 원리’에 기반하지 않을 뿐만 아니라, 전기장을 물리적으로 구현하는 현상(전하를 띤 질점의 속도 벡터)에 관한 새로운 예측을 하지 않고, 단지 수학적인 ‘단순성’ 혹은 ‘자연스러움’을 근거로 추구한 것³⁴⁸⁾이기

하고자 했다. 양자 물리학자들이 볼 때 연속 이론을 추구하는 학자들은 관측가능성 기준을 만족하지 않는 영역에 연속적 장의 개념을 적용하려는 인식론적으로 부적절한 처사를 하는 것이다.

347) 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986)에 누락된, 미출간 영어번역원고 49절에서의 논의 참조.

348) 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986)에 누락된, 미출간 영어번역원고 50절에서의 논의 참조.

때문이다. 라이헨바흐는 막대와 시계를 중력장의 지시자로서 받아들이면서 이러한 측정 도구들이 보이는 특수한 행태를 일종의 명백한 경험적 사실로서 수용했다. 물론 그는 추가적인 이론적 작업을 통해 측정 도구들의 행태를 설명하는 것을 환영했을 것이지만, 그러한 설명이 이루어진다고 해서 기존에 우리의 경험을 통해 알려진 측정 도구들의 행태가 변하지는 않는다고 보았다. 결국 라이헨바흐는 시공간의 기하학적 형태가 계량적인 측정 도구들을 통해 경험적으로 결정될 수 있다고 보았으며, 전기장을 기하학화 하더라도 이에 관련된 전기장의 지시자를 물리적으로 제시하고 이것의 행태에 관한 새로운 경험적 예측을 제시할 것을 요구한 것이다.

아인슈타인은 연속적인 장이론을 추구하는 관점에서 이와 같은 라이헨바흐의 입장에 만족하지 못했다. 아인슈타인이 실제로 원했던 것은 단순히 수학적 아름다움만을 추구하는 것이 아니라, 이론 속에 등장하며 이론에 경험적인 의미를 부여하는 기초적인 측정 도구의 행태 역시 이론의 기초 법칙을 통해 설명하는 것이었다. 즉, 이전까지는 이론에 의해 설명되지 않았던 측정 도구들의 행태를 이론을 통해 설명함으로써, 이론 내 서로 구분되는 이질적인 두 종류의 대상들(중력장과 이와는 구분되는 중력장의 탐지체)이 존재하지 않게끔 만드는 것이었다. 이를 물리학 이론의 ‘완전성(completeness)’ 추구라 부른다. 다만 이러한 완전성 추구 과정에서 일반 상대론의 등가 원리 같이 이론 전개에의 기준이 되는 경험적 원리가 없었기에, 아인슈타인은 수학적이고 사변적인(speculative) 방법론에 의존하여 더 완전한 이론을 추구하려 했다.

형식적 관점에서 보면 특수 상대론은 전기장과 자기장을 전자기장으로, 일반 상대론은 중력장과 관성장을 중력관성장으로 통합했다. 자신이 물리학에서 패러데이(Faraday) 이래 시작된 장이론의 프로그램을 추진하고 있다고 생각했던 아인슈타인은, 상대론의 다음 단계가 전자기장과 중력관성장을 통합하는 장이론을 구축하는 데 있다고 보았다. 이러한 상황에서 그가 직면했던 문제는 그가 자신이 상대론을 진행할 때 활용한 바 있었던 것과 유사한 경험주의적 사고를 활용하기 어려웠다는 데 있었다. 상대론의 경우 빛 신호, 강제 막대, 자연 시계와 같은 구체물을 활용한 ‘사고 실험’이 이론 전개에서 결정적인 역할을 했던 반면, 통일장 이론에서는 상대론에서와 유사한 경험적 대응물을 찾을 수 없었다. 또한 아인슈타인은 상대론에서 별빛의 태양 근처에서의 겉보기 위치 변화와 같이 구체적으로 시험이 가능한

예측을 산출할 수 있었지만, 통일장 이론과 관련해서는 그와 같은 시험 가능한 예측을 산출하지 못했다.

그러므로 아인슈타인이 푸앵카레를 내세우며 일종의 전체론적 관점에서 규약주의를 옹호한 것에는 두 가지 측면이 있다. 첫째, 아인슈타인의 규약주의는 푸앵카레와는 차별화되는 그 나름의 맥락을 가진 것이었다. 통일장 이론이 상대론과 달리 직접적인 경험적 의미를 얻지 못하는 상황에서, 아인슈타인은 자신의 통일장 이론 추구를 정당화하기 위해 기존 이론에서 당연하게 전제된 기초 측정 물체의 경험적 행태에 대해 추가적인 이론적 설명을 ‘요구’했다. 그리고 이러한 ‘요구’를 통일장 이론이 제공해 줄 수 있다면 비록 간접적인 방식으로라도 자신의 이론 추구를 합리화시킬 수 있으리라 생각했다. 둘째, 이러한 ‘규약주의’의 관점을 취한 것 역시 물리학자인 아인슈타인이 철학적으로는 일종의 ‘기회주의자’적인 태도를 보인 것으로 이해할 수 있다. 결국 아인슈타인은 일종의 철학적 관점인 ‘규약주의’를 자신의 물리학 탐구를 정당화 및 합리화하는 데 활용한 것이다.

만약 라이헨바흐가 주장한 상대론의 철학적 의의가 물리적 기하학의 경험적 결정 가능성이라면, 과연 라이헨바흐에 대한 아인슈타인의 비판은 라이헨바흐의 주장을 반박한 것일까? 그렇지 않다. 설혹 아인슈타인이 물리학은 측정 도구들의 특정한 기초 행태마저도 이론적으로 설명하는 것이 바람직하다고 생각했다고 하더라도, 막대와 시계 같은 측정 도구들의 행태가 중력장을 나타낸다는 경험적인 사실은 변하지 않기 때문이다. 어쩌면 아인슈타인은 측정 도구들의 행태를 설명하기 위해 물리학의 법칙들을 변경하고 물리적 기하학을 유클리드 기하학으로 유지하고자 하는 푸앵카레의 입장을 지지한 것 아닐까? 이는 전혀 그럴듯하지 않은 추론이다. 물리학에 리만 기하학을 도입하여 중력 이론을 개발한 장본인이며 물리학의 단순성이 갖는 중요성을 여러 차례 강조했던 아인슈타인이 그와 같은 주장을 했을 것이라고 보기는 어렵다.

따라서 아인슈타인이 지적한 것은, 라이헨바흐의 말처럼 미분력(물리적 힘)을 우리의 물리적 지식에 비추어 교정하고 보편력(계량적 힘)을 정의를 통해 제거한다고 하더라도, 이러한 과정을 통해 정의된 강제 막대 혹은 자연 시계의 개념에는 물리학 이론 전체의 지식이 반영되어 있으므로 측정 도구들을 통한 경험적 측정 결과에 완벽한 확실성을 부여할 수는 없다는 것이었다. 이러한 아인슈타인의 지적은 원칙적으로 옳다.³⁴⁹⁾ 왜냐하면 우리가

상대론을 통해 비로소 이전까지 경험적으로 식별할 수 없었던 측정 물체들의 경험적 행태를 식별할 수 있었던 것처럼, 이후 물리학 발전에 따라 그와 유사한 상황이 발생하지 않을 것이라 보장할 수 없기 때문이다. 그러나 이러한 한계는 순수 수학을 제외한 모든 자연과학적 지식이 갖는 경험적 한계라 할 수 있다. 어떤 종류의 경험적 명제라도 개연성을 넘어선 ‘확실성(certainty)’에까지 이를 수는 없기 때문이다.

또한, 비록 경험적 대상들의 행태에 대한 이론적 설명이 부족할 수 있을지언정, 그 대상들의 실제적인 행태에 대한 측정은 이와 관련된 지식과는 독립적으로 비교적 정확하게 이루어질 수 있다는 점에 주목하자. 설혹 아인슈타인이 추구했던 종류의 이론이 측정 도구들의 행태를 장방정식을 통해 설명할 수 있다고 해서 이 이론으로 인해 측정 도구들이 세계 속에서 보이는 행태마저 변하지는 않기 때문이다. 이와 관련하여 캐리에르(Carrier)는 기초 측정 도구에 관한 동등화 정의의 ‘순환성’ 문제를 극복하고 물리적 기하학의 경험적 결정이 객관적으로 이루어질 수 있음을 보인 바 있다.³⁵⁰⁾ 캐리에르의 철학적 분석 결과는 우리의 논의를 위해서 중요하므로 이를 좀 더 구체적으로 살펴보겠다.

보편력을 0으로 설정한다는 것은 중력의 효과를 계량 구조 그 자체에 의한 것으로 간주함을 뜻한다. 그런데 문제는 보편력 F_u 와 계량 텐서 g_{ab} 사이에 상호 의존성이 있다는 데 있다. 캐리에르에 따르면 이를 “자기 지칭적 변형(왜곡)이라고 말할 수 있다. 보편력은 계량에 대한 자기 지칭적 변형이며, 계량에 대한 보편력의 영향은 오직 계량에 의존해서만 교정될 수 있다. 즉, 자기 지칭적 변형이 물리적 기하학을 경험적으로 결정하는 데 포함되므로, 이는 순환성에 이르게 하고 기하학은 규약적 요소를 갖게 된다.³⁵¹⁾ 이에 더해 아인슈타인은 설혹 우리가 보편력을 0이라고 설정하더라도,

349) Howard, Don. (2014)에서 하워드 역시 이러한 아인슈타인의 전체론적 관점에 동의하며, 아인슈타인의 입장이 뒤엠(Duhem)의 인식론적 전체론 및 콰인(Quine)의 의미론적 전체론과 가깝다고 본다. 내 생각에 이러한 전체론적 관점을 취하는 것에는 문제가 없다. 그러나 적어도 일반 상대론에서는 물리적 기하학이 경험적으로 결정되며, 새로운 이론이 계량적 도구의 식별이 가능한 새로운 행태를 예측하지 않는 이상, 아인슈타인의 전체론적 입장이 라이헨바흐의 경험론적 입장(물리적 기하학에 관해)을 논박했다고 볼 수는 없다.

350) Carrier, Martin. (1993)에서의 논의 참조. 이 논문에서 캐리에르는 계량적 절차에 의존하지 않고 자유 입자 운동 궤적을 식별할 수 있음을 주장한다. 단, 캐리에르가 말하는 절차에서는 강제 막대가 아니라 시험 입자가 사용되고 있다.

측정 물체 정의의 이론 적재성으로 인해 미분력에 관련해서도 물리적 기하학이 미결정적인 상태로 남는다고 주장했다. 문제는 우리가 자유 운동하는 시험 입자와 빛 광선을 이용한 측정을 한다고 해도 미분력과 계량 사이의 상호 의존성에 의한 미결정성은 사라지지 않는다는 것이다.³⁵²⁾

캐리에르는 이런 미결정성 문제와 관련하여 그뤼엔바움(Gruenbaum)이 제시한 바 있는 해결책을 검토한다. 그뤼엔바움은 미결정성을 해결하기 위한 두 가지 방법을 제시했다. 첫째, 연속적 근사의 방법. 둘째, 변형(왜곡)되지 않은 사례들의 선택.³⁵³⁾ 첫째 방법의 경우, 원래 가정되었던 물리적 기하학과 실제의 물리적 기하학 측정 결과 사이에 차이가 날 때 일종의 ‘교정 절차’를 반복적으로 적용하면서 가정된 기하학과 측정된 기하학을 수렴해나가는 방법을 취한다. 그러나 이 방법의 경우 우주 내의 물질-에너지 분포가 계속 변하는 등의 이유로 이를 성공적으로 적용하기 힘들다. 캐리에르에 따르면 우리는 첫째 방법과 달리 둘째 방법을 성공적으로 사용할 수 있다. 다만 이때 우리는 측정 막대를 사용하기보다는 자유 입자의 운동 궤적을 사용해야 한다. 막대의 경우 이에 작용할 수 있는 물리적 영향력을 배제하는 것이 어렵지만, 자유 입자의 운동 궤적이 측지선을 따르는지 측지선에서 벗어나는지의 구분은 비교적 객관적으로 이루어질 수 있기 때문이다.³⁵⁴⁾

이렇듯 캐리에르는 보편력을 0으로 설정하는 것으로 인해 물리적 기하학의 ‘규약성’을 완전히 제거할 수는 없음을 인정하면서도, 적어도 미분력의 경우 자유 운동 입자의 궤적을 경험적으로 측정함으로써 이론 적재성을 극복하고 객관적인 방식으로 물리적 기하학을 결정할 수 있음을 보였다. 캐리에르는 말한다. “...즉, 물리적 기하학에 대한 분리된 접근이 가능하다... 순수한 사례들이 선택될 수 있으며 일반성을 잃지 않는 범위에서 자기 지칭적인 변형은 회피할 수 있다.”³⁵⁵⁾ 이는 실혹 동등화 정의에 이론이 적재되어 있다고 하더라도, 그와 같은 순환성의 문제가 특정한 실험 절차의

351) Carrier, Martin. (1993), p. 6.

352) Carrier, Martin. (1993), p. 10.

353) Carrier, Martin. (1993), p. 10.

354) Carrier, Martin. (1993), p. 17.

355) Carrier, Martin. (1993), p. 18. 논문의 마지막 부분에서 캐리에르는 여전히 ‘보편력 제거’에 의한 물리적 기하학의 규약성이 남아 있음을 지적하고 있다. 그러나 내가 주장한 바 있듯, ‘보편력 제거’라는 방법론적 원리를 수용하지 않을 특별한 이유가 제시되지 않는 이상 이러한 종류의 ‘규약성’은 우리가 가진 전체 자연과학적 지식의 기초적인 전제라고 보아야 할 것이다.

반복적인 적용을 통해 객관적으로 해결될 수 있음을 의미한다. 만약 동등화 정의가 합리적이고 그 정의에 기반한 경험적 결정이 객관적으로 이루어질 수 있다면, 아인슈타인이 우려하는 문제는 해결될 수 있다.

적어도 상대론에서는 잠정적으로 강체 막대와 자연 시계의 개념을 사용하고 이 개념들을 이용한 동등화 정의들을 전제함으로써 물리적 기하학이 경험적으로 결정된다. 따라서 라이헨바흐에 대한 아인슈타인의 비판이 성공했다고 보기 어렵다. 물론 인간과 전혀 다른 생물학적 구조를 가져, 인간의 것과 전혀 다른 특성을 가진 측정 도구를 이용하고 아주 다른 동등화 정의를 이용하는 지적 생명체가 존재할 가능성을 부정할 수 없다. 그러나 우리가 그와 같은 상황까지 고려하는 것은 비현실적일 것이다. 강체 막대와 자연 시계 개념의 핵심은 시공간적 운동에 따라서도 측정 도구가 기록하는 공간 간격과 시간 간격이 일정하게 유지된다는 것이며, 이 개념은 우리의 자연과학적 지식 전체에 스며들어 있는 근본적인 전제다. 이러한 전제를 부정하는 형태를 띤 다른 형태의 자연과학을 상상할 수 없는 것은 아니지만, 이런 자연과학은 인간에게 지금과 비교될 수 없을 정도로 복잡하게 여겨질 것이 분명하다.

다만 다음과 같은 상황이 발생하면 문제는 달라진다. 우리가 일반 상대론을 통해 중력과 측정 기준 물체의 행태 사이에 밀접한 관련이 있음을 새롭게 발견한 것처럼, 이와 같은 일반 상대론적 효과를 일종의 근사로 만들면서 지금까지 우리에게 알려지지 않은 새로운 예측을 제시하는 이론이 등장할 수 있다. 그러한 예측은 강체 막대, 자연 시계와 같은 계량적 도구의 행태에 관한 것일 수도 있지만, 라이헨바흐가 예로 제시한 것처럼 전자기장 아래에서 전하를 가진 질점의 속도 백터일 수 있다. 중요한 것은 이때 상대론에서처럼 새로운 방식으로 특정한 경험적 원리에 기반하면서도 측정을 통해 경험적으로 확인할 수 있는 실질적인 예측을 할 수 있어야 한다는 점이다. 이러한 상황이 발생하지 않는 한, 물리적 기하학은 여전히 경험적으로 결정 가능하다고 봐야 한다.

라이헨바흐는 아인슈타인과의 논쟁 직후인 1951년에 출판한 『과학적 철학의 형성』에서 자신에 대한 아인슈타인의 비판에 대해 다음과 같은 방식으로 답했다. 우선 그는 첫 번째 부류의 기술을 다음과 같이 제시한다. “(a) 기하학은 유클리드적이지만, 광선과 측정자를 변형시키는 보편적 힘이 있다. (b) 기하학은 비유클리드적이지만, 보편적 힘이 없다.” 이 두 기술은 같은 경험적 관찰 사실들과 양립할 수 있는 동등한 기술들이다. 두 번째

부류의 기술들은 다음과 같다. “(a) 기하학은 유클리드적이고, 보편적 힘이 없다. (b) 기하학은 비유클리드적이지만, 광선과 측정자를 변형시키는 보편적 힘이 있다.” 이 두 기술 또한 서로 동등한 기술들이다. 그러나 첫 번째 부류의 기술들이 지칭하는 세계와 두 번째 부류의 기술들이 지칭하는 세계는 객관적으로 다르다. 따라서 우리는 측정을 통해 어떤 부류의 기술들이 우리의 세계와 합치하는지를 경험적으로 확인할 수 있다. 먼저 어떤 부류의 기술들이 경험적으로 참인지 확인한 후, 해당 부류의 여러 기술 중 보편력이 없는 기술을 선택할 수 있다.³⁵⁶⁾

예를 들어 서로 다른 부류의 기술들을 견지하는 물리학자 A와 B가 있다고 하자. 비록 두 사람이 다른 이론적 입장을 견지한다고 하더라도, 측정 도구에 관한 합리적인 동등화 정의에 대해 서로 합의한다면 두 부류의 이론적 입장 중 어느 입장이 경험적으로 타당한지 밝힐 수 있다. 이때 A와 B가 같은 방식으로 측정 도구의 행태에 관해 설명할 필요도 없다. 단지 두 부류의 이론적 입장 모두 측정 도구가 경험을 통해 우리에게 세계에 대한 믿을만한 정보를 근사적으로 제공한다는 것에 대해서만 의견이 일치하면 된다. 경험은 이와 같은 방식으로 우리의 이론적 지식이 세계에 대해 타당한지 그렇지 않은지를 알려주는 최종적 보루이자 심판관의 역할을 담당한다. 이처럼 라이헨바흐가 제시한 답변은 물리적 기하학의 경험적 측정 가능성을 다시금 옹호한 것이었으며 이는 경험주의의 관점에서 이루어진 것이었다.

물론 아인슈타인이 강체 막대와 자연 시계가 물리학의 잠정적 기초에 지나지 않는다고 평가했던 것은 사실이다. 복잡한 물리적 구조물인 강체 막대와 자연 시계가 보이는 행태는 설명 없이 전제되어야 하는 기초적 대상이 아니라 추가적인 이론적 설명이 필요한 대상이다. 따라서 우리는 강체 막대와 자연 시계의 행태를 이론 내의 근본적인 방정식들에 의해 설명하는 이론을 ‘완전성’의 측면에서 더 높게 평가할 수 있다. 하지만 물리적 세계의 기하학적 형태를 파악하기 위해서는 측정을 위한 동등화 정의가 전제되어야 하며, 강체 막대와 자연 시계를 통한 합동성의 동등화 정의가 우리가 알고 있는 경험적 사실들과 합치하면서 시공간의 기하학적 형태를 경험적으로 잘 결정한다는 사실에는 변함이 없다. 완전성을 더 높은 정도로 성취한 새로운 이론이 측정 도구들의 행태를 잘 설명할 뿐만 아니라 이들의 행태에 대한 새로운 예측을 제시할 가능성이 없지는 않지만,

356) 한스 라이헨바흐, 김희빈 옮김 (1951/1994), 159-162쪽에서의 논의 참조.

설혹 이러한 일이 일어난다고 하더라도 물리적 기하학의 경험적 결정이 가능하다는 사실에는 변함이 없을 것이다.

물리적 기하학에 관한 ‘경험주의’와 ‘규약주의’ 모두 과학 이론의 타당성을 보장하는 최후의 보루가 ‘경험’에 있다는 점에서는 동의한다. 그리고 두 입장 사이의 미묘한 차이와 경쟁은 철학적 논쟁의 차원에서만 끝나지 않고 새로운 물리학 탐구를 위한 발견법을 제시했다. 헬름홀츠와 푸앵카레 사이의 철학적 성찰과 논쟁이 결과적으로 시간과 공간을 물리적으로 구현한 이론인 상대론이 탄생하는 자극제가 되었다면, 라이헨바흐와 아인슈타인의 철학적 성찰과 논쟁은 ‘경험주의’와 ‘규약주의’라는 관점 아래에서 이전과는 차별화되는 종류의 통찰을 제공해 준다. 이미 19세기에 헬름홀츠와 푸앵카레는 ‘자유 운동’하는 측정 기준 물체에 체계적인 물리적 힘이 적용하는지의 문제를 두고 논쟁을 벌인 바 있다.

20세기의 라이헨바흐-아인슈타인 논쟁에 이르러 논점은 다소 달라진다. 라이헨바흐의 경우 전기장의 기하학화 그 자체를 반대하지는 않았다. 다만 그는 바일과 아인슈타인처럼 전기장의 기하학화를 통한 이론적 통합을 이루려고 시도할 때도, 상대론에서와 마찬가지로 이론이 새로운 경험적 내용을 기초 측정 물체의 행태 변화를 통해 제시해야 한다고 요구했다. 아인슈타인은 현실적으로 이 요구를 수용하지 못했지만, 그렇다고 라이헨바흐의 경험주의적 관점을 순순히 받아들이지도 않았다. 그는 일종의 전체론적 관점을 무기로 삼아, 소극적으로는 물리학 이론의 ‘완전성’이 제고된다면 이론의 완전성 추구를 정당화할 수 있다고 주장했다. 더 나아가 그는 완전성을 추구하는 통일 이론이 상대론에서처럼 기존의 경험적 지식을 넘어서는 새로운 예측을 제시할 수 있기를 기대했다.

푸앵카레가 ‘수학적 단순성’을 근거로 물리적 기하학을 유클리드 기하학으로 유지하는 것을 정당화하려 한 것과 유사한 맥락에서, 아인슈타인은 상대론이 물리학 전체를 ‘단순화’했다는 논리로 이를 정당화했고, 통일장 이론의 추구가 물리학의 ‘완전성’을 높인다는 논리를 제시했다. 이는 넓은 의미에서 ‘규약주의’ 전통에 속하며, 슐리크와 카르납 역시 이러한 ‘규약주의’의 전통 아래에 있다. 그러나 상대론을 시간과 공간의 물리적 구현으로 이해하는 관점에서 보면, 상대론 추구 과정에서 경험주의 관점을 주로 활용했던 아인슈타인은 상대론 이후 일종의 철학적 ‘입장 전환’을 한 것이며, 이는 물리학 탐구를 위해 철학적 자원을 적극적으로 활용하는 아인슈타인 특유의

‘기회주의적’인 태도에서 비롯된 것이었다.

제5절. 결론

논리경험주의를 대표하는 라이헨바흐의 시공간 철학의 핵심 주장은 물리적 기하학의 ‘규약주의’가 아닌 ‘경험주의’였다. 라이헨바흐는 푸앵카레의 규약주의에 반대하여, 만약 길이와 시간에 관한 합동성의 정의를 결정한다면 물리적 기하학의 선택은 규약이 아니라 경험을 통해 이루어짐을 주장했다. 이때 강체 막대와 자연 시계와 같은 기초 측정 물체에 대한 정의가 핵심적 역할을 한다. 만약 우리가 ‘미분력’을 교정하고 ‘보편력’을 제거한다는 내용을 포함하면 물리적 기하학의 경험적 결정 가능성은 보장된다. 미분력의 교정은 우리의 물리적 지식에 기반하며 보편력 제거의 원리 역시 인식론적으로 합당한 원리이므로 정의들 속 규약적 요소는 최소화된다. 이처럼 동등화 정의의 규약성을 최소화함으로써 물리적 기하학의 경험적 결정이 가능해진다.

특수 상대론에서는 물리적 대상들 사이의 기하학적 관계를 유클리드적으로 단일하게 설정할 수 있으므로 계량 관계는 고정적이며 일종의 ‘구성 원리’가 된다. 일반 상대론에 이르면 중력에 의해 물리적 대상들 사이의 계량 관계가 달라지므로 우리는 특정한 계량 관계가 보편적으로 적용된다고 전제할 수 없다. 오직 미소 시공간 영역에서만 유클리드적 계량 관계가 성립할 뿐, 시공간 영역이 유한히 확대되고 시간에 따라 물질-에너지 분포가 변화할 때 계량 관계는 변하며 이러한 변화를 기술하는 ‘연결 원리’가 아인슈타인의 중력장 방정식이다. 따라서 일반 상대론적 시공간의 기하학적 형태는 경험적으로 결정된다. 문제가 되는 물리적 상황에 따라 계량 관계는 변화하며, 그렇기에 계량 관계는 각각의 상황에서 측정 도구들을 통한 실질적인 측정을 통해 경험적으로 결정된다.

상대론적 시공간에 대한 라이헨바흐의 재구성이 보인 것처럼 적어도 상대론에서는 물리적 기하학을 경험적으로 결정하는 것이 가능하다. 따라서 물리적 기하학의 경험적 결정 가능성에 관한 1951년의 ‘라이헨바흐-아인슈타인 논쟁’은 상대론을 넘어서는 좀 더 일반적인 맥락에서 이해해야 한다. 이 논쟁은 시간과 공간을 물리적으로 성찰하는 하나의 전통 아래 구분되는 서로 다른 철학적 입장인 ‘경험주의’와 ‘규약주의’ 사이의 논쟁이었다. 리만 이후 헬름홀츠는 ‘경험주의’를 푸앵카레는 ‘규약주의’를 대표했다. 아인슈

타인은 이 두 사람의 철학적 논의를 바탕으로 시간과 공간을 물리적으로 구현하는 상대론을 개발했고, 사실상 그가 상대론을 전개할 당시에 취했던 관점은 ‘경험주의’에 가까웠다. 그러나 아인슈타인은 상대론을 완성한 직후부터 두 관점 사이에서 애매한 관점을 취하다가, 시간이 지날수록 점점 더 ‘규약주의’에 가까워지는 모습을 보였다.

라이헨바흐는 상대론의 경험주의적 의의를 최대한 살리며 다음과 같은 관점을 제시했다. 규약적 요소를 최대한 제약하여 기초 측정 물체를 정의하면 물리적 기하학은 충분히 경험적으로 결정된다. 물리학 이론의 기초 개념에 경험적 내용을 제공하는 ‘동등화 정의’는 필수적이며, 어떤 새로운 이론이 등장해도 이 이론의 기초 개념에는 경험적인 의미가 부여되어야 한다. 이에 반해 아인슈타인은 기초 측정 물체의 정의에 상당한 이론적 요소가 포함되므로, 그 경험적 내용을 그대로 받아들이는 것을 넘어 이를 추가로 이론적 관점에서 설명할 필요가 있다고 주장했다. 아인슈타인은 이론의 ‘단순성’과 ‘완전성’을 근거로 ‘규약주의’의 연장선 위에 있는 자신의 물리학 추구를 철학적으로 합리화하려 했다.

이상과 같이 라이헨바흐-아인슈타인 논쟁은 물리학 속 추상적 개념(시간, 공간)을 물리적으로 구현하는 전통 속 주요한 두 입장인 ‘경험주의’ 대 ‘규약주의’ 사이의 논쟁으로 이해할 수 있다. 이는 둘의 논쟁을 일종의 ‘귀머거리의 대화’로 해석하는 지오바넬리의 관점에 비해 더 합리적이다. 지오바넬리는 아인슈타인이 리만적 수학 전통에, 라이헨바흐는 헬름홀츠적 수학 전통에 서 있다고 주장했다. 그러나 상대론적 시공간에 대한 철학적 논의를 ‘물리적 전통’이 아닌 ‘수학적 전통’ 아래의 논의라 주장하며, 둘 사이에 중요한 철학적 관점 차이가 있던 헬름홀츠와 푸앵카레의 입장을 하나의 단일한 전통으로 묶는 지오바넬리의 주장은 유지되기 어렵다.

라이헨바흐-아인슈타인 논쟁은 상대론 이후 통일장 이론의 경험적 성공 여부가 결정되지 않은 상황에서 누가 이겼다고 결론 내릴 수 없는 ‘진행 중’인 논쟁이었다.³⁵⁷⁾ 다만 시간과 공간에 대한 규약주의에 대항하는 라이헨바흐의 경험주의적 관점은 여전히 합리적으로 견지될 수 있다. 또한 그의 경험주의적 관점은 아인슈타인의 규약주의적 관점 못지않게 물리학 탐구를 위한 유용한 발견법적 지침을 제공할 수 있다.

357) 하지만 왜 자연 속에 이상적인 기초 측정 물체들이 존재하는지, 왜 그러한 물체들이 고도의 규칙적인 행태를 보이는지를 설명하는 것은 여전히 필요하다.

제8장. 결론

20세기 초반에 등장하여 시간과 공간에 대한 새로운 통찰을 제시한 상대성 이론은 시간과 공간을 물리적으로 사유하는 전통 아래 등장한 이론이다. 17세기 말에 뉴턴이 제시한 물리학 속 시간과 공간은 그 수학적이고 절대적인 특성으로 인해 물리적 세계 바깥에 추상적인 개념으로 남아 있었다. 뒤이은 18세기에 철학자 흄과 칸트가 별도의 철학적 시간 공간 이론을 제시했지만, 이들의 관점이 시간과 공간을 물리적으로 구현하는 직접적 계기를 마련하지는 못했다. 19세기 중엽에 이르러 비로소 리만이 제시한 혁신적인 기하학 개념이 시간과 공간을 물리적으로 구현하기 위한 결정적 단서를 제공했다. ‘측정 기준 물체 길이의 위치 독립성’과 ‘선 요소의 이차 미분 형식 표현’을 기하학의 기초인 두 ‘경험적 가설’이라 지적했던 리만의 통찰은 이후 헬름홀츠와 푸앵카레에게 이어졌다. 헬름홀츠는 측정 물체의 ‘자유 운동 원리’를 통해 공간의 기하학적 형태를 경험적으로 결정할 수 있다는 ‘경험주의’ 관점을 제시했다. 푸앵카레는 측정 기준 물체에 적용되는 물리학 법칙을 조정할 때 특정 유형의 물리적 기하학(유클리드 기하학)을 선택할 수 있다는 ‘규약주의’ 관점을 제시했다.

이처럼 리만, 헬름홀츠, 푸앵카레의 논의가 시간과 공간의 물리적 성찰을 위한 철학적 배경을 제공했다면, 이러한 철학적 담론을 실질적인 물리학 이론으로 구현한 것이 아인슈타인의 상대성 이론이다. 이 이론에서는 이전까지 수학적 차원에 머물러 있던 시간과 공간의 개념이 자연 시계, 측정 막대, 빛 신호의 개념을 통해 물질적으로 구현된다. 특수 상대론은 관성계라는 제한된 기준계에서, 일반 상대론은 특수 상대론에서 등장하는 관성계를 일종의 ‘미분적(극한적) 사례’로 포함하는 가속 운동하는 기준계에서 자연 시계와 측정 막대가 보이는 행태를 서술함으로써 시간과 공간을 물리적으로 구현한다. 이러한 물리적 구현 결과 뉴턴의 중력 이론을 대체하는 새 중력 이론이 탄생한 것은 놀랄만한 성과였다. 시간과 공간을 물리적으로 구현하는 과정에서 상대성 원리, 최초 신호로서의 빛 원리, 등가 원리 등과 같은 경험적 기초 원리들이 핵심적 역할을 담당했다.

문제는 이와 같은 상대론의 출현과 더불어 시간과 공간에 관한 여러 철학적 문제들이 제기되었고, 이 문제들에 대해 물리학과는 별도의 철학적 해명을 할 필요성이 생겼다는 것이다. 아인슈타인이 상대론을 통해 이전까지는

물리학의 명시적인 근본 법칙이 아니었던 법칙(상대성 원리, 빛 원리)을 새롭게 물리학의 근본 법칙으로 격상시키고, 같은 개념에 대해서 이전의 물리학과는 다른 방식으로 정의(동시성, 물체의 길이)하며, ‘점-일치’의 총체를 물리적 객관성의 유일한 담지자로 주장하고, 일반 공변성 추구를 통해 시간과 공간의 물리적 객관성이 상실되었다고 주장한 것은 물리학적 차원을 넘어선 철학적 차원의 문제들을 불러일으켰다. 그리고 이러한 문제들에 대한 별도의 철학적 분석과 해명이 필요한 상황이었다.

20세기를 대표하는 논리경험주의 시공간 철학은 이상과 같이 상대론이 시간과 공간에 관해 제기한 철학적 문제들을 분석해 나가는 과정을 통해 형성되었다. 물리학에서 철학으로 전향한 쉐리크의 상대론 해설은 ‘철학적 대리인’이라 할 수 있을 정도로 아인슈타인의 철학적 관점을 충실하게 대변했다. 특히 쉐리크가 제시한 철학적 개념인 ‘동등화의 유일성’은 아인슈타인의 ‘점-일치’ 논증과 부합했으며, 쉐리크 또한 규약주의라 부를 수 있는 일종의 전체론적 관점에서 이론의 ‘단순성’을 통해 상대론 속 새로운 시간과 공간 개념을 정당화했다. 그러나 쉐리크의 해설은 물리학자의 관점을 넘어서는 체계적인 인식론적 분석이 되지 못했다. 이러한 상황에서 카시러는 상대론의 철학적 의의를 신칸트주의(논리적 관념론)의 관점에서 해석하고자 했고, 그의 관념론적 해석은 쉐리크와 아인슈타인에게 상대론의 경험적 의의를 적절하게 평가하지 않는 해석으로 여겨졌다. 라이헨바흐와 카르납은 바로 이와 같은 상황에서 등장한 젊은 철학자들이었다.

라이헨바흐와 카르납은 둘 다 신칸트주의적 인식론에서 출발하여 상대론적 시간과 공간을 철학적으로 분석했지만, 이러한 분석 과정을 거치며 서로 다른 방향으로 나아갔다. 라이헨바흐는 1920년 교수자격 취득논문(『상대성 이론과 선형적 지식』)을 통해 과학적 지식 속 ‘구성적 원리들’이 어떻게 역사적으로 ‘변화할 수 있었는지’의 문제를 분석했고, 이제 과학적 인식론의 방법은 칸트식의 ‘이성에 대한 분석’이 아니라 ‘과학적 지식에 대한 분석’으로 변화되어야 한다는 결론을 내렸다. 이후 그는 상대론적 시간과 공간에 관한 철학적 분석을 ‘경험주의’의 관점에서 체계적으로 진행해나갔고, 이는 헬름홀츠의 경험주의 정신을 이어받은 철학적 해명의 작업이었다. 『상대성 이론의 공리화』(1924년), 『시간과 공간의 철학』(1928년)은 그러한 이론 구체적인 경험주의적 분석의 결과물이었다.

카르납은 1921년 박사학위 논문에서 물리학 속 ‘공간’ 개념 일반에 대해

논했다. 특히 그는 논리적 재구성 과정을 통해 직접적인 확실성을 갖는 감각 지각 위에 덧붙는 다양한 종류의 ‘규약’들 및 각각의 규약을 선택했을 경우의 장단점을 분석함으로써, ‘규약주의’의 관점에서 서로 다른 이론적 관점들 사이의 논쟁을 ‘중재’하는 면모를 보였다. 이처럼 카르납은 논리적 분석과 재구성의 작업을 통해 공간 개념과 관련하여 학자들 사이에서 벌어지고 있는 철학적 논쟁을 ‘해소’함으로써 푸앵카레가 제시한 ‘규약주의’를 발전시켜 이를 푸앵카레 사후 등장한 상대론적 시간과 공간에 대해서도 유효한 철학적 입장이 되도록 변형시켰다. 이와 더불어 그는 기호논리학을 경험주의에 적용하여 과학적 지식을 포함하는 인간 인식 일반을 정당화하려는 러셀의 인식론적 프로그램을 발전시켰다. 이후 비엔나의 술리크와 합류한 카르납은 「물리적 개념 형성」(1926년), 『세계의 논리적 구조』(1928년)를 출판하며 논리실증주의를 대표하는 이론 일반적 인식론 프로그램을 강력하게 추진했다.

20세기 전반기 시공간 철학의 대표자가 술리크와 카르납이 아닌 라이헨바흐가 될 수 있었던 것은, 라이헨바흐가 경험주의의 관점에서 상대론적 시간과 공간에 대한 상세한 분석을 진행하여 이에 대한 철학적 해명을 비교적 성공적으로 수행했기 때문이다. 이러한 성공은 그의 경험주의적 분석이 시간과 공간을 물리적으로 구현한 결과 등장한 이론인 상대론의 핵심 특징에 잘 부합했기 때문에 가능했다. 라이헨바흐는 빛 신호로 특수 상대론의 시공간 질서를 수립할 수 있으며, 측정 막대와 자연 시계 같은 측정 도구들은 이러한 빛 기하학을 따름을 보였다. 또한 그는 일반 상대론에 이르러 시공간의 계량적 특성들이 변함에 따라 계량 공리들은 구성적 역할을 하지 못하게 되지만 시공간의 위상적 공리들은 유지되며 여전히 구성적 역할을 함을 보일 수 있었다. 특히 그는 공간 질서가 시간 질서로 환원되고 시간 질서는 인과적 빛 신호에 기반하므로, 세계의 일반적 구조는 물리적 신호에 기반한 인과적 구조라는 결론을 도출했다.

문제는 라이헨바흐 시공간 철학의 핵심적인 특징이 ‘경험주의’라는 사실이 그의 사후 제대로 인지되지 못했다는 것이다. 이는 라이헨바흐 사후 논리 경험주의의 대표자가 카르납이 됨으로써 둘 사이에 존재했던 중요한 철학적 차이가 가려졌기 때문이다. 카르납은 1921년 박사학위 논문 이래 일관되게 시공간에 관한 ‘규약주의’의 관점을 취했다. 이에 반해 라이헨바흐는 1920년 교수자격 취득논문 이후 시공간에 관한 ‘경험주의’ 관점을 체계적으로 발전시켰다. 제한된 수의 경험적 명제들을 시공간 질서의 공리들로 삼고,

일반 상대론에서는 측정 물체에 기초한 실험을 통해 물리적 기하학의 계량적 형태를 결정해야 한다고 본 라이헨바흐의 관점은 분명 ‘규약주의’와는 구분되는 ‘경험주의’의 관점을 취하고 있었다. 하지만 라이헨바흐 사후 출판된 『시간과 공간의 철학』 영문판에 카르납이 쓴 서문 및 물리학의 철학적 기초에 관한 카르납의 저서 『물리학의 철학적 기초』 출간으로 인해 두 사람의 시공간 철학 모두 ‘물리적 기하학의 규약주의’라는 광범위한 평가가 형성되었다. 그러나 이러한 평가와 달리 라이헨바흐의 시공간 철학은 ‘규약주의’가 아닌 ‘경험주의’적 특징을 가지고 있었으며, 그 핵심 결론은 ‘시공간의 인과적 이론’이었다.

철학자 라이헨바흐와 물리학자 아인슈타인 사이의 관계는 양면적이었다. 라이헨바흐는 상대론적 시공간에 대한 철학적 분석을 통해 과학철학자로서의 명성을 얻었고, 아인슈타인은 라이헨바흐가 베를린 대학의 물리 철학 교수로 부임하는 데 직접적인 영향력을 행사했다. 하지만 상대론의 철학적 의의와 관련하여 둘 사이의 의견이 완전히 일치한 것은 아니었다. 아인슈타인은 일반 상대론에 이르러 시간과 공간이 물리적 객관성을 상실했다고 진단했지만, 라이헨바흐는 여전히 시간과 공간은 경험을 통해 파악되는 위상적인 특성을 유지한다는 의미에서 경험적으로 객관적이라고 주장했다. 또한 아인슈타인은 자신의 통일장 이론 추구에 비추어 물리적 기하학이 측정 물체를 통해 경험적으로 결정될 수 있다는 라이헨바흐의 입장에 반대하며 일종의 전체론적 규약주의의 입장을 견지했지만, 이에 반해 라이헨바흐는 우리가 어떤 종류의 이론을 취하더라도 이 이론과 관련된 특수한 물리적 과정을 일종의 ‘동등화 정의’로 선택함으로써 물리적 기하학을 경험적으로 결정할 수 있다는 경험주의적 입장을 견지했다.

이러한 두 사람의 양면적 관계는 두 사람이 시간과 공간을 물리적으로 사유하는 단일한 전통 아래 서로 차별화되는 철학적 입장을 견지했다고 볼 때 가장 잘 이해할 수 있다. 1854년에 리만이 제시한 새로운 기하학 개념 속에는 ‘경험주의’, ‘규약주의’, ‘해석적 기하학 이론’을 위한 단서가 모두 포함되어 있었다. 이 중에서 시간과 공간을 물리적으로 사유하는 것에 관한 철학적 관점은 ‘경험주의’와 ‘규약주의’이며, ‘해석적 기하학 이론’은 이후 크리스토펠, 리치와 같은 수학자들에 의해 발전되었다. 헬름홀츠가 ‘경험주의’를 대표했다면 푸앵카레는 ‘규약주의’를 대표했고, 실제로 아인슈타인이 상대론을 발전시키는 과정에서 핵심적인 역할을 한 것은 ‘경험

주의'였다. 다만 아인슈타인은 상대론 이후 자신의 물리학 추구를 정당화하는 과정에서 '경험주의'의 관점 대신 '규약주의'의 관점을 취하며 자신의 이론적 입장을 철학적으로 합리화시키고자 했다.

라이헨바흐의 '경험주의'와 아인슈타인의 '규약주의' 사이의 논쟁은 헬름홀츠와 푸앵카레 사이의 철학적 논쟁의 연장선 위에 있으면서도 그 구체적인 내용은 다소 달랐다. 헬름홀츠와 푸앵카레는 자유 운동하는 측정 물체의 단위 길이 유지에 관한 철학적 논쟁을 벌였다. 라이헨바흐와 아인슈타인은 물리학의 기초 측정 물체 정의의 이론 적재성, 이론의 완전성 및 물리적 기하학의 경험적 결정 가능성에 관해 철학적 논쟁을 벌였다. 이러한 두 사람 사이의 논쟁과 관련해서 어느 한쪽 편이 결정적인 승리를 거뒀다고 평가하기는 어렵다. 본 논문에서 나는 라이헨바흐의 경험주의적 관점이 아인슈타인의 규약주의적 관점과 대비했을 때 충분히 합리적임을 보임으로써, 아인슈타인의 규약주의적 전체론을 편들어 옹호하며 라이헨바흐의 경험주의를 비판한 바 있는 하워드와 리크먼에 대항하고 '경험주의'와 '규약주의' 사이의 논쟁에서 일종의 평형을 회복하고자 했다.

또한 본 논문에서 나는 물리적 기하학의 경험적 결정 가능성에 관한 라이헨바흐-아인슈타인 논쟁을 19세기에 이루어진 물리적 기하학에 관한 헬름홀츠-푸앵카레 논쟁의 연장선 위에 둬으로써, 둘 사이의 논쟁을 서로 다른 '수학적 전통' 아래 진행된 '귀머거리의 대화'라고 해석한 지오바넬리의 주장을 반박하고자 했다. 비록 지오바넬리가 제시하는 '헬름홀츠적 전통'과 '리만적 전통' 구분에 어느 정도 의의가 있긴 하지만, 철저히 물리학자였던 아인슈타인을 '수학적 전통' 아래 위치시키고 서로 중요한 차이를 갖고 있었던 헬름홀츠와 푸앵카레의 관점을 하나로 묶는 지오바넬리의 해석은 여러 문제점에 직면한다. 이와 달리 라이헨바흐는 헬름홀츠가 대표하는 '경험주의'의 전통을 잇고 아인슈타인은 푸앵카레가 대표하는 '규약주의'의 전통을 잇는다고 해석하면, 둘 사이의 철학적 논쟁을 '귀머거리의 대화'가 아닌 '진정한 논쟁'으로 이해할 수 있으며 두 사람의 철학적 관점이 제시하는 유의미한 발견법적 의의 또한 도출할 수 있다.

본 논문에서 나는 상대론적 시공간의 철학적 의의에 관한 라이헨바흐와 아인슈타인 사이의 논쟁 구도에서 라이헨바흐의 경험주의적 분석을 옹호하고자 했다. 특히 나는 라이헨바흐가 시간과 공간의 경험적 객관성(실재성) 문제와 물리적 기하학의 경험적 결정 가능성의 문제에 대해 상당히 합리적인

철학적 관점을 제시했음을 보이려고 노력했다. 물론 물리학자로서 아인슈타인이 보여준 위대한 창조성과 독창성을 부정할 수는 없다. 다만 이미 그 경험적 성공이 입증된 상대론 속 시간과 공간의 ‘의미’를 분석하고 규명하는 것에서 철학자 라이헨바흐가 제시한 경험주의 해석이 물리학자 아인슈타인의 다소 기회주의적인 규약주의적 해석보다 상대론의 본래 취지에 잘 부합한다고 볼 수 있다. 하지만 라이헨바흐와 아인슈타인 사이의 이러한 철학적 논쟁이 서로 다른 철학 전통 사이에서의 소통 불가능한 격렬한 대립은 아니었다. 오히려 이는 시간과 공간을 물리적으로 사유하는 전통 아래 진행된 상호 경쟁하면서도 협력적인 철학적 논쟁이었다고 보는 것이 적절하다. 이러한 경쟁 및 협력은 라이헨바흐와 아인슈타인이 1919년 처음 만난 이후 평생 친근한 관계를 유지했다는 점³⁵⁸⁾에서 잘 드러난다.

또한 강조할 필요가 있는 것은 상대론적 시간과 공간에 대한 라이헨바흐의 철학적 분석이 철저히 ‘이론 구체적’이었다는 것이다. 이는 1920년대 중반 이후 이론 일반적인 인식론 프로그램을 추진한 술리크 및 카르납과 대조된다. 라이헨바흐 시공간 철학의 성공은 물리학, 화학, 생물학 등 과학의 세부 영역에서 철학이 과학의 내용을 상세히 분석함으로써 과학과는 차별화되는 독창적 성찰을 제공할 수 있음을 의미한다. 이론 일반적이고 논리적인 재구성을 표방하는 과학철학은 1950년대 이후 많은 과학철학자로부터 여러 비판을 받았다. 하지만 이미 논리경험주의 속에 개별과학의 내용을 구체적으로 분석하여 철학적 해명을 제시하는 전통이 존재했으며 그 중심에 라이헨바흐가 있다. 지난 30여 년 동안 논리경험주의 역사에 대한 활발한 재조명이 이루어졌지만 이러한 재조명의 중심에는 그 누구보다 카르납이 있었다. 라이헨바흐 시공간 철학에 대한 철학적 재조명이 없지는 않았지만, 그러한 경우에도 그의 철학이 카시러, 바일, 에딩턴 등 다른 논자들의 철학에 비해 상대적으로 낮은 평가를 받은 것이 사실이다.

본 논문에서 나는 라이헨바흐의 시공간 철학이 20세기 초 상대론의 등장에 따른 칸트 인식론의 위기라는 맥락에서 출현했으며, 시간과 공간을 물리적으로 사유하는 맥락에서 등장한 상대론 속 시간과 공간의 의미를

358) 라이헨바흐가 1926년 베를린 대학에 임용될 당시 아인슈타인이 직접적으로 관여했으며, 프린스턴 고등과학연구소에 있던 아인슈타인이 이스탄불 대학에 있던 라이헨바흐가 미국에서 취직할 수 있도록 노력했다는 기록이 남겨져 있다. 또한 두 사람은 미국에서도 종종 만나 물리학의 철학적 문제에 관해 의견을 나누었다.

적절하게 해명하는 경험주의적 관점임을 보이고자 했다. 이를 위해 19세기에 리만에서 시작하여 헬름홀츠, 푸앵카레로 이어진 물리적 기하학의 철학적 담론을 논했으며, 20세기에 등장한 시간과 공간의 운동학이자 동역학으로서 상대론이 갖는 의의를 짚었다. 또한 상대론에 대한 초기의 철학적 해석을 제시한 쉐리크, 카시러, 라이헨바흐, 카르납을 비교한 후, 라이헨바흐가 경험주의의 관점에서 상대론적 시공간을 체계적으로 재구성함으로써 논리경험주의 시공간 철학을 대표하게 되었음을 보였다. 이와 더불어 상대론적 시공간의 경험적 객관성 및 물리적 기하학의 경험적 결정 가능성과 관련한 라이헨바흐와 아인슈타인 사이의 논쟁이 갖는 의미를 재조명함으로써, 당대의 물리학 이론을 심층적으로 분석하고 이 이론의 철학적 의의에 대해 과학자들과 함께 활발하게 토론하고 논쟁하는 철학자의 모습을 그리려 했다.³⁵⁹⁾

나는 본 논문에서 제시된 논리경험주의 시공간 철학의 의의에 대한 재평가가 오직 역사적 가치만을 가지는 데 그치지 않을 것이라 믿는다. 왜냐하면 시간과 공간에 관한 ‘경험주의’와 ‘규약주의’ 전통 아래에서의 대립은 여전히 오늘날에도 이어지고 있다고 볼 수 있기 때문이다. 또한 논리경험주의 시공간 철학의 핵심이 물리적 기하학의 ‘규약주의’가 아닌 ‘시공간의 인과적 이론’이며 ‘세계 속 인과적 구조의 경험적 객관성’을 긍정하는 것이라면, 이는 오늘날에도 유효한 철학적 관점일 수 있다.³⁶⁰⁾ 만약 빛, 강체 막대, 자연 시계와 같은 기초 측정 물체의 이상화된 물리적 행태가 오늘날까지도 이론적으로 충분히 설명되지 않은 채 이론의 경험적 기초로 가정되고 있고, 아직도 ‘보편력 제거의 원리’와 같은 강력한 방법론적 원리가 과학적 지식의 중요한 정의들 속에 전제되고 있다면, 논리경험주의 시공간 철학에서 비롯된 핵심적인 철학적 통찰은 여전히 유의미하며 오늘날 새로이 재발견될 필요가 있을 것이다.

359) 다만 나의 논문에서는 헤르만 바일(Hermann Weyl), 아서 에딩턴(Arthur Eddington), 볼프강 파울리(Wolfgang Pauli) 등과 같은 ‘철학적 물리학자들’의 상대론 해석을 상세하게 논하지 못했다. 이는 향후 추구될 필요가 있는 연구 과제이다.

360) 예를 들어 이론물리학자 리 스몰린(Lee Smolin) 역시 시간 및 인과적 과정의 실재성을 긍정하고 있다. Smolin. (2013) 참조. 라이헨바흐는 과거-현재-미래로 이어지는 시간 흐름의 실재성을 긍정한 바 있으므로, 향후 ‘시간의 방향’에 대한 라이헨바흐의 철학적 관점을 복원하고 재평가할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- 강형구 (2011), 「라이헨바흐의 ‘구성적 공리화’ - 그 의의와 한계」, 서울대학교 이학석사 학위논문.
- 강형구 (2020), 「라이헨바흐의 ‘상대화된 선험성’ 개념 : 그 출현과 전개」, 『과학철학』 23권 3호 (한국과학철학회), 87-114쪽.
- 강형구 (2021a), 「상대성 이론의 출현과 이에 따른 철학적 문제들」, 『철학연구』 158집 (대한철학회), 1-35쪽.
- 강형구 (2021b), 「상대성 이론에 대한 슐리크와 카시러의 철학적 분석 비교 연구」, 『과학철학』 24권 2호 (한국과학철학회), 31-66쪽.
- 강형구 (2022a), 「상대성 이론과 철학 사이의 관계 설정을 위한 두 시도 : 라이헨바흐와 카르납의 초기 물리 철학(1920-1926) 비교 연구」, 『철학연구』 162집 (대한철학회), 1-35쪽.
- 강형구 (2022b), 「상대성 이론의 철학적 배경 : 시간과 공간에 관한 철학적 탐구의 역사」, 『대동철학』 99집 (대동철학회), 1-30쪽.
- 강형구 (2022c), 「경험주의, 규약주의, 물리적 기하학의 경험적 결정 가능성 : ‘라이헨바흐-아인슈타인 논쟁’ 다시 생각하기」, 『과학철학』 25권 3호 (한국과학철학회), 1-32쪽.
- 강형구 (2022d), 「상대론적 시공간의 합리적 재구성과 물리적 객관성 : 라이헨바흐의 경험주의 시공간 철학 연구」, 『대동철학』 101집 (대동철학회), 1-32쪽.
- 고인석 (2010), 「빈 학단의 과학사상 : 배경, 형성과정, 그리고 변화」, 『과학철학』 13권 1호 (한국과학철학회), 53-81쪽.
- 기우항 (2018), 「비유클리드 기하학의 발전 - 실초곡면 구조의 평행성을 중심으로 -」 (학술원논문집 제57집 1호), 35-68쪽.
- 데이비드 흄, 이준호 옮김 (1994), 『오성에 관하여』 (서광사).
- 루돌프 카르납, 윤용택 옮김 (1966/1993), 『과학철학입문』 (서광사).
- 마이클 프리드먼, 박우석·이정민 옮김 (2001/2012), 『이성의 역학 : 새로운 과학적 철학을 위한 서설』 (서광사).

모리스 클라인, 심재관 옮김 (1972/2016), 『수학사상사』 1, 2, 3권(경문사).

아이작 뉴턴, 이무현 옮김 (2018), 『프린키피아』 (교우사).

알베르트 아인슈타인, 장헌영 옮김 (1916/1960/2012), 『상대성 이론 : 특수 상대성 이론과 일반 상대성 이론』 (지식을만드는지식).

알베르트 아인슈타인, 고중숙 옮김 (1922/2011), 『상대성이란 무엇인가』 (김영사).

알베르트 아인슈타인 · 레오폴트 인펠트, 조호근 옮김 (1938/2017), 『물리는 어떻게 진화했는가』 (서커스).

알베르트 아인슈타인, 홍수원 · 구자현 옮김 (2003), 『나의 세계관』 (중심).

알베르트 아인슈타인, 강형구 옮김 (1923/2009), 「상대성 이론의 기초 개념과 문제들」 (아인슈타인의 노벨상 수상 강연), 미출판 원고.

양리 푸앵카레, 이정우 · 이규원 옮김 (1902/2014), 『과학과 가설』 (에피스테메).

양경은 (2017), 「공간의 본성에 대한 라이프니츠-클라크 논쟁과 홀 논변」, 『철학연구』 제144집(대한철학회), 235-256쪽.

에른스트 마흐, 고인석 옮김 (1883/2014), 『역학의 발달 : 역사적 · 비판적 고찰』 (한길사).

에릭 벨, 안재구 옮김 (1937/1993), 『수학을 만든 사람들』 상·하권 (미래사).

이상욱 (2009), 「비트겐슈타인과 비엔나 모임 : 과학철학적 접점」, 『과학철학』 12권 2호 (한국과학철학회), 151-179쪽.

이 열 (2003), 『시간 공간의 물리학』 (홍릉과학출판사)

이종관 (2010), 「시간 공간의 상대성과 인식의 통일성 : 카시러의 철학으로 본 상대성이론의 인식론적 의미」, 『현상학과 현대철학』 44 (한국현상학회), 89-114쪽.

임경순 편저 (1997), 『100년만에 다시 찾는 아인슈타인』 (사이언스북스).

임마누엘 칸트, 백종현 옮김 (1781/2004), 『순수이성비판』 (아카넷).

전영덕 (1992), 「이론용어의 환원에 관한 문제 : 카르납의 초기 과학관과 그 한계」 (건지철학회 제7차 발표 논문), 1-46쪽.

천현득 (2010), 「시공간의 본성에 관하여 : 구멍 논변을 중심으로」, 『과학철학』 제13권 제2호 (한국과학철학회), 147-171쪽.

- 크리스타 용니켈 · 러셀 맥코마크, 구자현 옮김 (1986/2014), 『자연에 대한 온전한 이해 : 이론물리학, 옴에서 아인슈타인까지』 1-4권 (한국문화사).
- 한상기 (2013), 「20세기 철학에서 과학주의 : 과학적 경험주의와 자연화된 인식론」, 『범한철학』 제69집 (범한철학회), 281-305쪽.
- 한상기 (2016), 「콰인의 분석-종합 구별 다시 생각하기」, 『철학연구』 제140집 (대한철학회), 385-406쪽.
- 한상기 (2017), 「“두 번째 독단”과 콰인의 전체론적 검증주의」, 『철학논총』 제87집 (새한철학회), 489-508쪽.
- 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1920/1965/2015), 『상대성 이론과 선험적 지식』 (지식을만드는지식).
- 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1924/1969/2020), 『상대성 이론의 공리화』 (지식을만드는지식).
- 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986), 『시간과 공간의 철학』 (서광사).
- 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1928/2021), 「바일의 리만 공간 개념 확장과 전기의 기하학적 해석」 (『시간과 공간의 철학』 부록), 미출판 원고.
- 한스 라이헨바흐, 강형구 옮김 (1931/2017), 『원자와 우주』 (지식을만드는지식).
- 한스 라이헨바흐, 김희빈 옮김 (1951/1994), 『자연과학과 철학』 (중원문화).
- 홍성욱 · 이상욱 외 (2004), 『뉴턴과 아인슈타인, 우리가 몰랐던 천재들의 창조성』 (창작과비평)
- Ben-Menahem, Yemima. (2006), “Origins : Poincare and Duhem on convention” in *Conventionalism* (Cambridge University Press), pp. 39-79.
- Bengoetxea, Juan Bautista. (2019), “Intuition and evidential facts in Carnap’s analysis of space”, *Rev. Filos., Aurora, Curibita*, v. 31, n. 54, pp. 910-924.
- Canales, Jimena. (2015), *The Physicist and the Philosopher: Einstein, Bergson, and the Debate That Changed Our Understanding of Time* (Princeton University Press).
- Carnap, Rudolf. (1921), “Who forces laws of nature to hold?”, in *Rudolf Carnap: Early Writings*, A.W. Carus, Michael Friedman, Wolfgang

- Kienzler, Alan Richardson, and Sven Schlotter (eds.) (New York: Oxford University Press, 2019).
- Carnap, Rudolf. (1922), “Space: A Contribution to the Theory of Science”, in *Rudolf Carnap: Early Writings* (Oxford University Press, 2019).
- Carnap, Rudolf. (1923), “On the Task of Physics and the Application of the Principle of Maximal Simplicity”, in *Rudolf Carnap: Early Writings* (Oxford University Press, 2019).
- Carnap, Rudolf. (1924), “Three-Dimensionality of Space and Causality : An Investigation of the Logical Connection Between Two Fictions”, in *Rudolf Carnap: Early Writings* (Oxford University Press, 2019).
- Carnap, Rudolf. (1926), “On the Dependence of the Properties of Space on those of Time”, in *Rudolf Carnap: Early Writings* (Oxford University Press, 2019).
- Carnap, Rudolf. (1926), “Physical Concept Formation”, in *Rudolf Carnap: Early Writings* (Oxford University Press, 2019).
- Carnap, Rudolf. (1928), *Der Logische Aufbau der Welt* (Berlin -Schlachtensee : Weltkreis-verlag); *Logical Structure of the World*, translated by Rolf A. George. (Berkeley, CA: University of California Press, 1967).
- Carnap, Rudolf. (1966), *Philosophical foundations of physics : an introduction to the philosophy of science*, edited by Martin Gardner (New York: Basic Books).
- Carrier, Martin. (1990), “Constructing or Completing Physical Geometry? On the relation between theory and evidence in accounts of space-time structure”, *Philosophy of Science* 57, pp. 369–394.
- Carrier, Martin. (1993), “Physical Force or Geometrical Curvature? Einstein, Gruenbaum, and the Measurability of Physical Geometry”, *Philosophical Problems of the Internal and External Worlds : Essays on the philosophy of Adolf Gruenbaum* (University of Pittsburgh Press), pp. 3–21.

- Carroll, Sean. (2022), *The Biggest Ideas in the Universe : Space, Time, and Motion* (New York : One world Publications).
- Carus, Andre & Leitgeb, Hannes. (2020), "Rudolf Carnap", in *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (substantive revision 2020).
- Cassirer, Ernst. (1920), *Zur Einstein'schen Relativitätstheorie : erkenntnistheoretische Betrachtungen* (Berlin: Bruno Cassirer); *Einstein's Theory of Relativity* (Dover, 1953), pp. 409–456.
- Coffa, J. (1991), *The Semantic tradition from Kant to Carnap* (Cambridge University Press).
- Einstein, Albert. (1916/1952), "The Foundation of the General Theory of Relativity", in *The Principle of Relativity* (Dover), pp. 109–164.
- Everett, Jonathan. (2018), "A Kantian account of mathematical modeling and the rationality of scientific theory change : The role of the equivalence principle in the development of general relativity", *Studies in History and Philosophy of Science* 71, pp. 45–57.
- Friedman, Michael. (1999), "Geometry, Convention, and the Relativized A Priori: Reichenbach, Schlick, and Carnap", in *Reconsidering Logical Positivism* (Cambridge University Press), pp. 59–70.
- Friedman, Michael. (2014), "Ernst Cassirer" in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*.
- Friedman, M. & Creath, R. (eds.) (2007) *The Cambridge Companion to Carnap* (Cambridge University Press).
- Gimbel, Steven. (2004), "Un-conventional wisdom : theory-specificity in Reichenbach's geometric conventionalism", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 35, pp. 457–481.
- Giovanelli, Marco. (2013a), "Erich Kretschmann as a proto-logical empiricist : Adventures and misadventures of the point-coincidence argument", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 44, pp. 115–134.

- Giovanelli, Marco. (2013b), “The Forgotten Tradition : How the Logical Empiricists Missed the Philosophical Significance of the Work of Riemann, Christoffel and Ricci”, *Erkenntnis* 78, pp. 1219–1257.
- Giovanelli, Marco. (2013c), “Talking at Cross Purposes : how Einstein and the logical empiricists never agreed on what they were disagreeing about”, *Synthese*, pp. 3819–3863.
- Giovanelli, Marco. (2014), “‘But one must not legalize the mentioned sin’ : Phenomenological vs. dynamical treatments of rods and clocks in Einstein’s thought”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 48, pp. 20–44.
- Giovanelli, Marco. (2017), “Traditions in Collision : The Emergence of Logical Empiricism between the Riemannian and Helmholtzian Traditions”, *The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science*, vol. 7 (Fall 2017), pp. 328–380.
- Glymour, Clark. (2021), “The Legacy of Logical Empiricism”, in *Logical Empiricism and the Physical Sciences : From philosophy of nature to philosophy of physics* (Routledge), pp. 295–311.
- Gruenbaum, Adolf. (1963), *Philosophical Problems of Space and Time* (Springer Dordrecht).
- Helmholtz, Hermann von. (1868/1977 A), “On the Origin and Significance of the Axioms of Geometry”, *Helmholtz’s Epistemological Writings* (D. Reidel Publishing Company), pp. 1–38.
- Helmholtz, Hermann von. (1868/1977 B), “On the Facts Underlying Geometry”, *Helmholtz’s Epistemological Writings* (D. Reidel Publishing Company), pp. 39–71.
- Holton, Gerald. (1970), “Mach, Einstein and the Search for Reality”, in *Ernst Mach : Physicist and Philosopher* (Springer), pp. 165–199.
- Howard, Don. (1991), “Einstein, Kant, and the Origins of Logical Empiricism”, *Language, Logic, and the Structure of Scientific*

- Theories, Proceedings of the Carnap-Reichenbach Centennial* (University of Konstanz Press), pp. 45-105.
- Howard, Don. (2014), "Einstein and the Development of Twentieth-Century Philosophy of Science", *The Cambridge Companion to Einstein* (Cambridge University Press), pp. 354-376.
- Janssen, Michel. (2014), "'No Success Like Failure...': Einstein's Quest for General Relativity, 1907-1920", in *The Cambridge Companion to Einstein* (Cambridge University Press), pp. 167-227.
- Janssen, Michel. & Renn, Juergen. (2015), "Arch and scaffold : How Einstein found his field equations", *Physics today* 68, pp. 30-36.
- Janssen, Michel. & Renn, Juergen. (2022), *How Einstein Found His Field Equations : Sources and Interpretations* (Birkhaeuser).
- Lovrenov, Maja (2006), "The Role of Invariance in Cassirer's Interpretation of the Theory of Relativity", *Synthesis philosophica*, pp. 233-241.
- Lusanna, Luca. (2018), "General covariance and the objectivity of space-time point-events", arXiv:gr-qc/0503069v2 3 Sep 2005.
- Lusanna, Luca. and Pauri, Massimo. (2006a), "The physical role of gravitational and gauge degrees of freedom in general relativity - I: Dynamical synchronization and generalized inertial effects", *Gen. Relativ. Grav.* 38(2), pp. 187-227.
- Lusanna, Luca. and Pauri, Massimo. (2006b), "The physical role of gravitational and gauge degrees of freedom in general relativity - II: Dirac versus Bergmann observables and the objectivity of space-time", *Gen. Relativ. Grav.* 38(2), pp. 187-227.
- Lutz, Sebastian. & Tuboly, Adam Tamas. (2021), "Introduction", in *Logical Empiricism and the Physical Sciences : From philosophy of nature to philosophy of physics* (Routledge)., pp. 1-17.
- Malament, David. (1977), "Causal Theories of Time and the Conventionality of Simultaneity", *Noûs, Vol. 11, No. 3, Symposium on Space and Time*, pp. 293-300.

- Maudlin, Tim. (2012), *Philosophy of Physics : Space and Time* (Princeton University Press).
- Mormann, Thomas. (2008), “Geometrical leitmotifs in Carnap’s early philosophy” in *The Cambridge Companion to Rudolf Carnap* (Cambridge University Press), pp. 43–64.
- Neuber, Matthias. (2021), “Reichenbach : scientific realist and logical empiricist?“, *Synthese* 199., pp. 8875–8897.
- Norton, John. D. (2014), “Einstein’s Special Theory of Relativity and the Problems in the Electrodynamics of Moving Bodies That Led Him to It”, in *The Cambridge Companion to Einstein* (Cambridge University Press), pp. 72–102.
- Oberdan, Thomas. (2017), “Moritz Schlick” in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*.
- Pitts, J. Brian. (2018), “Kant, Schlick and Friedman on Space, Time, and Gravity in Light of Three Lessons from Particle Physics”, *Erkenntnis* 83(2), pp. 131–161.
- Poincare, Henri. (1902/1952), *Science and Hypothesis* (Dover Publications).
- Quine, W. V. (1951), “Two dogmas of empiricism”, *Philosophical Review* 60(1), pp. 20–43.
- Quine, W. V. (1969), “Epistemology naturalized”, In *Ontological Relativity and Other Essays* (New York: Columbia University Press), pp. 69–90.
- Reichenbach, Hans. (1920), *Relativitätstheorie und Erkenntnis Apriori* (Springer); *The Theory of Relativity and a priori knowledge* (University of California Press, 1965).
- Reichenbach, Hans. (1921), “A Report on an Axiomatization of Einstein’s Theory of Space–Time”, Translated from “Bericht ueber eine Axiomatik der Einsteinschen Raum–Zeit–Lehre,” *Physikalische Zeitschrift*, vol. 22., pp. 683–7. in *Defending Einstein* (2006), pp. 683–687.

- Reichenbach, Hans. (1922), “The Present State of the Discussion on Relativity : A Critical Investigation”, in *Hans Reichenbach’s Selected Writings 1909–1953: Volume Two*, Cohen, Robert S ; Reichenbach, Maria ; Schneewind, Elizabeth Hughes (Dordrecht: Springer Netherlands, 1978), pp. 3–47.
- Reichenbach, Hans. (1922), “The Philosophical Significance of the Theory of Relativity”, in *Defending Einstein* (Cambridge University Press, 2006), pp. 95–160.
- Reichenbach, Hans. (1924), “The Relativistic Theory of Time”, in *Hans Reichenbach’s Selected Writings 1909–1953: Volume Two* (Dordrecht: Springer Netherlands, 1978), pp. 69–80.
- Reichenbach, Hans. (1924), *Axiomatik der relativistischen Raum-Zeit-Lehre* (Friedr. Vieweg & Sohn Akt.-Ges); *Axiomatization of the Theory of Relativity*, Translated by Maria Reichenbach (University of California Press, 1969).
- Reichenbach, Hans. (1925), “On the Physical Consequences of the Axiomatization of Relativity”, in *Defending Einstein* (Cambridge University Press, 2006), pp. 171–194.
- Reichenbach, Hans. (1925), “The Causal Structure of the World and The Difference Between Past and Future”, in *Hans Reichenbach’s Selected Writings 1909–1953: Volume Two* (Dordrecht: Springer Netherlands, 1978), pp. 81–119.
- Reichenbach, Hans. (1928), *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre* (Walter de Gruyter, Berlin and Leipzig, 1928); *The philosophy of Space and Time*, translated by Maria Reichenbach and John Freund, with introductory remarks by Rudolf Carnap (New York; Dover Publications, 1958).
- Reichenbach, Hans. (1928c), “Philosophy of the Natural Sciences”, in *Hans Reichenbach’s Selected Writings 1909–1953: Volume One*, Cohen, Robert S ; Reichenbach, Maria ; Schneewind, Elizabeth Hughes (Dordrecht: Springer Netherlands, 1978), pp. 228–244.
- Reichenbach, Hans. (1929), “Aims and Methods in Physical Knowledge”,

- in *Hans Reichenbach's Selected Writings 1909-1953: Volume Two*, Cohen, Robert S ; Reichenbach, Maria ; Schneewind, Elizabeth Hughes (Dordrecht: Springer Netherlands, 1978), pp. 120-225.
- Reichenbach, Hans (1929b), "New Approaches in Science : Philosophical Research", in *Hans Reichenbach's Selected Writings 1909-1953: Volume One*, Cohen, Robert S ; Reichenbach, Maria ; Schneewind, Elizabeth Hughes (Dordrecht: Springer Netherlands, 1978), pp. 249-297.
- Reichenbach, Hans. (1929i), "Bertrand Russell", in *Hans Reichenbach's Selected Writings 1909-1953: Volume One*, Cohen, Robert S ; Reichenbach, Maria ; Schneewind, Elizabeth Hughes (Dordrecht: Springer Netherlands, 1978), pp. 298-323.
- Reichenbach, Hans. (1931j), "Aims and Methods of Modern Philosophy of Nature", in *Hans Reichenbach's Selected Writings 1909-1953: Volume One*, Cohen, Robert S ; Reichenbach, Maria ; Schneewind, Elizabeth Hughes (Dordrecht: Springer Netherlands, 1978), pp. 359-388.
- Reichenbach, Hans. (1931/1957), translated by Edward Allen, *Atom and Cosmos* (New York : Braziller).
- Reichenbach, Hans. (1936), "Logistic Empiricism in Germany and the Present State of Its Problems", *The Journal of Philosophy*, vol. 33, No, 6., pp. 141-160.
- Reichenbach, Hans. (1938), *Experience and Prediction : an analysis of the foundations and the structure of knowledge* (University of Chicago Press).
- Reichenbach, Hans. (1951), "The Philosophical Significance of the Theory of Relativity", in *Albert Einstein : Philosopher-Scientist* (Tudor Publishing Company), pp. 287-312. Einstein's Reply, pp. 676-679.
- Reichenbach, Hans. (1951), *The Rise of Scientific Philosophy* (Berkeley-Los Angeles : University of California Press).
- Reichenbach, Hans. (1978), *Selected Writings 1909-1953 Volume 1, 2* (D. Reidel Publishing Company).

- Reichenbach, Hans. (2006), *Defending Einstein : Hans Reichenbach's Writings on Space, Time and Motion*, Translated and Edited by Steven Gimbel & Anke Walz (Cambridge University Press).
- Riemann, Bernhardt. (1856/2004), "The Hypotheses on which geometry is based", *Riemann's Collected Papers* (Kendrick Press), pp. 257–272.
- Russell, Bertrand. (1950), "Logical Positivism", *Revue Internationale de Philosophie*, Vol. 4, No. 11, pp. 3–19.
- Ryckman, Thomas. (1994), "Weyl, Reichenbach, and the Epistemology of Geometry", in *Studies in History and Philosophy of Science* Vol 25., No. 6., pp. 831–870.
- Ryckman, Thomas. (2005), "General Covariance and the "Relativized A Priori": Two Roads from Kant", in *The Reign of Relativity* (Oxford University Press), pp. 13–46.
- Ryckman, Thomas. (2005), "1921 : Critical or Empiricist Interpretation of the New Physics?", in *The Reign of Relativity* (Oxford University Press), pp. 47–76.
- Ryckman, Thomas. (2005), "Einstein Agonists : Weyl and Reichenbach", in *The Reign of Relativity* (Oxford University Press), pp. 77–107.
- Ryckman, Thomas. (2018.), "Early Philosophical Interpretations of General Relativity", in *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (substantive revision on 2018. 5. 7.).
- Schilpp, Paul Arthur. eds. (1949/1951), *Albert Einstein : Philosopher–Scientist* (Tudor Publishing Company).
- Schlick, Moritz. (1917), *Raum und Zeit in der gegenwärtigen Physik : Zur Einführung in das Verständnis der allgemeinen Relativitätstheorie* (Springer); *Space and Time in Contemporary Physics* (Prometheus Books, 1920).
- Schlick, Moritz. (1918/1985), *General Theory of Knowledge*, Translated by Albert E. Blumberg (Open Court).
- Schlick, Moritz. (1921/1979), "Empirical or Critical Interpretation of Modern Physics?" in H. Mulder and B. van de Velde–Schlick, eds.

- Mortiz Schlick : Philosophical Papers. vol. 1.* (Dordrecht: Reidel).
- Schlick, Moritz. (1925), "Outlines of the Philosophy of Nature", *Moritz Schlick : Philosophical Papers (1925-1936)* (D. Reidel Pub. Co.), pp. 1-90.
- Schlick, Moritz. (1929), "Philosophy and Natural Science", *Moritz Schlick : Philosophical Papers (1925-1936)* (D. Reidel Pub. Co.), pp. 139-153.
- Schlick, Moritz. (1930), "The Turning-Point in Philosophy", *Moritz Schlick : Philosophical Papers (1925-1936)* (D. Reidel Pub. Co.), pp. 154-160.
- Schlick, Moritz. (1930), "Is There a Factual A Priori?", *Moritz Schlick : Philosophical Papers (1925-1936)* (D. Reidel Pub. Co.), pp. 161-170.
- Shabel, Lisa. (2010), "Transcendental Aesthetic", *Cambridge Companion to Kant* (Cambridge University Press), pp. 93-117.
- Smolin, Lee. (2013), *Time Reborn : from the crisis in physics to the future of the universe* (Boston : Houghton Mifflin Harcourt).
- Stadler, Friedrich. (2011), "The road to *Experience and Prediction* from within : Hans Reichenbach's scientific correspondence from Berlin to Istanbul", *Synthese* 181., pp. 137-155.
- Stone, Abraham D. (2010), "On the sources and implications of Camap's *Der Raum*", *Studies in History and Philosophy of Science* 41, pp. 65-74.
- Suppe, Frederick. (1974), "The Search for Philosophic Understanding of Scientific Theories", in *The Structure of Scientific Theories* (University of Illinois Press), pp. 6-118.
- Torretti, Roberto. (1978), *Philosophy of Geometry from Riemann to Poincare* (D. Reidel Publishing Company).

보론. ‘공간’의 경험적 탐구 : 리만, 헬름홀츠, 푸앵카레³⁶¹⁾

제1절. 서론

아인슈타인(Einstein)은 일반 상대성 이론에서 일반화된 미분기하학을 이용해 시간과 공간의 물리적 기하학(중력장)을 기술했는데, 이러한 과정에서 리만(Riemann), 헬름홀츠(Helmholtz), 푸앵카레(Poincare)로 이어진 시간과 공간에 대한 물리적 성찰이 핵심 역할을 했다.³⁶²⁾ 그런데 상대성 이론에 대한 기존의 논의에서는 ‘미분기하학의 수학적 발전’이라는 측면을 비교적 강조하는 경향이 있다. 리만 이후 크리스토펠(Christoffel), 리치(Ricci) 등이 미분기하학 이론을 해석적(解析的)으로 발전시켰고, 아인슈타인은 자신의 중력장 방정식을 기술하기 위해서 이미 발전되어 있던 해석적 미분기하학 이론을 적절하게 활용했다는 것이다.³⁶³⁾

하지만 아인슈타인은 기하학을 바라보는 헬름홀츠적 관점이 없었다면 자신이 일반 상대론을 개발할 수 없었을 것이라 명시적으로 언급했다.³⁶⁴⁾ 또한 그는 물리적 기하학에 관한 푸앵카레의 관점을 진지하게 언급했다. 비록 그가 강제 막대에 체계적인 힘이 작용한다고 가정함으로써 물리적 기하학을 유클리드 기하학으로 유지할 수 있다는 푸앵카레의 관점을 받아들이지는 않았지만, 그가 볼 때 적어도 원리적인 관점에서 푸앵카레의 입장은 합당하다.³⁶⁵⁾ 이는 리만 이후 헬름홀츠와 푸앵카레로 이어진, ‘시간과 공간을 물리적으로 사유하는 전통’이 아인슈타인에게 큰 영향을 미쳤음을 보여주는 결정적인 근거이다.

361) 이 보론을 위한 기초 논의는 강형구 (2022b)임을 밝혀 둔다.

362) 특히 마이클 프리드먼, 박우석·이정민 옮김 (2001/2012)에서의 논의 참조. 하지만 내가 볼 때 프리드먼의 논의가 갖는 한계는 기하학 철학의 의의를 ‘측정 기준 물체’를 중심으로 논하기보다는 유클리드 기하학, 미분기하학 등과 같이 수학적 기하학의 ‘유형’ 수준에서 논의했다는 데 있다.

363) 예를 들어, 오늘날 상대론에 대한 물리적·철학적 논의를 대표하고 있는 논자인 셴 캐럴(Sean Carroll) 또한 이와 유사한 방식으로 서술하고 있다. Carroll, Sean. (2022)에서의 논의를 참조하라.

364) 아인슈타인의 잘 알려진 논문 “기하학과 경험” (1921년)을 참조. 알베르트 아인슈타인, 홍수원·구자현 옮김 (2003), 284쪽에 관련 언급이 있다.

365) 위의 논문. 아인슈타인은 ‘영원의 관점에서 볼 때(sub specie aeternitatis)’ 푸앵카레가 옳다고 한다.

그렇다면 과연 시간과 공간을 물리적으로 사유하는 전통은 구체적으로 어떤 진화의 과정을 거쳐 아인슈타인에게 영향을 미친 것일까? 또한 아인슈타인 이후 논리경험주의의 시공간 철학 속에서 이러한 사유의 전통은 어떻게 창조적으로 변형되는 것일까? 뉴턴의 물리학에서는 시간과 공간의 개념이 수학적이고 보편적이어서 굳이 시간과 공간의 측정 기준 물체가 세계 속에 들어올 필요가 없었다. 그런데 리만은 공간 측정 단위 물체를 세계 밖에서 안으로 들여놓았고, 헬름홀츠는 그 측정 물체를 자유롭게 운동시킴으로써 공간의 기하학적 형태를 경험적으로 결정하는 가능성을 열었다. 푸앵카레는 물리적 기하학의 규약성에 대한 논의를 통해 시간과 공간을 물리화(physicalization)하기 위한 중요한 계기를 제공했다. 결국 아인슈타인은 공간뿐만 아니라 시간 또한 물리적 시계를 통해 세계 안으로 들여와, 시간과 공간이 구체적인 측정 물체(자연 시계, 강체 막대, 빛 신호)에 의해 표상되는 정식 물리학 이론을 만들어냈다.³⁶⁶⁾ 그리고 이 이론을 구축하는 과정에서 빛 신호가 핵심적인 역할을 했다.

나는 이 보론에서 공간을 물리적인 것으로 만들기 위한 철학적 사유의 전통이 리만, 헬름홀츠, 푸앵카레에 의해 어떻게 이어졌는지를 살펴본다. 이 보론의 논의는 논문의 본문을 위한 예비적인 논의이다. 리만 이전까지 물리학 이론 밖에서 일률적으로 공간의 측정 기준을 제공했던 수학적 공간 개념이, 리만의 제안과 더불어 작은 길이 측정 단위 물체와 함께 물리학 안으로 들어왔다. 리만, 헬름홀츠, 푸앵카레로 이어지면서 이와 같은 공간의 물리화 과정이 어떤 방식으로 변형되고 심화하는지를 보이는 것이 이 보론의 주된 목적이다.

제2절. 리만 : 물리적 세계 속 길이 단위 물체의 출현

탈레스(Thales), 피타고라스(Pythagoras), 플라톤(Platon) 등과 같은 그리스의 학자들이 동방의 문명에서 발달한 실용적 수학 지식을 연역적인 것으로 변환시켰다면, 기원전 3세기경 헬레니즘 시대에 활동한 수학자

366) 나의 관점은 상대성 이론은 물리학을 ‘기하학화’시킨 이론이라는 관점과 대비된다. 이러한 관점에 대한 대표적인 예로 Maudlin, Tim. (2012)를 참고하라. 이와 반대로 나는 상대성 이론이 이전까지 기하학적으로 표상되던 시간과 공간 개념을 구체적인 측정 도구를 매개로 ‘물리화(physicalization)’시킨 이론이라고 본다.

유클리드(Euclid)는 이미 알려져 있던 연역적 기하학 지식을 집대성하고 체계화하여 기하학에 중요한 변환을 가져왔다. 그는 5개의 공준(논리 법칙), 5개의 기하학 공리, 23개의 기하학 정의로부터 당시까지 알려져 있던 465개의 기하학적 정리를 연역적으로 증명했다. 이는 수학사에서 획기적인 사건이었고, 유클리드 이후 수학자들은 그를 본받아 엄밀한 논리적 체계를 수립하여 수학 이론을 제시하고자 했다.

그런데 유클리드의 기하학은 엄밀한 연역 체계를 갖춘 것만이 아니었다. 이 기하학은 건축, 측량 등 일상생활의 다양한 영역들에서 잘 적용되었을 뿐만 아니라, 갈릴레오, 케플러, 뉴턴의 자연 탐구에서도 문제없이 사용되었다. 따라서 18세기까지 학자들은 이와 같은 유클리드 기하학이 곧 자연의 실제 공간에도 적용되는 기하학이라고 생각했다. 수학적 기하학과 물리적 기하학이 하나이자 같다고 본 것이다. 18세기 철학자 칸트(Kant) 역시 뉴턴 역학이 전제하는 유클리드 기하학 공리들의 자명성을 의심하지 않고 이들을 일종의 ‘선형적 종합 명제’라 평가했다.³⁶⁷⁾

하지만 유클리드 기하학 체계에는 하나의 문제가 있었다. 이 기하학이 전제하고 있는 5개의 공리 중 다섯 번째 공리가 이미 유클리드 시대 때부터 학자들 사이에서 논란의 대상이 되었기 때문이다. 제5 공리는 다음과 같다. “한 평면 위에 두 직선을 가로지르는 선분이 있어, 선분을 기준으로 같은 쪽에 있는 교차각 내각의 합이 두 직각보다 작으면, 두 직선은 결국 (그 쪽에서) 만난다.” 이를 좀 더 직관적으로 이해하기 쉽게 말하면 다음과 같다. “한 직선과 그 직선 위에 있지 않은 하나의 점이 있을 때, 그 점을 지나면서 주어진 직선에 평행인 직선은 (같은 평면 위에) 오직 한 개 있다.” 다른 공리들과 달리 이 공리는 일종의 ‘무한’을 가정하고 있다. 주어진 직선과 평행인 직선이 오직 하나뿐인지 여부를 판단하기 위해서는 문제가 되는 직선을 무한히 연장해 보아야 한다. 유클리드 시대부터 수학자들은 이 다섯 번째 공리가 복잡하다고 보았고, 다른 단순하고 자명한 공리들로부터 이 공리를 연역해내고자 했다.

이러한 수학자들의 시도는 번번이 실패했다. 헬레니즘 시대에 프로클로스

367) 나는 유클리드 기하학의 역사와 의의에 관한 기존의 수학사 연구에서 본 논의에 필요한 부분만을 간추려서 서술할 것이다. 유클리드 기하학의 역사에 대한 개관으로 수학 역사가 모리스 클라인의 다음 저술이 매우 유용하다. 모리스 클라인, 심재관 옮김 (1972/2016), 『수학사상사』 1, 2, 3권 (경문사).

(Proclus)와 프톨레마이오스(Ptolemaios)가 시도했으나 실패했다. 월리스(Wallace)는 이 증명을 시도하는 과정에서 한 삼각형과 임의로 닮은 삼각형이 존재한다는 것이 평행선 공리와 동치임을 발견하기도 했다. 수학자들은 평행선 공리를 증명하려고 시도하는 과정에서 평행선 공리와 논리적으로 동치인 다른 명제들(삼각형의 내각의 합은 180° 이다. 등)을 발견했다. 가톨릭 사제이자 뉴턴과 동시대 인물이었던 사케리(Saccheri, 1667-1733)는 평행선 공리를 부정하여 이로부터 모순을 도출하고자 했으나 실패하며 쌍곡기하학 발견의 목전에 이르기도 했다. 이처럼 수학자들의 평행선 공리 증명 시도가 계속 실패하자, 프랑스의 수학자 달랑베르(D'Alembert, 1717-1783)는 이를 ‘기하학의 스캔들’이라고 부르기까지 했다.³⁶⁸⁾

유클리드 기하학의 절대성에 반론을 제기한 학자는 가우스(Gauss, 1777-1855, 독일), 보여이(Bolyai, 1802-1860, 헝가리), 로바첵스키(Lobachevsky, 1791-1856, 러시아)였다. 가우스는 19세기 초부터 유클리드의 평행선 공리를 의심했고 삼각형의 세 내각의 합이 180° 보다 작은 기하학 역시 논리적으로 모순이 없음을 발견했지만, 끝내 자신의 연구 결과를 출판하지 않았다. 비유클리드 기하학(쌍곡기하학)과 관련된 논문을 거의 같은 시기에 최초로 출판한 두 수학자는 보여이와 로바첵스키였다. 특히 로바첵스키는 유클리드 기하학을 인간이 외부 세계를 파악하는 일종의 ‘인식 형식’으로 바라보는 칸트의 공간 이론을 비판했고, 외부 세계가 어떤 기하학적 형태를 띠는지는 철학적 사변을 통해서가 아니라 실험을 통해서 확인될 필요가 있다고 주장했으며, 이러한 주장에 대해 가우스 역시 동의했다고 전한다.

비유클리드 기하학의 발견을 토대로 공간의 본성에 관한 물리적 탐구를 위해 결정적 역할을 한 것은 가우스³⁶⁹⁾의 제자였던 수학자 리만(Riemann,

368) 평행선 공리 연구에 관한 간추린 역사에 대해서는 모리스 클라인, 심재관 옮김 (1972/2016), 3권, 1209-1217쪽의 내용을 참고할 것. 본 논문에서 서술하고 있지 않지만 비유클리드 기하학이 창시되기 직전 이를 예비했던 수학자들(람베르트, 슈바이카르트, 타우리누스)에 관해서는 같은 책 1217-1219쪽의 서술을 참고.

369) 리만의 기하학은 스승이었던 가우스의 연구를 기반으로 했을 정도로 가우스는 미분기하학에 관해 이미 상당한 연구를 진행한 상황이었다. 가우스의 미분기하학 연구에 대한 훌륭한 개관으로 Torretti, Roberto. (1978), pp. 68-82, 모리스 클라인, 심재관 옮김 (1972/2016), 3권, 1240-1248쪽의 내용 참고. 특히 가우스는 자신의 미분기하학 연구를 통해 이미 “곡면의 한 부분을 다른 부분으로 옮길 수 있으려면 그 곡면이 상수 곡률을 가져야 한다는 것이 필요조건이라는 결론”을 알고 있었다. 모리스 클라인의 책 1244쪽.

1826-1866)이다.³⁷⁰⁾ 1854년에 실시된 리만의 교수취임 강연 제목은 “기하학이 기초하고 있는 가설들에 대하여”³⁷¹⁾였다. 이 강연에서 리만은 유클리드 기하학의 공리들보다 더 일반적인 개념(다양체, manifold)으로부터 시작하여, 공간을 기술하는 기하학이 기본적으로 전제하고 있는 가정이 무엇이며 그 가정의 기원이 무엇인지 따져 묻는다. 리만은 공간이 다양한 종류의 다양체 중 하나이며, 공간을 다른 다양체와 구분 짓는 특징은 ‘공간 속 모든 위치에서 선의 길이가 같은 측도로 측정될 수 있으며 비교 가능하다는 것’이라고 본다. 또한 리만은, 공간 내의 ‘선 요소(line element)’의 크기가 ‘이차 형식 좌표 미분소들의 곱을 합한 것으로 표현된다는 것’이 공간을 특징짓는다고 보았다. 리만의 1854년 강연에 포함된 이러한 두 가지 사유는 이후 상대성 이론이 발전하는 데 핵심적인 역할을 담당했다. 첫째, 기하학을 광역적 기하학에서 국소적 기하학으로 변환하고 공간 측정의 기준이 되는 단위 길이를 본격적인 논의의 대상으로 삼음으로써 공간의 물리학이 등장할 수 있는 단서를 마련했다. 둘째, 선 요소를 표현하는 일반화된 수학적 형식의 개요를 제시함으로써, 이후 이와 관련된 해석적 이론이 발전할 수 있는 방향을 제시했다.³⁷²⁾

리만은 자신의 탐구 계획에서, 공간의 계량 관계를 결정할 수 있게 해주는 가장 단순한 사실들을 찾겠다고 말한다. 여기서 리만의 핵심적인

370) 수리물리학자로서의 리만의 삶과 연구에 대한 유용한 개관으로 크리스타 옴니켈·러셀 매코마크, 구자현 옮김 (1986/2014) 제2권에서의 논의(9-22쪽)를 참조할 것. 특히 리만은 “자신의 주된 임무가 자연의 알려진 법칙에 관한 새로운 개념들을 개발하는 것”(13쪽)이라고 말할 정도로 수학 탐구와 물리학 탐구 사이의 밀접한 관련성을 강조했다. 그가 특히 편미분 방정식을 강조한 것 또한 수학적 개념의 실질적인 물리적 적용을 위한 것이었으며, 이런 관점은 이후 아인슈타인에게까지 이어진다. 아인슈타인은 편미분 방정식을 통해 ‘연속적인 장의 물리학’이 구현되었다고 보았다. 리만에 대한 또 다른 유용한 전기적 서술로 에릭 벨, 안재구 옮김 (1937/1993) 하권의 “리만” 항목(241-270쪽)을 참고하라. 벨 역시 리만이 수학뿐만 아니라 물리학에도 큰 관심을 보였음을 강조한다. “사실 그(리만)은 수학에 바치는 것과 똑같이 많은 시간을 물리학 연구에도 바쳤다.” (248쪽)

371) Riemann., Bernhardt. (1854/2004), pp. 257-272.

372) 리만을 포함한 기하학 철학의 역사를 전반적으로 다루고 있는 토레티(Torretti)의 저서(Torretti, Roberto., 1978)는 중요한 선행 연구이다. 리만의 기하학 및 철학을 다루고 있는 이 책의 2장 2절(pp. 67-109)을 참고하라. 다만 토레티의 경우 현대적인 수학적 발전을 전제하여 리만의 기하학 철학을 사후적으로 재구성하고 있으며, 리만이 제시한 가설을 ‘물리적’이라기보다는 ‘수학적’인 것으로 해석하고 있다. 그 점에서 토레티의 해석적 관점은 나의 관점과 구분된다.

주장은 기하학의 기초가 되는 공리들이 칸트가 생각했던 것처럼 필연적인 참이 아니라 오직 경험적 확실성만을 가지므로 일종의 ‘경험적 가설들’이라는 것이다. 이에 관해 리만은 다음과 같이 말한다.

...다차원적 대상은 서로 다른 방식으로 측정될 수 있으며 공간은 3차원적 양의 특수한 한 사례에 지나지 않는다. 이로부터 기하학의 정리들은 일반적인 양의 개념으로부터만 연역이 될 수 없으며, 이들은 오직 공간을 다른 생각 가능한 3차원적 개체들로부터 구분하는 속성들로부터 연역이 될 수 있다는 점이 필연적으로 따라 나온다. 그리고 이런 속성들은 오직 **실험적으로만** 발견될 수 있다.³⁷³⁾

이러한 자신의 주장을 전개하기 위해 우선 리만은 일반적인 n차원 다양체의 개념을 정의한다. 하나의 점이 있다. 이 점을 앞뒤로 움직이면 1차원 다양체가 생성된다. 이렇게 생성된 1차원 다양체를 다시 앞뒤로 움직이면 2차원 다양체가 생성되고, 2차원 다양체를 앞뒤로 움직이면 3차원 다양체가 생성된다. 이러한 방식으로 n차원 다양체에서 n+1차원 다양체로 계속 확장해 나갈 수 있다. 리만에 따르면 다양체 속 각 점에는 위치에 따른 연속적 함수가 제시되고, 함수의 값에 따라 각 점에 좌표값이 부여된다.

다양체가 실제로 물리학에서 사용되기 위해서는 계량적(metrical)인 것이 되어야 하고 이를 위해서는 ‘측정’이 필요하다. 여기서 중요한 것은 측정의 객관성을 담보하기 위해서 다양체 속 개체들에 관한 측정의 결과가 이 개체들의 위치와 독립적이어야 한다는 것이다. “측정은 측정되는 개체들의 측정이 이들의 위치와는 독립적이어야 함을 요구한다.”³⁷⁴⁾ 리만이 볼 때 이와 같은 독립성이 담보되기 위해서는 선 길이 측정의 단위인 ‘선 요소(line element)’의 크기가 변위에도 불구하고 유지되어야 한다.³⁷⁵⁾ 리만은 이러한 선 요소가 이차 미분 형식의 제곱근으로 표시된다는 것³⁷⁶⁾이 공간

373) Riemann., Bernhardt. (1854/2004), p. 257. 강조는 리만 본인의 것이다.

374) Riemann., Bernhardt. (1854/2004), p. 261.

375) Riemann., Bernhardt. (1854/2004), p. 262. 구체적으로 리만은 다음과 같이 말한다. “나는 만약 선 요소의 모든 점이 같은 무한소 변위를 거칠 경우, 이 선 요소의 길이가 크기의 이차 수준의 양들과는 무관하게 불변한다고 진제할 것이다.”

376) Riemann., Bernhardt. (1854/2004), pp. 262-263. 이의 가장 간단한 경우가 공간이 편평한 경우이다. 이를 $ds = \sqrt{\sum_i (dx^i)^2}$ 이라 표현할 수 있다.

이라는 다양체의 주요 특징이라고 본다. 리만은 다음과 같이 말한다.

...우리는 다음의 가설을 세운다. 선의 길이는 위치에 독립적이다. 무한소 선 요소의 길이는 이차 미분 표현의 제곱근으로 나타낼 수 있으며, 이는 가장 작은 영역의 편평함을 가정하고 있다.³⁷⁷⁾

공간 속 선 요소가 이차 미분 형식으로 표현될 수 있다는 것은 공간의 미소 부분이 편평하다는 것을 뜻하며, 이는 측정의 단위가 되는 작고 단단한 물체가 위치와는 독립적으로 그 단위 길이를 유지함을 가정한다. 이를 ‘측정 단위 물체 길이의 위치 독립성’이라고 할 수 있다.

리만의 핵심 주장은 기하학의 기초에 있는 가설인 ‘측정 단위 물체의 길이 독립성’이 유클리드 기하학 공리들보다 더 일반적이면서도 그 근원이 선형적이지 않고 경험적이라는 것이다. 실제로 우리는 경험을 통해 측정의 단위가 되는 물체가 그 위치와 무관하게 그 단위 길이를 유지함을 확인한다. 그 후 우리는 측정의 단위 물체가 어떤 곳에서도 그 단위 길이를 유지한다고 가정한 후 물체의 길이를 측정한다. “물체 크기의 위치 독립성이 가정되지 않으면 거시세계에서의 계량 관계로부터 미시세계의 계량 관계를 연역할 수 없다.”³⁷⁸⁾ 따라서 리만은 물리적 기하학의 기초가 되는 가설이 경험에 기초하며, 이 가설을 우리의 일상적 경험 혹은 측정의 범위를 넘어선 거시 또는 미시세계에까지 적용하는 것에 주의해야 함을 지적한다. 거시 또는 미시세계에서는 이 가설이 유효하지 않고 측정 기준 물체의 길이가 위치에 따라 달라질 수 있다. 리만은 만약 그와 같은 변화가 일어난다면 그러한 변화의 근원이 일종의 물리적 힘일 것이라 예상한다. 그렇기에 더욱더 물리적 세계에 적용되는 계량 기하학에 대한 논의는 수학이 아닌 물리학의 영역에 속하게 된다.³⁷⁹⁾

이처럼 리만은 물리적 기하학과 수학적 기하학을 분리하고, 물리적 기하학의 문제를 ‘측정 단위 물체 길이의 위치 독립성’으로 공식화함으로써

377) Riemann., Bernhardt. (1854/2004), p. 267.

378) Riemann., Bernhardt. (1854/2004), p. 270.

379) Riemann., Bernhardt. (1854/2004), p. 270. 여기서 리만은 다음과 같이 말한다. “다양체가 연속적일 경우, 크기 측정에 사용된 원리는 어딘가 다른 곳으로부터 비롯되어야 한다... 이 다양체의 계량 관계의 기초는 그것의 요소들을 묶어주는 힘이라는 외부의 원천으로부터 찾아야만 한다.”

광역적 기하학을 국소적 기하학으로 변환시켰다.³⁸⁰⁾ 이와 같은 리만의 개념은 이중적인 측면에서 혁신적이었다. 첫째, 수학적 측면에서의 혁신이 있다. 우리는 일반화된 다양체 개념으로부터 시작했기 때문에 공간의 광역적인 유클리드적 구조를 미리 전제할 필요가 없다. 만약 선-요소가 리만이 말하는 다양체가 요구하는 수학적 형식을 만족시키기만 한다면, 공간의 구조는 유클리드적 구조가 될 수 있을 뿐만 아니라 비유클리드적 구조가 될 수 있다. 이러한 측면에서 우리는 해석학적 도구를 이용한 형식적 기하학, 즉 일반적이고 국소적인 해석적 기하학 이론을 개발할 수 있다. 실제로 리만 이후 수학자인 크리스토펠(Christoffel)과 리치(Ricci)에 의해서 이와 같은 해석적 이론이 개발되었다.

하지만 우리가 이러한 형식적이고 수학적인 측면보다도 더 주목해야 하는 것은 리만으로부터 비롯된 물리적 공간을 탐구하는 혁신적 가능성이다. 기하학의 근본 가설이 칸트의 생각과 달리 ‘선형적’이 아니라 ‘경험적’이고 그 가설의 핵심이 ‘측정 단위 물체 길이의 위치 독립성’이라는 리만의 생각은 공간의 문제를 구체적인 물리적 문제로 다룰 수 있게 하는 가능성을 열었다. 물론 리만의 생각에서 아직 시간의 문제는 명시적으로 논의되지 않고 있다. 시간은 공간과 마찬가지로 물리학에서 어떤 대상 혹은 사건을 기술하는데 반드시 요구되는 요소임에도 불구하고 말이다. 또한 리만의 생각에서 측정 단위 물체는 공간 다양체 속 모든 점에서 ‘고정’되어 있다. 이는 실제 실험 물리학자가 공간을 ‘측정’하는 것과 다소 거리가 있다. 왜냐하면 실험물리학자는 강체 막대를 움직여 나란히 놓는 일련의 과정을 통해³⁸¹⁾ 공간을 실제로 측정하기 때문이다.

흥미로운 것은 리만의 개념적 혁신이 물리적 성격이 강했음에도 불구하고 수학자인 리만으로서 자신이 제시한 혁신적 개념에 관한 본격적 탐구를 추진하지 않았다는 것이다.³⁸²⁾ 따라서 리만의 개념은 그야말로

380) 이러한 기하학에서의 변화는 당시의 물리학 발전과 깊은 연관을 가지는 것처럼 보인다. 패러데이(Faraday)와 맥스웰(Maxwell)의 전자기 장이론은 고전 물리학과 달리 연속적 장이론을 표방하기 때문이다. 이때 연속적 장이론은 국소적 이론이며 물리적 과정이 접촉 작용의 원리를 만족한다고 전제한다. 국소적 기하학과 전자기학 사이의 연관에 대해서는 이미 몇몇 논자들이 명시적으로 논한 바 있다. 최근의 논의로는 Giovanelli (2017)와 Ryckman (1994)을 참고.

381) 논의의 편의상 이때의 실험물리학자가 19세기에 속하는 인물이라고 가정한다. 리만이 19세기의 인물이며 20세기 전반기까지도 물리학에서 특정한 길이 원기 막대를 사용했음을 고려하면 이러한 가정이 과도한 억지는 아닐 것이다.

공간에 관련한 물리적 탐구를 ‘시작’하는 역할을 담당했을 뿐이지만 이러한 ‘시작’만으로도 충분한 의미가 있었다.³⁸³⁾ 뉴턴이 물리학 속에서 공간의 유클리드적 성격을 의문 없이 전제했고 칸트가 물리적 세계 기술에 전제되는 유클리드 기하학을 ‘선형적 종합’ 개념으로 정당화한 상황에서, 리만의 제안은 공간의 물리적 탐구를 위한 역사적 계기를 마련했다.

제3절. 헬름홀츠 : 자유 운동 원리와 공간의 경험적 측정

헬름홀츠(Helmholtz, 1821-1894)는 이상과 같은 리만의 논의, 특히 그것의 수학적 측면보다 물리적 측면을 이어받아 더 심화시킨 인물이다. 그는 리만의 동료였던 수학자 데데킨트(Dedekind)가 리만 사후에 편집하여 출판한 리만의 교수취임 강연록(원래 강연은 1854년)을 읽은 직후, 기하학의 기초에 관해 논하는 두 편의 중요한 논문인 “기하학의 기초에 놓인 사실들에 대하여”³⁸⁴⁾와 “기하학 공리들의 기원과 그 의의”³⁸⁵⁾를 리만의 강연록이 출판된 바로 그 해인 1868년에 발표했다. 이렇듯 헬름홀츠가 리만의 강연록이 출판된 직후 자신의 논문을 발표했다는 것은 그 역시 비슷한 시기에 리만과 유사한 문제의식 아래 물리적 기하학의 경험적 기초를 탐구하고 있었음을 뜻한다.³⁸⁶⁾

헬름홀츠는 다소 짧고 간결하게 표현된 리만의 생각을 자신의 두 논문에서

382) 실제로 리만의 교수취임 강연 주제를 최종적으로 선택한 것은 리만이 아니라 그의 지도교수였던 가우스(Gauss)였다. 1854년 이후 리만은 1861년에 이차 미분 형식으로 표현된 계량을 다른 이차 미분 형식의 계량으로 변환할 수 있는지에 대한 논의를 제시하였고 이후 이 논의가 미분 불변량에 관한 이론으로 발전하였지만, 이 논의는 그 특성상 ‘물리적’이라기보다는 ‘수학적’인 것이었다. 이에 관해서는 모리스 클라인, 심재관 옮김 (1972/2016), 3권, 1255-1259쪽의 논의 참고.

383) 몇몇 논자들은 리만이 공간 다양체의 각 점에서의 곡률이 시간에 따라서 변동할 수 있다고 추측한 것(수학자 클리포드(Clifford, 1845-1879)에게 이어짐)에서 혁신성을 찾는다(Torretti, 1978., p. 105). 그러나 이러한 리만의 추측은 실로 사변적인 것이었고, 이 추측은 이후 아인슈타인에 의해 구체적인 물리적 추론 과정과 결합하지 않았다면 그저 추측으로만 남았을 것이다. 토레티와 유사한 견해를 모리스 클라인, 심재관 옮김 (1972/2016), 3권 1255쪽에서 찾을 수 있다.

384) Helmholtz., Hermann von. (1868/1977 B), pp. 39-71.

385) Helmholtz., Hermann von. (1868/1977 A), pp. 1-38.

386) 헬름홀츠는 의학, 생리학, 수리물리학 등 다방면에 걸쳐 다양한 학문적 공헌을 했으며 본 논문에서 그의 다양한 업적들을 모두 살피는 것은 불가능하다. 헬름홀츠의 시대별 주요 연구 결과에 대한 훌륭한 개관으로 크리스타 옴니켈·러셀 매코마크, 구자현 옮김 (1986/2014) 제3권에서의 논의(34-56쪽, 241-263쪽)를 참조할 것.

좀 더 상세하게 설명함과 동시에, 선 요소의 크기가 이차 형식을 가진 좌표 미분소들의 합의 제곱근으로 표현된다는 리만의 주장을 이보다 더 기본적인 가정들(사실들)로부터 유도하고자 시도했다. 특히 헬름홀츠의 중요한 기여는 리만의 제안에 등장했던 길이 측정 단위 물체에 ‘운동’을 도입한 데 있다. 리만의 제안에서 측정 단위 물체가 다양체 속 각 위치에 고정되어 있었다면, 헬름홀츠에 이르러 단위 물체가 그 길이를 변화시키지 않고 자유롭게 운동할 수 있게 되면서 물리적 공간의 기하학적 형태를 경험적(실험적) 측정을 통해 결정하는 것의 가능성이 더 선명하게 떠올랐다.

헬름홀츠의 논문 “기하학의 기초에 놓인 사실들에 대하여”를 살펴보자. 앞서 리만은 공간 내의 모든 선이 동일 척도로 비교할 수 있어야 하며 선 요소의 크기는 좌표들의 이차 미분 형식에 의해 표현될 수 있다고 주장했다. 하지만 헬름홀츠가 볼 때 문제는 이러한 형태의 선 요소 표현이 필수적이지 않으며 실제로 더 복잡한 수학적 형태로 표현될 수 있다는 데 있다. 그렇기에 그는 공간 속 선 요소의 크기를 이차 미분 형식을 통해 표현할 수 있도록 해주는 ‘더 단순한 사실들’을 찾아, 이 사실들로부터 선 요소 크기를 표현하는 공식을 유도해내고자 했다. 그는 다음과 같이 말한다.

나 자신의 탐구가 리만의 탐구와 다른 점은 다음과 같은 점에 있다... 선 요소의 제곱근이 좌표 미분소의 균일한 이차의 함수라는 가설... 그 자체로 고정된 형태들이 **공간의 모든 부분에서 변형 없이 자유롭게 이동할 수 있다는 것**을 처음부터 전제할 경우... 리만의 최초 가설은 훨씬 덜 제약적인 가정들의 귀결로서 도출될 수 있다는 것을 보일 수 있다.³⁸⁷⁾

이러한 유도를 위해 헬름홀츠가 제시하는 가설들(사실들)은 다음과 같다. 첫째, n차원 공간은 n차원의 연장된 다양체이다. 둘째, 합동에 의한 공간적 크기 비교를 가능하게 하는 데 필요한 이동이 가능한 강체 물체가 존재하고, 이 강체의 길이를 표현하는 방정식이 존재한다. 셋째, 고정된 물체의 완전한 자유 운동성이 성립한다. 넷째, 합동인 두 물체 중 하나가 임의의 방향으로 완전히 회전한 이후에도 두 물체는 여전히 그 합동성을 유지한다. 헬름홀츠는 이상과 같은 4가지 가설들을 전제한 후, 이차 미분 형식에 대한 리만의 가설을 연역적이고 수학적인 방식으로 유도해낸다.³⁸⁸⁾

387) Helmholtz., Hermann von. (1868/1977 B), p. 41. 강조는 나의 것이다.

이후 헬름홀츠는 다음과 같은 2개의 가설을 덧붙인다. 다섯째, 공간은 3차원을 가진다. 여섯째, 공간은 무한히 연장되어 있다.³⁸⁸⁾ 이상의 논의를 통해 헬름홀츠는 리만이 그 결론을 제시했지만 상세한 유도 과정이 생략되어 있던, ‘공간 속 선 요소의 이차 미분 형식 표현 가능성’을 뒷받침하는 지지 논증을 전개하고자 했다.

이처럼 리만과 마찬가지로 헬름홀츠의 논의에서도 핵심이 되는 전제는 특정하게 고정된 구조, 즉 길이의 측정 단위로 기능하는 어떤 공간적 구조물이 공간 내의 위치 변화에도 불구하고 그 길이를 유지한다는 것이었다. 또한 헬름홀츠 역시 리만과 더불어 이러한 전제가 일종의 ‘경험적 사실’일 것이라 보았다. 여기서 중요한 것은 정적인 개념을 제시했던 리만과 달리 헬름홀츠가 ‘공간적 구조’의 ‘자유 운동 가능성’ 개념을 명시적으로 도입했다는 것이다. 헬름홀츠의 생각 속에서 길이 측정 단위가 되는 고정된 공간적 구조는 그 길이를 유지한 채 자유롭게 운동하며 공간 속 길이 비교를 가능하게 해준다. 이 개념은 적극적인 방식으로 물리적 공간의 형태를 측정에 통해 결정할 수 있게 해주며, 공간의 개념을 기준계의 운동과 연결한다. 즉, 헬름홀츠의 사유는 공간의 기하학적 형태를 결정하는 측정 기준 물체의 운동을 고려함으로써 공간 개념을 물리적으로 탐구하는 결정적 역할을 했다.

리만과 헬름홀츠는 공간 속 ‘모든 종류의 기하학적 형태’들이 자유 이동의 원리를 만족시켜야 함을 가장 기초적인 전제로서 요구하지 않았으며, 이들이 요구한 것은 ‘길이를 측정하는 기초 단위 물체의 길이 불변성’이었다. 즉, 이들은 어떤 차원의 다양체인든 이 다양체의 1차원적 측도 불변성을 요구했다. 물론 공간은 3차원이며 공간 내 길이 측정 도구, 즉 작고 단단한 막대 또한 엄격히 말해 3차원적이다. 그러나 강체 막대의 주된 기능은 다른 물리적 대상의 길이를 측정하는 것 외의 다른 것이 아니다. 다시 말해, 리만과 헬름홀츠 모두 1차원 측정 기준 물체 길이의 위치 독립성을 주장한 것이지, 유독 헬름홀츠가 리만과 달리 3차원 측정 기준 물체 길이의 위치 독립성을 주장했다고 보기는 어렵다.

아인슈타인이 일반 상대론을 개발하는 데 헬름홀츠적 사고가 필요했다고 언급한 것³⁹⁰⁾은 실제로 그가 ‘회전 원판 사고 실험’에서 정확히 헬름홀츠의

388) 나의 논문에서는 헬름홀츠의 구체적인 수학적 유도 과정의 적법성과 타당성에 관해서는 논하지 않겠다. 다만 헬름홀츠의 수학적 논의가 이후 리(Lie)와 푸앵카레(Poincare)의 수학적 논의에 영향을 미쳤음을 언급하고자 한다.

389) Helmholtz., Hermann von. (1868/1977 B), pp. 41-58.

개념을 사용했기 때문이다. 이 사고 실험에서 회전하는 거대한 원판 가장자리에 있는 관측자는 원판의 원주율을 측정하기 위해 작은 측정 막대를 들고 이를 이용하여 원판의 둘레를 잰다. 이때 가정되는 것은, 비록 원판이 회전하고 있어 측정 막대가 힘(원심력)을 받는다고 하더라도 이 힘의 크기가 너무 작아 측정 막대의 단위 길이에 유의미한 영향을 미치지 못한다는 것, 측정을 위해 막대를 움직여도 막대 길이는 변함이 없다는 것이다.³⁹¹⁾ 만약 헬름홀츠가 측정 기준 물체 길이의 ‘자유 운동 원리’ 개념을 제시하지 않았다면 아인슈타인은 이러한 사고 실험을 떠올리기 어려웠을 것이다.

기하학의 기초에 관한 헬름홀츠의 논문 “기하학 공리들의 기원과 의의”는 앞서 살펴본 논문보다 더 대중적이고 평이하게 서술되어 있으면서도 그 자신의 공간 철학을 더 명료하게 개진하고 있다. 헬름홀츠는 이 논문에서 이후 널리 알려지게 된 ‘2차원적 존재에 대한 사고 실험’을 제시한다. 2차원 표면에 살며 그 신체 역시 2차원이지만 우리와 비슷한 지성과 지각 능력을 지닌 2차원적 존재를 상상하자. 우리는 이 존재가 자신이 사는 표면의 두 점 사이를 잇고 그 거리를 측정할 수 있다고 가정한다. 만약 이 존재가 구 표면에 살고 있다면 그는 유클리드 기하학과 달리 평행선이 존재하지 않는다는 공리를 수립할 것이다. 또한 구 표면의 경우 미소 영역에서는 삼각형 내각의 합이 180° 라고 할 수 있지만 삼각형의 크기가 커질수록 내각의 합 또한 커지기 때문에, 유클리드 기하학에서와 달리 기하학적 닮음의 개념이 성립하지 않는다고 판단할 것이다.³⁹²⁾

390) 우리는 아인슈타인이 1921년 논문 “기하학과 경험”에서 이와 같은 언급을 했음을 앞서 살펴본 바 있다. 아인슈타인이 1916년 12월에 대중을 대상으로 쓴 상대성 이론 해설서인 『상대성 이론 : 특수 상대성 이론과 일반 상대성 이론』(1부 1장, 2부 23장)에서도 유사한 관점이 제시된다. 실제로 아인슈타인은 생애의 말년에 이르기까지 헬름홀츠적 관점에 기반한 ‘회전 원판 사고 실험’이 일반 상대성 이론을 개발하는 데 있어서 결정적인 역할을 했다고 보았다.

391) 아인슈타인은 1921년 진행된 프린스턴 강연에서 구체적으로 다음과 같이 언급한다. “논의에서 강체와 시계의 변화는 속력에만 의존하고 가속에는 의존하지 않는다고 가정한다. 또는 최소한 가속의 영향이 속력의 영향을 상쇄하지 않는다고 가정한다.” 알베르트 아인슈타인 지음, 고중숙 옮김 (1922/1917), 128쪽 각주 참조.

392) Helmholtz., Hermann von. (1868/1977 A), pp. 6-7. 이와 같은 헬름홀츠의 논의와 실질적으로 같은 종류의 논의가 푸앵카레, 아인슈타인, 라이헨바흐, 카르납에게서 등장한다. 가장 대표적인 예를 들자면 다음과 같다. 앙리 푸앵카레, 이정우·이규원 옮김 (1902/2014) 2부에서의 논의(53-110쪽), 알베르트 아인슈타인·레오폴트 인켈트, 조호근 옮김 (1938/2017), 247-259쪽(“기하와 실험”)에서의 논의, 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986), 27-35쪽의 논의. 루돌프 카르납, 윤

가우스의 곡률 정의에 따르면 평면의 곡률은 0이 되고, 구면은 일정한 양의 곡률을 가지며, 나팔과 같은 의구(擬球)면은 일정한 음의 곡률을 갖는다. 2차원적 존재는 자신이 사는 표면의 환경에 따라 어떤 경우에는 평행선 공리를 가정할 것이지만 다른 경우에는 평행선 공리를 가정하지 않을 것이다. 그러므로 적어도 이 존재에게 유클리드 기하학의 공리는 선험적이거나 필연적이지 않으며, 어떤 공리를 설정하는지는 그가 사는 환경 속에서의 경험에 의존한다. 여기서 주목해야 하는 사실은 이와 같은 2차원적 존재 역시 자신이 사용하는 길이 측정 도구가 그 위치와는 독립적으로 단위 길이를 유지한다고 전제한다는 점이다. 이 길이를 표현하는 방정식이 이차 미분 형식을 갖고 있다는 것은 미소 영역에서 2차원 표면이 편평하다는 것을 뜻한다.

이 논문에서 헬름홀츠가 ‘모든 기하학적 형태들의 자유 운동 원리’가 성립하는, 일정한 곡률을 가진 2차원 공간들에 대해 언급하기는 한다. 그러나 헬름홀츠가 이와 같은 공간들을 명시적으로 언급하는 것은 유클리드 기하학의 공리들이 선험적이지 않으며 기하학의 공리들은 해당 인지적 존재가 속한 공간 경험으로부터 비롯됨을 주장하기 위해서였다. 구면(양의 곡률)이나 의구면(음의 곡률)은 평면에서처럼 모든 점에서 일정한 크기의 곡률을 가지는 표면이다. 이 두 종류의 면에서는 평면에서와 마찬가지로 임의의 기하학적 형태가 자유롭게 이동하며 합동성을 유지한다. 하지만 구면과 의구면에서는 유클리드의 제5 공리가 성립하지 않으며 이는 유클리드의 공리들이 선험적이지 않음을 뜻한다. 즉, 헬름홀츠가 제시한 ‘모든 기하학적 형태들의 자유 운동 원리’의 주된 목적은 유클리드 기하학이 ‘선험적 종합’이라는 칸트의 입장(당시 널리 받아들여지던 관점)을 반박하기 위해서였다.

타원면의 경우에는 그 위치에 따라서 곡률이 달라지므로 이와 같은 자유 운동이 가능하지 않다. 예를 들어, 타원면 위에서 하나의 삼각형을 운동시키면 삼각형의 위치에 따라서 한 변에 연계된 각의 크기가 달라질 것이다. 이러한 의미에서 모든 기하학적 형태들의 ‘자유 운동 원리’를 만족시키는 표면 즉 일정한 곡률을 갖는 표면은 여러 다양한 종류의 표면 중에서 특별하다 할 수 있다.³⁹³⁾ 그러나 헬름홀츠 논의의 핵심은 임의의

용택 옮김 (1966/1993) 제15장 "푸앵카레 대 아인슈타인"의 논의(189-197쪽).

393) 토레티는 자신의 저서(Torretti, Roberto., 1978, p. 100)에서 리만 역시 일정한 곡률을 가진 공간의 중요성을 지적한 바 있음을 언급한다. 리만 또한 1차원적 ‘선 요소’에서 나아가 3차원적 ‘강체 물체’가 의미가 있으려면 공간의 곡률이

기하학적 형태의 자유 운동 원리가 아닌, ‘길이 측정 단위의 자유 운동 원리’이다. 이는 이후 전개되는 헬름홀츠의 논의에서도 잘 드러난다.

2차원 표면에 관한 논의는 우리가 3차원 공간에 있는 까닭에 쉽게 상상할 수 있었다. 하지만 우리가 사는 공간의 차원은 우리 신체와 같은 3차원이며 우리는 4차원적 존재가 될 수 없으므로, 우리가 4차원적 관점에서 3차원에서의 상황을 상상할 수는 없다. 헬름홀츠가 볼 때 이 문제를 해결하는 방법을 리만이 제시했는데, 그것은 기하학을 ‘계량적 관점’에서 바라보는 것이다. 우리는 여기서 그와 같은 계량적 관점을 취하기 위해 다시 길이 측정 기준이 되는 물체의 행태에 주목해야 한다. 리만은 공간 속 어떤 선이라도 다른 선과 비교할 수 있다는 점, 즉 측정 단위의 위치 독립성으로 인한 길이 비교의 가능성을 주장했다. 만약 이 가능성을 하나의 전제로 받아들인다면 우리는 2차원 공간에서의 논의를 3차원 공간으로 확장할 수 있다. 2차원적 존재가 측정 도구를 이용한 측정을 통해 자신이 사는 공간의 형태를 결정할 수 있었던 것과 같이, 3차원에 사는 우리 역시 측정 도구를 이용한 측정을 통해 실제로 우리가 사는 3차원 공간이 어떤 형태를 가지는지 확인할 수 있을 것이다.³⁹⁴⁾

헬름홀츠는 3차원의 경우에도 여러 종류의 2차원 표면들에서처럼 서로 차별화되는 종류의 공간 속에서 어떤 지각적 경험이 일어날지 상상할 수 있을 것이라 주장한다. 그리고 이러한 자신의 주장을 뒷받침하기 위해 3차원 현실 세계를 2차원 표면에 투영한 볼록 거울의 사례, 의구면 속 2차원적 세계를 2차원 평면에 투영한 경우의 사례를 들기도 한다. 그러나 이러한 사례를 제시하는 헬름홀츠의 궁극적인 의도는, 3차원 공간에서도 2차원

일정해야 함을 말했다는 것이다. 이 지점에서 리만과 헬름홀츠의 논점을 구분하여 평가할 필요가 있다. 만약 미소 강체 막대가 1차원적 선 요소의 ‘물리적 구현물’이라면, 이 막대는 3차원임에도 불구하고 그 본래의 목적은 1차원적 크기 측정이며 공간에 비해 크기가 매우 작아야 한다. 헬름홀츠가 말하는 것은 ‘임의 크기의 기하학적 형태의 자유 운동 원리’이며, 이 점에서 헬름홀츠가 리만보다 더 정확한 논의를 하고 있다. 정확히 말해 일정한 곡률을 가진 공간은 ‘임의 크기의 기하학적 형태의 자유 운동 원리’를 만족하며, 만약 미소 강체 막대가 1차원적 선 요소의 물리적 구현물이라면 이 막대의 자유 운동 원리를 만족시키는 공간의 외연은 변동하는 곡률을 가진 공간 또한 포함한다.

394) Helmholtz., Hermann von. (1868/1977 A), pp. 11-14. 3차원 공간에서도 기하학적 도형의 형태를 결정하기 위해 측정하는 것은 1차원적인 ‘길이’이지 2차원적인 ‘넓이’ 또는 3차원적인 ‘부피’가 아니다. 그러므로 비록 작은 강체 막대가 실질적으로는 3차원적이라고 하더라도 이는 1차원적인 ‘길이’를 측정하는 도구이다.

공간에서와 마찬가지로 지금 우리가 사는 것과는 다른 형태의 공간 속에서 일어나게 될 일련의 지각을 충분히 떠올릴 수 있으며, 결과적으로 유클리드 기하학의 공리들을 선택적이라 볼 수 없음을 주장하는 것에 있었다.³⁹⁵⁾

하지만 여기서 문제가 발생한다. 헬름홀츠가 전제하고 있는 가설, 즉 공간 속 길이 측정 기준 물체가 자유 운동을 하더라도 위치에 독립적으로 일정 길이를 유지한다는 것은 당연히 받아들여야 하는 사실일까? 공간 속에 그 공간에 비하여 아주 작고 특정하게 고정된 공간적 구조가 존재해서, 그 구조가 공간 속 위치와 무관하게 길이 단위를 유지하는 것을 의심 없이 받아들일 수 있을까? 그렇지 않다. 왜냐하면 물리학에서 측정 단위 역할을 하는 구조물 역시 특정한 물리 법칙의 지배를 받을 것이며, 그렇기에 어떤 구조물이 공간에서 위치 독립적 강성(단단함)을 유지하는지는 물리학 이론 및 경험적 관측을 근거로 확인해야 하기 때문이다. 앞서 살펴 보았듯 리만 역시 이와 유사한 견해를 제시했고, 헬름홀츠 또한 논문 마지막 부분에서 이러한 점을 언급한다.

이제 우리에게서 물체들과 공간적 구조들의 고정성에 대해... 이들이 항상 전과 같은 합동성을 보여준다는 것 이외의 다른 기준이 없다. 그러나 우리는 물체들이 서로에 대해 같은 방식으로 변화하여 합동성을 유지하는지를 역학적 고려를 하지 않은 채 순수하게 기하학적인 방법으로만 판단할 수는 없다.³⁹⁶⁾

우리는 기하학의 기초에 관한 리만과 헬름홀츠의 탐구가 얻은 결론을 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 유클리드 기하학의 공리보다 더 일반적인 기하학의 전제가 존재하며, 이 전제는 칸트의 생각과 달리 경험적 가설들이다. 둘째, 만약 우리가 측정 단위 물체의 위치 독립성이라는 전제를 수용한다고 하더라도 가능한 물리적 기하학은 다양하다. 예를 들어, 공간 속에서 임의의 기하학적 형태가 자유롭게 이동할 수 있어야 한다는 좀 더 제약적인 조건을 만족시키는 기하학만 해도 유클리드 기하학뿐만 아니라

395) 이후 라이헨바흐는 이상과 같은 헬름홀츠의 논의를 이어받아, 실제로 비유클리드적인 3차원 공간 속에서 우리가 구체적으로 어떤 지각을 경험할 것인지를 상세하게 제시함으로써 헬름홀츠의 논점을 더 강화한 바 있다. 라이헨바흐가 자신의 『시간과 공간의 철학』 제1장 11절 및 12절에서 제시하고 있는 구체적인 사례들은 이와 같은 헬름홀츠의 철학적 논의의 연장선상에서 이해해야 할 것이다. 한스 라이헨바흐, 이정우 옮김 (1928/1958/1986), 73-109쪽 참조.

396) Helmholtz., Hermann von. (1868/1977 A), p. 24.

구면 기하학과 쌍곡면 기하학이 존재한다. 셋째, 우리의 공간 측정 경험은 일상적이고 국소적인 영역으로 제한되어 있으므로, 실제로 인간의 일상적 공간과 대비되는 거시세계나 미시세계에 적용되는 기하학이 무엇인지는 추가적인 경험을 통해 확인할 필요가 있다. 다양한 곡률을 가진 2차원 다양체의 모든 미소 영역이 편평한 것처럼, 3차원 공간 역시 국소적으로는 편평하나 거시적으로는 편평하지 않을 수 있다. 또한 기초 측정 도구가 일상적 크기를 갖고 있으므로, 이에 기반한 공간 기하학의 공리들은 미시적인 세계에는 적용되지 않을 수 있다.³⁹⁷⁾

이상과 같이 살펴본 것처럼, 리만과 헬름홀츠는 물리적 기하학의 선형적 특성을 주장한 칸트의 주장에 반대하여 기하학의 기초에 놓인 가설들이 유클리드의 공리들보다 더 단순하며 그 본성상 경험적이라 보았다. 리만과 헬름홀츠 모두 ‘측정 기준 물체의 위치 독립성’을 핵심적 가설로 보았으며, 선 요소가 이차 미분 형식으로 표현된다는 것이 공간을 다른 다양체와 구분하는 독특한 특성이라고 보았다. 헬름홀츠가 언급하는 ‘임의적 기하학적 형태의 자유 운동 원리’는 유클리드 기하학의 선형적 특성을 반박하기 위해 헬름홀츠가 사용한 일종의 논증적 도구였다. 그러므로 아인슈타인의 일반 상대론에서 사용되는 미분기하학이 3차원 물체의 자유 운동 원리를 허용하지 않는다는 이유로 헬름홀츠의 사고가 일반 상대론과 관련이 없다고 주장하기는 어렵다.³⁹⁸⁾

헬름홀츠에 이르러 길이 측정의 기준이 되는 강체 막대를 운동시킴으로써 공간의 기하학적 형태를 직접 경험적으로 결정할 수 있다는 생각은 리만의 초기 개념과 비교할 때 더 구체화 되었다. 공간 개념의 기준이 되는 길이 측정 물체가 자유 운동하는 단계에 이르면 이 물체는 좀 더 물리적인 고찰의

397) 헬름홀츠와 관련하여 다음의 사항을 언급할 필요가 있다. 1860년대 후반까지 그의 관점은 인간 지각에 관한 생리학적 탐구에 기반하였으며 경험주의적인 성격을 강하게 띠고 있었다. 그런데 이후 그가 베를린 대학에 물리학 교수로 부임하면서(1870년) 그의 탐구는 수학적 성격을 강하게 띠게 된다. 경험을 중시하는 관점에서 수학적 형식론을 중시하는 관점으로서의 이행은 헬름홀츠 이외의 학자들에게서도 볼 수 있으며 그 대표적인 예가 아인슈타인이다. 헬름홀츠의 철학적 탐구 경향의 변화에 대해서는 크리스타 옴니켈·러셀 매코마크, 구자현 옮김 (1986/2014) 제2권과 제3권에 수록된 헬름홀츠의 학문적 이력을 참조.

398) 나는 이 논점에 대해 본 논문의 7장에서 상세히 논의한다. 이 논점은 특히 과학 철학자 지오바넬리(Giovanelli)가 이른바 ‘헬름홀츠적(물리화) 전통’이 일반 상대론의 전개와는 무관했다고 주장하는 근거가 된다.

대상이 된다. 과연 헬름홀츠가 말하는 ‘자유 운동’이란 어떤 운동인가? 우리는 이러한 측정 물체의 단위 길이가 외부의 물리적 힘으로 인해 체계적으로 변할 가능성을 배제할 수 있을까? 공간 개념에 대한 이러한 물리적 논의를 헬름홀츠 이후 심화시킨 인물이 푸앵카레다.

제4절. 푸앵카레 : 물리적 기하학의 규약적 특성

앙리 푸앵카레(Henri Poincare, 1854-1912)는 19세기 후반에 활동한 대표적인 수학자, 물리학자, 철학자였다.³⁹⁹⁾ 그의 과학사상을 잘 드러내는 저서는 『과학과 가설』(1902년)이다. 푸앵카레는 기본적으로 칸트의 인식론적 관점을 견지하면서 18세기 이래로 새롭게 발견된 수학적, 물리학적 성과들을 칸트적 방식으로 해석하고자 했다. 그렇기에 그가 말하는 ‘규약(convention)’은 칸트 철학의 문맥에서 이해해야 한다. 푸앵카레의 ‘규약’은 우리가 일반적으로 사용하는 임의적 약속으로서의 ‘규약’과 구분된다. 만약 칸트의 ‘선험적 종합’이 지식의 확실성을 보장하는 근거이며 유일무이한 것이라면, 푸앵카레의 ‘규약’은 지식을 위해 꼭 필요하지만 유일하게 결정할 수 없도록 2개 이상의 선택지가 주어지므로 이들 중에서 선택해야만 한다. 푸앵카레는 물리적 기하학이 어떤 의미에서 ‘규약’인지 명료하게 사유함으로써 공간에 관한 물리적 탐구를 심화시켰다.

우선 푸앵카레는 산술에서의 회귀적 추론(수학적 귀납)은 모순율로는 환원 불가능하며 경험을 통해서 얻을 수 없는 ‘선험적 종합 판단’이라 보았다. 회귀적 추론의 필연성은 지성의 능력 및 이에 대한 직접적 직관에 근거하며, 이러한 점에서 그는 수학적 인식이 선험적이자 종합적이라는 칸트의 입장을 견지한다.⁴⁰⁰⁾ 그런데 우리는 이와 같은 회귀적 추론에 머물지 않고 외부 세계에 대한 감각의 두 집합을 서로 다른 것으로서 식별함으로써 물리적 연속체의 개념으로 나아간다. 연속체는 일차원, 이차원, 삼차원 등을 가질 수 있고, 우리가 물리적 연속의 정의에 ‘측정’의 개념을 도입하면 연속체는

399) 푸앵카레에 대한 유용한 전기적 서술로 에릭 벨, 안재구 옮김 (1937/1993) 하권의 “푸앵카레” 항목(289-322쪽)을 참고하라. 푸앵카레의 규약주의 일반에 대한 개괄은 Ben-Menahem, Yemima. (2006), pp. 39-79를 참고. 푸앵카레의 기하학 철학에 대한 좀 더 상세한 서술로 Torrett, Roberto. (1978), pp. 320-358이 유용한 참고가 된다.

400) 앙리 푸앵카레, 이정우·이규원 옮김 (1902/2014) 중 제1부 제1장.

공간으로 변화하고 기하학 탐구가 가능해진다.

그러나 푸앵카레가 볼 때 기하학적 탐구가 그 자체로 경험적 사물들에 대한 탐구는 아니다. 비록 우리가 감각을 경유하며 물리적 연속체의 개념으로 나아갔다고 하더라도, 일단 기하학을 공리적으로 연구하기로 한 이상 기하학에 대한 탐구에는 추가적인 경험적 자료가 필요하지 않기 때문이다. 푸앵카레는 비유클리드 기하학의 개발에 근거하여 기하학적 탐구가 경험과 독립적인 성격을 가진다고 보았다. 타원 기하학, 쌍곡 기하학, 유클리드 기하학 모두 상호 번역이 가능하며 그런 의미에서 ‘서로 동등한 수학적 기하학’이다. 그렇다면 수학적 기하학이 수학적 귀납법과 마찬가지로 칸트가 생각했던 ‘선험적 종합 판단’일까?

푸앵카레는 이 물음에 대해 부정적으로 답한다. 산술에서의 회귀적 추론은 유일무이한 방식의 추론이지만 기하학은 단일하지 않고 복수가 가능하므로 그 자체로 칸트가 생각했던 ‘선험적 종합 판단’의 지위를 가질 수 없기 때문이다. 그렇다고 기하학을 실험적 사실에 지나지 않는다고 말할 수도 없다. 수학적 기하학에서의 공간적 관계는 극도로 이상화되고 추상화된 까닭에, 실제 사물들에 의해서는 이 관계가 결코 정확히 구현되거나 반증이 되지 않기 때문이다. 즉, 기하학의 이상적이고 추상적인 특성으로 인해 기하학은 단순히 경험적인 과학일 수 없다.

...기하학의 공리는 선험적 종합 판단도 실험적 사실도 아니다.

그것은 **규약**이다. 가능한 모든 규약 가운데 우리의 선택은 실험적 사실을 통해 **유도된다**. 하지만 선택은 여전히 **자유로우며**, 모든 모순을 피해야 할 때만 제한을 받는다... 하나의 기하학이 다른 기하학보다 더 참일 수는 없다. 단지 더 편리할 수 있을 뿐이다.⁴⁰¹⁾

이처럼 푸앵카레는 물리적 기하학이 일종의 ‘규약’이라고 주장한다. 자연 탐구를 위해 반드시 기하학이 필요하지만, 복수의 수학적 기하학이 가능하며 경험이나 실험은 이들 중 어떤 기하학을 선택해야 하는지 우리에게 직접 알려주지 않는다. 따라서 물리학 탐구를 위한 기하학을 결정하는 과정에서는 반드시 ‘선택’이 필요하며, 그와 같은 선택으로 인해 기하학은 선험적 종합이 아닌 일종의 ‘규약’이 된다. 물리적 기하학이 규약이라면

401) 앙리 푸앵카레, 이정우·이규원 옮김 (1902/2014), 71쪽.

우리는 여러 기하학 중 하나를 선택해야 하는데, 푸앵카레는 우리의 선택이 늘 유클리드 기하학일 것이라고 보았다. 이에 대한 이유는 두 가지이다. 첫째, 유클리드 기하학은 수학적으로 가장 단순하며 편리하다. 둘째, 우리가 사는 물리적 세계에서 다수의 고체는 이상적 강체에 근사하는 특징(변형되지 않는 운동)을 보이며 이는 유클리드 기하학에 부합하기 때문이다.⁴⁰²⁾

비유클리드 기하학의 발견으로 인해 수학적 기하학이 하나가 아닌 여럿임을 부정할 수 없게 되었다. 하지만 우리는 리만과 헬름홀츠, 특히 헬름홀츠의 생각이 암시하는 것처럼 경험 또는 실험을 통해 물리적 세계에 적용되는 기하학이 특정한 기하학임을 직접 확인할 수 있지 않을까? 구체적으로 말해, 특정한 영역의 공간이 어떤 기하학적 형태를 띠고 있는지를 기준 막대를 이동해서 측정해봄으로써 파악할 수 있지 않을까? 이 물음에 대해 푸앵카레는 부정적으로 답했으며, 그의 부정적 답변은 푸앵카레 이후 ‘규약주의’의 논의를 이끌어가는 데 큰 영향을 주었으므로 이를 자세히 살펴보자.

푸앵카레에 따르면 우리는 시각, 운동, 촉각 감각 등 우리의 감각을 통해 ‘표상적 공간’을 형성한다. 우리는 2차원적인 시각 공간에 운동 감각을 결합함으로써 공간을 3차원적으로 표상하며, 우리의 촉각 감각 역시 시각과 운동을 통해 형성된 3차원 공간과 대응함을 알게 된다. 그런데 우리의 감각을 통해서만 공간의 3차원적 특성만을 인지할 수 있을 뿐 공간의 계량 관계까지는 확정하지 못한다.

이상의 논의를 전제한 후 푸앵카레는 다음과 같은 가상의 상황을 떠올린다. 온도가 중심에서 가장 높고 가장자리로 갈수록 낮아져서(R^2-r^2 에 비례) 물체들의 길이가 온도에 비례해 줄어드는 구의 세계가 있다고 가정하자. 그런데 이때 특별히 온도가 세계의 거주자들을 비롯한 모든 생물과 무생물에 같은 방식으로 영향을 미친다는 추가적인 가정을 하면, 이 세계의 거주자들은 온도가 달라지는 것을 파악하지 못하는 대신 물체들이 비유클리드 기하학의 법칙에 따른다고 인지할 것이다. 중요한 점은 이때 이 가상 세계의 거주자들이 적어도 측정 기준이 되는 물체의 단위 길이는 온도에 영향을 받지 않는다고 가정한다는 것이다. 그리고 이는 앞서 살펴본 바 있던 리만과 헬름홀츠가 수용했던 가정이다.

402) 앙리 푸앵카레, 이정우·이규원 옮김(1902/2014) 중 제2부 제3장. 여기서 푸앵카레는 측정 단위 물체가 아니라 고체 일반에 대해 말하고 있음을 유의하라. 측정 단위 물체의 길이 독립성은 유클리드 기하학뿐만 아니라 비유클리드 기하학에도 부합한다.

그런데 문제는 이러한 결론을 내리지 않을 수 있다는 데 있다. 만약 우리가 측정 기준 물체 역시 다른 물체들과 함께 온도에 따라 그 길이가 변한다고 가정할 경우, 여전히 우리는 물리적 기하학을 유클리드 기하학으로 유지할 수 있기 때문이다. 물론 이때 이 세계의 거주자들은 측정 기준 물체가 특정하게 작용하는 힘에 체계적으로 영향을 받는다고 별도로 가정해야 한다. 이러한 추가적인 가정을 할 경우, 경험적 관측 결과는 유클리드 기하학과 비유클리드 기하학 중 어떤 기하학을 이용하더라도 정합적으로 해석할 수 있게 된다. 따라서 푸앵카레가 볼 때 우리는 리만 및 헬름홀츠의 생각과 달리 경험적 측정 결과만으로는 물리적 기하학을 일의적으로 결정하지 못한다.⁴⁰³⁾ 이 예시에서 볼 수 있듯 늘 경험적 측정 결과는 물리적 기하학 자체가 아니라 측정 기준 물체에 관한 것이므로, 우리는 필요한 경우 측정 기준 물체들이 따르는 물리학 법칙들을 조정 혹은 변경함으로써 특정한 수학적 기하학을 계속 적법한 물리적 기하학으로서 유지할 수 있다. 따라서 리만과 헬름홀츠의 추측과 달리 물리적 기하학은 경험만으로 결정될 수 없다.⁴⁰⁴⁾

앞서 우리는 리만과 헬름홀츠가 측정 기준 물체의 길이 독립성 및 자유 운동 원리를 계량 기하학의 기초가 되는 경험적 가설로 보았음을 살펴보았다. 공간 다양체의 핵심적 특성은 다양체의 모든 영역에서 길이가 객관적으로 비교 가능하다는 것이며, 이는 길이 측정 단위가 위치에 독립적임을 의미한다. 비록 리만과 헬름홀츠는 이것이 “경험적 가설”이므로 물리학 탐구를 통해 확인해야 함을 인정했지만, 이들은 이 가설에 근거해서 공간의 기하학적 형태를 경험적으로 결정할 수 있을 것이라 보았다. 푸앵카레는 이러한 리만과 헬름홀츠의 생각에 도전했다. 그는 길이 측정 기준이 되는 물체 역시 다른 사물들과 마찬가지로 물리적 법칙들을 따르며, 그런 의미에서 이 기준 물체의 단위 길이가 특정한 물리적 법칙에 따라 체계적으로 변화할 수 있다고 주장한 것이다.

푸앵카레가 자신의 사고 실험 속에서 ‘물리적 세계 속 모든 사물을 같은 방식으로 변형’시키는 ‘특수한 종류의 힘’을 명시적으로 제시했다는 점에 주목하자. 특히 이 힘은 관측자뿐만 아니라 측정 도구 역시 같은 형태로 변화시키므로 관측자에게는 이 힘이 작용하는지 식별할 수 있는

403) 앙리 푸앵카레, 이정우·이규원 옮김 (1902/2014) 중 제2부 제4장.

404) 앙리 푸앵카레, 이정우·이규원 옮김 (1902/2014) 중 제2부 제5장.

그 어떤 방법도 없다. 만약 물질의 질량 혹은 질적 특성에 따라 이 힘이 미치는 영향이 달라진다면 이 힘의 존재를 식별할 수 있겠지만, 이 힘은 그 정의상 물질의 질량 혹은 특성과 무관하게 같은 방식으로 영향을 미치므로 물질 사이의 비교를 통해서 확인할 수 없다. 그런데 푸앵카레가 말하는 이러한 종류의 ‘특수한 힘’을 도입하는 것은 다소 부자연스럽지 않을까? 이 지점에서 물리학의 근본 법칙을 바라보는 푸앵카레의 독창적 시각이 제시된다. 푸앵카레는 물리적 기하학뿐만 아니라 근본적 물리 법칙 또한 선택이 가능한 ‘규약’이라고 보았으며, 그러한 관점을 바탕으로 이러한 ‘특수한 힘’에 관한 주장을 정당화할 수 있었다.

푸앵카레는 절대 공간과 절대 시간은 존재하지 않는다고 주장했다. 우리가 물리적 세계 속에서 파악할 수 있는 것은 오직 상대적 운동과 상대적 시간이기 때문이다. 푸앵카레가 볼 때 공간의 기하학적 형태가 규약에 지나지 않은 것처럼, 두 지속 시간이 같다는 주장 역시도 하나의 규약에 지나지 않는다. 푸앵카레는 뉴턴의 운동 제1 법칙인 관성의 법칙 역시 일종의 규약이라고 주장했다. 특수한 경우에 국한하여 실험적으로 검증된 관성의 법칙을 가장 일반적인 형태의 법칙으로 공식화할 경우, 이 법칙은 원래의 실험법칙에 비해 고도로 일반화되어 있을 뿐만 아니라 이 법칙 자체가 물체의 운동 상태를 정의하는 역할을 담당한다. 그러므로 근본적인 운동 법칙으로 설정되어 물리학 전체의 기초를 이루는 ‘구성적’ 역할을 맡게 되면, 일반적인 경험적 측정 또는 실험에 의해서는 일반화된 관성의 법칙을 쉽게 입증하거나 반박하지 못한다. 그런 의미에서 푸앵카레는 관성의 법칙을 일종의 ‘규약’이라고 불렀다.⁴⁰⁵⁾ 이와 유사한 종류의 논의가 뉴턴의 운동 제2 법칙과 제3 법칙, 상대적 운동의 원리, 에너지 보존의 원리, 최소 작용의 원리, 엔트로피 증가의 법칙에 대해서도 제시된다.⁴⁰⁶⁾ 이에 관해 푸앵카레는 다음과 같이 말한다.

물리학에서의 공준이 자신을 이끌어 낸 실험적 진리에는 결여된 일반성과 확실성을 가지고 있다면, 이는 결국 우리에게 만들 권리가 있는 단순한 규약으로 환원된다... 우리가 규약을 채택하는 것은 실험을 통해 그 편리함을 알게 되었기 때문이다.⁴⁰⁷⁾

405) 앙리 푸앵카레, 이정우·이규원 옮김 (1902/2014) 중 제2부 제6장.

406) 앙리 푸앵카레, 이정우·이규원 옮김 (1902/2014) 중 제2부 제7장-제8장.

이처럼 물리학의 근본 법칙 또한 본질적인 차원에서 선택을 허용하는 ‘규약’이라고 봄으로써, 푸앵카레는 물리적 기하학에 관한 철학적 논의에 다음과 같은 중요한 통찰을 제시했다. 첫째, 길이 측정 기준 물체가 그 길이를 위치에 독립적으로 유지한다고 하는 것은 순수한 경험적 가설일 수 없으며 그 진위를 쉽게 경험적으로 결정할 수 없다. 이 가설은 일종의 ‘규약’이며 선택의 여지를 남긴다. 왜냐하면 우리는 푸앵카레가 말하는 ‘보편력’을 도입하여 물리학의 법칙을 수정함으로써 이 가설과는 반대되는 가설을 채택할 수 있으며, 이러한 반대 가설 역시 ‘보편력’의 특수성으로 인해 경험적으로는 원래 가설과 동등하기 때문이다. 둘째, 만약 기준 물체 길이의 독립성 가설이 일종의 ‘규약’이라면, 우리는 가능한 여러 가설(규약)이 갖는 장단점을 비교하여 선택할 수 있다.

푸앵카레는 만약 우리가 측정 기준 물체를 체계적으로 변형시키는 보편력을 도입한다고 하더라도 그 결과 우리가 유클리드 기하학을 유지할 수 있다면 이를 수용할 수 있다고 주장했다. 왜냐하면 유클리드 기하학이 가능한 여러 수학적 기하학 중에서 가장 ‘단순’하기 때문이다. 물리학의 근본 법칙 역시 우리에게 일종의 ‘선택’을 허용하는 규약이므로, 우리는 물리적 기하학을 수학적으로 단순화하기 위해서 ‘보편력’을 도입하는 물리적 법칙을 선택할 수 있다. 우리는 물리적 기하학을 직접 확인하는 것이 아니라 강체 막대, 자연 시계, 빛 광선과 같이 자연적 과정을 통해서 간접적으로 확인함을 강조한 것은 푸앵카레가 리만, 헬름홀츠의 개념을 이어받아 발전시킨 독창적인 사유였다. 이에 더해 그는, 기초 측정 물체 혹은 기초적 자연 과정을 통해서도 물리적 기하학이 경험적으로 쉽게 결정되지 않는다는 점 또한 올바르게 지적했다.

이상과 같은 푸앵카레의 철학적 사고는 아인슈타인에게 여러모로 중요한 영향을 미쳤다.⁴⁰⁷⁾ 물리적 기하학과 물리학의 근본 법칙들을 ‘규약’이라고 바라본 푸앵카레의 관점은 아인슈타인에게 일종의 사상적 자유로움을 주었을 것이다. 마흐(Mach)의 절대적 시간 공간 비판이 아인슈타인을 비롯한 당대의 젊은 물리학자들에게 큰 자극이 되었던 것처럼, 물리학을 바라보는

407) 앙리 푸앵카레, 이정우·이규원 옮김 (1902/2014), 159쪽.

408) 아인슈타인은 스위스 특허청 시절 ‘올림피아 아카데미’라는 독서 토론 모임을 결성하여 중요한 철학 및 물리학 서적들을 읽고 자유롭게 토론했다. 그 서적 중 하나가 바로 푸앵카레의 『과학과 가설』(1902년)임이 잘 알려져 있다.

푸앵카레의 철학적 관점 역시 과감하게 독창적인 생각을 하도록 자극했다. 물리적 공간뿐만 아니라 시간 역시 일종의 ‘규약’이라고 본 것, 물리학에서 상대성 원리의 중요성을 거듭 강조한 것, 당시 유력했던 로렌츠(Lorentz)의 전자기 이론을 비판적으로 검토한 것 등 상대론의 발전에 관한 푸앵카레의 개념적 기여는 다양했으며 그 자신이 이미 특수 상대론에 상당히 근접해 있었다.

이 장의 논의에서 내가 기존 논의들과는 다소 다른 방식으로 푸앵카레의 기여를 해석하는 부분이 있다면 이는 다음과 같은 점이다. 푸앵카레는 물리적 기하학의 경험적 결정 문제가 리만과 헬름홀츠가 생각했던 것보다 더 복잡하게 측정 기준 물체와 관계되어 있으며, 그러한 복잡한 관계가 다름 아닌 ‘물리적 관계’임을 올바르게 지적했다. 특히 우리는 푸앵카레가 도입한 ‘보편력’의 개념에 주목한다. ‘보편력의 제거’는 헬름홀츠의 ‘자유 운동 원리’에 숨겨져 있는 전제라 볼 수 있다. 만약 측정 기준 물체에 세계 속 모든 물체에 같은 방식으로 작용하는 힘이 작용한다면, 적어도 그 세계 속에 있는 인지적 존재자들은 기준 물체에 아무런 힘이 작용하지 않는다고 생각할 것이기 때문이다. ‘보편력’이 작용하더라도 여전히 이를 정의를 통해 제거하고 세계 내에서 ‘자유 운동 원리’가 성립한다고 볼 수 있다. 이러한 생각을 훗날 아인슈타인이 일반 상대론을 구상해나갈 때 중요하게 참조하게 된다. 왜냐하면 중력 역시 그 특성상 일종의 ‘보편력’이라고 생각할 수 있기 때문이다.⁴⁰⁹⁾

또한 주목할 것은 이상과 같은 푸앵카레의 논의를 통해 공간과 시간을 측정 물체와 함께 물리학 내부로 도입하는 맥락이 좀 더 구체화 되었다는 것이다. 푸앵카레에 따르면 물리적 공간의 기하학적 형태를 결정하게 해 주는 길이 측정 기준 물체에는 ‘보편력’이 작용할 수 있으며, ‘보편력’을 상정함으로써 물리적 기하학을 유클리드적인 방식으로 유지할 수 있다. 이를 거꾸로 생각하면, 우리는 ‘보편력’을 없애는 방식으로 물리적 기하학을 비유클리드적인 것으로 약속할 수도 있다는 결론이 나온다. 이와 더불어 푸앵카레는 시간 간격의 동일성도 구체적인 시간 측정 과정에 기반하여 선택하고 약속하는 일종의 ‘규약’이라 보았다. 그렇기에 그는 공간뿐만 아니라 시간 측정 물체인 시계를 물리학 속에 도입할 수 있는 개념적 자원을 마련했다. 이에 관해 푸앵카레는 다음과 같이 말한다.

409) 중력의 이러한 특성에 대해서는 논문 6장과 7장에서 좀 더 상세하게 논한다.

...절대 시간은 존재하지 않는다. 두 지속이 같다는 것은 그 자체로는 아무런 의미도 없고, 규약에 의해서만 의미를 부여받을 수 있다는 주장일 뿐이다. ... 우리는 두 지속의 등가성에 대한 직접적 직관을 갖고 있지 않을 뿐만 아니라, 서로 다른 장면에서 일어나는 두 사건의 동시성에 대한 직접적 직관도 갖고 있지 않다.⁴¹⁰⁾

물리학자 로렌츠(Lorentz, 1853-1928)가 아인슈타인에게 당시의 물리학에 관한 최신 정보와 기준을 제공했다면, 푸앵카레는 아인슈타인에게 시간과 공간을 물리적으로 사유하기 위한 개념적 자원을 가장 많이 제공했던 인물이었다. 이렇듯 리만, 헬름홀츠를 이은 푸앵카레의 논의에서 시간과 공간 개념이 구체적인 측정 물체를 통해 물리학 속에 이론적으로 구현될 개념적인 준비가 거의 이루어졌다. 정적인 측정 물체(리만)가 자유 운동을 하게 되었고(헬름홀츠), 이후 이 물체는 체계적인 힘을 받을 수 있게 되었다(푸앵카레). 그러나 여전히 시간 개념은 물리적 세계의 밖에 있다.

제5절. 결론

리만의 1854년 교수취임 강연은 수학과 물리학의 관점 모두에서 일종의 획기적인 사건이었다. 분명 리만의 국소적 기하학 개념이 이후 크리스토펠과 리치에 의해서 해석적 미분기하학으로 발전한 것은 부정할 수 없으며, 이러한 수학적 이론 발전이 없었다면 아인슈타인이 일반 상대론의 중력장 방정식을 완성할 수 없었을 것이라는 점도 명백하다. 그러나 아인슈타인의 상대론을 위해서 더 중요했던 것은 리만 이후 헬름홀츠와 푸앵카레에게로 이어진 물리적 관점의 발전, 더 정확히 말해 물리학 밖에서 전제되었던 수학적 공간 개념을 길이 측정 물체와 함께 물리적 세계 속으로 집어 넣어 물리적으로 사유하는 개념적 발전이었다.

이러한 개념적 발전은 급작스러운 방식이 아니라 단계적으로 이루어졌다. 리만은 공간 다양체의 모든 곳에서 길이 측정 단위를 제공하는 물체를 도입했는데, 이 물체는 정적이었으며 실제 물리학에서 수행되는 길이 측정 과정과는 다소 거리가 있었다. 헬름홀츠는 길이 측정 단위 물체의 ‘자유

410) 앙리 푸앵카레, 이정우·이규원 옮김 (1902/2014), 114쪽.

운동 원리'를 도입함으로써, 비로소 물체를 움직여 물리적 공간의 형태를 직접 경험적으로 측정할 수 있는 개념적 가능성을 열었다. 이 논의를 좀 더 진지한 물리학적 논의로 만든 것이 푸앵카레였다. 특히 푸앵카레는 '보편력' 개념을 도입하여, 만약 측정 기준 물체에 체계적인 힘(모든 물체에 같은 방식으로 작용하는 힘)이 가해진다고 가정하면 물리적 기하학의 경험적 결정이 쉽게 이루어지지 않음을 지적했다.

또한 우리는 시간과 공간을 물리적으로 사유하는 이와 같은 전통 속에서 두 가지의 철학적 관점이 서로 대화하는 것 역시 확인할 수 있다. 자유 운동하는 측정 기준 물체를 통해 공간의 기하학적 형태를 결정할 수 있다고 본 헬름홀츠는 '경험주의'의 관점을 대표한다. 이와 대비하여, 물리학 법칙의 조정을 통해 측정 기준 물체에 체계적으로 작용하는 힘을 도입함으로써 우리가 공간의 기하학적 형태를 능동적으로 선택할 수 있다고 본 푸앵카레는 '규약주의' 관점을 대표한다. 이와 같은 헬름홀츠의 '경험주의'와 푸앵카레의 '규약주의'는 이후 상대론이 개발되는 과정에서뿐만 아니라 이후 이 이론을 철학적으로 정당화하는 데 핵심적인 역할을 했고, 상대론 이후의 물리학 추구에서도 중요한 개념적 자원이 되었다.

리만 이후 크리스토펠, 리치를 통해 발전된 해석적 미분기하학은 일반 상대론을 수립하기 위한 수학적 언어를 아인슈타인에게 제공했다. 그러나 이와 같은 수학적 언어는 리만에게서 시작되어 발전한 시간과 공간에 대한 물리적 성찰을 이론적으로 구현하기 위한 개념적 도구를 제공했을 뿐이다. 리만, 헬름홀츠, 푸앵카레로 이어진 이와 같은 물리적 사유의 전통을 이해하지 않는 한 우리는 상대론적 시간과 공간의 의미를 정확히 파악할 수 없다. 실로 리만의 개념은 공간을 물리적인 대상으로 만들기 위한 첫 발걸음이었다. 이후 헬름홀츠와 푸앵카레를 거치며 시간과 공간은 측정 기준 물체에 관한 물리학 이론으로 구현될 채비를 갖추었다.

Abstract

Logical Empiricist Philosophical Explication of Relativistic Space and Time

Kang, Hyeong-gu

Interdisciplinary Program in History and Philosophy of Science

The Graduate School

Seoul National University

In this dissertation, I examine the formation of logical empiricist philosophy of space and time through the philosophical analysis of relativity theory and its philosophical significance. Philosophers such as Schlick, Carnap, and Reichenbach, who represent logical empiricism, all conducted in-depth philosophical analysis of relativistic space and time. By examining the formation of logical empiricist philosophy of space and time with a focus on Reichenbach's analysis of relativity theory, I critically review and refute the arguments presented by some philosophers in this theme recently. In particular, I will show that the core of logical empiricism's philosophy of space and time is not the 'conventionalism' of physical geometry, but the 'causal theory of space and time', which is derived from the 'empirical' analysis of relativistic space and time.

First, I argue that relativity theory was developed in the context of the tradition in the physicalization of space and time followed by Riemann, Helmholtz, and Poincare. Moreover, Einstein's own thought

process and logical empiricist philosophy of space and time are also can be well understood from this perspective of physicalization of space and time. From the point of physicalization, relativity theory is a theory that physicalizes space and time, which had previously remained at the conceptual level, through physical objects (processes) such as rigid rods, natural clocks, and light signals. On this basis, I refute Giovanelli's assertion that relativity, in particular general relativity, relates only to the analytic tradition developed by Christoffel and Ricci after Riemann and has nothing to do with the tradition of physicalization(so-called Helmholtzian tradition).

Second, I critically examine Friedman's interpretation of 'relativized a priori' presented by Reichenbach in his *Theory of Relativity and a priori knowledge* (1920). I agree to Friedman that Reichenbach modified Kant's concept of a priori to constitutive principle as historically changeable, and Reichenbach's constitutive principles were theory-specific principles closely connected with relativity theory. However, Friedman wrongly diagnosed that Reichenbach lost the original meaning of the theory-specific constitutive principle by adopting the term 'convention' instead of 'relativized a priori' after his correspondence with Schlick. While I acknowledge Friedman's claim to some extent, I show that Reichenbach's concept of 'relativized a priori' already from 1920 had 'empirical' character distinct from Kant's own concept of a priori. Consequently, Reichenbach systematically analyzed relativistic space and time from the perspective of empiricism, and in contrast to this, a position close to the Kantian concept of 'a priori' reappeared later in Carnap's 'Language Frame Philosophy.'

Third, I show that Reichenbach's axiomatic reconstruction of relativistic space and time presented in his *Axiomatization of Relativity Theory* (1924) was to investigate the problem of the empirical objectivity of space and time. This problem was the most important philosophical problem raised by Einstein's theory of

relativity. Reichenbach constructed 'light geometry' with topological and metrical axioms using light signals, and established special relativistic space-time order with light geometry and the rigidity of the measuring objects. Afterwards, he showed that although metrical axioms do not hold in general relativity, topological axioms still hold. Because topological axioms are based on causal signals of light, so we can argue that space-time as a causal order is still empirically objective and objectively recognized. This was a philosophical correction of Einstein's radical claim that the physical objectivity of space and time disappeared by pursuing general relativity. In addition, this was a reasonable conclusion contrary to Ryckman's evaluation that the results of logical empiricist analysis of space and time were inconsistent and contradictory.

Fourth, after examining the debate between Reichenbach and Einstein on 'the empirical determinability of physical geometry', I show that this debate was between 'empiricism' and 'conventionalism' within the tradition of the physicalization of space and time. In this regard, Giovanelli diagnosed that the debate between the two as a 'dialogue of deaf' because they were in different mathematical tradition specifically Reichenbach in geometric tradition and Einstein in analytic tradition. However, the conversation between the two was not a 'dialogue of deaf' because it was a 'real' problem of whether the physical geometry could be empirically determined by overcoming the theoretical dependence of the measuring device definition. I argue that the theoretical dependence of the measuring device definition can be rationally overcome through some objective experimental procedures, so that, contrary to Einstein's and Howard's concerns, physical geometry can be sufficiently determined empirically according to experiments with basic measuring devices. By defending Reichenbach's empiricist view that physical geometry can be determined empirically, I try to find a balance between the 'empiricist view' and the 'conventionalist view' on physical geometry.

Finally, I argue that logical empiricist space-time philosophy represented by Reichenbach was an ‘empirical’ interpretation of relativistic space and time. This philosophy interprets relativity as a theory that physicalizes space and time, but still sees that the objective causal structure of space and time can be grasped through “experience.” In addition, this philosophy requires that the innovative physical theory after relativity theory must have new empirical content that can be directly confirmed through basic measuring objects, just like the theory of relativity. This position contrasts with the position of Einsteinian ‘conventionalism’, which pursues the ‘completeness’ of a theory through the theoretical explanation of measuring objects, in which only the whole theory has empirical content due to the theory dependence of the measuring object definition in the theory.

Key Words : logical empiricist philosophy of space and time, empiricism and conventionalism on physical geometry, causal structure of space and time, empirical objectivity of space and time

Student Number : 2011-30086

감사의 글

제가 조인래 교수님을 처음 뵈는 것이 2002년입니다. 학부 시절 교수님의 수업을 수강하며 과학철학을 계속 공부하고 싶다는 마음을 가졌습니다. 너무나 부족한 저를 석사, 박사과정에 들여주시고 지도해주신 교수님의 은혜에 마음 깊이 감사드립니다. 앞으로도 계속 연구에 정진하여 교수님께 부끄럽지 않은 과학철학 연구자가 되도록 노력하겠습니다.

지도교수이신 천현득 교수님께 고개 숙여 감사드립니다. 부족한 논문 임에도 불구하고 기꺼이 논문 심사를 맡아주신 홍성욱 교수님, 고인석 교수님, 양경은 교수님, 이정민 교수님께 진심으로 감사드립니다. 향후 계속 노력하는 연구자의 모습을 보여드릴 것을 약속드립니다. 저의 논문 작업을 기다리고 응원해주신 임종태 교수님, 전진권 교수님, 정동욱 교수님께 감사드립니다. 이미 학위를 받고 활발하게 학술 활동을 하고 계신 허원기 박사님, 김진영 박사님께 감사드립니다. 앞으로 저 또한 과학철학 연구자로서 박사님들과 함께 한국 과학철학의 유지 및 발전을 위해 노력할 것입니다.

제가 고등학생이던 시절, 부산 시내의 한 서점인 ‘영광도서’에서 우연히 발견한 책 『시간과 공간의 철학』은 지금까지 제가 과학철학을 연구하도록 이끌어주었습니다. 비록 한 번도 뵈지는 못했지만, 논리경험주의 과학철학의 창시자이며 훌륭한 물리 철학자이자 경험주의자였던 한스 라이헨바흐(Hans Reichenbach, 1891-1953) 교수님께 감사드립니다. 저의 논문이 고인의 경험주의 과학철학을 재조명하는 작은 계기가 되길 바랄 뿐입니다.

저의 과학철학 연구를 처음부터 끝까지 지지하고 기다려주신 부모님과 장모님께 감사드립니다. 누나, 매형, 두 조카 건호와 세영에게도 감사의 마음을 전합니다. 사랑하는 가족이 없었다면 저는 이 논문을 끝맺지 못했을 것입니다. 아내 은혜, 첫째 지윤, 둘째 서운, 셋째 태현에게 무한한 사랑을 전하며 짧은 감사의 글을 마칩니다.