creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

교육학석사 학위논문

고등학교 물리학의 전자기파 내용 체계에 대한 기초 탐구

: 『The Evolution of Physics(1938)』와 『Harvard Project Physics(1970)』를 중심으로

2025년 2월

서울대학교 대학원

과학교육과 물리전공

김 강 래

고등학교 물리학의 전자기파 내용 체계에 대한 기초 탐구

: 『The Evolution of Physics(1938)』와 『Harvard Project Physics(1970)』를 중심으로

지도교수 이 경 호

이 논문을 교육학석사 학위논문으로 제출함

2025년 2월

서울대학교 대학원

과학교육과 물리전공

김 강 래

김강래의 석사 학위논문을 인준함

2025년 2월

위 원 장 송 진 웅 (인)

부위원장 조 정 효 (인)

위 원 이 경 호 (인)

국문초록

본 연구는 물리 교과 내용 체계와 관련된 다음과 같은 문제 인식을 배경으로 한다. 선행연구에 따르면, 우리나라 과학교육에서는 교과 내용에 대한 근본적인 고찰이 부족하며(이재봉 등, *2010*), 개념 위계의 미흡으로 인해 물리 교사가 암기식 수업으로 어려움을 겪는 상황이 지속되고 있다(강현식 등, *2015*). 또한, 내용 체계 간 연계성 부족이 교과서 집필의 어려움을 초래하며(이세연 등, *2019*), 전자기파 단원에서는 교과서 내용이 단편적으로 나열되어 있어 개념 간의 유기적 연결을 구성하기 어려운 점이 보고되었다(이봉우, *2020*; 감민주, *2024*).

이상의 내용 체계의 문제를 해결할 수 있는 하나의 가능성은 *2022* 개정 교육과정에서 발견할 수 있다. *2022* 개정 교육과정에서는 물리학 교과의 내용 체계를 스토리라인(흐름)에 따라 구성하고, 학생들이 각 내용 영역의 지식•이해, 과정•기능, 가치•태도의 세 가지 차원을 상호보완적으로 함양함으로써 물리학의 본질과 얼개(구조)를 드러내는 핵심 아이디어에 도달하는 것을 강조한다. 이러한 방향성은 현행 물리학 교육과정 내용 체계의 문제를 해결할 수 있는 하나의 가능성을 제시할 수 있다고 본다. 그러나 아쉽게도, 교육과정 문서에 물리학의 흐름과 구조에 대한 구체적인 내용은 제시되어 있지 않다. 한편, 최근 연구(심규철 등, *2023*; 심규철 등, *2024*; 이광표 등 *2024*)에 따르면, 이와 같은 물리학의 흐름과 구조는 과학의 실천전통 속에서 찾을 수 있다고 본다.

과학의 실천 전통이란 '본질적-총체적' 관점에서 바라본 인간 활동으로서의 과학을 의미한다. 과학의 실천 전통에는 자연을 바라보는 과학의 관점과 함께 이와 연관된 핵심 아이디어, 사고방식, 태도(가치)와 이러한 요소들 간의 유기적이며 총체적인 관계가 포

함된다. 따라서 과학의 실천 전통에 대한 탐구는 *2022* 개정 교육과정에서 제시한 물리학의 흐름과 구조를 파악하는 것으로 이어질 수 있다고 본다.

이에 본 연구에서는 물리학 내용의 흐름과 구조를 구체화할 수 있는 방안의 하나로 과학의 실천전통을 탐구하고자 하였다. 특히, 본 연구는 과학의 실천전통을 담고 있을 것으로 기대되는 과학 고전 『*The Evolution of Physics(1938)*』*(EoP)*와 물리학 교과서 『*Harvard Project Physics(1970)*』*(HPP)*를 분석 대상으로 선정하였다. 두 교재에 나타난 전자기파 개념의 흐름과 구조를 체계적으로 분석하여 고등학교 물리학의 내용 체계 수립에 도움을 줄 수 있는 기초 자료로 제시하였다. 또한 과학의 실천전통 속에서 학생들은 진정한 이해를 형성할 수 있다는 점*(*이경호, 심규철, 이광표, *2024)*을 고려하여 교재를 읽은 독자가 도달하게 될 이해를 분석하였다.

연구 결과는 다음과 같다. *EoP* 전자기파 내용 체계의 흐름은 관점의 변화를 중심으로 한 거대한 흐름을 중심으로 기존 관점의 한계와 새로운 관점의 성공을 강조하였다. 또한 역사적 흐름을 그대로 따라가지 않고 논리적으로 재구성하여 제시하였다. *HPP*의 흐름은 역사적 사건을 중심의 흐름으로 당대 과학자들이 가졌던 생각과 아이디어를 강조하였다. 또한 이론적 예측에 이어 실험적 증명, 그리고 실생활 활용으로 이어지는 자연스러운 스토리라인이 특징적이었으며, 전자기 스펙트럼이 실생활에 활용되는 사례를 자세하게 설명하였다. 내용 체계의 구조는 다음과 같다. *EoP*는 대비되는 두 관점을 중심으로 한 체계적인 구조가 돋보인 반면, *HPP*는 두 관점의 대비가 뚜렷하지 않아 요소들 간의 논리적인 연결이 다소 떨어지는 구조를 보였다.

*EoP*를 읽은 독자들이 도달하게 될 이해의 측면의 특징은 다음

과 같다. ‘적용’을 제외한 나머지 *5*가지 측면의 이해에 골고루 도달할 수 있도록 서술되어 있었다. 특히, ‘관점’을 통해 현상을 바라보고 해석할 수 있도록 서술되어 있고, 서로 다른 관점을 가지고 현상을 바라봤을 때의 차이를 메타적으로 바라볼 수 있는 ‘자기지식’의 측면이 강조되었다. 반면, 실생활 활용 등에 대한 내용이 부족하여 ‘적용’의 이해에는 도달하기 어려웠다. *HPP*를 읽은 독자들이 도달하게 될 이해의 측면의 특징은 다음과 같다. 이해의 *6*가지 측면에 모두 잘 도달할 수 있도록 서술되어 있었지만, ‘설명’의 요소가 가장 두드러지게 나타났다. 또한 관점을 통해 현상을 바라보는 내용이 강조되지는 않다 보니, 특정 ‘관점’의 이해에는 도달할 수 있는 내용이 조금씩 있지만, 여러 관점을 통해 메타적으로 현상을 바라보는 ‘자기지식’의 이해의 측면에는 독자들이 도달하기에 다소 부족했다.

이상의 연구 결과를 종합하면, 두 교재 모두 과학의 실천 전통을 반영하고 있으며, 학생들이 '진정한 이해'에 도달하는 데 도움을 줄 수 있는 방향으로 서술되어 있다. 그러나 두 교재 간에는 차이점 또한 존재하였다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 두 교재의 장단점을 비교하고 보완되어야 할 부분을 잘 파악함으로써 향후 고등학교 전자기파 내용 체계를 새롭게 정립하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대한다. 예를 들어, *EoP*가 보여주는 거시적 구조 위에 *HPP*의 세밀하고 다양한 내용 요소를 결합하는 방안을 제안할 수 있다. 이러한 접근은 열린 시도이므로, 새로운 과학 고전이나 최신 교재의 우수한 요소들을 적극적으로 반영해 나가면서 전자기파 내용 체계의 문제를 해결하는 데 도움을 줄 수 있을 것이다.

주요어 : 과학의 실천전통, 진정한 이해, 전자기파, 교육과정 내용 체계, *The Evolution of Physics, Harvard Project Physics*

학 번 : *2023-20715*

목 차

제 1 장 서론 ····· 1

제 1 절 연구의 필요성 ····· 1

제 2 절 연구문제 ····· 4

제 2 장 이론적 배경 및 선행연구 ····· 5

제 1 절 과학의 실천전통 ····· 5

1. 실천전통 ····· 5

2. 과학의 실천전통 ····· 6

3. 과학의 실천전통의 흐름과 구조 ····· 8

3.1. 과학의 실천전통의 흐름 ····· 8

3.2. 과학의 실천전통의 구조 ····· 9

제 2 절 이해중심 교육과정과 '진정한 이해' ····· 10

1. 이해중심 교육과정 ····· 10

2. 교과가 추구하는 '진정한 이해' ····· 12

3. 과학 교과가 추구하는 '진정한 이해' ····· 13

제 3 장 연구 대상 및 연구 방법 ····· 16

제 1 절 연구 대상 ····· 16

1. 『*The Evolution of Physics*』 (1938) ····· 16

2. 『*Harvard Project Physics*』 (1970) ····· 18

제 2 절 연구 방법 ····· 20

1. 흐름도 작성 규칙 ····· 23

2. 구조도 작성 규칙 ····· 24

3. 이해의 측면 분석과정 ····· 24

제 4 장 연구 결과 ····· 27
제 1 절 전자기파 내용 체계의 특징 ····· 27
1. 전자기파 내용 체계의 흐름 ····· 27
1.1. EoP에 담긴 전자기파 내용 체계의 흐름 ····· 27
1.2. HPP에 담긴 전자기파 내용 체계의 흐름 ····· 32
1.3. EoP와 HPP의 내용 체계의 흐름 비교 ····· 36
2. 전자기파 내용 체계의 구조 ····· 37
2.1. EoP에 담긴 전자기파 내용 체계의 구조 ····· 37
2.2. HPP에 담긴 전자기파 내용 체계의 구조 ····· 39
2.3. EoP와 HPP의 내용 체계의 구조 비교 ····· 41

제 2 절 교재를 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면 ····· 43
1. EoP를 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면 ····· 43
2. HPP를 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면 ····· 55
3. EoP와 HPP를 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면 비교 ·· 77

제 5 장 요약 및 논의 ····· 80
제 1 절 요약 및 결론 ····· 80
제 2 절 논의 ····· 81

참고문헌 ····· 84

Abstract ····· 89

표 목 차

[표 3-1] EoP 분석을 위해 추출한 분석 범위 ····· *18*
[표 3-2] HPP 분석을 위해 추출한 분석 범위 ····· *20*
[표 3-3] 내용 체계 흐름도에 사용된 기호 정의 ····· *23*
[표 3-4] 과학교육에서 추구하는 '진정한 이해'의 여섯 가지 측면 *(*이경호, 심규철 *&* 이광표*, 2024)* ····· *26*
*[표 4-1] EoP*와 *HPP* 전자기파 내용 체계의 흐름 비교 ····· *37*
*[표 4-2] EoP*와 *HPP* 전자기파 내용 체계의 구조 비교 ····· *43*
*[표 4-3] EoP <3.3*절 장은 존재하는가*>, <3.4*절 장과 에테르*>*를 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면 ····· *46*
*[표 4-4] HPP <16*장*. Electromagnetic Radiation>*를 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면 ····· *58*
*[표 4-5] EoP*와 *HPP* 본문의 서사 구조에 따른 이해의 측면 비교 ····· *79*

그 림 목 차

[그림 2-1] 학문-문화 구조도 *(Tseitlin & Galili, 2005)* ····· *10*
[그림 2-2] 과학의 실천전통에 참여하는 학생이 형성하는 이해 ····· *15*
[그림 3-1] 질적 내용 분석*(QCA)* 과정 ····· *20*
[그림 4-1] EoP 전자기파 내용 체계의 흐름도 ····· *31*
[그림 4-2] HPP 전자기파 내용 체계의 흐름도 ····· *35*
[그림 4-3] EoP 전자기파 내용 체계의 구조도 ····· *39*
[그림 4-4] HPP 전자기파 내용 체계의 구조도 ····· *41*
*[그림 5-1] EoP*의 밑그림에 *HPP*의 내용을 보완한 전자기파 내용 체계의 흐름도 ····· *82*
*[그림 5-2] EoP*의 밑그림에 *HPP*의 내용을 보완한 전자기파 내용 체계의 구조도 ····· *83*

제 1 장 서론

제 1 절 연구의 필요성

우리나라 과학과 교육과정은 여러 번의 개정을 거치면서 학생들의 창의성과 문제 해결 능력 함양(교육과학기술부, 2009), 창의융합형 인재 양성과 학습 경험의 질 개선(교육부, 2015), 디지털 소양과 창의성을 바탕으로 한 학생 주도형 학습(교육부, 2022)을 강조하며 미래사회를 살아갈 학생들이 갖춰야 할 소양과 역량을 함양하도록 하기 위해 노력해 왔다. 그러나 그간의 노력에도 불구하고 현장의 과학 교육에서 여러 가지 근본적인 어려움은 해소되지 않고 있다. 예를 들어, 물리 교과 수업에서 교사와 학생이 겪는 여러 어려움이 선행연구로부터 꾸준히 보고되어 왔다(Gunstone et al., 2009; 임준홍 등, 2013; 강현식 등, 2015; 변보경 등, 2024). 특히, 이러한 어려움이 발생하게 된 가능한 원인 중 매우 근본적인 한 가지는 우리나라 과학교육에서 교과 내용 자체를 충분히 고찰하지 못했다는 점이다(이재봉 외, 2010). 최근에도 교과서 저자들이 교과서 집필에의 어려운 점으로 전체적 구성, 내용의 수준, 세부 내용 구성을 들었다(이세연 외, 2019). 특히, 교과서 저자는 '교육과정의 내용들이 전체 스토리를 만들지 못하고, 단절된 여러 개념들을 나열한 점'을 지적하였다.

이러한 선행연구들은 과학 교과 내용 체계에 대한 충분한 연구가 아직 이루어지지 않았음을 보여준다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 2022 개정 교육과정에서는 물리학 교과의 내용 체계를 스토리라인(흐름)에 따라 구성하고, 학생들이 각 내용 영역의 지식 • 이해, 과정 • 기능, 가치 • 태도의 세 가지 차원을 상호보완적으로 함양함으로써 물리학의 본질과 얼개(구조)를 드러내는 핵심 아이디어에 도달하는 것을 강조한다. 이러한 방향은 기존 교육과정에서 지적된 파편화되고 피상적인 학습의 문제를 극복하고 '진정한 이해'를 통한 전인적인 성장을 이루는 학교 교

육의 목표에 다가갈 수 있는 방안이라고 볼 수 있다. 한편, 교육과정 문서에는 이러한 흐름과 구조의 구체적인 모습이 어떠한지에 대해서는 명시되어 있지 않다. 이에, *2022* 개정 교육과정에서 강조한 물리 교과 내용의 스토리라인*(*흐름*)*과 얼개*(*구조*)*의 구체적인 모습을 파악하는 연구가 시급하다고 본다.

이에 최근 관련 연구에서는 과학의 스토리라인과 얼개를 구체적으로 파악하기 위해 과학의 실천 전통에 관한 연구가 진행되었다. 과학의 실천 전통이란 과학적 지식과 개념이 형성되고 발전하는 과정에서 인간이 수행해 온 탐구 활동의 역사적·사회적·문화적 맥락을 포괄하는 일련의 지속적이고 체계적인 실천적 활동이다*(*이경호, *2022).* 따라서, 과학의 실천전통에는 우리가 찾고자 하는 과학의 내용 체계를 이루는 흐름과 구조가 담겨 있는 것으로 볼 수 있다. 이에 과학의 실천 전통이 잘 드러나 있는 교재를 선정하여 분석하고 교육적 시사점을 얻고자 한 연구가 전자기학, 양자역학, 광전효과 내용 영역에 대해서 이루어졌다*(*심규철, *2022;* 이광표, *2024; 정경은, 2024).*

한편, 물리학 교과 내용과 관련된 어려움에 대한 선행 연구에서는 고등학교 전자기파 단원 수업을 준비하는 과정에서 교사들이 마주한 어려움에 대해 기술하고 있다*(*감민주, *2024).* 전자기파는 *Maxwell*에 의해 이론적으로 예측되고, *Hertz*에 의해 실험으로 검증된 개념으로, 빛이 전자기파임이 밝혀진 사건은 고전 물리학이 완성되는 지점인 동시에 새로운 현대 물리학의 태동이 일어나는 물리학의 흐름과 역사에 있어 매우 중요한 지점이었다. 그러나 현재 고등학교 물리 교과서의 전자기파 단원에서는 이러한 역사적 과정과 탐구 맥락이 생략된 채, 전자기파의 종류와 실생활에서의 활용 사례만을 중심으로 구성되어 있다. 이는 전자기파의 본질적인 이해를 어렵게 하며, 물리학의 본질과 구조에 대한 학생들의 깊이 있는 이해를 방해한다. 이에, 전자기파 내용 영역의 스토리라인과 얼개를 구체적으로 파악하기 위한 연구가 필요하다고 본다.

본 연구는 이러한 문제의식에서 출발하여, 과학의 실천전통에 기반한 고등학교 물리학의 전자기파 내용 체계에 대한 기초 탐구를 수행하고자

한다. 이에 여러 선행 연구를 통해 과학의 실천전통을 잘 담고 있는 것으로 알려진 과학 고전 『*The Evolution of Physics(1938)*』(이하, *EoP)*와 대표적인 물리학 교과서 『*Harvard Project Physics(1970)*』(이하, *HPP)*를 선택하여 분석하였다. 두 책에 담긴 전자기파와 관련된 실천전통을 탐구함으로써 고등학교 전자기파 소단원 내용 체계에 관한 구체적인 함의를 찾고자 하였다. 구체적으로, 본 연구는 *EoP*와 *HPP*에 담긴 전자기파 내용 체계의 특징을 분석하여 그 흐름과 구조를 파악하고, *EoP*와 *HPP*를 읽은 학생들이 도달하게 될 전자기파 개념에 대한 이해의 측면을 분석하고자 한다. 이를 위해 *2015* 개정 교육과정과 *2022* 개정 교육과정의 배경*(*강현석 등*, 2021;* 김경자 등*, 2017;* 이경원 등*, 2022;* 이승은*, 2021;* 임유나*, 2018)*이 되는 *Wiggins & McTighe(2005)*의 이해중심 교육과정을 참고하였다. *Wiggins & McTighe(2005)*는 교과 학습에서 진정한 이해란 '설명, 해석, 적용, 관점, 공감, 자기지식'의 여섯 가지 측면이 균형 있고 충분히 개발되는 것이라고 보았다. 그러나 이 접근은 범교과적 성격을 띠어 과학 고전 및 교재 분석에 직접 적용하기에는 제한이 있었다*(*이경호, 심규철, 이광표*, 2024).* 이에 본 연구는 이경호, 심규철, 이광표*(2024)*가 제안한 과학 교과의 진정한 이해와 여섯 가지 이해의 측면을 기준으로 *EoP*와 *HPP*를 분석하였다.

제 *2* 절 연구문제

본 연구는 전자기파와 관련된 내용체계의 수립에 도움을 줄 수 있는 기초자료로서 관련 영역의 과학의 실천전통을 파악하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 과학의 실천전통을 잘 담고 있을 것으로 기대되는 물리학 교재인 *EoP*와 *HPP*를 분석하였다. *EoP*와 *HPP*에 담긴 전자기파 내용 체계를 흐름과 구조의 측면에서 분석하여, *2022* 개정 교육과정에서 언급된 스토리라인과 얼개의 구체적인 모습을 탐색하였다. 더불어, *EoP*와 *HPP*를 읽은 독자들이 도달할 수 있는 전자기파에 대한 이해의 *6*가지 측면을 파악하고자 한다. 이를 위해 연구 문제는 다음과 같이 설정하였다.

1. 본 연구에서 선택한 대표적인 물리 교재에 담겨진 전자기파 관련 영역의 과학의 실천전통의 구체적인 모습은 어떠한가*?*
  *1-1. EoP*와 *HPP*에 담긴 전자기파 내용 체계의 흐름은 어떠한가*?*
  *1-2. EoP*와 *HPP*에 담긴 전자기파 내용 체계의 구조는 어떠한가*?*

2. 본 연구에서 선택한 대표적인 물리 교재를 읽은 독자에게 기대되는 전자기파에 대한 이해는 어떠한가*?*
  *2-1. EoP*를 읽는 독자에게 기대되는 전자기파 개념에 대한 이해는 어떠한가*?*
  *2-2. HPP*를 읽는 독자에게 기대되는 전자기파 개념에 대한 이해는 어떠한가*?*

제 2 장 이론적 배경 및 선행연구

제 1 절 과학의 실천전통

1. 실천전통

과학 교육에서 나타나는 내용 체계의 여러 문제점들—개념 위계의 미흡으로 인한 암기식 수업(강현식 등 2015), 내용 체계 간 연계성 부족으로 인한 교과서 집필의 한계(이세연 등, 2019), 개념 간 유기적 연결 구성의 어려움(이봉우, 2020; 감민주, 2024)—은 교과교육 전반에 걸쳐 관찰되는 현상이다. 홍은숙(2007)은 이러한 문제의 근본적 원인을 지식 중심의 주지주의적 교과교육에서 찾고, 이를 극복하기 위한 대안으로 실천전통에 입각한 교과교육을 제안하였다.

홍은숙(2007)은 주지주의 교육의 문제로 지식의 편협성, 지식의 무기력성, 지식의 무도덕성이라는 세 가지를 지적하였다. 첫째, 지식의 편협성 문제는 교육내용(what), 교육목표(why), 교육방법(how)의 측면에서 드러난다. 주지주의 교육은 교육내용 측면에서 이론적 학문만을 강조하고, 교육목표 측면에서는 교과의 사고방식, 기술, 가치 및 태도, 역사 등 다양한 요소를 배제한 채 이론적 명제만을 강조하며, 교육방법 측면에서는 실천보다 이론적 명제나 방법적 지식의 선행학습을 주장한다. 이는 본질적으로 불가분한 관계에 있는 지식, 기술, 정서 등을 인위적으로 분절시켜 지식의 파편화를 초래한다.

둘째, 지식의 무기력성 문제는 교육을 통해 습득한 지식이 실제 삶의 맥락과 연계되지 못하는 현상을 의미한다. 이를 해결하기 위해 흔히 제시되는 공리주의적 접근과 합리주의적 접근은 각각의 한계를 지닌다. 공리주의적 접근은 지식의 외재적 목적과 내재적 목적을 혼동하는 오류를 범하며, 합리주의적 접근은 실천에 선행할 수 없는 추상화된 이론을 먼저 가르치려 함으로써 이론과 실천의 괴리를 야기한다.

셋째, 지식의 무도덕성(무가치성) 문제는 지식이 개인과 사회의 행복보다는 소수의 이익을 위한 도구로 전락하거나 가치중립적인 것으로 간주되는 현상을 지칭한다. 이는 인식 주체와 대상을 분리하여 바라보는 객관주의적 인식론에서 비롯되며, 이러한 관점은 인간과 자연 사이의 공동체성이나 책임성과 같은 도덕적 가치를 약화시킨다.

이러한 문제들을 해결하기 위해 홍은숙(2007)은 McIntyre의 practices 개념을 '실천전통'으로 번역하여 새로운 교과교육의 패러다임을 제시하였다. 실천전통은 역사적·사회적으로 발달해온 인간 활동으로서, (1) 사회적으로 확립된 협동적 인간 활동, (2) 일관되고 복잡한 형식, (3) 탁월성, (4) 내적 가치, (5) 덕, (6) 규칙에 대한 복종, (7) 역사적 전통의 발전, (8) 구성원의 성장이라는 8가지 구성요소를 포함한다. 실천전통에 기반한 교과교육은 파편화된 지식을 통합하고, 맥락화된 학습을 가능하게 하며, 내적 가치와 덕성의 함양을 통해 인류의 공동선 실현에 기여할 수 있는 지식교육을 가능하게 한다.

2. 과학의 실천전통

이경호(2022)는 과학의 실천전통을 과학의 핵심적 구성요소들이 유기적으로 통합된 총체적 개념으로 정의하였다. 이러한 실천전통은 단순히 개별 요소들의 집합이 아니라, '본질적-총체적' 관점에서 바라본 과학의 본질을 의미한다. '본질적-총체적' 관점이란 대상을 그대로 바라보고, 온전하게 이해하려는 관점이다. 실천전통은 진리 탐구 과정에서 자연스럽게 형성되는 다양한 요소들의 유기적 결합체이며, 과학 교과 내용학과 교육학의 토대를 제공한다.

특히 '본질적-총체적' 관점에 기반한 과학 교과 내용학은 기존의 협의적 과학 개념을 넘어, 과학의 역사적 발전 과정과 탐구 맥락을 포함하는 실천전통을 핵심 요소로 삼는다. 여기서 주목할 점은 실천전통이 단순히 과거의 유산이나 특정 시기의 전통에 국한되지 않는다는 것이다. 이는 다양한 과학적 관점들의 교차와 충돌, 그리고 이를 통한 발전 과정을 포

함하며, 미래의 변화 가능성까지 내포하는 역동적 개념이다.

과학의 실천전통을 심도 있게 탐구하는 데 있어 과학 고전의 역할은 매우 중요하다. 과학 고전에는 *Einstein*이 언급한 '진정한 진리 탐구자'들의 경험과 통찰이 담겨 있기 때문이다. 따라서 우리는 이러한 고전들의 내러티브를 통해 과학적 안목, 핵심 사고방식, 연구 태도 등을 학습할 수 있다.

실천전통의 관점은 과학 교과 내용을 보다 포괄적으로 이해하고 재해석하는 데 도움을 준다. 이는 개별 현상('나무')에만 집중하기보다 전체적 맥락('숲')을 함께 보는 시각을 제공한다. 단, 이러한 접근이 단순히 교과 내용의 양적 확대를 의미하는 것은 아니며, 오히려 실천전통의 본질을 얼마나 효과적으로 전달할 수 있는가에 초점을 맞추어야 한다.

궁극적으로, 실천전통에 기반한 물리교육은 단순한 지식 전달을 넘어서는 것을 목표로 한다. 이는 물리학의 역사적 발전 과정과 탐구 맥락 속에서 발견되는 인간 활동의 다양한 측면들을 포괄하며, 학생들을 이러한 전통의 적극적인 참여자로 초대하는 것을 의미한다. 물리학의 실천전통은 물리학 지식뿐만 아니라, 과학자들의 연구 방식, 사고체계, 행동양식, 그리고 물리학계의 내부 문화와 규범까지 포함하는 포괄적인 개념이라 할 수 있다.

종합하면, 과학의 실천전통은 '본질적-총체적' 관점에서 바라본 과학적 탐구 활동의 총체이며, 동시에 과학교육의 근본적 토대가 된다. 과학과 과학교육은 이러한 실천전통을 통해 본질적 연관성을 가지며, 여기에는 자연현상을 이해하는 관점, 핵심 아이디어, 사고방식, 태도 등이 포함된다. 이러한 맥락 속에서 과학의 명제적 지식, 탐구 기술, 가치와 태도는 유기적으로 연결된다. 결국 과학의 실천전통은 과학교육에서 추구하는 지식·이해, 과정·기능, 가치·태도가 총체적으로 통합된 살아있는 맥락을 제공하는 토대라고 할 수 있다.

3. 과학의 실천전통의 흐름과 구조

과학의 실천전통은 인간 활동으로서의 과학의 총체를 의미하기 때문에, 수백 년, 때로는 수천 년에 걸쳐 형성된 역사적 흐름과 탐구맥락을 담고 있다. 따라서 과학의 실천전통 전체를 완벽하게 표현하는 것은 불가능하다. 그러나 과학의 실천전통의 핵심적 특징을 가능한 한 온전하게 드러내려는 시도는 여전히 중요한 의미를 지닌다. 이에 다음 절에서는 과학의 실천전통을 그 흐름과 구조의 측면에서 분석하고, 각 특징이 지니는 의미를 탐구하고자 한다.

3.1. 과학의 실천전통의 흐름

과학의 실천전통은 단순한 결과물이 아닌 역사적 발전 과정과 탐구맥락을 포함하는 총체적 개념이다. 홍은숙(2007)이 지적했듯이, 이는 "실천전통이 어떻게 생겨나서 발전해왔는지"와 "과학의 명제적 지식을 넘어선 발견 과정"을 포함하는 일련의 흐름을 내포한다.

이러한 흐름을 효과적으로 표현하는 방법으로 내러티브적 접근이 주목받고 있다. Bruner(1996)는 내러티브의 특성을 "부분과 전체 사이를 연결하는 양방향적 구조"로 설명했다. 즉, 개별 사건들이 전체 스토리에 의미를 부여받는 동시에, 전체 스토리는 개별 부분들로 구성되는 해석학적 순환 구조를 가진다는 것이다.

특히 주목할 점은 내러티브와 지식의 구조 간의 밀접한 관계이다. 강현석(2009)은 "구조가 내러티브이고, 내러티브가 곧 구조"라고 설명하며, 지식의 구조가 지닌 동적인 특성이 내러티브를 통해 효과적으로 표현될 수 있음을 강조했다.

그러나 김정희와 소경희(2014)가 지적했듯이, 과학의 실천전통을 내러티브적으로 완벽히 표현하는 것은 현실적인 한계가 있다. 이는 실재의 복잡성과 다층성, 그리고 표준화된 내러티브 방법론의 부재 때문이다.

이러한 한계를 인정하면서도, 본 연구는 강현석(2005)과 Klassen &

*Klassen(2014)*의 제안을 기반으로 과학의 실천전통의 흐름을 '초대/도입-전개-마무리'의 구조로 체계화하였다. 특히 이경호*(2022)*의 논의를 반영하여, 초대 단계는 자연에 대한 호기심과 공감을 유도하는 경우로, 도입 단계는 그 외의 시작 단계로 구분하였으며, 전개 단계는 필요에 따라 여러 하위 단계로 세분화할 수 있도록 설계하였다.

3.2. 과학의 실천전통의 구조

과학의 실천전통의 구조를 이해하기 위해서는 먼저 '구조'의 기본 개념을 살펴볼 필요가 있다. 이홍우*(2006)*는 *Bruner*의 '지식의 구조' 개념을 분석하며 구조를 "한 사물을 구성하는 요소들과 그들 간의 연결 관계"로 정의했다. 이러한 정의에 따르면, 과학의 실천전통 구조는 그것을 구성하는 요소들과 그들의 상호관계로 이해할 수 있다.

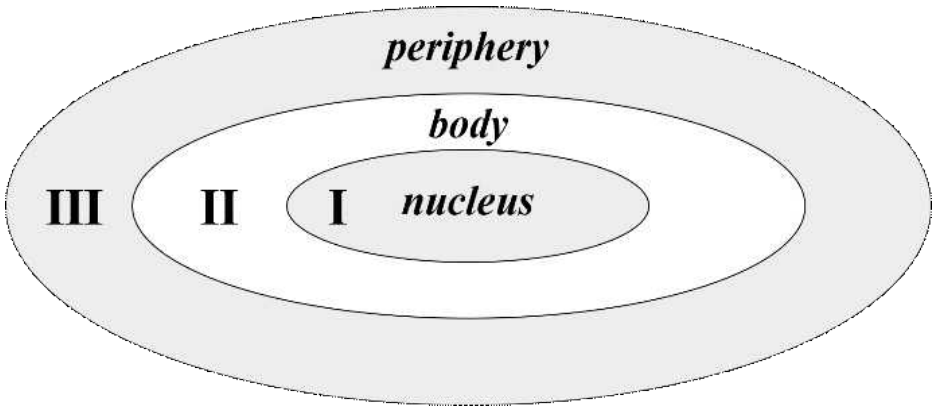
과학의 실천전통은 *8*가지 구성요소들의 관계를 통해 파악될 수 있으며, 동시에 지식의 구조를 구성하는 자연관, 핵심 아이디어, 사고방식, 태도 등의 요소들을 통해서도 이해될 수 있다. 그러나 이홍우*(2006)*가 지적했듯이, 이러한 구조를 단순한 개념도로 표현하는 것은 한계가 있다. 교과를 '교과답게' 가르치기 위해서는 단순한 개념 전달을 넘어, 학문을 탐구하고 이해하는 방식까지 포함해야 하기 때문이다.

이러한 맥락에서 *Tseitlin*과 *Galili(2005)*가 제안한 문화적 내용지식 *(Cultural Contents Knowledge, CCK)* 개념이 주목받고 있다. 그들은 물리학을 단순한 학문이 아닌 학문-문화로 보았으며, 이를 통해 교과 내용의 전체적 관계와 본질을 더 효과적으로 드러낼 수 있다고 주장했다.

특히 *Tseitlin*과 *Galili*는 학문-문화의 구조를 핵*(nucleus)*, 몸체*(body)*, 주변부*(periphery)*라는 세 층위로 구분했다. 핵은 학문의 근본 원리나 패러다임을, 몸체는 핵에서 파생되는 지식을, 주변부는 핵으로 완전히 설명되지 않는 현상과 지식을 포함한다. 이를 도식으로 표현한 것이 *[그림 2-1]*의 학문-문화 구조도*(Discipline-Culture diagram,* 이하 *DC* 구조도*)*이다. 이들은 특히 주변부의 중요성을 강조했는데, 이는 기존

이론과 새로운 이론 간의 상호작용을 가능케 하며, 과학 혁명을 통한 패러다임 전환의 계기를 제공하기 때문이다.

이러한 학문-문화 구조도(*DC* 구조도)의 특징은 전통적인 학문관과 달리 주변부를 포함함으로써, 과학의 발전 과정에서 일어나는 이론 간의 대화, 경쟁, 위기, 혁명 등을 총체적으로 포착할 수 있다는 점이다. 이를 통해 물리학의 실천전통을 더욱 포괄적이고 역동적으로 이해할 수 있게 된다.



[그림 2-1] 학문-문화 구조도 *(Tseitlin & Galili, 2005)*

제 *2* 절 이해중심 교육과정과 '진정한 이해'

1. 이해중심 교육과정

2022 개정 교육과정은 "깊이 있는 학습"을 통한 "핵심역량" 함양을 강조하여 주지교육의 문제 해결 가능성을 제시했다(교육부, *2022c).* 구체적으로, "단편적 지식의 암기"를 지양하고 "각 교과목의 핵심 아이디어"를 중심으로 "지식·이해, 과정·기능, 가치·태도의 내용 요소를 유기적으

로 연계"하는 것을 강조했다. *2022* 개정 교육과정의 핵심 아이디어가 *2015* 개정 교육과정의 핵심 개념과 일반화된 지식을 통합한 것임을 고려할 때*(*교육부*, 2022a), 2022* 개정 교육과정은 *2015* 개정 교육과정의 주요 특징을 계승하고 있다고 볼 수 있다*(*교육부*, 2015b).*

이러한 *2015* 및 *2022* 개정 교육과정은 이해중심 교육과정과 역량기반 교육과정을 토대로 한다. 두 교육과정의 관계에 대한 연구는 국내에서 제한적으로 이루어졌으나*(*최석민*, 2023),* 일부 주목할 만한 연구들이 있다. 한혜정 *&* 이주연*(2017)*은 학문중심 교육과정을 기준으로 두 교육과정의 철학적 배경을 비교했으며, 조현희*(2019)*는 두 교육과정의 공존에 대한 다양한 관점을 분석했다.

이해중심 교육과정의 기본 아이디어는 *Tyler*와 *Bruner*의 연구와 밀접한 관련이 있다*(*강현석*, 2011;* 강현석 *&* 유제순*, 2010;* 김경자 *&* 온정덕*, 2011). Tyler*의 포워드 설계와 달리*, Wiggins & McTighe(2005)*는 '교육 목표 설정-학습결과 평가 개발-학습 경험 선정 및 조직'이라는 백워드 설계를 제안했다. 또한 *Bruner*의 '지식의 구조' 개념을 계승하여, 전이 가능성이 높은 '빅 아이디어'의 중요성을 강조했다.

이해중심 교육과정의 주요 개념들은 다음과 같이 구조화된다*(*김경자 *&* 온정덕*, 2011;* 김경자 등*, 2017):*

- 사실과 정보*:* 기본적인 단편 지식
- 개념*:* 공통 속성을 통해 범주화된 추상적 용어
- 빅 아이디어*:* 여러 개념을 포괄하는 상위 개념
- 일반화*:* 개념들 간의 관계를 명제 형태로 표현한 것
- 기능*:* 지식을 구조화하는 사고 및 탐구 과정
- 전이*:* 지식의 전이*(*다른 상황에 적용*)*와 학습의 전이*(*새로운 산출물 창출*)*로 구분

2. 교과가 추구하는 '진정한 이해'

이해중심 교육과정은 '진정한 이해'의 개념을 핵심적으로 다룬다 *(McTighe & Seif, 2003;* 강현석 & 유제순, *2010).* 이해중심 교육과정에서 '이해'는 단순한 지식의 습득을 넘어서는 수행적 특성을 강조한다. 구체적으로, 이는 "지식을 맥락 속에서 의미를 파악"하는 것뿐만 아니라, "새로운 상황에서 유연하고도 유창하게 적용하여 새로운 산출물이나 결과물을 도출하는 수행"을 의미한다*(Wiggins & McTighe, 2005;* 김경자 & 온정덕, *2011;* 김경자 등, *2017).*

*Wiggins & McTighe*는 수행으로서의 이해를 세 가지 주요 측면에서 정의했다*(*강현석 등, *2021).* 첫째, 유의미한 추론으로서의 이해는 사실과 기능을 적절하게 처리하는 능력을 의미한다. 이들은 이해의 본질을 설명하기 위해 흥미로운 비유를 제시했다. 마치 바닥에 깔린 개별 타일들을 보고 전체적인 패턴을 파악하거나, 문장들을 읽고 행간의 의미를 이해하는 것처럼, 개별적 사실들을 넘어 전체적인 맥락과 구조를 파악하는 것이 진정한 이해라는 것이다. 이러한 맥락에서 추론은 교과의 근본적 구조를 습득하는 과정으로 볼 수 있다*(*김경자 & 온정덕, *2011).*

둘째, 전이 가능성으로서의 이해는 습득한 지식과 기능을 새로운 맥락에서 효과적으로 활용할 수 있는 능력을 의미한다. 김경자 & 온정덕 *(2011)*은 이러한 전이를 실제적인 적용의 과정으로 해석했다.

셋째, 전문가의 맹점으로부터 도출된 이해는 '더 많이 가르칠수록, 더 많이 배울 것'이라는 단순한 가정에 대한 비판적 인식에서 비롯된다 *(Wiggins & McTighe, 2005).* 이는 피상적인 지식의 축적을 넘어, 학습자가 스스로 핵심적인 아이디어를 지속적으로 발전시키고 내면화하는 과정을 강조한다.

이러한 이해의 개념을 더욱 구체화하여, *Wiggins & McTighe(2005)*는 여섯 가지 이해의 측면을 제시했다.

① 설명*(Explanation):* 데이터, 사실, 현상에 대해 일반화나 원리를 통해 정당하고 체계적인 근거를 제시할 수 있는 능력

② 해석*(Interpretation):* 이야기, 이미지, 비유, 모델 등을 통해 내재된 의미를 발견하고 이해하는 능력
③ 적용*(Application):* 습득한 지식을 다양한 실제적 맥락에서 적절하게 활용할 수 있는 능력
④ 관점*(Perspective):* 현상이나 문제를 비판적이고 다각적인 시각에서 분석할 수 있는 능력
⑤ 공감*(Empathy):* 타인의 감정과 세계관을 이해하고 수용할 수 있는 능력
⑥ 자기지식*(Self-Knowledge):* 자신의 한계를 인식하고, 자신의 이해를 방해하는 편견이나 사고방식을 파악하며, 자신의 사고와 행위를 메타인지적으로 성찰할 수 있는 능력

*Wiggins & McTighe(2005)*는 이러한 여섯 가지 측면이 균형 있게 발달하고 충분히 성숙될 때 비로소 '진정한 이해'에 도달할 수 있다고 보았다. 이는 이해가 단순히 개별적인 지식의 습득이나 특정 기능의 숙달이 아닌, 통합적이고 전인적인 발달 과정임을 시사한다.

3. 과학 교과가 추구하는 '진정한 이해'

과학교육계는 최근 이해중심 교육과정의 '진정한 이해' 개념에 주목하고 있다*(*이경호, 심규철 *&* 이광표, *2024). 2022* 개정 교육과정이 이해중심 교육과정을 기반으로 하고 있다는 점에서*(*강현석 등, *2021;* 김경자 등, *2017;* 이경원 등, *2022;* 이승은, *2021;* 임유나, *2018),* 교과교육의 핵심 목표인 '진정한 이해'를 과학교육의 맥락에서 면밀히 검토하는 것은 매우 중요한 과제라고 할 수 있다*(*강현석 *&* 유제순, *2010).*

그러나 앞서 논의된 '진정한 이해'의 여섯 가지 측면은 과학교육에 그대로 적용하기에는 한계가 있다. *McTighe & Wiggins(1999)*도 이해의 여섯 가지 측면이 "다소 인위적*(somewhat artificial)*이고 유일한 가능성*(not the only possible)*은 아니"라고 언급한 바 있다. 이는 이해의 여섯 가지 측면이 '진정한 이해'를 완벽하게 규정하지는 못함을 시사한다. 즉,

‘진정한 이해’의 본질을 파악하기 위해서는 이해의 여섯 가지 측면을 단순히 세분화하는 ‘분리적’ 접근을 넘어설 필요가 있다(이경호, 심규철 & 이광표, *2024*).

‘본질적-총체적’ 관점에서 볼 때, ‘진정한 이해’는 조작적 정의로 완전히 규명할 수 있는 성질의 것이 아니다. 인류는 오랜 시간 동안 세상에 대한 진정한 이해를 추구해왔으며, 그 과정과 결과가 지금도 축적되고 있다. 따라서 '진정한 이해'는 이러한 역사적 맥락 속에서 이해되어야 한다.

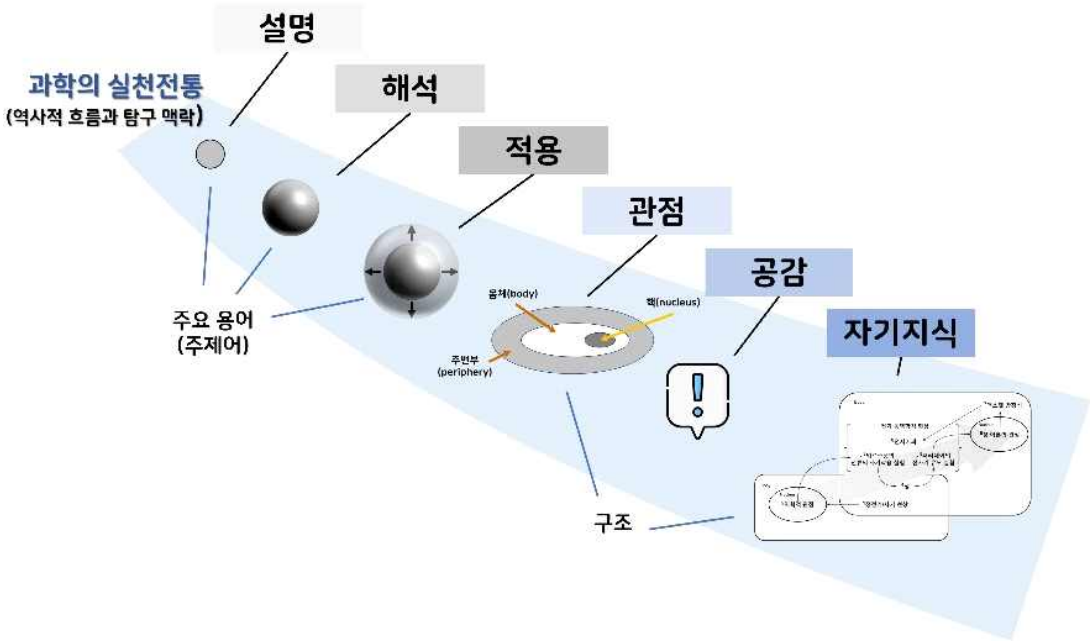
이러한 맥락에서 과학의 실천전통은 과학 교과가 추구하는 '진정한 이해'를 이해하는 데 중요한 통찰을 제공할 수 있다. 과학의 실천전통에는 자연을 진정으로 이해하기 위한 근원적 질문의 추구 과정과 결과가 담겨있기 때문에(이경호, *2022*), 이를 통해 '진정한 이해'의 원형을 발견할 수 있다.

과학의 실천전통은 역사적 흐름과 탐구맥락 속에서 발전해 온 인간의 생생한 경험을 포함하며, 이는 지식, 기능, 정서를 통합적으로 아우른다(이경호, *2022*). 따라서 과학의 실천전통을 통해 형성되는 '진정한 이해'는 본질적으로 총체성과 전인성을 지닌다(이경호, 심규철 & 이광표, *2024*).

이경호, 심규철 & 이광표(*2024*)는 과학의 실천전통과 '진정한 이해'의 여섯 가지 측면의 관계를 *[그림 2-2]*와 같이 제시했다. 이들은 과학의 실천전통 경험이 깊어짐에 따라 이해의 측면이 단계적으로 확장되어 간다고 보았다. 초기에는 '설명', '해석', '적용' 측면의 이해가 형성되고, 이어서 특정 학문-문화의 '관점'을 갖게 되며, 더 나아가 타인의 관점에 대한 '공감'이 발달한다. 궁극적으로는 다양한 관점의 한계를 인식하고 전체를 조망하는 '자기지식' 측면의 이해까지 도달할 수 있다.

이러한 맥락에서 과학 고전은 '진정한 이해'를 탐구하는 데 귀중한 자료가 된다. 과학 고전에는 자연에 대한 '진정한 이해'를 추구한 위대한 과학자들의 실천전통이 생생하게 담겨있기 때문이다(이경호, 심규철 & 이광표, *2024*). 따라서 과학 고전의 분석을 통해 '진정한 이해'가 형성되

어 가는 구체적인 과정과 그 원형을 파악할 수 있다.



[그림 2-2] 과학의 실천전통에 참여하는 학생이 형성하는 이해

제 3 장 연구 대상 및 연구 방법

제 1 절 연구 대상

본 연구는 과학의 실천전통을 잘 담고 있을 것으로 예상되는 *Einstein*과 *Infeld*의 『*The Evolution of Physics (1938)*』와 *Rutherford, Holton & Watson*의 『*Harvard Project Physics (1970)*』를 분석 대상으로 선정하였다. *EoP*와 *HPP* 본문의 전반적인 구성과 특징은 다음과 같다.

1. 『*The Evolution of Physics*』 *(1938)*

*EoP*는 물리학에 대한 기초 지식이 없는 일반 독자를 대상으로 저술된 책으로, *Einstein*은 수식을 사용하지 않고 이야기 형식을 통해 물리학의 발전 과정을 설명하였다. 그는 물리학의 주요 발견과 이론적 전환점을 직관적으로 전달하기 위해 스토리라인을 구성하고, 복잡한 개념들을 쉽게 이해할 수 있도록 서술하였다. 저자는 책의 집필 목적을 서문에서 다음과 같이 명시하고 있다.

> 이 책의 의도는 관념 세계와 현상 세계를 연결시키려는 인류의 시도를 대략적으로 그려보는 것이다. 이 책에서 우리는 자연 현상을 제대로 설명할 수 있는 관념세계가 어떻게 형성되어 왔는가를 보이고자 하였다. (Einstein & Infeld, 1938, Preface)

*Einstein*은 물리학 이론이 정립되고 발전하는 과정을 기술하며 자연현상을 설명할 수 있는 관념세계가 형성되어 온 과정을 서술하였다. 저자가 물리학의 전반적인 발전 과정을 강조한 이유는, 과거 이론의 위기 속에서 비롯된 어려움을 극복하려는 시도가 결국 현대 이론에 대한 깊은 이해로 이어진다고 보았기 때문이다. 한편, *EoP*에서는 물리학의 발전과

정을 서술함에 있어 연대기적이고 상세한 기술보다는, 인류가 이론적 난제를 극복하기 위해 기울여온 주요한 과정들을 간결하게 담아내고자 하였다. 이러한 저자의 의도는 책의 서문에서도 명확히 언급되어 있다.

> 사실과 개념의 미로를 통해 우리는 가장 전형적이고 중요하게 보인 지름길을 선택해야만 했다. … 우리가 택한 지름길을 가기 위해서는 제한된 사실과 개념만을 사용해야 했다. (Einstein & Infeld, 1938, Preface)

이와 같이 *Einstein*은 부차적 내용을 최대한 생략함으로써 물리학 발전을 이끄는 핵심적인 흐름, 이른바 '지름길'을 제시하고자 하였다. 요컨대, *EoP*는 물리학이 발전해 온 역사를 강조하면서도, 그 이해에 필수적인 사실과 개념, 그리고 특히 중요한 관점들을 중심으로 물리학 실천 전통을 담아내려 한 것이다.

*EoP*는 제 *1*장 '역학적 관점의 형성', 제 *2*장 '역학적 관점의 쇠퇴', 제 *3*장 '장과 상대성이론', 제 *4*장 '양자', 총 *4*개의 장으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 전자기파 내용과 직접적으로 관련이 있는 *2*장의 *3*개의 절과 *3*장의 *4*개 절을 연구의 분석범위로 선정하였다*([표 3-1] 참조).*

[표 3-1] EoP 분석을 위해 추출한 분석 범위

장 (Chapter)	절 (Section)	선택 여부 (Selected)
Ⅱ. The Decline of The Mechanical View	1. The two electric fluids	×
	2. The magnetic fluids	
	3. The first serious difficulty	
	4. The velocity of light	
	5. Light as substance	
	6. The riddle of colour	
	7. What is a wave?	
	8. The wave theory of light	◯
	9. Longitudinal or transverse light waves?	
	10. Ether and the mechanical view	
Ⅲ. Field, Relativity	1. The field as representation	◯
	2. The two pillars of the field theory	
	3. The reality of the field	
	4. Field and ether	
	5. The mechanical scaffold	×
	6. Ether and motion	
	7. Time, distance, relativity	
	8. Relativity and mechanics	
	9. The time-space continuum	
	10. General relativity	
	11. Outside and inside the lift	
	12. Geometry and experiment	
	13. General relativity and its verification	
	14. Field and matter	

2. 『*Harvard Project Physics*』 *(1970)*

*HPP*는 물리학을 전공하고자 하는 소수의 학생들뿐만 아니라, 다른 진로를 선택할 대다수의 학생들까지 포괄하는 포용적인 교재를 지향했다 *(Holton, 1969).* 이러한 목표를 달성하기 위해 *HPP*는 물리학의 인문학

적 측면을 교재에 적극적으로 담아내고자 했다*(Holton, 1969; Rutherford et al., 1970).* 이러한 접근의 의미는 노벨물리학상 수상자 *Rabi*의 다음 인용문에서 잘 드러난다*:*

> "나는 과학을 가장 낮은 수준에서 가장 높은 수준까지 인문학적인 방식으로 가르칠 것을 제안한다. 과학은 일정한 역사적, 철학적, 사회적 이해, 그리고 성공, 시도, 시련을 겪은 인간의 본성과 일대기라는 의미에서의 인간에 대한 이해와 함께 가르쳐져야 한다." (Rutherford et al., 1970, Preface)

이러한 인문학적 접근을 통해 *HPP*의 저자들은 다음과 같은 구체적인 목표를 추구했다*:*

① 개별 사실보다는 물리학의 핵심 아이디어 전달
② 물리학을 역사적, 문화적 맥락 속 인간 활동으로 조명
③ 물리학의 전통과 발전 과정의 체계적 제시
④ 학생들의 장기적 지식 습득과 즉각적 긍정적 경험의 균형 추구

이러한 특징들은 저자들이 제시한 좋은 물리학의 기준*(Holton, 1969)*에도 반영되어 있다. 본 연구자는 이러한 인문학적 접근과 좋은 물리학의 기준들이 교재에 충실히 구현되었다면, 이는 곧 물리학의 실천전통에 내재된 인간 활동으로서의 물리학을 효과적으로 담아낸 것이라고 판단하여 분석 대상으로 선정하였다.

*HPP*는 총 *6*개 단원*(Unit)*으로 구성되어 있다*:*

- *1*단원*:* 운동의 개념
- *2*단원*:* 천상의 운동
- *3*단원*:* 역학의 성공
- *4*단원*:* 빛과 전자기학
- *5*단원*:* 원자 모형
- *6*단원*:* 원자핵

본 연구는 전자기파와 직접적으로 관련된 *4*단원의 *16*장을 분석 대상

으로 선정했다*([표 3-2] 참조).*

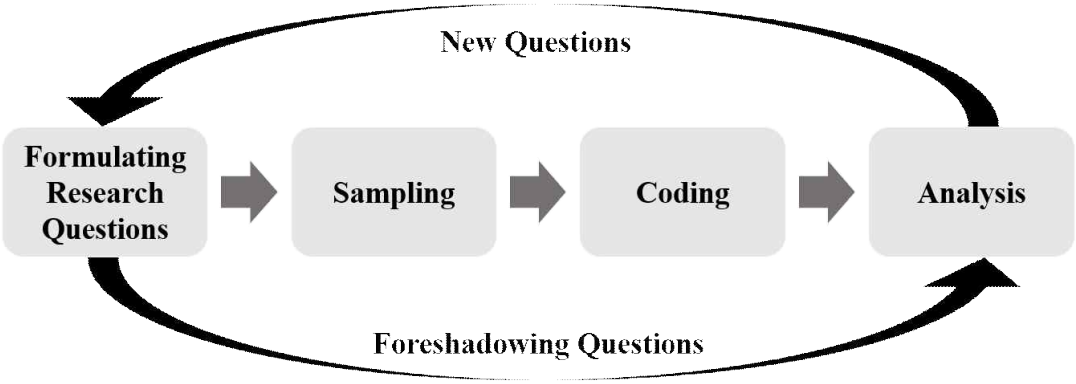
[표 3-2] HPP 분석을 위해 추출한 분석 범위

장 (Chapter)	절 (Section)	선택 여부 (Selected)
16. Electromagnetic Radiation	16.1. Introduction	○
	16.2. Maxwell's formulation of the principles of electromagnetism	
	16.3. The propagation of electromagnetic waves	
	16.4. Hertz's experiments	
	16.5. The electromagnetic spectrum	
	16.6. What about the ether now?	

제 *2* 절 연구 방법

본 연구는 *EoP*와 *HPP*의 텍스트를 질적 내용 분석법*(Qualitative Content Analysis, QCA)*을 통해 분석했다. 내용 분석법은 텍스트로부터 반복 가능하고 타당한 추론을 도출하는 연구방법론이며*(Krippendorff, 2018),* 그 중 질적 내용 분석법은 연구자의 총체적 이해를 바탕으로 체계적인 분석 과정을 통해 텍스트의 패턴과 의미를 밝히는 방법이다(최성호 등*, 2016).*

*White & Marsh(2006)*가 제시한 *QCA*는 연구 문제 제기*(Formulating Research Questions),* 표본 추출*(Sampling),* 코딩*(Coding),* 분석*(Analysis)*의 네 단계로 진행된다*([그림 3-1] 참조).* 첫 번째 단계인 연구 문제 제기에서는 개방형 예상질문*(Foreshadowing*



[그림 3-1] 질적 내용 분석*(QCA)* 과정

*Questions)*을 활용하여 데이터 수집과 연구 방향을 설정한다. 분석 과정에서 새로운 패턴과 개념이 발견될 경우, 연구자는 새로운 질문*(New Questions)*을 설정하고 재분석을 실시한다. 이는 만족스러운 해석에 도달할 때까지 재맥락화, 재해석, 재정의의 해석학적 순환 과정을 반복하는 것이다*(Krippendorff, 2018).*

본 연구는 서론에서 도출한 연구 문제를 시작점으로 삼아 순환적 분석을 진행했다. 분석의 신뢰도와 타당도 확보를 위해 공동연구자 *3*인*(*물리교육학 박사 *1*인, 물리교육 박사과정 *1*인, 물리교육 석사과정 *1*인*)*의 삼각검증과 동료검토*(peer debriefing)* 과정을 실시했다*(Lincoln & Guba, 1985).* 이러한 논의의 구체적인 사례는 '흐름도 및 구조도 작성 규칙'과 '이해의 측면 분석 과정'에서 상세히 다룬다.

두 번째 단계인 표본 추출에서는 연구목적에 부합하는 텍스트를 선정한다. 본 연구는 *EoP*와 *HPP* 본문의 장절 구분을 존중하여 전자기파 관련 절들을 표본으로 추출했다*([*표 *3-1], [*표*3-2]* 참조*).* 세 번째 단계인 코딩에서는 연구자의 전체적 이해를 바탕으로 표본의 의미를 체계적으로 파악한다. 본 연구는 우선 본문의 구분을 존중하며 문단 단위로 일차 분석을 실시하여 각 문단의 핵심 문장들을 추출하고 중심 내용을 파악했다. 이후 각 절의 문단들을 '초대/도입', '전개', '마무리'의 세 단계로 분류했다.

표본을 세 단계로 구분한 후, *EoP*와 *HPP*에 대해 서로 다른 분석 과

정을 적용했다. *EoP*의 경우, 먼저 각 단계별 핵심 내용을 파악하여 본문 상단에 요약 정리하고, 이와 밀접하게 관련된 주제어 후보들을 추출했다. *HPP*의 경우에는 절 단위 분석과 장 단위 분석의 두 단계로 진행했다. 절 단위 분석에서는 *EoP*와 동일하게 각 단계별 핵심 내용을 도출했으며, 주제어 후보 추출 대신 각 단계별 핵심 내용을 종합하여 해당 절의 핵심 내용을 파악했다.

절 단위 분석에 이어 장 단위 분석을 실시했다. 먼저 앞서 진행한 절 단위 분석을 토대로 각 장을 구성하는 모든 절의 핵심 내용을 통합적으로 검토했다.

이와 함께, *EoP*와 *HPP* 본문의 이해의 측면을 분석하기 위한 별도의 과정을 진행했다. 분석 대상으로는 *EoP* <*3.3*절. 장은 존재하는가>와 <*3.4*절. 장과 에테르>, 그리고 *HPP* <*16*장. *Electromagnetic Radiation*>을 선택했다. 이들 텍스트에 대해 기존의 '초대-전개-마무리' 구분을 더욱 세분화하여, 특히 전개 단계를 '전개*1*, 전개*2*, 전개*3*, 전개*4*'로 상세히 구분했다.

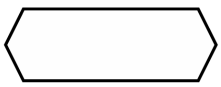
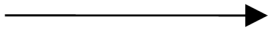
분석 과정에서는 '진정한 이해' 관련 문헌*(*강현석 *&* 유제순*, 2010;* 강현석 등*, 2021)*과 이경호, 심규철 *&* 이광표*(2024)*가 제시한 과학 교과의 이해 측면을 참고했다. 표본을 의미 단위로 분절하고 전후 맥락을 고려하며 코딩을 수행했으며, 이 과정의 구체적인 내용은 '이해의 측면 분석 과정'에서 상세히 다룬다.

마지막 분석 단계에서는 코딩 결과를 바탕으로 연구 문제에 대한 답을 도출했다. 코딩 결과는 흐름도와 구조도로 시각화했으며, 이 과정에서 전자기파 내용 체계의 흐름과 구조를 구성하는 핵심적 내용 요소인 주제어를 추출했다. 또한 본문에 나타난 이해의 측면을 종합적으로 고려하여 서사 구조의 각 단계별로 분석 결과를 정리했다.

1. 흐름도 작성 규칙

흐름도 작성 규칙은 선행연구(홍혜진, 2020; 심규철 등, 2023; 이광표, 2024; 정경은, 2024)에서 개발한 규칙을 활용하였다. 각 기호의 의미와 용도는 다음과 같다. 의미 단위의 시작점을 나타내는 육각형은 '준비(도입)' 단계 기호로 정의하였으며, 내용의 전개 과정을 표현하는 직사각형은 '과정(전개)' 단계 기호이다. 또한, 물결 사각형은 '출력(마무리)' 단계 기호로, 여러 내용 요소들이 통합되어 최종적인 의미를 형성하는 단계를 나타낸다. 연결성을 표현하는 요소로는 흐름선, 보조선을 활용하였다. 흐름선은 내용 단위 간의 직접적인 논리적 연결을 표현하는 데 사용되었으며, 보조선은 이들 관계에 대한 부가적인 설명을 제시하는 데 사용되었다. 이상의 흐름도에 사용된 기호와 그 정의는 [표 3-3]에 종합적으로 정리하였다.

[표 3-3] 내용 체계 흐름도에 사용된 기호 정의

단계	기호	정의
준비 (도입)		의미를 형성하기 시작하는 내용 단위
과정 (전개)		의미가 구체적으로 형성되며 전개되는 내용 단위
출력 (마무리)		앞선 여러 내용 단위를 종합하여 의미 형성을 마무리하는 내용 단위
흐름선		본문에 명시적으로 표현된 내용 단위의 논리적인 연결성을 표현하는 기호
보조선		흐름선으로 연결된 내용 단위의 논리적인 연결성을 부연해주는 기호

2. 구조도 작성 규칙

전자기파 내용 체계의 구조도는 학문 문화(*Discpline-Culture*)적 관점을 강조한 *DC* 구조도를 사용해서 나타냈다(*Tseitlin & Galili, 2005*). *DC* 구조도 작성 규칙은 선행연구(서범원, *2020;* 심규철, *2022;* 심규철 등, *2023;* 이광표, *2024;* 정경은, *2024*)에서 사용한 규칙을 따랐다. *DC* 구조도는 핵(*nucleus*), 몸체(*body*), 주변부(*periphery*)라는 세 개의 층위로 구성된다. 여기서 핵은 내용 체계의 핵심이 되는 근본 원리 또는 패러다임을 나타내며, 이론 체계의 중심을 이루는 관점이 핵에 위치한다. 몸체는 핵을 바탕으로 형성되는 지식 또는 핵의 원리로 설명이 가능한 지식과 현상을 나타낸다. 주변부는 핵으로는 설명하기 어려운 지식과 현상, 실험을 포함한다. *DC* 구조도는 특히 주변부를 통해 물리학의 문화적 측면을 드러내며, 이는 물리학 이론이 단순히 고정된 체계가 아닌 기존 이론과 상호작용하며 발전하는 역동적 체계임을 보여준다.

본 연구는 다음과 같은 절차로 *DC* 구조도를 작성하고 주제어를 도출하였다. 우선 잠재적 주제어들을 *DC* 구조도에 배치하고, 이를 흐름도와 상호 검토하며 핵심 주제어를 선별하였다. 이후 선별된 주제어를 구조도에 표현하고, 각 주제어의 좌측 상단에 번호를 부여하여 주제어가 교재에 제시된 순서를 표시하였다. 또한 주제어 사이의 연결성을 표현하기 위해 화살표를 활용하였다. 주제어 사이의 연결성이 나타나지 않는 경우에는 화살표를 사용하지 않고 번호 표시만을 통해 순서를 나타냈다..

3. 이해의 측면 분석과정

본 연구는 *EoP*와 *HPP*를 읽은 독자의 이해를 분석하기 위해, 과학교과가 추구하는 '진정한 이해'의 여섯 가지 측면을 활용하였다(이경호, 심규철 & 이광표, *2024*). '진정한 이해'는 과학의 실천전통 속에서 '설명', '해석', '적용', '관점', '공감', '자기지식'의 여섯가지 이해가 균형있고 충분하게 형성되는 것을 의미한다.

각 측면의 구체적인 의미와 특징은 다음과 같다. '설명'은 과학 교과의 내용(예: 주요어)에 대해 설명하는 것으로, 사실을 기술하는 것, 표현하는 것, 인과관계를 서술하는 것, 정당화 및 논증하는 것을 포함한다. '해석'은 과학 교과의 내용(예: 주제어)을 자신만의 언어로 해석하는 것으로, 유추, 비유, 의미구성, 이야기구성을 포함한다. '적용'은 과학 교과의 내용을 새로운 상황이나 다양한 맥락에서 활용하는 것으로, 문제 해결과 실제 적용을 포함한다. '관점'은 구조도의 핵심을 이루는 주요 개념이나 이론을 통해 현상을 일관되게 보는 것으로, 비교, 비판적 분석, 비평하기 등을 포함한다. '공감'은 과학의 실천전통에서 과학자들의 상황, 견해, 가치 등을 이해하고 공감하는 것을 의미한다. '자기지식'은 전체를 조망하면서 내용을 메타적으로 파악하는 것이다. 또한 문제의 원인 분석과 해결 방안을 모색하는 수준의 이해가 '자기지식'이다.

특히 혼동되기 쉬운 측면들의 구분 기준을 명확히 하였다. '설명'과 '해석'은 '저자의 언어를 통해 의미화된 내용인가?'를 기준으로 구분하였다. 예를 들어, 코펜하겐 해석이나 수로-전기회로 비유와 같은 내용도 단순 기술에 그친다면 '설명'으로 분류된다. '설명'과 '관점'은 '해당 관점을 통한 직접적인 현상 해석 여부'를 기준으로 삼았다. 단순히 관점과 관련된 표현을 쓰더라도, 현상을 그 관점을 통해 바라보는 것이 아니라면, 이는 관점이 아니라 단순한 설명으로 분류하였다. '적용'은 기존의 지식을 새로운 상황에 적용하는 다소 좁은 의미로 사용하였다. 예를 들어, 과학지식을 실생활에 적용한 사례에 대한 설명이 본문에 나와 있다면 이는, '적용'이 아닌 '설명'으로 분류하였다. '관점'과 '자기지식'은 한 가지 관점을 통해 바라본 것은 '관점'으로, 여러 가지 관점으로 바라보았거나, 기존 관점의 한계를 인식하고 새로운 관점을 모색하는 것 등과 같은 메타적인 이해의 경우 '자기지식'으로 분류할 수 있다. 따라서 자기지식의 형성을 위해서는 내용의 전반적인 흐름과 구조에 대한 기본적 이해가 선행되어야 한다. 이러한 내용은 *[표 3-4]*에 정리하였다.

또한, *EoP*의 경우 분석범위를 좁혀 <*3.3*절 장은 존재하는가>, <*3.4*절 장과 에테르>를 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면을 분석하였다. 이

는 전자기파가 직접적으로 등장하는 부분만을 분석하기 위함이다. *HPP*의 경우 내용 체계 분석 범위와 동일하게 *<16*장 *Electromagnetic Radiation>* 전체를 분석하였다.

*[*표 *3-4]* 과학교육에서 추구하는 '진정한 이해'의 여섯 가지 측면 *(*이경호, 심규철 *&* 이광표*, 2024)*

이해의 측면	의미와 예시
설명	과학교과의 내용(예: 주요어)에 대해 설명하기 [예] 기술/표현(보여줌)/인과 관계 서술/정당화/논증하기
해석	과학교과의 내용(예: 주제어)을 자신의 언어로 해석하기 [예] 유추/비유/의미구성/이야기구성/번역하기
적용	과학교과의 내용(예: 주제어)을 새로운 상황이나 다양한 맥락(예: 실생활)에 적용하기 [예] 실제에 활용/문제해결하기
관점	과학의 중요한 관점(예: 주요 개념/이론/원리 등과 같은 구조도의 핵)을 통해서 현상을 보기 [예] 비교/비판적 분석/비평/주장하기
공감	다른 사람(예: 과학의 실천전통 속 과학자)의 상황, 관점/아이디어, 혹은 감정/가치/태도 등에 공감하기 [예] 관심/고려/자신을 투영/느끼기/수용/감동하기
자기지식	전체를 조망하면서, 내용을 메타적으로 파악(예: 같은 것/다른 것, 아는 것/모르는 것, 잘 된 것/그러지 못한 것 등을 인식)하고, 문제의 원인 분석과 해결 방안을 모색하기 [예] 파악/판단/반성/자기평가하기

제 4 장 연구 결과

제 1 절 전자기파 내용 체계의 특징

1. 전자기파 내용 체계의 흐름

1.1. EoP에 담긴 전자기파 내용 체계의 흐름

EoP 전자기파 내용 체계의 흐름을 나타낸 흐름도는 *[그림 4-1]*과 같다. *EoP* 전자기파 내용 체계의 흐름은 관점의 변화를 중심으로 한 거대한 흐름 속에서 세부적인 흐름이 이어졌다. 기존 관점의 한계와, 새로운 관점의 성공을 강조한 한편, 역사적 흐름을 그대로 따라가지 않고 논리적으로 재구성하여 제시하였다. 특히, 빛의 특징과 전자기파의 특징이 대응을 이루며 서술되어, 빛이 전자기파의 한 종류임을 독자들이 자연스럽게 이해할 수 있게끔 서술하였고, 광학 현상을 설명하기 위한 두 가지 관점의 시도가 대비를 이루며 서술되었다.

EoP 전자기파 내용 체계의 흐름은 구체적으로 다음과 같다. 첫 번째 플롯은 *2.8*절, *2.9*절, *2.10*절의 내용으로 구성되며, 광학 현상에 대한 내용으로 시작한다. *<2.8*절. 빛의 파동이론>에서 저자는 빛의 굴절과 분산을 '빛의 파동이론'으로 성공적으로 설명하였다. 뿐만 아니라, *Young*과 *Fresnel*의 실험을 통해 빛이 회절한다는 것을 보였다. 빛의 회절은 앞선 절에서 소개했던 '빛의 미립자 이론'에서는 설명할 수 없는 현상으로, 빛의 파동이론이 일시적으로 승리하였음을 의미한다고 기술하였다. 이후, *<4*장. 양자> 이전까지는 빛이 파동임을 가정하여 책의 서술이 진행된다.

*<2.9*절. 빛은 종파인가 횡파인가?>에서 저자는 편광 현상을 소개하며, 이는 빛이 종파라면 결코 나올 수 없는 현상임을 설명하였다. 즉, 빛은 횡파라는 것이다. 빛이 횡파라는 사실은 빛의 매질에 대한 심각한 고민으로 이어진다. 종파의 매질과 달리, 횡파의 매질은 탄성이 있는 젤리와

같은 성질을 가져야 하고, 이는 빛의 매질로 가정한 '에테르'라는 물질에 인위적이고 부자연스러운 가정을 추가해야 함을 의미한다.

*<2.10*절. 에테르와 역학적 관점>에서 저자는 에테르에 대한 논의를 이어간다. 광학 현상을 기존의 역학적 관점으로 설명하려 한다면, 에테르는 어디에나 존재한다고 가정해야 한다. 하지만, 행성과 같은 천체들은 에테르에 의해 어떠한 저항도 받지 않고 운동한다. 즉, 광학 현상에서는 에테르와 물질 사이에 상호작용이 있는 반면, 역학적 현상에서는 상호작용이 없다는 매우 모순된 결론이 나온다. 그리고 이 모든 문제는, '자연의 모든 것이 역학적 관점으로 설명이 가능하다는 기본적 가정'에서 기인한다는 설명과 함께 *<2*장. 역학적 관점의 쇠퇴>가 마무리된다. 이로써 광학현상에서 출발한 첫 번째 플롯은 '역학적 관점의 한계'라는 결론을 도출함으로 끝이 난다.

이어지는 두 번째 플롯은 *<3*장. 장과 상대성이론>의 *3.1*절의 내용을 다루고 있다. *<3.1*절. 장에 의한 묘사>에서 저자는 '장' 개념의 철학적 관점의 발전을 설명하기 위해 중력장의 역선을 도입한다. 여기서 역선은 '장'과 동일한 의미로 사용된다. 장은 처음에는 힘을 파악하는 대행자 *(agent)*의 역할을 한다. 이러한 개념을 통해 전류의 자기작용을 시각화할 수 있으며, 막대자석과 솔레노이드가 그 대표적 예시이다. 저자는 '장' 개념이 단순한 대행자를 넘어, 역학적 관점으로는 이해하기 어려운 막대자석과 솔레노이드의 유사성을 설명할 수 있게 해준다는 점에서, '장'이 힘의 특성을 해석하는 '해석자*(interpreter)*' 역할을 한다고 설명을 확장한다.

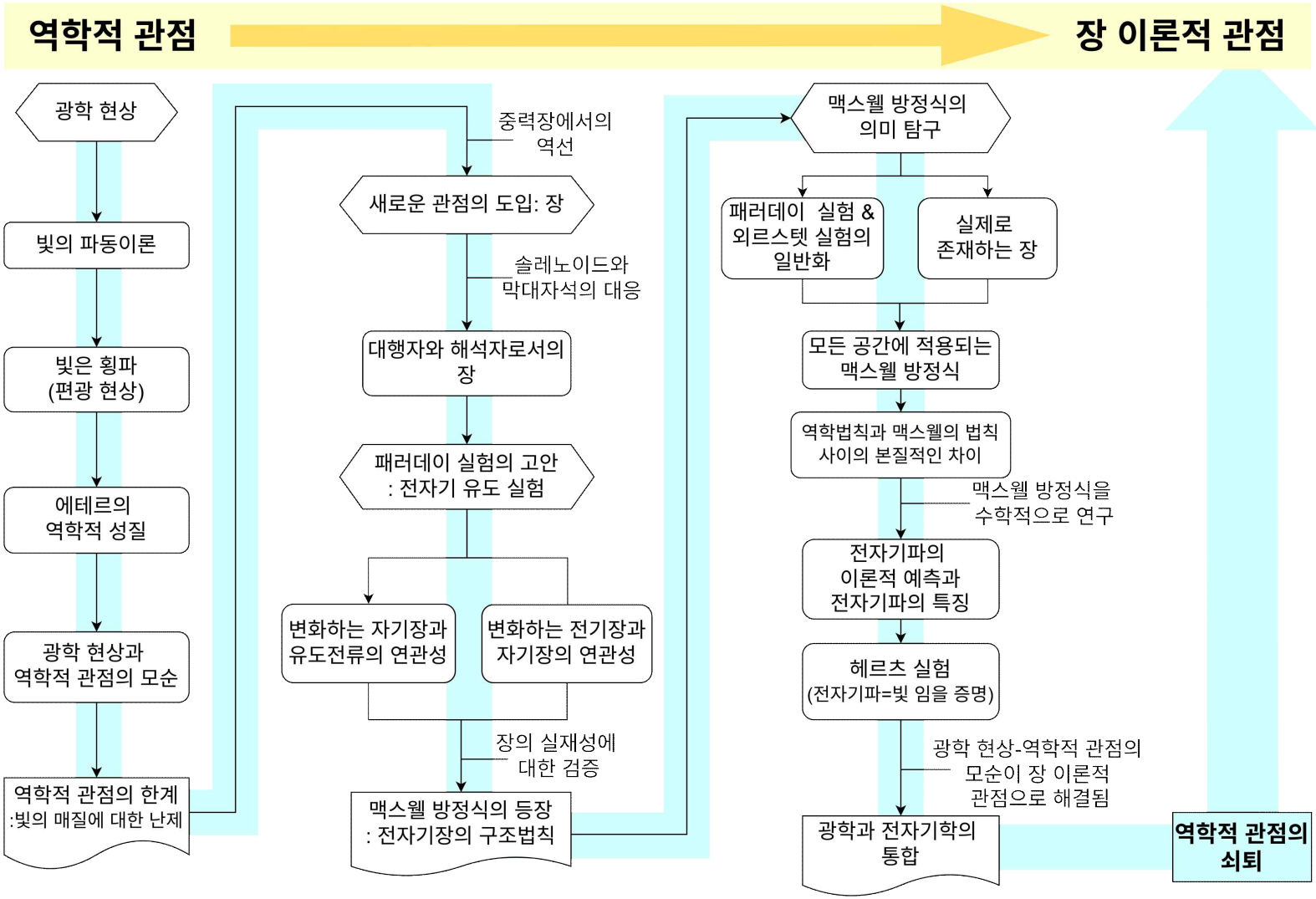
세 번째 플롯은 *<3.2*절. 장 이론의 두 가지 기둥>의 내용과 *<3.3*절. 장은 존재하는가>의 초반부 내용을 다루고 있다. 이 플롯에서는 '장' 개념이 새로운 물리학적 관점으로 발전하는 과정을 보여준다. *Faraday*의 전자기 유도 실험으로 시작하여 맥스웰 방정식의 등장으로 마무리되는 이 과정에서, '장'은 동역학적 변수이자 자연 현상 해석의 핵심 물리량으로 자리잡는다. 저자는 *Oersted*와 *Faraday*의 실험을 통해 전기장과 자기장의 상호 생성 관계를 설명하며, '장'이 단순한 해석 도구가 아닌 물

리적 실재임을 주장한다. 이로써'장'은 물질과 대등한 지위를 얻게 되고, '장 이론적 관점'이라는 새로운 패러다임이 등장한다. 맥스웰 방정식은 이러한 장의 구조를 수학적으로 표현한 것으로, 저자는 이를 *Newton* 이후 등장한 새로운 형태의 법칙이라 강조한다.

네 번째 플롯은 <*3.3*절. 장은 존재하는가>의 중·후반부와 <*3.4*절. 장과 에테르>의 내용을 다룬다. 이 플롯에서는 맥스웰 방정식의 의미를 탐구하는 과정에서 전자기파가 발견되고, 이것이 광학과 전자기학의 통합으로 이어지는 과정이 서술된다. 저자는 두 가지 중요한 과정—*(1) Oersted*와 *Faraday*의 실험에서 자기장과 전기장을 한 점으로 축소시켜 생각하는 일반화의 과정, *(2)* 장을 실재적인 것으로 생각하는 과정—을 통해 맥스웰 방정식의 완성 과정을 서술하였다. 이를 통해 맥스웰 방정식이 물질이나 전하가 존재하는 점들뿐만 아니라 모든 공간에 적용됨을 설명한다. 이후 맥스웰의 장에 관한 법칙은 두 물체 사이의 원격 작용을 가정한 역학 법칙과 달리, 장의 변화의 작은 소단계를 종합해야 함을 설명한다. 이를 통해 현상을 바라보는 두 관점의 차이를 명확하게 보여준다. 또한 맥스웰 방정식의 수학적 추론을 통해 진동하는 전하 주위에 전자기파가 발생함을 서술하며, 전자기파의 특징이 앞서 *Sec 2-8, 2-9*에서의 빛의 특징과 일치함을 보여준다. 이후 *Hertz*에 의해 전자기파의 존재가 실험적으로 판명되고, 전자기파가 광파와 동일한 존재임이 밝혀진다. 이는 광학과 전자기학의 통합으로 이어지며, 이러한 위대한 결론은 장 이론에 기인한 것으로, 역학적 관점이 쇠퇴하고 새로운 패러다임인 장 이론적 관점이 물리학의 지도적 위치를 차지하게 되었음을 강조한다.

정리하자면, *EoP*의 전자기파 내용 체계의 흐름은 고전 물리학의 중요한 관점의 변화를 체계적으로 보여준다. 역학적 관점으로 설명하기 어려웠던 빛의 특성과 에테르의 모순으로부터 출발하여, '장' 개념의 도입과 발전 과정을 거쳐, 최종적으로 맥스웰 방정식의 완성과 전자기파의 발견에 이르는 과정이 논리적으로 구성되어 있다. 이러한 흐름은 단순한 역사적 사실의 나열이 아닌, 물리학적 관점의 변화라는 큰 틀 안에서 재구성되어 있으며, 특히 광학과 전자기학의 통합이라는 위대한 결론으로

이어짐으로써 장 이론적 관점의 성공을 효과적으로 보여준다.



[그림 4-1] EoP 전자기파 내용 체계의 흐름도

*1.2. HPP*에 담긴 전자기파 내용 체계의 흐름

HPP 전자기파 내용 체계의 흐름을 나타낸 흐름도는 *[그림 4-2]*과 같다. *HPP* 전자기파 내용 체계의 흐름은 역사적 사건 중심의 흐름이었으며, 각각의 사건들이 매우 자세하게 서술되었다. 이 흐름 속에 *Faraday, Maxwell, Hertz* 등 당대 과학자들이 가졌던 생각과 아이디어를 강조하였으며, 때로는 이들의 고민과 실패의 과정을 서술하는 등 있는 그대로의 역사적 흐름을 자세하게 묘사하였다. 또한, 이론적 예측에 이어 실험적 검증, 그리고 실생활 활용으로 이어지는 자연스러운 스토리라인이 특징적이었다.

HPP 전자기파 내용 체계의 흐름은 *2*개의 플롯으로 구성되어 있다. 첫 번째 플롯은 *16.1*절, *16.2*절, *16.3*절, *16.6*절으로 이어지는 내용으로, 이전까지 실험으로 발견된 전기와 자기 관련 현상들이 이론화의 과정을 거쳐, 전자기파에 대한 예측으로 이어지는 과정을 *Maxwell*의 생각을 중심으로 서술하였다. 두 번째 플롯은 *16.4*절과 *16.5*절의 내용으로, 전자기파를 실험적으로 검증한 *Hertz*의 실험 과정과 주파수에 따른 전자기파의 종류와 각각의 특징을 서술하였다.

첫 번째 플롯의 구체적인 내용은 다음과 같다. *<16.1*절*. Introduction>*에서 저자는 빛의 본질에 대한 *Faraday*의 추측으로 시작한다. *Oersted*와 마찬가지로, *Faraday* 역시 자연의 모든 힘이 어떻게든 연결되어 있다고 믿었으며, 전기와 자기가 연결되어 있는 것에 이어, 빛 또한 연관성이 있을 것이라 입증하고자 했다. *Faraday*는 유리를 통과하는 빛이 유리에 가해진 자기장에 의해 편광면이 회전하는 것을 보여주었고, 빛과 자기 사이의 연관성에 대한 확신으로 빛 자체가 자기력선의 진동이라고 제안하였다. 그렇지만, *Faraday*는 자신의 추론을 증명할 수 있는 수학적 기술이 부족하여 그 이상 나아가지 못했다는 말로 첫 번째 절이 마무리된다.

*<16.2*절*. Maxwell's formulation of the principles of electromagnetism>*에서 저자는 *Maxwell*이 *Faraday*의 아이디어를 수학적 사고를 통해 구체화하여 모델링하는 과정을 기술한다. *Maxwell*은

Faraday 등이 실험적으로 관찰한 전기, 자기의 물리량들에 대한 역학적 모델을 제안하고, 이를 방정식으로 표현하였다. 또한, *Maxwell*이 자신의 모델을 물질이 없는 공간(진공)에 적용하는 과정을 기술하였다. 이후, 전기장과 자기장의 연관성을 정리하여 전자기학의 기본 원리 *2*가지를 추가하는 것으로 이어진다.

<*16.3*절. *The propagation of electromagnetic waves*>에서 저자는 전기장과 자기장이 서로를 유도하며 끝없이 퍼져나가는 과정을 설명하며, 이를 전자기파라고 부른다. 이어서 *Weber*와 *Kohlrausch*에 의해 측정된 값을 이용하여 *Maxwell*이 전자기파의 속도를 계산하였으며, 이 값이 *Fizeau*가 실험으로 측정한 빛의 속도와 매우 유사하다는 사실을 설명한다. 이를 통해, 빛이 곧 전자기파라고 추론하는 과정을 기술한다. 이는 전자기학과 광학의 통합으로 이어지며, *Maxwell* 이론이 *Newton*의 역학적 틀 속에서 떠올랐지만, 결국에는 그 틀에서 벗어나 하나의 위대한 물리 이론으로 성장했다는 말과 함께 *16.3*절이 마무리된다.

*16.3*절의 마지막 부분은 *16.6*절에서의 논의로 이어진다. <*16.6*절. *What about ether now?*>에서 저자는 *Maxwell*의 고민을 소개한다. *Maxwell*은 자신의 이론을 수학적으로 정당화하는 과정에서 에테르에 대한 가정을 버릴 수 있음을 깨달았지만, 여전히 에테르 개념을 지지했다. 이는 매질 없이 파동이 있을 수 없다는 생각 때문이었다. 이후, *Michelson-Morley* 실험, *Einstein*의 상대성 이론에 의해 에테르 개념이 지지를 잃어가는 과정을 소개한다. 그리고 '*Maxwell*의 방정식'이 '상대성 원리를 모든 물리학으로 확장하는 것'과 완전히 일치한다는 *Einstein*의 통찰을 소개하며 마무리된다.

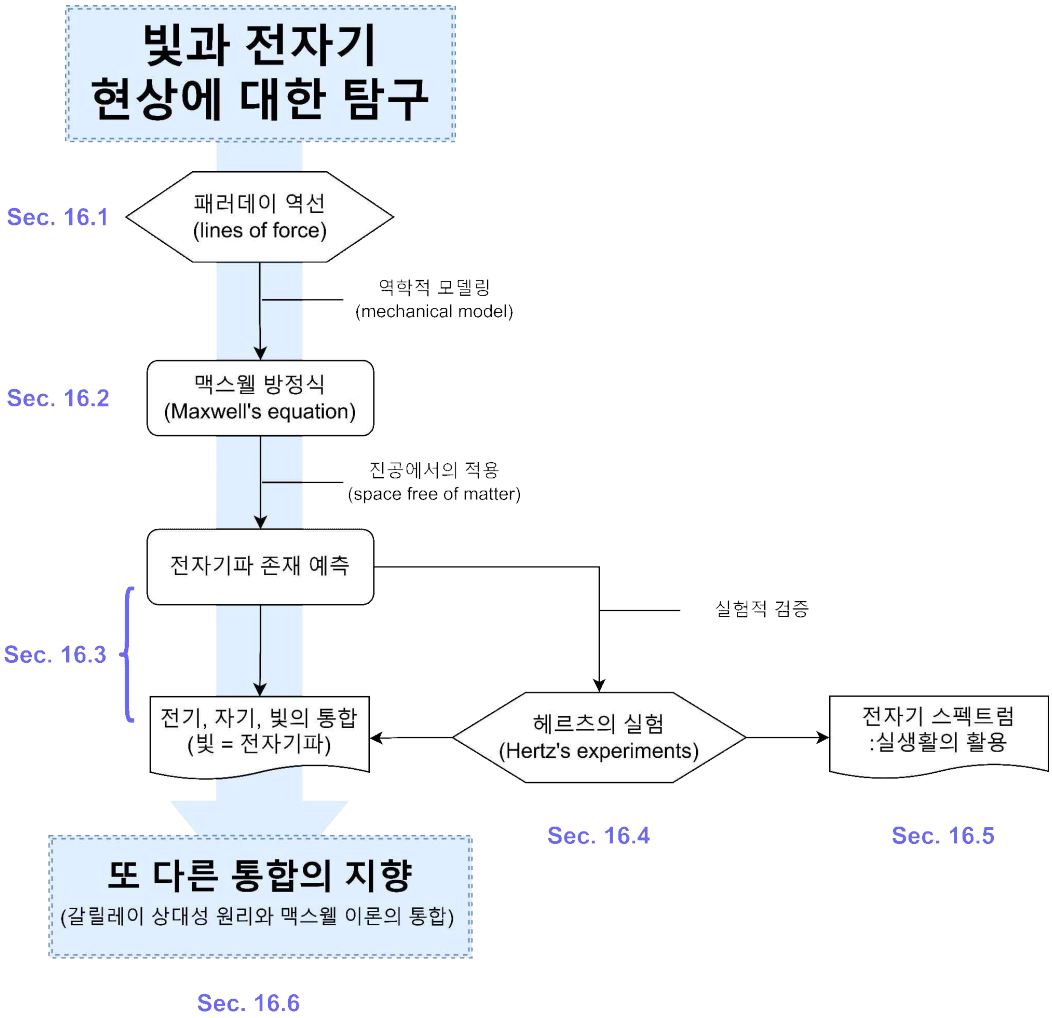
두 번째 플롯의 구체적인 내용은 다음과 같다. <*16.4*절. *Hertz's experiments*>에서 저자는 *Maxwell*의 전자기파에 대한 이론적 예측을 실험적으로 검증하는 데 성공한 *Hertz*의 실험 과정을 매우 자세하게 기술하였다. 장 관점으로 생각하는 것에 익숙하지 않은 당대의 물리학자들에게는 *Maxwell*의 이론이 이상하게 느껴졌다. 이에, *Maxwell* 이론이 다른 이론들보다 우위에 서기 위해서는 전자기학이나 빛의 새로운 성질을

예측하는 것이 필요했고, *Maxwell*도 '다양한 주파수의 전자기파가 존재할 수 있다.'는 예측을 내렸다. 이 예측을 검증하기 위해 *Hertz*는 가시광선 주파수가 아닌 다른 주파수의 전자기파를 생성하고 감지할 수 있는 장치를 발명해야 했고, 우연한 발견 끝에 결국 성공했다. 실험에서 측정한 주파수와 파장 값을 이용해, 전자기파의 속도를 계산하였으며, 이는 *Maxwell*의 예측과 동일한 값인 광속이라는 것을 발견하였다. 이를 통해 물리학자들이 *Maxwell*의 이론을 빠르게 받아들이게 되었다는 말과 함께 *16.4*절이 마무리된다.

<*16.5*절. *The electromagnetic spectrum*>에서 저자는 파장에 따른 전자기 스펙트럼의 다양한 종류와 특징을 소개하고 실생활에 활용되는 사례들을 매우 자세하게 설명한다. *16.5*절의 내용은 *2015* 개정 교육과정 물리학Ⅰ의 전자기파 소단원의 내용과 매우 유사하다. 앞서 선행연구*(*이봉우*, 2020;* 감민주*, 2024)*에서는 물리학Ⅰ 전자기파 소단원의 내용이 단편적으로 나열되어 있어, 분절적이고 개념 간의 연결성이 부족하다는 점이 지적된 바 있다. *HPP*의 *16.5*절 또한 동일한 내용으로 서술되어 있었으나, 앞선 절들에서 전자기파가 이론적으로 예측이 되고, 실험으로 증명이 되는 등의 역사적 맥락을 자세하게 서술한 후에 *16.5*절의 전자기 스펙트럼의 내용이 등장하다보니 선행연구에서 지적되었던 어려움들을 극복할 수 있었다.

*HPP*의 전자기파 내용 체계의 흐름은 역사적 사건 중심의 흐름이었다. 특히, *Maxwell*을 비롯한 당대 과학자들의 아이디어, 고민, 생각들이 자세하게 기술되어 있으며, 실험 과정 또한 어렵지 않게 재현이 가능할 정도로 자세하게 서술되어 있다. 전자기파에 대한 전체 그림을 숲과 나무에 비유한다면, *HPP*의 자세한 서술상의 특징은 하나하나의 나무를 매우 세밀하게 묘사했다는 장점이 있다. 또한, 빛과 전자기 현상에 대한 탐구에서 시작된 흐름이 전자기파의 이론적 예측, 실험적 검증, 실생활의 활용이라는 자연스러운 스토리라인을 거쳐 '또 다른 통합의 지향'이라는 좀 더 근본적인 물리학의 본성으로 이어진다. 이를 통해 전자기파의 내용 지식 뿐만 아니라, 물리학자들이 가지는 생각, 추구하는 방향*(*통합,

보편성 등)을 살펴볼 수 있었다.



[그림 4-2] HPP 전자기파 내용 체계의 흐름도

*1.3. EoP*와 *HPP*의 내용 체계의 흐름 비교

*EoP*와 *HPP*의 전자기파 내용 체계의 흐름을 비교하여 요약하면 *[표 4-1]*과 같다. *EoP*는 관점의 변화를 중심으로 한 거대한 흐름 속에서, 기존 관점의 한계와 새로운 관점의 성공을 강조한다. 서술 방식에 있어서 역사적 흐름을 따라가되, 그대로 묘사하기보다는 독자를 탐구맥락에 계속해서 초대하는 방식으로 재구성하였다는 특징이 있다. 이에, 관점의 변화와 상대적으로 관련이 적은 내용들은 간단히 서술되거나 생략되었다는 특징이 있다. 예를 들어, *Hertz*의 실험 과정은 상대적으로 매우 간단하게 제시되어 있으며, 전자기파의 실생활 적용에 대한 내용은 아예 생략되어 있다.

*HPP*는 역사적 사건 중심의 흐름을 매우 자세하게 기술하였다. 당대 과학자들이 가졌던 생각과 아이디어를 강조하였으며, 이론-실험-활용으로 이어지는 자연스러운 스토리라인이 돋보였다. 또한 *Hertz*의 실험 과정과 실험 도구를 매우 자세하게 서술하였으며 전자기 스펙트럼이 실생활에 활용되는 사례 또한 자세하게 설명하였다. 광학과 전자기학의 통합이 가지는 물리학적 의미를 강조하며 물리학자들의 기본적인 생각과 추구하는 방향을 서술하였다. 반면, 당시의 과학자들이 우주를 바라봤던 두 가지 관점을 제시하기는 하였으나, 이를 강조하지는 않았다.

[표 4-1] EoP와 HPP 전자기파 내용 체계의 흐름 비교

	EoP	HPP
전자기파 내용 체계의 흐름	**관점의 변화를 중심으로 한 거대한 흐름** • 기존 관점의 한계와, 새로운 관점의 성공을 강조 • 역사적 흐름을 따라가되, 그대로 묘사하기보다는, 독자를 탐구맥락에 계속해서 초대하는 방식으로 재구성하여 서술함. • 헤르츠의 실험 과정, 전자기파의 실생활 적용 등의 상세한 내용은 생략되어 있음 • 빛의 특징과 전자기파의 특징이 대응되도록, 광학 현상을 설명하기 위한 두 가지 관점의 시도가 대비되도록 서술됨.	**역사적 사건 중심의 흐름** • 당대 과학자들의 생각과 아이디어, 실험과정 등을 매우 자세하게 서술함. • 이론적 예측 → 실험 → 실생활 활용으로 이어지는 자연스러운 스토리라인이 돋보임. • 전자기 스펙트럼이 실생활에 활용되는 사례를 자세하게 설명함. • 광학과 전자기학의 통합이 가지는 물리적 의미와 또 다른 통합의 지향(상대성 이론)으로 이어짐을 자세히 서술함.

2. 전자기파 내용 체계의 구조

2.1. *EoP*에 담긴 전자기파 내용 체계의 구조

EoP 전자기파 내용 체계의 구조를 분석한 *DC* 구조도는 *[그림 4-3]*과 같다. *EoP* 전자기파 내용 체계는 두 가지 대비되는 물리학적 관점인 역학적 관점과 장 이론적 관점을 중심으로 대비되는 구조가 드러났다. 즉, 역학적 관점과 장 이론적 관점을 각각의 핵*(Nucleus)*으로 하여, 핵으로부터 파생되는 몸체*(Body)*와 핵으로는 잘 설명할 수 없는 주변부*(Periphery)*의 세 개의 뚜렷한 층위로 구분되어 있음이 확인되었다.

'광학 현상', '빛의 파동이론', '편광', '역선', '장'과 같은 개념들은 두 관점 모두에서 설명 가능한 요소로서, 각각의 몸체 영역에 동시에 위치한다. 반면, '에테르의 역학적 성질'은 빛 파동의 매질로서의 에테르를 역

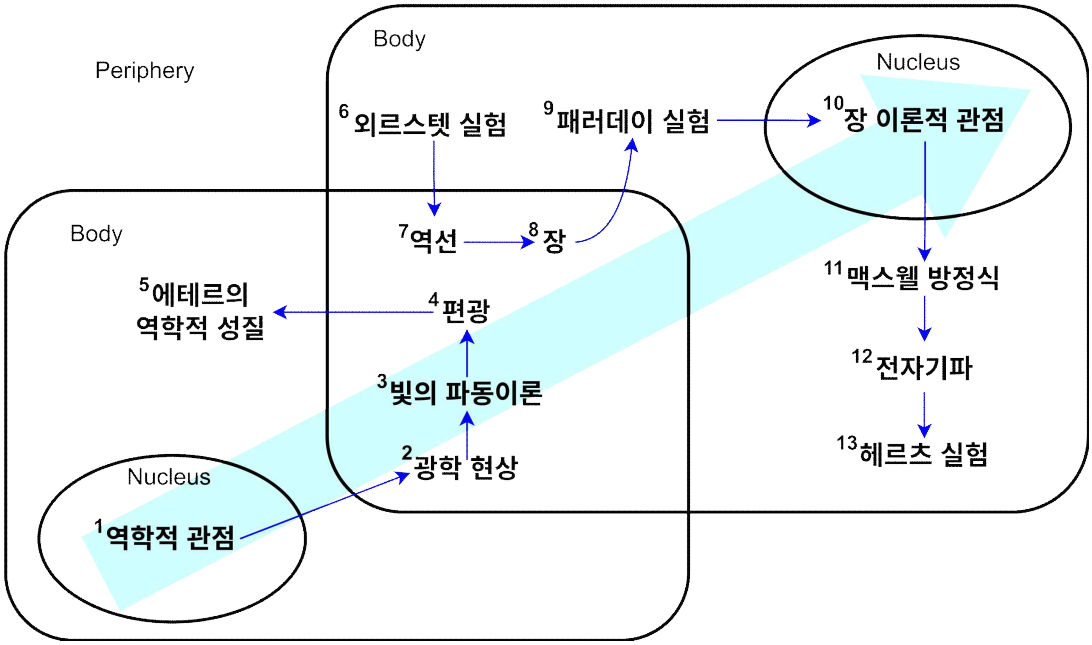
학적으로 해석하려 했던 시도에 대한 내용으로 역학적 관점의 몸체에 위치한다. '외르스텟 실험', '패러데이 실험', '맥스웰 방정식', '전자기파', '헤르츠 실험'은 역학적 관점의 설명의 한계를 넘어서는 현상들로서, 역학적 관점의 주변부이자 장 이론적 관점의 몸체에 자리잡고 있다.

본문의 논리적 전개를 화살표와 번호로 표시하여 분석해보면, 전자기파 관련 요소들이 이 두 대비되는 관점을 중심으로 긴밀하게 연결되어 있음이 드러난다. 구체적으로, *EoP*의 저자는 이전부터 이어오던 역학적 관점*(1)*의 틀을 광학 현상*(2)*에도 적용하려 시도한다. 이는 빛의 파동이론*(3)*으로 발전하여 굴절, 간섭, 회절 현상을 설명하고, 편광*(4)* 현상을 통해 빛이 횡파임을 도출해낸다. 그러나 빛의 매질에 대한 난제에 직면하여 에테르의 역학적 성질*(5)*을 탐구하지만, 에테르가 광학 현상에는 상호작용 하지만, 역학적 현상에 상호작용 하지 않는다는 모순점을 해결하지 못한 채 *2*장이 마무리된다.

*3*장에서는 역학적 관점으로는 설명이 어려웠던 외르스텟 실험*(6)*을 이해하기 위해 장과 역선 아이디어를 꺼낸다. 먼저 중력장에서의 역선*(7)* 아이디어를 제시하며, 대행자*(agent)*로서의 장*(8)*에 대해 탐구한다. 이후, 장*(8)*의 역할이 대행자를 넘어, 해석자*(interpreter)*, 나아가 물리적 실재*(physical reality)*로 확장되면서 외르스텟 실험*(6)*과 패러데이 실험*(9)*을 성공적으로 설명할 수 있었다. 이러한 발전은 우주를 장의 관점에서 해석하는 장 이론적 관점*(10)*의 정립으로 이어졌으며, 이는 맥스웰 방정식*(11)*이라는 수학적 체계로 완성되었다. 맥스웰 방정식*(11)*의 심층적 분석 과정에서 전기장과 자기장의 상호작용이 만들어내는 전자기파*(12)*의 존재가 이론적으로 예측되었고, 이는 후에 헤르츠의 실험*(13)*을 통해 실증되었다.

이처럼 *EoP*의 전자기파 내용 체계는 역학적 관점의 한계로부터 장 이론적 관점이 태동하는 과정을 보여준다. 역학적 관점의 주변부에 위치했던 현상들이 장 이론적 관점의 몸체로 편입되면서, 두 관점은 뚜렷한 대비를 이루게 되었다. 대비되는 구조 안에서 두 핵이 아우르는 전자기파 관련 내용 요소들은 유기적으로 연결되어 있었다.

결론적으로, *EoP*의 전자기파 내용 체계는 서로 대비되면서도 핵심적인 물리학의 두 관점을 중심으로 핵-몸체-주변부의 층위적 구조를 보여준다. 이는 앞서 제시한 흐름도와 함께 고찰할 때, *EoP*가 빛과 전자기파를 단일하고 고정된 지식체계로 다루지 않고, 역학적 관점과의 상호작용 속에서 발전해 온 장 이론적 관점의 실천전통을 생생하게 보여주고 있음을 확인할 수 있다.



[그림 4-3] EoP 전자기파 내용 체계의 구조도

*2.2. HPP*에 담긴 전자기파 내용 체계의 구조

HPP 전자기파 내용 체계의 구조를 분석한 *DC* 구조도는 *[그림 4-4]*와 같다. *HPP* 전자기파 내용 체계는 역학적 관점과 전자기장 이론 관점이라는 두 핵*(Nucleus)*을 중심으로 구조화되어 있다. 즉, 역학적 관점과 전자기장 이론 관점을 각각의 핵으로 하여, 핵으로부터 파생되는 몸체*(Body)*와, 핵으로는 잘 설명할 수 없는 주변부*(Periphery)*의 세 개의 층위로 구분됨이 확인되었다. 주목할 만한 특징은, 핵을 이루는 두 관점

이 본문에 명시는 되어 있지만, 그 역할이 강조되어 서술되지는 않았다는 점이다.

'패러데이의 역선'은 '역학적 관점' 하에서의 아이디어로서 역학적 관점의 몸체에 독자적으로 위치한다. '맥스웰 방정식'은 역학적 관점과 전자기장 이론 관점으로 모두 설명할 수 있는 요소로서, 양쪽 관점의 몸체에 동시에 위치한다. '전자기파', '헤르츠 실험', '전자기 스펙트럼'은 기존의 역학적 관점으로 설명할 수 없는 내용 요소로, 역학적 관점의 설명을 벗어나는 요소로서 역학적 관점의 주변부이자 전자기장 이론 관점의 몸체에 자리잡고 있다.

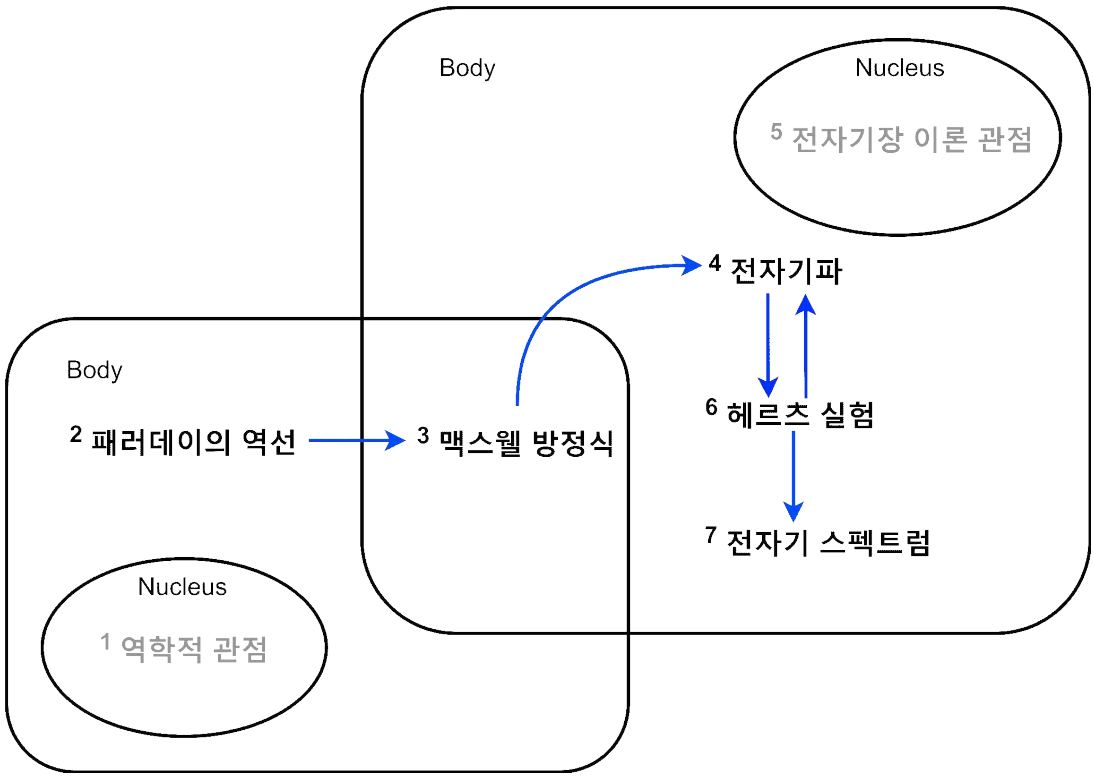
본문의 논리적 전개를 화살표와 번호로 표시하여 분석해보면, 전자기파 관련 내용 요소들이 일정 수준의 연결성을 보이나, 각 관점과의 관련성은 뚜렷하게 부각되지 않는다.

*HPP*는 *Faraday*의 역선*(2)* 아이디어를 바탕으로 *Maxwell*이 전기와 자기에 대한 역학적 모델을 제안하고, 이를 맥스웰 방정식*(3)*으로 정식화하는 과정을 보여준다. 이후 맥스웰 방정식은 역학적 틀에서 벗어나 전자기장 이론 관점*(5)*을 기반으로 새로운 물리 이론으로 발전한다. 맥스웰 방정식은 전기장과 자기장의 상호 유도를 통한 전자기파*(4)*의 존재를 예측했으며, 이는 *Hertz*의 실험*(6)*으로 입증되었다. 이를 통해 가시광선을 포함한 다양한 파장의 전자기파가 존재함이 밝혀졌고, 이는 전자기 스펙트럼*(7)*으로 체계화되었다.

이러한 내용 요소들 간의 관계를 분석하면, 역학적 관점은 *Faraday*와 *Maxwell*의 초기 사고의 배경으로만 작용할 뿐, 맥스웰 방정식이나 전자기파 발견과의 직접적 연관성은 약하게 서술되어 있다. 전자기장 이론 관점 역시 언급은 되나 그 역할이 명확히 제시되지 않았으며, 헤르츠 실험과 전자기 스펙트럼과 같은 요소들도 이 관점과의 뚜렷한 연관성을 보여주지 못했다.

결론적으로, *HPP* 전자기파 내용 체계는 두 물리학적 관점을 핵으로 하는 구조를 가지고 있으나, 이 관점들의 역할이 충분히 강조되지 않아 관점의 대비가 두드러지지 않았다. 이로 인해 전자기파 관련 내용 요소

들 간의 유기적 연결성이 다소 약화되었다. 그럼에도 불구하고 역사적 사실에 충실하게 내용을 기술한 점, 매우 자세하고 맥락을 담은 서술상의 특징 등으로 인해, 전자기파 내용 요소들이 자연스러운 스토리라인 속에서 연결되는 구조를 보여주었다.



[그림 4-4] HPP 전자기파 내용 체계의 구조도

*2.3. EoP*와 *HPP*의 내용 체계의 구조 비교

*EoP*와 *HPP*의 전자기파 내용 체계의 흐름을 비교하여 요약하면 *[*표 *4-2]*와 같다. 두 교재는 모두 역학적 관점과 장/전자기장 이론 관점을 핵*(Nucleus)*으로 하는 구조를 보여주나, 이 관점들의 활용에서 뚜렷한 차이를 보인다.

*EoP*는 두 관점의 대비를 명확히 부각시키며, 역학적 관점의 한계로부터 장 이론적 관점이 발전하는 과정을 체계적으로 보여준다. 특히 에테르 문제와 전자기 현상을 통해 역학적 관점의 한계를 드러내고, 이를 극복하는 과정에서 장 이론적 관점이 등장하는 흐름을 뚜렷이 제시한다. 두 관점 사이의 이러한 뚜렷한 대비는 내용 요소들의 유기적 연결을 강화한다.

반면 *HPP*는 두 관점을 명시하지만 그 역할을 강조하지 않는다. 역학적 관점은 *Faraday*와 *Maxwell*의 초기 사고 배경으로만 언급되며, 전자기장 이론 관점도 그 중요성이 충분히 부각되지 않는다. 이로 인해 관점들 사이의 대비가 약화되고 내용 요소들 간의 유기적 연결도 상대적으로 느슨해진다.

내용 요소의 배치에서도 주목할 만한 차이가 있다. '맥스웰 방정식'의 경우, *EoP*는 이를 역학적 관점의 주변부에 배치한 반면, *HPP*는 두 관점 모두의 몸체에 위치시켰다. 현대의 시각에서 맥스웰 방정식은 장 이론적 관점을 기반으로 한 전자기학 이론을 수학적으로 체계화한 결과물이므로, *EoP*처럼 역학적 관점의 주변부에 두는 것이 타당해 보인다. 그러나 *HPP*는 *Maxwell*이 처음에 역학적 모델에서 출발하여 이론을 발전시켰다는 역사적 사실에 충실하게 서술하였기에, 두 관점의 교집합 영역에 이를 배치한 것이다.

요약하자면, *EoP*는 물리학 이론의 발전 과정을 관점들의 대비와 상호작용을 통해 역동적으로 보여주는 반면, *HPP*는 관점의 역할이 강조되지 않아 내용 요소들 간의 유기적 연결이 상대적으로 느슨하다는 특징을 보인다.

[표 4-2] EoP와 HPP 전자기파 내용 체계의 구조 비교

	EoP	HPP
전자기파 내용 체계의 구조	**대비되는 두 관점을 중심으로 한 체계적인 구조** • 역학적 관점과 장 이론적 관점을 대비시킴. • 광학, 전자기학의 내용 요소들이 유기적으로 연결된 구조	**두 관점의 대비가 뚜렷하지 않은 구조** • 두 관점을 명시하지만, 관점의 역할이 강조되지 않음. • 역사적 사실에 충실한 서술을 통해 내용 요소들이 자연스럽게 연결되어 있지만, 요소들 간의 논리적인 연결은 다소 떨어지는 구조

제 2 절 교재를 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면

1. EoP를 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면

*EoP*를 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면을 분석한 결과는 *[표 4-3]*과 같다. 본문의 내용 중 독자를 이해의 *6*가지 측면으로 이끌 수 있는 부분에 이해의 *6*가지 측면에 대응되는 *6*가지 색깔을 이용하여 음영 표시를 하였다. *EoP*는 독자가 전자기파의 실천전통을 경험하여 '진정한 이해'에 이를 수 있도록 서술되어 있었다. 즉, *EoP*는 본문 전반에 걸쳐서 학생이 장 이론적 관점을 통해 관련 현상을 설명, 해석할 뿐만 아니라 공감하고 자기지식을 균형있게 형성할 수 있도록 서술되어 있었다.

EoP <*3.3*절. 장은 존재하는가>와 <*3.4*절. 장과 에테르>를 통해 학생이 형성하게 될 이해의 측면을 서사 구조의 각 단계별로 분석하면 다음과 같다.

<초대> 단계에서는 해석의 측면이 두드러진다. 저자는 맥스웰 방정식

의 물리학적 의의를 '구조 법칙'이라는 독창적 표현을 통해 의미화하며 서술하고 있다(해석).

<전개1>에서는 설명, 해석, 관점의 측면이 중심을 이룬다. 저자는 *Faraday*의 실험 결과를 일반화하여 제시하고(설명), 이 실험이 맥스웰 방정식으로 법칙화되는 과정을 고유한 방식으로 해석한다(해석). 또한 맥스웰 이론의 렌즈를 통해 전기장과 자기장의 실재성을 조명하고(관점), 맥스웰 방정식이 함의하고 있는 물리적 의미를 *Oersted, Rowland, Faraday*의 실험과 연결지어 물리적 실재로서의 장 개념으로 확장한다(설명).

<전개2>에서는 관점과 설명, 자기지식, 해석, 설명의 측면이 어우러진다. 저자는 장 이론적 관점을 통한 시공간적 인과관계를 설명하고(관점과 설명), 역학 법칙과 맥스웰 법칙의 근본적 차이를 각각의 기저 관점을 중심으로 조망한다(자기지식). 더불어 두 법칙에서 물질이 갖는 상반된 역할을 독특한 서술로 표현하고(해석), 이들을 대조하며 설명한다(설명).

<전개3>에서는 관점과 설명, 자기지식, 공감의 측면이 드러난다. 장의 관점에서 맥스웰 방정식의 수학적 추론을 통해 진동하는 전하 주변의 장 특성을 설명하고(관점과 설명), 기존 지식의 심층적 함의를 밝힌다(자기지식). 또한 전자기파의 이론적 발견이 지닌 위대함에 대한 당대 및 현대 과학자들의 공감대를 표현한다(공감).

<전개4>에서는 이해의 다양한 측면이 가장 풍부하게 드러난다. 저자는 빛의 본질을 탐구하는 자신의 추론 과정을 제시하며, 광학과 전기 현상의 통합이 지니는 물리학적 중요성을 독창적으로 의미화한다(해석). 이어서 고전역학적 관점으로 자연 현상을 바라보는 것의 함의를 심도 있게 고찰하고(관점), 역학적 관점과 장 이론적 관점의 본질적 차이를 상세히 설명한다(설명).

특히 전기 현상을 고전역학적 관점으로 이해하려 했던 시도와 그 한계점을 분석하며(자기지식과 해석), 현대 물리학자들이 장의 개념을 어떻게 받아들이고 발전시켜 왔는지에 대한 깊은 이해를 보여준다(공감).

또한 물리학의 패러다임이 역학적 관점에서 장 이론적 관점으로 전환되는 과정의 의미를 자신만의 언어로 해석하여 제시한다(해석).

더 나아가 저자는 고전 이론과 맥스웰 이론이라는 두 관점에서 전하의 개념을 어떻게 다르게 해석하는지 비교하며, 이에 대한 자신의 견해를 제시한다(관점과 설명). 마지막으로 새로운 이론과 기존 이론 사이의 관계를 거시적 관점에서 조망하며, 이에 대한 자신의 통찰을 풍부하게 펼쳐 보인다(자기지식과 해석).

<마무리>에서는 관점과 자기지식의 측면이 강조된다. 장 이론적 관점에서 재해석된 에테르의 축소된 의미를 제시하고(관점), 에테르에 대한 이해의 역사적 변천을 조망한다(자기지식).

EoP <3.3절. 장은 존재하는가>와 <3.4절. 장과 에테르>를 통해 학생이 도달하는 이해의 측면을 종합해보면, 각 단계별로 '적용'을 제외한 다양한 이해의 측면이 균형 있게 나타남을 알 수 있다. <초대>에서 해석의 측면으로 시작하여, <전개1-4>를 거치며 설명, 해석, 관점, 자기지식, 공감 등의 이해의 측면이 상호 보완적으로 드러나고, <마무리>에서는 관점과 자기지식으로 수렴된다. 특히 <전개4>에서는 이해의 모든 측면이 가장 풍부하게 어우러져, 독자로 하여금 장 이론의 발전 과정을 총체적으로 이해할 수 있도록 이끈다. 이를 통해 *EoP*가 독자들로 하여금 전자기파의 실천전통을 온전히 경험하고 '진정한 이해'에 도달할 수 있도록 체계적으로 구성되었음을 확인할 수 있다.

[표 4-3] EoP <3.3절 장은 존재하는가>, <3.4절 장과 에테르>를 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면

단계	문단	본문	이해의 측면
도입	1	**<3.3절 장은 존재하는가>** 장의 법칙들에 대한 정량적이고 수학적인 서술은 맥스웰 방정식에 의해 요약된다. 이 방정식 속에는 지금까지 언급한 사실들이 모두 포함될 뿐 아니라 우리가 지적하지 못했던 새로운 내용들이 담겨 있다. 주의 깊게 연구해 보면 이 간단해 보이는 방정식들에 포함되어 있는 심오한 의미를 알 수 있게 된다.	[해석] 맥스웰 방정식이 물리학에서 가지는 의미와 중요성에 대해 저자가 자신의 언어로 '구조'를 나타낸다는 표현과 함께 의미화하여 이야기하고 있다.
	2	이 방정식들이 만들어진 것은 내용이 풍부하다는 것뿐만 아니라 새로운 모범적인 법칙형태를 만들었다는 점에서 뉴튼 시대 이후 물리학에 있어 가장 중요한 사건이라 할 수 있다. 현대 물리학의 모든 식들이 그러하지만 맥스웰 방정식의 특성은 한마디로 나타낼 수 있다. 즉 맥스웰 방정식들은 장의 구조를 나타내는 법칙들이다.	
	3	맥스웰 방정식이 형태나 특성에 있어서 고전역학과 다른 점은 무엇인가? 이 식들이 장의 구조를 나타낸다는 것은 무엇을 의미하는가? 어떻게 해서 외르스텟과 맥스웰의 실험으로부터 물리학의 발전에 무척 중요하다고 인정되는 새로운 형태의 법칙을 이끌어낼 수 있었는가?	

전개 1	4	우리는 이미 외르스텟의 실험으로부터 어떻게 자기장이 변화하는 전기장 주위에 형성되는가를 살펴보았다. 그리고 패러데이의 실험을 통하여 어떻게 전기장이 변화하는 자기장 주위에 형성되는지도 알고 있다. 맥스웰 이론의 몇 가지 특징적인 성격을 알아보기 위해 잠시 우리의 주의를 패러데이의 실험에만 집중시키기로 하자. 다시 한번 변화하는 자기장에 의해 전류가 유도되는 그림을 살펴보자. 도선에 의해 둘러싸인 면을 지나가는 역선의 수가 변할 때 유도전류가 생긴다는 것은 이미 알고 있는 내용이다. 따라서 자기장이 변하거나, 또는 회로의 모양이 바뀌든지 회로가 움직일 때, 즉 원인에 상관없이 면을 지나가는 자기력선의 수가 변할 때 전류가 발생할 것이다. 자기력선의 수를 변화시키는 여러 가지 원인을 모두 고려하고 이것들의 특수한 영향까지 생각한다면 이론은 매우 복잡해질 것이다. 이 문제를 단순화시킬 수는 없는가? 회로의 모양, 회로의 길이, 도선에 의해 둘러싸인 면의 형태 등의 조건을 제거하기 위해 앞의 그림에서 회로가 점점 작아져 공간 위의 한 점에 불과한 아주 작은 회로로 축소되었다고 생각해 보자. 그러면 모양과 크기에 관련된 조건을 모두 무시할 수 있을 것이다. 닫힌 회로를 한 점으로 축소시킴으로써 크기와 모양은 고려대상에서 제외되고 우리는 임의의 순간, 공간 위의 임의의 점에서 자기장의 변화와 전기장의 변화에 관한 법칙을 얻게 된다.	[설명] Faraday의 실험 결과를 일반화하여 설명하였다. [해석] Faraday의 실험으로부터 맥스웰 방정식으로 법칙화되는 의미화의 과정을 저자의 언어로 해석하여 기술하였다.
	5	이것이 맥스웰의 방정식을 이끌어내는 주요한 과정 중의 하나인데 이 상상력에 의해서 행하여진 이상실험은 회로를 한 점에 이르기까지 점점 축소시켜가면서 패러데이의 실험을 반복하는 것이다.	
	6	이것은 사실 하나의 완전한 과정이라기보다는 반 정도의 과정이라 할 수 있다. 지금까지 우리의 관심의 초점은 패러데이의 실험에 두어졌다. 그러나 외르스텟의 실험에 근거를 둔 장 이론 역시 비슷한 방식에 의해 매우 주의깊게 연구되어야 한다. 이 실험에서는 자기력선이 전류의 주위를 감고 있다. 원형의 자기력선을 한 점으로 축소시킴으로써 나머지 반의 과정이 수행되는데, 이렇게 하여 완성된 하나의 과정은 임의의 순간, 공간 상의 임의의 점에서의 자기장의 변화와 전기장의 변화의 관련성을 보여준다.	

	7	그러나 아직 또 다른 중요한 과정이 남아 있다. 외르스텟의 실험에서 자기장의 존재여부를 확인하기 위한 자극이나 자침이 필요했듯이 패러데이의 실험에서도 전기장의 존재여부를 확인하기 위한 도선이 필요하다. 그러나 맥스웰의 새로운 이론적 사고는 이런 실험적인 사실을 뛰어넘는다. 맥스웰의 이론에서는 전기장과 자기장, 간단히 말해서 전자기장은 실제로 존재하는 것이다. 전기장은 이것을 검증하는 도선의 존재 여부에 관계없이 변화하는 자기장에 의해 형성된다. 마찬가지로 자기장도 실험 자극의 존재 여부에 관계없이 변화하는 전기장에 의해 형성된다.	[관점] 맥스웰 이론의 관점으로는 전기장과 자기장이 실제로 존재하는 것이다. [설명] 맥스웰 방정식이 함의하고 있는 물리적 의미를 Oersted, Rowland, Faraday의 실험과 관련지어 설명하고, 그것이 장의 실재성으로 이어짐을 설명한다.
	8	그러므로 두 개의 중요한 과정을 거쳐서 맥스웰의 방정식은 완성된다고 할 수 있다. 첫번째로 외르스텟과 로울랜드의 실험을 고찰함에 있어서 전류 주위를 원형으로 싸고 있는 자기장과 변화하고 있는 전기장을 한 점으로 축소시켜야 하고, 패러데이의 실험을 고찰함에 있어서도 변화하는 자기장을 둘러싸고 있는 전기장의 원형 역선을 한 점으로 줄여야 한다. 두번째로 장을 실재적인 어떤 것으로 생각해야 한다는 것이다. 한번 형성된 전자기장은 맥스웰의 방정식에 의해 존재하고 작용하며 변화한다.	

전개 2	9	맥스웰 방정식은 전자기장의 구조를 묘사한다. 물질이나 전하가 존재하는 점들에 대한 역학 법칙들과 다르게, 맥스웰 방정식은 모든 공간에 대하여 적용된다.	[관점과 설명] 장 이론적 관점에 의하면 공간상, 시간상 아주 가까운 곳에서 발생하게 될 일을 알 수 있음을 설명한다.
	10	역학에서 우리는 어떤 순간에 있어서의 물질의 위치와 속도 그리고 작용하는 힘을 가지고 그 물질의 앞으로의 운동을 예견할 수 있었다. 우리는 맥스웰 이론에 의해서 어떤 순간의 장을 근거로 시-공간의 변화에 따른 장의 변화를 알아낼 수 있다. 역학의 여러 방정식들이 우리에게 물질의 운동과정을 알려주듯이 맥스웰 방정식은 장의 변화과정을 알려준다.	
	11	그러나 역학법칙과 맥스웰의 법칙 사이에는 본질적인 차이점이 존재한다. 뉴튼의 중력법칙과 맥스웰의 장에 관한 법칙을 비교하면 이 법칙들이 나타내는 특성들의 차이점을 발견할 수 있다.	[자기지식] 역학 법칙과 맥스웰 법칙의 차이점을 각 법칙의 기저에 깔린 관점을 중심으로 조망한다.
	12	뉴튼 법칙의 도움으로 우리는 태양과 지구의 인력에 근거한 지구의 운동방식을 알 수 있다. 이 법칙은 지구의 운동을 멀리 떨어져 있는 태양의 영향력과 연관시킨다. 지구와 태양은 서로 멀리 떨어져 있지만 둘 다 힘이라는 연극의 배우들이다.	
	13	맥스웰 이론에서 물질적인 배우는 없다. 이 이론의 수학적 방정식은 전자기장에 대한 법칙을 나타낸다. 그러나 이것은 뉴튼의 법칙처럼 두 개의 분리된 물체를 연결시켜 주는 것, 즉 한 곳에서 일어나는 것과 다른 곳의 조건과의 관계를 나타내는 것이 아니다. 여기, 지금의 장은 방금 막 지나간 순간의 바로 옆에 위치한 장에만 의존한다. 만약 우리가 지금, 여기 무슨 일이 일어나고 있는가를 알고 있다면 이 방정식을 이용하여 우리는 공간상 아주 조금 떨어진, 시간상 아주 조금 경과한 후에 무슨 일이 발생할 것인가 하는 것을 알 수 있다. 따라서 어떤 장의 내용을 알기 위해서는 작은 소단계들을 거쳐야 한다. 멀리 떨어진 시-공에 존재하는 장으로부터 지금 여기의 장에 대한 내용을 알기 위해서는 일련의 작은 소단계를 종합해야 한다는 것이다. 반대로 뉴튼 이론의 경우에는 하나의 큰 단계만으로 두 상태를 바로 연결시킬 수 있다. 외르스텟과 패러데이의 실험은 맥스웰의 이론에서 다시 끄집어낼 수 있다. 그러나 그것은 맥스웰 방정식에 따르는 작은 소단계를 종합하는 것에 의해서만 가능하다.	[해석] 역학 법칙과 맥스웰 이론에서의 물질의 상반된 역할을 저자의 독특한 서술 방식으로 표현하였다. [설명] 두 법칙을 대조하며 설명한다.

전개 3	14	맥스웰 방정식을 좀더 철저히 연구하면 새롭고 기대하지 않은 결론을 얻을 수 있다. 그리고 이것은 좀더 수준높은 실험을 통해 검증된다. 왜냐하면 이러한 결과들은 논리적인 추론을 거쳐 얻어진 정량적인 것들이기 때문이다.	[관점과 설명] 장의 관점을 통해서 맥스웰 방정식의 수학적 추론을 통하여 진동하는 전하의 주위에 형성되는 장의 특성(전자기파)을 설명한다.
	15	이상실험을 상상해 보자. 전하를 띤 작은 구가 어떤 외부적 힘에 의해 진자와 같이 빠르고 주기적인 진동을 하고 있다. 우리는 이미 변화하는 것에 대해 배운 바가 있다. 여기서 일어나는 모든 것을 장의 언어로써 어떻게 기술할 수 있을까?	
	16	전하의 진동은 변화하는 전기장을 발생시킨다. 그리고 이것은 항상 변화하는 자기장을 동반한다. 만약 닫힌 도선회로를 근처에 놓는다면 변화하는 자기장은 회로에 전류를 발생시킬 것이다. 이런 것은 이미 우리가 알고 있는 사실의 반복에 불과하다. 그러나 맥스웰 방정식의 연구를 통하여 진동하는 전하에 대해 훨씬 많은 것을 알 수 있다. 맥스웰 방정식의 수학적 추론을 통하여 우리는 진동하는 전하의 주위에 형성되는 장의 특성 – 전하 주위와 떨어진 곳의 장의 구조, 시간에 따른 장의 변화 – 등을 알아낼 수 있다. 그 결과가 **전자기파**이다. 공간에서 일정하게 진동하고 있는 전하로부터 에너지가 일정한 속도로 방출되는데, 에너지의 전달과 상태변화는 모든 파동현상의 공통된 특성이다.	
	17	파동의 형태에 대해서는 이미 살펴본 바 있다. 그 하나의 형태가 진동하는 구에 의해서 발생하는 종파인데 이 경우는 매질을 통하여 밀도의 변화가 전달된다. 또 하나의 형태가 회전하는 구에 의해 발생하는 횡파로서 젤리 같은 매질을 통해 전달된다. 구의 회전에 의한 젤리의 변형이 매질을 따라 운동한다. 전자기파의 경우에는 어떤 종류의 변화가 전달될까? 오직 전자기장의 변화 그 자체이다. 모든 전기장의 변화는 자기장을 발생시킨다. 이렇게 생긴 모든 자기장의 변화는 전기장을 발생시킨다. 이 과정은 계속 반복된다. 장은 에너지를 나타내기 때문에 일정한 속도로 공간을 퍼져나가는 모든 장의 변화는 파동을 발생시킨다. 이론적으로 추론하면 전기력선이나 자기력선은 전달방향에 수직인 평면 위에 놓여 있다. 따라서 발생하는 파의 종류는 횡파이다. 우리가 외르스텟의 실험과 패러데이의 실험으로부터 생각했던 원래의 장의 형태는 지금도 마찬가지이다. 그러나 지금 우리는 그것이 훨씬 깊이있는 내용을 갖고 있다는 것을 깨닫는다.	[관점과 설명] 맥스웰의 장 이론적 관점으로 전자기파를 설명한다. [자기지식] 이전에 가지고 있었던 지식이 더 깊은 내용을 함의하고 있음을 설명한다.

	18	전자기파는 빈 공간을 퍼져나간다. 이것 또한 맥스웰 이론의 한 결과이다. 만약 진동하고 있던 전하가 갑자기 운동을 중지한다면 이때의 장은 정전기장이다. 그러나 진동에 의해 발생했던 파들은 계속 퍼져나갈 것이다. 이 파들은 독립적으로 존재하는 것으로 이들의 변화 과정은 물질입자의 경우와 마찬가지로 완전히 추적할 수 있다. 시간에 따라 변하며 일정한 속도로 공간 속에서 전파되어가는 전자기파의 구조를 나타내 주고 있기 때문에 가능한 것이다.	
	19	또 다른 주요한 문제가 있다. 전자기파는 어떤 속도로 빈공간을 퍼져나가는가? 실제로 파의 전달과는 아무런 관련이 없는 간단한 몇 가지 실험결과를 통해서 맥스웰의 이론은 이에 대한 명쾌한 해답을 준다. **전자기파의 속도는 빛의 속도와 같다.**	
	20	외르스텟과 패러데이의 실험은 맥스웰 법칙의 기초를 형성하였다. 지금까지 얻은 우리의 결과는 장의 언어로 기술된 이 법칙을 주의깊게 연구함으로써 도출된 것이다. 빛의 속도로 퍼져나가는 전자기파의 이론적 발견은 과학의 역사에 있어서 위대한 업적 중의 하나이다.	[공감] 당대의, 그리고 현재의 과학자들이 느끼는 전자기파의 이론적 발견의 위대함을 표현한다.
	21	이론에 따른 몇몇 예측이 실험에 의해 검증되었다. 50년 전 헤르츠에 의해 처음으로 전자기파의 존재가 실험적으로 판명되었고 그 속도가 광속과 같다는 것이 확인되었다. 오늘날 수많은 사람들이 전자기파의 존재를 확인하고 있다. 이들의 실험기구는 헤르츠의 기구보다 훨씬 더 복잡한 것으로, 파원으로부터 단지 몇 야드가 아니라 수천 마일 떨어진 곳에서 이 파의 존재를 확인할 수 있는 것이다.	

전개 4	22	**<3.4절 장과 에테르>** 전자기파는 횡파로서 빈 공간에서 빛의 속도로 퍼져나간다. 속도가 같다는 사실은 광학현상과 전자기현상의 밀접한 관계를 암시해 준다.	[설명] 역학적 관점과 장 이론적 관점이 어떤 것인지 자세하게 설명한다.
	23	입자론과 파장론 사이에서 선택을 해야 했을 때 우리는 파장론의 편에 섰었다. 이렇게 하는 데에는 빛의 회절현상이 결정적인 기여를 했다. 지금 우리가 **광파는 전자기파**라고 가정해도 광학적 사실에 대한 설명에 전혀 모순되지 않을 것이다. 오히려 더 많은 결론들이 도출될 수 있다. 만약 이것이 사실이라면 물질의 광학적 성질과 전기적 성질 사이에는 어떤 관련성이 존재하며 이를 이론적으로 증명할 수 있을 것이다. 이런 종류의 결론이 도출될 수 있고 이 결론이 실험을 통해 검증된다는 사실은 빛의 전자기이론을 지지하는 중요한 근거가 된다.	
	24	이 위대한 결론은 장 이론에 기인한다. 서로 명백한 연관이 없었던 과학의 두 분야가 동일한 이론에 의해 설명된 것이다. 맥스웰 방정식은 전기유도와 빛의 굴절이라는 두 가지 현상을 모두 설명한다. 우리의 목표가 하나의 이론으로 지금까지 발생했고 그리고 앞으로 발생할지 모를 모든 현상을 설명하는 것이라면 광학과 전기의 결합은 의심의 여지없이 매우 중요한 진보이다. 보통의 전자기파와 광파의 유일한 차이점은 파장이다. 광파의 파장은 매우 짧고 인간의 눈이 감지할 수 있다. 그리고 보통의 전자기파의 파장은 길고 라디오 수신기에 의해 감지된다. 고전역학적 관점은 자연계의 모든 현상을 물체 사이에 작용하는 힘에 귀결시키려 한다. 전기유체라는 순진한 이론이 이 관점에 기초를 두고 있다. 19세기 초기까지는 물리학자들에게는 장이라는 개념이 존재하지 않았다. 그들에게는 단지 물질과 그 변화만이 존재했을 뿐이다. 그들은 두 전하 사이의 작용을 전하에 직접 관계된 개념만으로 설명하려고 했다.	[해석] 빛의 본질이 무엇인지에 대해 추론하는 저자의 생각을 표현하고, 광학과 전기의 결합의 중요성을 강조한다. [관점] 고전역학적 관점으로 현상을 바라보는 것이 어떤 의미를 내포하고 있는지 서술한다.

	25	초기에 장이라는 개념은 역학적 관점에서 어떤 현상을 설명하기 위한 수단에 불과했다. 새로운 장의 언어에 있어서 두 전하 사이의 작용을 이해하는 핵심은 두 전하 그 자체가 아니라 그들 사이에 형성되는 장이었다. 이 새로운 개념에 대한 인식이 꾸준히 성장하여 물질 개념이 빛을 잃게 되었다. 물리학의 영역에서 엄청나게 중요한 사건이 발생한 것이다. 새로운 실체, 역학적으로는 도저히 설명할 수 없는 새로운 개념이 창조된 것이다. 천천히 그러나 다른 개념들과 치열하게 싸우면서 장의 개념은 스스로 물리학의 지도적 위치를 장악하였고 물리학의 기본개념 중의 하나로 정착되었다. 현대의 물리학자들에게 전자기장은 그들이 앉아 있는 의자만큼이나 실재하는 것이 되어 버렸다.	[자기지식] 고전역학적 관점으로 전기 현상을 바라보는 것이 어떤 것인지 설명하고, 그 관점이 지닌 한계 또한 설명한다. [해석] 역학적 관점에서 장 관점으로 변화하는 것의 의미에 대한 저자의 생각을 저자의 언어로 해석한다. [공감] 현대의 물리학자들의 장에 대한 관점, 생각, 태도 등을 이해한다.
	26	그러나 새로운 이론이 고전적 전기유체 이론의 잘못들을 모두 해결했다거나 고전적 이론이 성취한 업적이 모두 파괴되었다는 생각은 잘못된 것이다. 새로운 이론은 고전적 이론의 한계뿐만 아니라 장점도 보여준다. 그리고 더욱 높은 수준에서 고전적 개념을 이해할 수 있게 해준다. 이것은 전기유체와 장 이론뿐만 아니라 물리이론의 모든 변화에 적용된다. 하지만 그것은 가히 혁명적인 일이다.	[관점과 설명] 고전 이론적 관점과 맥스웰 이론적 관점 2가지 관점 모두에서 전하의 개념을 바라보는 방식에 대해 설명하고 바람직한 방향에 대한 저자의 생각을 설명한다.
	27	여기서의 경우를 예를 들면 비록 전하가 전기장의 근원으로만 이해되지만 맥스웰의 이론에서도 여전히 전하의 개념을 찾아볼 수 있다. 쿨롱의 법칙은 여전히 맥스웰 방정식에서도 도출될 수 있다. 고전적 이론에 의해서도 설명할 수 있는 현상에 대해서는 당연히 고전적 이론을 적용할 수 있다. 그러나 지금까지 우리가 논의한 사실들은 모두 새로운 이론을 적용하는 것이 좋다. 비유를 사용하자면, 새로운 이론을 창조하는 것은 헛간을 헐고 그 곳에 고층건물을 짓는 것과는 명백히 다른 것이다. 우리가 출발했던 점과 이후의 과정에 기대되지 않는 많은 연관을 발견했던 것을 염두에 둘 때 그것은 더욱 새롭고 넓은 곳을 보기 위하여 산에 오르는 것과 같다고 할 수 있다. 따라서 장애물을 모험으로 극복한 후 얻어진 넓은 시계에서 매우 작은 부분으로 보인다 하더라도 출발점은 여전히 존재하며 또한 우리는 그곳을 볼 수 있다.	[자기지식과 해석] 새로운 이론과 기존의 이론의 관계를 전체적으로 조망하며 저자의 생각을 표현한다.

마무리	28	맥스웰 이론의 모든 내용이 밝혀지는 데는 매우 오랜 시간이 걸렸다. 처음에 장은 에테르 개념을 사용하면 역학적으로 해석될 수 있는 어떤 것으로 생각되었다. 이 계획이 불가능함을 깨달았을 때는 이미 장 이론이 가져온 성과가 엄청난 충격을 불러와 그 중요성이 부각되고 있어 역학적 관점은 물러나게 되었다. 한편 에테르의 역학적 모델을 고안하는 문제는 점점 더 관심 밖으로 밀려났는데, 원래 이 가정의 부자연스러운 특성을 볼 때 갈수록 사기가 더 저하되는 것은 당연했다.	[자기지식] 에테르에 대한 과거와 현재의 이해를 구별하여 설명한다.
	29	이러한 상황에서 유일한 해결책은 공간이 전자기파를 전달하는 물리적 성질을 가진다는 사실을 당연한 것으로 받아들이고 여기에 대해 지나치게 문제를 제기하지 않는 것이다. 우리는 아직도 에테르라는 말을 사용할 수 있다. 그러나 그것은 공간의 어떤 물리적 성질을 나타내는 것에 불과하다. 에테르라는 말의 뜻은 물리학이 발전함에 따라 여러 번 변하여 왔다. 이제는 에테르가 더이상 입자로 이루어진 매질을 나타내는 말은 아니다. 그러나 에테르의 이야기는 결코 끝나지 않고 상대성이론에서 계속된다.	[관점] 새로운 장 이론적 관점에서 바라본 에테르의 축소된 의미를 기술한다.

2. *HPP*를 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면

*HPP*를 읽은 독자가 *HPP*에 담긴 전자기파의 실천전통을 경험함으로써 도달하게 될 이해의 측면을 분석한 결과는 *[표4-4]*와 같다. 본문의 내용 중 독자를 이해의 *6*가지 측면으로 이끌 수 있는 부분에 이해의 *6*가지 측면에 대응되는 *6*가지 색깔을 이용하여 음영 표시를 하였다. *HPP*는 독자가 다양한 이해의 측면에 도달하여 전자기파에 대한 '진정한 이해'에 이르는 데에 도움을 줄 수 있도록 서술되어 있었다. 특히 '설명'의 측면이 가장 두드러지며, '해석', '적용', '관점', '공감'의 측면도 균형 있게 나타난다. 그러나 관점의 변화가 명시적으로 강조되지 않아, 다양한 관점을 메타적으로 조망하는 '자기지식' 측면의 이해는 다소 제한적으로 드러난다.

HPP <*16*장. *Electromagnetic Radiation*>을 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면을 서사 구조의 단계별로 분석하면 다음과 같다. <도입> 단계에서는 설명, 관점과 설명, 관점이 중심을 이룬다. *Oersted*가 전류의 자기 효과를 발견한 당시의 과학자들의 생각과 배경을 설명하고*(*설명*)*, *Faraday*가 가졌던 자연의 통일성 관점과 이를 통한 전기-자기 현상의 해석*(*관점*)*, 그리고 *'unity'* 관점에서의 에너지-빛의 연관성, 실험적 증명*(*관점과 설명*)*이 체계적으로 서술된다.

<전개*1*> 단계에서는 설명, 해석, 공감의 측면이 부각된다. *Oersted*에서 *Faraday*를 거쳐 *Maxwell*에 이르기까지 전자기학의 역사적 발전 과정을 개괄하고*(*설명*)*, *Maxwell*의 혁신적 아이디어에 대한 저자의 독창적 해석을 제시한다*(*해석*)*. 또한 전기장과 자기장의 연관성이 가지는 의미를 탐구하던 당대 과학자들의 심정이 드러나며*(*공감*)*, 변위전류를 통한 전기장-자기장의 상호 작용의 과정이 상세히 설명된다*(*설명*)*.

<전개*2*> 단계에서는 설명, 적용, 공감과 설명, 자기지식과 공감, 해석 등 다양한 이해의 측면들이 풍성하게 나타난다. 전자기파의 발생 원리와 구체적 사례들을 설명하고*(*설명*)*, 이론적 지식을 실제 물질계에 적용하는 과정을 보여준다*(*적용*)*. 특히 *Maxwell*이 이론적으로 계산한 전자기파

의 속력과 당시 실험적으로 알려져있던 빛의 속력이 일치함을 발견했을 때의 놀라움에 공감하게 하며(공감), *Maxwell* 이론이 역학적 틀을 넘어서는 과정에서 과학자들의 인식 변화를 조망한다(자기지식과 공감). 더불어 우주가 단순한 *Newtonian machine*일 뿐만이 아니라, *machine*으로서는 설명이 되지 않는 장과 에너지를 포함한다는 자신의 통찰을 서술하였다(해석).

<전개3> 단계에서는 공감, 적용, 해석, 적용과 설명 등의 다양한 이해의 측면들이 고르게 나타났다. 우선 *Maxwell*의 이론이 당시 과학계에서 쉽게 받아들여지지 않았고 실험적 증거가 절실했던 상황에 대한 공감을 이끌어낸다(공감). 이어서 기존의 *Maxwell* 이론을 *Hertz*의 실험이라는 새로운 상황에 적용하는 과정을 보여주며(적용), *Hertz*가 관측한 스파크가 전자기파 존재의 '확실한 단서'가 된다는 저자의 해석을 제시한다(해석). 또한 빛에 대해 알려진 지식을 전자기파에 적용하여 두 현상의 유사성을 실험적으로 검증하는 과정을 상세히 설명한다(적용과 설명). 마지막으로 *Hertz*의 실험이 *Maxwell* 이론을 극적으로 입증함으로써 수리물리학자들이 이 이론을 수용하고 적용하게 되는 과정에 대한 공감적 이해를 형성하도록 이끈다(공감).

<전개4>는 주로 설명의 측면에 집중되어 있다. 전자기 스펙트럼의 개념과 특성, 그리고 라디오파부터 감마선까지 다양한 전자기파의 특징과 활용을 체계적으로 설명한다(설명).

<마무리> 단계에서는 관점, 관점과 설명, 공감, 해석의 측면이 두루 나타났다. 그 당시 물리학자들이 바라본 전자기학에 대한 관점으로 에테르를 바라보았다(관점). 또한, *Maxwell* 이론의 관점에 의하면 에테르 없이 전기장과 자기장의 변화 간의 관계를 설명할 수 있었다(관점). 에테르 개념의 지지자들이 에테르가 존재한다는 관점을 유지하기 위해, 임시변통적 가설을 만들어내었다(관점과 설명). 에테르에 대한 믿음이 무너져가는 과정에 지적으로 공감할 수 있도록 이끌었다(공감). 에테르 개념의 지지자들이 에테르가 존재한다는 관점을 유지하기 위해, 임시변통적 가설을 만들어냈다(관점). *Einstein*이 *Maxwell* 방정식을 상대성 원

리의 물리학 전체로의 확장으로 의미화하였다는 내용을 소개하며, 이것이 더 큰 통합을 이끌었다는 저자의 해석을 서술하였다(해석).

<마무리> 단계에서는 관점, 관점과 설명, 공감, 해석의 측면이 풍부하게 어우러진다. 먼저 당시 물리학자들이 전자기학의 틀 안에서 에테르를 어떻게 바라보았는지에 대한 관점을 제시하고(관점), *Maxwell* 이론의 관점에서는 에테르 없이도 전기장과 자기장의 변화 관계를 설명할 수 있었음을 보여준다(관점). 특히 에테르 개념의 지지자들이 자신들의 관점을 유지하기 위해 임시방편적 가설들을 만들어내는 과정을 설명하며(관점과 설명), 에테르에 대한 과학계의 믿음이 점차 무너져가는 과정에 대한 지적 공감을 이끌어낸다(공감). 마지막으로 *Einstein*이 *Maxwell* 방정식을 '상대성 원리의 물리학 전체로의 확장'으로 의미화하였다는 내용을 소개하며, 이것이 물리학 전체를 아우르는 더 큰 통합으로 이어졌다는 저자의 의미 있는 해석으로 마무리된다(해석).

종합하면, *HPP <16장. Electromagnetic Radiation>*은 각 단계별로 다양한 이해의 측면을 포함하고 있다. <도입>에서 설명과 관점을 중심으로 시작하여, <전개*1-3*>을 거치며 설명, 해석, 적용, 공감 등의 이해의 측면이 풍부하게 드러난다. 다만 <전개*4*>에서는 설명의 측면에 국한되어 있다가, <마무리>에서 다시 관점, 공감, 해석의 측면이 복합적으로 나타난다. 전반적으로 '설명'의 측면이 가장 두드러지며 다른 이해의 측면들도 고르게 나타나지만, 관점의 변화가 명시적으로 강조되지 않아 '자기지식' 측면의 이해는 상대적으로 제한적이다. 이를 통해 *HPP*가 독자들이 전자기파의 실천전통을 경험하고 '진정한 이해'에 도달하는 데 기여하면서도, 메타적 인식의 측면에서는 보완의 여지가 있음을 알 수 있다.

[표 4-4] HPP <16장. Electromagnetic Radiation>를 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면

단계	문단	본문	이해의 측면
도입	1	**<16.1절 Introduction>** On April 11, 1846, the distinguished physicist Sir Charles Wheatstone was scheduled to give a lecture at the Royal Institution in London. Michael Faraday was to introduce Wheatstone to the audience. At the last minute, just as Faraday and Wheatstone were about to enter the lecture hall, Wheatstone got stage fright, turned around, and ran out into the street. Faraday had to give the lecture himself. Nonnally, Faraday discussed only his actual experiments in public. But on this occasion he revealed certain speculations which, as he later admitted, he would never have made public had he not suddenly been forced to speak for an hour.	[설명] Oersted가 전류가 자석을 회전시킬 수 있는 것을 발견할 당시의 여러 과학자들의 생각과 배경에 대해 설명한다. [관점] Faraday는 자연의 힘이 연결되어 있다는 관점으로 전기와 자기 현상을 바라보았다.
	2	Faraday's speculations dealt with the nature of light. Faraday, like Oersted before him, believed that all the forces of nature are somehow connected. Electricity and magnetism, for example, could not be separate forces that just happen to exist in the same universe. Rather, they must be different forms of one basic phenomenon. This belief paralleled that of Schelling and other German Nature Philosophers at the beginning of the nineteenth century. It had inspired Oersted to search in the laboratory for a connection between electricity and magnetism. Eventually he found such a connection in his discovery that an electric current in a conductor can turn a nearby magnet.	

	3	Faraday, too, had been guided by a belief in the unity of natural forces. Could light also be another form of this basic "force"? Or rather, to use more modern terms, is light a form of energy? If so, scientists should be able to demonstrate experimentally its connection with other forms of energy such as electricity and magnetism. Faraday did succeed in doing just this. In 1845, he showed that light traveling through heavy glass had its plane of polarization rotated by a magnetic field applied to the glass.	[관점과 설명] Faraday가 unity에 대한 관점으로 에너지와 빛을 연관시키고, 이를 실험적으로 증명함. [설명] Faraday의 추론 과정을 기술함.
	4	This experiment convinced Faraday that there is a definite connection between light and magnetism. But he could not resist going one step further in his unrehearsed lecture the following year. Perhaps, he suggested, light itself is a vibration of magnetic lines of force. Suppose, for example, that two charged or magnetized objects are connected by an electric or magnetic line of force. If one of them moved, Faraday reasoned, a disturbance would be transmitted along the line of force. Furthermore, if light waves were vibrations of lines of force, then an elastic substance such as "ether" would not be needed in order to explain the propagation of light. The concept of the ether could be replaced if it could be shown that lines of force themselves have the elastic properties needed for wave transmission.	
	5	Faraday could not make his idea more precise. He lacked the mathematical skill needed to prove that waves could propagate along lines of electric or magnetic force. Other physicists in Britain and Europe might have been able to develop a mathematical theory of electromagnetic waves. But at the time these scientists either did not understand Faraday's concept of lines of force or did not consider them a good basis for a mathematical theory. Ten years passed before James Clerk Maxwell, a Scottish mathematical physicist, saw the value of the idea of lines of force and started using mathematics to express Faraday's concepts.	

전개 1	6	**<16.2절 Maxwell's formulation of the principles of electromagnetism>** The work of Oersted, Ampere, Henry, and Faraday had established two basic principles of electromagnetism: 1. An electric current in a conductor produces magnetic lines of force that circle the conductor. 2. When a conductor moves across eternally set up magnetic lines of force, a current is induced in the conductor.	
	7	In the 1860's, James Clerk Maxwell developed a mathematical theory of electromagnetism. In it, he added to and generalized these principles so that they applied to electric and magnetic fields in conductors, in insulators, and even in space free of matter.	
	8	Maxwell began by putting Faraday's theory of electricity and magnetism into mathematical form. In 1855, less than 2 years after completing his undergraduate studies at Cambridge University, Maxwell presented to the Cambridge Philosophical Society a long paper. Entitled "On Faraday's Lines of Force," it described how these lines are constructed: *... if we commence at any point and draw a line so that, as we go along it, its direction at any point shall always coincide with that of the resultant force at that point, this curve will indicate the direction of that force for every point through which it passes, and might be called on that account a line of force. We might in the same way draw other lines of force, till we had filled all space with curves indicating by their direction that of the force at any assigned point.* Maxwell stated that his paper was designed to show how, by a strict application of the ideas and methods of Faraday, the connection of the very different orders of phenomena which he has discovered may be clearly placed before the mathematical mind." During the next 10 years, Maxwell created his own models of electric and magnetic induction. In developing his theory, he first proposed a mechanical model for	[설명] Oersted에서 Faraday를 거쳐 Maxwell에 이르기까지 전자기학의 발전에 대한 역사적 흐름을 간략히 설명함.

		the electrical and magnetic quantities observed experimentally by Faraday and others. Maxwell then expressed the operation of the model in a group of equations that gave the relations between the electric and magnetic fields. He soon found these equations to be the most useful way to represent the theory. Their power allowed him eventually to discard the mechanical model altogether. Maxwell's mathematical view is still considered by physicists to be the proper approach to the theory of electromagnetic phenomena. If you go on to take another physics course after this introductory one, you will find that the development of Maxwell's mathematical model (Maxwell's equations) is one of the high points of the course. However, it will require vector calculus.	
	9	Maxwell's work contained an entirely new idea of far-reaching consequences: An electric field that is changing with time must be accompanied by a magnetic field. Not only do currents in conductors produce fields around them, but changing electric fields in insulators such as glass, air, or empty space also produce magnetic fields.	[해석] 'Maxwell의 연구에 완전히 새로운 아이디어(entirely new idea)가 포함되어 있다'는 저자의 해석을 그 구체적인 내용과 함께 서술함. [공감] 전기장과 자기장의 연결이 가지는 의미를 탐구하는 당대의 과학자들의 심정에 공감한다.
	10	It is one thing to accept this newly stated connection between electric and magnetic fields. But it is harder, and more interesting, to understand the physical necessity for such a connection. The paragraphs below are intended to make it clearer.	
	11	An uncharged insulator (such as glass, wood, paper, or rubber) contains equal amounts of negative and positive charges. In the normal state, these charges are distributed evenly. Thus, the net charge is zero in every region of the material. But when the insulator is placed in an electric field, these charges are subjected to electrical forces. The positive charges are pushed in one direction, the negative in the opposite direction. Unlike the charges in a conductor, the charges in an insulating material are not free to move far through the material. The charges can be displaced only a small distance before restoring forces in the insulator balance the force of the electric field. If the strength of the field is increased, the charges will be displaced	

			further. The changing displacement of charges that accompanies a changing electric field in an insulator forms a current. Maxwell called this current a *displacement current*. He assumed that this momentary displacement current in an insulator surrounds itself with a magnetic field just as a conduction current of the same magnitude does.	
	12		In an insulator, the displacement current is defined as *the rate at which the charge displacement changes*. This rate is directly proportional to the rate at which the electric field is changing in time. Thus, the magnetic field that circles the displacement current can be considered a consequence of the time-varying electric field. Maxwell assumed that this model, developed for matter, also applies to space free of matter (though at first glance this seems absurd). Therefore, under all circumstances, *an electric field that is changing with time surrounds itself with a magnetic field.* Previously, it was thought that the only current that produced a magnetic field was the current in a conductor. Now Maxwell predicted that a magnetic field would also arise from a changing electric field, even in empty space. Unfortunately, this field was very small in comparison to the magnetic field produced by the current in the conductors of the apparatus. So it was not at that time possible to measure it directly. But as you will see, Maxwell predicted consequences that soon *could* be tested.	[설명] '시간에 따라 변하는 전기장의 결과로 자기장이 생긴다'는 사실을 변위전류를 이용하여 설명함.
	13		According to Maxwell's theory, then, the two basic principles of electromagnetism should be expanded by adding a third: 3. *A changing electric field in space produces a magnetic field.* The induced magnetic field vector $\vec{B}$ is in a plane perpendicular to the changing electric field vector $\vec{E}$. The magnitude of $\vec{B}$ depends on the rate at which $\vec{E}$ is changing – not on $\vec{E}$ itself, but on '$\frac{\Delta \vec{E}}{\Delta t}$'. Therefore, the higher the frequency of alteration of $\vec{E}$, the greater the field $\vec{B}$ so induced.	[설명] 전기장의 변화가 자기장을 만드는 과정, 자기장의 변화가 전기장을 만드는 과정을 자세하게 설명함.

	14	**Consider a pair of conducting plates** connected to a source of current, as shown at the right. Charges are moved onto or away from plates through the conductors connecting them to the source. Thus, the strength of the electric field $\vec{E}$ in the space between the plates changes with time. This changing electric field produces a magnetic field $\vec{B}$ as shown. (Of course, only a few of the infinitely many lines for $\vec{E}$ and $\vec{B}$ are shown.)	
	15	An additional principle, known before Maxwell, assumed new significance in Maxwell's work because it is so symmetrical to statement 3 above: 4. *A changing magnetic field in space produces an electric field.* The induced electric field vector '$\vec{E}$' is in a plane perpendicular to the changing magnetic field vector '$\vec{B}$'. The magnitude of '$\vec{E}$' depends on the rate at which '$\vec{B}$' is changing-not on '$\vec{B}$' itself, but on '$\frac{\Delta \vec{B}}{\Delta t}$'. Consider the changing magnetic field produced by, say, temporarily increasing the current in an electromagnet. (See the illustration in the right margin of this page.) This changing magnetic field induces an electric field in the region around the magnet. If a conductor happens to be lined up in the direction of the induced electric field, the free charges in the conductor will move under the field's influence. Thus, a current in the direction of the induced field will arise in the conductor. This electromagnetic induction had been discovered experimentally by **Faraday (Sec. 15.3)**.	
	16	Maxwell's theories of the total set of relations between electric and magnetic fields were not at once directly testable. When the test finally came, it concerned his prediction of the existence of waves traveling as interrelating electric and magnetic fields, that is, electromagnetic waves.	

전개 2	17	**<16.3절 The propagation of electromagnetic waves>** Suppose in a certain region of space, an electric field that changes with time is created. According to Maxwell's theory, an electric field 'E' that varies in time simultaneously induces a magnetic field 'B' that also varies with time. (The magnetic field also varies with the distance from the region where the changing electric field was created.) Similarly, a magnetic field that is changing with time simultaneously induces an electric field that changes with time. (Here, too, the electric field also changes with distance from the region where the changing magnetic field was created.)	[설명] 전기장과 자기장의 상호 유도와 이를 통한 전자기파의 발생과 그 예시들에 대해 설명함.
	18	As Maxwell realized and correctly predicted, mutual induction of time- and space-changing electric and magnetic fields should set up an unending sequence of events. First, a time-varying electric field in one region produces a time- and space-varying magnetic field at points near this region. But this magnetic field produces a time and space-varying electric field in the space surrounding it. And this electric field produces time- and space-varying magnetic fields in its neighborhood, and so on. Thus, suppose that an electromagnetic disturbance is started at one location, say by vibrating charges in a hot gas or in the transmitter wire of a radio or television station. This disturbance can travel to distant points through the mutual generation of the electric and magnetic fields. The fluctuating, interlocked electric and magnetic fields propagate through space in the form of an electromagnetic wave, a disturbance in the electric and magnetic field intensities in space.	[적용] 위에서 서술했던 전기장은 자기장을, 자기장은 전기장을 생성한다는 지식이 실제 물질에서 어떠한 과정을 통해 일어나는지를 실제 물질에 적용함.

	19	In Chapter 12 it was shown that waves occur when a disturbance created in one region produces at a later time a disturbance in adjacent regions. Snapping one end of a rope produces, through the action of one part of the rope on the other, a displacement at points farther along the rope and at a later time. Dropping a pebble into a pond produces a disturbance that moves away from the source as one part of the water acts on neighboring parts. Time-varying electric and magnetic fields produce a disturbance that moves away from the source as the varying fields in one region create varying fields in neighboring regions.	
	20	What determines the speed with which electromagnetic waves travel? Recall first that for mechanical waves the speed of propagation is determined by the stiffness and density of the medium. Speed increases with increasing stiffness, but decreases with increasing density. This relation between wave speed, stiffness, and density holds for mechanical wave motions and for many other types of waves. Only the barest outline of how Maxwell proceeded beyond this point is given here. First, he assumed that a similar "stiffness and density" relation would hold for electromagnetic waves. Then he computed what he thought to be the "stiffness" and "density" of electric and magnetic fields propagating through the hypothetical ether. In finding values for these two properties of the electric and magnetic fields, Maxwell was guided by his mechanical model representing the ether. In this model, stiffness was related to the electric field, and density to the magnetic field. Next, he proved mathematically that the ratio of these two factors, which should determine the wave speed, is the same for all strengths of the fields. Finally, Maxwell demonstrated that the speed of the waves (if they exist!) is a definite quantity that can be deduced from measurements in the laboratory.	[설명] 전자기파의 속력을 결정하는 요인에 대해 설명함.

	21	The necessary measurements of the factors involved actually had been made 5 years earlier by the German scientists Weber and Kohlrausch. Using their published values, Maxwell calculated that the speed of the supposed electromagnetic waves should be about 311,000,000 m/sec. He was immediately struck by the fact that this large number was very close to a measured speed already well known in physics. In 1849, Armand Fizeau had measured the speed of light and had obtained a value of about 315,000,000 m/sec. The close similarity could have been a chance occurrence. But Maxwell believed that there must be a deep underlying reason for these two numbers being so nearly the same. The significance for physics seemed obvious to him. Making an enormous leap of the imagination, he wrote: The velocity of the transverse undulations in our hypothetical medium, calculated from the electromagnetic experiments of MM Kohlrausch and Weber, agrees so exactly with the velocity of light calculated from the optical experiments of M. Fizeau, that we can scarcely avoid the inference that *light consists in the transverse undulations of the same medium which is the cause of electric and magnetic phenomena.* Here then was an explanation of light waves and at the same time a joining of the previously separate sciences of electricity, magnetism, and optics. Maxwell realized the importance of his discovery. Now he set to work making the theory mathematically sound and freeing it from his admittedly artificial model.	[공감과 설명] Maxwell이 자신이 계산한 전자기파의 속력과 당시 실험적으로 알려져있던 빛의 속력이 같다는 것을 깨달았을 때의 심정에 공감함.

	22	Maxwell's synthesis of electromagnetism and optics, after it had been experimentally confirmed (see Sec. 16.4), was seen as a great event in physics. In fact, physics had known no greater time since the 1680's, when Newton was writing his monumental work on mechanics. Of course, Maxwell's electromagnetic theory had arisen in Maxwell's mind in a Newtonian, mechanical framework. But it had grown out of that framework, becoming another great general physical theory, independent of its mechanical origins. Like Newtonian mechanics, Maxwell's electromagnetic field theory succeeded spectacularly. You will see something of that success in the next few sections. The success occurred on two different levels: the practical and the theoretical. Practically, it led to a host of modern developments, such as radio and television. On the theoretical level, it led to a whole new way of viewing phenomena. The universe was not only a Newtonian machine of whirling and colliding parts; It included fields and energies that no machine could duplicate. As you will see later. Maxwell's work formed a basis of the special theory of relativity. Other physical theories were nourished by it also. Eventually, however, results accumulated that did not fit Maxwell's theory; something more was needed. Starting about 1925, after a quarter-century of discovery, the development of quantum mechanics led to a larger synthesis, which included Maxwell's electromagnetism.	[자기지식과 공감] Maxwell의 이론은 역학적 관점의 틀에서 시작되었지만, 결국에는 그 틀 밖으로 나와 독립하게 되었다는 서술을 통해 당대 과학자들의 심정에 공감하고, 여러 관점 속에서 현상을 바라보는 방식들을 조망함. [해석] 우주가 Newtonian machine일 뿐만이 아니라, machine으로서는 설명이 되지 않는 장과 에너지를 포함한다는 것을 자신의 언어로 표현함.

전개 3	23	**<16.4절 Hertz's experiments>** Did Maxwell establish without doubt that light actually does consist of electromagnetic waves, or even that electromagnetic waves exist at all? No. Most physicists remained skeptical for several years. The fact that the ratio of two quantities determined by electrical experiments came out equal to the speed of light certainly suggested some connection between electricity and light. No one would seriously argue that this was only a coincidence. But stronger evidence was needed before the rest of Maxwell's theory, with its displacement current, could be accepted.	
	24	What further evidence was needed to persuade physicists that Maxwell's theory was correct? Maxwell showed that his theory could explain all the known facts about electricity, magnetism, and light. But so could other theories, although with less sweeping connections between their separate parts. To a modern physicist, the other theories proposed in the nineteenth century seem much more complicated and artificial than Maxwell's. But at the time, Maxwell's theory seemed strange to physicists who were not accustomed to thinking in terms of fields. It could be accepted over other theories only if it could be used to predict some new property of electromagnetism or light.	[공감] Maxwell 이론이 당시 과학자들에게 받아들여지기 어려웠으며, 그들을 납득시키기 위해서는 실험적 증거가 반드시 필요함을 공감할 수 있도록 이끎.
	25	Maxwell himself made two such predictions from his theory. He did not live to see them verified experimentally in 1888, for he died in 1879 at the age of 48. Maxwell's most important prediction was that electromagnetic waves of many different frequencies could exist. All such waves would propagate through space at the speed of light. Light itself would correspond to waves of only a small range of high frequencies (from 4x10^14 Hz to 7x10^14 Hz). These are frequencies detectable by the human eye.	

	26	To test this prediction required inventing apparatus that could both produce and detect electromagnetic waves, preferably of frequencies other than light frequencies. This was first done by the German physicist Heinrich Hertz, whose contribution was triggered by a chance observation. In 1886, Hertz noticed a peculiar effect produced during the sparking of an induction coil. As was well known, sparks sometimes jump the air gap between the terminals of an induction coil (see drawing). You will recall (Chapter 15) that an induction coil can be used to produce high voltages if there are many more turns of wire on one side than on the other. Ordinarily, air does not conduct electricity. But when there is a very large potential difference between two wires a short distance apart, a conducting pathway may form briefly as air molecules are ionized. A short burst of electricity then may pass through, attended by a visible spark. Each visible spark produced is actually a series of many small sparks, jumping rapidly back and forth (oscillating) between the terminals. Hertz found that he could control the spark's frequency of oscillation by changing the size and shape of metal plates attached to the spark gap of the induction coil.	
	27	Hertz then bent a simple piece of wire so that there was a short gap between its two ends. When it was held near an induction coil, a spark jumped across the air gap in the wire just when a spark jumped across the terminals of the induction coil. This was a surprising new phenomenon. Hertz reasoned that as the spark jumps back and forth across the gap of the induction coil, it must set up rapidly changing electric and magnetic fields. According to Maxwell's theory, these changes propagate through space as electromagnetic waves. (The frequency of the waves is the same as the frequency of oscillations of the sparks.) When the electromagnetic waves pass over the bent wire, they set up rapidly changing electric and magnetic fields there, too. A strong electric field produces a spark in the air gap, just as the transmitter field did between the terminals of the induction coil. Since the field is rapidly changing, sparks can jump back and forth between the two ends of the wire. This wire, therefore, serves as a detector of the electromagnetic waves generated by the induction coil. Hertz's observation of the induced spark was the first solid clue that electromagnetic waves do exist.	[적용] 이미 알고 있는 지식(Maxwell 이론)을 새로운 상황(Hertz 실험)에 적용함. [해석]' Hertz가 관측한 스파크가 전자기파가 존재한다는 '확실한 단서'라는 저자의 의견을 서술함.

28		Hertz showed that the electromagnetic radiation from his induction coil has all the usual properties of light waves. It can be reflected at the surface of solid bodies, including metallic conductors. In addition, the angle of reflection is equal to the angle of incidence. The electromagnetic radiation can be focused by concave metallic mirrors. It shows diffraction effects when it passes through an opening in a screen. All interference phenomena can be shown, including standing waves. Also, electromagnetic waves are refracted by prisms made of glass, wood, plastic, and other nonconducting material. (All these experiments, with more modern apparatus, can be done in your laboratory.) By setting up a standing-wave pattern with a large metal reflector. Hertz was also able to determine the distance between consecutive nodes and thus measure the wavelength. He determined the frequency of the oscillating electric current through an analysis of his circuits. Thus, he was able to determine the speed of his waves and found it to be the same value that Maxwell had predicted: the speed of light.	[적용과 설명] 기존에 알고 있던 빛에 대한 지식을 전자기파에도 적용하여 전자기파도 동일한 성질을 가지는지 실험으로 검증하는 과정을 자세하게 설명함.
29		Hertz's experiments dramatically confirmed Maxwell's electromagnetic theory'. They showed that electromagnetic waves actually exist, that they travel with the speed of light, and that they have the familiar characteristics of light. Now mathematical physicists rapidly accepted Maxwell's theory and applied it with great success to the detailed analysis of a wide range of phenomena.	[공감] Hertz의 실험이 극적으로 Maxwell 이론을 확증함으로 인해 수리물리학자들이 이 론을 받아들이고 적용했다는 것에 공감할 수 있도록 이끎.
30		Thus, at the end of the nineteenth century, Maxwell's electromagnetic theory stood with Newton's laws of mechanics as an established part of the foundations of physics.	

전개 4	31	**<16.5절 The electromagnetic spectrum>** Hertz's induction coil produced electromagnetic radiation with a wavelength of about 1 m. This is about 1 million times the wavelength of visible light. Later experiments showed that a very wide and continuous range of electromagnetic wavelengths (and frequencies) is possible. The entire possible range is called the electromagnetic spectrum. A range of frequencies from about 1 Hz to 10^25 Hz, corresponding to a wavelength range from 10^8 m to 10^-17 m, has been studied. Many of these frequency regions have been put to practical use.	[설명] 전자기 스펙트럼이 무엇인지에 대해 설명함.
	32	Light, heat, radio waves, and X rays are names given to radiations in certain regions of the electromagnetic spectrum. In each of these regions radiation is produced or observed in a particular way. For example, light may be perceived directly through its effect on the retina of the eye. But to detect radio waves requires electronic equipment. The named regions overlap. For example, some radiation is called "ultraviolet" or "X ray," depending on how it is produced.	
	33	All waves in the electromagnetic spectrum, although produced and detected in various ways, behave as predicted by Maxwell's theory. All electromagnetic waves travel through empty space at the same speed—the speed of light. They all carry energy; when they are absorbed, the absorber is heated, as is food in a microwave oven. Electromagnetic radiation, whatever its frequency, can be emitted only if energy is supplied to the source of radiation, which is, ultimately, a charge that is undergoing acceleration. This charge acceleration can be produced in many ways. For example, heating a	[설명] 전자기파의 여러 특성에 대해 설명함.

		material will increase the vibrational energy of charged particles. Also, one can vary the motion of charges on an electric conductor (an antenna) or cause a charged particle to change its direction. In these and other processes, work is done by the force that is applied to accelerate the electric charge. Some of the energy supplied to the antenna in doing this work is "radiated" away; that is, it propagates away from the source as an electromagnetic wave.	
	34	The work of Maxwell and Hertz opened up a new scientific view of nature. It also prepared for a rapid blooming of new technologies, such as radio, TV, radar, etc. As was done before, for example, in the chapter on electric motors and generators, a brief description of these indirect consequences of a scientific advance is given below.	
	35	*Radio.* Electromagnetic waves having frequencies of 10^4 to 10^7 Hz are reflected quite well by electrically charged layers that exist in the upper atmosphere. This reflection makes it possible to detect radio waves at great distances from the source. Radio signals have wavelengths from tens to thousands of meters. Such waves can easily diffract around relatively small obstacles such as trees or buildings. But large hills and mountains may cast "dark" shadows. (이하 16.5절의 본문 생략)	[설명] 라디오파, 마이크로파, 적외선, 가시광선, 자외선, X선, 감마선의 특징과 활용에 대해 설명함.

마무리	36	**<16.6절 What about ether now?>** The "luminiferous ether" had been proposed specifically as a medium for the propagation of light waves. Maxwell found that the ether could also be thought of as a medium for transmitting electric and magnetic forces. Later, he realized that he could drop his specific model of the ether entirely if he focused on the mathematical form of the theory. Yet, just before his death in 1879, Maxwell wrote an article in which he still supported the ether concept: *Whatever difficulties we may have in forming a consistent idea of the constitution of the aether, there can be no doubt that the interplanetary and interstellar spaces are not empty, but are occupied by a material substance or body, which is certainly the largest, and probably the most uniform body of which we have any knowledge. .* Maxwell was aware of the failures of earlier ether theories. Near the beginning of the same article he said: *Aethers were invented for the planets to swim in, to constitute electric atmospheres and magnetic effluvia, to convey sensations from one part of our bodies to another, and so on, till all space had been filled three or four times over with aethers. It is only when we remember the extensive and mischievous influence on science which hypotheses about aethers used formerly to exercise, that we can appreciate the horror of aethers which sober-minded men had during the 18th century….*	

	37	Maxwell had formulated his electromagnetic theory mathematically, independent of any particular model of the ether. Why, then, did he continue to speak of the "great ocean of aether" filling all space? It seemed unthinkable to Maxwell that there could be vibrations without something that vibrates, or waves without a medium. Also, to many nineteenth-century physicists the idea of "action at a distance" seemed absurd. How could one object exert a force on another body far away if something did not transmit the force? One body is said to act on another, and the word on gives the idea of contact. Thus, according to accepted ways of describing the world in common language, the ether seemed somehow necessary.	[관점] 그 당시 물리학자들이 바라본 전자기학에 대한 관점으로 에테르를 바라봄.
	38	Yet 25 years after Maxwell's death the ether concept had lost much of its support. Within another decade, it had vanished from the collection of useful concepts. In part, the success of Maxwell's theory itself helped to undermine the general belief in the existence of an ether, simply because his equations did not depend on details of the ether's structure. In fact, they could be taken to describe the relations between changes of electric and magnetic fields in space without any reference to the ether at all.	[관점] Maxwell 이론의 관점에 의하면 에테르 없이 전기장과 자기장의 변화 간의 관계를 설명할 수 있음.
	39	Another difficulty with belief in the ether was that all attempts to detect the motion of the earth relative to the ether failed. If light is a kind of vibration of an ether that fills all space, then light should travel at a definite speed relative to the ether. But the earth must also be moving through the ether in its annual orbit around the sun. Thus, the earth should be moving like a ship, against an "ether wind" at some times, and with it at other times. Under these conditions, the apparent speed of light should be observed to differ. When the earth and a beam of light are moving in the same direction through the ether, the observed speed of light should not be the same as when the earth and the light are moving in opposite directions.	[관점과 설명] 에테르 개념의 지지자들이 에테르가 존재한다는 관점을 유지하기 위해, 임시변통적 가설을 만들어냄. [공감] 에테르에 대한 믿음이 무너져가는 과정에 지적으로 공감할 수 있도록 이끎.

	40	Theorists computed the time required for light to make a round trip with and against the ether wind. They compared this interval with the time calculated for a round trip in the absence of an ether wind. The expected time difference was found to be very small: only 10^(-15) sec for a round trip of 30 m. This is too short a time difference to measure directly, but it is of the same order as the time for one vibration of visible light. Therefore, the difference might be detected from observations of a properly produced interference pattern. In 1887, the American scientists Albert A. Michelson and Edward Morley used a device sensitive enough to detect an effect only 1% as great as that predicted by the ether theory. Neither this experiment nor the many similar experiments done since then have revealed the existence or expected effects of an ether wind.	[관점] 에테르 개념의 지지자들이 에테르가 존재한다는 관점을 유지하기 위해, 임시변통적 가설을 만들어냄.
	41	Supporters of the ether concept offered various explanations for this unexpected result. For example, they suggested that objects moving at high speeds relative to the ether might change their size in just such a way as to make this relative speed undetectable. But even those who made such attempts to rescue the ether concept felt their proposals to be forced and artificial. Finally, a decisive development led scientists to abandon the ether concept. This breakthrough was not a specific experiment, but a brilliant proposal by a young man of 26 years. The man was Albert Einstein, who in 1905 suggested that a new and deep union of mechanics and electromagnetism could be achieved without the ether model. A few brief remarks here will provide a setting for your further study of relativity at a later time.	
	42	Einstein showed that the equations of electromagnetism can be written to fit the same principle of relativity that holds for mechanics. In Sec. 4.4, the Galilean principle of relativity was discussed. It states that the same laws of mechanics apply in each of two frames of reference that have a constant velocity relative to each other. Thus, it is impossible to tell by any mechanical experiment whether or not a laboratory	

		(reference frame) is at rest or is moving with constant velocity. The principle is illustrated by common experience within a ship, car, plane, or train moving at a constant speed in a straight line. The observer finds that objects move, remain at rest, fall, or respond to applied force in just the same way they do when the ship, or whatever, is at rest. Galileo, a convinced Copernican, applied this principle to the motion of objects with respect to the earth. You will recall the example of a stone falling straight down alongside a tower. Galileo argued that this event gives no indication whether the earth is fixed and the sun in motion, or the sun fixed and the earth in motion.	
	43	Einstein extended this principle of relativity beyond mechanics. It applied, he proposed, to all of physics, including electromagnetism. A main reason for this assumption appears to have been his feeling that nature could not be lopsided; relativity could not apply only to part of physics. Einstein then added a second basic conjecture. He stated *that the speed of any light beam moving through free space is the same for all observers,* even when they are moving relative to each other or relative to the light source! This bold statement resolved the question of why the motion of observers with respect to the ether did not show up in experiments on the speed of light. In fact, Einstein rejected the ether and all other attempts to provide a "preferred frame of reference" for light propagation. The price of making these assumptions of his was, Einstein showed, the necessity of revising some common-sense notions of space and time. Einstein showed that Maxwell's equations are fully consistent with extending the principle of relativity to all physics. This was yet another great synthesis of previously separate ideas, like the syntheses forged by Copernicus, Newton, and Maxwell.	[해석] Einstein이 Maxwell 방정식을 상대성 원리의 물리학 전체로의 확장으로 의미화하였다는 내용을 소개하며, 이것이 더 큰 통합을 이끌었다는 저자의 해석을 서술함.

3. *EoP*와 *HPP*를 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면 비교

두 교재를 통해 독자가 도달하게 될 이해의 측면을 비교 분석한 결과는 *[표 4-5]*와 같다. *EoP*와 *HPP* 모두 독자가 전자기파에 대한 피상적 이해를 넘어 '진정한 이해'에 도달할 수 있도록 서술되어 있으나, 그 구체적인 방식에서는 차이를 보인다.

*EoP*는 서사 구조의 각 단계에서 이해의 여러 측면이 균형 있게 드러나도록 서술되어 있다. 특히 <전개*4*>에서는 해석, 관점, 설명, 자기지식, 공감 등 다양한 이해의 측면이 풍부하게 어우러진다. 또한 역학적 관점과 장 이론적 관점의 대비가 뚜렷이 강조되어, 독자가 두 관점을 메타적으로 조망하며 자기지식을 형성할 수 있도록 이끈다. 다만, 이론적 지식을 새로운 상황에 적용해보는 '적용'의 측면은 상대적으로 부족하다는 한계를 보인다.

반면 *HPP*는 '설명'의 측면이 두드러지며, '적용'을 포함한 다른 이해의 측면들도 전반적으로 나타나지만 그 분포가 단계별로 다소 불균형하다. 특히 <전개*4*>에서는 설명의 측면에만 집중되어 있다. 또한 관점의 변화가 명시적으로 강조되지 않아 '자기지식' 측면의 이해는 상대적으로 제한적이다.

이러한 차이는 두 교재의 내용 체계와 관련지어 이해할 수 있다. *EoP*는 역학적 관점과 장 이론적 관점의 대비를 중심으로 내용이 구조화되어 있어, 독자가 자연스럽게 두 관점을 비교하며 메타적 이해에 도달할 수 있다. 다만 '적용'의 이해에 도달할 수 있는 부분이 부족하다. 반면 *HPP*는 역사적 사실에 충실한 서술과 함께 '적용' 측면에 도달할 수 있는 사례를 포함하고 있지만, 관점들 간의 대비가 상대적으로 약하게 드러나 메타적 이해에 도달하는 것이 제한적이다.

결과적으로, 두 교재는 각각의 방식으로 전자기파의 실천전통에 대한 독자의 '진정한 이해' 형성에 기여한다. *EoP*는 역학적 관점과 장 이론적 관점의 대비를 중심으로 이해의 여러 측면이 균형 있게 드러나도록 구성되어 있으나, '적용' 측면의 보완이 필요해 보인다. *HPP*는 '적용'을 포함

한 다양한 이해의 측면을 다루고 있으며 역사적 맥락의 상세한 서술을 통해 독자의 이해 형성을 돕고 있지만, '설명' 측면의 비중이 높고, 관점들 간의 대비가 뚜렷하지 않아 '자기지식'의 이해에 도달하는 것에 다소 제한적이다. 두 교재의 이러한 특징은 각 교재가 전자기파의 실천전통에서 강조하고자 하는 부분의 차이에서 비롯된 것으로 볼 수 있다.

[표 4-5] EoP와 HPP 본문의 서사 구조에 따른 이해의 측면 비교

	초대/도입	전개1	전개2	전개3	전개4	마무리
EoP	3.3절 1-3문단	3.3절 4-8문단	3.3절 9-13문단	3.3절 14-21문단	3.4절 22-27문단	3.4절 28-29문단
	● 해석	● 설명 ● 해석 ● 관점 ● 설명	● 관점과 설명 ● 자기지식 ● 해석 ● 설명	● 관점과 설명 ● 관점과 설명 ● 자기지식 ● 공감	● 해석 ● 관점 ● 설명 ● 자기지식과 해석 ● 공감 ● 해석 ● 관점과 설명 ● 자기지식과 해석	● 관점 ● 자기지식
HPP	16.1절	16.2절	16.3절	16.4절	16.5절	16.6절
	● 설명 ● 관점 ● 관점과 설명 ● 설명	● 설명 ● 해석 ● 공감 ● 설명 ● 설명	● 설명 ● 적용 ● 설명 ● 공감과 설명 ● 자기지식과 공감 ● 관점 ● 해석	● 공감 ● 적용 ● 해석 ● 적용과 설명 ● 공감	● 설명 ● 설명 ● 설명	● 관점 ● 관점 ● 관점과 설명 ● 공감 ● 관점 ● 해석

제 5 장 요약 및 논의

제 1 절 요약 및 결론

본 연구는 *EoP*와 *HPP* 두 교재의 전자기파 내용 체계의 특징을 분석하고, 이를 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면을 비교 분석하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 두 교재의 전자기파 내용 체계는 흐름과 구조 면에서 뚜렷한 차이를 보였다. *EoP*는 역학적 관점과 장 이론적 관점의 대비를 중심으로 한 거대한 흐름 속에서 내용이 전개되었으며, 두 관점의 명확한 대비를 통해 내용 요소들이 유기적으로 연결된 구조를 보였다. 반면 *HPP*는 역사적 사실에 충실한 서술을 통해 자연스러운 스토리라인을 보여주었으나, 관점들 간의 대비가 상대적으로 약하게 드러나 내용 요소들 간의 논리적 연결은 다소 느슨한 구조를 보였다.

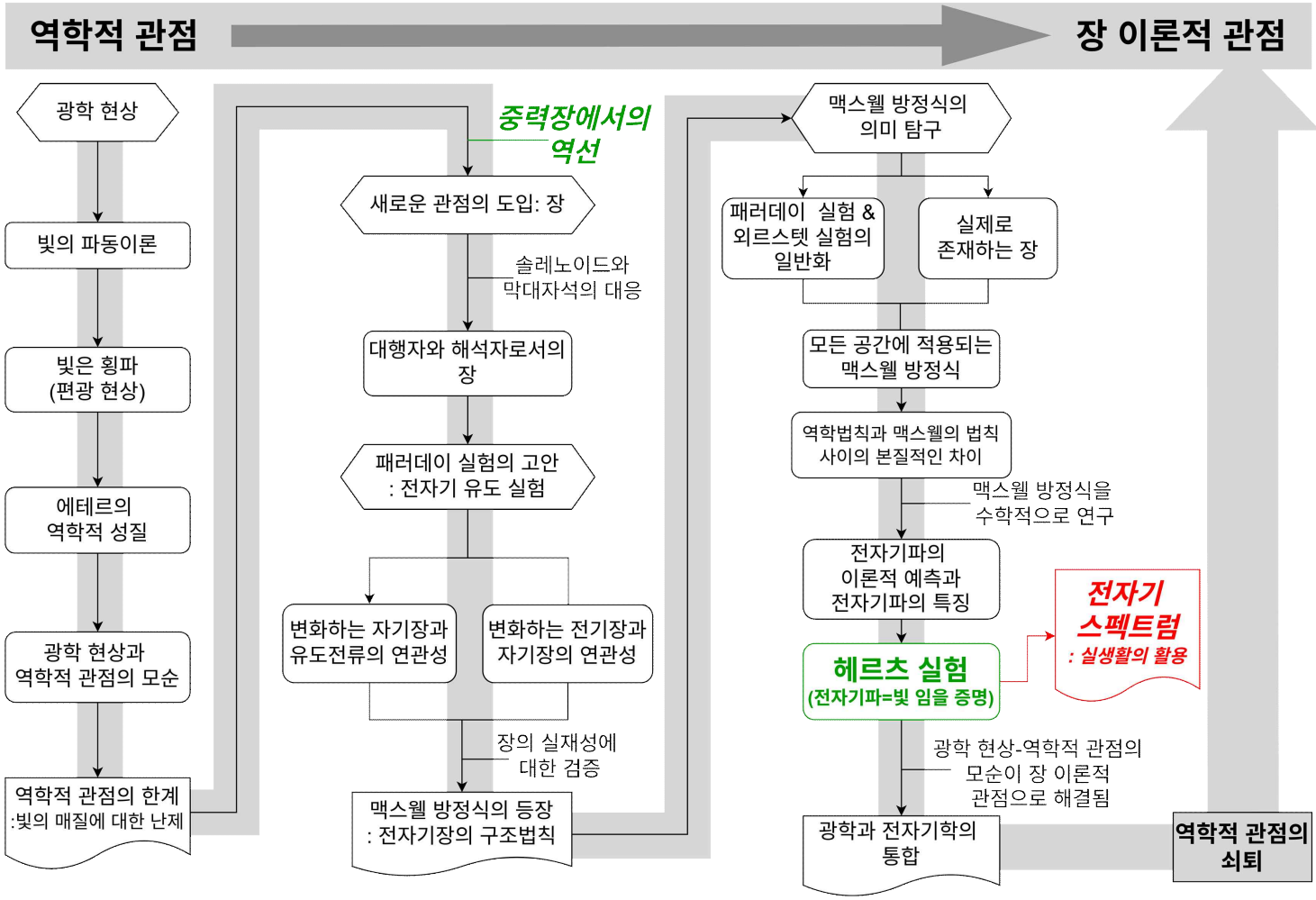
둘째, 두 교재를 읽은 독자가 도달하게 될 이해의 측면에서도 차이가 나타났다. *EoP*는 '적용'의 측면이 부족하나, 다른 이해의 측면들이 각 단계에서 균형있게 드러났으며, 특히 두 관점의 뚜렷한 대비를 통해 '자기지식' 형성이 용이하도록 구성되었다. *HPP*는 '적용'을 포함한 다양한 이해의 측면을 다루고 있으나, '설명' 측면의 비중이 높고 관점들 간의 대비가 뚜렷하지 않아 '자기지식' 측면의 이해는 상대적으로 제한적이었다.

이상의 결과는 교재가 전자기파의 실천전통의 어떤 부분을 강조하느냐에 따라 독자의 이해 형성 과정이 달라질 수 있음을 시사한다. *EoP*와 같이 관점의 대비를 중심으로 한 구조는 메타적 이해 형성에 도움을 주며, *HPP*와 같이 역사적 맥락을 상세히 다루는 구조는 과학자들의 사고 과정과 물리학 발전의 실제적인 모습을 이해하는 데 기여할 수 있다. 이는 향후 물리 교재 개발에 있어 교재의 목적과 의도에 따라 내용 체계의 구성 방식을 달리할 수 있음을 의미한다.

제 2 절 논의

본 연구는 고등학교 물리학의 전자기파 내용 체계 개선을 위한 기초 연구로서, *EoP*와 *HPP* 교재 분석을 통해 전자기파 관련 영역의 과학의 실천전통을 흐름과 구조로 체계화하여 표현하였다. 또한, *EoP*와 *HPP*를 읽은 독자가 형성할 수 있는 전자기파에 대한 이해의 측면을 분석하였다. 이를 바탕으로 본 절에서는 연구의 시사점을 논의하고자 한다.

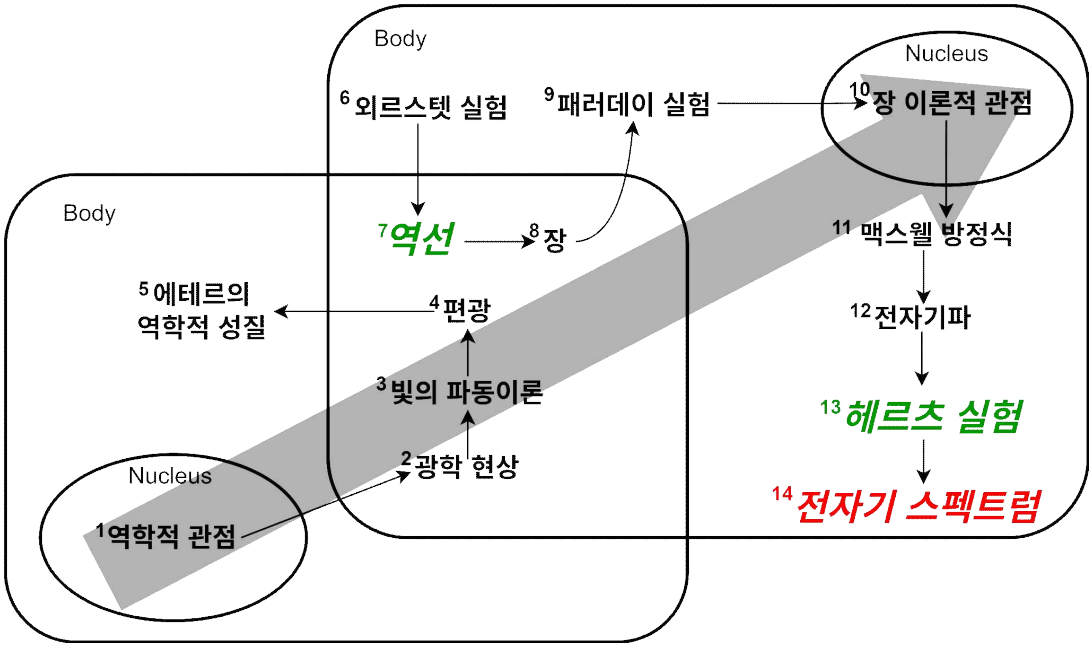
*EoP*에는 전자기파 내용 체계의 전체 그림과 세부 내용에 대한 서술, 즉 숲과 나무가 고르게 서술되어있다. 반면, *HPP*는 전체 그림의 구조는 뚜렷하지 않지만, 세부 내용에 대한 서술이 풍성하다는 특징이 있다. 이에, 전체 그림을 잘 보여주는 *EoP*의 흐름도를 밑그림으로 하여, *HPP*에 서술된 부분 중 *EoP*에 충분하게 서술되어있지 않은 부분들을 보완하여 흐름도에 넣어 새로운 내용체계의 흐름을 *[그림 5-1]*과 같이 제안할 수 있다.



*[그림 5-1] EoP*의 밑그림에 *HPP*의 내용을 보완한 전자기파 내용 체계의 흐름도

구조에 있어서는 *EoP*가 강조한 물리학적 관점의 의미와 역할을 적극적으로 고려하고, 이에 더해 *HPP*에서 자세하게 보완하여 제시된 내용과 새롭게 제시된 내용을 추가하여 전자기파 내용 체계를 *[그림 5-2]*와 같이 제안해 볼 수 있다.

이와 같은 시도는 하나의 열린 시도로서, 두 교재 외에도 과학 고전 및 국내외 물리학 교과서를 연구하여 드러나는 장점을 전자기파 내용 체계의 구성 요소로 포함시켜 전자기파 내용 체계의 지속적인 발전을 모색할 필요가 있다.



*[그림 5-2] EoP*의 밑그림에 *HPP*의 내용을 보완한 전자기파 내용 체계의 구조도

참 고 문 헌

감민주 (2024). 고등학교 전자기파 수업에서 발생한 어려움 극복을 위한 교사들의 협력적 실천 과정: '좋은' 과학 수업에 대한 인식과 실천의 변화를 중심으로. 서울대학교 석사학위 논문.

강현석. (2005). 합리주의적 교육과정 체제에서 배제된 내러티브 교육과정의 가능성과 교과목 개발의 방향 탐색. *교육과정연구, 23*(2), 83-115.

강현석. (2009). Bruner의 교육과정 이론에서 지식의 재해석: 지식의 구조와 내러티브의 관계. *교육철학*, 38, 1-34.

강현석, 유제순 (2010). Backward Design 을 통한 교육과정 설계: 교과의 진정한 이해를 위한 한 구상. *교육철학, 40*, 1-37.

강현석, 이지은 (2018). 백워드 설계를 통한 역량기반 교육과 이해중심 교육과정의 통합 방안. *예술인문사회 융합 멀티미디어 논문지, 8(1)*, 329-339.

강현석, 이지은, & 유제순. (2021). *이해중심 교육과정을 위한 백워드 설계의 이론과 실천: 교실혁명(2판)*. 학지사.

강현식, 이일, 진수영, 안재익, 유준희 (2015). 2009 개정 물리I 의 지도 교사가 인식한 물리I 내용 적정성 및 어려움. *새물리, 65(2)*, 152-169.

김경자, & 온정덕. (2011). *이해중심 교육과정*. 교육아카데미.

김경자, 온정덕, & 이경진. (2017). *역량 함양을 위한 교육과정 설계: 이해를 위한 수업*. 교육아카데미.

김정희, & 소경희. (2014). 교육연구에서 내러티브 탐구의 의의와 예술기반 연구로서의 가능성 탐색. *교육과정연구, 32*(2), 21-40.

교육과학기술부. (2009). 과학과 교육과정. 교육과학기술부 고시 제 2009-41호.

교육부. (2015a). 2015 개정 과학과 교육과정. 교육부 고시 제 2015-74호.

교육부. (2015b). 초중등학교 교육과정 총론. 교육부 고시 제 2015-74호.

교육부. (2021). 2022 개정 교육과정 총론 주요사항(시안).

교육부. (2022a). 2022 개정 과학과 교육과정 시안(최종안) 개발 정책연구.

교육부. (2022b). 2022 개정 과학과 교육과정. 교육부 고시 제 2022-33호.

교육부. (2022c). 초중등학교 교육과정 총론. 교육부 고시 제 2022-33호.

서범원. (2020). 힘과 운동 영역 내용 지식 체계와 고등학교 물리학 I 교과서 분

석: 아인슈타인과 인펠트의 저서를 중심으로. 서울대학교 석사학위 논문.
심규철 (2022). 2015 개정 물리학Ⅰ 교과서의 내용 지식 체계의 특징 분석: 『The Evolution of Physics(1938)』의 전자기학 내용 지식을 중심으로. 서울대학교 석사학위 논문.
심규철, 김홍빈, 이경호 (2023). 『The Evolution of Physics (1938)』 에 제시된 '전기와 자기' 영역의 내용 체계 분석, *새물리, 73(7)*, 577-591.
심규철, 김홍빈, 이경호 (2024). 2015 개정 교육과정 물리학Ⅰ 교과서에 제시된 '전기와 자기' 영역의 내용체계 분석: 『The Evolution of Physics』의 내용 체계와 비교를 중심으로, *새물리, 74(6)*, 561-577.
온정덕. (2011). 이해중심교육과정의 적용 사례 고찰: *초등예비교사들을 중심으로. 교육과정연구, 29*(1), 41-66.
온정덕, 변영임, 안나, & 유수정. (2018). *교실 속으로 간 이해중심 교육과정.* 살림터.
이경민. (2020). 아인슈타인의 관점에서 바라본 현대물리학 교재의 특징:'일반 상대성이론' 단원을 중심으로. 서울대학교 석사학위 논문.
이경원, 박영주, 김완수, & 강희원. (2022). 2022 개정 초등 도덕과 교육과정 시안의 이론적 토대 탐색. *도덕윤리과교육*(77), 1-37.
이경호. (2020). 학문, 교과, 교과내용, 교과교육 간 관계에 대한 비판적 고찰- 과학교육을 중심으로-. *한국과학교육학회지, 40(6)*, 671-685.
이경호 (2022). 과학교과내용학과 과학교육학의 본질 탐구-'본질적-총체적'관점과 실천전통을 중심으로. *한국과학교육학회지, 42(4)*, 449-475.
이광표 (2024). 고등학교 양자역학 내용 체계에 대한 기초 탐구 : 『The Evolution of Physics (1938)』와 『Harvard Project Physics (1970)』를 중심으로. 서울대학교 석사학위 논문.
이광표, 김홍빈, 이경호 (2024). 고등학교 양자역학 내용 체계 정립을 위한 기초 연구 1: 『The Evolution of Physics』를 중심으로, *새물리, 74(9)*, 895-911.
이다민 (2022). 물리 교과 내용 지식 체계에서 '빛'의 역할에 대한 탐색 -『The Evolution of Physics(1938)』중심으로-. 서울대학교 석사학위 논문.
이봉우 (2020). 2015 개정 과학과 교육과정에 의해 개발된 고등학교 물리학 교과서의 광학 내용 분석. *새물리, 70(4)*, 342-352.

이서지 (2019). 아인슈타인은 일반 상대성이론을 어떻게 설명하는가?: ‘학술논문’과 ‘일반인을 위한 저서’를 중심으로. 서울대학교 석사학위 논문.

이세연, 이봉우 (2018). 중학교 과학 교사들이 교과서의 물리 탐구 지도에서 겪는 어려움 분석. *새물리, 68(4)*, 411-421.

이세연, 이봉우, 손정우 (2019). 교과서 집필자가 고등학교 물리 교과서 개발 과정에서 겪는 어려움 분석. *새물리, 79(4)*, 429-438

이승은. (2021). 이해중심 교육과정의 두 원천이 교육과정의 성격과 교사의 역할 논의에 주는 시사. *초등교육연구, 34*(2), 1-28.

이재봉, 김용진, 백성혜, 이기영 (2010). 과학과 교육내용 개선을 위한 교육과정 내용 관련 쟁점 분석. *과학교육연구지, 34(1)*, 140-154.

이재봉 (2013). 2009 개정 고등학교 물리 I 교육과정과 평가에 대한 현장 교사의 의견. *새물리, 63(4)*, 400-410.

이홍우. (2006). *지식의 구조와 교과. 교*육과학사.

임유나. (2018). 국내 이해중심 교육과정 관련 연구 동향 분석과 문제점 논의. *학습자중심교과교육연구, 18*(8), 367-391.

정경은 (2024). 고등학교 물리학의 광전효과 내용 체계에 대한 기초 탐구 : 『The Evolution of Physics』와 『Harvard Project Physics』그리고 교과서를 중심으로. 서울대학교 석사학위 논문.

조현희. (2019). 2015 개정 교육과정에 근거한 학교 및 교실 수준의 역량기반 교육과정 설계 유형 탐색. *교육과정평가연구, 22*(2), 1-30.

최석민. (2023). 이해중심교육(UbD)과 역량기반교육(CBE)의 비교. *현장중심 초등교육연구, 5*(2), 173-195.

한혜정, 이주연 (2017). 학문중심 교육과정 및 이해중심 교육과정과의 비교를 통한 역량기반 교육과정 이해. *교육과정연구, 35(3)*, 203-221.

홍은숙 (2007). *교육의 개념: 실천전통에의 입문으로서의 교육.* 서울: 교육과학사.

홍혜진. (2020). 과학적 소양을 위한 교육내용 구성의 쟁점에 대한 고찰 : ‘과학지식’ vs. ‘과학을 둘러싼 맥락’을 중심으로. 서울대학교 석사학위 논문.

Bruner, J. (1996). *The Culture of Education.* Cambridge, MA: Harvard University Press

Einstein, A. & Infeld, L. (1938). *The Evolution of Physics: From early concepts to relativity and quanta*. New York: Simon and Schuster.

Galili, I. (2012). Promotion of Cultural Content Knowledge Through the Use of the History and Philosophy of Science. *Science & Education,* 21(9), 1283-1316.

Holton, G. (1967). Project Physics. A report on its aims and current status. *The Physics Teacher, 5*, 198-211.

Holton, G. (2003). The Project Physics Course, Then and Now. *Science & Education, 12(8)*, 779-786.

Kim H., & Lee G. (2018). Reflection and Outlook on Special Relativity Education from the Perspective of Einstein: Focusing on Research Papers Published in Korea. *Journal of the Korean Physical Society. 73(4)*: 422-435

Klassen, S., & Klassen, C. F. (2013). Science teaching with historically based stories: theoretical and practical perspectives. In *International handbook of research in history, philosophy and science teaching* (pp. 1503-1529). Springer.

Maxwell J. C. (1873), *A Treatise on Electricity and Magnetism. Vol.Ⅱ*, London: Clarendon Press. Oxford.

McTighe, J., & Seif, E. (2003). A summary of underlying theory and research base for understanding by design. *Unpublished manuscript.*

McTighe, J., & Wiggins, G. (1999). *The Understanding by Design Handbook.* Association for Supervision & Curriculum.

Rutherford, F. J., Holton, G., & Watson, F. G. (1981). *Project Physics*. Harcourt School.

Schaffner, K. F. (1967). Approaches to reduction. *Philosophy of science, 34(2)*, 137-147.

Tseitlin, M., & Galili, I. (2005). Physics teaching in the search for its self: From physics as a discipline to physics as a discipline-culture.*Science & Education*, *14*, 235-261.

White, M. D., & Marsh, E. E. (2006). Content analysis: A flexible methodology. *Library trends, 55(1)*, 22-45.

Wiggins, G., & McTighe, J. (2005). *Understanding by design*. Alexandria: Association for Supervision and Curriculum Development.

Abstract

A Basic Study on the Establishment of the Electromagnetic Waves Content System in High School

: Focusing on 『The Evolution of Physics (1938)』 and 『Harvard Project Physics (1970)』

Kangrae Kim

Physics Education Major

Department of Science Education

The Graduate School

Seoul National University

This study addresses several concerns regarding the content structure of physics education. Previous research indicates that Korean science education lacks fundamental reflection on subject content (Lee et al., 2010), and physics teachers continue to struggle

with rote learning due to insufficient concept hierarchy (Kang et al., 2015). Additionally, the lack of connectivity between content systems creates difficulties in textbook writing (Lee et al., 2019), and in electromagnetic wave units, content is often presented fragmentarily, making it difficult to establish organic connections between concepts (Lee, 2020; Kam, 2024).

A potential solution to these structural issues can be found in the 2022 Revised National Curriculum. This curriculum emphasizes organizing physics content according to storylines (flow) and encourages students to reach core ideas that reveal the essence and framework (structure) of physics through the complementary development of three dimensions: knowledge/understanding, process/skills, and values/attitudes. While this direction shows promise in addressing current issues, the curriculum documents lack specific details about the flow and structure of physics. Recent studies (Shim et al., 2023, 2024; Lee et al., 2024) suggest that such flow and structure can be found within science's practice traditions.

Science's practice tradition refers to science as human activity viewed from an 'essential-holistic' perspective. It encompasses scientific viewpoints on nature along with related core ideas, thinking methods, attitudes (values), and the organic, holistic relationships between these elements. Therefore, exploring science's practice tradition can lead to understanding the flow and structure of physics as presented in the 2022 Revised Curriculum.

This study investigated science's practice tradition as one approach to concretizing the flow and structure of physics content. Specifically, we analyzed "The Evolution of Physics" (1938, EoP) and "Harvard Project Physics" (1970, HPP), both expected to embody science's practice tradition. We systematically analyzed the flow and

structure of electromagnetic wave concepts in these texts to provide foundational material for establishing high school physics content systems. Additionally, considering that students can develop genuine understanding through science's practice tradition (Lee, Shim & Lee, 2024), we analyzed the understanding readers would achieve through these scientific classics.

The results show distinct characteristics in both texts. EoP's content flow emphasizes paradigm shifts, highlighting the limitations of existing perspectives and the success of new ones, presenting historical flow in logical reconstruction. HPP focuses on narrative flow centered on historical events, emphasizing contemporary scientists' thoughts and ideas, featuring a natural storyline from theoretical predictions to experimental proof and practical applications. Regarding content structure, EoP demonstrates a systematic structure centered on contrasting viewpoints, while HPP shows a less distinct contrast between perspectives with somewhat weaker logical connections between elements.

Understanding achieved through EoP encompasses five aspects of understanding (excluding 'application'), particularly emphasizing 'perspective' and 'self-knowledge.' HPP enables readers to reach all six aspects of understanding, with particular emphasis on 'explanation,' though somewhat lacking in meta-level 'self-knowledge.'

These findings suggest that both texts reflect science's practice tradition and support students' development of 'genuine understanding,' albeit with distinct characteristics. These results can contribute to establishing new electromagnetic wave content systems in high school physics by combining EoP's macroscopic structure with HPP's detailed content elements. This open approach can

incorporate elements from both new scientific classics and contemporary texts to address issues in electromagnetic wave content structure.

keywords : Practices in science, Authentic understanding, Electromagnetic waves, Curriculum Content Structure, The Evolution of Physics, Harvard Project Physics

Student Number : 2023-20715