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

# 교육적 고찰을 강조한 사범대학 현대물리 실험 수업의 사례 연구

# A Case Study of a Modern Physics Experiment Course in a Teacher Education Program with an Emphasis on Pedagogy

2025년 2월

서울대학교 대학원

과학교육과 물리전공

홍 성 언

# 교육적 고찰을 강조한 사범대학 현대물리 실험 수업의 사례 연구

A Case Study of a Modern Physics Experiment Course in a Teacher Education Program with an Emphasis on Pedagogy

지도 교수 송 진 웅

이 논문을 교육학석사 학위논문으로 제출함
2024년 12월

서울대학교 대학원
과학교육과(물리전공)
홍 성 언

홍성언의 교육학석사 학위논문을 인준함
2025년 1월

위 원 장 채 승 철 (인)

부위원장 석 효 준 (인)

위 원 송 진 웅 (인)

# 초 록

미래 사회를 살아갈 학생에게 현대 과학기술을 이해하는 소양을 길러 주는 것은 과학교육이 추구해야 할 중요한 목표 중 하나이다. 현대물리는 그 소양의 기반이 되는 핵심적인 과학 영역이기에 학교에서 가르칠 필요가 있다는 주장이 꾸준히 제기되었으며, 최근에는 국내외 교육과정에서도 관련 내용의 도입이 확장되는 추세이다.

현대물리에서의 실험은 이론의 태동 과정에서 새로운 자연 현상을 확인하는 핵심적인 역할을 한다. 따라서 실험 활동을 통한 현대물리 학습은 미시 세계의 성질과 과학의 본성을 이해하는 기회를 제공할 수 있다. 그러나 현대물리 실험은 교사들에게 가르치기 어려운 영역으로 꼽히고 그 교육적 가치들은 학교 현장에서 잘 구현되지 않는다. 이 문제를 해결하기 위해서는 현대물리 영역에서 예비교사 교육의 개선이 필요하다. 그러나 이와 관련된 실증적 연구는 미흡한 실정이다.

이러한 배경에서 본 연구는 과학교사 양성 과정에서 현대물리 실험의 특징과 교육적 가치를 탐색하고자 한다. 이를 위해 예비물리교사들이 현대물리 실험수업에서 나타낸 교육적 고찰을 분석하였다.

연구의 맥락으로 서울 소재 S대학에 전공 강의로 개설된 현대물리 실험 수업을 선정하였다. S대학의 현대물리 실험 수업은 현대물리 분야의 대표적 실험에 해당하는 양자화에 대한 실험 2종(양자 비유 실험, 밀리컨 기름 방울 실험), 자기공명 실험 2종(NMR, ESR), 빛의 성질에 대한 실험 2종(광전효과 실험, 태양전지 실험), 확률 분포에 대한 실험(맥스웰-볼츠만 분포 실험) 1종 등 총 7종의 실험 활동으로 구성된다.

연구자는 예비교사가 자기의 학습활동을 반성하고 미래의 교수실행을 고민하는 반성적 실행가(reflective implementor)가 될 수 있을 것으로 보고, 현대물리 실험에 대한 교육적 고찰(pedagogical consideration, PC)을 강조하는 수업 방식을 설계 및 적용하였다. 기존 실험 보고서의 I(introduction)-M(method)-R(result)-D(discussion)구조에 교육적 고찰(PC) 항목을 새로이 추가하여 현대물리 실험 활동을 교육 전공자의 관점으로 성찰하여 기록할 수 있도록 하였다. 예비교사의 교육적 고찰에는 물리 전공자의 관점에서 실험의 특징을 파악(identify)하는 과정과 자신의 실험학습 과정을 교육 전공자의 관점에서 반성(reflect)하는 두 가지 과정이 포함되었으며, 연구자는 이 과정을

통해 일어나는 예비교사의 학습에 주목하였다.

수업을 수강한 예비 물리교사 15명 중 연구 참여에 동의한 11명의 교육적 고찰이 담긴 실험 보고서를 7주간에 걸쳐 수집하였다. 또한 이들 중 7명을 대상으로 면담을 진행하여 그 녹음 자료를 전사하였다. 수집된 자료들을 바탕으로 질적 사례연구 방법론에 따라 연구 자료를 코딩 및 범주화하였으며, 이후 '의미도 그리기' 방법을 통해 개별 예비교사가 수행한 교육적 고찰의 맥락을 이해하고 특징을 분석하였다.

연구 결과, 현대물리 실험에서 교육적 고찰은 기존 수업에서 이루어지지 않았던 교육적 관점을 활용한 실험 경험에 관한 반성적 사고를 일으켰다. 이는 예비교사가 현대물리 실험의 특징에 대해 더 깊게 파악하고, 그에 대한 교육적 반성을 할 수 있도록 도왔다. 예컨대, 자기 공명 실험에서 예비교사는 그 실험의 특징으로 (1) 이론의 높은 난이도, (2) 실험자의 개입이 불가능한 실험 설계, (3) 첨단 기기의 활용을 파악하고, 그에 대한 교육적 반성으로 (1) 배경 지식의 중요성, (2) 실험자가 개입할 수 있는 실험 설계의 필요성, (3) 기기의 세부 원리 학습의 필요성을 인식하였다.

예비교사들의 현대물리 실험 교육에서 교육적 고찰의 결과는 네 가지 측면으로 종합할 수 있다. 첫째, 예비교사들은 현대물리 실험 교육에서 '시각화의 중요성'을 발견하였다. 모델링, 비유 사용을 통한 시각화는 비가시적인 현대물리의 교수학습에 유용한 전략이 될 수 있음을 이해하였다. 둘째, 현대물리 실험 교육에서 '관찰과 측정을 통한 체감의 중요성'을 발견하였다. 예비 교사들은 실험의 간접 관찰의 한계를 느끼고, 직접 관찰이 학습자가 '체감'할 수 있는 더 흥미롭고 효과적인 방식이라 인식하였다. 셋째, 현대물리 실험 교육에서 '실험 기기의 양면성'을 발견하였다. 첨단 실험 기기를 경험하는 것은 물리학의 공학적 응용에 대한 이해를 높일 수 있다고 보았다. 반면, 기술적으로 복잡하고 닫힌 블랙박스 형태의 기기 특성은 내부의 작동원리를 이해하기 어렵게 만든다고 인식하였다. 넷째, 현대물리 실험 교육에서 '실험과 이론 학습 간 괴리'를 확인하였다. 그리하여 이론 학습과 실험 학습이 유기적으로 이루어지는 것이 중요하다고 인식하였다.

요약하면, 본 연구 사례인 교육적 고찰을 강조한 사범대학 현대물리 실험 수업은 현대물리 영역의 학습에서 긍정적으로 작용하였다. 예비 물리교사가 현대물리 실험의 특징을 더 깊이 이해할 수 있도록 하였으며, 현대물리 실험을 교육적으로 활용할 때의 장단점과 의의를 파악할 수 있도록 하였다. 본 연구는 기존의 사범대학 현대물리 실험 수업에서

부족하였던 교육적 고찰을 강조한 사례로서, 예비교사들이 이해한 현대물리 실험 교육의 특성과 교육적 가치를 탐색하는 데에 의의가 있다.

**주요어 :** 현대물리, 예비 물리교사, 실험 교육, 교사교육

**학 번 :** 2023-27260

# 목 차


초 록 ..... I

1. 서론 ..... 1

1.1. 연구의 배경 및 목적 ..... 1
1.2. 연구 문제 ..... 5
1.3. 연구의 제한점 ..... 6
1.4. 용어의 정의 ..... 7

2. 선행연구 고찰 ..... 10

2.1. 현대물리 교육 ..... 10
2.1.1. 현대물리의 특징 ..... 10
2.1.2. 현대물리의 교수 학습 ..... 12
2.2. 과학교육에서 실험 ..... 17
2.2.1. 과학교육에서의 실험의 중요성 ..... 17
2.2.2. 과학교육에서 현대물리 실험의 중요성 ..... 24
2.3. 예비교사교육 ..... 26
2.3.1. 과학교사와 실험교육 ..... 26
2.3.2. 예비교사교육에서 실험 수업 ..... 28
2.3.3. 반성적 실행가로서 예비교사 ..... 30

3. 연구 맥락과 방법 ..... 33

3.1. 교육적 고찰을 강조한 현대물리실험 수업 ..... 33
3.1.1. 과학교사 양성 과정에서의 현대물리실험 ..... 33
3.1.2. 교육적 고찰을 강조한 현대물리실험 수업의 설계 ..... 36
3.1.3. 교육적 고찰을 강조한 현대물리실험 수업의 적용 ..... 38
3.2. 연구 방법 ..... 57
3.2.1. 사례연구 방법론 ..... 57
3.2.2. 연구 참여자 ..... 58
3.2.3. 연구자료 수집 ..... 60
3.2.4. 연구자료 분석 ..... 61

**4. 연구 결과** ..... 65

4.1. 양자 비유 실험 ..... 66
4.1.1. 비유의 활용 ..... 66
4.1.2. 이론의 시각화 ..... 68
4.2. 밀리컨 기름 방울 실험 ..... 71
4.2.1. 직접 관측 ..... 71
4.2.2. 과학사적 중요성 ..... 72
4.2.3. 기본 물리량의 확인 ..... 73
4.2.4. 실험 설계의 창의성 ..... 74
4.3. 자기 공명 실험: ESR, NMR ..... 76
4.3.1. 이론의 높은 난이도 ..... 76
4.3.2. 실험자의 개입이 불가능한 실험 설계 ..... 79
4.3.3. 첨단 기기의 활용 ..... 80
4.4. 빛의 성질 실험: 광전효과, 태양 전지 ..... 82
4.4.1. 형식화된 이론과 실재의 연결 ..... 82
4.4.2. 공학적 기기의 활용 ..... 85
4.5. 확률 분포 실험: 맥스웰-볼츠만 분포 실험 ..... 86
4.5.1. 미시현상의 거시적 모델링 ..... 86
4.5.2. 실험 설계의 창의성 ..... 88

**5. 결론: 예비교사들의 현대물리 실험 교육에서 교육적 고찰** ..... 91

5.1. 시각화의 중요성 ..... 91
5.2. 관찰과 측정을 통한 체감의 중요성 ..... 92
5.3. 실험 기기의 양면성 ..... 95
5.4. 실험과 이론 학습 간 괴리 ..... 96

**6. 논의 및 시사점** ..... 98

**참고 문헌** ..... 102

**부록** ..... 117

ABSTRACT ..... 119

# 표 목차

[표 2-1] 중등학교와 대학 실험학습의 목적(조현준 등, 2006) ..... 22
[표 2-2] 대학 물리실험의 학습 결과(Kozminski et al., 2014) ..... 23
[표 2-3] 현대물리 실험 활동의 기대 효과 및 목적..... 26
[표 3-1] 교사자격 취득을 위한 기본이수과목으로서 현대물리학과 물리교육실험(교육부, 2023) ..... 34
[표 3-2] <물리교육실험>에서 진행된 7종의 현대물리 실험 ..... 39
[표 3-3] 양자 비유 실험의 단계 및 내용..... 43
[표 3-4] 밀리컨 기름 방울 실험의 단계 및 내용..... 47
[표 3-5] 자기 공명 실험의 실험 단계 및 내용 ..... 50
[표 3-6] 빛의 성질 실험의 단계 및 내용..... 53
[표 3-7] 맥스웰-볼츠만 분포 실험의 단계 및 내용 ..... 56
[표 3-8] 연구 대상자 중 면담 참여자의 특징 및 배경 ..... 59
[표 4-1] 예비교사의 현대물리 실험수업에 대한 교육적 고찰 ..... 89

# 그림 목차

[그림 1-1] 조사의 하위 3단계 속 실험(Pedaste et al., 2015, p.56) . 8
[그림 1-2] 교육적 고찰을 구성하는 두 단계의 인지과정 ..... 9
[그림 3-1] 교육적 고찰을 강조한 실험 수업의 진행과정 ..... 39
[그림 3-2] Teachspin사 매뉴얼에 제시된 양자비유실험 컨트롤러 ... 42
[그림 3-3] 선형 배열 거치대에 설치된 튜브와 조리개 ..... 43
[그림 3-4] 밀리컨 실험에서 기름방울의 자유물체도..... 44
[그림 3-5] 밀리컨 기름 방울 실험 셋업 ..... 45
[그림 3-6] PASCO 매뉴얼에 제시된 밀리컨 기름방울 실험 장치..... 46
[그림 3-7] ESR실험의 공명지점에서 나타나는 전기 신호..... 48
[그림 3-8] Leybold 매뉴얼에 제시된 ESR 실험 셋업 ..... 49
[그림 3-9] 태양전지의 특성 곡선..... 52
[그림 3-10] PASCO 매뉴얼에 제시된 광전효과 실험 셋업 ..... 52
[그림 3-11] PHYWE 매뉴얼에 제시된 태양전지 실험 셋업 ..... 53
[그림 3-12] PHYWE 매뉴얼에 제시된 볼츠만 분포 실험 셋업 ..... 55
[그림 3-13] 연구 과정의 개요 ..... 63

# 1. 서론

## 1.1. 연구의 배경 및 목적

과학 기술과 사회의 급격한 발전에 따라, 물리교육은 새로운 비전을 제시함과 함께 다음의 물음에 답해야 한다: "어떠한 내용과 형태의 물리학 교육이 앞으로의 사회를 살아갈 학생들에 필요한가?". 현재 수립된 중·고등학교의 물리 영역 교육과정은 크게 역학, 전자기학, 열역학, 광학, 현대물리의 영역으로 구분할 수 있다. 이 중 대부분 학습 시간은 현대물리 이전의 고전적 관점에서의 물리학 체계를 학습하기 위해 할당되며, 가장 마지막으로 접하는 영역으로서 현대물리를 학습하게 된다. 현대물리 영역은 과거의 고전적 관점에서의 물리학을 대체하는 패러다임의 전환이며, 과학기술에 큰 영향을 미친 핵심 과학 영역으로 꼽힌다.

이러한 중요성에 따라 최근 수십 년간 많은 나라의 과학 교육과정에서는 현대물리 영역의 도입을 확장하는 움직임을 보이고 있다. 15개국의 현대물리 영역 교육과정 문서를 조사한 Stadermann (2019)은 공통적으로는 현대물리 영역이 확대되는 추세에 있으나, 그 구성에 있어서는 서로 다른 차이들이 나타남을 보고하였다. 현대물리의 학문적 중요성을 강조한다면 중등 교육과정에 현대물리 개념이 충분히 반영되지 않았다며 비판하고, 더 적극적인 도입을 요구할 것이다. 이는 고전 물리학 중심의 교육이 학생들에게 물리학이 시대에 뒤떨어지고 따분한 학문으로 인식되게 한다는 주장과 연관되며, 고전적 이해에 고착하게 만들어 자연의 성질에 대해 올바르게 이해할 수 없게 한다고 본다(Petri & Niedderer, 1998). 반대로 현대물리의 도입이 고전 물리학의 논리적 완결성을 저해할 수 있다는 입장도 있으며, 이들은 고전 물리학의 완결된 체계를 가르침으로서 물리학 체계에 대한 이해를 높여야 한다고 본다. 각 국가 및 상황마다 현대물리를 교육과정에 포함하는 이유는 다양할 것이다. 예컨대, 우리나라의 경우에는 현대물리 영역에 있어 공학적 응용에 관한 이해를 중심으로 교육과정을 서술한 바 있고(교육과학기술부, 2011), 독일의 경우에는 양자와 관련된 철학적

이해를 더욱 교육과정에 강조하기도 하였다(Ministry of Culture, 2016). 이러한 각국의 사례는 현대물리가 단순히 학문적 중요성을 넘어 사회적, 문화적 맥락에서도 교육적 가치를 지닌다는 점을 보여준다.

많은 연구에서도 현대물리 영역이 과학교육에서 제공할 수 있는 여러 가지 의미와 목적들을 보고하고 있다. Park et al. (2019)는 과학의 본성(NOS)의 관점에서 현대 물리 영역은 학습자의 삶과의 관련성을 강조할 수 있는 적절한 맥락이 될 수 있으며, 과학의 인식론적, 사회적 메커니즘을 가르치는 데 효과적일 수 있음을 이야기했다. 더 나아가 박종원 등(2022)은 초등학교 교육에서도 현대물리 영역을 도입 및 활용할 수 있음을 논하며 그 잠재력과 필요성을 학생 삶과의 연계성, 흥미와 호기심의 유발, 새로운 자연관의 형성의 세 가지 차원에서 제시한 바 있다.

이러한 다양한 목적과 의미들을 종합하면 단순히 학문적 중요성 때문에 현대물리가 중등 교육과정에 포함된 것이 아님은 분명하다. 현대물리의 교육적 필요성은 강조될 수 있다. PISA 2025 Science Framework에서는 '현대의 진보와 도전을 포함한 최신 과학 · 기술의 영역'을 과학교육의 주요 맥락 중 하나로 제시하며, 이러한 영역의 교육이 학생들의 과학적 소양을 함양하는 데 필수적이라고 평가하고 있다(OECD, 2023). 이는 각국 교육과정에 현대물리를 포함시키는 움직임이 강화되어야 함을 시사한다.

이 연구의 맥락이 되는 우리나라의 과학과 교육과정에서도 그러한 움직임이 확인된다. 2009 개정 교육과정에서는 21세기 글로벌 시민으로서 학생들이 필요한 과학적 소양을 갖추기 위한 영역으로 현대물리를 적극 도입하였으며(교육과학기술부, 2011), 최근에는 2022 개정 교육과정에서는 현대물리 관련 교과인 '전자기와 양자'를 신설하여 확률 파동, 중첩 원리, 터널 효과 등의 내용을 확대하는 변화를 통해 현대물리 개념, 특히 양자역학 영역을 보다 적극적으로 강조하였다(교육부, 2022).

그러나 실제 교수 학습 환경에서 현대물리는 여전히 가르치기 어려운 영역으로 손꼽힌다. 현대물리 영역에서 얻을 수 있는 여러 가지 장점들이 보고됨에도 불구하고, 이들이 학교에서 구현될 수 있는 기회는 제한적이다. 비직관적이고 형식적이라는 현대물리의 본질적 특성은

학생들에게 현대물리 이론의 이해를 어렵게 하며, 고전적 세계관의 관점과는 다른 비결정론적, 확률론적인 관점은 쉽게 받아들여지기 어렵다. 그러나 현대물리 교실에서는 이를 해결하기 어려운 이론 중심적 교수학습이 주로 이루어지며, 이는 현대물리 이론과 관점을 학생들이 효과적으로 학습하는 최적의 방식일 수 없다.

특히 현대물리의 교수 학습 방법에 있어서 직접 실험은 잘 활용되지 않는다. 고등학교 현대물리 단원에서 실험은 광전효과 정도의 일부 실험만이 직접 실험으로 제시되며, 우리나라 2022 개정 교육과정의 경우 '전자기와 양자' 단원의 성취기준 적용 시 고려사항에서 양자현상에 대한 직접 관찰과 실험 대신 컴퓨터 모의실험을 활용하여 지도할 것을 제시하였다(교육부, 2022). 이를 지도하는 교사들 또한 현대물리 영역 실험 기구들이 학교 환경상 준비 및 활용하기 어려웠다는 점을 언급하였으며(이세연 & 이봉우, 2018), 이는 현대물리 영역의 탐구와 실험을 지도하는 것이 어려운 일임을 지적한다.

이러한 이유로 교사의 현대물리 수업에서 실험의 활용은 아직까지 많이 탐색되지 않았다. 현대물리 영역 자체에 있어서도 그 개념적 이해를 조사하는 연구들은 여럿 이루어졌으나 (Fletcher & Johnston, 1999; Wuttiprom et al., 2009), 그 실험 활동에 대한 연구는 상대적으로 부족하다. 현대물리 영역에서 실험의 역할을 재확인하고 중등학교 및 교사교육을 포함한 앞으로의 현대물리 교육이 어떻게 이루어져야 하는지에 관한 논의가 필요한 시점이다. 현대물리가 교육과정에 확대 도입되는 흐름과 현대물리에서 실험 활용이 여전히 부족한 실태이며, 과학교육에서 탐구 실험의 중요성을 고려하면 현대물리 실험을 활용한 물리학 교육이라는 주제에 대한 연구는 그 필요성이 명확하다 할 수 있다.

본 연구는 현대물리 실험 교육이 수행할 수 있는 역할과 그 잠재적 가능성을 탐색하는 데에 목적을 준다. 현대물리 실험의 과학교사 양성 과정에서 교육적 고찰이 강조된 현대물리실험 학습 경험을 제공하고 이를 바탕으로 그들이 이해한 현대물리 실험의 특징과 교육적 의의를 조사하였다. 이는 현대물리 실험 교육에 있어 향후 중등학교에서 현대물리가 효과적으로 교육되기 위한 예비교사교육 차원에서의 시사점을 제공할 수 있을 것이다. 특히 현대물리 실험이 예비교사에게

단순히 이론의 보조 수단으로 기능하는 것을 넘어, 물리 교육자로서의 의미를 형성해 나가는 전문적, 실천적 역할의 가능성과 한계에 대한 구체적인 이해를 도모할 수 있을 것으로 기대하였다.

더 나아가 중등학교에서의 현대물리 실험 교육에 대한 논의를 제공할 수 있다. 대학에서 학습하는 현대물리 실험을 중등학교 과학 교육과정에 적용하려는 예비교사의 사고 과정을 조사한 본 연구의 결과는 직접적으로 교육과정에서의 대한 시사점을 제공하기에는 제한적일 수 있다. 그러나 이러한 학습 과정을 조사함으로써, 현대물리 영역이 실험과 결합되었을 때 어떠한 한계가 드러나고 어떠한 잠재력이 있는지 등 현대물리실험 교육 자체의 특성을 확인할 수 있다. 이러한 과정이 예비교사라는 학습자에게 물리적 사고를 확장하고 과학의 본성을 이해할 수 있는 등 교수학습에서의 역할을 확인하는 것은 현대물리 실험 교육의 학습자들에게 효과적으로 적용되어 나가는 데 시사하는 바가 있을 것이다.

예비교사의 현대물리 실험 경험에 대한 본 사례연구는 현대물리 실험 교육의 적극적인 활용의 시작점이 될 수 있다. 본 연구를 통해 현대물리 실험 교육에서 보고되지 않았던 특징들을 발견하고 이해하고자 한다. 첨단화, 고도화되어 나가는 미래 사회에서 현대물리 교육이 더 다양한 교육 목적을 달성하기 위해서는, 하나의 접근으로서 첨단 기술을 활용한 현대물리 영역의 실험들이 중등학교 교육 현장에 적용되는 것을 상상해 볼 수 있을 것이다. 이러한 미래에 대비하는 현재의 연구자로서 현대물리 교육의 실험을 통한 접근이 어떠한 장단점이 있는지 확인하는 것은 물리교육의 미래에 시사하는 바가 작을 수 없다.

## 1.2. 연구 문제

본 연구에서는 예비교사가 현대물리학 실험 수업을 통해 실험 활동을 경험하며 학습하고 성장할 수 있는 기회를 마련하고 조사하고자 하였다. '교육적 고찰을 강조한 실험수업'을 통해 현대물리 실험을 깊게 경험한 예비교사가 현대물리 실험교육에 대한 전반적인 이해를 형성하고 학습하는 과정과 결과를 탐색한다. 이를 통해 현대물리 실험교육, 특히 과학교사 양성 과정에서 현대물리 실험이 가지는 가능성 및 개선점을 모색하는 데 기여하고자 한다.

본 연구에서 초점이 된 연구 질문은 다음과 같다.

사범대학의 현대물리 실험 수업에서 예비 물리 교사의 교육적 고찰은 어떠한가?

## 1.3. 연구의 제한점

이 연구에는 네 가지의 제한점이 존재한다. 첫째, 본 연구는 서울 소재의 특정 사범대학에 재학 중인 예비 물리교사들을 대상으로 진행되었기에, 연구 결과를 전체 예비 과학교사 집단으로 일반화하는 데에는 한계가 존재한다. 특히 본 연구의 사례가 되는 수업 수강생 수가 상대적으로 적었을 뿐 아니라 참여자 모집 과정에서 자발적 참여를 우선하였기에, 연구 대상자의 실제 참여 숫자가 충분히 확보되지 못하였다. 보다 다양한 배경 및 환경에 속한 예비 과학교사들을 대상으로 한 후속 연구의 진행을 통해, 본 연구 결과의 외적 타당성을 제고할 필요가 있다.

둘째, 본 연구는 한 사범대학에서 2023년 선정되었던 7종의 현대물리 실험에 초점을 맞추고 있어 그 범위가 제한적이다. 수업에서 다루는 실험의 종류는 각 사범대학의 상황에 따라 다를 수 있으며, 이에 따라 본 연구의 범위 또한 특정 사범대학과 실험의 맥락을 대상으로 한다는 현실적인 한계가 존재한다.

셋째, 본 연구는 과학교사 양성 과정 프로그램이라는 제한된 범위 내에서 예비교사들의 실험수업 수강 경험을 분석하였으며, 이러한 경험이 실제 교직에 진출한 이후 실험 수업을 진행해 나가는 방식과 다를 수 있다는 한계가 존재한다. 따라서 후속 연구로서 현대물리 실험수업 지도 경험이 있는 교사를 대상으로 그들의 인식을 확인하고 교사교육 및 교수 실천 과정을 조사하는 추가 연구를 수행할 필요가 있다.

넷째, 데이터 수집 과정 및 분석에서의 엄밀함이다. 질적 자료의 분석 과정에서의 내적 신뢰도가 더욱 보완될 필요가 있다. 전체 데이터 중 핵심 데이터 및 코딩의 일부만이 과학교육 분야의 동료 연구자들에 의해 검토되어, 전체 질적 자료의 분석에 있어 내적 신뢰도가 검증되지 않았을 수 있다. 추후 본 연구 결과가 발전 및 활용되는 과정에서 이러한 검증 과정을 더 폭넓게 진행함으로써 제한점을 해결할 필요가 있다.

## 1.4. 용어의 정의

본 연구에서 사용되는 용어의 의미와 조작적 정의는 다음과 같다.

### 1) 현대물리(modern physics)

고전 과학(classical science), 근대 과학(modern science), 현대 과학(contemporary science) 등의 명칭은 '어떤 시기에 태동하였고 주류적이었던 과학인가?' 라는 시기적 기준에 따라 구분되는 용어다. 따라서 상대적으로 어떤 시기들을 기준으로 잡는가에 따라, 같은 용어여도 서로 다른 의미로 쓰이기도 한다(Koyré, 1953). 최근의 용어 사용을 살피면, 일반적으로 현대 과학이라는 용어는 '현재 생산되는' 지식, 즉 실제 과학 연구와 실험실에서 과학자들에게 활용되고 만들어지는 과학을 의미한다.

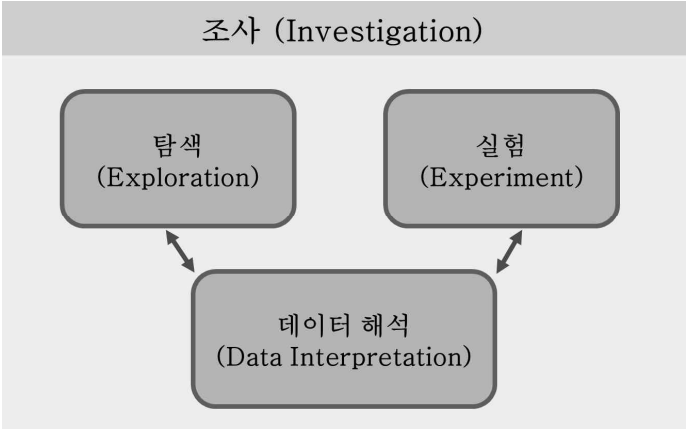
한편 물리학 분야에서 '현대물리학(modern physics)' 이라는 용어는 이러한 시대 구분과는 다른 의미를 가진다. 현대물리는 19세기 말부터 시작된 물리학의 패러다임 전환 이후 전개된 활동과 그 기반이 된 이론 체계를 의미하기 때문에(Beiser, 2002), 현대 과학과 동일한 시기를 가리키지 않아 의미상의 혼란을 낳기도 한다. 본 연구에서 의미하는 현대물리(modern physics)는 물리학 분야에서 통상적으로 갖는 의미와 같이 '20세기 이후 태동하여 상대성 이론, 양자역학 등을 중심으로 발전한 물리학의 하위 영역'으로 정의하고자 한다.

### 2) 실험(experiment)

과학에는 자연을 관찰하고 이에 대한 지식을 생성하는 다양한 종류의 방법이 있으며, 이를 설명하는 용어와 체계 또한 다양하다. 예컨대 과학교육 분야의 논문과 교육과정 문서에서는 이러한 활동들을 모두 포함하는 활동으로서 '탐구'를 정의한다. 과학 탐구의 의미는 Pedaste et al.(2015)의 연구에서 정리된 바 있다. 이 연구에서 과학 탐구는 지향(orientation)－개념화(conceptualization) – 조사(investigation) – 결론(conclusion) – 논의(discussion)의 다섯 단계의 대범주와, 그 하위 범주를 구성하는 단계로 구분할 수 있음을 설명하였다.

그의 탐구 과정 정의에서 실험(experiment)은 조사(investigation)의

하위 범주에 있는 좁은 범위로서, '변인 조작을 통해 가설을 확인하고 결과를 도출하는 행위'로 정의된다([그림 1-1] 참조). 이에 따라 최근의 문헌에서는 탐구와 실험을 구분하여 탐구를 더 총체적인 과정으로 정의하고, 그 하위에 있는 다양한 활동들 중 하나로서 실험을 구분하기도 한다(Yu et al., 2021).



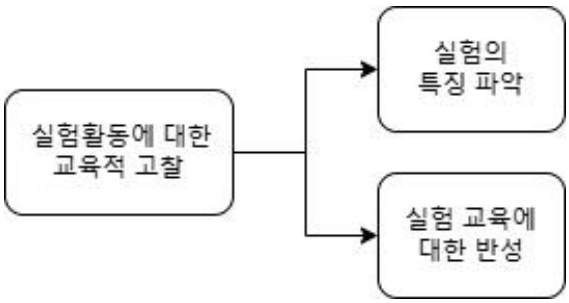

[그림 1-1] 조사의 하위 3단계 속 실험(Pedaste et al., 2015, p.56)

한편 학교 과학교육과정 문서 및 교과서에서 '실험(experiment)'은 '탐색(exploration)'과 '데이터 해석'을 포함하는 의미로서 과학을 실천하는 활동 과정들을 총체적으로 포함하는 넓은 의미로 활용한다. 대학 전공수업에서도 마찬가지로 '실험 수업'이라 함은 '이론 수업'과 대비되는 의미로서, 실험실에서 이루어지는 일련의 과학 탐구 활동을 총체적으로 일컫는 용어로 활용된다.

이러한 용어 사용의 혼재가 있으나, 본 연구에서는 교육 현장에서 통용되는 넓은 의미에서 이론 수업과 대비되는 과학적 탐구 활동을 의미하는 '실험(experiment)'이라는 용어를 사용하였다. 따라서, 본 연구에서는 실험을 '연구 질문이나 가설을 해결하기 위해 문제를 탐색하고, 데이터를 수집하고, 데이터를 해석 및 논의하는 활동'으로 정의한다.

### 3) 교육적 고찰(pedagogical consideration)

본 연구에서는 현대물리 실험 수업에서 예비 물리교사들이 실험을 수행하고 그 경험을 교육적으로 되돌아보는 과정이 진행되었다. 이러한 반성적인 사고 과정을 '교육적 고찰'이라 지칭한다. 예비 물리교사들은 현대물리 실험 전공 수업 중에 실시되는 실험을 수행하면서, 물리 전공생의 관점에서 물리적 특성을 파악(identify)하고, 교육 전공생의 관점에서의 자기 반성(reflect)을 통해 '교육적 고찰'을 작성하였다. 단, 예비교사들은 단순히 자기 자신의 행위와 사고 과정만을 되돌아본 것이 아니라 이 실험 자체의 특성도 함께 탐구하고 고민하였기에, 기존의 교수학습에서의 '교육적 반성'을 포함하는 더 넓은 의미로서 '교육적 고찰'이라는 용어를 사용하였다. 따라서, 실험 수업에 대한 교육적 고찰에는 (1) 실험 자체의 특성에 대한 파악, (2) 자신의 실험활동 및 학습에 대한 반성이라는 두 가지 측면의 메타인지적 과정이 모두 포함된다고 볼 수 있다.




[그림 1-2] 교육적 고찰을 구성하는 두 단계의 인지과정

결론적으로 '교육적 고찰을 강조한 현대물리 실험 수업'이라 함은 현대물리 실험의 학습 과정에서 예비 물리교사들이 현대물리와 실험 교육에 대한 자신의 견해를 검토할 수 있도록 구조화된 학습활동의 기회를 제공한 수업을 의미한다.

# 2. 선행연구 고찰

본 연구는 현대물리 교육과 과학교육에서 실험 학습에 대한 선행 연구들을 바탕으로 설계 및 분석되었다. 과학교육과 과학철학 분야에서 실험은 20세기부터 핵심적인 연구 주제로 다루어져 왔으며, 현대물리 교육은 물리교육의 세부 분야에서 최근 들어 더욱 주목받고 논의되고 있는 영역이다. 본 연구의 맥락이 되는 현대물리 실험 교육이라는 구체적인 대상을 논하기 위해서는, 두 가지 영역 모두에 대한 선행연구 고찰이 필요하다.

따라서 이 장에서는 과학교육 분야에서 다루어졌던 실험 교육과 현대물리 교육이라는 두 가지 영역에서의 문헌들을 살펴봄으로써 기존 연구들의 흐름을 파악하고, 기존의 논의와 본 연구 사례를 연결하는 기초로 삼고자 한다. 추가적으로, 이를 예비교사교육의 맥락에서 다루고 있기에 본 연구 설계의 논리와 의의를 설명하기 위한 예비교사교육 차원의 논의를 제시한다.

## 2.1. 현대물리 교육

### 2.1.1. 현대물리의 특징

기존 고전적 체계에 반하는 철학적 관점에서 자연 현상을 설명하는 현대물리는 고전역학의 한계를 극복하며 양자역학과 상대성 이론을 비롯한 주요 이론들을 정립하여, 첨단 과학기술 발전의 이론적 기반이 된 물리학의 핵심 영역이다. 현대물리의 발전 속에는 현대 과학 지식의 중요한 발전사가 담아내며, 최첨단 기술과 연구의 토대가 되기에 물리학에서 중요한 위상을 차지한다.

이러한 중요성에 따라 현대물리는 오래 전부터 대학 물리학 및 공학 교육에서 중요한 위치에 있어 왔다. 여기에 최근 수십 년 동안은 중등 교육에도 확대되어, 현대물리를 가르쳐야 한다는 공감대가 물리교육계 전반에 형성되었다. 15개국의 교육과정을 분석한 Stadermann et

al.(2019)의 연구에서는 양자역학과 상대성 이론과 같은 현대물리의 주요 내용들이 중등 교육과정에 도입 및 확대되었음을 보고하기도 하였다. 우리나라의 경우 2023년 6월 '대한민국 양자과학기술 전략'을 발표하여 양자과학기술 분야 종사인력을 1만 명 이상 양성한다는 목표를 세운 바 있으며(과학기술정보통신부, 2023), 초중등교육과정의 학생들 대상으로도 양자과학기술 교육을 확대하는 시행령(양자과학기술 및 양자산업 육성에 관한 법률 제19784호)을 발표한 바 있다. 특히 현대물리 영역은 빛의 이중성이나 광전효과와 같은 미시적인 현상, 고전과학에서 다루지 않았던 독특하고 새로운 현상과 그 해석을 다루기 때문에 중등학교 학생들에게 어렵지만, 한편으로는 궁금하고 배우고 싶은 내용으로 꼽힌다.

현대물리의 특징은 다양한 교육 연구 논문들을 통해 정리된 바 있다. 첫째, 현대물리는 다양한 사례를 통해 설명할 수 없다는 이론적 특징을 가진다. 현대물리 개념은 '본질적(identity)' 성격을 지닌 과학 개념이 많다(김완선, 2019). 본질적 개념이란, 대부분의 과학 개념이 하나 이상의 구성 요소와 여러 사례로 이루어지는 것과는 대조적으로, 하나의 구성 요소와 단 하나의 사례로 이루어지는 개념을 의미한다(Markle & Tiemann, 1970; 재인용 김완선, 2019). 예를 들어, 아인슈타인의 상대성이론, 파동-입자 이중성, 드브로이의 물질파 이론, 하이젠베르크의 불확정성 등의 현대물리 개념들은 그 구성 요소 및 사례가 제한적이기에, 본질적 개념으로 볼 수 있다(김완선, 2019). 따라서, 현대물리 개념들은 가르침에 있어서 여러 가지 사례를 들어 설명하는 것이 불가능하고, 이는 기본 개념에 해당하는 현상과 사례를 더 깊게 설명하고 이해하는 것이 현대물리 교육에 있어 매우 중요함을 의미한다.

둘째, 현대물리는 개념 학습 외에도 다른 측면들, 예컨대 실험적 접근과 학문적 연계 등이 함께 중요한 영역이다. Merzel et al. (2024)은 양자물리 교육에서 가르쳐야 하는 개념을 조사한 문헌을 확인하였을 때, 그 응용과 철학적 관점 등을 핵심 개념으로 본 사례가 많았다는 점을 이야기하였다. Winkler et al.(2021)은 양자역학과 관련된 여러 분야의 전문가들이 작성한 양자물리학의 개념 마인드맵을 조사한 결과, 전문가들은 양자역학의 특징으로 철학적, 현상적, 응용적, 다른 분야와의

연결성 등의 것들이 핵심 개념으로 포함된다고 인식하고 있음을 확인하였다. 이러한 연구 결과를 종합하면, 현대물리에서는 이론 학습 이외에도 현대물리적 현상과 응용, 세계관과 철학 등의 학습 중요도가 상대적으로 높다고 볼 수 있다.

현대물리의 국내외 교육과정을 살펴보면 공통적으로는 기초 개념과 이론에 대한 설명들을 다루고 있으나, 구체적으로 반영된 내용(수행 기대, 성취기준 등의 내용 조직)과 및 관점, 교육을 통해 목표하는 바는 서로 상이하다(Stadermann et al., 2019). 독일의 경우에는 양자역학적 관점을 학생들이 이해할 수 있도록 하는 것을 주요 목적으로 제시하는 한편, 우리나라는 첨단 기술의 응용 등 사회 및 공학과의 연계 관점이 더욱 두드러진다. 최근의 우리나라의 양자기술에 대한 관심 등을 고려하면, 산업 기술 관점의 교육과정 방향성이 앞으로도 더욱 강조될 것을 예상해 볼 수 있다.

### 2.1.2. 현대물리의 교수 학습

현대 물리의 독특한 특징은 학습자에게 있어서 배우기 어려운 요인으로 작용하기도 한다. 선행 연구에서 보고된 현대물리 영역에서 학습자가 겪는 학습의 어려움은 크게 세 가지로 구분할 수 있다.

첫째, 미시적, 비가시적, 확률론적 현상에 기인하는 어려움이다. 현대물리는 일상생활에서 경험하기 힘든 현상을 설명한다, 양자역학 등의 영역에서 다루는 미시적인 현상들은 기본적으로 비가시적, 비직관적인 특성을 가진다. 또한, 현대물리의 비결정론적, 확률론적 특징과 비직관적 특성은 학습자가 기존에 형성하고 있는 결정론적, 고전역학적 직관과 충돌하여 현상을 인지 및 해석하는 과정에 어려움을 겪게 한다(Akarsu, 2010; Marshman & Singh, 2017; Corsiglia et al., 2023). 결정론적 세계관에서 비결정론적, 확률론적 세계관으로의 전이는 학습자에게 매우 어려운 것으로 알려져 있다(Bouchée et al., 2023).

둘째, 현대물리는 자연 현상을 수학적으로 기술하고 형식적 체계에 초점을 맞추는 수학적 포멀리즘(mathematical formalism)의 특성이 강하여, 학습자의 수학적 능력이 강하게 요구되는 영역이다(Johansson

et al., 2018). 현대물리 개념을 이해하려면 파동함수, 확률, 양자수, 중력방정식 등의 핵심 개념을 표현하기 위한 행렬 연산, 각종 연산자 등의 수학적 언어를 알아야 한다. 따라서 이를 위해서는 학습자에게는 현대물리의 언어적 개념 이해와 함께 수학적 능력이 요구된다. 추상적인 수학적 모델을 실제 세계의 경험에 대응하는 것 또한 학습자에 걸림돌이 된다(Bouchée et al., 2023). 그러한 어려움에서, 학습자들은 쉽게 학습 동기를 잃을 수 있다(Johansson, 2018).

셋째, 학생들은 기존에 익숙해져 있던 관점과 전혀 다른 존재론적 시각을 수용하고, 이를 이해하는 과정에서 철학적 어려움을 겪을 수 있다. 예컨대 Baily와 Finkelstein(2015)은 양자 현상에 대한 이해의 차이를 양자물리학에 내재된 세계관의 갈등, 즉 존재론적 신념의 차이로 설명한 바 있다. 이는 학습자의 인식론적 신념이 개념 이해의 어려움과 연관된다는 지적과 유사하다.

이러한 어려움들은 현대물리의 특성에 기인하는 것으로 볼 수 있으며, 학습자 개개인이 현대물리를 학습하는 동안 학습자들이 고전적이거나 상식적인 개념을 고수하게 만들어 유의미한 현대물리 교육의 목적을 달성하는 것을 어렵게 한다(Krijtenburg-Lewerissa, 2020). 많은 현대물리 학습 상황에서 이러한 어려움이 드러나는데, 우리나라 대학생의 경우에도 일상에서 경험하는 대부분의 것들이 고전역학과 관련이 깊고, 고전역학을 공부하는 과정에서 형성된 신념들이 현대물리 영역과 반하기 때문에 학습에 어려움을 겪는다는 연구 결과(권재술 & 김중복, 2013)가 보고된 바 있다.

교사에게도 현대물리는 이해하고 가르치는 것이 어려운 영역이다. 현대물리가 교육과정에 빠르고 폭넓게 도입되고 있으나, 많은 교사들은 그에 대한 대비가 부족하며 실천적으로도 현대물리를 가르치는 데 있어 어려움을 겪는다. 중등학교 교사들은 물리학 교육과정의 다른 영역보다 현대물리 영역을 가르치는 데 더 불안감을 느끼고 자신감을 갖지 못한다는 연구 결과(Bungum et al., 2015)도 이를 뒷받침한다. 교사들은 물리학 교육과정의 다른 영역을 가르칠 때보다 현대물리 영역을 가르칠 때 교과서에 더 많이 의존하며, 학생들이 학습에 참여하도록 하는 데 어려움을 겪는다(Bungum et al., 2015). 우리나라의 경우에도 물리 교사들의 양자 물리학에 대한 흥미, 교수 효능감, 교수학습 필요성,

교수학습 중요성에 대한 인식이 다른 물리 영역에 비해 비교적 낮다는 연구 결과가 존재한다(권문호 & 임성민, 2024).

종합하면 현대물리 영역은 학습자가 공부하고 이해하기 어려운 영역이고, 이때 학습자를 적절히 도와줄 수 있는 교사의 역량이 중요하나 이 또한 상대적으로 부족한 실정이라 평가할 수 있다. 지금까지 현대물리의 교육에서 학습자와 교사들이 경험하는 다양한 인지적 · 개념적 어려움에 대해 논의하였다. 그렇다면 이러한 난점들을 극복하고, 학습자에게 의미 있고 효과적인 이해를 제공하기 위해서는 어떤 교수학습 접근이 필요할 것인가?

Krijtenburg-Lewerissa et al. (2019)은 기존 문헌에서 보고되었던 중등학교 및 대학 학부 수준에서의 양자물리 교육의 교수학습 전략과 그 결과를 종합하여 네 가지로 정리하였다. 첫째, 비고전적(현대적) 해석에 초점을 둔 교수학습 전략이다. 양자역학의 비결정성은 코펜하겐 해석을 포함한 여러 해석의 가능성이 있음을 의미한다. 교육과정에 이를 명시적으로 반영하여 해석에 대한 논의를 적극적으로 도입한 수업에서는 학생들의 해석적 관점이 크게 변화하고, 양자역학에 대한 이해가 한층 깊어질 수 있다. 반면, 해석을 전혀 언급하지 않을 경우 학생들은 결정론적 · 국소적 해석에 머무르려는 경향을 보인다. 따라서 다양한 해석과 그 한계를 함께 다루는 것은 학생들에게 보다 합리적이고 풍부한 이해를 제공하는 방법이 될 수 있다.

둘째, 이론의 발전 과정 및 특징을 강조하는 교수학습 전략이다. 학생들은 수 년 간의 기존 과학 수업을 통해 고전적 관점으로 사고해 왔다. 여기에서 관점의 전환을 도모할 목적으로 고전역학과 양자역학의 차이를 강조하는 교수전략, 원자모형의 역사적 발전과정에 초점을 둔 교수법, 그리고 고전적 비유를 활용한 접근이 시도되었다. 이러한 전략들은 학생들이 더 적절한 양자적 관점을 형성하고, 불확정성 원리나 슈뢰딩거 모형 이해와 같은 양자 개념을 수용하는 데 긍정적인 영향을 미쳤다.

셋째, 수학적 접근이 아닌 개념 중심의 교수학습 전략은 학생들의 이해를 효과적으로 지원할 수 있다. 연구에 따르면 수학적 역량 강화가 필수적인 양자 개념 이해로 이어지지 않았고, 절차적 이해도와 개념적 이해도의 뚜렷한 상관관계 또한 확인되지 않았다. 반면 실생활 사례나

시각화를 활용한 비수학적 접근을 적용하자, 중등 및 학부 학생 모두 개념적 이해를 높일 수 있었다. 이는 개념 중심의 비수학적 교수전략이 오히려 더 효과적인 대안임을 시사한다.

마지막으로, 활동을 통한 능동적 학습(active learning)방식은 양자 개념 이해를 높이는 데 효과적일 수 있다. 학생들이 퀴즈 및 시뮬레이션과 같은 상호작용형 방법을 활용하거나, 개념을 글로 풀어내는 과정을 거칠 때 전통적인 수업 방식에 비해 이해도가 향상되는 것으로 나타났다. 또한 동료와 상호작용하거나, 학생–교사 간 대화 영상 등 대화형 콘텐츠를 활용한 경우에도 이해 증진 효과가 확인되었다. 이러한 결과는 활동 중심 교수전략이 양자개념 습득에 긍정적인 영향을 미친다는 점을 시사한다.

지금까지 논의한 교수 학습 접근의 흐름을 정리하면, 기존에는 고전물리와 현대물리 간의 연속성을 강조하는 전통적 교수학습 방법이 주로 사용되었으며, 이는 개념 이해를 중심에 둔 방식이라고 할 수 있다. 초기에는 이 전통적 접근 내에서 개선을 모색하는 시도가 이루어졌다. Kalkanis et al. (2003)는 단순히 고전물리와 현대물리의 공통된 특성을 강조하며 가르칠 경우, 학습자가 현대물리의 독특한 사상적 전환을 충분히 인식하지 못하고 오개념을 형성할 가능성이 있음을 지적하였다. 이에 따라 고전물리학에서 근본적으로 변화된 현대물리 세계관을 명시적으로 제시하고, 상보성 원리와 같은 핵심 개념을 분명히 다루는 교수학습 전략이 제안되었다. 이러한 시도는 유의미하나, 전통적인 개념 이해 기반의 접근으로 여전히 이해할 수 있다. 또한 Siddiqui와 Singh (2017)은 현대물리에 대한 대학 교수들의 교수 태도와 접근 방식은 궁극적으로 학생들이 물리학 연구 분야로 진입할 준비를 갖추는 데 필요한 수학적 형식주의나 이론적 능력을 학습자에게 체계적으로 제공하는 것임을 보고하였다. 이를 통해, 대학에서 현대물리의 교수학습 접근은 주로 개념적인 측면에서 이루어지고 있음을 간접적으로 확인할 수 있다.

그러나 개념 이해를 강조하는 교수학습 접근만으로는 앞서 논했던 학생들의 어려움이 해결되기 충분하지 않을 것이다. Bøe et al. (2018)의 연구에 따르면, 기존에 물리를 학습하며 확립해온 문제 해결 중심의 전략들은 현대물리 학습에서 기대한 만큼의 효과를 발휘하지 못하기

때문에, 학습자들이 자기 효능감을 형성하는 데 어려움을 겪는다는 점이 드러났다. 이는 현대물리에 특화된 교육적 접근, 즉 단순한 개념 전달 이상의 교수전략이 필요함을 보여준다.

그러한 시도의 일환으로 시뮬레이션 등의 디지털 자료를 사용하거나 현대물리의 역사와 철학에 대해 토론하는 등 다양한 교수 전략들이 시도되었다. Bouchée et al. (2023)은 비디오 및 컴퓨터 시뮬레이션과 같은 디지털 자료를 통한 현대물리의 교수학습을 수행하여 학생들의 참여를 유도하고 개념 발달에 도움이 되었음을 확인한 바 있다.

이러한 시도에서 확인할 수 있는 특징은, '활동 중심' 이라고 불리는 활동들이 대부분 직접 실험을 통한 물리적 실재와의 상호작용이 아닌 시뮬레이션 등, 구조화된 형태로 제공되는 간접 경험 활동이라는 점이었다. Krijtenburg-Lewerissa et al. (2019)에서 이야기한 활동 중심의 접근에서는 phET (Physics Education Technology), QuILTs (Quantum Interactive Learning Tutorials), QuVis (The Quantum Mechanics Visualization Project) 등의 시뮬레이션 활동을 주요 활동으로 이야기하였으며, 실제 실험실에서의 실험 활동을 통한 학습 전략은 주요 접근으로 논의되고 있지 않았다.

한편 중등 교육과정이 현대물리와 과학의 본성(NOS) 간의 연관성을 충분히 반영하지 못하고 있음을 고려하면(Stadermann et al., 2019), 현대물리 교육과정의 현재 모습은 최선의 방식이 아닐 수 있다. 또한 중등 교육과정에서의 현대물리 교수학습 접근을 확인해 보면, 다른 영역과 달리 현대물리에서는 응용사례를 다루는 것이 전통적으로 이루어져 온 교수학습적 접근이 아님에도 불구하고(Johansson et al., 2018), 실제 중등학교의 현대물리 영역 교육과정에서는 응용 사례를 중심으로 다루는 접근을 많이 취하고 있었다. 이는 예비교사 교육과정에서의 현대물리 학습의 접근과 중등학교 현대물리 영역에서의 교수학습 접근에 결 어긋남(decoherence)이 발생할 수 있음을 예상하게 한다.

정리하면 현대물리 영역에서 실험이 가질 수 있는 여러 가지 교육적 가능성을 더 혁신적으로 검토하기 위한 후속 시도와 연구가 필요하나, 직접실험을 적극적으로 적용함을 통한 교육의 시도는 아직까지 부족하다. 다음 장에서는 과학교육에서 실험 활동의 의미를 전반적으로 조망하고,

현대물리에서의 실험의 교육의 목적에 대한 논의로 연결하고자 한다.

## 2.2. 과학교육에서 실험

### 2.2.1. 과학교육에서의 실험의 중요성

실험(experiment)은 과학에서 가장 중요한 인간의 활동이다. 인간은 자연을 감각 기관을 통해 관찰할 수 있으나, 자연은 그 성질상 통제하기 힘들며, 길들여 원하는 현상을 보기에도 까다롭다. 이러한 자연에 개입하고, 통제하는 행위가 실험이다. 실험은 실험실로 자연을 가지고 들어오는 행위에서 시작되며, 여러 가지 장치를 이용해 자연을 측정 가능하고 통제 가능한 형태로 변형하고 길들이는 과정이다(홍성욱, 2020). 이를 통해 자연에서 관찰하기 어려운 현상을 실험실에서 반복적으로 재현할 수 있다. 따라서 실험은 과학 지식이 발전하고 활용되는 데 가장 핵심적인 과정이자 방법론이라 할 수 있다(Galison, 1987; Franklin, 2007).

실험은 과학교육에서도 중요한 활동이다. 실험 자체가 갖는 과학에서의 중요성으로도 충분히 과학교육에서 실험이라는 방법론 자체를 학습하는 것은 중요한 지위를 갖는다. 과학 학습에 있어서는 실험을 통한 현상의 재현은 과학적 방법을 이해하고 과학의 본성을 경험할 수 있는 인지적인 활동이다(Arnold et al., 2014). 학생이 직접 실험을 수행하는 것 또한 과학교육에서도 독자적으로 중요한 요소로 자리매김하고 있다(Hofstein & Lunetta, 2004).

이러한 실험의 중요성은 학교 과학 교육과정에도 충분히 반영되어 왔다. Schwab(1960)이후 촉발된 탐구실험 중심 과학교육에 대한 관심은 과학과 교육과정 및 학교 교육을 실험 활동 중심의 형태로 획기적으로 전환시켰다(송진웅, 2006). 특히, 우리나라 2015 개정 과학과 교육과정부터는 과학적 사고력 및 문제 해결 능력을 증진하기 위한 목적으로 과학탐구실험 교과가 도입되었고, 2022 개정 교육과정에서도 해당 교과가 유지되었다(과학기술정보통신부, 2023; 장진아 & 송진웅, 2015). 이는 학교 교육에서 탐구실험 교육의 필요성이 국가적으로 중요한 과제로 여겨지고 있음을 보여 준다.

선행 연구에서 검토되었던 실험의 역할은 크게 네 가지로 분류하여 볼 수 있다. 먼저, 가장 주류적인 관점은 과학 내용 학습의 보조적 수단으로서 실험을 바라보는 관점이다(Woolnough, 1985). 실험을 통해 과학 지식을 습득하거나 확인하는 역할이 여기에 해당한다. 이때의 활동은 주로 '예시적 실험실습'으로 이루어지는데, 특정한 현상을 설명하기 위해 이미 인정된 과학 지식을 사용하는 방식에 대한 예시를 제공할 수 있다. 특히 복잡한 과학 내용이 도입되는 중등학교 이후에서 과학 내용을 설명하는 데에서 예시적 실험이 주로 활용된다.

그러나 과학 지식의 전달에서 실험이 모든 것을 해결해 주지는 않는다. 많은 경우에 과학 교사는 구성주의적 관점에 기대어, 실험을 경험을 통해 학습자가 스스로 과학 지식들을 학습하기를 기대한다. 그러나 실험을 수행한다고 해서 그 경험이 곧바로 개념의 형성과 습득으로 이어지지는 않는다(Abrahams & Millar, 2008). 때로는 실험을 과학 개념에 대한 이해 없이 수행하거나, 잘못된 이해를 갖고 실험을 수행하기도 한다.

둘째, 과학 탐구기능을 학습하는 수단으로서 실험을 바라보는 관점이다. 미국 물리교사 연합(AAPT)에서는 고등학교 물리 실험이 학생들에게 물리적 현상을 탐구할 기회를 제공하고, 학생들의 아이디어를 체계적으로 발전시키는 출발점이 되어야 하며, 논리적 추론을 통해 예측 능력을 향상시키는 기반을 마련해야 한다는 주장이 주류적으로 이루어졌다(Escobar et al., 1992). 이에 따라, 실험 활동은 학생들이 실험활동을 통해 자신감을 얻고 필요한 기능을 습득할 수 있도록 설계되어야 한다고 제안하였다.

세번째 관점은 실험학습이 과학의 본성에 대한 이해를 증대할 수 있다는 것이다. Collins et al. (2001)의 연구에서는 과학의 본성에 대한 이해를 과학실험을 통해 달성되어야 할 중요 영역의 목적으로 다루었다. 이 관점은 실험수업을 통해 학생들이 과학적 지식이 어떻게 형성되고 변화하는지, 과학적 탐구 과정의 본질, 증거의 역할, 이론과 실험의 상호작용 등 '과학이 작동하는 방식'을 인식할 수 있다는 점을 강조한다. Leach(2002)는 실험실을 통해 과학 지식을 믿는 근거로서 과학의 인식론과, 과학 활동의 작동에 관한 과학사회학적 문제를 과학의 본성으로 지칭하고, 실험실 활동이 과학의 방법과 본성을 가르치는

역할을 하여야 함을 주장하였다. 즉, 실험은 과학을 단순한 교과서 속 개념이 아닌, 역동적이고 검증 가능한 체계로서 바라보게 하는 메타인지적 이해를 길러주는 역할을 할 수 있다. 이상 논의한 세 가지 관점들은 과학교육 분야에서 많은 논의가 이루어지며 각각의 중요성에 대한 공감대가 형성되었고, 학교 과학 수업에서도 여러 방면으로 다루어져 왔다고 볼 수 있다.

이러한 기존의 관점과 다르게, 실험을 실험자의 의미 형성(meaning-making)의 과정으로 본 Gooding(1990)의 관점은 과학교육에서 새로운 관점을 제공한다. 이 관점은 실험자가 실험 경험을 통해 개인적 차원에서 의미를 재구성하고, 자신의 배경지식, 관심사, 가치관과 연결 지으며 '자신만의' 이해를 형성하는 과정에 주목한다. 이 관점에서 실험 학습자는 단순히 과학 지식을 외부로부터 주어진 것으로 받아들이는 것이 아니라, 스스로 의미를 재해석하는 주체적 학습자가 된다.

전통적인 과학철학에서는 관찰, 이론화, 실험 검증이라는 인지적 과정이 '문헌적 · 언어적 세계'와 '직관적 · 감각적 경험 세계'를 분리한 채 다루어져 왔다. 그 결과 실험은 주로 이론을 검증하는 수동적 수단으로만 간주되었고, 실험자가 실제로 자연에 개입하고, 기기를 활용하고, 감각적 학습을 통해 경험 영역을 넓혀가는 행위주체적 측면은 소외되어 왔다.

한편 Gooding(1990)의 관점에서 실험은 새로운 개념, 언어, 이미지, 도구 및 절차를 창출하고 조직함으로써 전혀 새로운 현상을 이해 가능한 대상으로 전환하는 '실행적' 의미를 갖는다. 즉 실험은 참여자가 자연 세계와 적극적으로 '맞부딪히는' 경험 과정이며, 이를 통해 형성된 경험과 관찰은 동료 연구자와 공유되고 비판되면서 언어적 · 문화적 합의를 이루고, 궁극적으로 이론의 발전과 재구성을 이끈다. 이러한 실험적 실행은 자연현상에 대한 감각-운동적 이해를 토대로 개념을 확장하고, 의미를 정교화하며, 타당한 관찰과 주장으로 정착시키는 복합적이고 실천적인 지식 형성 과정이다.

과학교육 차원에서 이는 새로운 관점을 제공한다. 학습자가 실험과 관찰을 통해 세계와 직접적으로 상호작용하며 과학적 개념을 형성하는 과정으로서 실험 학습을 바라볼 수 있다. 과학 교육자들에게 실천 기반 학습(learning by doing), 탐구 중심 과학 수업, 학생들의 감각 · 운동적

경험을 활용한 활동 설계 등의 교육 방법을 '의미 형성'이라는 과정으로 새롭게 바라보는 관점이 될 수 있다. 즉 실험을 능동적으로 재구성하고 수행하는 과정 자체가 학습자에게 자연현상을 의미 있는 방식으로 이해하고 표현할 수 있는 능력을 길러준다.

특히 실험을 특수한 목적으로서 활용하는 예비교사 학습자에게는 이러한 관점이 더 강력히 적용될 수 있다. 예비 교사의 경우 단순히 실험을 통한 개인의 과학학습 뿐만 아니라, 교직에 진출하였을 때 이 경험을 살려 실험을 가르치고자 하는 메타인지적 고민을 수행한다. 이 현상을 예비교사의 특수성에 따라, 추후 교직 진출을 통해 가르칠 '교사로서의 의미'를 형성해 나가는 과정으로서 볼 수 있다. 과학 예비교사교육을 다루는 본 연구에서 이러한 관점을 적용하는 것은, 과학 실험과 관련된 예비 교사가 실험 활동의 경험에서 어떻게 교육적인 의미를 생산되고 의미화하는지를 포착하기 위한 렌즈가 된다.

한편, 앞서 서술한 실험의 과학 학문 및 학교 교육에서의 공고한 지위에도 불구하고, 많은 연구 결과들은 학교 현장에서 실험이 본연의 목적을 달성하는 것이 쉽지 않은 과제임을 시사한다. 학교에서 많은 실험 수업들이 수행되지만, “잘못된 개념으로 가르쳐지거나 혼란스럽고 비생산적으로 이루어진다”는 비판이 많다. 실험 활동의 가치와 정당성 자체에 대한 회의적인 시각을 제시하는 연구도 있으며(e.g. Hodson, 1991; Lazarowitz, 1994), 우리나라의 경우 양일호 등(2006) 의 연구에서는 중등학교 실험 수업이 실험의 다양한 목적 중 몇 가지에만 집중하여 이루어지고, 특히 실험을 과학 지식 전달을 위한 수단의 목적 위주로만 운영되는 등 탐구를 매우 낮은 수준으로 가르치고 있는 것으로 실험 교육의 한계를 분석한 바 있다.

실험의 목적이 명확하지 않다면, 실험 수업은 의미 있게 이루어지기 어렵다. 실험의 목적은 여러 교수학습 현장에서 명확하지 않을 때가 많은데, Hart et al.(2000)은 교사들이 실험활동을 체계적으로 조직하지 못하고, 교사와 학생 모두 실험의 목적을 명확히 인식하지 못하고 있는 것을 보고하였다.

실험 활동의 목적은 다양한 연구에서 정리된 바 있다. 특히 Leach (2002)의 관점에서 구성한 실험수업의 목적을 참고해 볼 필요가 있는데, 그는 실험의 더 본질적인 기능들을 이해하기 위한 목적으로 다음 세

가지를 제시하였다.

1. 이론 강의를 설명하기 위해 실험 수업을 사용하는 것은 실험실의 비효율적인 사용이다.
2. 측정 자체는 오류를 인식하고, 추정하며, 제거하고 분석하는 것을 배우는 것보다 덜 중요할 때가 많다.
3. 세부적인 지시를 통해 실험 기술을 가르치는 것은 기술자(technician)를 훈련하는 데는 바람직한 방법이지만, 과학자(scientist)를 훈련하는 데에는 별로 가치가 없다.

이 관점은 더 본질적인 측면의 실험 목적을 전통적 관점의 문제점과 연결해 기술하고 있다는 점에서 의미 있는 것으로 평가할 수 있다.

한편 학습자별로 이 목적은 달라지기도 한다. 과학 연구와 교육에서 실험이 서로 다름을 고려할 때, 지식을 생산하는 과학자가 되기 위한 전문적 학습과, 이미 생산된 지식을 이해하는 보편적 학습 간에는 서로 다른 실험의 목적을 갖게 된다. 조현준 등(2006)의 연구에서는 초등, 중등, 대학 수준의 실험학습의 목적을 구분하여 같은 실험이어도 학습의 목적은 대상에 따라 서로 다를 수 있음을 논의하였다.

[표 2-1] 중등학교와 대학 실험학습의 목적(조현준 등, 2006)

| 수준 | 목적 |
|---|---|
| 중등교육 수준 | 과학탐구능력의 향상, 창의적 문제해결능력 체계화<br>과학적 발견의 기쁨 체험, 과학적 태도 증진<br>과학적 지식생성과정에 대한 이해<br>과학에 대한 태도 증진, 합리적 의사결정능력 증진<br>실험 활동의 필요성 인식 |
| 대학교육 수준 | 자연현상의 해석을 통한 규칙성 발견 능력의 개발<br>전문 과학 지식의 이해, 많은 조작 기술 습득<br>창의적 문제해결능력 증대<br>과학적 지식 생성과정에 대한 이해<br>객관적인 관찰 능력 습득, 과학탐구능력 습득<br>합리적 의사결정능력 증진, 과학에 대한 흥미 유치<br>과학적 태도 증진, 문제해결의 기쁨 체험<br>과학적 개념의 생성능력 개발, 실험 활동의 필요성 인식 |

결과적으로 볼 때 과학교육에서 실험의 목적은 다양하게 분류 및 제시되고 있으며, 이는 각 연구자가 조사한 교육 현장 및 영역의 맥락에 따라 실험의 목적은 매우 크게 달라질 수 있음을 시사한다.

대학 실험활동의 학습 목적 또한 많은 교육자 및 단체에서 제시하고 있다. 물리학 분야에서의 대표적인 목적은 AAPT 위원회의 실험활동 목적이라고 할 수 있다(Kozminski et al., 2014). 여기에서는 '물리학자처럼 생각하기' 습관을 기르고 물리적 세계에 대한 지식을 구성하는 것을 실험 활동의 핵심 목적으로 삼고, 아래 [표 2-2]에 제시되는 6개의 영역을 대학 물리실험의 학습 결과(learning outcome)로 제시한다.

[표 2-2] 대학 물리실험의 학습 결과(Kozminski et al., 2014)

| 실험 학습 결과 | 설명 |
|---|---|
| 모델링 (Modeling) | 모델을 물리적 및 측정 시스템의 제한과 근사치를 가진 추상적 표현으로 정의하고, 이를 개발, 평가, 테스트하는 것. |
| 실험 설계 (Designing experiments) | 모델을 테스트하기 위한 실험을 개발, 평가, 문제를 해결하는 것. |
| 실험 기능 개발 (Developing technical and practical skills) | 실험 장비(예: 오실로스코프) 사용과 같은 실험 관련 다양한 기술을 개발하는 것. |
| 데이터 분석 및 시각화 (analyzing and visualizing data) | 데이터를 평가하고 불확실성을 해석하기 위한 통계 및 그래프 방법을 이해하고 적용하는 것. |
| 지식 구성 (constructing knowledge) | 데이터를 활용하여 물리적 세계에 대한 아이디어와 결론을 도출하는 것. |
| 물리학 소통 (communicating physics) | 증거를 기반으로 논증하고 실험 방법 및 결과를 통합하여 널리 공유하는 것. |

이러한 목적은 입문 및 고급 실험활동 과정을 아우르는 물리학 커리큘럼이 실험활동 교육을 통해 달성하고자 하는 목적을 전반적으로 설명한다.

특정한 물리 영역에서의 실험학습의 맥락에서는 실험 학습의 목적은 더 구체화된 형태로 도출하는 것이 가능하다. Holmes & Smith (2019)는 이러한 일반적 실험활동 목적을 역학(mechanics) 분야 실험

수업에 구체화하여 대학 실험활동 교육과정 목적에 적용한 바 있다. 과학 실험이라는 범위는 매우 넓기에, 그 학문은 물론, 학문 내의 영역별로도 그 특징과 교육적 의의가 서로 다르다. 따라서 이 사례는 이 하나의 구체적인 물리학 영역에 있어서 학습자가 얻을 수 있는 학습의 기대효과와 목적을 영역별 특징에 맞게 더 최적화한 사례로서, 대학교육에서의 실천적 적용성이 높은 연구의 사례로 볼 수 있다.

이러한 선행 연구에서의 관점과 도출되었던 실험 활동의 목적들을 참고하여, 구체적인 분야로서 현대물리 분야의 실험 교육은 어떠한 목적을 가질 수 있는지에 대해 다음 절에서 논의하고자 한다.

### 2.2.2. 과학교육에서 현대물리 실험의 중요성

현대물리 학문의 태동에 있어 실험의 역할은 결정적이었다. 19세기 후반 시기, 공학의 발달에 따라 실험 기기가 기술적으로 큰 개선을 이루었고, 이러한 기술의 발전은 과학 연구에 있어 기존에 확인할 수 없던 새로운 자연 현상들을 확인할 수 있도록 하였다. 이러한 변화는 새로운 물리학이 탄생하는 데의 토대가 되었다(Jeans & Jeans, 1950). 예컨대, 이 시기에 일어났던 에어 펌프의 개선은 기체 현상에 대한 분석을 가능하게 하여 음전하를 띈 입자인 전자의 발견으로 이어졌다. 또한, 온도를 낮추는 기술의 개선은 절대영도에 가까운 온도에서의 물질 현상을 확인할 수 있도록 하여, 초전도 현상의 발견으로 이어졌다. 이는 실험이 현대물리의 중요한 발전 과정에 중요한 영향을 미쳤음을 확인시켜 주는 실증적 사례들이다.

이러한 물리 실험의 역사적 의미와 중요성에도 불구, 기존 연구들은 현대물리 교육의 맥락에서 이론적인 측면을 주로 조사 및 강조하였기 때문에 현대물리 교육에서 실험의 활용에 대한 연구는 제한적으로 이루어졌다. 특히 중등교육에서 현대물리 실험 교육에 대한 관심은 거의 없었다고 볼 수 있고, 대학교육의 맥락에서는 관련된 연구로 Zhu & Singh(2011)을 꼽을 수 있다. 이 연구에서는 슈테른-게를라흐 실험(Stern-Gerlach experiment)이라는 특정 실험이 양자역학에서 포멀리즘(formalism), 측정의 문제, 특정 기저(basis)를 선택하는 것의

중요성, 힐베르트 공간과 실제 공간의 차이, 중첩상태와 혼합상태의 차이 등 양자역학의 여러 측면을 가르치는 데 효과적이었음을 보고한 바 있다. 이러한 개별 실험에 대한 연구들은 현대물리 영역에서 실험의 교육적 가능성을 보여 주고 있으나, 이에 대한 구체적인 논의는 여전히 부족한 실정이다.

따라서 기존 연구논문에서 보고된 실험 교육의 가치와 목적을 현대물리를 교육의 특징과 종합하여 '현대물리 실험 교육'의 의미와 목적을 다시 정리하는 것은 현 시점에서 필요한 과제라 할 수 있다. 이러한 필요성과 문제 의식을 토대로, 현대물리 실험이 갖는 다른 영역와의 차별적 특징이 반영된 실험목적을 교육학적 관점에서 정리하였다. 현대물리의 특징은 앞서 2.1절에서 논의한 바를 영역을 구분하여 정리한 것이고, 실험 활동의 기대효과 및 목적은 앞 절에서 논의한 것들 중 현대물리의 특징과 연결될 수 있는 것을 추출하여 정리하였다.

[표 2-3] 현대물리 실험 활동의 기대 효과 및 목적

| 영역 | 현대물리 특징 | 현대물리 실험 활동의 기대효과 및 목적 |
|---|---|---|
| 과학 내용 | 이론의 형식성 | 형식화된 이론과 실제의 연결 (Welzel et al., 1998) |
| | 비직관적 현상 | 새로운 현상을 경험하고 친숙해지기 (Gupta, 2000; Millar, 1998) |
| | 높은 난이도 | 현대물리 지식의 깊은 이해 (양일호 & 조현준, 2005) |
| 과학탐구 기능 | 복잡한 실험 기기 | 첨단 실험 기기의 사용 경험 제공하기 (Wilkinson & Ward, 1997) |
| 과학의 본성 | 지식의 생성 | 과학자의 활동에 대한 이해, 과학 지식의 발전 과정(Millar, 2002). |
| | 과학기술에 대한 기여 | 과학-기술-사회의 상호작용 이해 (양일호 & 조현준, 2005) |
| 정의적 | 새롭고 흥미로움 | 학습자의 흥미를 유발 및 지속 (Bennett, 2001) |
| 과학적 사고력 | 세계관의 전환 | 새로운 통찰과 세계관의 형성 (박종원 외, 2022) |
| | 일상과 관련 짓기 어려움 | 과학기술과 연관이 높은 기기의 사용 경험 제공하기 (Wilkinson & Ward, 1997) |

## 2.3. 예비교사교육

### 2.3.1. 과학교사와 실험교육

많은 선행 연구들은 실험 수업에 있어서, 그것을 가르치는 과학 교사의 영향력에 초점을 맞추었다(Beatty & Woolnough, 1982; Kang & Wallace, 2005; Tobin, 1986). Tobin(1986)은 실험 활동이 일반적으로

과학 과정 전체와 개념적으로 통합되지 않은 '프릴(frill)'로 사용된다는 것을 이야기했다. 그의 연구에 따르면, 교사들이 과학 지식을 '전달 가능한 실체'로 간주하는 순진한 인식론적 신념을 가지고 있을 때, 실험 활동을 내용 수업의 부가적인 것으로 간주해 버리며 학생들이 과학적 탐구를 통해 의미를 만들 수 있는 기회를 인식하지 못한다. 이러한 연구 결과는 교사의 신념이 학교 교육에서의 실험활동의 활용 방식과 효과에 크게 영향을 미친다는 것을 시사한다.

실험 수업이 목적 달성에 실패하는 이유는 학교 현장의 다양한 요인들의 복잡한 상호작용의 결과일 것인데, 특히 교사 요인이 하나의 중요한 축으로 자리한다. 많은 연구가 교사의 사전 경험 및 지식, 신념을 파악하고 그것이 가르치는 행위에 어떤 영향을 미치는지 이해하기 위해 노력을 기울여 왔다(Calderhead, 1996; Fang, 1996; Halim & Meerah, 2002). 교사의 지식과 신념, 경험 등은 수업 전략에 가장 큰 영향을 미치는 변인이라고 볼 수 있다. 예컨대 어떤 교사가 과정 중의 과학(Latour, 1987)에 대한 더 정교한 인식론적 신념을 가지고 있다면, 그 교사는 학생들이 스스로 의미를 만들도록 격려하고 학생들이 직접 과학을 해보도록 함으로써 과학에 더 가까이 다가갈 수 있도록 하는 데 더 노력을 기울일 것이다. 실천적으로도, 과학을 잠정적 지식으로 제시하거나 결과보다 의미 형성 과정을 강조할 것임을 예상해 볼 수 있다. 반면 그러한 신념과 지식이 부족한 경우, 수업 전략이 모호하거나 목적성 없이 이루어질 수 있다.

실험 교육과 관련된 선행 연구를 살펴보면 Gardiner & Farragher(1999)의 연구에서는 교사들이 학생들의 탐구실험 학습의 촉진자 및 정보 제공자로서 충분히 역할을 하기 위한 전문성이 부족함을 보인 바 있다. 또한 이세연과 이봉우(2018)는 교과서에 제시된 실험이 예상과 다르게 흘러갈 경우 교사들이 실험을 중단하고 이론 설명 수업으로 회귀하는 모습을 확인하였다. 이는 교사가 예상하지 못한 상황에 잘 대처하지 못한 것이 수업 실패의 한 원인인 것으로 해석할 수 있다. 따라서 교사가 실험 수업과 관련한 교사 전문성이 있어야만 원래 의도한 실험의 목적 달성에 성공할 수 있고, 그렇지 않다면 단순히 지식 전달의 도구로서 실험 수업을 활용하게 될 우려가 있다(Shin & Song, 2023).

그러나 여전히, 학교 실험 수업에는 학생들이 단순히 실험활동을 수행해 보는 것만으로도 실험의 목적을 스스로 충분히 배울 수 있다는 근거 없는 가정이 내포하고 있으며(Abrahams & Millar, 2008) 이는 현재에도 유효한 문제 의식이다. 과학 교사가 단순히 실험활동을 수행하는 것을 넘어, 자신의 신념과 전문성을 활용한 실험 수업을 구성하고 가르치는 것은 어렵지만 중요한 일이다.

앞서 서술한 현대물리 영역에 대한 어려움과 실험 교수학습의 교사 요인을 종합하면, 현대물리 교육이 실험의 방법으로 이루어지는 것에 대한 교사의 어려움은 증폭될 것임을 예상할 수 있다. 과학을 단순한 학문이 아닌 실제 활동으로서 가르치자는 탐구 기반 교육과정의 가치를 다시 되돌아보면(송진웅, 2006), 중등 교육에서 현대물리 실험에 대한 시도는 새로운 학습 가능성을 창출해 낼 수 있다. 그러나 여전히 과학교육 연구에서 현대물리 교육의 이론적 측면에서의 연구가 대부분이기에, 현대물리 교육의 유망한 접근으로서 실험의 교육적 활용, 그리고 그에 대한 교사들의 견해 및 신념은 연구를 통해 탐색될 필요가 있겠다.

### 2.3.2. 예비교사교육에서 실험 수업

교사 교육의 관점에서도 예비교사의 실험 활동은 단순히 과학 지식을 공부하는 과정 그 이상의 의미를 가진다. 중등 과학 교사들의 과학 교과 전문성에 대한 인식을 조사한 심재호(2006)의 연구에서는 현직 중등 교사들이 과학 교사로서 전문성을 확보하기 위해 실험과 관련한 활동 연수와 교사 양성 체제 개선이 필요하다는 인식이 높음을 보고하였고, 이윤정과 임성민(2011)은 예비교사들이 과학 실험활동을 수행하고 반성적으로 돌아보는 과정을 통해 과정으로서 과학에 대해 인식하고, 과학교육에서의 실험의 의의에 대해 이해할 수 있음을 확인하였다.

그러나 앞서 밝힌 바와 같이 학교 실험에서 전제하는 근거 없는 가정(Abrahams & Millar, 2008)은 과학교사 양성 과정에서도 동일하다. 사범대학 과학 교사 양성과정의 실험 수업은 학생들이 단순히 실험활동을 수행해 보는 것만으로도 실험의 목적을 스스로 충분히 배울 수 있다는 근거 없는 전제를 가지고 이루어진다. 많은 경우 사범대학의

교사 양성 과정에서 예비 물리교사들은 실험 수업을 물리 지식과 역량을 학습하는 과정으로 이해하고 선택 및 수강하고 있으며, 이 실험수업 과정에서 실험과 관련한 교사 전문성은 잠재적 목적으로서 예비 물리교사가 스스로 발굴해야 하는 역량으로 취급된다. 여기에 신규 교사들이 실험을 교육학적으로 연결하는 능력이 부족하기 때문에 실험 수업 지도에 어려움을 겪는 경우가 많다는 연구 결과는 (Paeng & Paik, 2005), 이러한 과정에서 예비교사들이 잠재적 목적에 달성하고 있지 못했을 것을 예상하게 한다.

따라서 학교 현장에 나가 실험 수업 지도를 하기 위한 준비 과정에 있는 예비교사들이 물리 실험 학습을 통해 무엇을 학습하고 있으며, 특히 미래의 교수 실천을 위한 교육적 사고 (Pedagogical thinking)를 얼마나 해낼 수 있는지에 대한 확인과 개선은 예비교사교육에 필수적인 과제라 할 수 있다(Feiman-Nemser & Buchmann, 1985). 또한, 예비교사교육의 개선점 및 가능성을 찾아, 이를 적극적으로 개선하거나 장려하기 위한 사범대학의 실험 과목 운영 방식 및 수업에서의 도움 장치에 대한 고민과 노력이 필요할 것이다.

이러한 노력을 통해 실험 수업이 효과적으로 이루어진다면, 예비 과학교사에게 실험을 가르치는 교사로서의 전문성이 향상될 수 있다. 과학교사 양성 과정에 예비교사의 '탐구 지도를 위한 학습' 이 일어난 사례는 몇몇 선행 연구에서 확인된 바 있다. Kang et al., (2013)에서는 예비교사의 실험 학습 및 탐구 교수 실행 과정을 경계 넘기(border-crossing)를 통해 예비교사가 교사로서 나아가는 과정으로 바라보았다. 이 연구에 따르면 예비교사는 과학 탐구의 학습자이자 동시에 교수자인 경계에 있게 되고, 학습자로서 과학탐구 학습 경험을 교육적으로 번역(pedagogical translation)하여 탐구를 가르칠 때 필요한 경험으로 활용할 수 있게 된다.

이러한 선행연구를 검토할 때, 현대물리 영역에서의 예비교사의 실험활동 학습이 이루어진다면 물리학과 교육학의 경계에서 활동하는 예비 교사는 현대물리 및 그 실험에 대한 간학문적 학습 결과들을 얻어 나갈 수 있다. 본 연구는 현대물리 실험 전공 수업을 이 과정이 더욱 필요한 사례로 판단하고, 예비교사의 '교사로의 경계 넘기' 과정을 '교육적 고찰을 강조하기'를 통해 촉진함과 동시에 그들의 학습이 어떻게

일어나고 있는지를 탐색하고자 하였다.

따라서, 그 촉진의 방법으로 제시된 예비교사의 학습에서 반성과 고찰이 어떻게 이루어지고, 이것이 의미를 가지게 되는지에 대하여 다음 절에서 선행 연구를 검토함을 통해 살피고자 한다.

### 2.3.3. 반성적 실행가로서 예비교사

교육학 분야에서 교직의 전문성 향상이 중요한 연구 분야로 대두되며, 여러 연구들이 교사의 반성적 사고(reflective thinking)를 교사 전문성의 주요 조건으로 제시하였다(Adler, 1991; Langer & Colton, 1994; Heflich & Iran-Nejad, 1995; Pultorak, 1996). 이러한 논의는 과거 Dewey(1933)가 주창한 '반성'의 개념을 토대로 하는 것으로 '반성적 사고'를 일상적인 사고와 구별하여, 문제를 해결하며 현실에서 의미를 찾아 이해로 나아가려는 목적 지향적 사고로 정의하였다. 반성적 사고는 훈련을 통해 발전할 수 있는 의도적 사고로, 문제 상황이 주어졌을 때 논리적이고 경험적인 근거를 바탕으로 본질적인 의미를 찾아가는 지적 탐구라 할 수 있다.

Schön(1987)은 Dewey의 반성 개념을 교육학 분야에 적용하여 전문가(professional expertise) 개념을 제시하였다. 그는 전문가란 실천의 상황에서 자신의 행위가 지닌 의미를 이해하고 비판, 재구성하여 앞으로 취할 행위에 의미를 부여할 수 있는 역량을 가진 사람으로 정의한다. 이 때 '반성적 사고'는 전문가가 사고하는 방식으로, 전문가는 어렵고 독특한 과업에서 이루어지는 전문적 상황을 반성적으로 사고하고 실천한다. 반성을 통해 문제 상황 속에서 실천하고, 불확실성에 대처하며, 문제를 해결하는 과정은 행위의 결과로서 얻어지는 지식으로서 우리의 행위에 영향을 주며, 이것을 행위 중 앎(knowing-in-action)으로 이야기하였다.

Schön(1992)은 이를 행위 후의 반성(reflection-on-action)과 행위 중의 반성(reflection-in-action)이라는 두 가지로 구분하여 이야기한다. 먼저 행위 후의 반성이란 사건을 전문적으로 이해하기 위해 행위가 끝난 뒤 돌아보고 생각해 보는 것을 의미한다. 행위 후의 반성이

일단 일어나면 현상과 어떤 거리를 두게 되며, 평가적, 비판적으로 그 상황을 숙고할 수 있게 된다. 따라서 침착하고 면밀하게 무슨 일이 일어났으며, 왜 그 일이 일어났고, 그 현상을 예기했던 행위 중 앎의 실패의 원인이 무엇인지를 재고하는 능력이 생기게 되는 것이다. 둘째는 '행위 중의 반성'이다. 이는 개인이 문제를 구조화하고, 상황을 이해하며, 문제에 잠재되어 있는 가정들을 비판적으로 평가하고 대안적인 해결방식을 구성하는 의식적인 탐구 과정이다. 어떤 독특한 특징이 행위 중에 확인되면 이에 대한 의문을 품게 되고, 해결책을 적극적으로 예측하거나 혹은 어떻게 문제가 해결될 수 있는지를 역동적으로 모색하게 된다. 여기에서 진정한 전문가, 즉 '반성적 실천인'으로서의 능력은 전문적 행위를 하고 있는 동안의 변화에 대해 생각하며, 자신이 무엇을 하고 있는지를 알고 전문적으로 학습하는 것을 의미한다.

또 다른 반성 개념으로는 Killion & Todnem(1991)의 행위를 위한 반성(reflection-for action)이 있다. 이 개념은 예상되는 행위의 목적 또는 결과가 무엇인지를 검토하는 좀 더 사전적이고 적극적인 개념의 반성으로, 미래에 있을 교수 실천을 준비하는 과정에서 일어나는 전문적 사고를 의미한다. 이는 행위 중의 놀라움이 없는 사고라는 오해가 있을 수 있으나, 수업 준비 과정에서 수업의 재료와 주제에 기인하는 독특함과 예상하기 어려운 불확실함 등이 놀라움으로 작용한다.

지금까지 논의한 Dewey와 Schön, Killion & Todnem의 반성에 대한 개념을 종합해보면 '반성적 실천인'으로서의 교사는 여러 가지 복합 요인이 동시적으로 작용하는 교육현장에서 직접적 교육실천을 행하는 과정에, 문제해결을 탐색하고 이러한 총체적 과정을 반성함으로써 새로운 실천적 지식을 창출하여 적용하는 '반성적 실천'을 하고 이것이 교육자라는 전문가의 면모라 할 수 있다. 여기에서 '반성'은 실천적 이론과 행위를 포함하게 되며, 선행 연구들은 이러한 과정을 통해 진정한 교사 전문성 발달이 이루어질 수 있다고 이야기한다.

본 연구의 반성적 실험 보고서에는 자기 학습에 대한 반성이 포함된다. 따라서, 이러한 반성들이 구분되어 나타난다면 이를 개별적으로 포착하는 것이 가능하다. 그러나 교육적 반성을 다룬 연구들은 대부분 교사, 또는 예비교사의 '행위 후 반성' 과정을 분석할 수밖에 없는 한계에 부딪치게 된다. 그 이유는 연구자가 주로 외부

연구자이기 때문에 ‘행위 중 반성’의 과정을 포착하여 분석하기는 어렵기 때문이다(서경혜, 2006). 이 연구에서도 마찬가지로, 연구 참여자가 수업 중의 생각을 상기하며 ‘행위 중 반성’, 즉 실험 수업 중 발생하는 수많은 행위와 사고를 기억하고 서술한다 할지라도 이미 교육적 고찰을 작성하는 시점은 행위 후이다. 따라서 ‘행위 중 반성’과 함께 ‘행위 후 반성’, ‘행위를 위한 반성’이 혼재하는 상태로 실험 수업의 교육적 고찰이 이루어졌다고 볼 수 있다.

따라서 반성의 개념들에 있어 행위 중의 반성과 행위 후의 반성을 엄밀히 구분하는 유용성보다 예비교사가 어떠한 학습을 하고, 학습 중에 어떻게 문제를 인식하고 해결하고자 하는가, 즉 활동과 반성의 연결 고리와 그 과정을 통한 실천적 지식을 이해하는 것이 더 필요하다고 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 반성을 구분하지 않고, 혼재된 반성으로서 실험 경험과 미래의 수업을 준비하는 과정에 전반적으로 작용하는 전문적 학습 행위로서 반성을 이야기하고자 한다.

본 연구에서는 예비교사가 자기의 학습활동을 반성하고 미래의 교수실행을 고민하는 반성적 실행가(reflective implementor)가 될 수 있을 것으로 보았다. 실험 보고서 쓰기 과정에서 이루어진 예비교사들의 실험에 대한 사고에는 자신의 행위에 대한 반성은 물론, 현대물리 실험 자체의 특성에 대한 파악이 함께 이루어졌다. 이를 물리 전공자의 관점에서 실험의 특징을 파악(identify)하는 과정과 자신의 실험학습 과정을 교육 전공자의 관점에서 반성(reflect)하는 두 가지 과정이 포함되었다고 보고 두 요소를 포함하는 개념으로 ‘교육적 고찰’(pedagogical considerations)라는 용어를 사용하였다.

# 3. 연구 맥락과 방법

이 사례연구의 대상은 한 학기 동안 이루어진 사범대학 물리교육과의 전공 필수 수업으로 개설된 <물리교육실험> 수업이다. 본 연구자는 현대물리 실험 수업이 이루어지는 과정에서 일어나는 예비교사의 학습 과정을 운영 조교 및 연구자의 입장에서 관찰하고 조사하였다. 3.1에서는 예비 물리교사들의 학습 대상이 되었던 '교육적 고찰을 강조한 현대물리실험 수업'이 설계된 배경과 적용된 방법을 설명한다. 3.2절에서는 연구 방법에 대해 연구 대상자, 데이터 수집 과정, 데이터 분석 과정으로 나누어 구체적으로 설명한다.

## 3.1. 교육적 고찰을 강조한 현대물리실험 수업

### 3.1.1. 과학교사 양성 과정에서의 현대물리실험

우리 나라는 초·중등교육법상의 교원자격검정령을 교사자격 기준으로 삼아, 교사 자격을 국가에서 관리하고 인증한다. 각 교과 자격증 별로 필수적으로 이수해야 하는 과목명이 법령에 명시되어 있고, 교사교육기관은 이를 따라 교육 커리큘럼에 반영해야 한다.

과학교과에 있어 현대물리는 통합과학 교과 교사자격증에서 물리 영역의 기본 이수분야로 포함되어 있으며, 물리 과목에서도 현대물리의 이론 수업이 포함되어 있다. [표 3-1]은 교육부고시 2023-14호에 제시된 통합과학과 물리 교과에서의 기본이수과목을 정리한 것이다.

[표 3-1] 교사자격 취득을 위한 기본이수과목으로서 현대물리학과 물리교육실험(교육부, 2023)

| 표시 과목 | 관련학과 또는 학부 | 기본이수과목(또는 분야) |
|---|---|---|
| 통합 과학 | 과학교육, 물리교육, 화학교육, 생물교육, 지구과학교육, 통합과학교육전공 및 관련되는 학부(전공・학과) | (1)통합과학교육론(또는 과학교육론)<br>(2)일반물리학 및 실험, 전자기학, **현대물리학**<br>(3)일반화학 및 실험, 무기화학, 유기화학<br>(4)일반생물학 및 실험, 세포학, 분자생물학<br>(5)일반지구과학 및 실험, 지질학, 대기과학 |
| 물리 | 과학교육, 물리교육, 물리학 및 관련되는 학부(전공・학과) | 물리교육론(또는 과학교육론), 역학, 양자역학, 전자기학, 열및통계물리, 파동및광학, 전산물리, **현대물리학, 물리교육실험** |

실험 과목에 있어서는 '물리교육실험'이 물리교과 중등교사 자격증의 기본이수과목으로 포함되어 있다. 구체적인 학습 주제는 각 대학마다 상이한데, 서울 소재 S대학의 경우에는 물리학의 위계상 가장 마지막에 있는 현대물리 실험을 학습하는 것을 목적으로 한다. 한편 일부 다른 사범대학의 경우에는 중등학교 교과서에 담긴 물리 실험들을 수행하고, 실제 탐구 지도 역량을 기르는 것 자체를 강의의 목적으로 하기도 한다.

연구의 맥락이 되는 서울 소재 S대학의 사범대학 물리교육과에서는 전공 필수 과목으로 각 물리 분야별 실험 과목을 운영하고 있다. 실험

과목의 명칭은 물리 학문적 위계 구분 없이 <실험 및 시범 1>, <실험 및 시범 2>, 그리고 <물리교육실험>의 명칭 및 구조로 개설되어 있으나 실제 실험들은 권장 학년별 순서에 따라 역학, 전자기학, 현대물리학의 순서로 이루어진다.

대학 시스템에 등록된 수업의 본 의도와 목적은 아래 강의계획서 상에서 명시적으로 드러나듯, 물리학 역량과 교사로서의 역량 향상을 동시에 목적으로 삼고 있다.

[강의 계획서상의 수업 목적]
중, 고등학교 교과서에 제시된 중요 물리 실험 및 현대 물리학 첨단 실험을 수행함으로써 실험 기술 및 이론을 이해하고, 시범을 보일 수 있도록 한다. 정해진 실험을 수행한 후에는 중고등학교에서 할 수 있는 실험을 직접 설계하고, 매뉴얼을 작성하며, 실험진행 하는 조별 프로젝트를 통하여 중등학교 실험 지도능력 향상을 목적으로 한다.

위와 같은 체계를 확인해 볼 때 현대물리는 사범대학에서 필수 이수 과목으로 지정되어 있는 반면, 현대물리의 실험은 대학의 자율적 선택에 따라 실제 학습 여부가 정해진다. 또한 현대물리 실험의 목적은 두 가지 차원, 실험 탐구 기술, 응용과 창의성, 이론을 이해하는 물리 학습의 차원과 실험 지도능력의 향상 등 교사 전문성 차원을 둘 다 포함하고 있음을 알 수 있다.

그러나 실제 수업 구성의 경우, 교사 전문성 측면의 목적이 여전히 구현되기 어려운 구조로 이루어져 있으며 이를 더 개선할 여지가 있다고 판단하였다. 수업을 개설할 때 제시한 물리교육실험 수업의 '교과목 개요' 상에서는 아래와 같이 설명하여, 수업에서 다루는 심화된 실험 활동을 통해 1) 참 탐구 기술을 익힌다, 2) 응용과 창의성을 기른다 3) 고급 물리 이론을 이해한다는 세 가지 활동 준거를 세우고 있다. 즉, 교과목의 전반적인 개요에서는 예비교사의 수업이라는 특성이 크게 반영되어 있지 않다.

[교과목 개요]
역학, 현대물리, 광학, 전자기학 교과목에서 취급된 이론을 고급 실험 및 심화 선택 실험을 통하여 참 탐구 기술을 익히고, 응용 및 창의성을 기른

다. 또한, 실험을 통해 고급 물리 이론에 대한 이해를 확고히 한다.

사범대학의 예비 과학교사의 실험 전문성을 위한 교사교육과정의 보완 및 개선은 과거에도 꾸준히 요구되어 온 바 있다(김영민 et al., 2010). 현재까지도 이러한 요구는 사범대학 교사교육 전공 수업에서 교과내용학과 교육학의 조화로운 학습이 필요하다는 관점(김영민 et al., 2010; 이경호, 2020)에서, 사범대학에 개선이 필요한 과제라고 할 수 있다.

이러한 배경에서 연구자는 현대물리 실험 수업이 교과내용학 교육적 고찰을 강조한 현대물리실험 수업을 설계 및 적용하였다. 구체적인 설계 및 적용의 과정은 다음 차례에서 제시한다.

### 3.1.2. 교육적 고찰을 강조한 현대물리실험 수업의 설계

본 연구의 대상이 되는 2023학년도 2학기 <물리교육실험> 수업에서는 담당 교수와 학과 운영조교, 그리고 강의 조교인 연구자의 협의 하에 교육적인 측면을 더욱 강조하는 방식으로 수업을 바꾸어 설계하였다. 교육 측면을 강조하되 기존의 현대물리 실험 수업에서 요구되는 물리학 학습권을 최대한 침해하지 않는다는 원칙을 세우고, 그 안에서 학생들의 교육적인 측면의 사고를 유발 및 촉진하는 수업 방식을 구현하고자 하였다.

이러한 원칙 하에서 본 연구자가 이번 사례를 통해 시도한 것은 '교육적 고찰 실험 보고서'를 실험 수업에 적용하는 것이었다. 실험 수업에서 보고서의 역할은 매우 크다고 할 수 있는데, 과학 실험 보고서는 큰 틀에서는 비슷하나 그 목적에 따라 세부적인 구조에는 차이가 있다. 흔히 이루어지는 과학에서의 실험 실습 교육 보고서의 경우에는 I-M-R-D(Introduction - Method - Result - Discussion)의 과정으로 이루어진다. 이는 과학계 논문이 I-M-R-A-D(Introduction - Method - Result - Analysis - Discussion)의 형식을 따르는 것과는 다르게(Wu, 2011), 교육 실험은 과학적 발견의 목적이 아니라 실험을 재현하고 이 과정을 통해 학습하는 것을 목적으로

하기에 분석 과정을 Result에 포함시켜 더욱 단순화한 것이다.

한편, 물리교육 분야의 논문의 경우에는 그 Discussion의 구조가 자연과학 연구 논문과 일부 다르다고 할 수 있다. 대표적인 물리교육 분야의 저널인 한국물리학회에서 발간하는 <새물리> 학회지의 물리교육분과 논문, 미국의 물리교육 분과 논문인 <Physical Review Physics Educational Research>에 발간되는 교육 계열의 논문들의 구조를 참고해 볼 수 있다. 이러한 논문에서는 물리학적 이론, 현상, 실험 등에 대한 물리학 연구와 그에 따른 결과를 논의한 뒤, 그것을 교육학, 또는 교육 실천적 함의와 연결 지으며 논문의 시사점과 의미를 도출해낸다(조광희, 2022). 이와 같은 논리적 구조 속에서 물리학과 교육학의 중간 지대에 위치한 물리교육 연구자는 간학문적 의미를 생성하고 도출해 나간다.

예비교사를 위해 개설되는 실험 수업의 보고서 또한 일반적인 실험 보고서와는 다른 구조로 새로이 구성될 필요가 있다. 기존 물리실험 보고서의 구조를 유지하되, 이를 교육적인 시사점들을 고민하고 작성하는 방식으로 변경하기 위해 '교육적 고찰'을 위한 항목(PC)를 명시적으로 세분화하여 추가하였다. 따라서, 새롭게 설계된 '교육적 고찰을 강조한 실험 보고서'는 I-M-R-D-PC (Introduction - Method - Result - Discussion - Pedagogical Consideration)의 구조로 이루어졌다. 이를 예비교사에게 적용함으로써, 예비교사가 물리와 교육의 간학문적 의미를 도출함을 통해 '미래의 물리 교사'라는 간학문적 정체성 및 역량을 발전시킬 수 있기를 기대하였다.

수업에 교육적 고찰을 적용하는 것은 이 실험 보고서를 '반성적 과정'으로 만드는 과정이다. Langer & Colton(1994)에서는 반성적인 의사결정 역량을 촉진할 수 있는 전략으로 저널 쓰기를 강조한 바 있다. Windschitl(2003)의 연구에서는 예비교사가 실험 학습을 하면서 겪게 되는 경험, 기분, 사건, 순간의 생각, 실수 등을 여정(journey)으로 바라보았고, 이 여정을 반성적 저널(reflective journal)에 구체적으로 기록할 수 있도록 유도하다. 이를 통해 예비교사가 반성적 저널을 작성하는 과정은 실험에 대한 교육적 의미를 해석해 나가는 자신과의 대화 과정으로 바라보았다. 우리나라에서는 이윤정과 임성민(2011)이 유사한 연구를 수행하여, 사범대학 과학교사 양성 과정에 반성적 실험

저널쓰기 활동을 적용하여 예비 과학교사에게 반성적 사고를 촉진하였다. 이를 바탕으로 예비교사가 자신의 지식 상태와 앎의 과정을 돌아보는 초인지, 과학교육에 대한 인식론적 신념, 구체적인 과학 탐구 수행 상황에서의 정서를 확인하고 학습할 수 있도록 한 바 있다. 이러한 연구 사례들에서 반성적 실험 보고서가 실험 수업을 반성적 과정으로 만드는 역할을 할 수 있음을 확인할 수 있다. 실험 수행 과정에서 이루어지는 연구 참여자의 행위를 스스로 돌아보면서 실험 활동의 의미를 이해하고 학습하는 효과가 있다.

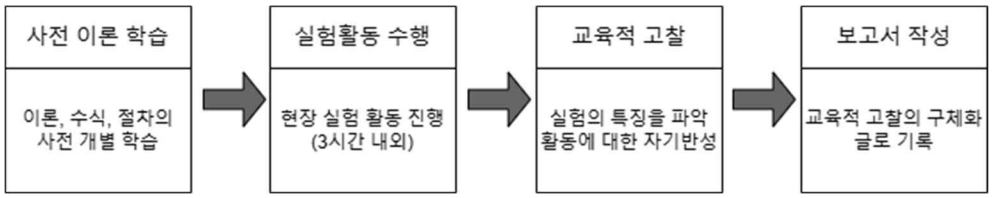
이러한 선행 연구 사례를 참고하여, 본 연구에서는 '현대물리 실험 보고서의 교육적 고찰을 반성적 저널로 삼아 본 연구에서의 핵심 개입 요소로서 설계 및 적용하였다. 이때 예비교사의 교육적 고찰에는 물리 전공자의 관점에서 실험의 특징을 파악(identify)하는 과정과 자신의 실험학습 과정을 교육 전공자의 관점에서 반성(reflect)하는 두 가지 과정이 포함되었다.

### 3.1.3. 교육적 고찰을 강조한 현대물리실험 수업의 적용

실험 보고서 형식의 변화를 기반으로 구체적인 수업의 진행은 다음과 같은 방식으로 이루어졌다. 첫째, 수업 오리엔테이션을 통해 <물리교육실험> 수업의 목적을 단순히 현대물리 실험을 공부하고 경험하는 것을 넘어, 이를 교육적으로 고민 및 고찰하는 과정도 포함하여 학습할 것을 명시적으로 지도하였다. 둘째, 이 과정을 촉진하고 실험 중 일어나는 고찰의 과정을 잘 드러내기 위한 '교육적 논의 실험 보고서'를 적용하여 예비교사의 실험 경험에 대한 해석에 의도적으로 교육적 관점을 포함시킬 수 있도록 하였다.

수업 설계 단계를 거쳐 최종적으로 구성된 '교육적 고찰을 강조한 현대물리 실험 수업' 은 아래 그림과 같은 과정으로 이루어졌다. 하나의 실험을 한 주의 모듈로 구성하여 사전 이론 학습, 조별 실험활동 수행, 이에 대한 교육적 고찰, 실험 보고서의 작성이라는 네 가지 단계로 하나의 모듈이 진행되었다. 총 일곱 가지의 실험을 개별 모듈이 되어, 한 주차에 하나의 모듈씩 나뉘어 진행되었다. 개별 모듈의 진행 과정은

아래 [그림 3-1]과 같다.




**[그림 3-1] 교육적 고찰을 강조한 실험 수업의 진행과정**

본 연구의 대상이 되는 <물리교육실험> 강좌는 3학년 2학기 전공 필수 과목으로 개설되어, 현대물리학 또는 양자역학 이론 과목을 선이수 과목으로 수강 완료한 학생들을 대상으로 한다. 따라서 [표 3-2]와 같이 총 7종의 서로 다른 현대물리 실험들이 본 수업의 주요 구성요소로 개설되었다.

**[표 3-2] <물리교육실험>에서 진행된 7종의 현대물리 실험**

| 실험명 | 실험의 흐름 및 목적 |
|---|---|
| **양자 아날로그** | 음파의 공명과 관련된 성질을 관찰하여 양자시스템의 비유적 이해 |
| **밀리컨 기름 방울 실험** | 최소 단위 전하량의 존재를 밝히고, 기본 전하량을 결정 |
| **전자스핀공명 (ESR)** | DPPH 시료의 전자스핀 공명 현상을 확인하고, g-factor를 계산 |
| **핵자기공명 (NMR)** | PTFE 시료의 핵자기 공명 현상을 확인하고, g-factor를 계산 |
| **광전 효과** | 광전관 측정 장치로 저지전압을 측정해 플랑크 상수를 계산 |

| | |
|---|---|
| **태양 전지** | 태양전지의 특성 탐구 (태양전지 영향 요인, 특성곡선) |
| **맥스웰-볼츠만 분포** | 기체분자 모델링을 통해 맥스웰-볼츠만 분포를 이해 |

이와 같은 7종의 현대물리 실험 활동을 진행 이외에는 교육적 고찰에 대한 소개 및 오리엔테이션, 실험과 관련한 환경안전 교육 이수, 실험 이론에 대한 기말 시험, 프로젝트를 통한 실험수업 시연 과제가 진행되어 총 15주의 수업으로 본 수업이 구성된다. 이때 실험수업 시연 과제의 경우에는 현대물리 분야가 아닌 역학 및 광학 실험에 대한 시연이 이루어져, 본 연구의 초점이 되는 현대물리 실험 활동과는 무관하였기에 본 연구의 대상에서는 제외하였다.

수업에서 다룬 7개의 현대물리 실험들은 모두 해당 실험의 실습을 위해 과학 실험기기 전문 업체(PASCO, Leybold, Teachspin, PHYWE 등)에서 제작된 교육용 시범실험 세트를 활용하였다. 교육용 시범실험 세트를 활용할 경우 실험의 설계 및 세팅의 과정에서 학습자가 어려움을 겪지 않고 실험 자체의 과정에 집중할 수 있도록 돕는다는 장점이 있다. 그러나 이러한 특성은 실험들이 간단하게 버튼을 조작하여 나타나는 값을 기록하여 이론을 '확인'하는 정형화된 요리책(cookbook)식 구조를 따라 진행되게 한다.

실험 장치는 수업 운영 조교에 의해 미리 점검 및 셋업이 완료된다. 특히 현대물리 실험에서는 활용되는 시료가 충격에 취약하거나, 기기 자체에 정밀하게 정렬된 필요하기에 실험 수업의 운영자가 실험 세트를 미리 관리 및 준비하는 과정이 더욱 요구되었다. 예비교사들은 이 사전 세팅이 완료된 준비된 실험 세트에 그대로 참여하여 실험을 수행한다. 실험 기기 세트에 예비교사들은 신호 발생기의 다이얼을 돌리며 음파 신호를 발생시키는 등, 실험 기기의 조절부를 조작함으로써 실험 데이터를 얻어낸다. 이를 오실로스코프 또는 컴퓨터와 연결하여, 전기적 신호가 자동적으로 나타나거나 프로그램을 통해 조직된다.

이때 각 실험마다 실험의 목적, 기기, 수행 방식은 상이하였다. 일반적인 실험 학습의 단계인 준비 단계, 실험 단계, 결론 단계에 따라

정리하였다. 이때 7종의 실험들 중 유사한 목적과 유형의 실험들은 함께 묶어 기술하였다.

#### 3.1.3.1 양자화 실험(Experiments on Quantization)

##### 1) 양자 비유(Quantum Analogy) 실험

###### 가. 실험의 의의

고전물리학 관점의 물리학 체계가 정립된 것으로 생각되었으나, 새로운 해석이 이루어지며 양자물리학이 태동하였다. 이때 많은 해석이 기존의 체계를 토대로 하였기 때문에, 여러 양자물리 현상들은 고전물리학의 시스템과 유사한 측면을 가진다(Dragoman & Dragoman, 2004). 따라서 비유를 활용하여 양자물리학을 설명하는 교수학습 접근이 이루어질 수 있으며, 그 가능성 및 효과성은 여러 연구를 통해 확인된 바 있다(Bunge, 1968; Budde et al., 2002; Cruz-Hastenreiter, 2015).

본 수업에서 수행된 양자 비유 실험은 슈뢰딩거 방정식과 헬름홀츠 방정식의 수학적 유사성을 활용한다. 이해하고자 하는 양자 현상과 수학적으로 유사한 관의 공명 실험을 통해 나온 음향물리적 현상을 확인하고 과를 얻어내, 이를 통해 간접적으로 양자 현상에 대한 해석을 수행해 보는 경험을 제공한다(Matzdorf, 2009).

###### 나. 실험 이론

이 실험에서의 음파 방정식은 양자역학에서의 결과와 매우 유사한 꼴을 갖는다. $\Psi(0)=0,\ \Psi(L)=0$ 인 경계조건에서 파동함수는 $\psi(x,t)$로 나타낼 수 있고, 이는 음파를 기술하는 방정식 $p(x,t)$과 유사한 꼴로 나타난다.

$$\psi(x,t)=\sqrt{\frac{2}{L}}\exp(-i\omega t)\sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad \leftrightarrow \quad p(x,t)=\hat{p}\cos(\omega t)\cos\left(\frac{n\pi}{L}x\right)$$

또한, 입자의 에너지와 운동량 사이의 관계식(분산 관계)은 아래 좌변과 같이 나타나고, 이는 우변의 음파 방정식에서의 각진동수와 파수

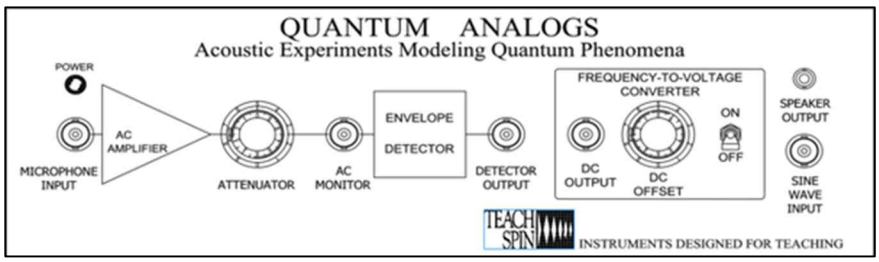
간의 관계식과 유사한 꼴로 나타난다.

$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2mL^2} n^2 \quad \leftrightarrow \quad \omega(k) = dk = \frac{\pi c}{L} n$$

이러한 형식적 유사성을 통해, 음파의 공명 현상에서의 여러 물리적 특성을 통해 나타나는 스펙트럼을 양자 현상으로 비유적으로 이해할 수 있다.

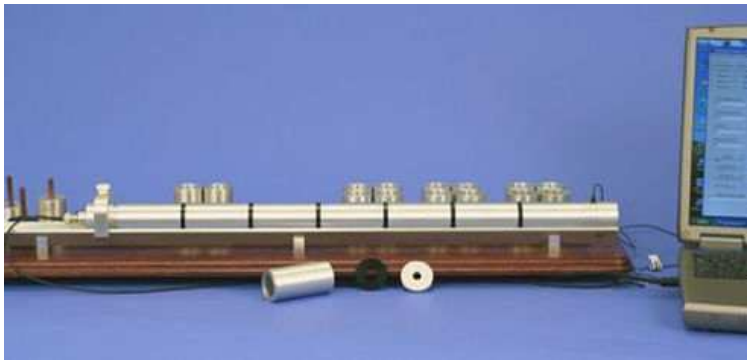
### 다. 실험 장치

실험 장치로는 Teachspin사에서 제작, 판매하는 Quantum Analog – Acoustic Experiments Modeling Quantum Phenomena– 기기를 활용한다. 핵심 부품이라고 할 수 있는 컨트롤러에는 마이크 입력과 검출기(detector) 출력이 연결되고, 조절 다이얼을 통해 음파의 여러 가지 특성을 조절할 수 있다. 아래 [그림 3-2]는 Teachspin사에서 제공하는 매뉴얼에 제시된 양자비유 실험의 컨트롤러를 나타낸 그림이다.




[그림 3-2] Teachspin사 매뉴얼에 제시된 양자비유실험 컨트롤러

이 음파는 선형 배열 거치대(linear array)에 설치된 관에 입력되며, 관 튜브의 사이사이에는 조리개가 설치되어 퍼텐셜 장벽의 역할을 하게 된다. 선형 배열 거치대는 아래 [그림 3-3]과 같다.



[그림 3-3] 선형 배열 거치대에 설치된 튜브와 조리개

신호 발생기에서 나온 음파 신호는 관의 공명을 일으키고, 이 신호는 다시 연결된 컨트롤러와 컴퓨터에 입력된다. 컴퓨터에서는 전용 소프트웨어를 통해 그래프로 변환된다.

### 라. 실험 과정

실험의 과정은 다음과 같은 준비 단계, 실험활동 단계, 결론 단계로 나누어 정리할 수 있다. 단계를 종합 정리하면 아래 [표 3-3]과 같다.

[표 3-3] 양자 비유 실험의 단계 및 내용

| 단계 | 요소 | 내용 |
|---|---|---|
| 준비 단계 | 목표 | 음파의 공명과 관련된 여러 가지 성질을 관찰하고 측정함으로써 양자 시스템에 대해 비유적인 이해하기 |
| | 이론 | 파동방정식과 슈뢰딩거 방정식, 음파의 공명 |
| 실험 활동 단계 | 조작 | 오실로스코프, 신호발생기 주파수 조절 |
| | 관찰 | 프로그램을 통해 조직되는 스펙트럼의 띠 구조 관찰 (최대 진폭, 주기, lifetime 등) |
| | 기록 | 전기신호의 주기, 스펙트럼의 최대 진폭 |
| 결론 단계 | 분석 | 스펙트럼 모양의 비교를 통한 양자화 이해 |

## 2) 밀리컨 기름 방울 실험 (The Millikan Oil Drop Experiment)

### 가. 실험의 의의

밀리컨 기름방울 실험은 전자의 전하량이 불연속적으로 분리된 최소 단위, 즉 최소 전하량의 양자화 현상을 확인하는 실험이다. 전기장을 조절하여 대전된 기름방울이 낙하하거나 상승하는 운동을 관찰하고, 이를 바탕으로 기름방울의 전하량을 정밀하게 측정한다. 실험의 주 목표는 대전된 기름방울의 전하량을 측정하고 이를 통해 최소 단위 전하량(기본 전하)이 존재함을 입증하는 것이다. 본 실험은 전자의 물리적 특성과 전하량의 양자화 개념을 정립하는 데 기여한 대표적인 실험으로 평가받는다.

### 나. 실험 이론

기름 방울에 대전된 전하량이 특정한 값(최소 전하량)의 정수배임을 확인하는 실험이다. [그림 3-4]는 밀리컨 실험에서 기름 방울의 자유물체도를 표현한 것이다. Figure 1은 전기장이 없는 조건, Figure 2는 전기장이 걸린 조건에서 기름 방울에 작용하는 힘을 표현한 것이다. 이때 그림에서 $v_f$는 전기장이 없을 때의 하강 종단속도, $v_r$은 전기장이 걸릴 때의 상승 종단속도를 의미한다.

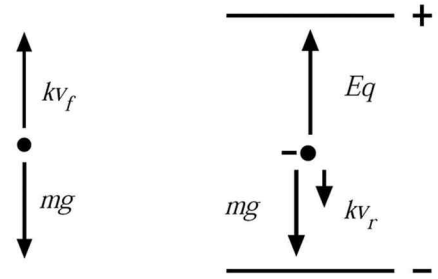



Figure 1 Figure 2

[그림 3-4] 밀리컨 실험에서 기름방울의 자유물체도

기름 방울이 종단속도에 도달하였다면, 기름방울에 작용하는 알짜 힘은 0이 된다. 따라서 전기장이 없는 조건에서의 힘의 평형 식($mg=$

$kv_f$)과, 전기장이 있는 조건에서의 평형 식($qE = mg + kv_r$)을 도출할 수 있다. 두 평형 식을 연립 정리하면, 기름 방울에 대전된 전하량 q의 값은 다음과 같이 유도된다. 아래의 식에 따라, 기름방울에 대전된 전하량 q의 값은 기름방울의 질량, 종단속도, 상승속도, 전기장의 세기를 관측함으로써 구할 수 있다.

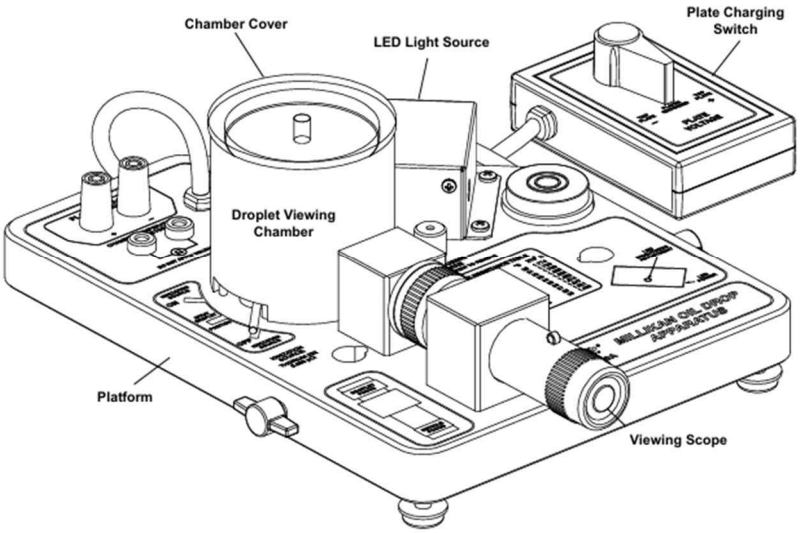
$$q = \frac{mg(v_f + v_r)}{v_f E}$$

이때 반복 측정을 수행하고 여기에 해당하는 어떠한 값이 특정한 값의 정수배로 나타남을 확인한다면, 그 특정한 값이 바로 '최소 전하량'임을 확인할 수 있다.

### 다. 실험 장치

이 실험에서는 파스코의 AP-8210A 기기를 활용한다. 분사된 기름 방울에 전기장을 걸 수 있는 챔버 실험 장치, 기름 분무기, 고전압 전원공급 장치, 멀티미터, 초시계가 활용된다. 전원 장치는 기름방울 챔버에 전기장을 거는 역할을, 멀티미터는 챔버 내 서미스터의 저항을 측정하는 역할을 하며, 초시계는 기름방울의 낙하 속도를 측정하기 위해 활용된다. 실험 장치의 세팅은 아래 [그림 3-5]와 같다.

**[그림 3-5] 밀리컨 기름 방울 실험 셋업**




[그림 3-6] PASCO 매뉴얼에 제시된 밀리컨 기름방울 실험 장치

핵심이 되는 기기는 [그림 3-6]과 같이 제작, 판매되는 밀리컨 실험 전용 장치이다. 이 장치의 특징은 챔버(droplet viewing chamber)에 연결된 현미경(viewing scope)을 통해 실험자가 기름방울의 거동을 직접 관찰할 수 있다는 점이다. 챔버에 기름 방울을 분사하고 현미경의 초점과 조명을 조절한 뒤 접안 렌즈를 바라보게 되면, 실험자의 눈을 통해 직접 기름방울이 실제로 반짝이는 모습을 확인할 수 있다.

### 라. 실험 과정

실험은 전자 기름방울이 전기장 속에서 받는 힘과 중력의 균형을 관찰하여 데이터를 분석하는 과정으로 구성된다. 현미경으로 낙하하는 기름방울의 운동을 관찰하며 초시계를 통해 낙하 시간을 기록하고 종단 속도를 계산한다. 이를 바탕으로 대전된 기름방울의 전하량이 일정한 값의 정수배로 나타남을 확인하고, 이를 통해 기본 전하량을 계산한다. 실험의 단계를 종합하여 정리하면 아래 [표 3-4]와 같다.

[표 3-4] 밀리컨 기름 방울 실험의 단계 및 내용

| 단계 | 요소 | 내용 |
|---|---|---|
| 준비 단계 | 목표 | 기름방을 대전 전하량 측정을 통해, 최소 단위 전하량이 존재함을 보임 |
| | 이론 | 전자 전하량의 양자화 |
| 실험 활동 단계 | 조작 | 대전 스위치 조작, 멀티미터 이용, 초시계 기록 |
| | 관찰 | 현미경 통해 반짝이는 기름방울이 낙하하며 종단 속도에 도달하는 현상을 확인 |
| | 기록 | 기름방울이 떨어지는 시간을 측정하여 종단 속도를 계산, 저항 측정 |
| 결론 단계 | 분석 | 정수 배가 됨을 확인하여 기본 전하량을 계산 |

### 3.1.3.2 자기 공명 실험(Magnetic Resonance Experiments)

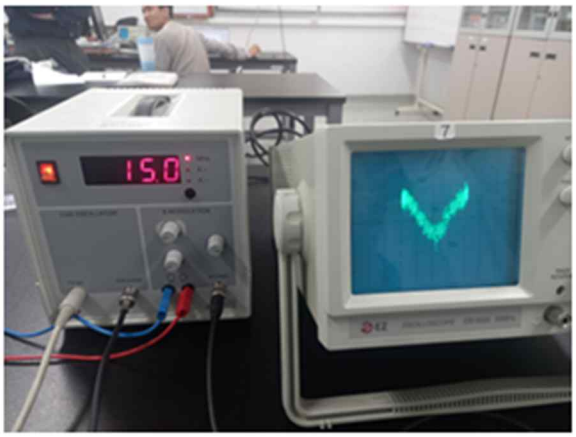
#### 가. 실험의 의의

자기 공명 실험은 원자 내에서 이루어지는 미시적 양자 현상을 전기 신호를 통해 간접적으로 확인하는 실험이다. 본 수업 사례에서 수행된 전자스핀공명(ESR)과 핵자기공명(NMR) 실험은 일정한 자기장 안에 시료를 배치하여 공명 현상을 일으키고, 이를 오실로스코프를 통해 전기 신호로서 확인하는 실험이다. 이 공명 조건의 전기적 수치 데이터가 수집되고, 이 데이터를 활용하여 기존의 법칙이 성립함을 확인하는 유사한 과정의 실험이다. 자기장을 만드는 방식과 공명 현상이 일어나는 시료에 차이가 있을 뿐, 얻어내는 데이터(공명 신호, 전류, 자기장, 주파수)와 목표하는 상수(g-factor)도 동일하다. 실제로 예비교사들 또한 이 두 실험을 구분하지 못하거나, 거의 차이가 없는 실험으로 인식하였다.

## 나. 실험 이론

외부 자기장 속에 하나의 전자가 놓인 경우, 전자의 스핀은 자기 쌍극자 모멘트를 형성하여 퍼텐셜 에너지를 갖게 된다. 이때 전자의 퍼텐셜 에너지는 $E = -\mu B_0 = g\mu_B B_0 m$ 이 된다 ($\mu_B$ 는 전자의 보어 마그네톤, $m$은 스핀벡터, g는 전자의 g-factor). 이때 전자가 가지고 있는 자기모멘트에 제만 효과에 의한 에너지 분리가 발생하고, 교번자계(alternating field)의 에너지가 에너지 준위차와 동등한 조건이 만족되면 전자는 광자 흡수로 $m \rightarrow m \pm 1$ 전이하며 $\Delta m = \pm 1$ 인 선택규칙을 만족한다. 결과적으로 이는 $h\nu = \Delta E = g\mu_B B_0$ 인 조건을 의미하고, 이때 발생하는 현상을 전자 스핀 공명이라고 한다. 이때의 에너지 선폭은 불확정성 원리에 따라 $\delta E \cdot T \geq \frac{\hbar}{2}$이라고 할 수 있고, 공명 조건과 연계하면 관계식은 $\delta B_0 = \frac{\hbar}{2 \cdot g_J \cdot \mu_B \cdot T}$ 으로 얻어지게 된다.

[그림 3-7]은 예비교사 N이 실험 중 확인하고 촬영한 공명 신호의 예시이다. 공명 신호의 확인은 오실로스코프 신호를 통해 이루어진다. 위상이동이 상쇄되었을 때, X-Y 채널 모드에서 대칭적인 신호가 나타나는 지점을 공명이 일어나는 지점으로 파악할 수 있다. 이때의 전기적 값을 기록하고, 기존 이론 및 DPPH시료의 g-factor 이론값과 비교하여 이론을 확인한다.

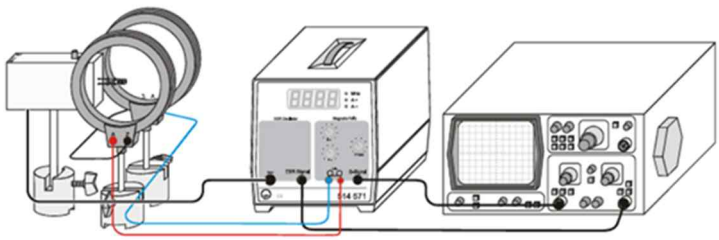



**[그림 3-7] ESR실험의 공명지점에서 나타나는 전기 신호**

한편 원자의 전자는 원자의 핵과 결합되어 있고, 원자 내 다른 전자와 상호작용하기에, 엄밀한 계산에서는 각 상호작용을 모두 고려할 수 있다. 그러나 이는 복잡하여 계산이 어렵기에, 전자의 궤도운동은 분자구조에 의해 거의 상쇄된다고 보고, 이때 전자의 g-factor는 자유 전자의 g-factor와 거의 같은 것으로 이해할 수 있다. 특히 실험에서 사용한 DPPH시료는 질소-질소 결합의 한 원자에서 짝이 없는 홀전자를 가지는 자유 라디컬(free radical) 분자이기에 이러한 이해가 가능하다.

### 다. 실험 장치

ESR 실험 장치는 Leybold사에서 제작, 판매하는 Electron spin resonance at DPPH(모델명 P6.2.6.2)를 활용한다. ESR 실험의 셋업은 아래의 [그림 3-8]과 같다.



[그림 3-8] Leybold 매뉴얼에 제시된 ESR 실험 셋업

실험장치는 크게 오실로스코프, 전원을 공급하고 주파수를 측정하는 ESR 실험 장치, 헬름홀츠 코일, DPPH시료로 구성된다. 전원 공급 장치는 코일에 연결되어 나란한 자기장을 형성하며, 이때 자기장 안에 놓인 DPPH 시료의 공명 신호는 오실로스코프를 통해 출력된다.

### 라. 실험 과정

DPPH 샘플을 헬름홀츠 코일 쌍의 중앙에 위치시키고 ESR 장치를 작동시킨다. 공명 주파수(약 15 MHz)를 설정한 후, 진폭과 위상 이동을 조정하여 ESR현상이 구현될 수 있는 실험 조건을 세팅한다. 오실로스코프는 먼저 이중 채널 모드에서 신호를 관찰한 뒤, 공명 신호가 나타났을 때 XY 모드로 전환하고 두 공명 신호가 정확히 겹치고

대칭이 되도록 위상 이동과 전압을 조정한다. 헬름홀츠 코일에 흐르는 직류전류와 공명 주파수 데이터를 기록한다. 이후 공명 주파수를 일정 간격으로 증가시키며, 새로운 공명 조건에서의 측정을 반복한다.

단 이 실험은 세팅이 되지 않을 경우 실험결과를 도출하기 어려웠기에 앞서 설명한 바와 같이 세팅 과정에서는 조교의 적극적인 도움이 있었다. 예비교사들은 세팅 이후 주파수를 조절하여 공명 현상을 찾아내고, 그때의 데이터를 수집하는 활동을 위주로 수행하였다. 실험의 단계를 종합 정리하면 아래 [표 3-5]와 같다.

**[표 3-5] 자기 공명 실험의 실험 단계 및 내용**

| 단계 | 요소 | 내용 |
|---|---|---|
| 준비 단계 | 목표 | 전자 스핀/핵자기 공명 현상을 확인하고 g-factor을 계산 |
| | 이론 | 외부 자기장에 대한 전자스핀/핵자기 공명 현상 |
| 실험 과정 단계 | 조작 | NMR 서플라이에서 발생되는 자기장의 세기와 진동수를 조절함. |
| | 관찰 | 오실로스코프의 공명 신호를 확인함 |
| | 기록 | 공명 지점에서의 전류와 주파수를 기록 |
| 결론 단계 | 분석 | 자기장 대 주파수의 그래프를 조직하여 g-factor 값을 계산함 |

### 3.1.3.3 빛의 성질 실험: 광전효과, 태양전지 실험

#### 가. 실험의 의의

광전효과 실험과 태양전지 실험은 빛의 성질을 이해하기 위한

실험들이다. 광전효과 실험에서는 빛의 진동수에 따른 전자의 최대 운동 에너지를 측정하여 광전효과의 물리적 원리를 이해하고, 또한 플랑크 상수를 측정한다. 또 다른 실험인 태양전지 실험에서는 태양전지의 특성곡선을 확인함으로써 특성을 파악하고, 현대물리 원리의 공학적 활용 방식을 이해한다. 두 실험은 빛의 성질에 대한 심층적인 학습을 목표로 한다.

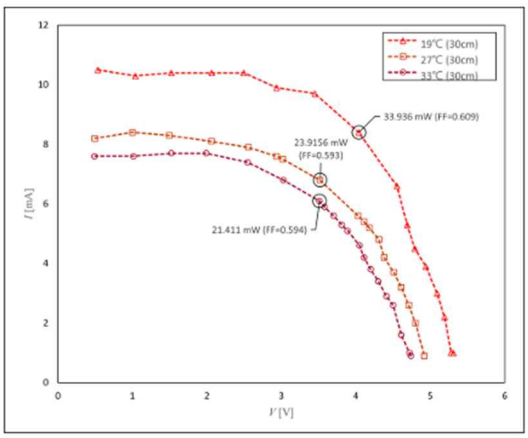
이 두 실험은 빛이 가지는 이론적 성질(입자의 성질 및 에너지 변환 능력)에 중점을 두고 있으며, 실험 결과는 진동수, 전압, 전류 등을 활용하여 분석된다. 두 실험에서는 공통적으로 빛의 본질에 대한 이해를 돕는 목적을 가지나, 광전효과는 빛의 성질에 대한 개념에 초점을 있다면 태양전지는 그 개념의 응용에 초점이 있다는 점에서는 차이가 있다.

### 나. 실험 이론

광전효과는 빛의 양자가 금속 표면의 전자와 상호작용하여 전자를 방출시키는 현상이다. 금속의 일함수($W_0$)는 전자가 금속을 빠져나가는 데 필요한 최소 에너지로 정의된다. 입사된 빛의 에너지가 일함수보다 클 경우, 여분의 에너지는 방출된 전자의 운동 에너지로 나타난다. 이 관계는 아인슈타인의 식 $E = h\nu = KE_{max} + W_0$로 표현된다. 여기서 $h$는 플랑크 상수, $v$는 빛의 진동수, $KE_{max}$는 전자의 최대 운동 에너지다.

실험적으로, 빛의 진동수를 변화시키며 정지 전압을 측정하면, 정지 전압은 빛의 진동수와 선형적으로 증가하며, 기울기는 $h/e$로 나타난다. 이 관계는 $eV = h\nu - W_0$로 설명되며, $e$는 전자의 전하를 나타낸다. 이를 통해 플랑크 상수 및 물질의 일함수를 실험적으로 구할 수 있다.

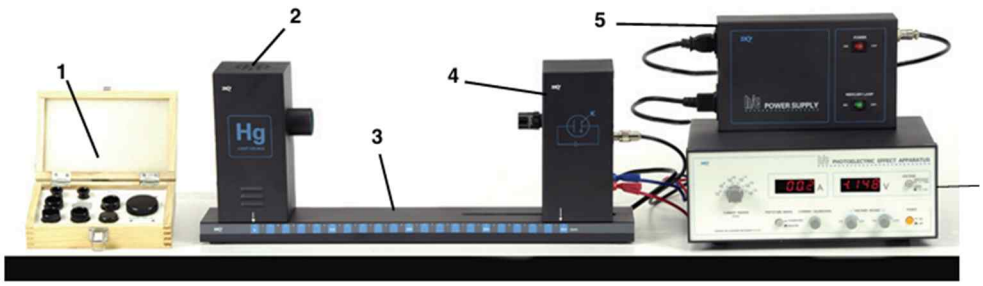
태양 전지는 광전 효과를 응용한 대표적인 사례다. 태양 전지는 광량, 온도 등 여러 환경적 요소에 따라 그 효율과 특성이 달라진다. 실험을 통해 얻어낸 데이터를 통해 특성 곡선을 그림을 통해, 태양 전지의 성질을 확인할 수 있다. [그림 3-9]는 예비교사 F가 실험을 통해 조직한 태양 전지의 특성 곡선으로, 온도에 따른 전압, 전류의 특성을 확인함으로써 태양전지의 발전 효율과 같은 성질을 파악할 수 있다.




[그림 3-9] 태양전지의 특성 곡선

### 다. 실험 장치

광전효과 실험 장치는 PASCO사에서 제공되는 Photoelectric Effect Apparatus (모델명 AP-8209)를 사용하였다. 실험 셋업은 아래 [그림 3-10]과 같다.




[그림 3-10] PASCO 매뉴얼에 제시된 광전효과 실험 셋업

태양전지 실험 장치는 특성곡선을 확인하는 데 강점이 있는 PHYWE사의 Characteristic curves of a solar cell (모델명 4.1.09-01)을 사용하였다. 실험 셋업은 아래 [그림 3-11]과 같다.

[그림 3-11] PHYWE 매뉴얼에 제시된 태양전지 실험 셋업

### 라. 실험 과정

광전효과 실험에서는 빛의 진동수와 정지전압을 측정하여 플랑크 상수를 계산하고, 여러 조건에서의 전압-전류 그래프를 그려 광전효과의 성질을 이해한다. 태양 전지 실험에서는 광원의 세기, 광원의 종류, 온도 등의 조건에 따른 특성 곡선이 어떻게 나타나는지를 탐색적으로 확인해 나가는 일련의 실험들로 구성된다.

종합적으로 두 실험 모두 전기적 값을 측정하여 데이터를 수집하고, 수집한 데이터로 그래프를 조직하거나 수식을 통해 계산함으로써 현상과 물질에 대한 여러 가지 특성들을 확인해 나간다. 실험의 단계를 정리하면 아래 [표 3-6]과 같다.

[표 3-6] 빛의 성질 실험의 단계 및 내용

| 단계 | 요소 | 내용 |
|---|---|---|
| 준비 단계 | 목표 | 광전효과를 통한 현상의 파악<br>(태양전지 실험: 태양전지의 특성곡선 그리기)<br>(광전효과 실험: 플랑크 상수 측정하기) |
| | 이론 | 광전 효과, 태양전지의 특성곡선 |
| 실험 | 조작 | 광원의 색(진동수), 광원의 세기 |

| | | |
|---|---|---|
| 활동 단계 | 관찰 | 빛이 입사하였을 때 회로에 전압이 걸림 |
| | 기록 | 정지전압의 측정 |
| 결론 단계 | 분석 | 진동수-최대 운동 에너지 그래프를 조직하고, 그 기울기를 통해 플랑크 상수를 측정 |

### 3.1.3.4 확률 분포 실험: 맥스웰-볼츠만 분포 실험

#### 가. 실험의 의의

맥스웰-볼츠만 분포 실험은 기체 분자의 운동 에너지와 속도 분포를 모델링하여 미시적 입자의 확률적 거동을 이해하는 데 목적을 둔다. 이 실험에서는 기체 분자의 운동을 유리 구슬로 거시적으로 모델링하고, 유리 구슬이 진동을 통해 분포되는 과정을 확인하여 통계적 분포 현상을 확인한다. 이를 통한 실험의 목표는 맥스웰-볼츠만 분포의 이론적 예측값을 유리 구슬 실험을 통해 나타난 데이터와 비교하여, 통계적 분포의 의미를 학생들이 체계적으로 이해하도록 돕는 것이다.

#### 나. 실험 이론

대규모 기체 시스템에서 기체의 운동은 고전적인 접근법으로 정확히 측정할 수 없다. 기체 입자의 평균 속도($\bar{v}$)는 다음 식을 통해 계산할 수 있다.

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

여기서 $k = 1.38 \times 10^{-23} \mathrm{J/K}$는 볼츠만 상수(Boltzmann constant)이다. 기체 입자의 속도 분포가 가우시안 분포를 따른다고 가정할 때, 다음과 같은 속도 분포 함수를 도출할 수 있다.

$$f(v)dv = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(\frac{m}{2kT}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot v^2\, dv \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

이와 같은 분포를 맥스웰-볼츠만 속도 분포(Maxwell-Boltzmann

speed distribution)라고 한다. 가장 확률이 높은 속도는 다음 식으로 계산된다.

$$v_w = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

이 실험에서, 유리구슬 모델링 실험에서 구슬의 속력은 구슬이 떨어진 거리(s)를 측정하여 알아낼 수 있다. 유리구슬이 떨어진 높이를 h라 할 때 구슬의 속력은 $c = s\sqrt{\frac{g}{2h}}$이 된다. 구슬의 속도 분포는 확률밀도함수이므로, $f(c) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{c_w^3} c^2 e^{-\left(\frac{c^2}{c_w^2}\right)} = \frac{1}{\sum N_i} \cdot \frac{N_i}{\Delta c}$으로 속도 분포 함수를 나타낼 수 있다.

### 다. 실험 장치

실험 장치는 PHYWE사의 Maxwellian velocity distribution (모델명 LEP 3.2.03) 실험 세트를 활용한다. 중요 장치로는 전원 공급 장치, 기체역학 진동 실험 장치, 리시버 챔버로 구성된다. 실험 셋업 시의 모습은 아래 [그림 3-12]와 같다.

**[그림 3-12] PHYWE 매뉴얼에 제시된 볼츠만 분포 실험 셋업**

### 라. 실험 과정

실험은 진동대를 사용하여 유리 구슬을 무작위로 이동시키고, 구슬들이 칸막이 속으로 투입되는 현상을 관찰하는 방식으로 진행된다. 각각의 구슬이 칸막이로 들어가는 분포 데이터를 기록하고 이를 바탕으로 맥스웰-볼츠만 분포 그래프를 작성, 실제 기체 분자 분포와 비교한다. 이 과정은 기체 분자의 미시적 확률 분포 특성과의 유사성을 보여주며, 입자의 움직임이 통계적 원리에 따라 설명될 수 있음을 시각적으로 입증한다. 본 실험은 학생들에게 물리적 확률 분포와 미시적 거동의 개념을 직관적으로 이해할 수 있도록 하는 기회를 제공한다. 실험의 단계를 종합 정리하면 아래 [표 3-7]와 같다.

**[표 3-7] 맥스웰-볼츠만 분포 실험의 단계 및 내용**

| 단계 | 요소 | 내용 |
|---|---|---|
| 준비 단계 | 목표 | 기체분자 모델링을 통해, 미시적 입자의 확률적 거동을 이해 |
| | 이론 | 맥스웰-볼츠만 분포, 기체분자 모델링 |
| 실험 과정 단계 | 조작 | 기체분자가 모델링 된 유리 구슬을 투입, 진동대를 작동, 구슬을 |
| | 관찰 | 각각의 구슬들이 서로 다른 칸막이로 들어가는 것을 확인함 |
| | 기록 | 칸막이별로 몇 개의 구슬이 투입되었는지를 기록 |
| 결론 단계 | 분석 | 개수 데이터를 맥스웰-볼츠만 그래프로 조직, 실제 기체 분자 분포와의 비교 |

## 3.2. 연구 방법

이 연구는 7가지의 현대물리 실험의 학습 및 그에 대한 예비교사의 교육적 고찰 사례를 조사하였다. 즉, 현대물리교육과 실험 교육이라는 두 가지의 주제를 함께 다루었다. 실험 교육에 대한 기존의 연구 논문들은 학생, 예비교사, 현직교사, 전문가 등 다양한 연구 참여자를 대상으로 하며, 또한 그들의 학습과 인식을 조사하기 위해 검사지, 설문지, 면담 등 다양한 연구 방법 및 설계를 활용하였다.

이 연구에서는 그 중에서, 예비교사를 대상으로 중 질적 사례연구 방법론에 따른 연구 방법을 따랐다. 현대물리 개념 측면에서의 구인을 측정하는 데 개발 및 활용된 검사 도구와 척도가 선행 연구에서 활용된 바 있어(McKagan & Wieman, 2006), 이를 활용한 양적 개념 연구의 방법도 취할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 심층적인 질적 연구 접근을 취하였는데, 현대물리 실험 교육이라는 구체적인 현상을 탐색해 나가는 접근이 본 연구의 목적이기 때문이었다. 기존 활용된 척도는 현대물리 영역의 개념 척도를 측정하는 단일 차원의 질문들로 구성되기에, 실험의 맥락까지 함께 고려하는 응답을 이끌어내기에 불충분하다.

실험교육 현장을 실험 보고서 자료를 토대로 구체적으로 탐색한 선행 연구(Windschitl, 2003)에서는 탐색적 사례연구 방법론을 취한 바 있다. 본 연구에서도 마찬가지로 현대물리실험 교육이라는 구체적인 영역을 탐색 및 관찰하고자 하였기에, 해당 연구의 설계 및 방법론을 참고하여 연구를 진행하였다.

### 3.2.1. 사례연구 방법론

교육학 연구에서 사례연구 방법론은 가장 일반적이고, 다양한 목적으로 활용된다(Yin, 2018). 첫째, ‘사례’로 삼는 특정한 현상을 그 맥락과 함께 심층적으로 조사하고자 할 때 활용된다. 둘째, 특정한 프로그램의 전개 과정에 대한 모니터링과 과정에 대한 인과적 설명이 필요할 때 활용된다. 본 연구는 교육적 고찰을 강조한 현대물리실험 수업이라는 특정 프로그램에 참여한 예비교사의 학습 과정에 대한 연구이므로, 사례 연구 방법론이 적합성을 가진다고 할 수 있다.

본 연구에서는 사례연구 방법론을 취한 이유는 다음과 같다. 첫째, 한 사범대학의 실험 수업에서 이루어지는 사고와 활동의 순간들을 포착할 수 있기 때문이다. 둘째, 현대물리 실험 수행 과정의 예비교사 해석과 사고는 복잡하기에, 이를 잘 드러낼 적절한 방법이기 때문이다. 교사의 교육적 해석은 개인의 경험, 지식, 신념, 물리 교육과정 간의 상호작용 속에서 이루어진다. 예비교사의 현대물리 실험 학습에 대한 교육적 고찰 사례는 현대물리실험 교육의 목적에 대한 기존 문헌들의 종합적 논의와 연결되고, 실험 과정에서 휘발되기 쉬운 현장감 있는 실시간의 데이터들을 기반으로 한다. 따라서, 본 연구는 단일 사례 연구로서 예비 물리교사들의 현대물리 실험 경험과 그에 대한 교육적 고찰을 통한 학습 과정 및 결과를 파악하는 데 적합한 방법론을 취했다고 할 수 있다.

한편 단일 사례연구는 통계적 일반화가 아닌 분석적 일반화를 통해 일반화할 수 있는 교훈을 얻고자 노력한다(Yin, 2018). 본 연구의 대상이 서울 소재 사범대학에서 한 학기 기간에 이루어진 특별한 사례일지라도, 연구 자료 및 핵심 결과를 통해 앞으로의 현대물리와 실험 교육 현장에 기여하고 시사점을 도출하려는 분석적 일반화의 목적을 갖는다.

### 3.2.2. 연구 참여자

본 연구의 대상은 서울 지역 사범대학에 재학 중인 예비 물리교사로, 교과 전공실험 과목인 ‘물리교육실험’을 수강하는 물리교육과 학부생 11인이다. 이들은 현대물리 과목 또는 양자물리학 과목을 이미 이수했거나, 또는 같은 학기에 함께 수강 중인 3학년에 해당한다. 이들은 현재 졸업 후 진로를 탐색 중에 있으며 물리 전공생으로 다양한 분야에 관심이 있으면서 명확하게 교사라는 진로를 확정하고 있지는 않으나, 사범대학에서 관련 전공과목을 수강하면서 교육자로서의 전문성을 함양하고 준비하는 과정에 있다고 볼 수 있다.

수업 수강생 15인 중 11인이 연구 참여에 동의하였으며, 이 중 7명은 자발적으로 연구과정에서의 면담에 참여하였다. 자료의 분석에서, 실험 수행 과정에 대한 관찰과 실험 보고서는 11명을 대상으로

분석하였으며, 면담 자료를 활용한 분석은 면담에 참여한 7명을 대상으로 하였다. 면담에 참여한 7명의 예비교사는 아래와 같으며, 연구 과정의 관찰과 면담 과정 중에서 대상자에 대한 질문을 통해 확인한 정보들은 [표 3-8]와 같다.

**[표 3-8] 연구 대상자 중 면담 참여자의 특징 및 배경**

| 예비교사 | 학년 | 복수전공 | 이론수업 수강 | 관심분야 |
|---|---|---|---|---|
| A | 3 | 전기공학 | 현대물리 | 공학 |
| B | 3 | 컴퓨터공학 | 현대물리 | 공학 |
| C | 3 | X | 현대물리<br>양자물리(동시) | 물리학 |
| H | 3 | X | 현대물리 | 교육 |
| F | 3 | 생명과학<br>컴퓨터공학 | 현대물리(동시) | 물리학 |
| N | 3 | X | 현대물리<br>양자물리(동시) | 교육 |
| J | 3 | X | 현대물리 | 물리학 |

본 연구의 참여자들의 과외 및 교육 봉사 등을 통한 교수 경험을 일부 가지고 있었으나, 실제로 실험 수업을 가르쳐 본 적은 거의 없었으며, 학습자로서의 실험 학습 경험만을 가지고 있었다. 참여자들의 실험 학습 경험은 초, 중등학교에서의 과학 학습 경험, 과제연구 등 과학 프로젝트 수행 경험, 대학에서의 실험 수업 수강 경험 등이 있었다. 공통적으로는 물리학 및 물리교육과 전공 실험 수업 수강을 통해 일반물리학 실험, 역학 실험, 전자기학 실험 수업 수강 경험들을 모두 가지고 있었다.

따라서 물리 실험의 기본적인 이해 및 데이터 수집, 분석의 기본적인 기능들은 이미 가지고 있는 상황이지만, 실험을 가르치는 데 필요한 교사 전문성은 매우 부족하다고 할 수 있다.

### 3.2.3. 연구자료 수집

#### 1) 데이터 수집 과정

본 연구는 2023년 2학기 서울 지역에 위치한 한 사범대학의 물리교육과에서 진행된 <물리교육실험> 수업을 대상으로 진행되었다. 학기가 9월부터 12월까지 진행되었고, 학기가 종료된 이후 심층 면담을 실시하였기에 주요 데이터의 수집 기간은 2024년 2월까지였다. 수업이 진행되기 전, 예비교사들의 현재 학년과 이수했던 과목 등의 배경 정보를 확인하기 위한 기본적인 설문 조사를 실시하였다. 이후, 학기가 진행되는 과정에서는 각 실험을 수행한 후의 실험 보고서들을 수집하였으며, 학기 종료 및 평가가 완료된 이후인 2024년 1월, 2월에 면담 참여자 모집을 완료하고, 심층 면담하였다.

#### 2) 교육적 고찰을 강조한 보고서

첫째, 예비교사들이 실험을 수행한 뒤 작성한 실험 보고서를 수집하였다. 실험 보고서의 구조는 (1) 실험의 목적, (2) 수집한 데이터, (3) 데이터 분석을 통해 조직한 표와 그래프, (4) 결과에 대한 물리적 해석이 포함된 실험적 논의, (5) 교육적 관점에서의 해석이 포함된 '교육적 고찰'의 다섯 가지 요소로 구성되었다. 실험 수행 이후 일주일 내에 실험 보고서를 작성 및 제출할 수 있도록 하여 기억이 휘발되지 않도록 하였기에, 현대물리 실험 학습 및 고찰의 과정을 생동감 있게 드러낼 수 있는 연구 자료로서 활용되었다.

#### 3) 개별 면담

보고서의 수집 및 면담 참여자 모집이 마무리된 이후에는 면담 참여자들의 보고서를 검토하여 개별 면담질문지를 구성하였다. 주요 면담 질문은 예비교사들의 실험 경험과 그에 대한 예비교사의 생각과

해석으로 구성되었고, 추가적으로 예비교사별로 작성한 실험 보고서에서 특징적이라고 판단되는 특징을 확인하여 그렇게 생각한 이유와 추가적인 생각들을 함께 질문하였다.

면담 참여에는 총 7인이 동의하였으며, 비대면 플랫폼(Zoom)을 통해 면담을 진행하고 녹음하였다. 면담은 1시간 내외로 이루어졌고 면담 내용은 면담 과정의 메모 및 채팅과 함께 전사되었다.

#### 4) 연구자의 위치

연구자는 6년 전 해당 사범대학에서 동일한 수업을 수강한 경험이 있는 사람으로, 기존에 이 수업이 어떻게 이루어져 왔고 그 학습자가 어떤 형태로 수업에 참여하는지에 대한 이해가 있었다. 그러한 경험 하에서, 기존 수업의 방식의 장단점에 대한 이해를 기반으로 수업의 기존 구조 및 수업 교수자, 수강생들의 학습 기대와 투입 시간을 방해하지 않으면서, 교육적 고찰을 강조할 수 있는 수업 설계를 시도하였다.

연구자가 수업 조교로 배정된 이후, 수업의 개설을 담당하는 담당 교수와 수업의 운영 및 실험 기기의 관리를 담당하는 운영 조교와 각각 해당 수업에 대한 의견을 나누어, 수업에서 변형하고자 하는 바를 함께 논의하였다. 수업이 진행되는 동안에는 예비교사들의 실험 진행 과정을 관찰하면서 실험 수업 준비 및 예비교사의 참여를 지원하고 운영하였다. 수업 현장에서 예비교사들과 꾸준히 소통하여 실험 과정에서 어떠한 문제와 경험을 겪는지 직접 확인 및 기록하며 연구를 수행하였다.

### 3.2.4. 연구자료 분석

질적 연구에서 자료 수집과 분석은 연속적이고 동시적으로 이루어지는 과정이다(Yin, 2018). 본 연구는 관련 분야 연구자와의 지속적인 협의를 통해 설계되고 수행되었으며, 수집된 자료(수업 기록물, 면담 녹음 파일, 참여 관찰 노트 등)는 모두 익명화 및 전사되었다. 면담 내용을 최대한 정확히 이해하기 위해 녹음 파일을 여러 차례 반복 청취하였고, 전사 및 분석 과정에서 떠오른 주요 주제, 아이디어, 연구와 관련된 세부 사항은

메모 작업으로 기록하였다. 이후, 1차 코딩과 2차 코딩을 통해 자료를 축약하고 주제별로 묶어 범주화 과정을 거쳤다(Charmaz, 2015).

연구 과정 중에서 가장 먼저 수집된 자료는 실험 보고서였다. 매주 실험 보고서가 제출되면 이를 각 예비교사별로 정리하여 개개인이 수업 과정에 어떻게 참여해 나가고, 현대물리 실험에 대한 어떠한 경험과 고찰을 해 나가는지 모니터링하였다. 7가지의 실험에 대한 보고서가 모두 수집된 이후에는 각 실험에서 주요 데이터가 되는 '논의' 파트를 추출하여 정리하고, 각 예비교사가 현대물리 실험에서 중요하게 논의한 것들을 추출하였다. 이러한 분석 결과는 개별 면담 질문의 일부를 구성하는 데 참고하였다.

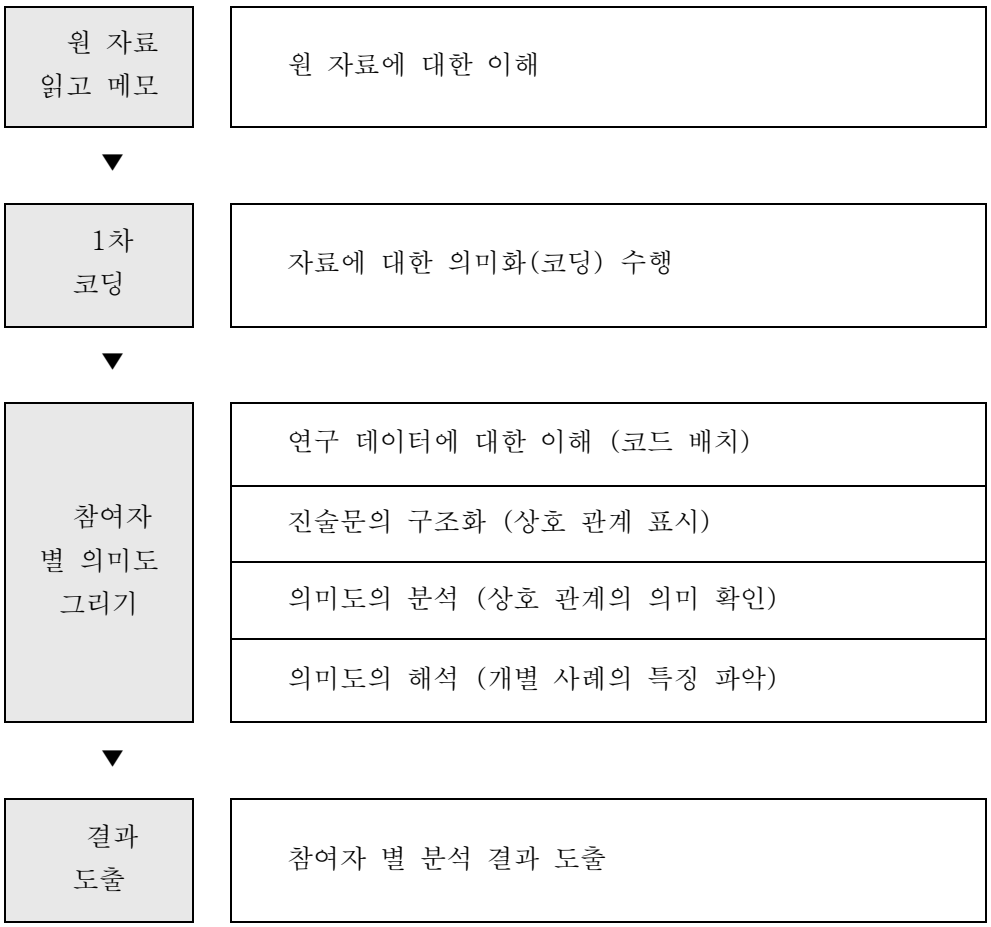
수업 종료 및 실험 보고서에 대한 1차적 분석 이후에는, 개별로 반구조화 면담 질문지를 구성하여 면담하였다. 면담 시 녹음한 자료는 전사 프로그램(클로바 노트)를 통해 전사되고, 연구자에 의해 실제 음성과 전사 자료 대조를 통해 수정 검토되었다. 전사된 자료는 충분한 이해를 위해 반복적으로 검토되었으며, 정확한 이해가 어려운 경우에는 면담자의 확인을 거쳐 정교화하였다.

현상에 대한 다각화된 연구 자료가 존재하였기에, 이 연구 자료들을 동시에 종합적으로 분석하기 위한 시도가 필요하였다. 이를 위해 이질적인 연구자료 간의 관계를 파악하고, 각 자료에 내재된 의미를 심층적으로 탐구하고자 하기 위한 분석 과정을 수행하였다. 실험 보고서 자료에서는 참여자의 학습 결과 및 고찰 결과에 초점을 맞추고, 면담 자료에서는 그러한 결과가 나타나게 된 구체적인 경험을 중심으로 분석하여 상호 보완적인 관점을 제공하도록 하였다. 정리된 두 가지 연구 자료는 질적자료 분석 소프트웨어인 NVIVO 12에 예비교사 개인별로 항목을 나누어 업로드하여 교차 분석하였다.

분석의 첫 단계는 질적 사례연구 방법론(Yin, 2018)을 따라 수행되었다. 코딩 및 범주화 과정을 통해, 이를 통해 예비교사가 생각한 자신의 학습 결과, 찾아낸 현대물리 실험의 특징, 찾아낸 현대물리실험의 가치와 제한점, 현대물리실험의 교육적 활용에 대한 견해라는 연구 문제에서 주요 주제를 확인하고, 각 주제에 대한 세부 내용을 도출하였다.

다음 단계로는 각 예비교사 사례들의 학습 양상을 파악하기 위해,

코드들 간의 상호 연관성을 화살표와 도식을 통해 연결하는 의미도 그리기를 실시하였다. 개념도 그리기 방법(Kane & Trochim, 2009; 조성민 & 백종호, 2015)을 참고하여 현대물리실험에 대한 예비교사의 인식들을 의미화 및 도표화하고, 이에 영향을 준 개별 예비교사의 기존 경험 및 학습 과정을 확인하고 화살표를 통해 연결성을 표현하였다. 이를 통해 개별 학습자들이 현대물리 실험을 파악하고 학습하는 양상의 전반적인 특징을 확인하고, 그 차이점을 드러내었다. 의미도 그리기 방법을 활용한 분석 과정은 아래 [그림 3-13]과 같다.




**[그림 3-13] 연구 과정의 개요**

의미도는 연구 참여자의 인식과 관점을 이해하고, 실험별 인식과

관점의 형성 과정을 비교하기 위해 작성되었다. 우선 참여자 개인별로 작성한 뒤, 실험별로 드러나는 개념들을 비교하여 통합적인 분석을 수행하였다. 작성 과정에서는 중요 발화를 강조하기 위해 큰 글씨로 기록하였으며, 연구자의 해석은 별도의 노트에 기록하여 객관성을 유지하였다. 작성 순서는 참여자 개인을 기준으로, 특정 대상에 대한 인식을 1차적으로 범주화하고, 이를 정리하며 2차적으로 세분화한 뒤 주요 키워드와 발화를 이름을 붙인 뒤 그 관계를 도식화하여 시각적으로 강조하는 방식으로 진행되었다. 이를 통해, 참여자가 실험을 통해 형성한 인식의 구조와 특징을 체계적으로 드러낼 수 있었다.

# 4. 연구 결과

본 장에서는 교육적 고찰을 강조한 현대물리실험 수업에서 일어난 예비 물리교사들의 교육적 고찰의 결과를 실험별로 기술한다. 연구자는 수업 조교로서 오리엔테이션을 통해 교육적인 관점에서 실험에 대해 고민할 것을 명시적으로 공지하고, '교육적 고찰'을 실험 보고서에 작성 및 과제로 제출해 줄 것을 요청하였다. 이러한 변화에 따라 예비교사들은 교육적 고찰을 작성하기 위해 실험 중 드는 관련된 생각들을 메모하기도 하는 등, 교육적인 관점을 활용하여 실험 활동을 바라보려는 노력을 기울였다. 즉 실험 수업에 교육적 고찰을 강조하는 변화는 예비교사가 물리적 학습으로서 '현대물리 실험의 특징 파악'과, 교육적 고찰을 통한 교사 전문성 차원의 ' 반성을 통한 현대물리 실험의 교육적 가치와 활용의 이해'를 동시에 할 수 있도록 하였다.

F: 사실 제가 말했던 이런 실험의 가치들은 보고서를 쓰면서 많이 느꼈죠. (면담)

예비교사들은 자신이 수행한 현대물리실험을 '중등교육에 적용한다면 어떨까?' 라는 질문에 답해 나가면서, 구체적으로는 중등교육에 현대물리실험들을 적용했을 때의 가치와 한계점을 고민하고 실험의 목적과 활용 방안을 생각해 나갔다. 이는 자신이 파악하였던 현대물리 실험의 특성을 교육의 맥락에서 활용하려는 사고의 과정인 교수적 변환(pedagogical transformation)을 시도한 것으로 볼 수 있다.

N: 교육적 논의를 쓰게 한 부분 때문에, 실험을 하면서 현대물리 실험이 학생에게 어떻게 도움이 되는지 등등을 생각했거든요. 그래서 좋았던 것 같아요. (면담)

그 결과는 실험이 종료된 이후 '교육적 고찰' 항목을 작성하는 과정에서 구체화, 정교화되어 실험 보고서에 기록되었다. 따라서 본 연구의 수업 사례에 적용되었던 '교육적 고찰을 강조한 실험보고서'는

선행 연구에서 다루어졌던 것과 같이, 반성적 사고를 촉진하고 기록하는 '반성적 저널'로서의 역할을 수행하였음을 확인할 수 있었다.

## 4.1. 양자 비유 실험

### 4.1.1. 비유의 활용

이론 수업에서는 현대물리 체계와 고전역학 체계 간의 수학적 유사성에 대한 학습 기회는 상대적으로 부족하다. 양자 비유 실험은 고전물리의 체계와 양자물리의 체계에는 서로 유사한 구조와 수학적 유사성이 있고, 따라서 이러한 유사성을 활용한 비유적 해석이 가능하다는 것을 확인시켜 주는 실험이었다. 예비교사는 '비유의 활용'을 직접적으로 학습한 새로운 경험이었고, 신기하고 가치 있는 아이디어로 인식되었다. 이는 Bennett(2001)이 실험 수업의 목적으로 제시하였던 정의적 영역에서 흥미 유발이라는 목적과 연관된 것이다.

> H: 양자역학을 음파의 모습으로 보는 건 굉장히 재밌고 흥미로운 아이디어였고, 그게 실제 결과로도 나오니까 되게 신기했어요. 이런 아이디어가 있구나, 이렇게 보일 수가 있구나. (면담)

따라서 교육적 고찰 보고서에서도 '비유의 활용'에 대한 파악이 가장 많이 확인되었다. 예비교사들은 현대물리에 있어서 현상 자체를 구현하고 파악하는 것이 어렵다고 보았다. 이러한 특성에서, 비유는 현대물리에서 기존에 보일 수 없던 현상을 설명할 수 있는 좋은 교육적 도구가 될 수 있음을 이해하였다.

> B: 양자시스템을 이론적으로 학습할 때 현상적인, 어떻게 일어나는지에 대한 이해가 매우 어렵다. 이러한 현실에서의 경험을 통해 유사한 형태로서 양자 시스템에 대한 그래프나 개념을 이해하는 것은 교육적으로 충분히 도움이 될 것이다. (실험 보고서)

> F: 사실 음파 공명으로 나오는 거라서 양자와는 직접적으로 관련이 있진 않은데, 그래도 파동함수를 실제 파동으로 비유를 시켜서 양자적으로

나오는 걸 보고 '양자'라는 단어의 컨셉을 이해하기 괜찮은 실험 같아요. (면담)

그러나 비유를 통한 학습은 우려점도 존재하였다. 예비교사들은 비유는 오개념을 불러 일으킬 수 있기에 학습 시 각별히 유의할 필요가 있다고 보았다. 둘째, 비유를 통한 학습이 효과적이기 위해서는 학생들이 충분히 잘 알고 있는 내용이 비유물로서 활용되어야 할 것이라는 인식을 보였다.

E: 음파 실험을 입자의 파동함수와 관련하여 해석하는 것은 다소 무리이다. 오해의 소지가 다분하며, 대학생으로서 실험을 수행한 본인 또한 양자역학의 어떤 영역에 대응되는 실험인지 이해하기 힘들었다. (실험 보고서)

H: 학생들이 제대로 해석하기 어려울 것이다. 비유가 어떤 새로운 내용을 이해하는 데 좋은 방법이긴 하지만, 주변에서 볼 수 있는 것들에 비유를 해야 학생들이 이해할 수 있다. 이건 쉽지 않은 비유가 된 것 같다. (실험 보고서)

이는 선행 연구에서 검토한 Kalkanis et al.(2003)의 논의와 유사한 결과다. 그는 세계관적 전환의 측면에서 고전물리와 현대물리의 공통된 특성을 강조하며 가르칠 경우, 학습자가 현대물리의 독특한 사상적 전환을 충분히 인식하지 못하고 오개념을 형성할 가능성이 있음을 지적한 바 있다. 본 연구 결과는 이러한 선행 연구의 결과를 현대물리 실험에서도 동일하게 적용할 수 있음을 보여 준다.

이에 따라 고전물리학과 현대물리학의 유사점과 차이점을 명시적으로 제시하고, 고전물리에서 학생들이 충분히 깊게 이해할 수 있는 비유물을 활용하거나 그에 대한 선행 학습을 진행하는 것과 같은 교수학습 전략을 제안할 수 있다.

F: 실험으로 새로운 걸 알려고 보는 건데, 비유는 이미 아는 걸 더 이해하려고 보는 거잖아요. 그러니까 비유할 내용에 대해 이미 잘 알고 나서 실험에 들어가야 되지 않나 하는 생각이 들어요. (면담)

연구 결과를 종합하면, 예비교사는 단순히 비유를 활용하여 양자 시스템을 이해하는 것을 넘어서 그 교육적 활용에서의 유의점, 교수학습 전략으로서 장단점을 고려하는 교육자로서의 성찰을 보여주었다.

### 4.1.2. 이론의 시각화

예비교사 F는 물리학이 어려운 이유에 대해 고민했을 때, 물리학의 많은 개념이 상상력을 필요로 하는 사고 실험에 기반하기 때문이라고 보았다. 그는 이러한 사고 실험을 수행하는 능력이 학습자들에게 부족하다는 점을 어려움의 원인으로 인식했다.

> F: 제가 물리를 하면서 느낀 게 사실 물리에 많은 부분이 사고 실험이기 때문에, 실험을 안 해도 그나마 생각을 많이 할 수 있는 사람들은 괜찮은데, 과학이 무엇인지 모르고 과학을 하는 경우가 너무 많아요. 제가 생명과학을 처음에 공부했을 때를 생각을 해보면 그냥 세상에 이런 게 있더라, 외우자가 끝이었어요. 그 때 만약에 제가 사고 실험을 직접 할 수 있는 능력이 없었다면 물리도 똑같이 느꼈을 거고, 이걸 좀 해결할 수 있는 게 실험. (면담)

이를 해결할 수 있는 것이 실험 학습 방법에서의 시각화라는 인식을 가졌다. 양자 비유 실험은 양자 현상과 수학적으로 동일한 그래프를 시각화해 주었다. 따라서 이 실험은 비가시적, 형식적인 특성을 갖는 '양자화' 개념을 시각화해 줄 수 있다는 교육 도구로서의 특별한 장점이 있다고 보았다.

> N: 과학 개념을 설명할 때, 안 보이는 것을 시각화하는 방법은 이해를 쉽게 하는 방법이잖아요. 그런 점에서 이건 음파를 가지고 시각화하고, 양자의 특징을 잘 느낄 수 있는 실험이죠. (면담)

예비교사들은 공명 지점들이 서로 나뉘는 현상을 결과 그래프를 통해 시각적으로 확인하였다. F는 시각적 자극이 양자역학에서 '양자화'에

대한 이해를 높이는 데 기여할 수 있다고 보았다. 양자역학에서 '셀 수 있다'라는 개념이 핵심인데, 예비 물리교사들이 상대적으로 이러한 이해가 부족한 것에 문제의식이 있었다. 이때 이 실험은 '나뉜다', '셀 수 있다'라는 양자 개념의 이해를 효과적으로 돕는 전략이 될 수 있다고 보았다.

F: '양자'라고 할 때 보통은 있었는데 없었습니다 이런 슈뢰딩거의 고양이 같은 걸 많이 생각하잖아요. 우리 과 학생들도 그러거든요. 근데 사실 '셀 수 있다'라는 점이 양자의 본질인 것인데, 그걸 이 실험에서 잘 보여준 것 같아요. 딱 나눠져서 실험 결과가 나오잖아요. (면담)

이 시각화 요소는 예비교사의 양자역학에 대한 더 깊은 이해를 가능하게 했다. 예비교사 C의 경우에는 기존의 이론 수업을 통해 무한 퍼텐셜 우물에 대해 추상적인 이해를 가지고 있었는데, 이 실험 수업을 통해 감각적 현상으로 이를 받아들이며 더 구체화된 이해를 형성할 수 있었다고 밝혔다.

C: 이론 수업에서 무한 퍼텐셜 우물 같은 모델을 배울 때, 이런 거 배워서 어디다 쓰냐 그런 생각을 많이 했었어요. 근데 이 실험이 직접적이진 않지만 그래도 소리와 음파를 통해서 더 이해를 할 수 있었죠. 이론 수업이랑 실험 수업이랑 연관이 되는 게 좋았고. (면담)

그러나 양자비유 실험에서 이루어진 시각화는 실제 눈을 통해 직접적으로 자연 현상을 확인할 수 있는 것이 아니라, 컴퓨터를 통한 간접적인 방식의 시각화로 이루어진다. 양자 실험 세트에 연결된 컴퓨터 소프트웨어를 통해 한 번에 최종 결과 스펙트럼이 나타난다. 따라서 예비교사는 어떠한 실제 현상이나 시간에 따른 동적 변화와 상호작용하지 못한 채, 기계가 제공하는 최종 그래프만을 ‘시각화’의 대상으로 확인하는 간접적인 시각화 경험을 가지게 된다. 이러한 ‘컴퓨터를 통한 간접적 시각화’라는 특성에 따라, 많은 예비교사들은 실험을 통해 나오는 결과가 크게 와닿지 않았으며, 체감되지 않았다고 이야기하였다.

J: 실험 자체의 발상은 좋은 편이었는데, 나오는 결과를 결국 컴퓨터로 보는 게, 조금 안 와닿았습니다. 이론이나 실험 설계는 괜찮았는데... 결과를 컴퓨터 그림으로 스펙트럼을 그리고, 측정도 기계가 해주는 게 조금 아쉬웠습니다.

F: 현대물리 실험은 컴퓨터가 많이 찍어줬잖아요, 그게 좀 아쉬웠죠. 컴퓨터 활용하는 수업을 되게 좋아하고 요즘 트렌드로 생각하는 사람이 많은데, 저도 컴퓨터 활용하는 거 되게 좋아하거든요. 컴퓨터 공학을 복전 하고 있으니까 사실 당연한데, 컴퓨터를 활용한 실험수업은 또 다른 얘기인 게, 실제로 할 수 없을 때 컴퓨터를 써야지 실제로 할 수 있는데 컴퓨터를 쓰는 건 저는 독이라고 생각해요.

이러한 간접적인 시각화가 일어나는 상황에서는, 예비교사 B는 개념 설명이 충분히 선행되어야 한다고 이야기하였다. 개념적으로 확인해 낼 그래프의 수식들에 대한 사전 이해가 있어야 실험에서 전달하는 의미에 대한 충분한 이해가 가능하다고 본 것이다. 따라서 추후 교직에 진출하여 이 실험을 가르치게 된다면 개념 설명에 많은 시간 투자를 할 것이라는 예비교사들의 견해를 확인할 수 있었다.

B: 다만, 시각적인 결과가 양자화 개념과 연관되어 있다는 것을 확인하기 힘들어서, 해당 실험을 하는 것이 의미가 있으려면 실험 개념 설명이 충분히 이루어진 다음에 실험을 진행하는 것이 좋다고 생각한다. (실험 보고서)

요약하자면 양자 비유 실험에 대해 예비교사들은 '비유의 활용'과 '이론의 시각화'라는 두 가지를 실험의 특징으로 이해하였으며, 이에 따른 교육적 반성으로는 비유의 활용 시 비유물에 대한 학습자의 이해를 고려해야 하며, 이론의 시각화의 경우 간접성이 높은 시각화일수록 개념 설명이 더 충분히 선행되어야 함을 고찰하였다.

## 4.2. 밀리컨 기름 방울 실험

### 4.2.1. 직접 관측

밀리컨 실험은 대전된 기름 방울의 거동을 현미경을 통해 직접 눈으로 관측할 수 있는 실험이다. 이에 따라 예비교사 B는 실험이 '직관적이다'라는 평가를 하게 되었다. 이는 일어나는 현상을 눈으로 확인하고 그것을 직관적으로 이해할 수 있었음이 예비교사에게 긍정적으로 인식된 것이었다.

> B: 실험들 중에 밀리컨 실험이 가장 직관적으로 다가왔어요. 그게 되게 좋았던 것 같습니다. (면담)

> N: 밀리컨 실험은 보통 우리가 물리실험이라고 말하는 그런 느낌과 좀 달랐어요. 뭔가 기름방울을 움직이고, 조그마한 통에 넣어서 그걸 직접 관찰하고, 그 움직이는 걸 직접적으로 볼 수 있는 부분에서 좀 새롭긴 했고... (면담)

이 실험은 시각적으로 '물리 현상의 아름다움'을 보여 줄 수 있는 실험으로 인식되었다. 실험자의 두 눈을 통해 직접 반짝이는 기름 방울이 움직이는 모습을 확인할 수 있기에, 이는 학습자에게 새롭고 즐거운 경험이 될 것으로 보았다. 따라서 밀리컨 실험은 학습자들에게 흥미를 유발할 수 있는 실험으로 인식되었다.

> N: 기름방울이 현미경을 통해 반짝반짝 보이는 모습, 그러면서 기름방울이 움직이는 모습은 흥미를 유발할 수 있다. (실험 보고서)

이러한 특징은 양자 비유 실험과는 대비된다. 양자 비유 실험에서 시각적으로 관찰한 것은 결과 그래프였던 반면, 이 실험에서는 직접 대전된 입자의 거동을 확인할 수 있었다. 양자 현상에 대한 설명력의 측면에서는 양자 비유의 그래프가 양자의 '나뉨'을 더 잘 확인시켜 줄 수 있는 시각화였다. 그러나 두 가지 시각 경험 중 예비교사들은 밀리컨 실험의 것을 선호하였는데, 이는 실험에서 예비교사에게 더 흥미를 유발하고 실험에서 기대하는 것은 실제 자연 현상을 확인할 수 있는

기회임을 알 수 있다.

### 4.2.2. 과학사적 중요성

밀리컨 실험에서는 과학사적 의의에 대한 논의도 많이 이루어졌던 실험이었다. 밀리컨이 실제로 고안한 실험을 재현한다는 점이 강조되었으며, 이론 수업에서도 밀리컨의 실험은 과학사의 맥락에서 소개된 바 있었다. 따라서 예비교사들은 과학사적으로 중요한 과학자의 행위를 재현하는 그 자체를 의미 있는 것으로 생각하고, 실험을 수행함에 있어 흥미를 가졌다.

> C: 밀리컨 실험은 어떤 역사적인 실험을 재현을 했다, 그거에 끝판왕이었던 실험 같아요. (면담)

> H: 밀리컨 실험은 고등학교 교육과정에서도 나오는 물리학의 역사에서 굉장히 중요한 실험 중 하나이다. (실험 보고서)

특히, 시각을 통한 직접 관찰의 첫 감상은 아름다웠으나, 막상 계속 진행할 때 오히려 실험을 어렵게 만드는 요소가 되었다 예비교사들은 밀리컨 실험의 절차가 생각보다는 체력적으로 힘들다는 것을 발견했다. 예비교사 J는 이 실험의 관측 과정이 눈을 너무 아프게 했고, 실험 절차에서 여러 우여곡절을 겪으며 절차적으로 어려운 실험이었다는 점을 고찰하였다.

> J: 실험하면서 우여곡절이 되게 많았어요. 초점 맞추는 게 굉장히 힘들었고, 실험실 안에 또 바람이 또 있어서 중간에 놓치기도 하고 그랬습니다. 끝나고도 눈에 잔상 남아 있고, 보는데 정신병 걸리는 줄 알았어요. (면담)

이러한 절차의 어려움은 밀리컨 실험의 '재현성'이라는 특성과 결합되어, 과학자들도 이러한 어려움을 겪었음을 인식하게 하였다. H는 밀리컨 실험에서 실험 과정적으로 많은 어려움을 겪었던 예비교사였다. 그는 자신의 우여곡절의 경험을 과학사적 의미와 연결지어 고찰하였고, 이를 통해 밀리컨도 과거에 이러한 노력을 통해 실험을 해 냈을 것임을

인식하게 되었다고 밝혔다.

H: 직접 해 보니까 사람이 할 짓이 아니다 싶더라고요. 이 실험을 도대체 어떻게 하라는 거지? 라는 생각이 들고 솔직히 힘들었어요. 기름 방울을 한 시간을 보고 나니까 한 이틀은 눈이 아파가지고 안 넣던 안약까지 넣었어요. 하고 나니까 이걸 했던 밀리컨은 도대체 어떤 사람일까? 라는 생각이 들기도 해서, 실험 방법의 중요성을 알려 주는 실험이라고 보고서에도 적었습니다. (면담)

이 사례를 통해, 과학사에서 등장하는 결정적 실험 등의 재현 실험에 있어 그 절차가 인상 깊은 경우에 실험활동 경험은 학습자가 과거 과학자의 활동과 노력을 인식하는 계기가 될 수 있음을 확인할 수 있다.

### 4.2.3. 기본 물리량의 확인

예비 물리 교사는 실험 활동을 통해 기본 전하량의 존재성을 확인하며, 이론으로만 이해했던 개념의 실재를 확인하였다. 이 경험은 의미 있고 신기한 경험으로 다가왔다. 추상적으로만 이해하던 개념을 실험적으로 검증하는 경험을 통해, 보이지 않는 세계에 대한 신뢰와 이해가 증대되었다. 이는 현대물리 실험 활동이 예비 교사에게도 추상적인 현대물리의 이론을 현상으로서 이해하는 데 도움을 주고, 존재성에 대한 신뢰와 신념을 형성시켜 주는 중요한 학습 경험임을 보여 준다.

B: 교과서에서는 되게 짧게 지나가는 부분인데, 기본 전하량이 세상에 실제로 존재한다는 게 신기한 것 같아요. 저희한테 안 보이는 세상이잖아요? 이론에서 그렇다고 하니까 믿는 것인데, 정말 기본 전하라는 게 있다는 걸 확인하게 되면 눈에 보이지 않는 걸 확인한 셈이 되니까, 그런 게 좀 신기한 것 같네요. (면담)

이는 고등학교 학습자에게도 유의미할 수 있을 것으로 인식되었다. 예비교사 B의 경우에는 실험을 통해서만 이러한 세상을 이루는 기본 원칙과 현상에 대한 신기한 감정과 이해를 얻을 수 있다고 보고, 학습자에게 이론 수업에서 얻지 못하는 학습 경험을 제공할 수 있다고 보았다.

B: 뭔가 세상을 이루는 기본 원칙 같은 거니까. 신기함을 느낄 수 있다면 학생들에게 좋은 경험이 되지 않을까? 싶기도 합니다. 그런 걸 느끼는 거는 실험을 통해서만 가능한 것 같다고 생각이 드네요. 저 같은 경우도 내용 자체는 정말 많이 들어 봤었지만 결국에는 실험을 하면서 무언가 새로운, 느낌을 받았기 때문에 이거는 자기 손으로 직접 해야지 얻을 수 있는 감정이 아닌가 싶습니다. (면담)

예비교사 E는 이 실험이 교육적으로 매우 가치가 있는 실험이라고 평가하며, 학생들이 기본 전하량의 존재를 인식하는 데 효과적인 실험이 된다고 보았다. 예비교사 B는 학습자들이 이러한 최소 전하량의 존재를 인식하는 효과가 단순히 이론을 학습하는 것보다 더 근본적인 이해를 형성시켜 줄 수 있고, 따라서 최소 전하량의 존재를 잊고 전하량에서 가질 수 있는 오개념을 해결하는 역할을 할 수 있다고 평가하였다.

E: 교육적으로 매우 가치가 있는 실험이라 생각한다. 이는 학생들이 기본 전하량의 존재를 인식하는 좋은 실험이 될 수 있다. (실험 보고서)

B: 예를 들어서 저희가 이 기본 전하량의 배수로 이루어질 수 있다 라는 지식을 알고 있어도, 그냥 뭔가 얘의 전하량은 기본 전하량보다 더 낮은 0.5 뭐 그런 거라고 했을 때 그냥 무의식적으로 넘어가기 쉬울 것 같은데, 이런 거를 좀 실험적으로 확인하고 그걸 한번 느꼈으면 그런 오개념을, 자연스레 좀 뭐랄까 근본적으로 없앨 수 있는 것 같은 생각이 듭니다. (면담)

### 4.2.4. 실험 설계의 창의성

밀리컨 기름 방울 실험에서 예비 물리교사들에게 특별히 매력적으로 다가왔던 요소는 실험의 설계에 담긴 아이디어가 창의적이고 획기적이었다는 점이었다. 실험 설계는 Kozminski et al.(2014)가 제시한 대학 실험의 학습 결과 중 하나로, 문제를 해결하기 위해 실험을 개발하는 과정을 의미한다.

밀리컨은 전하량의 양자화를 확인하기 위한 실험을 구성하고 대전체를 결정해야 하는 문제를 기름방울을 분무로 만들어 전기장 속에 위치시키는 실험 설계의 방식과, 여기에서 종단 속도에 도달했을 때의

힘의 평형 조건을 활용하는 물리적 논리의 방식으로 해결하였다. 이러한 밀리컨의 실험 설계를 따라 재현해 본 예비 물리교사들은 이 속에서 '실험 설계의 창의성'을 확인할 수 있었다.

F: 물리학을 전공하고 교육 분야에 있는 대학생으로서 이 실험은 정말 즐거웠다. 전하 측정을 위해 전기장과 종단 속도를 사용하는 이 실험의 접근 방식은 우아한(elegant) 실험 방법이었다. 물리학 실험의 본질을 명확하게 반영하고 있다. (실험 보고서)

F: 실에 꼬이는 힘을 이용해가지고, 중력이나 전자기력 계산하는 그 실험이 있었잖아요. 있었죠 그래서 이제 중력 상수라는 아주 작은 그러니까 아주 작은 값 그러니까 굉장히 스케일이 작은 값을 실제로 뽑을 수 있다는 것도 그런 실의 힘이 있기 때문에 가능한 건데, 얘 같은 경우도 그런 식으로 실제로 볼 수 있는 것을 바탕으로 이런 아주 작은 값들을 얻어낸다는 게 조금 흥미로운 포인트였죠. (면담)

특히 밀리컨 실험의 결과를 해석하고 결론을 도출하는 논리적 전개의 과정도 좋았던 점으로 꼽혔다. 물리적인 논리들을 거쳐서 최종적인 '전하량의 양자화' 라는 해석까지 나아가는 과정이 인상적이었고, 물리학과 실험에 있어 중요한 부분이자 물리학적으로 큰 의미를 가진다는 점을 이야기하였다.

N: 계산을 할 때, 되게 여러 과정을 거쳐서 최종적으로 구현했잖아요. 반지름을 측정하고 뭐를 측정해서 결국 최종적으로 전하량이 나오는 거였는데, 만약에 어떤 걸 바로 구할 수 없으면 그거를 구할 수 있는 다른 물리적 논리를 또 쓰고, 그렇게 연쇄적으로 보는 게 좋았어요. (면담)

이러한 실험의 설계 속 창의성, 논리적 전개를 통한 이론의 도출이라는 밀리컨 실험 속의 요소들은 지식이 만들어지는 과정에 대한 내용이다. 이는 학습자에게도 가치 있고, 교사가 되어서 가르쳐야 하는 일로 인식되었다. 특히 실험 설계가 매우 좋은 실험이기에, 예비교사 F의 경우에는 이를 더 극대화하는 방식으로서 실험 설계도 직접 수행해

보는 활동을 함께 진행할 수 있다고 바라보았다. F는 교사가 되어 이 실험을 학교에서 가르친다면, 다음과 같은 구조로 실험을 가르치는 것이 좋을 것이라고 밝혔다.

> F: 여기서 (1) 이 값이 어떻게 나왔는지 추적을 해보고 (실험 속 장치들이 어떻게 활용되었는가?), (2) 그 과정에서 이제 어떤 장치들이 이제 들어가 있는지 조금 요약을 해보고, (3) 나라면 어떻게 실험을 설계를 해서 이 값들을 뽑아낼 수 있을까? 를 한번 생각을 해보고, (4) 한번 직접 실험을 설계하고 해보자라고 하는 활동을 할 것 같아요. 그리고 (5) 활동을 하고 나서 우수한 과제 몇 개랑 좀 창의적인 과제 몇 개 발표를 한 다음에, 마지막으로 (6) 교사가 첨언을 해 주는 과정으로 수업 진행을. (면담)

요약하면 밀리컨 기름 방울 실험에 대해 예비교사들은 '직접 관측'과 '과학사적 의의', '기본 전하량의 존재 확인', 그리고 '실험 설계의 창의성'이라는 네 가지 요소를 교육적 고찰의 결과로서 얻었다.

## 4.3. 자기 공명 실험: ESR, NMR

### 4.3.1. 이론의 높은 난이도

자기 공명 실험은 예비교사들에게 이론이 어려운 실험이었다. 예비교사 J는 NMR 실험에 대하여 선행 지식들이 가장 많은 실험으로서, 이론을 제대로 이해하는 데 난이도가 높은 실험으로 평가하였다.

> J: 선행돼야 되는 지식이 굉장히 많아요. 일단 제가 쓴 보고서에서 필요한 이론만 해도 이제 슈뢰딩거 방정식에서 상자 속의 입자의 스퀘어 우물, 거기에서 미분 방정식 푸는 방법도 알아야 이해가 될 거고. (면담)

예비 물리교사들은 이 실험에서 다른 실험에 비해 풍부한 고찰 내용을 기술하지 못하였는데, 사후 면담을 통해 그 이유를 파악할 수 있었다. 예비교사들은 요리책(cookbook) 형태로 작성되어 있는 실험 매뉴얼의 단계에서 요구하는 과정을 하나하나 잘 따라서 수행해 냈으나, 이

실험에서 자신이 정확히 어떠한 것을 하고 있는지 이해하기는 어려웠다고 평가하였다. 가장 큰 많이 나왔던 반응은 '무슨 실험인지 도통 모르겠다' 라는 것이었다. 이러한 과정에서 예비교사들은 단순 조작의 경험을 했을 뿐, 실험을 통한 큰 의미를 찾아내지 못했다는 것을 면담을 통해 밝혔다.

A: 실험을 하긴 했는데 사실 이해를 정확히 못하고 해가지고, 보고서를 제대로 못 쓴 것 같긴 해요. 개념을, 정확히 개념과 실험이 어떻게 정확히 관련이 있는지라고 해야 되나? 그런 쪽 이해를 정확히 못 했었고, 그래서 그냥 실험 매뉴얼에서 이제 시키는 대로 그냥 따라만 했던. (면담)

C: 뭐를 이제 구하라는 건지 잘 모르겠고, 그냥 매뉴얼에서 이걸 시키니까 그냥 이거 과정 그대로 따랐죠. 얼추 이제 값을 구했더니 매뉴얼에 어떤 이론 값과 비슷하게 나왔고, 그러면 아마 이 값이 맞겠구나 해가지고 진행했던 것 같아요. (면담)

그 원인으로 예비교사들은 '이론에 대한 사전 지식이 없어서 의미 파악을 하기 어려웠음'을 꼽았다. 특히 같은 학기에 개설된 양자역학 전반부의 이론 수업을 함께 수강한 예비교사 C의 경우에는 이론 수업에서 관련 단원을 공부하고 나서야 비로소 과거에 했던 실험에 대해 이해할 수 있었다고 말하기도 했다. 이러한 경험은 예비교사들에게 실험에서 배경 이론의 중요성을 학습하게 하였다.

A: 사실 이해를 정확히 못 하고 실험에 들어가서 실험 보고서를 제대로 못 쓴 것 같긴 해요. 정확히는 개념과 실험이 어떻게 관련이 있는지, 그런 부분 이해를 정확히 못 했어요. 그래서 그냥 실험 매뉴얼에서 이제 시키는 대로 그냥 따라만 했던 거 같아요. 원래 값이 무엇이고, 그게 어떤 식으로 어떤 의미를 가지고 있는지 정확히 알아야 설명할 수 있을 텐데, 그런 걸 잘 모르겠으니까 설명하기가 애매한. (면담)

C: 제가 양자물리 이론 수업과 이번 실험 수업을 동시에 수강을 했는데요. 그러다 보니 어느 정도 이제 좀 양자 역학에 대한 지식이 쌓인 수업 후반부에, 곱씹어보니까 아, 이게 이런 의미였구나! 하는 순간이 있었습니다. (면담)

이론의 중요성을 느끼게 된 예비교사들은 실험 학습자가 배경 지식을 가지는 것이 매우 중요함을 이해하였다. 따라서, 자신들이 실험을 수행한 대로 학습자들이 실험을 수행하게 된다면 실험에서 유의미한 학습이 일어나지 않는다는 생각을 갖게 되었다.

J: 그냥 잘 모르고 하면 이제 진짜 아무 의미없는 행위가 되는 거죠. 대충 이제 보고서에 이 이론을 잘 모르면 대충 보고서 읽고 엑셀에다가 이제 대충 방정식 넣고 대충 결과값이 잘 나오는지 아닌지만 확인하는 아무런 의미없는 행위가 되는 것 같아요. (면담)

H: 오차 오류가 일어났을 때 결과가 어떻게 나오는지를 알아야 그리고 해석할 수 있어야 저희가 실험한 결과를 설명할 수 있다는 거를 저는 이 실험에서 거의 처음 느껴봤던 것 같습니다. (면담)

특히 예비교사 H는 자신의 학습 결과를 통해, 교사교육 차원에서 이 실험은 교사들에게 실험에서 학생에 대한 이해를 높여 줄 수 있는 실험으로 보았다.

H: 교사들은 솔직히 중고등학생들이 하는 실험들에 대한 이론들은 바삭하게 알고 있는 상태이고, 그렇게 어렵지도 않은 내용이다 보니까 다 알고 있는 상태에서 실험을 하죠. 근데 중고등학생들의 입장에서는 이론을 완전하게 알고 있지 않은 상태에서 실험을 하는 사람, 학생들이 분명히 있을 거고, 어떻게 보면 그런 학생들이 어떻게 실험을 할 때 느끼고 어떻게 생각하게 되는지를 경험할 수 있는 계기가 되지 않을까라는 생각을 했었습니다. (면담)

이러한 유형의 실험에서는, 더 과정에 대한 집중적인 교사의 지도가 필요하다고 보았다. 특히 실험 과정에 있어 공명 현상을 해석하는 과정이 내용적으로도, 의미를 찾기도 어려웠기에 예비교사 F는 이 과정에 힌트와 같은 적절한 교육적 장치와 밀착 지도가 필요할 것이라고 생각하였다.

F: NMR 같은 경우는 이 실험을 실제로 해봤거나 잘 알고 있는 사람들이

딱 붙어서 이 실험에서 NMR이 이제 detect(감지)가 됐다라고 하는 criterion(기준)을 알려주는 그런 것부터 시작을 해서, 데이터가 나왔으면 이상하면 왜 이상한지 한번 힌트를 줘보고 약간 그런 식으로 해야 할 것 같아요. 볼츠만 실험에서는 그렇게 생각 안 했는데 얘는 뭔가 과정 전체에서 딱 붙어서 알려줬으면 좋겠다는 생각을 했었어요. (면담)

이는 예비교사가 실험에 대한 교육적 고찰을 통해 실험에서의 이론적 어려움을 이해하고, 이를 해결하기 위한 실험의 교수학습 방식의 개선점을 고민했던 사례라고 볼 수 있다.

### 4.3.2. 실험자의 개입이 불가능한 실험 설계

자기 공명 실험은 실험 장비가 복잡하지 않고 조작이 직관적이어서, 예비교사들은 실험 과정의 기술적 어려움은 크게 느끼지 않았다. 그러나 이러한 간단함은 동시에 실험 장비의 내부 작동 원리를 이해하기 어려운 블랙박스 형태로 느껴지게 하였다.

H: 이 실험에서는 실험 결과가 무엇인지 파악하는 것이 생각보다 쉽지 않다. 축이 툭 튀어나오는 부분이 있다고 해서 그 부분을 만드는 주파수가 무엇인지, 전류발생기에서 보여주는 전류는 어디에 들어가고 주파수는 어디에서 작동하는지 파악하는 게 어렵다. 학생들은 이 과정을 비교적 간단한 실험에서부터 찬찬히 배워 나가야 할 것이다. (실험 보고서)

실험 결과를 모니터를 통해 간접적으로 관찰해야 한다는 한계가 지적되었다. 이로 인해 실험의 체감 효과와 몰입도, 놀라움이 다소 떨어질 수 있다는 우려가 제기되었다. 이러한 점은 학습자의 흥미와 몰입을 높이기 위한 보완책의 필요성을 시사한다.

J: 이제 어떤 것을 이제 주도적으로 했다는 생각을 하게 하려면 처음부터 끝까지 본인이 개입 유도를 해야 된다고 생각하거든요. 마지막 단계에 이 측정의 단계에서 기계가 그냥 숫자를 이렇게 딱 내뱉는 거랑 자기가 본 이 위치에 있는 거 길이를 재가지고 계산을 하고 길이를 재거나 유리구슬 개수를 재거나 하면서 이제 측정 결과를 이제 표시를 하는

게 주도적인 측면에서 차이가 있다고 생각합니다.

J: 밀리컨, 볼츠만 실험은 관측자가 직접 개입을 해서 측정을 하기 때문에 그게 훨씬 주도적으로 이제 실험을 하고 있다는 느낌을 들게 했죠. 이제 그리고 뭐라 해야 되지... 신뢰성의 정도랄까? 물론 이제 기계를 못 믿는다는 건 아니지만, (이 실험처럼) 이제 기계에서 숫자를 딱 표시한 거랑 이거 직접 이거를 확인을 하고 이제 개수를 세 가지고 하는 거로 확신의 정도가 조금 다르다고 생각을 해요.

이러한 특성은 실험자의 낮은 행위주체성과도 연결된다. 자기 공명 실험에서는 실험자가 장비의 설정이나 데이터 수집 과정에서 능동적으로 개입할 여지가 제한적이며, 대부분의 과정이 자동화된 장비에 의존한다. 이로 인해 실험자는 실험 과정에서의 능동적 참여나 탐구 경험을 충분히 느끼기 어렵고, 결과 해석 또한 장비가 제공하는 데이터에 의존하게 된다. Leach(2002)가 주창한 실험이 가져야 할 본질적 목적을 되돌아보았을 때, 이 실험은 학습자가 실험의 의미를 이해하는 주체로서 과학자(scientist)가 되는 데 기여하기보다는, 장비의 작동을 조작하고 관찰하는 기술자(technician)의 역할에 머물게 할 가능성이 있기에 실험실습에 부합하지 않는 형태로 평가할 수 있다.

또한 흥미를 유발하기 어려운 실험으로 실험 자체가 흥미를 끌지 못한다는 의견을 보였다. 특히 결과가 직관적으로 이해되지 않을 경우 학습자의 흥미를 저하시킬 수 있다는 우려가 제기되었다. 이러한 점은 실험 설계 및 학습자 참여 유도를 위한 교육용 실험에서의 새로운 접근 방식이나 개선이 필요함을 시사한다.

J: 배경 이론을 알면 실험을 할 수 있긴 있을 텐데요, 근데 그럼에도 걱정되는 건 저한테는 실험이 좀 재미가 없었던... (면담)

### 4.3.3. 첨단 기기의 활용

예비교사들에게 자기 공명이라는 현상의 구현은 처음 확인하는 경험이었다. MRI와 같은 장치에서 자기 공명 현상을 이용한다는 사실을 이해하고 있었으나, 실제로 이 현상이 어떠한 메커니즘에서

발생하는지에 대한 지식과 경험은 없었다. 이 실험은 공학적 기기를 통해 현상이 구현될 수 있는 공학적 메커니즘을 확인하는 학습의 기회가 되었다.

B: 강한 외부 자기장의 주파수가 핵자기의 주파수와 같아졌을 때 에너지의 강한 흡수가 일어나는 핵자기 공명 현상을 실험적으로 관측하는 것 자체가 매우 신기한 일이다. (실험 보고서)

예비교사들에게는 이 현상을 구현하는 실험 기기가 특히 신기하게 다가왔다. 새로운 기기의 사용 경험을 제공하는 것 자체가 실험자로서 의미 있는 학습이었다(Wilkinson & Ward, 1997).

H: 예전엔 못 봤던 실험 장비들이 대학 실험실엔 있잖아요. 그걸 보고 세팅하고 세팅을 확인하면서 그런 체계를 만들 수 있다는 것도 알고, 재밌다. (면담)

예비교사들은 이러한 기기를 활용하는 것은 학습자가 MRI와 같은 물리학의 공학적 응용에 대해 이해하는 경험이 될 수 있다고 보았다. 예비교사 B는 이 실험을 통해 학습자들에게 과학과 기술의 연결성을 이해할 기회를 제공할 수 있다고 보았다. 예비교사 F는 학문 간 연결성도 고려하여, 다른 학문에 기여하는 물리학적 방법론을 함께 배울 수 있다고 생각하였다.

B: 눈에 보이지 않는 원자 단위의 현상을 실험적으로 보여주는 것은 교육적인 관점에서도 기대하는 바가 작을 수가 없다. 자기공명 현상은 의학에서의 중요한 장치인 MRI의 핵심 기술이기 때문에 과학과 의학과의 관계성, 또는 더 나아가 과학에서의 한 실험이 인류에게 중요한 영향을 미칠 수 있음을 보여주는 데에 좋은 실험이 될 수 있다고 생각한다. (면담)

F: 아무래도 NMR이 그 어떤 개념적인 측면에서도 물리학이 되게 중심적으로 다루어지긴 하지만, 그거랑 별개로 다른 데서 많이 쓰이잖아요. 그 점을 생각을 해보면, 이제 물리학의 방법론이 화학과 생물학과 어떤 그 이외의 그런 재료공학이라든가 그런 여러 가지 학문들에의 기

여를 알 수 있다는 그런 것들을 배울 수 있지 않나라고 생각하고 있습니다. (면담)

첨단 기기를 활용한 것에 대해서 교육적 한계점 또한 지적되었다. 이 실험기기들이 첨단이라는 특성은, 다른 한편으로는 복잡하다는 의미를 내포한다. 따라서 실험기기를 활용함에 있어 그 복잡함과 내부의 원리가 직관적으로 보이지 않음, 즉 블랙박스(blackbox)와 같은 특성이 있음을 파악하였고, 이에 대해 현대물리 실험 교육에서는 구체적인 동작의 원리에 대한 지도가 더 강조되어야 한다는 점을 반성하였다.

H: 비교적 더 장치 자체가 복잡하고 어려워지는 이 현대물리 실험에서는 좀 더 왜 이런 것들이 왜 이렇게 되는가? 라는 원리를 설명하는 게 더 중요하지 않을까라고 생각을 했습니다. 직접 데이터 나오고 그래프 그려보고 하는 작업들은 다른 실험에서도 그리고 훨씬 간단한 역학 실험 같은 거에서도 해볼 수 있는 건데, 현대물리 실험은 이제 사용하는 기기가 직관적으로 보이지가 않다 보니까 원리 같은 게 그런 것들을 설명해 주는 게 조금 더 훨씬 더 중요하다고 생각해요. (면담)

요약하면, 자기 공명 실험인 ESR, NMR 실험에 대해 예비교사는 그 실험의 특징으로 (1) 이론의 높은 난이도, (2) 실험자의 개입이 불가능한 실험 설계, (3) 첨단 기기의 활용을 파악하고, 그에 대한 교육적 반성으로 (1) 배경 지식의 중요성, (2) 실험자가 개입할 수 있는 실험 설계의 필요성, (3) 기기의 세부 원리 학습의 필요성을 인식하였다.

## 4.4. 빛의 성질 실험: 광전효과, 태양 전지

### 4.4.1. 형식화된 이론과 실재의 연결

실험의 목적 중 하나는 이론과 실재하는 자연을 연결해 준다는 점이다(Welzel et al., 1998). 이는 실험이 과학 내용의 차원에서 이론에 대한 이해를 높여줄 수 있음을 의미한다.

광전효과 실험과 태양 전지 실험은 고등학교 교육과정에서 배운

경험들이 있었기에, 현대물리 실험들 중에서 가장 이론이 쉬운 실험으로 꼽혔다. 따라서 예비교사들에게 이 실험들은 고등학교에서 가장 수업할 수 있을 법한 실험으로 평가되었다.

F: 광전효과는 유일하게 고등학교에서 써먹을 수 있는 실험이죠. 직접이요. 왜냐하면 내용이 쉬워서. (면담)

그러나 광전효과의 현상은 물리교육을 전공하는 대학생들에게도 낯설고 새롭게 느껴지는 현상들이었다. 기존의 이론 수업 또는 고등학교 물리학 교재를 통해 광전효과의 이론은 잘 알고 있었으나, 실험을 통해 실제로 광전효과 현상을 주의 깊게 보는 것은 처음 있는 일이었다. 실험 수업은 이러한 예비교사에게 현대물리 현상을 새롭게 경험하고, 친숙해질 수 있는 기회가 되었다.

A: 고등학교 물리에서 광전효과에 대한 실험 그림 같은 거는 많이 보는데, 관련해서 실험을 할 수 있었던 건 처음이라 새로웠던 것 같아요. (면담)

예비교사들은 광전효과 이론에 대해 교과서 상의 그래프와 비교하여 실험의 결과를 확인할 때 장점이 있다고 보았다. 특히 이 실험에서는 앞선 양자비유 실험에서의 시각화와 달리 '이론적으로 배운 것이 실제 세상에 존재한다'라는 측면에서 실험을 통한 현상과의 상호작용의 장점이 논의되었다. 이론적으로 광전효과를 미리 알고 있으나, 이 현상이 실제로 구현되는 것을 직접 확인한 것은 예비교사에게 이론에서 말하는 현상이 실재한다는 이해를 제공하였다(Welzel et al., 1998).

F: 교과서에 있는 그래프를 실제로 볼 수 있는 게 좀 크죠. 책에 있는 게 그 책에 있는 그래프나 그런 것들이 실제로 있는 그러니까 실제 세상에 있는 것들이라는 그런 의미를. (면담)

예비교사들은 현상을 관찰한 것에서 더 나아가, 과학 원리와 개념에 대한 세부적인 이해를 향상시킬 수 있었다. 특히 기존에 알고 있던 이론 체계에서 놓쳤던 부분을 파악하고 더 세부적인 이론의 작동 방식까지도 이해하는 데 도움이 되었다고 밝혔다.

N: 예전에 만들어진 이론으로 학습했을 때는 이 현상을 다 이해했다고 생각했던 것 같아요. 그런데, 직접 실험을 함으로써 오히려 만들어진 이론 체계에서는 보이지 않았던 광전효과의 세부적 원리들을 모른다는 사실을 파악할 수 있었고, 현상을 더 깊게 이해할 수 있었어요. (면담)

N: 고등학교 때는 그냥 저 이론을 알아서 정지 전압 문제 푸니까 그냥 문제 풀면 그냥 그렇게 하면 되고 그 정도만 이해하고 있으면 되잖아요. 근데 실험을 하다 보니까 뭔가 전자가 튀어나오면 그 전자는 어떻게 되는 거지? 약간 전자가 다시 들어가나 뭐 이런 질문이라던지 그냥 되게 뭔가 약간 나 잘 아직 모르네 이런 느낌을 많이 받았던 것 같고. (면담)

광전효과는 기본적으로 자연에 대한 현상론적 이론이기에 현상에 대해 이해하는 것이 학습에 있어 핵심적이다. 그러나, 이론 수업에서 학습한 광전효과 현상은 그림과 회로도와 같은 교과서 속 표상들을 통해 파악한 현상들이었다. 여기에서는 축약되어 확인할 수 없었던 현상들은 학습하지 못한 현상이고, 실험에서만 확인할 수 있었던 것이었다. 예컨대 실제 빛이 어디서 발생하고 어디에 얼마나 입사하는지 등, 교과서에서 다루지 않은 세부적인 체계들까지 공부하는 기회가 되었다. 예비교사가 이론 수업에서 학습하는 지을 충분히 이해하더라도, 학습하지 못한 주변적, 잠재적 지식들이 존재할 수 있으며 실험 활동은 이를 보충적으로 학습할 기회를 제공해 준다. 특히 본질적인 개념을 다루는 현대물리의 경우에는, 이러한 실험학습의 기회는 형식적 측면이 강조되는 이론 수업을 보완하는 데 효과적일 수 있다.

특히 플랑크 상수라는 값에 대한 더 깊은 학습이 가능한 실험이라고 보았다. 예비교사 A는 고등학교 물리 교육과정에서는 플랑크 상수가 단순히 주어진 값으로 추상적으로 제시되지만, 실험을 통해 이 상수가 유도되는 과정을 경험한다면 그 의미를 보다 깊이 이해할 수 있다고 보았다. 이를 통해 현대물리에서 플랑크 상수의 의미를 학습자들에게 효과적으로 전달할 가능성을 제안하였다.

A: 중력 상수 같은 건 그래도 식을 통해서 어느 정도 이게 나왔는지 알 수가 있는데, 플랑크 상수는 사실 고등학교 버전에서 그냥 던져져 있는

값이니까 이거를 그냥 한번 보는 것도 의미 있다는 생각이 들어요. (면담)

### 4.4.2. 공학적 기기의 활용

태양 전지를 활용해본 경험은 과학기술적으로 응용도가 높은 실험 경험을 제공하였다. 자기공명실험에서의 경험과 마찬가지로, 예비교사들은 공학적 기기를 활용하는 것은 학습자가 물리학의 공학적 응용에 대해 이해하고 흥미를 갖는 경험이 될 수 있다고 보았다. 태양전지 실험을 통해 과학적 원리를 이해하고 그 원리가 공학적인 태양광 발전으로 연결된다는 사실을 이해함으로써, 과학-기술-사회 간의 관계를 이해하고 이에 따른 공학적 진로 동기를 유발하는 데 도움이 될 수 잇다고 보았다.

H: 차세대 에너지원으로 주목받는 태양전지의 원리에 대해서 알아보는 데 의미가 있다. 태양전지에 대해 학생들이 직접 실험을 하고 태양전지로부터 전류가 발생하는 원리를 이해하여, 이에 대한 흥미를 가지게 된다면 미래 시대의 공학자를 한 명이라도 더 만들어 낼 수 있지 않을까 기대해본다. (태양전지 실험 보고서)

요약하면, 빛의 성질에 대한 실험인 광전효과, 태양전지 실험에 대해 예비교사는 그 실험의 특징으로 (1) 형식화된 이론과 실재의 연결, (2) 공학적 기기의 활용을 파악하고, 그에 대한 교육적 반성으로 (1) 이론 수업에 대한 실험의 보완적 역할, (2) 과학과 기술의 관계에 대한 이해와 진로 동기 유발의 가능성을 인식하였다.

## 4.5. 확률 분포 실험: 맥스웰-볼츠만 분포 실험

### 4.5.1. 미시현상의 거시적 모델링

모델링은 Kozminski et al.(2014)가 제시한 대학 실험 수업의 6가지 학습 결과의 하나로서, 현상을 실험을 통해 파악이 가능한 형태로 모형화하는 것을 의미한다. 맥스웰-볼츠만 분포 실험은 '미시적 확률분포 현상을 거시적으로 모델링'에 관한 의의를 위주로 논의되었다. 예비교사들은 기체 분자의 운동을 이론적으로 접할 때 기체 분자를 상상하면서 학습한 경험을 가지고 있었다. 이를 유리 구슬이라는 거시적 모델로 구현함으로서, 학생들에게 이러한 모델링이라는 방법론을 잘 이해시켜 주는 사례로 기능하였다. 예비교사 F의 경우 이 실험은 통계역학의 개념을 눈에 보이게 만들어 주었고, 따라서 통계역학의 개념을 잘 이해시켜 주는 데 도움이 되었다는 점을 밝히며 실험이 통계역학을 접근하는데 좋은 교육적 접근 방식으로 평가하였다.

F: 실험으로 통계 역학에 좀 컨셉을 실제로 눈으로 볼 수 있는 거잖아요. 사실은 기체를 실제로 이제 실험 도구로 사용을 하게 되면 정말 효과적이긴 하겠지만 그거랑 별개로 실제로 이 기체를 볼 수가 없기 때문에, 그런 아날로그적 관점을 이용해서 그런 구슬을 활용을 해서 통계적으로 분석을 했다는 게, 그리고 그걸 통해서 이제 볼츠만 분포를 뽑았다는 게 굉장히 조금 눈에 보이는 방식으로 통계역학을 좀 접근할 수 있는 굉장히 좋은 그런 접근 방식이 아니었나라고 생각을 하고 있어요. 지금까지도. (면담)

N: 원래는 통계 물리를 그림으로 보고 아니면 컴퓨터로 시뮬레이션을 많이 하잖아요. 근데 그것도 뭔가 되게 많은 데이터들이 랜덤으로 이렇게 되는 느낌이 오긴 하지만, 얘는 그렇게 많은 애들이 있고 얘네가 막 튀어나가서 어떤 분포를 이루는지를 실제로 보는 거잖아요. 그래서 뭔가 좀 더 현실 같은 느낌이 있었어요. (면담)

이는 예비교사들이 가르쳤을 때 수학적인 모델링과 과정들이 왜 물리학에서 필요하며 어떠한 효과가 있는지를 보여 줄 수 있는 좋은 사례로 평가하였다.

H: 맥스웰 분포는 이상적으로 또 실험을 통해서 증명되어 왔고 왜 수학적인 해석을 학생들이 받아드려야 하는지, 이상적인 가정이 쓸모가 있는지 보여주는 좋은 예시가 된다. (실험 보고서)

특히 기체 분자를 유리구슬로 모델링한 사례는 이해가 쉽게 잘 대응된 모델링이기에 교육적으로 활용하는 데 있어서 우려가 더 적다고 생각하였다. 이는 양자 비유 실험에서 양자 현상을 음파의 공명 현상으로 비유한 것과는 대조되는 것이었다.

J: 이 실험 자체가 이제 이론적인 모델이랑 눈에 보이는 유리구슬, 그걸 배치를 굉장히 잘 시킨 그런 실험이라고 생각을 하기 때문에 실험 결과를 보고 이제 이론적으로 우리가 어떤 걸 배우는 데도, 딱딱 이해가 될 것 같은. 그래서 좀 이 실험을 교육적으로 활용하는데 괜찮을 것 같습니다. (면담)

더 나아가 예비교사들은 이러한 모델링을 활용한 구체적인 교수학습 전략을 세워 보기도 하였다. 본 실험의 통계역학을 눈으로 확인하는 모델링은 꼭 기체역학의 분포가 아니더라도, 더 넓은 범위에서 통계적 현상을 다룰 수 있는 방법론이라는 생각을 갖게 하였다. 이러한 생각에서 본 실험의 설계를 응용한 프로젝트 수업 등이 가능할 것이라는 인식을 보였다.

N: 뭔가 이거 같은 경우에는 딱히 이 이론을 학교에서 가르치고 있는 내용이 아닌데 되게 실제 현상이랑은 관련이 많은 것 같아서 과학 과제 연구 같은 데 썼으면 좋겠다고 생각을 했고 그 주제로 생각했던 게 역학조사 같은 거 할 때 감염병 통계적으로 분석을 하고 하니까 이런 모델을 그러니까 그런 모델을 보통 컴퓨터로 하긴 하는데 이거를 이 실험의 구슬을 가지고 해볼 수도 있겠다는 생각이 들어서, 그런 데 써먹을 수 있을 것 같다고 생각을 했습니다. (면담)

F: 그래서 이 실험 자체를 막 직접적으로 사용하지 못하겠지만 이 실험을 이제 배워서 나중에 이제 중고등학교에서 사용을 한다라고 생각을 하면 좀 이거랑 비슷한 방식으로 어떤 통계적인 그런 방식을 통해서 물

리학을 접근을 할 때 관련된 실험을 설계를 간단하게 해서 보여줄 수 있는 그런 생각을 좀 열 수 있을 것 같아요. 그런 방식의 실험을 만들 수 있다라는 생각을 사실 이걸 하기 전까지는 생각을 못했었는데 이 실험을 하고 나서 이런 방식으로도 가능하겠다라는 생각을 가능하게 해주는 그런 실험이 아닌가 싶고요. (면담)

### 4.5.2. 실험 설계의 창의성

예비교사들은 볼츠만 분포 실험의의 설계 단계에서 드러나는 발상의 창의성이 매우 좋다고 인식하였다. 면담에 참여한 예비교사 J는 맥스웰-볼츠만 실험에서 기체 분자를 유리 구슬로, 온도를 기계의 진동수로 대체하는 실험 설계 단계의 발상에서 과학적 모델링의 창의성을 높이 평가하고, 그 참신함과 흥미로움을 언급하였다.

J: 이론적인 것들을 이제 실험을 통해서 측정하기 위해서 어떤 거를 어떤 식으로 표현하기 위해 위한 발상을 했는지, 볼츠만에서는 이제 기체 분자를 유리 구슬로 대체하고 온도를 그 기계의 진동수로 대체하는 그런 발상이 있었고, 밀리컨 기름 방울 실험에서는 이제 기름방울 안에 전자가 들어가고 그걸 측정하겠다 그런 발상이 있었죠. 두 실험에 담긴 이 실험 자체의 발상이 신선하고 재미있는 편이라고 생각했습니다. (면담)

이러한 모델링은 학습자에게 개념적으로 의미가 있는 것으로 인식되었다. 예비교사 J의 경우 과학에서 생각의 유연함, 즉 서로 다른 것을 공통된 특징으로 묶거나 비교할 수 있음을 가르칠 수 있는 소재가 될 것으로 인식하였다.

J: 기체 분자를 구슬로 대신하고, 기체의 온도를 Bottom plate의 진동수로 대신하는 것은 개념적으로 의미가 있으며, 생각의 유연함 또한 가르칠 만한 가치가 있는 것으로 보인다.

요약하면, 예비교사는 맥스웰-볼츠만 분포 실험의 특징으로 (1) 미시현상의 거시적 모델링, (2) 실험 설계의 창의성을 파악하고, 그에 대한 교육적 반성으로 (1) 시각화를 통한 이해에 도움되고, (2) 과학적

창의성과 생각의 유연함을 가르칠 수 있음을 인식하였다.

종합하면, 교육적 고찰을 강조한 현대물리 실험 수업에서 예비 물리교사는 현대물리 실험의 특징 파악과 실험교육에 대한 반성을 통해 개별 실험에서 나타나는 몇 가지의 유의미한 교육적 고찰을 도출하였다. 본 연구 사례 속 다섯 유형의 실험들은 각각의 유형에 따라 서로 다른 특징을 가지고 있었으며, 그에 따라 서로 다른 교육적 고찰들이 반성을 통해 도출되었다. 각 실험의 교육적 고찰을 정리한 표는 아래의 [표 4-1]과 같다.

**[표 4-1] 예비교사의 현대물리 실험수업에 대한 교육적 고찰**

| 실험 | 실험의 특징 파악 | 실험교육에 대한 반성 |
|---|---|---|
| 양자 비유 실험 | 비유의 활용 | - 시각화를 통한 이해에 도움<br>- 학습자가 잘 아는 비유물을 활용해야 함 |
| | 이론의 시각화 | - 비가시적인 현상을 시각화 할 수 있음, 양자의 '나뉜다' 개념의 이해에 도움<br>- 컴퓨터를 통해 간접적으로 나타나는 시각적 그래프는 그 의미가 와닿지 않음 |
| 자기 공명 실험 | 이론의 높은 난이도 | - 배경 이론 학습의 중요성 파악 |
| | 실험자 개입이 불가능한 실험 설계 | - 실험자가 개입할 수 있는 실험 설계의 필요성 |
| | 첨단 기기의 활용 | - 물리학의 공학적 응용 사례 이해<br>- 기기의 세부원리 파악의 필요성 |

[표 4-1] (계속)

| 실험 | 실험의 특징 파악 | 실험교육에 대한 반성 |
|---|---|---|
| 밀리컨 기름 방울 실험 | 직접 관측 | – 물리 현상의 아름다움을 확인, 과학자의 활동을 이해하고 노력을 인식 |
| | 과학사적 의의 | – 역사적 실험 재현, 과학사적 의의 확인 |
| | 기본 물리량의 확인 | – 이론으로만 이해했던 양자개념의 실재를 확인<br>– 이론에 대한 신뢰 |
| | 실험 설계의 창의성 | – 실험 설계와 발상의 창의성<br>– 물리적 논리 전개 과정의 우수함 |
| 빛의 성질 실험 | 형식화된 이론과 실재의 연결 | – 이론 체계에서 놓쳤던 지식을 파악<br>– 더 세부적인 작동 방식까지도 이해 |
| | 공학적 기기의 활용 | – 학습자가 물리학의 공학적 응용에 대해 이해하고 흥미를 갖는 경험임<br>– 공학 진로 동기유발 가능 |
| 확률 분포 실험 | 미시현상의 거시적 모델링 | – 미시적 개념을 거시적으로 시각화<br>– 통계역학의 개념을 이해에 도움 |
| | 실험 설계의 창의성 | – 과학적 창의성과 생각의 유연함을 가르칠 수 있음 |

# 5. 결론: 예비교사들의 현대물리 실험 교육에서 교육적 고찰

예비교사들은 5가지 유형의 현대물리 실험에 대해 실험의 특징을 파악하고 실험교육에 대해 반성하는 교육적 고찰을 수행하였다. 본 장에서는 연구의 결론으로서, 현대물리 실험 교육에서 교육적 고찰의 특징적이었던 네 가지의 결과를 도출하여 제시한다. 특히, 교육적 고찰에는 중 본 연구의 목적인 '현대물리 실험교육'의 특징과 관련된 교육적 고찰을 추출하고, 이를 구체적으로 서술한다.

## 5.1. 시각화의 중요성

앞선 이론적 배경에서 논의한 바와 같이, 현대물리학에 있어 많은 어려움들은 이론의 추상적, 형식적, 반직관적 성질에 기인한다. 예비교사 또한 마찬가지로 현대물리학에 대해 '상상하기가 어렵다'라는 인식을 가지고 있었다. 이러한 관점에서, 예비교사들은 현대물리의 유용한 교수학습 전략으로서 시각화의 중요성을 이해하였다.

먼저, 현대물리 실험들은 예비교사가 이론 수업을 통해 추상적으로 이해하고 있던 개념들을 더 직관에 가깝게 시각화해서 볼 수 있는 경험을 제공하였다. 여기에서 예비교사는 현대물리의 현상이라는 것이 눈으로 보기 어려운 형태이기에 현상론적 이론으로 학습하다는 것이 중요하다는 생각을 가졌다. 그러나 실험의 비가시적, 미시적 현상을 시각화라는 방법을 통해 현상을 경험하는 것에서 자신에게 미친 학습 효과를 토대로 시각화의 유용성을 발견할 수 있었다.

구체적인 사례는 모델링과 비유에 의한 시각화였다. 먼저 볼츠만 실험에서 미시적, 비가시적인 현상을 거시적으로 모델링하였다는 특징을 파악하고, 실험교육에 대한 반성으로서 '모델링을 통한 이론의 시각화'의 장단점을 이해하였다. 비가시적인 기체 분자를 거시적으로 이해한 경험이 신기하고 체감되어, 이러한 학습 전략이 효과적일 수 있음을 인식하는 계기가 되었다.

둘째, 양자 비유 실험의 ‘비유를 통한 이론의 시각화’ 전략의 장단점을 이해하였다. 예비교사들은 양자 비유 실험을 통해 형식적이고 비가시적인 이론을 시각화하는 전략은 과학개념의 설명에서 효과적인 방법임을 이해하고, 이러한 시각화가 양자의 특징을 느끼는 데 도움이 된다는 사실을 이해하였다.

요약하면 현대물리 실험은 모델링, 비유 등을 통해 비가시적인 현상을 거시적이고 직관적인 형태로 시각화해 준다. 예비교사는 이러한 실험의 역할이 현대물리의 미시적, 형식적 특성에 기인하는 어려움을 해결할 수 있다는 유용성을 깨닫게 되었으며, 이를 교육적으로 활용할 수 있다는 지식을 얻고 교사 전문성 측면의 학습을 이루었다.

## 5.2. 관찰과 측정을 통한 체감의 중요성

실험은 자연을 실험실로 가지고 들어와, 재료와 장치를 이용해 통제 가능한 형태로 자연을 변형하고 길들이는 과정이다(홍성욱, 2020). 따라서 실험실에서 확인할 수 있는 ‘자연 현상’ 은 날 것의 생생함이 본질적으로 부족하다 할 수 있어도, 원하는 타겟 현상을 능동적으로 관찰, 측정하고 개입(intervening) [①] 할 수 있기에 강력한 과학의 방법론이다. 현대물리 실험 교육에서 관찰, 측정에 대한 교육적 고찰은 다음과 같이 나타났다.

첫째, 예비교사들은 현대물리 실험에서 '직접 경험'을 중시하였다. 직접적인 관찰을 통해 자연현상을 가까이 이해하고 '체감'할 수 있는 실험들을 선호하는 경향을 보였다. 특히 컴퓨터를 통해 찍혀 나오는 간접적 현상보다 자연 현상과 직접 상호작용을 중시하였다. 이를 통해 예비교사는 추상적인 이론이 실제로 어떻게 작동하는지 '체감'할 수 있다는 점을 장점으로 꼽았다.

예비교사들은 '체감'이라는 용어를 사용하여 실험에서 자신들이 받은 느낌을 표현하였다. 그들이 말한 '체감'의 의미는 두 가지로 요약할 수

[①] 학교 실험에서 개입이란 정해진 실험절차를 단순히 따라하는 것을 넘어, 실험자가 상황에 맞게 적극적으로 지식과 도구를 활용하여 상황을 변화시키는 것을 의미한다(Hacking, 1983).

있다. 첫째, 직관적인 이해의 의미이다. 추상적으로만 인식하고 이해하던 현대물리의 이론을 더 구체적인 현상으로 이해할 수 있었다. 둘째, 정의적 신뢰와 동의의 의미이다. 실험을 통해 이론의 작동을 확인한 것은 실험자에게 이론의 실재를 확인하게 한 것이었으며, 이는 이론에 대한 확신과 신뢰성을 높여 주는 역할을 하였다.

이에 대한 구체적 사례로 양자비유 실험과 기름방울 실험을 비교해 볼 수 있다. 양자 비유 실험과 밀리컨 기름방울 실험은 모두 '물리량의 양자화' 이론을 확인하는 목적을 가지는 실험이다. 전자는 컴퓨터와 음파 모델을 통해 에너지의 양자화 현상을 관측하고, 후자는 현미경과 물리적 이론 전개를 통해 기름 방울에 대전된 전하량을 관측 및 측정하여 양자화 개념을 확인한다.

밀리컨 기름 방울 실험은 역사적 실험의 재현성이 높고 실제 물리 현상을 시각적으로 볼 수 있다는 장점이 있으나, 실험에서 관측하는 것은 '기름방울의 종단 속도 도달 현상'이지 양자화 현상이 아니다. 따라서 양자 현상의 시각화라는 측면에서는 한계가 있으며, 양자 현상을 확인하는 설명력은 상대적으로 낮다고 볼 수 있다. 이와 반대로, 양자 비유 실험은 양자화 현상을 컴퓨터 그래프를 통해 명확하게 구현해 주기 때문에 수학적 이론에 대한 설명력이 강하다는 장점을 가진다. 그러나 실제 양자물리적 현상을 대상으로 하지 않기에 현상 자체를 확인하는 의미는 상대적으로 떨어진다고 볼 수 있다.

예비교사들은 현대물리의 수학적 포멀리즘을 시각 그래프로 확인하는 것보다는, 자연과 가깝게 상호작용하는 경험이 실험에서 더 얻어야 하는 중요한 경험, 즉 실험의 목적으로 보았다는 것을 확인할 수 있다. 두 실험을 비교하였을 때, 예비교사들에게 양자역학의 이론을 더 명확하게 설명해 줄 수 있는 실험은 양자 비유 실험이라 할 수 있다. 그러나, 많은 예비교사들에게 더 매력적이고 선호하는 실험으로 평가한 것은 밀리컨 기름 방울에서 직접 현상과 상호작용한 경험이었다.

같은 맥락에서 예비교사는 현대물리에서 시뮬레이션이 실험의 대안이 될 수 있는가? 에 관하여 고찰을 수행했다. 실험만이 가질 수 있는 시뮬레이션과는 다른 효과로 이 체감 효과를 꼽았다. 시뮬레이션을 통해서는 현상을 오차 없이 오히려 더 선명하고 쉽게 확인할 수 있다. 그러나 컴퓨터 모니터를 통해 물리 법칙을 구현해 둔 현상이지 자연에서

일어나는 현상이 아니기에, 직접 자연 현상을 볼 수 있는 현대물리 실험만이 이러한 체감 효과를 얻을 수 있다고 보았다.

둘째, 예비교사들은 실험 과정에서 학습자가 능동적으로 개입하는 경험, 즉 과학적 활동으로서 실험 학습을 중요시한다. 이들은 단순히 정해진 절차에 따라 결과를 관찰하는 것이 아니라, 직접 데이터를 측정하고 분석하며 문제 해결에 참여하는 과정을 통해 과학적 탐구의 본질을 체험하고자 한다. 실험에 개입하는 경험은 학습자가 이론이 실제로 어떻게 적용되는지, 그리고 그 한계와 가능성을 스스로 확인할 수 있는 기회를 제공하기 때문에, 과학적 사고와 실천적 능력을 함양하는 데 큰 역할을 한다.

더불어, 현대물리 실험들은 학습자가 개입할 여지가 제한적인 경우가 많았다. 이미 실험의 과정과 도달점이 정해진 확인 실험의 성격을 띠며, 요리책식 실험 수업 구조에서 비롯된 측면이 두드러진다. 즉, (1) 실험의 목표가 주로 현상의 재현과 확인에 치우치고, (2) 실험 기기가 미리 만들어진 세트로 구성되어 학습자의 조작 및 개입의 여지가 적어, 학습자가 큰 고민 없이 정해진 절차를 따르게 되는 것이다. 이로 인해 학습자들이 주체적으로 문제를 해결해 나가는 경험을 충분히 누리지 못한다는 점을 예비교사들은 우려하였다. 또한 학습자가 실험에 개입하는 과정이 일어나지 않기에, 실험을 통해 얻을 수 있는 현대물리의 이론에 대한 확신과 신뢰가 낮다는 우려사항이 현대물리 실험의 한계로 인식되었다.

요약하면, 예비교사들은 실험을 통해 '자연 현상을 확인하는' 경험을 선호하고, 여기에서의 '체감 효과'를 주요 목적으로 기대하였다. 또한, 예비교사는 실험자의 능동성이 있는 실험 학습을 유의미하다고 생각하였다. 그러나 현대물리 실험은 이 두 가지 측면에서 모두 한계가 있는 영역으로 인식되었다. 현대물리 실험에서 제공하는 현상은 전기 신호를 통해 출력되는 간접적인 형태였다. 또한 현대물리 실험은 확인 실험이며, 실험 셋업 또한 큰 조작과 개입이 요구되지 않는 형태였다. 결과적으로, 현대물리 실험은 예비교사들이 기대하는 체감 효과와 능동적 참여를 온전히 충족시키지 못하였고 예비교사들은 현대물리

영역에서도 보다 실질적이고 참여적인 실험 방식에 대한 아쉬움을 표하였다.

## 5.3. 실험 기기의 양면성

현대물리 실험은 특정한 현상을 구현하기 위한 조건을 제공해 주는 NMR기기와 태양 전지 등, 현대 과학기술이 반영된 첨단 기기들이 여럿 활용된다. 이들의 경험을 통해 학습한 점을 분석하였을 때, 첨단 기기에 대한 판단에 있어 두 가지의 상반된 고찰이 나타났다.

먼저, 예비교사들은 현대물리 실험에서 설계된 장치와 셋업들을 활용해 본 경험이 새롭고 신기했다고 밝혔으며, 흥미를 유발할 수 있다는 점을 깨닫게 되었다. 또한, 물리학적 현상이 공학적으로 제작된 기기를 통해 구현된다는 점에서 이러한 경험은 공학적 경험이자, 과학과 기술 간의 관계를 보여 주는 경험으로 인식되었다. 여기에서 공학적 진로와 관련된 기술의 원리를 이해시키고 관련된 진로 동기를 유발할 수 있다는 점을 교육적으로 고찰하였다.

이와 반대로, 현대물리 실험 기기가 첨단이라는 점은 또한 기기가 복잡하다는 것을 의미한다. 따라서 실험자는 이 기기의 내부에서 일어나는 과정을 확인하고 이해하기 어려운, 블랙박스(black box)와 같은 형태로 실험 기기를 받아들였다. 특히 자기 공명 실험이 여기에 해당하는데, 현상이 고정된 실험 기기의 내부에서 보이지 않는 형태로 일어나므로 그 양자 현상이 구현되는 과정과 원리가 잘 보이지 않는다. 여기에서 학습자들의 실험의 이해가 자체가 제한적이었다.

여기에서, 현대물리 영역에 있어서는 수업에서 실험을 다루더라도 학습자가 과학적 원리를 파악하기 어렵다는 것이 교육의 한계점으로서 고찰되었다. 이는 다른 영역에 비해 훨씬 실험의 적용을 주저하게 되는 요인이 되었으며, 이 현대물리 영역에서 실험한다면 더욱 장치에 대한 원리 설명을 강화해야 한다는 인식을 갖게 되었다.

추가적으로, 현대물리 실험 기기에서 드러나는 실험 설계의 창의성과 유용성을 파악하였다. 예컨대 볼츠만 분포 실험에서 기체의 통계적 분포 현상을 유리 구슬과 챔버의 진동수를 통해 구현한 실험 설계는

예비교사에게 실험 설계가 이런 방식으로 창의적으로 가능하구나, 라는 점을 이해하게 하였다. 또한 이러한 실험 기기를 다른 통계 관련 현상을 가르칠 때에도 적용하여 활용해 볼 수 있겠다는 점을 깨닫게 되었다.

## 5.4. 실험과 이론 학습 간 괴리

예비교사들은 ESR 등과 같이 배경 이론이 어려웠던 실험은 현상 자체에 대한 관찰을 잘 수행하였음에도 불구하고 의미 있는 학습과 의미 파악이 제한적이었던 것을 경험하였다.

이 경험에서 예비교사들은 실험 학습은 이론을 알고 있을 때 더 잘 이루어질 수 있음, 즉 배경이론 학습의 중요성을 인식하였다. 이를 해결하기 위한 방안으로서 이론 수업과의 연결성 또는 실험 전의 이론 학습 등을 통한 적절한 이론-실험의 연계의 중요성을 강조하였다. 그러나, 예비교사가 경험하였던 과학교사 양성 과정은 이론은 이론대로, 실험은 실험대로 분절적으로 이루어지는 형태였다.

> N: 실험 과목이랑 이론 과목이랑 유기성이 좀 많이 떨어진다고 생각해요. 이론 과목에서는 그 진도 따로 나가고, 실험 과목에서의 실험들은 그냥 이론을 잘 몰라도 거기에 집어넣어서 계산을 하는 식으로 진행이 되잖아요. 그런 부분이 전반적으로 아쉬웠어요. (면담)

예비교사는 이러한 분절적인 과정에 아쉬움을 느꼈다. 또한 이론과 실험의 관계에 있어, 다른 영역보다도 현대물리 영역의 이론-실험 유기성은 더욱 강조되어야 한다고 생각했다. 이는 같은 과학 현상을 관찰하더라도 이론적 배경이 서로 다른 사람들은 서로 다르게 해석하여 발생하는 관찰의 이론의존적 특성(Hanson, 1979)에서 찾을 수 있다. 현대물리 실험을 다루기 위해서는 실험의 기반이 되는 이론에 대한 충분한 설명과 이해가 필수적이었다. 그러나 현대물리 이론은 본질적으로 추상적이고 복잡하여, 이론을 제대로 이해하지 못하는 경우 현상을 온전히 경험하기 어려웠다. 특히 현대물리에서는 이론과 실험이 긴밀하게 연결되어 있기 때문에, 실험 수행 과정에서 나타나는 결과를 해석하려면 해당 결과에 대한 과학적 개념을 이해하고 이를 바탕으로

분석하는 과정이 필요했다.

> N: 아는 내용으로 실험하면 이론도 더 이해가 잘 될 거고, 결과 해석할 때도 편하죠. 아직 배우지 않은 내용이면, 저희가 막 진지하게 이론을 공부하는 게 아니라 매뉴얼에 써 있는 정도만 읽는 거잖아요? 그러면 제대로 이해 못하는 것도 있고, 실험은 했는데 나중에 기억 안 나는 경우도 있죠. 그래서 이론과 실험 과목의 유기성이 있으면 좋겠다고 생각합니다. (면담)

예비교사들은 이론적 이해 없이 실험의 교육적 효과가 제한적일 수 있다는 점을 확인하였다. 결국 실험을 통해 교육적 가치를 얻기 위해서는 해당 실험과 관련된 이론을 명확히 이해하는 것이 필수적이라는 결론에 도달하였다. 이러한 경험을 한 예비교사가 교직에 진출하여 실험을 활용한다면 현대물리 실험 교육에서 실험과 이론 간의 연계를 강화하고, 이론적 배경에 대한 교육을 실험과 더욱 유기적으로 구성하고자 할 것임을 예상할 수 있다.

# 6. 논의 및 시사점

이 논문은 '사범대학의 현대물리 실험 수업은 어디로 나아가야 하는가?' 라는 교사교육 차원의 질문에 대한 하나의 작은 응답일 것이다. 최근의 사회적 흐름에 따른 물리 교육과정 및 목표상의 대응 중 하나는 '현대물리 교육'과 '탐구실험 교육'에 대한 강조였다. 그러나 기대에 효과적으로 부응하는 움직임은 아직까지 과학교사 양성 과정에서 찾아보기 어렵다.

특히 현대물리가 중등학교 교사에게 난이도가 높고 자신이 없는 영역으로 여겨진다는 사실은 현대물리 수업에서 실험과 같은 적극적인 교육의 방식이 이루어지기 어렵게 만든다. 하지만 현대물리 영역에서 실험이 갖는 의미와 교육목표상의 중요성을 고려하면, 현대물리 교육과정에서 실험 학습은 더 적극적으로 다루어질 필요가 있다. 그리고 그것을 가능하게 만드는 방법은, 과학교사 양성 과정을 통해 예비교사의 현대물리 교육의 역량을 키워 주는 것이다.

예비교사가 현대물리 실험을 제대로 배우는 것은 현대물리의 이해를 돕고 실험 학습과 나아가 물리학 전반의 이해를 확장해 나가는 데 긍정적으로 기능할 수 있다. 그러나 단순히 수업을 통해 어떤 지식이나 기술을 학습하는지에 관심을 갖는 것은, 과학교사를 위한 사범대학의 실험 수업으로서는 부족할 것이다. 더 나아가 이러한 배움이 실제 교육 현장에서 학생들에게 어떻게 활용되고 전달될 수 있는가를 고민하는 문제, 즉 교사 전문성 측면의 문제로서 예비교사의 경험과 배움이 다루어져야 한다.

본 연구 사례인 '교육적 고찰을 강조한 현대물리실험 수업'에서, 예비 물리교사들은 현대물리 실험 활동 속에서 각각의 실험들이 갖는 물리학적, 교육적 의의에 대해 생각해보는 '교육적 고찰'을 수행하였다. 이 과정에서 예비교사들은 현대물리 실험 교육의 특징과 의의, 장점과 한계, 교육에서의 유의점 등을 파악하였다. 교육적 고찰의 과정은 예비교사들에게 실험의 수행만으로는 배울 수 없던 물리 교육에서 갖는 의의를 성찰하는 기회를 제공하였다. 또한 실험 교육을 위해 교사가 유의할 점과 갖추어야 할 역량에 대해 이해하는 데 도움을 주었다.

교사가 자신이 가르칠 학문 및 내용에 대해 적절한 지식과 견해를 가지는 것은 학교에서 이를 성공적으로 구현하기 위한 핵심 조건이다(Shulman, 1986). 사범대학의 과학교사 양성 과정은 예비교사에게 이러한 지식과 견해를 가질 수 있는 기회이다. 현대물리 영역의 양성 과정에서도, 단순히 이론 수업의 교과서와 커리큘럼 속 지식을 전달받는 것이 아니라 예비교사가 현대물리 교육의 가치와 목적을 명확히 알 때 의미 있는 예비교사교육이 이루어질 수 있다. 또한 교사가 현대물리 교육을 어떻게 인식하고 바라보는가, 즉 각 교사가 현대물리 실험에 가지는 견해는 그 교사의 수업의 모습을 결정짓기 때문에 이를 확인하는 것은 현대물리 실험 수업을 수강한 예비교사가 학교 현장에서 이를 가르칠 때의 형식과 목적을 간접적으로 탐색할 수 있게 한다.

결국 대학에서의 실험 수업 경험은 사범대학 졸업생들이 교직에 진출하였을 때의 관점과 교육적 실천 기반을 형성하는 데 핵심적 역할을 한다. 그러나 과학교사 양성 프로그램은 수업목적에 대한 합의의 부재로 중구난방식 교육과정이 운영되는 경우도 많고(이기영, 2013), 특히 교사양성 과정에 있어 교과내용학과 교과교육학의 분리적 관점은 이러한 문제 상황의 하나의 원인이다(이경호, 2020).

따라서 사범대학의 교육과정은 예비교사들에게 물리학의 개념적 이해와 실험적 경험을 제공하는 차원의 목적에 그치지 않고, 이러한 경험이 미래의 물리교육 현장에서 어떻게 활용될 수 있을지를 고민하며 설계되어야 한다. 본 연구 사례와 같이 설계된 예비교사들의 현대물리 실험 수업의 경험은 향후 마주하게 될 자신들의 교육 현장에서 학생들과 함께 교육을 실천하며, 새로운 질문을 던지고, 그 답을 고민하고 찾아가는 데 밑거름이 될 것이다. 본 연구가 방향성을 제시한 바와 같이, 현대물리 실험은 단순한 현대물리 학습의 도구가 아니라, 미래의 교사들이 현대물리에 대한 이해를 깊이 있게 구체화하고 그 교육적 의의와 장단점을 확인하는 과정이어야 할 것이다.

또한, 본 연구는 현대물리 실험 교육의 특성과 교육적 의의를 파악했다는 점에서 의미가 있다. 연구에 참여한 예비교사들은 현대물리 실험에 대한 깊이 있는 활동과 고민을 경험하였으며, 이러한 강점을 바탕으로 유의미한 교육적 고찰을 도출하였다. 그러나 예비교사들은

실험 수업 지도 경험이 부족하고 교수내용지식(PCK)이 충분하지 않기 때문에, 그들이 파악한 현대물리 실험의 교육적 특징과 의의를 중등교육에 즉시 적용하는 데에는 한계가 있을 수 있다. 현직 과학교사 등을 대상으로 후속 연구를 진행함으로써 이러한 제한점을 해결할 필요가 있다.

연구의 시사점은 다음과 같다. 첫째, 현대물리 실험 수업은 예비교사들이 이론 수업이 제공하지 못하는 현대물리의 가치와 잠재력을 학습할 수 있도록 하며, 이는 교직에 진출하여 현대물리 실험을 효과적으로 가르치는 자원이 될 수 있다. 이때 이번 사례연구와 같이 과학교사 양성 과정에서 교육적 고찰이 강조된 실험 수업 방식을 적용할 수 있다. 기존의 수업과 달리, 교육적 고찰을 강조한 수업 방식은 예비교사들이 단순히 물리적인 차원의 학습을 이루는 것이 아니라, 실험의 교육적 가치를 고민하고 자기 학습을 반성함을 통해 교사 전문성 차원에서 현대물리실험교육에 대한 교육적 가치와 의의를 파악하는 성취를 얻을 수 있었다. 본 사례를 참고하여 교사교육 과정에서 현대물리 실험 수업을 구성할 필요가 있다.

둘째, 현대물리 실험 수업에서 활용되는 실험 방식과 기기의 개선을 모색해 볼 수 있다. 개별 현대물리 실험을 수행한 예비교사들은 실험의 특성에 따른 교육적 한계를 인식하며, 일부 실험이 교육적 활용도가 낮을 것이라는 점에 아쉬움을 표했다. 예컨대, 자기공명실험은 내부의 작동 원리를 파악하기 어려운 블랙박스 형태로 구성되어 있어, 물리를 전공하는 예비교사조차 그 원리를 이해하는 데 어려움을 겪었으며 강력한 교육적인 한계로 인식되었다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 블랙박스화된 실험 기기의 내부 과정을 단계적으로 파악할 수 있는 교육실험 기기의 개발, 또는 실험 기기의 원리에 대한 단계별 지도와 교육자료를 제공하는 개선이 이루어질 필요가 있다.

사범대학에서 제공하는 과학교사 양성 과정은 단순히 과학 지식을 전달하는 역할로 남아서는 안 된다. 예비교사들에게 물리학적으로 유의미한 경험을 제공하고, 나아가 이를 교육적으로 재구성할 수 있는 경험과 기회를 제공해야 한다. 이를 위해서는 현대물리 실험 수업이 실험 기기의 사용을 통한 이론 확인에 그치는 것이 아니라, 실험 결과의 분석과정을 교육적 맥락에서 활용할 수 있는 사고와 역량을 증진하는 데

데 중점을 두어야 할 것이다.

본 연구는 현대물리 실험 수업에서의 예비교사 학습 경험을 탐구한 초기 단계의 탐색에 해당한다. 이후에도 사범대학 및 예비교사 교육과정에서의 현대물리 실험 학습에 대한 많은 후속 연구가 이루어지기를 희망한다. 실험 수업이 예비교사들에게 단순히 물리학적 이해만을 제공하는 것이 아니라, 이를 바탕으로 물리 교육자로서의 역량을 키우고 실제 교육 현장에서 구현할 수 있는 가능성을 모색하여야 한다.

# 참고 문헌

Abrahams, I., & Millar, R. (2008). Does practical work really work? A study of the effectiveness of practical work as a teaching and learning method in school science. *International Journal of Science Education*, *30*(14), 1945–1969.

Adler, S. (1991). The Reflective Practitioner and the Curriculum of Teacher Education. *Journal of Education for Teaching*, *17*(2), 139–150. https://doi.org/10.1080/0260747910170203

Akarsu, B. (2010). Einstein's redundant triumph" quantum physics": An extensive study of teaching/learning quantum mechanics in college. *Latin-American Journal of Physics Education*, *4*(2), 3.

Arnold, J. C., Kremer, K., & Mayer, J. (2014). Understanding Students' Experiments—What kind of support do they need in inquiry tasks? *International Journal of Science Education*, *36*(16), 2719–2749.

Baily, C., & Finkelstein, N. D. (2015). Teaching quantum interpretations: Revisiting the goals and practices of introductory quantum physics courses. *Physical Review Special Topics—Physics Education Research*, *11*(2), 020124.

Beatty, J. W., & Woolnough, B. E. (1982). Practical Work in 11-13 Science: The context, type and aims of current practice. *British Educational Research Journal*, *8*(1), 23–30.

Beiser, A. (2002). Concepts of modern physics. *Tata McGraw-Hill Education*.

Bennett, J. (2001). Practical work at the upper high school level: The evaluation of a new model of assessment. *International Journal of Science Education*, *23*(1), 97–110.

Bøe, M. V., Henriksen, E. K., & Angell, C. (2018). Actual versus implied physics students: How students from traditional physics classrooms related to an innovative approach to quantum physics. *Science Education*, *102*(4), 649–667.

Bouchée, T., Thurlings, M., de Putter - Smits, L., & Pepin, B. (2023). Investigating teachers' and students' experiences of quantum physics lessons: Opportunities and challenges. *Research in Science & Technological Education*, *41*(2), 777–799. https://doi.org/10.1080/02635143.2021.1948826

Budde, M., Niedderer, H., Scott, P., & Leach, J. (2002). The quantum atomic model'Electronium': A successful teaching tool. *Physics Education*, *37*(3), 204.

Bunge, M. (1968). Analogy in quantum theory: From insight to nonsense. *The British Journal for the Philosophy of Science*, *18*(4), 265–286.

Bungum, B., Henriksen, E. K., Angell, C., Tellefsen, C. W., & Bøe, M. V. (2015). *ReleQuant-Improving teaching and learning in quantum physics through educational design research*.

Calderhead, J. (1996). *Teachers: Beliefs and knowledge.*

Charmaz, K. (2015). Grounded theory. *Qualitative Psychology: A Practical Guide to Research Methods*, *3*, 53–84.

Collins, S., Osborne, J., Ratcliffe, M., Millar, R., & Rick, D. (2001). *What 'ideas-about-science'should be taught in school science? A Delphi study of the expert community.*

Corsiglia, G., Pollock, S., & Passante, G. (2023). Intuition in quantum mechanics: Student perspectives and expectations. *Physical Review Physics Education Research*, *19*(1), 010109.

Cruz-Hastenreiter, R. (2015). Analogies in high school classes on quantum physics. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *167*, 38–43.

Dewey, J. (1933). *How we think: A restatement of reflective thinking to the educative process*. Heath (DC).

Dragoman, D., & Dragoman, M. (2004). *Quantum-classical analogies* (Vol. 92). Springer.

Escobar, C., Hickman, P., Morse, R., & Preece, B. (1992). The role of laboratory activities in high school physics. *Position Paper: American Association of Physics Teachers.[Online]*

Fang, Z. (1996). A review of research on teacher beliefs and practices. *Educational Research*, *38*(1), 47–65.

Feiman-Nemser, S., & Buchmann, M. (1985). Pitfalls of experience in teacher

preparation. *Teachers College Record*, *87*(1), 53–65.

Fletcher, P., & Johnston, I. (1999). Quantum mechanics: Exploring conceptual change. *Papers Presented at the Annual Meeting National Association for Research in Science Teaching March, 1999*, 28.

Franklin, A. (2007). The Role of Experiments in the Natural Sciences. In *General Philosophy of Science* (pp. 219–274). Elsevier.

Galison, P. (1987). *How experiments end*. The University of Chicago Press.

Gardiner, P. G., & Farragher, P. (1999). The quantity and quality of biology laboratory work in British Columbia high schools. *School Science and Mathematics*, *99*(4), 197–204.

Gooding, D. (1990). *Experiment and the making of meaning: Human agency in scientific observation and experiment*. Kluwer Academic Publishers.

Gupta, V. (2000). Laboratory Teaching-Aims and Approach. *First Symposium on Teaching and Learning in Higher Education, National University of Singapore*, 6–7.

Hacking, I. (1983). *Representing and intervening: Introductory topics in the philosophy of natural science*. Cambridge university press.

Halim, L., & Meerah, S. M. M. (2002). Science trainee teachers' pedagogical content knowledge and its influence on physics teaching. *Research in Science & Technological Education*, *20*(2), 215–225.

Hanson, N. R. (1979). *Patterns of discovery: An inquiry into the conceptual foundations of science*. CUP Archive.

Hart, C., Mulhall, P., Berry, A., Loughran, J., & Gunstone, R. (2000). What is the purpose of this experiment? Or can students learn something from doing experiments? *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, *37*(7), 655–675.

Heflich, D. A., & Iran-Nejad, A. (1995). *Reflective Educational Practice from the Perspective of Wholetheme Constructivism.*

Hodson, D. (1991). *Practical work in science: Time for a reappraisal*. Taylor & Francis.

Hofstein, A., & Lunetta, V. N. (2004). The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century. *Science Education*, *88*(1), 28–54.

Holmes, N. G., & Smith, E. M. (2019). Operationalizing the AAPT learning goals for the lab. *The Physics Teacher*, *57*(5), 296–299.

Jeans, J. H., & Jeans, J. (1950). *The growth of physical science.*

Johansson, A. (2018). Undergraduate quantum mechanics: Lost opportunities for engaging motivated students? *European Journal of Physics*, *39*(2), 025705.

Johansson, A., Andersson, S., Salminen-Karlsson, M., & Elmgren, M. (2018).

"Shut up and calculate": The available discursive positions in quantum physics courses. *Cultural Studies of Science Education*, *13*(1), 205–226. https://doi.org/10.1007/s11422-016-9742-8

Kalkanis, G., Hadzidaki, P., & Stavrou, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, *87*(2), 257–280.

Kane, M., & Trochim, W. M. (2009). Concept mapping for applied social research. *The Sage Handbook of Applied Social Research Methods*, 435–474.

Kang, E. J. S., Bianchini, J. A., & Kelly, G. J. (2013). Crossing the Border from Science Student to Science Teacher: Preservice Teachers' Views and Experiences Learning to Teach Inquiry. *Journal of Science Teacher Education*, *24*(3), 427–447. https://doi.org/10.1007/s10972-012-9317-9

Kang, & Wallace. (2005). Secondary science teachers' use of laboratory activities: Linking epistemological beliefs, goals, and practices. *Science Education*, *89*(1), 140–165. https://doi.org/10.1002/sce.20013

Killion, J. P., & Todnem, G. R. (1991). A process for personal theory building. *Educational Leadership*, *48*(6), 14–16.

Koyré, A. (1953). An experiment in measurement. *Proceedings of the*

*American Philosophical Society*, *97*(2), 222–237.

Kozminski, J., Lewandowski, H., Beverly, N., Lindaas, S., Deardorff, D., Reagan, A., Dietz, R., Tagg, R., EblenZayas, M., & Williams, J. (2014). AAPT recommendations for the undergraduate physics laboratory curriculum. *American Association of Physics Teachers*, *29*.

Krijtenburg-Lewerissa, K. (2020). *Teaching quantum mechanics at the secondary school level*. https://doi.org/10.3990/1.9789036549905

Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A., & Van Joolingen, W. R. (2019). Key topics for quantum mechanics at secondary schools: A Delphi study into expert opinions. *International Journal of Science Education*, *41*(3), 349–366. https://doi.org/10.1080/09500693.2018.1550273

Langer, G. M., & Colton, A. B. (1994). Reflective Decision Making: The Cornerstone of School Reform. *Journal of Staff Development*, *15*(1), 2–7.

Latour, B. (1987). Visualisation and Social Reproduction: Opening One Eye While Closing the other … A Note on Some Religious Paintings. *The Sociological Review*, *35*(1_suppl), 15–38. https://doi.org/10.1111/j.1467-954X.1987.tb00081.x

Lazarowitz, R. (1994). Research on using laboratory instruction in science. *Handbook of Research on Science Teaching and Learning/Macmillan*.

Leach, J. (2002). Teaching about the world of science in the laboratory: The influence of students' ideas. In *Practical Work in School Science* (pp. 52–68). Routledge.

Markle, S. M., & Tiemann, P. W. (1970). Really understanding concepts: Or, in frumious pursuit of the jabberwock. *(No Title)*.

Marshman, E., & Singh, C. (2017). Investigating and improving student understanding of quantum mechanical observables and their corresponding operators in Dirac notation. *European Journal of Physics*, *39*(1), 015707. https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa8e73

Matzdorf, R. (2009). *Quantum Analogs– Acoustic Experiments Modeling Quantum Phenomena*.

McKagan, S. B., & Wieman, C. E. (2006). Exploring student understanding of energy through the quantum mechanics conceptual survey. *AIP Conference Proceedings*, *818*(1), 65–68.

Merzel, A., Bitzenbauer, P., Krijtenburg-Lewerissa, K., Stadermann, K., Andreotti, E., Anttila, D., Bondani, M., Chiofalo, M. L. (Marilù), Faletič, S., Frans, R., Goorney, S., Greinert, F., Jurčić, L., Koupilová, Z., Malgieri, M., Müller, R., Onorato, P., Pospiech, G., Ubben, M., … Pol, H. (2024). The core of secondary level quantum education: A multi-stakeholder perspective. *EPJ Quantum Technology*, *11*(1), Article 1. https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-024-00237-x

Millar, R. (1998). *A map of the variety of labwork*. Working Paper 1 from the European project Labwork in Science Education ….

Millar, R. (2002). Varieties of labwork: A way of profiling labwork tasks. *Teaching and. Learning in the Science Laboratory/Kluwer Academic*.

Ministry of Culture. (2016). *Bildungsplan des Gymnasiums Physik.* Youth and Sports, Baden Württemberg.

OECD. (2023). *PISA 2025 Science Framework*. OECD Publishing.

Paeng, A.-J., & Paik, S.-H. (2005). A Case Study of Secondary School Science Teachers' Faiths on Experiments in Science Classes. *Journal of the Korean Association for Science Education*, *25*(2), 146–161.

Park, W., Yang, S., & Song, J. (2019). When Modern Physics Meets Nature of Science: The Representation of Nature of Science in General Relativity in New Korean Physics Textbooks. *Science & Education*, *28*(9–10), 1055–1083.

Pedaste, M., Mäeots, M., Siiman, L. A., De Jong, T., Van Riesen, S. A., Kamp, E. T., Manoli, C. C., Zacharia, Z. C., & Tsourlidaki, E. (2015). Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry cycle. *Educational Research Review*, *14*, 47–61.

Petri, J., & Niedderer*, H. (1998). A learning pathway in high-school level quantum atomic physics. *International Journal of Science Education*, *20*(9), 1075–1088. https://doi.org/10.1080/0950069980200905

Pultorak, E. G. (1996). Followling the Developmental Process of Reflection in Novice Teachers: Three Years of Investigation. *Journal of Teacher Education*, *47*(4), 283–291.

Schön, D. A. (1987). *Educating the reflective practitioner*.

Schön, D. A. (1992). *The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action (1st ed.).* Routledge.

Schwab, J. J. (1960). Inquiry, the science teacher, and the educator. *The School Review*, *68*(2), 176–195.

Shin, C., & Song, J. (2023). *Unexpected Situations in Elementary School Electric Circuit Lessons: An Experienced Teacher's Responses and Science Teaching Beliefs*.

Shulman, L. S. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, *15*(2), 4–14.

Siddiqui, S., & Singh, C. (2017). How diverse are physics instructors' attitudes and approaches to teaching undergraduate level quantum mechanics? *European Journal of Physics*, *38*(3), 035703.

Stadermann, H. K. E., Van Den Berg, E., & Goedhart, M. J. (2019). Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. *Physical Review Physics Education Research*, *15*(1), 010130.

Tobin, K. (1986). Secondary science laboratory activities. *European Journal*

*of Science Education*, *8*(2), 199–211.

Welzel, M., Haller, K., Bandiera, M., Hammelev, D., Koumaras, P., Niedderer, H., Paulsen, A., Bécu-Robinault, K., & von Aufschnaiter, S. (1998). TEACHERS'OBJECTIVES FOR LABWORK. *Research Tool and Cross Country resultsWORKING PAPER*, *6*.

Wilkinson, J. W., & Ward, M. (1997). The purpose and perceived effectiveness of laboratory work in secondary schools. *Australian Science Teachers Journal*, *43*(2).

Windschitl, M. (2003). Inquiry projects in science teacher education: What can investigative experiences reveal about teacher thinking and eventual classroom practice? *Science Education*, *87*(1), 112–143.

Winkler, B., Bitzenbauer, P., & Meyn, J.-P. (2021). Quantum physics≠ quantum physics. A survey of researchers' associations. *Physics Education*, *56*(6), 065031.

Woolnough, B. (1985). Practical work in science. *Cambridge University*.

Wu, J. (2011). Improving the writing of research papers: IMRAD and beyond. In *Landscape Ecology* (Vol. 26, pp. 1345–1349). Springer.

Wuttiprom, S., Sharma, M. D., Johnston, I. D., Chitaree, R., & Soankwan, C. (2009). Development and use of a conceptual survey in introductory quantum physics. *International Journal of Science Education*, *31*(5), 631–654.

Yang, I.-H., Jeong, J.-W., Kim, Y.-S., Kim, M.-K., & Cho, H.-J. (2006). Analyses of the aims of laboratory activity, interaction, and inquiry process within laboratory instruction in secondary school science. *Journal of the Korean Earth Science Society*, *27*(5), 509–520.

Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications*. Sage Thousand Oaks, CA.

Yu Eun-Jeong, Byun Taejin, Baek Jongho, Shim Hyeon-Pyo, Ryu Kumbok, & Lee Dongwon. (2021). 과학교육에서 탐구 관련 국외 연구 동향 -탐구의 인식과 관점, 전략과 지원, 교사 전문성의 관점에서-. 한국과학교육학회지, *41*(1), 33–46.

Zhu, G., & Singh, C. (2011). Improving students' understanding of quantum mechanics via the Stern–Gerlach experiment. *American Journal of Physics*, *79*(5), 499–507. https://doi.org/10.1119/1.3546093

과학기술정보통신부. (2023). 대한민국 양자과학기술 전략(2023.6.27). 세종: 과학기술정보통신부. https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?bbsSeqNo=65&nttSeqNo=3017410&sCode=user

교육과학기술부. (2011). *교육과학기술부 고시 제 2011-361호에 따른 2009개정 교육과정*.

교육부. (2022). 개정 교육과정 총론 주요사항 (시안). 세종: 교육부.

교육부. (2023). 유치원 및 초등· 중등· 특수학교 등의 교사자격 취득을 위한 세부기준. *교육부고시 제2023-14호*.

권문호, & 임성민. (2024). 물리 교사들의 양자 물리학 교육에 대한 인식. 새물리, *74*(9), 925–937.

권재술, & 김중복. (2013). 특수상대론 교육의 특수성. 현장과학교육, *7*(3), 203–211.

김영민, 박종원, 박종석, 이효녕, & 김영신. (2010). 과학 교사 양성 과정에서 과학교육학 과목 운영에 대한 과학 교사들의 인식과 요구. 한국과학교육학회지, *30*(6), 785–798.

김완선. (2019). *예비 물리교사를 위한 현대물리 개념 진단지의 개발 및 적용* [Ph.D. Dissertation]. 이화여자대학교 대학원.

박종원, 윤혜경, & 이인선. (2022). 초등학교 과학 교육과정에 현대물리 도입 가능성 탐색. 초등과학교육, *41*(2), 199–216.

서경혜. (2006). 교사의 학습과 교육과정. 교육과정연구, *24*(2), 257–276.

송진웅. (2006). 20 세기 과학교육의 분수령 JJ Schwab. 한국과학교육학회지, *26*(7), 856–869.

심재호. (2006). 과학교사 전문성과 실험 연수에 대한 중등 과학 교사의 인식. 생물교육, *34*(1), 27–37.

양일호, & 조현준. (2005). 학교 과학수업에서 실험의 목적에 대한 고찰. 초등과학교육, *24*(3), 268–280.

*양자과학기술 및 양자산업 육성에 관한 법률 제19784호*. (n.d.).

이경호. (2020). 학문, 교과, 교과내용, 교과교육 간 관계에 대한 비판적 고찰-과학교육을 중심으로. 한국과학교육학회지, *40*(6), 671–685.

이세연, & 이봉우. (2018). 고등학교 물리 교사들이 교과서 탐구 지도에서 겪는 어려움. 한국과학교육학회지, *38*(4), 519–526.

이윤정, & 임성민. (2011). 실험 저널쓰기에서 나타난 예비과학교사들의 과학실험에 대한 반성적 사고 분석. 한국과학교육학회지, *31*(2), 198–209.

장진아, & 송진웅. (2015). 초등학교 과학 수업의 탐구활동에서 형성되는 교실 규범의 특징에 대한 사례 연구. 한국과학교육학회지, *35*(2), 303–312.

조광희. (2022). “새물리” 에 게재된 경험적 연구 논문의 구성 체제 분석: 실험물리학과 물리교육 분야를 중심으로. 새물리, *72*(8), 605–614.

조성민, & 백종호. (2015). 예비 과학교사의 탐구지도 경험에 관한 사례연구: 탐구의 인식과 실천 사이의 딜레마 해소를 중심

으로. 한국과학교육학회지, *35*(4), 573–584.

조현준, 양일호, 김영신, 정진우, & 허명. (2006). 학교과학교육에서 실험 활동의 목적: 전문가 커뮤니티를 통한 델파이 연구. 한국과학교육학회지, *26*(2), 177–190.

홍성욱. (2020). *실험실의 진화: 연금술에서 시민과학까지*. 김영사.

# 부록

[부록 1] IRB 심의결과 통보서

## 심의결과 통보서

**수신**

| 연구책임자 | 이름: 홍성언 | 소속: 사범대학 과학교육과 | 직위: 석사과정 |
|---|---|---|---|

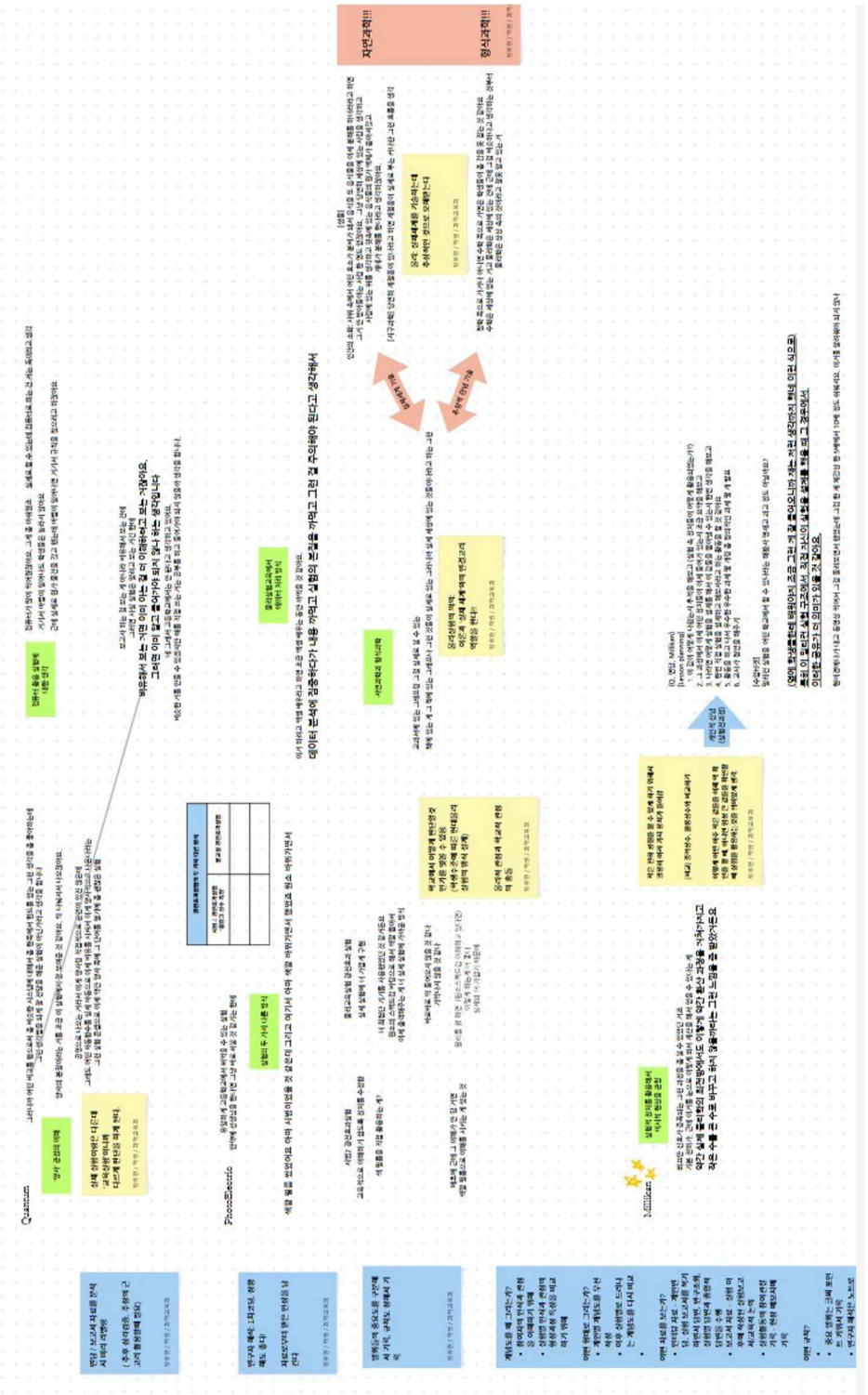
**과제정보**

| | | |
|---|---|---|
| 연구과제명 | | 물리 실험 수업에서 나타난 예비 물리교사들의 교육적 사고 탐색 |
| 연구종류 | | |
| 심의종류 | | 종료 |
| 심의일자 | | 2024-12-23 |
| 심의결과 | | 승인 |
| 정기보고주기 | | |
| 검토의견 | 계획서 검토의견 | 종료 보고를 승인합니다. 연구자께서는 다음 사항에 유의하여 주시기 바랍니다.<br>- 연구 자료, 특히 녹음 파일과 같은 개인 정보 자료의 보관, 관리 및 폐기에 유의하여 주시기 바랍니다.<br>- 연구 종료에 따라 본 승인 번호로는 연구를 지속할 수 없습니다. |

2024년 12월 23일

서울대학교 생명윤리위원회 위원장

[부록 2] 의미도 그리기 분석 방법의 예시 (예비교사 F)



## Abstract

# A Case Study of a Modern Physics Experiment Course in a Teacher Education Program with an Emphasis on Pedagogy

Seongeon Hong
Department of Science Education
The Graduate School
Seoul National University

Developing students' ability to comprehend modern science and technology is recognized as a key objective of science education. To achieve this goal, Modern physics has been consistently argued to be a core area of science that should be taught in schools. In recent years, both domestic and international curricula have increasingly included contents related to modern physics.

Experiments in modern physics play an indispensable role in substantiating emerging natural phenomena during the evolution of theoretical frameworks. Engaging in experimental activities provides valuable opportunities to understand the properties of microscopic phenomena and the nature of scientific inquiry. Despite these benefits, modern physics experiments are often perceived as challenging to teach, and their potential educational value is not fully realized in

school settings.

Therefore, it is essential to enhance the training of preservice teachers in modern physics; yet, empirical studies addressing this issue remain relatively scarce.

In response to these concerns, this study investigated the characteristics and educational values of modern physics experiments within a teacher education program. Specifically, it examined the pedagogical considerations of preservice physics teachers during a modern physics experiment course.

For this study, a modern physics experiment course offered as a mandatory course at a teacher's college was selected. The course comprises seven distinct experimental activities: two experiments on quantization (a quantum analogy experiment and the Millikan oil drop experiment), two experiments on magnetic resonance (NMR and ESR), two experiments on the properties of light (the photoelectric effect experiment and a solar cell experiment), and one experiment on probability distributions (the Maxwell–Boltzmann distribution experiment).

The researcher posited that preservice teachers can serve as reflective implementers, i.e., individuals who critically evaluate their own learning processes and deliberate on their future teaching practices. An instructional approach emphasizing pedagogical considerations (PC) in modern physics experiments was designed and implemented to facilitate this transformation. Specifically, a new PC section was added to the conventional lab report structure (Introduction–Method–Results–Discussion), enabling preservice teachers to reflect on and document modern physics experiments

from an educational perspective. The PC elicited from the preservice teachers involved two key processes: (1) identifying the distinctive features of the experiments from a physics major's perspective, and (2) reflecting on their personal experimental learning experience through an educational lens. The study focused on the learning outcomes associated with these processes.

For 7 weeks, lab reports incorporating PC were collected from 11 of the 15 preservice physics teachers who consented to participate. Additionally, semi-structured interviews were conducted with 7 participants, and the recordings were transcribed. The collected data were analyzed using qualitative case study methodology, which involved coding and categorizing the research materials. Then, I used concept mapping to clarify the context and analyze the features of each preservice teacher's PC.

The findings indicated that integrating PC into modern physics experiments stimulated reflective thinking about experimental experiences from an educational perspective—a dimension largely absent in traditional instruction. This approach helped preservice teachers grasp the key aspects of modern physics experiments and fostered valuable reflections on education. For instance, during the magnetic resonance experiments, preservice teachers identified several distinguishing characteristics: (1) a high level of theoretical complexity, (2) experimental designs that preclude the possibility of experimenter intervention, and (3) the use of advanced instrumentation. Correspondingly, their reflection underscored the importance of (1) possessing solid background knowledge, (2) designing experiments that allow for experimenter interaction, and

(3) acquiring a detailed understanding of the operating principles underlying the equipment.

Overall, PCs emerged from the modern physics experiment course could be synthesized into four principal aspects. First, preservice teachers recognized the importance of visualization, noting that strategies such as modeling and the use of analogies can serve as effective tools in modern physics instruction. Second, they highlighted the significance of observation and measurement, observing that direct observation may offer more engaging and effective learning opportunities than indirect observation. Third, they recognized a dual nature in experimental apparatus. While advanced equipment deepens our understanding of the engineering applications of physics, its complex, "black box" design often makes it hard to see the underlying "science in action". Finally, a noticeable disparity between experimental and theoretical learning was observed, underscoring the necessity of an integrated approach that cohesively bridges these two facets.

In summary, this case study—pedagogically emphasized modern physics experiment course—demonstrated a positive impact on the learning experiences of preservice physics teachers. The course not only deepened their understanding on the unique characteristics of modern physics experiments but also enabled them to critically assess the educational advantages and limitations of these experimental practices. As a case addressing a previously underemphasized aspect of teacher education, this study offers valuable insights into the exploration of modern physics experiments and their educational value from the perspective of future educators.

Keywords : Modern Physics, Experiment, Pre-Service Physics Teacher, Teacher Education
Student Number : 2023-27260