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

교육학박사학위논문

계통오차 분석 활동이 실험 오차와 실험 지도에 대한 교사의 인식에 미치는 영향

Effects of Exploring Systematic Errors on Teachers' Perception of Experimental Error and Laboratory Instructions

2020년 8월

서울대학교 대학원

과학교육과 물리전공

박 대 현

계통오차 분석 활동이 실험 오차와 실험 지도에 대한 교사의 인식에 미치는 영향

Effects of Exploring Systematic Errors on Teachers' Perception of Experimental Error and Laboratory Instructions

지도교수 전 동 렬

이 논문을 교육학박사 학위논문으로 제출함

2020년 4월

서울대학교 대학원

과학교육과 물리전공

박 대 현

박대현의 박사 학위논문을 인준함

2020년 7월

위 원 장 채 승 철 (인)

부위원장 전 동 렬 (인)

위 원 이 인 호 (인)

위 원 이 재 봉 (인)

위 원 변 태 진 (인)

국문초록

초중등학교의 탐구 실험에서 교과서에 수록된 참값을 얻기는 매우 어렵다. 교사들은 실험환경의 미비함과 실험의 미숙함 때문에 실험 오차가 발생하는 것을 당연하다고 간주하며, 오차의 원인과 보정에 별로 관심을 보이지 않는다. 그렇지만 오차의 원인을 찾고 오차를 줄이려는 노력은 실험방법과 실험도구의 특성을 이해하여 실험에 숙달하게 만들고, 실험자가 실험에 관련된 과학의 본성과 배경 이론을 이해하는 데 있어서 중요하다.

선행연구에 의하면 실험수업은 과학적 탐구능력 향상이라는 과학교육의 목표를 달성하기에 효율적인 교수법으로 인정받고 있지만, 학교에서는 실험수업이 이루어지는 횟수가 적고 실험수업이 지식을 습득하는 데 초점이 맞추어져 진행되고 있다. 실험 수업의 중요성이 강조되고 있지만 학교에서 실험수업이 잘 이루어지지 않는 이유는 실험을 어렵게 만드는 환경요인과 실험수업에서 교사들이 겪는 어려움 때문이다. 실험수업에 관한 선행연구에 의하면 교사들은 실험결과에 오차가 있을 때 그 원인을 자세히 찾기보다 실험환경이 좋지 않고 학생들이 실험에 미숙하기 때문에 오차가 생기는 것으로 여긴다. 하지만 오차의 원인을 피하기 어려운 환경과 학생의 미숙함으로만 여기고 넘어간다면 실험수업은 과학적 탐구능력의 향상이라는 본래의 목표를 달성하지 못하고 의미를 잃게 된다.

이 연구에서는 실험환경이 상대적으로 잘 갖추어진 학교에도 실험수업에 대한 동일한 어려움이 있는지 알아보기 위해 과학고등학교에 근무하는 물리 교사들을 대상으로 실험 오차와 실험 지도에 대해 어떤 인식을 가지고 있는지 면담하였다. 연구에 참여한 교사들은 세 명으로 모두 과학고등학교에서 물리를 담당하고 있으며, 교직 경력이 20년 이상, 10년 이상, 5년 미만인 교사를 한 명씩 선택했다. 우선 교사들은 실험값이 정밀하지 않고 정확하지 않은 어려움을 겪고 있었고, 정밀한 실험도구를 사용함으로써 이 문제를 해결하였다. 그리고 실험수업에서 학생들이 오

차의 원인을 찾아내더라도 오차를 보정하는 과정을 진행하지 않았으며, 실험키트를 사용하는 실험에서는 오차의 원인을 찾을 수 없는 경우도 있었다. 그리고 계통오차를 보정하는 것에 어려움을 겪고 있었다. 중등학교 물리실험 수업의 일차 목표는 대체로 실험결과를 이론과 비교하면서 이론의 타당성을 확인하는 것과 실험 능력을 향상시켜 학생 주도의 탐구설계 능력을 올리는 것이다. 그러나 실험도구와 실험과정에 드러나지 않는 체계적 오차가 있고 그것을 보정하지 않는다면 이런 목표를 달성하기 어렵다.

이 연구에서는 체계적 오차, 다시 말해, 계통오차의 원인을 이해하고 보정하는 활동을 통해 교사들이 오차 보정의 중요성을 확인하고 실험수업을 진행하는 태도에 변화가 있는지 조사했다. 실험 오차에는 몇 종류가 있는데, 우연오차나 실험자의 과실로 일어나는 오차는 개인의 실험 숙련도와 관련되므로 오랜 경험이나 정밀한 실험도구를 통해 해결될 수 있다. 그러나 계통오차는 실험기구에 내재된 체계적 오류이므로 실험자의 경험보다는 실험도구의 작동에 대한 이해가 중요하다. 그러므로 계통오차의 이해는, 우연오차보다, 오차가 실험에서 차지하는 역할과 오차 처리의 중요성을 교사들이 인식하게 하여 실험 지도의 태도 변화를 유도하는 데에 효과적일 수 있다.

교사들이 계통오차를 이해하는 데에 효과가 있을 실험 주제를 찾기 위해, 물리학 실험 교과서에 수록된 실험 도구를 조사하고, 실험 도구와 관련된 계통오차가 발생할 가능성이 큰 실험들을 찾았다. 모든 실험에서 계통오차를 찾아서 제거하기는 어려울 뿐만 아니라 계통오차의 제거 자체가 이 연구의 목표는 아니므로 계통오차를 발견하고 분석하고 보정하는 과정을 수행하기 용이한 실험 주제를 역학, 전자기, 빛과 파동, 현대물리 단원에서 한 개씩 선택했다. 연구자는 실험설계에 대한 이해에 도움이 되도록 스마트 기기, 오픈소스 하드웨어, 범용기기들을 사용하여 물리실험들을 설계했고, 연구참여자들이 이 실험들을 수행하여 계통오차를 분석해보도록 했다.

연구참여자들이 계통오차 분석 활동을 수행해 본 뒤에는 면담을 통해

참여자들이 이 실험을 수행하면서 오차에 대한 인식에 어떤 변화가 일어났는지 알아보았다. 연구참여자들은 계통오차 분석 활동을 통해 실험을 지도할 때 오차의 발생은 피할 수 없는 것이라는 자신의 기존 관념을 바꾸었으며, 계통오차에 대한 이해가 실험에 사용하는 도구를 고려해서 실험을 지도하도록 영향을 주었다고 하였다. 또한, 본 연구에서 진행한 활동이 오차에 대한 이해와 오차 처리가 갖는 교육적 의미를 환기하는 데 도움을 주었다는 소감을 밝혔다.

이 연구에서 계통오차의 원인은 사용한 실험도구의 종류에 따라서 분류할 수도 있었다. 스마트 기기를 사용한 실험에서는 기기의 작동 방식이 계통오차의 원인이 되었으며, 범용기기나 오픈소스 하드웨어를 사용한 실험에서는 이상적 조건으로 생각하고 사용한 실험도구의 물리량이 계통오차의 원인이 되었다. 이 결과를 바탕으로 계통오차의 원인을 찾고 측정값을 보정하는 과정을 순서도로 제시했으며, 순서도를 이용하여 계통 오차를 체계적으로 찾아내는 과정을 예시로 들고, 계통오차 분석활동을 교사 대상 실험연수로 활용할 수 있는 모형을 제안하였다.

연구를 요약하면 다음과 같다. 교사들은 일반적으로 실험에서 오차를 당연하게 여기며 오차의 원인을 찾아 보정하는 것을 어려워한다. 그러나 실험결과가 이론에서 크게 벗어나는데도 그것의 원인을 오차에 돌리면서 정작 오차의 분석에는 소홀하다면 실험교육이 과학의 본성을 외면하는 상황이 된다. 그러므로 오차의 본성을 탐구함으로써 교사들의 인식을 쇄신하기 위한 활동이 필요하다. 우연오차는 체계적이지 않지만, 계통오차는 기기 자체에 내재되어 있으므로 오차의 원인을 체계적으로 찾아내고 영향을 분석하기에 용이하다. 따라서 연구자는 적당한 실험 주제와 기기를 이용하여 계통오차를 찾아내고 분석하여 이해하는 것을 목표로 하는 계통오차 분석 활동을 설계하고 교사들에게 수행하게 했다. 그리고 이 활동을 경험한 물리 교사들의 오차에 대한 인식이 활동 전후로 어떻게 바뀌었는지 면담을 통해 확인했고, 교사의 이런 경험이 학생들에게 실험을 지도할 때 태도 변화에도 연결될 수 있음을 알았다.

이 연구의 결과를 확대하여 교사연수에 적용하면 교사들이 오차 처리

의 중요성과 이론과 실험의 관계를 인식하고 실험수업을 통해 과학의 본성을 지도하는 데에 도움이 되리라 믿는다.

주요어 : 계통오차, 교사, 실험 오차, 실험 지도, 물리실험, 실험도구
학 번 : 2011-31081

목 차

국문초록 ····· i
목차 ····· v
표 목차 ····· ix
그림 목차 ····· xi

Ⅰ. 서론 ····· 1
1.1. 연구의 필요성 ····· 1
1.2. 연구문제 ····· 4
1.3. 연구개요 ····· 5
1.4. 연구의 제한점 ····· 8

Ⅱ. 이론적 배경 ····· 9
2.1. 실험수업의 중요성과 실태 ····· 9
2.1.1. 실험과 실험수업의 구분 ····· 9
2.1.2. 실험수업의 종류 ····· 10
2.1.3. 실험수업의 중요성 ····· 10
2.1.4. 학교에서 실험수업의 목적과 실태 ····· 12
2.2. 실험수업의 어려움 ····· 13
2.2.1. 실험수업을 저해하는 환경적 요인 ····· 13
2.2.2. 실험수업에서 겪는 어려움 ····· 14
2.2.3. 실험수업의 어려움 정리 ····· 16
2.3. 실험수업에서의 오차 ····· 19
2.3.1. 실험 오차와 처리 방법 ····· 19
2.3.1.1. 정밀도와 정확도 ····· 19
2.3.1.2. 우연오차와 통계적 불확도 표현 ····· 21

2.3.1.3. 계통오차의 원인 ····· 22
2.3.2. 실험 오차에 대한 교사들의 인식 ····· 25
2.3.3. 실험수업에서 계통오차 분석의 중요성 ····· 27

Ⅲ. 연구방법 ····· 30
3.1. 연구참여자 ····· 30
3.2. 실험 오차와 실험 지도에 대한 인식 ····· 31
3.3. 계통오차 분석이 가능한 물리실험 설계 ····· 33
3.4. 계통오차 분석 활동 ····· 34
3.5. 계통오차 분석 활동의 효과 ····· 36

Ⅳ. 연구결과 ····· 37
4.1. 실험 오차와 실험 지도에 대한 교사들의 인식 ····· 37
4.1.1. 실험 오차에 대한 인식 ····· 37
4.1.1.1. 실험값이 정밀하지 않은 문제 ····· 37
4.1.1.2. 실험값이 정확하지 않은 문제 ····· 41
4.1.1.3. 계통오차 보정의 어려움 ····· 46
4.1.2. 실험 지도에 대한 인식 ····· 49
4.1.3. 정리 ····· 52
4.2. 계통오차 분석이 가능한 물리실험 설계 ····· 54
4.2.1. 설계할 물리실험 선정 ····· 54
4.2.1.1. 물리학 실험 교과서의 실험도구 조사 ····· 54
4.2.1.2. 설계할 실험에 사용할 실험도구 선정 ····· 59
4.2.1.3. 계통오차 분석이 가능한 물리실험 주제 선정 ····· 61
4.2.2. 설계한 실험의 실험방법과 실험결과 ····· 64
4.2.2.1. 스마트 기기를 이용한 실험 ····· 64
4.2.2.2. 범용기기를 이용한 실험 ····· 70
4.2.2.3. 오픈소스 하드웨어를 이용한 실험 ····· 72

4.3. 계통오차 분석 활동 ····· 75
4.3.1. 설계한 실험의 계통오차 보정 방법 ····· 76
4.3.1.1. 스마트 기기를 이용한 실험의 계통오차 ····· 76
4.3.1.2. 범용기기를 이용한 실험의 계통오차 ····· 81
4.3.1.3. 오픈소스 하드웨어를 이용한 실험의 계통오차 ····· 84
4.3.2. 계통오차 분석활동에서 교사들의 반응 ····· 87
4.4. 계통오차 분석 활동의 효과 ····· 89
4.4.1. 실험 오차에 대한 인식 변화 ····· 89
4.4.2. 실험 지도에 대한 인식 변화 ····· 92
4.4.3. 계통오차 분석활동 경험의 필요성 ····· 95
4.4.4. 정리 ····· 97
4.5. 계통오차 분석 활동 실험연수 모형 ····· 100
4.5.1. 물리실험에서 계통오차 분석 과정 ····· 100
4.5.1.1. 물리실험에서 발생할 수 있는 계통오차의 유형 ····· 100
4.5.1.2. 계통오차 분석 순서도 ····· 104
4.5.1.3. 계통오차 분석 예시 ····· 109
4.5.2. 교사 대상 계통오차 분석 활동 실험연수 모형 ····· 115
4.5.2.1. 계통오차 분석 활동 실험연수 모형 ····· 115
4.5.2.2. 계통오차 분석 활동 실험연수 예시 ····· 118

Ⅴ. 결론 및 제언 ····· 121

참고문헌 ····· 125

부록 ····· 130
[부록 1] IRB 심의 승인 통보서 ····· 130
[부록 2] 연구참여자 모집 문건 ····· 131
[부록 3] 연구참여자용 설명문 ····· 132

[부록 4] 연구참여자용 동의서 ····· 136
[부록 5] 물리학 실험 교과서의 각 단원에 사용되는 도구 ····· 137
[부록 6] 셔터속도와 촬영된 물체의 모습 ····· 141
[부록 7] 트래커로 위치-시간 데이터 얻기 ····· 142
[부록 8] 트래커로 선 스펙트럼의 분광분포 얻기 ····· 149
[부록 9] RC회로를 이용한 공기의 유전율 측정실험 ····· 151
[부록 10] 플랑크 상수 측정실험 ····· 153
[부록 11] 중력가속도 측정실험 안내서 ····· 161
[부록 12] 공기의 유전율 측정실험 안내서 ····· 165

Abstract ····· 169

표 목 차

[표 2-1] 실험수업의 어려움 ····· 17
[표 2-2] 실험수업의 어려움 문헌별 구분 ····· 18
[표 2-3] 문헌별 계통오차 원인 구분 ····· 24
[표 3-1] 연구참여자 정보 ····· 31
[표 3-2] 실험과 실험수업의 경험에 대한 면담 일정과 주요 질문 ····· 32
[표 3-3] 계통오차 분석활동의 단계 ····· 34
[표 3-4] 계통오차 분석활동 실시 일정 ····· 35
[표 3-5] 계통오차 분석활동의 효과에 대한 면담 일정과 주요 질문 ····· 36
[표 4-1] 실험 오차와 실험 지도에 대한 연구참여자들의 인식 ····· 53
[표 4-2] 물리학 실험 교과서 실험에 사용되는 실험도구의 종류 ····· 55
[표 4-3] 설계한 실험에 사용한 실험도구 ····· 61
[표 4-4] 설계한 실험과 사용한 도구 ····· 63
[표 4-5] 실험으로 측정한 중력가속도 ····· 65
[표 4-6] 설계한 중력가속도 측정실험과 교과서 실험의 차이점 ····· 66
[표 4-7] 레이저, 수소, 헬륨 스펙트럼의 파장을 트래커로 분석한 값 ·· 68
[표 4-8] 설계한 선스펙트럼 측정실험과 교과서 실험의 차이점 ····· 69
[표 4-9] 실험으로 측정한 전기용량과 공기의 유전율 ····· 71
[표 4-10] 설계한 공기의 유전율 측정실험과 교과서 실험의 차이점 ····· 72
[표 4-11] 설계한 플랑크 상수 측정실험과 교과서 실험의 차이점 ····· 74
[표 4-12] 계통오차를 보정한 중력가속도 ····· 78
[표 4-13] 계통오차를 보정한 전기용량과 공기의 유전율 ····· 83
[표 4-14] 계통오차 분석활동을 경험한 후
연구참여자들의 인식 변화 ····· 98
[표 4-15] 설계한 실험의 계통오차의 원인과 사용한 실험도구 ····· 102
[표 4-16] 물리학 실험 교과서의 실험도구와 관련된
계통오차의 원인 ····· 103
[표 4-17] 사용한 도구에 따른 오차의 원인 찾기 ····· 105

[표 4-18] 오차의 원인 확인 단계 ····· 107
[표 4-19] 실험도구의 작동방식에 의한 계통오차를 찾는 과정 예시 ·· 109
[표 4-20] 실험환경이 불완전한 조건이어서 발생한
계통오차를 찾는 과정 예시 ····· 110
[표 4-21] 추의 질량에 따른 가속도 ····· 111
[표 4-22] 시간기록계의 마찰에 의해 발생한 계통오차를 찾는 과정 ·· 112
[표 4-23] 줄에서 발생하는 정상파 실험에서 발생한
계통오차를 찾는 과정 ····· 114
[표 4-24] 중력가속도 측정실험의 계통오차 분석활동
연수 지도안 예시 ····· 119
[표 4-25] 공기의 유전율 측정실험의 계통오차 분석활동
연수 지도안 예시 ····· 120

그 림 목 차

[그림 1-1] 연구의 개요 ····· 7
[그림 2-1] 정밀도와 정확도 ····· 20
[그림 2-2] 물리학 실험 교과서의 실험수업 순서 ····· 28
[그림 3-1] 실험과 실험수업의 경험에 대한 면담의 주요 내용 ····· 32
[그림 4-1] 실험도구가 각 단원에서 사용되는 빈도 ····· 58
[그림 4-2] 낙하하는 추를 촬영하기 위한 실험도구 배치 ····· 64
[그림 4-3] 레이저, 수소, 헬륨 선 스펙트럼 사진 ····· 67
[그림 4-4] 간이 분광기를 통해 본 선 스펙트럼의 배치 ····· 67
[그림 4-5] 트래커로 얻어낸 수소 스펙트럼의 분광분포 ····· 68
[그림 4-6] 플랑크 상수 측정 회로도 ····· 73
[그림 4-7] 모눈, 추, 카메라의 배치 ····· 77
[그림 4-8] 계통오차를 보정하기 전후의 중력가속도 측정값 ····· 78
[그림 4-9] 조광창이 없는 간이 분광기로 촬영한 스펙트럼 ····· 80
[그림 4-10] 서로 다르게 촬영된 헬륨 스펙트럼 ····· 80
[그림 4-11] 축전기를 제거한 RC 회로 ····· 82
[그림 4-12] 계통오차를 보정하기 전후의 공기의 유전율 측정값 ····· 83
[그림 4-13] 전구를 깨뜨려 필라멘트의 저항을 측정하는 과정 ····· 85
[그림 4-14] 계통오차를 보정하기 전후의 플랑크 상수 측정값 ····· 86
[그림 4-15] 참값을 알고 있는 물리실험에서
계통오차 분석 순서도 ····· 108
[그림 4-16] 시간기록계를 이용한 중력가속도 측정 ····· 112
[그림 4-17] 줄의 정상파 실험에서 진동모드와 속력 ····· 113
[그림 4-18] 계통오차 분석활동 실험연수 모형 ····· 117

I. 서론

1.1. 연구의 필요성

2015 개정 교육과정에서 과학교육의 주요 목표는 학생이 과학의 개념을 이해하고 과학적 탐구능력과 태도를 함양하여 개인과 사회의 문제를 과학적이고 창의적으로 해결할 수 있는 과학적 소양을 기르는 데에 있다(교육부, 2015). 이런 과학적 소양을 키우는 데에 있어서 효과적인 교수방법 중의 하나는 수업시간에 이루어지는 실험활동이며(Hofstein & Lunetta, 1982; Schwartz & Crawford, 2006), 과학교사들도 실험수업의 목적이 학생의 과학적 탐구능력을 함양이라는 것에 동의한다(조현준 등, 2008). 그리고 4차 산업혁명기에 진입하며 미래 세대 인적자원양성을 위해 창의성, 문제해결력, 협업능력, 융복합적 사고력 등을 증진할 수 있는 교육의 방안으로 실험수업이 제시되기도 한다(손향구, 2019).

실험수업의 중요성이 강조되고 있지만 학교에서는 실험수업이 이루어지는 빈도가 낮고, 실험수업이 이루어지더라도 과학적 탐구능력 향상보다 과학 지식 습득에 목적을 두고 진행되고 있다(박현주, 2013; 양일호, 2006a; 2007; 최수빈, 2007). 실험수업의 빈도가 낮고, 본래의 목적대로 이루어지지 않는 이유는 실험 지도에 어려움이 있기 때문인데, 실험수업 관찰과 과학교사 면담으로 이를 조사한 선행연구에서 교사들은 실험 오차로 인해 실험 지도에 어려움을 겪는 것으로 나타났다. 과학교사들은 실험결과에 오차가 발생한 경우에 오차의 원인과 실험결과의 의미를 학생들에게 설명하기 어려워하고 있었고, 학교의 실험수업에서 오차가 발생하는 것을 당연히 여기고 오차에 대한 논의 과정을 진행하지 않고 있었다(노영, 2014; 한유화 등, 2014; 한감봉 등, 2012).

학교에서 주로 이루어지는 실험수업의 유형은 실험결과를 이용하여 과학법칙을 확인하는 확인실험인데(양일호 등 2007), 만약, 실험결과에 오차가 있음에도 오차에 대한 논의를 진행하지 않고 넘어간다면 과학법칙

을 확인하고 과학적 논의를 진행하는 실험수업의 목적은 달성하기 어려울 것이다.

실험수업에서 발생하는 오차의 종류는 우연오차와 계통오차로 구분된다. 우연오차는 불확도가 발생하는 원인이다. 그러나 반복측정과 통계처리를 통해서 불확도를 줄일 수 있으며, 측정과 자료해석에 불확도의 중요성을 강조한 연구들이 많이 진행되었다(강영창, 2013; 박종찬, 2009; 이재봉, 2006). 또, 불확도는 정밀한 실험도구를 사용함으로써 줄일 수 있는데, 박종찬(2009)은 측정과 자료해석에 관련된 과학자의 개념을 가지고 MBL 장비와 같이 정밀한 실험도구를 이용하면 우연오차에 의한 불확도를 줄일 수 있고 실험결과를 심도 있게 논의할 수 있다고 하였다.

계통오차는 측정값이 참값으로부터 편향되게 측정되는 것으로, 그 원인을 찾기 쉽지 않고 우연오차와 달리 반복측정을 통해서 제거할 수 없는 오차이다(Taylor, 1997). 참값을 알고 있는 확인실험에서 측정값의 신뢰구간을 구하여 계통오차가 있는지 확인할 수 있는데, 계통오차가 나타난다면 그 원인을 찾고 실험값을 보정해야 정확한 값을 이용해 과학법칙을 확인할 수 있다. 그런데 계통오차는 정밀한 측정을 한다고 해서 보정되지 않고, 장비의 영점 문제나 실험설계에서 고려하지 못한 오차의 원인을 찾아내야 보정할 수 있다(Barlow, 2002; Taylor, 1997).

정밀한 실험도구를 이용하여 우연오차에 의한 불확도를 줄이더라도 계통오차는 나타날 수 있으므로 확인실험수업에서 계통오차가 있다면 이에 대해 분석하는 것은 중요할 것이다. 또, 실험값이 정밀하지 않은 문제는 실험을 반복해서 수행하거나 정밀한 실험도구를 사용함으로써 해결할 수 있지만, 실험값이 정확하지 않은 문제는 실험설계, 실험방법, 실험도구 등 실험 전반을 다시 검토해야 해결할 수 있다. 계통오차를 분석하기 위해서는 이와 같이 실험 전반에 대한 반성적 검토가 요구되므로 우연오차 분석에 비해 실험에 대한 이해를 높일 수 있다. 그러므로 교사들에게 계통오차를 분석하는 경험을 제공해준다면 오차가 실험에서 차지하는 역할과 오차 보정의 중요성을 교사들이 인식하고, 실험수업에 이를 활용하도록 유도하는 데에 효과적일 수 있다

이에 본 연구에서는 계통오차 분석을 경험할 수 있는 물리실험을 설계하고 이 실험을 경험한 교사들에게 나타나는 인식의 변화를 알아보고 하였다. 이를 위해 과학고등학교에 근무하는 교사 3명을 연구참여자로 선정하여 물리교사들이 실험 오차와 실험 지도에 대해서 어떤 인식을 가지고 있는지 면담하였다. 다음으로 계통오차가 포함되어 있으면서 그 원인을 실험설계나 실험도구에서 찾을 수 있는 물리실험을 설계하였다. 그리고 설계한 물리실험을 이용하여 연구참여자들에게 계통오차 분석 활동을 경험하게 하였고, 그 후에 연구참여자들을 다시 면담하여 계통오차 분석 활동이 연구참여자들에게 어떤 변화를 가져왔는지 조사하였다. 마지막으로 연구결과를 바탕으로 물리실험수업에서 나타날 수 있는 계통오차의 유형을 분류하고, 오차의 유형에 따라 계통오차를 분석하는 과정을 순서도로 제시하였다. 또한 계통오차 분석활동을 교사 대상 실험연수로 어떻게 진행할 수 있을지 실험연수 모형을 제안하였다.

1.2. 연구문제

본 연구에서는 크게 네 가지 문제에 관심을 두었다. 구체적인 연구 문제는 다음과 같다.

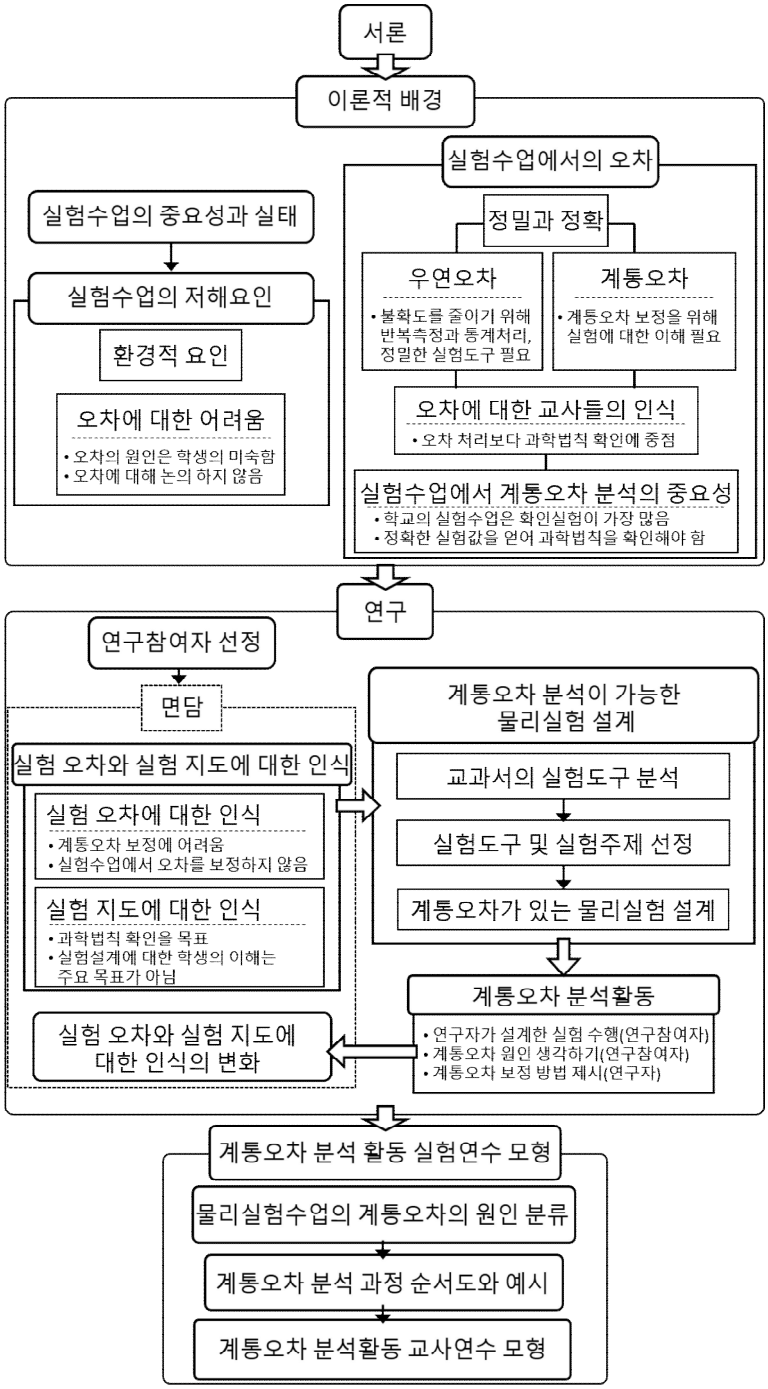
1) 교사들은 실험 오차와 실험 지도에 대해 어떤 인식을 가지고 실험 수업을 진행하고 있는가?
2) 계통오차의 원인을 실험 안에서 찾을 수 있고 이를 보정할 수 있다는 것을 교사들에게 알려줄 수 있는 물리실험은 어떻게 설계할 수 있는가?
3) 계통오차가 나타나는 물리실험에서 교사들은 계통오차의 원인을 찾아내고 오차를 보정할 수 있는가?
4) 계통오차 분석 활동은 교사들의 실험 오차와 실험 지도에 대한 인식에 어떤 영향을 미치는가?

1.3. 연구개요

본 연구에서는 실험수업에서 발생하는 오차를 보정하는 것의 중요성을 교사들에게 알려주기 위하여 계통오차 분석 활동을 경험할 수 있는 물리실험을 설계하고 교사들이 이를 경험해볼 수 있도록 하였다. 선행연구에 따르면 과학교사들은 실험수업에서 오차가 발생하는 어려움을 겪고 있었지만, 오차의 원인을 학생들의 미숙함으로 여기고 오차에 대한 논의를 진행하지 않는 것으로 보고되었다. 학교에서 가장 많이 이루어지는 실험수업의 유형은 확인실험인데, 오차에 대한 논의를 하지 않고 넘어간다면 실험수업의 목표를 달성하기 어려울 수 있다. 이에 학생들의 실험능력이 우수한 학교의 실험수업에서도 이와 같은 어려움이 나타나는지 알아보기 위해 과학고등학교 교사 3명을 연구참여자로 선정하여 물리실험수업에서 겪는 어려움을 알아보았다. 과학고등학교의 물리실험수업에서도 오차에 대한 어려움은 나타났으며, 면담내용을 분석하여 교사들이 실험 오차와 실험 지도에 어떤 인식을 지니고 실험수업을 진행하는지 알아내었다. 연구참여자들은 정밀한 실험값을 얻기 위해서는 정밀한 실험도구를 사용해야 한다는 것은 인식하고 있었지만, 실험값이 정확하지 않을 때에는 실험설계, 실험방법 등 실험 전반에 대해 다시 살펴봐야 한다는 것을 인식하지는 못했고 계통오차를 보정하는 것에 어려움을 겪고 있었다. 그리고 이론과 실험이 다름을 당연시하는 인식으로 인해 실험수업에서 오차의 원인을 찾아내더라도 이를 보정하여 정확한 값을 찾아내는 과정은 진행하지 않고 있었다.

이에 교사들에게 오차 보정의 중요성을 알려주고자 계통오차 분석 활동을 경험할 수 있는 물리실험을 설계하였다. 먼저 물리학 실험 교과서에 수록된 실험도구를 조사하였고, 설계에 사용할 도구를 선정하였다. 그리고 계통오차가 발생할 수 있는 실험의 주제를 역학, 전자기, 빛과 파동, 현대물리 영역에서 한 개씩 골라 실험을 설계하였다. 설계한 실험을 연구참여 교사 3명이 수행해보도록 하였고, 교사들이 계통오차의 원인을 찾아 보정할 수 있는지 알아보았다. 실험을 수행한 후에는 다시 면담을

하여 계통오차를 분석하는 활동이 연구참여자들의 실험 오차와 실험 지도에 대한 인식에 어떤 영향을 주었는지 알아보았다. 다음으로 물리실험 수업에서 나타날 수 있는 계통오차를 찾는 과정을 순서도로 제시하였고, 계통오차를 찾아내는 예시를 든 후에 계통오차 분석활동을 교사연수로 활용한 실험연수 모형을 제안하였다. 이런 연구의 개요를 [그림 1-1]에 나타내었다.


서론
이론적 배경
실험수업의 중요성과 실태
실험수업의 저해요인
환경적 요인
오차에 대한 어려움
• 오차의 원인은 학생의 미숙함
• 오차에 대해 논의 하지 않음
실험수업에서의 오차
정밀과 정확
우연오차
• 불확도를 줄이기 위해 반복측정과 통계처리, 정밀한 실험도구 필요
계통오차
• 계통오차 보정을 위해 실험에 대한 이해 필요
오차에 대한 교사들의 인식
• 오차 처리보다 과학법칙 확인에 중점
실험수업에서 계통오차 분석의 중요성
• 학교의 실험수업은 확인실험이 가장 많음
• 정확한 실험값을 얻어 과학법칙을 확인해야 함
연구
연구참여자 선정
면담
실험 오차와 실험 지도에 대한 인식
실험 오차에 대한 인식
• 계통오차 보정에 어려움
• 실험수업에서 오차를 보정하지 않음
실험 지도에 대한 인식
• 과학법칙 확인을 목표
• 실험설계에 대한 학생의 이해는 주요 목표가 아님
실험 오차와 실험 지도에 대한 인식의 변화
계통오차 분석이 가능한 물리실험 설계
교과서의 실험도구 분석
실험도구 및 실험주제 선정
계통오차가 있는 물리실험 설계
계통오차 분석활동
• 연구자가 설계한 실험 수행(연구참여자)
• 계통오차 원인 생각하기(연구참여자)
• 계통오차 보정 방법 제시(연구자)
계통오차 분석 활동 실험연수 모형
물리실험수업의 계통오차의 원인 분류
계통오차 분석 과정 순서도와 예시
계통오차 분석활동 교사연수 모형

[그림 1-1] 연구의 개요

1.4. 연구의 제한점

본 연구에서는 교사들에게 오차 보정의 중요성을 알려주기 위해 계통오차 분석 활동이 가능한 물리실험을 설계하였다. 그리고 계통오차를 찾을 수 있는 방법을 제시하였다. 과학고등학교 교사들을 대상으로 면담하여 물리실험수업에서 오차로 인하여 어떤 어려움을 겪는지 알아내었지만, 실험수업에 참여하는 학생들은 면담하지 못하였다. 과학고등학교 학생들은 이공계 진로를 희망하고 있고 일반고 학생들에 비해 실험을 해본 경험이 많다. 그러므로 과학고등학교 학생들은 실험수업에서 어떤 어려움을 겪고 있는지, 그리고 계통오차가 있을 때에 어떻게 대처하는지에 관해 연구가 진행될 필요가 있다.

실험설계에 대한 이해를 높이기 위해 스마트 기기, 범용기기, 오픈소스 하드웨어를 이용하여 물리실험을 설계하였다. 그러나 설계한 실험의 수가 제한적이므로 다양한 실험 개발 사례를 모아서 교사들에게 보급할 필요가 있다.

계통오차가 드러나는 실험을 설계하고 계통오차의 원인을 실험도구와 관련지어 분류하였지만 모든 종류의 계통오차를 찾아내고 나눌 수는 없었다. 본 연구에서 찾아낸 계통오차의 분류를 적용할 수 있는 범위가 제한되어 있다는 한계가 있다.

계통오차의 원인을 실험도구와 관련지어 분류하고 이를 이용해서 계통오차의 원인을 찾는 방법을 순서도로 제시하였다. 그러나 설계한 물리실험들은 알려진 값을 측정하는 실험으로 반복측정과 통계처리를 통해 계통오차를 드러낼 수 있는 실험이었다. 그러므로 학교에서 참값이 얼마인지 알 수 없는 실험을 진행할 때에 계통오차를 어떻게 처리해야 하는지에 대한 연구가 필요하다.

II. 이론적 배경

2.1. 실험수업의 중요성과 실태

2.1.1. 실험과 실험수업의 구분

Morrow(2003)는 과학교육에서의 실험은 과학자의 연구과정을 모방한다는 점에서는 비슷하지만 교사의 지도가 포함된다는 점에서 과학자들의 실험과는 구분된다고 하였다. 그리고 양일호 등(2006b)은 과학교육의 일환으로 학교에서 이루어지는 실험은 실험수업으로 불리어야 한다고 하였고, 이를 과학자의 실험과 구분하여 다음과 같이 정의하였다.

- 실험 : 과학적 가설의 검증이나 지식을 생성하기 위하여 과학자들이 수행하는 자연 현상에 대한 관찰 또는 기구와 재료의 실제적인 조작활동이다.
- 실험수업 : 실험실이나 그와 비슷한 환경에서 행해지는 실험을 수반하는 수업활동을 말하며 실험 전 관련 개념 학습과 실험 후 토론 및 정리 활동도 포함한다.

본 연구에서는 이 정의를 따라서 교사나 학생이 실험도구와 재료를 이용해 실제적인 조작활동을 하는 것을 실험, 수업활동으로 실험을 수행하고 이에 대한 학습이 이루어지는 것을 실험수업이라 하였다.

2.1.2. 실험수업의 종류

양일호 등(2006b)은 실험과 실험수업을 구분하여 정의하고 실험수업의 종류를 다음 4가지로 분류하였다.

1) 확인실험 : 과학적 사실이나 개념을 실험을 통해 확인하고 학습하는 실험수업으로 학생들은 요리책처럼 상세하게 나열된 절차를 따라 실험을 수행한다.
2) 발견실험 : 과학적 사실이나 개념에 관한 이론 학습이 이루어지기 전에 절차를 따라 실험을 수행하고 결과에 대한 토론을 통해 학습해야 할 내용을 학생들이 스스로 발견할 수 있도록 실험수업을 수행한다.
3) 탐색실험 : 구조화된 절차 없이 새로운 개념이나 물질들을 탐색하여 나중에 학습하게 될 현상에 대해 미리 탐색해보고 흥미를 갖도록 실험수업을 수행한다.
4) 연구실험 : 과학자들이 연구를 수행하는 것과 같은 방법으로 가설을 검증하거나 문제를 해결하면서 학생들이 문제를 해결하기 위해 다양한 활동들을 스스로 계획하고 실험하도록 실험수업을 수행한다.

양일호 등(2007)에 의하면 중등학교에서 가장 많이 이루어지는 실험수업의 유형은 확인실험이다.

2.1.3. 실험수업의 중요성

2015 개정 과학과 교육과정에서 과학은 모든 학생이 과학의 개념을 이해하고 과학적 탐구 능력과 태도를 함양하여 개인과 사회의 문제를 과학적이고 창의적으로 해결할 수 있는 과학적 소양을 기르기 위한 교과로 정의한다(교육부, 2015). 그리고 과학교육의 목표를 과학적 태도, 과학적

탐구능력, 과학 개념 이해, 과학과 기술 및 사회의 상호 관계 인식, 과학 학습의 즐거움과 과학의 유용성 인식에 두고 있다. 이런 과학교육의 주요 목표를 달성하기 위한 가장 특징적이며 효과적인 교수방법 중에 하나는 수업시간에 이루어지는 실험활동인데, 실험수업은 학생들에게 도구 조작능력과 과학적 탐구능력을 기르는 데에 도움을 준다(박현주, 2013; 조현준 등, 2008; 한감봉 등, 2012).

Nordmann et al.(2011)은 과학연구의 형태가 과학적 문제 해결에만 집중하던 전통적 연구 방식에서 벗어나 사회, 환경, 산업, 의학 등 시대의 다양한 요구를 반영하여 과학과 기술이 융합된 새로운 방식으로 이루어지고 있다고 하였다. 특히, 과학과 기술이 융합된 최근의 연구들은 과학 지식을 알아내는 것보다 새로운 것을 만들어 내는 것에 더 초점을 둔다. 새로운 것을 만들어 내기 위해서는 실제 사물을 다루는 능력이 중요하므로 과학연구자를 진로로 희망하는 학생들에게 실험수업을 통해 도구 조작능력과 과학적 탐구능력을 길러주는 것은 중요하다.

4차 산업혁명기를 살아갈 미래 세대에게는 과학자만이 아니라 시민들의 소양으로서 과학탐구능력이 강조된다. 손향구(2019)는 범람하는 과학 정보에 대한 신뢰여부를 판단하고 의사결정과정에서 오류를 최소화하기 위해서 기본 교양으로서의 실험수업이 필요하다고 하였다. 그리고 실험수업을 해야 하는 이유를 세 가지로 제시하였다. 첫째, 실험수업에서 실험을 직접 수행함으로써 한 가지 주제에 대해 심도 있게 사고하는 훈련을 반복한다면 유사과학에 의한 사회적 문제를 예방하거나 개선하는데 효과가 있다. 둘째, 관찰과 측정의 기예를 익히고 실천하며 문제제시, 실험설계, 결론도출 과정에 대한 이해를 높여서 전문가로서 성장하거나 사회문제 해결에 참여할 수 있는 기회를 넓힐 수 있다. 셋째, 협업을 통해 시너지효과를 경험하고 이의 중요성을 터득하게 될 수 있다. 이 세 가지 이유는 2015 개정 교육과정에서 과학을 개인과 사회의 문제를 과학적이고 창의적으로 해결할 수 있는 과학적 소양을 기르기 위한 교과로 정의한 것과 부합한다. 즉, 실험수업은 과학교육의 목표를 달성하기 위한 중요한 교육적 수단인 것이다.

2.1.4. 학교에서 실험수업의 목적과 실태

배성열과 박윤배(2000)는 과학교육의 목표 네 가지 영역(탐구, 지식, 과학적 태도, STS)에 대해 교사가 인식하고 있는 중요도 순위를 조사하였다. 초등학교 교사 76명과 중등학교 과학교사 217명을 대상으로 한 설문결과 교사들은 과학교육목표들 중에서 탐구를 가장 중요하게 생각하고 있었고, 그 다음으로 과학적 태도, STS, 지식의 순으로 나타났다.

조현준 등(2008)는 중학교 과학교사 108명, 고등학교 과학교사 104명을 대상으로 중요하게 생각하는 실험수업의 목적을 조사하였다. 그 결과 중등학교 과학교사들은 실험수업을 통해 과학탐구능력을 학생들에게 길러주는 것을 가장 중요한 목적으로 생각하고 있었다.

교사들을 대상으로 한 설문조사에서 가장 중요하게 생각하는 과학교육의 목표와 실험수업의 목적이 일치한다는 것은 실험수업이 과학교육의 목표를 달성하는 데에 중요한 교수방법임을 말해준다. 하지만 박현주(2013)에 의하면 60% 이상의 교사들이 한 학기에 1~3회 정도 실험수업을 하고 있어서 실험수업의 빈도는 비교적 낮은 것으로 나타났다.

실험수업이 이루어지더라도 과학탐구능력을 키우는 목적보다는 과학지식에 초점을 두어 실험수업이 진행되고 있다. 양일호 등(2007)은 초등학교와 중학교에서 이루어지는 실험수업의 유형을 조사하였는데, 학교에서는 과학적 개념이나 사실을 확인하는 유형의 실험수업이 주로 이루어지고 있었다. 양일호 등(2006a)은 중등학교 교사 18명을 대상으로 21차시분의 실험 수업을 분석하였는데, 실험의 목적 측면에서 과학지식이 비교적 강조되고 있음을 알아내었다. 최수빈(2007)은 중학교 교사 4명을 대상으로 실험활동의 목적에 대해 면담하였는데, 4명 중에서 3명의 교사가 실험활동의 목적을 과학지식의 습득으로 인식하고 있음을 알아내었다.

다수의 교사들을 대상으로 한 설문조사에서 교사들은 과학교육과 실험수업의 주요 목표가 과학탐구능력을 길러주는 것이라 응답하였지만, 학교에서 실제로 이루어지고 있는 실험수업은 과학지식 전달에 초점이 맞추어져 있는 것이다.

2.2. 실험수업의 어려움

학교에서 실험수업이 이루어지는 횟수가 적고 본래의 목적에 맞지 않게 이루어지고 있는 데에는 실험수업을 저해하는 어려움이 있기 때문이다. 실험수업을 저해하는 요인은 설문지나 실태조사를 통한 양적연구와 수업관찰과 면담을 통한 질적연구로 나뉘어 연구되었다. 설문지나 실태조사를 통해서는 주로 실험 외적인 환경요인이 조사되었으며, 수업관찰과 면담을 통해서는 실험수업을 진행하면서 겪는 어려움이 조사되었다.

2.2.1. 실험수업을 저해하는 환경적 요인

박현주(2013)의 연구에서 중학교 과학교사 110명을 대상으로 조사한 결과 실험수업을 저해하는 요인은 교사의 업무 과중, 수업진도와 평가, 실험실의 환경, 안전사고, 학생들의 태도, 교사의 실험수행능력 부족의 순으로 나타났다. 심재호(2006)는 중등학교 과학교사 168명을 대상으로 실험활동을 자주 하지 못하는 요인에 대해 조사하였는데, 실험준비 시간의 과다, 실험구기의 부실, 입시 중심의 교육, 탐구능력을 향상시키지 못하는 실험, 교사의 자신감 부족의 순으로 교사들이 응답하였다. 실험준비 시간이 과다한 것은 다른 교과의 교사들과 수업시수는 비슷하지만 실험을 준비하고, 정리하는 데에 시간이 많이 소요되는 것으로 교사의 업무 과중과 관련이 있다. 배성열과 박윤배(2000)는 탐구가 수업에서 잘 실현되지 않는 이유를 조사하였는데, 입시 및 학력평가 위주의 수업, 학급인원의 과다, 교사의 업무 과중 순으로 조사되었다. 입시 및 학력평가 위주로 수업이 실시되는 것은 중학교와 고등학교는 가르칠 개념이 너무 많기 때문이며 이는 수업진도와 평가에 대한 부담으로 이어진다(이양락 등, 2004). 정건상과 허명(1993)은 고등학교 생물교사를 대상으로 탐구학습이 저해되는 요인에 대해 조사하였는데, 대학 입학 전형 제도, 학급당 인원수의 과다, 실험시설 및 기구 부족, 교사의 업무 과중, 실험재료 구입 예산의 부족과 행정절차 순으로 교사들이 응답하여 다른 연구들과 비슷한

요인들이 조사되었다.

실험수업의 저해요인에 대해 조사한 연구들에서 교사의 업무 과중, 실험실 환경, 수업진도에 대한 부담과 같은 실험 외적인 환경요인은 공통으로 조사된 내용이다. 반면에 실험수업에 대한 교사들의 자신감 부족이나 실험수업 지도능력 부족은 다른 요인들에 비해 영향이 낮은 것으로 조사되었는데, 이는 교사들이 실험지도 능력과 자신감이 보통 이상의 수준이라고 생각하고 있기 때문이다(이윤종 등, 1997; 심재호, 2006; 박현주, 2013). 이와 같이 설문조사를 통해 실험수업을 저해하는 요인을 조사했을 때에는 교사의 능력이나 실험수업 안에서의 문제보다는 주로 실험 외적인 환경요인이 실험수업의 어려움으로 조사되었다.

2.2.2. 실험수업에서 겪는 어려움

학교에서 이루어지는 수업은 교사에 따라서 다양한 양상으로 이루어지므로 설문지나 실태조사를 통해서는 실험수업의 어려움에 대해 구체적으로 파악하기 부족하다. 반면, 과학교사의 실제 수업 분석, 심층 면담을 통해서 교사들이 실험수업에서 겪는 어려움을 조사한 연구들에서는 실험 외적인 환경요인 외에도 실험수업을 진행하면서 겪는 어려움들이 드러난다.

노영(2014)은 중등학교 과학교사 7명에 대해 면담을 진행하여 실험수업에서 겪는 어려움에 대해 조사하였다. 면담 결과 안전사고, 실험준비, 학생들의 태도, 예산 부족 등 실험의 환경적 요인들에 의해서 실험수업에 어려움을 겪는 것이 드러나는 것은 물론 실험수업 시간에 겪는 어려움도 드러났다. 교사들은 교과서에 실험과정이 명확하게 표시되어 있지 않아서 실험을 수행하기 어렵거나 학생들이 실험을 이해하지 못하는 경우가 있다고 하였고, 그 예로 교과서에 정확한 수치가 제시되어 있지 않거나 교과서에 사진이 제대로 실려 있지 않았던 사례를 들었다. 그리고 교과서에 제시되어 있는 과정대로 실험을 진행하더라도 결과 값이 제대로 나오지 않는 경우에 학생들에게 그 원인을 정확히 설명해주지 못하는

어려움을 겪고 있었다. 또, 실험수업에 배정된 시간이 짧아서 실험재료를 준비하고 정리하는 데에 시간이 부족하다는 문제점을 말하였다. 실험수업의 시간이 부족한 것은 환경적 요인이기도 하지만 시간이 부족해서 정해진 시간 안에 교과서의 실험을 다 수행할 수 없고 실험의 목표에 도달하지 못한다는 측면에서는 실험수업을 하면서 겪는 어려움이라 할 수도 있다.

한유화 등(2014)은 중학교 과학교사 22명을 대상으로 실험수업에서 주로 실시하는 단계에 대해 설문하고, 중학교 과학교사 3명을 선정하여 실험수업을 진행하는 과정에서 어떤 어려움을 인식하는지 면담하였다. 설문결과에 의하면 교사들은 실험결과에 대해 의사소통하고 설명을 정당화하는 단계에 가장 많은 시간을 할애하고 싶어 하지만, 실제로는 실험을 수행하고 자료를 수집하는 단계와 실험도구와 실험방법을 설명하는 단계에 실험수업 시간을 가장 많이 할애한다고 응답하였다. 그리고 그 이유로 학생들이 실험에 미숙해서 실험을 수행하기에도 시간이 부족하기 때문이라 응답하였다. 교사들을 대상으로 진행한 면담에서는 시간이 부족하기 때문에 실험결과에 대해 토의하는 단계가 생략되고 있으며, 실험결과가 이론과 일치하지 않더라도 교사와 학생들은 이것을 실험미숙으로 인한 오차라고만 판단하고 넘어간다는 문제점이 드러났다. 한유화 등(2014)은 이렇게 수업시간 안에 실험을 수행하고 끝내는 효율성에만 초점을 두게 되면 학생들은 학습해야 하는 내용을 그대로 받아들이기 때문에 본래 의도하였던 실험수업의 목표에 도달하지 못한다고 하였다.

한감봉 등(2012)은 중학교 과학 수업과 실험에 대해 3명의 교사를 대상으로 수업관찰 및 면담을 진행하였다. 앞서 노영(2014), 한유화 등(2014)의 연구에서처럼 교사들은 실험의 결과가 교과서의 내용과 일치하지 않는 데에 어려움을 느끼고 있었는데, 오차가 발생한 것에 대해 실험실의 환경과 학생들의 미숙함을 오차의 원인으로 생각하고 있었다. 그리고 교사의 이런 인식에 영향을 받은 학생 중에는 실험결과를 신뢰하지 못하고 이론에 맞게 결과를 조작하기도 하는 등 실험수업이 학생들에게 부정적인 영향을 준 사례도 보고되었다.

세 연구에서 공통적으로 교사들은 교과서 실험에서 오차가 발생하는 것에 대해 어려워하고 있었고, 오차가 발생한 원인을 주로 학생들이 실험에 미숙하기 때문이라고 생각하고 있었다. 한유화 등(2014)의 연구에서 교사와 학생들은 얻어낸 실험결과를 믿지 않고 실험과정에서 잘못된 행동으로 인한 오류라고 생각하고 있었고, 한감봉 등(2012)의 연구에서는 이론에 맞도록 실험결과를 조작하는 학생들의 사례가 드러났다. 즉, 실험결과에 오차가 있음으로 인해서 본래 의도하였던 실험수업의 목표에 도달하지 못하는 어려움이 있는 것이다.

2.2.3. 실험수업의 어려움 정리

선행연구를 분석하여 알아낸 실험수업의 어려움과 이에 대한 설명을 [표 2-1] 나타내었다. 교과서 실험의 문제를 제외하면 실험 자체의 문제가 아니라 대부분 실험 외적인 환경요인이 실험수업을 저해하는 요인으로 조사되었다. [표 2-2]에는 문헌에 따라서 조사된 실험수업의 어려움을 나타내었다.

[표 2-2]를 보면 양적연구에서 교사들은 교사의 업무과다, 수업진도와 평가에 대한 부담, 실험실 환경을 실험수업을 저해하는 요인으로 가장 많이 꼽고 있다. 반면, 교사들을 직접 면담하고 수업을 관찰하는 질적연구에서는 실험수업을 진행하면서 겪는 어려움이 드러난다. 이 어려움들은 시간 부족으로 인한 실험 지도의 어려움, 실험결과에 나타난 오차에 대한 어려움이다. 이렇게 질적연구를 통해 실험수업 자체에서 겪는 어려움이 드러나지만 이 연구들은 실험수업을 저해하는 환경요인들이 해결되지 않은 학교의 교사들을 대상으로 연구를 수행한 것이다. 따라서 환경요인들이 해결된 학교의 실험수업에서도 이와 같은 어려움이 드러나는지 조사할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 실험실 환경, 예산 문제 등 환경요인들로 인한 실험수업의 어려움이 어느 정도 해결된 과학고등학교에 근무하는 교사들을 연구참여자로 선정하여 연구를 진행하였다.

[표 2-1] 실험수업의 어려움

종류	어려움	설명
환경	교사의 업무과다	• 학교 업무 과중 • 실험수업 준비와 정리에 소요되는 시간에 대한 부담
	수업진도, 평가	• 교과서에 제시된 내용의 과다 • 입시 중심의 교육 • 평가에 대한 부담
	실험실 환경	• 실험 기구의 노후화 • 실험 기구 및 재료의 부족 • 실험 보조원 부재
	학급인원 과다	• 학급 인원수가 많아서 실험지도에 부담
	예산 부족 및 집행 절차	• 실험 기구 및 재료 구입 예산 부족 • 복잡하고 시간이 걸리는 예산 집행 절차
	과학교육 연구 부족	• 과학교과 교육에 대한 연구가 부족
학생	학생들의 태도 및 미숙함	• 실험에 대한 학생들의 집중력 부족 • 학생들의 비참여적 태도 • 실험과정과 보고서 작성에 무임승차하는 학생 • 학생들의 실험기구 조작 미숙 • 실험에 대한 학생들의 이해도 부족
	안전사고	• 학생 안전사고 발생에 대한 부담
교사	교사의 실험수행능력	• 교사의 실험기구 조작능력, 약품, 현미경, 전기회로 조작 능력 등 부족 • 실험수업 지도에 대한 자신감 부족
실험	실험시간 부족	• 수업시간 안에 교과서 실험의 내용을 끝낼 수 없음 • 수업시간 안에 모든 실험 조들을 지도할 수 없음 • 실험결과에 오차가 있어도 결과에 대해 논의할 시간이 없음
	교과서 실험의 문제	• 교과서의 실험이 학생들의 탐구능력을 향상시켜주지 못함 • 교과서의 절차대로 실험을 진행했음에도 결과가 제대로 나오지 않음 • 교과서에 제시된 실험과정이 명확하지 않음

[표 2-2] 실험수업의 어려움 문헌별 구분

종류	어려움	양적 연구				질적 연구		
		박현주 (2013)	심재호 (2006)	배성열과 박윤배 (2000)	정건상과 허명 (1993)	노영 (2014)	한감봉 등 (2012)	한유화 등 (2014)
환경	교사의 업무과다	○	○	○	○	○		
	수업진도, 평가	○	○	○	○			
	실험실 환경	○	○	○	○	○		
	학급인원 과다			○	○			
	예산 부족 및 집행 절차			○	○	○		
	과학교육연구 부족			○				
학생	학생들의 태도 및 미숙함	○		○		○	○	○
	안전사고	○				○		
교사	교사의 실험수행능력	○	○	○				
실험	실험시간 부족					○	○	○
	교과서 실험의문제		○	○		○	○	○

2.3. 실험수업에서의 오차

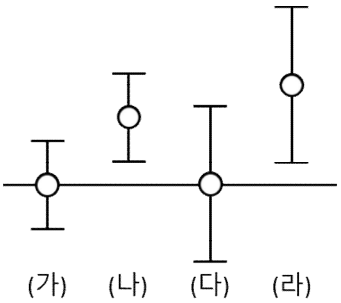
2.3.1. 실험 오차와 처리 방법

실험수업에서 학생들은 측정을 통하여 과학법칙과 원리를 확인할 수 있는 기초자료를 얻는데, 측정이란 도구나 기계를 사용하여 길이, 질량, 온도, 부피 등의 물리량을 재어서 기록하는 활동이다(박승호 등, 2018). 측정은 아무리 주의를 기울이고 과학적으로 실시하더라도 모든 측정에는 필연적으로 오차가 발생하게 되어 있다(Taylor, 1997). 오차는 어떤 양을 측정하였을 때 생기는 측정값과 참값의 차이를 말하는 것으로 아무리 주의해서 측정한다 하더라도 오차를 완전히 제거할 수 없다. 실제 실험에서는 많은 경우에 참값을 정확히 알 수 없기 때문에 오차 또한 알 수 없어서 불확도를 구하여 측정값의 특성을 표현한다. 따라서 측정값을 표현할 때에는 불확도와 함께 나타내야 하며, 불확도 범위 안에 참값이 있게 된다면 어느 정도 정확한 실험을 했다고 볼 수 있지만 참값이 불확도 범위 밖에 있게 되면 오차가 발생한 것으로 볼 수 있다. 그리고 오차의 종류에는 대표적으로 우연오차와 계통오차가 있다.

2.3.1.1. 정밀도와 정확도

정밀도는 여러 번 측정했을 때 얼마나 일관성 있는 값들이 측정되느냐를 나타낸다. 정밀도는 상대불확도로 표현하며, 상대불확도는 불확도를 측정값으로 나눈 값이다. 정확도는 측정값이 협정 참값에 얼마나 가까운가를 나타낸다. 정확도는 상대 오차로 표현하며, 상대오차는 측정값에서 참값을 뺀 후에 참값으로 나누어서 구한다(박승호 등, 2018). 측정값이 정확하지 않은 이유에는 여러 이유가 있을 수 있다. 본 연구에서는 측정으로 얻은 실험값이 정밀하기는 하지만 알려져 있는 참값과 일치하지 않을 때에 측정값이 한쪽으로 치우치는 계통오차가 있는 것으로 간주하였다.

[그림 2-1]에서 가로인 실선이 실험으로 측정하고자 했던 참값, 오차 막대는 불확도의 크기라고 할 때에, (가)는 정밀하고 정확한 측정, (나)는 정밀하지만 정확하지 않은 측정, (다)는 정확하지만 정밀하지 않은 측정, (라)는 정확하지도 정밀하지도 않은 측정이다.



[그림 2-1] 정밀도와 정확도

정밀한 측정을 위해서는 정밀한 실험도구를 사용해야 한다. 물리실험 수업에는 정밀한 실험을 위해서 MBL과 같은 장비를 사용한다. 박종찬(2009)에 의하면 측정과 자료해석과 관련된 과학자의 개념을 가지고 MBL 장치를 사용하면 정밀한 측정을 할 수 있고 실험수업에서 실험결과에 대해 심도 있는 논의를 할 수 있다고 하였다. 그러나 정밀한 측정이 정확한 측정인 것은 아니다. 정밀한 측정과 정확한 측정은 구분되어야 하는데(한국표준과학연구원, 2010), 학생들은 정밀과 정확에 대해 오개념을 가지고 있거나 정밀한 측정을 했을 경우에 정확하게 측정한 것으로 인식하는 경우가 있다고 보고되었다(신광문 등, 2011; 이재봉, 2006).

측정값이 정확하지 않을 때에는 오차의 원인을 찾아서 제거해주어야 하는데 이 방법은 정해져 있는 것이 아니다(박승호 등, 2018; Barlow, 2002; Bevington & Robinson, 2003; Taylor, 1997). 참값을 알고 있지 않은 실험의 경우에는 측정한 값이 정확한 값인지 확인해야 하는데, Ravetz(1971)는 사용하는 실험도구에 대한 이해와 실험에 대한 경험이 없으면 실험으로 측정한 값이 정확한 값인지 확신할 수 없다고 하였고, Barlow(2002)는 정확한 값인지 판단하는 데에 여러 수학적 도구를 사용할 수 있지만 많은 시간과 노력이 필요하다고 하였다. 즉, 정확한 값을

측정하는 데에 정해진 방법을 제시하기 힘들며, 한 가지 확실한 것은 정밀한 실험도구의 사용이 곧 정확한 측정을 의미하지는 않는다는 점이다.

학교의 실험수업은 대부분 실험결과로 과학법칙을 확인하는 확인실험 수업이 이루어진다(양일호 등, 2007). 따라서 측정하고자 하는 참값을 알고 있는 경우가 많기 때문에 측정값이 정확하게 측정되었는지의 여부를 판단할 수 있다. 그러나 실험결과가 정밀하게 측정되었더라도 정확하지 않으면 결과에 대한 논의가 어려울 수 있다.

2.3.1.2. 우연오차와 통계적 불확도 표현

우연오차는 아무리 주의해도 피할 수 없는 불규칙적이고 우발적인 원인에 따라 일어나는 오차를 말하며, 반복 측정을 통해 오차를 줄일 수 있고 통계적으로 불확도를 분석할 수 있다. 하지만 보정할 수 없는 오차이다. 일반적으로 불확도를 결정할 때에는 일반적으로 A형 표준 불확도와 B형 표준 불확도를 계산하여 합성 표준 불확도를 계산한 후에 포함인자 k를 곱하여 확장 불확도를 구한다(한국표준과학연구원, 2010). A형 표준 불확도는 시행횟수가 N일 때에 표준편차를 $\sqrt{N}$으로 나눈 값이고, B형 표준 불확도는 반복적으로 측정되지 않은 값에 대해서 모든 정보에 근거한 과학적 판단에 의해 결정된다. 그리고 포함인자 k는 요구되는 포함확률 또는 신뢰의 수준에 따라 정해진다. 2015 개정 교육과정의 물리학 실험 교과서는 반복측정을 통해 확장 불확도를 표현하고 신뢰도를 함께 나타내는 것이 바람직하며, 학교에서는 복잡한 계산 등을 고려하여 A형 표준 불확도만으로 확장 불확도를 계산한다고 제시하고 있다(박승호 등, 2018). 그리고 물리실험에서 측정값은 여러 번 반복측정을 하여 다음과 같이 나타내라고 제시한다.

$$\text{측정값 } x \Rightarrow \overline{x} \pm (\text{확장 불확도})\ (\text{단위})\ (\text{신뢰도: } \sim\%)$$

여기서 $\overline{x}$는 측정값의 평균을 나타내며, 이와 같이 측정값을 평균값과

확장 불확도로 표현해 이루어진 구간을 신뢰구간이라고 한다. 그리고 이 신뢰구간 안에 참값이 존재할 확률을 신뢰도라고 한다. 만약, 참값을 알고 있는 실험에서 반복측정으로 측정값과 확장 불확도를 구했지만 참값이 신뢰구간 안에 들어가지 않는다면 측정값은 정확하지 않고 계통오차가 포함되어 있다고 생각할 수 있다. 물리실험에서 불확도를 이용해서 측정값을 표현하면 실험결과에 계통오차가 포함되어 있는지 알 수 있으므로 반복측정을 하는 것과 신뢰구간을 구하는 것은 실험결과 분석에 중요한 과정이다(Talyor, 1997). 이에 물리실험에서 측정과 자료해석에 불확도의 중요성을 강조하는 연구들이 많이 진행되었다(강영창, 2013; 박종찬, 2009; 이재봉, 2006).

본 연구에서 물리실험을 설계할 때에는 물리학 실험 교과서의 안내를 따라 반복측정을 한 후에 A형 표준 불확도에 포함인자 k를 곱하여 확장 불확도를 구하는 방식으로 측정값을 표현했다. 그 이유는 대학생인 예비교사들도 불확도의 표현과 분석을 어려워하기 때문에(강영창, 2013; 이재봉, 2006), 최대한 간단한 방식으로 불확도를 구하기 위해서이다. 그리고 설정한 측정값의 신뢰도는 95 %이며, 측정값의 신뢰구간이 참값을 포함하게 되면 정확한 값을 측정한 것으로 가정하였다.

2.3.1.3. 계통오차의 원인

계통오차는 측정값이 참값으로부터 한쪽으로 편향되게 측정되는 오차이다. 그리고 오차의 크기와 부호를 추정할 수 있고 보정이 가능한 오차이다(박승호 등, 2018). 하지만 우연오차와는 다르게 반복하여 측정을 하더라도 드러나지 않으며 통계적 분석으로도 발견할 수 없다. Bevington & Robinson(2003)은 계통오차는 실험을 설계하는 단계에서 모두 찾아내고 제거해야 한다고 하였지만 구체적인 방법은 제시하지 않았다. 그리고 Taylor(1997)는 계통오차들에 대한 취급 방법을 가르쳐주는 간단한 이론은 없으며, 유일한 이론이 있다면 계통오차들이 모두 식별되어야 한다는 것이라고 하였다. 이렇게 계통오차를 알아내는 방법은 정해져 있지 않고,

전문가 수준이 요구되기 때문에 오차처리의 중요성을 강조한 연구들에서도 계통오차를 다루는 내용을 찾아보기 어렵다. 물리실험에서 측정과 자료해석에 불확도의 중요성을 강조하는 연구들에서는 정확과 정밀에 의한 자료해석을 중요시하지만 계통오차의 다양한 예시나 처리 방법에 대해서는 다루고 있지 않다(강영창, 2013; 박종찬, 2009; 이재봉, 2006). 신광문 등(2011)이 개발한 물리실험 보고서 분석틀에서도 정확성과 정밀성을 이해하고 실험결과 분석에 적절하게 사용하는 것을 평가요소로 제시하고 있지만, 계통오차를 어떻게 처리해야 하는지 알려주지 않는다.

계통오차의 원인을 찾아내고 보정하기 위해서는 계통오차가 발생하는 원인을 종류별로 구분해야 한다. 계통오차가 발생하는 원인은 문헌마다 조금씩 다르지만 보통 장비의 계통 불확실성, 기기의 영점 조정 문제, 실험자의 실수로 나뉜다(박승호 등, 2018; Barlow, 2002; Taylor, 1997). Taylor(1997)는 계통오차가 발생할 수 있는 경우를 측정장비의 계통오차가 알고 있던 것보다 더 큰 경우, 실험에 사용하는 상수의 값들이 정확하지 않은 경우, 실험설계에 결함이 있을 경우로 나누었으며, 실험설계에 결함이 있는 경우에 계통오차의 원인을 찾기 매우 어렵다고 하였다. Barlow(2002)는 측정장비에 사용되는 파라미터들의 불확도에 의해 발생하는 계통효과는 계통오차와 구분되어야 한다고 했으며, 계통오차를 장비의 눈금이 편향되어 있어서 생기는 계통오차와 실험자의 실수에 의해서 생기는 계통오차로 구분하였다.

박승호 등(2018)은 물리학 실험 교과서에서 계통오차의 종류를 계기오차, 환경오차, 개인오차로 구분하였다. 계기오차는 눈금이 정확하지 않거나 영점 보정이 되지 않은 경우이고, 환경오차는 측정기구가 온도, 습도, 압력 등 외부 환경의 영향을 받는 경우이다. 개인오차는 어떤 현상이 일어나는 시간을 인식하는 정도가 개인마다 다른 것처럼 개인의 차이에 의해서 발생한다.

[표 2-3] 문헌별 계통오차 원인 구분

<table>
<tr><th rowspan="2">구분</th><th rowspan="2">원인</th><th colspan="3">참고문헌</th></tr>
<tr><th>Taylor(1997)</th><th>Barlow(2002)</th><th>박승호 등 (2018)</th></tr>
<tr><td>계통 효과</td><td>파라미터의 불확실성</td><td>장비에 내재된 오차 (파라미터의 불확도)</td><td>파라미터들의 불확도에 의한 계통 불확실성</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">계통 오차</td><td rowspan="2">장비의 문제</td><td rowspan="2">장비나 실험에서 사용하는 계산식의 파라미터들의 오차</td><td rowspan="2">눈금의 편향 문제 (장비의 영점 보정)</td><td>계기오차</td></tr>
<tr><td>환경오차</td></tr>
<tr><td>실험자의 문제</td><td>실험설계에 포함된 실수에 의한 오차</td><td>기기를 조건에 맞게 사용하지 않는 실수</td><td>개인오차</td></tr>
</table>

세 문헌에서 구분한 계통오차의 원인을 [표 2-3]에 나타내었다. 정리한 것을 보면 계통효과와 계통오차는 구분되어야 한다. 계통효과에 의한 계통오차는 필요로 하는 보정값을 정확히 모르기 때문에 생기는 측정값의 불확도이며, 이것은 측정값이 편향되게 측정되는 계통오차와 다르다(한국표준과학연구원, 2010). Taylor(1997)는 계통효과에 의한 계통오차와 편향에 의한 계통오차를 함께 계통오차로 설명하고 있고, Barlow(2002)는 계통효과와 계통오차는 구분되어야 한다고 설명한다. 박승호 등(2018)은 물리학 실험 교과서에서 계통오차의 종류로 측정값이 참값에서 한쪽으로 편향되게 측정되는 오차만 제시한다. 본 연구에서는 물리학 실험 교과서에서 제시한대로 측정값이 참값으로부터 한쪽으로 편향되게 측정되는 오차를 계통오차로 다룬다.

Barlow(2002)는 계통오차가 생기는 경우를 장비의 눈금이 편향되어 있어서 발생하는 계통오차와 실험자의 실수에 일어나는 계통오차로 구분하였다. 하지만 이런 구분이 절대적인 것은 아니다. 예를 들어, 강철로 된 자를 이용해서 측정할 때는 자의 열팽창을 고려하여 실험실의 온도를 측정해서 측정값을 보정해줘야 한다. 이것은 물리학 실험 교과서의 기준으로는 환경오차에 해당하는데, Barlow(2002)의 기준으로는 장비의 영점 문제가 될 수도 있고 실험자의 실수가 될 수도 있다. 만약, 이 환경오차를 온도에 의해서 자의 눈금이 편향되는 것으로만 생각하면 장비의 영점

문제에 의한 계통오차로 볼 수 있다. 그런데 실험자가 이 환경오차를 고려하지 않고 측정값을 얻으면 측정값은 한쪽으로 치우치게 되므로 실험자의 실수에 의한 계통오차가 발생한 것으로도 볼 수 있다. 즉, 계통오차의 원인을 실험자의 실수로 여긴다면 계통오차의 원인을 구분하기는 힘든 것이다. 그리고 계통오차는 원인을 알아내면 보정할 수 있는 오차이므로, 실험자가 실수로 오차의 원인을 고려하지 않은 것으로 치부하기 쉽다.

교사들은 실험결과에 오차가 나타나는 이유를 학생들의 미숙함으로 여기고 있었는데(한감봉 등, 2012; 한유화 등, 2014), 오차의 원인을 실수나 미숙함으로 여기는 경우 학생들은 직접 얻은 실험결과를 신뢰하지 못하고 결과를 조작하는 사례가 발생하기도 했다. 따라서 계통오차의 원인을 실험을 하는 개인의 실수로 돌리는 것이 아니라 실험 자체와 관련된 내용으로 오차의 원인을 구분할 필요가 있다.

2.3.2. 실험 오차에 대한 교사들의 인식

학교의 실험수업에서 교사들은 실험결과에 오차가 있음으로 인해서 어려움을 겪고 있는 것으로 조사되었다. 한유화 등(2014)은 실험수업에 오차가 있는 경우에 이에 대한 논의를 진행하고 싶어 하지만 시간 부족의 이유로 오차에 대한 논의를 진행하지 못한다고 하였다. 교사들이 실험수업의 시간이 부족하다고 생각하는 이유는 학생들이 실험에 미숙하기 때문에 실험에 대해 자세히 설명해야 하고, 자료수집에 시간이 많이 걸리는 것으로 인식하기 때문이었다. 즉, 교사들은 학생들은 실험에 미숙하다고 인식하고, 실험방법과 자료수집에 대해 설명하는 데에 시간을 많이 할애하는 바람에 실험결과에 나타나는 오차에 대한 논의를 진행하지 못하고 있었다.

한감봉 등(2012)은 교사들은 실험수업에서 오차가 발생하는 이유를 실험을 수행하는 학생들이 실험에 미숙하기 때문이라고 생각한다고 보고하였다. 그리고 오차가 발생했을 때에 오차의 원인에 대해서는 실험의 미

숙함과 실험의 환경에 대해서만 언급하고 넘어가는 모습을 보인다고 하였다. 즉, 교사들은 오차의 원인을 학생들의 미숙함으로 생각하고 그 원인에 대해서 논의를 진행하지 않고 있었다.

실험에 미숙하기 때문에 나타날 수 있는 오차를 과실오차라고도 한다(박승호 등, 2018). 측정을 하는 사람의 실수나 계기의 취급 부주의로 생기는 오차인데, 경우에 따라서 우연오차가 되어 불확도를 크게 만들기도 하고, 계통오차가 되어서 측정값이 참값으로부터 편향되게 만들기도 한다(Taylor, 1997). 예를 들어, 측정을 하는 사람이 계기의 눈금을 확인할 때에 계속해서 한쪽으로 치우친 방향에서 눈금을 읽는다면 측정값이 한쪽으로 치우치게 되고, 눈금을 읽을 때마다 다른 방향에서 눈금을 읽는다면 불확도가 커지게 된다. 그러므로 학생들의 미숙함으로 인해서 오차가 발생한다고 인식한다면 오차의 원인을 찾아내기 어렵게 된다.

물리실험수업에서는 오차가 생기는 경우에 공기의 저항이나 마찰과 같은 실험 환경에 대한 이유를 들곤 한다. 그러나 박종찬(2009)에 의하면, 정밀한 실험을 통해서 반복측정과 통계적 처리를 하면 공기저항과 마찰이 오차의 원인으로 작용하지 않는 것을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고, 의례적으로 이들을 오차의 원인으로 제시하는 경우도 있다. 즉, 오차에 대해 통계적 처리를 하게 되면 오차가 있는 것이 아님에도 불구하고 교사들은 오차를 처리하거나 설명하지 않고 넘어가는 경우도 있는 것이다.

박종찬(2009)은 과학고등학교의 실험수업에서 측정 및 자료해석과 관련된 내용이 어떻게 다루어지고 있는지 조사하였다. 조사결과 교사들은 실험수업을 지도할 때에 반복측정과 변수간의 관계 해석은 중요하게 생각하지만, 점들의 퍼짐에 대한 적절한 해석, 정확과 정밀, 불확실도를 이용한 결과 해석은 상대적으로 중요하지 않게 인식하는 것으로 드러났다. 즉, 교사들은 반복측정을 통해 얻은 값으로 변수들 간의 관계를 나타내어 과학법칙을 확인하는 것을 실험수업의 주요 목표로 삼고 있으며, 오차에 대한 내용은 실험수업에서 상대적으로 덜 중요하게 여기고 있는 것이다.

정리하면, 실험수업에서 오차가 발생하였을 때에 교사들은 그 원인을

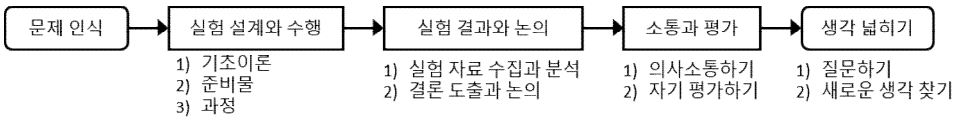
학생들의 미숙함으로 생각하고 있었고, 오차를 분석하거나 오차의 원인에 대해 논의하는 과정을 진행하지 않는 경우가 많다. 그리고 실험수업에서 과학법칙 확인에 비해서 오차에 대한 해석은 덜 중요한 것으로 인식하고 있다.

2.3.3. 실험수업에서 계통오차 분석의 중요성

학교에서 가장 많이 이루어지는 실험수업의 유형은 확인실험이다(양일호, 2007). 확인실험은 실험값과 이론값을 비교하여 과학법칙을 확인하여야 하는데, 실험값이 이론값에서 벗어나 정확하지 않은 계통오차가 있으면 실험의 목표를 달성하기 어려워진다. 그러나 과학교사들은 실험수업에서 오차가 발생하는 것을 당연한 것으로 여기고 오차에 대해 토의하지 않고 넘어가는 경우가 많다(한감봉 등, 2012; 한유화 등, 2014). 그리고 교사들은 오차의 원인을 학생들의 미숙함과 같은 실험 외적인 요인으로 여기고 있다.

이렇게 오차의 원인을 실험의 외부에서만 찾는다면 한유화 등(2014)은 학생들이 본인이 직접 측정한 실험결과를 받아들이지 않게 되어 실험결과에 상관없이 과학지식을 암기하게 되고, 한감봉 등(2012)은 실험값을 조작하는 사례가 나타난다고 하였으며, 강영창(2013)은 학생들이 실험과 이론은 항상 다르다는 인식을 갖게 된다고 하였다.

2015 개정 교육과정의 물리학 실험 교과서(박승호 등, 2018)에는 실험수업의 단계를 문제 인식, 실험 설계와 수행, 실험 결과와 논의, 소통과 평가, 생각 넓히기의 다섯 단계로 제시한다([그림 2-2]). 실험수업에서 실험을 수행한 후에 실험 자료 수집과 분석 과정을 거치면 결론 도출과 논의 과정을 통해 실험주제와 관련된 물리적 논의를 더 진행하게 된다. 그런데 만약 실험값이 확인하고자 하는 값과 일치하지 않는다면 결론 도출과 논의 과정을 진행하기 어려울 것이다.



[그림 2-2] 물리학 실험 교과서의 실험수업 순서

물리학 실험 교과서의 실험은 대부분 참값을 알고 있는 실험으로 수집된 실험 자료를 분석하면 실험값의 신뢰구간이 참값을 포함하도록 정확하게 측정되었는지 판단할 수 있다. 그런데 실험결과가 정밀하지만 정확하게 측정되지 않았다면 계통오차가 포함된 것으로 생각할 수 있다. 계통오차의 원인을 찾기 위해서는 실험설계를 다시 검토해야 하는데, 여기에는 실험설계에 대한 이해가 필요하다. 한감봉 등(2012)의 연구에 의하면 학생들은 성적이 상위권일지라도 실험이 왜 그렇게 설계되어야 하는지 파악하지 못하는 것으로 나타났지만, 한유화 등(2014)에 의하면 교사들은 실험수업 시간이 부족하기 때문에 실험설계에 대해 설명하는 것에는 많은 시간을 할애하지 않았다. 그러므로 실험수업에서 학생들이 실험설계에 대한 이해를 향상시킬 방안이 필요하며, 계통오차를 보정하는 활동이 하나의 방법이 될 수 있다. 특히, 계통오차를 보정하기 위해서는 실험설계, 실험방법, 실험도구 등 실험 전반에 대한 이해가 필요하기 때문에 계통오차를 보정하는 경험은 교사들의 실험에 대한 이해도를 증진시킬 수 있는 연수의 소재도 될 수 있을 것이다.

정밀한 측정을 위해서는 정밀한 실험도구를 사용해야 한다. 물리실험수업에는 정밀한 실험을 위해서 MBL과 같은 장비를 사용한다. 박종찬(2009)에 의하면 측정과 자료해석과 관련된 과학자의 개념을 가지고 MBL 장치를 사용하면 정밀한 측정을 할 수 있고 실험수업에서 실험결과에 대해 심도 있는 논의를 할 수 있다고 하였다. 그러나 정밀한 측정이 정확한 측정인 것은 아니다. 학생들은 정밀한 측정을 했을 경우에 정확하게 측정한 것으로 인식하는 경우가 있다고 보고되었는데(신광문 등, 2011; 이재봉, 2006), 학생들이 이런 오개념을 갖지 않기 위해서는 교사들이 정밀하게 측정하는 방법과 정확하지 않은 값을 보정하는 방법이 다르다는 것을 인식하고 실험을 지도해야 한다. 교사들이 이를 인식하도록

하는 방법으로 실험값이 정밀하지만 정확하지 않게 측정되는 물리실험을 설계하고, 계통오차를 보정하는 활동을 교사들이 수행하도록 하는 방법을 생각할 수 있다.

본 연구에서 물리교사들을 대상으로 면담을 진행하였는데, 교사들은 실험값이 이론값과 일치하지 않으면 학생들에게 오차의 원인을 생각해보게 만들지만 계통오차를 보정하여 실험을 진행하지는 않았다. 그리고 계통오차를 보정하는 것을 어려워했으며, 오차가 있는 경우에 정밀한 실험도구로 바꾸어서 실험을 진행하였다. 계통오차가 있다면 실험도구를 정밀한 도구로 교체하기 전에 실험설계의 실수나 실험도구의 문제를 찾아야 한다(Barlow, 2002; Taylor, 1997). 그런데 본 연구에 참여한 교사들은 계통오차를 보정하는 방법에 대해서 잘 알고 있지 않았다. 이렇게 교사가 계통오차에 대해 이해하지 못한 상황에서 실험수업을 진행한다면, 실험결과에 오차가 있는 경우에는 학생들에게 과학법칙이 실험으로 증명될 수 있다는 것을 알려주기 힘들 것이다. 그러므로 교사들이 계통오차에 대해 이해하고 정확한 실험값을 얻어 실험을 지도할 수 있도록 하는 방안이 필요하다.

III. 연구방법

3.1. 연구참여자

실험수업에서 오차와 관련하여 교사들이 겪는 어려움을 조사하기 위해 과학고등학교에 근무하는 교사 3명을 연구참여자로 선정하였다. 과학고등학교에 근무하는 교사들을 연구참여자로 선정한 이유는 과학고등학교에서는 실험수업을 저해하는 환경요인이 대부분 해결되어 있어서 실험수업에서만의 어려움에 초점을 두어 조사할 수 있기 때문이다. 예를 들어, 과학고등학교에서는 실험기구를 구입할 수 있는 예산이 일반학교에 비해 충분히 확보되어 있고, 과학교사 1명의 수업시수도 다른 교과에 비해 적기 때문에 실험수업을 준비하는 데에 할애할 수 있는 시간이 많다. 또, 연구참여자들이 근무하는 학교에는 실험보조원이 실험실에 상주하고 있으며, 물리실험실 2개와 물리교사들이 사용할 수 있는 특별실들이 있어서 실험수업을 할 수 있는 환경적 여건이 충족되어 있다. 그리고 물리학 실험을 교육과정에서 교과목으로 운영하고 있어서 과학고등학교에 근무한 경력이 많은 교사는 그만큼 실험수업에 대한 경험도 많다. 이에 과학고등학교에 근무하는 교사들 중에서 물리교사 3명을 선정하였다.

연구참여자는 과학고등학교에 근무하는 교사 A, B, C로 각 교사들의 특징을 [표 3-1]에 제시하였다. 교사 A, B, C는 실험수업과 관련하여 서로 다른 특징을 보인다. 교사 A는 실험보다 이론에 더 관심이 많아 이론 설명에 초점을 둔 수업을 주로 진행한다. 그리고 교직 경력이 짧은 만큼 실험수업에 대한 경험이 적다. 교사 B는 평소에 실험수업을 잘하고 싶어 하는 교사로서 과학고등학교에 5년 이상 근무하며 실험수업에 대한 경험을 쌓았고, 연구에 참여한 기간에는 물리학 실험 교과를 맡아서 실험 위주의 수업을 진행하고 있었다. 교사 C는 실험수업을 통해 이론수업에서는 배울 수 없는 내용을 학생들이 배울 수 있다고 생각하고 실험수업을 매 학기마다 진행하고 있었다. 따라서 교사 A는 실험수업의 경험

이 적은 교사, 교사 B는 실험수업을 잘하고 싶어 하며 과학고등학교에서 실험수업의 경험을 쌓고 있는 교사, 교사 C는 실험수업에 대한 경험이 많은 교사라고 할 수 있다

[표 3-1] 연구참여자 정보

	A	B	C
교직경력	5년 이하	10년 이상	20년 이상
과학고등학교 근무 경력	5년 이하	5년 이상	15년 이상
담당 과목	물리	물리	물리

3.2. 실험 오차와 실험 지도에 대한 인식

연구참여자와 실험수업에 대한 경험을 면담하여 실험수업에서 교사들이 오차와 관련하여 어떤 어려움을 겪는지 알아내고, 실험 오차와 실험 지도에 대해서 어떤 인식을 가지고 있는지 분석하였다. 이를 위해 첫 번째 면담에서 연구참여자에게 실험과 실험수업에 대한 경험을 가능한 한 많이 이야기해달라고 하였다. 첫 번째 면담에서 사용한 질문의 주요 내용은 [그림 3-1]에 나타내었다. 두 번째 면담에서는 연구참여자들의 경험 중에서 오차와 관련된 경험을 골라서 이에 대해 세부적인 내용을 면담하였다. 연구참여자들의 일정을 고려하여 면담의 횟수와 일정을 조절하였는데, 만약, 첫 번째 면담에서 실험에 대한 세부적인 경험을 면담할 수 있을 때에는 첫 번째 면담에서 세부적인 내용까지 질문하였다. 면담 일정과 실험 경험에 대한 세부적인 질문을 [표 3-2]에 나타내었다. 필요한 경우에는 연구참여자에게 추가면담을 요청하거나 질문을 통해서 면담의 내용을 확인하였다. 면담은 한 차례에 1시간 내외로 진행하였고, 녹음기로 녹취한 후에 면담내용을 기록하였다. 면담한 내용은 반복적으로 읽고 각각의 면담을 비교분석하여 연구참여자들의 경험에 내포되어 있는 실험수업에서 오차에 대한 어려움을 분석하였다. 특히, 오차가 발생했을

때에 이에 대해 어떻게 반응하고 어떤 인식을 가지고 있는지, 그리고 실험 지도에 대해서 어떤 인식을 가지고 실험수업을 진행하는지 알아내고자 하였다.

1. 실험을 배운 경험과 직접 설계해본 경험에 대한 질문
   1-1. 초중고등학교, 대학교, 대학원에서 어떤 실험수업을 수강했고, 어떤 실험을 했습니까?
   1-2. 연구참여자가 수강한 실험 수업들은 어떤 방식으로 이루어졌습니까?
   1-3. 수강했던 실험수업에서 실험에 성공해서 기억에 남는 실험이 있습니까?
   1-4. 수강했던 실험수업에서 실험에 실패해서 기억에 남는 실험이 있습니까?
   1-5. 직접 실험을 설계해서 수행했던 실험은 어떤 것이 있습니까?
2. 실험수업을 지도해본 경험에 대한 질문
   2-1. 교직생활을 하면서 학생들을 대상으로 했던 실험수업은 어떤 것이 있습니까?
   2-2. 실험수업은 어떤 방식으로 진행했습니까?
   2-3. 준비하기 어려웠던 실험수업은 무엇이고 어떤 면에서 어려웠습니까?
   2-4. 진행하기 어려웠던 실험수업은 무엇이고 어떤 면에서 어려웠습니까?
   2-5. 교과서에 제시된 실험 외에 직접 실험수업을 설계해서 지도한 적이 있습니까?

[그림 3-1] 실험과 실험수업의 경험에 대한 면담의 주요 내용

[표 3-2] 실험과 실험수업의 경험에 대한 면담 일정과 주요 질문

연구 참여자	날짜	주요 질문
A	2019.08.08	• 실험과 실험수업의 경험에 대한 전반적인 질문
	2019.09.10	-세부적인 내용 질문 • 카메라로 영상을 촬영하여 물체의 운동을 분석하는 실험을 지도할 때에 물체가 흐릿하게 보였던 것은 어떻게 해결하셨나요?
B	2019.09.16	• 실험과 실험수업의 경험에 대한 전반적인 질문
		-세부적인 내용 질문 • 선생님의 실험수업에서 학생들이 찾아낸 오차의 원인을 말씀해주시겠어요? • 선생님께서 단진자 실험수업을 준비하실 때에 실험도구를 알아보고 구입을 진행한 이유는 무엇인가요?
C	2020.09.18	• 실험과 실험수업의 경험에 대한 전반적인 질문
		-세부적인 내용 질문 • RLC 회로에서 발견하셨던 오차에 대해 설명해주시겠어요? • 실험수업에 MBL 장비를 사용하시는 이유는 무엇인가요?

3.3. 계통오차 분석이 가능한 물리실험 설계

연구참여자들의 실험수업의 경험을 분석해보았을 때에 연구참여자들은 계통오차가 발생하는 것에 대한 어려움을 겪고 있었다. 특정 실험만을 위해 제작된 실험키트를 사용하는 경우에 계통오차의 원인을 찾지 못했으며, 다른 실험에서도 계통오차가 있을 때에 이를 보정하는 대신에 실험도구를 교체하여 실험을 개선하고 있었다. 그리고 실험수업에서는 오차의 원인을 학생들이 찾아내게 했음에도 그것을 보정하지 않고 실험수업을 진행하였다. 계통오차가 있을 때에 이를 보정하기 위해서는 실험도구의 교체가 아니라 실험설계와 실험도구에서 고려하지 못한 사항을 찾아서 수정해야 하는데 연구참여자들은 이를 인식하고 있지 못했다. 학교의 물리실험수업은 보통 확인실험으로 이루어지는 것을 생각했을 때 실험결과에 계통오차가 있어도 보정하지 않고 넘어간다면 실험을 통해서 과학법칙을 확인하는 것은 어려운 일이다. 이에 교사들에게 계통오차의 원인을 실험 안에서 찾을 수 있다는 것과 계통오차를 보정하는 방법을 알려주기 위하여 계통오차 분석이 가능한 물리실험을 설계하였다.

먼저, 연구참여자들이 근무하는 과학고등학교에서 사용하는 물리학 실험 교과서에 제시된 실험도구들을 조사하였다. 실험도구들을 종류별로 구분하고 측정에 주로 사용되는 도구들을 알아내었다. 그 중에서 실험설계에 대한 이해에 도움이 되도록 스마트 기기와 범용기기를 사용하여 물리실험을 설계하고자 하였다. 그리고 실험키트 대신 오픈소스 하드웨어를 이용하여 물리실험을 설계하고자 하였다.

스마트 기기, 범용기기, 오픈소스 하드웨어를 이용하여 계통오차 분석 활동이 가능한 물리실험을 물리학 실험 교과서의 각 단원별로 한 개씩 설계하였고, 각 실험의 결과에 계통오차가 있음을 확인하였다.

설계한 실험은 중력가속도, 공기의 유전율, 선 스펙트럼 파장, 플랑크 상수 측정실험이고 각각의 실험에 사용한 실험도구에 따라 실험들을 분류하였다. 설계한 실험 중에서 물리학 실험 교과서와 같은 실험도구를 사용하는 실험은 실험도구의 기능을 실험에 활용하는 방법을 구체적으로

제시하여 교과서와 차이점을 두었다. 물리학 실험 교과서의 실험과 측정하는 값은 같지만 사용하는 실험도구가 다른 실험은 실험도구의 매뉴얼을 참고하고 관련 실험의 문헌을 조사하여 설계하였다.

3.4. 계통오차 분석 활동

계통오차가 있도록 연구자가 설계한 네 개의 실험을 연구참여자들에게 소개하고 실험을 수행하게 하였다. 그리고 연구참여자들이 계통오차의 원인을 찾아내고 실험값을 보정할 수 있는지 알아보았다. 실험을 수행하는 과정에서 이루어진 연구참여자와 연구자의 대화내용은 녹음기로 녹취하였고, 필요한 경우에 연구참여자에게 질문을 하여 대화한 내용의 의미를 확인하였다.

설계한 실험을 수행할 때에는 실험데이터에 계통오차가 나타날 거라는 사실을 알리지 않았고, 실험에 사용하는 실험도구를 통해서 실험값을 얻는 방법을 자세히 설명하였다. 반복측정과 통계처리를 통해 실험결과에 계통오차가 있다는 것을 연구참여자들이 발견한 후에는 계통오차의 원인에 대해 생각해보게 하였다. 네 개의 실험에서 모두 연구참여자들은 계통오차의 원인을 생각하기 어려워했으며, 계통오차의 원인과 오차를 보정하는 방법을 연구자가 제시해주었다. 계통오차 분석 활동의 단계를 [표 3-3]에 나타내었다.

[표 3-3] 계통오차 분석활동의 단계

단계	과정
실험설명 및 수행	• 사용하는 실험도구의 사용법과 실험방법을 설명함
계통오차의 원인 생각하기	• 반복측정과 통계처리를 통해 계통오차 확인 • 실험설계와 실험방법에 대해서 다시 설명하고 계통오차의 원인을 생각해보게 함.
계통오차 보정하기	• 계통오차의 원인을 찾아내지 못한 경우에 계통오차의 원인을 설명하고 실험값을 보정하는 방법을 알려줌.

네 개의 실험 중에서 공기의 유전율 측정실험만 교사 A 한 명이 참여하였고, 나머지 세 개의 실험은 연구참여자 3명이 모두 참여하여 수행하였다. 계통오차 분석활동을 실시한 일정을 [표 3-4]에 나타내었다.

[표 3-4] 계통오차 분석활동 실시 일정

실험	날짜	참여자
선 스펙트럼 파장 측정	2019.09.25	A, B, C
중력가속도 측정	2019.10.23	A, B, C
플랑크 상수 측정	2019.12.04	A, B, C
공기의 유전율 측정	2019.12.30	A

3.5. 계통오차 분석 활동의 효과

설계한 네 개의 실험으로 계통오차를 분석하는 활동을 수행해본 후에 계통오차 분석 활동이 어떤 효과를 나타낼 수 있을지 면담을 통하여 알아보았다. 실험수업의 경험에 대해 면담한 내용을 토대로 연구참여자마다 질문지를 작성하여 면담하였다. 면담 일정과 질문의 주요 내용은 [표 3-5]에 나타내었다. 면담은 1시간 내외로 한 차례를 진행하였고, 녹음기로 녹취한 후에 면담내용을 기록하였다. 면담한 내용은 반복적으로 읽고, 필요한 경우 연구참여자에게 질문을 하여 면담내용의 의미를 확인하였다. 그리고 계통오차 분석활동이 어떤 효과를 이끌어내었는지 분석하였다.

[표 3-5] 계통오차 분석활동의 효과에 대한 면담 일정과 주요 질문

연구 참여자	날짜	주요 질문
A	2020.02.04	• 본 연구에서 설계한 실험의 교육적 의미는 어떻게 생각하십니까? • 계통오차의 원인을 찾아내서 보정하는 방식의 실험이 선생님께 어떤 의미가 있으셨습니까?
B	2020.02.24	• 본 연구에서 설계한 실험을 수행해보신 후에 실험에 대한 생각이 바뀐 점이 있습니까? • 본 연구에서 설계한 실험을 경험해보신 후에 실험 지도에 어떤 변화가 있으셨나요?
C	2020.02.05	• 본 연구에서 설계한 실험의 교육적 의미를 어떻게 생각하십니까? • 계통오차 분석 활동을 교사들이 경험해볼 필요가 있다고 생각하십니까? 어떤 점에서 그렇게 생각하십니까?

IV. 연구결과

4.1. 실험 오차와 실험 지도에 대한 교사들의 인식

연구참여자를 대상으로 실험과 실험수업의 경험에 대해 면담하여 실험수업에서 오차와 관련하여 교사들이 겪을 수 있는 어려움을 알아내었다. 그리고 실험 오차와 실험 지도에 대하여 어떤 인식을 가지고 있는지 분석하였다.

4.1.1. 실험 오차에 대한 인식

4.1.1.1. 실험값이 정밀하지 않은 문제

연구참여자들은 정밀한 데이터를 얻기 위해 실험도구를 개선하는 노력을 기울이고 있었는데, 실험조건에 맞추어서 실험도구를 선정해야 한다는 것을 인식하지 못하는 사례가 있었다. 그리고 정밀한 실험값을 얻기 위해 측정이 용이한 실험세팅을 학생들에게 제공하여 실험수업을 하고 있었다.

교사 A는 스마트폰의 카메라를 이용해서 빠르게 움직이는 물체를 동영상으로 촬영하고 물체의 운동을 분석하는 실험수업을 지도한 적이 있었는데, 물체가 너무 빨리 움직이는 바람에 동영상의 정지화면에서 물체가 흐릿하게 보여서 정밀한 실험값을 얻지 못한 경험을 하였다. 다음은 이에 대한 교사 A와의 면담 내용이다.

교사 A : 에어 테이블에서 퍽을 쏘아서 운동을 분석하는 실험을 지도한 적이 있어요. 퍽이 까만색이라 흰색 종이를 동그랗게 오려서 붙인 다음에 240 fps(frame per second)를 지원하는 스마트폰 카메라로 촬영을 했어요. 240 fps로 찍었음에도 영상분석 프로그램에서 퍽이

일그러지면서 넓게 보였어요. 그래서 종이의 크기를 줄이는 방식도 시도해봤고, 두 개의 상반된 색을 퍽에 붙여서 상반된 패턴의 모양을 추적하는 방식도 시도해 봤어요.

연구자 : 그 방법들은 빠르게 움직이는 퍽에 수정을 가한 것이고, 혹시 카메라의 종류나 카메라의 설정을 바꾸는 시도는 안 해보셨나요?

교사 A : 그거는 시도하지 않았어요. 1초에 240프레임을 촬영해도 빠르게 지나가는 퍽을 온전히 잡아내지는 못했으니까요.

교사 A는 근무 학교에서 사용하는 물리학Ⅱ, 물리학 실험 교과서(김성진 등, 2018; 박승호 등, 2018)에 제시되어 있는 실험방법을 이용하여 실험을 지도하려 했지만, 교과서에 제시된 방법대로 실험했더니 물체가 흐릿하게 촬영되어 트래커(Tracker, https://physlets.org/tracker/)에서 물체의 위치를 정확하게 알아내기 어려웠다. 이 경우에 화면에 물체가 보이는 위치의 범위가 넓어지고 매 장면마다 위치를 수동으로 지정해줘야 하는데, 이때에는 불확도가 커져 정밀한 데이터를 얻지 못할 가능성이 있다. 그래서 A는 물체에 붙이는 표지의 크기나 색을 바꾸는 시도를 하여 불확도를 줄이려 하였다. 그러나 이 시도로는 측정값의 불확도를 줄여주지 못했다.

교사 A의 실험수업에서 정밀한 실험데이터를 얻기 위해서는 물체가 운동하는 속도의 조건에 맞추어서 사용하는 카메라를 선택해야 한다. 초당 프레임 수가 240 fps인 카메라는 한 프레임 당 약 4.2 ms 동안 물체를 촬영하는데, 물체의 운동 속도가 2 m/s만 되어도 영상의 한 프레임이 촬영되는 동안 물체가 이동하는 거리는 8 mm가 되어 영상에서 물체는 흐릿하게 보인다. 이런 경우에는 물체의 속도를 고려해서 셔터속도를 더 빠르게 조절할 수 있는 카메라를 실험에 사용해야 한다. 즉, 더 정밀한 데이터를 얻기 위해서는 실험조건에 맞도록 더 정밀한 실험도구로 교체하여 실험설계를 다시 해야 하는 것인데, 교사 A는 이를 인식하지 못한 것으로 보인다.

교사 A가 실험수업에 대한 경험이 부족하므로 정밀한 실험데이터를 얻지 못한 것으로 여길 수 있다. 하지만 실험수업에 대한 경험이 풍부하

다고 해서 실험조건에 맞게 교과서의 실험설계를 수정할 수 있는 것은 아니다. 실험수업의 경험이 많은 교사 C 역시 디지털 카메라로 물체의 운동을 분석하는 실험에서 카메라의 셔터속도를 조절해야 한다는 것을 바로 알지는 못했다. C는 자유낙하 하는 물체의 운동을 촬영하여 중력가속도를 알아내는 실험수업을 지도한 적이 있는데, 물체가 또렷하게 보이도록 영상을 촬영하는 실험방법은 동료교사가 만들어 놓은 디지털 카메라 설정 매뉴얼을 본 후에 알았다고 면담에서 진술하였다. 즉, 실험조건에 맞게 실험도구를 선정해야 함을 인식하지 못하는 문제는 실험방법과 실험도구에 대해 자세히 안내함으로써 해결할 수 있다.

연구참여자들은 실험수업에서 정밀한 실험값을 얻기 위해 과학교구회사의 제품을 이용해서 측정이 용이한 실험세팅을 학생들에게 제공하고 있었다. 교사 B는 단진자 운동 실험수업을 준비하면서 보다 정밀한 측정값을 얻기 위해 실험도구들을 바꾸어 가며 실험설계를 수정하는 노력을 기울이고 있었다. 다음은 교사 B가 단진자 실험수업을 준비하기 위해 기울인 노력이다.

> 교사 B : 단진자 실험을 작년(2018년)에 했었어요. 학교에 있는 실험장비는 진자에 줄을 하나만 묶어서 매달던데, 교구회사에서 실을 두 줄로 묶어서 꼬이지 않게 해주는 단진자용 클램프를 파는 거예요. 그리고 추의 크기와 모양은 똑같지만 질량만 다른 추를 찾아보니까 교구회사에서 팔고 있어서 그것도 구입을 했죠.

교사 B는 교과서에 제시된 실험방법대로 단진자 실험을 수행하면 줄이 꼬이거나 흔들려서 불확도가 커지는 것을 알아내었다. 실험수업의 목표는 단진자의 공식이 진폭이 작은 경우에만 잘 맞는다는 것을 보이기 위함이었다. 그런데 진자의 운동이 평면상에서 일어나지 않아서 불확도가 크다면 실험수업의 목표에 도달할 수 없기 때문에 보다 나은 실험도구를 찾아서 실험을 개선했다고 진술하였다. 노영(2014)은 교과서의 실험과정이 명확하지 않고 실험데이터를 얻기 힘들 때에, 교사들은 미리 예비실험을 해서 실험을 할 수 있는 조건을 찾거나 학생들이 할 수 있는

실험방법을 고안해서 실험수업을 진행한다고 보고하였는데, B도 예비실험을 통해 학생들이 더 정밀한 실험값을 얻을 수 있도록 교과서의 실험설계를 수정한 것이다. 이때, 주로 과학교구회사에서 판매하는 제품을 사용하였다. 과학교구회사의 제품은 측정과 자료수집을 쉽게 할 수 있도록 만든 제품이기 때문에 이를 이용하면 학생들이 수업시간 안에 정밀한 실험값을 얻을 수 있고 실험결과를 이용하여 과학적 논의를 진행할 수 있다.

실험수업의 경험이 많은 교사 C도 실험수업에 과학교구회사에서 판매하는 정밀한 실험도구를 이용해서 과학적 논의를 할 수 있는 시간을 확보하였다. 다음은 이에 대한 교사 C와의 면담내용이다.

> 교사 C : 실험수업에 MBL 센서를 이용하면 측정과 자료수집의 어려움을 해결할 수 있기 때문에 실험결과를 이용해서 물리적 논의를 할 수 있는 시간이 늘어나잖아요. 이게 MBL 실험의 장점이라고 생각해요. 그래서 저는 그동안 실험수업을 그렇게 해왔어요.

이렇게 연구참여자들이 측정을 쉽게 해주는 제품을 사용해서 실험수업을 진행하는 것을 보았을 때, 실험값을 얻기 위한 실험설계와 실험방법에 대한 학생들의 이해는 실험수업의 주요 목표가 아닌 것으로 보인다.

정리하자면, 정밀한 측정을 위해서 실험조건에 맞게 실험을 다시 설계해야 한다는 것을 인식하지 못하는 경우가 있었고, 실험수업에서 정밀한 실험값을 얻기 위해 측정이 용이한 실험세팅을 학생들에게 제공하여 실험수업을 진행하고 있었다.

4.1.1.2. 실험값이 정확하지 않은 문제

연구참여자들은 실험수업에서 실험결과가 정확하게 나오지 않는 계통오차가 발생하여 어려움을 겪고 있었다. 오차가 발생하더라도 오차를 보정해서 보다 정확한 값을 얻는 단계는 실험수업에서 진행하지 않는 사례가 있었고, 실험키트를 이용한 실험에서 오차의 원인을 찾는 것을 포기하는 사례가 있었다. 그리고 실험설계만 보아도 오차 없이 실험결과를 얻어낼 수 있을 거라 생각하는 사례가 드러났다.

교사 B는 2019년 2학기에 물리학 실험 교과서의 빛과 파동 단원을 맡아서 실험수업을 지도하고 있었고, 오차가 발생한 경우에 학생들이 오차의 원인을 찾아보게 했다. 그러나 오차의 원인을 제거해서 정확한 값을 얻는 단계는 실험수업에서 진행하지 않았다. 다음은 B의 면담 내용 중 실험수업에서 발생한 오차와 관련된 내용을 발췌하여 정리한 것이다.

- 소리굽쇠와 공기기둥 공명 실험

  학생들 중에는 실험매뉴얼대로 소리굽쇠를 고무망치로 치는 학생도 있지만 소리굽쇠를 책상에 세게 내리쳐서 진동시키는 경우도 있었다. 이런 경우에 학생들은 소리굽쇠에서 나는 소리가 이전에 약하게 쳤을 때의 소리보다 높아진 것 같다고 말하였다. 그리고 실험을 해보면 소리굽쇠의 진동수보다 더 높은 진동수, 즉 λ보다 더 짧은 파장에서 공명현상이 일어났다. 공기기둥이 $1/8\lambda$, $3/8\lambda$인 지점에서 공명이 일어나기도 하며 다른 지점에서 공명이 일어나기도 했다.

- 줄의 정상파 실험

  B는 실험수업을 준비하면서 줄이 고무줄처럼 잘 늘어나면 확인하고자 하는 내용인 $v=\sqrt{T/\rho}$와 오차가 크게 발생하는 것을 발견하였다. 그리고 학생들이 오차의 원인을 생각하게 하고자 오차가 확연히 드러나는 잘 늘어나는 줄을 실험에 제공했다. 학생들은 오차의 원인을 줄이 잘 늘어나는 것 외에 여러 가지를 찾아내고 어떻게 처리해야 하는지 질문했다. 그 내용들은 실험 도중에 추는 제자리에 멈춰있지 않고 회전하거나 움직여서 중력 외에 다른 힘도 줄에 장력을 준다는 점, 실험에 사용한 줄은 너

무 가벼워서 질량을 측정하기 힘들어 선밀도를 구하기 힘들다는 점, 선밀도를 구하기 위해 실이 어떤 상태일 때 길이를 재어야 하는지 알기 어렵다는 점, 도르래에 걸쳐서 늘어뜨린 부분도 줄에 장력을 제공한다는 점, 줄이 진동하면서 도르래도 조금씩 움직이고 도르래에 의한 마찰력이 있다는 점, 진동기에서 진동하는 부분이 진동할 때에 진폭이 있으므로 그 부분에 줄을 묶으면 줄의 한쪽 끝이 마디가 되지 않는다는 점 등이다.

- 수면파 간섭 실험

수면파 발생장치로 실험을 하면서 학생들은 광원이 평행광선이 아니라서 수면파의 상이 확대되어 보이는 것을 발견하였다. 이에 대해 파장의 길이를 정확하게 측정하는 방법은 무엇인지, 상쇄간섭이나 보강간섭이 보이는 곳이 확대된 두꺼운 선으로 보이기 때문에 어느 부분을 따라 선으로 그려야 하는지, 확대된 상으로 보인다면 얼마의 비율로 보정해야 하는지 등 정량적으로 측정하는 방법에 대해서 여러 질문을 하였다.

교사 B의 실험수업에서 학생들은 정확한 값이 측정되지 않는 이유를 실험도구에서 찾아내고 있다. 한감봉 등(2012)에 의하면 교사들은 실험과정에서 학생들이 보이는 미숙함 때문에 실험결과에 당연히 오차가 발생한다고 생각하고 있었는데, 과학고등학교의 물리실험에서 학생들은 오차를 발생시키는 역할이 아니라 교사가 미처 생각하지 못한 오차의 원인을 찾아내는 역할을 하고 있는 것이다.

노영(2014), 한감봉 등(2012), 한유화 등(2014)의 연구에서 실험결과에 발생한 오차에 대해 설명하는 것을 교사들은 어려워했는데, 교사 B 역시 본인이 생각하지 못했던 오차의 원인을 학생들이 찾아내고 질문을 하는 경우에 어떻게 대답해야 할지 난감하다고 하였다.

교사 B의 실험수업에서 학생들이 찾아낸 오차의 원인은 실험설계 단계에서 실험도구와 관련된 내용을 수정하면 제거할 수 있는 계통오차들이다. 소리굽쇠를 세게 칠 때 소리굽쇠의 배음으로 진동할 수 있다는 것은 실험에 사용하는 도구의 특성인데, 소리굽쇠의 이런 특성에 대해 주의를 주는 단계를 실험순서에 넣어서 실험을 설계하면 해결할 수 있다. 줄의 정상파 실험에서 매달아 놓은 추가 진동하면 원심력이 줄의 장력으

로 추가된다는 점은 이를 고려해서 분석하는 단계를 추가하거나 실험을 수행할 때 추가 흔들리지 않게 하도록 실험을 설계하면 해결할 수 있다. 수면파 실험에서 광원이 퍼지는 것은 빛이 퍼지는 정도를 측정하는 단계를 넣어서 실험을 설계하면 해결할 수 있다. 그 외의 오차의 원인도 실험도구의 작동방식이나 특성을 알거나 실험설계에서 오차의 원인과 관련된 내용을 추가하면 해결할 수 있는 오차들이다. B는 학생들에게 정확한 값이 측정되지 않는 이유에 대해서 보고서에 작성하게 했지만, 학생들이 생각해낸 오차의 원인이 정말로 오차를 발생시켰는지 확인하는 실험을 진행하지 않았고, 또, 오차의 원인을 제거해서 실험수업을 진행하지 않았다.

교사 C는 실험결과에 계통오차가 있을 때에 실험도구를 교체하여 정확한 값을 얻는 실험수업을 하고 있었다. 이때 사용한 도구는 MBL과 같은 정밀한 측정을 쉽게 할 수 있도록 도와주는 실험도구이다. 다음은 이에 대한 교사 C와의 면담내용이다.

> 교사 C : 중력가속도를 측정할 때, 기계식 시간기록계를 이용하면 9.2 m/s^2 정도가 나오고, 전도식 시간기록계를 이용하면 9.5 m/s^2의 값을 얻을 수 있어요. 그런데 MBL 포토게이트를 사용하면 9.8 m/s^2을 얻을 수 있어요. 시간기록계는 마찰이 오차의 주요 원인인데, MBL을 이용하면 마찰과 같은 오차의 원인을 제거한 상태에서 실험을 하게 하니까, 학생들이 이론적으로 알고 있는 값과 근접한 값을 얻는 데에 도움이 되는 것 같아요.

교사 C는 시간기록계를 이용한 중력가속도 측정실험에서 오차의 원인을 보정하는 방법을 찾아내지 못하고 MBL과 같은 정밀한 실험도구를 선택하여 실험수업을 진행하였다. 그러나 시간기록계를 이용한 실험에서 계통오차가 나타난다면, MBL 장비로 실험도구를 교체하기 전에, 시간기록계를 이용한 실험의 실험설계에서 오차를 보정할 수 있는 방법을 찾아야 한다. C는 이를 알고 있었고 실험의 경험도 많지만, 시간기록계를 이용한 실험에서 나타난 오차를 보정하는 방법을 알아내기는 어려웠다. 실

험도구를 시간기록계에서 MBL 장비로 바꾸는 것은 실험설계 자체를 바꾸는 것이기 때문에 학생들이 시간기록계를 이용한 실험에 대해 완전히 이해하지 못한 상태에서 다른 종류의 실험으로 주제가 변경되는 것이다. 그리고 학생들이 값비싼 MBL 장비로 교체하여 실험할 때에 정확한 값이 측정된다는 것을 경험하면, 학생들은 실험값이 정확하지 않을 때 실험설계에 대해 다시 검토를 하는 것보다 실험도구를 탓하며 더 정밀한 실험도구로 교체하는 방법을 먼저 생각하게 될 수도 있을 것이다.

특정 실험만을 위해 만들어진 실험키트를 사용했을 때 실험결과가 정확하게 나오지 않고, 오차의 원인을 찾지 못하는 사례도 나타났다. 확인실험 중에는 그 실험만을 위해 만들어진 실험키트를 사용해야 하는 실험수업이 있는데, 이 경우에 실험결과에 오차가 있어도 그 원인을 찾아내기 힘들다. 실험수업의 경험이 많은 교사 C는 광전효과 실험장치를 이용하여 플랑크 상수를 측정하는 실험수업을 지도한 적이 있는데, 플랑크 상수의 값을 정확히 측정해본 경험이 없다고 하였다. 다음은 이에 대한 C와의 면담 내용이다.

> 교사 C : 광전효과를 이용해서 플랑크 상수를 측정하는 실험을 많이 해봤어요. 그런데 6.6(×10^{-34} J·s) 근처 수치가 안 나와요. 그리고 작게 나와요. 그럼 과학자들은 6.6(×10^{-34} J·s)을 어떻게 얻어낸 건지 오랫동안 고민을 해봤는데 해결하지 못하고 결국 포기를 했었어요.

특정 실험만을 위해 만들어진 실험키트를 사용했을 때에 발생한 오차는 교사와 학생이 오차의 원인을 알아내고 제거하기 힘들다는 점에서 교사 B의 사례에서 나타난 오차와 차이점이 있다. 실험키트를 실험에 사용하면 기기 안에서 어떤 현상들이 일어나는지 실험자는 알기 힘들다. 이에 대해 이종봉과 이경호(2016)는 실험수업에서 실험키트를 사용하면, 분석해야 하는 자연현상은 기계에 의해 차폐되고 기계가 내놓은 수치만 해석의 대상이 된다고 하였다. 그리고 Ravetz(1971)는 측정 신호가 기기 내부의 여러 단계를 통과해 오면서 어디에서 계통오차를 포함하는지 알 수 없기 때문에, 기기에 사용되는 도구에 대한 깊은 지식이 없다면, 기기

가 보여주는 눈금의 값을 쉽게 받아들여서는 안 된다고 하였다. 즉, 실험수업에 임하는 교사와 학생은 실험키트가 내보내는 수치만을 실험결과로 얻게 되므로 이 데이터가 어떤 과정을 통해서 나오게 되었는지 파악할 수 없기에 오차의 원인을 파악하기 힘든 것이다. 그리고 교사 C는 실험수업의 경험이 많음에도 이런 경우에 오차의 원인을 찾는 것을 포기하게 되었다.

또 다른 사례로 계통오차가 발생할 수 있음을 고려하지 않고 실험을 해보지 않아도 결과를 예상할 수 있다고 생각하는 사례가 있었다. 교사 A는 교과서에 제시된 확인실험의 경우에 실험의 내용과 실험도구에 대해서 다 이해가 되기 때문에 실험을 해보지 않아도 결과를 예상할 수 있다고 생각하고 있었고, 오차 때문에 정확한 값이 측정되지 않을 수도 있다는 것을 고려하지 않고 있었다. 다음은 이에 대한 교사 A와의 면담내용이다.

> 교사 A : 중력가속도 확인 실험은 절차에 대해서도 알고 있고, 사용되는 이론인 등가속도 운동에 대해서도 알고 있고, 실험이 어떤 방식으로 이루어지는지도 알고 있다 보니, 실험을 하는 것과 손으로 연습문제를 푸는 거랑 다르지 않다고 느끼게 되는 거 같아요.

교사 A는 교과서의 실험은 이해하기 쉽기 때문에 답이 정해진 연습문제를 푸는 것처럼 실험도 정확한 답이 나올 것이라 생각하고 있다. 하지만 교사 B의 사례에서 예상하지 못했던 오차가 실험수업에서 발생하는 것처럼, 실험은 실제로 해보아야 결과가 정확하게 나올지 알 수 있다.

교사 A, B, C의 사례를 보았을 때에 실험수업에서 정확하지 않은 실험값을 얻었을 때에 교사들은 오차의 원인을 찾지 못하는 경우고 있고, 오차의 원인을 찾아도 오차 처리에 어려움을 겪고 있었다. 그리고 계통오차가 있는 경우에 이를 보정하지 않고 사용하는 실험도구를 다른 종류로 교체해서 실험수업을 진행하고 있었다. 그리고 실험을 해보지 않아도 오차가 없는 실험값을 얻을 수 있을 것이라 생각하고 있었다. 정리하면, 오차 처리에 어려움을 인식하고 다른 종류의 실험도구로 교체해서 실험

수업을 진행하는 것이다.

만약, 실험수업에서 이렇게 오차에 대한 논의를 하지 않고 넘어간다면 실험수업이 학생들에게 부정적 영향을 줄 수 있다는 연구들이 보고되었다. 실험수업에서 오차에 대한 논의를 거치지 않는 실험수업이 진행될 때, 한유화 등(2014)은 학생들이 실험결과에 상관없이 과학지식을 암기만 하게 된다고 했으며, 한감봉 등(2012)은 학생들이 실험결과를 과학법칙에 맞게 조작하는 사례를 찾아내기도 하였다. 그리고 강영창(2013)은 실험과 이론은 항상 다르다는 인식을 갖게 된다고 하였다. 그러나 계통오차를 보정하기 위해서는 실험도구의 교체가 아니라 실험설계나 실험과정에서 미처 고려하지 못했던 것을 찾아내야 하므로 실험설계에 대한 이해를 높이고, 학교의 실험수업에서도 정확한 값을 측정해낼 수 있다는 것을 알려주는 활동이 될 수 있다. 그러므로 계통오차를 발견하게 된다면 이를 보정하여 되도록 참값에 근접한 값을 얻어 실험수업을 진행해야 할 필요가 있을 것이다.

4.1.1.3. 계통오차 보정의 어려움

연구참여자들은 실험결과에 계통오차가 있을 때에 오차를 보정하는 것에 대해 어려워하고 있었다. 그리고 정밀한 실험값을 얻기 위한 방법과 정확한 값을 얻기 위한 방법이 다를 수 있다는 것을 인식하지 못하는 사례가 드러났다.

교사 B는 실험결과에 계통오차가 발생했을 때 실험수업에서 그 원인을 제거하는 단계까지 진행하지 않았는데, 이는 이론과 실험은 일치하지 않는다는 인식에서 나타난 것으로 보인다. 다음은 이에 대한 교사 B와의 면담내용이다.

> 교사 B : 저는 이론과 실제 실험이 당연히 일치할 수 없다는 걸 인정하고 있었어요. 그리고 오차가 없는 데이터를 얻기 위해 노력하는 것은 불필요한 일이라고 생각했어요. 학생들이 그런 고생을 겪어보면 오히려 실험이나 연구에 대한 흥미가 떨어지는 것이 아닌가 하는 생

각도 있거든요.

교사 B는 평소에 실험수업을 준비하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 이런 노력에도 불구하고 실험값에 오차가 있는 것을 보면서 이론과 실험이 일치하지 않는 것으로 여기고 있으며, 오차를 줄이기 위해서 노력하는 과정이 힘들고 어려운 것으로 생각하고 있다. 그런데 이것은 교사 B가 정밀한 데이터를 얻기 위한 방법과 정확한 데이터를 얻기 위한 방법을 구분하지 못해서 생긴 인식으로 볼 수 있다. 정밀한 데이터를 얻기 위해서는 교사 B가 단진자 실험수업을 준비했을 때처럼 실험도구를 더 정밀한 실험도구로 개선해야 한다. 그러나 실험값이 정확하게 측정되지 않고 계통오차가 있다면, 실험도구를 교체하기 전에 실험도구의 문제, 설계의 문제 등 실험설계 단계에서 고려하지 못한 오차의 원인들을 찾아보아야 한다. 그런데 B는 이런 차이를 인식하지 못하고 본인이 정밀한 실험값을 얻기 위해 기울인 노력을 통해서 정확한 측정도 가능하게 될 것이라 생각하고 있는 것으로 보인다.

측정과 자료해석에 불확도의 중요성을 강조한 연구들에서 학생이나 예비교사들은 정밀한 데이터가 정확한 데이터라고 인식하는 사례들이 있다고 보고되었다(신광문 등, 2011; 이재봉, 2006). 그러나 교사 B가 정밀한 데이터와 정확한 데이터를 구분하지 못하는 것은 아니었다. B는 물리학실험 교과목을 맡아서 학생들을 지도할 때에 이에 대해 지도했다고 하였고, 학생들이 실험데이터를 정밀하게만 측정하면 정확하게 측정했다고 확신해버리는 사례에 대해서도 알고 있었다. 다음은 이에 대한 교사 B와의 면담내용이다.

교사 B : 정밀하다와 정확하다가 다르다는 것을 학생들에게 실험기초 수업에서 지도한 적이 있어요. 정밀하지만 정확하지 않은 결과가 나왔을 때에 계통오차를 보정하면 정밀하면서 정확한 데이터로 옮길 수 있는 거잖아요. 그런데 학생들이 과제연구를 할 때에 정확하지 않은 데이터인데 단순히 정밀하게만 나오면 자기들의 실험이 틀리지 않고 너무 잘했다고 확신을 해버리거든요.

즉, B는 정밀과 정확을 구분할 수 있지만, 정밀한 실험도구로 개선했다고 해서 정확한 값을 측정해낼 수 있지는 않다는 것을 인식하지 못한 것으로 보인다. 이렇게 정확한 값을 얻는 방법이 정밀한 값을 얻는 방법과 다르다는 것을 인식하지 못함으로 인해 이론과 실험이 다름을 당연시하고 오차를 줄이기 위해서 노력하는 과정이 힘들고 어려운 것이라 인식하는 것으로 보인다.

따라서 정확한 결과를 얻지 못한 경우에 실험값에 포함된 계통오차를 보정하는 방법에 대해서 교사들이 알고 있어야 한다. 하지만 계통오차를 보정하는 방법은 실험수업에 대한 경험이 풍부하더라도 쉽게 알아낼 수 있는 것이 아니다. 교사 C는 정확한 실험데이터를 얻지 못한 경우에 오차의 원인을 찾을 수 있는 경우도 있고 그럴 수 없는 경우도 있었는데, 오차의 원인을 찾을 수 있더라도 그 원인을 찾는 데에 많은 시간과 노력이 들었다고 하였다. 다음은 이에 대한 교사 C와의 면담내용이다.

> 교사 C : 시간기록계와 종이테이프를 이용해서 중력가속도 실험을 하면 실험값은 항상 작게 나오잖아요. 이 실험방법으로 우리가 알고 있는 중력가속도의 값인 9.8 m/s^2 근처의 값을 얻어 본 적이 없어요. 또, 어떤 경우가 있었냐면, RLC 회로 실험을 할 때에 결과가 정확하지 않은 거예요. 한참 걸려서 생각해봤더니 코일에도 저항이 크더라구요. 이걸 알아내는 데에 1주일은 넘게 걸렸어요.

실험수업에 대한 경험이 많은 교사라도 계통오차를 보정하는 것은 쉽지 않다. 그래서 이에 대한 자료들이 교사에게 필요하지만 실험수업에서 계통오차를 어떻게 보정할 수 있는지 알려주는 자료는 많지 않다. 또, 물리실험에서 오차 처리의 중요성을 강조하는 연구들에는 정확과 정밀에 의한 자료해석을 중요시하지만 계통오차의 다양한 예시나 처리 방법에 대해서는 다루고 있지 않다(강영창, 2013; 박종찬, 2009; 이재봉, 2006). 그런데 실험에서 발생하는 계통오차는 그 원인이 다양하고 계통오차를 모두 제거하는 것은 무리이므로 모든 계통오차를 찾아서 정리한 자료를

만드는 것은 어려운 일이다. 그러므로 교사들이 계통오차의 원인을 찾아내고 보정하는 경험을 해보고 정밀한 데이터를 얻기 위한 방법과 정확한 데이터를 얻기 위한 방법이 다르다는 것을 알 수 있도록 체험해 보는 것이 중요할 것이다. 따라서 이런 경험을 할 수 있는 실험교육 자료가 필요하다.

4.1.2. 실험 지도에 대한 인식

연구참여자들은 실험수업을 통해서 학생들이 과학법칙을 확인하는 것에 주요 목표를 두고 있었다. 하지만 실험설계와 실험방법에 대한 학생들의 이해는 주요 목표가 아니었으며, 학교에서 실험수업이 교육적으로 의미 있게 이루어지지 않는다고 인식하는 사례도 있었다.

교사 A는 확인실험의 결과는 예측한 그대로 나오는 경우가 많아 실험수업은 훈련 같다고 하였다. 다음은 이에 대한 교사 A의 진술이다.

> 교사 A : 확인실험들은 예측한 그대로 나오는 실험들이 많은데, 그런 실험들은 훈련을 받는 것 같은 느낌이에요. 그래서 실험수업에서 중력가속도의 값이 정확하게 측정되었다고 해도 그게 실험수업이 의미있다고 느끼는 요인이 되지는 않아요.

교사 A는 학교에서 이루어지는 실험수업이 실험도구의 사용법, 그래프 그리는 법, 오차의 통계적 처리방법을 배우는 반복적인 훈련 같다고 추가 면담에서 진술하였으며, 실험수업에서 과학자처럼 실험을 하는 법에 대해서 배우는 것은 아닌 것 같다고 하였다. 그래서 실험을 통해 정확한 값을 얻더라도 학교의 실험수업이 교육적 의미가 있는 것은 아니라고 인식하고 있었다. 한감봉 등(2012)과 한유화 등(2014)은 학교의 실험수업에서는 측정과 자료수집에 수업시간의 대부분을 할애하고 있고, 학생들은 결과를 얻어내는 실험의 수행에만 목적을 두고 있기 때문에 실험수업이 의미 있게 이루어지지 않는다고 보고하였는데, 이 내용과 A의 인식이 일치한다.

교사 B의 단진자 실험수업을 준비하는 사례에서 보았듯이 B는 실험수업에서 학생들이 정밀한 실험값을 얻을 수 있도록 노력하였지만, 정밀한 실험값을 얻는 방법에 대한 학생들의 이해를 도모하는 것에는 치중하지 않았다. 교사 B는 단진자 실험수업의 목표에 대하여 다음과 같이 말하였다.

> 교사 B : 단진자의 진폭이 커지면 우리가 알고 있는 주기공식이 맞지 않는다는 것을 알려주고 싶었어요. 오차막대가 작아야 진폭이 달라질 때 주기도 달라진다는 것을 알 수 있잖아요.

교사 B의 목표는 진자의 진폭이 달라질 때 주기도 달라질 수 있다는 것을 학생들에게 알려주기 위함이었고, 그러기 위해서 정밀한 실험값이 필요했다. 즉, 주어진 시간 안에 학생들이 더 정밀한 값을 얻고 실험결과를 이용하여 물리적 논의를 진행하기 위해서 실험을 개선해 나간 것이다. 그러나 정밀한 실험을 위해서 왜 그런 실험도구들을 써야 하는지 이해시키는 것은 실험수업의 주요 내용이 아니었다. 실험설계와 실험방법 자체는 물리적 논의를 위한 실험값을 얻는 수단이라 생각한다는 B의 진술은 이를 잘 보여준다. 한유화 등(2014)과 한감봉 등(2012)은 교사들이 실험수행과 과정설명에 가장 많은 시간을 할애한다고 하였는데, 실험설계에 대한 학생의 이해를 실험수업에서 중요한 목표로 인식하지 않는 B의 사례도 이러한 연구결과와 궤를 같이한다.

교사 C 역시 실험 지도에 대해 비슷한 인식을 갖고 있는 것으로 나타났다. C의 실험수업의 주요 목표는 실험결과를 이용하여 물리적 논의를 진행하는 것이었다. 즉, 정밀하고 정확한 실험값을 얻어내는 실험설계에 대한 이해는 실험수업의 주요 목표는 아니었다. 다음은 이에 대한 교사 C와의 면담내용이다.

> 교사 C : 스펙트럼 관찰 실험도 스펙트로미터를 이용하면 스펙트럼의 모양을 바로 알 수 있잖아요. 그 결과를 이용해서 스펙트럼의 모양이 왜 이렇게 되어야 하는지를 생각하고 탐구하는 게 실험수업에서 저

의 주된 관심사였죠.

정리하면, 연구참여자들은 학생들이 실험값을 쉽게 얻을 수 있는 실험 세팅을 제공하고 실험값을 얻은 후에, 실험결과로 과학법칙을 확인하는 실험수업을 진행하고 있었다. 이는 박종찬(2009)이 실험수업에서 교사들이 반복측정과 변수간의 관계 해석을 중요하게 생각하고 있다고 조사한 것과 일치한다. 하지만 이렇게 주어진 실험구성을 사용한다면 실험값을 얻기 위해 왜 그렇게 실험이 설계되었는지에 대해 학생들이 이해하는 데에는 한계가 있다. 그리고 실험설계에 대한 이해가 부족하다면, 실험값이 정확하게 측정되지 않았을 때에 계통오차의 원인을 찾기 힘들어질 수 있다.

4.1.3. 정리

연구참여자들은 실험수업에서 오차와 관련된 어려움을 겪고 있었다. 정밀한 측정을 위해서 실험조건에 맞게 실험을 다시 설계해야 한다는 것을 인식하지 못하는 경우가 있었고, 실험수업에서 정밀한 실험값을 얻기 위해 측정이 용이한 실험세팅을 학생들에게 제공하여 실험수업을 진행하고 있었다.

정확하지 않은 실험값을 얻는 경우에 교사 B는 학생들에게 오차의 원인을 찾게 했지만 이를 보정해서 정확한 실험값을 얻어내는 단계는 실험수업에서 진행되지 않았다. 교사 C는 실험값이 정확하지 않을 때에 오차처리에 어려움을 느끼고 MBL 장비와 같이 정밀한 실험도구를 사용하여 실험수업을 진행하였다. 교사 A는 실험을 해보지 않아도 결과가 정확히 나올 것이라 예상할 수 있다는 생각을 하고 있었다.

계통오차에 대해서 교사 B는 이론과 실험이 다를 수밖에 없다는 것을 인정하고 있었다. 이는 정밀한 실험값과 정확한 실험값을 얻기 위한 방법이 다를 수 있다는 것을 인식하지는 못하기 때문인 것으로 보인다. 교사 C의 사례를 보았을 때 계통오차를 보정하는 방법은 실험수업의 경험이 풍부하더라도 쉽게 알아내기 어렵다. 그렇기 때문에 정확한 실험값을 얻기 위한 방법을 교사들에게 알려줄 필요가 있을 것으로 보인다.

실험수업에 대해서 교사 A는 반복적인 훈련처럼 느껴져서 학교의 실험수업이 의미 있게 이루어지지 않고 있다고 생각하고 있었다. 교사 B와 C의 경우 실험수업의 목표를 실험결과를 이용하여 과학적 논의를 진행하는 것으로 생각하고 있었고, 실험설계와 실험방법을 학생들이 이해하는 것은 실험의 주요 목표가 아니었다.

이렇게 실험에서 발생하는 오차와 관련하여 교사들이 어떤 인식을 가지고 실험수업을 진행하고 있는지 연구참여자에 따라 [표 4-1]에 정리하였다.

[표 4-1] 실험 오차와 실험 지도에 대한 연구참여자들의 인식

연구참여자	실험 오차와 실험 지도에 대한 인식
교사 A	• 오차 발생을 고려하지 않고 실험을 해보지 않아도 측정값을 예상할 수 있다고 생각한다. • 학교의 실험수업은 반복적인 훈련 같아서 의미 있게 이루어지지 않고 있다고 생각한다.
교사 B	• 측정에 용이한 실험세팅으로 실험수업을 진행한다. • 학생들이 찾아낸 오차의 원인을 제거해서 실험하는 단계는 진행하지 않는다. • 이론과 실험이 일치할 수 없다고 생각한다. • 실험도구를 정밀하게 개선함으로써 정확한 값도 얻을 수 있을 것이라고 인식한다. • 실험설계에 대한 학생들의 이해는 실험수업의 주요 목표가 아니다.
교사 C	• 측정에 용이한 실험세팅으로 실험수업을 진행한다. • 정확하지 않은 값이 측정된 경우에 오차의 원인을 찾고 있지만, 시간이 오래 걸리고 원인을 찾지 못하는 경우도 있다. • 실험설계에 대한 학생들의 이해는 실험수업의 주요 목표가 아니다.

이를 종합하면, 교사들은 정밀하고 정확한 실험값을 얻기 위한 방법으로 실험도구를 교체하는 방법을 선택한다. 그리고 실험결과가 정확하지 않을 때 실험도구를 교체하기 이전에 실험설계와 실험방법에서 오차의 원인을 찾아야 하는 것을 인식하지 못하고 있었다. 그리고 계통오차가 발생했을 때에 이를 보정하는 것에 어려움을 겪고 있었으며, 오차를 피하기 위해 실험값을 쉽고 빠르게 얻을 수 있는 실험도구들을 학생들에게 제공하는 모습을 보였다. 오차에 대한 이러한 회피는 교사들이 측정값을 얻기 위한 실험설계의 이해를 실험수업의 목표로 인식하지 않기 때문인 것으로 보인다.

4.2. 계통오차 분석이 가능한 물리실험 설계

연구참여자들은 실험값이 정확하지 않을 때에 오차를 처리하는 것에 어려움을 겪고 있었다. 이에 물리실험에서 발생하는 계통오차를 찾아내고 보정하는 과정을 경험할 수 있는 물리실험을 설계하고자 하였다. 이 실험을 통해 연구참여자들은 계통오차의 원인을 찾아내기 위해서는 실험설계, 실험방법, 실험도구 등 실험 전반에 대해서 검토하여 고려하지 못한 사항을 찾아내야 함을 인식할 수 있을 것이다. 그리고 계통오차 분석 활동을 통해 실험에 대한 이해를 높이고 오차 보정의 중요성을 인식할 수 있고, 학교의 실험에서도 알려진 참값에 가까운 실험값을 얻을 수 있음을 인식할 수 있을 것이다. 이 절에서는 물리학 실험 교과서에 제시된 실험에 사용되는 실험도구들을 조사하였고, 연구참여자들이 실험설계에 대해 이해할 수 있도록 실험도구들을 선별해서 물리실험을 설계했으며, 설계한 실험들의 실험방법과 실험결과를 제시하였다.

4.2.1. 설계할 물리실험 선정

4.2.1.1. 물리학 실험 교과서의 실험도구 조사

계통오차의 원인을 찾아내고 보정하는 경험을 할 수 있는 물리실험을 설계하기 위해서는 물리실험에 사용되는 실험도구들에 대해서 조사할 필요가 있다. 물리실험수업에서 발생한 오차의 원인은 대부분 실험도구와 관련되어 있기 때문이다. 그래서 연구참여자들이 근무하는 과학고등학교에서 사용하는 물리학 실험 교과서(박승호 등, 2018)에서 사용하는 실험도구들을 조사하였다. 실험도구는 교과서의 실험순서에 제시된 준비물들이며, 기본 도구, 조건 통제용 실험도구, 단순 측정도구, 스마트 기기, 범용기기, 소프트웨어, 특정 실험만을 위한 실험키트로 분류하여 나타내었다. 그리고 이 실험도구들의 종류를 변인을 통제하는 데에 사용하는 도구, 측정을 하는 데에 사용하는 도구, 측정 데이터를 분석하는 데에 사용

하는 도구로 구분하였다. 이 구분은 물리학 실험 교과서의 저자 중 한 명의 확인을 받아 [표 4-2]에 나타내었다.

[표 4-2] 물리학 실험 교과서 실험에 사용되는 실험도구의 종류

구분	종류		예시	설명
변인 통제	기본 도구		추, 역학수레	기본적으로 사용되는 도구
	조건 통제용 실험도구		시간기록계 줄 진동기 함수발생기 광학대	일정한 조건을 유지시켜주기 위해 사용하는 기기
측정	단순 측정도구		초시계, 각도기, 온도계, 전압계, 전류계, MBL 센서	한 종류의 물리량만 측정할 수 있는 기기
	스마트 기기		스마트폰 디지털 카메라	용도가 제한되어 있지 않고 실험에 활용할 수 있는 기기
	범용기기		디지털 멀티미터 오실로스코프	여러 종류의 물리량을 측정할 수 있고, 여러 실험에 활용할 수 있는 기기
분석	소프트웨어	오픈소스	트래커	무료로 사용할 수 있는 분석 프로그램
		전용 프로그램	분광계 프로그램 Capstone	특정 제품에 사용할 수 있는 전용 프로그램
특정 실험만을 위한 실험키트			광전효과 실험장치 기름방울 실험장치	특정 실험만을 위해서 만든 완제품으로 다른 종류의 실험에 활용하기 힘든 실험장치

변인을 통제하는 데에 사용하는 도구는 기본 도구와 조건 통제용 실험도구이다. 기본 도구는 기본적인 실험도구로 자연에 존재하는 여러 물체를 이상적인 상황으로 모델링하여 실험에 사용할 수 있도록 바꾼 것이다. 예를 들어 자유낙하 하는 물체에 대해 실험하기 위해서는 임의의 물체를 사용하는 것이 아니라 크기, 모양, 질량을 통제할 수 있는 추와 같은 기본 도구를 사용해야 하는 것이다. 조건 통제용 실험도구는 종이테이프에 일정한 시간간격으로 타점을 찍어주는 시간기록계, 줄을 일정한

진동수로 진동시켜주는 줄 진동기처럼 실험에 일정한 조건을 제공해주는 실험도구이다. 자연현상은 여러 조건이 혼재되어 일어나기 때문에 실험을 위해서는 특정 조건만 유지시켜야 하는데, 이때 사용하는 실험도구가 조건 통제용 실험도구이다.

실험값을 측정하기 위해서는 단순 측정도구, 스마트 기기, 범용기기를 사용한다. 단순 측정도구는 초시계, 온도계 등 한 종류의 물리량만 측정할 수 있는 측정기기이다. MBL(Microcomputer Based Laboratory)은 측정하고자 하는 물리량에 맞추어서 센서를 사용하기 때문에 단순 측정도구로 분류하였다. 스마트 기기는 스마트폰, 디지털 카메라 등으로 용도가 제한되어 있지 않으며, 최근에 널리 보급되기 시작하여 물리실험에 쓰이고 있고, 실험데이터를 디지털 형태로 측정할 수 있게 도와주는 실험도구이다. 범용기기는 디지털 멀티미터, 오실로스코프 등 여러 종류의 물리량을 측정할 수 있어서 여러 실험에 사용할 수 있는 측정도구이다. 스마트 기기와 범용기기는 특정 실험만을 위해서 만들어진 것이 아니고 여러 실험에 활용할 수 있는 특징이 있다.

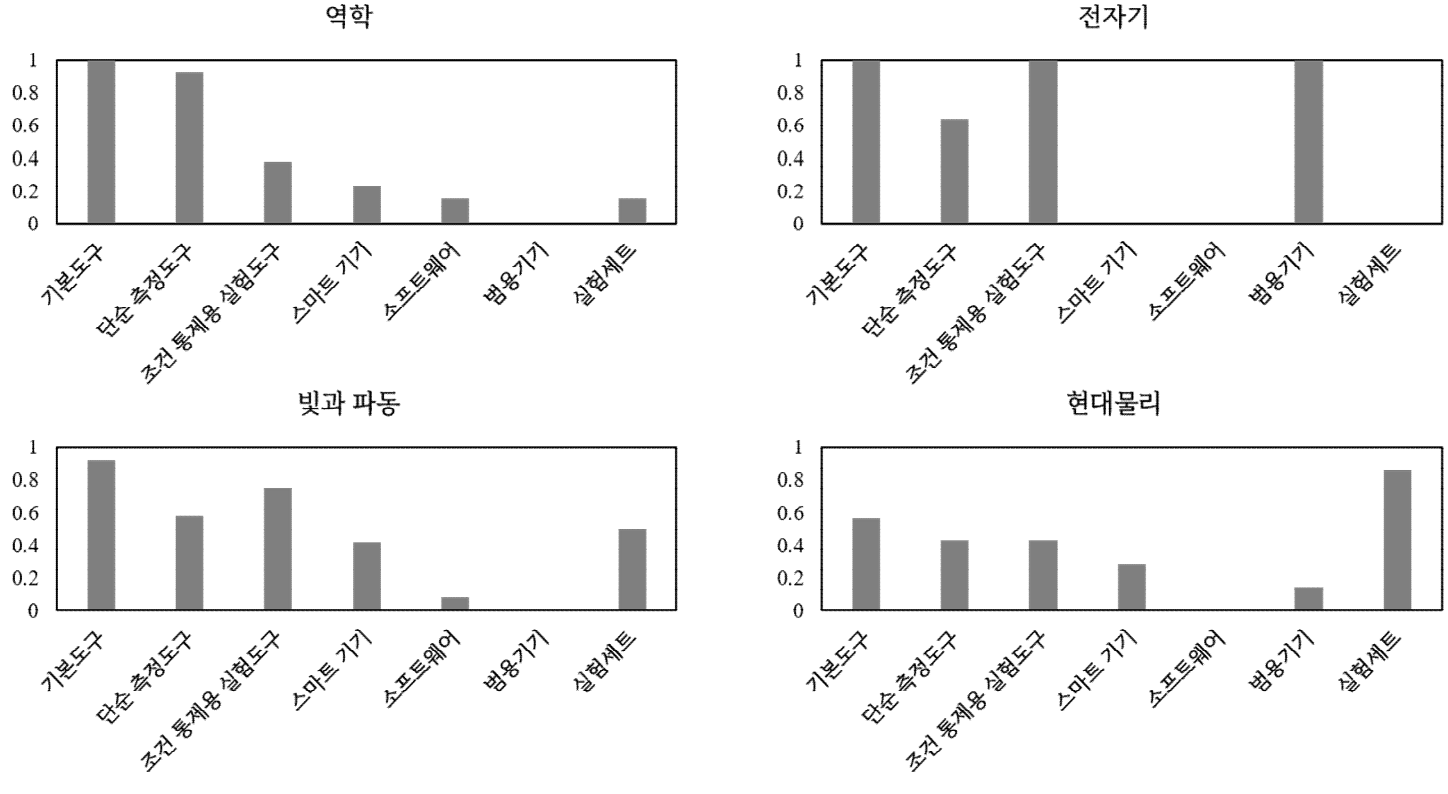
측정한 데이터를 분석하는 데에는 소프트웨어를 사용한다. 소프트웨어는 실험에서 측정한 데이터를 컴퓨터로 받아들이고 분석에 도움을 주는 역할을 한다. 오픈소스는 무료로 사용할 수 있는 프로그램이고, 특정 제품의 전용 프로그램은 교구회사의 제품과 함께 구입해서 사용해야 한다.

특정 실험만을 위한 실험키트는 변인통제, 측정, 분석을 모두 같이 할 수 있는 실험도구이다. 그리고 광전효과 실험장치, 밀리컨의 기름방울 실험장치, 프랑크-헤르츠 실험장치 등 특정 실험에서만 사용할 수 있거나 교구회사를 통해서만 구입할 수 있는 실험도구이다.

이렇게 실험도구를 7종류로 나누고 물리학 실험 교과서에 제시된 실험에서 사용하는 실험도구를 조사하여 [부록 5] 나타내었다. 그리고 각각의 단원에서 각 실험도구의 종류가 사용된 횟수를 각 단원의 실험수로 나누어서 계산한 빈도를 [그림 4-1]에 나타내었다.

물리학 실험 교과서는 역학, 전자기, 빛과 파동, 현대물리 실험으로 구성되어 있다. 역학 실험에는 추, 초시계, 수레 등 기본 도구와 단순 측정

도구들을 이용한 실험이 많았고, 주로 초시계로 시간을 측정하고 운동학 공식을 이용해 원하는 값을 얻는다. 스마트 기기를 사용하는 실험으로는 디지털 카메라로 영상을 촬영하고 컴퓨터에서 트래커로 영상을 분석하는 실험이 있다. 실험키트를 사용해야 실험은 2차원 충돌 실험과 열 실험이다. 전자기 실험에는 주로 디지털 멀티미터나 오실로스코프와 같은 범용 기기가 실험에서 사용된다. 빛과 파동 실험에는 실험키트에 의존하는 실험이 많다. 수면파 실험장치, 광학대, 분광계는 세트로 구비하기에 비용이 든다. 대신 광학대는 여러 실험도구의 광축을 맞추어 주는 조건 통제용 실험도구로 여러 실험에 활용할 수 있다. 현대물리 실험은 학교에서 직접 실험장치를 만들 수 없는 경우가 많기 때문에 주로 각각의 실험에 맞는 실험세트를 이용한다.



[그림 4-1] 실험도구가 각 단원에서 사용되는 빈도

물리학 실험 교과서의 실험에서 활용하는 실험도구들을 정리한 결과 기본 도구, 조건 통제용 실험도구, 단순 측정도구들이 네 개의 단원에서 고루 사용되고 있었다. 그리고 역학 실험에는 스마트 기기를, 전자기 실험에는 범용기기를, 빛과 파동 그리고 현대물리 실험에는 실험키트를 주로 사용하고 있었다.

변인통제에 관련된 실험도구는 실험에 기본적으로 사용되기 때문에 네 개의 단원에서 골고루 등장한다. 그러나 측정과 관련된 실험도구는 각각의 단원에서 서로 다른 빈도로 등장하는데, 이는 실험의 종류에 따라서 알맞은 측정도구를 선택해야 함을 나타낸다. 빛과 파동 단원과 현대물리 단원에서 실험키트가 등장하는 빈도가 높은 이유는 조건을 통제하고 측정하는 과정이 까다롭기 때문인데, 학교에서 모든 실험에 대한 실험키트를 구비하는 것은 어려운 일이므로 교사들이 쉽게 구할 수 있는 실험도구들로 이 단원의 실험을 설계할 필요가 있다.

4.2.1.2. 설계할 실험에 사용할 실험도구 선정

연구참여자들은 실험수업에서 정밀하고 정확한 실험값을 얻기 위해 측정 자료를 얻기 용이한 제품을 구입하여 실험에 사용하고 있었다. 그러나 실험값이 정밀하지 않은 문제는 실험도구를 정밀한 것으로 개선해야 할 필요가 있지만, 실험값이 정확하지 않을 때에는 실험도구를 교체하기 전에 실험설계와 기기에 결함이 있는지부터 찾아야 한다. 이렇게 실험설계와 기기에 대한 결함을 찾아내는 계통오차 분석이 가능하려면 실험설계에 대해 이해할 수 있는 실험도구로 물리실험을 설계해야 한다.

기본 도구, 조건 통제용 실험도구, 단순 측정도구는 물리학 실험 교과서의 네 단원에서 고루 사용하고 있는 도구이므로 어떤 실험을 설계하든 기본적으로 사용해야 하는 도구들이다. 그러므로 본 연구에서 설계할 실험에도 기본적으로 사용하게 된다. 특정실험만을 위한 실험키트를 사용하는 경우에는 실험설계에 대해 이해할 수 없어 오차의 원인을 찾기 힘들다. 그래서 본 연구에서는 실험키트를 사용한 실험은 설계하지 않았다.

계통오차 분석이 가능하기 위해서는 실험값이 정밀하게 측정되어야 한다. 실험값의 불확도가 작을 때에 참값에서 벗어난 계통오차가 발생했는지 판단할 수 있기 때문이다. 그래서 본 연구에서는 측정과 관련된 도구들 중에 교사가 실험설계를 이해하는 데에 도움이 되면서 정밀한 측정이 가능한 도구들을 선택하여 계통오차 분석이 가능한 실험을 설계하고자 하였다.

정밀한 측정이 가능하면서 실험설계에 대한 이해가 가능한 실험도구로는 스마트 기기, 범용기기, 오픈소스 하드웨어가 있다. 이 실험도구들은 특정 실험에 국한되지 않고 다양한 실험에 활용할 수 있는 도구들이다. 스마트 기기는 용도가 제한되어 있지 않아서 실험에 활용할 수 있는 도구이다. 스마트 기기의 예로는 스마트폰, 디지털 카메라 등이 있다. 스마트 기기 중 하나인 스마트폰은 센서 백엽상으로 불릴 만큼 각종 물리량 측정 센서를 탑재하여 휴대용 컴퓨터와 통신이 가능하고 주위 환경을 측정하는 역할을 한다(이준원, 2014). 그래서 최근에 스마트폰을 다양한 물리량을 측정하는 실험도구로 사용한 물리실험들이 개발되고 있다(Pendrill & Rohlen, 2011; Wattanayotin et al., 2017). 범용기기는 다양한 물리량을 측정하기 위해 만든 기기로 여러 실험에 활용할 수 있는 기기이다. 범용기기인 디지털 멀티미터, 오실로스코프는 이미 다양한 실험에 활용되고 있고, 활용되는 실험에 맞추어서 그 기능을 알맞게 사용해야 하므로 실험설계를 이해하는 데에 도움이 된다. 그리고 범용기기는 측정할 수 있는 범위를 고려하지 않으면 계통오차가 나타날 수 있는 가능성이 있다. 오픈소스 하드웨어는 사용자가 원하는 대로 기기를 구성할 수 있으므로 실험에 활용할 수 있다. 오픈소스 하드웨어로는 아두이노 보드를 예시로 들 수 있다. 아두이노 보드에는 각종 센서를 연결하여 원하는 대로 회로를 만들고 물리량을 측정할 수 있어서 스마트폰보다 더 자유롭게 장치를 구성할 수 있다. 그리고 스마트폰과 마찬가지로 아두이노를 이용한 물리실험들도 개발되고 있다(Goncalves et al., 2017; Pereira, 2016).

이렇게 본 연구에서는 실험값을 정밀하게 측정할 수 있게 해주는 스마

트 기기, 범용기기, 오픈소스 하드웨어를 이용하여 실험을 설계하고 계통오차를 분석하는 것에 초점을 두었다. 계통오차 분석활동이 가능한 물리실험을 설계하는 데에 사용한 실험도구를 [표 4-3]에 나타내었다. 물리학 실험 교과서에서 사용하는 실험도구와 비교하면 특정 실험만을 위한 실험키트를 제외시키고 오픈소스 하드웨어를 추가한 것이다.

[표 4-3] 설계한 실험에 사용한 실험도구

종류	예시	설명
스마트 기기	스마트폰 디지털 카메라	용도가 제한되어 있지 않고 실험에 활용할 수 있는 기기
범용기기	디지털 멀티미터 오실로스코프	여러 종류의 물리량을 측정할 수 있고, 여러 실험에 활용할 수 있는 기기
오픈소스 하드웨어	아두이노	사용자가 원하는 대로 구성할 수 있는 도구

4.2.1.3. 계통오차 분석이 가능한 물리실험 주제 선정

계통오차 분석이 가능하기 위해서는 실험값이 정밀하게 측정되어야 하며, 실험결과에 계통오차가 포함되어 있어야 한다. 앞서 정밀한 측정이 가능한 기기로 스마트 기기, 범용기기, 오픈소스 하드웨어를 선정하였다. 이들 실험도구로 실험을 설계했을 때에 계통오차가 포함되어 있다면 계통오차의 원인을 찾아내고 보정하는 것을 교사들이 경험할 수 있다.

본 연구에서는 [표 4-3]에 제시한 실험도구들을 이용하여 물리학 실험 교과서의 각 단원에서 대표적인 실험을 하나씩 골라 계통오차 분석 활동이 가능한 물리실험을 설계하였다.

역학 실험에서는 중력가속도를 측정하는 실험을 스마트 기기인 디지털 카메라를 사용하여 설계하였다. 교사 C의 경험에서 시간기록계를 이용하여 중력가속도를 측정하면 항상 작은 값이 측정되는데, C는 마찰의 영향을 적게 받는 MBL 장치를 이용하여 정확한 값을 측정했었다. 물리학

실험 교과서에는 중력가속도 측정실험으로 시간기록계를 사용하는 실험과 디지털 카메라의 광학센서를 사용하는 실험이 제시되어 있다. 그런데 광학 센서를 이용할 때에는 바라보는 각도에 따라 물체의 위치가 달라 보이는 시차오차에 의한 계통오차가 발생할 수 있다.

전자기 실험에서는 공기의 유전율 측정실험을 범용기기인 오실로스코프를 이용하여 설계하였다. 오실로스코프는 전압신호를 정밀하게 측정할 수 있는 측정도구이다. 전압을 정확하게 측정하기 위해서는 전압계의 저항이 무한대이어야 하지만 실제 오실로스코프의 저항은 무한대가 아니다. 그리고 특정 물리량을 측정하기 위해서는 측정의 대상이 되는 회로와 연결을 해야 하는데, 이때 측정의 대상이 매우 작은 값이라면 연결을 위해 사용한 케이블의 물리량이 측정값에 영향을 줄 수 있다. 연구참여자들은 정밀하고 정확한 실험값을 측정하기 위해 더 정밀한 실험도구로 교체하는 방법을 택했는데, 정밀한 실험도구로 실험설계를 수정하더라도 오차가 발생할 수 있음을 알려주기 위해서 정밀한 도구인 오실로스코프로 매우 작은 물리량인 공기의 유전율을 측정하는 실험을 설계하였다.

빛과 파동 실험에서는 선 스펙트럼의 파장을 스마트 기기인 스마트폰 카메라를 이용하여 촬영하고 트래커를 이용해서 파장을 분석하는 실험을 설계하였다. 물리학 실험 교과서에서는 분광계와 분광계 프로그램을 이용하여 선 스펙트럼의 파장을 분석하는 실험이 제시된다. 그러나 분광계와 프로그램을 구입하는 데에 비용이 많이 필요하고, 실험키트를 사용하는 경우에 오차의 원인을 논의하기 어렵다. 그래서 값비싼 장비를 사용하지 않아도 실험이 가능함을 알려주기 위해 스마트폰 카메라를 스펙트럼 촬영 도구로 사용하는 실험을 설계하였다. 스마트폰 카메라에는 광량에 따라서 초점을 자동으로 조절하는 기능이 있는데, 스펙트럼을 촬영할 때에 자동초점 기능으로 인해 스펙트럼이 확대 또는 축소되어 촬영될 가능성이 있어 계통오차가 발생할 수 있다.

현대물리 실험에서는 플랑크 상수를 측정하는 실험을 오픈소스 하드웨어인 아두이노 보드와 센서를 이용하여 설계하였다. 교사 C의 경험에 의하면 광전효과 실험장치로 플랑크 상수를 측정하면 참값보다 작은 값이

측정되는 계통오차가 나타나는데, 그 원인을 찾을 수 없었다. 그래서 실험키트를 사용하지 않아도 현대물리 실험을 할 수 있다는 것과 계통오차를 보정할 수 있다는 것을 알려주기 위해 오픈소스 하드웨어를 이용하여 실험을 설계하였다.

Brizuela & Juan(1996)와 Crandall & Delord(1983)에 의하면 전구, 광센서 등을 이용하면 플랑크 상수를 측정할 수 있는 실험을 설계할 수 있는데, 이 설계는 아두이노 보드와 꼬마전구, 적외선 광다이오드를 이용하면 구성할 수 있다. 그런데 이렇게 실험을 설계하여 플랑크 상수를 측정하면 알려진 값보다 작게 측정되는 계통오차가 발생한다. Brizuela & Juan(1996)와 Crandall & Delord(1983)이 측정한 플랑크 상수의 값은 각각 $4.7 \sim 6.0 \times 10^{-34}$ J·s와 4.9×10^{-34} J·s로 알려진 값(6.626×10^{-34} J·s)보다 더 작은 값이었다. 따라서 오픈소스 하드웨어를 이용하여 플랑크 상수를 측정하는 실험을 설계하면 계통오차가 포함되어 있으므로 이를 분석하는 경험을 할 수 있다.

계통오차 분석 활동이 가능한 물리실험을 각 단원별로 그리고 사용한 측정도구에 따라서 [표 4-4]에 나타내었다.

[표 4-4] 설계한 실험과 사용한 도구

단원	실험	사용 도구		
		스마트 기기	범용기기	오픈소스 하드웨어
역학	중력가속도	디지털 카메라		
전자기	공기유전율		오실로스코프	
빛과 파동	선스펙트럼 파장	스마트폰 카메라		
현대물리	플랑크 상수			아두이노

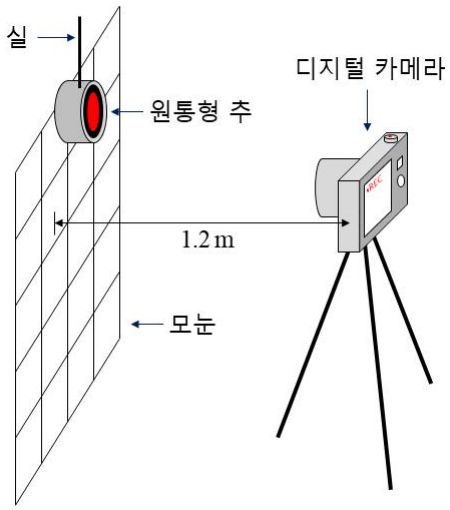
4.2.2. 설계한 실험의 실험방법과 실험결과

4.2.2.1. 스마트 기기를 이용한 실험

스마트 기기를 이용한 실험으로 중력가속도 측정실험과 빛의 선스펙트럼 파장 측정실험을 설계하였다. 두 실험 모두 카메라를 촬영도구로 사용하고 트래커를 분석도구로 사용하였다.

◆ 중력가속도 측정실험

지표면 근처에서 자유낙하 하는 물체의 영상을 촬영하기 위해 슬로우 모션 촬영 기능이 있는 디지털 카메라(Nikon, Nikon 1 J5)를 사용하고, 영상 분석 프로그램으로는 오픈소스 소프트웨어인 트래커를 사용하였다. 자유낙하 하는 물체를 촬영하기 위해 [그림 4-2]와 같이 모눈을 배경에 세우고 두께가 약 1 cm인 원통형 추를 실에 매달아서 잡고 있다가 실을 놓아 떨어뜨렸다. 추가 낙하하는 장면은 모눈과 약 1.2 m 떨어져 있는 카메라로 촬영하였다.



[그림 4-2] 낙하하는 추를 촬영하기 위한 실험도구 배치

촬영된 영상에서 추가 낙하한 거리는 약 50 cm인데, 추가 정지 상태에서 낙하를 시작했다고 한다면 50 cm를 낙하하는 데에 걸리는 시간은 약 0.3 s이다. 만약 영상을 120 fps로 촬영한다면 촬영되는 장면의 수는 약 40장이고, 400 fps로 촬영한다면 촬영되는 장면의 수는 약 120장이다. 분석에 사용할 장면의 수를 늘리기 위하여 400 fps로 초당프레임 수를 설정하였다. 그리고 영상에서 낙하하는 추가 명확하게 보일 수 있도록 셔터속도를 1 ms로 설정하여 촬영하였다. 셔터속도와 촬영된 추의 모양의 관계를 [부록 6]에 제시하였다.

촬영한 영상을 트래커에서 분석하면 위치-시간 데이터를 얻을 수 있다. 그리고 트래커에서 2차식의 추세선을 맞추고 중력가속도를 구할 수 있다. 이 과정을 [부록 7]에 제시하였다. 촬영한 영상 10개를 분석하여 구한 중력가속도의 값을 [표 4-5]에 나타내었는데, 10개의 값을 평균을 내었더니 95% 신뢰도로 9.91 ± 0.06 m/s^2이었다. 10개의 데이터 중 대부분이 알려진 중력가속도 9.8 m/s^2보다 더 크게 나오는 계통오차가 발생했다.

[표 4-5] 실험으로 측정한 중력가속도

실험 번호	중력가속도 (m/s^2)
1	9.85
2	9.84
3	9.82
4	10.03
5	9.88
6	10.01
7	9.79
8	9.95
9	10.02
10	9.88
평균	9.91 ± 0.06

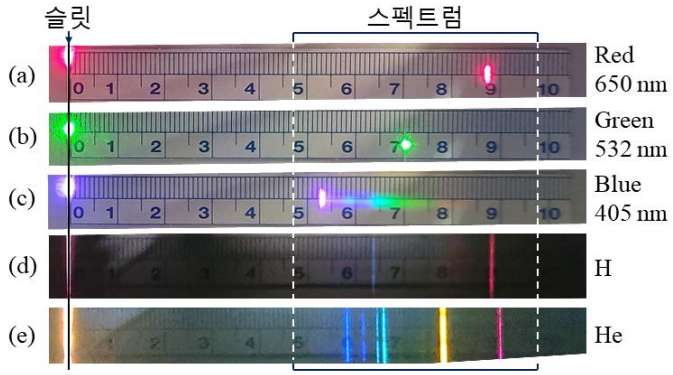
물리학 실험 교과서에 제시된 중력가속도 측정실험과 비교하면 실험에 디지털 카메라와 트래커를 사용하는 것은 같다. 그러나 교과서와는 달리 본 연구에서는 동영상을 촬영할 때에도 셔터속도를 조절할 수 있는 기능이 있는 디지털 카메라를 사용하는 방법을 제시하였다([표 4-6]). 디지털 카메라와 같은 스마트 기기를 실험에 사용할 때에는 실험에 활용할 수 있는 기능을 자세히 안내해주어야 정밀한 실험데이터를 얻을 수 있다. 그리고 정밀한 데이터를 쉽게 얻을 수 있어야 반복측정과 통계적 처리를 통해 계통오차가 드러나게 할 수 있다.

[표 4-6] 설계한 중력가속도 측정실험과 교과서 실험의 차이점

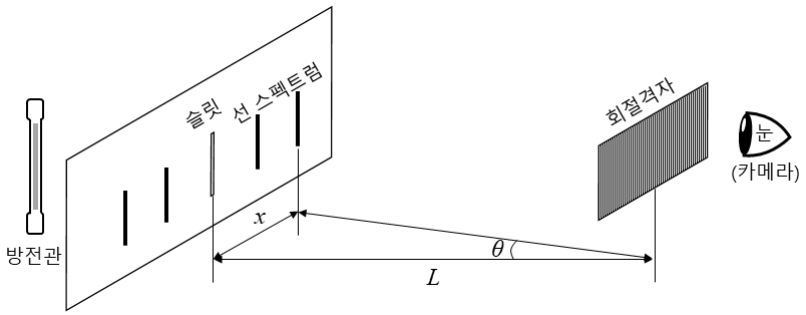
	물리학 실험 교과서	개발한 실험
실험방법	디지털 카메라와 트래커를 사용한다..	디지털 카메라의 셔터속도 조절 기능을 활용하여 낙하하는 물체를 또렷하게 촬영한다.

◆ 선스펙트럼 파장 측정실험

선스펙트럼의 파장을 측정하기 위해서 간이분광기에 스마트폰 카메라를 갖다 대어 스펙트럼 사진을 촬영하고 오픈소스 소프트웨어인 트래커에서 사진을 분석하였다. 실험에 사용한 간이 분광기(신세기 사이언스, 간이 분광기 제작 키트, KSIC-9708)는 2000 nm(= 1/500 mm) 간격의 회절격자를 사용한다. 간이 분광기의 회절격자 부분에 스마트폰 카메라를 갖다 대고 슬릿으로 들어온 빛을 촬영한 사진을 [그림 4-3]에 나타내었다. 촬영한 빛은 650 nm 붉은색 레이저, 532 nm 녹색 레이저, 405 nm 파란색 레이저, 수소의 선 스펙트럼, 그리고 헬륨의 선 스펙트럼이다.



[그림 4-3] 레이저, 수소, 헬륨 선 스펙트럼 사진. 트래커에서 분석하기 위해 슬릿의 위치를 맞췄다. 사진은 (a) 붉은색 650 nm, (b) 녹색 532 nm, (c) 파란색 405 nm 레이저, (d) 수소, (e) 헬륨이다.

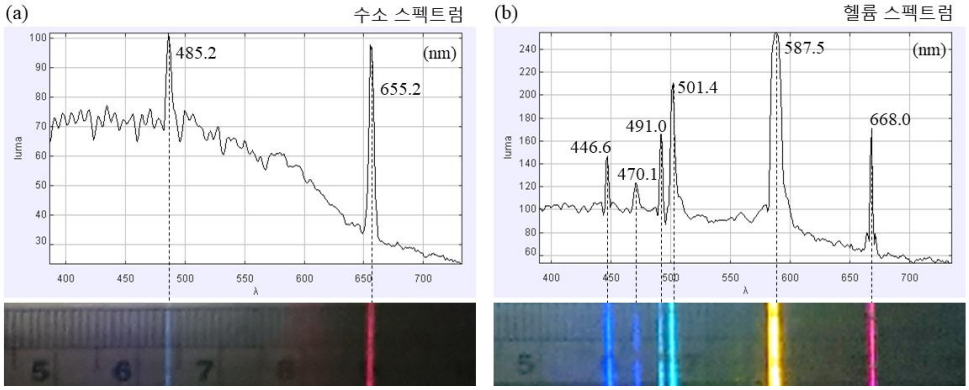


[그림 4-4] 간이 분광기를 통해 본 선 스펙트럼의 배치. 방전관에서 나온 빛이 슬릿과 회절격자를 통과해서 눈 또는 카메라로 들어오면 슬릿 근방에 선 스펙트럼이 보인다.

슬릿과 회절격자를 통과한 빛을 눈으로 보거나 사진으로 찍으면 [그림 4-4]와 같이 슬릿 양쪽으로 스펙트럼이 보인다. 그리고 파장을 λ, 회절격자의 간격을 d, 간섭무늬가 보이는 시야각을 θ, 선 스펙트럼의 상과 회절격자 사이의 거리를 L, 스펙트럼의 중앙과 선이 떨어진 거리를 x라 하면 다음 식이 성립한다.

$$\lambda = d\sin\theta = d\frac{x}{\sqrt{L^2+x^2}} \qquad \text{[식 4-1]}$$

트래커에 [그림 4-3]을 불러온 후에 650 nm 붉은색 레이저의 빛을 기준이 되는 빛으로 사용하였다. 파장을 알고 있는 스펙트럼의 선이 사진의 어느 부분에 위치하는지 알아야 되기 때문이다. 트래커에서 [그림 4-3]의 분광분포를 얻을 수 있는 방법을 [부록 8]에 제시하였다. 그리고 트래커로 얻어낸 분광분포를 [그림 4-5]에 나타내었고, 레이저, 수소, 헬륨의 선 스펙트럼의 파장을 구해서 [표 4-7]에 나타내었다.



[그림 4-5] 트래커로 얻어낸 수소 스펙트럼의 분광분포. (a) 수소의 스펙트럼은 두 개의 선 H_α와 H_β만 촬영되었고, (b) 헬륨의 스펙트럼은 6개의 선이 촬영되었다. 파장의 값은 트래커의 데이터 도구에서 얻어낸 값이고 나노미터(nm) 단위이다. 스펙트럼 사진은 그래프와 비교하기 위해 편집하여 붙인 것이다.

[표 4-7] 레이저, 수소, 헬륨 스펙트럼의 파장을 트래커로 분석한 값

종류	실제 파장 (nm)	트래커로 분석한 파장 (nm)
Red	650	기준으로 사용함
Green	532	532.4
Blue	405	405.1
수소	656.3	655.2
	486.1	485.2
헬륨	667.8	668.0
	587.5	587.5
	501.5	501.4
	492.1	491.0
	471.3	470.1
	447.1	446.6

트래커로 측정한 수소와 헬륨의 선스펙트럼의 파장은 실제 파장과 가깝게 나왔다. 실험결과를 보았을 때에 이렇게 트래커를 이용해서 선 스펙트럼의 파장을 측정해도 분광계 프로그램을 이용하는 것만큼 정확한 값을 알아낼 수 있다.

물리학 실험 교과서의 빛의 스펙트럼 관찰 실험과 본 연구에서 설계한 선 스펙트럼 파장 측정실험의 차이점을 [표 4-8]에 나타내었다. 물리학 실험 교과서의 실험은 스펙트럼의 분광분포와 파장을 자동으로 측정해주는 분광기와 분광계 프로그램을 이용하여 실험한다. 그러나 본 연구에서 개발한 실험은 분광기와 분광계가 자동으로 해주었던 과정을 실험자가 직접 수행하게 한다. 분광계 프로그램을 사용했을 때에 측정값에 계통오차가 있다면 이는 분광계 프로그램의 영점을 조절해주면 해결된다. 반면, 스마트폰과 트래커를 이용해서 파장을 직접 측정했을 때에 계통오차가 발생한다면 그 원인을 실험의 과정 안에서 찾는 활동을 시작할 수 있다.

[표 4-8] 설계한 선스펙트럼 측정실험과 교과서 실험의 차이점

	물리학 실험 교과서	개발한 실험
실험방법	분광기와 분광계 프로그램이 스펙트럼을 자동으로 분석하여 분광분포를 얻어 준 것으로 스펙트럼을 관찰한다.	간이 분광기, 스마트폰 카메라를 이용하여 스펙트럼을 직접 촬영한다. 트래커에 스펙트럼 사진을 분석하는 과정을 거쳐 선스펙트럼의 파장을 측정하고 분광분포 그래프를 얻는다.

4.2.2.2. 범용기기를 이용한 실험

◆ 공기의 유전율 측정실험

범용기기를 이용한 실험으로 공기의 유전율 측정실험을 설계하였다. 물리학 실험 교과서에는 도체판 축전기의 전기용량을 디지털 멀티미터나 LCR 미터와 같이 전기용량을 직접 측정해주는 기기를 사용한 실험이 제시된다. 그러나 전기용량을 직접 측정해주는 장비를 사용하면 어느 단계에서 오차가 발생했는지 알아내기 힘들다. 그러나 RC회로의 시상수를 측정하여 도체판 축전기의 전기용량을 알아내도록 실험을 설계하면 오차의 발견 및 그에 대한 논의가 가능해진다. 오실로스코프는 시상수를 직접 측정해주는 기능이 없으나, 상승시간 측정 기능을 활용하면 시상수를 알아낼 수 있으므로 이를 이용하였다. 도체판 축전기의 넓이와 간격을 알면 공기의 유전율을 계산할 수 있는데, 공기의 유전율은 알려진 값이므로 측정값에 계통오차가 있는지 파악하기 쉽다. 그리고 계통오차가 있다면, 도체판 축전기의 넓이와 간격에 따라서 계통오차의 크기가 변하므로 계통오차를 분석하는 활동을 할 수 있다. 그래서 축전기와 전기용량 측정실험을 공기의 유전율을 측정하는 실험으로 바꾸어서 설계하였다.

공기의 유전율을 측정하기 위해서 가로 0.2 m, 세로 0.3 m인 구리판을 이용하여 간격이 각각 1 mm, 2 mm이고 공기가 유전체인 도체판 축전기를 만들었다. 이렇게 만든 두 축전기의 전기용량은 이론적으로 각각 약 530 pF, 265 pF이다. 이 축전기로 RC회로를 구성하고 오실로스코프의 상승시간 측정 기능을 이용하여 전기용량을 측정하고 공기의 유전율을 계산하였다. 이 과정은 [부록 9]에 제시하였다.

두 종류의 평행판 축전기에 대해 각각 30회씩을 실험하여 구한 전기용량과 공기의 유전율 값을 [표 4-9]에 정리하였다. 신뢰도는 95%로 계산한 것이다. 전기용량이 매우 작아서 상승시간도 아주 작았고 오실로스코프가 상승시간을 측정해내는 데에 한계가 있었기 때문에 불확실도가 크다. 그래서 공기의 유전율 측정값을 소수 둘째자리까지 나타내기는 힘들

었다. 일반적으로 공기의 유전율은 8.85×10^{-12} $C^2/N\cdot m^2$으로 알려져 있는데 실험에서는 이 보다 더 크게 측정되었고, 구리판의 간격이 두 배여도 전기용량의 값이 절반으로 줄어들지 않는 것을 보면 측정값에 계통오차가 포함되어 있다는 것을 알 수 있다.

[표 4-9] 실험으로 측정한 전기용량과 공기의 유전율

구리판 간격 (mm)	이론적 전기용량 (pF)	측정된 전기용량 (pF)	공기의 유전율 ($\times10^{-12}$ $C^2/N\cdot m^2$)
2	265	395 ± 7	13.2 ± 0.2
1	530	640 ± 20	10.7 ± 0.4

물리학 실험 교과서에 제시된 축전기 전기용량 측정실험과의 차이점을 [표 4-10]에 나타내었다. 물리학 실험 교과서의 실험은 디지털 멀티미터나 LCR미터를 이용하여 도체판 축전기의 전기용량을 측정한다. 하지만 전기용량을 직접 측정해주는 장비를 사용하면 전기용량을 측정하는 과정에 적용되는 물리 개념을 학습할 기회를 놓칠 수 있다. 그리고 측정값에 계통오차가 발견되더라도 그 원인을 찾기 힘들다. 그래서 오실로스코프와 RC회로를 이용하여 전기용량을 측정하도록 실험을 구성했다. 이렇게 개발한 공기의 유전율 측정실험은 물리학 실험 교과서의 RC회로 시상수 측정실험과 비슷하다. 하지만 교과서는 오실로스코프의 파형을 이용하여 전압이 최댓값의 절반이 되는 반감기를 결정하라고 기술하고 있어서 불확도가 커질 가능성이 있다. 반면, 본 연구에서는 오실로스코프의 상승시간 측정 기능을 이용하여 시상수를 알아내는 과정을 실험에 포함하였다. 범용기기가 실험에서 측정해야 하는 모든 물리량을 바로 측정해주는 것은 아니므로 범용기기의 기능을 이용해서 원하는 물리량을 측정하는 방법을 자세히 안내해준다면 정밀한 실험값을 얻을 수 있다. 그리고 정밀한 실험결과를 얻었지만 실험결과에 계통오차가 발생했다면 실험설계 안에서 오차의 원인을 분석하는 활동이 가능해진다.

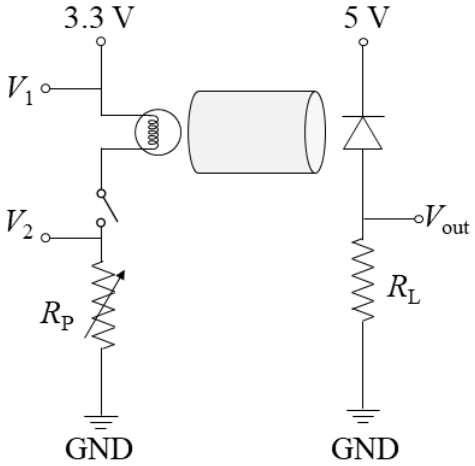
[표 4-10] 설계한 공기의 유전율 측정실험과 교과서 실험의 차이점

	물리학 실험 교과서	개발한 실험
실험방법	디지털 멀티미터, LCR미터를 이용하여 도체판 축전기의 전기용량을 측정한다.	도체판 축전기로 RC회로를 구성하고 오실로스코프의 상승시간 측정기능을 이용하여 시상수를 측정한 후에 전기용량을 계산한다.

4.2.2.3. 오픈소스 하드웨어를 이용한 실험

◆ 플랑크 상수 측정실험

오픈소스 하드웨어를 이용하는 실험으로 플랑크 상수 측정실험을 설계하였다. 물리학 실험 교과서에서는 실험키트인 광전효과 실험장치를 이용하여 플랑크 상수를 측정하는데, 교사 C의 경우 이 실험에서 계통오차가 발생하였고 그 원인을 찾지 못하였다. 본 연구에서는 흑체의 온도를 바꾸어가며 특정 파장의 빛의 세기를 측정해서 플랑크 상수를 얻는 방법을 이용하는 실험을 설계하였다(Rubens & Kurlbaum, 1901). 그 이유는 이 방법을 이용하면 아두이노 보드, 적외선 센서, 전구 등 비교적 구하기 쉬운 재료들을 이용하여 실험을 할 수 있기 때문이고, 이 방법을 이용하여 실험한 Brizuela & Juan(1996)과 Crandall & Delord(1983)의 실험결과에 계통오차가 포함되어 있었기 때문이다.



[그림 4-6] 플랑크 상수 측정 회로도. 아두이노 보드에 회로를 연결하여 측정한다.

온도를 바꿀 수 있는 흑체로는 3V 꼬마전구를, 특정 파장의 빛의 세기를 측정하는 도구로는 적외선 광다이오드(KODENSHI, HPI-6FFR4)를 사용하였다. 그리고 아두이노 보드를 이용하여 [그림 4-6]의 회로를 연결하였다. 아크릴 거울로 원통을 만들고 3D 프린터로 소켓을 만들어 전구의 빛만 광다이오드가 검출할 수 있게 하였다. 플랑크 상수를 측정할 수 있는 원리와 과정은 [부록 10]에 제시하였다.

실험을 20번 반복하여 얻어낸 플랑크 상수는 $(5.2 \pm 0.6)\times10^{-34}$ J·s이었다. Brizuela & Juan(1996)와 Crandall & Delord(1983)도 전구와 광센서를 이용한 방법으로 플랑크 상수를 측정하였는데, 각각 $4.7\sim6.0\times10^{-34}$ J·s와 4.9×10^{-34} J·s로 알려진 값(6.626×10^{-34} J·s)보다 더 작은 값을 얻었다. 이와 같은 방법으로 실험을 하면 실험결과에 계통오차가 포함되어 있는 것이다.

물리학 실험 교과서에 제시된 광전효과 실험장치를 이용한 플랑크 상수 측정실험과의 차이점을 [표 4-11]에 나타내었다. 물리학 실험 교과서에서는 광전효과 실험장치의 사용 순서에 따라서 실험을 하고 플랑크 상수를 얻는데, 이렇게 실험키트를 이용하여 실험하면 교사와 학생은 다이

얼을 돌리고 버튼을 누르는 역할만 하게 된다. 실험장치 안에서 어떤 현상이 일어나서 결과를 보여주게 되는지 알 수 없고 오차가 발생해도 그 원인을 찾을 수 없게 되는 것이다. 그러나 오픈소스 하드웨어를 이용하여 실험수업을 설계하면 고가의 장비를 구입하지 않아도 되고 실험이 어떻게 설계되었는지 교사와 학생이 알 수 있다. 그리고 계통오차가 있을 때에 그 원인을 실험설계 안에서 찾을 수 있게 된다.

[표 4-11] 설계한 플랑크 상수 측정실험과 교과서 실험의 차이점

	물리학 실험 교과서	개발한 실험
실험방법	광전효과 실험장치의 사용 순서를 따라하고 플랑크 상수를 측정한다.	아두이노, 적외선 센서, 전구를 이용하여 실험을 설계하고 측정한 값을 분석하여 플랑크 상수를 알아낸다.

4.3. 계통오차 분석 활동

앞서 물리학 실험 교과서에 단원별로 선정된 실험 주제들을 계통 오차 분석이 가능하도록 다시 설계하고 이를 수행한 결과에 포함된 계통 오차를 확인하였다. 이 절에서는 연구참여자들이 이 네 가지 실험을 수행하고 계통 오차의 원인을 찾아 보정할 수 있는지 알아보고자 하였다.

연구참여자들이 실험을 수행할 때에는 실험방법에 대해 자세히 설명해서 실험의 순서를 따라하면 정밀하고 정확한 실험값이 나올 것처럼 보이게 하였다. 반복측정과 통계처리를 통해 실험결과에 계통오차가 있다는 것을 연구참여자들이 발견한 후에는 계통오차의 원인에 대해 생각해보게 하였다. 네 개의 실험에서 모두 연구참여자들은 계통오차의 원인을 생각하기 어려워했다. 그래서 연구자가 계통오차의 원인을 설명하고 실험값을 보정하여 참값에 근접한 실험결과를 얻는 과정을 보여주었다. 연구참여자들은 계통오차의 원인을 찾아내는 것은 어려워했지만, 연구자가 제시한 계통오차를 보정하는 방법은 쉽게 이해하였다.

이 절에서는 먼저 연구자가 찾아낸 계통오차 보정 방법을 서술하였고, 연구참여자들이 계통오차 분석 활동에서 어떤 반응을 보였는지 제시하였다.

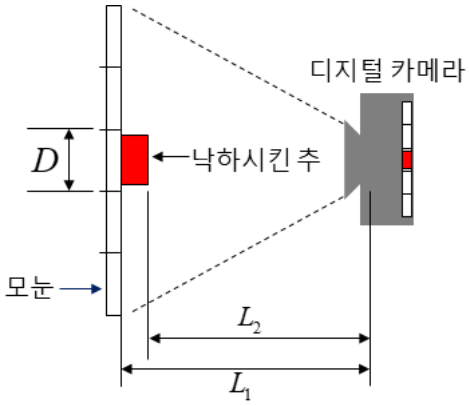
4.3.1. 설계한 실험의 계통오차 보정 방법

스마트 기기, 범용기기, 오픈소스 하드웨어를 이용하여 정밀한 실험값을 얻을 수 있게 실험을 설계하더라도 실험결과에는 계통오차가 포함되어 있었다. 다음은 이 실험들에서 연구자가 찾아낸 계통오차를 보정하는 방법이다.

4.3.1.1. 스마트 기기를 이용한 실험의 계통오차

◆ 중력가속도 측정실험의 계통오차

디지털 카메라로 중력가속도를 측정하는 실험에서는 3차원 공간을 2차원 평면으로 촬영하는 작동 원리가 계통오차의 원인이 될 수 있다. 이를 시차오차라고 하는데 크기가 같은 물체라도 멀리 있는 물체가 더 작게 촬영되므로 오차가 발생하는 것이다. [그림 4-7]에 나타낸 것처럼 3차원 공간에서는 모눈과 낙하하는 추가 한 평면에 없는데 디지털 카메라로 촬영한 화면에는 모두 2차원 평면에 있는 것처럼 보인다. 모눈과 디지털 카메라 사이의 거리는 L_1이고 영상에서 보이는 추의 표면과 디지털 카메라 사이의 거리는 L_2로 서로 다르다. 이것을 고려하지 않으면 트래커의 교정막대자에 모눈의 크기 D를 기준으로 수치를 입력하고, 추를 추적할 때는 모눈과 같은 평면에 있지 않는 추의 표면을 추적하게 된다. 추가 움직인 거리를 실제보다 조금 더 크게 측정하게 되므로 중력가속도가 일관적으로 크게 측정되는 계통오차가 발생한다.



[그림 4-7] 모눈, 추, 카메라의 배치. 교정막대자를 설정하는 모눈의 표면과 위치를 추적하는 추의 표면은 같은 면에 있지 않다.

시차오차에 의한 계통오차를 줄이는 방법은 모눈과 디지털 카메라 사이의 거리를 추의 두께를 무시할 수 있을 정도로 멀리 떨어뜨리는 것이다(Cross, 2002). 하지만 디지털 카메라와 물체 사이의 거리가 멀어지면 영상에서 모눈과 물체가 모두 작게 촬영되어 영상을 분석하기 어려워진다. 다른 방법으로 모눈의 크기 D를 트래커의 교정막대자에 넣지 않고 L_1과 L_2의 비율을 이용해 보정한 값을 교정막대자에 입력하는 방법이 있다. 트래커의 교정막대자에 입력해야 하는 모눈의 크기 D'은 닮음비를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D' = \frac{L_2}{L_1} D \qquad \text{[식 4-2]}$$

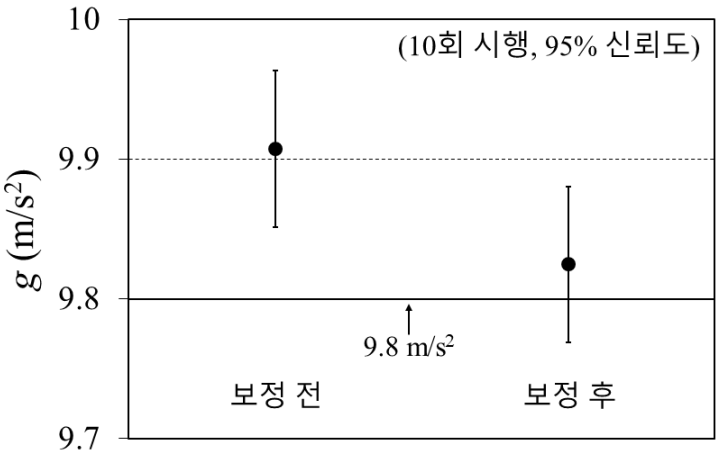
교정막대자에 D'을 입력하지 않고 측정된 중력가속도의 값에 L_2/L_1의 값을 곱해도 결과는 같다. 위 실험에서 L_1은 120 cm이고, 추의 두께는 약 1 cm이므로 L_1은 119 cm이다. L_2/L_1은 약 0.992 이므로 이 비율을 적용해 [표 4-5]에 제시된 중력가속도의 측정값을 보정해서 [표 4-12]에 나타내었다. 표를 보면 계통오차를 보정하기 전에 비해서 알려져 있는

값 9.8 m/s^{2}에 더 근접한 것을 알 수 있다.

[표 4-12] 계통오차를 보정한 중력가속도

실험 번호	보정한 중력가속도 (m/s^2)
1	9.77
2	9.76
3	9.74
4	9.95
5	9.79
6	9.93
7	9.71
8	9.87
9	9.94
10	9.80
평균	9.82 ± 0.06

계통오차를 보정하기 전의 측정값과 보정한 후의 측정값을 [그림 4-8]에 나타내었다. 95% 신뢰구간을 오차막대로 표현했을 때에 계통오차를 보정하기 전에는 신뢰구간이 9.8 m/s^{2}을 포함하지 않았지만, 계통오차를 보정한 후에는 신뢰구간이 9.8 m/s^{2}을 포함한다.

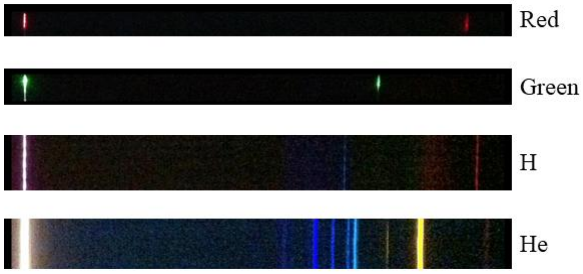


[그림 4-8] 계통오차를 보정하기 전후의 중력가속도 측정값. 계통오차를 보정하면 신뢰구간이 중력가속도의 값인 9.8 m/s^{2}을 포함한다.

◆ 선스펙트럼 파장 측정실험의 계통오차

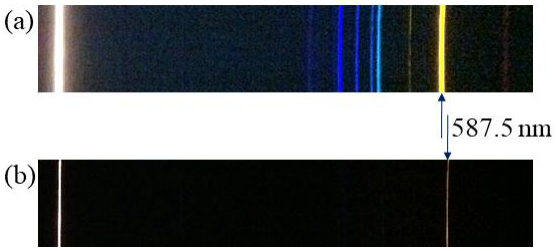
스마트폰 카메라를 이용하여 선스펙트럼의 파장을 측정하는 실험에서는 자동으로 초점을 조절하는 카메라의 작동방식이 계통오차의 원인이 될 수 있다. [그림 4-3]를 보면 수소의 선 스펙트럼은 H_α와 H_β만 사진에 촬영되었는데, 그 이유는 다른 선들은 세기가 약하기 때문이다. 반면에 헬륨의 선 스펙트럼은 여섯 개의 선이 사진에 촬영되었으며 수소의 선 스펙트럼에 비해 밝다. 실험에 사용한 간이 분광기는 조광창이 있어서 분광기 내부에 그려져 있는 눈금과 스펙트럼의 선을 같이 볼 수 있다. 그러나 수소의 선 스펙트럼은 세기가 약해서 조광창을 열고 사진을 촬영하면 스펙트럼의 선이 보이지 않는다. 그래서 수소의 선 스펙트럼을 촬영할 때에는 조광창을 닫았고 사진에는 눈금이 어둡게 보이도록 촬영된 것이다. 이렇게 사진을 찍을 때마다 광원의 세기에 따라서 사진이 어두워지기도 하고 밝아지기도 하는데, 스마트폰 카메라는 초점을 자동으로 조정하면서 사진에서 보이는 스펙트럼을 조금 더 크게 촬영하기도 하고 조금 더 작게 촬영하기도 하면서 계통오차가 발생한다. 그래서 [표 4-7]에서 수소의 선스펙트럼은 알려진 값보다 모두 1 nm 정도 작게 측정된 것으로 보이지만 이것은 실험을 더 해보아야 계통오차인지 아닌지 알 수 있다.

스마트폰 카메라의 자동초점 기능 때문에 계통오차가 발생하는 현상은 조광창이 없는 간이 분광기에서 두드러지게 나타난다. 그 이유는 사진의 밝기가 광원에 의해서 결정되기 때문이다. [그림 4-9]는 조광창이 없는 간이 분광기로 촬영한 스펙트럼 사진인데 슬릿에 들어오는 빛을 보면 레이저와 수소의 스펙트럼에 비해 헬륨 스펙트럼은 훨씬 밝은 것을 볼 수 있다.



[그림 4-9] 조광창이 없는 간이 분광기로 촬영한 스펙트럼

헬륨 스펙트럼은 기준이 되는 레이저의 스펙트럼보다 훨씬 밝기 때문에 헬륨 스펙트럼을 촬영할 때에는 스마트폰 카메라가 자동초점 기능을 이용하여 다른 사진들과는 다르게 초점거리를 형성한다. 이 상태로 레이저를 기준으로 해서 헬륨 스펙트럼의 파장을 구하면 실제 값과 다른 값들이 나온다. [그림 4-10]은 간이 분광기를 헬륨 방전관에 정면으로 갖다 대어 빛을 많이 받은 사진과 비스듬하게 갖다 대어 빛을 적게 받은 사진을 비교한 것인데 세기가 가장 큰 587.5 nm 선의 위치가 서로 다른 것을 볼 수 있다. 광원의 세기에 따라 사진의 확대 축소가 일어나는 것이다.



[그림 4-10] 서로 다르게 촬영된 헬륨 스펙트럼. 헬륨 방전관에 간이 분광기의 슬릿을 (a) 정면으로 갖다 대었을 때이고, (b) 비스듬하게 갖다 대었을 때이다. 슬릿을 통해 들어오는 광량에 따라 사진이 확대 또는 축소된다.

이것을 보정하는 방법은 간이 분광기를 헬륨 방전관에 비스듬하게 갖다 대어 스마트폰 카메라에서 빛을 적게 받는 것이다. 그러면 [그림 4-

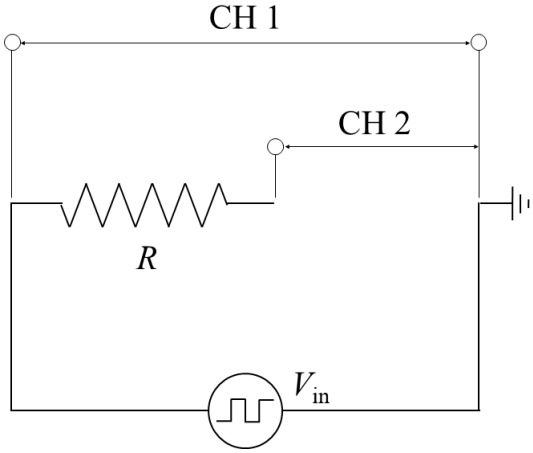
10(b)]처럼 세기가 가장 강한 587.5 nm에 해당하는 빛만 보이고 이 상태에서는 레이저나 수소의 스펙트럼을 촬영했을 때와 같이 초점을 맞추게 된다. 그런 후에 헬륨 스펙트럼의 선이 여러 개 찍힌 [그림 4-10(a)]의 587.5 nm에 해당하는 선을 [그림 4-10(b)]의 587.5 nm 선에 맞추어서 [그림 4-10(a)]의 크기를 조정하고 트래커로 분석하면 계통오차를 보정할 수 있다.

4.3.1.2. 범용기기를 이용한 실험의 계통오차

◆ 공기의 유전율 측정실험의 계통오차

범용기기인 오실로스코프를 이용해서 도체판의 전기용량을 알아내고 공기의 유전율을 계산하는 실험에서 계통오차의 원인은 RC회로와 오실로스코프를 연결한 회로에서 찾을 수 있다. 이상적인 조건이라면 오실로스코프와 RC회로를 연결해주는 케이블은 실험결과에 영향을 주지 않아야 하지만 실제 실험에서는 측정값에 영향을 주기 때문에 계통오차가 발생한다.

실험에 사용하는 실험도구들이 이상적인 조건이라면 [그림 4-11]과 같이 축전기를 분리한 상태에서 오실로스코프로 CH1과 CH2의 신호를 측정하면 두 신호는 함수발생기에서 발생한 사각파 신호와 같아야 한다. 하지만 실제로 [그림 4-11]과 같은 회로를 오실로스코프에 연결하고 신호를 측정해 보면 CH1은 사각파 신호가 측정되지만 CH2는 여전히 축전기가 연결되어 있는 것처럼 RC회로의 신호가 측정된다. 그 이유는 RC회로 내에 도체판 축전기 외에 다른 전기용량이 추가되어 있기 때문이다.



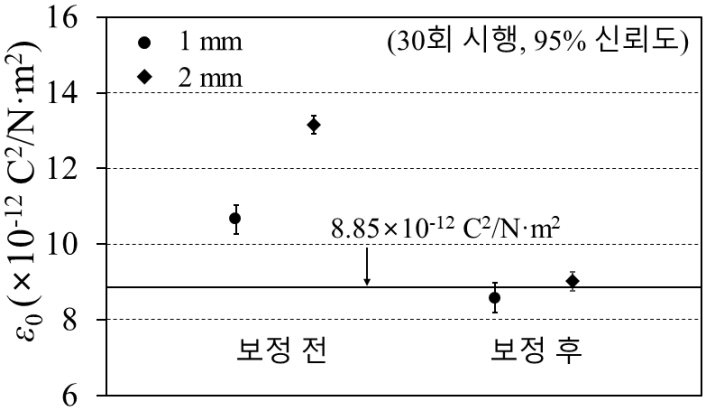
[그림 4-11] 축전기를 제거한 RC 회로

추가된 전기용량의 대부분은 오실로스코프와 RC회로를 연결하기 위해 사용한 실험도구인 동축 케이블의 전기용량이다. 이상적 조건이라고만 생각하면 동축 케이블의 전기용량이나 추가된 다른 전기용량은 매우 작다고 생각하고 무시한다. 하지만 동축 케이블은 1 m당 전기용량이 약 80 pF이며 평행판 축전기에 병렬로 연결된다(Hiscocks & Gaston, 2007; Tektronix, 2014). 그러므로 전기용량이 작은 축전기에 동축 케이블을 연결하면 출력 신호를 왜곡시킬 수 있다(Gamry Instruments, 2018). 따라서 [표 4-9]의 전기용량의 값에서 [그림 4-11]에서 측정한 전기용량의 값을 빼주어야 도체판 축전기만의 전기용량이 계산되고 공기의 유전율도 구할 수 있다. 오실로스코프와 RC회로를 연결함으로써 추가되는 전기용량은 약 124 ± 5 pF으로 측정되었다. 이 값은 동축 케이블의 전기용량과 다른 원인에 의한 전기용량의 값이다. 그리고 이 값은 실험에 사용한 도체판 축전기의 이론적인 전기용량과 비교하면 무시할 수 없을 정도로 큰 값이므로 공기의 유전율 측정에 계통오차로 작용하기에 충분하다. [표 4-9]의 값을 보정한 공기의 유전율을 [표 4-13]에 나타내었다.

[표 4-13] 계통오차를 보정한 전기용량과 공기의 유전율

구리판 간격 (mm)	이론적 전기용량 (pF)	보정 후 전기용량 (pF)	공기의 유전율 ($\times 10^{-12}$ $C^2/N \cdot m^2$)
2	265	270 ± 7	9.0 ± 0.2
1	530	510 ± 20	8.6 ± 0.4

비교를 위해서 계통오차를 보정하기 전후의 공기의 유전율을 [그림 4-12]에 나타내었다. 계통오차를 보정하기 전에는 간격이 2 mm인 축전기로 구한 공기의 유전율이 1 mm인 축전기로 구한 값보다 컸는데, 그 이유는 간격이 2 mm인 축전기의 전기용량이 작기 때문에 계통오차의 영향을 더 많이 받기 때문이다. 계통오차를 보정해주면 각각의 축전기로 구한 공기의 유전율의 값의 차이가 줄어든다.



[그림 4-12] 계통오차를 보정하기 전후의 공기의 유전율 측정값. 간격이 2 mm인 축전기는 전기용량이 더 작기 때문에 간격이 1 mm인 축전기보다 계통오차의 영향을 더 많이 받는다. 계통오차를 보정해주면 각각의 축전기에서 구한 공기의 유전율 측정값의 차이가 줄어든다.

4.3.1.3. 오픈소스 하드웨어를 이용한 실험의 계통오차

◆ 플랑크 상수 측정실험의 계통오차

오픈소스 하드웨어를 이용하여 플랑크 상수를 측정하는 실험에서 계통오차의 원인은 필라멘트의 온도를 계산할 때에 필라멘트의 저항이 아니라 전구의 저항을 저항-온도 식에 대입한 것에 있다. 실험에서는 필라멘트의 저항과 온도의 관계가 $T \propto R^{\gamma}$라 가정하고 [식 4-3]을 이용하여 필라멘트의 온도를 계산하였다.

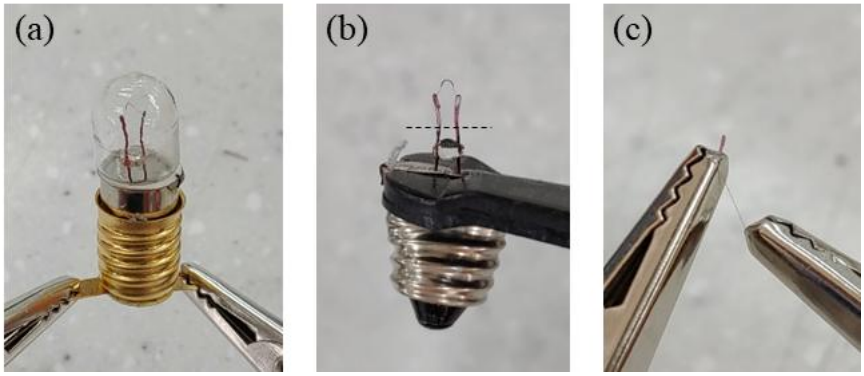
$$T = \left(\frac{R}{R_0}\right)^{\gamma} T_0 \qquad \text{[식 4-3]}$$

하지만 실험에 사용하는 전구가 이상적인 조건이라면 전구의 저항이 필라멘트의 저항과 같아야 하는데, 실제 전구에는 필라멘트 외에 다른 저항 요소들이 있어서 측정값에 영향을 주기 때문에 계통오차가 발생한다.

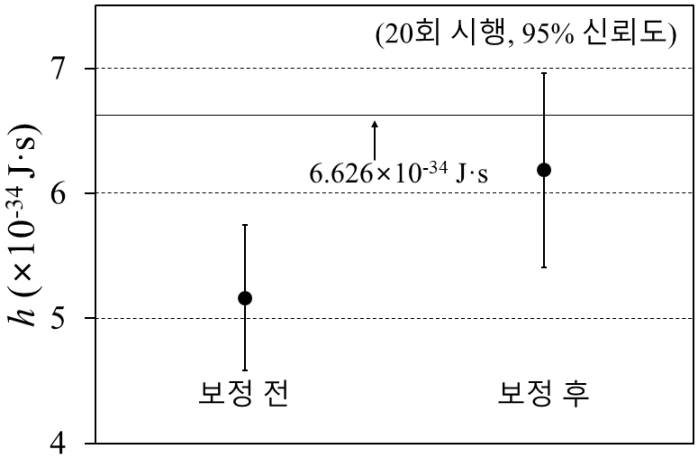
전구와 가변저항을 연결한 회로인 [그림 4-6]에서 전구의 전압 $V_1 - V_2$는 전구소켓을 포함한 양단의 전압이다. 따라서 $(V_1 - V_2)/I$는 필라멘트만의 저항이 아니라 전구소켓의 저항, 텅스텐 필라멘트를 이어주는 다른 금속의 저항, 필라멘트와 다른 금속 사이의 접촉 저항을 모두 합한 값이다. 꼬마전구에 불이 켜지면 텅스텐 필라멘트만 빛을 내고 다른 부분들은 색이 변하지 않는 것을 보면, 불이 켜지더라도 필라멘트의 저항만 크기가 변하고 다른 부분들은 저항이 거의 변하지 않을 것이라 생각할 수 있다. 따라서 상온에서 필라멘트를 제외한 다른 부분의 저항 R_c를 측정해서 [식 4-3]을 다음과 같이 수정하여야 한다.

$$T = \left(\frac{R - R_c}{R_0 - R_c}\right)^{\gamma} T_0 \qquad \text{[식 4-4]}$$

필라멘트를 제외한 다른 부분의 저항 R_c를 측정하는 방법은 상온에서 꼬마전구를 분해하여 필라멘트의 저항만 따로 측정하고 원래의 저항에서 빼는 것이다. [그림 4-13]에서처럼 꼬마전구의 소켓을 포함한 저항을 측정한 후에 전구를 분해하고 필라멘트만 따로 저항을 측정한다. 그리고 꼬마전구의 소켓을 포함한 저항에서 필라멘트만의 저항을 빼면 R_c를 구할 수 있다. 같은 종류의 꼬마전구 12개에서 R_c를 구했을 때에 평균이 약 0.51 ± 0.07 Ω이었다. [식 4-4]를 이용해 필라멘트의 온도를 다시 계산해서 플랑크 상수를 구해보면 $(5.3 \pm 0.6)\times10^{-34}$ J·s에서 $(6.2 \pm 0.8)\times10^{-34}$ J·s으로 알려진 값에 더 가까워진다. 계통오차를 보정하기 전후의 플랑크 상수 측정값을 [그림 4-14]에 나타내었다. 사용한 데이터는 20개이고 95% 신뢰도로 오차막대를 표시했다. 불확실도가 커서 소수 첫째자리까지만 구할 수 있었는데, 실험횟수를 늘리거나 접촉저항 등 다른 오차원인을 제거하면 더 정밀한 실험을 할 수 있을 것으로 보인다.



[그림 4-13] 전구를 깨뜨려 필라멘트의 저항을 측정하는 과정. (a) 전구를 소켓에 끼운 상태에서 멀티미터로 저항을 측정한다. (b) 전구의 유리를 깨서 필라멘트가 드러나게 하고 점선으로 표시한 부분을 절단한다. (c) 필라멘트의 저항만 멀티미터로 측정한다. (a)에서 측정한 저항에서 (c)에서 측정한 값을 빼면 R_c의 값이다.



[그림 4-14] 계통오차를 보정하기 전후의 플랑크 상수 측정값. 계통오차를 보정하면 신뢰구간이 플랑크 상수의 값인 6.626×10^{-34} J·s을 포함한다.

4.3.2. 계통오차 분석 활동에서 교사들의 반응

본 연구에서 설계한 실험에서 나타난 계통오차의 원인을 찾고 보정하는 분석활동을 했을 때에 연구참여자들이 보인 반응은 크게 두 가지이다.

첫째, 값비싼 실험키트 대신 스마트 기기를 사용하더라도 정밀한 실험을 할 수 있음을 새로 알게 되었다. 스마트 기기는 용도의 제한이 없으며 실험에 활용할 수 있는 기능이 있는 기기이다. 연구참여자들은 교구회사의 제품에 의존하지 않고 스마트폰의 카메라와 트래커를 이용해서 광학실험을 교사가 직접 설계할 수 있음을 새로 알게 되었다. 물리학 실험 교과서에 제시된 실험방법은 분광계와 분광계 프로그램을 구입해서 실험을 수행해야 하지만 스마트폰 카메라와 트래커를 이용하면 교구회사의 제품을 사용하지 않아도 정밀한 실험이 가능하다는 것을 알게 된 것이다. 다음은 이에 대한 교사 C의 진술이다.

> 교사 C : 스펙트럼 관찰 실험을 할 때에 스펙트로미터와 같은 제품을 사용하면 될 거라고 생각했었어요. 이번에 같이 한 실험은 스마트폰 카메라를 이용해서 스펙트로미터를 만든 셈이잖아요. 그런 생각은 잘 하지 못하고 있었어요.

둘째, 계통오차의 원인을 설명할 수 있는 이론에 대해서는 알고 있었지만 그 내용이 계통오차의 원인이 될 수 있음을 쉽게 찾아내지 못했다. 중력가속도를 측정하는 실험을 했을 때에 카메라의 시차오차가 계통오차의 원인이 되었다. 카메라의 시차오차는 원근을 이용하여 큰 건물을 손바닥 위에 올려놓은 것처럼 보이는 사진을 찍는 것처럼 일상생활에서도 쉽게 접할 수 있는 사항이다. 그러나 연구참여자들은 이것이 계통오차를 발생시킬 수 있다는 것을 쉽게 떠올리지 못했다. 선 스펙트럼의 파장을 측정하는 실험에서는 카메라의 자동초점 기능이 계통오차의 원인이 될 수 있었는데, 이 기능은 스마트폰으로 사진을 촬영할 때에 접할 수 있음에도 이것이 계통오차의 원인이 될 수 있음을 인지하지 못하였다. 그리

고 플랑크 상수를 측정하는 실험을 할 때에 교사들은 필라멘트 이외의 저항이 실험값에 영향을 주었음을 인지하지 못하였다.

공기의 유전율을 측정하는 실험에서 교사 A는 동축 케이블의 전기용량이 계통오차의 원인이 될 수 있음을 생각하지 못하였다. 그러나 A는 일반물리학에서 RC 회로에 대해서 배웠고, 일반물리학 연습문제(Serway & Jewett, 2006)를 통해 동축 케이블에도 전기용량이 있다는 것을 알고 있었다. 하지만 동축 케이블의 전기용량이 오실로스코프가 측정하는 값에 영향을 줄 수 있다는 사실을 떠올리지 못한 것이다. 교사 A는 이에 대해서 다음과 같이 진술하였다.

> 교사 A : 스펙트럼을 스마트폰 카메라로 찍었을 때에 카메라가 초점을 잡으면서 사진이 확대, 축소되었잖아요. 그런 것은 들어보니 맞는 말인데 말씀을 안 해주셨으면 모를 것 같아요. 그리고 공기 유전율을 측정하는 실험에서도 동축 케이블에 전기용량이 있다는 것을 알고 있는 것과 그것이 실험에 영향을 미칠 수 있다는 것을 알아내는 것은 다른 것 같아요.

이런 내용들을 보았을 때에 계통오차의 원인이 되는 실험도구들에 대한 이론을 알고 있다고 해도, 그 도구들이 실험결과에 어떤 영향을 미칠지 파악하는 것은 힘든 것임을 알 수 있다. 따라서 계통오차가 나타났을 때에 물리적 지식을 동원해서 오차의 원인을 찾고 보정할 수 있다는 것을 인식하게 해주는 활동이 필요할 것으로 보인다.

4.4. 계통오차 분석 활동의 효과

4.4.1. 실험 오차에 대한 인식 변화

교사 A는 실험을 해보지 않아도 실험결과를 예측할 수 있다고 했으며, 학교의 실험수업이 교육적으로 의미 있게 이루어지지 않는 것 같다고 생각했었다. 그러나 계통오차 분석활동을 해본 후에는 계통오차의 원인을 찾는 과정을 교사나 학생들이 경험해본다면 실험수업을 의미 있게 진행할 수 있으며, 실험설계에 대한 이해를 높여 줄 수 있을 것으로 기대하였다. 다음은 이에 대한 교사 A와의 면담 내용이다.

> 교사 A : 단지 실험수업의 목적 자체가 과학법칙이 맞는지 확인해보는 거라면 교육적으로 큰 의미가 없을 것 같아요. 반복측정으로 정밀한 실험값을 얻는 것에 그치지 않고, 실험에서 어떤 부분이 문제가 있나 생각하게 하고, 계통오차의 원인에 대해서 이야기하면 교육적으로 의미 있어요. 이런 활동이 실험설계를 이해하는 데에 도움이 되는 것 같아요.

교사 A는 학교에서의 실험수업은 실험을 수행하는 것과 결과를 확인하는 것에 초점을 두어서 실험수업의 교육적 의미가 크지 않다고 생각하고 있었다. 그런데 계통오차 분석 활동은 실험설계 안에서 계통오차의 원인을 찾도록 만들기 때문에 실험설계에 대한 이해를 향상시킨다는 점에서 교육적 의미가 있다고 하였다. 한유화 등(2014)에 의하면 교사들은 학생들이 실험에 미숙하다는 생각에 실험과정 설명과 실험수행에 실험수업의 시간을 많이 할애한다고 하였다. 그러나 한감봉 등(2012)의 연구에 의하면 학생들은 실험과정을 따라하는 데에 큰 어려움을 겪지 않으며, 오히려 실험이 왜 그렇게 설계되어야 하는지 파악하지 못하는 것으로 나타났다. 그러므로 실험수업은 학생들의 실험설계에 대한 이해에도 중점을 둘 필요가 있는데, 계통오차를 분석하는 활동이 교사 A의 말처럼 실험설계를 이해하게 하는 데에 도움이 될 수 있을 것이다.

그리고 교사 A는 오차에 대해 고려하지 않고 실험을 해보지 않아도 결과를 알 수 있을 거라는 생각했었지만, 이제는 계통오차의 원인이 어떤 이유에서 발생했는지를 구분할 정도로 오차에 대해 인색하게 되었다. 다음은 이에 대한 교사 A와의 면담 내용이다.

교사 A : 디지털 카메라로 중력가속도를 측정하는 실험에서는 측정 장비가 어떤 방식으로 측정을 하는지에 대한 이해가 필요한 것 같아요. 공기의 유전율을 측정하는 실험에서는 측정하려고 하는 대상의 범위가 동축 케이블까지 포함시켜야지만 오차의 원인을 파악할 수 있는 것 같아요. 그러니까 실험도구의 작동 원리에 대해 이해, 그리고 측정 대상의 범위를 어디까지 볼 수 있을 것이냐에 대한 이해, 이렇게 두 가지 유형으로 계통오차가 발생하는 것 같아요.

교사 A는 계통오차 분석 활동을 경험함으로써 오차의 원인을 실험도구에서 찾을 수 있음을 알게 된 것이다. 그리고 그것을 두 가지 유형으로 구분하였는데, 첫째로 실험도구의 작동 원리에 대한 이해가 부족해서 이를 고려하지 않으면 계통오차가 나타날 수 있으며, 둘째로 이상적 조건이라고 생각하는 실험도구들까지 측정의 대상에 포함하지 않으면 계통오차가 나타날 수 있다고 하였다. 그리고 이런 오차의 원인은 실험설계에 대한 이해가 있어야 찾을 수 있다고 하였다.

교사 B는 계통오차의 원인을 찾아 실험값을 보정하는 과정을 보면서, 이론과 실험은 다를 수밖에 없다는 인식과 실험수업에서 오차가 발생하는 것이 당연하기 때문에 이를 보정할 필요가 없다고 여겼던 생각이 바뀌었다고 했다. 그리고 계통오차의 원인을 찾기 위해 다양한 방법을 생각해서 오차를 보정하는 과정이 과학적인 활동이라는 인식을 갖게 되었다. 다음은 이에 대한 교사 B와의 면담내용이다.

교사 B : 실험세팅을 이상적 조건에 맞게 고쳐가면서 정확한 값을 얻는 것을 보고, 이제는 오차의 원인을 하나하나 제거하면서 최대한 정확한 값을 얻기 위해 수행하는 과정이 대단히 과학적인 활동이라는

생각이 들어요. 그리고 그걸 학생들이 한 번 경험하는 게 중요하겠다는 생각이 들어요.

교사 B는 정밀한 실험도구를 사용함으로써 정확한 실험값을 얻을 수 있을 것이라 생각했었고, 이론과 실험이 다를 수밖에 없다고 생각했었다. 그런데 계통오차 분석 활동을 경험한 후에는 실험설계 안에서 오차의 원인을 찾아내고, 그것을 제거할 수 있다는 것을 알게 되었다. 그리고 실험결과가 정확하지 않을 때에는 실험도구를 정밀한 것으로 교체하기 전에 실험설계에서 오차의 원인을 찾아야 한다는 것을 인식하게 되었다. 또한 오차의 원인을 찾으면 그것을 보정할 수 있으며, 그 과정이 과학적인 활동이라 인식하게 되었다. 한감봉 등(2012)에 의하면 교사가 실험에서 오차가 발생하는 것을 당연하게 여기거나 오차의 원인을 학생의 실험 미숙으로 인식한다면, 학생들은 이에 영향을 받아 본인들의 실험 수행 결과를 불신하고 실험결과를 조작하게 된다고 하였다. 그러므로 오차 발생이 당연하고 오차를 고칠 수 없다고 생각하는 교사의 인식은 바꾸어줄 필요가 있는데, 교사 B의 사례처럼 계통오차 분석 활동을 경험해보는 것이 도움이 된다.

교사 C는 값비싼 실험장비를 사용하지 않아도 참값에 가까운 실험값을 얻을 수 있다는 것을 알게 되었다고 했다. 실험수업의 경험이 많은 교사 C는 MBL과 같이 시중에서 판매하는 실험도구를 이용하여 실험수업을 진행했었다. 그런데 계통오차 분석 활동을 통해서 값비싼 실험도구를 사용하지 않아도 정밀한 값을 얻을 수 있고, 교사가 직접 오차를 보정해서 정확한 값을 얻을 수 있다는 것을 알게 되었다고 하였다. 다음은 이에 대한 교사 C와의 면담내용이다.

교사 C : 이번에 같이 실험을 해보면서 카메라와 트래커를 이용하고 계통오차의 원인을 파악해서 제거하면, MBL과 같이 값비싼 실험장비를 사용하지 않아도 참값에 근접한 값을 얻을 수 있다는 것을 알게 되었어요.

정리하면, 연구참여자들은 오차 처리의 중요성을 인식하게 되었고, 계통오차를 보정하기 위해서는 실험설계에 대한 이해가 필요하다는 것을 인식하게 되었다. 그리고 정밀한 실험값을 얻기 위해 값비싼 제품을 이용하지 않아도 정밀한 실험값을 얻을 수 있으며, 계통오차의 원인을 직접 제거해서 참값에 가까운 실험값을 얻을 수 있다는 것을 인식하게 되었다.

4.4.2. 실험 지도에 대한 인식 변화

교사 A는 계통오차 분석활동을 경험함으로써 학생들의 연구실험을 실험설계 단계부터 자세히 지도해야겠다는 생각을 갖게 되었다. 다음은 이에 대한 교사 A와의 면담 내용이다.

> 교사 A : 과제연구를 지도하면서 학생들의 실험을 단순하게만 바라봤었어요. 그런데 이제는 실험 자체에 대해서 더 깊이 이해하려는 태도가 생긴 것 같아요. 실험이 진행될 때에 실험도구들이 어떤 역할을 하고 있는지에 대해 더 관심을 갖게 됐고, 사용하는 게 당연하다고 여겼던 실험도구들도 그 안에서 어떤 역할을 하게 되는지 다시 한 번 돌아보게 되었어요. 그리고 학생들이 과제연구를 계획할 때에 설계단계부터 실험도구들의 여러 요소들을 고려해서 지도할 수 있을 것 같아요.

계통오차 분석 활동을 통해서 실험설계에 대한 이해가 중요하다는 것을 인식한 교사 A는 학생들의 연구를 지도할 때에 실험에 사용하는 실험도구들이 실험결과에 어떤 영향을 미칠지를 고려하면서 실험을 지도해야한다고 인식하게 된 것이다.

교사 B는 계통오차 분석 활동을 통해서 실험값을 얻어내는 과정의 중요성을 인식하고, 학생들이 직접 실험값을 얻어내는 방법을 생각해보게 하는 실험수업을 진행하였다. B는 학생들에게 허상을 관찰하는 방법을 생각하게 만드는 실험수업을 2019년 12월에 진행하였는데 그 내용은 다

음과 같다.

교사 B : 제가 예비실험을 했을 때에 실상은 쉽게 관찰할 수 있었어요. 그런데 허상이나 거울의 상을 어떻게 관찰하는지 교과서에 나와 있지 않아서 당황스러웠어요. 다른 실험안내서들을 따라하다 보니 허상은 볼록렌즈를 이용해야 하고, 거울의 상은 반 스크린을 써야 한다는 것을 알게 되었어요. 그래서 학생들도 실험값을 얻기 어려운 문제를 해결했을 때의 성취감을 느꼈으면 좋겠다는 생각에 허상과 거울의 상을 관찰할 수 있는 방법을 학생들이 생각해보도록 지도했어요.

교사 B는 이전의 실험수업에서 실험값을 쉽게 얻을 수 있는 실험구성을 학생들에게 제공한 후에 결과를 이용하여 물리적 논의를 진행하는 전형적인 확인실험을 진행했었다. 그러나 계통오차 분석 활동을 경험한 후에 진행한 실험수업은 탐색의 대상은 교사가 정해주지만 실험방법은 학생이 고안하게 하는 탐색실험에 해당한다(양일호 등, 2006). 이처럼 계통오차 분석 활동은 실험값을 얻기 위한 실험설계의 중요성을 인식하게 하고, 실험수업의 진행 방식에 변화를 일으킬 수 있다.

교사 B처럼 실험수업을 진행하기 위해서는 예비실험을 통해 학생들은 쉽게 떠올리기 힘든 실험방법을 찾아야 하는데, 이때 교사가 직접 실험을 해보는 실천적 노력이 필요하다. B는 이전에는 본인이 실험수업을 준비하면서 실험값을 얻기 위해 기울였던 실천적 노력들이 허무하다고 생각했었지만, 계통오차 분석 활동을 경험해본 후에는 학생들이 실험값을 얻어내는 방법을 생각하는 경험, 즉, 실험을 설계하는 경험을 해봐야 한다고 생각하게 되었다. 다음은 이에 대한 교사 B와의 면담내용이다.

교사 B : 제가 이전에 그런 노력이 허무하다고 느꼈던 이유는 실험을 과학법칙을 확인하는 수단으로 생각했기 때문인 것 같아요. 과학법칙만 확인하면 되는데 시간을 들여서 불확도를 줄이거나 오차를 제거하는 걸 왜 해야 하는지 허무하다 느꼈던 것 같아요. 그런데 지금은 정밀하고 정확한 실험값을 얻기 위해 다양한 사고를 해야 한다는

걸 알게 됐어요. 이전에는 그 과정이 실험의 목적이 아니어서 불필요하고 허무하다 느꼈는데, 이제는 좋은 실험값을 얻기 위해 어떤 노력을 해야 할지 학생들도 알아야 한다는 방향으로 실험수업의 초점이 바뀌었어요.

교사 B는 이렇게 실험수업이 확인실험으로 진행되더라도 실험의 목적을 과학법칙을 확인하는 것에만 두지 않고, 실험값을 얻기 위해 실험도구를 어떻게 배치하고 사용해야 하는지 학생들이 배울 필요가 있다고 생각하게 되었다. 그리고 그 생각대로 실험수업을 진행했을 때에, 확인실험수업이 탐색실험수업의 형태로 진행될 수 있었다.

교사 C는 실험에서 정확한 값이 측정되지 않을 때에 그 원인을 찾도록 탐구를 해보는 것도 중요한 의의가 있다고 인식하게 되었다. C는 평소에 실험키트나 교구회사에서 제공해주는 실험도구를 이용해서 학생들이 실험값을 쉽게 얻고, 실험결과를 이용하여 학생들과 물리학적인 내용을 논의하는 형식의 실험수업을 해왔다고 하였다. 그런데 계통오차 분석 활동을 경험한 후에는 오차의 원인을 탐색하는 실험수업이 실험데이터를 정확하게 얻는 방법과 오차의 원인에 대해 생각해보게 한다는 점에서 교육적으로 의미가 있다고 하였다. 다음은 이에 대한 교사 C와의 면담내용이다.

교사 C : 스마트폰 카메라와 트래커로 스펙트로미터를 대신하고 그 과정에서 오차의 요인들을 논의 했잖아요. 스펙트럼 관찰 실험을 이런 식으로 해도 의미 있구나 하는 생각을 했어요. 실험의 목적이 실험을 주의 깊게 수행하여 이론값과 근접한 값을 얻어서 과학법칙을 확인하는 것도 의의가 있지만, 이론값에서 벗어난 경우, 그 원인을 찾도록 하는 것도 중요한 의의가 있다고 생각해요.

교사 C는 이전에는 교구회사의 제품을 이용하여 정밀하고 정확한 실험값이 나오도록 실험수업을 진행하고 실험결과에 대한 논의를 진행해왔었다. 그런데 계통오차 분석 활동을 진행한 후에는 실험수업에서 계통

오차가 발생하였을 때에 오차의 원인을 찾아보게 하는 것도 실험수업의 활동이 될 수 있다고 인식하게 된 것이다. 한감봉 등(2012)은 오차의 원인을 실험수업의 중요한 요소로 활용할 때에 실험결과의 과학적 의미를 학생들에게 전달해줄 수 있다고 하였는데, 계통오차 분석 활동은 이런 면에서 실험수업의 중요한 요소가 될 수 있다.

정리하면, 계통오차 분석 활동은 교사들에게 실험설계의 중요성, 실험값을 얻어내는 과정에 대한 이해의 중요성을 인식하게 해주고 확인실험을 탐색실험처럼 진행할 수 있도록 실험 지도에 대한 교사들의 인식을 변화시켜주었다. 그리고 학생들이 오차의 원인을 찾아내고 정확한 값을 얻어내는 방법을 생각해보게 하는 것도 교육적 의의가 있다는 인식을 갖게 해주었다.

4.4.3. 계통오차 분석 활동 경험의 필요성

계통오차 분석 활동을 경험한 연구참여자들은 계통오차를 보정해서 참값에 가까운 실험값을 얻어내는 과정을 교사들이 경험해볼 필요가 있다고 말하였다. 그 이유는 계통오차를 찾아내고 보정하는 과정이 중요한 과학적 활동이지만 이것을 쉽게 배울 수 있는 것은 아니기 때문이다(Ravetz, 1971; Barlow, 2002). 그래서 연구참여자들은 계통오차에 대해 이론적으로 배우는 것보다 계통오차 분석 활동을 경험해보는 것이 계통오차를 보정하는 것의 중요성을 깨달을 수 있게 해줄 것이라고 하였다. 다음은 이에 대한 교사 A, B 와의 면담 내용이다.

교사 A : 계통오차의 원인을 찾아내는 게 생각하기 쉽지 않을 것 같아요. 계통오차를 분석하는 경험을 해보면 다른 실험에서도 전혀 생각하지 못했던 오차의 원인을 찾아내는 감각이 키워질 것 같다는 생각은 들어요.

교사 B : 실험설계 안에서 계통오차의 원인을 찾는 것은 열심히 공부한다고 해서 알 수 있는 것은 아닌 것 같아요. 특정 주제로 계통오차의

원인을 찾아보는 탐구를 해보는 것 외에는 계통오차를 찾아내는 것을 교육시킬 수 있는 방법은 없을 것 같거든요.

교사 A, B는 계통오차 분석활동을 경험해본 후에도 여전히 계통오차의 원인을 찾아내는 것은 어려운 일로 인식하고 있었다. 그리고 계통오차를 보정하는 방법은 이론적으로 배울 수 있는 것은 아니고 계통오차 분석 활동의 경험을 통해 알아갈 수 있는 것이라고 하였다. 그 이유는 본 연구에서 설계한 실험에 포함되어 있던 계통오차는 어렵지 않은 물리학적 지식을 이용해서 보정할 수 있음에도 불구하고, 연구참여자들은 계통오차의 원인을 쉽게 떠올릴 수 없었기 때문이다. 그래서 교사 A, B는 계통오차 분석 활동을 교사들이 경험해 보아야 오차 보정의 중요성과 실험설계에 대한 이해의 중요성을 깨우칠 수 있을 거라고 인식한 것이다.

실험수업에 대한 경험이 많은 교사 C도 교사들이 계통오차에 대한 다양한 사례를 경험해볼 필요가 있다고 하였다. C는 중력가속도 측정 실험에서 알려진 값보다 더 크게 실험값이 나오게 되는 계통오차는 본 연구에 참여함으로써 알게 되었다고 했다. 그리고 이렇게 계통오차의 사례를 교사들이 많이 알고 있다면 오차의 원인에 대해서 더 폭넓게 지도할 수 있게 될 것이라고 하였다. 다음은 이에 대한 교사 C와의 면담내용이다.

교사 C: 시간기록계로 중력가속도 측정실험을 하면 보통 알려진 값 9.8 m/s^2보다 작게 나오는데, 공기저항이나 마찰 때문이라고 생각은 되지만 알려진 값에 가깝게 측정할 수 있는 방법을 찾을 수 없어 고민하고 있었어요. 그런데 카메라를 이용해서 중력가속도를 측정하는 경우에 9.8 m/s^2에 근접하기는 하지만 이보다 큰 수치가 나오는 것은 처음 알게 된 거예요. 이거라면 학생들에게 공기저항이나 마찰이 오차의 원인은 아니라는 것을 알려줄 수 있겠다고 생각했어요. 그러면서 오차의 원인을 공기저항이나 마찰 때문이라고 막연하게 생각하던 대신에 계통오차의 원인을 분명히 알게 된 상태에서 학생들에게 오차의 원인을 알려줄 수 있게 되었어요. 교사가 학교에서 이루어지는 실험들에 대해서 다양한 계통오차 원인을 파악하고 있으면, 확인실험, 탐구실험 등 실험수업을 계획하는 데에 많은 도움이 되고

오차의 원인에 대해서 폭넓게 지도하는 것이 가능하게 될 것 같아요.

교사 C처럼 실험수업의 경험이 많은 교사도 계통오차가 나타나는 원인을 모두 알아내기는 어렵다. 따라서 학교의 물리실험에서 나타날 수 있는 계통오차의 원인들을 찾아내고 이를 교사들에게 알려줄 필요가 있다. 그러나 계통오차의 원인을 모두 찾아내어 알려주는 것은 불가능하다. 반면, 실험결과에 계통오차가 있을 경우에 그 원인을 실험 안에서 찾아낼 수 있다는 것을 인식하게 해주는 것은 가능하다. 이것은 교사 A, B의 진술처럼 계통오차 분석 활동을 경험해 봄으로써 가능할 것이다. 그러므로 교사들을 대상으로 계통오차를 찾아내고 보정하는 것을 경험할 수 있게 해주는 실험교육 자료가 필요할 것으로 보인다.

4.4.4. 정리

계통오차 분석 활동을 통하여 연구참여자들은 실험 오차에 대한 인식과 실험 지도에 대한 인식에 변화가 나타났다. 그리고 교사들이 계통오차 분석 활동을 경험해 볼 필요가 있음을 말하였다.

교사 A는 학교의 실험수업이 교육적으로 의미 있게 이루어지지 않는다고 생각했고, 오차에 대해 고려하지 않은 채로 실험을 해보지 않아도 결과를 예측할 수 있다고 했었다. 하지만 계통오차 분석 활동을 경험한 후에는 실험설계 단계에서 미처 고려하지 못한 내용이 오차의 원인으로 작용할 수 있다는 것을 알게 되고, 실험설계의 중요성을 인식하게 되었다. 그리고 학생들의 연구활동을 지도할 때에 실험설계 단계부터 실험도구와 관련된 요소들을 고려하여 지도해야 함을 인식하게 되었다.

교사 B는 이론과 실험이 일치할 수 없다고 인식하고 있었지만 계통오차 분석 활동을 통해 실험값을 참값에 가깝게 얻어낼 수 있다는 것을 알게 되었다. 그리고 실험값을 얻어내는 방법을 생각해보는 것도 실험수업의 주요 목표가 될 수 있음을 인식하고, 학생들이 실험값을 얻어내는 방법을 스스로 고안해 보게 하는 실험수업을 진행하였다.

교사 C는 계통오차 분석 활동을 경험한 후에 값비싼 장비를 사용하지 않아도 정밀한 실험을 할 수 있으며, 오차의 원인을 직접 제거하여 참값에 가까운 값을 얻을 수 있다는 것을 알게 되었다. 그리고 실험값이 이론값에서 벗어난 경우에 오차의 원인을 찾아보고 처리하는 활동이 실험수업에서 의미 있는 활동이 될 수 있으며, 물리실험에서 발생할 수 있는 계통오차의 다양한 사례를 교사들이 알고 있다면 실험을 지도하는 데에 도움이 될 것이라고 하였다.

이러한 연구참여자들의 변화 내용을 표 [4-14]에 정리하였다.

[표 4-14] 계통오차 분석활동을 경험한 후 연구참여자들의 인식 변화

연구참여자	인식 변화
교사 A	• 계통오차 분석 활동이 실험설계에 대한 이해를 높인다. • 오차에 대해 고려하게 되었고, 계통오차 원인의 유형을 실험도구와 관련하여 구분할 수 있다. • 학생들의 연구활동을 지도할 때에 실험도구와 관련된 여러 요소들을 고려하게 되었다.
교사 B	• 정확한 값을 얻기 위해서는 실험 안에서 계통오차의 원인을 찾아내야 한다는 것을 알게 되었다. • 계통오차 분석이 과학적인 활동이라는 것을 인식하게 되었다. • 실험방법에 대해 학생들이 고안해보게 하는 실험수업을 진행하게 되었다.
교사 C	• 값비싼 제품을 구입하지 않더라도 정밀하고 정확한 실험값을 얻을 수 있다는 것을 인식하게 되었다. • 계통오차의 원인을 찾고 제거하는 과정도 실험수업에서 의미 있는 활동이 될 수 있다. • 계통오차의 다양한 사례를 교사들이 알고 있으면 실험수업에서 오차에 대해 폭넓게 지도할 수 있다.

마지막으로 연구참여자들은 계통오차 분석활동을 교사들이 경험해볼 필요가 있다고 강조하였다. 계통오차 분석활동을 경험해본 후에도 연구참여자들은 계통오차의 원인을 찾아내는 것이 여전히 어려운 일이라고 생각하였고, 학습을 통해서 그 방법을 깨닫기는 어려울 것이라고 하였다. 그 이유는 물리실험에서 발생하는 계통오차의 원인이 어려운 이론과 관

련된 것은 아니지만, 계통오차의 원인을 쉽게 떠올릴 수 없었기 때문이다. 그래서 계통오차 분석 활동을 경험해보아야 실험설계에서 고려하지 못한 요소들 때문에 오차가 발생할 수 있음을 인식할 수 있을 것이라 하였다.

계통오차 분석활동을 교사들이 경험해볼 필요가 있다면 본 연구에서 설계한 실험을 교사들을 대상으로 하는 실험교육 자료로 활용할 수 있는 방안을 마련해야 할 것이다. 다음 절에서는 물리실험에서 계통오차가 발생했을 때에 이를 찾아내고 보정하는 과정을 순서도로 제시하고, 계통오차 분석 활동을 교사들이 경험할 수 있는 실험연수 모형을 제안하였다.

4.5. 계통오차 분석 활동 실험연수 모형

본 연구에서 연구참여자들은 계통오차 분석 활동을 교사들이 경험해볼 필요가 있으며, 계통오차의 다양한 사례를 교사들이 알고 있을 필요가 있다고 하였다. 그래서 이를 위한 교사 대상 실험연수 모형을 제시하고자 한다. 먼저, 물리실험에서 나타나는 계통오차를 어떻게 분석할 수 있는지 제시하고, 이를 이용하여 실험연수 모형을 제시하였다.

4.5.1. 물리실험에서 계통오차 분석 과정

4.5.1.1. 물리실험에서 발생할 수 있는 계통오차의 유형

실험결과에 계통오차가 있고 그 원인을 찾을 수 있다면 오차를 보정할 수 있지만 계통오차의 원인을 찾는 것은 어려운 일이다(박승호 등, 2018; Barlow, 2002; Bevington & Robinson, 2003; Taylor, 1997). 과학자의 실험에서는 실험결과에 나타난 오차가 계통오차인지부터 알아내야 하는데, Barlow(2002)에 의하면 이를 알아내기 위해서는 여러 방법을 동원해야 하며 끝내 알아내지 못할 수도 있다. 그러나 학교의 물리실험수업은 대부분 확인실험으로, 실험결과와 과학법칙을 비교하기 때문에 반복측정과 통계처리를 거치면 실험결과에 계통오차가 있는지 판단할 수 있다. 그러므로 실험결과에 계통오차가 나타났을 때에 계통오차의 유형과 구체적인 예시를 교사들이 알고 있다면 오차의 원인을 알아내는 데에 도움이 될 것이다.

계통오차의 원인으로 보통 장비의 영점 문제나 실험자의 실수로 인해 오차의 원인을 고려하지 못한 것으로 설명한다(박승호 등, 2018; Barlow, 2002; Bevington & Robinson, 2003; Taylor, 1997). 학교에서 사용하는 실험도구들은 대부분 학교의 실험에 맞게 제작된 기기들임을 감안했을 때에 장비의 영점 문제는 쉽게 해결할 수 있는 오차의 원인이다. 그러나

본 연구의 계통오차 분석 활동에서 물리 교사들이 계통오차의 원인을 쉽게 떠올리지 못한 것을 보았을 때에 실험설계 단계에서 오차의 원인을 고려하지 못해서 발생한 계통오차는 그 원인을 알아내기 힘들다. 그런데 오차의 원인을 실험자의 실수로만 여기고 넘어갈 경우에 실험수업의 부정적 효과가 나타날 수 있음이 여러 연구에서 보고되었다(한감봉 등, 2012; 한유화 등, 2014; 강영창, 2013). 따라서 학교의 계통오차의 원인을 실험자의 실수로 여기지 않고 실험 안에서 오차의 원인을 찾을 수 있도록 하는 방안이 필요하다.

본 연구에서는 계통오차 분석 활동이 가능한 물리실험 4개를 설계하였는데, 각각의 실험에는 실험결과가 참값으로부터 편향되게 측정되게 하는 계통오차가 발생했다. 그리고 계통오차의 원인을 실험도구로부터 찾아낼 수 있었고, 오차를 보정할 수 있었다. 그래서 먼저 본 연구에서 설계한 실험에서 나타난 계통오차의 원인을 실험도구와 관련지어 분류하였다.

스마트 기기, 범용기기, 오픈소스 하드웨어를 이용하여 물리실험을 설계했을 때에 실험도구에 의해서 발생할 수 있는 계통오차의 종류를 [표 4-15]에 정리하였다. 계통오차의 종류를 살펴보면 사용하는 실험도구에 따라서 나타나는 계통오차의 유형이 다른 것을 볼 수 있다. 스마트 기기를 실험에 사용할 때에는 실험도구의 작동 원리를 고려하지 않았을 때에 계통오차가 발생한다. 그리고 범용기기와 오픈소스 하드웨어를 실험에 사용할 때에는 실험환경이 불완전함에도 이를 고려하지 않으면서 계통오차가 발생하게 된다.

스마트 기기를 사용한 중력가속도 측정실험에서는 같은 크기의 물체라도 거리에 따라서 다른 크기로 촬영하는 카메라의 작동 원리를 고려하지 않은 것이 계통오차의 원인이었으며, 선 스펙트럼 파장 측정실험에서는 스마트폰 카메라의 자동초점 기능을 고려하지 않으면 계통오차가 나타날 수 있었다.

범용기기를 사용한 공기의 유전율 측정실험에서 동축 케이블의 전기용량을 고려하지 않은 것이 계통오차의 원인이었다. 이상적인 상황이라면

동축 케이블의 전기용량은 없는 것으로 간주해야 하지만 실험에 사용한 도체판 축전기의 전기용량이 매우 작기 때문에 동축 케이블의 전기용량이 측정결과에 포함되어 계통오차의 원인이 되었다. 오픈소스 하드웨어를 사용한 플랑크 상수 측정실험에서는 실험에 사용한 꼬마전구의 필라멘트만의 저항을 측정해야 하는데, 필라멘트 외의 저항도 측정하게 되어 계통오차가 나타났다. 즉, 이상적이어야 할 상황이지만 실제로는 실험환경이 불완전하고 이를 고려하지 못해서 계통오차가 발생한 것이다.

[표 4-15] 설계한 실험의 계통오차의 원인과 사용한 실험도구

계통오차의 원인	사용한 실험도구	실험 예시
실험도구의 작동 원리	스마트 기기	중력가속도
		선스펙트럼 파장
불완전한 실험환경	범용기기	공기의 유전율
	오픈소스 하드웨어	플랑크 상수

[표 4-15]에 나타낸 계통오차의 원인을 물리학 실험 교과서에 제시된 실험에도 적용할 수 있다. [표 4-2]에는 물리학 실험 교과서의 실험에서 사용하는 실험도구의 종류를 분류했었는데, 기본 도구, 조건 통제용 실험도구, 단순 측정도구를 [표 4-15]에 추가한다면 물리학 실험 교과서에서 제시한 실험에서 계통오차가 나타났을 때 그 원인을 실험도구와 관련지어 분류할 수 있다. 이를 [표 4-16]에 나타내었다. 특정 실험만을 위한 실험키트는 오차가 있을 경우에 그 원인을 파악하기 힘들기 때문에 제외하였고, 분석에 쓰이는 소프트웨어들은 실험에 사용하는 실험도구들에 따라서 선택되므로 제외하였다.

[표 4-16] 물리학 실험 교과서의 실험도구와 관련된 계통오차의 원인

구분	종류	계통오차의 원인
변인 통제	기본 도구	• 불완전한 실험환경
	조건 통제용 실험도구	
측정	단순 측정도구	• 영점 조정 문제 • 불완전한 실험환경
	범용기기	
	오픈소스 하드웨어	
	스마트 기기	• 실험도구의 작동 원리

변인통제를 위해서 사용하는 실험도구인 기본 도구와 조건 통제용 실험도구는 자연현상의 여러 조건을 실험에서 구현해주는 역할을 하는데, 이들이 특정 조건을 구현해주면서 다른 조건을 불완전하게 만들면 계통오차가 발생할 수 있다. 그 예로, 시간기록계는 일정한 시간 간격으로 종이테이프에 타점을 기록해주지만 종이테이프에 작용하는 마찰은 계통오차의 원인이 된다.

측정에 사용하는 단순 측정도구와 범용기기는 기본적으로 영점 조정 문제가 계통오차의 원인이 된다. 만약, 영점이 제대로 맞추어져 있다면 이상적 조건이라 여기고 사용했던 실험도구들이 사실은 불완전한 조건이어서 계통오차가 나타날 수 있다.

4.5.1.2. 계통오차 분석 순서도

물리실험에서 정확한 값이 측정되지 않았을 때에 계통오차의 원인을 실험도구와 관련지어 구분하였다([표 4-16]). 이 절에서는 물리실험의 결과에 계통오차가 있을 때에 [표 4-16]의 구분을 이용하여 오차의 원인을 찾아내는 방법을 제시하고자 한다.

물리실험수업에서는 보통 측정값을 얻은 후에 결과에 대해 물리학적으로 논의하는 실험수업을 진행한다. 그리고 참값을 알고 있는 확인실험이 진행되는 경우가 많다. [그림 2-2]에서 보듯이 2015 개정 교육과정의 물리학 실험 교과서는 실험수업의 순서를 문제인식, 실험 설계와 수행, 실험 결과와 논의, 소통과 평가, 생각 넓히기로 제시하고 있는데(박승호 등, 2018), 계통오차를 찾고 보정하는 과정은 실험 결과와 논의에 들어갈 수 있다. 실험 결과와 논의는 실험 자료 수집과 분석, 결론 도출과 논의로 다시 나뉜다. 실험데이터에 계통오차가 포함되어 있다면 결론을 도출하기 전에 이를 보정해줘야 하므로 실험 자료 수집과 분석 단계 이후에 계통오차를 찾아내고 보정하는 과정을 포함시키고, 계통오차가 보정이 되면 결론 도출과 논의 단계를 진행하면 알맞을 것이다.

계통오차를 찾아내고 실험데이터를 보정하는 과정을 [그림 4-15]에 나타내었다. 물리학 실험 교과서에 제시하는 실험들은 대부분 참값을 알고 있는 확인실험이므로 측정값의 신뢰구간이 참값을 포함하게 될 때에 계통오차가 보정된 것으로 보았고, 그 이후에 다음 단계인 결론 도출과 논의를 진행할 수 있는 것으로 보았다.

계통오차를 찾는 과정은 세 단계를 거치게 되는데, 그것은 계통오차 드러내기, 오차의 원인 찾기, 오차의 원인 확인이다.

◆ 1단계 : 계통오차 드러내기

계통오차 드러내기 단계는 실험을 반복적으로 수행하여 측정값을 얻고 통계 처리를 통해 신뢰구간을 얻는 것이다. 만약, 신뢰구간이 참값을 포

함한다면 결론 도출과 논의 과정을 진행하면 된다. 그러나 계통오차가 있는 것이 드러나게 된다면 오차의 원인 찾기 단계로 넘어간다.

◆ 2단계 : 오차의 원인 찾기

오차의 원인 찾기 단계는 [표 4-16]의 구분을 이용한다. 이 구분은 사용하는 도구에 의해서 결정되었으므로 오차의 원인 찾기 단계는 실험에 사용하는 도구가 무엇인지 파악하는 것부터 시작된다. 사용한 도구에 따라 오차의 원인을 찾는 순서를 [표 4-17]에 나타내었다.

[표 4-17] 사용한 도구에 따른 오차의 원인 찾기

<table>
<tr><th>단계</th><th colspan="2">사용한 실험도구</th><th>오차의 원인 찾기 순서</th></tr>
<tr><td rowspan="6">오차의
원인
찾기</td><td rowspan="2">변인
통제</td><td>기본 도구</td><td rowspan="2">1) 일정 조건을 유지시켜 주는 대신에
불완전한 조건이 되는 곳 찾기
2) 예시
• 시간기록계는 일정한 시간 간격으로
타점을 기록하는 대신 마찰이 작용
• 줄 진동기는 일정한 진동을 가하는 대신
줄의 한쪽 끝이 마디가 되지 않음</td></tr>
<tr><td>조건 통제용
실험도구</td></tr>
<tr><td rowspan="4">측정</td><td>단순
측정도구</td><td rowspan="3">1) 영점이 조정되어 있는지 확인하기
2) 이상적 조건이라 생각하고 사용한 실험도구 찾기
3) 찾는 방법 예시
• 실험설계 살펴보기
• 조작변인을 바꿔 다시 실험해보기</td></tr>
<tr><td>범용기기</td></tr>
<tr><td>오픈소스
하드웨어</td></tr>
<tr><td>스마트 기기</td><td>1) 스마트 기기의 작동원리를 확인하여
오차의 원인이 될 만한 요인 찾기
2) 찾는 방법 예시
• 관련된 실험 문헌조사
• 스마트 기기의 매뉴얼 확인</td></tr>
</table>

기본 도구나 조건 통제용 실험도구들을 실험에 사용하는 경우에, 기기의 고장이 아니라면, 이 도구들이 불완전한 실험환경을 제공할 때 계통오차가 발생할 수 있다. 예를 들어, 시간기록계는 일정한 시간 간격으로 타점을 종이테이프에 찍어주는 대신에 마찰이 작용하고, 줄 진동기는 줄

을 일정한 진동수로 진동시키는 대신에 줄의 한 쪽 끝을 마디로 만들어 주지 못한다. 이와 같이 조건을 통제하기 위한 도구들이 특정 조건을 만들어주면서 실험의 다른 부분에서 불완전한 실험환경을 제공하면 계통오차가 발생할 수 있다.

단순 측정도구, 범용기기, 오픈소스 하드웨어를 사용했다면 측정기기의 영점이 맞았는지 확인해야 한다. 오차의 원인이 영점 조정 문제라면 보정값이나 보정인자를 구해서 데이터를 보정한다. 여기서 보정값은 계통오차를 보정하기 위해 측정값에 더해야 하는 값이고, 보정인자는 측정값에 곱해야 하는 값이다. 영점 조정 문제가 아니라면 범용기기나 오픈소스 하드웨어 외의 실험도구들 중에서 이상적인 조건이라고 생각하고 사용한 실험도구를 찾아야 한다. 이것을 찾는 것은 매우 어려운 일이고 시간을 들여야 하는 일이지만 본래의 실험에서 설정했던 조작변인과 다른 새로운 조작 변인을 찾아서 다시 실험을 해보거나 데이터를 처리해보면 오차의 원인을 찾을 수 있는 가능성이 있다(Barlow, 2002).

스마트 기기를 사용하여 실험을 하였다면 기기의 작동 원리 중에서 오차의 원인이 될 수 있는 요인을 찾아야 한다. 그 방법으로는 비슷한 기기를 사용한 실험을 참고하기, 기기의 매뉴얼 확인하기 등이 있다. 스마트 기기의 작동 원리를 충분히 고려했음에도 계통오차가 보정되지 않는다면 스마트 기기 외에 실험에서 사용한 다른 실험도구들 중에서 계통오차의 원인을 찾아야 한다.

◆ 3단계 : 오차의 원인 확인

오차의 원인 확인 단계는 원인 찾기 단계에서 알아낸 오차의 원인이 정말로 오차의 원인으로 작용했는지 실험으로 확인하는 단계이다. 이 단계를 진행해야 오차의 원인을 제거하고 참값에 근접한 실험값을 얻을 수 있다.

생각해낸 오차의 원인이 정말로 계통오차를 만들어냈는지 확인하기 위해서는 생각해낸 원인과 관련된 변수를 바꾸어가며 실험을 해보아야 한

다. 예를 들어, 공기의 유전율 측정실험에서 도체판 축전기의 간격을 바꾸어가며 공기의 유전율을 측정하면 간격이 클 때에 계통오차가 더 크게 나타난다. 그렇다면 도체판 축전기 외에도 다른 전기용량이 추가적으로 더 측정되고 있음을 알 수 있다.

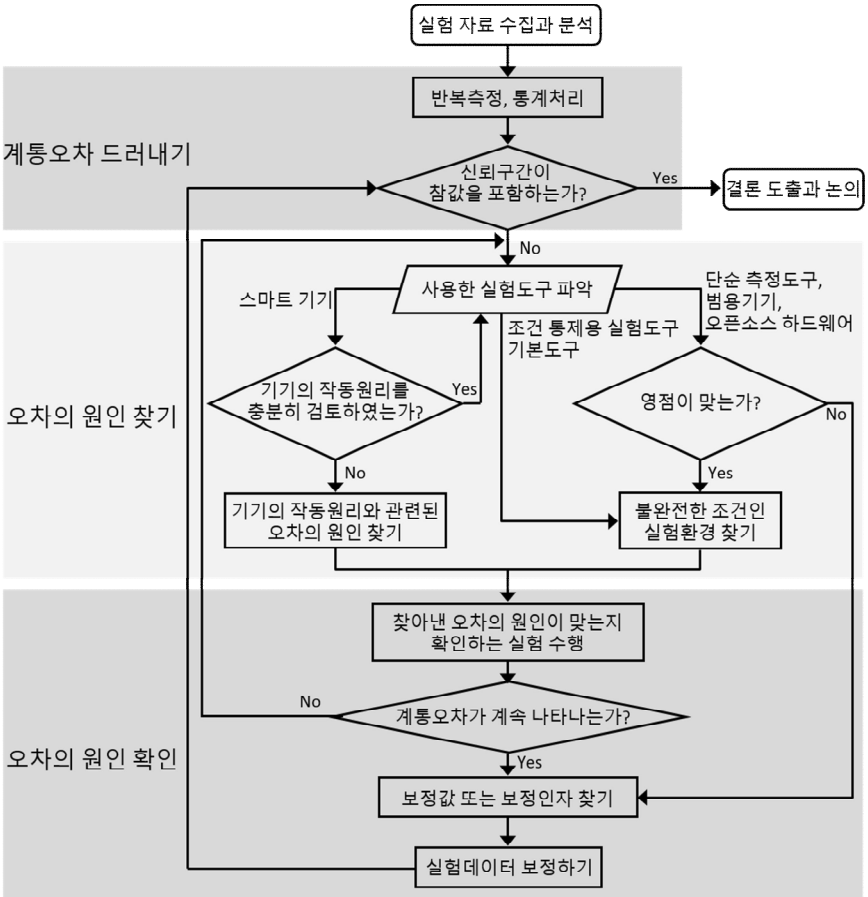
찾아낸 오차의 원인과 관련된 변인을 조작변인으로 다시 실험을 수행했을 때에 계속해서 계통오차가 나타나거나, 측정값의 변화가 나타난다면 계통오차의 원인을 찾은 것이라 할 수 있다. 만약 그렇지 않다면 오차의 원인 찾기 단계로 돌아가야 한다. 오차의 원인을 확인했다면 보정값이나 보정인자를 얻은 후에 실험데이터를 보정한다. 그리고 계통오차를 보정한 측정값의 신뢰구간이 참값을 포함하는지 확인한다. 계통오차가 보정되었다면 결론 도출과 논의 과정을 진행하면 되지만 그렇지 않다면 다시 오차의 원인 찾기 단계를 진행한다.

이러한 오차의 원인 확인 단계를 [표 4-18]에 나타내었다.

[표 4-18] 오차의 원인 확인 단계

단계		순서
오차의 원인 확인	오차의 원인이 맞는지 확인하는 실험	1) 오차의 원인과 관련된 변수를 바꾸어가며 실험하기 2) 계통오차가 계속 나타나는지 확인하기
	보정값이나 보정인자 찾기	3) 오차를 보정할 수 있는 보정값이나 보정인자 찾기
	실험데이터 보정	4) 측정값에 보정값을 더하거나 보정인자를 곱하여 데이터 보정하기

만약, 실험에 다양한 종류의 실험도구가 사용되었다면, 각각의 실험도구에 해당하는 과정을 따라서 도구별로 계통오차를 일으켰을 가능성을 찾아나가야 한다.



[그림 4-15] 참값을 알고 있는 물리실험에서 계통오차 분석 순서도

[그림 4-15]의 계통오차를 찾아가는 과정은 참값을 알고 있는 물리실험에서 실험결과에 계통오차가 포함되어 있을 때에 오차의 원인을 찾는 과정의 예시이다. 이 과정에는 실험도구의 작동 원리를 고려하지 않거나 실험환경이 불완전할 때에 발생하는 계통오차의 예시만 나타나 있다. 그러므로 이 과정으로 모든 종류의 계통오차를 찾을 수 있는 것은 아니다. 그리고 이 과정을 따라한다고 해서 주어진 실험수업 시간 안에 계통오차를 찾을 수 있는 것도 아니다. 다만, 물리실험에서 알려진 값과 일치하지 않는 실험값이 측정되었을 때 계통오차의 원인을 찾는 방법에 대한 하나의 가이드라인을 제안하고자 하였다.

4.5.1.3. 계통오차 분석 예시

4.5.1.3.1. 실험도구의 작동 원리와 계통오차

실험도구의 작동방식에 의해 발생한 계통오차를 찾는 과정을 본 연구에서 개발한 중력가속도 측정실험을 예시로 [표 4-19]에 나타내었다.

[표 4-19] 실험도구의 작동방식에 의한 계통오차를 찾는 과정 예시

단계		예시
계통오차 드러내기		• 측정값의 신뢰구간이 참값을 포함하는지 확인한다.
오차의 원인 찾기	사용한 실험도구	• 스마트 기기인 디지털 카메라를 사용했다.
	오차의 원인이 될 만한 작동원리 찾기	1) 3차원 공간을 2차원 평면에 담아내는 작동방식으로 인해 카메라로부터 떨어진 거리에 따라서 물체가 확대 축소되는 비율이 다르다. 2) 그래서 어떤 두 물체가 같은 속도로 움직이더라도 카메라와 가까이 있는 물체가 멀리 있는 물체보다 더 빠르게 움직이는 것처럼 보인다. 3) 따라서 모눈의 위치를 기준으로 화면상과 실제 거리의 비율을 구하면 모눈보다 더 가까운 거리에서 움직이는 추는 실제보다 더 빠르게 움직이는 것처럼 분석된다. 4) 이 이유 때문에 중력가속도가 더 크게 측정되었을 것이다.
오차의 원인 확인	오차의 원인이 맞는지 확인하는 실험	1) 낙하시키는 추를 본래 실험에서 했던 것보다 모눈으로부터 더 떨어뜨리면서 실험을 수행한다. 2) 추가 모눈에서 더 떨어져서 낙하할수록 중력가속도는 더 크게 측정된다. 3) 그러므로 3차원 공간을 2차원 평면으로 나타내는 카메라의 작동원리가 오차의 원인이다.
	보정인자 찾기	1) 모눈과 카메라 사이의 거리와 추의 표면과 카메라 사이의 거리를 측정한다. 2) 보정인자는 두 거리의 비율이다.
	실험데이터 보정	• 측정값에 보정인자를 곱하여 데이터를 보정한다.
계통오차 드러내기		• 측정값의 신뢰구간이 참값을 포함하는지 확인한다.

4.5.1.3.2. 불완전한 실험환경과 계통오차

이상적 조건이 아니어서 발생한 계통오차를 찾는 과정을 본 연구에서 개발한 공기의 유전율 측정실험을 예시로 [표 4-20]에 나타내었다.

[표 4-20] 실험환경이 불완전한 조건이어서 발생한 계통오차를 찾는 과정 예시

단계		예시
계통오차 드러내기		• 측정값의 신뢰구간이 참값을 포함하는지 확인한다.
오차의 원인 찾기	사용한 실험도구	• 범용기기인 오실로스코프를 사용하였다.
	불완전한 조건인 실험환경 찾기	1) 오실로스코프의 영점을 확인한다. 2) 영점이 맞춰져 있다면, 도체판 축전기의 간격을 바꿔서 전기용량을 측정해본다. 3) 도체판의 간격을 가로축으로 하고 전기용량을 세로축으로 하여 그래프를 그린다. 4) 그래프의 y절편이 0이 아니라면 일정한 값이 더 추가되어 측정되는 것이다. 5) 축전기는 병렬연결을 할 경우에 전기용량이 더 커지므로 도체판 축전기에 병렬로 연결된 실험도구를 찾는다. 6) 추가된 전기용량의 후보로 동축 케이블이 있다. 동축 케이블은 도체판 축전기에 병렬로 연결되며 자체 전기용량이 있다.
오차의 원인 확인	오차의 원인이 맞는지 확인하는 실험	• 방법 1: 도체판 축전기를 제거해도 오실로스코프에 RC회로의 파형이 나타나면 추가된 전기용량이 오차의 원인이다. • 방법 2: 동축 케이블의 길이를 바꿔서 실험했을 때에 측정된 전기용량의 값이 바뀐다면 추가된 전기용량이 오차의 원인이다.
	보정값 찾기	1) 동축 케이블 외에도 추가된 전기용량이 있을 수 있으므로 추가된 전체 전기용량을 구해야 한다. 2) RC회로에서 도체판 축전기를 제거한 후에 실험을 수행해서 추가된 전체 전기용량을 측정한다. 3) 이 값이 측정한 전기용량에서 빼주어야 하는 보정값이다.
	실험데이터 보정	1) 전기용량 측정값에서 보정값을 빼서 전기용량 데이터를 보정한다. 2) 공기의 유전율을 계산한다.
계통오차 드러내기		• 측정값의 신뢰구간이 참값을 포함하는지 확인한다.

4.5.1.3.3. 교과서 실험에서 발견되는 계통오차

물리학 실험 교과서에서는 다양한 실험도구들을 이용하여 수행하는 실험들이 제시되어 있다. 이 절에서는 물리학 실험 교과서에 제시된 실험 중에서 조건 통제용 실험도구를 사용했을 때에 계통오차가 발생한 경우의 예시를 설명하고자 한다.

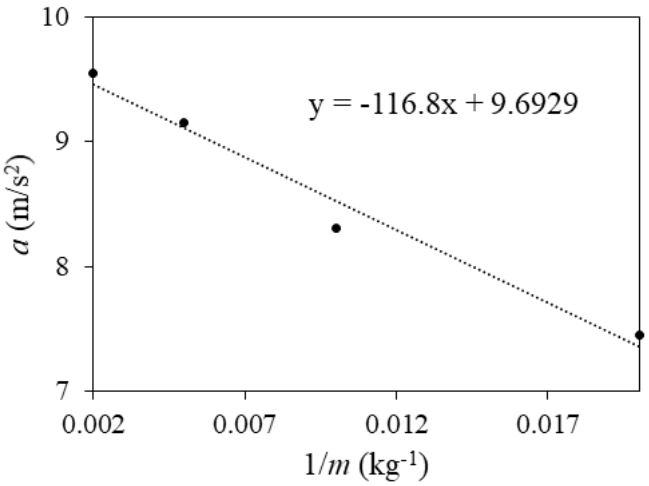
시간기록계는 종이테이프에 일정한 시간간격으로 타점을 찍어 시간을 기록하는 역할을 한다. 타점의 시간간격을 일정한 조건으로 유지시켜주는 역할을 하는데, 이상적 조건이라면 마찰력이 작용하지 않아야 하지만 실제로는 마찰력이 작용하여 계통오차가 생긴다. 시간기록계를 이용하여 중력가속도를 측정할 때에 같은 질량의 추로 실험을 반복하면 측정값의 불확도는 줄어들지만 중력가속도가 더 작게 측정되는 계통오차는 사라지지 않는다. 이 실험에서 계통오차의 원인은 주로 시간기록계와 종이테이프 사이의 마찰을 예로 든다. 마찰력을 f라고 했을 때에 추의 운동방정식은 $ma = mg - f$이므로 추의 질량을 크게 바꾸어 가면서 낙하하는 추의 가속도를 측정하면 중력가속도의 값에 점점 가까워지는 것을 볼 수 있다. 그러나 완전히 같아질 수는 없다. 시간기록계에 매단 추의 질량을 바꿔가며 실험한 결과를 [표 4-21]에 나타내었다.

[표 4-21] 추의 질량에 따른 가속도

추의 질량 (g)	50	100	200	500
가속도 (m/s^2)	7.45	8.30	9.15	9.55

이 실험에서 마찰력은 추의 질량에 영향을 받고 마찰력을 제거할 수 없으므로 보정값이나 보정인자를 찾기 어렵다. 이런 경우에는 실험데이터를 분석하는 방법을 적절히 선택하여야 한다. [그림 4-16]에서처럼 그래프를 그릴 때에 가로축을 질량의 역수, 세로축을 추의 가속도로 설정하면 y절편이 중력가속도의 값이 된다. 이렇게 [그림 4-15]의 순서를 따라서 시간기록계의 마찰에 의한 계통오차를 찾는 방법과 데이터를 처리

하는 방법의 예시를 [표 4-22]에 나타내었다.

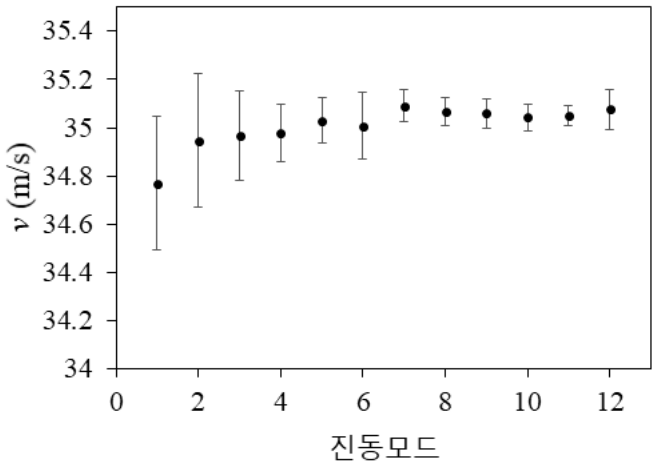


[그림 4-16] 시간기록계를 이용한 중력가속도 측정

[표 4-22] 시간기록계의 마찰에 의해 발생한 계통오차를 찾는 과정

단계		예시
계통오차 드러내기		• 측정값의 신뢰구간이 참값을 포함하는지 확인한다.
오차의 원인 찾기	사용한 실험도구	• 시간기록계를 실험에 사용하였다.
	불완전한 조건인 실험환경 찾기	1) 시간기록계가 이상적 조건이었다면 마찰이 작용하지 않았겠지만, 종이테이프에 마찰이 작용하므로 추는 자유낙하하지 못한다.
오차의 원인 확인	오차의 원인이 맞는지 확인하는 실험	1) 종이테이프와 시간기록계 사이의 마찰을 조절할 수 없으므로 마찰력의 크기를 변화시킬 수 있는 조건을 찾아야 한다. 2) 마찰력을 f라고 할 때에 추의 운동방정식은 $ma = mg - f$이므로 추의 질량이 클수록 마찰의 영향을 작게 받을 것이다. 3) 추의 질량을 크게 하면 추의 가속도가 점점 중력가속도의 값에 가까워지는 것을 볼 수 있으므로, 마찰이 계통오차의 원인이다.
	보정값이나 보정인자 찾기	1) 마찰은 통제하기 어려워 보정값이나 보정인자를 찾을 수 없다. 2) 질량의 역수를 가로축에, 측정한 가속도를 세로축에 놓고 그래프를 분석하여 y절편을 구하면 중력가속도의 값을 구할 수 있다.
	실험데이터 보정	

또 다른 예로는 줄의 정상파 실험에서 사용하는 진동기가 있다. 진동기는 줄에 일정한 진동을 유지시켜주는 역할을 하는데, 이 실험은 줄의 양 끝이 마디인 것을 가정한 실험이지만 진동기의 진폭이 클 때에는 줄을 진동시키는 부분이 마디가 되지 못해서 계통오차가 발생한다. 이를 보여주는 실험데이터를 [그림 4-17]에 나타내었다. 줄의 진동모드가 클수록 줄에서의 파동의 속력은 일정한 값에 가까워지는 것을 볼 수 있다. 반대로 진동모드가 작을 때의 속력은 진동모드가 클 때보다 더 작게 측정된다. 줄에서 파동의 속력은 진동수가 바뀌어도 같아야 하는데, 진동기의 진동수에 따라서 측정되는 값이 변한다면 계통오차가 포함되어 있는 것이다. 이 계통오차의 원인은 진동기의 진폭이므로 진동수, 추의 질량이 일정한 상태에서 진동기의 진폭을 바꾸었을 때에 정상파가 만들어지는 진동수가 바뀐다면 오차의 원인을 찾은 것이다. 그러나 줄을 진동시키기 위해서는 진폭이 있어야 하므로 이 오차의 원인은 제거하기 어렵다. 대신 진동수가 큰 범위에서만 실험한다면 진동기의 진폭에 의한 영향을 줄일 수는 있다. 이렇게 [그림 4-15]의 순서를 따라서 진동기의 진폭에 의한 계통오차를 찾는 과정을 [표 4-23]에 나타내었다.



[그림 4-17] 줄의 정상파 실험에서 진동모드와 속력

[표 4-23] 줄에서 발생하는 정상파 실험에서 발생한 계통오차를 찾는 과정

단계		예시
계통오차 드러내기		• 측정값의 신뢰구간이 참값을 포함하는지 확인한다.
오차의 원인 찾기	사용한 실험도구	• 줄 진동기를 이용하여 실험하였다.
	불완전한 조건인 실험환경 찾기	1) 진동모드가 커질수록 속력이 일정한 값에 가까워지는 것을 볼 수 있다. 2) 진동모드가 클 때에는 진동기의 진동수가 크고 진동기의 진폭이 작다. 3) 진동모드가 작을 때에는 진동기의 진동수가 작고 진폭이 커진다. 4) 진동기의 진폭이 크면 줄이 진동기에 묶여 있는 끝 부분은 마디가 되지 못한다. 5) 줄의 한쪽 끝이 진동한다면 줄의 양 끝이 마디라는 이상적 조건을 만족하지 않으므로 오차가 발생한다.
오차의 원인 확인	오차의 원인이 맞는지 확인하는 실험	• 진동기의 진폭이 오차의 원인이라면 진폭을 조절했을 때에 정상파가 만들어지는 진동수가 달라진다.
	보정값이나 보정인자 찾기	1) 진동기의 진폭은 완전히 제거할 수 없다. 2) 대신 진동기의 진폭이 아주 작은 영역에서 실험을 하면 진폭에 의한 계통오차를 줄일 수 있다.
	실험데이터 보정	

물리학 실험 교과서에 제시된 실험 중에서 실험결과에 계통오차가 있는 예시를 두 개 들었다. 두 실험에서 오차의 원인이 된 실험도구는 실험에서 일정한 조건을 유지시켜주는 역할을 하지만 다른 부분에서 이상적인 조건을 제공해주지 못한다. 실험도구가 제 역할을 수행하고는 있지만 다른 부분에서 불완전한 실험환경을 제공하는 것이다. 물리실험에서는 이상적 조건을 가정하고 실험을 하는 경우가 많으므로 실험결과에 오차가 있을 때에 [그림 4-15]를 참고하면 계통오차를 찾는 데에 도움이 될 수 있다.

4.5.2. 교사 대상 계통오차 분석 활동 실험연수 모형

4.5.2.1. 계통오차 분석 활동 실험연수 모형

본 연구의 연구참여자들이 경험한 계통오차 분석 활동은 정밀한 실험값을 얻을 수 있는 실험방법 소개, 실험결과에 나타난 계통오차 발견 및 그 원인에 대한 논의, 계통오차가 나타난 원인과 보정방법에 대한 연구자의 설명으로 이어지는 세 단계로 구성되어 있다. 이때, 연구자가 계통오차의 원인을 교사들에게 알려준 이유는 교사들이 오차의 원인을 생각해내기 어려워했기 때문이다. 하지만 계통오차의 원인을 교사들이 스스로 생각하고 오차를 보정할 수 있도록 해주는 연수를 구성한다면 계통오차 분석 활동의 효과가 더 잘 나타날 수 있을 것이다.

Barlow(2002)는 실험결과에 오차가 있을 때에 그것이 계통오차인지부터 알아내야 한다고 했고, 계통오차인지 알아내는 방법 중의 하나로 실험의 변수를 바꾸어서 결과를 분석할 것을 제안하였다. 본 연구에서 설계한 실험 중에는 실험의 변수를 바꾸어 실험했을 때에 실험값에 나타난 오차가 계통오차인지 확인할 수 있는 실험이 있다. 그러므로 이 실험들을 소재로 실험연수를 운영한다면 효과적인 계통오차 분석 실험연수를 기대해 볼 수 있다.

따라서 이 절에서는 본 연구에서 설계한 물리실험을 이용한 계통오차 분석 활동을 3단계의 교사 대상 실험연수로 구성해보았다. 각 단계는 실험수행 단계, 오차의 원인 생각하기 단계, 오차의 원인 확인하기 단계로 본 연구의 연구참여자들이 경험한 과정을 고려한 것이다.

◆ 실험수행 단계

실험수행 단계에서는 실험값을 정밀하게 얻는 방법을 설명하고 실험을 수행하게 한다. 실험결과에 계통오차가 포함되어 있어도 실험을 시작할 때부터 계통오차가 있음을 교사들에게 알려주지 않는다. 대신 실험값을

얻을 수 있는 방법을 자세히 설명하여 실험을 수행했을 때에 원하는 값을 쉽게 구할 수 있을 거라 예상하게 한다. 반복측정으로 측정값의 신뢰구간을 얻기 위해서는 데이터 수집에 시간이 오래 걸리면 안 되기 때문에, 데이터 수집을 쉽게 할 수 있는 방법을 알려준다. 반복측정 후에 평균과 신뢰구간을 구하고, 신뢰구간이 참값을 포함하지 않는 계통오차가 나타나면 다음 단계로 넘어간다.

◆ 오차의 원인 생각하기 단계

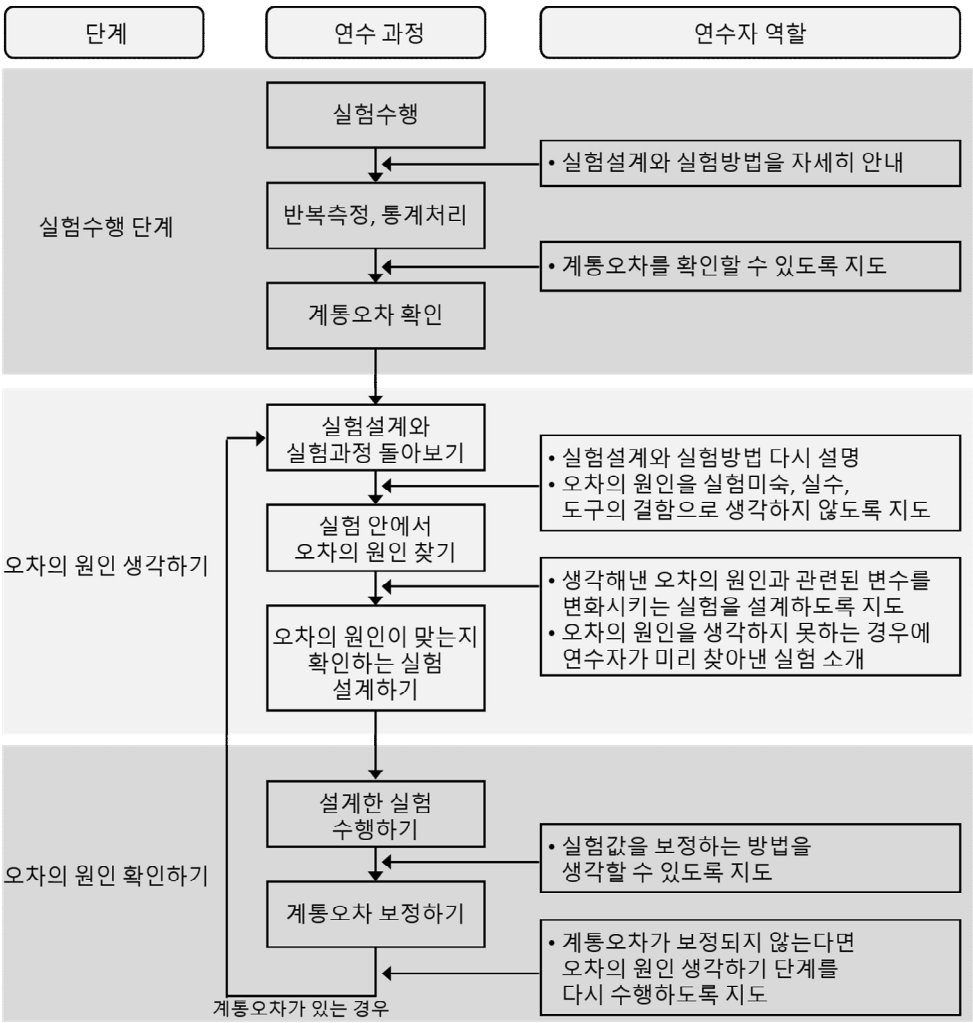
오차의 원인 생각하기 단계는 실험 안에서 오차의 원인을 생각하게 하는 단계이다. 실험수행 단계에서 실험과정을 자세히 지도했기 때문에 실험도구를 다루는 데에 미숙함, 실험과정에서 실수, 실험도구의 결함으로 인해서 오차가 발생했다는 생각은 하지 않게 해야 한다. 오차의 원인으로 이런 이유를 든다면 실험수업에 대한 부정적 효과가 나타날 수 있고, 이론과 실험은 다르다는 인식을 심어줄 수 있기 때문이다(강영창, 2013; 한감봉 등, 2012; 한유화 등 2014). 연수자는 실험설계를 다시 설명하고, 실험에 사용한 도구를 검토하게 해서 실험 안에서 오차의 원인을 찾게 해야 한다. 연수 참여자가 생각해낸 오차의 원인이 있다면 그것이 오차로 작용한 것이 맞는지 확인하는 실험을 설계하게 한다. 이때에 오차의 원인으로 생각해낸 도구를 교체하는 방법보다 도구와 관련된 변수를 바꾸어가며 측정을 하는 실험을 설계하도록 해야 한다. 그리고 같은 조건으로 실험을 반복한다면 계통오차의 원인을 찾아낼 수 없다는 것을 알려줘야 한다. 만약, 오차의 원인을 생각해내기 어려워한다면 연수자가 미리 찾아낸 오차의 원인을 발견할 수 있는 방법을 소개한다.

◆ 오차의 원인 확인하기 단계

오차의 원인 확인하기 단계는 전 단계에서 생각해낸 오차의 원인이 오차로 작용했는지 확인하는 실험을 하는 단계이다. 같은 실험을 반복해서

는 계통오차의 원인을 찾을 수 없기 때문에, 이 실험이 본래의 실험에서 수행했던 실험과 다르다는 것을 인식하게 한다. 생각해낸 오차의 원인이 옳다면 계통오차가 계속해서 나타나거나 측정값의 변화가 보인다. 그렇다면 오차의 원인을 제거해서 실험값을 보정하게 한다. 만약, 보정한 실험값의 신뢰구간이 참값을 포함하지 않는다면, 다시 오차의 원인 생각하기 단계를 수행해야 한다.

지금까지 서술한 3단계 과정을 [그림 4-18]에 나타내었다.



[그림 4-18] 계통오차 분석활동 실험연수 모형

4.5.2.2. 계통오차 분석 활동 실험연수 예시

본 연구에서 설계한 실험 중에서 중력가속도 측정실험과 공기의 유전율 측정실험으로 계통오차 분석 활동 실험연수를 구성할 수 있다. 이 실험들에서는 오차와 관련된 변수를 바꾸어서 실험했을 때에 계통오차가 포함되어 있음을 잘 알 수 있기 때문이다.

중력가속도 측정실험의 경우에 시차오차에 의해서 계통오차가 나타나는데, 낙하시키는 추를 카메라와 더 가깝게 하여 낙하시키면 오차의 크기가 더 커진다. 이를 이용하여 실험연수를 구성하면 실험을 수행하는 교사가 계통오차의 원인에 대해 생각해볼 수 있도록 할 수 있다. 연수 참여교사가 계통오차의 원인을 생각하지 못할 때에는 시차오차를 생각해낼 수 있도록 도울 수 있는데, 그 방법은 두께가 5 cm 정도로 두꺼운 추를 낙하시키는 영상을 보여주는 것이다. 이런 영상에서는 카메라와 가까운 면과 먼 면이 이동하는 거리가 달라 보이기 때문에 시차오차를 확인할 수 있다. [그림 4-18]의 실험연수 모형에 따라서 구성한 중력가속도 측정실험의 연수 지도안 예시를 [표 4-24]에 나타내었다. 그리고 이 실험의 안내서는 [부록 11]에 제시하였다.

공기의 유전율 측정실험의 경우에 도체판 축전기의 전기용량과 회로에서 추가된 전기용량이 함께 측정되어 계통오차가 나타난다. 동축 케이블의 길이나 도체판 축전기의 간격을 바꾸면 계통오차의 크기가 달라지기 때문에 이를 이용하여 계통오차 분석 활동 실험연수를 구성할 수 있다. [그림 4-18]의 실험연수 모형에 따라서 구성한 공기의 유전율 측정실험의 연수 지도안 예시를 [표 4-25]에 나타내었다. 그리고 이 실험의 안내서는 [부록 12]에 제시하였다.

이렇게 계통오차 분석활동을 실험연수로 구성하면 실험값이 정확하지 않을 때에는 실험 안에서 오차의 원인을 찾을 수 있다는 것, 학교의 실험에서도 오차를 보정해서 이론값에 가까운 측정값을 얻을 수 있다는 것, 그리고 실험설계에 대한 이해가 중요하다는 것을 교사들에게 알려줄 수 있을 것으로 기대한다.

[표 4-24] 중력가속도 측정실험의 계통오차 분석 활동 연수 지도안 예시

실험 주제	중력가속도 측정	
실험 목표	디지털 카메라와 트래커를 이용하여 중력가속도를 측정한다.	
단계	실험활동	
	연수참여자	연수자
실험 수행	• 추의 낙하 장면 촬영 실험을 반복 수행 • 트래커에서 영상을 분석해 중력가속도 측정	• 디지털 카메라의 초당 프레임 수, 셔터속도 조절 방법 지도 • 동영상 분석 방법 지도
	• 중력가속도 측정값의 평균과 신뢰구간 계산	• 측정값의 신뢰구간과 참값을 비교하여 계통오차를 확인할 수 있도록 지도
오차의 원인 생각하기	• 실험설계와 실험방법에서 오차의 원인 생각하기	• 측정값이 알려진 중력가속도보다 더 크게 측정되었음을 상기시킴 • 디지털 카메라의 설정, 트래커 사용법 등 실험설계와 실험방법을 다시 설명 • 오차의 원인을 실험도구 사용의 미숙함, 실험과정에서의 실수, 실험도구의 결함으로 생각하지 않도록 지도
	• 생각해낸 오차의 원인이 맞는지 확인하는 실험 설계	• 같은 조건의 실험을 반복해서는 계통오차의 원인을 찾을 수 없다는 것을 지도 • 생각해낸 오차의 원인과 관련된 변수를 변화시키는 실험을 설계하도록 지도 (예 : 시차오차를 오차의 원인으로 생각했다면, 추를 낙하시키는 위치를 모눈으로부터 점점 떨어지게 해서 중력가속도를 측정하는 실험을 설계 하도록 유도) • 오차의 원인을 생각하기 어려워하는 경우에 시차오차를 생각할 수 있는 영상 보여주기 (예 : 두께가 5 cm 정도 되는 원통형 추가 낙하하는 장면 보여주기)
오차의 원인 확인하기	• 오차의 원인이 맞는지 확인하는 실험 수행 • 계통오차가 계속 나타나는지 확인하기	• 추의 낙하 위치에 따라서 중력가속도 측정값이 달라지는 것을 확인할 수 있도록 실험 지도
	• 계통오차 보정방법 생각하기 • 오차 보정하기	• 계통오차 보정방법 지도(예 : 추에 표지가 붙은 위치, 모눈의 위치를 카메라로부터 측정한 다음에 그 비율을 보정인자로 사용) • 계통오차가 보정되지 않는다면 오차의 원인 생각하기 단계를 다시 수행하도록 지도

[표 4-25] 공기의 유전율 측정실험의 계통오차 분석활동 연수 지도안 예시

실험 주제	공기의 유전율 측정	
실험 목표	1. RC회로를 이용하여 도체판 축전기의 전기용량을 측정한다. 2. 도체판 축전기의 전기용량으로 공기의 유전율을 계산한다.	
단계	실험활동	
	연수참여자	연수자
실험 수행	• 도체판 축전기의 전기용량 반복 측정 • 공기의 유전율 계산	• 오실로스코프로 시상수 측정방법 설명 • 도체판 축전기의 간격이 1 mm인 경우만 실험하도록 지도
	• 공기 유전율 측정값의 평균과 신뢰구간 계산	• 측정값의 신뢰구간과 참값을 비교하여 계통오차를 확인할 수 있도록 지도
오차의 원인 생각하기	• 실험설계와 실험방법에서 오차의 원인 생각하기	• 측정값이 알려진 공기의 유전율보다 더 크게 측정되었음을 상기시킴 • 시상수 측정 방법, RC회로의 구조 등 실험설계와 실험방법을 다시 설명 • 오차의 원인을 실험도구 사용의 미숙함, 실험과정에서의 실수, 실험도구의 결함으로 생각하지 않도록 지도
	• 생각해낸 오차의 원인이 맞는지 확인하는 실험 설계	• 같은 조건의 실험을 반복해서는 계통오차의 원인을 찾을 수 없다는 것을 지도 • 생각해낸 오차의 원인과 관련된 변수를 변화시키는 실험을 설계하도록 지도 (예 : 동축 케이블의 전기용량을 오차의 원인으로 생각했다면, 사용한 동축 케이블의 길이를 변화시키면서 공기의 유전율을 측정하는 실험을 설계해보도록 유도) • 오차의 원인을 생각하기 어려워하는 경우에 도체판 축전기의 간격을 2 mm, 3 mm로 바꾸어서 실험을 설계해보도록 지도
오차의 원인 확인하기	• 오차의 원인이 맞는지 확인하는 실험 수행 • 계통오차가 계속 나타나는지 확인하기	• 동축 케이블의 길이에 따라서 공기의 유전율 측정값이 달라지는 것을 확인할 수 있도록 실험지도 • 도체판의 간격에 따라서 공기의 유전율 측정값이 달라지는 것을 확인할 수 있도록 실험지도
	• 계통오차 보정방법 생각하기 • 오차 보정하기	• 계통오차 보정방법 지도(예 : 도체판 축전기를 제거하고 추가된 전기용량을 측정, 이를 보정값으로 사용) • 계통오차가 보정되지 않는다면 오차의 원인 생각하기 단계를 다시 수행하도록 지도

V. 결론 및 제언

본 연구는 계통오차 분석을 경험할 수 있는 물리실험을 설계하여 교사들에게 실험설계의 이해와 오차 보정의 중요성을 알려주고자 진행되었다. 선행연구에 의하면 실험수업에서 교사들은 실험결과에 오차가 있을 때에 그 원인을 명확히 설명하지 못하고 있었으며, 오차의 원인을 학생의 실험능력이 미숙하기 때문이라 생각하고 오차에 대한 논의를 진행하지 않고 있었다. 학교에서 가장 많이 이루어지는 실험수업이 확인실험이라는 것을 고려할 때 오차에 대한 논의를 거치지 않는다면 탐구능력의 향상이라는 실험수업의 본래 목적을 달성하기 어려워질 것이다. 이에 과학고등학교에 근무하는 물리 교사 세 명을 연구참여자로 선정하여 실험오차와 실험 지도에 대한 인식을 조사하고 계통오차 분석 활동이 교사들의 인식에 어떤 영향을 줄 수 있는지 연구하였다.

연구참여자들을 면담하여 교사들이 실험 오차와 실험 지도에 대해서 어떤 인식을 가지고 실험수업을 진행하는지 알아보았다. 연구참여자들은 정밀한 실험값을 얻기 위해서는 정밀한 실험도구를 사용해야 하는 것을 알고 있었지만, 실험결과가 정확하지 않을 때에는 실험도구를 교체하기 전에 실험설계, 실험방법, 실험도구 등 실험 전반에 걸쳐서 다시 살펴봐야 한다는 것은 인식하지 못하고 있었다. 또, 이론과 실험이 다르다는 인식을 가지고 오차를 보정하여 정확한 값을 측정하는 단계는 실험수업에서 진행하지 않고 있었으며, 계통오차를 보정하는 것을 어려워했다. 그리고 연구참여자들은 측정과 자료수집을 쉽게 할 수 있는 실험구성을 통해 실험수업을 진행하고 있었으며, 실험수업의 목표를 과학법칙을 확인하는 것으로 인식하고 있었다. 그러나 실험값을 얻기 위해 왜 그렇게 실험을 설계해야 하는지 이해시키는 것은 실험수업의 주요 목표로 인식하지 않았다.

학교의 실험수업은 주로 과학법칙을 확인하는 확인실험인데 실험결과에 계통오차가 있다면 과학적인 논의를 진행하기 힘들다. 계통오차를 보정하기 위해서는 실험 전반에 대한 이해가 필요하므로 교사들이 계통오

차를 보정하는 과정을 경험해본다면 오차 보정의 중요성과 실험설계에 대한 이해의 중요성을 인식할 수 있을 것으로 보고, 교사들이 계통오차 분석 활동을 경험할 수 있는 물리실험을 설계하였다. 그리고 설계한 실험을 연구참여자들이 수행하게 하는 계통오차 분석 활동을 진행하였다.

계통오차 분석 활동을 끝낸 후에 다시 면담을 진행하여 실험 오차와 실험 지도에 대한 교사들의 인식이 어떻게 변하였는지 알아보았다. 교사들은 실험값에 계통오차가 있을 때에 정밀한 실험도구로 교체하는 것이 아니라 실험설계나 실험도구에 대해서 살펴봐야 한다는 것을 인식하게 되었다. 그리고 실험값을 얻기 위한 실험설계의 중요성을 인식하게 되었고, 학생들이 실험방법을 직접 고안해보게 하는 방식으로 실험수업을 진행하게끔 실험 지도에 대한 인식이 바뀌었다. 또, 계통오차가 발견되었을 때에 이를 보정하는 과정을 실험수업에서 활용하는 것도 교육적 의미가 있으며, 교사가 계통오차의 사례를 다양하게 알고 있을 때에 실험수업에서 오차에 대해 더 폭넓게 지도할 수 있게 된다고 인식하게 되었다. 그러나 연구참여자들은 계통오차를 보정하는 것에 대해서 여전히 어려운 일이라고 생각하고 있으며, 교사들이 계통오차를 보정하는 것을 경험해본다면 오차 보정과 실험설계 이해의 중요성을 깨우칠 수 있을 것이라 하였다.

다음으로 계통오차 분석활동을 교사들이 경험할 수 있는 방안을 찾고자 하였다. 먼저 물리실험수업에서 발생할 수 있는 계통오차의 유형을 분류하였다. 본 연구에서 설계한 실험에서 발생한 계통오차의 원인을 분석하여 계통오차의 유형을 실험도구의 작동원리를 고려하지 않았을 때의 계통오차, 불완전한 실험환경임에도 이를 고려하지 않았을 때의 계통오차로 구분하였다. 그리고 물리학 실험 교과서에 수록된 실험도구를 이 구분에 포함하여 물리실험수업에서 발견될 수 있는 계통오차를 실험도구와 관련지어 분류하였다. 이 분류를 기준으로 참값을 알고 있는 실험수업에서 계통오차가 발생했을 때에 이를 보정하는 과정을 순서도로 제시하였고, 몇 가지 예시를 들었다. 그리고 계통오차 분석활동을 경험할 수 있는 교사연수의 모형을 제안하였다.

본 연구는 실험수업에서 계통오차가 발생했을 때에 이를 보정하는 구체적인 방법을 제시하여 오차 처리의 중요성을 교사들이 인식할 수 있게 해준다는 점에서 의의를 갖는다. 오차 처리와 관련하여서 불확도의 중요성을 강조한 연구들은 많이 진행되었지만(강영창, 2013; 박종찬, 2009; 이재봉, 2006), 학교의 실험수업에서 발생하는 계통오차에 대한 구체적인 사례와 보정 방법에 대한 연구는 부족하다. 확인실험에서 정확한 실험값을 이용하여 과학법칙을 확인하는 것이 중요하지만 많은 교사들이 오차 처리에 어려움을 겪고 있는 상황에서, 본 연구에서 강조한 계통오차 분석 활동은 교사들에게 오차의 원인을 실험 안에서 찾을 수 있고 오차를 보정할 수 있다는 인식을 갖게 할 수 있다. 이를 위해 계통오차 분석 활동을 교사를 대상으로 하는 실험연수로 활용할 수 있는 모형을 제안하였는데, 추후 이를 실제로 적용하고 효과를 알아볼 필요가 있다.

물리실험수업에서 나타날 수 있는 계통오차의 원인을 실험에 사용한 도구와 관련지어서 분류했다는 점에서도 의의를 갖는다. 오차 처리에 관한 교재에서는 계통오차를 장비의 영점 문제나 실험자의 실수에 의해서 발생하는 것으로 다루었다(Bevington & Robinson, 2003; Taylor, 1997). 그리고 교사들은 실험수업에서 발생하는 오차를 학생들의 실수로 생각하고 있었다. 계통오차에 대한 이런 인식은 교사와 학생들에게 이론과 실험은 다르다는 생각을 심어주고, 실험을 하는 의미를 잃게 만든다. 그러나 실험결과에 계통오차가 있을 때에 그 원인을 실험도구와 관련지어 분류하면, 계통오차 분석이 가능해진다.

계통오차 분석 활동은 실험설계에 대한 이해를 돕고, 오차를 당연한 것으로 여기는 생각을 바꾸어줄 수 있으므로 이를 학교의 실험수업에도 활용할 수 있다. 하지만 이를 위해서는 추가 연구로 교사들이 실험수업에 활용할 수 있는 계통오차가 포함된 물리실험의 예시를 더 개발해야 한다. 계통오차의 원인은 쉽게 찾아낼 수 있는 것이 아니기 때문이다. 따라서 계통오차를 탐구의 요소로 활용할 수 있는 실험의 예시를 더 개발하고, 이를 교사들에게 보급할 수 있는 방안을 마련해야 한다.

본 연구에서 설계한 실험은 온라인 실험수업에 활용될 수 있다는 점에

서도 의의가 있다. 스마트 기기의 예시인 스마트폰은 널리 보급되어 있으며 물리실험에 활용할 수 있는 다양한 센서들이 탑재되어 있다. 오픈소스 소프트웨어인 트래커는 무료로 사용할 수 있으며, 오픈소스 하드웨어인 아두이노 보드와 각종 센서는 저렴하게 구입할 수 있다. 본 연구에서 설계한 실험과 같이 스마트 기기, 오픈소스로 실험을 설계하는 방법을 자세하게 안내하면, 비대면 온라인 수업에서도 실험수업을 진행할 수 있을 것이다. 그리고 실험결과에 나타날 수 있는 계통오차를 학생들이 분석할 수 있도록 교사가 실험수업을 구성한다면, 단순히 실험을 수행하는 것 이상의 의미를 갖는 온라인 실험수업을 진행할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

강영창 (2013). 예비교사를 위한 측정 불확도 개념이 강조된 물리 실험 설계틀 개발 및 적용.서울대학교 박사학위논문.

교육부 (2015). 과학과 교육과정. 교육부 고시 제2015-74호 [별책 9]

김성진, 김대규, 문연호, 안형수, 권경필, 민보경, 박가영 (2018). 고등학교 물리학Ⅱ. 2015 개정 교육과정, 미래앤.

노영 (2014). 실험수업에서 과학교사가 겪는 어려움 및 대처방안에 대한 질적 연구. 이화여자대학교 석사학위논문.

박승호, 김익수, 김종엽, 남경식, 박종찬 (2018). 고등학교 물리학 실험. 2015 개정 교육과정, 대전광역시교육청.

박종찬 (2009). 측정과 자료해석 능력 향상을 위해 교정적 피드백을 강조한 실험수업의 효과-과학고등학교 물리실험활동을 중심으로. 서울대학교 박사학위논문.

박현주 (2013). 중학교 과학교사의 실험수업 실태 및 인식 조사. 과학교육연구지, 37(1), 79-86.

배성열, 박윤배 (2000). 교사들이 인식하는 과학과 목표의 영역별 중요도와 장애요인. 한국과학교육학회지, 20(4), 572-581.

손향구 (2019). 대학 과학교양교육을 위한 실험수업의 필요성과 효율적 운영방안. 교양 교육 연구, 13(6), 171-186.

신광문, 강영창, 이성묵, 이재봉 (2011). 대학생들의 물리실험에서 측정 활동 분석틀 개발 및 적용. 한국과학교육학회지, 31(1), 115-127.

심재호 (2006). 과학교사 전문성과 실험 연수에 대한 중등 과학 교사의 인식. 한국생물교육학회지, 34(1), 27-37.

양일호, 김석민, 조현준 (2007). 초·중등학교 과학 실험수업의 유형 분석. 한국과학교육학회지, 27(3), 235-241.

양일호, 정진우, 김영신, 김민경, 조현준 (2006a). 중등학교 과학 실험 수업에 대한 실험 목적·상호 작용·탐구 과정의 분석. 한국지구과학회, 27(5), 509-520.

양일호, 정진우, 허명, 김석민 (2006b). 실험수업 유형 분류틀 개발. 한국과학교육학회지, 26(3), 342-355.

이미섭, 김상년 (2014). 플랑크 흑체복사와 빈의 변위 공식을 이용한 꼬마 전구의 온도와 플랑크 상수 측정. 현장과학교육, 8(2), 149-154.

이양락, 박재근, 이봉우, 박순경, 정영근 (2004). 과학과 교육내용 적정성 분석 및 평가. 한국교육과정평가원 연구보고 RRC 2004-1-6.

이윤종, 기우항, 김영호, 정원우, 양승영, 강용희, 안병호, 임성규, 윤일희, 김중욱, 윤성효 (1997). 현행 중등학교 과학 실험·실습 교육 실태 조사 및 그 운영 진단(Ⅰ)-중학교 과학 실험·실습 교육을 중심으로. 한국과학교육학회지, 17(4), 435-450.

이재봉 (2006). 물리탐구활동에서 불확실도 개념이 측정과 자료 해석 과정에 미치는 영향. 서울대학교 박사학위 논문.

이종봉, 이경호 (2016). 실험교육의 현상학적 이해: 밀리컨 기름방울 실험과 홀 효과 실험을 중심으로. 새물리, 66(7), 864-876.

이준원 (2014). 만보계에서 크루즈 미사일까지 안드로이드 센서 이야기. 부천: 프리렉.

정건상, 허명 (1993). 고등학교 생물과 탐구 학습 의 실태 조사와 문제점 분석. 한국과학교육학회지, 13(2), 146-151.

조현준, 양일호, 이효녕 (2008). 중·고등학교 과학실험활동의 목적에 대한 교사와 학생의 인식 비교. 과학교육연구지, 32(2), 103-120. 경북대학교 과학교 육연구소.

최수빈 (2007). 중학교 교사와 학생의 실험 활동 목적 인식의 차이에 대한 질적 접근. 한국교원대학교 석사학위논문.

한유화, 전은선, 백성혜 (2014). 중학교 과학교과서, 교사의 인식 및 실험수업 사례에서 나타난 과학적 탐구 요소 분석. 한국과학교육학회지, 34(4), 349-357.

한감봉, 민희정, 백성혜 (2012). 중학교 과학 수업에서 일정성분비 법칙의 강의와 실험에 대한 교사 및 학생들의 인식. 대한화학회. 56(1).

144-157.
한국표준과학연구원 (2010). 측정불확도 (GUM, ISO/IEC Guide 98-3) 제3부: 측정불확도 표현 지침 (GUM:1995). 한국표준과학연구원 KRISS/SP--2010-105
Barlow, R. (2002). Systematic Errors: facts and fictions. High Energy Physics-Experiment. Presented at Advanced Statistical Techniques in HEP, Durham.
Bevington P. R., & Robinson, D. K. (2003). Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences. 3rd Ed., New York: McGraw-Hill Higher Education.
Bloomfield, L. A. (2008). How everything works. John Wiley & Sons, Inc.
Bonefačić, I., & Blecich, P. (2015) Two-color temperature measurement method using BPW34 pin photodiodes. Engineering Review, 35(3), 259-266.
Brizuela, G., & Juan, A. (1996). Planck's constant determination using a light bulb. American Journal of Physics, 64(6), 819-821.
Crandall, R. E., & Delord, J. F. (1983). Minimal apparatus for determination of Planck's constant. American Journal of Physics, 51(1), 90-91.
Cross, R. (2002) Measurements of the horizontal coefficient of restitution for a superball and a tennis ball. Am. J. Phys., 70(5), 482-489.
Gamry Instruments (2018). Cable-Capacitance Correction. Gamry Instruments Technical Note.
Goncalves, A. B. B., Cena, C. R., & Bozano, D. F. (2017). Driven damped harmonic oscillator resonance with an Arduino. Physics Education, 52(4), 043002-043005.
Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2001). Fundamentals of

Physics. 6th Ed., Joh Wiley & Sons, Inc.

Hiscocks, P. D., & Gaston, J. (2007). Oscilloscope Probes:Theory and Practice. Syscomp Electronic Design.

Hofstein, A., & Lunetta, V. N. (1982). The role of the laboratory in science teaching: neglected aspects of research. Review of Educational Research, 52(2), 201-217.

Jones, H. A. (1926). A temperature scale for tungsten. Phys. Rev., 28, 202-207.

KODENSHI. PIN Photodiode HPI-6FFR4 Data sheet.

Morrow, C. A. (2003). Misconceptions scientists often have about the K-12 national science education standards. The Astronomy Education Review, 1(2), 85-94.

Nordmann, A., Radder, H., & Schiemann, G. (2011). Science Transformed? Debaing claims of an epochal break. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.

Ojanen, M., &Karha P., Saulius, N., Sperling, A., Mantynen, H., & Ikonen, E. (2012). Double-coiled tungsten filament lamps as absolute spectral irradiance reference sources. Metrologia, 49, S53-S58.

Pendrill, A. M., & Rohlen, J. (2011). Acceleration and rotation in a pendulum ride, measured using an iPhone 4. Physics Education, 46(6), 060676-060681.

Pereira, N. S. A. (2016). Measuring the RC time constant with Arduino. Physics Education, 51(6), 065007-065016.

Ravetz, J. R. (1971). Scientific Knowledge and its Social Problems. New York: Oxford University Press.

Rubens, H., & Kurlbaum F. (1901). On the Heat Radiation of Long Wave-Length Emitted by Black Bodies at Different Temperatures. Astrophysical Journal, 14, 335-348.

Saleh, B. E. A., & Teich, M. C. (1991). Fundamentals of Photonics. John Wiley & Sons, Inc.

Schwartz, R. S., & Crawford, B. A. (2006). “Authentic scientific inquiry as context for teaching nature of science”. in Flick L.B., Lederman N.G., (eds.) Scientific Inquiry and Nature of Science, Springer, 331-335.

Serway, R. A., & Jewett J. W. (2006). Principles of Physics-A Calculus-Based Text. 4th Ed., Brooks/Cole-Thomson Learning.

SHARP (1999). Photodiode/Phototransistor Application Circuit. SHARP Application Note.

Taylor, J. R. (1997). An Introduction to Error Analysis. 2nd Ed., Sausalito, California: University Science Books. 김재관 역 (2015). 오차 분석 입문. 서울대학교출판문화원.

Tektronix (2014). How Oscilloscope Probes Affect Your Measurement. Tektronix Application Note.

Wattanayotin, P., Puttharugsa, C., & Khemmani, S. (2017). Investigation of the rolling motion of a hollow cylinder using a smartphone's digital compass. Physics Education, 52(4), 045009-045017.

[부록 1] IRB 심의 승인 통보서

심의결과 통보서

수신

연구책임자	**이름:** 박대현	**소속:** 사범대학 과학교육과	**직위:** 박사과정
지원기관	해당없음		

과제정보

승인번호		IRB No. 1908/002-006	
연구과제명		물리교과실험에서 발생하는 실험도구와 관련된 계통오차의 원인과 사례 연구	
연구종류		학위 논문 연구 , 관찰연구 , 면담(FGI 포함)	
심의종류		재심의	
심의일자		2019-07-29	
심의대상		설명문 및 동의서 또는 서면동의 면제사유서 , (재심의 답변서, 기관장 연구수행 허락서)	
심의결과		승인	
승인일자		2019-07-29	승인유효기간 2020-07-28
정기보고주기		12개월	
심의의견		1. 심의결과 제출하신 연구계획에 대해 승인합니다. 2. 연구자께서는 승인된 문서를 사용하여 연구를 진행하시기 바라며, 만일 연구진행 과정에서 계획상에 변경사항(연구자 변경, 연구내용 변경 등)이 발생할 경우 본 위원회에 변경신청을 하여 승인 받은 후 연구를 진행하여 주십시오. 3. 유효기간 내 연구가 끝났을 경우 종료 보고서를 제출하여야 하며, 승인유효기간 이후에도 연구를 계속하고자 할 경우, 2020-06-28까지 지속심의를 받도록 하여 주십시오.	
검토의견	계획서 검토의견	- 승인합니다. 다만 대상으로 진행되는 연구인 만큼 연구참여의 자발성과 개인정보 보안에 유의하여 주시기 바랍니다.	
	동의서 검토의견		
	기타 검토의견		

2019년 07월 29일

서울대학교 생명윤리위원회 위원장

본 위원회가 승인한 연구를 수행하는 연구자들은 다음의 사항을 준수해야 합니다.

1. 반드시 계획서에 따라 연구를 수행해야 합니다.
2. 위원회의 승인을 받은 연구참여자 동의서를 사용해야 합니다.
3. 모국어가 한국어가 아닌 연구참여자에게는 승인된 동의서를 연구참여자의 모국어로 번역하여 사용해야 하며 번역본은 인증 및 위원회의 승인을 거쳐야 합니다.
4. 연구참여자 보호를 위해 불가피한 경우를 제외하고는 연구 진행중의 변경에 대해서는 위원회의 사전 승인을 받아야 합니다. 연구참여자의 보호를 위해 취해진 응급상황에서의 변경에 대해서는 즉각 위원회에 보고해야 합니다.
5. 위원회에서 승인 받은 계획서에 따라 등록된 연구참여자의 사망, 입원, 심각한 질병에 대하여는 위원회에 서면으로 보고해야 합니다.
6. 임상시험 또는 연구참여자의 안전에 대해 유해한 영향을 미칠 수 있는 새로운 정보는 즉각 위원회에 보고해야 합니다.
7. 위원회의 요구가 있을 때에는 연구의 진행과 관련된 사항에 관하여 위원회에 보고해야 합니다.
8. 연구참여자 모집광고는 사용 전에 위원회로부터 승인을 받아야 합니다.
9. 강제 혹은 부당한 영향력이 없는 상태에서 충분한 설명에 근거하여 연구참여자로부터 동의를 받아야 하며, 잠재적인 연구참여자에 대해서 연구 참여 여부를 숙려할 수 있도록 충분한 기회를 제공해야 합니다.

[부록 2] 연구참여자 모집 문건

IRB No. 1908/002-006 유효기간: 2020년 7월 28일

연구참여자 모집 문건

다음과 같은 연구에 참여하실 분을 모집합니다.

연구 과제명
물리교과실험에서 발생하는 실험도구와 관련된 계통오차의 원인과 사례 연구
연구 책임자명
박대현(서울대학교 사범대학 과학교육과)

연구 목적 :

1) 물리교과실험에서 실험도구에 적용되는 이론을 고려하지 않고 실험을 했을 경우에 계통오차가 발생할 수 있음을 교사들이 인지하고 있는지 면담을 통해서 알아봅니다.

2) 연구참여자들과 물리교과실험을 하면서 실험도구와 관련된 계통오차를 찾아보고 계통오차 발생의 원인과 사례를 알아봅니다.

참여자 선정조건 : 물리교과 교사

참여 내용 :

1) 도구사용과 실험에 대한 경험에 대한 면담

2) 연구참여자들과 물리교과실험 수행

참여기간 및 장소

1) 기간 : 2019년 9월~2020년 7월

2) 장소 : 물리실험실

참여 시 사례 : 금전적인 사례는 없습니다.

참여 방법 : 연구책임자(박대현)에게 참여의사를 밝혀주세요.

본 연구의 내용에 관한 문의는 다음 연구 담당자에게 하십시오.

이름: 박대현 전화번호:

Version 1.1(2019.7.29.)

[부록 3] 연구참여자용 설명문

IRB No. 1908/002-006 유효기간: 2020년 7월 28일

연구참여자용 설명문(교사용)

연구 과제명 : 물리교과실험에서 발생하는 실험도구와 관련된 계통오차의 원인과 사례 연구

연구 책임자명 : 박대현(서울대학교 사범대학 과학교육과, 박사과정)

이 연구는 물리교과실험에서 발생하는 오차 중에서 실험도구와 관련된 계통오차에 대한 연구입니다. 귀하는 물리교과를 지도하는 교사이기 때문에 이 연구에 참여하도록 권유 받았습니다. 이 연구를 수행하는 서울대학교 소속의 박대현 연구원(박대현,)이 귀하에게 이 연구에 대해 설명해 줄 것입니다. 이 연구는 자발적으로 참여 의사를 밝히신 분에 한하여 수행 될 것이며, 귀하께서는 참여 의사를 결정하기 전에 본 연구가 왜 수행되는지 그리고 연구의 내용이 무엇과 관련 있는지 이해하는 것이 중요합니다. 다음 내용을 신중히 읽어보신 후 참여 의사를 밝혀 주시길 바라며, 필요하다면 가족이나 친구들과 의논해 보십시오. 만일 어떠한 질문이 있다면 담당 연구원이 자세하게 설명해 줄 것입니다.

1. 이 연구는 왜 실시합니까?

이 연구의 목적은 첫째, 물리교과실험에서 실험도구에 적용되는 이론을 고려하지 않고 실험을 했을 경우에 계통오차가 발생할 수 있음을 교사들이 인지하고 있는지 면담을 통해서 알아보는 것입니다. 둘째, 연구참여자들과 물리교과실험을 하면서 실험도구와 관련된 계통오차를 찾아보고 계통오차 발생의 원인과 사례를 알아보는 것입니다.

2. 얼마나 많은 사람이 참여합니까?

최대 8명의 사람이 참여 할 것입니다.

3. 만일 연구에 참여하면 어떤 과정이 진행됩니까?

만일 귀하가 참여의사를 밝혀 주시면 다음과 같은 과정이 진행될 것입니다.
1) 첫 번째 과정으로 두 번의 1:1 면담이 진행될 것입니다. 1차 면담에서 귀하는 도구사용과 실험에 대한 귀하의 전반적인 경험에 대해서 면담을 할 것입니다. 2차 면담에서는 1차 면담에서 진술한 경험 중에서 몇 개를 골라서 심층적으로 면담을 할 것입니다. 면담 내용은 녹음될 것이며 각 면담은 1시간 내외, 두 면담의 간격은 1주일 정도입니다. 면담 일정은 귀하가 정할 수 있습니다. 2차 면담까지 마치고 나서 연구 책임자가 추가면담을 요청할 수 있으나 귀하는 추가면담을 거부할 수 있습니다.

녹음을 하는 과정에서 귀하의 정보가 드러나는 것을 방지하기 위해 가명을 사용하거나 "선생님"이라고만 칭할 것입니다. 만약, 귀하가 면담 내용이 녹음되는 것을 원치 않는다면 녹음을 거부할 수 있습니다. 그 때에는 면담 내용을 면담 기록지에 기록하고 귀하의 확인을 거쳐 동의를 얻은 내용만 연구자료로 사용할 것입니다.

Version 1.1(2019.7.29.) - 1 -

2) 두 번째 과정은 다른 연구참여자들과 함께 물리교과실험을 수행하는 것입니다. 다른 연구참여자들과 함께 실험을 하는 것을 원하지 않거나 일정이 맞지 않으면 혼자서 진행할 수 있습니다. 수행하는 실험은 물리 교과서에 실린 실험, 연구 책임자가 개발한 물리 교과실험 등인데 제시된 주제들 중에서 선택할 수 있습니다. 귀하는 실험을 수행하며 다른 연구참여자들과 토론을 할 수도 있으며 연구원에게 질문을 할 수도 있습니다. 실험 수행은 테스트가 아니며 함께 실험을 하며 계통오차를 찾아보고 보다 나은 실험결과를 얻기 위해 서로 배우고 토론하는 것으로 여길 수 있습니다. 귀하는 연구원이 제시하는 실험 주제 중에서 참여하기 원하는 실험 주제를 선택할 수 있으며, 실험과정은 실험도구를 다루는 모습 위주로 녹화될 것이고 대화 내용은 녹음될 것입니다. 수행하는 실험 주제는 2개이며, 귀하가 원하는 경우에 실험의 수를 늘이거나 줄일 수 있습니다.

실험 장면이 녹화되는 과정에서 귀하의 정보가 드러나는 것을 방지하기 위해 면담에서 사용했던 가명이나 식별부호를 계속해서 사용할 것입니다. 만약, 귀화가 실험과정이 녹화되는 것을 원치 않는다면 녹화와 녹음을 거부할 수 있습니다. 그 때에는 녹화를 원하지 않는 다른 연구참여자들과 실험을 수행하거나 혼자서 실험을 수행할 것입니다. 실험수행에서 관찰한 내용은 관찰 기록지에 기록하고 귀하의 확인을 거쳐 동의를 얻은 내용만 연구자료로 사용할 것입니다.

4. 연구 참여 기간은 얼마나 됩니까?

1) 면담은 물리실험실, 무한상상실 등 물리교사들이 주로 사용하는 교실에서 2일 동안 1일에 한 번씩 총 2회를 진행하도록 요청받을 것입니다. 면담은 1:1로 진행되며 1회 면담 시마다 1시간 내외의 시간이 소요됩니다. 1차 면담과 2차 면담의 간격은 일주일 정도입니다. 면담 일정은 귀하가 정할 수 있으며, 추가면담이 요청될 수 있으나 거부할 수 있습니다.

2) 물리교과실험은 물리실험실 또는 무한상상실에서 2일 동안 1일에 한 번씩 총 2회를 진행하도록 요청받을 것입니다. 1회 실험 시마다 1시간 내외의 시간이 소요됩니다. 참여하기 원하는 실험 주제와 개수, 실험 일정은 귀하가 정할 수 있습니다.

5. 참여 도중 그만두어도 됩니까?

예, 귀하는 언제든지 어떠한 불이익 없이 참여 도중에 그만 둘 수 있습니다. 만일 귀하가 연구에 참여하는 것을 그만두고 싶다면 연구 책임자에게 즉시 말씀해 주십시오. 그만두는 경우 모아진 자료는 폐기를 원하시면 즉시 폐기됩니다. 그러나 폐기를 원하지 않는다면 그만두기 전까지 모아진 자료는 연구 자료로 사용됩니다.

6. 부작용이나 위험요소는 없습니까?

면담을 진행하는 도중에 답하기 꺼려지는 질문이 있을 수 있습니다. 답하기 꺼려지는 질문에는 답을 하지 않아도 됩니다. 만일 귀하가 제공한 자료 중에서 연구에 사용되기 원하지 않는 자료가 있다면 연구 책임자에게 즉시 말씀해 주십시오. 귀하가 밝히기 원하지 않거나 연구에 활용되기 원하지 않는 정보는 바로 폐기됩니다. 물리교과실험은 실험실 안전수칙을 준수하며 진행되고, 위험요소가 포함된 실험은 수행하지 않습니다. 그 외에

부작용이나 위험요소는 없습니다.

7. 이 연구에 참여시 참여자에게 이득이 있습니까?

귀하가 이 연구에 참여하는 데에 있어서 직접적인 이득은 없습니다. 그러나 귀하가 제공하는 정보는 물리교과실험에서 실험도구에 대한 이론을 고려하지 않아서 발생하는 계통오차에 대한 이해를 증진하는 데에 도움이 될 것입니다.

8. 만일 이 연구에 참여하지 않는다면 불이익이 있습니까?

귀하는 본 연구에 참여하지 않을 자유가 있습니다. 또한, 귀하가 본 연구에 참여하지 않아도 귀하에게는 어떠한 불이익도 없습니다.

9. 연구에서 얻은 모든 개인 정보의 비밀은 보장됩니까?

개인정보관리책임자는 서울대학교의 박대현 입니다. 본 연구에서 수집되는 개인정보는 나이, 성별, 교육경력, 학력으로 개인 식별이 불가능한 범위입니다. 이러한 개인정보가 수집되는 이유는 연구참여자의 경험을 이해하고 의미를 부여하기 위해서 필요하기 때문입니다. 개인 정보는 이름 대신 개인별 식별코드를 부여하여 관리하고, 연구자료 활용 시에는 이름이 공개되지 않습니다. 수집된 연구자료는 연구 책임자 박대현 에게만 접근이 허락되며, 암호를 걸어 놓은 파일로 암호로 보호되는 연구 책임자의 개인PC에 저장하는 방법으로 보관이 될 것입니다. 동의서는 관련 법령에 따라 3년을 보관한 후 폐기할 예정이며, 연구자료의 경우는 서울대학교 연구윤리 지침에 따라 가능한 영구 보관할 예정입니다. 저희는 이 연구를 통해 얻은 모든 개인 정보의 비밀 보장을 위해 최선을 다할 것입니다.

연구결과물에 귀하의 정보가 드러나지 않도록 다음과 같이 조치할 것입니다. 녹음이나 녹화된 내용에서 귀하의 정보가 드러나지 않도록 가명이나 개인별 식별코드를 사용하고, 실험장면을 연구결과물에 삽입할 경우에는 모자이크나 블러 처리를 하여 귀하가 식별되지 않도록 할 것입니다. 특정 정보를 사용해야할 경우에는 귀하를 식별해낼 수 없는 범위에서만 사용할 것입니다. 예를 들어, 학교명은 기재하지 않고 서울시 소재 고등학교로 표기될 것이며, 나이는 연령대로만 나타낼 것입니다. 하지만 이렇게 식별해낼 수 없는 범위로 정보를 표현할 수 없다면 그 정보는 사용하지 않을 것입니다.

이 연구에서 얻어진 개인 정보가 학위논문이나 학회지나 학회에 공개 될 때 귀하의 이름 및 기타 개인 정보는 사용되지 않을 것입니다. 그러나 만일 법이 요구하면 귀하의 개인정보는 제공될 수도 있습니다. 또한 모니터 요원, 점검 요원, 생명윤리위원회는 연구참여자의 개인 정보에 대한 비밀 보장을 침해하지 않고 관련규정이 정하는 범위 안에서 본 연구의 실시 절차와 자료의 신뢰성을 검증하기 위해 연구 결과를 직접 열람할 수 있습니다. 귀하가 본 동의서에 서명하는 것은, 이러한 사항에 대하여 사전에 알고 있었으며 이를 허용한다는 동의로 간주될 것입니다.

10. 이 연구에 참가하면 사례가 지급됩니까?

죄송합니다만 본 연구에 참가하는데 있어서 연구참여자에게 어떠한 금전적 보상도 없습니다.

11. 연구에 대한 문의는 어떻게 해야 됩니까?

본 연구에 대해 질문이 있거나 연구 중간에 문제가 생길 시 다음 연구 담당자에게 연락하십시오.

이름: 박대현 전화번호:

만일 어느 때라도 연구참여자로서 귀하의 권리에 대한 질문이 있다면 다음의 서울대학교 생명윤리위원회에 연락하십시오.
서울대학교 생명윤리위원회 (SNUIRB) 전화번호: 02-880-5153

[부록 4] 연구참여자용 동의서

IRB No. 1908/002-006 유효기간: 2020년 7월 28일

동 의 서 (연구참여자 보관용)

연구 과제명 : 물리교과실험에서 발생하는 실험도구와 관련된 계통오차의 원인과 사례 연구

연구 책임자명 : 박대현(서울대학교 사범대학 과학교육과, 박사과정)

1. 나는 이 설명서를 읽었으며 담당 연구원과 이에 대하여 의논하였습니다.
2. 나는 위험과 이득에 관하여 들었으며 나의 질문에 만족할 만한 답변을 얻었습니다.
3. 나는 이 연구에 참여하는 것에 대하여 자발적으로 동의합니다.
4. 나는 이 연구에서 얻어진 나에 대한 정보를 현행 법률과 생명윤리위원회 규정이 허용하는 범위 내에서 연구자가 수집하고 처리하는 데 동의합니다.
5. 나는 담당 연구자나 위임 받은 대리인이 연구를 진행하거나 결과 관리를 하는 경우와 법률이 규정한 국가 기관 및 서울대학교 생명윤리위원회가 실태 조사를 하는 경우에는 비밀로 유지되는 나의 개인 신상 정보를 확인하는 것에 동의합니다.
6. 나는 언제라도 이 연구의 참여를 철회할 수 있고 이러한 결정이 나에게 어떠한 해도 되지 않을 것이라는 것을 압니다.
7. 나의 서명은 이 동의서의 사본을 받았다는 것을 뜻하며 나와 동의를 받는 연구원의 서명이 포함된 사본을 보관하겠습니다.
8. 나는 연구를 수행하는 중에 (녹음 및 녹화)가 진행되는 것에 동의합니다.

동의함 ☐ 동의하지 않음 ☐

연구참여자 성명	서 명	날짜 (년/월/일)
동의 받는 연구원 성명	서 명	날짜 (년/월/일)

Version 1.1(2019.7.29.) - 1 -

[부록 5] 물리학 실험 교과서의 각 단원에 사용되는 도구

표 1. 역학 실험에 사용되는 실험도구

역학 실험	실험준비물						
	기본도구	조건 통제용 실험도구	단순 측정도구	스마트 기기	범용기기	소프트웨어	실험키트
반응 속도 측정	호루라기, 안대		자, 초시계				
빗면을 내려가는 물체의 운동	실험용 수레	레일	각도기	카메라		동영상분석 프로그램	
뉴턴의 운동 법칙	도르래, 실, 추, 수레	레일	초시계				
마찰력 측정	나무도막, 경사판, 도르래, 추		저울, 초시계				
중력 가속도 측정	역학용 추	시간기록계	자	카메라			
원운동 분석	관, 받침쇠, 고무마개, 실		자, 초시계				
단진자의 주기 운동 분석	추, 클램프, 실,		초시계, 자, 각도기				
운동량의 보존	수레, 막대, 추, 클램프		저울, 자				
2차원 충돌	퍽, 수평기	2차원 충돌 실험장치		카메라		동영상분석 프로그램	
용수철 진자와 역학적 에너지	용수철, 추, 스탠드, 집게		초시계, 자				
얼음의 융해열 측정	얼음, 비커, 물	열량계	온도계, 전자저울, 메스실린더				
줄 실험장치를 이용한 열의 일당량 측정	물, 계산기 추, 비커		눈금자, 초시계, 저울, 온도계				줄열 실험장치
여러 고체의 선팽창 계수 측정	금속막대, 비닐관		미터자, 온도계, 온도센서				선팽창계수 측정장치, 증기발생기

표 2. 전자기 실험에 사용되는 실험도구

전자기 실험	실험준비물			
	기본도구	조건 통제용 실험도구	단순 측정도구	범용기기
등전위선 그리기	전선	전지, 원형 금속 고리, 동전	자	디지털 멀티미터
축전기와 전기용량	전선	평행판 축전기, 알루미늄박, 종이	눈금자, 버니어 캘리퍼스	디지털 멀티미터, LCR 미터
옴의 법칙	전선	직류전원장치, 꼬마전구, 철선	눈금자, 버니어 캘리퍼스, 온도계	디지털 멀티미터
내부 저항	스위치, 전선	전지, 저항		디지털 멀티미터
휘트스톤 브리지	스위치, 전선	저항, 니크롬선, 전지	미터자	디지털 멀티미터
직선 도선의 전류에 의한 자기장	전선, 테이프	직류전원장치, 저항, 구리선	자	디지털 멀티미터, 가우스 미터
자기장 속에서 전류가 받는 힘	전선, 스탠드	직류전원장치, ㄷ자 도선판, 저항, 자석	저울, 자	디지털 멀티미터, 가우스 미터
유도기전력 측정	사포, 전선	자석, 에나멜 선,	버니어 캘리퍼스, 미터자	MBL 전압 측정장치
RL, RC 회로의 시간상수	전선	함수발생기, 저항, 축전기, 코일		오실로스코프, 디지털 멀티미터, LCR 미터
RLC 회로의 교류 특성	회로판, 전선	함수발생기, 저항, 축전기, 코일		오실로스코프, 디지털 멀티미터, LCR 미터
다이오드 특성과 정류회로 설계	전선	함수발생기, 직류전원장치, 저항, 다이오드		오실로스코프, 디지털 멀티미터

표 3. 빛과 파동 실험에 사용되는 실험도구

빛과 파동 실험	실험준비물					
	기본도구	조건 통제용 실험도구	단순 측정도구	스마트 기기	소프트웨어	실험키트
수면파의 반사와 굴절	연필		자, 가도기	디지털 카메라		수면파 발생장치
수면파의 간섭	연필			디지털 카메라		수면파 발생장치
수면파의 회절	연필			디지털 카메라		수면파 발생장치
정상파와 공명	줄, 도르래, 추	줄 진동기	줄자, 온도계	스마트폰		공기기둥 공명실험장치
구면거울에 의한 상의 형성	스크린, 전구	볼록거울, 오목거울, 광학대	자			
빛의 굴절과 전반사	연필	아크릴 조각, 광학대	자, 각도기			
볼록렌즈에 의한 상의 형성	전구	볼록렌즈, 오목렌즈, 광학대	미터자			
이중슬릿에 의한 빛의 간섭	스크린	레이저, 이중슬릿	자			
마이컬슨 간섭계를 이용한 굴절률 측정		레이저				마이컬슨 간섭계
슬릿에 의한 빛의 회절	스크린	레이저, 단일슬릿, 다중슬릿	자, 마이크로미터		분광계 프로그램	
빛의 스펙트럼 관찰	형광등, 백열등	레이저, 방전관, 분광기, 분광계		컴퓨터		
편광 현상 관찰	글자판	편광판, 방해석				편광 실험장치, 브루스터 각 실험장치

표 4.현대물리 실험에 사용되는 실험도구

현대물리 실험	실험준비물					
	기본도구	조건 통제용 실험도구	단순 측정도구	스마트 기기	범용기기	실험키트
광전효과로 알아보는 빛의 입자성				컴퓨터		광전효과 실험장치
음극선의 성질	막대자석, 전선					크룩스관, 유도코일
전자의 비전하 측정		직류전원장치, 고전압 전원장치	전류계, 전압계			비전하 측정장치
밀리컨의 기름방울 실험	액체 파라핀 용액	직류전원장치	초시계		디지털 멀티미터	밀리컨 기름방울 실험장치
프랑크-헤르츠 실험						프랑크-헤르츠 실험장치
물질의 방사선량 측정	종이, 알루미늄판, 납판	가이거-뮐러관, 방사선원	방사선 계수기			
간이 안개상자를 이용한 방사선 궤적 측정	모눈종이, 랜턴 심지, 점등관			디지털 카메라		간이 안개상자 실험세트

[부록 6] 셔터속도와 촬영된 물체의 모습

동영상을 촬영할 때에도 셔터속도를 조절할 수 있는 카메라를 사용하면 영상 분석이 편리하다. 초기 속력이 0 m/s인 물체가 0.3 m를 낙하하면 속력은 약 2.4 m/s가 된다. 이는 상당히 빠른 속력으로 셔터속도가 느리면 한 장면에 촬영된 물체의 모양은 흐릿하게 퍼져 보인다. 초당 프레임 수를 120 fps로, 셔터속도를 1/120 초보다 더 빠른 4 ms, 1 ms로 설정하고 촬영한 사진을 그림 1에 나타내었다. 한 장면이 촬영되는 동안 물체가 이동한 거리는 약 1 cm(= 2.4 m/s × 4 ms)이므로, 셔터속도가 4 ms로 매우 빠르더라도 이 화면에서 물체는 흐릿하게 보인다(그림 1(a)). 이런 영상을 트래커에서 분석하면 물체의 위치를 정확히 알 수 없기 때문에 영상 분석에 어려움이 있고 이런 영상을 이용하면 불확도가 커진다. 반면, 셔터속도가 1 ms로 충분히 빠르면 낙하하는 물체의 모양을 명확하게 드러낼 수 있으므로 영상 분석에 용이하고 정밀한 실험값을 얻을 수 있다(그림 1(b)).

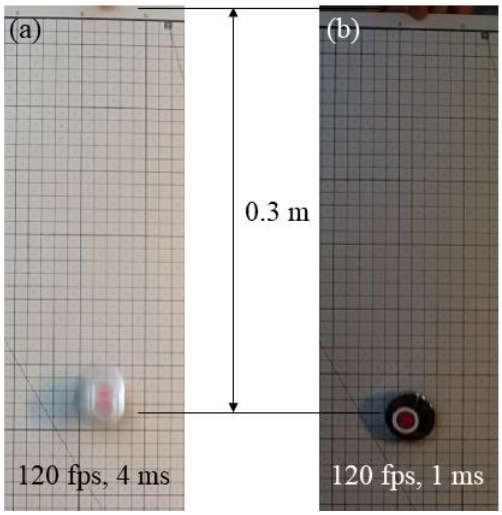


그림 1. 셔터속도에 따라 물체가 촬영된 모습의 차이. 그림의 순간은 물체가 0.3 m를 낙하해서 속력이 약 2.4 m/s일 때이다. 초당 프레임 수와 셔터속도는 (a) 120 fps, 4 ms 이고 (b) 120 fps, 1 ms 인데, (b)에서 물체의 모양은 또렷하게 보이는 대신에 화면은 어둡다.

[부록 7] 트래커로 위치-시간 데이터 얻기

※ 다음은 자유 낙하하는 물체를 촬영한 동영상을 트래커로 불러왔을 때의 화면이다. 아래의 과정을 따라가며 자유 낙하하는 물체의 위치-시간 데이터를 얻어 보자. (트래커 파일과 동영상 파일이 같은 폴더 안에 있도록 한다.)

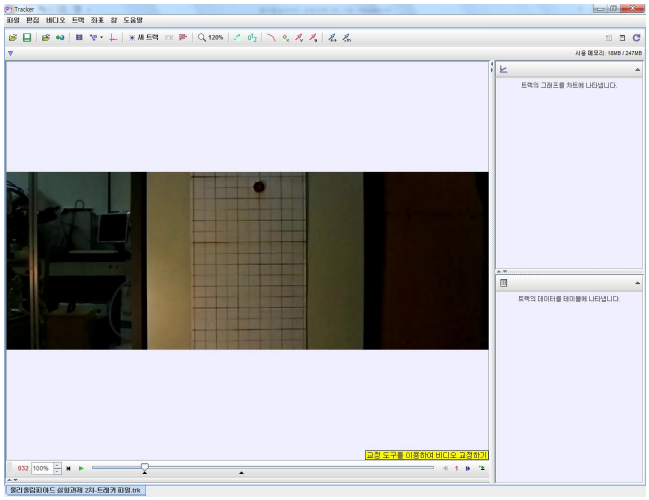


그림 1. 트래커 파일에 동영상을 불러온 화면

1. 화면 아래쪽의 검은색 삼각형을 조정하여 그림 2와 같이 자유 낙하 운동을 분석할 수 있는 프레임의 시작과 끝을 설정한다.

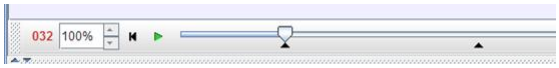


그림 2. 검은색 삼각형(▲)을 조정하여 분석하고자 하는 프레임의 시작과 끝을 설정할 수 있다.

2. 동영상의 촬영 정보를 입력하기 위해서 영상 위에 마우스를 올리고 오른쪽 클릭을 한 후(그림 3(가)) “비디오 설정” 메뉴를 선택하거나 메뉴 바의 를 클릭한다. “프레임 속도”에 400을 입력하고 확인 버튼을 누른다(그림 3(나)). 프레임 간격이 0.0025 초로 바뀌었는지 확인한다.

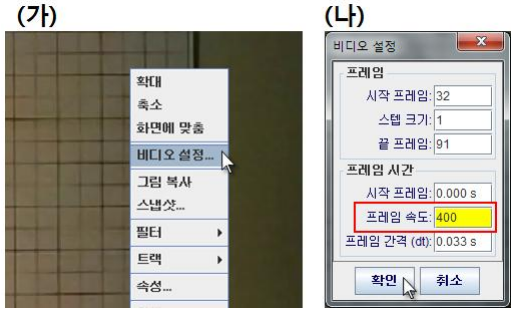


그림 3. (가) 동영상 화면을 오른쪽 클릭하여 비디오 설정을 선택하고, (나) 프레임 속도에 400을 입력한다.

3. 화면에서 물체의 위치와 이동거리는 픽셀(pixel) 단위로 측정된다. 이를 미터(m) 단위로 변환하기 위해서는 교정도구가 필요하다. 메뉴 바의 를 클릭하여 “새 트랙-교정 막대자”를 선택한다(그림 4(가)). 교정 막대자 양 끝의 파란 십자가를 마우스로 끌어서 굵은 선으로 보이는 모눈의 한 변에 맞춘다(그림 4(나)). 실험에 사용한 모눈의 크기에 맞추어 값을 입력한다. 예를 들어, 모눈에서 작은 사각형이 한 변이 1 cm인 정사각형이면, 트래커에서 단위는 미터이므로 0.01를 입력한다. 되도록 모눈을 여러 칸 선택하자. 10 cm에 해당하는 만큼의 모눈을 교정 막대자의 양 끝으로 선택하고 0.1을 입력하자. 이제 화면에서 교정 막대자의 길이에 해당하는 픽셀은 10 cm로 계산된다.

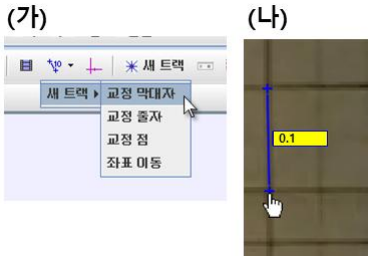


그림 4. (가) 교정 막대자를 선택하고 (나) 10 cm에 해당하는 모눈의 양 끝에 교정 막대자를 맞춘다. 그리고 0.1를 입력한다.

4. 물체의 위치를 추적하기 위해서는 기준점이 있어야 한다. 메뉴 바의 를 클릭하면 화면에 좌표축이 나타난다. 좌표축의 원점을 마우스로 끌어서 원하는 위치에 놓는다(그림 5). (이 매뉴얼에서는 분석할 프레임 범위의 첫 번째 프레임에 찍힌 물체의 중심에 맞추었다. 이 프레임이 자유 낙하를 시작하는 시점일 필요는 없다.)

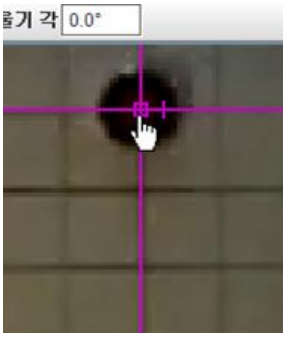


그림 5. 좌표축의 원점을 물체의 중심으로 이동

5. 앞의 과정은 모두 분석할 프레임들 중 첫 번째 프레임에서 이루어졌다. 이제 다음 프레임들에서 물체의 위치가 어떻게 변하는지 추적한다. 메뉴 바에서 새 트랙을 클릭하여 "질점"을 선택하면(그림 6(가)) 그림 6(나)와 같은 창이 나타난다.

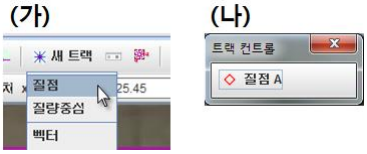


그림 6. (가) 새 트랙에서 질점을 선택하면 (나) 질점을 제어할 수 있는 창이 나타난다.

6. 물체의 위치를 자동으로 추적하여 질점이 물체의 위치와 대응되게 해야 한다. 자동추적을 위해서 Ctrl 버튼과 Shift 버튼을 동시에 누른 채로 화면에 나온 물체를 클릭한다(그림 7(가)). 마우스 커서가 그림 7(가)와 같이 변해야 자동추적을 위한 질점을 찍는 것이다.

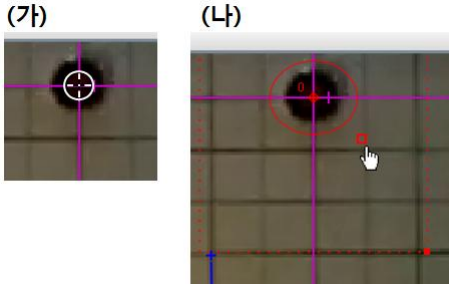


그림 7. (가) Ctrl 버튼과 Shift 버튼을 동시에 누른 채로 화면에 나온 물체를 클릭하면 (나) 추적할 물체를 지정할 수 있다.

7. 질점을 찍으면 그림 7(나)와 같이 빨간색 점선으로 된 사각형과 빨간색 실선으로 된 원이 보인다. 바깥쪽에 점선으로 되어 있는 사각형은 화면에서 물체를 찾는 범위를 나타내고, 안쪽에 실선으로 되어 있는 원은 추적할 물체를 나타낸다. 원의 오른쪽 아랫부분에 있는 빨간색 점을 마우스로 클릭하여 끌면 원의 모양과 크기를 바꿀 수 있다. 트래커의 자동 찾기 기능은 실선으로 되어 있는 원 안에 있는 모양과 일치하는 모양을 화면에서 찾아 질점의 위치를 추적한다. 그러므로 추적할 물체의 경계와 함께 배경이 어느 정도 보여야 다음 프레임에서도 물체의 위치가 잘 추적된다.

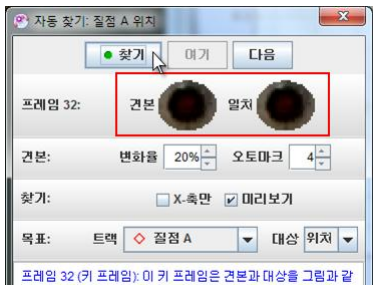


그림 8. 트래커의 자동 찾기 기능은 실선으로 되어 있는 원 안에 있는 모양과 일치하는 모양을 화면에서 찾아 질점의 위치를 추적한다. 견본이 선택되면 찾기 버튼을 누른다.

8. 원의 모양과 위치를 조정하여 추적할 영상을 선택하면 그림 8과 같이 “견본”과 “일치”하는 모양을 볼 수 있다. 찾기 버튼을 누르면 다음 프레임

으로 자동으로 넘어가면서 견본과 일치하는 모양을 자동으로 찾아 질점의 위치를 기록한다(그림 9). 만약 질점이 추적되지 않는다면 첫 프레임으로 돌아가 추적할 물체를 선택하는 것부터 다시 한다.

그림 9. 자동 찾기를 하면 다음 프레임으로 넘어가면서 견본과 일치하는 부분을 자동으로 찾는다. 트래커가 분석하기 쉽도록 견본을 선택해야 자동 찾기 도중에 멈추지 않고 질점을 추적할 수 있다.

9. 자동 찾기를 통해 위치를 추적하면 그림 10(가)와 같은 그래프가 트래커 화면 오른쪽에 보인다. 그래프의 가로축은 시간을 나타낸다. 그래프의 세로축에 표시된 x를 클릭하여 y(위치의 y성분)를 선택하면 y축 방향의 위치-시간 그래프가 나온다(그림 10(나)).

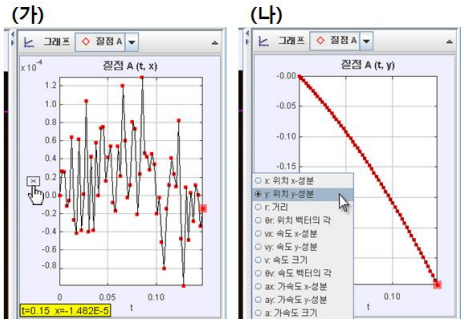


그림 10. (가) 위치의 x성분. (나) 위치의 y성분.

10. 트래커 화면의 오른쪽 아랫부분에는 데이터가 숫자로 표시된다. 위치의 y성분과 속도의 y성분을 표시하기 위해 데이터를 클릭한다. 데이터 구성요소 창에서 원하는 데이터를 선택한다(그림 11).

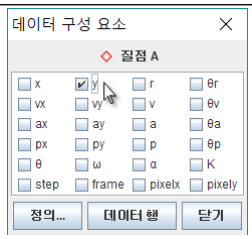


그림 11. 데이터 구성 요소에서 y를 선택한 모습.

11. 위치의 y성분이 나타난 그래프 위에 마우스 커서를 올리고 오른쪽 클릭을 하면 나타나는 메뉴에서 “분석”을 선택한다(그림 12(가)). 그러면 데이터 도구라는 창이 나타나는데 분석 버튼을 누르고 “추세선”을 선택한다(그림 12(나)).

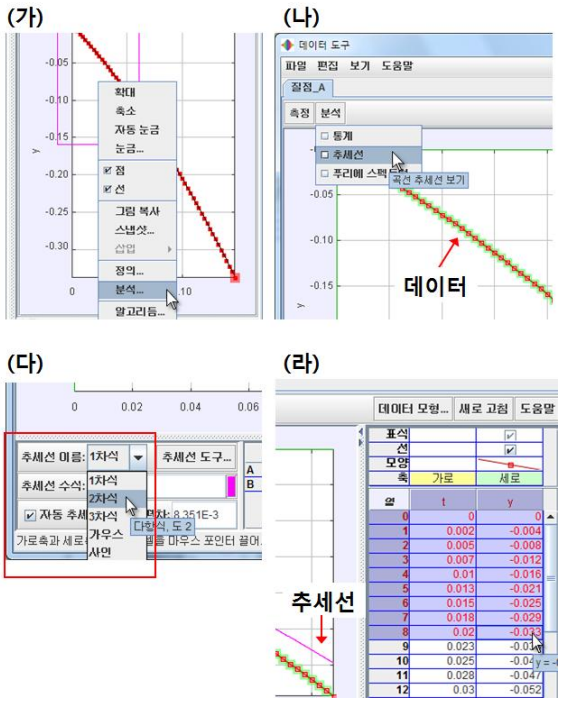


그림 12. (가) 그래프 위에서 마우스의 오른쪽 버튼을 클릭하면 분석 메뉴를 선택할 수 있다. (나) 데이터 도구 창에서 분석 버튼을 누르고 추세선을 선택한다. (다) 추세선의 이름은 “2차식”을 선택하고 “자동 추세선”에 체크한다. (라) 분석하려는 데이터들을 마우스로 끌어서 선택한다.

12. 자유낙하 하는 물체의 위치는 시간에 관한 2차 함수이므로 추세선 이름은 2차식을 선택하고, 자동 추세선 항목에 체크한다(그림 12(다)). 데이터 도구 창의 오른쪽에는 데이터가 숫자로 표시되는데, 분석하고자 하는 데이터들을 마우스로 끌어서 선택하면 그래프에 추세선이 자동으로 표시된다(그림 12(라)). 모든 데이터를 선택하자. 그러면 그림 13과 같이 2차식에 사용된 계수 A, B, C의 값을 구할 수 있다. 트래커에서 사용한 2차식은 $y = At^2 + Bt + C$이고 자유낙하 하는 물체는 $y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 t + s_0$의 식을 따르므로 A가 중력가속도의 절반에 해당하는 값이다.

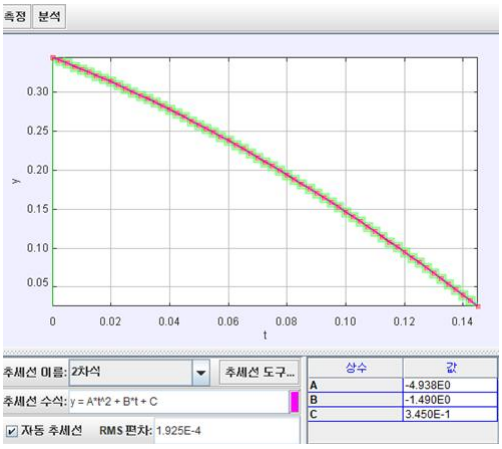


그림 13. 위치-시간 데이터에서 추세선을 2차식으로 선택하면 2차 함수의 계수값들을 알 수 있다. 여기에서 A가 중력가속도의 절반에 해당하는 값이다.

[부록 8] 트래커로 선 스펙트럼의 분광분포 얻기

트래커에 스펙트럼 사진을 그림 1처럼 불러온 후에 650 nm 붉은색 레이저의 빛을 기준이 되는 빛으로 사용한다. 파장을 알고 있는 스펙트럼의 선이 사진의 어느 부분에 위치하는지 알아야 되기 때문이다. 슬릿과 붉은색 레이저의 스펙트럼까지를 교정막대자의 양끝으로 하고 그 길이를 간이분광기의 눈금에서 측정한 값(87 mm)으로 설정한 후에 좌표축을 추가하여 세로축을 슬릿의 위치와 맞춰준다. 그리고 트래커 메뉴에서 선 프로파일을 추가하면 그림 1의 오른쪽 부분과 같이 분광분포와 비슷한 그래프를 얻을 수 있다. 이 그래프의 가로축을 파장 λ에 대응하도록 바꾸어 주어야 하는데 그러기 위해서는 트래커에 불러온 사진에서 식 (1)의 L에 해당하는 값을 계산해야 한다. 실험에 사용한 분광기의 회절격자는 2000 nm 간격이므로 식 (1)에 $d = 2000\,\mathrm{nm}$, $\lambda = 650\,\mathrm{nm}$, $x = 87\,\mathrm{mm}$를 대입하면 스펙트럼과 회절격자 사이의 거리 L은 약 253 mm이다. 이렇게 구한 L의 값은 분광기의 본체의 길이인 260 mm와 거의 같고, 이 값은 다른 빛의 스펙트럼의 파장을 계산할 때에도 사용할 수 있다.

$$\lambda = d\frac{x}{\sqrt{L^2 + x^2}} \qquad \text{식 (1)}$$

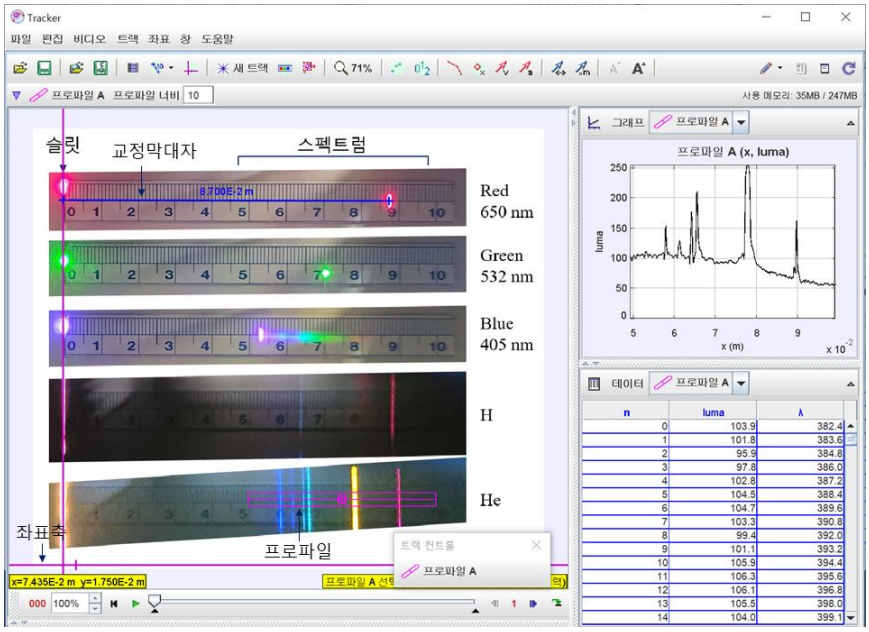


그림1. 스펙트럼 사진을 트래커에 불러온 화면

트래커에서 보여주는 그래프에서 가로축을 위치인 x에서 파장인 λ로 바꾸기 위해서도 식 (1)을 사용한다. 그림 1에서 오른쪽 위에 있는 그래프의 가로축인 x를 클릭하면 팝업 메뉴가 나타나는데 거기에서 변수의 정의를 입력할 수 있는 메뉴로 이동하면 그림 2와 같은 창이 나온다. 여기에서 상수로 d와 L을 입력하고 수식에 식 (1)를 입력하면 파장 λ를 정의할 수 있다.

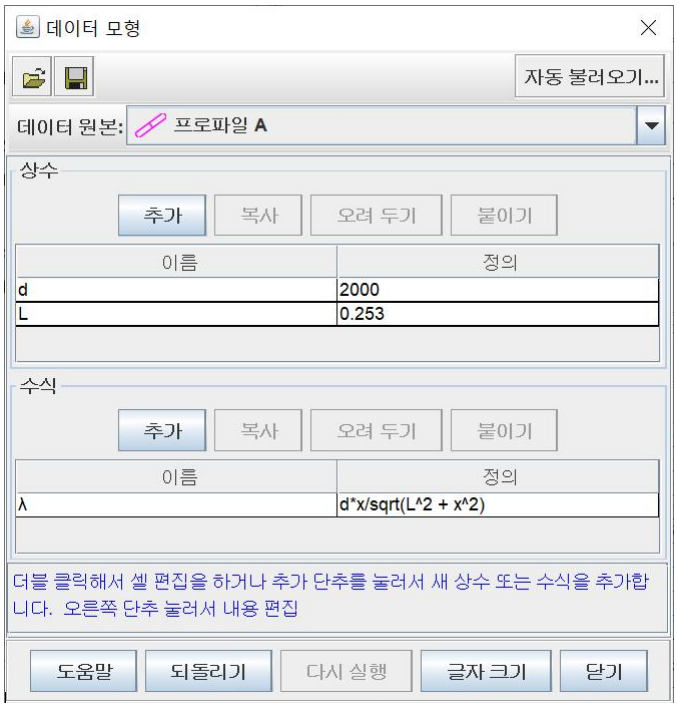


그림 2. 트래커에서 변수를 정의할 수 있는 창

[부록 9] RC회로를 이용한 공기의 유전율 측정실험

도체판 축전기의 전기용량 C를 측정하면 다음 식을 이용하여 공기의 유전율 ϵ_0을 계산할 수 있다.

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d} \qquad \text{식 (1)}$$

여기서 S는 구리판의 면적이고 d는 구리판 사이의 간격이다. 평행판 축전기의 전기용량은 그림 1과 같은 RC 회로를 구성하고 시상수 τ를 측정하여 구할 수 있다. 회로 구성에 사용한 저항은 1kΩ이고, 이를 평행판 축전기에 직렬로 연결한 후에 함수발생기로 1kHz의 사각파를 회로에 공급하였다. 그리고 오실로스코프의 CH1과 CH2로 전체 신호와 평행판 축전기의 신호를 측정하였다.

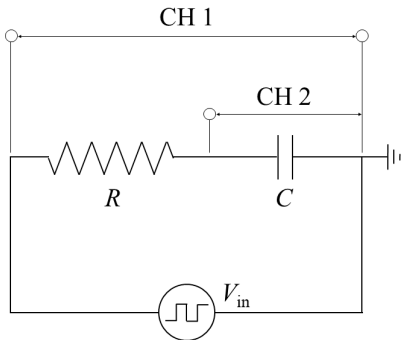


그림 1. RC 회로 구성

본 연구에서 사용한 오실로스코프(Protek, 6810C)는 시상수를 직접 측정해주는 기능이 없다. 오실로스코프에 연결하여 실험할 수 있는 회로가 RC회로만은 아니기 때문이다. 그래서 시상수는 오실로스코프의 기능 중에서 상승시간을 측정하는 기능을 사용하여 구하였다. 실험에 사용한 오실로스코프인 Protek의 6810C 모델은 그림 2와 같이 신호가 최댓값의 10%에서 90%까지 상승하는 데에 걸린 시간을 상승시간으로 측정한다.

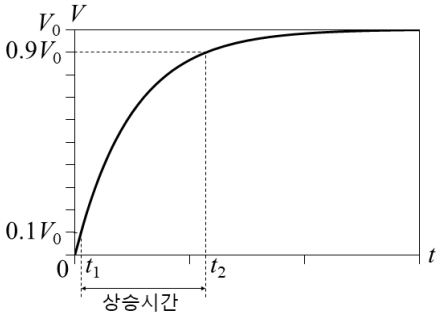


그림 2. 오실로스코프의 상승시간 측정 범위

RC 회로에서 축전기의 전압이 V_0까지 충전되고 있을 때 축전기의 전압 $V(t)$와 시간 t의 관계는 $V(t) = V_0\left(1 - e^{-t/RC}\right)$이고 신호의 값이 10%, 90%일 때의 시간을 각각 t_1, t_2라고 한다면 상승시간은 $t_2 - t_1$이다. 그리고 시상수 τ는 RC의 값과 같다. 이를 정리하면 다음 식이 성립한다.

$$t_2 - t_1 = RC\ln 9 \qquad \text{식 (2)}$$

평행판 축전기로 RC회로를 구성하고 오실로스코프에서 그림 3과 같이 시간 축을 조정한 후에 상승시간을 측정한다. 오실로스코프의 화면 오른쪽 끝에는 신호의 최댓값이, 왼쪽 끝에는 신호의 최솟값이 나타나게 시간 축을 조정한다. 상승시간을 측정하고 식 (2)로 전기용량의 값을 계산한 후에 전기용량, 구리판의 넓이를 식 (1)에 대입하면 공기의 유전율을 계산할 수 있다.

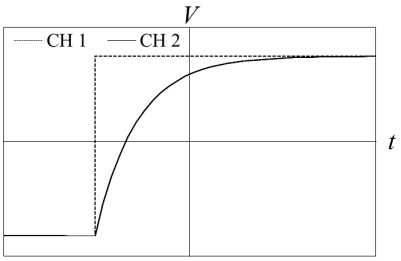


그림 3. 상승시간을 측정하기 위한 오실로스코프 화면. 오른쪽 끝은 신호의 최댓값이, 왼쪽 끝은 신호의 최솟값이 나타나게 시간 축을 조정한다.

[부록 10] 플랑크 상수 측정실험

흑체의 온도를 바꾸어가며 특정 파장의 빛의 세기를 측정해서 플랑크 상수를 얻는 실험을 설계하였는데, 온도를 바꿀 수 있는 흑체로는 3V 꼬마전구를, 특정 파장의 빛의 세기를 측정하는 도구로는 적외선 광다이오드(KODENSHI, HPI-6FFR4)를 사용하였다. 그리고 이들을 연결하고 제어하기 위해서 아두이노 보드를 이용하였다.

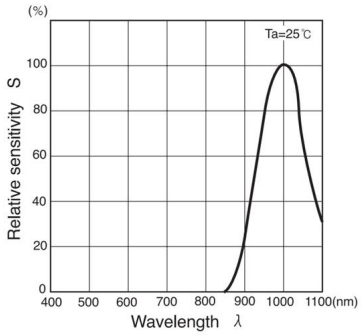


그림 1. 적외선 광다이오드의 파장별 감도. 그래프는 HPI-6FFR4의 데이터시트에서 발췌한 것으로 이 광다이오드는 1000 nm의 빛에 가장 민감하게 반응한다(KODENSHI, HPI-6FFR4 Datasheet).

실험에 사용한 광다이오드(HPI-6FFR4)의 데이터시트를 참고하면 그림 1에서 보는 것과 같이 대략 1000 nm에 해당하는 적외선에 가장 잘 반응한다. 3V 꼬마전구가 빛을 낼 때는 주황색에 가까운 빛을 내는데, 이는 대략 1500 K 근처의 흑체가 내는 빛이다. 흑체복사 곡선의 에너지 밀도 u를 나타내는 식은

$$u(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \qquad \text{식 (1)}$$

인데, 여기에서 λ는 파장, T는 온도, h는 플랑크 상수, c는 빛의 속도, k_B는 볼츠만 상수이다. 이 식에 흑체의 온도 T를 1500 K으로, 파장 λ를 1000 nm로 대입하면 분모에 있는 $\exp\left[hc/\lambda k_B T\right]$의 값은 약 14700으로 1보다 매우 크므로 위 식은 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$u(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} e^{-\frac{hc}{\lambda k_B T}} \qquad \text{식 (2)}$$

이 식은 흑체복사를 설명하는 빈의 공식과 같지만 이 실험에서는 빈의 공식도 성립하는 파장과 온도 영역에서 실험하기 때문에 식 (2)와 같은 식을 써도 무방하다. 그림 1에서와 같이 적외선 광다이오드가 측정할 수 있는 범위는 약 900~1100 nm이며, 이는 고정되어 있는 범위이므로 적외선 광다이오드가 흑체에서 나오는 빛을 측정한 에너지의 세기 E는 다음 식과 같다.

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} u(\lambda, T) d\lambda \approx \frac{2hc^2}{\lambda} e^{-\frac{hc}{\lambda k_B T}} \Delta\lambda \qquad \text{식 (3)}$$

여기에서 λ_1과 λ_2는 광다이오드가 측정하는 범위인 약 900~1100 nm를 의미하며, $\Delta\lambda$는 이 측정범위의 폭이다. 이 값들은 고정되어 있는 상수들로 취급할 수 있으므로 식 (3)의 양변에 로그를 취하면

$$\ln E = -h \frac{c}{\lambda k_B} \frac{1}{T} + const. \qquad \text{식 (4)}$$

이다. 만약, 광다이오드가 1000 nm 근처의 빛의 세기에 대해서 선형으로 비례하는 신호를 내보낸다면 가로축을 $\frac{c}{\lambda k_B}\frac{1}{T}$로 하고 세로축을 $\ln E$로 그래프를 그렸을 때에 기울기의 절댓값이 플랑크 상수에 해당한다.

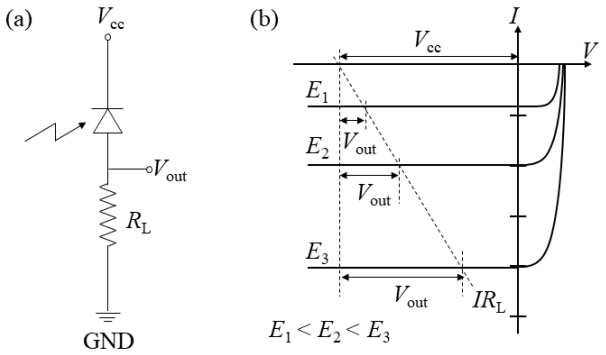


그림 2. 광다이오드 연결법과 출력신호 그래프. (a) 광다이오드에 저항을 직렬로 연결하고 역전압을 걸어주면 (b) 광전도 모드가 되어 빛의 세기에 대해 출력신호가 선형으로 변한다.

적외선 광다이오드는 그림 2(a)와 같이 연결하는데, 역전압 V_{cc}를 가하고 저항 R_L을 직렬로 연결하면 광전도 모드(Photoconductive mode)가 된다 (Bonefačić & Blecich, 2015; Saleh & Teich, 1991). 실험에서 사용한 역전압 V_{cc}의 값은 아두이노에서 공급할 수 있는 전압의 값 중 하나인 5 V이며, 광다이오드에 직렬로 연결한 저항 R_L의 크기는 50 kΩ이다. 광전도 모드에서 빛을 비추면 그림 2(b)처럼 빛의 세기 E_1, E_2, E_3의 크기에 비례하여 V_{out}을 내보낸다(SHARP, 1999). 따라서 그림 2(a)와 같이 광다이오드를 연결하면 식 (4)는 다음과 같이 고칠 수 있다.

$$\ln V_{out} = -h\frac{c}{\lambda k_B}\frac{1}{T} + const. \qquad \text{식 (5)}$$

광다이오드가 포함된 회로에 의해서 측정되는 V_{out}은 아두이노의 아날로그 인(Analog In) 채널에서 측정할 수 있다. 그래프의 가로축을 그리기 위해서는 전구 필라멘트의 온도 T를 알아야 한다. 필라멘트는 유리로 둘러싸여 있으므로 온도를 접촉식 온도계로 측정할 수 없다. 비접촉식 온도계인 열화상 카메라를 이용하더라도 꼬마전구의 필라멘트는 크기가 매우 작아서 열화상 카메라에서는 온도 측정이 불가능하다. 하지만 꼬마전구가 연결된 회로에서 전압과 전류를 측정하는 것은 가능하기 때문에 필라멘트의 온도는 온도-저항 관계식을 이용하여 알아낸다(이미섭과 김상년, 2014; Ojanen et. al., 2012).

금속의 저항 R과 온도 T의 관계는 상온 T_0에서 저항을 R_0라고 했을 때에 $R = R_0\{1+\alpha(T-T_0)\}$를 만족한다. 그러나 이 식은 저항의 온도계수 α의 값이 온도 범위에 따라 다르다는 단점이 있다. 필라멘트의 재료인 텅스텐의 α의 값은 상온에서 약 4.5×10^{-3} K^{-1}인데(Halliday et. al., 2001; Serway & Jewett, 2006), 이 값은 3V 꼬마전구가 켜졌을 때의 온도인 1500 K 근처에서는 사용할 수 없다. 그림 3은 Jones(1926)가 측정한 텅스텐의 저항과 온도 관계 데이터를 이용하여 그래프를 그린 것인데, $R = R_0\{1+\alpha(T-T_0)\}$ 공식은 온도가 1500 K 근처가 되면 문헌의 값과 일치하지 않게 된다. 그 이유는 R_0의 값이 상온일 때 측정한 값이기 때문이다. R_0의 값을 고온에서 측정하면 되겠지만 R_0의 값은 꼬마전구를 상온에 둔 상태로 디지털 멀티미터로 측정해야 한다. 왜냐하면 전구에 전류가 흐르는 동안에는 디지털 멀티미터로 저항을 측정할 수도 없고 전구를 1500 K인 곳에도 둘 수 없기 때문이다.

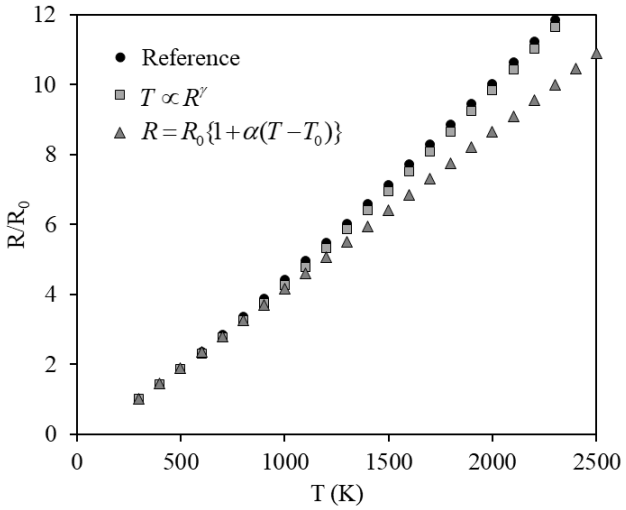


그림 3. 텅스텐의 저항과 온도의 관계. 저항과 온도는 선형 관계 보다는 비선형 관계를 따르는 것으로 보인다.

이렇게 온도와 저항의 선형 관계식을 쓸 수 없다면 온도와 저항이 비선형 관계라 가정한 $T \propto R^{\gamma}$(γ는 상수)을 이용하여 필라멘트의 온도를 알아내야 한다. 그림 3에서 $T \propto R^{\gamma}$을 이용한 식은 문헌의 값과 거의 일치하는 것을 알 수 있고, $T \propto R^{\gamma}$이 성립한다고 가정했을 때 온도-저항 관계식은 다음과 같다.

$$T = \left(\frac{R}{R_0}\right)^{\gamma} T_0 \qquad \text{식 (6)}$$

온도-저항 식인 식 (6)을 사용하기 위해서는 저항 R과 γ를 알아야 한다. 저항 R을 구하기 위해 그림 4와 같이 꼬마전구를 가변저항 R_P와 직렬로 연결하고 아두이노 보드에서 3.3 V를 가한다. 그리고 전위 V_1과 V_2를 아두이노 보드의 아날로그 인에서 측정한다. 아두이노 보드에서는 3.3 V를 공급하기에 V_1은 3.3 V여야 하지만 실제로 측정해보면 V_1에서는 3.3 V와 다른 값이 측정되어서 V_1을 따로 측정하였다. 실험에 사용한 가변저항은 0 Ω에서 25 Ω까지 조절할 수 있는 1 W짜리 가변저항(TE Connectivity, TW1250KA)이다. 스위치를 켜고 전위 V_1과 V_2를 측정하면 불이 켜졌을 때 꼬마전구의 전압은 $V_1 - V_2$이고 가변저항의 전압은 V_2이다. 필라멘트에 흐르는 전류 I는 V_2/R_P로 계산할 수 있다. 그리고 필라멘트의 저항 R은

$(V_1 - V_2)/I$가 된다. 가변저항의 크기에 따라 꼬마전구의 밝기가 달라지고 필라멘트의 온도가 달라지므로 필라멘트의 저항 R은 가변저항의 크기에 따라 달라진다.

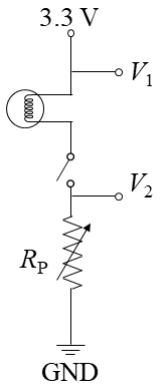


그림 4. 꼬마전구와 가변저항의 연결

상수인 γ를 측정하기 위해서 필라멘트의 소비전력 P와 필라멘트가 방출하는 빛에너지의 양이 비례한다고 가정한다(Bloomfield, 2008; Brizuela & Juan, 1996; Crandall & Delord, 1983). 그러면 슈테판-볼츠만 법칙에 의해 $P \propto \sigma T^4$(σ는 슈테판-볼츠만 상수)이고, $T \propto R^{\gamma}$이므로

$$\ln P = 4\gamma \ln R + const. \qquad \text{식 (7)}$$

가 성립한다. 가변저항의 값을 바꾸어가며 저항 R과 전력 $P(=I^2R)$를 측정하면 $\ln P - \ln R$ 그래프에서 기울기의 값인 4γ로 γ의 값을 얻을 수 있다. 그리고 이렇게 구한 γ와 R의 값을 식 (6)에 대입하면 필라멘트의 온도 T를 구할 수 있다. 하지만 가변저항의 값을 바꾸어가며 측정하는 과정을 한 번 거쳐야 γ의 값을 얻을 수 있기 때문에 필라멘트의 온도 T가 필라멘트의 저항 R을 측정하자마자 구해지는 것은 아니다.

지금까지 설명한 것은 꼬마전구의 필라멘트와 적외선 광다이오드에 적용되는 물리학적 내용이며, 이 둘을 실제로 아두이노 보드에 어떻게 연결하는지 그림 5에 나타내었다.

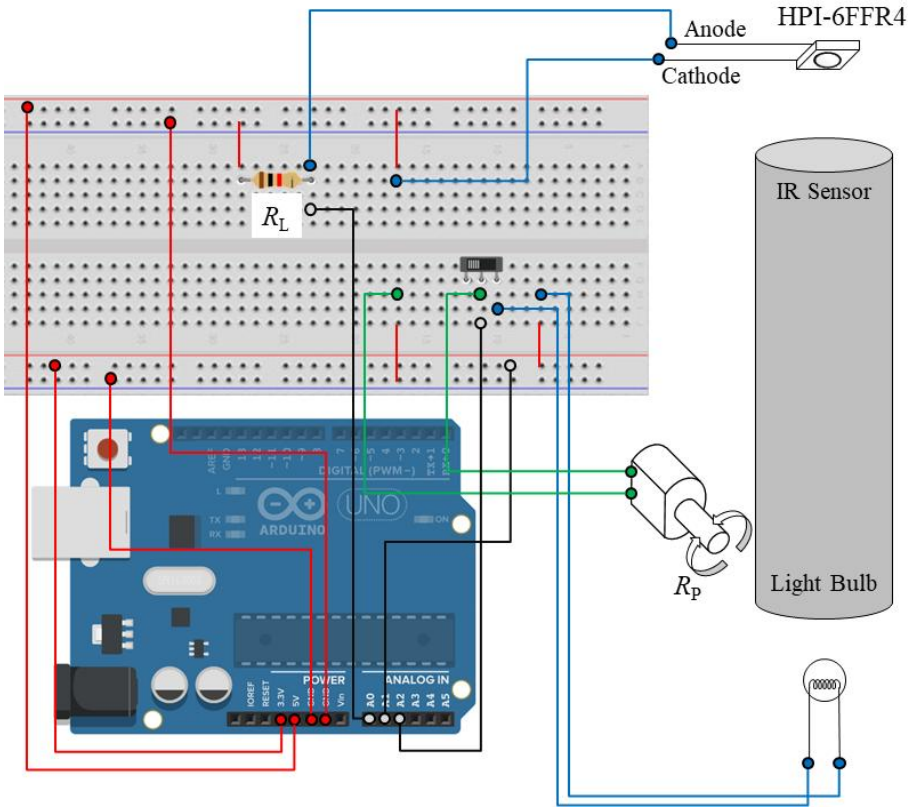


그림 5. 꼬마전구, 광다이오드, 아두이노 보드 연결 모식도. 아두이노 보드에서 3.3 V는 꼬마전구에, 5 V는 광다이오드에 가한다. 아날로그 인에서 광다이오드의 출력값 V_{out}은 A0로, 전구가 연결된 회로의 V_1, V_2는 각각 A1, A2로 입력받는다.

아두이노 보드에서 측정하는 신호는 그림 2(a)의 V_{out}과 그림 4의 V_1, V_2이며 각각 아날로그 인의 A0, A1, A2에서 측정한다. 아날로그 인에서 측정한 신호는 엑셀 스프레드시트에서 처리할 수 있는 형태로 출력되게 하였다. 실행 코드와 실행 예시는 그림 6에 나와 있는데, 아두이노 보드는 5V를 1024단계(0~1023)로 나누어 출력하므로 스프레드시트에서는 출력 값을 전압의 단위로 바꾸어준다. 그리고 엑셀 스프레드시트에서 식 (5), (6), (7)을 이용해 데이터를 처리하고 그래프를 그려 γ를 알아내고 플랑크 상수의 값을 얻는다.

실행 코드

h-measurements

```
#define IRRX A0 // HPI-6FFR4
#define V_1 A1  // Light Bulb
#define V_2 A2  // Potentiometer

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  int r = analogRead(IRRX);
  int a = analogRead(V_1);
  int b = analogRead(V_2);

  Serial.print(r);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(a);
  Serial.print("\t");
  Serial.println(b);

  delay(100);
}
```

실행 예시

509	769	268
510	768	268
508	768	268
508	769	268
507	768	268
507	768	268
507	768	268
507	768	268
506	768	267
505	768	267
507	768	268
507	768	268
506	768	267
505	768	267

그림 6. 실험에 사용한 실행 코드와 실행 예시

적외선 광다이오드에 외부의 빛은 차단되고 꼬마전구의 빛만 들어갈 수 있어야 필라멘트를 흑체로 간주할 수 있다. 그래서 아크릴 거울을 말아서 원통으로 만들고 양 끝에 꼬마전구와 광다이오드가 위치하게 하여 외부의 빛을 차단하였다. 꼬마전구와 광다이오드를 고정하는 소켓은 3D프린터를 이용해 만들었다. 이를 그림 7에 나타냈는데, 작은 그림들은 각각 광다이오드와 꼬마전구를 원통의 반대쪽에서 본 그림이다.

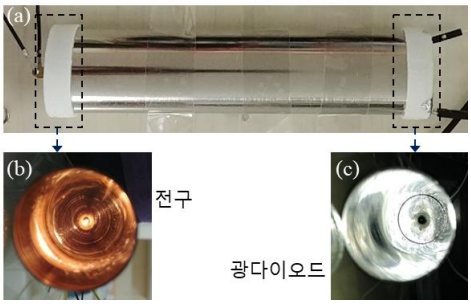


그림 7. 광다이오드, 전구, 원통을 결합하여 만든 흑체복사 실험장치. (a) 결합된 상태에서 본 외관. 원통의 다른 쪽에서 본 (b) 전구가 결합되고 불이 켜진 모습, (c) 광다이오드가 결합된 모습.

실험을 할 때에는 가변저항의 크기를 3 Ω에서 15 Ω 범위로 약 1 Ω 정도씩 바꾸어가며 측정값 V_{out}, V_1, V_2를 얻어서 전구의 저항, 전력 등을 계산하는 과정을 스프레드시트에서 처리했다. 그렇게 하면 식 (7)을 통해 γ의 값을 구할 수 있고, γ의 값을 구하면 식(6)을 이용해 각각의 시행에서 필라멘트의 온도를 구할 수 있으며, 필라멘트의 온도와 광다이오드가 연결된 회로에서 측정한 V_{out}을 식 (5)에 적용하여 플랑크 상수를 구할 수 있게 된다.

[부록 11] 중력가속도 측정실험 안내서

자유 낙하하는 물체를 촬영해서 중력가속도 측정하기

- 목표 : 디지털 카메라의 슬로우 모션 촬영 기능을 이용하여 짧은 시간 간격으로 물체의 운동을 촬영하고 트래커 프로그램으로 물체의 위치-시간 데이터를 얻어낸다. 그리고 위치-시간 데이터를 분석하여 중력가속도의 크기가 9.8 m/s^2인 것을 확인하다.

- 준비물 : 디지털 카메라(셔터속도 조절 기능이 있는 카메라), 삼각대, 모눈이 그려진 판, 납작한 원통형 추, 실, 자, 노트북

- 실험준비 : 자유 낙하하는 물체의 운동을 촬영하기 위해 다음 그림 1과 같이 장비를 설치한다. 카메라와 모눈 사이의 거리는 1 m이고 추는 실에 매달아 초기 위치에서 흔들리지 않도록 잡는다. 카메라는 낙하하는 추의 모습이 충분히 촬영될 수 있도록 위치를 잡고 삼각대에 고정한다.

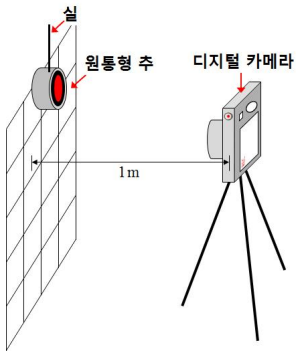


그림 1. 모눈, 추, 카메라의 배치

◆ 1단계 : 실험수행

1-1. 카메라의 녹화버튼을 누르고 추를 떨어뜨린다.

1-2. 동영상 화면에서 낙하하는 물체가 명확히 보이는가?

1-3. 카메라의 모드를 슬로우 모션 촬영으로 바꾸고, 촬영 속도와 셔터 스피드를 120 fps, 1/125 s로 설정한다. 그리고 녹화 버튼을 누르고 추를 낙하시킨다. (설정 방법은 카메라 매뉴얼을 참고한다.)

1-4. 이번에는 촬영 속도와 셔터 스피드를 120 fps, 1/1000 s로 설정한다. 그리고 녹화 버튼을 누르고 추를 낙하시킨다.

1-5. 앞의 1번과 2번 과정에서 촬영한 영상을 한 프레임씩 넘겨가며 관찰한다. 두 영상에서 촬영된 추의 모습은 어떤 차이점이 있는가?

1-6. 촬영 속도를 120 fps로 설정한 동영상에서 자유 낙하 운동을 분석할 때 사용할 수 있는 프레임의 개수는 몇 장인가? 왜 그 정도의 프레임만 사용 가능한가? (추의 낙하 거리와 시간을 고려하여 답하시오.)

1-7. 촬영 속도와 셔터 스피드를 400 fps, 1/1000 s로 설정한다. 그리고 녹화 버튼을 누르고 추를 낙하시킨다. 사용할 수 있는 프레임의 개수는 대략 몇 장인가? 왜 그 정도의 프레임이 사용 가능한가?

1-8. 제공된 트래커 매뉴얼을 참고하여 자유 낙하하는 물체의 위치-시간 데이터를 얻고, 2차식으로 추세선을 그려 중력가속도를 얻어낸다.

1-9. 실험을 5회 반복하여 중력가속도를 얻어서 평균을 구하고 95% 신뢰 구간을 계산한다.

1-10. 측정한 중력가속도는 알려진 값과 비교했을 때 어떤 특징이 있는가?

◆ 2단계 : 오차의 원인 생각하기

2-1. 측정된 값에 나타난 오차의 원인은 무엇일까?

2-2. 생각해낸 오차의 원인이 맞는지 확인하는 방법을 고안해보시오.

-2단계를 끝내기 전까지 다음 페이지로 넘기지 마시오.

◆ 3단계 : 오차의 원인 확인하기

3-1. 1단계 실험에서 사용한 추와 두께가 다른 추를 이용하여 실험을 반복하고, 중력가속도의 크기를 구해본다. (또는 모눈으로부터 추를 떨어뜨려서 실험해본다.)

추의 두께	측정한 중력가속도	오차율

3-2. 이 실험에 포함된 오차를 제거하거나 보정하는 방법을 생각하고 실험 데이터를 보정하시오.

[부록 12] 공기의 유전율 측정실험 안내서

도체판 축전기를 이용하여 공기의 유전율 측정하기

- 목표 : 구리판 두 개로 만든 평행판 축전기로 RC회로를 구성하여 시간상수를 측정하고 평행판 축전기의 전기용량을 알아낸다. 그리고 평행판 축전기의 기하학적 구조를 측정하여 축전기 공식을 통해 공기의 유전율을 계산한다.

- 준비물 : 브레드 보드, 함수발생기, 오실로스코프(Protek 6810C), 저항 1kΩ 1개, 구리판 2개, 집게전선 2개, BNC-클립형 케이블 3개, 자

- 실험준비 : 그림과 같이 저항 1kΩ, 도체판 축전기, 함수발생기를 직렬로 연결하고 오실로스코프의 채널1은 함수발생기에, 채널2는 축전기에 병렬로 연결한다. 함수발생기의 파형은 사각파, 주파수는 1kHz로 맞춘다.

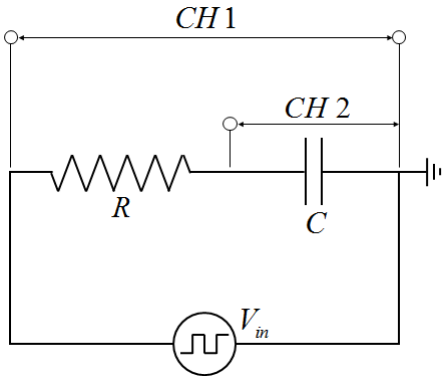


그림 1. RC회로

◆ 1단계 : 실험수행

1-1. RC회로의 시간상수를 측정하기 위하여 오실로스코프의 상승시간 측정기능을 사용할 것이다. 상승시간이란 진폭이 10%에서 90%가 될 때까지 상승하는 시간이다(그림 2).

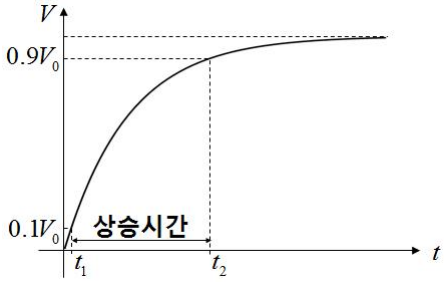


그림 2. 상승 시간($t_2 - t_1$)은 진폭이 10%에서 90%로 상승하는 데 걸리는 시간이다.

상승시간($t_2 - t_1$)과 RC회로의 시간상수와의 관계를 유도하시오.

1-2. 도체판의 간격을 1 mm로 만들고 채널 2에 입력되는 신호의 상승시간을 측정하고, 시간상수 및 축전기의 전기용량을 계산한다.

시행	상승시간 (ns)	시간상수 (ns)	전기용량 (pF)
1 회			
2 회			
3 회			
4 회			
5 회			
. . .			

1-3. 구리판의 가로, 세로 길이를 측정한다. 그리고 평행 도체판 축전기의 전기용량 공식과 앞에서 구한 전기용량을 이용하여 공기의 유전율을 계산한다. (측정값의 평균과 불확도를 계산한다.)

도체판 간격	공기의 유전율 ($C^2/N{\cdot}m^2$)
1 mm	

1-4. 공기의 유전율은 대략 진공의 유전율과 같다. 알려져 있는 값은 8.85×10^{-12} $C^2/N{\cdot}m^2$이다. 측정한 값을 알려진 값과 비교했을 때 어떤 특징이 있는가?

◆ 2단계 : 오차의 원인 생각하기

2-1. 측정된 값에 나타난 오차의 원인은 무엇일까?

2-2. 생각해낸 오차의 원인이 맞는지 확인하는 방법을 고안해보시오.

-2단계를 끝내기 전까지 다음 페이지로 넘기지 마시오.

◆ 3단계 : 오차의 원인 확인하기

3-1. 1단계 실험에서 사용한 평행 도체판의 간격을 바꾸어서 실험을 반복하고, 공기 유전율의 크기를 구해본다.

도체판의 간격	측정한 공기 유전율	오차율

3-2. 이 실험에 포함된 오차를 제거하거나 보정하는 방법을 생각하고 실험 데이터를 보정하시오.

Abstract

Effects of Exploring Systematic Errors on Teachers' Perception of Experimental Error and Laboratory Instructions

Daehyun Park
Physics Education Major
Department of Science Education
The Graduate School
Seoul National University

It is very difficult to obtain the conventional true value of textbooks in inquiry experiments of elementary and secondary schools. Teachers consider that the experimental error is very large due to the lack of experimental equipment and environment, and immaturity of experiment. And teachers show little interest in the cause and correction of errors. However, efforts to find the cause of the error and reduce the error are important in understanding the characteristics of the experimental method and the experimental tools to make the mastery of the experiment, and for the experimenter to understand the nature of science and background theory related to the

experiment.

According to previous studies, laboratory instruction is recognized as an effective teaching method to achieve the goal of scientific education, which is to improve scientific inquiry ability. However, in the school, the frequency of laboratory instructions is small, and the laboratory instructions are focused on acquiring knowledge. The reason why laboratory instructions are not conducted well in school is because of the environmental factors that make experiments difficult and the difficulties experienced by teachers in laboratory instructions. According to previous studies on laboratory instructions, when there is an error in the experimental results, teachers think that, rather than finding the cause in detail, the error occurs because the experimental equipments are poor and students are unskilled in experimenting. However, if the cause of the error is regarded only as the experimental environment and the inexperienced students, the laboratory instruction loses meaning without achieving the original goal of improving scientific inquiry ability.

In this study, we interviewed physics teachers working in science high schools to see if there were the same difficulties in laboratory instructions even in schools with relatively good experimental environments. In addition, we analyzed the perception of experimental error and laboratory instructions. First, even if the teachers followed the experiment according to the textbook, the experiment result was imprecise and inaccurate, and the problem was solved by using precise experimental tools. In the laboratory instructions, even if students found the cause of the error, the process of correcting the error did not proceed. In some cases, the cause of the error could not be found in the experiment using the experimental kit. And teachers were having difficulty about correcting systematic errors. The

primary goal of secondary school physics experiment is to compare the experimental results with theories to confirm the validity of the theory and to improve students' scientific inquiry ability. However, there are systematic errors that are not revealed in the experimental tools and process, and it is difficult to achieve this goal without correcting them.

We investigated whether teachers perceived the importance of error correction and whether there was a change in attitude about conducting laboratory instructions, through the activities of understanding and correcting the causes of systematic errors. There are several types of experimental errors, random errors or careless errors are related to the individual's experimental skill, and can be resolved through long experience or precise experimental tools. However, compared to the random errors, the systematic error is a systematically inherent in the experimental apparatus, so it is important to understand the operation of the experimental tool rather than the experimenter's experience. In addition, understanding of systematic errors, rather than random errors, can be effective in inducing changes in teachers' attitudes of laboratory instructions by recognizing the role of errors in experiment and the importance of error correction.

In order to find an experimental topic that would be effective for teachers to understand systematic errors, we examined the experimental tools contained in the physics experiment textbooks, and found experiments that are likely to cause systematic errors related to the experimental tools. Since it is difficult to find and eliminate systematic errors in all experiments, and the elimination of systematic errors itself is not the goal of this study, we chose an experimental topic that facilitates the process of discovering, analyzing, and

correcting systematic errors. Each topic was selected from mechanics, electromagnetics, light and wave, and modern physics. we designed physics experiments for exploring systematic errors using smart measuring instruments, open source hardware, and general-purpose measuring instruments, and asked teachers to perform these experiments.

Three teachers participated in this study, taking charge of physics at science high school. Participants in the study had teaching careers of 20 years or more, 10 years or more, and less than 5 years, respectively. We could also classify the causes of systematic errors according to the type of experimental tools used when designing experiments using smart devices, open source, and general-purpose devices. In the experiments using smart devices, the operating principle of the devices caused the systematic errors. In the experiments using general-purpose equipments or open source hardwares, the physical quantity of the experimental tools used as an ideal condition was the cause of systematic error.

After participants performed these experiments, interviews were conducted to find out what changes occurred in the perception of errors. Participants in this study changed their existing notion that the occurrence of errors was inevitable in the experiments through the exploring systematic errors. They also said that the understanding of systematic errors influenced to consider the tools used in the laboratory instructions. And they expressed that it gave an educational meaning emphasizing the importance of understanding and correcting errors.

In this study, we found that the systematic errors can be largely divided into two types according to the experimental apparatus, due to the operating principle of the apparatus itself and due to the

limitation of the experimental environment. Based on these results, we presented in the flowchart the process of finding the cause of systematic errors and correcting the measured values.

The study is summarized as follows. Teachers generally do not doubt occurrence of errors in experiments, they think that it is difficult to correct the errors. However, when the experimental results deviate from the theory, if the error analysis is neglected, the laboratory instructions turns away from the nature of science. Therefore, teachers' activities are needed to explore the nature of error and recognize its importance. Although the random error is not systematic, since the systematic error is inherent in the device itself, it is easy to systematically find the cause of the error and analyze the effect. Therefore, we designed a physics experiments aimed at finding, analyzing, and understanding the systematic errors using appropriate experimental topics and devices, and let teachers perform them. After that, we interviewed to see how teachers' perceptions of experimental errors have changed. And we found that experience of these physic experiments can also affect the teachers' perception of the laboratory instructions.

We expect that, if the results of this study are expanded and applied to in-service training programs for experiments, teachers will be able to recognize the relationship between theory and experiment, and it will help students understand the nature of science through laboratory instructions.

keywords : Systematic errors, Teachers, Experimental errors, Laboratory instructions, Physics experiments, Experimental tools
Student Number : 2011-31081