



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](#)

博士學位論文

초등학교 실험수업을 위한
새로운 전자석 개발과 특성 연구

濟州大學校 大學院

科學教育學部
初等科學教育專攻

金 錫 柱

2016 年 8 月

초등학교 실험수업을 위한 새로운 전자석 개발과 특성 연구

指導教授 玄 東 杰

金 錫 柱

이 論文을 教育學 博士學位 論文으로 提出함

2016年 6月

金錫柱의 教育學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ (인)

委 員 _____ (인)

委 員 _____ (인)

委 員 _____ (인)

委 員 _____ (인)

濟州大學校 大學院

2016 年 6 月

A Study on Development of New Electromagnet
and its Characteristics for Elementary-school
Science Classes

Seok-Ju Kim

(Supervised by professor Donggeul Hyun)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Doctor of Philosophy in Education

2016. 6.

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Dong-Geul Hyun, Prof. Department of Elementary Science Education

Date

Department of Elementary Science Education
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

I. 서 론	1
1. 연구의 필요성 및 목적	1
2. 연구 내용	4
II. 이론적 배경	5
1. 자기의 근원 및 물질의 자기적 성질	5
2. 전자석의 자기장	10
3. 전자석의 자기력	12
4. 자기이력곡선	13
5. 초등학교 과학과 교육과정의 변천에 따른 전자석 관련 지도 내용 분석	14
6. 선행연구	26
7. 본 연구의 범위	28
III. 연구 절차 및 방법	29
1. 연구 절차	29
2. 연구 방법	29
가. 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들의 원인 분석	29
나. 새로운 전자석의 개발	34
다. 새로운 전자석의 특성 분석	35

IV. 연구 결과 및 논의	39
1. 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들의 원인 분석	39
가. 전류의 크기와 전자석의 자기력 관계	39
나. 고리전선 수와 전자석의 자기력 관계	52
2. 새로운 전자석 개발	63
가. 새로운 전자석 개발 배경	63
나. 새로운 전자석의 개발	65
3. 새로운 전자석의 특성 분석	70
가. 변인에 따른 전자석의 자기력 분석	70
나. 새로운 전자석의 전자기적 특성	78
다. 전자석의 잔류자기장 비교	91
V. 결론 및 제언	94
1. 결론	94
2. 제언	95
참고문헌	97
ABSTRACT	101

표 목차

<표 II-1> 제3차 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도 내용	15
<표 II-2> 제4차 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도 내용	16
<표 II-3> 제5차 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도 내용	18
<표 II-4> 제6차 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도 내용	19
<표 II-5> 제7차 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도 내용	21
<표 II-6> 2007 개정 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도 내용	22
<표 III-1> 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들의 원인 분석을 위한 실험 목록	30
<표 IV-1> 전자석 제작관련 요소들에 대한 기존 전자석과 개발된 전자석의 특징	93

그림 목차

[그림 II-1] 한 원자 내의 전자의 궤도 자기쌍극자 모멘트 m_{orb} , 전자의 스핀 자기쌍극자모멘트 m_s , 그리고 원자 자기쌍극자 모멘트 m_i	6
[그림 II-2] 외부자기장 B_{ext} 가 없을 때 물질의 자기화 M 과 내부자기장 B_{int} , 그리고 외부자기장 B_{ext} 가 있을 때 물질의 자기화 M 과 내부자기장 B_{int}	9
[그림 II-3] 길이가 L , 고리전선 수가 N 인 솔레노이드의 고리전선에 전류 I 가 일정하게 흐를 때 솔레노이드 내부의 자기장 B_0	10
[그림 II-4] 전류가 흐르지 않는 전자석과 일정한 전류가 흐르는 전자석의 자기장 분포	11
[그림 II-5] 전자석과 물체의 상호작용	13
[그림 II-6] 자기이력곡선	14
[그림 III-1] 연구 절차	29
[그림 III-2] 직렬연결된 1.5 V 전지 2개, 3.0 V 0.25 A 전구, 스위치, 집게전선, 고리전선 수가 100인 전자석 등으로 구성된 전기회로	32
[그림 IV-1] 고리전선 수 m 이 $m=100$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지 수 n 의 따른 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{n,100}$	40
[그림 IV-2] 고리전선 수 m 이 $m=100$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지 수 n 에 따른 전자석의 고리전선에 흐르는 전류 $I_{n,100}$ 와 전지의 합성 내부저항 $r_{bn,100}$	42
[그림 IV-3] 고리전선 수 m 이 $m=100$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n 에 따른 부하저항 $R_{Ln,100}$ 과 전류 $I_{n,100}$	45
[그림 IV-4] 고리전선 수 m 이 $m=100$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n 에 따른 전자석의 자기장 $B_{En,100}$ 와 전류 $I_{n,100}$	46
[그림 IV-5] 전자석의 전기회로에 흐르는 전류 $I_{n,100}$ 에 따른 전자석의 자기장 $B_{En,100}$, 그리고 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{n,100}$	48

[그림 IV-6] 고리전선 수 m 이 $m=100$ 인 전자석의 전기회로에 직류전원장치를 사용하여 전류 I 를 흘려 보냈을 때 전자석의 자기장 $B_{E,m=100}$ 와 전자석에 붙는 클립 수 $N_{m=100}$	50
[그림 IV-7] 고리전선 수 m 이 $m=100$ 인 전자석의 자기장에 따른 전자석에 붙는 클립 수 $N_{m=100}$	50
[그림 IV-8] 고리전선 수 m 에 따른 전자석에 붙는 클립 수 $N_{n,mB}$	53
[그림 IV-9] 고리전선 수 m 에 따른 전기회로의 전류 $I_{n,m}$ 와 전지의 합성내부저항 $r_{bn,m}$	54
[그림 IV-10] 고리전선 수 m 에 따른 전자석 전기회로의 부하저항 $R_{L_{n,m}}$ 과 전류 $I_{n,m}$	57
[그림 IV-11] 고리전선 수 m 에 따른 고리전선의 저항 R_{Wm} 과 전류 $I_{n,m}$	59
[그림 IV-12] 고리전선 수 m 에 따른 전자석의 자기장 $B_{E_{n,m}}$ 과 전류 $I_{n,m}$ 관계	60
[그림 IV-13] 길이가 170 cm, 직경이 0.5 mm 에나멜선에 전류 5 A 를 60초간 흘려보냈을 때 에나멜선의 온도 변화	65
[그림 IV-14] 전산볼트	66
[그림 IV-15] 전선 끝 피복을 2 cm 정도 벗긴 모습	66
[그림 IV-16] 전선 끝 피복을 2 cm 정도 벗긴 후 납땀한 모습	66
[그림 IV-17] 길이가 170 cm인 비닐전선과 에나멜선에 전류 5 A 를 60초간 흘려 보냈을 때 온도 변화	67
[그림 IV-18] 전산볼트, 비닐전선, 그리고 빵판을 이용한 새로운 전자석 제작 과정	69
[그림 IV-19] 직경 \varnothing 이 $\varnothing=9.3$ mm인 전산볼트, 고리전선 수 m 이 $m=30$, 고리전선 길이 L 이 $L=120$ mm가 되도록 제작한 전자석의 전류 I 에 따른 전자석의 자기장 $B_{EI,m30}$ 와 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립의 수 $N_{I,m30}$	71

[그림 IV-20] 직경 ϕ 이 $\phi = 9.3$ mm인 전산볼트, 고리전선 길이 L 이 $L = 120$ mm가 되도록 제작한 전자석에 전류 I 가 5 A가 흐를 때 고리전선 수 m 에 따른 전자석의 자기장 $B_{EB,m}$ 와 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{B,m}$ 73

[그림 IV-21] 직경 ϕ 이 $\phi = 9.3$ mm인 전산볼트에 고리전선 수 m 이 $m = 30$, 고리전선 길이 L 이 $L = 120$ mm가 되도록 제작한 전자석의 전류 I 에 따른 전자석의 자기장 $B_{EI,m30,유무}$ 과 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{I,m30,유무}$ 75

[그림 IV-22] 전산볼트에 고리전선 수 m 이 $m = 30$, 고리전선 길이 L 이 $L = 120$ mm가 되도록 제작한 전자석에 전류 I 를 1 A에서 6 A범위로 1 A씩 크게 흘려 보냈을 때 철심 단면적 A 에 따른 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{I,m30,A}$ 77

[그림 IV-23] 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n_S 에 따른 고리전선 수 m 이 $m = 30$ 인 전자석이 붙여 끌어올리는 클립의 수 $N_{nS,30}$ 과 전류 $I_{nS,30}$ 79

[그림 IV-24] 고리전선 수 m 이 $m = 30$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n_S 에 따른 전지들의 합성내부저항 $r_{bnS,30}$, 전기회로의 부하저항 $R_{LnS,30}$, 전류 $I_{nS,30}$ 81

[그림 IV-25] 전자석의 전기회로에 병렬연결한 전지의 수 n_P 에 따른 고리전선 수 m 이 $m = 30$ 인 전자석이 붙여 끌어올리는 클립의 수 $N_{nP,30}$ 과 전류 $I_{nP,30}$ 82

[그림 IV-26] 고리전선 수 m 이 $m = 30$ 인 전자석의 전기회로에 병렬연결한 전지의 수 n_P 에 따른 전지들의 합성내부저항 $r_{bnP,30}$, 전기회로의 부하저항 $R_{LnP,30}$, 전류 $I_{nP,30}$ 84

[그림 IV-27] 고리전선 수 m 이 $m = 30$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결 그리고 병렬연결한 전지의 수 n 에 따른 전자석의 자기장 $B_{En,30}$ 의 변화와 전류 $I_{n,30}$ 85

[그림 IV-28] 고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n_s 이 $n_s = 3$ 일 때 전자석이 클립들을 붙여 끌어올리는 실험 사진	86
[그림 IV-29] 고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석의 전기회로에 병렬연결한 전지의 수 n_p 이 $n_p = 3$ 일 때 전자석이 클립들을 붙여 끌어올리는 실험 사진	86
[그림 IV-30] 전기회로의 전류 $I_{n,30}$ 에 따른 전자석이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{n,30}$ 과 전자석의 자기장 $B_{En,30}$	88
[그림 IV-31] 전자석의 자기장 $B_{En,30}$ 에 따른 전자석이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{n,30}$	89
[그림 IV-32] 고리전선 수 m 에 따른 전자석의 자기장 $B_{E1,m}$ 와 전기회로의 전류 $I_{1,m}$	90
[그림 IV-33] 고리전선 수 m 에 따른 전자석들이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{1,m}$ 과 전자석의 자기장 $B_{E1,m}$	90
[그림 IV-34] 개발된 전자석과 기존 전자석에 일정한 자기장을 유도하고 난후, 고리전선에 흐르는 전류를 차단했을 때 잔류자기장 $B_{r, 전산볼트}$ 와 $B_{r, 철못}$	92

<국문초록>

초등학교 실험수업을 위한 새로운 전자석 개발과 특성 연구

김 석 주

제주대학교 대학원 과학교육학부 초등과학교육전공

지도교수 현 동 곁

전자석이 초등학교 과학과 교육과정에 도입된 이래 수차례의 초등학교 과학과 교육과정의 개편이 있었음에도, 전자석 관련 실험 수업에서 비슷한 유형이 문제가 반복하여 발생한다는 연구 결과들이 보고 되어 왔다. 이러한 문제들을 정리하면 학생들이 전자석을 만들기가 어려워 많은 시간이 소요되어 실험 수업의 운영에 지장을 초래해 왔고, 그 실험 결과가 이론적으로 예상한 바와 다르다는 것들이다. 또한, 전자석 관련 실험에서 참고할만한 실험정보가 없을 뿐만 아니라 교사용 지도서들과 문헌들에 잘못된 정보가 제시 돼 왔다는 것도 이러한 문제들을 해결하는 장애가 되어 왔다. 이 연구에서는 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들의 원인을 실험적으로 밝히고, 전자석 관련 실험수업을 효과적으로 운영하기 위한 새로운 전자석을 개발하였다.

이 연구의 결론은 다음과 같다.

첫째, 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들에 대한 주된 원인은 전자석의 전기회로를 구성하는 전구에 있었다. 전구의 저항 크기가 전자석의 전기회로의 전력원인 전지의 기전력의 크기에 비하여 너무 크기 때문에 전자석의 전기회로에 흐르는 전류의 크기가 너무 작다는 것이다. 이러한 너무 작은 전류는 전지를 직렬연결하거나 고리전선 수를 증가시켜도 충분히 큰 전자석의 자기장을 유도할 수 있을 만큼 충분히 증가하지 못하여 전자석이 클립을 붙여 올릴 만큼 충분한 자기력이 발생하지 못하는 원인으로 분석되었다.

둘째, 이 연구에서 개발된 새로운 전자석의 전자기적 특성이 과학적 개념과 법

칙에 잘 부합되며, 학생들이 짧은 시간 동안 쉽게 전자석을 만들 수 있을 뿐만 아니라 분해할 수 있다.

셋째, 전자석의 자기장은 고리전선에 흐르는 전류와 고리전선 수에 비례하여 증가하였고, 전자석의 자기력은 고리전선에 흐르는 전류의 제곱, 고리전선 수의 제곱에 비례하였으며, 철심의 단면적에 비례했다. 이러한 결과는 최근 전자석의 자기력에 대한 이론적 연구결과와 잘 부합됨을 확인할 수 있었다.

주제어: 초등학교, 실험수업, 전류의 자기작용, 전자석, 전자석의 자기력, 전류,
고리전선

I. 서론

1. 연구의 필요성 및 목적

전자석은 전선을 고리 형태로 나란히 감아, 그 안에 철심을 놓고 전선에 전류를 흘려보내 강한 자기장을 얻는 일종의 솔레노이드이다(현동걸, 신애경, 박상우, 2015). 전자석은 눈에 보이지 않는 전류의 자기작용을 현상적으로 보여주는 도구일 뿐만 아니라 일상생활에서 사용하는 전기기구들과 밀접하게 관련되어 있다. 또한, 전자석이 자석과 같은 효과와 기능을 한다는 것을 간단한 도구를 사용하면 누구나 쉽게 관찰할 수 있기 때문에(교육인적자원부, 2002) 학생들에게 과학에 대한 흥미와 관심을 갖도록 하는 학습 소재로 여겨져 왔다(송판섭과 김정덕, 2002). 이러한 까닭으로 초등학교 과학과 교육과정에서 전자석은 제3차 초등학교 과학과 교육과정에서부터 현행 초등학교 과학과 교육과정에 이르기까지 전류의 자기작용 관련 과학지식을 학습시키기 위하여 계속해서 이용돼 왔다(Kim & Hyun, 2015).

제3차 초등학교 과학과 교육과정부터 2007 개정 초등학교 과학과 교육과정에 이르기까지 전자석 관련 단원에서 전자석의 원리를 설명하는 전류의 자기작용에 대한 개념들은 물리 교육에서 학습되어야 할 중요한 과학지식이다. 학습 내용을 살펴보면 ‘전류가 흐르는 직선 전선 주위의 자기장 관찰’, ‘전류가 흐르는 고리전선 주위의 자기장 관찰’에 이어 전자석을 만들고, 전자석과 자석의 공통점과 차이점을 이들 주위의 자기장 관찰을 통하여 학습하게 한다. 그리고 전류의 크기, 고리전선 수가 전자석의 세기에 영향을 미친다는 것을 학습한 후, 전자석을 활용한 만들기 활동을 하는 것이 공통적이다. 여기에서 전자석의 세기란 전자석의 자기력으로 그 단위는 N(뉴턴)이지만, 전자석에 붙은 철판이나 클립의 개수로 어렵게 하는 것이 일반적이다(교육과학기술부, 2013; 교육부, 1997a; 교육인적자원부, 2002; 문교부, 1973, 1983, 1991).

실험수업을 기반으로 하는 탐구중심의 제3차 초등학교 과학과 교육과정이 시행된 이래 전자석 관련 실험수업에서 다루어지는 내용, 방법, 절차 등에 있어서

거의 변화가 없이 현행 과학과 교육과정에 이르고 있다. 그러나 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들을 조사한 여러 연구 결과들을 살펴보면(강진필, 2004; 김상옥, 최병문, 김윤걸, 조선행, 1981; 박종욱과 김선자, 1996; 백남권, 박종호, 정수현, 2005; 신순임, 1977; 윤혜경, 2004), 그동안 수차례의 교육과정 개편이 있었음에도 반복하여 발생하는 문제들이 있다. 이러한 문제 중에서 공통적이고 주된 문제들은 ‘전자석 만들기가 어렵다’로 대표되는 전자석 제작과 관련된 문제와 ‘전자석의 극을 찾기가 힘들다’, ‘전자석에 의해 철가루가 늘어선 모양이 자석에 의해 철가루가 늘어선 모양처럼 뚜렷하지 못하다’, ‘클립이 전혀 전자석에 붙지 않는다’, ‘전지의 수나 코일의 감은 수를 증가시켜도 전자석에 붙는 클립의 개수 차이가 별로 나지 않는다’, ‘전자석에 붙는 클립의 수가 전지의 수나 코일의 감은 수에 따른 예상과 다르다’는 것 등과 같은 전자석의 자기력에 대한 실험결과가 예상과 다르다는 문제로 구분할 수 있다.

우선 전자석의 제작과 관련된 문제인 ‘전자석 만들기가 어렵다’는 매우 심각한 문제이다. 왜냐하면, 전자석 제작활동이 그 자체로 끝나는 것이 아니라 제작된 전자석을 활용하여 후속되는 전류의 자기작용 관련 실험수업들이 이루어지기 때문에, 전자석의 제작에서 문제가 발생하면 정상적인 실험활동에 방해가 될 수 있으며(박종욱과 김선자, 1996), 실험수업이 형식적으로 되는 등 전류의 자기작용 관련 학습에 좋지 않은 영향을 미치게 된다(Hyun, Kim, Shin, Park, 2015).

또한, 예상한 결과와 다른 실험결과로 인해 발생하는 문제들은 교사들과 학생들이 과학에 대한 흥미와 자신감을 잃게 하고, 실험수업을 기피하게 하는 등의 여러 가지 부정적인 측면을 갖게 하는 요인으로 작용한다(강진필, 2004; 김상옥 등, 1981; 박종욱과 김선자, 1996; 백남권 등, 2005; 신순임, 1977; 윤혜경, 2004).

전자석을 활용한 전류의 자기작용 학습에서 중요하게 다루는 자기장과 자기력은 눈에 보이지 않는 추상적인 개념이다. 그로 인해 인지 수준이 대부분 구체적 조작기나 과도기에 있는 초등학생들에게 전자석을 활용한 조작적 활동을 통해 가시적 현상 중심으로 지도하게 되어 있을 뿐만 아니라, 학생들이 이해할 수 있는 정성적인 수준에서만 다루도록 하고 있다(교육인적자원부, 2002; 김동우, 1992). 하지만 학생들을 지도해야 하는 교사들은 정성적인 수준이 아닌 올바른 과학지식을 바탕으로 교사용 지도서를 참고하여 실험수업 준비 및 운영을 해야

한다(송관섭과 김정덕, 2002; 이수아 등, 2007; Czerniak & Chiarelott, 1990). 초등학교 과학과 교사용 지도서들에서 전자석 관련 지도내용을 살펴보면, ‘고리전선에 흐르는 전류의 크기가 커지면 전자석의 세기도 커진다. 그리고 전자석을 감은 고리전선 수가 많아지면 전자석의 세기도 커진다’라고 정성적으로 제시되어 있다(교육과학기술부, 2013; 교육부, 1997a; 문교부, 1983, 1991) 교사들이 과학실험을 운영하는 데 있어 실험이 제대로 되었는지에 대한 참고할만한 정보가 없다(곽영순, 2004; 송관섭과 김정덕, 2002). 그뿐만 아니라 전자석의 자기력에 대해 일부 교사용 지도서와 문헌에는 ‘전자석 자기력의 크기가 철심을 감은 고리전선에 흐르는 전류의 크기에 비례하고, 철심을 감은 고리전선 수에 비례한다’고 잘못 제시되어 있다(고호관, 2009, 교육과학기술부, 2013; 교육인적자원부, 2002; 김상옥 등, 1981; 문교부, 1973; 최영완, 1998; 한명희, 1999) 교사들의 혼란을 가중시키고 있다. 이러한 배경으로 최근 연구에서 초등교사들은 물론 중등교사들도 전자석에 대한 이해도가 매우 낮게 조사되었으며(현동걸 등, 2015), ‘전자석’ 단원이 초등교사들이 가장 지도하기 어려운 단원 중 하나로 조사되었다(곽영순, 2004). 초등교사들은 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들의 원인으로 실험에 사용되는 기자재의 불량을 지적하고 있다(강진필, 2004; 박종욱과 김선자, 1996; 백남권 등, 2005). 여러 차례 교육과정이 개편되면서 과학과의 실험수업에서 발생하는 문제들을 해결하기 위해 많은 노력을 해왔으며, 또한 이러한 노력의 결과로 많은 문제가 해결되고 개선됐다. 그러나 수차례의 교육과정 개편이 있었음에도, 같은 문제들이 반복하여 발생한다는 것은 그 원인을 기자재의 불량이라기보다는 다른 요인에서 찾아야 한다는 것을 시사한다(Park & Hyun, 2014). 특히 이러한 문제들은 현장 교사들의 노력이나 현장 여건의 개선 등을 통하여 해결될 수 없는 특성이 있어 관련 분야 전문가들의 노력이 필요하지만(윤혜경, 2008), 지금까지 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들에 대한 원인을 규명하거나 해결하려는 어떠한 노력도 거의 찾아볼 수가 없다(Kim & Hyun, 2015).

최근 현동걸 등(2015)은 전자석의 자기력을 자기포텐셜에너지 방법으로 유도하였는데, 전자석의 자기력은 전자석의 철심의 단면적과 철심의 자기감수율에 비례하며, 단위 길이당 고리전선 수, 철심의 상대투자율, 고리전선에 흐르는 전류의 제곱에 비례하고, 고리전선을 감은 길이의 제곱에 반비례한다는 것을 이론적으로

제시하였다.

이 연구는 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들의 원인을 실험적으로 밝히고, 전자석 관련 실험수업을 보다 효과적으로 운영할 수 있는 새로운 전자석을 개발하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구의 내용

가. 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들의 원인 분석

제3차 초등학교 과학과 교육과정에서부터 2007 개정 초등학교 과학과 교육과정에 이르기까지 전자석 관련 실험수업의 실태와 문제들을 선행 연구들을 통해 분석하고, 교과서에 제시된 절차와 방법에 따라 실험을 재현하여 문제들을 확인한다. 그리고 전자석의 성질을 결정하는 전자기적 변인들 관계를 정량적으로 분석하여 문제의 원인을 설명한다.

나. 새로운 전자석의 개발

전자석 관련 실험수업을 효과적으로 운영하기 위하여, 학생들이 짧은 시간 동안 쉽게 만들 수 있으며, 이론을 근거로 예상하는 전자석의 자기력을 실험결과로 얻을 수 있는 새로운 전자석을 개발한다.

다. 새로운 전자석의 특성 분석

개발된 새로운 전자석을 이용하여 전자기적 특성을 실험적으로 조사하고 제시한다. 전자석의 자기력에 영향을 주는 내부요인과 외부요인에 따른 전자석의 자기력에 대하여 실험적으로 분석한다. 이를 바탕으로 새로 개발된 전자석의 기존 전자석 대체 가능성을 확인한다.

II. 이론적 배경

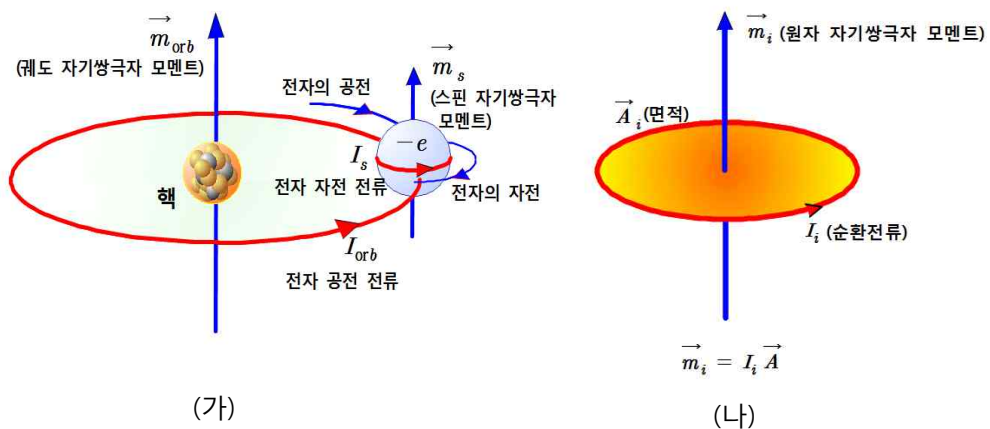
1. 자기의 근원 및 물질의 자기적 성질

모든 물질을 원자들로 구성돼 있으며, 원자는 다시 양성자와 중성자로 이루어진 핵과 그 핵 주위를 일정한 방향으로 자전하며 여러 각의 공전궤도를 공전하고 있는 전자들로 이루어져 있다. 물질의 자기적 성질은 물질을 이루는 원자의 핵과 전자의 배열과 밀접하게 관련되어 있다. 자기는 일종의 전류 작용이며, 그리고 전류는 전하를 가진 원자핵이나 전자의 운동에 의하여 생기기 때문이다(교육부, 2015). 원자 내의 전자들은 원자핵 주위에 있는 전자각들의 여러 공전궤도에서 공전하며 자전을 한다. 전자들은 음의 전하를 가지고 있어서 전자의 공전방향과 자전방향과 반대의 방향으로 각각의 순환전류 I_{orb} 와 I_s 를 형성한다(Sadiku, 2009)

전자들의 공전과 자전으로 인한 순환전류 I_{orb} 와 I_s 에 의하여 그 주위에 [그림 II-1]의 (가)와 같이 자기장이 생기게 된다. 이러한 전자의 공전과 자전에 의한 자기효과를 궤도 자기쌍극자 모멘트(orbital magnetic dipole moment) m_{orb} 와 스핀 자기쌍극자 모멘트(spin magnetic dipole moment) m_s 라고 한다. 이들 자기쌍극자 모멘트는 N 극과 S 극으로 이루어진 자석과 같은 효과를 가진 물리량으로 그 자기장의 크기와 방향을 가진 벡터량을 의미하는 것으로(현동걸과 박상우, 2014), 각 문자 위의 화살표는 각각의 자기쌍극자 모멘트의 방향을 나타낸다. 또한, 원자핵의 운동으로 인한 자기효과를 핵 자기쌍극자 모멘트(nuclear magnetic dipole moment)라고 한다. 핵 자기모멘트는 전자의 궤도 자기쌍극자 모멘트와 스핀 자기쌍극자 모멘트보다 약 10^{-3} 배가 될 정도로 매우 작아서 물질의 자성에 영향을 거의 미치지 않아 무시할 수 있다(고재귀, 2008; Halliday, Resnick, Walker, 2004; Jewett & Serway, 2008).

물질 내의 어느 한 개의 원자가 갖는 원자 자기쌍극자 모멘트(atomic magnetic dipole moment) m_i 는 그 원자 내의 모든 전자의 궤도 자기쌍극자 모

멘트 m_{orb} 와 스핀 자기쌍극자 모멘트 m_s 의 합으로 나타낸다. 이러한 원자 자기쌍극자 모멘트 m_i 는 하나의 매우 작은 자석으로 원자 자석이라고도 하며, 원자 자기쌍극자 모멘트 m_i 는 [그림 II-1]의 (나)와 같이 모형화한다. 원자 자기쌍극자 모멘트 m_i 은 원자 자기쌍극자의 자기적 성질에 관계하는 벡터량으로, 순환 전류의 크기 I_i 와 순환 전류에 의하여 둘러싸인 면적벡터 A_i 의 곱으로 나타낸다. 여기에서 원자 자기쌍극자 모멘트 m_i 의 방향은 면적벡터 A_i 와 일치한다. 그리고 면적벡터 A_i 의 방향은 전류의 방향을 기준으로 오른손 법칙에 의해 결정되며, 면적벡터 A_i 의 크기는 고리 전류 I_i 에 의하여 둘러 싸여진 면적이다. 원자 자기쌍극자 모멘트 m_i 의 단위는 $A \cdot m^2$ 이다(현동걸과 박상우, 2014). 물질의 자기적 성질은 물질을 구성하는 원자 자기쌍극자 모멘트의 배열상태로 결정된다.



[그림 II-1] 한 원자 내의 전자의 궤도 자기쌍극자 모멘트 m_{orb} , 전자의 스핀 자기쌍극자모멘트 m_s (가), 그리고 원자 자기쌍극자 모멘트 m_i (나)

전자의 궤도 자기쌍극자 모멘트인 경우 전자들의 다른 방향의 궤도에서 공전으로 인한 궤도 자기쌍극자 모멘트와 서로 상쇄되어 거의 나타나지 않는다. 그리고 원자의 한 공전궤도 안에는 자전방향이 서로 반대인 2개의 전자가 쌍으로 존재하거나 1개의 전자만이 있을 수 있다. 한 공전궤도에 자전하는 전자가 쌍으로 존재할 때 이들 전자에 의한 스핀 자기쌍극자 모멘트는 서로 상쇄된다. 그러나

궤도 내에서 쌍을 이루지 못한 1개의 전자인 경우 상쇄되지 않고, 이 홀전자에 의한 스핀 자기쌍극자 모멘트는 원자 자기쌍극자 모멘트에 기여하게 된다. 이러한 홀전자들은 최외각 전자각보다 안쪽에 있는 전자각의 공전궤도, 즉 내각의 공전궤도에 있는 홀전자들이다(고재귀, 2008; Halliday et al., 2004; Jewett & Serway, 2008; Sadiku, 2009; Zumdahl & Zumdahl, 2013).

물질의 자기적 성질은 물질의 투자율(permeability μ)이나 자기감수율(magnetic susceptibility χ_m)에 의하여 분류된다. 물질 내의 모든 원자는 그 물체의 자기쌍극자 모멘트 m 에 기여한다. 물질 내의 원자 자기쌍극자 모멘트 m_i 은 외부자기장 B_{ext} 가 없을 때는 [그림 II-2]의 (가)와 같이 무질서하게 배열되어 있어 자기적 성질을 나타내지 않는다. 하지만 물질이 외부자기장 B_{ext} 내에 존재하게 되면 [그림 II-2]의 (나)와 같이 물체 내의 원자 자기쌍극자 모멘트 m_i 들이 외부자기장 B_{ext} 과의 상호작용을 통해 그 자기적 성질이 달라진다. 이러한 외부자기장 B_{ext} 에 의해 영향을 받는 물질의 원자 자기쌍극자 모멘트 m_i 들의 단위체적당 합인 자기모멘트를 물질의 자기화(magnetization) M 라고 한다. 물질 내의 원자 자기쌍극자모멘트 m_i 들의 자기화 M 에 인하여 물질 내부에 자기장이 형성되는데, 이를 내부자기장 B_{int} 이라고 한다. 내부자기장 B_{int} 은 자기화 M 에 비례하며, 다음 식 (II-1)과 같이 나타낸다(현동걸 등, 2015; Tipler & Mosca, 2007) .

$$B_{int} = \mu_0 M \quad (\text{II-1})$$

여기에서 비례상수인 μ_0 는 진공의 투자율로서 진공 중에 외부자기장에 의한 자기력선을 얼마나 통과시킬 수 있는지를 나타내는 척도이며, 그 크기는 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/m}\cdot\text{A}$ 이다.

물질을 외부자기장 B_{ext} 내에 놓았을 때 물질 내에 존재하는 원자 자기쌍극자 모멘트 m_i 들의 방향이 외부 자기장의 방향과 일치시켜 내부자기장 B_{int} 를 형성하게 한다. 이때 형성되는 내부자기장 B_{int} 는 다음 식 (II-2)와 같이 나타낼 수

있다(현동걸 등, 2015; Tipler & Mosca, 2007).

$$B_{int} = \chi_m B_{ext} \quad (\text{II-2})$$

여기서 χ_m 는 물질의 외부자기장 B_{ext} 에 대하여 내부자기장 B_{int} 를 형성되는 비율을 나타내는 물리량으로 물질의 자기감수율(magnetic susceptibility) χ_m 이라 한다. $\chi_m = 0$ 인 물질을 비자성체(nonmagnetic material)이라고 하는데, 공기가 비자성체이며 진공인 경우도 $\chi_m = 0$ 인 경우이다(Sadiku, 2009). $\chi_m \neq 0$ 인 물질을 자성체(magnetic material)라고 하며 일반적으로 강자성체, 상자성체, 반자성체로 구분한다(고재귀, 2008; Halliday et al., 2004; Jewett & Serway, 2008; Sadiku, 2009).

또한 식 (II-1)과 식 (II-2)를 이용하여 자기화 M 를 식 (II-3)으로 나타낼 수 있다. 자기화 M 은 외부자기장 B_{ext} 에 비례하며, 이때 비례상수는 χ_m/μ_0 이다(Tipler & Mosca, 2007).

$$M = \frac{\chi_m}{\mu_0} B_{ext} \quad (\text{II-3})$$

외부자기장 B_{ext} 내에 놓인 물질의 내부 전체 자기장 B 는 외부자기장 B_{ext} 과 물질 내부의 원자 자기쌍극자 모멘트 m_i 의 자기화 M 에 의한 내부자기장 B_{int} 의 합으로, 다음 식 (II-4)로 나타낸다.

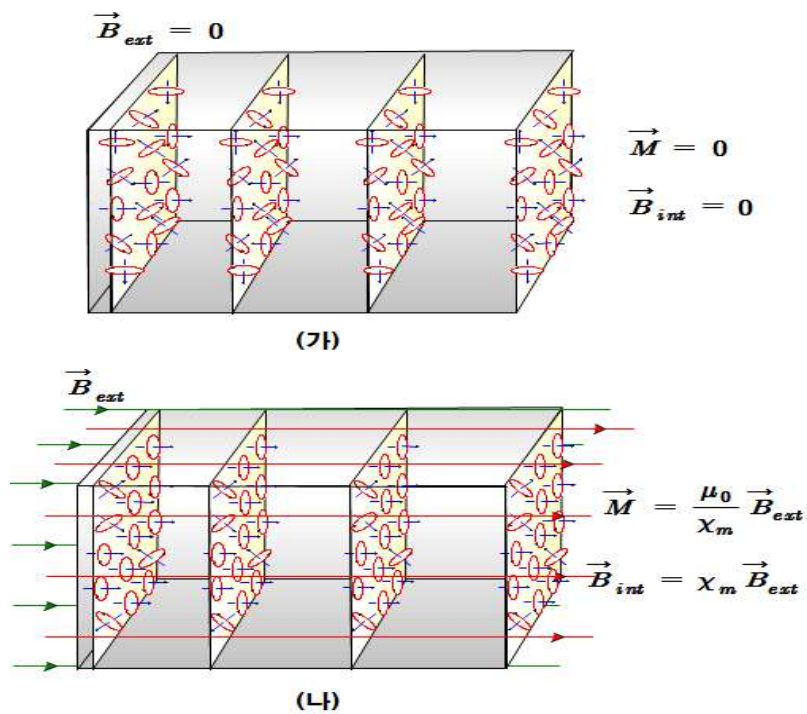
$$B = B_{ext} + B_{int} \quad (\text{II-4})$$

그리고 식 (II-2)를 사용하면, 식 (II-4)은 다음 식 (II-5)와 (II-6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$B = (1 + \chi_m) B_{ext} \quad (\text{II-5})$$

$$= \mu_r B_{ext} \quad (\text{II-6})$$

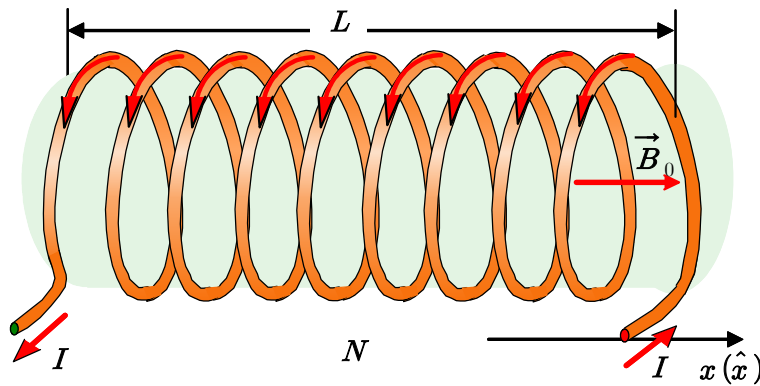
여기서 μ_r 은 물질의 상대투자율(relative permeability)이라고 하는데, 물질의 상대투자율 μ_r 은 $\mu_r = 1 + \chi_m$ 또는 $\mu_r = B/B_{ext}$ 와 같이 물질의 외부자기장 B_{ext} 의 크기에 대한 물질 내부의 전체 자기장 B 의 크기의 비율이다. 즉, 상대투자율 μ_r 가 크면 자화가 잘 일어나 더 강한 자기장을 얻을 수 있게 된다. 물질의 투자율 μ 는 $\mu = \mu_r \mu_0$ 로서, 물질의 상대투자율 μ_r 과 진공의 투자율 μ_0 의 곱으로 나타내며, 물질 내에서 얼마나 많은 자기력선을 통과시킬 수 있는지를 나타낸다(현동걸 등, 2015; Tipler & Mosca, 2007).



[그림 II-2] 외부자기장 B_{ext} 가 없을 때 물질의 자기화 M 과 내부자기장 B_{int} (가), 외부자기장 B_{ext} 가 있을 때 물질의 자기화 M 과 내부자기장 B_{int} (나)

2. 전자석의 자기장

전자석은 고리 형태로 감은 긴 도선 형태 안에 철심을 넣어 만든 일종의 솔레노이드를 말한다. 나선형으로 감은 긴 도선 형태인 솔레노이드는 [그림 II-3]과 같이 길이가 단면의 반지름보다 길도록 하고 촘촘하게 감아 도선에 전류를 흘려 보냈을 때, 고리전선에 흐르는 자기장의 중첩에 의하여 솔레노이드의 내부에 비교적 일정하면서도 강한 자기장 B_0 을 얻을 수 있다(현동걸 등, 2015)

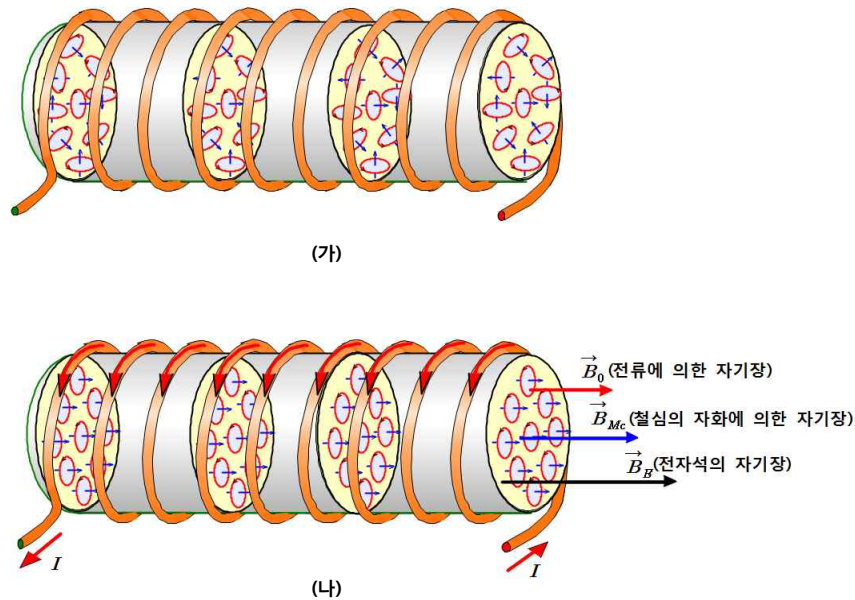


[그림 II-3] 길이가 L , 고리전선 수가 N 인 솔레노이드의 고리전선에 전류 I 가 일정하게 흐를 때 솔레노이드 내부의 자기장 B_0 (현동걸 등, 2015)

더욱 센 자기장을 만들기 위하여 솔레노이드 내부에 연철이나 규소강 같은 강자성체를 넣어서 사용한다. 강자성체는 외부의 작은 자기장에도 평행하게 정렬하려는 원자 자기쌍극자 모멘트를 갖고 있는 자기감수율과 투자율이 큰 물질을 말한다. 모든 물질들은 수많은 원자들을 갖고 있고, 원자들은 자기쌍극자 모멘트를 갖고 있지만 대부분의 외부자기장의 영향을 받지 않는 한 불규칙적으로 배열되어 있어 원자들에 의해 발생된 총 자기 모멘트가 0이거나 아주 작기 때문에 자기의 성질을 띄지 않는다. 그러나 [그림 II-4]의 (가)와 같이 고리전선에 전류가 흐르지 않는 경우 철심의 원자 자기쌍극자 모멘트가 각각 임의의 방향으로 정렬되어 있다가 고리전선에 일정한 전류가 흐르면 고리전선 내부에 자기장 B_0 가 형

성되며 철심의 외부자기장 역할을 하게 된다. 이로 인하여 [그림 II-4]의 (나)와 같이 외부자기장 B_0 와 철심 속 원자 자기쌍극자 모멘트 m 가 상호작용을 통해 원자 자기쌍극자 모멘트 m 의 방향을 외부자기장 B_0 과 평행한 방향으로 정렬시키는 자기화가 일어난다.

이때 전자석의 자기장 B_E 는 고리전선인 솔레노이드의 자기장 B_0 에 철심의 자기화에 의한 자기장 B_{Mc} 이 합쳐진 양으로 구할 수 있다. 철심 속에는 무수히 많은 원자들이 존재하기 때문에 철심의 자기화로 인해 형성되는 철심의 자기장 B_{Mc} 는 솔레노이드의 자기장 B_0 보다 수백에서 수천배 커지게 된다. 따라서 철심을 넣은 전자석은 철심이 없는 솔레노이드보다 매우 강한 자기장을 얻을 수 있게 된다.



[그림 II-4] 전류가 흐르지 않는 전자석 (가)와 일정한 전류가 흐르는 전자석 (나)의 자기장 분포(현동걸 등, 2015)

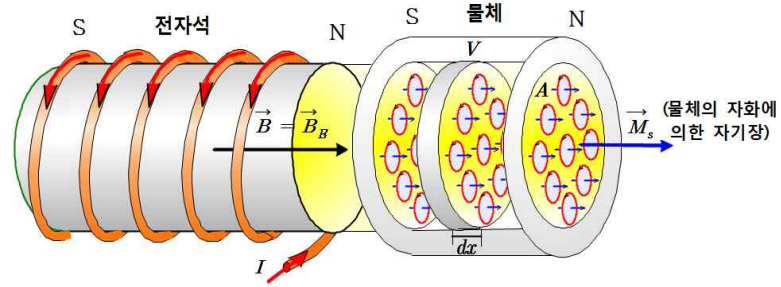
전자석에 의한 자기장 세기는 다음의 식 (II-7)을 따른다.

$$B_E = \mu_c n I \quad (\text{II-7})$$

식 (II-7)에 의하면 전자석의 자기장 B_E 는 철심의 투자율 μ_c , 전자석의 고리전선에 흐르는 전류 I , 그리고 전자석의 단위 길이당 고리전선의 수 $n(=N/L)$ 에 비례한다(현동걸 등, 2015).

3. 전자석의 자기력

전자석의 자기력 F_E 는 [그림 II-5]와 같이 고리전선에 흐르는 전류에 의해 형성되는 전자석의 자기장 B_{Mc} 와 물체 S 의 상호작용으로 발생한다. 물체 S 가 전자석의 자기장 B_{Mc} 내에 존재하게 되면 전자석의 자기장 B_E 는 물체 S 의 외부자기장 B 이 된다. 외부자기장 B 이 없을 때에는 물체 S 의 원자 자기쌍극자 모멘트 m 가 무질서한 상태로 있게 된다. 그로 인해 원자들에 의해 발생된 총 자기모멘트가 0 이거나 아주 작아지기 때문에 물체 S 는 자기의 성질을 띠지 않게 되어 전자석과 물체 S 가 서로 상호작용이 일어나지 않는다. 하지만 물체 S 가 전자석의 자기장 B_E 의 범위 내에 존재하게 되면 전자석의 자기장 B_E 가 외부자기장 B 으로 물체 S 에 작용하게 되어, 외부자기장 B 로 인해 무질서하게 배열되어 있던 원자 자기쌍극자 모멘트 m 에 돌림힘이 작용하게 된다. 이러한 자기화 과정을 통해 물체 S 의 원자 자기쌍극자 모멘트 m 이 전자석의 자기장 B_E 방향과 같은 방향으로 배열되어 물체가 자기화 된다. 따라서 [그림 II-5]와 같이 전류 I 의 흐름을 가정한다면, 앙페르의 법칙에 의해 전자석의 앞쪽에는 N극이 되고 뒤쪽은 S극이 되며, 자기화된 물체 S 의 자기장 M_S 와 전자석의 자기장 B_E 의 방향이 동일하기 때문에 물체 S 의 앞쪽에는 N극이 되고 전자석을 마주보고 있는 물체 S 의 뒤쪽은 S극이 된다. N극과 S극이 서로 반대되는 극으로 인력이 작용하여 전자석과 물체가 서로 달라붙게 되는 것이다.



[그림 II-5] 전자석과 물체의 상호작용(현동걸 등, 2015)

전자석이 물체 S 에 작용하는 자기력 F_m 를 나타내면 다음과 같이 식 (II-8)로 나타낼 수 있다.

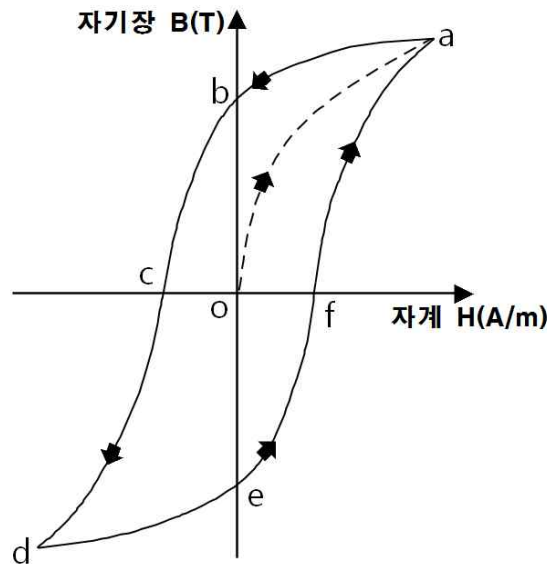
$$F_m = \frac{1}{2} A \chi_{mS} \mu_0 \mu_{cr}^2 n^2 I^2 \quad (\text{II-8})$$

식 (II-8)에 의하면 전자석의 자기력 F_m 는 전자석의 철심의 단면적 A 와 물체 S 의 자기감수율 χ_{mS} 에 비례하고, 철심의 상대투자율 μ_{cr} , 단위 길이당 고리전선 수 $n(=N/L)$, 고리전선에 흐르는 전류 I 의 제곱에 비례한다(현동걸 등, 2015).

4. 자기이력곡선

[그림 II-6]과 같이 외부 자계(H)에 의해 자성체의 자속밀도 변화 즉, 자기장(B) 변화를 나타낸 곡선을 자기이력곡선이라고 한다. 처음 자화되지 않은 자성체를 자계 내에 넣으면 0점에서 a지점을 자화가 된다. 자계의 세기를 더 크게해도 자성체의 자기장이 일정한 값 이상으로 커지지 않는데 이를 포화자기유도라고 한다. 이후 자계의 세기를 감소시키면 자성체의 자기장이 기존 a지점에서 0점으로 변화하지 않고, 다른 곡선인 a지점에서 b지점으로 감소하게 된다. 그 결과 자계의 세기가 0일 때, 자성체는 초기 자기장 세기 0과 달리 b지점의 자기장을 갖게 되는데, b지점에서의 자기장을 잔류자기장이라고 한다. 그리고 이러한 현상을 자기이력효과(hysteresis effect)이라고 한다. 또한 자성체의 자기장을 0으로 하기

위해서는 자계의 방향을 반대로 하여 0점에서 c지점 만큼 자계의 세기가 필요한데 이를 보자력(coercive force)라고 한다. 영구자석을 만들 때는 잔류자기, 보자력이 큰 것이 좋지만 변압기와 전자석 등을 제작할 때는 잔류자기와 보자력이 작은 것이 좋다(고재귀와 송재만, 1997; Callister & Rethwisch, 2012; Hubert, 2002).



[그림 II-6] 자기이력곡선(Hubert, 2002)

5. 초등학교 과학과 교육과정의 변천에 따른 전자석 관련 지도 내용 분석

제3차 초등학교 과학과 교육과정부터 2007 개정교육과정까지 전자석 관련 지도 내용의 변화를 알아보기 위하여 각 교육과정의 교사용 지도서를 참고하여 각 교육과정에서 각 차시별 학습 주제와 학습활동을 분석하였다.

가. 제3차 초등학교 과학과 교육과정(1973 ~ 1981)

제3차 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도내용은 <표 II-1>과 같

다.

<표 II-1> 제3차 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도 내용(문교부, 1973)

소단원	차시	주제	학습활동	
전류와 자기장	1	나침반의 움직임	- 자석 주위에 나침반을 놓아 바늘이 가리키는 방향 조사	
	2	자석 주변 자기장	- 자석 주위의 철가루 관찰을 통해 자기장 조사	
	3	도선 주위 나침반 움직임	- 도선 주위 나침반을 놓고 바늘이 가리키는 방향 조사	
	4	나침반과 전류의 방향	- 전류의 흐르는 방향과 나침반의 N극이 움직이는 방향과의 관계 알아보기	
	5	코일의 감은 수와 나침반의 바늘	- 나침반에 감은 코일의 횟수를 변화시키면서 바늘의 움직임을 관찰하기	
	6-7	건전지의 수와 나침반의 바늘	- 건전지의 수를 변화시키면서 바늘의 움직임을 관찰하기	
	8-9	나침반 바늘의 움직임에 관한 예상 활동	- 여러 회로 안에 전류를 흐르게 하여, 나침반 바늘이 움직임에 관하여 예상, 실험하기	
	전자석	1	전자석 만들기	- 전자석을 만들어 여러 가지 물체에 가까이 하여 끌어당기는 성질 조사하기
		2	전자석 실험	- 코일 속의 물질을 달리해서 전자석 세기 조사하기
3		전자석과 막대자석	- 전자석과 막대자석의 다른 점 찾기	
4		전자석과 막대자석의 자력선 만들기	- 전자석과 막대자석에 철가루를 뿌려 관찰하기	
5		막대자석의 극 성질	- 자석의 극성을 실험을 통해 알기	
6		전자석의 극 성질	- 전자석의 극성을 실험을 통해 알기	
7		건전지의 수와 자력	- 건전지의 수에 따른 자력 비교	
8		코일의 감은 수와 자력	- 코일의 감은 수에 따른 자력 비교	
9		전자석의 극	- 나침반을 이용하여 전자석의 극 찾기	
10-11		전신기 만들기	- 전자석을 이용하여 전신기 만들기	
12		부저 만들기	- 전신기로 부저 만들기	

제3차 초등학교 과학과 교육과정에서는 소단원 ‘전류와 자기장’, ‘전자석’으로 나누어 총 20차시를 지도하도록 하고 있다. 소단원 ‘전류와 자기장’에서는 자석 주위의 나침반의 움직임을 확인하고 전류가 흐르는 도선 주변에 나침반의 움직임을 관찰하여 전류가 흐르는 도선 주변에 자기장이 형성됨을 학습하게 된다. 도선에 흐르는 전류의 방향에 따라 자기장의 방향이 바뀌는 것을 알고, 고리전선의 수와 건전지 수에 따른 나침반의 움직임을 관찰하여 자기장의 세기가 변함을 학

습한다. 소단원 ‘전자석’에서는 볼로 가열하여 천천히 식힌 철못에 에나멜선을 촘촘히 감아 전자석을 만들어 전자석의 성질을 알아보게 한다. 전자석 위에 철가루를 뿌려 봄으로써 전자석의 자기력선과 극성을 확인하고, 건전지의 수와 코일의 감은 수에 따른 자력의 세기를 알아본 다음 전자석을 응용한 만들기 활동을 하게 된다(문교부, 1973).

나. 제4차 초등학교 과학과 교육과정(1981 ~ 1987)

제4차 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도내용은 <표 II-2>와 같다.

<표 II-2> 제4차 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도 내용(문교부, 1983)

소단원	차시	주제	학습활동
전류와 자기장	1	자석 주위에 생기는 자기장 확인	- 자석의 성질에 대하여 이야기하기 - 나침반의 바늘이 가리키는 방향 관찰하기 - 나침반 가까이에 자석을 가져가기
	2	전류가 흐르는 전선 주위에 생기는 자기장 확인	- 전류가 흐르는 전선 주위에 놓은 나침반의 바늘이 가리키는 방향 관찰하기 - 전류가 흐르는 전선 주위에 생기는 자기장에 대하여 이야기 하기
	3	에나멜선을 감은 수와 자기장의 세기와 관계	- 나침반에 에나멜선을 감고 전류를 흐르게 하기 - 에나멜선을 감은 수를 달리하면서 나침반의 바늘이 움직인 각의 크기 관찰하기
	4	전류의 세기와 자기장의 세기와 관계	- 전지의 수를 달리하여 전류의 세기를 변화시키고, 나침반의 바늘이 움직인 각의 크기 관찰하기 - 전류의 세기에 따른 자기장의 세기 비교
	5	전류의 방향과 자기장의 방향과의 관계	- 전류의 방향을 바꾸고 나침반의 바늘이 움직이는 방향 관찰하기 - 전류의 방향에 따른 자기장의 방향 비교하기
	6	나침반을 이용한 회로 검사기	- 나침반을 이용한 회로 검사기 만들기 - 나침반을 이용한 회로 검사기 사용하기
전자석	7	전자석 만들기	- 자석 주위에 생기는 자기장과 전류가 흐르는 전선 주위에 생기는 자기장에 대하여 이야기하기 - 전자석을 만들어 작은 못 붙여 보기
	8	자석의 성질과 전자석의 성질 비교	- 전자석 주위에 생기는 자기장 확인하기 - 전자석에 붙는 물체와 붙지 않는 물체로 분류하기 - 자석과 전자석의 같은 점과 다른 점 이야기 하기
	9	전자석 주위에 철가루	- 전자석 주위에 철가루가 늘어선 모양 관찰하기

	루가 늘어선 모양	- 전자석과 막대 자석 주위에 철가루가 늘어선 모양 비교하기
10	전류의 방향과 전자석의 극과의 관계	- 전자석의 양쪽 극 알아보기 - 전류의 방향을 바꾸고 전자석의 양쪽 극 알아보기
11	에나멜선을 감은 수와 전자석의 세기와 관계	- 에나멜선을 감은 수가 서로 다른 전자석 만들기 - 두 전자석에 핀을 붙여 세기 비교하기
12	전류의 세기와 전자석의 세기와 관계	- 에나멜선을 감은 수가 일정한 전자석에 전류의 세기를 달리하면서 핀 붙여 보기 - 전류의 세기와 전자석의 세기와 관계에 대하여 이야기하기
13	전자석의 이용	- 센 전자석과 약한 전자석에 핀 붙여보기 - 전자석의 성질을 이용하고 있는 예 알아보기
14	전신기 만들기 및 놀이기	- 전신기 만들기 - 전신기의 원리 알아보기

제4차 초등학교 과학과 교육과정에서는 소단원 ‘전류와 자기장’, ‘전자석’으로 나누어 총 14차시를 지도하도록 하고 있다. 소단원 ‘전류와 자기장’에서는 자석 주위에 생기는 자기장을 나침반을 이용하여 확인하고, 전류가 흐르는 전선 주변에 나침반 바늘이 움직이는 것을 통해 자기장이 형성됨을 학습한다. 에나멜선으로 고리전선을 만들어 에나멜선의 감은 수와 전지의 수에 따라 나침반의 움직임을 관찰하여 자기장의 변화 됨을 안다. 그리고 전류의 방향에 따라 나침반의 움직이는 방향을 관찰하여 전류와 자기장 방향의 관계를 인식하고, 나침반을 이용한 회로 검사기를 만들어 본다. 소단원 ‘전자석’에는 불로 가열하여 천천히 식힌 철못에 에나멜선을 촘촘히 감아 전자석을 만들어 작은 못을 붙여 봄으로써 전자석이 자석과 같은 성질이 있음을 알게 한다. 전자석의 성질을 알아본 후 에나멜선의 감은 수와 전류 크기가 전자석의 세기에 미치는 영향을 알고, 전자석의 이용방법을 알고 전신기를 만들어 보게 한다(문교부, 1983).

다. 제5차 초등학교 과학과 교육과정(1987 ~ 1992)

제5차 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도내용은 <표 II-3>과 같다.

<표 II-3> 제5차 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도 내용(문교부, 1991)

소단원	차시	주제	학습활동
전류에 의한 자기장	1	자석 주위의 자기장	- 자석의 여러 가지 성질 이해하기 - 자석 주위의 자기장 확인하기
	2	전류가 흐르는 전선 주위의 자기장	- 나침반 바늘의 움직임 관찰하기 - 전류가 흐르는 전선 주위의 자기장에 대해 이야기하기
	3	전류가 흐르는 방향과 자기장의 방향	- 전기 회로를 만들고 자기장의 방향 알아내기 - 전류의 방향을 바꾸고 자기장의 방향 알아보기
	4	전류의 세기와 자기장의 세기	- 전류의 세기와 자기장의 세기 관계 알아보기
	5	나침반에 감은 전선에 전류가 흐를 때의 자기장	- 나침반에 감은 에나멜선에 전류가 흐를 때 바늘의 움직임 관찰하기 - 에나멜선을 감은 수에 따른 자기장의 세기 알아보기
	6	나침반에 감은 전선의 전류의 방향 및 세기와 자기장	- 전류의 방향에 따른 자기장의 방향 이야기하기 - 전류의 세기에 따른 나침반 바늘의 움직임 관찰하기
	7	나침반을 이용한 회로 검사기	- 회로 검사기 만들기 - 회로 검사기에 물체 연결하기
	8	전자석 만들기	- 전자석 만들기 - 전자석에 핀 붙여 보기
전자석	9	전자석에 붙는 물체와 붙지 않는 물체	- 전자석에 여러 가지 물체 붙여 보기 - 전자석에 붙는 물체와 붙지 않는 물체로 분류하기 - 전자석과 자석의 같은 점과 다른 점 찾기
	10	전자석의 극	- 자석의 극 찾기 - 전자석과 자석 사이에 작용하는 힘 알아보기 - 전류의 방향과 전자석의 극 관계 알아보기
	11	전자석 주위의 자기장	- 전자석 주위에 철가루가 늘어난 모양 관찰하기 - 전자석 주위의 자기장과 막대자석 주위의 자기장 비교하기
	12	에나멜선 감은 수와 전자석의 세기	- 에나멜선 감은 수가 다른 전자석에 핀 붙여 보기 - 에나멜선을 감은 수에 따른 전자석의 세기 비교하기
	13	전류의 세기와 전자석 세기	- 전류의 세기를 달리하면서 전자석에 핀 붙여 보기 - 전류의 세기와 전자석 세기와의 관계 알아보기
	14	전신기 만들기	- 전신기 만들기 - 전신기에서 전자석의 역할 알아보기 - 전자석의 이용 알아보기

제5차 초등학교 과학과 교육과정에서는 소단원 ‘전류에 의한 자기장’, ‘전자석’으로 나누어 총 14차시를 지도하도록 하고 있다. 소단원 ‘전류에 의한 자기장’에서는 자석 주위에 자기장을 살펴보고, 전류가 흐르는 전선 주변에 나침반 바늘의

움직임을 관찰하고 자기장이 형성됨을 알게 한다. 고리전선을 만들어 에나멜선의 감은 수와 전류의 세기에 따라 나침반을 이용하여 자기장 세기를 확인하고, 전류의 방향에 따른 자기장의 방향을 나침반의 움직이는 방향을 통해 알게 한다. 이후 나침반을 이용한 회로 검사기를 만들어 보게 한다. 소단원 ‘전자석’에는 불로 가열하여 천천히 식힌 철못에 에나멜선을 촘촘히 감아 전자석을 만들어 핀을 붙여 봄으로써 전자석이 자석과 같은 성질을 갖고 있음을 알게 하여 전자석과 자석의 공통점과 차이점을 찾도록 한다. 전자석의 성질을 알아본 후 에나멜선의 감은 수와 전류 세기가 전자석의 세기에 미치는 영향을 알고, 전자석의 이용방법을 알고 전신기를 만들어 보게 한다(문교부, 1991).

라. 제6차 초등학교 과학과 교육과정(1992 ~ 1997)

제6차 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도내용은 <표 II-4>와 같다.

<표 II-4> 제6차 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도 내용(교육부, 1997a)

소단원	차시	주제	학습활동
전류에 의한 자기장	1	자석 주위에 철가루가 늘어선 모양	- 자석 주위에서 철가루가 늘어서는 모양 관찰하기
	2	자석 주위의 자기장	- 나침반으로 자석 주위의 자기장에 대해 알아보기
	3	전류가 흐르는 직선 주위의 자기장	- 나침반 바늘의 움직임 관찰하기 - 전류가 흐르는 전선 주위의 자기장에 대해 이야기하기
	4	전류의 방향과 자기장의 방향	- 전류의 방향과 자기장의 방향에 대해 알아보기
	5	전류의 세기와 자기장 세기	- 전류의 세기와 자기장의 세기에 대해 알아보기
	6	나침반에 전선을 감은 수와 자기장 세기	- 나침반에 감은 에나멜선에 전류가 흐를 때 자기장이 생기는지 알아보기 - 에나멜선을 감은 수에 따라 자기장의 세기 알아보기
	7	전류의 방향과 세기에 따라 전선을 감은 나침반 바늘의 움직임	- 전류의 방향과 세기에 따라 전선을 감은 나침반 바늘의 움직임 관찰하기

전 자 석	8	나침반을 이용한 회로 검사기	- 나침반을 이용한 회로 검사기 만들기 - 회로 검사기에 여러 물체를 연결하기
	9	전자석 만들기	- 전자석 - 전자석에 클립 붙여보기
	10	전자석에 붙는 물체와 붙지 않은 물체	- 자석과 전자석에 여러 가지 물체 붙여보기 - 자석과 전자석에 붙는 물체와 붙지 않은 물체 분류하기 - 회로 검사기로 물체들을 구별하기
	11	전류의 방향과 전자석의 극	- 전자석의 극 찾기 - 전류의 방향과 전자석의 극 관계 알아보기 - 전자석과 자석 사이에 작용하는 힘 알아보기
	12	전자석 주위의 자기장	- 전자석 주위에 철가루가 늘어난 모양 관찰하기 - 전자석 주위에 나침반 바늘의 방향 관찰하기
	13	전선을 감은 수와 전자석의 세기	- 에나멜선을 감은 수가 다른 전자석에 작은 클립 붙여보기 - 에나멜선을 감은 수에 따른 전자석의 세기 비교하기
	14	전류의 세기와 전자석의 세기	- 전류의 세기를 달리하면서 전자석에 작은 클립 붙여보기 - 전류의 세기와 전자석 세기와의 관계 알아보기 - 전자석과 자석의 같은 점과 다른 점 알기
	15~ 16	전동기 만들기	- 전동기 만들기 - 전동기 작동하기
	17	전자석의 이용	- 전동기를 돌려 보기 - 전자석의 이용 알아보기

제6차 초등학교 과학과 교육과정에서는 소단원 ‘전류에 의한 자기장’, ‘전자석’으로 나누어 총 17차시를 지도하도록 하고 있다. 소단원 ‘전류에 의한 자기장’에서는 자석 주위에 철가루 배열과 나침반의 변화를 관찰하고, 전류가 흐르는 전선 주변에도 같은 경향이 일어남을 통해 자기장이 형성됨을 학습하게 한다. 에나멜선을 감아 전류의 세기와 감은 에나멜선의 수에 따른 자기장 세기 변화를 알아보고, 전류의 방향에 자기장의 방향을 나침반의 움직이는 방향을 통해 알게 한다. 이후 나침반을 이용한 회로 검사기를 만들어 보게 한다. 소단원 ‘전자석’에는 불로 가열하여 천천히 식힌 철못에 에나멜선을 촘촘히 감아 전자석을 만들어 클립을 붙여 봄으로써 전자석이 자석과 같은 성질을 갖고 있음을 알게 하고, 나침반을 이용하여 전류의 방향과 전자석의 극과의 관계를 알아본다. 전자석의 성질을 알아본 후 에나멜선의 감은 수와 전류 세기에 따른 전자석의 세기를 비교해 보고, 전자석을 이용한 전동기를 만들어 보게 한다. 이후 생활에서 활용되고 있는 전자석에 대해 알아보게 한다(교육부, 1997a).

다. 제7차 초등학교 과학과 교육과정(1997 ~ 2007)

제7차 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도내용은 <표 II-5>와 같다.

<표 II-5> 제7차 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도 내용(교육인적자원부, 2002)

차시	주제	학습활동
1	전류가 흐르는 에나멜선 주위의 나침반 방향 관찰하기	- 나침반을 이용하여 막대 자석 주위의 자기장 알아보기 - 나침반을 이용하여 직선 전선 주위의 자기장 알아보기
2	고리모양으로 감은 에나멜선 주위에서 나침반 방향 관찰하기	- 나침반을 이용하여 고리모양으로 감은 전선의 자기장 알아보기 - 전류의 방향을 반대로 하여 자기장 확인하기
3-4	여러 종류의 막대에 에나멜선을 감고 전지 연결하기	- 전자석 만들기 - 막대자석과 비교하기
5	전자석의 특징 알아보기	- 전자석의 특징 관찰하기 - 전자석의 쓰임새 조사하기
6	전자석의 세기에 영향을 주는 요인 조사하기	- 전지의 수에 따른 전자석의 세기 변화 알아보기 - 에나멜선의 감은 횟수와 전자석의 세기 변화 알아보기 - 전자석의 세기 측정하기
7	센 전자석 만들기(심화)	- 센 전자석을 만들 수 있는 조건 찾기
8-9	전자석의 성질을 이용한 장난감 만들기	- 간이 전동기 만들기 - 생활에서 사용하는 전동기 조사하기 - 전자석을 이용하여 장난감 만들기

제7차 초등학교 과학과 교육과정에서는 소단원 구분 없이 9차시를 지도하도록 하고 있다. 먼저 전류가 흐르는 에나멜선 주변에 자석과 같이 나침반 움직임을 통해 자기장이 형성되고 있음을 학습하고 고리모양으로 감은 전선 주변의 나침반의 방향을 관찰하도록 자기장을 확인한다. 이후 불로 가열하여 천천히 식혀 연철화된 철못에 에나멜선을 촘촘히 감아 전자석을 만들어 막대자석과 비교해보는 활동을 하도록 한다. 그리고 철못 대신 여러 종류의 막대를 전자석 심으로 넣어 전자석의 성질을 탐구하도록 하고 전지의 수와 에나멜선의 감은 횟수에 따른 전자석의 세기 변화를 알아보는 활동을 통해 전자석의 세기에 영향을 주는 요인을

조사하도록 하고 있다. 심화 활동으로 센 전자석을 만들기 위한 조건을 찾고, 간이 전동기를 만들어 보고, 전자석의 성질을 이용한 장난감을 만들어 보도록 하였다(교육인적자원부, 2002).

바. 2007 개정 초등학교 과학과 교육과정(2007 ~ 2009)

2007 개정 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도내용은 <표 II-6>과 같다.

<표 II-6> 2007 개정 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 지도 내용(교육과학기술부, 2013)

차시	주제	학습활동
1	자석으로 병 속의 철 슝 가루 움직여 보기	- 자석에 의해 배열되는 철 슝 가루 관찰하기
2	자석 주위에서 일어나는 현상은 무엇 때문일까요?	- 철가루나 나침반을 이용하여 자석 주위의 자기장을 관찰하기
3	전류가 흐르는 전선 주위에서 일어나는 현상은 무엇 때문일까요?	- 나침반을 이용하여 전류가 흐르는 전선 주위의 자기장을 관찰하기
4	고리 모양의 전선 주위에서 나침반 바늘은 어떻게 될까요?	- 나침반을 이용하여 고리 모양의 전선 주위에서 자기장을 관찰하기
5	전자석은 어떤 성질을 가지고 있을까요?	- 전자석의 성질 관찰하기
6	어떻게 하면 센 전자석을 만들 수 있을까요?	- 전자석의 세기에 영향을 주는 요인을 찾아보기
7	자기장에 대하여 정리해 볼까요?	- 자기장과 전자석의 성질 정리하기
8	전자석을 이용하여 전동기를 만들어 볼까요?	- 간이 전동기를 만들고 작동원리 설명하기

2007 개정 초등학교 과학과 교육과정에서는 제7차 교육과정과 마찬가지로 소단원 구분 없이 7차시를 지도하도록 하고 있다. 먼저 자석에 의해 배열되는 철 슝 가루, 철가루, 나침반의 바늘을 통해 자석 주위의 자기장이 형성됨을 학습하고, 전류가 흐르는 전선 주위에도 같은 현상이 일어남을 통해 전류가 흐르는 전선

주변에 자기장이 형성됨을 알게 한다. 고리 모양의 전선 주위에 나침반 바늘의 움직임은 통해 자기장을 관찰하고, 불로 가열하여 천천히 식혀 연결화된 철못에 에나멜선을 촘촘히 감아 전자석을 만들어 영구자석과 비교해보는 활동을 하도록 한다. 그리고 전자석의 세기에 영향을 주는 요인을 찾아보도록 하는데, 지도서에는 전류의 세기와 고리전선 수에 따른 전자석의 세기 관계를 예시로 제시하고 있다. 이후 간이전동기를 만들어 보고 작동원리를 설명하도록 하고 있다(교육과학기술부, 2013).

사. 전자석 관련 실험수업의 실태 분석

제3차 초등학교 과학과 교육과정에서부터 2007 개정 초등학교 과학과 교육과정에 이르기까지 교사용 지도서에서 학습해야 할 내용들을 살펴보면 공통으로 다루는 것이 있다. 전류가 흐르는 직선전선, 고리전선 주위에 생성되는 자기장에 대한 선수 학습을 바탕으로 ‘전자석 만들기’, ‘전자석과 자석의 공통점과 차이점 찾기’, ‘전류의 세기, 고리전선 수에 따른 전자석 세기’, ‘전자석을 활용한 만들기’ 등으로 전자석 관련 실험수업에서 다루어지는 내용, 방법, 절차 등에서 있어서 거의 변화가 없이 현행 과학과 교육과정에 이르고 있다(교육과학기술부, 2013; 교육부, 1997a; 교육인적자원부, 2002; 문교부, 1973, 1983, 1991). 하지만 전자석을 구성하는 전기회로의 구성을 살펴보면, 전기회로의 전구 연결에서 차이를 찾아볼 수 있다. 제3차 초등학교 과학과 교육과정에서는 전구를 연결하지 않고 전자석의 전기회로를 구성한다(문교부, 1973). 그러나 제4차 과학과 교육과정 이후에서는 전기회로의 단락을 방지한다는 이유로 전구를 전자석의 전기회로에 연결한다. 과전압으로부터 전구의 필라멘트를 보호하기 위하여 전지 1개를 전력원으로 사용하는 전자석의 전기회로에 1.5 V 전구를 연결하는 것이 일반적이며, ‘전류의 크기와 전자석의 자기력 관계’를 알아보기 위한 실험에서 전지 여러 개를 직렬연결하여 사용할 때는 전자석에 주는 영향을 통제하기 위하여 정격전압이 다른 전구를 사용한다. 실질적인 예로서, 전지 2개를 직렬연결하고 전자석을 연결한 전기회로에서는 3.0 V 전구를 사용하며, 전지 3개나 4개를 직렬연결하고 전자석을 연결한 전기회로에서는 6.0 V 전구를 사용하고 있다. 또한 전구는 전자석의

전기회로에 전류가 흐르는지에 대한 여부와 그 크기를 어렵하기 위한 수단으로도 활용하고 있다(교육과학기술부, 2013; 교육부, 1997a; 교육인적자원부, 2002; 문교부, 1973, 1983, 1991; Kim & Hyun, 2015).

초등학교 전자석 관련 실험수업에서 전자석의 세기 측정은 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 또는 핀의 수로 확인한다. 이는 전자석의 자기력 크기를 확인하는 방법으로 초등학교 과학과 교육과정에서 전자석의 세기를 전자석의 자기력으로 보고 있음을 의미한다. 따라서 교과서에 제시된 전류의 크기와 고리전선 수에 따른 전자석의 세기 비교 실험은 전류의 크기와 고리전선 수에 따른 전자석의 자기력 크기 비교 실험으로 해석해야 할 것이다.

초등학교 과학과 교사용 지도서들에 나타난 전자석의 자기력 관련 지도 내용들을 살펴보면, 제3차 초등학교 과학과 교육과정 교사용 지도서에서는 “전자석의 세기는 전자석에 감은 코일에 흐르는 전류에 비례하고, 코일의 단위 길이당 감은 수에 비례한다”(문교부, 1973, p. 70)로 전자석의 자기력이 전자석의 고리전선에 흐르는 전류와 고리전선의 단위 길이당 감은 수에 비례하는 것으로 명시하고 있다.

제4차 초등학교 과학과 교육과정 교사용 지도서(문교부, 1983)에서는 다음과 같이 제시하고 있다:

두 전자석에 같은 세기의 전류가 흐르게 한 다음, 각각의 전자석에 붙는 핀의 수를 세어 봄으로써 에나멜선을 감은 수가 많아지면 전자석의 세기가 세어짐을 알게 한다. (p. 96)

직렬로 연결하는 전지의 수가 많아지면 전자석에 붙는 핀의 수가 많아지는 것을 관찰하여 전류가 세어지면 전자석의 세기가 세어짐을 확인한다. (p. 97)

제5차 초등학교 과학과 교육과정 교사용 지도서(문교부, 1991)에서는 다음과 같이 제시하고 있다:

각각의 전자석에 붙은 핀의 수를 세어 봄으로써 에나멜선의 감은 수가 많아지면 전자석의 세기가 세어짐을 알아본다. (p. 102)

에나멜선의 감은 수가 일정한 전자석에 전류가 세게 흐를수록 전자석의 세기도 세어진다. (p. 105)

제6차 초등학교 과학과 교육과정 교사용 지도서(교육부, 1997a)에서는 다음과 같이 제시하고 있다:

각각의 전자석에 붙는 클립 수와 당겨 올라온 클립 수를 세어 봄으로써 에나멜선의 감은 수가 많아지면, 전자석의 세기가 세어짐을 학습한다. (p. 118)
에나멜선의 감은 수가 일정한 전자석에 전류가 세게 흐를수록 전자석의 세기도 세어진다. (p. 121)

이상 제4차 초등학교 과학과 교육과정에서부터 제6차 초등학교 과학과 교육과정까지 교사용 지도서를 살펴보면 전자석의 자기력이 고리전선에 흐르는 전류 크기와 단위 길이당 감은 고리전선 수에 따라 커진다고 정성적으로 제시하였다.

제7차 초등학교 과학과 교육과정 교사용 지도서에서는 “이론적으로 전자석의 세기가 단위 길이당 감은 횟수에 비례하고 전류의 세기에 비례한다”(교육인적자원부, 2002), 그리고 2007 개정 초등학교 과학과 교육과정 교사용 지도서에서는 “전자석의 세기가 전류의 세기에 비례함을 보이는 실험에서는 전자석을 만들 때 전구를 사용한 전기 회로를 사용하는 것이 좋다. 전자석의 세기는 에나멜선의 감은 수에 비례하여 커지지 않을 수도 있으므로 가능하면 반복 실험의 평균값을 사용하여 오차를 줄이도록 한다”(교육과학기술부, 2013)로 마치 전자석의 고리전선에 흐르는 전류의 세기가 커지면 전자석의 자기력이 비례하여 커지고, 단위 길이당 전자석을 감은 고리전선 수가 많아질수록 전자석의 자기력이 비례하여 커진다는 것으로 제시되어져 왔다.

지금까지 초등학교 과학과 교육과정에 제시된 전류의 크기와 고리전선 수에 따른 전자석의 자기력 관계는 다음과 같다(교육과학기술부, 2013; 교육부, 1997a; 교육인적자원부, 2002; 문교부, 1973, 1983, 1991)

- (1) 전자석의 자기력은 고리전선에 흐르는 전류의 크기에 비례한다.
- (2) 전자석의 자기력은 고리전선 수에 비례한다.

6. 선행연구

제3차 초등학교 과학과 교육과정의 실험수업에서 발생하는 문제 중에서 전자석 관련 실험수업에서의 문제들을 조사한 연구 결과들을 살펴보면, 신순임(1977)은 ‘전자석의 자기력과 전류의 크기 관계’와 ‘전자석의 자기력과 코일의 감은 수 관계’를 알아보는 실험에서 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수나 전자석의 코일의 감은 수를 늘렸을 때 ‘예상과 다르게 전자석에 붙는 핀의 수가 전지의 수나 코일의 감은 수에 비례하여 증가하지 않는다’는 점을 문제로 지적하였다. 제3차 초등학교 과학과 교육과정의 교사용 지도서에서는 ‘전자석의 자기력이 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수와 코일의 감은 수에 비례한다’라고 명시되어 있다(문교부, 1973). 초등학교 과학과 교육과정에서는 전기회로에 흐르는 전류의 크기를 증가시키는 방법으로 직렬연결하는 전지의 수를 늘리도록 제시하고 있다(교육과학기술부, 2013; 교육부, 1997a; 교육인적자원부, 2002; 문교부, 1973, 1983, 1991). 김상옥 등(1981)도 제3차 초등학교 과학과 교육과정의 전자석 관련 실험수업에서 여러 문제가 있다고 보고하였다. 전자석의 자기력이 전류의 크기에 비례하는 것을 보이기 위하여 전류계를 사용해야 한다고 하였고, 전자석의 자기력이 코일의 감은 수에 비례하여 커지지 않는 문제가 발생한다고 하였다(Kim & Hyun, 2015).

박종욱과 김선자(1996)는 제5차 과학과 교육과정의 실험수업에서 발생하는 문제들을 조사하였으며, 강진필(2004)은 제7차 과학과 교육과정의 전기와 자기 관련 실험수업에서 발생하는 문제들을 조사하였다. 그리고 백남권 등(2005)은 제7차 과학과 교육과정의 에너지 영역 실험수업에서 발생하는 문제들을 조사하였다. 제4차 초등학교 과학과 교육과정에서부터 현행 교육과정에 이르기까지 전자석 관련 실험수업에서 다루어지는 내용, 방법, 절차가 거의 같아 이들의 조사 결과가 제4차 교육과정 이후의 과학과 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들과 유사하다고 볼 수 있다(교육과학기술부, 2013; 교육부, 1997a; 교육인적자원부, 2002; 문교부, 1983, 1991; Kim & Hyun, 2015).

제4차 초등학교 과학과 교육과정 이후 전자석 관련 실험수업에서 공통적으로

발생하는 문제들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 실험수업에서 만든 전자석에 핀이나 클립이 잘 붙지 않는다. 그래서 ‘전류의 크기에 따른 전자석의 자기력 관계’와 ‘고리전선의 수에 따른 전자석의 자기력 관계’를 말 할 수 없다.
- (2) 전지의 수나 고리전선의 수에 따라 전자석의 자기력의 차이를 관찰하기 어렵다. 이는 실험 전 예상과 다르다.

이러한 문제들의 원인으로 현장 교사들은 실험에 사용하는 기자재의 불량을 지적하고 있다(강진필, 2004; 박종욱과 김선자, 1996; 백남권 등; Kim & Hyun, 2015).

제3차 초등학교 과학과 교육과정과 제4차 초등학교 과학과 교육과정 이후 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들은 서로 다른 관점에서 분석해야 할 필요가 있다. 제3차 초등학교 과학과 교육과정에서 나타난 문제들은 전자석의 자기력이 전지의 수나 고리전선 수에 비례하지 않는 문제들이지만(김상옥 등, 1981; 신순임, 1977), 제4차 초등학교 과학과 교육과정 이후의 교육과정들에서는 전자석에 클립이 전혀 붙지 않거나 전자석의 자기력이 전지의 수나 고리전선의 수에 따라 그 변화를 관찰하기 어렵다는 것이다(강진필, 2004; 박종욱과 김선자, 1996; 백남권 등, 2005; 윤혜경, 2004; Kim & Hyun, 2015).

Park & Hyun(2014)은 전류가 흐르는 전선 부근에서의 자기장 관찰 실험에서 전기회로에 연결한 전구가 큰 부하저항으로 작용하여 충분한 자기장을 형성시키지 못하게 한다고 하였다. 또한 Hyun(2010)은 여러 개의 전지를 전력원으로 사용하는 전기회로의 전류의 크기는 전지의 연결 방법과 전지의 내부저항과 전기회로 부하저항의 상대적 크기에 따라 결정된다는 것을 이론적으로 보였다. 이러한 연구 결과는 기존의 전지 연결 방법에 따른 전류의 특성에 대한 개념들과 다른 것으로, 전기회로의 부하저항으로 비교적 저항이 작은 다중 고리전선을 사용하는 전자석의 전기회로인 경우 전류의 특성이 달라짐에 의하여 전자석의 자기장이나 자기력의 세기가 예상과 다르게 나올 수 있다는 것을 시사한다(Kim & Hyun, 2015).

전자석의 자기력이 전자석의 고리전선에 흐르는 전류와 고리전선의 수에 비례한다고 교사용 지도서나 여러 문헌 등에서 제시되어 있다(고호관, 2009; 교육인적자원부, 2002; 김상옥 등, 1981; 문교부, 1973; 최영완, 1998; 한명희, 1999). 그러나 현동걸 등(2015)은 전자석의 자기력이 고리전선에 흐르는 전류와 고리전선의 수의 제곱에 비례하며 고리전선을 감은 길이의 제곱에 반비례한다는 것을 이론적으로 유도하였다. 이러한 최근의 연구결과들은 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들의 원인을 실험적으로 분석하는 데 좋은 기초 자료가 될 것이다 (Kim & Hyun, 2015).

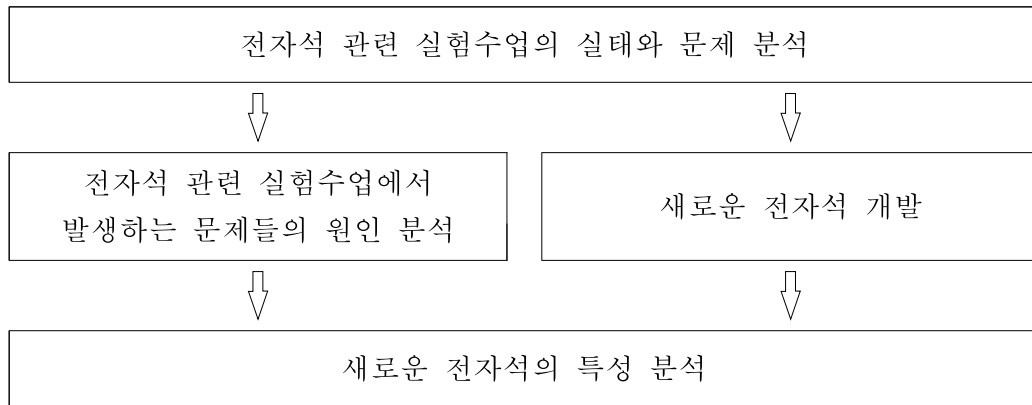
7. 본 연구의 범위

본 연구는 선행연구에서 제시한 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제 중 전자석 제작과 전자석 자기력 관련된 문제들을 중심으로 하여 문제의 원인과 해결책을 제시하였다. 먼저 전류의 크기, 고리전선 수와 자기력 관계 관련 문제 원인을 실험적으로 분석하였다. 그리고 전자석 제작 관련 문제점 파악하여 이를 보완한 새로운 전자석을 제시하였다. 마지막으로 새로운 전자석의 전자기적 특성 조사 통해 기존 전자석을 대체할 수 있는지 가능성을 확인하고자 하였다.

Ⅲ. 연구 절차 및 방법

1. 연구 절차

연구의 목적을 달성하기 위하여 [그림 Ⅲ-1]과 같은 절차로 연구를 수행하였다.



[그림 Ⅲ-1] 연구 절차

본 연구를 수행하기 위하여 먼저 현행 교육과정까지 전자석 관련 실험수업의 실태와 문제들에 대하여 선행연구와 지도서를 통해 분석하였다. 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들을 크게 실험결과와 전자석 제작 문제로 나누고, 실험결과 문제와 관련하여 교과서에 나온 실험을 재현하였다. 그리고 실험결과와 전자석의 성질을 결정하는 전자기적 변인들 관계를 정량적으로 분석하여 실험수업에서 발생하는 문제들의 원인을 설명하였다. 그다음으로 전자석 관련 실험수업을 효과적으로 운영하기 위한 새로운 전자석을 개발하였다. 마지막으로 새로운 전자석의 전자기적 특성을 조사하여 기존 전자석의 대체 가능성을 확인하였다.

2. 연구 방법

가. 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들의 원인 분석

전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들을 실험적으로 분석하고 그 문제들의 원인을 밝히기 위하여, 제3차 초등학교 과학과 교육과정 이후 교과서 내용을 바탕으로 실험을 재현하여 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들을 확인하였다. 그리고 문제의 원인을 찾기 위하여 전기회로의 전류, 전지의 내부저항, 전기회로의 부하저항, 전구의 저항, 고리전선의 저항, 전자석의 자기장 등의 전자석의 전자기적 성질을 결정하는 요인들 사이 관계와 이들이 전자석의 자기력에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 실험은 초등학교 과학과 교과서의 전자석 관련 실험의 과정과 절차에 따라 수행하는 것을 원칙으로 하였다(교육과학기술부, 2013; 교육부, 1997a; 교육인적자원부, 2002; 문교부, 1973, 1983, 1991; Kim & Hyun, 2015).

<표 III-1> 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들의 원인 분석을 위한 실험 목록

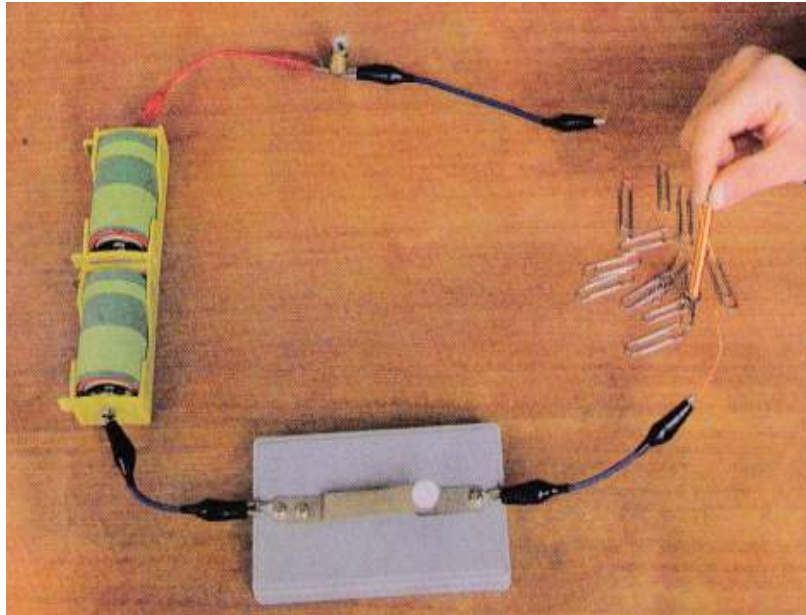
발생 문제	실험 목적	실험내용
직렬연결한 전지 수를 증가시켜도 클립이 전혀 붙지 않거나, 클립의 개수가 차이가 나지 않는다.	실험수업시 발생하는 문제 확인	1. 전지 수에 따른 전자석의 자기력
	원인 분석	1-1. 전지 수에 따른 전류와 내부저항
		1-2. 전지 수에 따른 전류와 부하저항
		1-3. 전지 수에 따른 자기장과 전류
		1-4. 전류의 크기에 따른 자기장과 자기력
고리전선 수를 증가시켜도 클립이 전혀 붙지 않거나, 클립의 개수가 차이가 나지 않는다.	실험수업시 발생하는 문제 확인	2. 고리전선 수에 따른 전자석의 자기력
	원인 분석	2-1. 고리전선 수에 따른 전류와 내부저항
		2-2. 고리전선 수에 따른 전류와 부하저항
		2-3. 고리전선 수에 따른 고리전선 저항과 전류
		2-4. 고리전선 수에 따른 자기장과 전류

이 연구의 재현 실험에서 사용한 전자석의 심은 알코올램프로 20분 동안 가열한 후에 자연 냉각시킨 연철화 된 지름이 5 mm이고 길이가 125 mm인 못을 사용하였다. 그리고 전자석의 심인 못과 에나멜선의 절연을 고려하여 못의 표면을 종이를 감싸고, 그 둘레를 지름이 0.5 mm인 에나멜선을 원형 고리 모양으로 한 방

향으로 나란하게 감아 고리전선을 만들었다. 전자석의 심인 못에 고리전선을 감은 부분의 길이는 90 mm로 통제하였으며, 감은 고리전선 수가 25, 50, 75, 100, 125, 150인 전자석을 여러 개 만들었다. 에나멜선의 길이는 교과서에서와같이 통제하지 않았으며(교육과학기술부, 2013; 교육부, 1997a; 교육인적자원부, 2002; 문교부, 1973, 1983, 1991), 에나멜선의 길이는 감은 고리전선 수에 따라 각각 640 mm, 1050 mm, 1510 mm, 2020 mm, 2490 mm, 2920 mm이었고, 그 저항은 각각 0.040 Ω , 0.075 Ω , 0.115 Ω , 0.150 Ω , 0.220 Ω 이었다. 이미 사용했던 전자석은 그 심인 못이 자기화 영향으로 생긴 잔류자기장에 의하여 실험 결과에 영향을 미치게 되므로, 이를 방지하기 위하여 모든 실험에서는 사용하지 않았던 전자석을 사용하였다(Kim & Hyun, 2015).

전자석의 전기회로는 1.5 V 전지를 1개, 2개 또는 3개를 직렬연결한 전력원, 못에 에나멜선을 감은 전자석, 스위치, 그리고 이들을 연결하는 다수의 집게전선들로 구성되며, 각 교육과정의 과학과 교과서들에 제시된 내용에 따라 전구를 연결한 전기회로와 전구를 연결하지 않은 전기회로로 구성하였다. 이 실험에서 사용하는 전지들은 유통기한 내의 사용하지 않았던 전지들로서, 전지의 기전력들은 1.62 V에서 1.66 V의 범위이며, 부하저항이 10 Ω 일 때 전지의 내부저항이 약 0.50 Ω 에서 0.54 Ω 의 범위에 있는 것들로 측정 선택하여 사용하였다(Kim & Hyun, 2015).

전기회로에서 사용한 전구는 1.5 V 전지를 1개를 전력원으로 사용하는 경우 1.5 V 0.3 A 전구, 1.5 V 전지 2개를 직렬연결하여 전력원으로 사용하는 경우 3.0 V 0.25 A 전구, 1.5 V 전지 3개를 직렬연결하여 전력원으로 사용하는 경우에는 6.3 V 0.15 A 전구이다. 이들 전구들의 실온저항은 1.5 V 0.3 A 전구인 경우 0.45 Ω , 3.0 V 0.25 A 전구인 경우 1.15 Ω , 6.3 V 0.15 A 전구인 경우 2.15 Ω 이었다(Kim & Hyun, 2015). [그림 III-2]는 직렬연결된 1.5 V 전지 2개, 3.0 V 0.25 A 전구, 스위치, 집게전선, 고리전선 수가 100인 전자석 등으로 구성된 전기회로의 모습을 보여주고 있다(교육부, 1997b).



[그림 III-2] 직렬연결된 1.5 V 전지 2개, 3.0 V 0.25 A 전구, 스위치, 집게전선, 고리전선 수가 100인 전자석 등으로 구성된 전기회로(교육부, 1997b)

이 연구의 실험은 전류의 크기에 따른 전자석의 자기력 관계를 설명하기 위한 실험과 고리전선 수에 따른 전자석의 자기력 관계를 설명하기 위한 실험으로 구분하여 진행하였다(Kim & Hyun, 2015).

전류의 크기와 전자석의 자기력 관계를 설명하기 위한 실험은 전기회로에 전구를 연결한 경우와 전구를 연결하지 않은 경우를 비교하였다. 먼저 전구를 연결한 전기회로에서 직렬연결한 전지의 수에 따른 전자석이 붙는 클립의 수, 전기회로의 전류 크기, 전지의 합성내부저항, 전기회로의 부하저항, 전자석의 자기장의 세기 등을 측정하였으며, 이어 전구를 연결하지 않은 전기회로의 전자석들에서도 직렬연결한 전지의 수에 따른 각 변인 값을 측정하였다. 전지 2개를 직렬연결할 때 전자석의 전기회로에 사용된 전구는 3.0 V 0.25 A 전구이었으며, 전지 3개를 직렬연결할 때 전자석의 전기회로에 사용한 전구는 6.3 V 0.15 A 전구이었다(교육과학기술부, 2013; 교육부, 1997a; 교육인적자원부, 2002). 이 연구에서 전기회로의 부하저항이란 전자석의 전기회로에서 전지의 합성 내부저항을 제외한 전기회로의 모든 저항을 말하는데, 보통 전구의 저항과 전선 저항의 합성저항을 의미한

다(Park & Hyun, 2014).

고리전선의 수에 따른 전자석의 자기력 관계를 설명하기 위한 실험에서는 전구 없이 전지 1개를 연결한 전기회로, 1.5 V 0.3 A 전구와 전지 1개를 연결한 전기회로, 3.0 V 0.25 A 전구와 전지 2개를 연결한 전기회로를 만들었다. 각 전기회로에 고리전선 수가 다른 전자석 6종을 각각 연결하고 단회로를 만든 후, 전자석에 붙는 클립의 수, 전기회로의 전류, 전지의 합성 내부저항, 전기회로의 부하저항, 전자석의 자기장의 세기 등을 측정하였다(Kim & Hyun, 2015).

이 연구에서 전자석의 자기력은 교사용 지도서에 제시된 방법과 같이 전자석의 한 단면을 철제 클립이 담겨 있는 통에 수직으로 내려놓고 올렸을 때 전자석이 붙여 끌어올리는 클립의 수로 어림할 수 있다고 전제하였다. 고리전선에 전류가 흐르는 전자석 철심의 한 단면을 다수의 클립이 담겨 있는 통에 1초간 수직으로 넣었다 빼 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립의 수를 확인하여 전자석의 자기력을 어림하였다. 이 실험에서 사용한 클립(Nickel Plated)은 철로 만들어진 소형으로서 그 질량은 7 mg이었다. 그리고 전지의 내부저항은 전지의 기전력과 단자전압으로부터 전지에서 강하된 전압을 구하고, 이를 전기회로의 전류로 나누어 구하였다(Park & Hyun, 2014). 전자석의 자기장 측정은 사전실험 결과 고리전선에 전류가 흐르는 전자석을 자기장 센서에 접촉하여 측정하는 경우 자기장 세기가 측정 한계 범위($5.0 \times 10^{-3} T$) 이상으로 나오는 경우가 발생하여 전자석과 자기장센서 사이 거리가 10 mm가 되도록 고정해 전자석의 자기장을 측정하였다. 이때 전자석의 철심의 한 단면의 중심과 자기장센서의 중심이 서로 마주 보도록 높이를 조절하였다. 또한 실험 결과를 분석을 위한 기초자료를 마련하기 위하여 직류전원공급장치를 사용하여 전자석의 고리전선에 0 A에서 4 A의 범위의 전류를 공급하면서 전류에 따른 전자석의 자기장과 전자석에 붙는 클립의 수를 측정하였다(Kim & Hyun, 2015).

이 연구의 실험에서 전류, 전압, 자기장의 세기를 측정하는 데는 전류 센서(HCS-BTA)와 랩퀘스트 미니 인터페이스(Vernier Lab Quest Mini, Vernier Software & Technology), 전압 센서(KDS-1009), 자기장 센서(KSD-1007, 측정한계 $\pm 5.0 \times 10^{-3} T$, 분해능 $0.005 \times 10^{-3} T$)가 구비된 MBL(KDM-Max V, Korea

Digital Ltd.), 디지털 멀티미터(Digital Multimeter. 34401A, Agilent Technologies, Inc.)를 사용하였으며, 전류를 공급하기 위해 직류전원공급장치(UNICORN UP-3003T), 전지의 내부저항을 측정하기 위하여 가변저항기(Slider Resistor, 15 Ω, 6 A, 세계과학)을 사용하였다(Kim & Hyun, 2015).

모든 실험은 같은 조건에서 5회 반복 수행하였으며, 이 연구에서 나타내는 실험 수치들은 실험에서 얻은 실험값들의 평균값을 의미한다. 실험 분석 관련 장들에서 직렬연결한 전지의 수를 n , 고리전선의 수를 m , 전자석에 붙는 클립의 수를 N , 전자석의 전기회로에 흐르는 전류를 I , 전지의 기전력을 E , 전지의 내부저항을 r_b , 전기회로의 부하저항을 R_L , 전구의 저항을 R_B , 고리전선의 저항을 R_W , 전자석의 자기장을 B_E 로, 그리고 전자석의 자기력을 F_M 등으로 나타내었으며, 전구를 연결한 전기회로인 경우를 아래 첨자 B , 전구를 연결하지 않은 전기회로인 경우를 아래 첨자 N 으로 나타내었다(Kim & Hyun, 2015).

나. 새로운 전자석 개발

‘전자석을 만들기 어렵다.’는 문제를 해결하기 위해 기존 전자석의 제작 문제점을 분석하여 새로운 전자석을 개발하였다.

1) 기존 전자석 제작의 문제점 분석

제3차 초등학교 과학과 교육과정에서부터 2007개정 초등학교 과학과 교육과정에 이르기까지 전자석 관련 실험수업에서 사용되는 전자석의 구성과 제작 방법을 찾아 분석 하였다. 특히 전자석의 구성 요소 중 철심의 역할을 하는 철못과 고리전선을 이루는 에나멜선의 특성에 대한 분석 및 고찰을 통해 전자석 제작과 관련된 문제점을 분석하였다.

2) 새로운 전자석의 개발

기존 전자석의 제작의 문제점을 보완하며 전자석 관련 실험을 보다 효과적으로 수행하기 위한 새로운 전자석을 개발하였다.

다. 새로운 전자석의 특성 분석

새로운 전자석을 이용하여 변인에 따른 전자석의 자기력에 대해 실험을 통해 분석하였다. 그리고 초등학교 전자석 관련 실험수업에서 전력원으로 사용되는 전지를 이용하여 새로운 전자석의 전자기적 특성을 분석하였다. 마지막 새로운 전자석과 기존 전자석의 잔류자기장을 측정하여 비교하였다.

1) 변인에 따른 전자석의 자기력 분석

실험에 앞서 전자석의 자기력에 영향을 미치는 변인을 크게 구조적인 변인과 외부적인 변인으로 나누었다. 구조적인 변인에는 철심의 유무, 철심의 투자율, 철심의 단면적, 단위 길이당 고리전선 수, 고리전선의 길이, 고리전선 직경 등이 있으며, 외부적인 요인으로는 고리전선에 흐르는 전류의 크기 있다. 본 연구에서는 이 중에 구조적 변인으로 고리전선 수, 철심의 유무, 철심의 단면적을, 그리고 외부적 요인으로 고리전선에 흐르는 전류의 크기에 대해 분석하였다.

이 실험에는 전선(VFF 0.75 mm², 170 cm), <전산볼트 소(∅9.3 mm, L 150 mm), 전산볼트 중(∅12.3 mm, L 150 mm), 전산볼트 대(∅15.5 mm, L 150 mm)>, <PVC 관 소(∅9.3 mm, L 150 mm), PVC관 중(∅12.3 mm, L 150 mm)>, 포장용 결속끈(칼라 타이), 집게전선 다수, 자기장 센서(KSD-1007, 측정한계 $\pm 5.0 \times 10^{-3} T$, 분해능 $0.005 \times 10^{-3} T$)가 구비된 MBL(KDM-MaxV, Korea Digital Ltd.), 철제 클립(7 mg, Nickel Plated) 다수, 안정된 전류를 공급하기 위해 직류전원공급장치(UNICORN UP-3003T)를 사용하였다.

가) 전류에 따른 전자석의 자기력

가장 먼저 고리전선에 흐르는 전류의 크기에 따른 전자석의 자기력 비교 실험에서는 직경이 9.3 mm인 전산볼트를 준비하여 단위길이당 고리전선 수 30, 고리전선을 감은 부분의 길이가 120 mm가 되도록 전자석을 제작하였다. 그리고 집게전선을 이용하여 고리전선을 직류전원장치에 연결하여 전류를 1 A에서 6 A범위로 1 A씩 크게 흘려보내 전자석의 자기장과 자기력을 측정하였다.

나) 고리전선 수에 따른 전자석의 자기력

전자석의 고리전선 수에 따른 전자석 자기력 비교 실험에서는 직경이 9.3 mm인 전산볼트를 준비하여 고리전선 길이가 120 mm로 일정하게 하고, 고리전선 수를 10, 20, 30, 40이 되도록 전자석을 제작하였다. 직류전원장치를 이용하여 전류 5 A를 전자석의 고리전선에 흘려 보내 고리전선 수에 따른 전자석의 자기장과 자기력을 측정하였다.

다) 철심 유무에 따른 전자석의 자기력

철심의 유무에 따른 전자석의 자기력 비교 실험에서는 직경이 9.3 mm인 PVC관과 전산볼트를 준비한다. 여기에 각각 비닐전선을 이용하여 고리전선 수 30, 고리전선 길이가 120 mm가 되도록 전자석을 제작한다. 고리전선에 직류전원장치를 이용하여 전류를 1 A에서 6 A범위로 1 A씩 크게 흘려보내 전자석의 자기장과 자기력을 측정하였다.

라) 철심의 단면적에 따른 전자석의 자기력

철심의 단면적에 따른 전자석의 자기력 비교 실험에서는 먼저 직경이 9.3 mm, 12.3 mm, 15.5 mm인 전산볼트를 준비하여 고리전선 수가 30, 고리전선 길이가 120 mm가 되도록 전자석을 제작하였다. 직류전원장치를 이용하여 1 A에서 6 A범

위로 1 A씩 크게 전류를 전자석의 고리전선에 흘려 보내 철심의 직경에 따른 전자석의 자기력을 측정하였고, 얻어진 테이터를 바탕으로 철심의 단면적에 따른 전자석의 자기력을 분석하였다.

2) 새로운 전자석의 전자기적 특성

개발된 새로운 전자석을 이용하여 전자석의 전기회로의 전류, 전지의 내부저항, 전기회로의 부하저항, 전자석의 자기장 등의 전자석의 전자기적 성질을 결정하는 요인들 사이의 관계와 이들이 전자석의 자기력에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다(Hyun et al., 2015).

실험에서 전자석의 전기회로는 1개의 1.5 V 전지, 2개 또는 3개의 1.5 V 전지들을 직렬연결하거나 병렬연결한 전력원, 전산볼트($\varnothing 9.3$ mm, L 150 mm)에 전선(VFF 0.75 mm², 170 cm)을 감은 전자석, 스위치, 그리고 이들을 연결하는 다수의 집게전선들로 구성된다(Hyun et al., 2015).

전자석의 자기력과 전류의 관계를 분석하기 위하여 고리전선의 수가 30인 전자석의 전기회로에 직렬연결하거나 병렬연결하는 전지의 수를 다르게 하며 전자석이 붙여 올리는 클립의 수, 전기회로의 전류, 전지들의 합성내부저항, 전기회로의 부하저항, 전자석의 자기장의 세기 등을 측정하였다. 그리고 전자석의 자기력과 고리전선 수의 관계를 분석하기 위하여 고리전선의 수를 10, 20, 30, 40으로 변화시키며 1개의 전지를 연결한 전기회로들을 구성하고, 이들에 대하여 전자석들에 대하여 전기회로에 전류가 흐를 때 전자석이 붙여 끌어올리는 클립의 수, 전기회로의 전류, 전지의 내부저항, 전기회로의 부하저항, 전자석의 자기장 등을 측정하였다(Hyun et al., 2015).

3) 전자석의 잔류자기장 비교

새로 개발된 전자석과 기존 전자석의 고리전선에 직류전원공급장치를 이용해 전류를 공급하여 특정한 자기장 세기에 이르게 하고 난 다음 전류를 차단한 후




잔류 자기장을 측정하였다.

모든 실험은 같은 조건에서 10회 반복 수행하였으며, 실험에서 얻은 실험값들은 그 평균값을 의미한다. 그리고 다음의 연구 결과 및 논의 장에서 직렬연결 또는 하는 전지의 수를 n , 고리전선의 수를 m , 고리전선의 길이를 L , 전자석이 붙여 올리는 클립의 수를 N , 전자석의 전기회로에 흐르는 전류를 I , 전산볼트와 PVC관의 직경을 \varnothing , 철심의 단면적을 A , 전지의 기전력을 E , 전지의 내부저항을 r_b , 전기회로의 부하저항을 R_L , 전기회로의 전체저항을 R , 전자석의 자기장을 B_E , 전자석의 자기력을 F_M 등으로 나타내었으며, 전지들을 직렬연결한 전기회로인 경우를 아래 첨자 S , 전지들을 병렬연결한 전기회로인 경우를 아래 첨자 P 으로 나타내었다. 그리고 각각의 데이터 분석을 용이하게 하기 위해 변인에 대한 사항을 아래첨자로 나타내었다.

IV. 연구 결과 및 논의

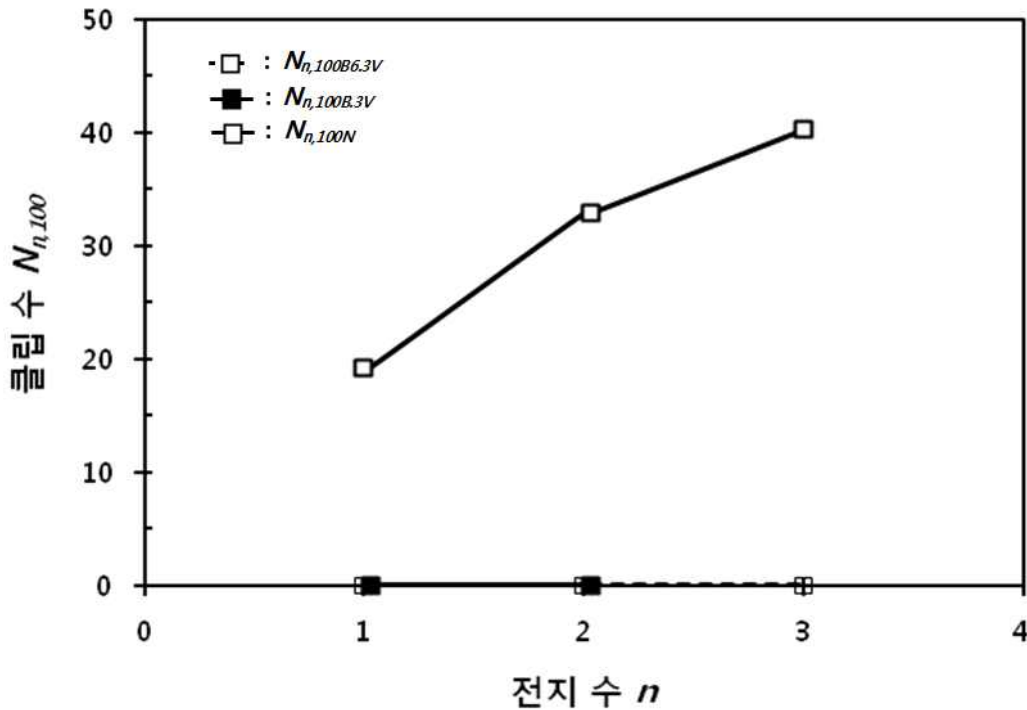
1. 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들의 원인 분석

가. 전류의 크기와 전자석의 자기력 관계

[그림 IV-1]은 고리전선의 수 m 이 $m=100$ 인 전자석의 전기회로에, 제3차 초등학교 과학과 교육과정 교과서(문교부, 1973)에서 제시한 바와 같이 전구를 연결하지 않고 전지 3개를 1개씩 직렬연결하면서 전류가 흐를 때 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{n,100N}$ () , 제4차과 제5차 과학과 교육과정 교과서(문교부, 1983, 1991)에서 제시한 바와 같이 3.0 V 0.25 A 전구를 연결하고 전지 2개를 1개씩 직렬연결하면서 전류가 흐를 때 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{n,100B3V}$ () , 그리고 제6차 과학과 교육과정 이후의 교과서(교육과학기술부, 2013; 교육인적자원부, 2002; 교육부, 1997a)에서 제시한 바와 같이 6.3 V 0.15 A 전구를 연결하고 전지 3개를 1개씩 직렬연결하면서 전류가 흐를 때 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{n,100B6.3V}$ ()를 측정된 결과들과 전지의 수 n 관계를 보여준다(Kim & Hyun, 2015).

전구를 전자석의 전기회로에 연결하지 않을 경우 직렬연결한 전지의 수 n 이 $n = 1$, $n = 2$, $n = 3$ 으로 증가됨에 따라 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{n,100N}$ 은 $N_{1,100N} = 19.2$, $N_{2,100N} = 33.8$, $N_{3,100N} = 40.2$ 로 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n 에 비례하지 않고 증가한다. 제3차 교육과정의 실험수업에서 발생하는 문제들을 조사하고 분석한 연구 결과에 의하면(신순임, 1977), 이러한 실험 결과는 ‘전자석에 붙는 클립의 수가 직렬연결한 전지의 수에 비례하여 증가하지 않는다’는 문제로 지적되고 있다. 한편 전구를 전자석의 전기회로에 연결한 경우들에서는 직렬연결한 전지의 수 n 가 증가하여도 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{n,100B}$ 는 $N_{n,100B} = 0$, 즉 1개의 클립도 전자석에 붙지 않는다. 이러한 실험 결과들은 제4차 초등학교 과학과 교육과정에서부터 현행 과학과 교육과정에 이르기까지의 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제를 조사한 여러 연구 결과들과 일치하고

있다. 이러한 문제의 원인으로 현장 교사들은 기자재의 불량을 지적하고 있다(강진필, 2004; 박종욱과 김전자, 1996; 백남권 등, 2005). 여기에서 기자재의 불량이란 전지의 불량으로서 전지의 내부저항이 크다는 것을 의미한다(Kim & Hyun, 2015; Park & Hyun, 2014).



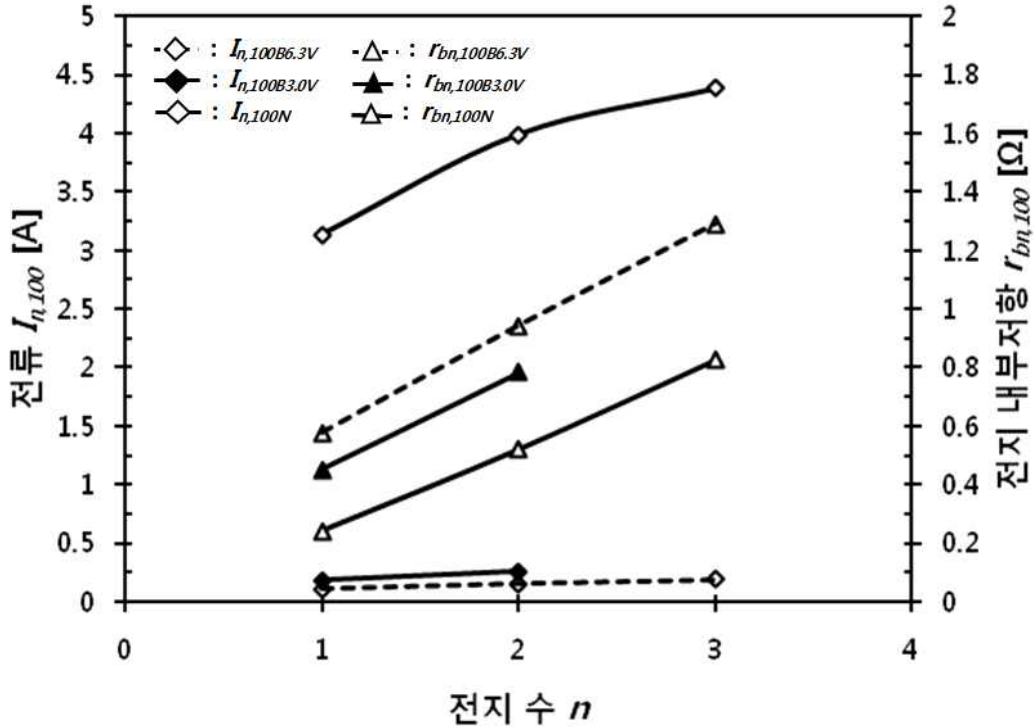
[그림 IV-1] 고리전선 수 m 이 $m=100$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지 수 n 의 따른 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{n,100}$: 6.3 V 0.15 A 전구를 연결한 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{n,100B6.3V}$ (□), 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{n,100B3V}$ (■), 전구를 연결하지 않은 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{n,100N}$ (□)(Kim & Hyun, 2015)

[그림 IV-2]에서는 고리전선 수 m 이 $m=100$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n 에 따른 전류 $I_{n,100}$ 와 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100}$ 의 변화를 측정된 결과를 보여준다. 6.3 V 0.15 A 전구를 연결한 전자석의 전기회로인 경우 전류 $I_{n,100B6.3V}$ (◇)가 $n=1$ 일 때 $I_{1,100B6.3V} = 0.106$ A에서 n 이 증가함에 따라 $I_{2,100B6.3V} = 0.155$ A, $I_{3,100B6.3V} = 0.190$ A로 증가한다. 이때 전지의 합성내부저항

$r_{bn,100B6.3V}(-\blacktriangle)$ 는 $r_{b1,100B6.3V} = 0.576 \Omega$ 에서 $r_{b2,100B6.3V} = 0.942 \Omega$, $r_{b3,100B6.3V} = 1.289 \Omega$ 로 증가한다. 그리고 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전자석의 전기회로인 경우는 전류 $I_{n,100B3V}(\blacklozenge)$ 는 $n = 1$ 일 때 $I_{1,100B3V} = 0.182 A$ 에서 $n = 2$ 일 때 $I_{2,100B3V} = 0.255 A$ 로 증가한다. 이때 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100B3V}(\blacktriangle)$ 는 $r_{b1,100B3V} = 0.452 \Omega$ 에서 $r_{b2,100B3V} = 0.782 \Omega$ 으로 증가한다. 여기에서 전지 3개를 직렬연결하여 전류를 증가시키려는 의도와는 다르게 6.3 V 0.15 A 전구를 연결한 전기회로의 전류 $I_{n,100B6.3V}(\blacklozenge)$ 가 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전기회로의 전류 $I_{n,100B3V}(\blacklozenge)$ 에 비하여 작은 것을 볼 수 있다. 한편 전구를 연결하지 않은 전기회로의 전류 $I_{n,100N}(\blacklozenge)$ 는 $n = 1$ 일 때 $I_{1,100N} = 3.132 A$ 에서 n 이 증가함에 따라 $I_{2,100N} = 3.990 A$, $I_{3,100N} = 4.384 A$ 으로 증가한다. 이때 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100N}(\blacktriangle)$ 는 $r_{b1,100N} = 0.241 \Omega$ 에서 n 이 증가함에 따라 $r_{b2,100N} = 0.519 \Omega$, $r_{b3,100N} = 0.825 \Omega$ 으로 증가한다(Kim & Hyun, 2015).

[그림 IV-2]에서 보여주는 바와 같이 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100}$ 는 n 이 증가함에 따라 거의 비례하여 증가하지만(Hyun & Shin, 2014), 전류 $I_{n,100}$ 는 n 에 비례하여 증가하지 않는다. n 이 증가할수록 전구를 연결한 전기회로의 전류 $I_{n,100B}$ 가 전구를 연결하지 않은 전기회로의 전류 $I_{n,100N}$ 에 비하여 전류가 증가하는 비율은 커지지만 그 크기는 전류 $I_{n,100N}$ 에 비하여 0.034배에서 0.064배로 매우 작다. 이러한 비율은 전구를 연결한 전기회로의 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100B}$ 가 전구를 연결하지 않은 전기회로의 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100N}$ 보다 1.506배에서 2.391배가 큰 것에 비하여 매우 작은 비율로서, 전구를 연결한 전기회로의 전류 $I_{n,100B}$ 가 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100B}$ 의 영향을 거의 받지 않는다는 것을 의미한다. 또한 6.3 V 0.15 A 전구를 연결한 전기회로의 전류 $I_{n,100B6.3V}$ 가 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전기회로의 전류 $I_{n,100B3V}$ 에 비하여 작은 이유로서 6.3 V 0.15 A 전구를 연결한 전기회로의 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100B6.3V}$ 가 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전기회로의 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100B3V}$ 보다 크기 때문인 것으로도 보기가 어렵다. 왜냐하면 전지의 합성기전력 nE 에 비하여 전지

의 합성내부저항 $r_{bn,100B}$ 가 너무 작기 때문이다(Kim & Hyun, 2015).



[그림 IV-2] 고리전선 수 m 이 $m=100$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지 수 n 에 따른 전자석의 고리전선에 흐르는 전류 $I_{n,100}$ 와 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100}$: 6.3 V 0.15 A 전구를 연결한 전자석의 전기회로에 흐르는 전류 $I_{n,100B6.3V}$ (◇)와 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100B6.3V}$ (△), 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전자석의 전기회로에 흐르는 전류 $I_{n,100B3V}$ (◆)와 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100B3V}$ (▲), 전구를 연결하지 않은 전자석의 전기회로에 흐르는 전류 $I_{n,100N}$ (○)와 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100N}$ (△)(Kim & Hyun, 2015)

[그림 IV-3]은 고리전선 수 m 이 $m=100$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n 에 따른 부하저항 $R_{Ln,100}$ 의 변화와 전류 $I_{n,100}$ 의 변화를 측정 한 결과를 보여준다. 전구를 연결한 전기회로에서 6.3 V 0.15 A 전구를 연결한 전기회로인 경우 $R_{Ln,100B6.3V}$ (△)은 $R_{L1,100B6.3V} = 15.200 \Omega$ 에서 n 이 증가함에 따라 $R_{L2,100B6.3V} = 20.142 \Omega$, $R_{L3,100B6.3V} = 24.426 \Omega$ 으로 증가한다. 이때 전류 $I_{n,100B6.3V}$ (◇)는 $I_{1,100B6.3V} = 0.106 A$ 에서 $I_{2,100B6.3V} = 0.155 A$, $I_{3,100B6.3V} =$

0.190 A 으로 증가한다. 그리고 3.0 V 0.25 A 전구인 경우 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,100B3V}$ (▲)은 $R_{L1,100B3V} = 8.615 \Omega$ 에서 $R_{L2,100B3V} = 11.667 \Omega$ 으로 증가한다. 이때 전류 $I_{n,100B3V}$ (◆)는 $I_{1,100B3V} = 0.182 A$ 에서 $I_{2,100B3V} = 0.255 A$ 로 증가한다. 그러나 전구를 연결하지 않은 전기회로인 경우 부하저항 $R_{Ln,100N}$ (▲)은 $R_{L1,100N} = 0.284 \Omega$ 에서 n 이 증가함에도 $R_{L2,100N} = 0.286 \Omega$, $R_{L3,100N} = 0.286 \Omega$ 으로 거의 일정하지만, 전류 $I_{n,100N}$ (◇)는 $I_{1,100N} = 3.132 A$ 에서 n 이 증가함에 따라 $I_{2,100N} = 3.990 A$, $I_{3,100N} = 4.384 A$ 으로 증가한다(Kim & Hyun, 2015).

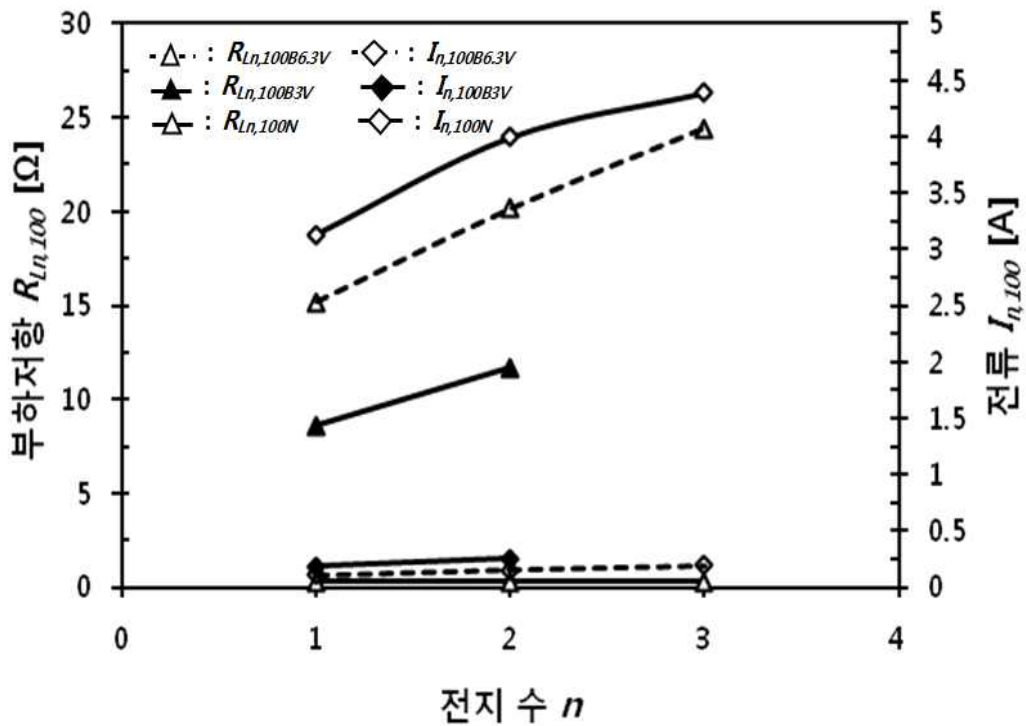
전구를 연결하지 않은 전기회로인 경우 부하저항 $R_{Ln,100N}$ 이 거의 일정함에도 전류 $I_{n,100N}$ 가 n 에 비례하여 증가하지 않고, $I_{1,100N} = 3.132 A$ 에 비하여 1.27배와 1.40배로 증가한다는 것은 전류 $I_{n,100N}$ 이 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100N}$ 에 영향을 많이 받는다는 것을 의미한다. 이것은 전구를 연결하지 않은 전기회로에서 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100N}$ 이 부하저항 $R_{Ln,100N}$ 에 비하여 작지 않다는 것이다(Park & Hyun, 2014). 일반적으로 전지를 전력원으로 하는 전기회로의 전류 I_n 는 전지의 합성내부저항 r_{bn} 과 부하저항 R_{Ln} 을 합한 저항에 대한 전지의 합성기전력 $E_n = nE$ 의 비율로 나타낸다(Hyun, 2010). 그러나 전구를 연결한 전기회로인 경우 부하저항 $R_{Ln,100B}$ 이 [그림 IV-2]에서 보여주는 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100B}$ 에 비하여 14.920배에서 26.392배가 크다는 것은 부하저항 $R_{Ln,100B}$ 이 전류 $I_{n,100B}$ 를 결정하는 주된 역할을 한다는 것을 의미한다(Kim & Hyun, 2015; Park & Hyun, 2014; Hyun & Park, 2012).

전구를 연결한 전기회로에서 전구의 저항 $R_{Bn,100B}$ 은 전구를 연결한 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,100B}$ 에서 전구를 연결하지 않은 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,100N}$ 을 제외한 저항으로 볼 수 있다. n 이 증가함에 따라 부하저항 $R_{Ln,100B}$ 가 커지는 것은 전구의 저항이 비선형 저항으로 일정하지 않고 전구에 인가되는 전압이 커질수록 커지며, 전구의 정격전압을 인가할 경우 그 크기가 실온저항의 약 15배에 이르기 때문이다(Hyun & Park, 2012). 전구를 연결하지 않은 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,100N}$ 을 일정한 값인 0.286Ω 으로 간주할 때, 전구의 저항 $R_{Bn,100B}$ 는 전구

를 연결하지 않은 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,100N}$ 의 30.33배에서 85.41배로서 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,100B}$ 의 크기를 결정하는 지배적인 요인으로 작용한다고 할 수 있다. 따라서 전기회로에 전지를 직렬연결했을 때 전지의 합성기전력 E_n 가 n 에 따라 $E_n = nE$ 로 증가하더라도 전구의 저항 $R_{Bn,100B}$ 이 또한 커지기 때문에 전구를 연결한 전기회로의 전류 $I_{n,100B}$ 은 전구의 저항 $R_{Bn,100B}$ 에 결정적인 영향을 받는다고 할 수 있다(Park & Hyun, 2014; Hyun & Park, 2012). 즉 전구를 연결한 전기회로의 전류 $I_{n,100B}$ 가 작은 원인은 전자석의 전기회로에 전구가 포함되었기 때문으로, 전구의 저항 $R_{Bn,100B}$ 이 커서 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,100B}$ 이 커지며, 이로 인하여 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100B}$ 과 부하저항 $R_{Ln,100B}$ 을 합한 저항에 대한 전지의 합성기전력 $E_n = nE$ 의 비율인 전류 $I_{n,100B}$ 가 작게 된다는 것이다(Kim & Hyun, 2015).

전구를 연결한 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,100B}$ 을 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100B}$ 과 비교할 때, 6.3 V 0.15 A 전구를 연결한 전기회로인 경우 $R_{Ln,100B6.3V}$ 은 $r_{bn,100B6.3V}$ 에 비하여 18.94배에서 26.39배가 크며, 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전기회로인 경우는 $R_{Ln,100B3V}$ 는 $r_{bn,100B3V}$ 에 비하여 14.92배에서 19.06배가 크다. 이것은 전구를 연결한 전기회로에서 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100B}$ 이 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,100B}$ 에 비하여 너무 작아 전류 $I_{n,100B}$ 에 유의미한 영향을 줄 수 없다는 것을 의미한다. 또한 전지의 합성내부저항 $r_{bn,100B}$ 이 충분히 커져 전자석 관련 실험에 사용할 수 없는 정도의 저항 1Ω 정도가 될 경우에도 부하저항 $R_{Ln,100B}$ 에 비하여 0.04배에서 0.12배로 작아 전류 $I_{n,100B}$ 에 유의미한 영향을 줄 수 없다(Hyun & Park, 2012). 이러한 예상은 제4차 초등학교 과학과 교육과정 이후의 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들의 원인이 전지의 내부저항이라는 현장 교사들의 분석과 다르다고 할 수 있다(강진필, 2004; 박종욱과 김선자, 1996; 백남권 등, 2005). 그리고 6.3 V 0.15 A 전구를 연결한 전기회로의 전류 $I_{n,100B6.3V}$ 가 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전기회로의 전류 $I_{n,100B3V}$ 에 비하여 작은 것은 6.3 V 0.15 A 전구를 연결한 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,100B6.3V}$ 가 3.0 V 0.25 A 전구

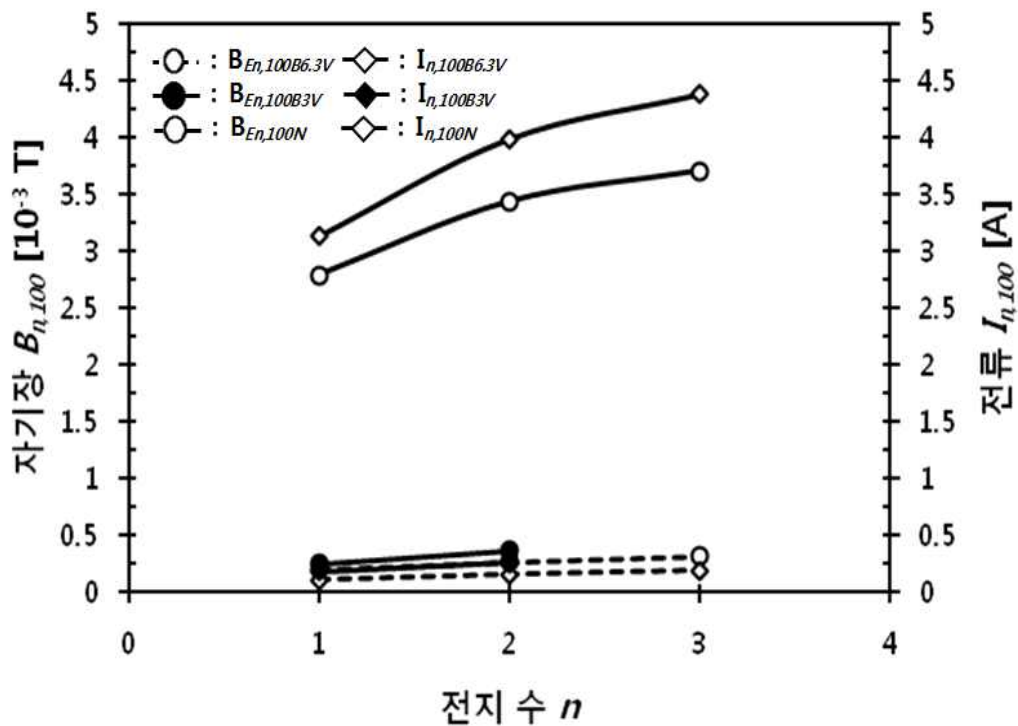
를 연결한 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,100B3V}$ 에 비하여 크기 때문이다. 결국 이러한 현상의 원인은 6.3 V 0.15 A 전구의 저항 $R_{Bn,100B6.3V}$ 이 3.0 V 0.25 A 전구의 저항 $R_{Bn,100B3V}$ 에 비하여 크기 때문이라고 할 수 있다(Kim & Hyun, 2015).



[그림 IV-3] 고리전선 수 m 이 $m=100$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n 에 따른 부하저항 $R_{Ln,100}$ 과 전류 $I_{n,100}$: 6.3 V 0.15 A 전구를 연결한 전자석의 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,100B6.3V}$ (\triangle)와 전기회로에 흐르는 전류 $I_{n,100B6.3V}$ (\diamond), 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전자석의 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,100B3V}$ (\blacktriangle)와 전기회로에 흐르는 전류 $I_{n,100B3V}$ (\blacklozenge), 전구를 연결하지 않은 전자석의 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,100N}$ (\triangle)과 전기회로에 흐르는 전류 $I_{n,100N}$ (\diamond)(Kim & Hyun, 2015)

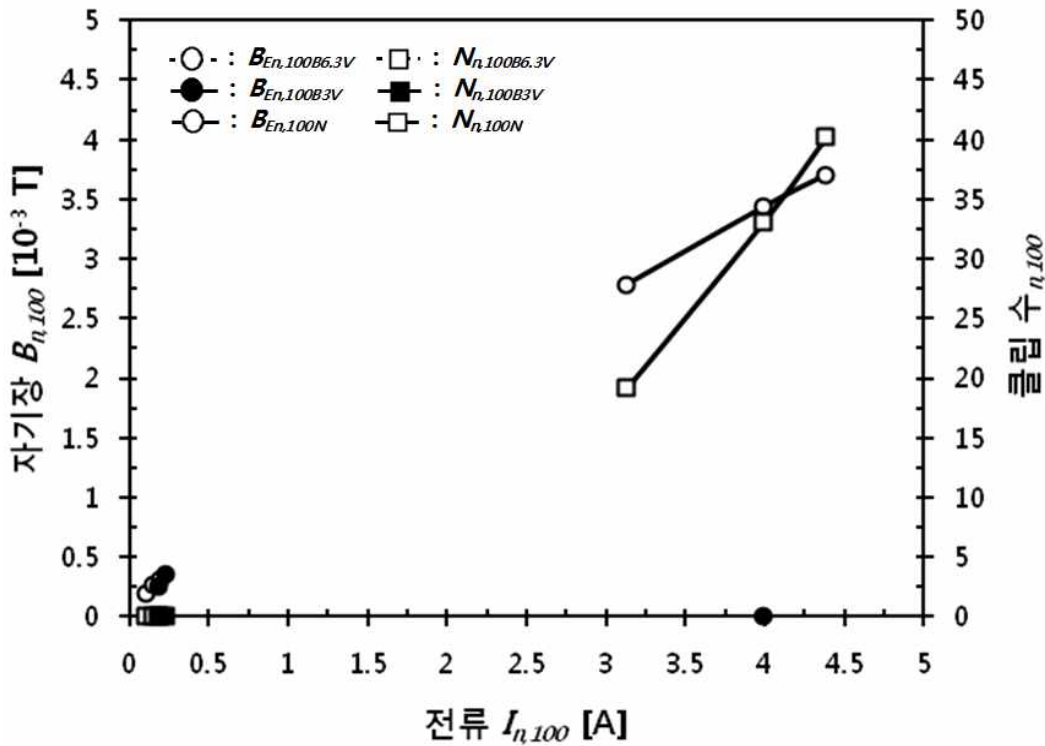
[그림 IV-4]는 고리전선 수 m 이 $m=100$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n 에 따른 전자석의 자기장 $B_{En,100}$ 의 변화와 전류 $I_{n,100}$ 의 변화를 측정된 결과들을 보여준다. 전구를 연결한 전기회로의 전자석이나 전구를 연결하지 않은 전기회로의 전자석의 자기장 $B_{En,100}$ 이 전류 $I_{n,100}$ 가 증가할 때 같은 추세

로 증가하는 것을 알 수 있다. 전구를 연결한 전자석의 자기장 $B_{En,100B}$ 인 경우 그 전류 $I_{n,100B}$ 가 n 이 증가하여도 0.106 A 에서 0.255 A 의 범위로 그 크기가 작기 때문에 자기장 $B_{En,100B}$ 의 크기는 또한 0.203×10^{-3} T에서 0.370×10^{-3} T 범위로 작다. 전구를 연결하지 않는 전기회로인 경우 전류 $I_{n,100N}$ 가 3.132 A 에서 4.384 A 범위로 크기 때문에 그 자기장 $B_{En,100N}$ 의 크기는 2.798×10^{-3} T에서 3.705×10^{-3} T 범위로 크다. 그러나 전류 $I_{n,100N}$ 의 경우와 같이 자기장 $B_{En,100N}$ 또한 n 에 비례하여 증가하지 않는다(Kim & Hyun, 2015).



[그림 IV-4] 고리전선 수 m 이 $m=100$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n 에 따른 전자석의 자기장 $B_{En,100}$ 와 전류 $I_{n,100}$: 6.3 V 0.15 A 전구를 연결한 전자석의 자기장 $B_{En,100B6.3V}$ (○)와 전기회로에 흐르는 전류 $I_{n,100B6.3V}$ (◇), 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전자석의 자기장 $B_{En,100B3V}$ (●)와 전기회로에 흐르는 전류 $I_{n,100B3V}$ (◆), 전구를 연결하지 않은 전자석의 전기회로의 부하저항 $B_{En,100N}$ (○)과 전기회로에 흐르는 전류 $I_{n,100N}$ (◇)(Kim & Hyun, 2015)

전자석의 전기회로에 흐르는 전류 $I_{n,100}$ 와 전자석의 자기장 $B_{En,100}$ 관계 그리고 전류 $I_{n,100}$ 와 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{n,100}$ 관계를 확인하기 위하여, 이 연구의 실험에서 얻는 자료들을 바탕으로 전기회로의 전류 $I_{n,100}$ 에 따른 전자석의 자기장 $B_{En,100}$ 과 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{n,100}$ 관계를 [그림 IV-5]에 나타내었다. [그림 IV-5]에서 보여주는 바와 같이 전구를 연결한 전기회로의 전자석인 경우 0.106 A 에서 0.255 A 범위의 전류 $I_{n,100B}$ 에 의하여 유도된 0.203×10^{-3} T에서 0.370×10^{-3} T 범위 자기장 $B_{En,100B}$ 에서 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{n,100}$ 은 $N_{n,100} = 0$ 이다. 이것은 0.203×10^{-3} T에서 0.370×10^{-3} T 범위의 자기장 $B_{En,100B}$ 에 의하여 1개의 클립도 붙여 올릴 수 없는 전자석의 자기력 $F_{Mn,100B}$ 이 클립에 작용한다는 것을 의미한다. 그러나 전구를 연결하지 않은 전기회로의 전자석인 경우에는 전류 $I_{1,100N} = 3.132$ A, $I_{2,100N} = 3.990$ A, $I_{3,100N} = 4.384$ A 에 의하여 전자석의 자기장 $B_{E1,100N} = 2.789 \times 10^{-3}$ T, $B_{E2,100N} = 3.435 \times 10^{-3}$ T, $B_{E3,100N} = 3.705 \times 10^{-3}$ T가 유도되고, 이로 인하여 $N_{1,100N} = 19.2$, $N_{2,100N} = 33.8$, $N_{3,100N} = 40.2$ 인 평균 클립의 수가 붙을 수 있는 정도의 전자석의 자기력 $F_{Mn,100N}$ 이 클립에 작용한다는 것을 의미한다(Kim & Hyun, 2015).



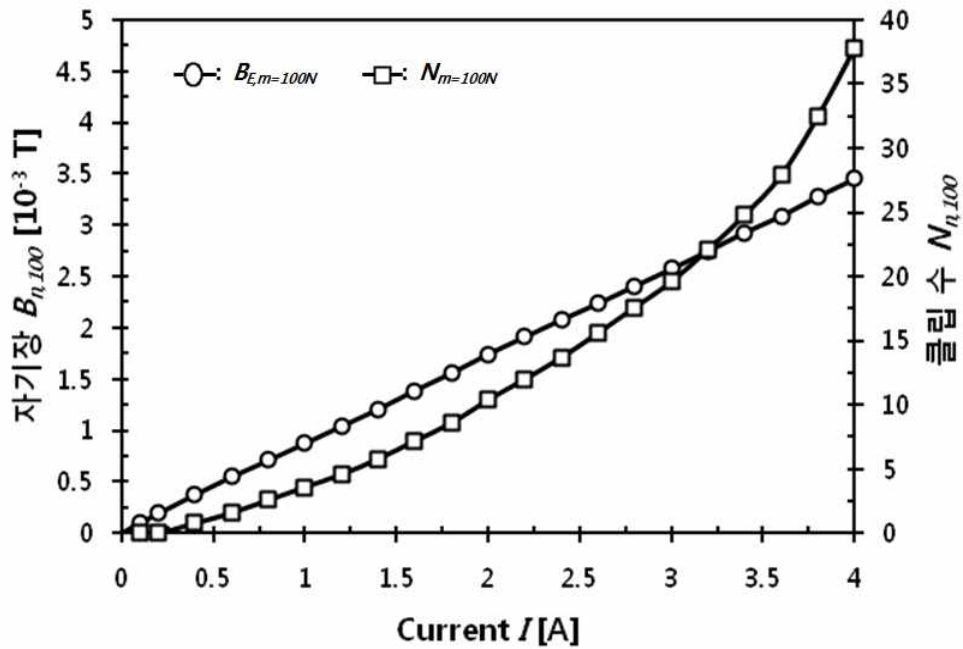
[그림 IV-5] 전자석의 전기회로에 흐르는 전류 $I_{n,100}$ 에 따른 전자석의 자기장 $B_{En,100}$, 그리고 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{n,100}$: 6.3 V 0.15 A 전구를 연결한 전자석의 자기장 $B_{En,100B6.3V}$ (\circ)와 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{n,100B6.3V}$ (\square), 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전자석의 자기장 $B_{En,100B3V}$ (\bullet)와 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{n,100B3V}$ (\blacksquare), 전구를 연결하지 않은 전자석의 전기회로의 부하저항 $B_{En,100N}$ (\circ)과 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{n,100N}$ (\square)(Kim & Hyun, 2015)

[그림 IV-6]과 [그림 IV-7]은 직류전원공급장치를 사용하여 고리전선의 수 $m=100$ 인 전자석의 고리전선에 0 A에서 4 A의 범위의 전류 I 를 공급하면서 전류 I 에 따른 전자석의 자기장 $B_{E,m=100}$ 와 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{m=100}$ 을 측정된 결과와 전자석의 자기장 $B_{E,m=100}$ 의 증가에 따른 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{m=100}$ 을 측정된 결과를 보여준다. [그림 IV-6]은 전자석의 자기장 $B_{E,m=100}$ 는 전류 I 가 증가할수록 이에 비례하여 세어지며, 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{m=100}$ 은 0.411 A 이하의 전류 I 에서는 0이지만 그 이상의 전류 I 에서는 전류

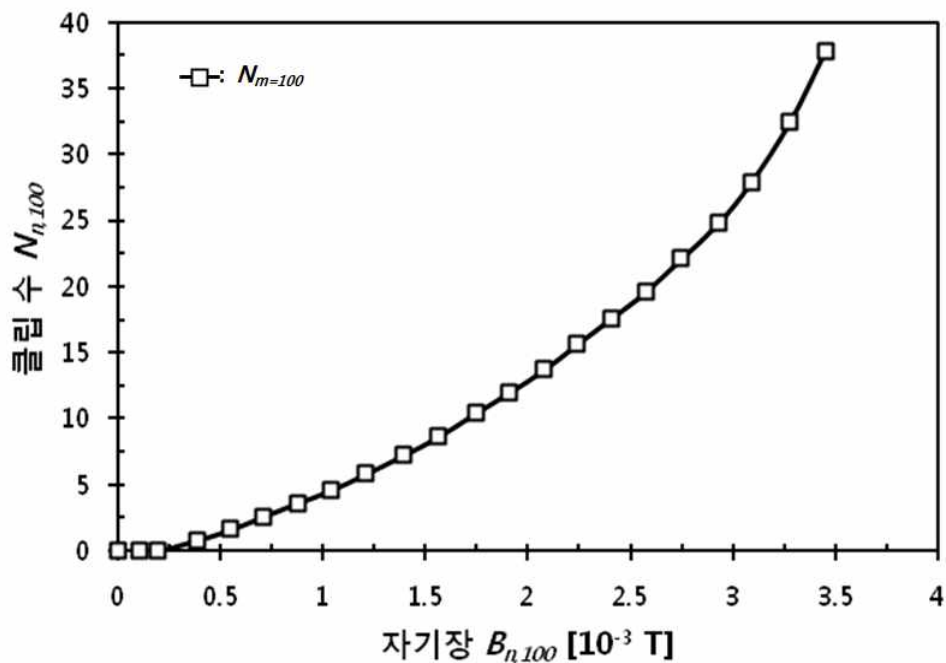
I 의 제공에 비례하여 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{m=100}$ 이 증가하는 것을 보여준다. 또한 [그림 IV-7]은 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{m=100}$ 은 $0.403 \times 10^{-3} \text{ T}$ 이하의 전자석의 자기장 $B_{E,m=100}$ 에서는 $N_{m=100} = 0$ 이지만, 그 이상의 전자석의 자기장 $B_{E,m=100}$ 에서는 전자석의 자기장 $B_{E,m=100}$ 의 제공에 비례하여 증가하는 것을 보여준다(Kim & Hyun, 2015).

이러한 결과들은 식 (II-7)과 같이 전자석의 자기장 B_E 는 전자석의 전기회로의 전류 I 과 전자석을 감은 고리전선의 수 m 에 비례하고, 전자석의 자기력 F_M 은 식 (II-8)과 같이 전자석의 전기회로에 흐르는 전류 I 의 제공과 전자석을 감은 고리전선 수 m 의 제공에 비례하거나(현동걸 등, 2015), 다음의 식 (IV-1)과 같이 전자석의 자기장 B_E 의 제공에 비례한다는 이론적인 결과들과 일치한다(Hayt & Buck, 2012; Kim & Hyun, 2015; Popovic & Popovic, 2000; Sadiku, 2009).

$$F_M = \frac{AB_E^2}{2\mu_0} \quad (\text{IV-1})$$



[그림 IV-6] 고리전선 수 m 이 $m=100$ 인 전자석의 전기회로에 직류전원장치를 사용하여 전류 I 를 흘려 보냈을 때 전자석의 자기장 $B_{E,m=100}$ (○)와 전자석에 붙는 클립 수 $N_{m=100}$ (□)(Kim & Hyun, 2015)






[그림 IV-7] 고리전선 수 m 이 $m=100$ 인 전자석의 자기장에 따른 전자석에 붙는 클립 수 $N_{m=100}$ (□)(Kim & Hyun, 2015)

결국, [그림 IV-1]에서 보여주는 바와 같이, 3.0 V 0.25 A 전구나 6.3 V 0.15 A 전구와 한 개의 전지를 연결한 전기회로의 전자석들에 1개의 클립도 붙지 않는 이유는 전구의 저항을 포함하는 부하저항의 크기가 8.615Ω 이상으로 전지의 기전력의 크기에 비하여 너무 크기 때문이다. 이러한 큰 부하저항으로 인하여 전자석에 클립을 붙을 수 있는 자기력이 작용할 만큼인 $0.403 \times 10^{-3} \text{ T}$ 세기 이상의 자기장을 유도할 수 있도록 0.411 A 크기 이상의 전류가 전기회로에 흐르지 않는다는 것이다. 그리고 전기회로에 전지 2개 또는 3개를 직렬연결하여도 전자석이 1개의 클립도 붙여 올릴 수 없는 이유는 전지들을 직렬연결함에 의하여 전지의 합성기전력은 커지지만, 비선형 저항인 전구의 저항이 커짐으로 인하여 부하저항의 크기가 11.667Ω 이상으로 커지지 때문에 전자석이 최소한 1개의 클립을 붙여 끌어올릴 수 있는 자기력을 작용할 만큼인 $0.403 \times 10^{-3} \text{ T}$ 세기의 자기장을 유도할 수 있는 0.411 A 크기 이상의 전류가 전기회로에 흐르지 않는다는 것이다 (Kim & Hyun, 2015).

전구를 연결하지 않은 전기회로의 전자석들인 경우, [그림 IV-1]에서 보여주는 바와 같이, 전류의 제공에 거의 비례하여 전자석에 붙는 클립의 수가 증가한다. 이를 통해 전기회로에 직렬연결한 전지의 수를 증가시켜도 예상과 다르게 전자석에 붙는 클립의 수가 전지의 수에 비례하여 늘어나지 않는다는 제3차 초등학교 과학과 교육과정의 실험수업에서의 문제는 직렬연결한 전지의 수가 증가함에 따라 전지의 합성내부저항에 큰 영향을 받는 전류가 전지의 수에 비례하여 증가하지 않을 뿐만아니라 전자석의 자기력이 전류의 제공에 비례함에도 불구하고, 전자석의 자기력이 전류에 비례한다고 잘못된 안내에 기인하는 것으로 볼 수 있다(교육인적자원부, 2013; 김상옥 등, 1982; 문교부, 1973; Kim & Hyun, 2015).

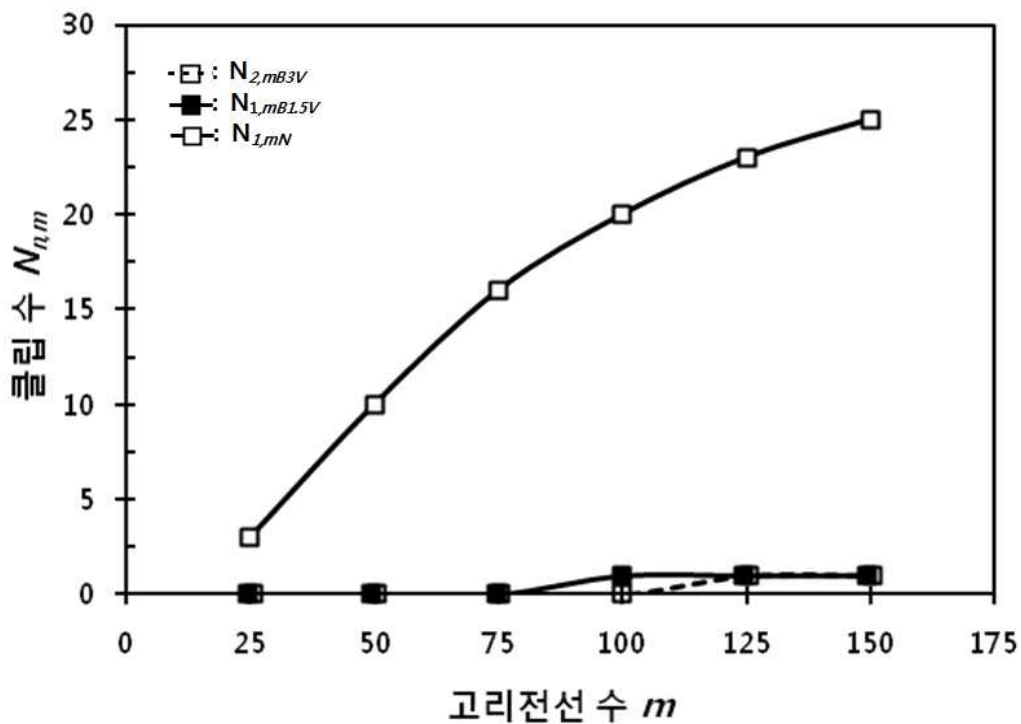
제4차 초등학교 과학과 교육과정 이후의 실험수업에서 발생하는 핀이나 클립이 전혀 전자석에 붙지 않는다는 문제는, 전자석에 대한 이론이나 실험적인 정보들을 바탕으로 전자석 관련 실험수업을 구성해야 함에도 불구하고, 전구의 저항의 크기를 간과하여 실험수업을 구성한 결과라고 할 수 있다(Kim & Hyun, 2015)

나. 고리전선 수와 전자석의 자기력 관계

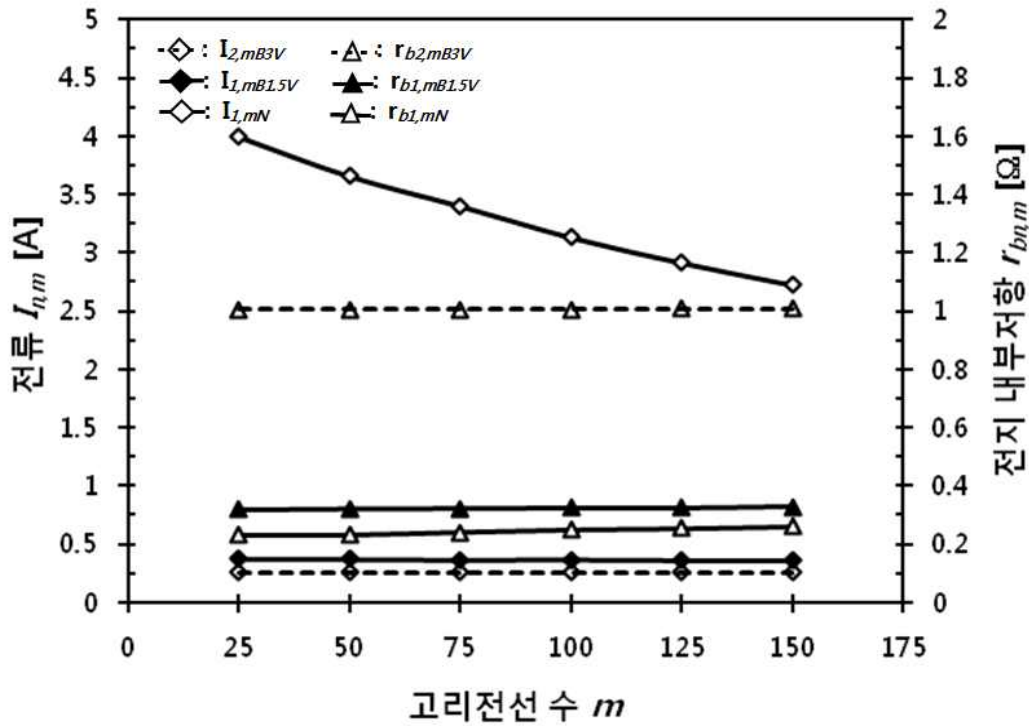
[그림 IV-8]은 고리전선의 수 m 이 $m = 25, 50, 75, 100, 125, 150$ 인 전자석들에 대하여, 제3차 초등학교 과학과 교육과정의 교과서(문교부, 1973)에서 제시한 바와 같이 전구를 연결하지 않고 전력원으로 전지 1개를 연결한 전기회로의 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{1,mN}$ () , 제4차와 제5차 과학과 교육과정의 교과서(문교부, 1983, 1991)에서 제시한 바와 같이 1.5 V 0.3 A 전구를 연결하고 전력원으로 전지 1개를 연결한 전기회로의 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{1,mB1.5V}$ () , 그리고 제6차 교육과정 이후의 교과서(교육부, 1997; 교육인적자원부, 2002; 교육과학기술부, 2013)에 제시한 바와 같이 3.0 V 0.25 A 전구를 연결하고 전지 2개를 직렬 연결한 전기회로의 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{2,mB3V}$ ()를 측정하여 나타낸 결과들을 보여준다(Kim & Hyun, 2015).

제3차 초등학교 과학과 교육과정의 전구를 연결하지 않을 전기회로의 전자석들인 경우 고리전선의 수 m 가 증가함에 따라 전자석에 붙는 클립의 수 $N_{1,mN}$ 은 $N_{1,25N} = 4.2$, $N_{1,50N} = 9.2$, $N_{1,75N} = 14.8$, $N_{1,100N} = 19.2$, $N_{1,125N} = 22.8$, $N_{1,150N} = 24.0$ 으로 완만한 곡선의 모양으로 증가한다. 제3차 초등학교 과학과 교육과정에서 발생하는 문제들을 분석한 연구에서는 이러한 결과를 ‘고리전선의 수를 증가시켜도 전자석에 붙는 클립의 수가 예상과 같이 고리전선의 수에 비례하여 증가하지 않는다’는 문제로 지적하였다(신순임, 1977). 제4차와 제5차 과학과 교육과정 교과서의 1.5 V 0.3 A 전구를 연결한 전기회로의 전자석들인 경우, 고리전선의 수 m 이 $m = 25, 50, 75$ 인 전자석들은 1개의 클립도 붙여 올리지 못하고, $m = 100, 125, 150$ 인 전자석들만이 1개씩의 클립을 붙여 올린다. 그리고 제6차 과학과 교육과정 이후의 교과서에서는 전류를 증가시켜 큰 전자석의 자기력을 얻기 위하여 전지 2개를 직렬 연결하고 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전기회로의 전자석인 경우에도 그 의도와 크게 다르게 $m = 125, 150$ 인 전자석들만이 1개씩의 클립을 붙여 올린다. 이러한 결과들은 제4차 초등학교 과학과 교육과정에서부터 현행 과학과 교육과정에 이르기까지 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들을 조사한 여러 연구들에서 지적해온 ‘고리전선의 수를 증가시켜도 전자석

에 붙는 클립의 개수 차이가 별로 나지 않는다’, ‘클립이 전혀 전자석에 붙지 않는다’, ‘전자석에 붙는 클립의 수가 고리전선의 수에 따라 예상과 다르다’는 문제들과 일치한다(강진필, 2004; 김상욱 등, 1981; 박종욱과 김선자, 1996; 백남권 등, 2005; 신순임, 1977; 윤혜경, 2004). 이러한 문제의 원인으로 현장 교사들은, 전류의 크기와 자기력 관계에 대한 실험에서 발생하는 문제의 원인과 같이, 전지의 불량 즉 큰 전지의 내부저항을 지적하고 있다(강진필, 2004; 박종욱과 김선자, 1996; 백남권 등, 2005; Kim & Hyun, 2015).



[그림 IV-8] 고리전선 수 m 에 따른 전자석에 붙는 클립 수 $N_{n,mB}$: 3.0 V 0.25 A 전구를 연결하고 전지 2개를 직렬연결한 전기회로의 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{2,mB3V}$ (□), 1.5 V 0.3 A 전구를 연결하고 전지 1개를 연결한 전기회로의 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{1,mB1.5V}$ (■), 전구를 연결하지 않고 전지 1개를 연결한 전기회로의 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{1,mN}$ (□)(Kim & Hyun, 2015)



[그림 IV-9] 고리전선 수 m 에 따른 전기회로의 전류 $I_{n,m}$ 와 전지의 합성내부저항 $r_{bn,m}$: 3.0 V 0.25 A 전구를 연결하고 전지 2개를 직렬연결한 전기회로에 흐르는 전류 $I_{2,mB3V}$ (\diamond)와 전지의 합성내부저항 $r_{b2,mB3V}$ (\blacktriangle), 1.5 V 0.3 A 전구를 연결하고 전지 1개를 연결한 전기회로에 흐르는 전류 $I_{1,mB1.5V}$ (\blacklozenge)와 전지의 내부저항 $r_{b1,mB1.5V}$ (\blacktriangle), 전구를 연결하지 않고 전지 1개를 연결한 전기회로에 흐르는 전류 $I_{1,mN}$ (\diamond)와 전지의 내부저항 $r_{b1,mN}$ (\blacktriangle)(Kim & Hyun, 2015)

[그림 IV-9]는 고리전선 수 m 에 따른 전기회로의 전류 $I_{n,m}$ 와 전지의 합성내부저항 $r_{bn,m}$ 의 변화를 측정한 결과들을 보여준다. 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전기회로는 전지 2개($n = 2$)를 직렬연결하여 전력원으로 사용하는 경우로서 두 전지의 합성내부저항 $r_{b2,mB3V}$ (\blacktriangle)은 고리전선 수 m 이 $m = 25$ 일 때 $r_{b2,25B3V} = 0.7501 \Omega$ 에서 $m = 150$ 일 때 $r_{b2,150B3V} = 0.7505 \Omega$ 으로 아주 작은 양인 $\Delta r_{b2,mB3V} = 0.0004 \Omega$ 의 저항이 증가한다. 이때 전류 $I_{2,mB3V}$ (\diamond)는 $I_{2,25B3V} = 0.259$ A에서 $I_{2,150B3V} = 0.255$ A로 $\Delta I_{2,mB3V} = 0.004$ A의 전류가 감소한다. 1.5 V 0.3 A 전구를 연결한 전기회로는 전지 1개($n = 1$)를 전력원으로 사용

하는 경우로서 전지의 내부저항 $r_{b1,mB1.5V}$ (▲)은 고리전선 수 m 이 $m = 25$ 일 때 $r_{b1,25B1.5V} = 0.319 \Omega$ 에서 $m = 150$ 일 때 $r_{b1,150B1.5V} = 0.326 \Omega$ 으로 $\Delta r_{b1,mB1.5V} = 0.007 \Omega$ 의 저항이 증가한다. 이때 전류 $I_{1,mB1.5V}$ (◆)은 $I_{1,25B1.5V} = 0.373 A$ 에서 $I_{1,150B1.5V} = 0.360 A$ 로 $\Delta I_{1,mB1.5V} = 0.013 A$ 의 전류가 감소한다. 그러나 제6차 과학과 교육과정 이후(교육과학기술부, 2013; 교육부, 1997a; 교육인적자원부, 2002) 전류를 증가시키려는 의도로 전지 2개를 직렬연결한 전기회로의 전류 $I_{2,mB3V}$ 가 전지 1개를 연결한 전기회로의 전류 $I_{1,mB1.5V}$ 에 비하여 작은 것을 볼 수 있다. 한편 전구를 연결하지 않은 전기회로인 경우는 전지 1개를 전력원으로 사용하는 경우으로서 전지의 내부저항 $r_{b1,mN}$ (▲)은 고리전선 수 m 이 $m = 25$ 일 때 $r_{b1,25N} = 0.230 \Omega$ 에서 $m = 150$ 일 때 $r_{b1,150N} = 0.260 \Omega$ 으로 $\Delta r_{b1,mN} = 0.030 \Omega$ 의 저항이 증가한다. 이때 전류 $I_{1,mN}$ (◆)은 $I_{1,25N} = 3.992 A$ 에서 $I_{1,150N} = 2.726 A$ 로 $\Delta I_{1,mN} = 1.266 A$ 의 전류가 감소한다(Kim & Hyun, 2015).

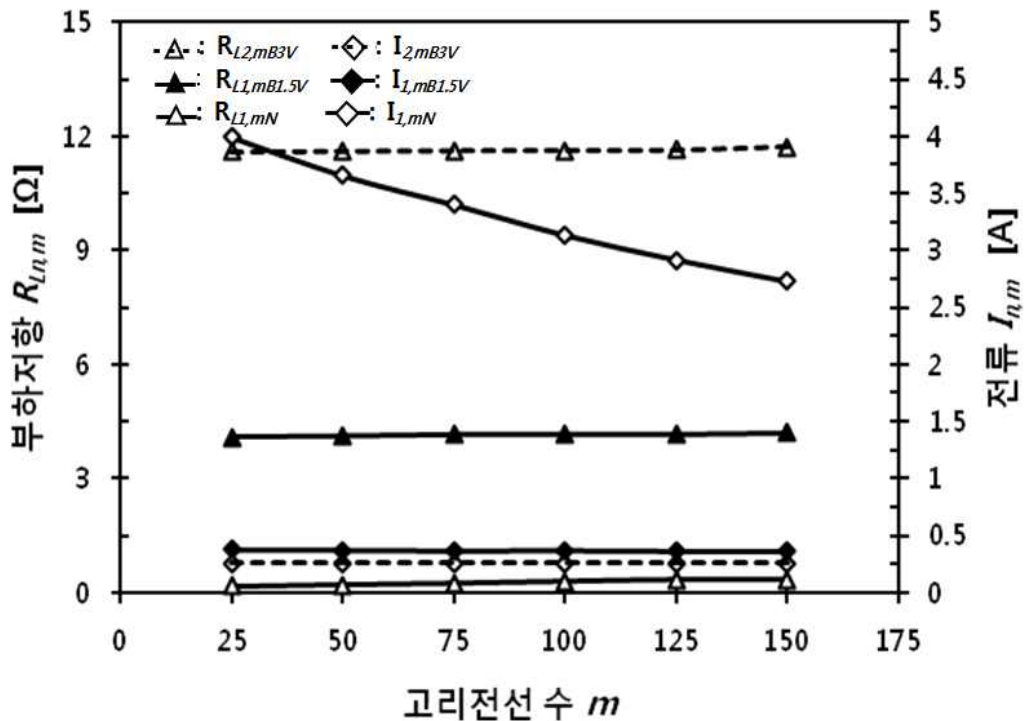
전구를 연결한 전기회로인 경우 고리전선 수 m 이 증가함에 따라 전지의 합성 내부저항 $r_{bn,mB}$ 가 0.319Ω 에서 0.7505Ω 의 범위에서 증가하는 반면, 전류 $I_{n,mB}$ 는 $0.373 A$ 에서 $0.255 A$ 의 범위에서 감소한다. 전지의 합성기전력 $E_n = nE$ 를 고려할 때 전류 $I_{n,mB}$ 는 매우 작은 양이다. 이것은 전지의 내부저항 $r_{bn,mB}$ 의 변화가 전류 $I_{n,mB}$ 의 변화에 유의미한 영향을 주지 못하고 있다는 것을 의미한다(Hyun, 2010; Hyun & Shin, 2014). 이것은 제4차 초등학교 과학과 교육과정 이후의 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들의 원인이 전지의 내부저항이라는 현장 교사들의 분석과 다르다는 것을 의미한다(강진필, 2004; 박종욱과 김선자, 1996; 백남권 등, 2005). 그리고 $3.0 V 0.25 A$ 전구와 전지 2개를 직렬연결한 전기회로의 전류 $I_{2,mB3V}$ 가 $1.5 V 0.3 A$ 전구와 전지 1개를 연결한 전기회로의 전류 $I_{1,mB1.5V}$ 에 비하여 작은 것은 전지의 합성기전력 $E_n = nE$ 에 비하여 전지의 합성내부저항 $r_{bn,mB}$ 이 상대적으로 너무 작기 때문에 전지의 합성내부저항의 차이로 인한 것으로는 보기 어렵다. 그러나 전구를 연결하지 않은 전기회로인 경우는 고리전선 수 m 이 증가함에 따라 전지의 내부저항 $r_{b1,mN}$ 가

0.230 Ω에서 0.260 Ω의 범위에서 증가하는 반면, 전류 $I_{1,mN}$ 는 3.992 A에서 2.726 A의 범위에서 감소한다. 전기회로의 기전력 $E = 1.6 V$ 라고 전제할 때, 전지의 내부저항 $r_{b1,mN}$ 이 전류 $I_{1,mN}$ 의 크기에 많은 영향을 주고 있음을 의미한다(Kim & Hyun, 2015).

[그림 IV-10]은 고리전선 수 m 에 따른 전자석의 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,m}$ 과 전류 $I_{n,m}$ 의 변화를 측정한 결과들을 보여준다. 3.0 V 0.25 A 전구와 전지 2개를 직렬연결한 전기회로인 경우 전기회로의 부하저항 $R_{L2,mB3V}$ (▲)은 고리전선 수 m 이 $m = 25$ 일 때 $R_{L2,25B3V} = 11.590 \Omega$ 에서 $m = 150$ 일 때 $R_{L2,150B3V} = 11.724 \Omega$ 으로 작은 양의 저항 $\Delta R_{L2,mB3V} = 0.134 \Omega$ 가 증가한다. 이때 전류 $I_{2,mB3V}$ (◆)은 $I_{2,25B3V} = 0.259 A$ 에서 $I_{2,150B3V} = 0.255 A$ 로 아주 작은 양의 전류 $\Delta I_{2,mB3V} = 0.004 A$ 가 감소한다. 그리고 1.5 V 0.3 A 전구와 전지 1개를 연결한 전기회로인 경우에는 부하저항 $R_{L1,mB1.5V}$ (▲)은 고리전선 수 m 이 $m = 25$ 일 때 $R_{L1,25B1.5V} = 4.091 \Omega$ 에서 $m = 150$ 일 때 $R_{L1,150B1.5V} = 4.200 \Omega$ 으로 작은 양의 저항 $\Delta R_{L1,mB1.5V} = 0.109 \Omega$ 이 증가한다. 이때 전류 $I_{1,mB1.5V}$ (◆)은 $I_{1,25B1.5V} = 0.373 A$ 에서 $I_{1,150B1.5V} = 0.360 A$ 로 작은 양의 전류 $\Delta I_{1,mB1.5V} = 0.013 A$ 가 감소한다. 한편 전구를 연결하지 않은 전기회로인 경우 전기회로의 부하저항 $R_{L1,mN}$ (▲)은 고리전선 수 m 이 $m = 25$ 일 때 $R_{L1,25N} = 0.158 \Omega$ 에서 $m = 150$ 일 때 $R_{L1,150N} = 0.321 \Omega$ 으로 $\Delta R_{L1,mN} = 0.163 \Omega$ 가 증가한다. 이때 전류 $I_{1,mN}$ (◆)은 $I_{1,25N} = 3.992 A$ 에서 $I_{1,150N} = 2.726 A$ 으로 $\Delta I_{1,mN} = 1.266 A$ 의 크기의 전류가 감소한다(Kim & Hyun, 2015).

전구를 연결한 전기회로인 경우 고리전선 수 m 이 증가함에 따라 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,mB}$ 가 4.091 Ω에서 11.724 Ω의 범위에서 작게 증가하고, 전류 $I_{n,mB}$ 는 0.373 A에서 0.255 A의 범위에서 감소한다. 전기회로의 전지의 합성기전력 $E_n = nE$ 를 고려할 때, 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,mB}$ 이 전류 $I_{n,mB}$ 에 큰 영향을 주고 있지만 그 크기의 변화에는 유의미한 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 그리고 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전기회로의 부하저항 $R_{L2,mB3V}$ 에 대한 기

전력 $2E$ 의 비율이 1.5 V 0.3 A 전구를 연결한 전기회로의 부하저항 $R_{L1,mB1.5V}$ 에 대한 기전력 E 의 비율보다 작기 때문에 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전기회로의 전류 $I_{2,mB3V}$ 가 1.5 V 0.3 A 전구를 연결한 전기회로의 전류 $I_{1,mB1.5V}$ 에 비하여 작다고 할 수 있다. 전구를 연결하지 않은 전기회로인 경우는 고리전선 수 m 이 증가함에 따라 전기회로의 부하저항 $R_{L1,mN}$ 가 0.158 Ω 에서 0.321 Ω 의 범위에서 작게 증가하는 반면, 전류 $I_{n,mN}$ 는 3.992 A에서 2.726 A 범위로 크게 감소한다. 전지 1개의 기전력 $E = 1.6 V$ 라고 전제할 때, 전기회로의 부하저항 $R_{L1,mN}$ 가 전류 $I_{n,mN}$ 에 큰 영향을 주고 있음을 의미한다(Kim & Hyun, 2015).



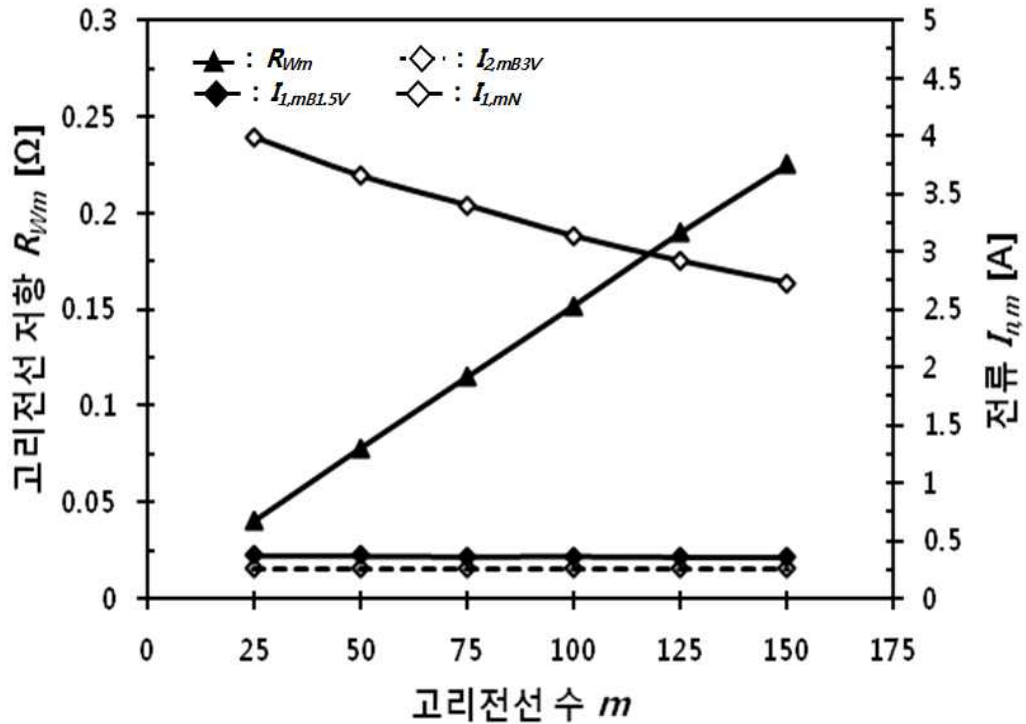
[그림 IV-10] 고리전선 수 m 에 따른 전자석 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,m}$ 과 전류 $I_{n,m}$: 3.0 V 0.25 A 전구를 연결하고 전지 2개를 직렬연결한 전기회로의 부하저항 $R_{L2,mB3V}$ (\blacktriangle)와 전기회로에 흐르는 전류 $I_{2,mB3V}$ (\blacklozenge), 1.5 V 0.3 A 전구를 연결하고 전지 1개를 연결한 전기회로의 부하저항 $R_{L1,mB1.5V}$ (\blacktriangle)과 전기회로에 흐르는 전류 $I_{1,mB1.5V}$ (\blacklozenge), 전구를 연결하지 않고 전지 1개를 연결한 전기회로의 부하저항 $R_{L1,mN}$ (\triangle)과 전기회로에 흐르는 전류 $I_{1,mN}$ (\lozenge)(Kim & Hyun, 2015)

[그림 IV-11]은 전자석을 감은 고리전선 수 m 에 따른 고리전선 저항 R_{Wm} 과 전류 $I_{n,m}$ 의 변화를 측정된 결과들을 보여준다. 고리전선 저항 R_{Wm} (▲)은 고리전선 수 m 이 $m = 25$ 일 때 $R_{W25} = 0.040 \Omega$ 에서 $m = 150$ 에서 $R_{W150} = 0.225 \Omega$ 으로 거의 일정한 비율로 증가하며, 그 증가량 ΔR_{Wm} 은 $\Delta R_{Wm} = 0.185 \Omega$ 이다. 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전자석의 전기회로인 경우 전류 $I_{2,mB3V}$ (◆)는 고리전선 수 m 이 $m = 25$ 일 때 $I_{2,25B3V} = 0.259 A$ 에서 $m = 150$ 일 때 $I_{2,150B3V} = 0.255 A$ 로 아주 작은 양의 전류 $\Delta I_{2,mB3V} = 0.004 A$ 가 감소한다. 1.5 V 0.3 A 전구를 연결한 전자석의 전기회로인 경우는 $I_{1,mB1.5V}$ (◆)은 고리전선 수 m 이 $m = 25$ 일 때 $I_{1,25B1.5V} = 0.373 A$ 에서 $m = 150$ 일 때 $I_{1,150B1.5V} = 0.360 A$ 로 작은 양의 전류 $\Delta I_{1,mB1.5V} = 0.013 A$ 가 감소한다(Kim & Hyun, 2015).

고리전선의 저항 R_{Wm} (▲)을 [그림 IV-10]의 전구를 연결한 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,mB}$ 와 비교할 경우, 고리전선의 저항 R_{Wm} 은 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전기회로의 부하저항 $R_{L2,mB3V}$ 의 0.003배에서 0.019배가 작은 양이며, 1.5 V 0.3 A 전구를 연결한 전기회로 부하저항 $R_{L1,mB1.5V}$ 의 0.010배에서 0.054배가 작은 양이다. 이러한 작은 비율은 고리전선의 저항 R_{Wm} 이 전구를 연결한 전기회로의 부하저항 $R_{Ln,mB}$ 을 결정하는 데 비중이 있는 저항이 될 수 없다는 것을 의미한다(Kim & Hyun, 2015).

전구를 연결하지 않은 전기회로에서 고리전선의 저항 R_{Wm} (▲)은 그 전기회로의 부하저항 $R_{L1,mN}$ 의 0.253배에서 0.701배로서 의미가 있는 양이다. 이것은 고리전선의 저항 R_{Wm} 이 전기회로의 부하저항 $R_{L1,mN}$ 의 큰 비중을 차지한다는 것이다. 전구를 연결하지 않은 전기회로인 경우 전류 $I_{1,mN}$ (◆)은 $m = 25$ 일 때 $I_{1,25N} = 3.992 A$ 에서 $m = 150$ 일 때 $I_{1,150N} = 2.726 A$ 로 $\Delta I_{1,n,mN} = 1.266 A$ 의 전류가 감소한다. 고리전선의 수 m 이 증가함에 따라 전류 $I_{1,mN}$ 가 감소하는 것은 고리전선의 저항 R_{Wm} 이 고리전선 수 m 에 비례하여 커짐으로 인하여, [그림 IV-10]에서 보여주는 바와 같이, 고리전선의 저항 R_{Wm} 을 포함하는 부하저항

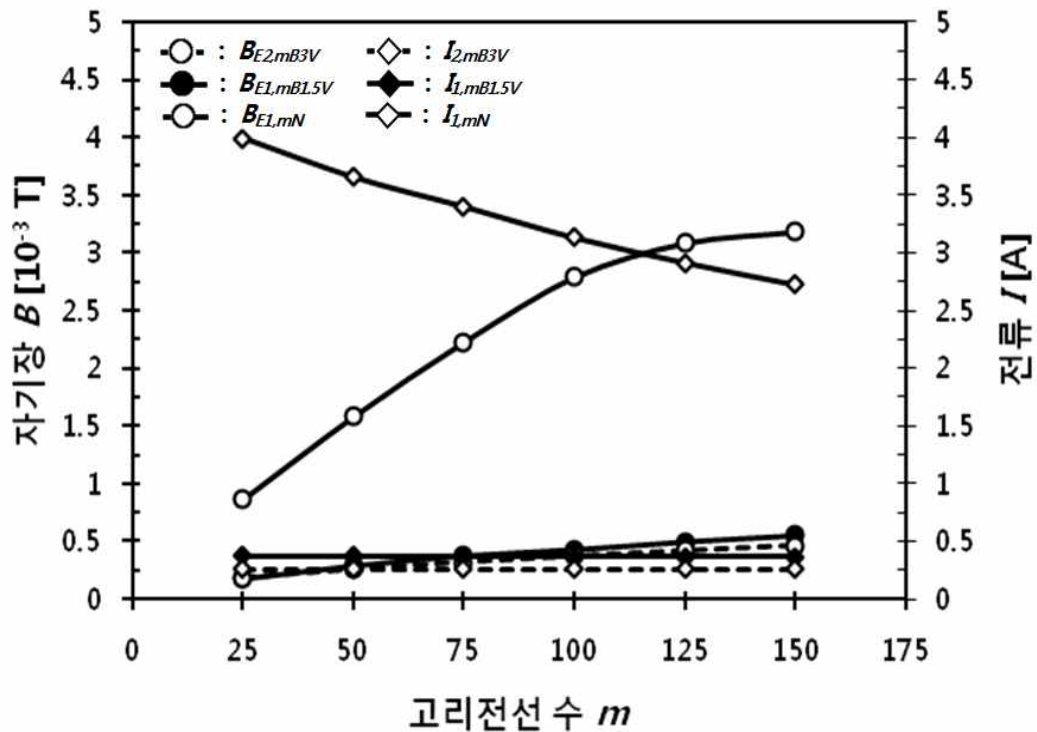
$R_{L1,mN}$ 이 커지는 데 기인한다고 할 수 있다(Kim & Hyun, 2015).



[그림 IV-11] 고리전선 수 m 에 따른 고리전선의 저항 R_{Wm} 과 전류 $I_{n,m}$: 고리전선 수 m 에 따른 고리전선의 저항 R_{Wm} (▲), 3.0 V 0.25 A 전구를 연결하고 전지 2개를 직렬연결한 전기회로에 흐르는 전류 $I_{2,mB3V}$ (◇), 1.5 V 0.3 A 전구를 연결하고 전지 1개를 연결한 전기회로에 흐르는 전류 $I_{1,mB1.5V}$ (◆), 전구를 연결하지 않고 전지 1개를 연결한 전기회로에 흐르는 전류 $I_{1,mN}$ (◇)(Kim & Hyun, 2015)

[그림 IV-12]는 고리전선 수 m 에 따른 전자석의 자기장 $B_{En,m}$ 과 전류 $I_{n,m}$ 관계를 측정된 결과들을 보여준다. 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전자석의 전기회로인 경우 전류 $I_{2,mB3V}$ (◇)은 $I_{2,25B3V} = 0.260$ A에서 고리전선 수 m 이 증가함에 따라 $I_{2,150B3V} = 0.255$ A으로 감소하지만, 전자석의 자기장 $B_{E2,mB3V}$ (○)은 고리전선 수 m 이 증가함에 따라 $B_{E2,25B3V} = 0.181 \times 10^{-3}$ T에서 $B_{E2,150B3V} = 0.464 \times 10^{-3}$ T로 고리전선 수 m 에 거의 비례하여 증가한다. 그리

고 1.5 V 0.3 A 전구를 연결한 전기회로인 경우 전류 $I_{1,mB1.5V}$ (◆)는 $I_{1,25B1.5V} = 0.370$ A 에서 $I_{1,150B1.5V} = 0.363$ A 으로 감소하지만, 전자석의 자기장 $B_{E1,mB1.5V}$ (●)는 $B_{E1,25B1.5V} = 0.178 \times 10^{-3}$ T 에서 고리전선 수 m 에 거의 비례하여 $B_{E1,150B1.5V} = 0.548 \times 10^{-3}$ T 로 증가한다(Kim & Hyun, 2015).



[그림 IV-12] 고리전선 수 m 에 따른 전자석의 자기장 $B_{En,m}$ 과 전류 $I_{n,m}$: 3.0 V 0.25 A 전구를 연결하고 전지 2개를 직렬연결한 전자석의 자기장 $B_{E2,mB3V}$ (○)와 전기회로에 흐르는 전류 $I_{2,mB3V}$ (◇), 1.5 V 0.3 A 전구를 연결하고 전지 1개를 연결한 전자석의 자기장 $B_{E1,mB1.5V}$ (●)와 전기회로에 흐르는 전류 $I_{1,mB1.5V}$ (◆), 전구를 연결하지 않고 전지 1개를 연결한 전자석의 자기장 $B_{E1,mN}$ (○)와 전기회로에 흐르는 전류 $I_{1,mN}$ (◇)(Kim & Hyun, 2015)

그러나 전구를 연결하지 않은 전기회로인 경우 전류 $I_{1,mN}$ (◇)은 $I_{1,25N} = 3.992$ A 에서 고리전선 수 m 이 증가함에 따라 $I_{1,50N} = 3.655$ A, $I_{1,75N} = 3.400$ A, $I_{1,100N} = 3.132$ A, $I_{1,125N} = 2.916$ A, $I_{1,150N} = 2.726$ A 로 감소하

지만, 전자석의 자기장 $B_{E1,mN}$ (\odot)은 $B_{E1,25N} = 0.865 \times 10^{-3}$ T에서 고리전선 수 m 이 증가함에 따라 $B_{E1,50N} = 1.583 \times 10^{-3}$ T, $B_{E1,75N} = 2.228 \times 10^{-3}$ T, $B_{E1,100N} = 2.798 \times 10^{-3}$ T, $B_{E1,125N} = 3.083 \times 10^{-3}$ T, $B_{E1,150N} = 3.181 \times 10^{-3}$ T로 증가하나, 전자석의 자기장 $B_{E1,mN}$ 가 고리전선 수 m 에 비례하여 증가하지는 않는다(Kim & Hyun, 2015).

[그림 IV-6]과 [그림 IV-7]에서 최소한 1개의 클립을 전자석에 붙는 데 필요한 전자석의 자기력을 작용하기 위해서는 전자석의 자기장의 크기는 0.403×10^{-3} T이어야 하며, 또한 2개 이상의 클립이 전자석에 붙을 수 있는 자기력을 작용하기 위해서는 자기장이 0.599×10^{-3} T 이상이 되어야 한다는 것을 보여 주고 있다. 이에 따르면, [그림 IV-8]에서 보여주는 바와 같이, 3.0 V 0.25 A 전구를 연결한 전기회로의 전자석들인 경우 고리전선 수 m 이 $m = 100$ 이하인 전자석에는 1개의 클립도 붙을 수 없으며, 자기장 $B_{E2,125B3V} = 0.418 \times 10^{-3}$ T와 $B_{E2,150B3V} = 0.464 \times 10^{-3}$ T인 고리전선 수 m 이 $m = 125$ 와 $m = 150$ 인 전자석에만 1개의 클립이 붙을 수 있다. 그리고 1.5 V 0.3 A 전구를 연결한 전기회로의 전자석들인 경우에는 고리전선 수 $m = 75$ 이하인 전자석에는 1개의 클립도 붙을 수 없으며, 자기장 $B_{E1,100B1.5V} = 0.428 \times 10^{-3}$ T, $B_{E1,125B1.5V} = 0.495 \times 10^{-3}$ T, $B_{E1,150B1.5V} = 0.548 \times 10^{-3}$ T인 고리전선 수 $m = 100$, $m = 125$, $m = 150$ 인 전자석들에만 1개의 클립이 붙을 수 있다는 것이다(Kim & Hyun, 2015).

전구를 연결한 전기회로의 전자석의 자기장 $B_{En,mB}$ 가 고리전선 수 m 을 증가시킴에도 불구하고 충분히 커지지 않는 것은 전류 $I_{n,mB}$ 가 매우 작다는 것이다. 그 원인으로서는 전구의 저항 $R_{Bn,mB}$ 이 커서 전류 $I_{n,mB}$ 를 작게 한다는 것이다. 그리고 전구를 연결하지 않은 전기회로의 전자석의 자기장 $B_{E1,mN}$ 가 고리전선 수 m 에 비례하여 증가하지 않는 것은, [그림 IV-9], [그림 IV-10], 그리고 [그림 IV-11]에서 보여주는 바와 같이 고리전선 수 m 이 증가함에 따라 그 부하저항 $R_{L1,mN}$ 이 커져서 전류 $I_{1,mN}$ 가 감소하기 때문이다. 이것은 고리전선 저항 R_{Wm} 을 통제하지 못하고 있는 것이 주된 원인이며, 전지의 합성내부저항 $r_{bn,m}$ 가 일정

하지 않고 부하저항 $R_{Ln,mB}$ 이 클수록 전지의 합성내부저항 $r_{bn,m}$ 가 커지는 것도 원인이 될 수 있다(Kim & Hyun, 2015).

[그림 IV-8]에서 보여주는 바와 같이 고리전선 수를 증가시켜도 전구를 연결한 전기회로의 전자석에 클립이 붙지 않는 이유는 전기회로의 부하저항의 크기가 전지의 합성기전력의 크기에 비하여 너무 크기 때문이다. 이러한 상대적으로 큰 전기회로의 부하저항은 전자석의 전기회로에 매우 작은 전류를 흐르게 한다. 이러한 경우 전자석의 고리전선 수를 증가시킴에 따라 자기장은 증가하지만, 전자석에 클립이 붙을 수 있는 자기력을 작용할 수 있는 세기 이상의 자기장을 형성시키기가 어렵다는 것이다. 그 원인으로는 전자석의 전기회로의 부하저항이 인가되는 전압에 따라 커지는 비선형 저항인 전구의 저항에 있다고 할 수 있다(Hyun & Park, 2012). 전구를 연결하지 않은 전기회로의 전자석이 고리전선 수를 증가시킬 경우에도 고리전선 수에 비례하여 전자석에 붙는 클립의 수가 증가하지 않는 이유는, 고리전선의 저항이 작은 크기이지만 전구를 연결하지 않은 전기회로에서는 고리전선의 저항이 부하저항의 큰 비율을 차지하는 것으로, 고리전선 수에 비례하여 고리전선의 저항이 커짐으로 인하여 전자석의 전기회로의 전류가 작아지기 때문이다(Kim & Hyun, 2015).

결국 전자석에 감는 고리전선 수를 증가시켜도 예상과 다르게 전자석에 붙는 클립의 수가 고리전선 수에 비례하여 늘어나지 않는다는 제3차 초등학교 과학과 교육과정의 실험수업에서의 문제는 고리전선의 저항을 변인통제하지 않는 데에 기인하는 것으로 볼 수 있다(교육과학기술부, 2013; 교육부, 1997a; 교육인적자원부, 2002; 문교부, 1973, 1983, 1991). 또한 이러한 원인으로 인하여 실험 결과로부터 ‘전자석의 자기력이 고리전선 수의 제공에 비례한다’(현동걸 등, 2015)는 결론을 이끌어 낼 수 없었으며, 잘못된 안내된 ‘전자석의 자기력이 고리전선 수에 비례한다’(고호관, 2009; 교육인적자원부, 2002; 문교부, 1973; 최영완, 1998; 한명희, 1999)는 전자석의 자기력에 대한 오개념의 진위여부를 확인할 수도 없었다는 것이다. 그리고 제4차 초등학교 과학과 교육과정 이후의 실험수업에서 발생하는 편이나 클립이 전혀 전자석에 붙지 않는다는 문제는, 우선적으로 전자석에 대한 이론이나 실험적인 정보들을 바탕으로 전자석 관련 실험수업을 구성해야 함에도

불구하고, 전구의 저항의 크기를 간과하여 실험수업을 구성한 결과라고 할 수 있겠다(Kim & Hyun, 2015).

2. 새로운 전자석 개발

가. 새로운 전자석 개발 배경

제3차 초등학교 과학과 교육과정에서부터 현행 초등학교 과학과 교육과정에 이르기까지 전자석 관련 실험수업에서 사용되는 전자석의 구성과 제작 방법은 동일하다. 전자석의 심으로 불에 달구었다가 천천히 식힌 지름이 5 mm 정도인 못을 사용하며, 못의 표면을 종이나 절연 테이프로 감싼다. 그리고 전자석을 감는 고리전선은 지름이 0.5 mm에서 0.7 mm 정도인 에나멜선을 사용하며, 에나멜선을 심인 못 둘레에 원형 고리모양으로 같은 방향이 되도록 나란하게 촘촘히 감아 솔레노이드 형태로 만든다. 전자석의 고리전선에 전류를 공급하는 전기회로는 전지, 전구, 스위치, 그리고 이들을 연결하는 집게전선 등으로 구성된다(교육과학기술부, 2013; 교육부, 1997a; 교육인적자원부, 2002; 문교부, 1973, 1983, 1991; Hyun et al., 2015).

전자석의 제작 과정에서 못을 전자석의 심으로 사용하는 이유는 보다 더 센 자기장을 만들기 위한 것이며, 못을 불에 달구었다가 천천히 식히는 이유는 못이 주변의 다른 자기장에 의하여 이미 자기화되어 있을 지도 모르기 때문에 이를 없애고, 못은 자기이력이 큰 강철로 되어 있어 자기이력이 작은 연철로 만들기 위한 것으로 설명하고 있다(송관섭과 김정덕, 2002). 못의 표면을 종이나 절연 테이프로 감싸는 것은 못과 에나멜선의 절연을 고려한 것이며, 에나멜선이 완전한 상태인 경우에는 종이나 절연 테이프로 감싸지 않아도 무방하다고 설명하고 있다(교육부, 1997a; 교육인적자원부, 2002; 문교부, 1983, 1991; Hyun et al., 2015).

전자석 관련 실험수업에서 계속적으로 발생하는 문제들 중에서 ‘전자석 만들기가 어렵다’는 것은 기술적 능력과 관련된 문제로서, 실험수업에서 요구되는 기술적인 능력이 학습자들의 기술적인 능력 수준 이상이라는 것을 의미한다. 전자석

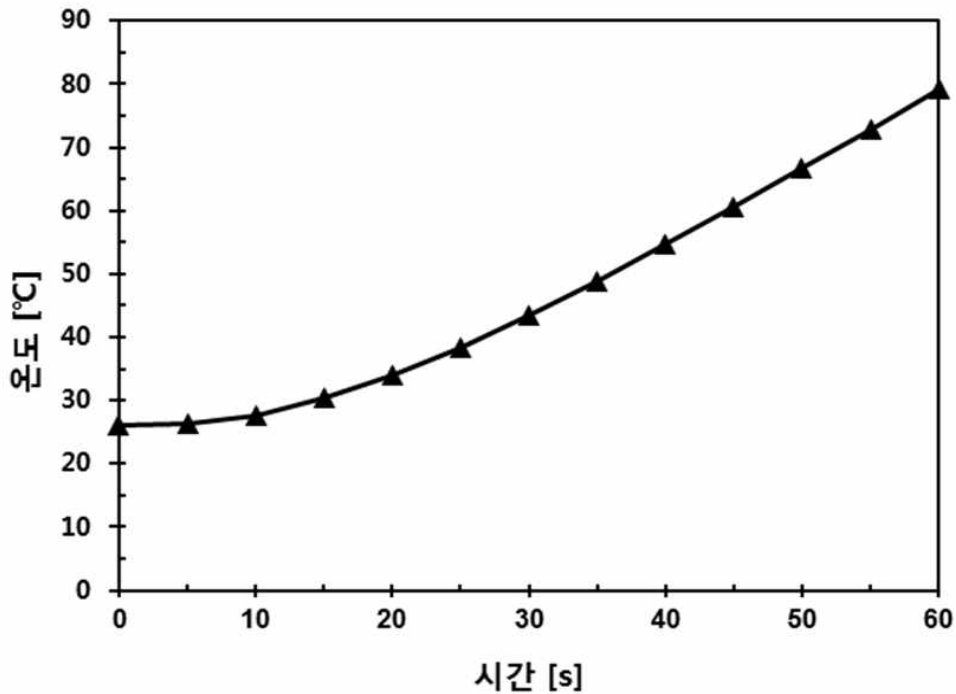
을 만드는 과정을 살펴보면, 전자석의 심으로 사용되는 못(KS D3553)은 탄소(C) 함유율이 0.15~0.23%이고 투자율이 큰 저탄소강인 연강선재(SWRM)로 만들어진다(김석주, 정성안, 박상우, 채동현, 현동걸, 2014). 이때 철못에 함유된 탄소와 불순물로 포함된 탄소, 질소 등은 용해도가 상온에서 낮기 때문에 사용과정에서 Fe_3C 등으로 석출되어 철심 내부에 끼이게 되어 자기력 이동을 방해하고, 투자율을 낮추며, 보자력을 높이는 원인이 된다(고재귀와 송재만, 1997; 김철구과 남균, 2003; 김한민, 강일구, 이재일, 2001). 이러한 이유로 자기이력효과를 높이는 원인이 되는 못에 함유된 탄소를 제거하고 못의 잔류자기장을 제거하기 위하여 철의 퀴리온도인 770 °C 이상의 온도가 되도록 오랫동안 불에 달구었다가 천천히 식혀 사용해야 한다(고재귀와 송재만, 1997; 김한민 등, 2001). 그리고 지름이 0.5 mm에서 0.7 mm 정도인 탄성이 작은 에나멜선을 촘촘히 100 회 정도 가늘고 미끄러운 못에 주의하여 감아야 한다. 이러한 과정들로 전자석을 만드는데 많은 시간이 소요되어 실험수업을 진행하는데 많은 어려움이 발생한다(김석주 등, 2014; Hyun et al., 2015).

그리고 실험 목적상 고리전선 수를 달리한 전자석이 필요할 경우마다 매번 전자석을 만들어야 하는 번거로움이 있고, 사용했던 전자석을 다시 사용하는 경우에는 잔류자기장이 철심에 남아 있어서 의도하는 실험 결과를 얻기 어렵다. 또한 에나멜선은 탄성이 작은 구리선으로 되어 있기 때문에 분리하여 재활용하기가 어려우며 실험수업이 끝나면 소중한 자원을 폐기처분해야하는 문제도 있다(김석주 등, 2014; Hyun et al., 2015).

이러한 문제들로 인하여 교사나 과학보조교사가 직접 전자석을 제작하거나 과학교재사에서 판매하는 전자석을 이용하여 수업에 활용할 수 있겠으나 전자석 제작 자체가 하나의 교육활동이고, 구체적 조작기 단계에 있는 학생들에게 구체적 체험활동과 노작 활동이 학생들이 인지발달에 크게 기여(최유현, 1997)할 뿐만 아니라 창의성 향상(이정원과 정모근, 2002; 정미경, 2005)과 신체 발달과 건강 유지(이재원, 1991; 정훈, 2013)에 도움을 주기 때문에 학생들이 직접 전자석을 만들 수 있는 기회를 제공해야 한다.

또한 선행연구(Kim & Hyun, 2015; Hyun, 2010)의 결과에 의하면 전류의 자기작용을 직관적으로 관찰하기 위해서는 전기회로에 큰 전류가 흘러야 하지만 [그

림 IV-13]과 같이 에나멜선에 큰 전류를 흘려보낼 때 열이 급격하게 증가하여 단락과 사용함에 위험이 따른다는 문제가 발생한다.



[그림 IV-13] 길이가 170 cm, 직경이 0.5 mm 에나멜선에 전류 5 A 를 60초간 흘려보냈을 때 에나멜선의 온도 변화

나. 새로운 전자석의 개발

이 연구에서 개발된 새로운 전자석은 심으로 전산볼트(threaded rod)와 고리전선으로 비닐평형코드(VFF; Flat-Type Vinyl cord) 이하 비닐전선)로 구성되며, 심에 고리전선을 고정하는 끈으로는 뽕끈(칼라타이)을 사용하여 학생들이 짧은 시간동안 전자석을 쉽게 만들 수가 있을 뿐만 아니라 또한 쉽게 분해할 수 있는 것을 그 특징으로 한다(Hyun et al., 2015).

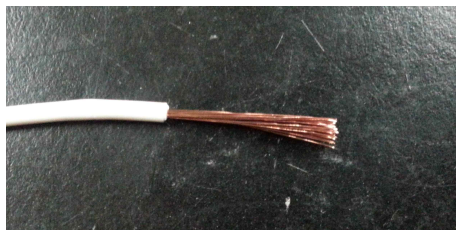
일반적으로 산업용 전자석의 심은 자기이력효과가 적고 투자율이 높은 규소강을 사용한다. 규소강에 함유된 규소(Si)는 자기이력효과를 낮추는 성질을 지니고 있기 때문이다(고재귀와 송재만, 1997; 김한민 등, 2001). 재질이 압연강재인

SS400(C 0.16%, Si 0.31%, Mn 1.33%, P 0.013%, S 0.005%)로 성형되는 전산볼트는 상대투자율 2100인 강자성체이며, 규소 함유율이 높아서 자기이력효과를 낮출 수 있는 조건을 갖추고 있으며(김승년, 2013), 탄소(C) 함유율이 낮아 실험수업에서 전산볼트를 심으로 하는 전자석을 만들 때에 못을 사용하는 경우에서와 같이 불에 달구어 연철화하는 과정이 없이 전자석을 만들 수 있다. 또한 전산볼트는 지름이 6 mm 이상의 굵기와 [그림 IV-14]와 같이 겉면에 산과 골이 있어 전선을 전산볼트의 축에 따라 촘촘히 감기가 편한 외형을 하고 있으며(김석주 등, 2014), 6 mm, 10 mm, 12 mm 지름과 1 m, 2 m, 3 m 길이로 시중에서 쉽게 구할 수 있다. 이것은 심의 단면적이 다른 전자석을 만들어 심의 단면적에 따른 전자석의 성질을 설명하는 실험도 가능하게 한다(Hyun et al., 2015).



[그림 IV-14] 전산볼트

비닐전선은 어느 정도의 탄성이 있어 전자석의 심에 감거나 심에서 분리하는데 편리하여 재사용할 수 있는 장점을 가지고 있다(Hyun et al., 2015). 이 연구에서는 비닐평형코드(VFF, 0.75 mm^2)의 2심(2-core)을 1심(single core)으로 분리하여 170 cm 의 길이로 자른 다음, 그 양끝의 피복을 [그림 IV-15]와 같이 2 cm 정도 벗긴 후, 그 끝을 [그림 IV-16]과 같이 납땜하여 사용한다. 이는 비닐전선을 이루는 가는 구리선들이 흩어지는 것을 방지하고 집게전선과 연결이 편하도록 하기 위함이다.

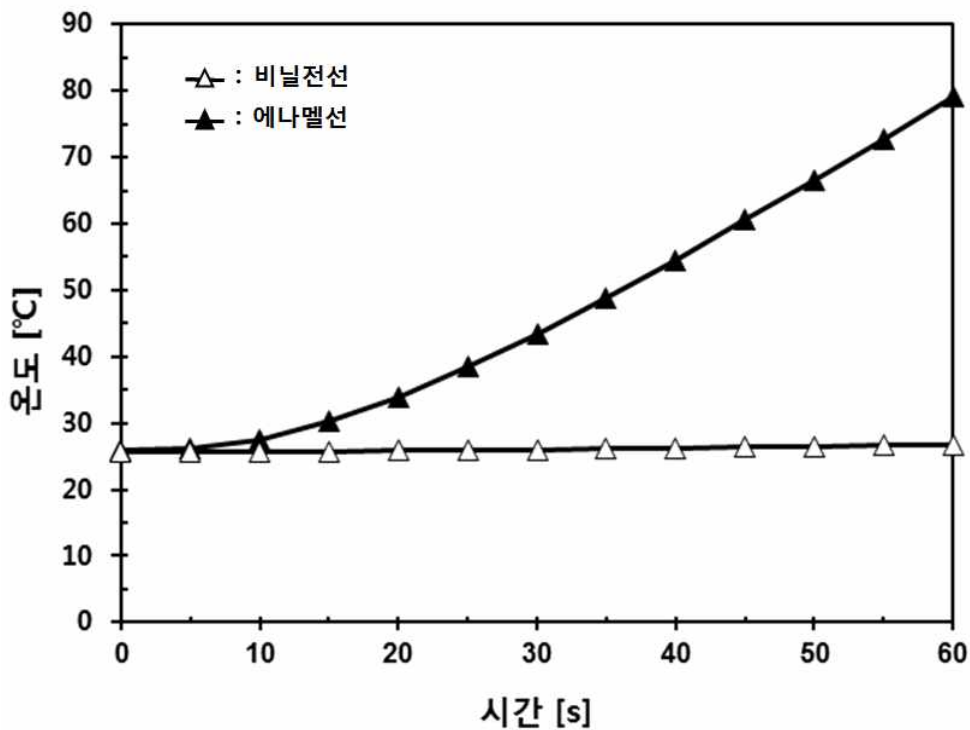


[그림 IV-15] 전선 끝 피복을 2 cm 정도 벗긴 모습



[그림 IV-16] 전선 끝 피복을 2 cm 정도 벗긴 후 납땜한 모습

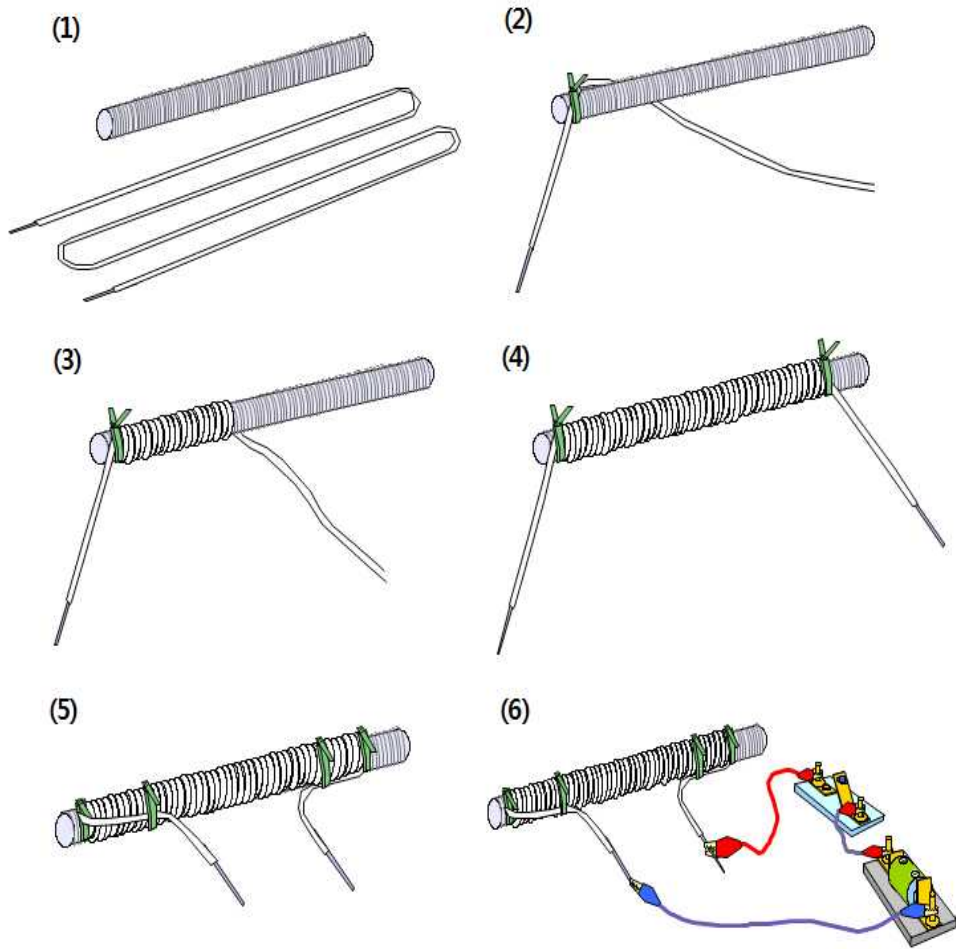
이때 사용되는 비닐전선 도체의 허용 온도가 60 ℃, 절연체인 폴리염화비닐수지(PVC; polyvinyl chloride resin)의 연화점이 80 ℃ 이다(최충식, 2011). 전선에 5 A 전류를 1분간 흘려 보냈을 때 뜨거움이 느껴질 정도로 열이 발생하여 단락의 위험이 있는 에나멜선과 달리 개발된 전자석에 사용되는 비닐전선은 [그림 IV-17]과 같이 처음 온도 15.24 ℃ 에서 60초 후 16.32 ℃ 로 온도변화 정도가 1 ℃ 정도 크지 않아 단락의 위험과 금속이 열을 받으면 저항이 변해 실험에 영향을 미칠 수 있는 문제를 최소화 할 수 있다. 땀은 시중에서 쉽게 구할 수 있으며, 탄성이 작고 단단히 묽어 매거나 풀기가 편하다.



[그림 IV-17] 길이가 170 cm인 비닐전선과 에나멜선에 전류 5 A 를 60 초간 흘려 보냈을 때 온도 변화

이 연구에서 개발하는 새로운 전자석을 만드는 절차와 방법은 다음과 같으며, [그림 IV-18]에서는 그림으로 보여준다(Hyun et al., 2015).

- (1) 지름이 10 mm 이고 15 cm 길이인 전산볼트, 그 양끝의 피복을 2 cm 정도 벗긴 170 cm 길이인 비닐전선, 빵끈을 준비한다. 준비된 비닐전선의 저항은 약 0.2Ω 정도이다.
- (2) 비닐전선의 한 끝 부분을 약 10 cm 정도 남기고, 전산볼트의 한 끝에 비닐전선을 빵끈으로 묶어 매어 고정시킨다.
- (3) 비닐전선을 전산볼트에 같은 방향으로 나란하게 감아 고리전선을 만든다. 전자석을 감은 고리전선의 길이를 일정하게 통제할 경우에는 미리 전산볼트의 겉면에 길이를 표시하고 균일한 간격으로 원하는 고리전선의 수를 감도록 한다.
- (4) 원하는 고리전선 수만큼 감은 후 고리전선을 빵끈으로 전산볼트에 묶어 매어 고정시킨다.
- (5) 비닐전선의 양 끝 부분을 안쪽으로 구부려 비닐전선의 끝부분을 전산볼트에 빵끈으로 묶어 매어 고정시킨다.
- (6) 전산볼트에 감긴 비닐전선의 양 끝에 전지와 스위치를 연결한다. 그리고 실험을 한다.
- (7) 실험이 끝난 다음에는 전산볼트와 비닐전선을 묶어 맨 빵끈을 풀고 전산볼트와 비닐전선을 분리한다.



[그림 IV-18] 전산볼트, 비닐전선, 그리고 빵판을 이용한 새로운 전자석 제작 과정(Hyun et al., 2015)

다. 새로운 전자석의 특성 분석

1) 변인에 따른 전자석의 자기력 분석

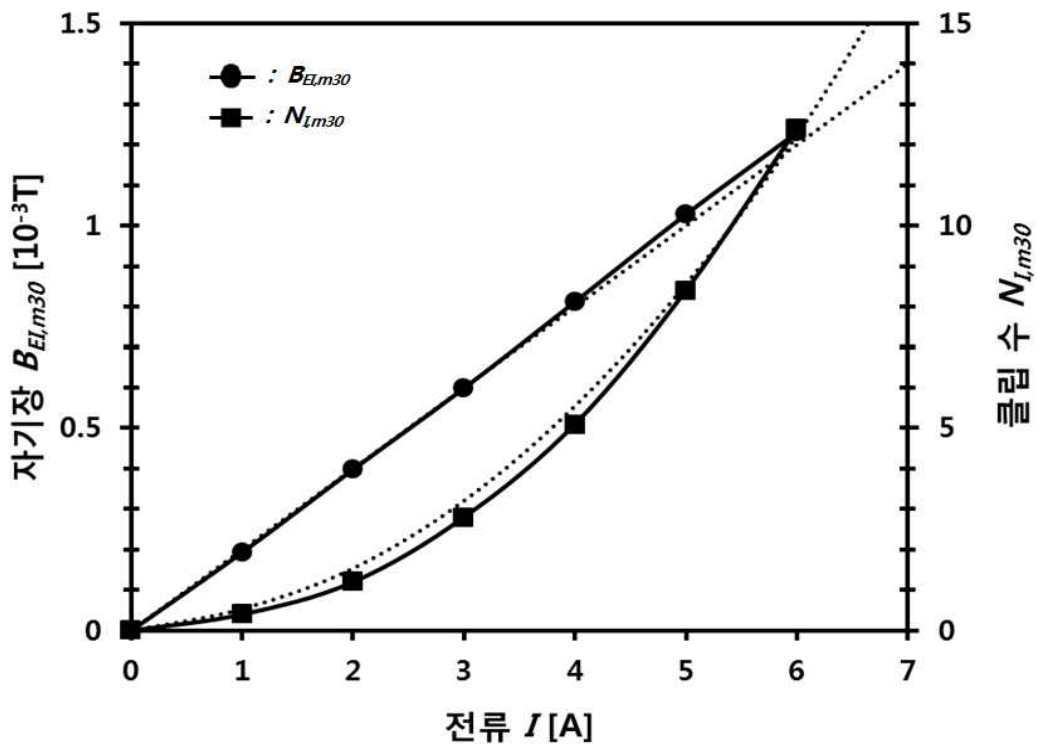
가) 전류에 따른 전자석의 자기력

[그림 IV-19]는 직경 \varnothing 이 $\varnothing = 9.3$ mm인 전산볼트, 고리전선 수 m 이 $m = 30$, 고리전선 길이 L 이 $L = 120$ mm인 전자석에 직류전원장치를 이용하여 전류 I 를 1 A부터 6 A까지 1 A 간격으로 증가시키며 전자석의 자기장 $B_{EI,m30}$ 과 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립의 수 $N_{I,m30}$ 을 측정된 결과이다. 전류 I 가 1 A씩 증가함에 따라 전자석의 자기장 $B_{EI,m30}$ (●)는 $B_{E1,m30} = 0.193 \times 10^{-3}$ T, $B_{E2,m30} = 0.398 \times 10^{-3}$ T, $B_{E3,m30} = 0.599 \times 10^{-3}$ T, $B_{E4,m30} = 0.812 \times 10^{-3}$ T, $B_{E5,m30} = 1.028 \times 10^{-3}$ T, $B_{E6,m30} = 1.230 \times 10^{-3}$ T로 증가하였다. 전류 I 가 1 A씩 커질 때마다 전자석의 자기장 증가량 $\Delta B_{EI,m30}$ 는 각각 0.205×10^{-3} T, 0.201×10^{-3} T, 0.213×10^{-3} T, 0.216×10^{-3} T, 0.202×10^{-3} T로 평균 $\Delta B_{EI,m30} = 0.207 \times 10^{-3}$ T씩 증가하였다. 실험에서 사용되어진 자기장 센서 (KSD-1007)의 분해능이 0.005×10^{-3} T인 것을 감안하면 전자석의 자기장 증가량 $\Delta B_{EI,m30}$ 가 거의 일정함을 알 수 있다. 또한 [그림 IV-19]에서처럼 전류 I 에 따른 전자석의 자기장 $B_{EI,m30}$ 변화가 $B_{EI,m30} = aI$ ($a = 0.207 \times 10^3 T^{-1}$)의 일차함수인 추세선을 거의 따르는 것으로 보아 전자석의 자기장 B_E 는 전류 I 에 일차함수적으로 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다.

한편 전류 I 가 1 A씩 커질 때 마다 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립의 수 $N_{I,m30}$ (■)은 $N_{1,m30} = 0.4$, $N_{2,m30} = 1.2$, $N_{3,m30} = 2.8$, $N_{4,m30} = 5.1$, $N_{5,m30} = 8.4$, $N_{6,m30} = 12.4$ 로 증가하였다. II장에서 전자석의 자기력은 전자석과 물체의 상호작용이고, III장에서 전자석과 상호작용을 통해 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립의 수로 전자석의 자기력을 어렵한다는 전제를 하였다. 이에 따라 전류 I 와 전

자석의 자기력 F_M 와의 관계를 살펴보면, 전류 I 가 증가함에 따라 전자석의 자기력 F_M 또한 증가하고 있음을 알 수 있다. 하지만 전류 I 에 따라 비례하여 증가하는 전자석의 자기장 $B_{EL,m30}$ 와는 달리 전류 I 가 증가할수록 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립의 수 증가량 $\Delta N_{I,m30}$ 은 각각 0.8, 1.6, 2.3, 3.3, 4.0로 점점 커지고 있음을 알 수 있다. 또한 전류 I 가 증가함에 따라 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립의 수 $N_{I,m30}$ 은 $N_{I,m30} = bI^2$ ($b = 0.3342 A^{-2}$)로 구해지는 이차함수인 추세선을 거의 따라 증가한다. 이것은 전자석의 자기력 F_M 가 전자석 고리전선에 흐르는 전류 I 의 제곱, 즉 이차함수적으로 비례하여 증가한다는 것을 의미한다.

이상 정리해보면 전자석의 자기장 B_E 는 식 (II-7)과 같이 전류 I 에 비례하여 증가하고, 전자석의 자기력 F_M 는 전류의 제곱 I^2 에 비례한다는 식 (II-8)의 이론적 결과와 일치함을 알 수 있다.



[그림 IV-19] 직경 \varnothing 이 $\varnothing = 9.3$ mm인 전산볼트, 고리전선 수 m 이 $m = 30$, 고리전선 길이 L 이 $L = 120$ mm가 되도록 제작한 전자석의 전류 I 에 따른 전자석의 자기장 $B_{EL,m30}$ (●)와 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립의 수 $N_{I,m30}$ (■)

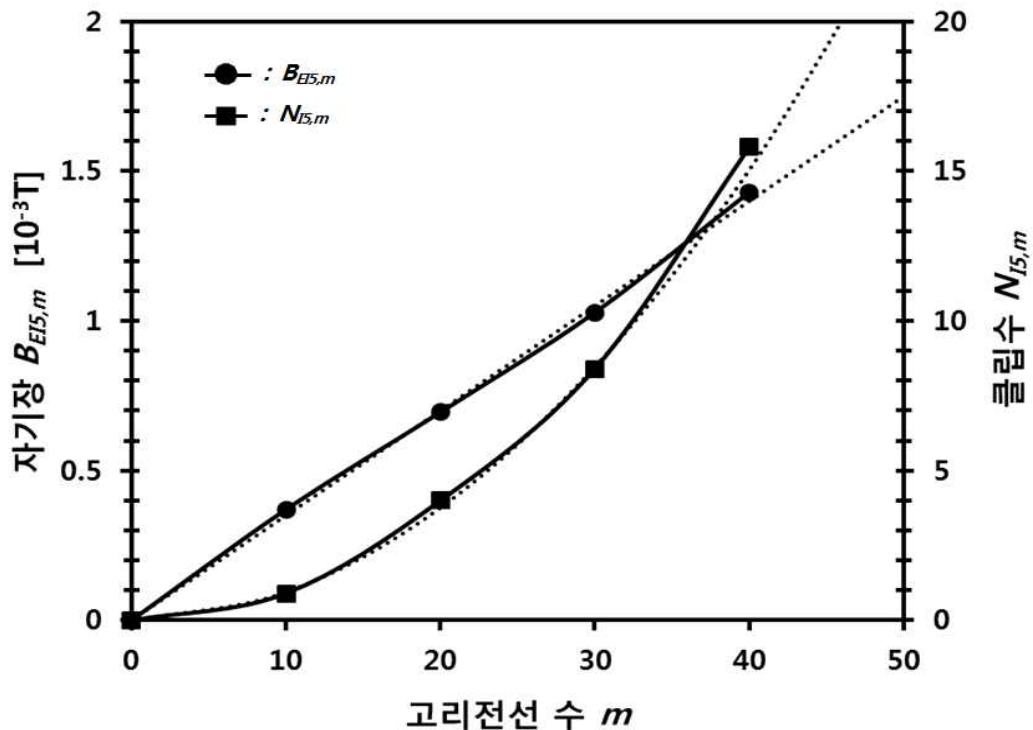
나) 고리전선 수에 따른 전자석의 자기력

직경 \varnothing 이 $\varnothing = 9.3 \text{ mm}$ 전산볼트에 고리전선 길이 L 이 $L = 120 \text{ mm}$ 가 되도록 비닐전선을 이용하여 제작한 전자석에 직류전원장치를 이용하여 고리전선에 전류 I 를 5 A 흐르도록 하였을 때, 고리전선 수 m 을 $m = 10$ 부터 $m = 40$ 까지 10간격으로 증가시키며 전자석의 자기장 $B_{EB,m}$ (●)과 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립의 수 $N_{B,m}$ (■)를 측정 한 결과는 [그림 IV-20]과 같다. 고리전선 수 m 이 증가함에 따라 전자석의 자기장 $B_{EB,m}$ (●)는 $B_{EB,m10} = 0.370 \times 10^{-3} \text{ T}$, $B_{EB,m20} = 0.695 \times 10^{-3} \text{ T}$, $B_{EB,m30} = 1.028 \times 10^{-3} \text{ T}$, $B_{EB,m40} = 1.430 \times 10^{-3} \text{ T}$ 로 측정되었다. 전자석의 자기장 $B_{EB,m}$ 은 고리전선 수 n 이 10씩 커질 때마다 평균 $\Delta B_{EB,m} = 0.350 \times 10^{-3} \text{ T}$ 씩 증가하였고, 고리전선 수 m 에 따른 전자석의 자기장 $B_{EB,m}$ 의 변화는 $B_{EB,m} = cm$ ($c = 0.035 \times 10^3 \text{ T}^{-1}$)로 구해지는 일차함수인 추세선을 거의 따라 증가하였다. 이는 고리전선 수 m 에 따라 전자석의 자기장 B_E 가 일차함수적으로 비례하여 증가한다는 것을 의미한다.

한편 고리전선 수 m 이 10씩 증가함에 따라 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립의 수 $N_{B,m}$ (■)은 $N_{B,m10} = 0.9$, $N_{B,m20} = 4.0$, $N_{B,m30} = 8.4$, $N_{B,m40} = 15.8$ 로 증가하였다. 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립의 수로 전자석의 자기력을 어림할 수 있다는 전제하에 고리전선 수에 따른 전자석의 자기력과의 관계를 살펴보면, 고리전선 수 m 이 증가함에 따라 전자석의 자기력 F_M 또한 증가하고 있음을 알 수 있다. 하지만 고리전선 수 m 이 증가함에 따라 비례하여 증가하는 전자석의 자기장 $B_{EB,m}$ 와 달리 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립의 수 증가량 $\Delta N_{B,m}$ 은 각각 3.1, 4.4, 7.4로 고리전선 수 m 이 커질수록 클립의 수 증가량 $\Delta N_{B,m}$ 이 커짐을 알 수 있다. 고리전선 수 m 이 증가함에 따라 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립의 수 $N_{B,m}$ 는 $N_{B,m} = dm^2$ ($d = 0.0094 \text{ A}^{-2}$)로 구해지는 이차함수인 추세선을 거의 따라 증가하고 있다. 이것은 전자석의 자기력 F_M 가 전자석 고리전선 수 m 에 비례하는 것이 아닌 고리전선 수의 제곱 m^2 에 비례하여 증가한다는 것을 의미한다.

다.

이상 정리해보면 자석의 자기장 B_E 는 식 (II-7)과 같이 고리전선 수 m 에 비례하여 증가하고, 전자석의 자기력 F_M 는 고리전선 수의 제곱 m^2 에 비례한다는 식 (II-8)의 이론적 결과와 일치함을 알 수 있다.



[그림 IV-20] 직경 ϕ 이 $\phi = 9.3 \text{ mm}$ 인 전산볼트, 고리전선 길이 L 이 $L = 120 \text{ mm}$ 가 되도록 제작한 전자석에 전류 I 가 5 A가 흐를 때 고리전선 수 m 에 따른 전자석의 자기장 $B_{E15,m}$ (●)과 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{15,m}$ (■)

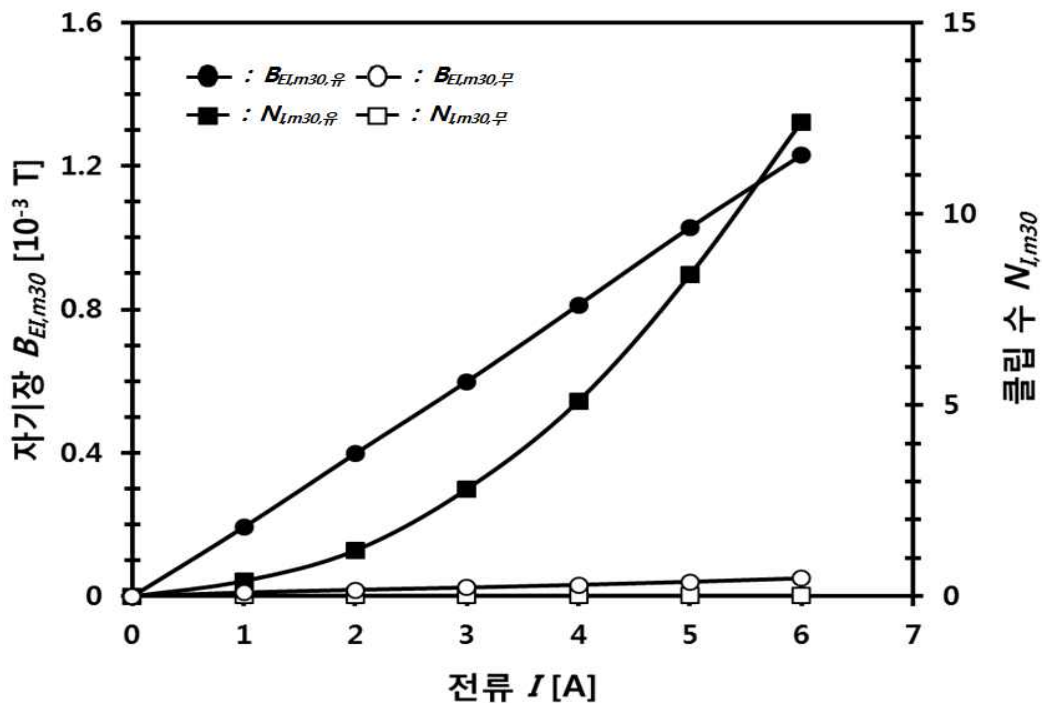
다) 철심 유무에 따른 전자석의 자기력

철심의 유무에 따른 전자석 세기 분석에는 철심으로 전산볼트를 사용한 전자석과 PVC 투명관을 이용한 철심이 없는 전자석을 사용하였다. 직경 ϕ 이 $\phi = 9.3 \text{ mm}$ 인 전산볼트와 PVC관에 고리전선 수 m 이 $m = 30$, 고리전선 길이 L 이 $L = 120 \text{ mm}$ 되도록 제작한 전자석에 전류 I 에 따른 전자석의 자기장

$B_{EI,m30,유무}$ 과 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{I,m30,유무}$ 결과는 [그림 IV-21] 과 같다. 먼저 전류 I 를 1 A부터 6 A범위까지 1 A 간격으로 증가시키며 전자석의 자기장 $B_{EI,m30,유무}$ 변화를 살펴보면, 전류 I 가 증가함에 따라 철심이 있는 전자석의 자기장 $B_{EI,m30,유}$ (●)는 $B_{EI1,m30,유} = 0.193 \times 10^{-3} T$, $B_{EI2,m30,유} = 0.398 \times 10^{-3} T$, $B_{EI3,m30,유} = 0.599 \times 10^{-3} T$, $B_{EI4,m30,유} = 0.812 \times 10^{-3} T$, $B_{EI5,m30,유} = 1.028 \times 10^{-3} T$, $B_{EI6,m30,유} = 1.230 \times 10^{-3} T$ 로 유도되었다. 철심이 있는 전자석의 자기장 $B_{EI,m30,유}$ 은 전류 I 가 1 A씩 커질 때마다 약 $\Delta B_{EI,m30,유} = 0.200 \times 10^{-3} T$ 씩 커지는 비례관계에 있다는 것을 알 수 있다. 철심이 없는 전자석의 자기장 $B_{EI,m30,무}$ (○)는 $B_{EI1,m30,무} = 0.010 \times 10^{-3} T$, $B_{EI2,m30,무} = 0.017 \times 10^{-3} T$, $B_{EI3,m30,무} = 0.023 \times 10^{-3} T$, $B_{EI4,m30,유} = 0.030 \times 10^{-3} T$, $B_{EI5,m30,무} = 0.038 \times 10^{-3} T$, $B_{EI6,m30,유} = 0.047 \times 10^{-3} T$ 로 유도되었다. 철심이 없는 전자석의 자기장 $B_{EI,m30,무}$ 는 전류가 1 A씩 커질 때마다 약 $\Delta B_{EI,m30,무} = 0.007 \times 10^{-3} T$ 씩 커지고 있다. 철심이 있는 전자석의 자기장 $B_{EI,m30,유}$ 와 비교해 봤을 때 자기장 크기는 상대적으로 작지만 철심이 없는 전자석도 전류 I 에 따라 비례 관계에 있다는 것을 알 수 있다. 철심이 없는 전자석의 자기장 $B_{EI,m30,무}$ 가 철심이 있는 전자석의 자기장 $B_{EI,m30,유}$ 보다 0.03배에서 0.05배로 작아 철심이 전자석의 자기장 $B_{EI,m30,유}$ 를 크게 하는데 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

전류 I 가 1 A씩 커질 때 마다 철심이 있는 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립의 수 $N_{I,m30,유}$ (■)은 $N_{I1,m30,유} = 0.4$, $N_{I2,m30,유} = 1.2$, $N_{I3,m30,유} = 2.8$, $N_{I4,m30,유} = 5.1$, $N_{I5,m30,유} = 8.4$, $N_{I6,m30,유} = 12.4$ 로 전류 I 가 커짐에 따라 전자석에 달라 붙는 클립 수의 증가량 $\Delta N_{I,m30,유}$ 또한 커지는 경향이 있다. 반면 철심이 없는 전자석인 경우 전류 I 에 상관없이 전자석이 붙여 끌어올리는 클립 수 $N_{I,m30,무}$ (□)은 모두 0이었다. 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 N 으로 전자석의 자기력 F_M 을 어림할 수 있다는 전제하에 살펴보면, 철심이 있는 전자석의 자기력 $F_{M유}$ 는 전류 제곱 I^2 에 비례하여 커지는 반면, 철심이 없는 전자석은 고리전선에 흐르는 전류 I 가 6 A가 되더라도 클립 1개를 들어 올릴 수 있을 만큼의 자기력 $F_{M무}$ 가

서로 작용하지 못하고 있다는 것을 알 수 있다. 전자석의 자기력 F_M 는 전자석의 고리전선에 흐르는 전류의 자기작용에 따라 형성되는 자기장에 의해 유도된다 (현동걸 등, 2015). 본 연구자의 실험에 의하면 전자석이 클립 1개를 붙여 끌어올리기 위한 전자석 자기력 F_M 가 유도되려면 전자석의 자기장 B_E 가 최소 $B_E = 0.403 \times 10^{-3} \text{T}$ 정도의 자기장이 형성되어야 한다. 전류 I 가 1 A에서 6 A 범위 내에서 철심이 없는 전자석의 자기장 $B_{EL,m30,무}$ 는 $0.010 \times 10^{-3} \text{T}$ 에서 $0.047 \times 10^{-3} \text{T}$ 로 클립 1개를 들어 올릴 수 있을 만큼의 자기력 $F_{M무}$ 이 작용할 만큼 충분하지 못하다. 따라서 강한 자기장을 얻어 충분한 자기력 F_M 이 작용하도록 고리전선 내부에 철심을 넣는다는 것을 확인할 수 있다.



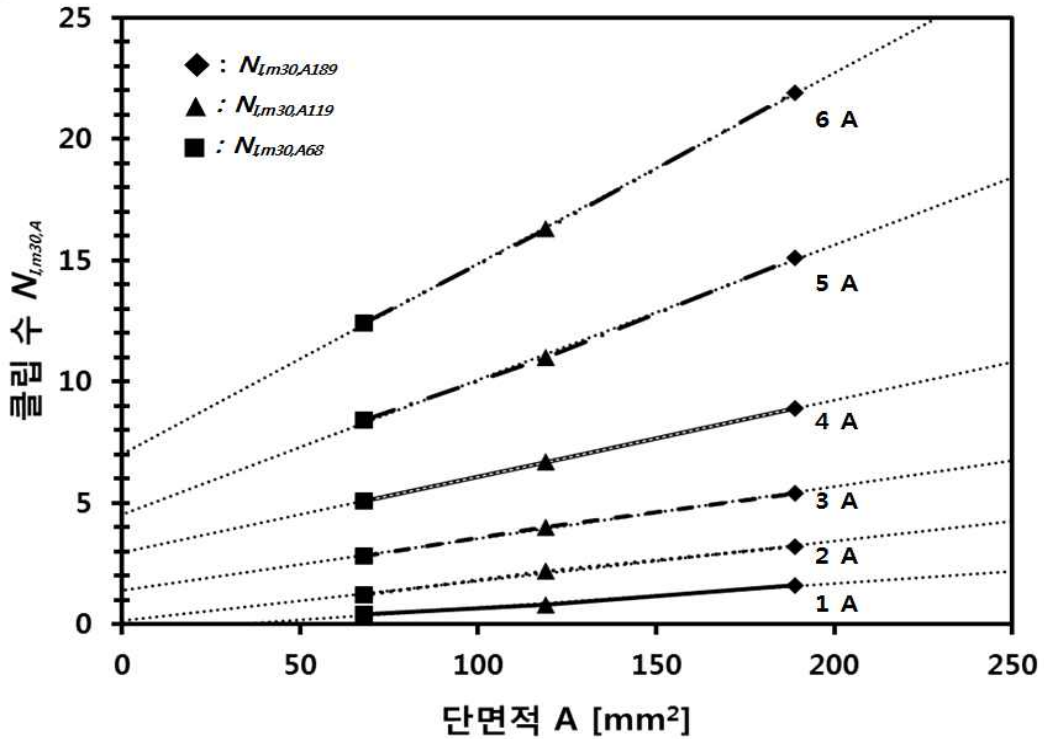
[그림 IV-21] 직경 \varnothing 이 $\varnothing = 9.3 \text{ mm}$ 인 전산볼트에 고리전선 수 m 이 $m = 30$, 고리전선 길이 L 이 $L = 120 \text{ mm}$ 가 되도록 제작한 전자석의 전류 I 에 따른 전자석의 자기장 $B_{EL,m30,유무}$ 과 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{L,m30,유무}$: 철심이 있는 전자석의 자기장 $B_{EL,m30,유}$ (●)와 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{L,m30,유}$ (■), 철심이 없는 전자석의 자기장 $B_{EL,m30,무}$ (○)와 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{L,m30,무}$ (□)

라) 철심의 단면적에 따른 전자석의 자기력

철심의 단면적에 따른 전자석의 자기장을 측정하기 위하여 직경 \varnothing 이 $\varnothing = 9.3 \text{ mm}$, $\varnothing = 12.3 \text{ mm}$, $\varnothing = 15.5 \text{ mm}$ 인 전산볼트를 준비하여 각각 고리전선 수 m 이 $m=30$, 고리전선 길이 L 이 $L=120 \text{ mm}$ 가 되도록 제작한 전자석에 전류를 1 A에서 6 A범위로 흘려보냈을 때 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{I,m30,A}$ 를 측정하였다. 이후 직경 \varnothing 의 길이를 이용하여 철심의 단면적 A 를 구하여 전자석의 자기력과 관계를 분석하였다.

[그림 IV-22]은 전자석에 전류 I 를 1 A에서 6 A범위로 1 A씩 크게 흘려보냈을 때 철심 단면적 A 에 따른 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{I,m30,A}$ 를 나타낸다. 전류 I 가 1 A일 때, 철심의 단면적 A 에 따른 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{1,m30,A}$ 는 단면적 A 가 $A=68 \text{ mm}^2$, $A=119 \text{ mm}^2$, $A=189 \text{ mm}^2$ 일 때 각각 $N_{1,m30,68} = 0.4$, $N_{1,m30,119} = 0.8$, $N_{1,m30,189} = 1.6$ 로 $N_{1,m30,A} = e_1 A + f_1$ ($e_1 = 0.01, f_1 = -0.321$)로 구해진 일차함수인 추세선에 따라 비례하여 증가하고 있다. 전류 I 가 2 A일 때, 철심의 단면적 A 에 따른 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{2,m30,A}$ 는 각각 $N_{2,m30,68} = 1.2$, $N_{2,m30,119} = 2.2$, $N_{2,m30,189} = 3.2$ 로 $N_{2,m30,A} = e_2 A + f_2$ ($e_2 = 0.0164, f_2 = 0.1453$)로 구해지는 추세선에 따라 전류 I 가 1 A 일 때와 마찬가지로 일차함수적으로 비례하여 증가함을 알 수 있다. 전류 I 가 3 A에서 6 A 일 때도 철심의 단면적 A 에 따른 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{I,m30,A}$ 는 $N_{I,m30,A} = e_I A + f_I$ 형태의 일차선형함수에 따라 비례하여 증가하였다. 각각의 기울기와 절편 값은 고리전선에 흐르는 전류가 I 가 3 A일 때 $e_3 = 0.0214$, $f_3 = 1.3848$, 4 A일 때 $e_4 = 0.0314$, $f_4 = 2.9637$, 5 A일 때 $e_5 = 0.0556$, $f_5 = 4.536$, 6 A일 때 $e_6 = 0.0786$, $f_6 = 7.0152$ 이다. 고리전선에 흐르는 전류 I 에 따른 각 선형함수식을 살펴보면 전류 I 가 커질수록 기울기 e_I 도 같이 커지는 것을 알 수 있다. 정리해보면, 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수로 전자석의 자기력을 어림할 수 있다는 전제하에 전자석의 자기력 F_M 는 철심의 단면적 A 에 일차함수적으로 비례하여 증가한다는 것을 의미한다. 이는 전자석의

자기력 F_M 는 철심의 단면적 A 에 비례한다는 식 (II-8)의 이론적 결과와 일치함을 알 수 있다.



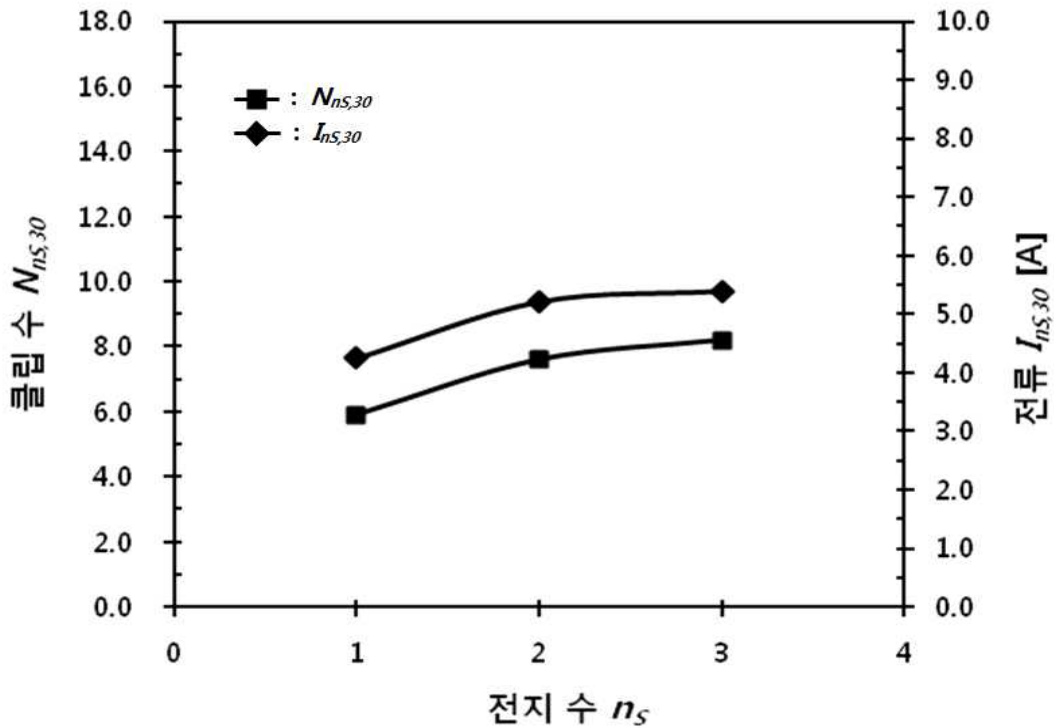
[그림 IV-22] 전산볼트에 고리전선 수 m 이 $m=30$, 고리전선 길이 L 이 $L=120$ mm가 되도록 제작한 전자석에 전류 I 를 1 A에서 6 A범위로 1 A씩 크게 흘려 보냈을 때 철심 단면적 A 에 따른 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{L,m30,A}$: 철심의 단면적이 189 mm^2 인 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{L,m30,A189}$ (◆), 철심의 단면적이 119 mm^2 인 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{L,m30,A119}$ (▲), 철심의 단면적이 68 mm^2 인 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{L,m30,A68}$ (■)

이상 변인에 따른 전자석의 자기력과 관계를 살펴보면 전자석의 자기력 F_M 는 전자석의 고리전선에 흐르는 전류 I 의 제곱과 전자석을 감은 고리전선 수 m 의 제곱, 그리고 철심의 단면적 A 에 비례한다는 식 (II-8)의 이론적인 결과와 일치함을 알 수 있다. 또한 전자석의 자기장 B_E 는 전자석의 고리전선에 흐르는 전류 I 와 전자석을 감은 고리전선 수 m 에 비례한다는 식 (II-7)의 이론적인 결

과와 일치하였다. 이러한 결과는 새로 개발된 전자석을 이용한 전자석 관련 실험이 과학개념에 부합되기 때문에 초등학교 전자석 관련 실험수업에 사용 가능함을 의미한다.

2) 새로운 전자석의 전자기적 특성

[그림 IV-23]은 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n_S 에 따른 고리전선 수 $m=30$ 인 전자석이 붙여 끌어올리는 클립의 수 $N_{n_S,30}$ (■)과 전류 $I_{n_S,30}$ (◆)의 변화를 보여준다. 전자석이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{n_S,30}$ (■)은 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n_S 이 $n_S = 1, n_S = 2, n_S = 3$ 으로 증가함에 따라 $N_{1S,30} = 5.9, N_{2S,30} = 7.7, N_{3S,30} = 8.2$ 로 증가하지만, 증가하는 개수가 매우 적다. 전자석의 전류 $I_{n_S,30}$ (◆)은 $n_S = 1$ 일 때 $I_{1S,30} = 4.245$ A, $n_S = 2$ 일 때 $I_{2S,30} = 5.210$ A, $n_S = 3$ 일 때 $I_{3S,30} = 5.393$ A로 그 크기는 크지만, 전지의 수 n_S 이 증가함에 따라 증가하는 폭이 점점 작아진다. Hyun(2010)의 연구 결과에 의하면, 이러한 현상은 전지들을 직렬연결하여 전력원으로 사용하는 전기회로에서 전기회로의 부하저항이 전지의 내부저항보다 작을 때 나타난다는 것이다(Hyun et al., 2015).



[그림 IV-23] 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n_s 에 따른 고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석이 붙여 끌어올리는 클립의 수 $N_{n_s,30}$ (■)과 전류 $I_{n_s,30}$ (◆)(Hyun et al., 2015)

[그림 IV-24]는 고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n_s 에 따른 전지들의 합성내부저항 $r_{bn_s,30}$ (▲), 전기회로의 부하저항 $R_{Ln_s,30}$ (▲), 전류 $I_{n_s,30}$ (◆)의 변화를 보여준다. 직렬연결한 전지들의 합성내부저항 $r_{bn_s,30}$ 은 전지의 수 n_s 이 증가함에 따라 $r_{b1s,30} = 0.232 \Omega$, $r_{b2s,30} = 0.476 \Omega$, $r_{b3s,30} = 0.762 \Omega$ 으로 전지의 수 n_s 에 비례하여 증가한다. 그러나 전기회로의 부하저항 $R_{Ln_s,30}$ 은 $R_{Ln_s,30} = 0.150 \Omega$ 으로, 전지의 수 n_s 가 증가하여도 일정하다. 전기회로의 부하저항 $R_{Ln_s,30}$ 은 전지들의 합성내부저항 $r_{bn_s,30}$ 에 비하여 작지만, 전지들의 합성내부저항 $r_{bn,30}$ 의 0.197배에서 0.647배로 의미가 있는 크기이다 (Hyun et al., 2015).

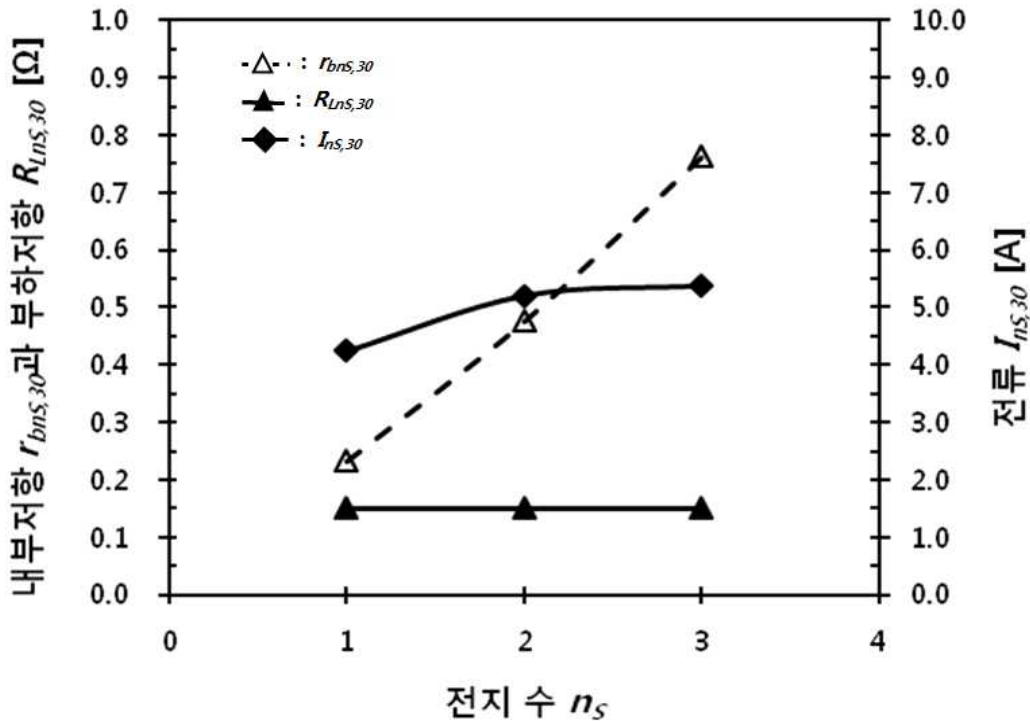
전기회로의 부하저항이 R_{Ln_s} 인 전기회로에서 내부저항이 r_{bn} 인 n_s 개의 전지를 직렬연결하여 전력원으로 사용할 때 전기회로의 전류 I_{n_s} 는 다음의 식 (IV-2)와

같이 나타낼 수 있다(Hyun, 2010).

$$I_{nS} = \frac{E_{nS}}{R_{LnS} + r_{bnS}} \quad (IV-2)$$

여기에서 E_{nS} 는 직렬연결한 n_S 개의 전지들의 합성기전력이고, r_{bnS} 는 전지들의 합성내부저항이다. 모든 전지의 기전력이 같다고 즉 $E_1 = E_2 = E_3 = E$ 라고 전제할 때, 전지들의 합성기전력 $E_{nS} = n_S E$ 이라고 할 수 있다. 또한 전지들의 내부저항 r_{bn} 이 모두 같다 즉 $r_{b1} = r_{b2} = r_{b3} = r_b$ 라고 전제할 때, 직렬연결한 전지들의 합성내부저항은 $r_{bnS} = n_S r_b$ 이라고 할 수 있다. 한 개의 전지의 기전력 E 를 $E = 1.62 V$ 라 전제하고, 식 (IV-2)와 [그림 IV-24]의 정보들을 사용하여 전류 $I_{nS,30}$ 를 계산하면 그 오차가 5% 이내인 전류 $I_{nS,30}$ 의 예상값들을 구할 수가 있다. 이것은 식 (IV-2)가 이 연구에서 개발된 전자석의 전기회로에 전지들을 직렬연결할 때, 전기회로의 전류 I_{nS} 를 결정하거나 전류 I_{nS} 에 영향을 주는 요인들 뿐만 아니라 요인들이 영향을 주는 정도까지 설명할 수 있다는 것이다(Hyun et al., 2015).

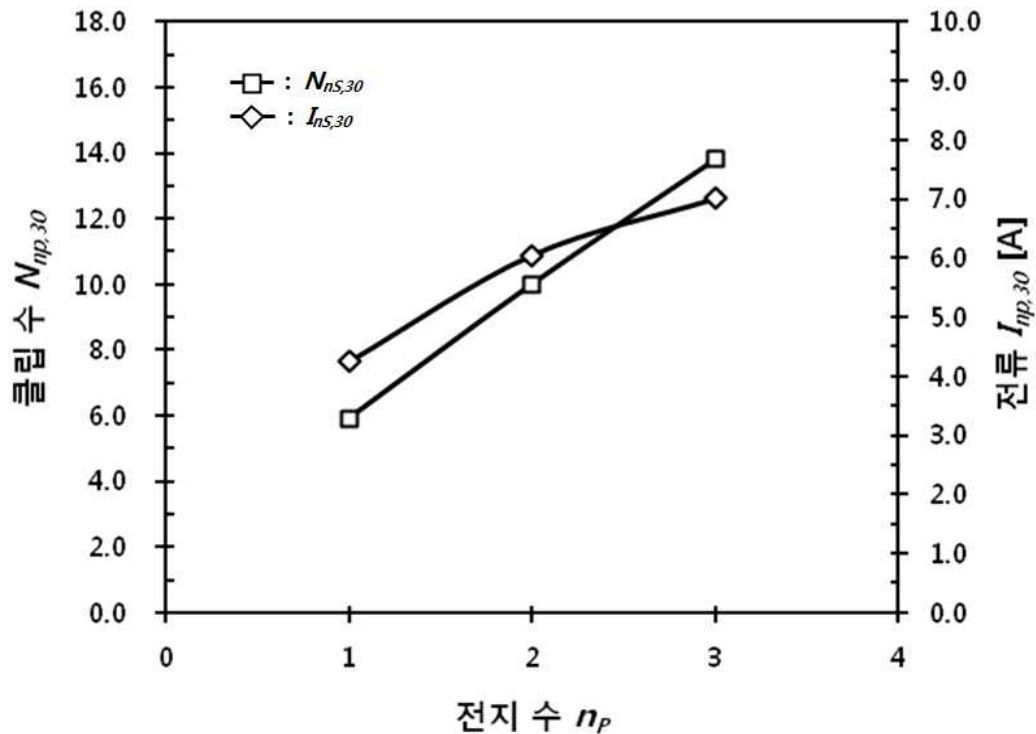
식 (IV-2)에 의하면, 고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석의 n_S 개의 전지를 직렬연결한 전기회로의 전류 $I_{nS,30}$ 는 전지들의 합성내부저항 $r_{bnS,30}$ 과 전기회로의 부하저항 $R_{LnS,30}$ 을 합한 전기회로의 전체저항 $R_{nS,30}$ 에 대한 전지의 합성기전력 $E_{nS} = n_S E$ 의 비율로 나타낼 수 있다. 전지들을 직렬연결함에 따라 전지들의 합성기전력 $E_{nS} = n_S E$ 이 증가함에도 불구하고, [그림 IV-24]에서 보여주는 바와 같이 전류 $I_{nS,30}$ 가 전지의 수 n_S 에 비례하여 증가하지 않는 것은 전지의 수 n_S 에 비례하여 전지들의 합성내부저항 $r_{bnS,30}$ 또한 커져 전기회로의 전체저항 $R_{nS,30}$ 이 커지기 때문이다. 이러한 이유로 인하여 전자석이 붙여 끌어올리는 클립의 수 $N_{nS,30}$ 가 전지의 수 n_S 가 증가함에 따라 증가하지 않는다는 것이다(Hyun et al., 2015).



[그림 IV-24] 고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n_s 에 따른 전지들의 합성내부저항 $r_{bns,30}$ (\triangle), 전기회로의 부하저항 $R_{Lns,30}$ (\blacktriangle), 전류 $I_{ns,30}$ (\blacklozenge)(Hyun et al., 2015).

[그림 IV-25]는 전자석의 전기회로에 병렬연결한 전지의 수 n_p 에 따른 고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석이 붙여 끌어올리는 클립의 수 $N_{n_p,30}$ (\square)와 전류 $I_{n_p,30}$ (\blacklozenge)의 변화를 보여준다. 전자석이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{n_p,30}$ 은 전자석의 전기회로에 병렬연결한 전지의 수 n_p 가 증가함에 따라 $N_{1P,30} = 5.9$, $N_{2P,30} = 10.0$, $N_{3P,30} = 13.9$ 로 증가한다. 전지들을 병렬연결한 경우의 전자석이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{n_p,30}$ 은 [그림 IV-25]에서 보여주는 전지들을 직렬연결한 경우 전자석이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{n_s,30}$ 에 비하여 증가하는 개수가 많다. 전자석의 전기회로의 전류 $I_{n_p,30}$ 는 전지의 수 n_p 이 증가함에 따라 $I_{1P,30} = 4.245$ A, $I_{2P,30} = 6.050$ A, $I_{3P,30} = 7.009$ A로 증가한다. 전류 $I_{n_p,30}$ 는 [그림 IV-25]에서 보여주는 전지들을 직렬연결한 경우 전기회로의 전류 $I_{n_s,30}$ 에 비하여 증가하는 폭이 크다. Hyun(2010)의 연구 결과에 의하면, 이러한 현상은 전지들을

병렬연결하여 전력원으로 사용하는 전기회로에서 전기회로의 부하저항이 전지의 내부저항보다 작을 때 나타난다는 것이다.



[그림 IV-25] 전자석의 전기회로에 병렬연결한 전지의 수 n_p 에 따른 고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석이 붙여 끌어올리는 클립의 수 $N_{nP,30}$ (□)와 전류 $I_{nP,30}$ (◇)(Hyun et al., 2015)

[그림 IV-26]는 고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석의 전기회로에 병렬연결한 전지의 수 n_p 에 따른 전지들의 합성내부저항 $r_{bnP,30}$ (▲), 전기회로의 부하저항 $R_{LnP,30}$ (▲), 전류 $I_{nP,30}$ (◇)의 변화를 보여준다. 병렬연결한 전지들의 합성내부저항 $r_{bnP,30}$ 은 전지의 수 n_p 가 증가함에 따라 $r_{b1P,30} = 0.232 \Omega$, $r_{b2P,30} = 0.121 \Omega$, $r_{b3P,30} = 0.083 \Omega$ 으로 감소한다. 그러나 전기회로의 부하저항 $R_{LnP,30}$ 은 일정한 $R_{LnP,30} = 0.150 \Omega$ 이다(Hyun et al., 2015).

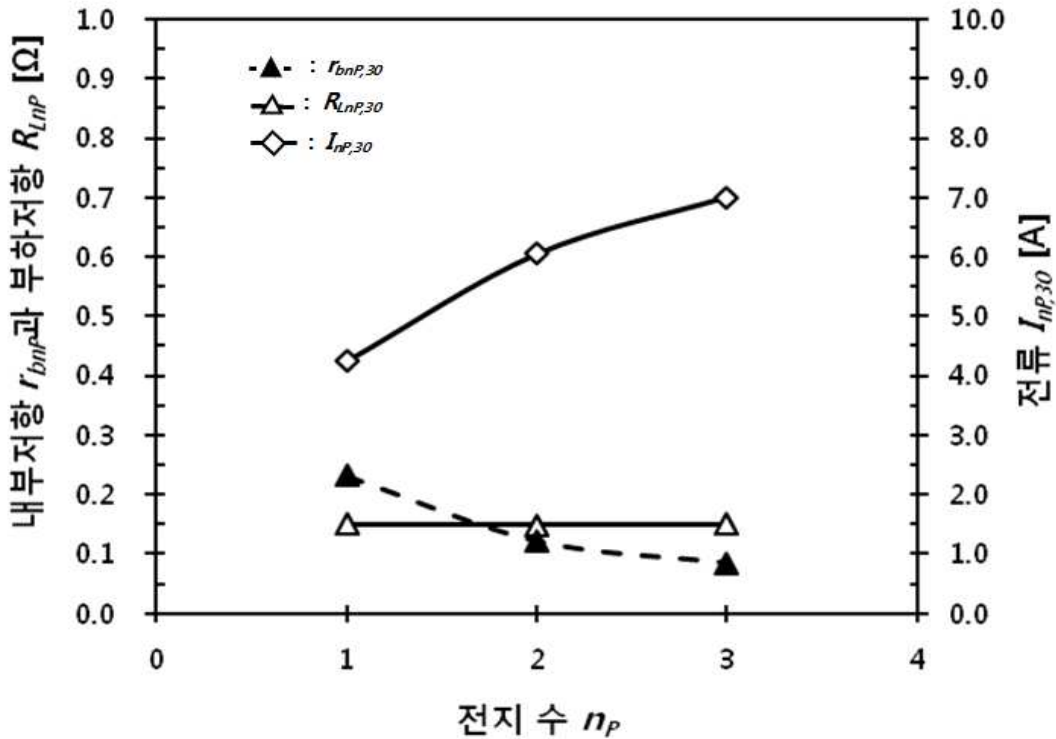
전기회로의 부하저항이 R_{LnP} 인 전기회로에서 내부저항이 r_{bn} 인 n_p 개의 전지를 병렬연결하여 전력원으로 사용할 때 전기회로의 전류 I_{nP} 는 다음의 식 (IV

-3)와 같이 나타낼 수 있다(Hyun, 2010).

$$I_{nP} = \frac{E}{R_{LnP} + r_{bnP}} \quad (IV-3)$$

여기에서 r_{bnP} 는 병렬연결한 전지들의 합성내부저항이다. 전지들의 내부저항 모두 같다고 즉 $r_{b1} = r_{b2} = r_{b3} = r_b$ 라고 전제할 때, 병렬연결한 전지들의 합성내부저항 $r_{bnP} = r_b/n$ 이라고 할 수 있다. 전지의 기전력 E 를 $E = 1.62 V$ 라 전제하고, 식 (IV-3)과 [그림 IV-26]의 정보들을 사용하여 전류 $I_{nP,30}$ 를 계산하면 그 오차가 5% 이내인 전류 $I_{nP,30}$ 의 예상값들을 구할 수가 있다. 이것은 식 (IV-3)이 전기회로의 전류 I_{nP} 를 결정하거나 전류 I_{nP} 에 영향을 주는 요인들뿐만 아니라 요인들이 영향을 주는 정도까지 설명할 수 있다는 것이다(Hyun et al., 2015).

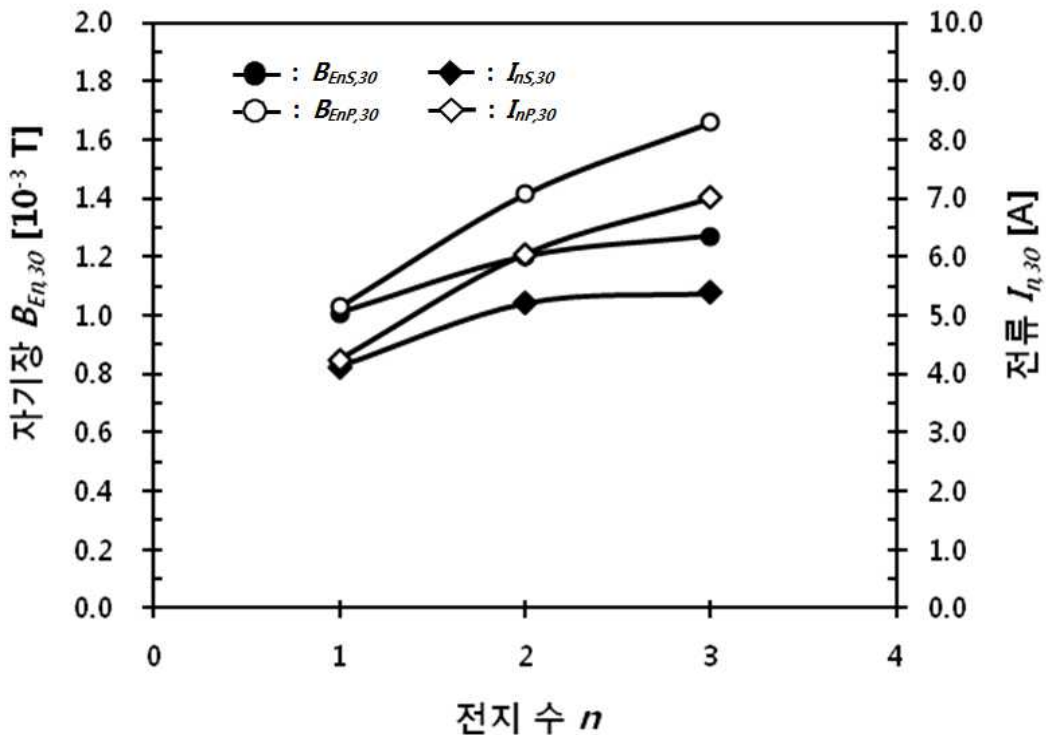
식 (IV-3)에 의하면, 고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석의 n_p 개의 전지를 병렬연결한 전기회로의 전류 $I_{nP,30}$ 는 전지들의 합성내부저항 $r_{bnP,30}$ 과 전기회로의 부하저항 $R_{LnP,30}$ 을 합한 전기회로의 전체저항 $R_{nP,30}$ 에 대한 전지의 기전력 E 의 비율로 나타낼 수 있다. 전지의 기전력 E 가 일정함에도 불구하고, Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 전류 $I_{nP,30}$ 가 전지의 수 n_p 가 증가함에 따라 커지는 것은 전지의 수 n_p 에 반비례하여 전지들의 합성내부저항 $r_{bnP,30}$ 이 작아져서 전체저항 $R_{nP,30}$ 을 작게하기 때문이다. 이러한 이유로 인하여 전지를 병렬연결한 전기회로의 전자석이 붙여 끌어올리는 클립의 수 $N_{nP,30}$ 이 전지의 수 n_p 가 증가함에 따라 뚜렷히 증가한다는 것이다. 그리고 전지들을 병렬연결한 전기회로의 전류 $I_{nP,30}$ 의 범위가 전지들을 직렬연결한 전기회로의 전류 $I_{nS,30}$ 의 범위를 포함하고 있다. 이것은 전기회로의 부하저항이 전지의 내부저항보다 작을 경우 전지들을 병렬연결한 경우가 전지들을 직렬연결할 때보다 더 큰 범위의 전류를 얻을 수 있다는 것을 의미한다(Hyun et al., 2015).



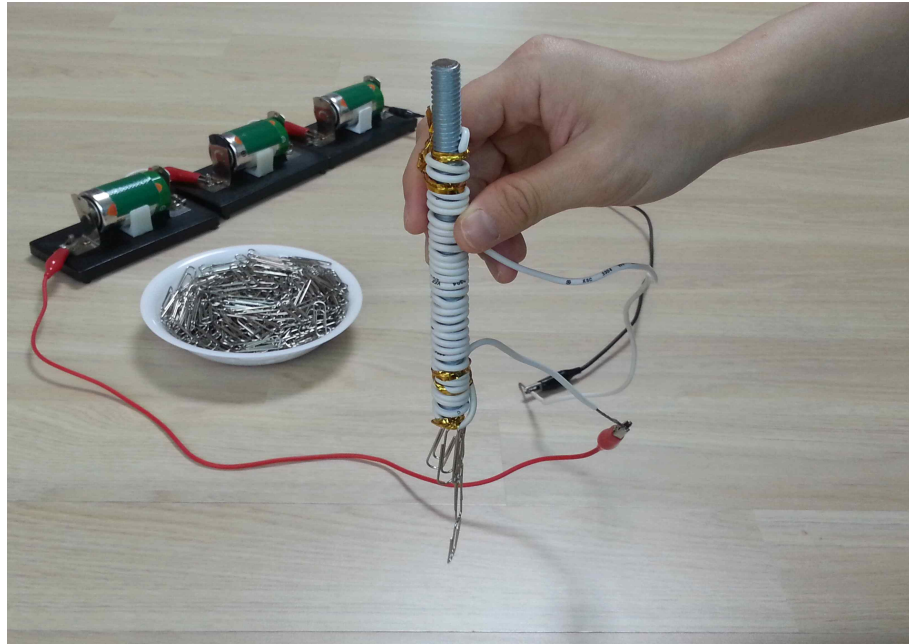
[그림 IV-26] 고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석의 전기회로에 병렬연결한 전지의 수 n_p 에 따른 전지들의 합성내부저항 $r_{bnP,30}$ (\blacktriangle), 전기회로의 부하저항 $R_{LnP,30}$ (\triangle), 전류 $I_{nP,30}$ (\diamond)(Hyun et al., 2015)

[그림 IV-27]은 고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결 그리고 병렬연결한 전지의 수 n 에 따른 전자석의 자기장 $B_{En,30}$ 의 변화와 전류 $I_{n,30}$ 의 변화를 측정된 결과들을 보여준다. 전지들을 직렬연결한 전기회로의 전자석의 자기장 $B_{EnS,30}$ (\bullet)은 전지의 수 $n_s = 1$ 일 때 $B_{E1S,30} = 1.008 \times 10^{-3}$ T, 전지의 수 $n_s = 2$ 일 때 $B_{E2S,30} = 1.221 \times 10^{-3}$ T, $n_s = 3$ 일 때 $B_{E3S,30} = 1.271 \times 10^{-3}$ T 로, 전지의 수 n_s 가 증가함에 따라 그 증가하는 폭이 점점 작아진다. 그러나 전지들을 병렬연결한 전기회로의 전자석의 자기장 $B_{EnP,30}$ (\circ)은 전지의 수 $n_p = 1$ 일 때, $B_{E1P,30} = 1.008 \times 10^{-3}$ T 에서 n_p 가 증가함에 따라 $B_{E2P,30} = 1.414 \times 10^{-3}$ T, $B_{E3P,30} = 1.658 \times 10^{-3}$ T 로 전지들을 직렬연결한 경우보다 그 크기가 상대적으로 크게 증가함을 알 수 있다. 이러한 전

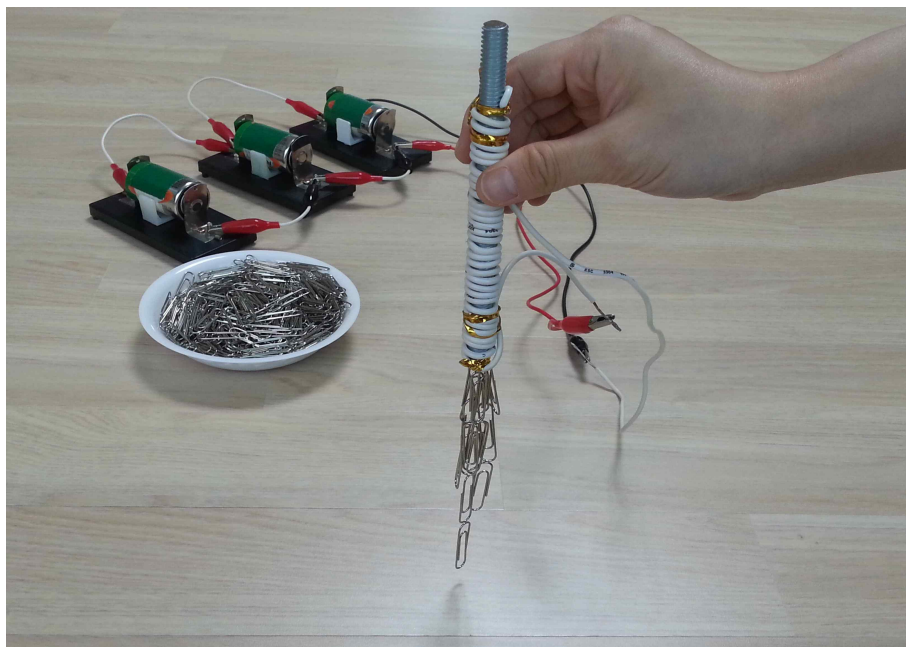
자석의 자기장 $B_{En,30}$ 의 변화는 전류 $I_{n,30}$ 의 변화의 추세와 같다. [그림 IV-24] 와 [그림 IV-26]에서 보여주는 바와 같이 전류 $I_{n,30}$ 는 전지들을 병렬연결한 전기회로의 전류 $I_{nP,30}$ (\diamond)이 전지들을 직렬연결한 전기회로의 전류 $I_{nS,30}$ (\blacklozenge)보다 전지의 수 $n = 2$ 에서는 0.840 A, $n = 3$ 에서는 1.616 A가 더 크며, 이들에 의하여 유도된 전자석의 자기장 $B_{En,30}$ 또한 전지들을 병렬연결한 전기회로의 전자석의 자기장 $B_{EnP,30}$ 가 전지들을 직렬연결한 전기회로의 전자석의 자기장 $B_{EnS,30}$ 보다 전지의 수 $n = 2$ 에서는 0.193×10^{-3} T, $n = 3$ 에서는 0.387×10^{-3} T가 더 크다(Hyun et al., 2015).



[그림 IV-27] 고리전선 수 m 이 $m = 30$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결 그리고 병렬연결한 전지의 수 n 에 따른 전자석의 자기장 $B_{En,30}$ 의 변화와 전류 $I_{n,30}$: 전지들을 직렬연결한 전기회로의 전자석의 자기장 $B_{EnS,30}$ (\bullet)과 전류 $I_{nS,30}$ (\blacklozenge), 전지들을 병렬연결한 전기회로의 전자석의 자기장 $B_{EnP,30}$ (\circ)과 전류 $I_{nP,30}$ (\diamond)(Hyun et al., 2015)



[그림 IV-28] 고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n_s 이 $n_s=3$ 일 때 전자석이 클립들을 붙여 끌어올리는 실험사진



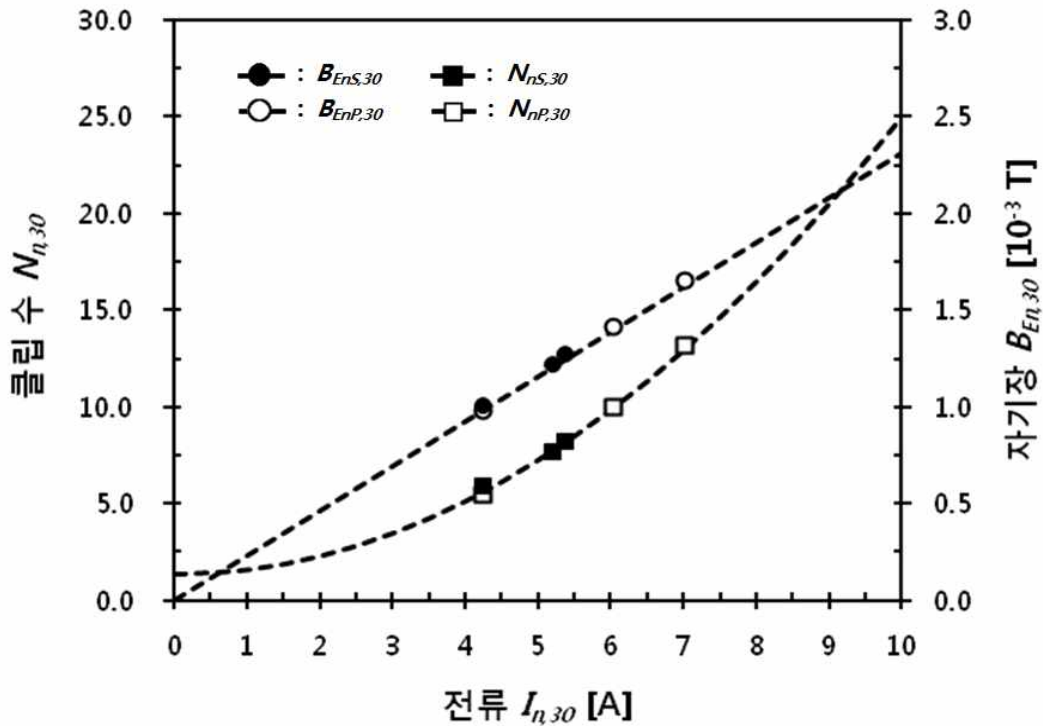
[그림 IV-29] 고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석의 전기회로에 병렬연결한 전지의 수 n_p 이 $n_p=3$ 일 때 전자석이 클립들을 붙여 끌어올리는 실험사진

[그림 IV-28]는 고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석의 전기회로에 직렬연결한 전지의 수 n_s 이 $n_s=3$ 일 때 전자석이 클립들을 붙여 끌어올리는 실험사진이며, [그림 IV-29]는 고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석의 전기회로에 병렬연결한 전지의 수 n_p 이 $n_p=3$ 일 때 전자석이 클립들을 붙여 끌어올리는 실험사진이다.

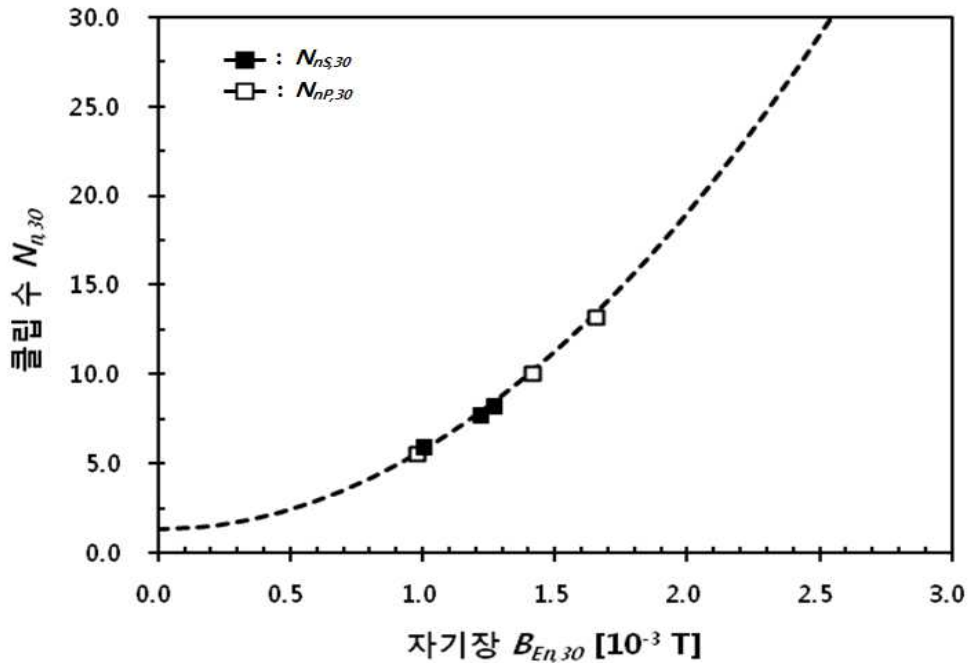
고리전선 수 m 이 $m=30$ 인 전자석의 전기회로에 흐르는 전류 $I_{n,30}$ 와 전자석이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{n,30}$ 의 관계 그리고 $I_{n,30}$ 와 전자석의 자기장 $B_{En,30}$ 의 관계를 확인하기 위하여, 이 연구의 실험에서 얻는 자료들을 바탕으로 전기회로의 전류 $I_{n,30}$ 에 따른 전자석이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{n,30}$ 과 전자석의 자기장 $B_{En,30}$ 의 관계를 [그림 IV-30]에 나타내었으며, 전자석의 자기장 $B_{En,30}$ 과 전자석이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{n,30}$ 의 관계를 [그림 IV-31]에 나타내었다. 여기에서 표식 \bullet 는 $B_{EnS,30}$, 표식 \circ 는 $B_{EnP,30}$, 표식 \blacksquare 는 $N_{nS,30}$, 표식 \square 는 $N_{nP,30}$ 을 나타낸다. [그림 IV-30]에서 보여주는 바와 같이 전지들을 직렬연결한 전기회로의 전류 $I_{nS,30}$ 와 전지들을 병렬연결한 전기회로의 전류 $I_{nP,30}$ 의 범위인 4.245 A에서 7.009 A의 범위에서 전자석이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{n,30}$ 은 5.9개에서 13.9개로 증가하며, 전자석의 자기장 $B_{En,30}$ 는 1.008×10^{-3} T에서 1.658×10^{-3} T로 증가한다. 전류 $I_{n,30}$ 가 증가함에 따라 전자석이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{n,30}$ 는 $N_{n,30} = gI_{n,30}^2 + h$ ($g = 0.2360 \text{ A}^{-2}$, $h = 1.360$)로 구해지는 추세선을 따라 증가하며, 전자석의 자기장 $B_{En,30}$ 는 $B_{En,30} = iI_{n,30}$ ($i = 0.2309 \times 10^3 \text{ T}^{-1}$)로 구해지는 추세선을 따라 증가한다. 이것은 전자석이 붙여 올리는 클립의 수는 전자석의 전기회로의 전류의 제곱에 비례하여 증가하며, 전자석의 자기장은 전기회로의 전류에 비례하여 증가한다는 것을 의미한다 (Hyun et al., 2015).

[그림 IV-31]에서 전자석의 자기장 $B_{En,30}$ 는 1.008×10^{-3} T에서 1.658×10^{-3} T로 증가함에 따라 전자석이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{n,30}$ 은 5.9개에서 13.9개로 증가한다. 전자석의 자기장 $B_{En,30}$ 가 증가함에 따라 전자석이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{n,30}$ 은 $N_{n,30} = jB_{En,30}^2 + h$ ($j = 4.4340 \times 10^6 \text{ T}^{-2}$, $h = 1.360$)로 구해

지는 추세선을 따라 증가한다. 이것은 전자석이 붙여 올리는 클립의 수는 전자석의 자기장의 제공에 비례하여 증가한다는 것을 의미한다(Hyun et al., 2015).

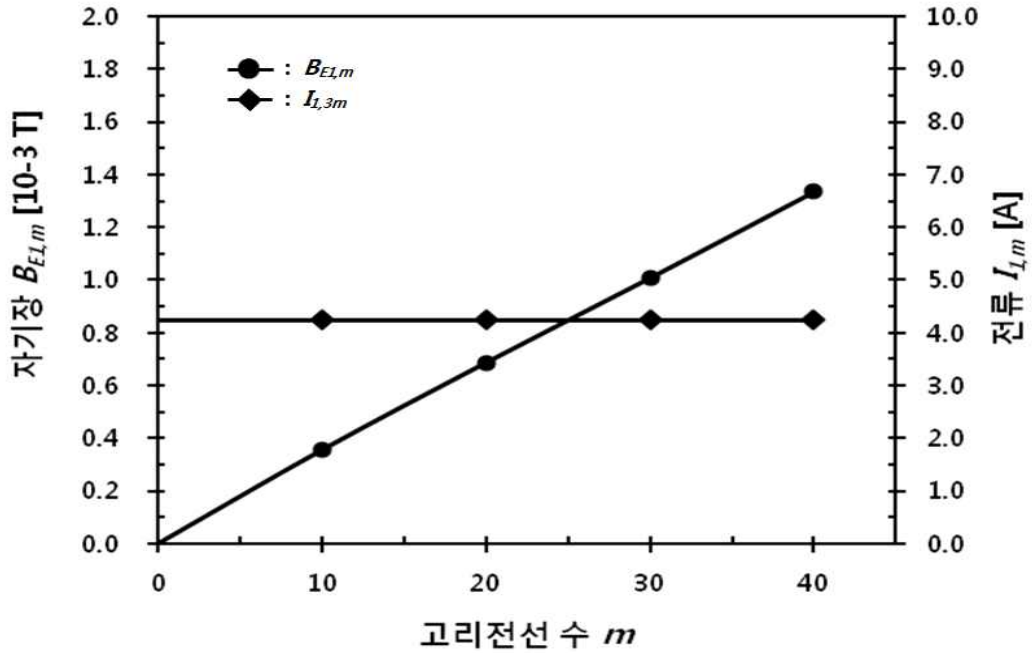


[그림 IV-30] 전기회로의 전류 $I_{n,30}$ 에 따른 전자석이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{n,30}$ 과 전자석의 자기장 $B_{En,30}$: 전지들을 직렬연결한 전기회로의 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{nS,30}$ (■)과 전자석 자기장 $B_{EnS,30}$ (●), 전지들을 병렬연결한 전기회로의 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{nP,30}$ (□)과 전자석의 자기장 $B_{EnP,30}$ (○)(Hyun et al., 2015)

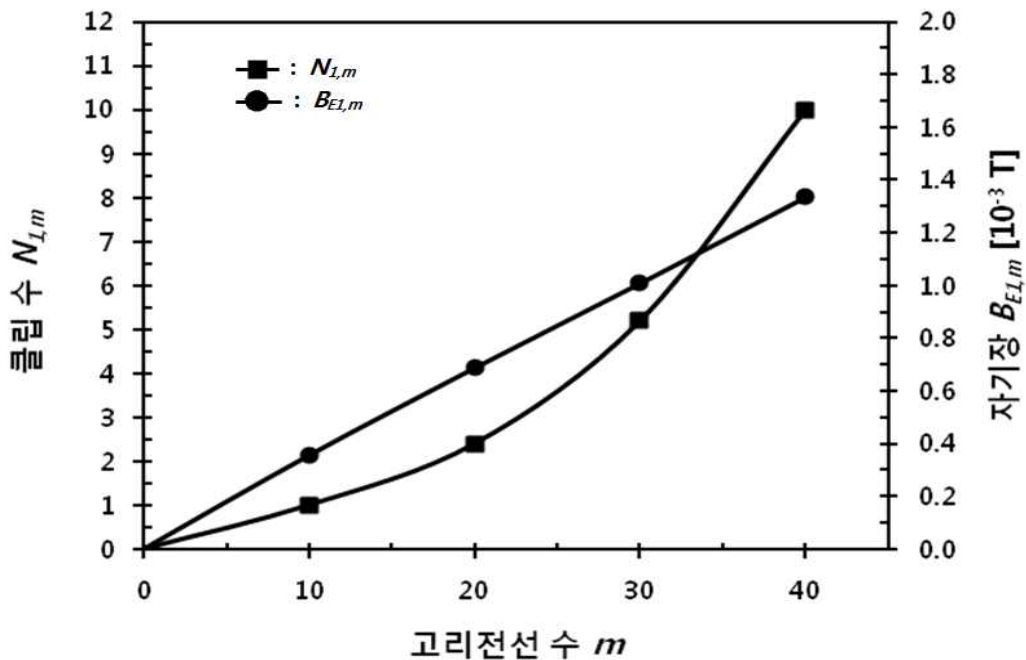


[그림 IV-31] 전자석의 자기장 $B_{En,30}$ 에 따른 전자석이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{n,30}$: 전지들을 직렬연결한 전기회로의 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{nS,30}$ (■), 전지들을 병렬연결한 전기회로의 전자석이 붙여 끌어 올리는 클립 수 $N_{nP,30}$ (□)(Hyun et al., 2015)

고리전선 수 m 을 $m = 10, 20, 30, 40$ 으로 감은 전자석들에 대하여 전기회로의 전력원으로 전지 1개를 연결할 경우 즉 $n = 1$ 일 때, 고리전선 수 m 에 따른 전자석의 자기장 $B_{E1,m}$ 과 전기회로의 전류 $I_{1,m}$ 의 변화를 [그림 IV-32]에서 보여 주며, 전자석들이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{1,m}$ 과 전자석의 자기장 $B_{E1,m}$ 의 변화를 [그림 IV-33]에서 보여준다. 전류 $I_{1,m}$ 는 $I_{1,m} = 4.245$ A 로서 통제되어 있음을 보여준다. 전류 $I_{1,m}$ 가 통제된 조건에서 전자석의 자기장 $B_{E1,m}$ 는 $B_{E1,10} = 0.356 \times 10^{-3}$ T, $B_{E1,20} = 0.687 \times 10^{-3}$ T, $B_{E1,30} = 1.008 \times 10^{-3}$ T, $B_{E1,40} = 1.335 \times 10^{-3}$ T로 고리전선 수 m 에 비례하여 증가한다. 그리고 고리전선 수 m 이 증가함에 따라 전자석이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{1,m}$ 은 $N_{1,10} = 1$, $N_{1,20} = 2.4$, $N_{1,30} = 5.2$, $N_{1,40} = 10.0$ 으로 고리전선 수 m 의 제곱에 비례하여 증가하는 것을 명백하게 보여준다(Hyun et al., 2015).



[그림 IV-32] 고리전선 수 m 에 따른 전자석의 자기장 $B_{E1,m}$ (●)와 전기회로의 전류 $I_{L,m}$ (◆)(Hyun et al., 2015)



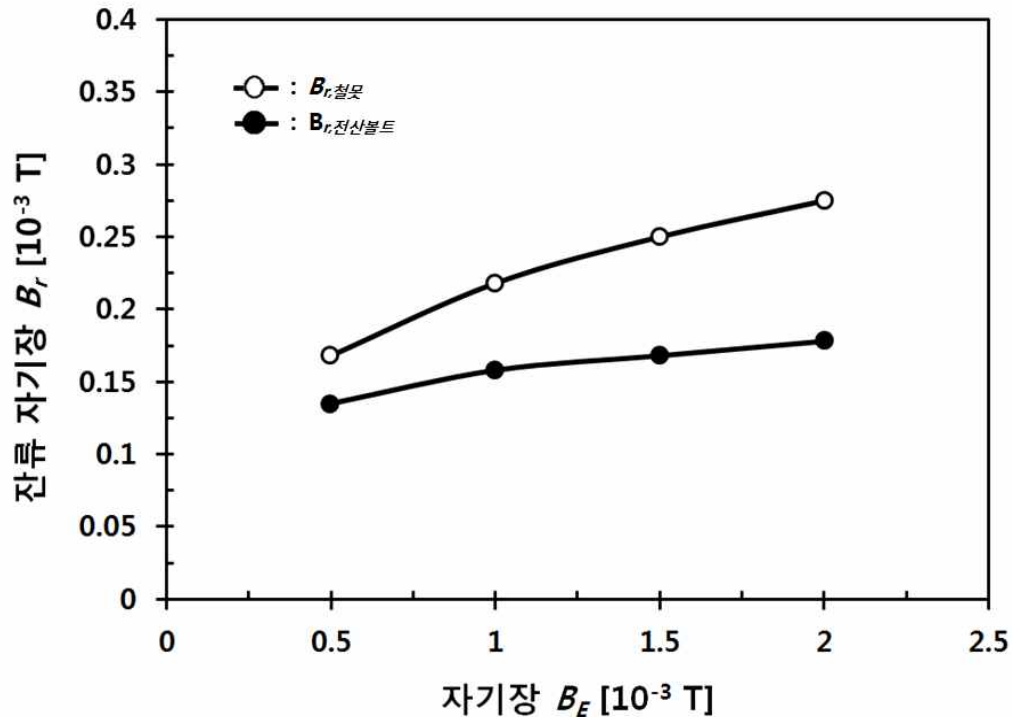
[그림 IV-33] 고리전선 수 m 에 따른 전자석들이 붙여 올리는 클립의 수 $N_{L,m}$ (■)과 전자석의 자기장 $B_{E1,m}$ (●)(Hyun et al., 2015)

지금까지 논의된 [그림 IV-30], [그림 IV-31], [그림 IV-32], [그림 IV-33]에 대한 내용들은, 연구에서 개발된 새로운 전자석의 전자기적 특성들이 식 (II-7)과 같이 전자석의 자기장 B_E 는 전자석의 전기회로의 전류 I 과 전자석을 감은 고리전선 수 m 에 비례하고, 전자석의 자기력 F_M 은 식 (II-8)과 같이 전자석의 전기회로에 흐르는 전류 I 의 제곱과 전자석을 감은 고리전선 수 m 의 제곱에 비례하거나(현동걸 등, 2015), 식 (IV-1)과 같이 전자석의 자기장 B_E 의 제곱에 비례한다는 이론적인 결과들과 일치함을 보여 준다(Hayt & Buck, 2012; Popovic & Popovic, 2002; Sadiku, 2009)

3) 전자석의 잔류자기장 비교

[그림 IV-34]는 새로 개발된 전자석과 기존 교육과정에 제시된 전자석의 고리전선에 전류를 흘려보내 각 전자석에 자기장 B_E 를 $B_E = 0.5 \times 10^{-3} \text{ T}$, $1.0 \times 10^{-3} \text{ T}$, $1.5 \times 10^{-3} \text{ T}$, $2.0 \times 10^{-3} \text{ T}$ 유도하고 고리전선에 흐르는 전류를 차단했을 때 각 전자석에 잔류되는 자기장 B_r 을 측정된 결과이다. 전자석의 자기장 B_E 이 $B_E = 0.5 \times 10^{-3} \text{ T}$ 일 때 잔류되는 자기장 B_r 은 각각 $B_{r, \text{전산볼트}, 0.5} = 0.135 \times 10^{-3} \text{ T}$, $B_{r, \text{철못}, 0.5} = 0.168 \times 10^{-3} \text{ T}$ 로 철못을 사용한 전자석의 잔류자기장 $B_{r, \text{철못}, 0.5}$ 이 $0.033 \times 10^{-3} \text{ T}$ 로 컸으며, 전자석의 자기장 B_E 이 $B_E = 1.0 \times 10^{-3} \text{ T}$ 일 때 잔류되는 자기장 B_r 은 각각 $B_{r, \text{전산볼트}, 1.0} = 0.158 \times 10^{-3} \text{ T}$, $B_{r, \text{철못}, 1.0} = 0.218 \times 10^{-3} \text{ T}$ 로 전산볼트를 사용한 전자석인 경우 잔류자기장 $B_{r, \text{전산볼트}}$ 가 $\Delta B_{r, \text{전산볼트}} = 0.023 \times 10^{-3} \text{ T}$ 가 증가한 반면 철못을 사용한 전자석인 경우 잔류자기장 $B_{r, \text{철못}}$ 가 $\Delta B_{r, \text{철못}} = 0.050 \times 10^{-3} \text{ T}$ 2배 이상 증가하였다. 전자석의 자기장 B_E 가 $B_E = 1.5 \times 10^{-3} \text{ T}$, $2.0 \times 10^{-3} \text{ T}$ 일 때도 전자석의 잔류자기장 차이 ΔB_r 는 $\Delta B_r = 0.082 \times 10^{-3} \text{ T}$, $0.097 \times 10^{-3} \text{ T}$ 로 점점 커짐을 알 수 있다. 이를 통해 새로 개발된 전자석의 잔류자기장 $B_{r, \text{전산볼트}}$ 가 기존 전자석의 잔류자기장 $B_{r, \text{철못}}$ 보다 작기 때문에 전자석 특성 실험에 보다 효과적으로 사용할 수 있다

는 것을 알 수 있다.



[그림 IV-34] 개발된 전자석과 기존 전자석에 일정한 자기장을 유도하고 난 후, 고리전선에 흐르는 전류를 차단했을 때 잔류자기장 $B_{r, 전산볼트}$ 와 $B_{r, 철분}$

지금까지 결과를 바탕으로 전자석 제작관련 요소들에 대한 기존 전자석과 새로운 전자석의 특징을 비교해보면 <표 IV-1>과 같다. 새로 개발된 전자석은 철심인 전산볼트에 자기이력효과를 줄여주는 규소가 포함되어 있어 불에 달구었다 사용해야하는 번거로움이 없다. 또한 철심인 전산볼트의 크기가 상대적으로 크고, 산과 풀이 있으며, 고리전선 수가 10, 20, 30, 40이기 때문에 학생들이 비닐전선을 촘촘히 빠른시간내에 감기가 수월하다(김석주 등, 2014; 신에경 등, 2015). 그리고 사용한 전자석은 분리하여 재사용이 가능하며, 비닐전선에 큰 전류가 흘러도 전선의 온도 변화가 작아 단락의 위험이 작다. 더불어 앞 차시까지 전선을 사용하여 실험을 하다가 전자석 제작시 뜬금없이 에나멜선을 사용해야하는 번거로움과 차시의 연계성 측면에서 취약한 부분을 개발된 전자석에 사용되는 비닐

전선은 앞 차시에서부터 활용하여 수업자료를 연계하여 사용할 수 있다는 장점이 있다. 마지막으로 개발된 전자석은 전자석의 자기력에 대한 과학적 개념과 법칙에 잘 부합하였다.

따라서 개발된 전자석은 기존 전자석의 문제점을 보완하여 대체할 수 있는 활용 가능성이 있음을 알 수 있다.

<표 IV-1> 전자석 제작관련 요소들에 대한 기존 전자석과 개발된 전자석의 특징

전자석 제작 요소	기존 전자석	개발된 전자석
자기이력효과	철심인 철못 탄소 함유량이 높음. 자기이력효과가 크고 불에 달구었다가 천천히 식혀 사용해야 하는 번거로움 발생	철심인 전산볼트에 자기이력 효과를 줄여주는 규소가 포함되어 있어 불에 달궈 필요 없음
철심에 철심 감기	에나멜선 가늘고 미끄러운 철못에 주의해서 감아야 함	전산볼트의 크기가 상대적으로 크고 골과 산이 있어 전선이 미끄러지는 것을 방지하여 전선을 쉽게 감을 수 있음
제작시간	고리전선 수를 50, 100, 150 등으로 제작해야서 시간이 오래 걸림	고리전선 수를 10, 20, 30, 40으로 하여 전자석 제작시간을 단축시킬 수 있음
전선 발열	큰 전류가 흐르면 온도가 급격히 상승함	큰 전류가 흘렀때 온도 변화가 작음
재활용 가능성	탄성이 작은 구리선 사용으로 재활용이 어려움	비닐전선이 탄성이 있어 분리하여 재사용 가능
수업연계	이전 수업에는 전선을 사용하여 전류의 자기효과 확인 실험을 하다가 전자석 부분에서 뜬금없이 에나멜선을 사용하여 수업연계가 부자연스러움	이전 수업부터 비닐전선을 활용한 수업 진행이 가능함

V. 결론 및 제언

1. 결론

이 연구는 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들에 대한 원인을 밝히고, 효과적으로 실험수업을 운영할 수 있는 새로운 전자석을 개발하는 것을 목적으로 하였다.

이 연구의 결론은 다음과 같다.

첫째, 전자석 관련 실험수업에서 발생하는 문제들에 대한 주된 원인은 전자석의 전기회로를 구성하는 전구에 있었다. 제4차 초등학교 과학과 교육과정 이후로 전구를 전자석의 전기회로의 단락을 방지하고 고리전선에 전류가 흐르는지의 여부와 그 크기를 어렵하기 위한 검류계나 전류계를 대신하여 사용하고 있었지만, 전구는 인가되는 전압에 따라 커지는 비선형 저항으로서 전자석의 전기회로에 연결할 경우 저항의 크기가 전지의 기전력에 비하여 너무 커서 전자석의 전기회로의 전류가 작아진다는 것이다. 이러한 작은 전류는 작은 세기의 전자석 자기장을 유도한다. 그리고 전자석의 전기회로에 전지를 직렬연결하더라도 전자석이 클립을 붙여 올릴 만한 자기력을 작용할 수 있는 충분한 세기의 자기장을 유도할 수 있을 정도로 크기가 증가하지 않는다. 또한 전자석의 고리전선 수를 증가시키는 경우에도 역시 클립을 붙여 올릴 만한 자기력을 작용할 수 있는 충분한 세기의 자기장으로 증가되지 않는다는 것이다. 그리고 전구를 연결하지 않은 제3차 초등학교 과학과 교육과정에서는 고리전선의 저항을 통제하지 않은 관계로 예상과 다른 실험 결과가 나타난다는 것이다.

둘째, 이 연구에서 개발된 새로운 전자석은 그 심으로 전산볼트, 고리전선은 비닐전선으로 구성되며, 결속끈으로 뺨끈을 사용하여 학생들이 짧은 시간동안 쉽게 전자석을 만들 수가 있을 뿐만 아니라 분해할 수 있다. 그리고 새로운 전자석 특성들은 전자석의 자기력에 대한 과학적 개념과 법칙에 잘 부합되는 것을 보였다. 개발된 새로운 전자석은 하나의 전자석이라는 제품이라기보다는 전자석을 조립하고 분해할 수 있는 실험 기자재로서, 전자석의 원리를 이해하는 데뿐만 아니

라 전류의 자기작용의 전반적인 실험에서 활용할 수 있는 장점을 지니고 있다고 할 수 있다.

셋째, 전자석의 자기장은 고리전선에 흐르는 전류와 고리전선 수에 비례하여 증가하였고, 전자석의 자기력은 고리전선에 흐르는 전류의 제곱, 고리전선 수의 제곱에 비례하였으며, 철심의 단면적에 비례하였다. 또한 철심이 없는 경우 전자석의 자기장은 고리전선의 직경에 영향을 받지 않았다. 이러한 결과들은 이는 전자석의 자기력이 전류의 크기의 제곱, 고리전선 수의 제곱, 철심의 단면적에 비례한다는 이론 결과를 실험적으로 확인할 수 있었으며, 이러한 결과 현동걸 등(2015)이 제시한 이론적 결과와 일치함을 보였다.

2. 제언

본 연구의 결과를 바탕으로 다음과 같이 제언을 하고자 한다.

첫째, 전자석 관련 실험문제에서 발생하는 문제의 주된 원인은 전자석 전기회로에 전구가 포함되었기 때문이다. 전자석의 전기회로에 전구가 포함된 주된 이유는 고리전선에 전류가 흐르고 있는지 확인하기 위함과 전선의 단락을 막기 위함이다. 따라서 전기회로에서 전구를 제거하게 되면 전기회로에 전류가 흐르고 있는지 확인하기가 어렵다는 문제가 발생한다. 이를 보완하기 위해 먼저 전자석 전기회로에 전구를 연결하여 전류가 흐르고 있음을 확인하고 전기회로에 전구를 제거하여 실험을 한다거나, 전류가 흐르고 있는 전선 주변에 자기장이 형성된다는 전차시 학습 내용을 바탕으로 전구를 제거한 전기회로의 전선 주변에 나침반을 놓아 전류가 흐를 때 나침반이 움직임을 관찰을 통해 전구가 없는 전기회로에 전류가 흐르고 있는지 확인할 수도 있을 것이다. 전자석의 전기회로에 전구를 포함시키는 두 번째 이유인 전선의 단락 관련 문제는, 본 연구에서 새로 개발한 전자석을 이용한다면 비닐전선이 허용할 수 있는 전류 세기가 크기 때문에 전자석의 온도가 올라간다거나 전선의 단락 위험이 없을 것을 것이다. 추후 전자석 전기회로에서 전구를 제거 했을 때 발생할 수 있는 문제에 대해 다각적인 연구가 필요하다.

둘째, 전구를 제거한 전자석 전기회로에서 전류의 세기를 증가시키는 목적으로 전지를 직렬연결한 경우보다 병렬연결한 경우가 더 큰 전류를 얻을 수 있었다. 이는 학생들이 기존에 학습하게 되는 내용과 반대되는 개념으로 학교 현장에서 혼란이 올 수 있다. 전류의 크기에 따른 전자석의 세기 비교 실험에서 전지를 직렬 또는 병렬로 연결하는 목적은 보다 큰 전류를 얻어 전자석의 세기를 크게 하기 위함이다. 교사들은 올바른 과학지식을 알고 있어야 하기 때문에 전기회로의 부하저항이 전지의 내부저항보다 작은 경우에는 전지를 병렬연결한 경우가 더 큰 전류를 얻을 수 있음을 인지할 필요가 있다. 하지만 초등학교 학생들은 혼란이 올 수 있게 때문에 전지의 직렬연결 또는 병렬연결에 대한 언급을 하지 않고 자유탐구 방식으로 학생들 스스로가 다양한 방법으로 전자석의 세기에 영향을 주는 변인을 찾아보는 활동을 하도록 제시하면 될 것이다. 앞으로 학교 현장에서 전지를 연결함에 있어 전기회로의 부하저항이 전지의 내부저항보다 큰 경우와 전기회로의 부하저항이 전지의 내부저항 보다 작은 경우를 어떻게 지도해야 할지에 대한 논의가 필요하다.

셋째, 본 연구에서 실험적으로 검증한 전자석의 자기력이 전류의 제곱, 고리전선 수의 제곱, 철심의 단면적에 비례한다는 이론 및 실험결과를 바탕으로 교육과정의 구성되어야 할 것이다. 또한 교사들이 전자석에 대한 정확한 이해를 위해 교사 교육프로그램 개발 및 적용이 필요할 것이다.

넷째, 본 연구에서 개발한 새로운 전자석이 학교 현장에 적용하였을 때 기존 문제들이 발생하지 않는지, 또는 새로운 문제가 발생하지 않는지에 대한 추후 연구가 필요하다.

참고문헌

- 강진필(2004). 초등학교 과학과 전기단원 실험 지도의 실태 조사. 한국교원대학교 교육대학원 석사학위논문.
- 고재귀(2008). 자성 재료학. 서울: 송실대학교출판부.
- 고재귀와 송재만(1997). 자성물리학의 기초와 응용. 서울: 송실대학교출판부.
- 고호관(2009). 술술 읽는 물리 소설책 2. 서울: 부즈핌.
- 곽영순(2004). 제7차 초등 과학과 교육과정 운영 실태 분석. 한국과학교육학회지, 24(5), 1028-1038.
- 교육과학기술부(2013). 초등학교 교사용 지도서 과학 6-1. 서울: (주)미래엔.
- 교육인적자원부(2002). 초등학교 교사용 지도서 과학 6-1. 서울: (주)대한교과서.
- 교육부(1997a). 초등학교 교사용 지도서 자연 6-1. 충남: (주)국정교과서.
- 교육부(1997b). 초등학교 자연 6-1. 서울: (주)국정교과서.
- 교육부(2015). 초등학교 교사용 지도서 과학 6-1. 서울: (주)미래엔.
- 김동우(1992). 초등학교의 논리적 사고수준과 전류와 자기장의 학습 성취도의 관계. 한국교원대학교 교육대학원 석사학위논문.
- 김상욱, 최병문, 김윤걸, 조선형(1981). 초등 과학 실험상의 문제점에 관한 연구, 청주교육대학교 과학교육연구, 6, 1-37.
- 김승년(2013). 자기변형효과를 이용한 흙막이 가시설 구조물의 비파괴 응력 계측에 관한 연구. 경일대학교 대학원 석사학위논문.
- 김석주, 정성안, 박상우, 채동현, 현동걸(2014). 전자석 관련 실험수업의 개선을 위한 새로운 전자석 제작 및 특성 조사. 2014 한국초등과학교육학회 제66차 동계학술대회. 광주: 광주교육대학교.
- 김철구, 남균(2003). 자성체의 이론과 응용. 서울: 청문각.
- 김한민, 강일구, 이재일(2001). 자성재료물리학. 서울: 백산출판사.
- 문교부(1973). 국민학교 교사용 지도서 자연 6-1. (주)국정교과서.
- 문교부(1983). 국민학교 교사용 지도서 자연 6-1. (주)국정교과서.
- 문교부(1991). 국민학교 교사용 지도서 자연 6-1. (주)국정교과서.

- 박종욱, 김선자(1996). 초등학교 교사들이 자연과 실험수업에서 겪는 문제 조사. 한국초등과학교육학회지, 15(2), 263-282.
- 백남권, 박종호, 정수현(2005). 초등학교 교사들이 과학과 에너지 영역 실험수업에서 겪는 문제. 진주교육대학교 과학교육연구, 28, 169-191.
- 송관섭, 김정덕(2002). 전자식 만들기에서 잔류 자기장의 요인 및 수업모형 제시. 광주교육대학교 초등교육연구, 17(1), 93-107.
- 신순임(1977). 자연과 실험지도에 있어서의 문제점 해결 방안. 춘천교육대학교 과학교육연구, 4, 41-66.
- 신애경, 김석주, 현동걸(2015). 전자식 관련 실험수업의 효율화를 위한 새로운 전자식 제작 및 특성 조사. 2015 한국초등과학교육학회 제68차 동계학술대회. 제주: 제주대학교.
- 윤혜경(2004). 초등 예비교사들이 과학 수업에서 겪는 어려움. 초등과학교육, 23(1), 74-84.
- 윤혜경(2008). 과학 실험 실습 교육에서 초등 교사가 느끼는 딜레마. 초등과학교육, 27(2), 102-116.
- 이수아, 전영석, 홍준의, 신영준, 최정훈, 이인호(2007). 초등 교사들의 과학 수업에서 겪는 어려움 분석. 초등과학교육, 26(1), 97-107.
- 이정원, 정모근(2002). 실과 가꾸기 및 기르기의 노작 활동 흥미도와 아동 인성과의 관계. 한국실과교육학회지, 15(4), 41-63.
- 이재원(1991). 노작의 의의와 그 교육적 가치에 관한 소고. 대한공업교육학회지, 16(1), 1-9.
- 정미경(2005). 초·중학교 가정교과 수공노작학습이 두뇌기능 및 창의성에 미치는 효과. 한국가정과학교육학회지, 16(4), 57-79.
- 정훈(2013). 노작의 가치 탐색: 감각과 소통의 측면에서. 한양대학교 교육공학연구, 7(1), 94-114.
- 최영완(1998). 초등학교 고학년 학생의 전기와 자석개념 및 과학에 대한 태도의 한·일 비교 연구. 한국교원대학교 대학원 석사학위논문.
- 최유현(1997). 초등실과 교육의 정체성과 정당성에 관한 이론적 탐색. 실과교육연구, 9, 475-504.

- 최충식(2011). 에너지원의 종류에 따른 비닐평형코드(VFF)의 소손원인 판정기법에 관한 연구. 한국소방방재학회, 25(6), 83-88.
- 현동걸, 박상우(2014). 전류가 흐르는 전선 부근의 나침반 자침 편향의 모형화 및 이론적 고찰. 현장과학교육, 8(1), 62-73.
- 현동걸, 박상우, 신애경(2015). 물리교육에서 다루어지는 전자석의 자기력에 대한 이론적 연구. 현장과학교육, 9(1), 50-59.
- 한명희(1999). 중학생의 전기와 자기에 대한 개념 조사. 한국교원대학교 대학원 석사학위논문.
- Callister, W. D. & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals Of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach(4th ed.). John Wiley & Sons, INC.
- Czerniak, C. & Chiarelott, L. (1990). Teacher education for effective science instruction - a social cognitive perspective. Journal of teacher Education, 41(1), 49-58.
- Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J. (2004). Fundamentals of Physics(7th ed.). John Wiley & Sons Inc.
- Hayt, Jr. W. H. & Buck, J. A. (2012). Engineering Electromagnetics(8th ed.). McGraw-Hill Education. .
- Hubert, C. I. (2002). Electric Machines. Prentice-Hall.
- Hyun, D. (2010). A Theoretical Approach to the Relation of the Relative Magnitude of a Load Resistance to the Internal Resistance of a Battery and the Current in the Electric Circuit with a Series/Parallel Combination of Batteries. New Physics: Sae Mulli, 60(10), 1125-1133.
- Hyun, D. & Park, S. (2012). A Study on the Problems of a Light Bulb Appearing in Physics Education (I) : Resistance of a Light Bulb. New Physics: Sae Mulli, 62(4). 352-363.
- Hyun, D. & Shin, A. (2014). Study on Problems Occurring in Elementary-school Science Classes Related to Electric Circuits. New Physics: Sae Mulli, 64(12), 1211-1222.

- Hyun, D., Kim, S., Shin, A. & Park, S. (2015). Development of a New Electromagnet and Investigation of its Characteristics for Efficiency of Science Classes Related to the Magnetic Effect of an Electric Current. *New Physics: Sae Mulli*, 65(11), 1086-1096.
- Jewett, Jr. J. W. & Serway, R. A. (2008). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*(7th ed.). Thomson Learning, Inc.
- Kim, S. & Hyun, D. (2015). Experimental Analysis of Problems Occurring in Science Classes Related to Electromagnets. *New Physics: Sae Mulli*, 65(8), 797-811.
- Miessler, Fischer, Tarr, 2013
- Sadiku, M. N. O. (2009). *Elements of Electromagnetics*(5th ed.). Oxford University Press.
- Park, S. & Hyun, D. (2014). Theoretical Approach to Problems Related to Magnetic Interactions of Electric Currents in Elementary-School Science Classes. *New Physics: Sae Mulli*, 64(4), 405-416.
- Popovic. Z. & Popovic B. D. (2000). *Introductory Electromagnetics*, Corrected Ed. Prentice Hall, Inc.
- Tipler, P. A. & Mosca, G. (2007). *Physics for Scientists and Engineers*. W H Freeman & Co.
- Zumdahl, S. S. & Zumdahl, S. A. (2013). *Chemistry*(9th ed.). Thomson Learning, Inc.

ABSTRACT

A Study on Development of New Electromagnet and its Characteristics for Elementary-school Science Classes

Seok-Ju Kim

Department of Elementary Science Education

Graduate School

Jeju National University

Supervisor: Prof. Donggeul Hyun

In spite of the several revisions of the elementary science curriculum since the introduction of the elementary science curriculum, the researches that some problems have occurred in the science classes related to electromagnets have been reported continuously. The problems that the students have difficulty and spend a lot of time in making the electromagnet have caused some trouble in the class operation. And the results of the experiments about the magnetic force of the electromagnet don't turn out as predicted theoretically. In addition, it has no experimental information about the experiments related to electromagne and it is given the wrong information in the teacher's instructions and some study. In this study, the causes of there problems were discovered through an experimental analysis of the experiments in science classes related to electromagnets. And we developed a new electromagnetic to effectively operate the science classes related to electromagnet.

The results works as follows.

First, the main cause of the problems occurring in the related electromagnet experiment class was in the bulbs that make up the electric circuit of the electromagnet. because that the magnitude of the resistance of the bulb is too large compared to the size of the electromotive force of the battery of the electric circuit of the electromagnet, the current in the electric circuit of the electromagnet is too small. This very small current never becomes large enough for the electromagnet to produce a sufficient magnetic field, not even when the number of batteries in connected in series or the number of loop electric wires is increased. As a result, it does not raise sufficient magnetic force might lift a clip on the electromagnet.

Second, a characteristic of the new electromagnet developed in this study showed that well suited to scientific concepts and laws of magnetic force of the electromagnet. And students can be decomposed not only easy to make the electromagnet for a short time.

Third, magnetic field of the new electromagnet is increased in proportion to the current flowing through the wire and the number of loop electric wires. The magnetic force of the new electromagnet was proportional to the square of he current flowing through the wire and the current flowing through the wire. And the magnetic force of the new electromagnet was proportional to the cross-sectional area of the iron core. These results were consistent with theoretical studies on the magnetic force of the electromagnet recently.

* Key words: Elementary school, Magnetic action of electric current, Loop electric wires, Electromagnet, Magnetic force, Science class, Current