

자체 유도 현상에 대한 직관적 사고의 내용과 원인 분석을 통한 과학자적 이해

안 수 영
(경남과학고등학교)

Scientific Understanding Through the Analysis of Students' Intuitive Ideas and Sources on Self-Induction

Ahn, Soo-Young
(Gyeong Nam Science Highschool)

ABSTRACT

Self-induction is an important concept in the field of electromagnetism, which is dealt with in all the high school physics textbooks. According to the results of the survey on self-induction, most of general high school students and even science high school students have overgeneralized concepts that high self-induced emf. are produced whenever the switch is turned off in the circuit containing inductors.

The reasons of this overgeneralization on self-induction could be explained through the analysis of current high school physics II textbooks. Main reasons can be attributed to the fact that, by depending on their intuitive ideas, students try to vaguely explain the concept, based on lighting up of Ne tube in the special circuit.

This study found out qualitative method to have students effectively understand self-induction based on quantitative interpretation to gain scientific understanding on self-induction.

Key words: self-induction, intuitive ideas

I. 서 론

전자기유도 현상의 대표적 현상 중의 하나인 자체 유도 현상은 고등학교의 모든 물리Ⅱ 교과서에서 다루어지고 있다. 특히 코일과 저항으로 구성된 회로(R-L 회로)에서 자체 유도 이론의 특징을 잘 보여줄 수 있는 높은 역기전력이 유도되는 실험적인 현상은 대부분의 교과서에서 취급되고 있다. 자체 유도에 대한 이론적인 어려움을 피해 고등학생 수준에서 이를 가르치기 위하여, 고교 교과서에서는 R-L 회로와 병렬로 연결된 Ne 전구나 형광등에서 스위치를 닫았

다가 열 때 나타나는 점등 현상을 소개한다. 이 회로에서 스위치를 닫을 때나 계속 닫고 있을 때는 Ne 전구가 점등되지 않지만, 스위치를 열 때는 Ne 전구가 순간적으로 점등되었다가 꺼진다. 이처럼 잘 설정된 회로를 이용하여 Ne 전구의 점등 과정을 통해서 스위치를 여는 순간 높은 유도 기전력이 나타난다는 것을 가시적으로 보여줄 수가 있으므로, 학생들에게 회로에 연결된 건전지의 기전력보다 훨씬 큰 유도 기전력이 자체 유도 현상에 의해 나타난다는 것을 이해시키는 데 도움이 된다.

오개념과 관련한 학생들의 개념 형성의 주된 요인

은 학생들의 직관적 사고, 자발적으로 형성된 선개념, 사회·문화적 배경, 교과서나 교사에 의한 학교 교육 등을 들 수 있다(권재술과 김범기 편저, 1993). 자체 유도 현상에 대한 개념 형성은 그 특성상 학생들의 자발적 선개념과는 거리가 멀고 대부분 교과서나 교사에 의한 형식적 교육을 통해서 형성되기 쉽다. 한편 학생들은 교과서나 교사의 설명을 있는 그대로 수용하는 게 아니라 자신들의 개념구조를 바탕으로 새로운 정보를 받아들여 자발적으로 재구성한다. 자체 유도 현상에 대한 이론상의 어려움을 피하기 위해 정확한 정량적인 설명대신 직관적 사고에 의존한 교과서에 제시된 정성적 설명은 과학자들이 요구하는 것과는 다른 개념구조를 형성할 수 있다(Lawson & Thompson, 1988; Chinn & Brewer, 1993; 박승재와 조희형, 1999).

대부분의 교과서에서는 특정 회로에서 나타나는 자체 유도 현상을 Ne 전구의 점등을 통해 가시적으로 제시하고 이를 바탕으로 고전압이 유도되었다는 것을 설명한다. 교과서에서 제시하고 있는 학생 수준을 고려한 직관적 사고에 의존한 설명은 자칫 잘못된 지식을 학생들에게 형성시키기 쉽다(Mclosky, 1983). 즉, 학생들은 회로가 어떻게 구성되든지 관계없이 “R - L 회로에서는 스위치를 닫았다가 열기만 하면 높은 유도 기전력이 나타난다” 식의 과 일반화된 자체 유도에 대한 지식을 갖기 쉽다. 사실 이와 같은 과 일반화된 지식은 자체 유도 현상을 학습한 일반고등학교 학생뿐만 아니라 과학고등학교에게서도 상당히 많이 찾아볼 수 있다.

이에 본 논문에서는 자체 유도 현상에 대하여 학생들의 과 일반화 된 지식의 내용과 형성 원인을 찾아 보고, 자체 유도 현상에 대한 정량적인 해석을 토대로 이에 대한 올바른 이해를 도모하고 학생들에게 자체 유도 현상을 효과적으로 이해시킬 수 있는 방안을 찾고자 한다.

II. 연구 방법

연구는 학생들에게 자체 유도 현상과 관련한 설문 조사를 실시하여 학생들의 지니고 있는 개념을 진단

하고, 6차와 7차의 물리 II 교과서를 분석하여 학생들의 개념 형성 원인을 분석하였다. 설문 조사는 자체 유도 현상을 학습하고 대학수학능력 시험에서 물리를 선택할 3학년 학생 123명과 과학고등학교 2학년 학생 89명을 대상으로 하였다.

나아가 자체 유도 현상에 대한 정량적 접근을 통해 다양한 상황에서 나타날 수 있는 실험적 결과를 바르게 해석하고, 이를 통해 학생들이 자체 유도 현상을 올바르게 이해할 수 있는 효과적인 설명 체계를 찾아보았다.

III. 연구 결과 및 논의

1. 자체 유도 현상에 대한 학생들의 직관적 사고

자체 유도 현상과 관련한 학생들의 직관적 사고를 알아보기 위하여 연구 대상 학생들에 대하여 개념 조사를 실시하였다. 연구 대상 학생 중 일반고등학교 학생들은 자연계열 학생들 중 대학 수학능력 시험에서 물리를 선택한 학생들로 일반 학생들보다는 물리에 대한 관심이 높다고 할 수 있다.

학생들의 개념을 조사하기 위하여 사용한 문항과 그에 따른 학생들의 대표적인 직관적 사고는 부록 1과 같이 나타났다.

(문항 1)에서 과학고등학교(95%)와 일반고등학교(91%)의 많은 학생들이 스위치를 닫았다가 여는 순간 고압의 유도 기전력이 발생하여 순간적으로 네온 전구에는 불이 들어왔다가 꺼진다는 과학자적 응답을 하였다. 스위치를 닫을 때도 네온 전구가 켜질 것이라는 잘못된 응답은 일반고등학교에서는 11%, 과학고등학교에서는 4.5%로 적게 나타났다.

(문항 1)의 회로에서 Ne 전구와 병렬로 도선을 연결한 (문항 2)의 경우에도, 회로의 차이에 관계없이 스위치를 열 때는 Ne 전구가 여전히 순간적으로 켜질 것이라는 응답은 과학고등학교 학생의 71%, 일반고등학교 학생의 92%가 택하여 아주 많은 학생들이 직관적 사고를 바탕으로 잘못된 응답을 하고 있다.

(문항 3)에서는 (문항 1)과 동일한 회로를 사용하

여 스위치를 닫았다가 열 때 나타나는 자체 유도 기전력의 크기를 물어보았다. 과학고등학교 학생 모두와 일반고등학교 학생의 92%가 스위치를 열 때 고전압이 유도될 것이라는 바른 응답을 하여 (문항 1)과 비슷한 결과를 보였다.

(문항 4)의 회로는 네온 전구 대신 도선을 연결하였다. 스위치를 닫았다가 여는 순간에 여전히 고전압이 코일에 유도될 것이라는 잘못된 응답을 과학고등학교의 78%, 일반고등학교의 90% 학생이 하였다. (문항 1)에서 (문항 4)까지의 응답 결과를 통해, 학생들은 코일과 병렬 연결된 네온 전구나 도선과는 무관하게, 코일이 있는 회로에서는 스위치를 열 때 항상 고전압이 유도된다는 직관적 사고를 지니고 있다는 것을 알 수 있다. 이때 네온 전구는 고전압이 유도되었다는 것을 가시적으로 보여주는 역할만 하는 것으로, 스위치를 닫거나 열 때 회로에 아무런 영향을 주지 않는 것으로 인식하고 있다는 것을 파악할 수 있다.

(문항 5)에서 코일의 자체 유도계수(L)가 커지면 유도 기전력도 커질 것이라는 응답을 과학고등학교 학생의 53%, 일반고등학교 학생의 75%가 하였다. 자체 유도계수(L)가 커지면 코일에 저장되는 자기적 에너지가 커질 것이라는 바른 응답은 과학고등학교 학생의 45%, 일반고등학교 학생의 17% 정도였다. 학생들의 설명에 의하면, 코일에 의한 유도 기전력의 크기는 $E = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$ 의 관계가 있으므로, 유도 기전력(E)은 자체 유도계수(L)가 클수록 크게 나타난다고 직관적으로 판단하고 있다.

학생들의 설문 결과를 토대로 과학고등학교나 일반고등학교 학생 대부분이 자체 유도 현상에 대하여 다음과 같은 과 일반화된 직관적 사고를 지니고 있다는 것을 알 수 있다.

· 자체 유도 현상이 일어나는 회로에서는 스위치를 열 때 회로의 특성에 관계없이 항상 고전압이 유도된다.

· $E = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$ 에 의해 자체 유도계수(L)가 클수록 큰 전압이 유도된다.

· 네온 전구는 유도 기전력의 크기에 영향을 주는 회로 요소가 아닌 고압의 유도 기전력이 나타났다는 것을 알 수 있는 장치이다.

2. 자체 유도 현상에 대한 과 일반화된 지식 형성의 원인

자체 유도 현상의 이론적인 정량화 과정은 고등학교 수준에서는 이해하기 약간 어렵다. 이런 이유로, 교교 교과서에서는 자체 유도 현상을 이해시키기 위하여 자체 유도 현상에 의해 나타나는 가시적인 실험 현상을 바탕으로 학생들의 직관에 의존한 설명을 시도한다.

한편 자체 유도 현상은 그 성질상 학생들의 선개념과는 무관하다고 볼 수 있다. 따라서 오개념과 관련된 연구 결과를 고려할 때 자체 유도 현상에 대한 과 일반화된 지식 형성의 원인은 교과서에 제시되어진 내용에서 찾을 수 있다.

1) 교과서에 제시된 특정 회로에 의한 자체 유도 현상

자체 유도 현상에 의해 나타나는 유도 기전력의 변화는 구성된 회로에 의존하여 달라진다. 그렇지만 대부분의 현행 물리 II 교과서에서는 높은 유도 기전력이 나타나는 것을 실험적으로 보여주기 위하여 Fig. 1과 같은 회로만을 주로 다룬다.

분석 대상으로 삼은 6차와 7차의 13종 교과서 중 circuit 1과 같은 실험적 상황은 6차 교과서 4종과 7차 교과서 6종에서 제시되어 대부분의 교과서가 동일한 실험 상황을 다루고 있다. circuit 2와 같은 실험적 상황은 6차 교과서 3종에서 다루고 있다.

Fig. 1의 circuit 1에서 Ne 전구나 형광등이 점등되기 위해서는 회로에 연결된 전지의 기전력보다 훨씬 큰 전압이 필요하다. circuit 1에서 나타나는 실험적인 결과는 잘 알려져 있는 내용으로 스위치를 닫는 순간이나 계속 닫고 있는 동안에는 Ne 전구나 형광등은 점등되지 않지만 닫고 있던 스위치를 여는 순간에 Ne 전구가 순간적으로 켜졌다가 꺼지는 것을 관

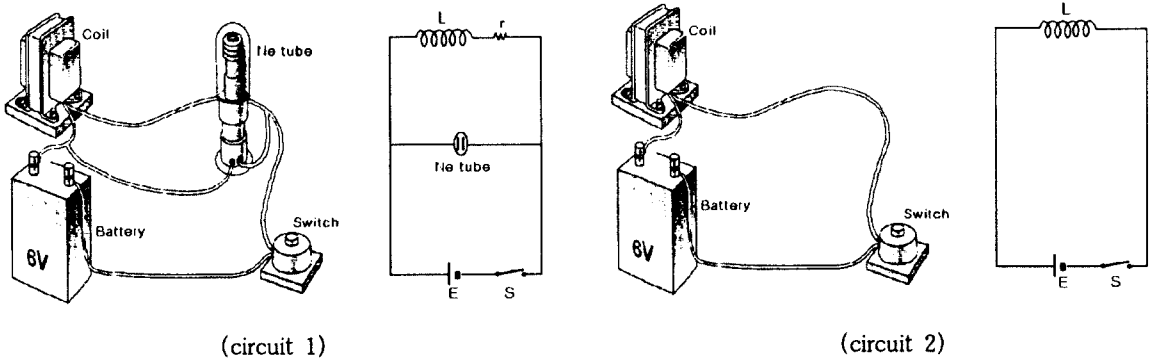


Fig. 1. Circuits of self-induction on the textbooks

찰 할 수 있다.

일반적으로 Ne 전구나 형광등은 고전압 하에서 켜지므로, 대부분의 교과서에서는 Ne 전구의 점등을 통해 코일에 고전압이 유도되었다는 것을 설명한다. 또한 이들 교과서에서는 학생들의 수준을 고려하여 정량적인 해석을 바탕으로 스위치를 닫거나 열 때 저항체 역할을 하는 Ne 전구로 인해 고압의 유도 기전력이 나타날 수 있다는 구체적인 설명은 생략하고 있다. 직관에 의존한 정성적인 설명에 의해, Ne 전구나 형광등은 점등 여부를 통해 고전압이 유도되었는가를 판단할 수 있는 일종의 테스트 기구로 학생들에게 묵시적으로 비취진다.

circuit 2도 circuit 1과 같은 맥락에서 볼 수 있다. 일반적으로 전기회로에서 스위치의 역할은 그다지 부각되지 않지만 자체 유도 현상에서는 다르다. 스위치를 닫는 경우에는 코일과 건전지만으로 회로가 구성되지만, 열 때는 이 회로에 열린 스위치(큰 저항체)가 포함된 회로가 구성된다고 볼 수 있다. 스위치를 닫을 때와 열 때의 각 회로의 저항이 크게 다르므로 나타나는 전류의 변화도 다르다고 볼 수 있다. 따라서 전류의 변화는 스위치를 열 때 더욱 급격히 일어나고, 그 결과 순간적으로 고압의 유도 기전력이 발생한다.

분석 결과에 의하면, 모든 교과서가 Fig. 1(circuit 1, 2)과 같은 특정한 실험 상황만을 다루고 있다. 따라서 교과서를 통해 자체 유도 현상을 학습한 학생들

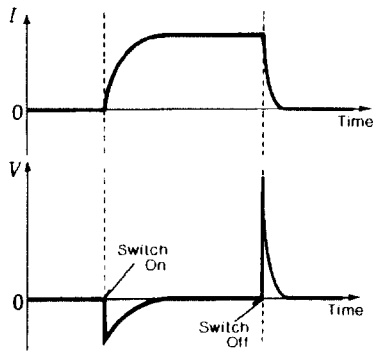
은 Fig. 1의 circuit 1에서는 Ne 전구의 점등을, circuit 2에서는 스위치에서 일어나는 순간적인 방전을 통해 자체 유도 현상에 대하여 다음과 같은 기계적 도식을 가질 수 있다.

자체 유도 현상이 일어나는 회로에서 '스위치를 열 때는 항상 고압의 유도 기전력이 발생' 한다.

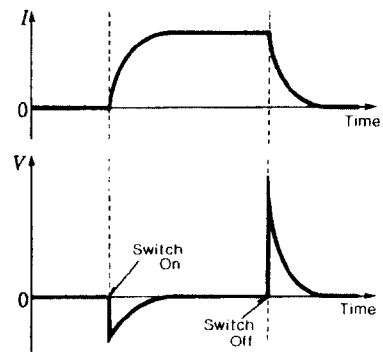
2) 전류의 변화에 대한 직관적 해석

대부분의 물리Ⅱ 교과서에서는 Fig. 1의 circuit 1에서 나타나는 자체 유도 현상을 실험적으로 제시한 다음, 자체 유도 현상에 대한 이론적인 설명은 고등 학생의 수준을 고려하여 이들의 직관에 의존한 정성적인 설명을 시도한다. 많은 교과서는 스위치를 닫거나 열 때 나타나는 전류나 전압의 변화를 Fig. 2의 Graph 1로 바르게 제시하고 있지만 일부 교과서에서는 Graph 2와 같은 실험 상황과 맞지 않는 그래프를 제시하고 있다.

스위치를 닫을 때 전류의 증가는 곧바로 일정한 값(E/R)에 이르는 것이 아니라, 코일의 자체 유도 현상에 의한 역기전력으로 인해 시간 차이를 두고 일정한 값(E/R)에 이르게 된다고 설명한다. 이와 같은 설명은 학생들에게도 전자기 유도에 의해 나타난 코일의 역기전력을 도입함으로써 무리없이 받아들여진다. 계속 닫고 있으면 회로 내에는 일정한 전류가 흐르게 되고 이에 따라 코일의 유도 기전력이 사라지게 된다는 것도 쉽게 설명 가능하며 직관적으로 받아들일 수



(Graph 1) Asymmetrical change of current.



(Graph 2) Symmetrical change of current.

Fig. 2. Change of current of self-induction on the textbooks

있는 현상이다.

반대로 스위치를 열면 전류가 순간적으로 0이 되고, 시간에 따른 전류의 급격한 변화는 높은 유도 기전력을 코일에 유도시키고, 이로 인해 Ne 전구나 형광등에 불이 켜진다고 설명한다. 이러한 정성적인 설명의 과정에서 스위치를 닫거나 열 때 저항으로서의 Ne 전구의 특성은 간과된 채로 단순히 스위치를 열 때가 닫을 때보다 전류의 변화가 더 급격히 일어나는 것으로 설명되고 있다. 또 다른 면에서 이와 같은 막연한 설명은 때로는 학생들에게 직관적으로 와 닿지 않을 때도 있다. 네온 전구나 스위치가 회로를 닫거나 여는 상황과 무관한 것으로 인식하는 학생들은 오히려 스위치를 닫거나 열 때 나타나는 전류의 변화는 대칭적으로 같아야 한다고 판단하게 된다. 이러한 생각들은 교과서에 제시된 Graph 2를 통해서 더욱 강화될 수 있다.

전류의 시간적인 변화율이 유도 기전력의 크기를 결정한다고 할 때, Graph 2에서는 갑자기 고압의 유도 기전력이 나타나야 할 이유가 없다. 하지만 Graph 2에서는 전류에 대한 그래프의 변화 형태와는 달리 유도 기전력의 크기는 스위치를 닫을 때보다 열 때 더욱 큰 값이 되는 것으로 잘못 나타내고 있다.

여전히 대부분의 교과서에서 Fig. 1과 같은 특징의 실험 상황에 관련된 그래프만 제시함으로써 학생들은 스위치를 닫을 때보다 열 때 전류의 변화가 더욱 급격히 일어난다는 직관적 사고를 강화시키고 이러한 직관적 사고는 회로의 특성에 관계없이 항상 스위치

를 열 때가 닫을 때보다 큰 유도 기전력이 나타난다는 쪽으로 과 일반화 될 수 있다.

자체 유도 현상에 대한 과 일반화된 개념 형성을 예방하기 위해서는 기존의 실험 상황 외에 (문항 2)나 (문항 4)와 같은 실험 상황을 함께 제시할 필요가 있다. (문항 2)나 (문항 4)에서는 스위치를 닫거나 열 때 나타나는 전류의 변화는 Graph 2와 비슷하고 이 때는 물론 고압의 유도 기전력은 나타나지 않는다.

3) 유도 기전력의 크기를 나타내는 표현식에 대한 직관적 사고

코일이 지니는 자체 유도계수(L)와 코일의 유도 기전력(E_L) 사이에는 다음의 관계가 성립하고 있다.

$$E_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

외형적으로 전류의 시간적인 변화율($\frac{\Delta i}{\Delta t}$)이 같으면,

유도 기전력(E_L)의 크기는 자체 유도계수(L)의 값에 따라 비례하여 커지는 것으로 받아들일 수 있다. 따라서 감긴 횟수가 많은, 즉 코일의 자체 유도계수(L)가 크면 유도 기전력(E_L)의 값은 전지의 기전력 보다 더 커질 수 있다고 생각하게 된다. 이러한 생각은 유도 기전력의 값이 전지의 기전력 보다 훨씬 큰 값을 지닐 수 있다는 생각을 강화시키는 데 기여하게 된다.

3. 자체 유도 현상에 대한 정량적인 해석

R-L 회로에서 나타나는 대표적인 자체 유도 현상은 Fig. 3, Fig. 4의 2가지 회로로 구분하여 해석할 수 있다.

1) Fig. 3 회로에서의 자체 유도 현상

Fig. 3의 회로에서 스위치 S₂를 열어 놓은 상태에서 스위치 S₁을 닫을 때 나타나는 자체 유도 현상과 스위치 S₂를 닫아놓은 상태에서 스위치 S₁을 열 때 나타나는 자체 유도 현상은 회로방정식을 이용하여 다음과 같이 간략히 정리된다.

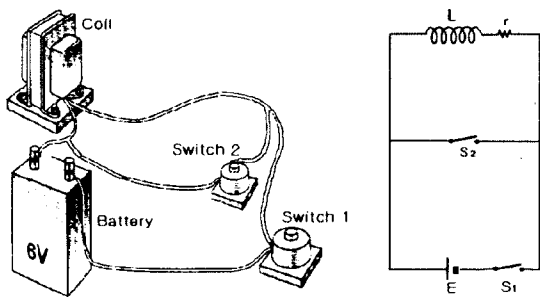


Fig. 3. r - L circuit

Fig. 3의 회로에서 스위치를 닫거나 열 때 나타나는 전류와 유도 기전력의 변화는 비슷한 형태를 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 스위치를 닫을 때 나타나는 전류의 변화는 자체 유도 현상에 의한 역기전력에 의해 서서히 증가하여 일정한 값($\frac{E}{r}$)의 평형상태에 이른다는 것을 알 수 있다. 시간에 따른 변화율은 처음에는 크다가 시간이 지날수록 완만해진다. 스위치를 열 때는 전류의 크기는 시간에 따라 감소하지만, 그 변화율은 스위치를 닫을 때와 같게 나타난다.

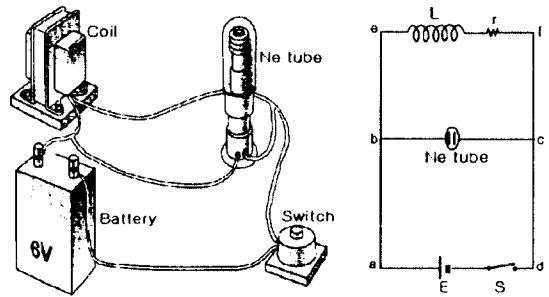


Fig. 4. r - L circuit containing Ne tube

스위치를 닫을 때		스위치를 열 때	
Loop 정리에 의한 회로의 표현식			
$E = ir + L \frac{di}{dt}$		$0 = ir + L \frac{di}{dt}$	
전류에 대한 표현식			
$i = \frac{E}{r} (1 - e^{-\frac{rt}{L}})$		$i = \frac{E}{r} e^{-\frac{rt}{L}}$	
유도 기전력에 대한 표현식			
$E_L = -L \frac{di}{dt} = -E e^{-\frac{rt}{L}}$		$E_L = -L \frac{di}{dt} = -E e^{-\frac{rt}{L}}$	
전류와 유도 기전력(전압)에 대한 그래프		전압 E	
전류의 변화		여는 순간 $\frac{E}{r}$	
닫는 순간 0		일정 시간 경과 0	
일정 시간 경과 $\frac{E}{r}$		여는 순간 E	
유도 기전력의 변화		일정 시간 경과 0	
닫는 순간 -E			
일정 시간 경과 0			

Fig. 3의 회로에서 스위치를 닫거나 열 때 나타나는 유도 기전력의 변화는 일반적으로 교과서적인 유도 기전력의 변화와는 다르다. 스위치를 닫을 때의 유도 기전력의 변화는 교과서의 진술과 일치하지만, 스위치를 열 때 순간적으로 높은 역기전력이 나타나리라는 예상과 달리 역기전력의 크기는 E 로서 전전지의 기전력을 초과하지 않는다는 것을 알 수 있다.

2) Fig. 4 회로에서의 자체 유도 현상

Fig. 4의 회로는 Fig. 3의 회로와 달리 스위치 S_2 대신에 N_e 전구가 코일에 병렬로 연결되어 있다. N_e 전구는 고전압 방전에 의해 불이 켜지게 되어 있어 구조적으로 일반 전구와는 달리 큰 저항을 가지고 있다. N_e 전구가 지나는 저항(R)으로 인해 이들이 점등되기 위해서는 충분히 큰 전압이 요구된다. 스위치 S_1 을 닫았을 때 회로 요소 $aefd$ 를 따라서 전류가 흐르나 N_e 전구에는 자체의 큰 저항으로 인해 전류가 흐르지 않는다(N_e 전구 켜지지 않음). 따라서 스위치를 닫을 때 나타나는 전류와 유도 기전력의 변화는 앞의 Fig. 3 회로에서 스위치를 닫을 때의 조건과 같다는 것을 알 수 있다.

그러므로 Fig. 3의 회로와 동일하게, 스위치를 닫는 순간의 전류 $i=0$ 이며, 이때의 유도 기전력의 최대값은 전지의 기전력 E 와 같다. 따라서 이때 코일에 나타나는 유도 기전력의 크기로서는 큰 전압이 요구되는 N_e 전구나 형광등을 켤 수 없다.

마찬가지로, 스위치를 닫은 다음 충분한 시간이 지났을 때의 전류 $i = \frac{E}{r}$ 값을 지니고, 이때의 유도

기전력(E_L) = 0 이 되어 충분한 시간이 지나면 전지의 역기전력은 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다.

한편으로 스위치를 여는 순간의 전류가 흐르는 회로의 구성 상태는 스위치를 닫을 때와는 다르다. 스위치를 열게 되면, 회로에 제공되던 전지의 기전력은 나타나지 않게 되고, 평형상태에서 코일에 저장되었던 자기장에 의한 에너지에 의해 회로 요소 $befc$ 를 구성하는 새로운 회로가 형성된다. 회로 요소 $befc$ 에는 앞의 조건과 달리 N_e 전구에 의한 큰 저항(R)이 추가된다.

Fig. 4의 회로에 대한 전류와 유도 기전력의 크기를 Loop 정리를 적용하여 정리하면 다음과 같다.

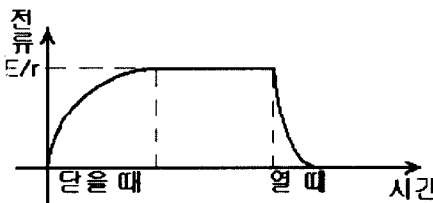
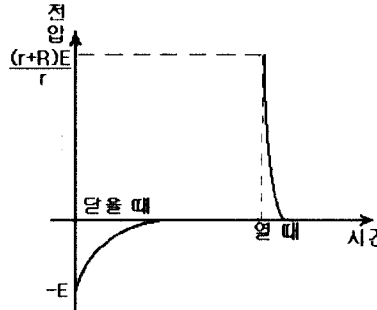
정리된 결과를 바탕으로 Fig. 3과 Fig. 4의 회로에 나타나는 전류와 유도 기전력을 비교하면 다음과 같은 차이가 있다.

Fig. 3의 회로에서는 스위치를 닫을 때나 열 때의 전류와 유도 기전력의 변화는 대칭적인 형태로 나타났다. Fig. 4에서는 스위치를 닫을 때와 열 때의 시간에 따른 전류의 변화율은 N_e 관이 지나는 저항 R 값의 크기에 의해 달라진다는 것을 알 수 있다. 즉 Fig. 2의 회로에서처럼 저항 값이 큰 N_e 전구나 형광등이 연결되어지면, 스위치를 닫을 때와 달리 스위치를 열 때는 전류가 급격하게 감소한다. 이와 같은 전류의 급격한 감소에 의해 코일에는 순간적으로 고압의 유도 기전력이 나타나게 된다. 이때 유도 기전력의 시간에 따른 크기는 식

$$\left(\frac{r+R}{r}\right)Ee^{-\frac{r+Rt}{L}}$$

에 의해 결정된다. 따라서 유도 기전력의 크기는

스위치를 닫을 때	스위치를 열 때
Loop 정리에 의한 회로의 표현식 $E = ir + L \frac{di}{dt}$	$0 = ir + iR + L \frac{di}{dt}$
전류에 대한 표현식 $i = \frac{E}{r} (1 - e^{-\frac{rt}{L}})$	$i = \frac{E}{r} e^{-\frac{r+Rt}{L}}$
유도 기전력에 대한 표현식 $E_L = -L \frac{di}{dt} = -Ee^{-\frac{rt}{L}}$	$E_L = -L \frac{di}{dt} = \left(\frac{r+R}{r}\right)Ee^{-\frac{r+Rt}{L}}$

스위치를 닫을 때	스위치를 열 때																
<p>전류와 유도 기전력에 대한 그래프</p>  <p>전류의 변화</p> <table border="0"> <tr> <td>닫는 순간</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>일정 시간 경과</td> <td>$\frac{E}{r}$</td> </tr> </table> <p>유도 기전력의 변화</p> <table border="0"> <tr> <td>닫는 순간</td> <td>-E</td> </tr> <tr> <td>일정 시간 경과</td> <td>0</td> </tr> </table>	닫는 순간	0	일정 시간 경과	$\frac{E}{r}$	닫는 순간	-E	일정 시간 경과	0	 <p>여는 순간</p> <table border="0"> <tr> <td></td> <td>$\frac{E}{r}$</td> </tr> <tr> <td>짧은 시간 경과</td> <td>0</td> </tr> </table> <p>유도 기전력의 변화</p> <table border="0"> <tr> <td>여는 순간</td> <td>$E \frac{(R+r)}{r}$</td> </tr> <tr> <td>일정 시간 경과</td> <td>0</td> </tr> </table>		$\frac{E}{r}$	짧은 시간 경과	0	여는 순간	$E \frac{(R+r)}{r}$	일정 시간 경과	0
닫는 순간	0																
일정 시간 경과	$\frac{E}{r}$																
닫는 순간	-E																
일정 시간 경과	0																
	$\frac{E}{r}$																
짧은 시간 경과	0																
여는 순간	$E \frac{(R+r)}{r}$																
일정 시간 경과	0																

Ne 전구의 저항(R)값이 클수록 큰 값을 초기에 가진다는 것을 알 수 있다. 위의 식에 의하면, 유도 기전력의 크기는 일반적으로 자체 유도계수(L) 값과 무관하다는 것을 알 수 있다.

3) 코일에 저장된 에너지를 고려한 정성적 해석

Fig. 4의 회로에서 스위치를 열 때에 아주 높은 고전압이 유도되는 이유를 계산에 의존하지 않고 정성적으로 접근해 볼 수 있다. 위의 회로에서 스위치를 계속 닫아두었다가 열 때에 나타나는 회로를 생각해 보자.

Fig. 5와 Fig. 6에서 스위치를 닫아두었다가 여는 순간에는 최대 전류($i = \frac{E}{r}$)가 흐르고 있는 상태이다.

따라서 코일에는 자기장에 의한 에너지($En = \frac{1}{2} Li^2$)가 저장되어 있다. 스위치를 열게 되면 Fig. 5의 회로에서는 닫을 때와 같은 저항(r)에 전류가 흐르면서 에너지 소모가 일어난다. 반면에 Fig. 6의 회로에서는 코일에 저장되었던 에너지의 대부분이 저항이 큰 Ne 전구(저항 R)에 전류가 흐르면서 에너지 소모가 일어나게 된다. 결국 큰 저항을 통하여 전류가 흐르기 위해서는 Ne 전구의 양단에 충분히 높은 전압이

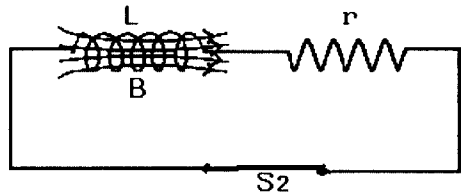


Fig. 5. When the switch S₁ turn off with closed the switch S₂

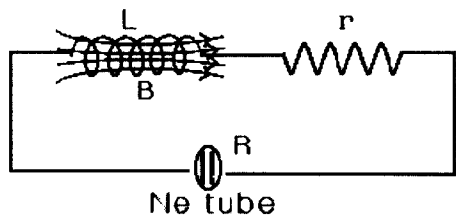


Fig. 6. When the switch turn off the circuit containing Ne tube

걸려야 하고 그 순간 Ne 전구가 켜지게 된다. Fig. 5, Fig. 6의 회로에서 에너지가 소모되는 정도는 저항의 크기에 좌우되므로, 저항이 큰 Fig. 6의 회로에서는 에너지의 급격한 소모가 일어나므로 전류도 급격히 감소하게 된다고 할 수 있다.

흔히 전자석 실험에서 겪게 되는 앞의 Fig. 1의

circuit 2와 같은 코일과 저항 그리고 전지가 직렬로 연결된 단순한 회로에서 자체 유도에 의해 나타나는 스위치에서의 방전 현상도 같은 맥락에서 설명될 수 있다.

Fig. 7에서 스위치를 닫는 순간부터 전류가 일정하게 될 때까지는 나타나는 유도 기전력과 전류의 변화는 앞의 회로에서 다루었던 것과 동일하므로 회로에는 큰 기전력이 유도되지 않는다.

하지만 스위치를 여는 순간에는 열려진 스위치가 일종의 큰 저항에 해당한다. 이때 큰 저항체인 스위치에 전류가 흘러 코일에 저장된 에너지가 소모되기 위해서는 스위치 양단에 고전압이 유도되어야만 한다. 이때 코일의 자체 유도계수(L)가 클수록 저장된 에너지는 많고, 따라서 스위치에서의 방전 시간이 더 길어지므로 고전압에 의한 방전 효과를 분명하게 관찰할 수 있다. 하지만 이때의 자체 유도계수(L)의 크기는 스위치 양단에 걸리는 전압의 크기를 결정하는 게 아니라 코일의 자기장에 의해 저장되는 에너지의 크기를 결정한다.

스위치를 열 때 회로에 걸리는 유도 기전력이 저항의 크기에 따라 달라진다는 것을 정성적으로 이해시키기 위해서는 Fig. 8과 같은 실험 상황을 통해 직접

체험하는 과정으로 제시해보는 것도 효과적인 것이다.

Fig. 1의 circuit 1에서 네온 전구 대신 손과 손을 잡은 학생들로서 회로를 구성하여 스위치를 닫을 때와 열 때 나타나는 유도 기전력을 체험하게 할 수 있다. 이때 스위치를 닫을 때는 학생들은 전류가 순간적으로 흐르는 전기 충격을 경험할 수 없지만, 스위치를 열 때는 순간적으로 전기 충격을 경험한다. 이를 통해 스위치를 닫을 때는 고전압이 유도되지 않지만 열 때는 고압의 유도 기전력이 발생한다는 것을 체험할 수 있다.

하지만 (문항 2)에서와 같이 학생들과 도선을 병렬로 연결하게 되면, 스위치를 열 때라도 학생들은 전기 충격 효과를 경험할 수 없으므로 이를 통해 고압의 유도 기전력이 발생하지 않았다는 것을 확인할 수 있다.

일반적으로 학생들은 회로의 저항이 충분히 커지면 회로에 전류가 흐를 수 없다고 생각한다. Fig. 1의 circuit 1에서 손을 잡은 학생 수를 늘리면 회로의 저항이 증가하게 된다. Fig. 8의 오른쪽 실험 상황에서 스위치를 열 때 한 학생이 연결했을 때와 같은 전기 충격을 여러 사람이 연결했을 때도 여전히

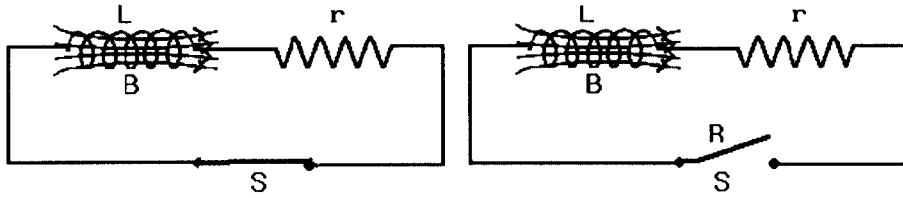


Fig. 7. After turn on the switch S, and when turn off the switch S



Fig. 8. Experience of self-induction (left - 1 student, right - 10 students)

경험하게 된다. 이를 통해 학생들에게 회로의 저항이 커지면 스위치를 여는 순간 손을 잡고 있는 학생들에게 전류가 흐를 정도로 유도 기전력도 역시 증가하게 된다는 것을 설득력 있게 설명할 수 있다. 물론 (문항 2)와 같은 방식으로 실험자와 도선을 병렬로 연결하면 스위치를 열 때 여전히 고압의 유도 기전력이 생지 않았다는 것을 체험할 수 있다.

IV. 결 론

자체 유도 현상에 대한 학생들의 직관적 사고와 개념 형성의 교과서적인 원인을 살펴보았다. 자체 유도 현상에 대한 개념 조사 결과 학생들은 다음과 같고 일반화된 개념을 지니고 있는 것으로 나타났다.

- 코일과 네온 전구가 병렬 연결된 회로에서 네온 전구는 고전압이 유도되었는가를 판단할 수 있는 일종의 측정 도구이다.

- 코일에 의해 자체 유도 현상이 일어나는 회로에서는 그 회로의 특성에 상관없이 스위치를 닫았다가 열 때 항상 높은 고전압이 유도된다.

- 코일의 자체 유도계수(L)이 클수록 유도 기전력은 커진다.

조사 결과 자체 유도 현상에 대한 과 일반화된 개념은 일반고등학교 학생뿐만 아니라 과학고등학교 학생들에게도 아주 많이 나타나고 있으며 일관된 유형을 보이고 있었다.

자체 유도 현상에 대한 개념 형성의 교과서 적인 요인을 파악하기 위하여 제 6차와 7차의 물리 II 교과서 13종을 분석한 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

- 대부분의 교과서에서는 자체 유도 현상을 설명하기 위하여 도입하는 실험 상황이 특정한 회로(코일과 병렬 연결된 네온 전구)만을 대상으로 하고 있다. 또한 모든 교과서에서 제시하고 있는 실험 상황은 스위치를 열 때 고압의 유도 기전력이 나타나는 회로만을 다루고 있다.

- 학생들의 수준을 고려하여 자체 유도 현상의 이론에 대한 어려움을 피하기 위해 네온 전구가 점등되는 가시적 현상을 이용하여 고압의 유도 기전력이 나

타나는 과정을 설명하고 있다. 스위치를 닫거나 열 때 네온 전구의 큰 저항은 고압의 유도 기전력을 만드는 요인이지만 교과서에서는 구체적인 언급은 생략되어 있다. 이 결과 학생들은 네온 전구를 고압의 유도 기전력을 만드는 요인으로 보기보다는 고압의 유도 기전력을 확인하는 일종의 측정도구로만 인식한다.

교과서에 제시된 특정 회로에 국한된 자체 유도 현상만을 학습한 학생들은 해당 실험 결과를 자체 유도 현상과 관련한 다른 회로로까지 일반화시키게 된다. 한편으로 직관에 의존한 막연한 설명은 또 다른 과 일반화를 가져온다. 즉, 고압의 유도 기전력을 발생시키는 요인으로서 네온 전구의 역할을 간과하고, 단순한 측정 도구로 인식하여 회로에 네온 전구가 있던 없던 관계없이 스위치를 열 때 고압의 유도 기전력은 항상 나타날 수 있다고 생각한다.

자체 유도 현상에 대한 과학자적 이해를 위한 정량적 해석 결과를 바탕으로 자체 유도 현상을 정리하면 다음과 같다.

- 코일에 의해 자체 유도 현상이 나타나는 회로에서 스위치를 열 때 언제나 고전압이 유도되는 것은 아니라 회로의 특성에 의존한다. 스위치를 열 때 나타나는 고압의 유도 기전력은 스위치를 여는 순간에 형성되는 회로에 포함되는 큰 저항에 의해서 나타난다. 만약 스위치를 닫을 때와 열 때 회로의 저항이 변하지 않는다면 유도되는 기전력의 크기는 같은 변화를 보이며 최대값은 전지의 기전력을 초과하지 않는다.

- 스위치를 열 때 코일의 자체 유도계수(L)에 비례하여 고전압은 증가하지 않는다. 자체 유도계수(L)의 크기는 코일에 저장되는 에너지를 증가시키고 전류의 감소를 지연시키는 효과는 있지만 고전압의 크기와는 무관하다.

끝으로, 자체 유도 현상에 의해 큰 유도 기전력이 유도되는 현상에 대한 정량적인 해석은 학생들의 수준을 고려할 때 고등학생에게는 무리일 수 있다. 따라서 자체 유도 현상에 대한 설명은 정성적인 설명에 의존해야 할 필요가 있다. 정성적인 설명은 기존의 교과서에 제시한 실험에 의한 방법 외에 코일에 저장

된 에너지 소모 관계를 고려하여 접근할 수 있다.

학생들의 직관적인 사고에 의존하여 실험을 바탕으로 자체 유도 현상을 설명하되 과 일반화되는 개념 형성을 막기 위해서는 기존의 교과서에서 제시하고 있는 특정 회로 - 코일과 병렬 연결한 네온 램프에 의해 스위치를 열 때 고전압이 유도되는 회로 - 외에 (문항 2)나 (문항 4)와 같은 회로를 함께 제공하여 자체 유도에 대한 다양한 실험적 결과를 제시할 필요가 있다.

스위치를 열 때 나타나는 고압의 유도 기전력은 직관에 의존한 막연한 설명보다 코일에 저장된 에너지 소모의 관점에서 학생들의 수준에 맞춰 정성적으로 설명할 수 있다. 스위치를 열 때 코일에 저장된 에너지는 저항에서 소모되어야 한다. 네온 램프나 열린 스위치는 아주 큰 저항에 해당하므로 전류가 흘러 에너지가 소모되기 위해서는 걸리는 전압도 순간적으로 매우 커야 한다. 반대로 소모되는 전기에너지는 저항의 크기에 비례하므로, 저항이 클수록 코일에 저장되었던 에너지는 순간적으로 소모되게 된다. 따라서 전류도 급격히 0으로 변하게 되므로 이 순간 큰 유도 기전력이 발생하게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 실험적 과정과 현상을 학생들이 직접 체험을 통해 확인할 수 있는 방법을 제안할 수 있었다.

자체 유도 현상의 내용적 특성을 고려할 때 그 원인은 자발적으로 형성된 선개념에 의해서보다는 교과서와 교사를 통한 형식적 교육에서 찾아야 할 필요가 있다. 지금까지는 주로 교과서에 의해 형성될 수 있는 요인을 주로 살펴보았지만, 학생들의 과 일반화된 사고 형성의 원인을 좀더 자세히 분석하기 위해서는 앞으로 자체 유도 현상에 대한 교사의 개념을 분석하는 연구가 필요하다.

국문 요약

자체 유도 현상은 고등학교의 모든 물리Ⅱ 교과서에서 다루지고 있는 중요한 개념이다.

자체 유도 현상에 대한 설문 조사 결과, 코일로 구성된 회로에서 스위치를 열기만 하면 고압의 유도 기전력이 발생한다는 과 일반화된 사고는 일반고등학교

학생뿐만 아니라 과학고등학교 학생들에서도 심각한 정도로 많이 나타난다. 자체 유도 현상에 대한 학생들의 일반화된 사고의 원인을 현행 물리Ⅱ 교과서 분석을 통해 찾아볼 수 있었다. 그 결과, 특정 회로에서의 네온 전구의 점등 현상을 바탕으로 학생들의 직관적 사고에 의존한 막연한 설명이 주된 원인으로 나타났다. 자체 유도 현상에 대한 과학자적 이해를 돕기 위하여 정량적 해석을 시도하였으며, 이를 바탕으로 학생들에게 자체 유도 현상을 효과적으로 이해시킬 수 있는 정성적인 접근 방법을 찾아보았다.

참고 문헌

- 고재걸 등(1995). 물리Ⅱ. 청문각: 서울.
 권숙일 등(1995). 물리Ⅱ. 동아출판사: 서울.
 권재술 등(2002). 물리Ⅱ. 교학사: 서울.
 권재술, 김범기 편저(1993). 과학 오개념 편람. 한국 교원대학교 물리교육연구실.
 김대식 등(1995). 물리Ⅱ. 대한교과서: 서울.
 김범기 등(1995). 물리Ⅱ. 한샘출판사: 서울.
 대학물리학교재편찬위원회 역(1998). 범한서적주식회사. [원저: Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J.(1993). Fundamentals of Physics(4th ed.), John Wiley & Sons, Inc.]
 박봉상 등(2002). 물리Ⅱ. 대한교과서: 서울.
 박승재, 조희형(1999). 교수-학습 이론과 과학교육, 교육과학사.
 방형찬 등(2002). 물리Ⅱ. 천재교육: 서울.
 엄정인 등(1995). 물리Ⅱ. 박영사: 서울.
 이춘우 등(2002). 물리Ⅱ. 중앙교육진흥연구소: 서울.
 장준성 등(2002). 물리Ⅱ. 지학사: 서울.
 차동우 등(1995). 물리Ⅱ. 천재교육: 서울.
 차동우 역(1998). 전자기학, 도서출판 대웅. [원저: Reitz, J. R., Milford, F. J., Christy, R. W.(1993), Foundation of Electromagnetic Theory(4th ed.). Addison-Wesley Publishing Company.]
 채광표 등(2002). 물리Ⅱ. 금성출판사: 서울.
 한천옥 등(1995). 물리Ⅱ. 예지각: 서울.

Chinn, C. & Brewer, W. F.(1993). The role of anomalous data in knowledge acquisition : a theoretical framework and implications for science instruction. *Review of Educational Research*, 63(1), 1-49.

Genter, D. et al(1997). Analogical reasoning and conceptual change: a case study of Johannes Kepler. *Journal of the learning Science*, 6(1), 3-40.

Lawson, A. E. & Thompson, L. D.(1988). Formal

reasoning ability and misconceptions concerning genetics and natural selection. *Journal of Research in Science Teaching*, 25(9), 733-746.

Mclosky, M.(1983). Intuitive physics. *Scientific American*, 248(4), 122-130.

Purcell, Edward M.(1985), Electricity and magnetism, Berkeley physics course, Volume 2, McGraw-Hill, Inc.

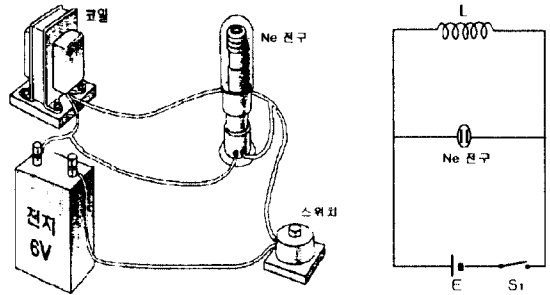
부 록 1

Students' responses of the survey on self-induction

(문항 1) 그림과 같이 코일과 네온 전구가 병렬로 연결된 회로에 건전지가 연결되어 있다. 스위치를 닫거나 열 때 네온 전구는 어떻게 되겠는가?

가. 스위치 닫을 때	과학고	일반고
① 켜지지 않는다*	85(95%)	112(91%)
② 켜졌다가 꺼진다	4(5%)	11(9%)
③ 계속 켜져 있다		
나. 스위치 닫았다가 열 때	과학고	일반고
① 켜지지 않는다		6(5%)
② 켜졌다가 꺼진다*	89(100%)	117(95%)
③ 계속 켜져 있다		

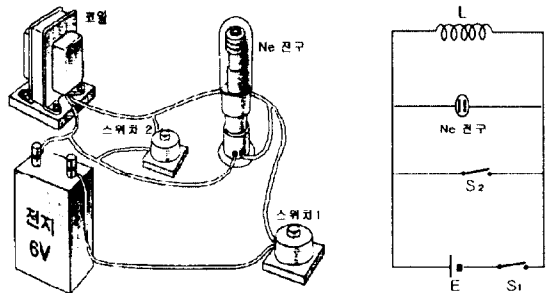
* 과학자적 응답



(문항 2) 위의 회로에서 네온 전구와 병렬로 스위치가 있는 도선을 그림과 같이 연결하였다. 다음 각 상황에서 Ne 전구는 어떻게 되겠는가?

가. 스위치 S1을 닫고, 스위치 S2를 닫을 때	과학고	일반고
① 켜지지 않는다*	85(95%)	112(91%)
② 켜졌다가 꺼진다	4(5%)	11(9%)
③ 계속 켜져 있다		
나. 스위치 S2는 닫은 채 S1 열 때	과학고	일반고
① 켜지지 않는다*	26(29%)	7(8%)
② 켜졌다가 꺼진다	63(71%)	116(92%)
③ 계속 켜져 있다		

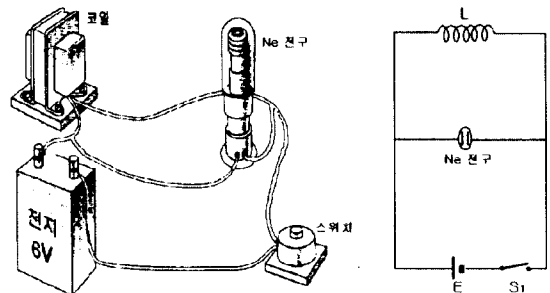
* 과학자적 응답



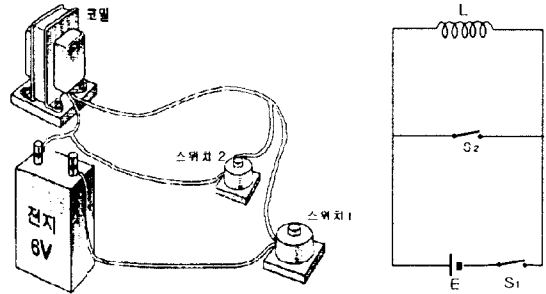
(문항 3) 다음 회로에서 스위치를 닫았다가 열 때 코일에 유도되는 자계 유도 기전력의 크기는 어떻게 되겠는가?

	과학고	일반고
① 고전압 유도되지 않는다		10(8%)
② 고전압 유도된다*	89(100%)	113(92%)

* 과학자적 응답



(문항 4) 회로에 네온 램프 대신 스위치를 연결하였다. 스위치 S_1 을 닫고 S_2 를 닫은 다음, S_2 를 닫은 채로 S_1 을 열 때 코일에 유도되는 자체 유도 기전력의 크기는 어떻게 되겠는가?



	과학고	일반고
① 고전압 유도되지 않는다*	20(22%)	12(10%)
② 고전압 유도된다	69(78%)	111(90%)
* 과학자적 응답		

(문항 5) 코일의 자체 유도계수(L)와 관련된 설명으로 바른 것을 고르면?

	과학고	일반고
① L 이 커지면 스위치를 열 때 자체 유도 기전력이 커진다		
② L 이 커지면 코일에 저장된 에너지가 커진다*	47(53%)	92(75%)
③ L 은 자체 유도 기전력이나 코일에 저장된 에너지와 무관하다	40(45%)	21(17%)
* 과학자적 응답	2(2%)	10(8%)