

전하의 이동을 고려한 꼬마전구 불켜기에 대한 이해

김중복*, 이정숙

한국교원대학교 물리교육과, 충청북도 363-791

Understanding of Charge Movement for Constant Current in a Simple Circuit

Jung Bog Kim* and Jungsook Lee

Department of Physics Education, Korea National University of Education, Chungbuk 363-791, Korea

요약

건전지, 전구 및 전선으로 이루어진 가장 간단한 회로에 대하여 어떻게 모든 곳에 전류가 일정하게 흐르는지를 전하들 사이의 상호작용과 이로 인한 이동 관점에서 해설하고자 한다. 전기장과 전위차 및 전기력선 등의 개념을 전기회로를 이해하는 관점에서 적용하도록 하였으며, 저항과 도선이 만나는 접합면과 도선 표면에도 전하들이 분포하여야 모든 개념들 사이에 일관성이 있는 것을 확인함으로써 단순한 회로에서 전류의 흐름을 이해할 수 있도록 노력하였다. 또한, 이러한 개념을 잘 반영할 수 있는 물 흐름 모형을 새롭게 제안하였다.

주제어 : 전류, 전하, 정전기, 전류 모형, 개념변화

초등학교 학생들이 건전지, 꼬마전구 및 전선으로 꼬마전구에 불이 켜지도록 하는 것을 처음 볼 때는 정말로 신기해한다. 그러나 시간이 지나갈수록 신기함은 사라지고 이내 어려운 소재로 둔갑하게 된다. 그 이유는 꼬마전구에서 빛이 나는 것 외에는 아무것도 보이지 않는데 과학적 개념을 가지고 그 현상을 물리적으로 설명하라고 요구하고 있기 때문이다. 사실 이와 같이 단순한 전기회로에 물리적으로 생각해보아야 할 거의 모든 사항들이 숨어있기 때문에 교육과정의 진행 될수록 어렵게 느껴지는 것은 어찌 보면 당연하다고 볼 수 있다.

전류가 흐르는 것은 대부분의 경우에 전자의 이동에 의하여 흐르는 경우를 다루는데 문제는 전자의 이동을 눈으로 볼 수 없다는데 있다. 따라서 여러 가지 방법으로 비유를 사용하여 전류 개념을 소개하고 있지만 학생들은 많은 오개념을 가지고 있음을 알 수 있다 (권재술과 안수영, 1989; 김영민 등, 1990; 문충식과 권재술, 1991; Cohen et al., 1983; Cosgrove, 1995; Heller and Finley, 1992; Miller and King, 1993). 대표적으로

(1) 건전지에서 흘러나오는 전류의 흐름은 일정하다. (2) 전압의 개념보다는 전류의 개념이 우선적이다. (3) 전지에서 흘러나오는 전류가 회로에서 소비된다. (3) 두 개의 전구가 직렬로 연결되었을 때 전류를 나누어 가진다. (4) 전류가 전지의 양쪽 끝에서 흘러나와 전구에서 부딪히기 때문에 전구에 불이 들어온다. 초등학교생들의 경우에 교과서에서 취급되지 않지만 전류 흐름에 기본적이라고 생각하는 문제들에 대하여 과학적으로 거의 인식하지 못하고 있다(이정숙 등, 2009). 이러한 오개념과 어려움을 해소하기 위한 노력들이 조금은 있었지만 학생들은 여전히 많은 학교 경험에도 불구하고 변화되지 않는다고 한다. 학생들을 위해서는 비유가 적절할지 모르지만 대학의 일반물리 수준의 교육을 받은 사람들에게는 전자기에서 배운 내용들을 바탕으로 보다 근원적으로 이 문제를 살펴보게 함으로써 간단하지만 산만하게 흩어져 있을지도 모르는 개념들 사이에 일관성을 가지도록 도울 수 있는 자료가 필요하다고 판단하여 본 해설 논문을 쓰게 되었다.

본 해설 논문에서는 전하들이 이동하는 이유에서부터 도선의 구조 및 꼬마전구에서 전류가 흐를 때 어떠한 일이 일어나

*교신저자: jbkim@knu.ac.kr

•2009년 6월 19일 접수, 2009년 7월 31일 수정, 2009년 8월 5일 통과.

는지 그리고 회로가 구성되었을 때 전하들이 어떻게 힘을 받아서 이동하여 결국에는 회로의 모든 곳에서 전류가 일정하게 흐르는지에 대하여 해설하고자 한다. 본 해설 논문의 차례는 전하가 움직이는 이유에서 전기장과 전위를 소개하고, 도선 안에서 전자가 움직이려면 어떻게 되어야 하는지에 대하여 설명하고, 꼬마전구에서 어떠한 일이 일어나는지에 대하여 설명하고, 간단한 회로에서 어떻게 모든 곳에서 전류가 일정한지에 대하여 미시적 관점 즉 전하들의 분포와 이동을 고려하여 설명하고자 한다.

전하들이 이동하는 이유 - 전기장, 전기력선, 전위

역학시간에 배우는 가장 중요한 개념 중의 하나가 물체가 이동하는 것에 관한 것이다. 외부에서 힘이 작용하지 않으면 처음의 운동 상태를 유지하게 된다. 즉 처음에 정지해 있던 물체는 그대로 정지해 있고 움직이던 물체는 직진운동 한다. 그렇다면 전하들은 왜 움직이는 것일까? 전하 역시 힘을 받아야 한다. 이것을 이는 것이 전류를 이해하는데 있어 너무나 중요하다. 그 이유는 전하들의 이동이 곧 전류이기 때문이다. 전하라는 것은 무엇인가? 일반적으로 전하란 알짜 전하량을 가진 입자를 말한다. 교과서에서 전하는 전기를 띤 입자라고 정의되어 있는데 굳이 알짜 전하량을 가진 입자라고 한 이유는 전기를 띤다는 의미가 무엇을 말하는지 분명하지 않고 전류의 정의에서 필수적인 전하량을 도입하기 위해서는 분명하게 전하에 대한 소개가 필요하기 때문이다. 전하는 알짜 전하량을 가지고 있으며 질량과 크기를 가진 입자이다.

정지해 있던 전하들이 움직이려면 외부에서 힘이 작용하여야 한다. 힘이 작용하면 우리가 잘 알고 있는 식 $a = F/m$ 에 의해서 전하가 가속운동을 하게 된다. 전하들 사이에 작용하는 힘에 대한 쿨롱의 법칙은 두 전하량의 곱에 비례하며 전하 사이의 거리의 제곱에 반비례 한다는 것을 잘 알고 있다. 전하는 다른 전하에 의해서 힘을 받게 되는 것이다. 뉴턴의 제3법칙적인 작용-반작용 법칙이 여기서도 그대로 적용된다. 즉, 같은 부호의 두 전하 사이에는 그림 1과 같이 크기가 같고 방향이 반대인



그림 1. 두 전하 사이에 작용하는 힘

힘이 작용한다.

전하 q_1 과 전하 q_2 는 힘을 받아 서로 반대 방향으로 가속운동하게 된다. 이와 같이 정지해 있던 전하가 움직이기 위해서는 또 다른 전하에 의한 전기력을 받아야 하는 것이 가장 기본이 되는 개념으로 전기 회로에서도 이 개념을 이용하여 설명할 수 있어야 과학적인 이해를 했다고 할 수 있다.

여기서 흥미 있는 질문 하나를 생각해보자. 그림 1에서 $t=0$ 인 시간에 전하 q_2 가 정지해 있다. 그런데 전하 q_1 은 $t=0$ 일 때까지 그 자리에 없다가 갑자기 나타났다고 하자. 그렇다면 언제 전하 q_2 가 힘을 받게 되겠는가? 두 전하 사이의 거리가 l 이라면 $t=l/c$ (여기서 c 는 진공 중에서 빛의 속도임) 만큼 시간 후에 전하 q_2 에 힘이 작용할 것이다. 그 이유는 지금부터 말하게 될 전기장이 전파하는데 시간이 걸리기 때문이다. 사실 기초 물리학 수준에서는 이와 같은 상황은 생각하지 않는다. 그러나 고등학교 수준에서도 스위치를 켜면 바로 전구에 전류가 흐른다는 설명을 하고 있는데, 전기장이 회로에 형성되는데 걸리는 시간이 매우 짧기 때문에 전구에 바로 전류가 흐르게 되는 것이다. 우리는 전자를 배울 때 자주 전기장이라는 개념을 사용한다. 이 문제에서처럼 q_1 이 공간상에 나타나면 주위 공간에 빛의 속도로 전기장이 퍼져나가면서 분포하기 때문이다. 전기장의 정의는 다음 식에 의해 주어진다.

$$E = \frac{F}{q} \tag{1}$$

이 (1)식의 의미는 전기장의 크기는 단위 전하가 받는 힘이라는 것이다. 전기 회로에서 전류가 흐르는 것과 연관 짓기 위하여 전기장의 근원이 무엇인가를 마음에 두자. 전기장을 만드는 것은 전하이다. 따라서 도선 안에서 전하들이 힘을 받아 움직이고 있다는 말은 곧 도선 안에 전기장이 형성되었다는 것을 의미하고 어디엔가 전기장을 만드는 전하들이 있기 때문에 우리는 그 전하들이 어디에 있는지 찾을 수 있어야 한다.

한편 전기력선에 대한 개념도 함께 배우는데 이 역시 전기회로와 연관 지어 설명할 수 있어야 한다. 전기력선은 양전하에서 시작하여 음전하에서 끝나도록 그리는데 전기장이 큰 곳에서는 전기력선 밀도가 높게 그린다. 전기 회로에서 전기력선을 그리는 이유는 전기장에 비례하는 전기력선을 그리다 보면 전하들이 어디 있어야 하는지를 알 수 있기 때문이다.

다음으로 전기 회로에서 많이 사용되는 개념 중의 하나는 전위차 혹은 전압이다. 전위에 대한 정확한 정의는 다음 식과 같

이 전기장을 무한대 지점에서 전위를 구하려고 하는 지점까지 선적분한 값에 음의 부호를 곱한 값이다.

$$V = - \int_{\infty}^r \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (2)$$

이 식(2)에 대하여 배우면서 많은 학생들이 미궁에 빠져드는 것이 실상이다. 그런데 간단한 전기 회로를 해석하는 수준에서는 식(2)를 쉽게 적용할 수 있다. 전기장이 일정한 경우에는 전위차를 구하고 싶어 하는 두 지점 사이의 거리에 전기장 값을 곱함으로써 전위차를 구할 수 있다. 사실 직류회로에서 도선과 저항에서는 각각 전기장 값이 일정하다. 이에 대해서는 뒤에 자세하게 설명하겠다. 만약에 중간에 전기장 값이 바뀌면 전기장 값이 일정한 곳까지 나누어서 전위차를 구한 후에 이들을 더하면 된다. 전위차 곧 전압을 소개하는 이유도 그것의 원인이 되는 것이 무엇인지 설명하고자 함이었다. 전위차가 전기장과 연관이 된다는 사실을 식(2)로부터 알 수 있기 때문에 전위차 역시 전하가 근원인 것을 알 수 있다. 전위차, 전기장 및 전기력선의 근원은 전하이다. 따라서 우리는 전하가 어디에 어떻게 분포하여 도선 안에 있는 전자들에게 힘을 작용하는지 알아야 할 것이다.

전기회로 요소 - 건전지, 도선, 전구

간단한 회로에 들어가는 요소들로는 건전지, 전선 및 전구이다. 여기서는 이들에 대하여 살펴보기로 하자.

건전지

그림 2는 건전지의 양쪽 극에 전하 분포를 그린 것이다. 우

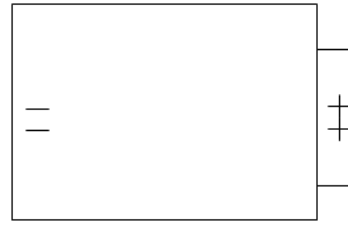


그림 2. 건전지의 전하 분포

리가 앞서 살펴 본 것처럼 전위차는 전하들에 의해 나타난다. 가령 1.5V 건전지의 경우에 건전지의 양(+극)과 음(-극)에 1.5V의 전위차가 나도록 전하들이 분포하게 된다. 그렇다면 전하량이 얼마나 될까? 그 양은 매우 적다. 전하량을 예측하여 보기 위하여 다음과 같은 상상을 하여보자. 그림 3과 같이 용량이 C인 축전기가 전위차가 V인 건전지에 연결되어 있다면, 축전기는 충전된다. 스위치가 닫히기 전에는 축전기에 충전된 전하량이 없어 두 판 사이에는 전위차가 없다. 그런데 스위치를 닫으면 축전기는 그림 3(b)와 같이 충전된다. 충전이 완료된 상태에서 축전기 두 판 사이의 전위차는 건전지의 전위차와 같게 된다. 그렇다면 한 가지 질문이 생길 것이다. 축전기 오른쪽 판과 건전지 양(+극) 사이에 연결된 전선 사이의 전위차는 얼마일까? 답은 0이다. 그렇다면 어떻게 0이 되는지 생각하여 보자. 우선 전기장에 대하여 생각해보자. 도선 안에 있는 전자가 한 쪽으로 움직인다면 아직 충전되는 과정이라는 것을 쉽게 생각할 수 있다. 따라서 충전이 마쳐졌다면 도선 안의 전자는 움직이지 않아야 한다. 즉, 전자에 작용하는 알짜 힘은 0이 되어야 한다. 어떻게 이러한 일이 가능할까? 축전기 오른쪽 판에 쌓인 양의 전하들은 도선안의 전자들을 끌어당길 것이다. 그런데 왜 오지 못하는 것일까? 그것은 왼쪽 판에 있는 음 전하들이 밀기 때문이다. 또한 어느 정도는 건전지 양(+극)에 있는 양의 전하들이 전자들을 건전지 쪽으로 끌어당기기 때문이다. 결과적으

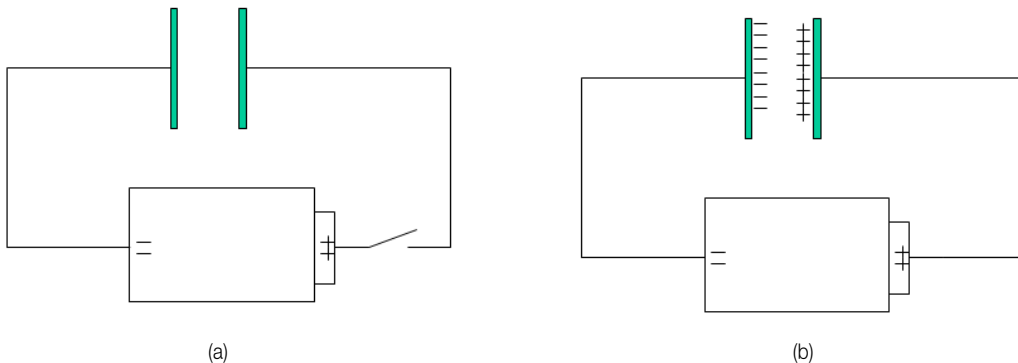


그림 3. 축전기에서의 전하분포 (a) 스위치 닫기 전 (b) 스위치를 닫은 후.

로 도선 안의 전자들은 알짜 힘이 0이 될 것이다. 사실은 도선 안의 전자들이 받는 힘이 0이 될 때까지 충전되는 것이다. 이제 전기력선 입장에서 살펴보자. 도선 안에는 전기력선을 하나도 그리지 말아야 한다. 그 이유는 도선 안의 전기장이 0이기 때문이다. 그렇다면 어떻게 전기력선을 그릴 수 있는가? 축전기 양 쪽 극판에 쌓인 무수히 많은 양전하들과 음전하들 사이를 연결하는 전기력선을 그리면 된다.

전기 용량이 C이고 전압이 V일 때 축전기에 충전된 전하의 양 Q는 다음 식에 의해 주어진다.

$$Q = CV \quad (3)$$

전기 용량 C가 크면 그만큼 많은 전하량이 충전될 것이다. 두 개의 마주보는 금속판으로 이루어진 축전기의 전기 용량 C는 면적에 비례하고 판사이의 거리에 반비례한다. 따라서 축전기의 면적을 조금씩 줄이면 전기용량이 줄어들어 충전되는 전하량이 줄어들게 된다. 면적을 아주 작게 하면 전선의 단면적에 해당하는 만큼 면적을 줄일 수 있고 전기 용량은 매우 작아지게 되며 충전되는 전하량은 매우 적을 것이다. 더군다나 끊어진 두 전선을 잘라 가면 전선 사이의 거리가 더 멀어져 용량은 더욱 줄어들게 된다. 전선을 아예 없애버리면 남은 것은 건전지 밖에 없다. 이 경우에 건전지 양쪽 전극 면을 축전기라고 생각하면 용량 C는 거의 0일 것이다. 따라서 1.5V의 전위차에 해당하는 전하량은 극히 적다. 그래도 전하가 양쪽 전극에 있다고 생각하는 것이 바람직하다. 건전지를 공기 중에 오래 놓아두면 건전지가 쓸모없게 된다. 그 이유는 전극에 쌓여 있던 전하들이 공기 중으로 지속적으로 적은 양이지만 빠져 나가고 결국에는 건전지 내부의 화학반응이 멈추기 때문이라고 생각할 수 있다.

전선

전선은 도체로 만들어 진다. 도체라 함은 자유 전자가 무수히 많고 전기장이 걸리면 쉽게 내부를 통하여 이동할 수 있는 물질이다. 간단한 회로에서 사용되는 전선은 일반적으로 구리로 만들어져 있다. 구리는 저항이 매우 작고 지구에 풍부하기 때문에 전선의 재료로 널리 사용된다. 아주 고급의 전자 제품에는 금을 이용하여 전선을 만들기도 한다. 전류가 흐르지 않는 상황에서 도선 내부의 전기장은 0이다. 그 이유는 도선 안에 양이온과 음이온이 같은 양만큼 있어 알짜 전하가 없기 때문에

전기장을 만들 근원이 없다. 만약에 도선을 대전시킨다면 어떻게 될까? 이 경우에도 도체 내부는 전기장이 0이 된다. 그 이유는 대전된 전하들이 모두 도선 밖 즉 표면에만 분포하게 되기 때문이다. 혹시 도선 안쪽에 알짜 전하가 있게 되면 이것에 의한 전기장이 주위의 전하들에게 영향을 주어 결국은 알짜 전하가 표면으로 밀려나가는 모습으로 전하가 재분포한다. 이것은 전하들이 평형상태에 있는 정전기 상황에서 아주 중요한 결과이다. 따라서 정전기 상황에서 도선 내부는 전기장이 0이다. 그러나, 전류가 흐르는 상황은 도선 내부에 전기장이 있어 전하들이 한쪽 방향으로 이동하는 경우이다. 우리가 학생들에게 도선 안에서 전자의 이동을 설명할 때 전자가 건전지에서 밀리면 밀린 전자가 옆의 전자에게 힘을 주어 옆의 전자가 밀리며 또 다시 옆의 전자를 밀어 도선안의 전자들이 연쇄적으로 밀려 전류가 흐른다는 모형을 자주 사용한다. 그러나 이러한 설명은 적절하지 않은데 그 이유는 도선 안에 움직이는 전자들이 이웃한 전자들을 밀지 않기 때문이다. 평균적으로 자유 전자들 사이에 반발력은 도선 안에 있는 양이온들의 인력에 의해서 상쇄되기 때문이다. 따라서 움직이는 전자들 사이에는 어떠한 힘도 서로 작용하지 않는다고 생각하는 것이 옳바르다. 그러나 때로 이러한 방법으로 도선 내에서 전자의 흐름을 이해하거나 설명하는 것이 유용할 때도 있다.

도선 내부에 전자들에게 힘을 주는 전기장의 근원은 도선 표면에 있는 전하들에 의한 것이다. 이들 전하들이 어디에 어떻게 존재하는지를 잘 알게 되는 것 또한 매우 중요하다. 도선 안에 전기장을 형성하기 위한 전하의 재분포 역시 정전기 상황에서 전하들이 재분포하여 도체 내부의 전기장을 0으로 만드는 과정과 유사하다. 그림 4와 같이 음으로 대전된 부도체를 금속구 근처에 가까이 가져가면 금속구 안의 전자들이 힘을 받아 오른쪽으로 밀려간다. 처음에는 많은 전자들이 밀려가지만 이내 한쪽으로 쏠린 전자들이 서로 반발하고 더 오른쪽으로 오려고 하는 전자들에게 힘을 가하여 다시 왼쪽방향으로 가도록 하

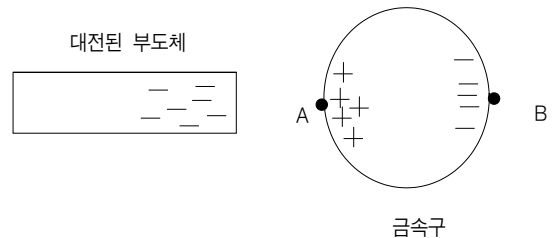


그림 4. 정전기 유도에서 전하들의 재분포

는 과정이 거의 순식간에 일어난다. 결과적으로 도체 내부에는 전자들이 더 이상 이동이 없게 된다. 그런데 여기서 흥미 있는 질문을 할 수 있다. 즉, 점 A와 B 사이에 전압을 측정하면 대부분의 학생이나 교사들이 전위차가 있다고 말한다. 그 이유는 오른쪽에 양전하가 왼쪽에 음전하가 있기 때문에 두 지점사이에는 전위차가 있다고 생각하는 것이다. 이것은 대전된 부도체가 가지고 있는 음전하들의 영향을 생각하고 있지 않기 때문이다. 즉, 도체 내부의 한 지점에 있는 전자에 작용하는 힘을 보면 A쪽의 양전하들이 왼쪽으로 끌어당기는 인력과 B 쪽에 있는 음전하들이 왼쪽으로 미는 척력의 합이 대전된 부도체의 음전하들에 의해 오른쪽으로 미는 척력과 같아질 때까지 전하들이 재분포하기 때문에 도체 내부의 전기장은 0이 된다. 다시 말하면 두 지점 사이에 전위차는 0이다. 이는 정전기 상황에서 도체는 등전위가 된다는 사실과 잘 일치한다. 도선에 전류가 흐르는 상황에서 도선 안에 전기장을 형성하기 위하여 전하들이 재분포하는 과정도 이와 유사하다.

전구

전구의 필라멘트는 도체로 만들어져 있다. 대부분의 경우에 텅스텐으로 되어 있는데 그 이유는 고온에서 녹지 않고 빛을 낼 수 있기 때문이다. 텅스텐 필라멘트를 공기 중에 노출시킨 상태에서 전류를 흐르게 하면 산화가 되기 쉬워 타버리게 된다. 따라서 전구 안쪽은 아르곤과 같은 불활성 기체를 넣어 산화되지 않도록 하여야 한다. 구리와 같이 도선으로 사용하는 도체에서는 전자들이 이동하기가 쉬운데 반하여 얇은 텅스텐 필라멘트는 전자들의 이동을 강력하게 저지한다. 전자들이 힘을 받게 되면 가속 운동을 하게 되어 운동 에너지가 증가된다. 전자들의 운동 에너지는 양이온들과 충돌을 하게 되면서 양이온들의 열에너지로 전환되어 따라서 필라멘트의 온도가 올라가게 된다. 절대 온도가 0이 아닌 한 모든 물체는 전자기파를 방출하고 흡수한다. 온도가 올라갈수록 방출되는 빛의 파장이 짧아지는데 가시광 영역의 파장을 갖는 빛들이 발생되기 위해서는 약 2,500℃ 정도까지 올라가야 한다.

둘 다 도체인 구리와 텅스텐은 무엇이 다르기에 하나는 도선으로 하나는 필라멘트로 사용하는가라는 질문이 생긴다. 우리는 다음과 같은 식을 알고 있다.

$$R = \rho \frac{L}{A} \tag{4}$$

식(4)의 의미는 비저항이 ρ 인 물질로 이루어진 도선의 저항 값은 길이 L 에 비례하고 단면적에 반비례한다. 같은 단면적과 같은 길이인 구리선과 텅스텐 선의 저항 값은 텅스텐의 경우가 훨씬 크다. 텅스텐은 양이온 한 개 한 개의 크기가 클 뿐만 아니라 더 조밀하게 붙어있기 때문이다. 따라서 전자가 텅스텐을 통과하여 가기가 쉽지 않게 되는데 이와 같이 전자가 어렵게 통과 할수록 비저항 값 ρ 가 크다. 도체의 온도가 올라가면 비저항이 커지는 이유는 양이온들이 진동을 하기 때문에 전자들과 충돌 가능성이 그 만큼 커지기 때문이다.

간단한 회로에서 전하들의 분포와 전류

그림 5와 같은 꼬마전구와 건전지로 이루어진 간단한 회로에 대하여 생각하여보자. 우리가 잘 알고 있는 것처럼 전선과 꼬마전구 및 전구에 흐르는 전류는 모든 곳에서 동일하다. 건전지의 전압이 1.5V일 때 점 a와 d 사이의 전압은 1.5V이다. a와 b 사이 혹은 c와 d 사이의 전압은 거의 0이다. 그리고 꼬마전구 양단의 전압은 거의 1.5V이다. 이러한 사실은 쉽게 전압계를 이용하여 측정할 수 있다. 그렇다면 도선 내부에서의 전기장은 식(2)에 의해 거의 0일 것이며 꼬마전구 필라멘트 내부에서는 전기장이 큰 값을 가질 것이라는 것을 쉽게 짐작할 수 있다. 우리는 여기에서 심각한 질문을 접하게 된다. 전선 내부에서의 전기력선과 필라멘트 내부에서의 전기력선은 어떻게 되겠는가? 건전지의 양극에서 음극까지 전기력선을 그리면 된다고 생각하는 사람이 있을지 모르겠다. 필라멘트가 가늘기 때문에 전기력선의 밀도가 필라멘트 안에서 높아져 전기장이 커지는 것을 설명할 수 있다고 생각할 수 있을 것이다. 그러나 이러

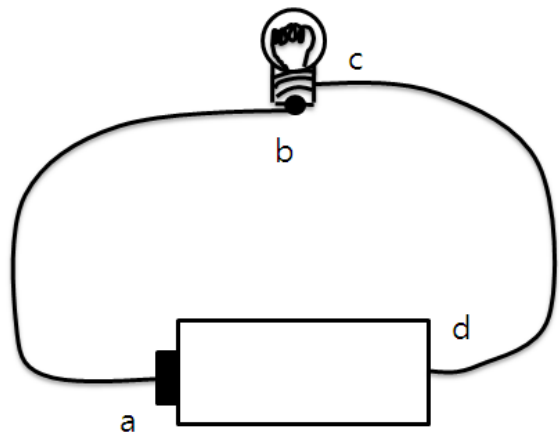


그림 5. 간단한 회로.

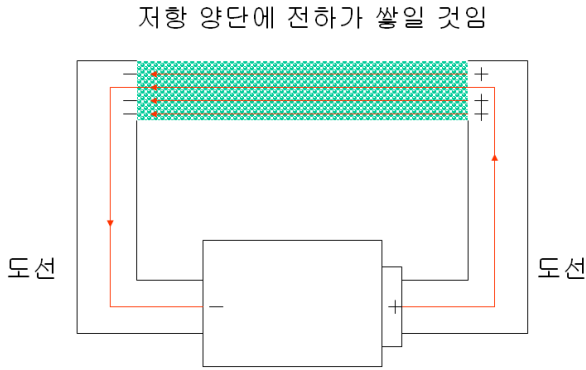


그림 6. 저항 양단에 전하가 쌓임.

한 접근은 다음과 같은 상황을 만나면 쉽게 틀리는 것을 볼 수 있다.

도선과 굵기가 같은 저항을 사용하게 되면 어떻게 될까? 즉 도선과 굵기는 같은데 비저항이 매우 큰 것으로 회로를 구성하여 전압을 측정하면 그림 6과 거의 동일한 결과를 얻게 될 것이다. 따라서 그림 6과 같은 상황을 생각하여야 한다. 저항의 굵기와 도선의 굵기가 같은 경우이다. 즉, 저항 양단 즉 도선과 만나는 면에 전하들이 쌓여야 한다. 이와 같은 상황에서는 전기력선을 그림과 같이 그릴 수 있다. 전기력선은 양전하에서 나와 음전하에서 끝난다. 그림 6은 저항 내부에서 전기장이 크고 도선 내부에서는 전기장이 작은 것을 잘 표현하고 있다. 그러나 이 그림에도 문제가 있다. 그것은 전기장의 방향이 도선 내부에서 그림과 같이 꺾이려면 현재의 전하 분포로는 맞지 않는 것을 쉽게 알 수 있다.

그림 7-9는 R. W. Chabay(Chabay, 1995)에 의해 제안된 전하 분포의 모습이다. 그림 7은 평행판 축전기를 연결했을 때와 거의 같은 상황이다. 도선만 연결된 열린회로로써 축전기 판의 면적이 도선의 단면적과 같은 상황이다. 전류가 흐르지 않는 상황이기 때문에 도선내의 전기장이 0이 될 때까지 전하들이 재분포하게 된다. 따라서 도선의 단면을 포함하여 도선 중간

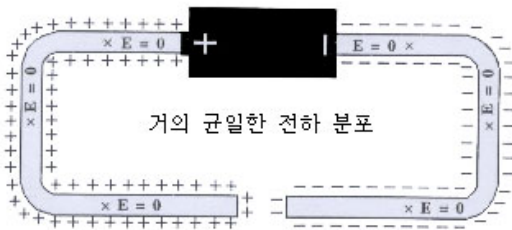


그림 7. 열린회로에서 도선 내의 전기장이 0이 되기 위한 전하분포 ; 표면 전하 밀도가 거의 균일함.

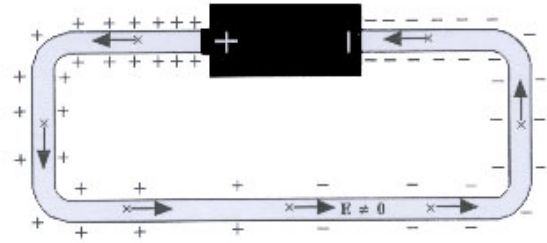


그림 8. 닫힌회로에서 도선을 따라 도선 내에 전기장을 형성하기 위한 표면 전하 분포 ; 표면에서 전하량의 변화율이 도선 내부에 전기장을 생성함.

표면에도 전하들이 있어야 한다. 표면의 모든 전하들이 기여하는 것을 고려하면 도선 안에 x 표시한 부분들에서 전기장이 0이 되는 것을 상상해 볼 수 있다.

그림 8은 그림 7에서 떨어진 두 도선을 연결한 상태 즉 전체적으로는 합선된 상태이다. 이때에 회로에는 많은 전류가 흐르게 된다. 따라서 도선을 따라 도선 내부에 전기장이 형성되어야 할 것이며 전기장의 크기는 모든 곳에서 일정할 것이다. 이와 같은 조건을 만족하기 위해서는 도선 표면에 전하들이 그림 8과 같이 분포하여야 한다. x 표시한 부분마다 전기장이 도선 방향으로 형성되도록 표면의 전하 분포가 균일하지 않다. 즉, 건전지 극에 가까울수록 표면전하들이 많으며 도선의 중간 부분에는 표면 전하들이 듥성듬성 있다. 도선을 따라 표면 전하의 밀도 변화는 도선 안에 도선 방향으로 전기장을 형성하도록 한다. 따라서 도선 내부의 전자들이 도선을 따라 이동하게 되는 것이다. 실제로 도선 표면의 전하 분포를 실험적으로 확인할 수도 있다. 이 실험을 하기 위해서는 고전압의 전원 장치를 이용하여야 한다. 도선 표면에 전하 센서를 가까이 하게 되면 전원 장치의 양극 쪽에 연결된 도선 표면에서는 양전하들이 음극 쪽에 연결된 도선 표면에서는 음전하들이 분포하는 것을 확인할 수 있다. 낮은 전압의 건전지로 해도 원리적으로 같겠지만 도선 표면에 전하량이 매우 작아 잘 측정이 되지 않는다.

이제 저항이 연결된 그림 5와 같은 간단한 회로를 생각하자. 도선에서는 거의 전위차가 없을 것이고 저항 양단에서 전위차가 매우 커야 한다. 따라서 도선을 따라서는 거의 균일한 표면 전하가 도선 표면에 분포할 것이다. 저항과 도선이 만나는 접면에 많은 전하들이 분포하여야 한다는 것을 알 수 있다. 이것은 그림 6에서 이미 근사적으로 살펴본 것과 동일하다. 이러한 상황을 고려하여 도선 주변과 접합면에서 전하들의 분포를 그림으로 나타낸 것이 그림 9이다. 이러한 전하 분포는 전압과 전기장 및 전기력선 사이에 모순이 없도록 한다. 일반적으로

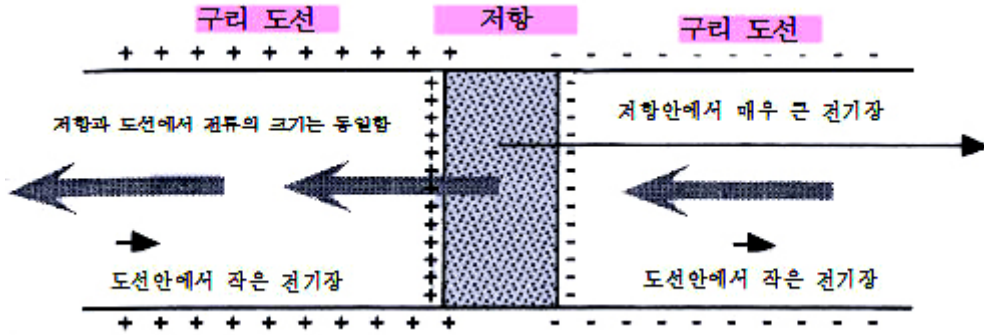


그림 9. 도선과 저항이 연결된 접합면에서 일정한 전류가 흐르기 위해 형성된 전하 분포.

1.5V의 건전지를 사용하는 경우에 도선 표면의 전하 분포는 무시할 만큼 작은 것으로 간주할 수 있으나 저항과 도선이 만나는 면에서의 전하 분포를 무시하면 전압 측정에 대한 실험 결과를 설명할 수 없는 모순에 빠질 수 있기 때문에 이에 대한 이해가 꼭 필요하다.

이제 어떠한 과정을 거쳐 저항과 도선이 접하는 면에서 전하들이 쌓이는지를 이해하여 보자. 간단한 회로에서 스위치를 닫게 되면 건전지 양극 쪽에 연결된 도선 내부의 전자들을 끌어당길 것이다. 건전지 음극 쪽에서는 전자들을 밀어낼 것이다. 그 이유는 건전지의 양쪽 극에 전하들이 있기 때문에 전하 사이에 작용하는 힘 때문이다. 이러한 인력과 척력은 매우 빠르게 도선을 타고 저항이 연결된 곳까지 도달하게 된다. 건전지의 음극 쪽에 연결된 저항의 단면에는 전자들이 저항 안으로 들어가려고 할 것인데 저항 속으로 전자들이 들어가는 것이 쉽지 않다. 그 이유는 저항이 크기 때문이다. 따라서 접하는 면에는 전자들이 쌓이게 된다. 접면에 전자들이 쌓이는 데에 한계가 있다. 무한히 많이 쌓이지 못하는 이유는 앞서 정전기 유도에서 살펴본 것과 같이 접면에 쌓인 전자들이 건전지 음극 쪽으로 힘을 작용하기 때문이다. 한편 건전지 양극 쪽에 연결된 저항 쪽 접면에서는 반대 현상이 생긴다. 즉 도선 내부의 전자들은 건전지 양극 쪽으로 끌려가게 되는데 접면의 저항 안쪽에서는 전자들이 잘 빠져 나오지 못하게 된다. 따라서 접하는 면에서는 전자가 부족한 상태가 되어 그 자리에 있는 양이온들에 의해 양의 전하들이 남게 된다. 양의 전하들이 한 없이 많아 질 수 없는 이유는 건전지의 양극에서 전자를 당기는 힘과 접하는 면에 남은 양의 전하들이 전자들을 반대로 끌어당기는 힘이 존재하기 때문이다. 두 힘이 거의 같아질 때까지 전하들의 재분포가 있게 된다. 이와 같은 전하들의 재분포는 아주 빠른 시간 안에 이루어진다.

접하는 면에 전하들이 있기 때문에 저항 안에는 큰 전기장이 형성된다. 따라서 전자들에게는 식(1)에 의해 큰 힘이 작용하게 된다. 저항 내부를 통과하는 전자들은 양이온과 많은 충돌을 하기 때문에 충돌할 때 마다 운동 에너지를 거의 잃어버리고 전기장에 의해 다시 가속되면서 운동 에너지를 얻고 다시 충돌하고 하면서 수없이 많은 충돌을 거치면서 저항을 빠져 나오게 된다. 저항을 빠져 나오게 되면 접합면과 건전지 양극 사이에 전하의 불균형이 생기기 때문에 전자는 건전지의 양극을 향하여 계속 운동을 하게 된다. 사실은 저항 안에서 전자들의 평균 속도는 전선 안에서 전자들의 평균 속도보다 빠르다. 그 이유는 저항의 굵기가 도선보다 작기 때문이다. 저항을 빠져 나온 전자들은 넓은 길에 퍼져서 좀 더 천천히 진행하게 된다. 건전지의 음극 쪽에 접한 면에서 전자가 하나 들어간다면 다시 접합면과 건전지 음극 사이에는 전하의 불균형이 생기기 때문에 건전지 음극에서 전자가 하나 보충이 된다. 이러한 흐름은 도선과 저항 내부에서 지속적으로 일어난다. 사실 1mA의 전류가 흐른다는 것은 전자 하나의 전하량이 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ 이므로 1초에 $1 \times 10^{-3} / 1.6 \times 10^{-19} \approx 10^{16}$ 개의 전자들이 단면을 통과한다는 의미이기 때문에 전자를 하나하나 생각하는 것은 매우 거친 생각이다. 엄청난 수의 전자들이 밀려가는 것이기 때문에 전자 바다라는 표현까지 쓴다. 따라서 전자 하나가 들어가고 저항 안에서 충돌하고 정지하고 가속하고 하는 것들이 어떤 전자는 충돌하고 어떤 전자는 가속하고 어떤 전자는 들어가고 어떤 전자는 빠져 나가고 하는 일련의 사건들이 종합적으로 함께 일어난다. 중요한 점은 단위 시간당 도선의 단면을 통과하는 전자의 수와 저항의 단면을 통과하는 전자의 수가 같다는 점이다. 이것이 회로의 모든 부분에서 전류가 같다는 것의 근본적인 이해이다.

마지막으로 본 해설 논문에서 기존의 물 흐름 모형을 수정한

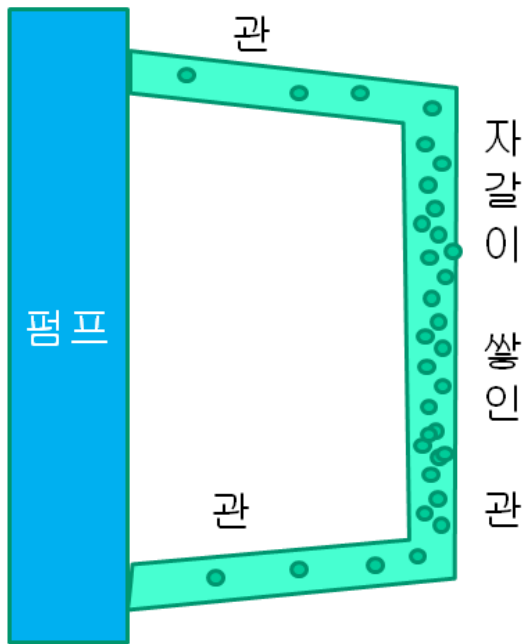


그림 10. 단순한 회로에 대한 물 흐름 모형 ; 관 속에 박힌 원은 돌이나 모래 같은 장애물으로써 물 흐름에 대하여 저항 역할을 함.

모형을 제시하고자 한다. 그림 10은 단순한 전기 회로에 대한 물 흐름 모형이다. 건전지는 펌프, 전선은 관, 저항은 자갈이나 모래가 쌓인 관으로 비유하고자 한다. 전압은 물의 높이 차에 해당하며, 전기장은 중력에 비유된다. 그리고 저항 값은 자갈인 경우와 모래인 경우 혹은 관의 직경을 달리 함으로써 다르게 할 수 있다. 펌프의 기능이 매우 중요하다. 즉, 펌프는 물이 흘러갈 수 있는 양만큼 만 아래쪽에 있는 물을 위쪽으로 옮기는 역할을 한다. 따라서 저항 값이 큰 경우에는 펌프는 단위 시간 당 물을 위쪽으로 작은 양을 올리고, 저항 값이 작은 경우에는 많은 양의 물을 올려야 한다. 펌프는 물이 얼마나 잘 흐르느냐를 저항 값에 의하여 알 수 있다. 즉 위쪽 관이 비스듬하게 되어 있는데 저항이 크면 그곳에 물이 잘 흘러가지 못할 것이다. 즉 관에 물의 압력이 커지게 되어 펌프에 반대로 물이 흘러들어갈 수도 있다. 따라서 펌프는 저항에서 물이 빠져 나간 만큼만 채워주게 된다. 또한 아래쪽 관에서도 관이 비지 않도록 물의 흐름이 유지된다. 즉 저항에서 빠져 나온 물의 양만큼 만 위쪽으로 물을 올리게 된다. 전기회로에서 중요한 점들 중의 하나는 회로에 흐르는 전류의 크기가 외부 부하 저항에 의해서 결정된다는 것이다. 물 흐름 모형에서도 물 흐름량이 외부에 연결된 저항에 의해서 결정되는 과정을 잘 설명할 수 있어야 한다. 따라서 모래가 든 관으로 저항을 바꾸게 되면 저항이 커

지기 때문에 단위 시간당 물 흐름의 양이 작을 것이다. 이제 저항 안에서 일어나는 일을 생각하여 보자. 물 입자가 위쪽으로 들어오게 되면 중력에 의해서 가속되고 운동에너지를 갖게 되며 자갈이나 모래와 부딪치게 된다. 충돌을 한 후에는 운동 에너지가 거의 0이 되고 다시 중력에 의해 가속되어 운동 에너지가 증가되는 일련의 과정을 거치면서 아래쪽으로 천천히 이동하게 된다. 도선에 해당하는 관이 작은 각도로 기울어져 있는 것은 처음과 끝의 높이차 즉 전위차가 작은 것을 말하고 도선 안에서도 저항이 작기는 하지만 있기 때문에 이 효과를 나타내기 위하여 등성등성 장애물을 놓았다.

기존의 물 흐름 모형에서는 저항으로 이 물레방아나 다른 역학적 에너지 소비체를 사용하였는데 본 모형에서는 관속의 자갈이나 모래를 사용하여 실질적으로 비저항 값에 비유되는 상황을 제시하였다. 또한, 도선에 해당하는 관을 비스듬하게 놓음으로써 전기 도선에도 전위차가 있는 것을 설명할 수 있다. 뿐만 아니라 펌프가 저항 값에 의해 흐름이 자동으로 조절되어야 한다는 사항은 외부 회로의 저항 값에 의해 전류가 결정된다는 중요한 개념을 내포하고 있다. 건전지의 전압을 높이면 펌프의 높이가 커져야 하는데 이렇게 되면 도선에 해당하는 관의 기울기 뿐 아니라 저항에 해당하는 자갈이 쌓인 관을 변형하여야 하는 단점을 가지고 있어 완벽한 모형이라고 볼 수 없다. 하지만 물이 자갈들과 부딪치면서 에너지를 잃고 다시 중력에 의해 에너지를 얻는 것을 설명하기 위해서는 유용한 모형이라고 사료된다.

결 론

전류를 교육하는데 전하들의 이동을 고려하지 않는 것은 핵심이 빠진 추상적인 개념 형성의 가능성이 있을 것이다. 본 해설 논문에서는 전하들이 어떻게 해서 이동하고 전기장과 전위차의 개념을 어떻게 전기 회로를 분석하는데 활용할 수 있는지에 대하여 살펴보았다. 또한 건전지와 꼬마전구로 이루어진 가장 단순한 전기회로에서 어떻게 전하들이 상호작용하여 일정한 전류가 흐르는지에 대하여 살펴보았다. 도선 표면과 저항과 도선이 만나는 접합면에 전하들이 분포한다는 것을 꼭 명심해야 모든 개념들 사이에 모순이 없게 된다. 아울러 본 해설 논문에서는 그 동안 있어 왔던 물 흐름 모형과는 다소 차이가 있는 모형을 소개하여 본 해설 논문의 전류에 관한 설명과 그래도 잘 부합하도록 노력하였다.

건전지와 꼬마전구를 연결한 단순한 회로를 과학적으로 잘

이해하는 것이 쉽지가 않다는 것을 해설 논문을 쓰면서도 느끼게 된다. 이 해설 논문이 단순한 회로를 잘 이해하는데 그치지 않고 전구의 직렬연결과 병렬연결 등 다른 회로의 이해에 도움이 될 수 있도록 노력하여 볼 것을 제안한다. 아울러 학생들을 지도하는데 조금이라도 도움이 되기를 바란다.

ABSTRACT

We have tried to explain how constant current in all points of a simple circuit, consisted of battery, bulb, and wires, flows in view point of charge movement. When concepts of electric field, potential difference, and electric field lines are applied to the simple circuit, charges at both the boundary plane contacting between a resistor and the wire and on wire surfaces should exist to explain electric current and all related concepts are coherent. Also, we propose a new water flowing model to reflect our approaches.

Key words: electric current, charge, electrostatic, electric current model, conceptual change

참고문헌

권재술, 안수영 (1989) 대학생들의 물리 개념 오인에 관한 연구. 물리교육. 7(1): 26-41.
 김영민, 박윤희, 박승재 (1990) 중학생의 전류에 대한 학습 전

개념과 관계 현상 관찰 후의 설명. 한국과학교육학회지. 10(1): 47-55.
 문충식, 권재술 (1991) 전류에 관한 학생들의 오인 유형 변화의 종단 연구. 한국과학교육학회지. 11(1): 1-14.
 이정숙, 원복순, 김소연, 김중복 (2009) 비전형적 상황에서의 전기 회로 요소에 관한 초등학생들의 인식. 새물리. 58: 101-109.
 Chabay RW (1995) Electric and Magnetic interactions. Jhon Wiley & Sons, Inc. Chapter 5.
 Cohen R, Eylon B and Ganiel U (1983) Potential difference and current in simple electric circuit: A study of students' concepts. American Journal of Physics 51(5): 407-412.
 Cosgrove M (1995) A Study of Science-in-the-making as Students Generate an Analogy for Electricity. International Journal of Science Education 17(3): 295-310.
 Heller PM and Finley FN (1992) Variable Uses of Alternative Conceptions: A Case Study in Current Electricity. Journal of Research in Science Teaching 29(3): 259-275.
 Miller R and King T (1993) Learning Difficulties in High School Physics: Development of Remedial Teaching Methods and Assessment of its Impact on Achievement. Journal of Research in Science Teaching 22(2): 127-140.