

## 제 2 장

# 전자기학

### 1 회로이론

#### 1.1 개요

회로 이론은 전기 소자들로 이루어진 회로망의 해석 이론이다. 학부 이상 수준의 회로 이론에는 물리학적 지식보다는 수학적 이론이 많이 포함된다. 중고등학교 수준의 회로 이론은 비체계적이며 빠진 내용이 많다.

회로 이론은 이전부터 물리 I, II 교육과정에 포함되어 있었으나 2007 개정 교육과정부터는 저항의 혼합 연결, 키르히호프 법칙 등이 제외되어 직접적으로 직류 회로를 분석하는 내용이 다소 축소되었다. 물리 I에는 새로이 교류 회로에 대한 내용, 다이오드나 트랜지스터, 전력 수송과 변압기 관련 내용이 추가되었다.

#### 1.2 직류 회로

직류 회로는 전압원의 공급 전압이 시간에 따라 변하지 않는 회로이다. 또는 전류의 세기와 방향이 시간에 따라 변하지 않는 회로이다. 여기서는 이상적인 ‘직류 전원’과 ‘저항’으로 구성된 회로의 정성적인 분석을 다루도록 한다.

**정의 1 (전위)** 전위는 한 지점의 전기적인 높이이다.

전위는 (특히 도선 내의) 한 지점의 ‘전기적인 의미에서의 높이’이다. 비슷한 개념으로는 중력 퍼텐셜 에너지에서의 ‘높이’가 있다. 정확히 말하자면 전위는 해당 지점의 단위 전하당 전기력에 의한 퍼텐셜 에너지이다. 전위의 개념은 원래 물리 II에서 소개하지만, 여기서는 전압을 정의하기 위해 간단히 소개하였다.

**정의 2 (전압)** 전압은 두 지점의 전기적인 높이의 차이이다.

전압은 전위차의 다른 표현이다.<sup>1</sup> 전기를 물에 비유해서 설명하면 이해에 도움이 된다. 물이 높은 위치에서 낮은 위치로 흐르듯, 양전하는 전기적인 높이가 높은 곳에서 전기적인 높이가 낮은 곳으로 이동한다. 여기서 물이 낙하하는 두 지점의 높이차가 양전하가 이동하는 두 전위의 차, 전압이라고 보면 된다.

전압이 음수인 경우도 있을 수 있다. 예를 들어 전기적인 높이가 높은 A지점과 전기적인 높이가 낮은 B지점이 있다고 하자. A와 B 사이의 전압은 ‘B를 기준으로 측정된 A의 전위’를 가리킬 수도 있고, 반대로 ‘A를 기준으로 측정된 B의 전위’를 가리킬 수도 있다. 전자는 양수가 되고 후자는 음수가 된다. ‘차’가 절댓값이 아님에 유의하라.

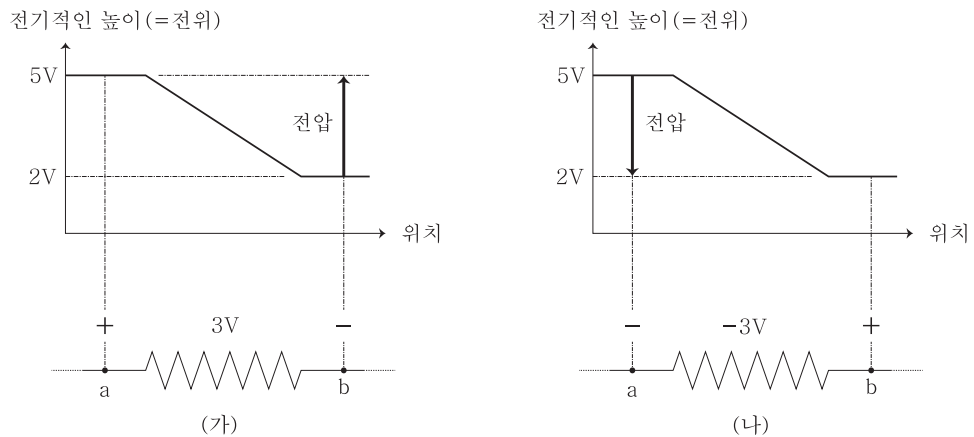


그림 2.1: (가) b를 기준으로 잰 전압 (나) a를 기준으로 잰 전압

그림 2.1와 마찬가지로 2가지 방법으로 걸리는 전압을 구할 수 있다. 여기서는 ‘a와 b 사이에 걸리는 전압’이라고 하면 양수를 사용하는 것으로 약속하자.

<sup>1</sup>번위가 위치 차의 다른 표현이듯이.

**정의 3 (전류)** 전류는 단위 시간 동안 흐른 전하의 양이다.

전기를 물에 비유해서 설명하자. 물의 흐름이 세차면 단위 시간당 흐르는 물의 양이 많다. 마찬가지로 전류의 세기는 단위 시간당 흐르는 전하의 양이다. 전류의 방향은 양전하의 이동 방향이다. 양공이나 양이온이 전하 운반체인 경우 그 방향과 동일하고, 전자가 전하 운반체인 경우 그 반대 방향이 된다.

전류가 음수인 경우도 있을 수 있다. 예를 들어 양전하들이 A지점에서 B지점으로 흐르고 있다고 하자. 그러면 ‘A지점에서 B지점으로 흐르는 전류’는 양수이다. 반대로 ‘B지점에서 A지점으로 흐르는 전류’는 음수이다.

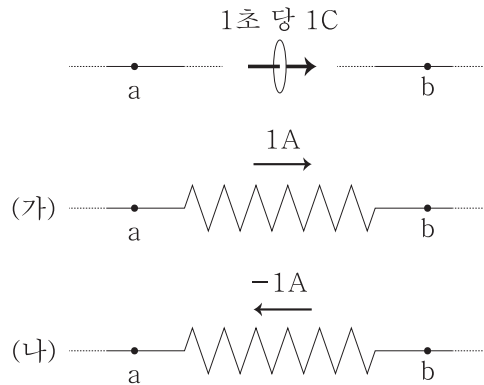


그림 2.2: (가) a에서 b로 흐르는 전류 (나) b에서 a로 흐르는 전류

그림 2.2와 마찬가지로 2가지 방법으로 흐르는 전류를 구할 수 있다. 여기서는 ‘a와 b 사이에 흐르는 전류’라고 하면 양수를 사용하는 것으로 약속하자.

**정의 4 (소자)** 회로를 구성하는 부품을 간단히 나타낸 것을 소자라고 한다.

예를 들어 ‘전원 장치’, ‘저항’, ‘축전기’, ‘다이오드’ 같은 것들을 소자라고 할 수 있다. 소자에는 여러 가지 종류가 있지만, 간단한 소자는 대부분 2개의 단자를 가지고 있으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

그림 2.3은 2개의 단자가 있는 소자에  $V$ 의 전압이 걸려 있고  $I$ 의 전류가 흐르고 있는 모습을 나타낸 것이다. 임의의 단자를 (+)극, 반대쪽 단자를 (-)극으로 둔다. 그러면 소자에 흐르는 전류의 방향은 (+)단자에서 (-)단자를 향하는

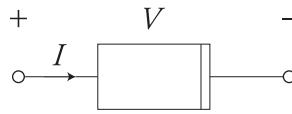


그림 2.3: 소자

방향이고, 소자에 걸리는 전압은 ‘(+ )단자의 전기적인 높이(전위)’ - ‘(-)단자의 전기적인 높이(전위)’이다.

일반적으로 양전하가 단자  $A$ 로 들어와 단자  $B$ 로 나갈 때,  $A$ 를 (+)단자,  $B$ 를 (-)단자로 두는 것이 자연스럽다.<sup>2</sup> 그러면 저항과 같은 소자의 전압과 전류가 모두 양수가 된다. 다이오드와 같은 경우는 (+)단자와 (-)단자가 정해져 있다.

**정의 5 (소자 법칙)** 어떤 소자에 대하여 그 소자에 걸리는 전압  $V$ 와 소자에 흐르는 전류  $I$  사이의 관계식을 소자 법칙이라고 한다.

가장 유명한 예시로 옴의 법칙  $V = IR$ 을 들 수 있다. 옴의 법칙은 ‘저항’이라는 소자의 소자 법칙이다. 옴의 법칙이 모든 종류의 소자에 대해 성립한다고 해서 안 된다.

**정의 6 (저항)** 전하의 흐름을 방해하는 작용이나 소자를 저항이라고 한다.



그림 2.4: 저항

기호로는  $R$ 로 표기한다. 저항은 가장 기본적인 전기 소자이다. 저항체, 저항기라고도 불린다. 저항의 정도를 저항값이라고도 한다.

저항의 소자 법칙은  $V = IR$ 이다. 여기서  $R$ 은 저항값으로 개별 저항의 고유한 상수이다. 이를 옴의 법칙이라고도 한다. 저항에 더 많은 전류가 흐르기 위해서는 더 큰 전압을 걸어주어야 한다. 또, 저항값이 클수록 동일한 전압을

<sup>2</sup>그러나 전류를 음수로 두어도 문제 푸는데는 지장이 없다.

결어주었을 때 흐르는 전류의 세기가 약해진다.  $R$ 을 바꿀 수 있는 저항을 가변 저항이라고 한다.

**정의 7 (전원<sup>3</sup>)** 전압을 만들어내는 소자를 전원이라고 한다.

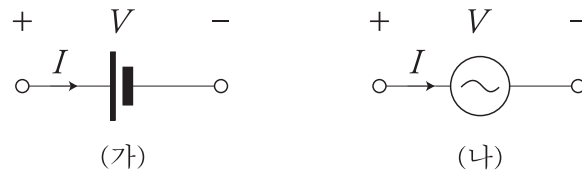


그림 2.5: (가) 직류 전원 (나) 교류 전원

전원은 양 단자 사이에 전압(전위차)을 만들어내는 소자이다. 이때의 전압을 기전력이라고도 한다. 직류 전원은 ‘직류 전원 장치’ 또는 ‘전지’로, 교류 전원은 ‘교류 전원 장치’로 부른다.

전원의 소자 법칙은  $V = E$ 이다. 여기서  $E$ 는 전원의 기전력이다. 교류 전원의 경우  $E$ 가 시간  $t$ 의 함수<sup>4</sup>로 나타난다. 소자 법칙으로부터 유추할 수 있듯이, 전원 자체는 전류와 아무런 관계가 없다. 그림 2.5의 (가)에서 일반적으로 전원이 하나인 직류 회로에서  $V$ 는 양수이고  $I$ 는 음수<sup>5</sup>이다. 하지만 여러 개의 전원이 연결된 복잡한 회로의 경우는  $I$ 가 양수일 수 있다.

**정의 8 (전압계)** 전압계는 소자 법칙이  $I = 0$ 인 소자이다.

전압계는 전압계의 양 단에 걸리는 전압을 측정한다. 전압계 자체는 전류가 흐르지 않으므로 회로에 영향을 주지 않는다. 저항이  $\infty$ 인 소자라고도 할 수 있다.

**정의 9 (전류계)** 전류계는 소자 법칙이  $V = 0$ 인 소자이다.

전류계는 전류계에 흐르는 전류를 측정한다. 전류계 자체는 전압이 걸리지 않으므로 회로에 영향을 주지 않는다. 저항이 0인 소자라고도 할 수 있다.

<sup>4</sup>고등학교 수준에서는  $V_0 \sin 2\pi ft$ 정도

<sup>5</sup>즉, (+)단자에서 나가는 방향.

**정의 10 (회로)** 소자들을 연결하여 여러 고리로 만든 것을 회로라고 한다.

회로는 단자, 도선, 소자로 구성된다. 단자는 도선이 만나는 지점이고 도선은 전류가 흐르는 선이다. 모든 소자는 도선 위에 있고, 양 쪽에 단자가 연결되어 있다. 모든 단자에는 전위가 있고, 도선에서는 전위가 일정하다. 이제 몇 가지 자명한 법칙을 소개한다.

**전압 법칙** 임의의 고리에서 공급하는 전압의 합은 소모하는 전압의 합과 같다.

**전류 법칙** 임의의 단자로 들어가는 전류의 합은 나가는 전류의 합과 같다.

**예제 1 회로 읽기 1**

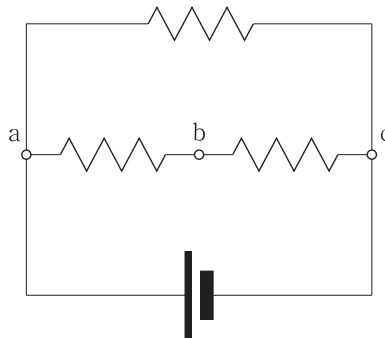


그림 2.6: 어떤 직류 회로

그림 2.6은 저항 3개와 전지 1개로 구성된 회로이다. 이 회로에서 단자와 소자는 각각 몇 개인가?

단자는  $a, b, c$ 의 3개이다. 소자는 총 4개이다.

**예제 2 회로 읽기 2**

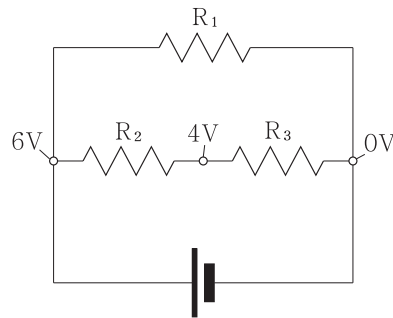


그림 2.7: 어떤 직류 회로

그림 2.7은 저항  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ 와 전지로 구성된 회로의 각 단자마다 전기적인 높이(전위)를 나타낸 것이다. 각 소자에 걸리는 전압을 설명하라.

전지에 걸리는 전압 = 전지의 기전력은  $6 - 0 = 6$  V이다.  $R_1$ 에 걸리는 전압은  $6 - 0 = 6$  V이다.  $R_2$ 에 걸리는 전압은  $6 - 4 = 2$  V이다.  $R_3$ 에 걸리는 전압은  $4 - 0 = 4$  V이다.

### 예제 3 회로 읽기 3

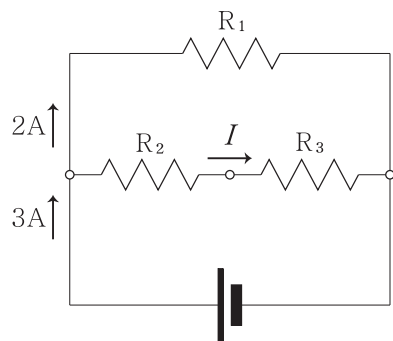


그림 2.8: 어떤 직류 회로

그림 2.8은 저항  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ 와 전지로 구성된 회로의 각 도선마다 흐르는 전류를 나타낸 것이다. 각 소자에 흐르는 전류를 설명하라.

전지에 흐르는 전류는 3 A이다.  $R_1$ 에 흐르는 전류는 2 A이다.  $R_2$ 에 흐르는 전류와  $R_3$ 에 흐르는 전류는  $3 - 2 = 1$  A로 같다.

**따름정리 1 (직렬 연결 1)** 두 소자를 줄지어 있는 것을 직렬 연결이라고 한다.

직렬 연결은 임의의 두 소자에 대한 것이지만, 여기서는 저항의 직렬 연결을 예시로 살펴보자.

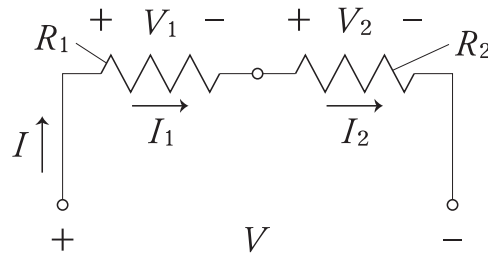


그림 2.9: 직렬 연결

그림 2.9과 앞서의 논의<sup>6</sup>로부터  $V = V_1 + V_2$ 임과  $I = I_1 = I_2$ 임이 자명하다. 이제 저항의 소자 법칙-옴의 법칙을 연립하면,

$$V_1 = IR_1, V_2 = IR_2, V = I(R_1 + R_2)$$

이므로  $I$ 를 소거하면

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}V, V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}V$$

이다. 따라서 저항의 직렬 연결에서 총 전압은 각 저항에 걸리는 전압의 합과 같으며, 각 저항에 걸리는 전압은 저항값에 비례하게 나누어진다. 흐르는 전류는 동일하다.

**따름정리 2 (병렬 연결)** 두 소자를 겹쳐 있는 것을 병렬 연결이라고 한다.

병렬 연결은 임의의 두 소자에 대한 것이지만, 여기서는 저항의 병렬 연결을 예시로 살펴보자.

<sup>6</sup>전압 법칙, 전류 법칙



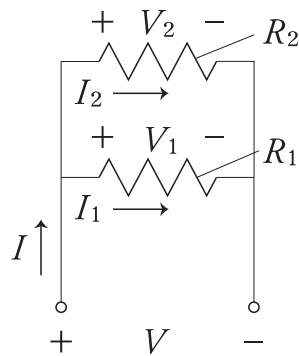


그림 2.10: 병렬 연결

그림 2.9과 앞서의 논의<sup>7</sup>로부터  $V = V_1 = V_2$ 임과  $I = I_1 + I_2$ 임이 자명하다. 이제 저항의 소자 법칙-옴의 법칙을 연립하면,

$$I_1 = \frac{V}{R_1}, I_2 = \frac{V}{R_2}, I = \frac{V(R_1 + R_2)}{R_1 R_2}$$

이므로  $V$ 를 소거하면

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I, I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

이다. 따라서 저항의 병렬 연결에서 총 전류는 각 전류에 흐르는 전류의 합과 같으며, 각 저항에 흐르는 전류는 저항값에 반비례하게 나누어진다. 걸리는 전압은 동일하다.

**따름정리 3 (등가 저항)** 다수 개의 저항과 동일한 소자 법칙을 갖는 하나의 저항을 등가 저항이라고 한다.

등가 저항, 또는 합성 저항을 구하는 것은 여러 개의 저항을 동등한 효과를 내는 하나의 저항으로 대체하는 과정이다. 직렬 연결과 병렬 연결의 경우 이를 간단히 구할 수 있다. 직렬 연결의 경우(그림 2.9)  $V = I(R_1 + R_2)$ 이므로 등가 저항  $R = R_1 + R_2$ 이다. 따라서 직렬 연결된 두 저항의 총 저항 효과는 증가한다. 병렬 연결의 경우(그림 2.10)  $I = \frac{V(R_1 + R_2)}{R_1 R_2}$ 이므로 등가 저항  $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ 이다. 따라서 병렬 연결된 두 저항의 총 저항 효과는 감소한다.

<sup>7</sup>전압 법칙, 전류 법칙

## 예제 4 저항의 직렬 연결

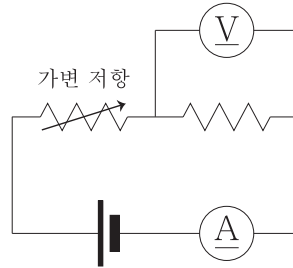


그림 2.11: 가변 저항이 연결된 직류 회로

그림 2.11은 복잡한 직류 회로이다. 전압계는 저항에 병렬 연결 되어있고 전류계는 저항에 직렬 연결 되어있다. (1) 전지의 기전력이 12 V, 저항의 저항값이  $2\ \Omega$ , 가변 저항의 저항값이  $4\ \Omega$ 일 때 전압계와 전류계의 측정값을 구하여라. (2) 가변 저항의 저항값을 증가시키면 전압계와 전류계의 측정값은 어떻게 되는가? (3) 가변 저항의 저항값을 감소시키면 전압계와 전류계의 측정값은 어떻게 되는가?

전압계와 저항이 병렬 연결되어 있으므로 전압계의 측정값은 저항에 걸리는 전압과 같다. 전류계와 저항이 직렬 연결되어 있고, 저항에 병렬 연결된 것이 전압계 뿐이므로 전류계의 측정값은 저항에 흐르는 전류와 같다.

(1) 저항에 걸리는 전압은  $\frac{2}{2+4} \times 12 = 4\ \text{V}$ 이다. 옴의 법칙에 의하여 저항에 흐르는 전류는  $\frac{4}{2} = 2\ \text{A}$ 이다.

(2) 가변 저항에 걸리는 전압의 비가 증가하고 전지의 전압은 일정하므로, 저항에 걸리는 전압은 감소한다. 따라서 옴의 법칙에 의하여 저항에 흐르는 전류도 감소한다. 또는, 가변 저항과 저항의 등가 저항이 증가하므로 등가 저항과 직렬 연결된 전류계에 흐르는 전류는 감소한다.

- (3) 가변 저항에 걸리는 전압의 비가 감소하고 전지의 전압은 일정하므로, 저항에 걸리는 전압은 증가한다. 따라서 옴의 법칙에 의하여 저항에 흐르는 전류도 증가한다. 또는, 가변 저항과 저항의 등가 저항이 감소하므로 등가 저항과 직렬 연결된 전류계에 흐르는 전류는 증가한다.

### 예제 5 저항의 병렬 연결

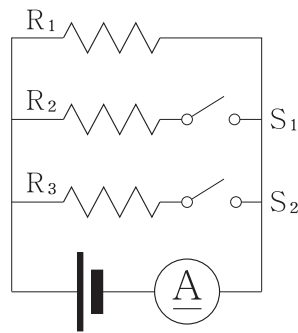


그림 2.12: 스위치가 연결된 직류 회로

그림 2.11은 복잡한 직류 회로이다. 전류계는 전지에 직렬 연결 되어있다. 두 저항  $R_2$ ,  $R_3$ 은 각각 스위치  $S_1$ ,  $S_2$ 와 연결되어 있다. (1) 전지의 기전력이 12 V,  $R_1$ 의 저항값이  $6 \Omega$ ,  $R_2$ 의 저항값이  $6 \Omega$ ,  $R_3$ 의 저항값이  $3 \Omega$ 일 때 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 의 연결 상태에 따른 전류계의 측정값을 구하여라. (2) 처음에 스위치  $S_1$ 은 닫혀 있었고  $S_2$ 는 열려 있었으며 저항값이  $R_2 > R_3$ 라고 하자. 스위치  $S_1$ 을 열고 스위치  $S_2$ 를 닫으면 전류계의 측정값은 어떻게 되는가?

전류계와 전지가 직렬 연결 되어 있으므로 전류계의 측정값은 전지에 흐르는 전류와 같다. 모든 저항은 병렬 연결 되어 있고 양 단이 전지와 연결되어 있으므로 항상 전지의 기전력과 같은 전압이 걸린다.

- (1) 두 스위치가 모두 열려 있으면  $R_1$ 에 흐르는 전류는 옴의 법칙에 의하여  $\frac{12}{6} = 2 \text{ A}$ 이다. 따라서 전류계의 측정값은  $2 + 0 + 0 = 2 \text{ A}$ 이다.

$S_1$ 만 닫혀 있으면  $R_1$ 에 흐르는 전류는 마찬가지로 2 A이고  $R_2$ 에 흐르는 전류는 옴의 법칙에 의하여  $\frac{12}{6} = 2$  A이다. 따라서 전류계의 측정값은  $2 + 2 + 0 = 4$  A이다. 또는 등가 저항( $R_1 || R_2$ )이  $\frac{6 \times 6}{6+6} = 3 \Omega$ 이므로 옴의 법칙에 의하여  $\frac{12}{3} = 4$  A의 전류가 흐른다고도 할 수 있다.

$S_2$ 만 닫혀 있으면  $R_1$ 에 흐르는 전류는 마찬가지로 2 A이고  $R_3$ 에 흐르는 전류는 옴의 법칙에 의하여  $\frac{12}{3} = 4$  A이다. 따라서 전류계의 측정값은  $2 + 0 + 4 = 6$  A이다. 또는 등가 저항( $R_1 || R_3$ )이  $\frac{6 \times 3}{6+3} = 2 \Omega$ 이므로 옴의 법칙에 의하여  $\frac{12}{2} = 6$  A의 전류가 흐른다고도 할 수 있다.

$S_1$ 과  $S_2$ 가 모두 닫혀 있으면  $R_1, R_2, R_3$ 에 흐르는 전류가 각각 2 A, 2 A, 4 A이므로 전류계의 측정값은  $2 + 2 + 4 = 8$  A이다. 또는 등가 저항( $(R_1 || R_2) || R_3$ )이  $\frac{6 \times 6}{6+6} = 3 \Omega$ 과  $3 \Omega$ 의 등가저항이어서  $\frac{3 \times 3}{3+3} = 1.5 \Omega$ 이므로 옴의 법칙에 의하여  $\frac{12}{1.5} = 8$  A의 전류가 흐른다고도 할 수 있다.

- (2)  $R_1$ 에 흐르는 전류는  $R_1$ 에 무엇이 병렬 연결 되어 있는지와 무관하게 동일하다.  $R_2$ 에 흐르던 전류보다  $R_3$ 에 흐르는 전류가 더 크다. 걸리는 전압은 동일한데  $R_3$ 의 저항값이 더 작기 때문이다. 따라서 전류계의 측정값은 증가한다. 등가 저항으로 해석할 수도 있다.  $R_1$ 과  $R_2$ 의 등가 저항보다  $R_1$ 과  $R_3$ 의 등가 저항이 더 작다. 따라서 등가 저항에 흐르는 전류가 증가하므로 전류계의 측정값도 증가한다.

### 1.3 교류 회로

교류 회로는 전압원의 공급 전압이 시간에 따라 변하는 회로이다. 또는 전류의 세기와 방향이 주기적으로 변하는 회로이다. 여기서는 이상적인 ‘교류 전원’과 ‘저항’, ‘축전기’, ‘코일’으로 구성된 회로의 정성적인 분석을 다루도록 한다. 추가로 전력 수송과 변압에 대한 내용도 다룬다.

**정의 11 (축전기)** 에너지를 전기장의 형태로 저장하는 소자를 축전기라고 한다.

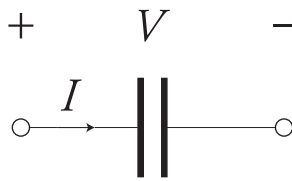


그림 2.13: 축전기

기호로는  $C$ 로 표기한다. 축전기는 가장 기본적인 교류 소자이다. 축전기는 전하를 충전하는 작용을 하는데, 그 정도를 전기 용량이라고 한다.

축전기에 형성되는 전압은 기본적으로 충전된 전하량에 의한 것이다. 축전기의 양 극판은 서로 크기는 같고 부호가 반대인 전하를 띤다. 축전기에  $Q$ 의 전하량이 충전되어 있다면 한 쪽 극판에는  $+Q$ , 다른 쪽 극판에는  $-Q$ 의 전하가 저장되어 있는 것이다. 그렇게 되면 평행한 극판 사이에 전기장이 형성되므로 전위의 차이가 생긴다.

축전기의 소자 법칙은  $I = C \frac{dV}{dt}$ 이다. 양 변을 시간  $t$ 에 대하여 적분하면  $Q = CV$ 를 얻는다. 여기서  $C$ 는 전기 용량으로 개별 축전기의 고유한 상수이다. 소자 법칙이 미분방정식의 형태로 나타나기 때문에, 이를 정량적으로 계산하기보다는 정성적인 의미를 파악하여야 한다.

- $V$ 가 양수인 경우만 고려해도 일반성을 잃지 않는다.
- $I$ 가 양수이면  $V$ 가 증가한다. 양전하가 저장된 쪽으로 전류가 들어오면 전하가 더 많이 충전되어 전압이 높아진다.
- $I$ 가 음수이면  $V$ 가 감소한다. 양전하가 저장된 쪽에서 전류가 나가면 충전된 전하가 방전되어 전압이 낮아진다.
- $I$ 가 0이면  $V$ 가 변하지 않는다.<sup>8</sup> 완전히 충전된 축전기는 전류가 흐르지 않는다.

직류 회로에서 축전기는 충전되기 전에는 소자 법칙이  $V = 0$ 이므로 도선과

<sup>8</sup>위 항목들이 'A이면 B이다' 식으로 서술되어 있지만, 사실은 동치이다.

동일하지만, 전지가 연결되면 순식간에 충전되어 소자 법칙이  $I = 0$ 이 되므로 끊어진 도선, 혹은 저항이  $\infty$ 인 소자가 된다. 교류 회로에서 축전기는 충전과 방전을 반복하면서 전압이 계속 변하므로 전류도 계속해서 흐른다. 이때는 축전기가 저항의 효과를 내는데 이를 용량 리액턴스  $X_C$ 라고 한다. 축전기의 전기 용량이  $C$ 이고 회로의 각주파수가  $\omega^9$ 일 때, 용량 리액턴스  $X_C = \frac{1}{\omega C}$ 이다. 축전기의 저항 효과는 전기 용량과 주파수에 반비례한다. 전기 용량이 크면 같은 전하를 충전해도 걸리는 전압이 낮을 것이고, 주파수가 크면 충전이 조금만 되어도 금방 방전되므로 축전기에 걸리는 전압이 낮을 것이기 때문이다. 따라서 축전기는 주파수가 작은 신호를 잘 통과시키지 않는다고 표현한다.

**정의 12 (코일)** 에너지를 자기장의 형태로 저장하는 소자를 코일이라고 한다.

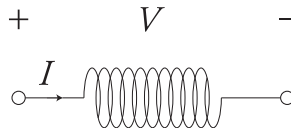


그림 2.14: 코일

기호로는  $L$ 로 표기한다. 코일도 가장 기본적인 교류 소자이다. 코일은 유도 자기장을 형성하는 작용을 하는데, 그 정도를 자체 유도 계수<sup>10</sup>라고 한다.

코일에 형성되는 전압은 기본적으로 유도 기전력에 의한 것이다. 코일에 전류가 흐르면 전류에 의한 자기장이 형성된다. 그러면 코일은 그 자기장에 반발하여 반대로 유도 자기장을 형성하고 유도 기전력을 형성한다. 이 기전력이 전위의 차이를 만들게 된다.

코일의 소자 법칙은  $V = L \frac{dI}{dt}$ 이다. 양 변을 시간  $t$ 에 대하여 적분하면  $\Phi = LI$ 를 얻는다. 여기서  $L$ 은 자체 유도 계수로 개별 코일의 고유한 상수이다. 소자 법칙이 미분방정식의 형태로 나타나기 때문에, 이를 정량적으로 계산하기보다는 정성적인 의미를 파악하여야 한다.

<sup>9</sup> $\omega = 2\pi f$

<sup>10</sup>상호 유도 계수도 있다.

- $I \geq 0$ 인 경우만 고려해도 일반성을 잃지 않는다.
- $I$ 가 증가하면  $V$ 가 양수이다. 들어오는 전류가 증가하면 전류의 진행을 막는 방향으로 유도 기전력이 형성된다.<sup>11</sup>
- $I$ 가 감소하면  $V$ 가 음수이다. 들어오는 전류가 감소하면 전류의 진행을 돕는 방향으로 유도 기전력이 형성된다.
- $I$ 가 변하지 않으면  $V$ 가 0이다.<sup>12</sup> 전류의 변화가 없으면 유도 기전력도 형성되지 않는다.

직류 회로에서 코일은 전류가 처음으로 흐르게 되는 순간 큰 역기전력을 형성하여 소자 법칙이  $I = 0$ 이므로 끊어진 도선과 동일하지만, 전류가 어느 정도 흐르게 되다가 일정해지면 소자 법칙이  $V = 0$ 이 되므로 도선, 혹은 저항이 0인 소자가 된다. 교류 회로에서는 전류가 계속 변하므로 코일은 기전력과 역기전력을 형성하기를 반복한다. 이때는 코일이 저항의 효과를 내는데 이를 유도 리액턴스  $X_L$ 라고 한다. 자체 유도 계수가  $L$ 이고 회로의 각주파수가  $\omega$ <sup>13</sup>일 때, 유도 리액턴스  $X_L = \omega L$ 이다. 코일의 저항 효과는 자체 유도 계수와 주파수에 비례한다. 자체 유도 계수가 크면 형성되는 유도 기전력이 커질 것이고, 주파수가 크면 전류의 변화량이 커지므로 유도 기전력이 커질 것이기 때문이다. 따라서 코일은 주파수가 큰 신호를 잘 통과시키지 않는다고 표현한다.

### 예제 6 코일과 축전기가 연결된 직류 회로

그림 2.15와 같이 회로를 구성하였다. 처음에 두 저항에 흐르는 전류는 0, 축전기에 충전된 전하량은 0, 코일이 형성한 유도 자기장은 0이었다.<sup>14</sup> 전지의 기전력은 12 V이고 위쪽 저항의 저항값은 6  $\Omega$ , 아래쪽 저항의 저항값은 4  $\Omega$ 이다.

<sup>11</sup>역기전력이라고도 한다.

<sup>12</sup>위 항목들이 'A이면 B이다' 식으로 서술되어 있지만, 사실은 동치이다.

<sup>13</sup> $\omega = 2\pi f$

<sup>14</sup>여기서는 친절하게 조건을 주었으나, 기본적으로 스위치를 닫아서 회로를 연결시키기 전에는 초기에 이런 상태라고 가정한다.

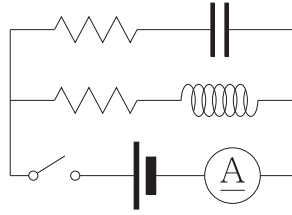


그림 2.15: 코일과 축전기가 연결된 직류 회로

(1) 스위치를 닫은 순간 전류계의 측정값은? (2) 스위치를 닫고 충분한 시간이 지난 뒤 전류계의 측정값은?

- (1) 맨 처음 순간에 축전기는 저항이 0인 소자, 코일은 저항이  $\infty$ 인 소자이므로 위쪽 저항만 연결되고 아래쪽 저항은 끊어진다. 따라서 전류계의 측정값은  $\frac{12}{6} = 2$  A이다.
- (2) 충분히 시간이 지난 후에 축전기는 저항이  $\infty$ 인 소자, 코일은 저항이 0인 소자이므로 아래쪽 저항만 연결되고 위쪽 저항은 끊어진다. 따라서 전류계의 측정값은  $\frac{12}{4} = 3$  A이다.

축전기나 코일은 직류 회로보다는 교류 회로에서 많이 사용된다. 축전기나 코일이 교류 회로에서 어떻게 동작하는지 이해하기 위해서는 우선 교류 회로를 ‘해석하는 법’과 교류 회로에서의 ‘저항 효과’를 이해해야 한다.

교류 회로에서는 전압과 전류의 크기와 방향이 시간에 따라 변하므로 해석하기 복잡하다. 축전기와 코일의 소자 법칙이 미분 방정식이므로 더더욱 해석이 어려워진다. 그런데 전압과 전류가 삼각함수로 나타나는 경우에는 ‘임피던스’를 활용하면 저항만 연결된 직류 회로와 유사하게 나타내어 쉽게 해석할 수 있다.

**정의 13 (임피던스)** 교류에서 소자의 저항 효과를 임피던스라고 한다.

교류 회로에서 어떤 소자의 저항값이  $R$ 이고 리액턴스가  $X$ 일 때, 소자의 저항 효



과를 임피던스  $Z$ 라고 한다. 임피던스는 복소수<sup>15</sup>로 표현하는데, 실수부를 ‘저항’이라 부르고 허수부를 ‘리액턴스’라 부른다. ‘저항’은 ‘전력을 소모하는 저항 효과’이며, ‘리액턴스’<sup>16</sup>는 ‘전력을 저장하는 저항 효과’이다. 리액턴스는 주기적으로 전력을 저장했다가 다시 전원으로 돌려준다.

임피던스 모델을 이용하면 교류 전원, 저항, 축전기, 코일로 구성된 교류 회로를 직류 회로처럼 해석할 수 있다. 전압 대신 전압의 진폭<sup>17</sup>, 전류 대신 전류의 진폭을 사용하면, 임의의 소자에 걸린 전압  $Z$ 과 소자에 흐르는 전류  $I$ 가 소자의 임피던스  $Z$ 에 대하여  $V = ZI$ 를 만족한다. 회로의 임피던스는 각 소자의 임피던스를 등가 저항을 구하는 방식으로 구할 수 있다. 각주파수가  $\omega$ <sup>18</sup>인 교류 회로에서 저항값이  $R$ 인 저항의 임피던스는  $R$ , 전기 용량이  $C$ 인 축전기의 임피던스는  $\frac{1}{j\omega C}$ , 자체 유도 계수가  $L$ 인 코일의 임피던스는  $j\omega L$ 이다.

### 예제 7 RC회로

---

전압이 20 V인 교류 전원에 저항값이 4 Ω인 저항  $R$ 과 용량 리액턴스가 3 Ω인 축전기  $C$ 를 직렬 연결하였다. (1) 저항과 축전기에 걸리는 전압을 구하라. (2) 회로에 흐르는 전류를 구하라. (3) 교류 전원의 진동수를 감소시키면, 저항과 축전기에 흐르는 전류는 어떻게 되는가? (4) 교류 전원의 진동수를 증가시키면, 저항과 축전기에 걸리는 전압은 어떻게 되는가?

---

(1)번과 (2)번 항목은 회로의 임피던스를 이용한 해석을 돕기 위한 것이고, (3)번과 (4)번 항목은 실질적인 필터 회로에 대한 것이다. 여기서 말하는 ‘전압’

<sup>15</sup>미분 방정식 보다는 복소수가 간단하다.

<sup>16</sup>리액턴스  $X$ 와 용량 리액턴스  $X_C$ , 유도 리액턴스  $X_L$ 는  $X = X_L - X_C$ 의 관계를 갖는다.

<sup>17</sup>혹은 간단히 최댓값이라고 생각해도 된다. 다만 여기서의 진폭은 실제 진폭이 아니라 복소 진폭이다. 예를 들어 계산의 결과가 5가 나올 수도 있고,  $3 + 4j$ 가 나올 수도 있는데, 둘 다 최댓값이 5인 진폭이다.

<sup>18</sup> $\omega = 2\pi f$

과 ‘전류’는 각각 ‘교류 전압의 복소 진폭’, ‘교류 전류의 복소 진폭’이고 그 크기는 각각 ‘교류 전압의 최댓값’, ‘교류 전류의 최댓값’이다.

- (1) 저항의 임피던스는  $4 \Omega$ 이고 축전기의 임피던스는  $-3j \Omega$ 이다. 따라서 저항에 걸리는 전압은  $\frac{4}{4-3j} \times 20 = \frac{16}{5}(4+3j)$  V이고, 축전기에 걸리는 전압은  $\frac{3j}{4-3j} \times 20 = \frac{12}{5}(-3+4j)$  V이다. 그 크기는 각각 16 V, 12 V이다. 여기서  $20 < 16 + 12$ 인 것은 저항의 걸리는 전압의 최댓값과 축전기에 걸리는 전압의 최댓값을 더했기 때문이다. 저항의 전압이 최대가 되는 시점과 축전기의 전압이 최대가 되는 시점은 다르다. 최댓값 둘을 더하면 20 V를 넘을 수 있으나, 각 순간의 합은 항상 20 V가 된다.
- (2) 회로의 등가 임피던스가  $4 - 3j \Omega$ 이므로 전류는  $\frac{4}{5}(4+3j)$  A이다. 그 크기는 4 A이다.
- (3) 교류 전원의 진동수를 감소시키면 축전기의 용량 리액턴스가 증가하므로 회로의 등가 임피던스( $R - jX_C$ )<sup>19</sup>가 커진다. 전원의 전압은 일정하므로 회로에 흐르는 전류는 감소한다.
- (4) 교류 전원의 진동수를 증가시키면 축전기의 용량 리액턴스가 감소하므로 저항에 걸리는 전압의 비는 상대적으로 증가, 축전기에 걸리는 전압의 비는 상대적으로 감소한다. 전원의 전압은 일정하므로 저항에 걸리는 전압은 증가, 축전기에 걸리는 전압은 감소한다.

### 예제 8 RL회로

전압이 15 V인 교류 전원에 저항값이  $3 \Omega$ 인 저항  $R$ 과 유도 리액턴스가  $4 \Omega$ 인 코일  $L$ 을 직렬 연결하였다. (1) 저항과 코일에 걸리는 전압을 구하라. (2) 회로에 흐르는 전류를 구하라. (3) 교류 전원의 진동수를 감소시키면, 저항과 코일에

<sup>19</sup>임피던스의 크기가  $\sqrt{R^2 + X_C^2}$ 이므로.

흐르는 전류는 어떻게 되는가? (4) 교류 전원의 진동수를 증가시키면, 저항과 코일에 걸리는 전압은 어떻게 되는가?

- (1) 저항의 임피던스는  $3 \Omega$ 이고 코일의 임피던스는  $4j \Omega$ 이다. 따라서 저항에 걸리는 전압은  $\frac{3}{3+4j} \times 15 = \frac{9}{5}(3-4j)$  V이고, 코일에 걸리는 전압은  $\frac{4j}{3+4j} \times 20 = \frac{12}{5}(4+3j)$  V이다. 그 크기는 각각 9 V, 12 V이다. 여기서  $15 < 9 + 12$ 인 것은 저항의 걸리는 전압의 최댓값과 코일에 걸리는 전압의 최댓값을 더했기 때문이다. 저항의 전압이 최대가 되는 시점과 축전기의 전압이 최대가 되는 시점은 다르다. 최댓값 둘을 더하면 20 V를 넘을 수 있으나, 각 순간의 합은 항상 15 V가 된다.
- (2) 회로의 등가 임피던스가  $3 + 4j \Omega$ 이므로 전류는  $\frac{3}{5}(3-4j)$  A이다. 그 크기는 3 A이다.
- (3) 교류 전원의 진동수를 감소시키면 코일의 유도 리액턴스가 감소하므로 회로의 등가 임피던스( $R + jX_L$ )<sup>20</sup>가 작아진다. 전원의 전압은 일정하므로 회로에 흐르는 전류는 증가한다.
- (4) 교류 전원의 진동수를 증가시키면 코일의 유도 리액턴스가 증가하므로 저항에 걸리는 전압의 비는 상대적으로 감소, 코일에 걸리는 전압의 비는 상대적으로 증가한다. 전원의 전압은 일정하므로 저항에 걸리는 전압은 감소, 코일에 걸리는 전압은 증가한다.

### 예제 9 RLC회로

전압이 12 V인 교류 전원에 저항값이  $3 \Omega$ 인 저항  $R$ 과 유도 리액턴스가  $3 \Omega$ 인 코일  $L$ , 용량 리액턴스가  $3 \Omega$ 인 축전기  $C$ 를 직렬 연결하였다. (1) 각 소자에 걸리는 전압과 회로에 흐르는 전류를 구하라. (2) 이때 교류 전원의 진동수를  $R$ ,

<sup>20</sup>임피던스의 크기가  $\sqrt{R^2 + X_L^2}$ 이므로.

$L, C$ 를 써서 표현하라. (3) 교류 전원의 진동수를 감소시킬 때, 저항에 흐르는 전류와 저항에 걸리는 전압은 어떻게 되는가? (4) 교류 전원의 진동수를 증가시킬 때, 저항에 흐르는 전류와 저항에 걸리는 전압은 어떻게 되는가?

(1) 전류를 구해  $V = ZI$ 를 적용하는 것이 간단하다. 회로의 등가 임피던스가  $3 + 3j - 3j = 3 \Omega$ 이므로 회로에 흐르는 전류는  $\frac{12}{3} = 4 \text{ A}$ 이다. 따라서 저항에 걸리는 전압은  $4 \times 3 = 12 \text{ V}$ 이고 코일에 걸리는 전압은  $4 \times 3j = 12j \text{ V}$ 이고 축전기에 걸리는 전압은  $4 \times (-3j) = -12j \text{ V}$ 이다. 그 크기는 모두  $12 \text{ V}$ 이다.

(2) 코일의 유도 리액턴스  $X_L = 2\pi fL$ 이고 축전기의 용량 리액턴스  $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ 이다. 조건에서  $X_L = X_C$ 이므로

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}, (2\pi f)^2 LC = 1, f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

임을 알 수 있다. 여기서  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 를 고유 진동수(공명 진동수)라고 한다. RLC 직렬 회로에서 교류 전원의 진동수가 고유 진동수일 때, 유도 리액턴스와 용량 리액턴스가 같다.

(3) 교류 전원의 진동수를 감소시키면 코일의 유도 리액턴스는 감소하고 축전기의 용량 리액턴스는 증가한다. 유도 리액턴스의 감소량을  $a$ , 용량 리액턴스의 증가량을  $b$ 라 하면, 회로의 등가 임피던스가  $3 + (3 - a)j - (3 + b)j = 3 - (a + b)j \Omega$ 이 되어 그 크기가  $\sqrt{9 + (a + b)^2} \Omega$ 으로  $3 \Omega$ 보다 크게 된다. 따라서 회로에 흐르는 전류가 감소하므로 저항에 흐르는 전류는 감소한다. 저항의 저항값은 일정하고 저항에 흐르는 전류는 감소하므로 저항에 걸리는 전압은 감소한다.

(4) 교류 전원의 진동수를 증가시키면 코일의 유도 리액턴스는 증가하고 축전기의 용량 리액턴스는 감소한다. 유도 리액턴스의 증가량을  $a$ , 용량 리액턴스의 감소량을  $b$ 라 하면, 회로의 등가 임피던스가  $3 + (3 + a)j - (3 - b)j =$

$3+(a+b)j \Omega$ 이 되어 그 크기가  $\sqrt{9+(a+b)^2} \Omega$ 으로  $3 \Omega$ 보다 크게 된다. 따라서 회로에 흐르는 전류가 감소하므로 저항에 흐르는 전류는 감소한다. 저항의 저항값은 일정하고 저항에 흐르는 전류는 감소하므로 저항에 걸리는 전압은 감소한다.

**정의 14 (필터 회로)** 입력된 신호 중 특정 주파수의 신호를 크게 출력하는 회로를 필터 회로라고 한다.

필터 회로는 용도에 따라 다양하지만, 물리 I 에서 주로 다루는 필터 회로는 2가지 종류가 있다.

**저주파 통과 회로** 입력 전압으로 진폭이 같은 저주파와 고주파의 신호를 보냈을 때, 출력 전압으로 저주파의 신호가 더 크게 출력되는 회로를 말한다. 예를 들어 RC회로에서 축전기에 출력부를 연결한 회로, RL회로에서 저항에 출력부를 연결한 회로가 있다.

**고주파 통과 회로** 입력 전압으로 진폭이 같은 저주파와 고주파의 신호를 보냈을 때, 출력 전압으로 고주파의 신호가 더 크게 출력되는 회로를 말한다. 예를 들어 RC회로에서 저항에 출력부를 연결한 회로, RL회로에서 코일에 출력부를 연결한 회로가 있다.

상대적으로 코일(L)이 고주파에서 저항 효과가 크고 축전기(C)가 저주파에서 저항 효과가 크므로 위와 같은 결과를 얻는다. 이에 대한 증명은 앞서의 예제에서의 논의로 충분하다.

독특한 것은 입력 전압으로 서로 다른 주파수의 신호를 동시에 보낼 수 있다는 것이다. 예를 들어 교류 전원의 전압  $V = V_1 \sin 2\pi t + V_2 \sin \pi t$ 와 같이 두 교류 전원을 연달아 단 경우를 생각할 수 있다. 이때 저항, 축전기, 코일에 걸리는 전압은  $V = V_1 \sin 2\pi t$ 으로 계산한 값과  $V = V_2 \sin \pi t$ 으로 계산한 값을 단순히 합하여 구할 수 있다. 전류도 마찬가지이다. 이러한 특성은 선형 회로<sup>21</sup>에서 나타나는 것인데, 교류 회로에서도 임피던스 모델을 이용하면 동일한 성질이 나타난다.

<sup>21</sup>간단히 이야기해서 저항과 직류 전원으로 된 회로