

[최고의 수험물리 전문가]

윤형철

변리사 탄탄물리

[개념+기출]

— 12장 전기회로 —

“물리는 외우는 과목이 아니라 생각하는 과목입니다.”

세 가지 강의 철학

목차

— 성장기반 물리

(Grow-based Physics)

— 취사선택 물리

(Cut-off Strategy Physics)

— 생각하는 물리

(Thinking Physics)



물리

윤형철 교수

물리 윤형철 교수입니다.

약력

전남과학고등학교 졸업
서울대학교 사범대학 물리교육과 졸업

전 대치 미래탐구
전 대치 새움학원
현 대치 링크물리
현 변리사스쿨 물리 전문교수

개념 POINT

[전기 개관]

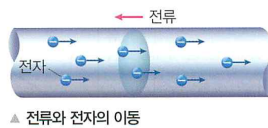
물리현상 (문제상황)	→ 물리량	물리법칙
전기현상	① 전하 ② 전기력 ③ 전기장 ④ 전기 퍼텐셜에너지 ⑤ 전기 퍼텐셜(전위) ⑥ 전기 퍼텐셜차(전위차)	쿨롱의 법칙 가우스 법칙

I. 전류

전하의 흐름을 전류라고 하지만, 움직이는 모든 전하가 전류를 형성하는 것은 아니다. 즉, 전류가 흐른다는 것은 도선의 단면을 통과하는 전하의 알짜 흐름이 있다는 것이다.

1. 전류

도선의 양 끝에 외부에서 전기장을 가하면 전기장과 반대 방향으로 (-)전하를 띤 자유 전자가 도선을 따라 이동하면서 전하를 운반하는데, 이러한 전하의 흐름을 전류라고 한다.



▲ 전류와 전자의 이동

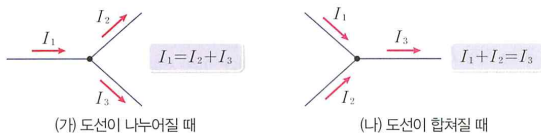
- (1) **전류의 방향**: 전자의 이동 방향과 반대 방향이다.
- (2) **전류의 세기**: 단위 시간 동안 도선의 한 단면을 통과하는 전하량으로, 시간 t 동안 도선의 한 단면을 통과하는 전하량이 Q 일 때, 전류의 세기 I 는 다음과 같다.

$$I = \frac{Q}{t} \quad (\text{단위: A})$$

전류의 세기의 단위로는 A(암페어)를 사용하며, 1초 동안 도선의 한 단면을 통과하는 전하량이 1 C일 때 전류의 세기를 1 A라고 한다. 즉, $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ 이다. 전자 1개의 전하량은 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 이므로, 1 A는 1초 동안 도선의 한 단면을 약 6.25×10^{18} 개의 전자가 이동할 때의 전류의 세기를 말한다.

2. 전기 회로에서의 전류

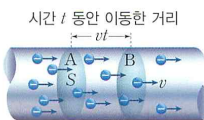
도선에 흐르는 전하의 양은 항상 일정하게 보존되므로, 그림 (가)와 같이 전기 회로에서 도선이 나누어질 때 나누어지기 전 전류의 세기와 나누어진 후 전류의 세기의 합은 같다. 즉, 전류의 세기는 일정하게 보존된다. 마찬가지로 그림 (나)와 같이 전기 회로에서 도선이 합쳐질 때도 전류의 세기는 일정하게 보존된다.



▲ 전기 회로에서의 전류

시야확장 + 도선에 흐르는 전류의 세기

그림과 같이 단위 부피당 n 개의 자유 전자를 포함하고 있는 단면적이 S 인 도선 속에서 자유 전자가 유동 속력 v 로 운동하고 있다. 시간 t 동안 A 에 있던 자유 전자가 B 까지 이동하였을 때 자유 전자가 휩쓸고 지나간 부피 $V = Svt$ 이고, 그 부피 속의 자유 전자의 수 $N = nV = nSvt$ 이다. 전자의 전하량을 $-e$ 라고 하면 시간 t 동안 B 를 통과한 총 전하량 $Q = Sevt$ 이다. 따라서 도선에 흐르는 전류의 세기 $I = \frac{Q}{t} = Sevn$ 이다.



전류의 방향

- 전류의 방향은 (+)전하가 이동하는 방향으로 정한다.
- 실제로 도선 속에서 전류는 (-)전하를 띤 자유 전자가 이동하는 것이므로, 전류의 방향은 전자의 이동 방향과 반대이다.

전류 단위의 표준

암페어(기호: A)는 전류의 SI 단위이다. 암페어는 기본 전하 e 를 C 단위로 나타낼 때 그 수치를 $1.602176634 \times 10^{-19}$ 로 고정함으로써 정의된다.

유동 속력

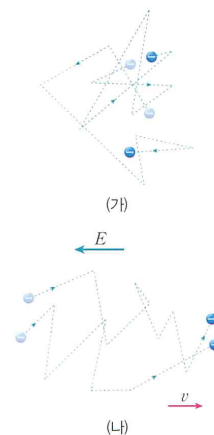


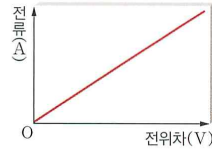
그림 (가)와 같이 전기장이 없을 때 도체 내의 전자는 일정한 방향 없이 자유롭게 움직인다. 반면 그림 (나)와 같이 전기장이 있을 때 도체 내의 전자는 전기력을 받아 전기장과 반대 방향으로 이동하는데, 이때 전기장과 관련한 방향의 전하의 속력을 유동 속력 v 라고 한다.

II. 옴의 법칙과 전기저항

옴의 법칙은 특정 물질에서 성립하는 경험 법칙이다. 이는 금속 도체에서 잘 들어맞고 제한적인 환경에서만 성립하는 식이지만, 실용적인 가치가 있다.

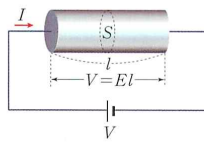
1. 옴의 법칙

(1) **옴의 법칙**: 도체 내에 흐르는 전류는 자유 전자의 흐름이므로, 전류의 세기는 전위차와 관련이 있다. 어떤 물체에 흐르는 전류의 세기가 전위차에 정비례한다는 것을 옴의 법칙이라고 한다. 옴의 법칙은 물체의 전기 저항이 전위차나 극성에 무관한 상황에서만 성립한다. 즉, 도체 혹은 반도체에 관계없이 균질한 모든 물질은 적당한 전기장 내에서 옴의 법칙을 따른다. 그러나 전기장이 매우 크면 옴의 법칙을 따르지 않는다.



▲ 전류와 전위차의 관계

(2) 단면적이 S 이고 길이가 l 인 직선 도선의 양단에 전위차 V 가 가해지면 도선 내에 전기장 E 가 형성되어 전류가 흐르게 된다. 이때 전류의 세기 I 는 전기장 E 와 도선의 단면적 S 에 비례한다. 또 균일한 전기장 내에서 전위차 $V=El$ 이므로, 전류의 세기 I 와 전위차 V 사이의 관계는



▲ 전류와 전위차

$$I \propto ES = \frac{V}{l} S \text{ 에서 } I = kV \text{ 가 된다.}$$

이때 비례 상수 $k = \frac{1}{R}$ 전기 저항 R 와 관련이 있으며, 이는 물질의 성질에 따라 달라진다.

(3) 전류의 세기 I , 전위차 V , 전기 저항 R 사이의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \frac{V}{R}$$

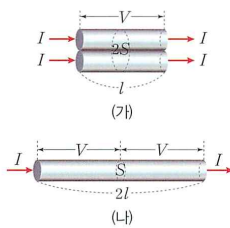
2. 전기 저항

(1) **전기 저항**: 전류의 세기 I 에 대한 전위차 V 의 비를 전기 저항 또는 저항 R 라고 한다.

$$R = \frac{V}{I} \text{ (단위: } \Omega \text{)}$$

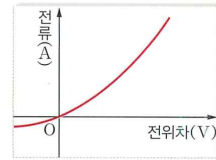
전기 저항의 단위로는 Ω (옴)을 사용하며, 도선의 양단에 1 V의 전위차를 걸었을 때 1 A의 전류가 흐르는 도선의 전기 저항을 1 Ω 이라고 한다. 즉, 1 $\Omega = 1 \text{ V/A}$ 이다.

(2) **도선의 전기 저항**: 도선의 모양에 따라 달라진다. 일반적으로 그림 (가)와 같이 도선의 단면적(S)이 넓어지면 같은 시간 동안 도선의 한 단면을 통과하는 자유 전자의 개수가 많아지므로, 전류의 세기가 세진다. 반면 그림 (나)와 같이 도선의 길이(l)가 길어지면 자유 전자가 원자들과 충돌하는 횟수가 많아지므로, 전기 저항이 커져 같은 시간 동안 도선의 한 단면을 통과하는 자유 전자의 개수가 줄어들어 전류의 세기가 약해진다.



▲ 도선의 단면적 및 길이와 전기 저항

옴의 법칙이 성립하지 않는 예



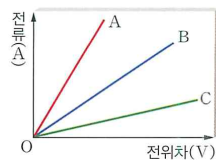
p-n 접합 다이오드는 순방향 바이어스일 때 전류가 급격히 흐르고, 역방향 바이어스일 때는 전류가 거의 흐르지 않는다. 따라서 p-n 접합 다이오드는 전류와 전위차의 관계가 비선형적이므로, 옴의 법칙이 성립하지 않는다.

전기 전도도

전위차를 걸었을 때 얼마나 전류를 잘 흐르게 하는가에 대한 척도를 전기 전도도 G 라고 한다. 이는 저항의 역수이며, 단위로는 S(지멘스)를 사용한다.

$$G = \frac{1}{R} = \sigma \frac{S}{l} \text{ (}\sigma\text{: 전기 전도율)}$$

전기 저항의 크기 비교



전류-전위차 그래프에서 기울기는 전기 저항의 역수를 나타내므로, 전기 저항은 C가 가장 크고, A가 가장 작다.

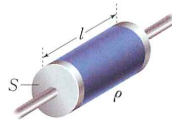
$$\Rightarrow R_A < R_B < R_C$$

개념 POINT

① 도선의 전기 저항: 도선의 전기 저항 R 는 도선의 길이 l 에 비례하고, 도선의 단면적 S 에 반비례한다.

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

이때 비례 상수 ρ 는 비저항이라고 한다.



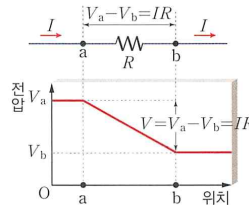
▲ 도선의 전기 저항

② 비저항: 비저항은 물질의 고유한 값으로, 단위로는 $\Omega \cdot m$ 를 사용한다. 이는 물질의 종류와 온도에 따라 달라지며, 길이가 1 m, 단면적이 $1 m^2$ 인 물질의 저항값을 나타낸다. 표는 20 °C일 때 여러 가지 물질의 비저항을 나타낸 것이다.

물질	비저항($\Omega \cdot m$)	물질	비저항($\Omega \cdot m$)
은	1.62×10^{-8}	납	2.2×10^{-7}
구리	1.69×10^{-8}	고무	$(1 \sim 5) \times 10^{13}$
철	9.68×10^{-8}	유리	$10^{10} \sim 10^{14}$

③ 저항에 의한 전압 강하: 그림과 같이 전기 회로에 전류 I 가 a점에서 b점으로 저항 R 를 지나면 a점의 전위 V_a 가 b점의 전위 V_b 보다 높다. 즉, 전류는 항상 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐른다. 이때 b점의 전위 V_b 가 a점의 전위 V_a 보다 IR 만큼 낮아진다. 이를 저항에 의한 전압 강하라고 한다.

$$V = V_a - V_b = IR$$



▲ 저항에 의한 전압 강하

시야확장 + 온도에 따른 전기 저항의 변화

옴의 법칙에 의하면 저항이 일정할 때 전압을 증가 또는 감소시키면 전류도 같은 비율로 증가 또는 감소한다. 그러나 실제 실험에서는 전압과 전류의 비례 정도가 일정하지 않은 결과가 나온다. 이는 실험을 할 때 니크롬선과 같은 저항에 전류가 흐르면 전류에 의해 열이 발생하고, 이로 인해 저항의 온도가 변하여 물질의 저항값이 달라지기 때문이다.

어떤 도체의 0 °C일 때의 비저항을 ρ_0 이라고 하면, t °C일 때의 비저항 ρ 는 적당한 온도 범위에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

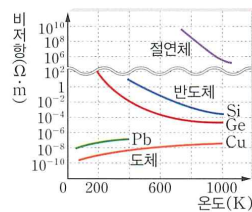
$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$$

이때 α 는 물질의 고유한 상수로, 비저항의 온도 계수라고 한다. 단면적이 S , 길이가 l 인 도체의 t °C일 때의 비저항을 ρ , 저항을 R 라고 하고, 0 °C일 때의 비저항을 ρ_0 , 저항을 R_0 이라고 하면, R , R_0 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \rho \frac{l}{S}, R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$$

따라서 $\frac{R}{R_0} = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\rho_0(1 + \alpha t)}{\rho_0}$ 이므로, t °C일 때 R 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = R_0(1 + \alpha t)$$



▲ 온도에 따른 물질의 비저항

온도에 따른 비저항

온도가 높아질수록 도체는 비저항이 커지고, 반도체와 절연체는 비저항이 작아진다.

개념 POINT

전기 저항과 비저항

전기 저항은 특정한 물체의 성질이고, 비저항은 물체를 구성하는 물질의 성질이다.

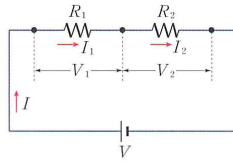
III. 저항의 연결

누전 차단 장치는 전원에 직렬로 연결하고, 가정용 전기 기구들은 전원에 병렬로 연결한다. 이는 저항의 연결 방법에 따라 회로의 특성이 달라지기 때문이다.

1. 저항의 직렬연결

전류가 연속해서 각 저항에 흐르도록 저항을 연결하는 방법을 직렬연결이라고 한다.

- (1) 그림과 같이 저항 R_1 과 R_2 를 직렬연결한 경우 전체 전류는 전하량 보존 법칙에 의해 각 저항에 흐르는 전류와 같고, 전체 전압은 각 저항에 의한 전압 강하의 합과 같다. 전체 전류 $I=I_1=I_2$ 이므로, R_1 과 R_2 양단에 걸리는 전압 V_1 과 V_2 를 구하면 $V_1=IR_1$, $V_2=IR_2$ 이다. 즉, 각 저항의 양단에 걸리는 전압은 각 저항에 비례한다. 따라서 합성 저항을 R 라고 할 때 전체 전압 $V=V_1+V_2=I(R_1+R_2)=IR$ 이므로, R 는 다음과 같다.



▲ 저항의 직렬연결

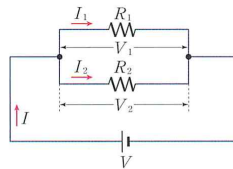
$$R=R_1+R_2$$

- (2) 비저항이 ρ , 단면적이 S , 길이가 각각 l_1 , l_2 인 저항 $R_1=\rho \frac{l_1}{S}$ 과 $R_2=\rho \frac{l_2}{S}$ 를 직렬연결하면 전체 길이는 l_1+l_2 가 되므로, 합성 저항 $R=\rho \frac{l_1+l_2}{S}=\rho \frac{l_1}{S}+\rho \frac{l_2}{S}=R_1+R_2$ 이다.

2. 저항의 병렬연결

전류가 각 저항에 나누어져 흐르도록 저항을 연결하는 방법을 병렬연결이라고 한다.

- (1) 그림과 같이 저항 R_1 과 R_2 를 병렬연결한 경우 전체 전압은 각 저항에 의한 전압 강하와 같고, 전체 전류는 전하량 보존 법칙에 의해 각 저항에 흐르는 전류의 합과 같다. 전체 전압 $V=V_1=V_2$ 이므로, R_1 과 R_2 에 흐르는 전류 I_1 과 I_2 를 구하면 $I_1=\frac{V}{R_1}$, $I_2=\frac{V}{R_2}$ 이다. 즉, 각 저항에 흐르는 전류는 각 저항에 반비례한다. 따라서 합성 저항을 R 라고 할 때 전체 전류 $I=I_1+I_2=V\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)=\frac{V}{R}$ 이므로, R 의 역수는 다음과 같다.



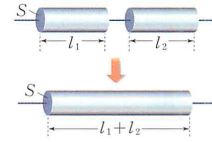
▲ 저항의 병렬연결

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}$$

- (2) 비저항이 ρ , 길이가 l , 단면적이 각각 S_1 , S_2 인 저항 $R_1=\rho \frac{l}{S_1}$ 과 $R_2=\rho \frac{l}{S_2}$ 을 병렬연결하면 전체 단면적은 S_1+S_2 가 되므로, 합성 저항 R 의 역수 $\frac{1}{R}=\frac{S_1+S_2}{\rho l}=\frac{S_1}{\rho l}+\frac{S_2}{\rho l}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}$ 이다.

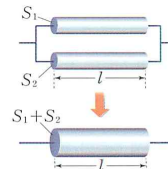
개념 POINT

저항의 직렬연결과 도선의 길이



저항을 직렬연결할 때 합성 저항이 커지는 것은 도선의 길이와 저항의 관계로 설명할 수 있다. 도선을 직렬로 연결하면 단면적은 변하지 않고 길이만 늘어난다. 따라서 도선을 따라 이동하는 전자의 흐름을 방해하는 길이가 더 길어지므로, 저항이 커지게 된다.

저항의 병렬연결과 도선의 단면적



저항을 병렬연결할 때 합성 저항이 작아지는 것은 도선의 단면적과 저항의 관계로 설명할 수 있다. 도선을 병렬로 연결하면 길이는 변하지 않고 단면적만 커진다. 따라서 도선의 한 단면을 통과하는 전자의 수가 많아져 전류가 잘 흐르므로, 저항은 작아지게 된다.

3. 저항의 혼합 연결

심화 44쪽

여러 개의 저항을 직렬과 병렬로 혼합하여 연결하는 방법을 저항의 혼합 연결이라고 한다. 여러 개의 저항이 혼합 연결되어 있을 때에는 분기점을 기준으로 하나씩 단계별로 합성 저항을 구하는 과정을 반복하여 전체 합성 저항을 구한다.

(1) 직렬연결에 병렬연결이 포함된 경우

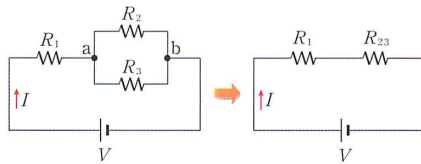
그림과 같이 연결된 회로에서 전체 합성 저항은 다음과 같다.

① 분기점 a와 b 사이에서 저항 R_2 와

R_3 은 병렬연결되어 있으므로, R_2

와 R_3 의 합성 저항 R_{23} 의 역수 $\frac{1}{R_{23}}$

$= \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$ 에서 $R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$ 이다.



▲ 직렬연결에 병렬연결이 포함된 경우

② 저항 R_1 과 R_{23} 은 직렬연결되어 있으므로, 전체 합성 저항 R 는 다음과 같다.

$$R = R_1 + R_{23} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

(2) 병렬연결에 직렬연결이 포함된 경우

그림과 같이 연결된 회로에서 전체 합성 저항은 다음과 같다.

① 분기점 a와 b 사이에서 저항 R_2

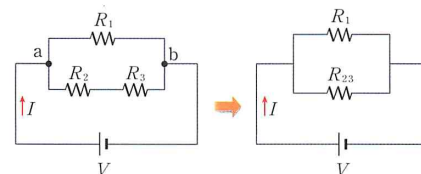
와 R_3 은 직렬연결되어 있으므로,

R_2 와 R_3 의 합성 저항 $R_{23} = R_2 + R_3$

이다.

② 저항 R_1 과 R_{23} 은 병렬연결되어

있으므로, 전체 합성 저항 R 의 역수



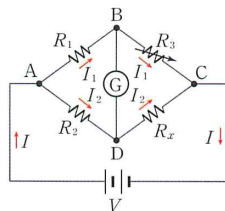
▲ 병렬연결에 직렬연결이 포함된 경우

$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + R_3}$ 이다. 따라서 R 는 다음과 같다.

$$R = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}$$

시야확장 + 휘트스톤 브리지

4개의 저항을 대칭으로 연결하여 미지의 저항을 정밀하게 측정할 수 있는 회로를 휘트스톤 브리지라고 한다. 그림은 저항 R_1 , R_2 , 가변 저항 R_3 , 미지의 저항 R_x 그리고 검류계를 연결한 모습을 나타낸 것이다. R_3 을 조절하여 검류계에 전류가 흐르지 않도록 하면 B점과 D점의 전위는 같아진다. 이는 R_1 과 R_2 양단에 걸리는 전압이 같다는 것을 의미하므로, R_1 과 R_2 에 흐르는 전류를 각각 I_1 , I_2 라고 하면 $I_1 R_1 = I_2 R_2$ 가 된다. 이때 R_1 과 R_3 , R_2 와 R_x 가 각각 직렬연결되어 있으므로, R_3 과 R_x 에 흐르는 전류도 각각 I_1 , I_2 이다. 또 R_3 과 R_x 양단에 걸리는 전압도 같으므로, $I_1 R_3 = I_2 R_x$ 가 된다. 따라서 다음과 같은 관계를 통해 R_x 를 구할 수 있다.



▲ 휘트스톤 브리지

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x}$$

IV. 전기 에너지와 소비전력

흐르는 물이 물레방아를 돌리는 일을 할 수 있는 것과 같이 전하의 흐름인 전류는 전동기를 돌리는 일을 할 수 있다.

1. 전기 에너지와 소비 전력

(1) 전기 에너지

- ① 전류가 흐를 때 공급되는 에너지를 전기 에너지라고 한다. 움직이는 전하는 회로에 열을 발생시키거나 전동기를 돌리는 등의 일을 하므로, 전하가 하는 일만큼의 전기 에너지가 감소하게 된다. 즉, 전하를 이동시킬 때 하는 일은 저항에서 소모되는 전기 에너지와 같다.
- ② 저항값이 R 인 저항의 양단에 전압 V 를 걸어 주었을 때 흐르는 전류의 세기가 I 라면, 시간 t 동안 도선의 한 단면을 통과하는 전하량 $q=It$ 이므로, 공급되는 전기 에너지 W 는 다음과 같다.

$$W=qV=VIt=I^2Rt=\frac{V^2}{R}t \text{ (단위: J)}$$

- ③ 전기 에너지의 단위로는 J(줄)을 사용한다.

(2) 소비 전력

- ① 단위 시간 동안 소비하거나 생산되는 전기 에너지의 양을 소비 전력이라고 한다.
- ② 저항값이 R 인 저항의 양단에 전압 V 를 걸어 주었을 때 흐르는 전류의 세기 I 가 시간 t 동안 전기 에너지 W 만큼의 일을 하였다면 소비 전력 P 는 다음과 같다.

$$P=\frac{W}{t}=VI=I^2R=\frac{V^2}{R} \text{ (단위: W)}$$

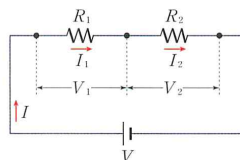
- ③ 소비 전력의 단위로는 W(와트)를 사용한다. 1 V의 전위차로 1 A의 전류가 흐를 때의 소비 전력을 1 W라고 한다. 즉, 1초 동안에 1 J의 일을 하는 것과 같다.

$$1 \text{ W}=1 \text{ V} \times 1 \text{ A}=1 \text{ V} \cdot \text{A}=1 \text{ J/s}$$

2. 저항의 연결과 소비 전력

(1) 저항의 직렬연결과 소비 전력

- ① 그림과 같이 저항 R_1 과 R_2 를 직렬연결한 경우 각 저항에 흐르는 전류의 세기가 같으므로, $P=I^2R$ 로부터 각 저항에서 소모되는 전력 P_1, P_2 를 구하면 $P_1=I^2R_1, P_2=I^2R_2$ 이다. 즉, 각 저항에서 소모되는 전력은 각 저항에 비례한다. 이때 전체 소비 전력 $P=VI=\frac{V^2}{R_1+R_2}$ 이다.



▲ 저항의 직렬연결에서의 소비 전력

- ② 회로에서 직렬연결한 저항의 개수가 증가할수록 합성 저항은 커진다. 이때 회로 전체에 걸리는 전압이 일정하므로, 회로에 흐르는 전류의 세기가 감소한다. 따라서 전체 소비 전력은 감소한다.

개념 POINT

전력량

- 전력량: 전력은 단위 시간 동안에 소비하거나 생산되는 전기 에너지이므로, 어느 시간 동안에 사용한 전기 에너지의 총량은 전력(P)과 사용 시간(t)의 곱으로 구할 수 있다. 이 전기 에너지의 총량을 전력량 W 라고 하며, W 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W=Pt$$

- 전력량의 단위: 전력량은 에너지이므로, 단위로 J(줄)을 사용해도 되지만, 실용적으로는 Wh(와트시)가 사용된다. 1 W의 전력으로 1시간 동안 사용한 전력량을 1 Wh라고 한다.

$$1 \text{ Wh}=1 \text{ W} \times 3600 \text{ s}=3600 \text{ J}$$

직렬연결의 활용

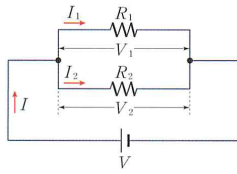
- 누전 차단기는 가정용 전기 기구에 직렬로 연결한다. 누전 차단기가 끊어지면 가정에 들어오는 모든 전류가 차단된다.
- 장식용 전구는 각 전구에 걸리는 전압이 작으므로, 가정용 220 V의 전원에 연결하여 사용하려면 여러 개의 장식용 전구를 직렬로 연결하여 전압 분할을 통해 각 전구에 적절한 전압이 걸리도록 해야 한다.

(2) 저항의 병렬연결과 소비 전력

① 그림과 같이 저항 R_1 과 R_2 를 병렬연결한 경우 각 저항의 양단에 걸리는 전압이 같으므로, $P = \frac{V^2}{R}$ 으로부터

각 저항에서 소모되는 전력 P_1, P_2 를 구하면 $P_1 = \frac{V^2}{R_1}$, $P_2 = \frac{V^2}{R_2}$ 이다. 즉, 각 저항에서 소모되는 전력은 각 저항에 반비례한다. 이때 전체 소비 전력 $P = VI = V^2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ 이다.

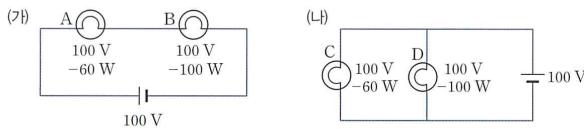
② 회로에서 병렬연결한 저항의 개수가 증가할수록 합성 저항은 작아진다. 이때 회로 전체에 걸리는 전압이 일정하므로, 회로에 흐르는 전류의 세기는 증가한다. 따라서 전체 소비 전력은 증가한다.



▲ 저항의 병렬연결에서의 소비 전력

예제

1. 그림 (가)는 전압이 100 V로 일정한 전원에 전구 A와 B를 직렬연결한 모습을, (나)는 전압이 100 V로 일정한 전원에 전구 C와 D를 병렬연결한 모습을 나타낸 것이다. 이때 A, C는 100 V - 60 W이고, B, D는 100 V - 100 W이다.

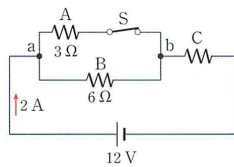


A~D를 밝은 전구부터 차례로 나열하십시오. (단, 전구의 밝기는 소비 전력에 비례한다.)

해설 소비 전력 $P = \frac{V^2}{R}$ 에서 저항 $R = \frac{V^2}{P}$ 이므로, A, C의 저항은 $R_A = R_C = \frac{(100 \text{ V})^2}{60 \text{ W}} \approx 167 \Omega$ 이고, B, D의 저항은 $R_B = R_D = \frac{(100 \text{ V})^2}{100 \text{ W}} = 100 \Omega$ 이다. (가)에서 직렬연결된 A와 B의 각 저항에서 소모되는 전력은 각 저항에 비례하므로, 소비 전력은 A가 B보다 크다. (나)에서 병렬연결된 C와 D의 각 저항에서 소모되는 전력은 저항에 반비례하므로, 소비 전력은 D가 C보다 크다. 그런데 합성 저항은 병렬연결일 때가 직렬연결일 때보다 작으므로, 소비 전력은 병렬연결일 때가 더 크다. 따라서 전구의 밝기는 D - C - A - B 순으로 밝다.

정답 D - C - A - B

2. 그림과 같이 전압이 12 V로 일정한 전원에 저항값이 각각 3 Ω, 6 Ω인 저항 A, B와 저항값을 알 수 없는 저항 C를 혼합 연결하였다. 스위치 S를 닫았을 때 회로에 흐르는 전체 전류의 세기는 2 A이다.



- (1) C의 저항값은 몇 Ω인지 구하십시오.
- (2) C에서 소모되는 전력은 몇 W인지 구하십시오.
- (3) S를 열었을 때 분기점 a와 b 사이에 걸리는 전압은 몇 V인지 구하십시오.

해설 (1) 병렬연결된 A와 B의 합성 저항 $R_{AB} = \frac{1}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}} = \frac{1}{\frac{1}{3 \Omega} + \frac{1}{6 \Omega}} = 2 \Omega$ 에서 $R_{AB} = 2 \Omega$ 이다. 또 직렬연결된 A, B와 C의 전체 합성 저항 $R = 2 \Omega + R_C$ 이다. 따라서 $2 \Omega + R_C = \frac{12 \text{ V}}{2 \text{ A}}$ 이므로, $R_C = 4 \Omega$ 이다.
(2) 소비 전력 $P = I^2 R$ 이므로, C에서 소모되는 전력 $P = (2 \text{ A})^2 \times 4 \Omega = 16 \text{ W}$ 이다.
(3) S를 열면 B와 C만 직렬연결되므로, 전체 전류의 세기 $I = \frac{12 \text{ V}}{10 \Omega} = 1.2 \text{ A}$ 이다. 따라서 분기점 a와 b 사이에 걸리는 전압을 V_{ab} 라고 할 때 $V_{ab} = 1.2 \text{ A} \times 6 \Omega = 7.2 \text{ V}$ 이다.

정답 (1) 4 Ω (2) 16 W (3) 7.2 V

병렬연결의 활용

- 대부분의 가정용 전기 가구들은 전원에 병렬로 연결한다. 전원에 병렬로 연결하면 각 전기 가구를 사용하는 데 필요한 전압을 일정하게 유지할 수 있고, 하나의 전기 가구를 분리하더라도 다른 전기 가구를 정상적으로 사용할 수 있다.
- 멀티탭은 여러 전기 가구를 병렬로 연결하는 기구이다. 그러나 한꺼번에 너무 많은 전기 가구를 연결하여 사용하면 멀티탭의 전선에 허용 전류보다 더 큰 전류가 흐르므로, 발열로 인한 화재의 위험이 생긴다. 이 때문에 과전류 차단 장치가 직렬로 연결된 멀티탭이 개발되었다.

저항의 직렬연결과 병렬연결의 특징

- 직렬연결된 저항 중 하나가 끊어지면 회로 전체에 전류가 흐르지 않는다.
- 병렬연결된 저항 중 하나가 끊어져도 다른 저항에는 계속 전류가 흐른다.

예제 1의 소비 전력의 수학적 풀이

- (가) 회로에서 A와 B의 합성 저항: $R_{AB} = \frac{800}{3} \Omega$
- (가) 회로의 전류: $I_{AB} = \frac{100 \text{ V}}{\frac{800}{3} \Omega} = \frac{3}{8} \text{ A}$
- (가)에서 A의 소비 전력: $P_A = I_{AB}^2 R_A = \left(\frac{3}{8} \text{ A} \right)^2 \times \frac{(100 \text{ V})^2}{60 \text{ W}} = \frac{375}{16} \text{ W}$
- (가)에서 B의 소비 전력: $P_B = I_{AB}^2 R_B = \left(\frac{3}{8} \text{ A} \right)^2 \times 100 \Omega = \frac{225}{16} \text{ W}$
- (나)에서 C와 D는 모두 정격 전압인 100 V가 걸리므로, 소비 전력은 각각의 정격 소비 전력과 같다.

개념 POINT

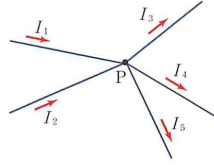
V. 키르히호프의 법칙

개념 POINT

다중 회로에서 각 저항에 흐르는 전류의 세기나 각 저항의 양단에 걸리는 전압은 키르히호프 법칙을 이용하여 구하면 편리하다.

1 키르히호프 제1법칙

단한 회로의 한 접합점에 들어오는 전류의 합은 그 접합점에서 나가는 전류의 합과 같다. 그림과 같이 여러 회로가 P점에서 만날 때 P점에 들어오는 전류와 나가는 전류의 합은 같다. P점에 들어오는 전류를 I_1, I_2 라고 하고, P점에서 나가는 전류를 I_3, I_4, I_5 라고 하면 $I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$ 이다. 이때 P점에 들어오는 전류를



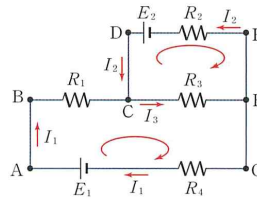
▲ 키르히호프 제1법칙
(+), P점에서 나가는 전류를 (-)라고 하면, 키르히호프 제1법칙은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$

전류의 세기는 단위 시간 동안 도선의 한 단면을 통과하는 전하량이므로, 키르히호프 제1법칙은 전하량 보존 법칙의 확장이다.

2 키르히호프 제2법칙

임의의 닫힌 회로에서 회로 내 모든 전압의 합은 0이다. 즉, 임의의 닫힌 회로를 따라 한 바퀴 돌 때 그 회로의 기전력의 총합은 각 저항에 의한 전압 강하의 합과 같다. 키르히호프 제2법칙을 사용할 때는 먼저 회로를 분석하는 방향(시계 방향 또는 반시계 방향)을 정하고, 그 방향으로 돌아가면서 기전력 E 와 저항에 의한 전압 강하 IR 의 부호를 정한다. 이때 부호는 전압이 높아질 때를 (+), 전압이 낮아질 때를 (-)라고 한다. 즉, 키르히호프 제2법칙은 다음과 같다.



▲ 키르히호프 제2법칙

$$\sum_{k=1}^n E_k + \sum_{i,j=1}^n I_i R_j = 0$$

그림과 같이 화살표 방향으로 회로를 돌 때 키르히호프 제2법칙을 이용하면 다음과 같다.

• ABCFG 회로: $E_1 - I_1 R_1 - I_3 R_3 - I_1 R_4 = 0$

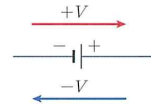
• CDEF 회로: $-E_2 + I_2 R_2 + I_3 R_3 = 0$

• ABCDEFG 회로: $E_1 - I_1 R_1 - E_2 + I_2 R_2 - I_1 R_4 = 0$

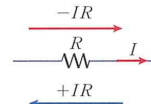
키르히호프 제2법칙의 양변에 전류 I_i 를 곱하면 $\sum_{k=1}^n E_k I_i + \sum_{j=1}^n I_i^2 R_j = 0$ 이 되는데, 이때 $E_k I_i$ 는 전원에서 공급하는 전력이고, $I_i^2 R_j$ 는 저항에서 소모되는 전력이므로, 키르히호프 제2법칙은 에너지 보존 법칙을 의미한다. 또 옴의 법칙 $V = IR$ 은 $V - IR = 0$ 으로 표현할 수 있으므로, 키르히호프 제2법칙의 가장 간단한 형태이다.

키르히호프 법칙에서 전압 부호의 변환

• 전원을 지날 때



• 저항을 지날 때



■ 변리사 기출문제

개념 POINT

1. [2002년 변리사] (하)

전기저항이 R 인 세 개의 저항이 있다. 세 개를 모두 사용하여 전기회로를 꾸미고자 할 때 저항의 조합에서 가능하지 않은 저항값은?¹⁾

① $\frac{4}{3}R$

② $3R$

③ $\frac{1}{3}R$

④ $\frac{2}{3}R$

⑤ $\frac{3}{2}R$

2. [2003년 변리사] (상)

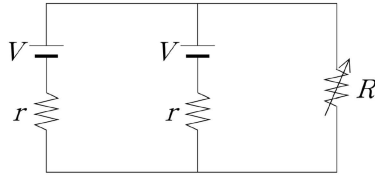
발전소에서 발전된 전기는 일반적으로 고전압으로 송전하여 1차 변전소, 2차 변전소를 지나면서 전압을 낮추어 가정으로 보낸다. 동일한 전력을 송전하는데 전압을 10배 높여서 송전할 때의 효과를 가장 바르게 설명한 것은?²⁾

- ① 송전선에 흐르는 최대 전류가 10배 증가한다.
- ② 송전선의 저항이 0.1배로 된다.
- ③ 송전선에서 소모되는 전력이 0.01배로 된다.
- ④ 가정에 100배의 에너지를 공급한다.
- ⑤ 송전선의 저항은 오히려 증가한다.

개념 POINT

3. [2007년 변리사] (중)

기전력이 V 이고 내부저항이 r 인 전지 두 개와 저항을 그림과 같이 병렬 연결하였다. 저항 R 의 크기를 조절할 수 있다면 저항 R 이 전지로부터 얻을 수 있는 최대 소비전력은 얼마인가?³⁾



① $\frac{V^2}{r}$

② $\frac{V^2}{2r}$

③ $\frac{V^2}{4r}$

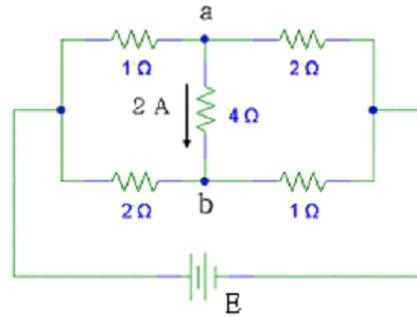
④ $\frac{2V^2}{r}$

⑤ $\frac{4V^2}{r}$

개념 POINT

4. [2009년 변리사] (중)

그림은 다섯 개의 저항과 기전력이 E 인 전원장치를 이용하여 구성된 회로를 나타낸 것이다.



점 a에서 점 b로 4Ω 의 저항에 $2A$ 의 전류가 흐를 때 기전력 E 는?4)

- ① $24V$ ② $32V$ ③ $36V$ ④ $40V$ ⑤ $60V$

개념 POINT

5. [2010년 변리사] (하)

저항이 R 인 두 도선 A, B가 있다. A와 B의 양단을 병렬로 연결하고 전압 V 를 양단에 걸어 줄 때, A 도선에 흐르는 전류는?⁵⁾

① $\frac{V}{4R}$

② $\frac{V}{2R}$

③ $\frac{V}{R}$

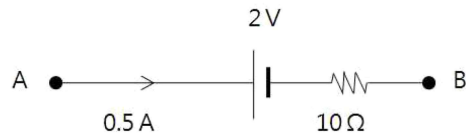
④ $\frac{2V}{R}$

⑤ $\frac{4V}{R}$

개념 POINT

6. [2011년 변리사] (하)

그림은 A에서 B방향으로 $0.5A$ 의 전류가 흐르고 있는 회로의 일부를 나타낸 것이다. 저항은 10Ω 이고, 전지의 기전력은 $2V$ 이다.



두 점 A, B의 전위를 각각 V_A , V_B 라고 할 때, $V_A - V_B$ 는? (단, 전지의 내부저항은 무시한다.)⁶⁾

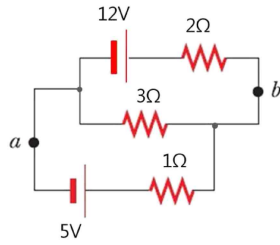
- ① $2V$ ② $3V$ ③ $5V$ ④ $6V$ ⑤ $7V$

개념 POINT

7. [2013년 변리사] (상)

그림의 회로에서 점 a와 b사이의 전위차($|\Delta V_{ab}|$)와 3Ω 의 저항에서 5초 동안 소모되는 에너지(E)는?7)

개념 POINT



- ① $|\Delta V_{ab}| = 3V, E = 15J$ ② $|\Delta V_{ab}| = 3V, E = 30J$ ③ $|\Delta V_{ab}| = 6V, E = 60J$
 ④ $|\Delta V_{ab}| = 9V, E = 135J$ ⑤ $|\Delta V_{ab}| = 12V, E = 240J$

8. [2015년 변리사] (중)

같은 저항값 R 을 갖는 두 저항기를 병렬로 연결한 회로 양단에 내부 저항이 0.05Ω 이고 전압이 $15V$ 인 전지를 연결하면 저항기 1개에 흐르는 전류가 I_p 이다. 또한, 이들 저항기를 직렬로 연결한 회로 양단에 같은 전지를 연결하면 저항기 1개에 흐르는 전류가 I_s 이다. $\frac{I_p}{I_s} = \frac{3}{2}$ 일 때 R 값은? ⁸⁾

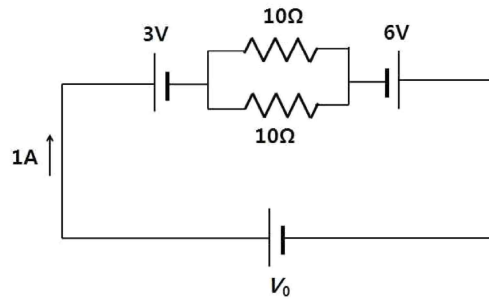
- ① $\frac{1}{5}\Omega$ ② $\frac{1}{2}\Omega$ ③ 1Ω ④ 2Ω ⑤ 5Ω

개념 POINT

9. [2016년 변리사] (하)

그림과 같은 회로에 1A의 전류가 흐르고 있다. V_0 은?9)

개념 POINT



① 1V

② 2V

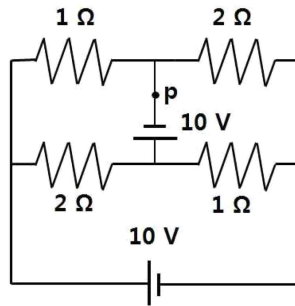
③ 3V

④ 4V

⑤ 5V

10. [2017년 변리사] (중)

그림과 같이 4개의 저항과 2개의 전지로 회로를 구성하였다. 회로상의 점 p에 흐르는 전류의 세기는? ¹⁰⁾



① $\frac{10}{3}A$

② $5A$

③ $\frac{20}{3}A$

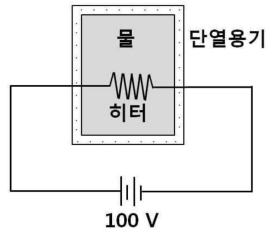
④ $10A$

⑤ $15A$

개념 POINT

11. [2017년 변리사] (중)

그림과 같이 단열 용기에 가득 채워진 $10.0^{\circ}C$ 의 물 $1.0kg$ 을 히터를 이용하여 10분간 가열한 결과, 용기의 부피 변화 없이 물이 $60.0^{\circ}C$ 의 평형상태에 도달하였다. 히터 양단에 걸리는 전압이 $100V$ 일 때 히터의 저항값은 얼마인가? (단, 온도 증가에 따른 히터의 저항값 변화는 무시하고, 히터의 열은 모두 물로 전달되며, 물의 등적 비열은 $4000J/kg \cdot ^{\circ}C$ 로 가정한다.)¹¹⁾

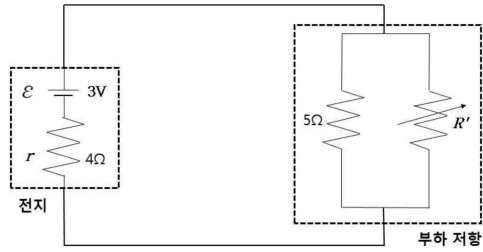


- ① 20Ω ② 25Ω ③ 30Ω ④ 35Ω ⑤ 40Ω

개념 POINT

12. [2021년 변리사] (하)

그림은 전지와 부하 저항이 연결된 회로이다. 부하 저항은 5Ω 인 저항과 R' 인 가변 저항이 병렬로 연결되어 있다. 전지의 기전력(\mathcal{E})은 $3V$ 이고, 내부 저항(r)은 4Ω 이다. 부하 저항에 최대 전력(electric power)을 전달하기 위한 R' 은?¹²⁾



- ① 1Ω ② 4Ω ③ 5Ω ④ 9Ω ⑤ 20Ω

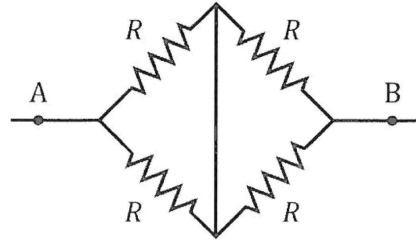
3.

개념 POINT

13. [2022년 변리사] (하)

그림은 저항값이 R 인 4개의 저항으로 구성된 어느 회로의 일부를 나타낸 것이다. 두 지점 A와 B 사이의 등가(합성)저항값은?¹³⁾

개념 POINT



① $\frac{1}{4}R$

② $\frac{1}{2}R$

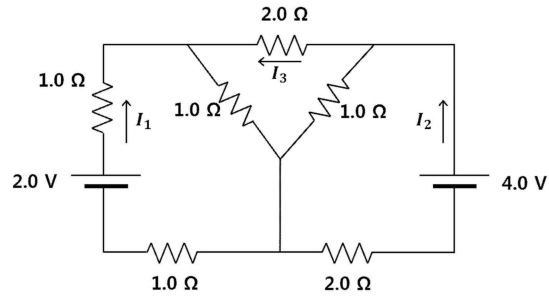
③ R

④ $2R$

⑤ $4R$

14. [2024년 변리사] (상)

그림에서 회로에 흐르는 전류 I_1 과 I_2 로 옳은 것은?¹⁴⁾



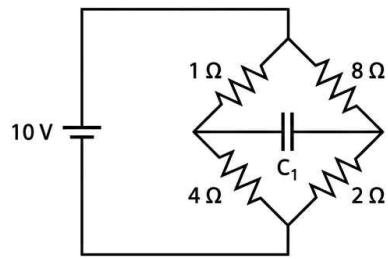
- ① $I_1 = 0.4A, I_2 = 1.2A$ ② $I_1 = 0.4A, I_2 = 1.4A$ ③ $I_1 = 0.4A, I_2 = 1.6A$
 ④ $I_1 = 0.6A, I_2 = 1.2A$ ⑤ $I_1 = 0.6A, I_2 = 1.4A$

개념 POINT

15. [2026년 변리사] (중)

그림과 같은 회로에서 전기 용량이 $1\mu F$ 인 축전기 C_1 이 완전히 충전되어 있다. C_1 에 충전된 전하량은?¹⁵⁾

개념 POINT



① $4\mu C$

② $6\mu C$

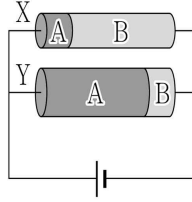
③ $8\mu C$

④ $10\mu C$

⑤ $12\mu C$

■ 개념확인문제

16. 그림과 같이 금속 A, B를 연결하여 만든 원통형 저항 X, Y를 전압이 일정한 전원에 연결하여 회로를 구성하였다. 표는 X, Y를 이루는 A, B의 단면적과 길이를 나타낸 것이고, A, B의 비저항은 각각 ρ_0 , $2\rho_0$ 이다. X와 Y에서 소비되는 전력은 각각 P_X , P_Y 이다.



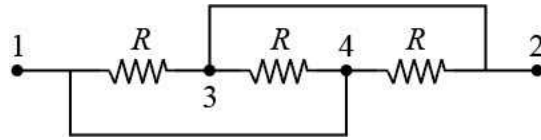
저항	단면적	A의 길이	B의 길이
X	S	L	$4L$
Y	$2S$	$4L$	L

$P_X:P_Y$ 는? ¹⁶⁾

- ① 1:3 ② 1:2 ③ 1:1 ④ 3:2 ⑤ 2:1

개념 POINT

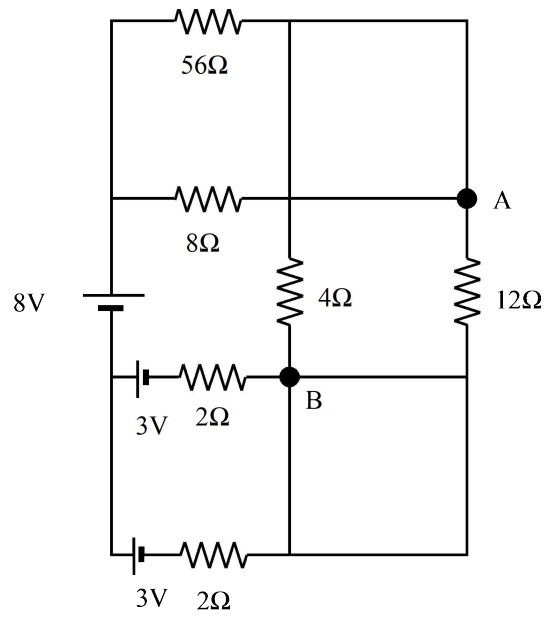
17. 다음 그림의 회로에서 두 점 1,2사이의 총 저항을 구하라.¹⁷⁾



개념 POINT

18. 아래의 회로에 대해 다음에 답하여라.¹⁸⁾

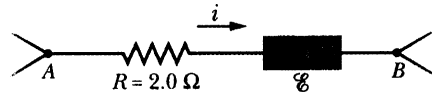
개념 POINT



- (1) 56Ω 의 저항에 흐르는 전류를 구하여라.
- (2) 2Ω 의 저항에 흐르는 전류를 구하여라.

19. 그림은 어떤 회로의 일부분을 보여주는 것이다. 전류 $i = 1.0\text{A}$ 가 표시된 방향으로 지나갈 때, AB 사이에서 소모되는 전력은 50W 이다.¹⁹⁾

개념 POINT



- (1) A 와 B 사이의 전기 퍼텐셜차는 얼마인가?
- (2) 기전력 장치 \mathcal{E} 에는 내부 저항이 없다. 기전력은 얼마인가?
- (3) \mathcal{E} 의 왼쪽(A 쪽)과 오른쪽(B 쪽)의 극성은 각각 무엇인가?

20. 금속 도선 내 전자는 끊임없이 불규칙적인 운동을 한다. 도선 양단에 전위차가 생기면 전자는 0이 아닌 평균 속도로 전위가 높은 방향으로 움직인다. 이를 전자의 운동이라 하고 전자의 평균 속도를 유동 속도라고 한다. 단면적이 1.0 m^2 인 구리 도선에 8.0 A 의 전류가 흐르고 있을 때, 구리 도선 내 전자의 유동 속도는? (단, 구리의 전자 밀도는 $1.0 \times 10^{23}/\text{m}^3$ 이고 기본전하량은 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 이다.)²⁰⁾

- ① $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ② $1.3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ③ $1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
 ④ $2.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ⑤ $5.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

개념 POINT

21. 어느 도선 내에서 자유 전자가 같은 방향으로 이동하고 있다. (단, 전자의 전하량의 크기는 e 이다.)²¹⁾

개념 POINT

(1) 단위 길이당 n 개씩 들어 있는 자유 전자가 평균 속력 v 로 운동할 때, 이 도선을 흐르는 전류의 세기는 얼마인가?

(2) 만일 단위 부피 속의 전자의 개수가 n 개이고, 단면적이 S 인 도선에 전류 I 가 흐르고 있다면, 전자의 평균 이동 속력은 얼마인가?

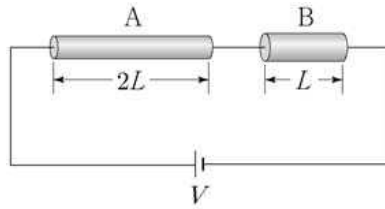
22. 전자가 반지름이 R 인 원둘레를 속도 v 로 돌고 있을 때 전류의 세기는?²²⁾

- ① $\frac{ev}{R}$ ② $\frac{ev}{2\pi R}$ ③ $\frac{2\pi ev}{R}$ ④ evR ⑤ $2\pi R$

개념 POINT

23. 그림과 같이 동일한 재료의 원통형 금속 막대 A, B를 전압이 V 로 일정한 전원에 연결하여 회로를 구성하였다. A, B의 단면적은 각각 $2S$, $3S$ 이고, 길이는 각각 $2L$, L 이다. 1초 동안 A, B에서 소모되는 전기 에너지는 각각 E_A , E_B 이다.

개념 POINT

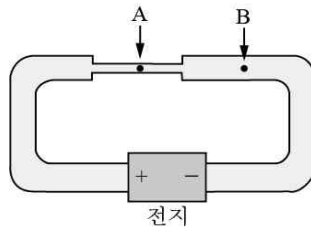


$E_A : E_B$ 는? ²³⁾

- ① 3:1 ② 3:2 ③ 1:1 ④ 2:3 ⑤ 1:3

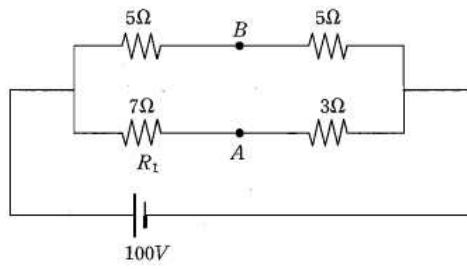
24. 그림과 같이 전선을 니크롬선으로 만든 회로가 전지와 연결되어 있다. 전선은 위치에 따라 굵기가 다르며 B지점이 A지점에 비해 굵다. 시간이 충분히 흘러 전류의 세기에 변화가 없을 때, 다음 설명 중 옳은 것을 2개 고르면? ²⁴⁾

개념 POINT



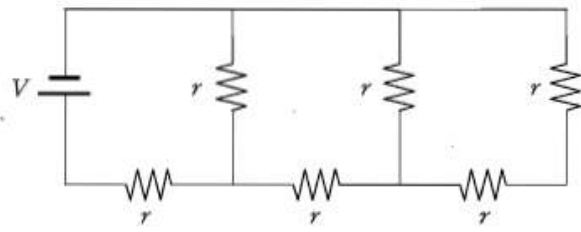
- ① A 지점과 B 지점의 전류의 세기는 동일하다.
- ② A 지점과 B 지점의 전류밀도의 크기는 동일하다.
- ③ A 지점을 통과하는 전하들의 평균속력이 B 지점을 통과하는 전하들의 평균속력보다 빠르다.
- ④ A 지점이 B 지점에 비해 전위가 낮다.
- ⑤ B 지점이 A 지점에 비해 전기장의 세기가 세다.

25. 다음 회로에서 A 점의 전기 퍼텐셜은 B 점의 전기 퍼텐셜보다 얼마나 낮은가?²⁵⁾



개념 POINT

26. 그림과 같은 회로에서 전지를 흐르는 전류는? ²⁶⁾



개념 POINT

27. 어떤 전기 주전자(전기로 물을 끓이는 장치)가 두 개의 저항선 A, B 를 가지고 있다. 전기 주전자에 물을 가득 채우고, 저항선 A 에만 전류를 흐르게 하면 물이 끓는 데 걸리는 시간이 Δt 이다. 또, 저항선 B 에서 전류가 흐르게 하면 걸리는 시간은 $2\Delta t$ 이다. 두 저항선에 모두 전류가 흐르고, 두 저항선이

개념 POINT

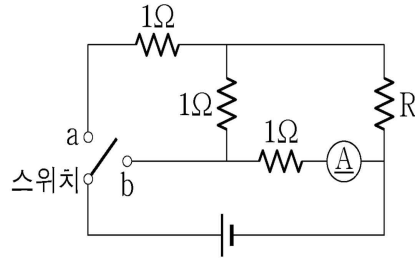
(1) 병렬

(2) 직렬

연결되었을 때, 물이 끓기까지 걸리는 시간을 구하라.²⁷⁾

28. 그림과 같이 저항값이 1Ω 인 저항 3개, 저항 R , 전류계, 스위치를 전압이 일정한 직류 전원에 연결하여 회로를 구성하였다. 전류계에 흐르는 전류의 세기는 스위치를 b에 연결했을 때가 스위치를 a에 연결했을 때의 7배이다.

개념 POINT

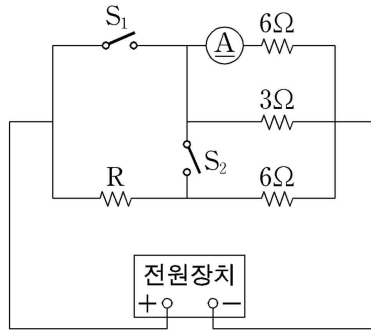


r 의 저항값은?28)

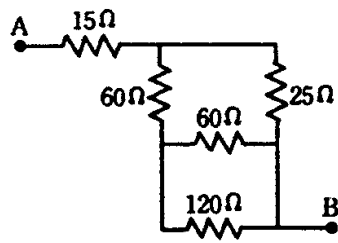
- ① $\frac{1}{3}\Omega$ ② $\frac{1}{2}\Omega$ ③ 1Ω ④ 2Ω ⑤ 3Ω

29. 그림과 같이 네 개의 저항을 전압이 일정한 전원장치에 연결하였다. 스위치 S_1 만 닫았을 때 전류계에 흐르는 전류는 3A이고, 스위치 S_2 만 닫았을 때 전류계에 흐르는 전류는 1A이었다. S_1 만 닫았을 때 R 의 소비전력은?29)

개념 POINT



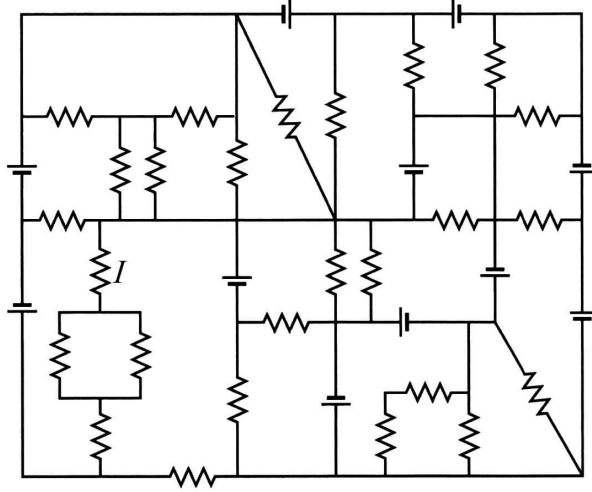
30. 아래 그림과 같은 회로의 양 끝 A와 B 사이의 전기저항을 구하라.³⁰⁾



개념 POINT

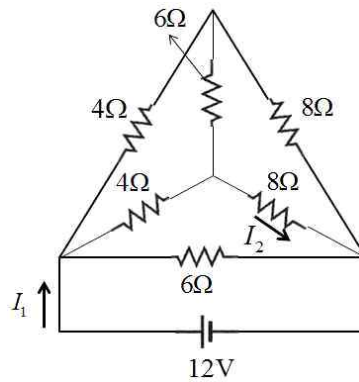
31. 그림에서 모든 저항은 4.0Ω 이고 모든 이상적인 전지의 기전력은 $10V$ 이다. 전류 I 의 (1) 크기와 (2) 방향을 각각 구하여라(힌트 : 이 문제는 머릿속으로만 계산해서도 풀 수 있다).³¹⁾

개념 POINT



32. 저항값이 각각 4Ω 6Ω 8Ω 인 저항 6개로 정사면체 모양의 회로를 만들어 전압 $12V$ 인 전원을 연결하였다. 그림은 정사면체 모양 회로의 평면도이다. 이 회로에 흐르는 전체 전류의 세기 I_1 과 중앙의 8Ω 을 흐르는 전류의 세기 I_2 를 구하시오.

개념 POINT



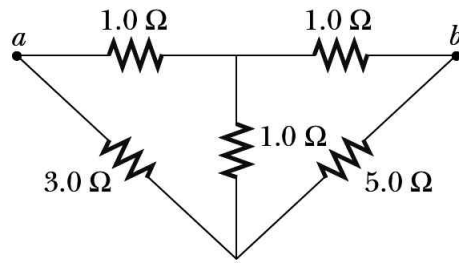
33. 두 개의 저항 R_1 과 R_2 가 병렬로 연결되어 있다. 두 저항을 합해서 전체 전류는 I 이다.
32)

(1) 두 저항에 흐르는 전류는 각각 얼마인가?

(2) 위에서 구한 전류 분배가 다른 어떠한 분배보다 더 적은 전력 소모를 준다는 것을 증명하라. 일반적으로, 직류 회로에서 전류는 회로에 전달되는 전력이 최소가 되도록 분포한다.

개념 POINT

34. 다음 그림의 회로에서 a, b 사이의 총 저항을 구하라.³³⁾



개념 POINT

1) [정답] ①

[해설]

- 세 개의 저항 모두 직렬연결일 때 : $R_{eq} = R + R + R = 3R$ 이다.
- 세 개의 저항 모두 병렬연결일 때 : $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} = \frac{3}{R}$ 이므로 $R_{eq} = \frac{1}{3}R$ 이다.
- 두 개의 저항 직렬연결과 한 개의 저항 병렬연결 : $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R+R} = \frac{3}{2R}$ 이므로 $R_{eq} = \frac{2}{3}R$ 이다.
- 두 개의 저항 병렬연결과 한 개의 저항 직렬연결 : $R_{eq} = \frac{R^2}{R+R} + R = \frac{3}{2}R$ 이다.

2) [정답] ③

[해설]

- $P = VI$ 에서 P 가 일정할 때 V 가 10배가 되면 I 는 0.1배가 된다. (거짓)
- 송전선의 저항은 송전선의 비저항과 단면적 및 길이에 의하여 결정되므로 일정하다. (거짓)
- 송전선의 저항에서 소모되는 전력은 I^2R 이므로 I 가 0.1배이면 소모전력은 0.01배가 된다. (참)
- 전압을 높이는 이유는 송전 과정의 '손실'을 줄이기 위함이지, 가정에 공급하는 에너지 양을 직접적으로 100배 늘리는 것이 아니다. (거짓)
- 송전선의 저항은 송전선의 비저항과 단면적 및 길이에 의하여 결정되므로 일정하다. (거짓)

3) [정답] ②

[해설]

전지가 병렬연결이므로 기전력은 V 이고 합성 내부저항은 $\frac{r}{2}$ 이다. 따라서 회로 전체의 합성저항은 $R + \frac{r}{2}$ 이므로 회로의 소비전력은 $P = I^2R = \left(\frac{V}{R + \frac{r}{2}}\right)^2 R = V^2 \times \frac{R}{\left(R + \frac{r}{2}\right)^2}$ 이므로 최대 소비전력인 경우 $R = \frac{r}{2}$ 이므로 $P_{\max} = \frac{V^2}{r^2} \times \frac{r}{2} = \frac{V^2}{2r}$ 이다.

4) [정답] ②

[해설]

- 점 a에서 점 b로 4Ω 의 저항에 $2A$ 의 전류가 흐르므로 $V_a - V_b = 2A \times 4\Omega = 8V$ 이다.
- 마디점 a에서 키르히호프의 제1법칙을 적용하면 $\frac{E - V_a}{1} = 2 + \frac{V_a}{2}$ 이다.
- 마디점 b에서 키르히호프의 제1법칙을 적용하면 $\frac{E - V_b}{2} + 2 = \frac{V_b}{1}$ 이다.
- 네 식을 연립하면 $E = 32V$ 이다.

5) [정답] ③

[해설]

저항이 R 인 두 도선 A와 B의 양단을 병렬로 연결하고 전압 V 를 양단에 걸어주면 A와 B에 걸리는 전압은 V 로 동일하다. 따라서 A 도선에 흐르는 전류는 $\frac{V}{R}$ 이다.

개념 POINT

6) [정답] ⑤

[해설]

A부터 B까지 차례로 전위 변화를 구하면 $V_A - \varepsilon - IR = V_B$ 에서 $V_A - 2 - 0.5 \times 10 = V_B$ 이다. 따라서 $V_A - V_B = 2 + 0.5 \times 10 = 7V$ 이다.

7) [정답] ③

[해설]

$2\Omega, 3\Omega, 1\Omega$ 에 각각 오른쪽 방향으로 흐르는 전류를 i_1, i_2, i_3 라고 하면

1. b점에서 키르히호프 제1법칙을 적용하면 $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ 이다.

2. $2\Omega, 3\Omega, 1\Omega$ 각각에 대하여 키르히호프 제2법칙을 적용하면 a, b점에서의 전위를 각각 V_a, V_b 라고 할 때 $V_a + 12 - 2 \times i_1 = V_b$, $V_a - 3 \times i_2 = V_b$, $V_a + 5 - 1 \times i_3 = V_b$ 이므로

$V_a - V_b = \Delta V_{ab} = 2i_1 - 12 = 3i_2 = i_3 - 5$ 이므로 $i_1 = \frac{\Delta V_{ab} + 12}{2}$, $i_2 = \frac{\Delta V_{ab}}{3}$, $i_3 = \Delta V_{ab} + 5$ 이다.

3. 1번에 2번의 결과를 대입하여 정리하면 $\Delta V_{ab} = -6V$ 이고 3Ω 의 저항에서 5초 동안 소모되는 에너지는 $E = \frac{V^2}{R}t = \frac{6^2}{3} \times 5 = 60J$ 이다.

8) [정답] ①

[해설]

1. 같은 저항값 R 을 갖는 두 저항기를 병렬로 연결한 회로 양단에 내부 저항이 0.05Ω 이고 전압이 $15V$ 인 전지를 연결하면 병렬로 된 두 저항의 합성저항은 $\frac{R}{2}$ 이고 내부저항은

$r = 0.05\Omega$ 이므로 이 때 흐르는 전류는 $I = \frac{V}{\frac{R}{2} + r} = \frac{2V}{R + 2r}$ 이므로 $I_p = \frac{V}{R + 2r}$ 이다.

2. 같은 저항값 R 을 갖는 두 저항기를 직렬로 연결한 회로 양단에 내부 저항이 0.05Ω 이고 전압이 $15V$ 인 전지를 연결하면 직렬로 된 두 저항의 합성저항은 $2R$ 이고 내부저항은

$r = 0.05\Omega$ 이므로 이 때 흐르는 전류는 $I = \frac{V}{2R + r} = I_s$ 이다.

3. 따라서 $\frac{I_p}{I_s} = \frac{3}{2} = \frac{\frac{V}{R + 2r}}{\frac{V}{2R + r}} = \frac{2R + r}{R + 2r}$ 에서 $R = 4r = 4 \times 0.05 = \frac{1}{5}\Omega$ 이다.

9) [정답] ②

[해설]

전지의 음극부터 시계방향으로 전위 변화를 구하면 $V_0 - 3V - 1A \times \frac{10}{2}\Omega + 6V = 0$ 이므로 $V_0 = 2V$ 이다.

10) [정답] ④

[해설]

1. 회로 위쪽 1Ω 에 지나는 전류를 i_1 , 점 P를 아래 방향으로 지나는 전류를 I 라고 하면 회로 위쪽 2Ω 을 지나는 전류는 $i_1 - I$ 이다.

2. 회로 아래쪽 2Ω 을 지나는 전류를 i_2 라고 하면 회로 아래쪽 1Ω 을 지나는 전류는 $i_2 + I$ 이다.

3. 회로 위쪽 왼쪽 폐회로에서 키르히호프 제2법칙을 시계방향으로 적용하면 $10 + 2 \times i_2 - 1 \times i_1 = 0$ 이다.

4. 회로 위쪽 오른쪽 폐회로에서 키르히호프 제2법칙을 반시계방향으로 적용하면 $10 - 1 \times (i_2 + I) + 2i_2 = 0$ 이다.
5. 회로 아래 폐회로에서 키르히호프 제2법칙을 시계방향으로 적용하면 $10 - 2 \times i_2 - 1 \times (i_2 + I) = 0$ 이다.
6. 세 식을 연립하면 $i_1 = 10A, i_2 = 0A, I = 10A$ 이다.

11) [정답] ③

[해설]

히터의 저항값을 R 이라 하면 히터에서 전환된 모든 열에너지는 물로 전달된다.

1. 히터에서 10분간 전환된 열에너지 $W = Pt = VI = \frac{V^2}{R}t = \frac{100^2}{R} \times 10 \times 60 = \frac{6,000,000}{R} J$ 이다.
2. 물로 전달된 열에너지 $Q = cm \Delta T = 4000 \times 1 \times (60 - 10) = 200000 J$
3. $Q = W$ 이므로 $200,000 = \frac{6,000,000}{R}$ 이고 $R = 30 \Omega$ 이다.

12) [정답] ⑤

[해설]

1. 부하 저항은 두 저항이 병렬연결이므로 $R_L = \frac{5 \times R'}{5 + R'}$ 이다.
2. 부하 저항에 최대 전력이 전달되려면 내부 저항과 부하 저항이 같아야 하므로 $4 = \frac{5R'}{5 + R'}$ 에서 $R' = 20 \Omega$ 이다.

13) [정답] ③

[해설]

저항이 없는 중간 도선은 전위차가 0이므로 전류가 흐르지 않으므로 존재하지 않는 것과 같다. 따라서 두 지점 A와 B 사이의 합성저항은 $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R+R} + \frac{1}{R+R} = \frac{1}{R}$ 이므로 $R_{eq} = R$ 이다.

14) [정답] ⑤

[해설]

1. 왼쪽 폐회로에서 왼쪽 삼각형 변에 흐르는 전류는 $I_1 + I_3$ 이므로 시계 방향으로 키르히호프의 제 2법칙을 적용하면 $2 - 1 \times I_1 - 1 \times (I_1 + I_3) - 1 \times I_1 = 0$ 이다.
2. 오른쪽 폐회로에서 오른쪽 삼각형 변에 흐르는 전류는 $I_2 - I_3$ 이므로 반시계 방향으로 키르히호프의 제 2법칙을 적용하면 $4 - 1 \times (I_2 - I_3) - I_2 \times 2 = 0$ 이다.
3. 가운데 폐회로에서 반시계 방향으로 키르히호프의 제 2법칙을 적용하면 $-2 \times I_3 - 1 \times (I_1 + I_3) + 1 \times (I_2 - I_3) = 0$ 이다.
4. 세 식을 연립하면 $I_1 = 0.6A, I_2 = 1.4A, I_3 = 0.2A$ 이다.

15) [정답] ②

[해설]

이 문제는 축전기가 완전히 충전되었을 때 회로에 전류가 흐르지 않는 특성을 이용해 축전기 양단에 걸리는 전압(V)을 구하는 것이 핵심이다.

1. 회로의 상태 파악

축전기가 완전히 충전되면 축전기가 포함된 가지(branch)로는 전류가 흐르지 않는다. 따라서

개념 POINT

회로는 왼쪽의 $1\Omega, 4\Omega$ 저항 직렬연결과 오른쪽의 $8\Omega, 2\Omega$ 저항 직렬연결이 전원에 병렬로 연결된 구조이다.

개념 POINT

2. 각 지점의 전위(Potential) 계산

축전기 C_1 이 연결된 왼쪽 지점을 A, 오른쪽 지점을 B라고 하고, 전원의 마이너스극을 0V로 설정한다.

- 왼쪽 라인: 10V전압이 1Ω 과 4Ω 에 나누어 걸리고 지점 A의 전위 V_A 는 4Ω 저항에 걸리는 전압과 같다. 따라서 $V_A = 10V \times \frac{4\Omega}{1\Omega + 4\Omega} = 8V$ 이다.

- 오른쪽 라인: 10V전압이 8Ω 과 2Ω 에 나누어 걸리고 지점 B의 전위 V_B 는 2Ω 저항에 걸리는 전압과 같다. 따라서 $V_B = 10V \times \frac{2\Omega}{8\Omega + 2\Omega} = 2V$ 이다.

3. 축전기에 걸리는 전압 및 전하량 계산

따라서 축전기 양단에 걸리는 전압은 두 지점의 전위차는 $\Delta V = V_A - V_B = 8V - 2V = 6V$ 이고 전하량은 $Q = C\Delta V = 1\mu F \times 6V = 6\mu C$ 이다.

16) [정답] ①

[해설]

X에서 A, B의 저항값을 각각 R_{XA}, R_{XB} 라고 하면, $R_{XA} = \rho_0 \frac{L}{S}$ 이고 $R_{XB} = 8\rho_0 \frac{L}{S}$ 이므로 X의 저항값은 $R_X = R_{XA} + R_{XB} = 9\rho_0 \frac{L}{S}$ 이다. Y에서 A, B의 저항값을 각각 R_{YA}, R_{YB} 라고 하면, $R_{YA} = 2\rho_0 \frac{L}{S}$ 이고 $R_{YB} = \rho_0 \frac{L}{S}$ 이므로 Y의 저항값은 $R_Y = R_{YA} + R_{YB} = 3\rho_0 \frac{L}{S}$ 이다. X와 Y의 양단에 걸리는 전압은 같으므로 $P_X : P_Y = \frac{1}{R_X} : \frac{1}{R_Y} = \frac{S}{9\rho_0 L} : \frac{S}{3\rho_0 L} = 1 : 3$ 이다.

17) [정답] $R/3$

[해설] 점 1, 4가 등전위이고 점 2, 3이 등전위면이 되어서 저항 3개의 병렬연결이 된다.

18) [정답] (1) $\frac{1}{8} = 0.125A$ (2) $\frac{1}{2} = 0.5A$

[해설]

대칭성에 의해 전체 전위는 11V이며 전체 저항이 $\frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{56}} + \frac{1}{\frac{1}{4} + \frac{1}{12}} + \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \Omega = 11\Omega$ 이다.

19) [정답] (1) 50V (2) 48V (3) A: +, B: -

[해설] (1) AB사이에서 소모하는 전력은 AB사이에 걸린 전압과 AB사이에 흐르는 전류의 곱이다.

$$P_{AB} = iV_{AB} \Rightarrow V_{AB} = \frac{P_{AB}}{i} = \frac{50W}{1.0A} = 50V$$

(2) AB사이에 걸린 전압은 R에 걸린 전압과 \mathcal{E} 의 기전력의 합이다.

$$V_{AB} = V_R + \mathcal{E} \Rightarrow \mathcal{E} = V_{AB} - V_R = 50V - 2.0V = 48V$$

(3) 저항은 전류의 방향과 상관없이 항상 에너지를 소모한다. 저항의 소모 일률은

$$P_R = i^2 R = 2.0W$$

따라서, 기전력 장치 \mathcal{E} 가 48W의 일률로 에너지를 소모해야 된다. 기전력 장치가 에너지를 소모하기 위해서는 전류가 기전력 장치의 양극으로 들어가서 음극으로 나와야 한다. 따라서 \mathcal{E} 의 왼쪽(A쪽)이 (+)단자, 오른쪽(B쪽)이 (-)단자이다.

20) [정답] ⑤ $5.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

[해설]

전류는 전류밀도와 단면적의 곱이며

전류밀도는 $J = nev_d$ 이다.

$$I = JA = nev_d A$$

평균 유동속도는

$$v_d = \frac{I}{neA} = \frac{(8.0\text{A})}{(1.0 \times 10^{23}/\text{m}^3)(1.6 \times 10^{-19}\text{C})(1.0\text{m}^2)} \\ = 5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

21) [정답] (1) nve (2) $\frac{I}{Sne}$

[해설] (1) $I = \frac{q}{t} = \frac{nve}{1} = nve$

(2) 전자의 평균 이동 속력을 v 라고 하면 $I = \frac{q}{t} = \frac{Svne}{1} = Svne \quad \therefore v = \frac{I}{Sne}$

22) [정답] ②

[해설] 원운동의 주기는 $\frac{2\pi R}{v}$ 이고, 단위 시간 동안의 회전수는 $\frac{v}{2\pi R}$ 이므로

$$I = \frac{q}{t} = ne = \frac{ev}{2\pi R}$$

23) [정답] ① $E_A : E_B = R_A : R_B = 3 : 1$

[해설]

전기 저항의 저항값은 $\rho \frac{L}{S}$ 이고, A와 B는 동일한 재질이므로 비저항(ρ)이 같다. A, B의 저항

값을 각각 R_A , R_B 라고 하면, $R_A : R_B = \frac{2L}{2S} : \frac{L}{3S} = 3 : 1$ 이다. 직렬로 연결되어 있는 A와 B에 흐르는 전류의 세기는 같으므로 1초 동안 저항에서 소모되는 전기 에너지는 저항값에 비례한다. 따라서 $E_A : E_B = R_A : R_B = 3 : 1$ 이다.

24) [정답] ①, ③

[해설]

① 직렬연결이므로 A지점과 B지점의 전류의 세기는 동일하다. (O)

② 전류가 같고 단면적이 다르므로 $J = \frac{\Delta I}{\Delta A}$ 에서 전류밀도는 다르다. (X)

③ A지점의 전류밀도가 B지점보다 크며 $J = nev_d$ 이므로 A에서의 전자의 평균유동속도가 B에서의 전자의 평균 유동속도보다 빠르다. (O)

④ 전류의 방향은 A에서 B이며 저항에서는 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 전류가 흐르므로, 전위는 A가 B보다 높다. (X)

⑤ 옴의 법칙 $E = \rho J$ 에서 같은 재질로 만들어져 비저항 ρ 는 같지만 $J_A > J_B$ 이므로 $E_A > E_B$ 이다. (X)

25) [정답] A점이 B점보다 20V 낮다

[해설]

합성저항을 R 이라 하면 $\frac{1}{R} = \frac{1}{10} + \frac{1}{10} \therefore R = 5(\Omega)$

$100 = i \times 5$ 에서 $i = 20(1)$

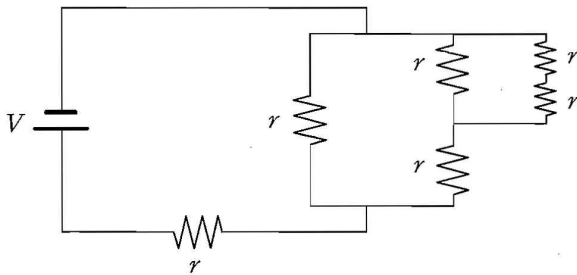
5Ω 과 7Ω 에 각각 10A의 전류가 흐르므로 B점은 $5 \times 10 = 50(V)$ 낮아지고 A점은 $7 \times 10 = 70(V)$ 낮아진다.

\therefore A점이 B점보다 20V 낮다.

26) [정답] $i = \frac{8V}{13r}$

[해설]

주어진 회로는 다음과 같다.



$$\therefore V = \frac{13}{8}ir \therefore i = \frac{8V}{13r}$$

27) [정답] (1) $\frac{2\Delta t}{3}$ (2) $3\Delta t$

[해설] 물을 끓이는 데 필요한 열량을 Q 라 하면 A, B 의 소모 전력은 각각

$$P_A = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{V^2}{R_A} \quad P_B = \frac{Q}{2\Delta t} = \frac{V^2}{R_B}$$

$$(1) P_{tot} = \frac{V^2}{R_A} + \frac{V^2}{R_B} = \frac{3Q}{2\Delta t} \text{ 걸린 시간 } \frac{Q}{P_{tot}} = \frac{2\Delta t}{3}$$

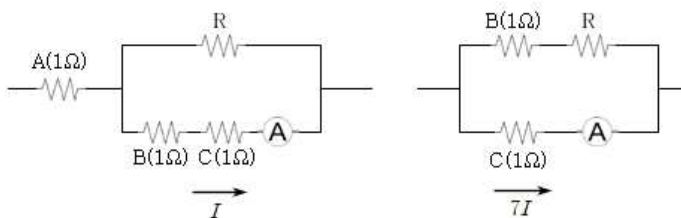
$$(2) P_{tot} = \frac{1}{R_A} \left(\frac{R_A}{R_A + R_B} V \right)^2 + \frac{1}{R_B} \left(\frac{R_A}{R_A + R_B} V \right)^2 = \frac{V^2}{R_A + R_B} = \frac{1}{\frac{\Delta t}{Q} + \frac{2\Delta t}{Q}} = \frac{Q}{3\Delta t}$$

$$\text{걸린 시간 } \frac{Q}{P_{tot}} = 3\Delta t$$

28) [정답] ② $\frac{1}{2}\Omega$

[해설]

스위치를 a에 연결할 때와 b에 연결할 때, 회로도 는 다음과 같다.



(가) a에 연결할 때

(나) b에 연결할 때

개념 POINT

전원 전압을 V , (가)에서 전류계에 흐르는 전류의 세기를 I 라고 하면, (나)에서 C에 흐르는 전류의 세기는 $7I$ 이고 C에 걸린 전압은 V 이다. $V=7I \times 1\Omega$ 이므로 (가)의 B, C 전체에 걸린 전압은 $V_{BC}=I \times 2\Omega = \frac{2}{7}V$ 이고, A에 걸린 전압은 $\frac{5}{7}V$ 이다. 따라서 (가)의 A에 흐르는 전류의 세기는 $5I$ 이고 R에 흐르는 전류의 세기는 $4I$ 이다. (가)에서 R에 흐르는 전류의 세기가 B, C에 흐르는 전류의 세기의 4배이고, B, C의 합성 저항이 2Ω 이므로

R의 저항값은 $R=2 \times \frac{1}{4} = \frac{1}{2}(\Omega)$ 이다.

29) [정답] 12W

[해설]

S_1 만 닫았을 때 전류계에 흐르는 전류가 3A이므로 6Ω 와 3Ω 에 걸린 전압 그리고 전체 전압이 모두 18V이다. 특히 여기서 전원장치의 전압이 18V임을 알 수 있다.

S_2 만 닫았을 때는 6Ω 에 흐르는 전류가 1A이므로 6V가 걸리며 그 아래의 3Ω 와 6Ω 도 병렬 연결이므로 6V가 걸려서 각각 2A와 1A의 전류가 흐른다.

R에 걸린 전압은 $V_R=18V-6V=12V$ 이며,

R에 흐르는 전류는 $I_R=1A+2A+1A=4A$ 가 된다.

따라서 R의 저항은 $R=\frac{V_R}{I_R}=3\Omega$ 이다.

S_1 만 닫았을 때 R의 소비전력을 구해보자.

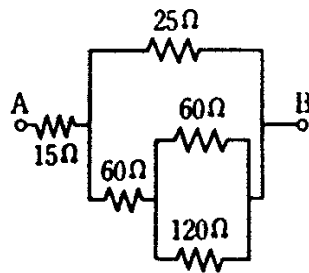
R과 오른쪽 아래의 6Ω 이 18V에 직렬 연결되었으므로 R에 흐르는 전류가

$$I_R = \frac{18V}{3\Omega+6\Omega} = 2A \text{가 된다.}$$

따라서 $P_R = I_R^2 R = (2A)^2 (3\Omega) = 12W$ 이다.

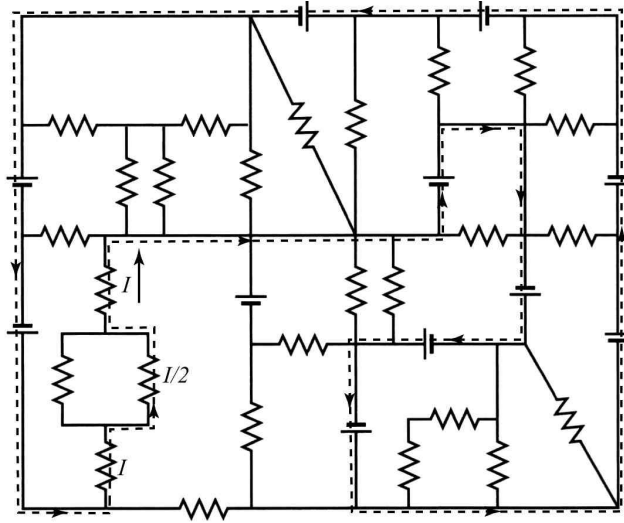
30) [정답] 35Ω

[해설] 회로를 다시 그리면 다음 그림과 같으므로 합성 저항은 $35(\Omega)$ 이다.



31) [정답] 4.0A 위쪽으로 흐른다.

[해설] 다음 그림과 같은 경로에 대해 Kirchhoff의 제2법칙을 적용한다.



$$40V - 10I = 0 \Rightarrow I = 4.0A$$

32) [정답] (1) $I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$, $I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$ (2) 풀이 참조

[해설] (1) $I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$, $I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$

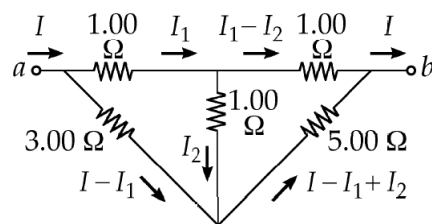
(2) R_1 에 흐르는 전류가 I_1 이면 R_2 에 흐르는 전류는 $I_2 = I - I_1$ 이 되므로, 전체 회로에서 전력은 $P = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_1^2 R_1 + (I - I_1)^2 R_2 = (R_1 + R_2) I_1^2 - 2I R_2 I_1 + I^2 R_2$

$$= (R_1 + R_2) \left(I_1 - \frac{I R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 + \frac{I^2 R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

따라서, $I_1 = \frac{I R_2}{R_1 + R_2}$ 일 때 전력이 최소가 된다.

33) [정답] $\frac{27}{17} \Omega$

[해설] 다음 그림과 같이 전류를 정하고 두 작은 삼각형에 대해 폐회로 법칙을 적용한다.



$$-I_1 - I_2 + 3(I - I_1) = 0 \Rightarrow 4I_1 + I_2 = 3I$$

$$-(I_1 - I_2) + 5(I - I_1 + I_2) + I_2 = 0 \Rightarrow 6I_1 - 7I_2 = 5I$$

두 식을 연립하여 풀면 $I_1 = \frac{13}{17} I$, $I_2 = -\frac{1}{17} I$

a, b 사이의 전위차는 $V_{ab} = I_1 + I_1 - I_2 = \frac{27}{17} I$

따라서, $R_{ab} = \frac{17}{27} \Omega$