

# 전기회로 강의노트

2015. 9.

안 상 호

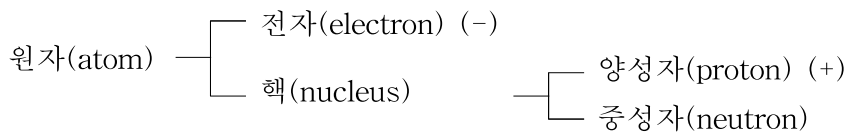
인제대학교 전자IT기계자동차공학부

## 제 2장. 전압과 전류 (voltage and current)

### ■ 전하(electric charge)

- 전하는 전기현상을 일으키는 물질이 갖고 있는 전기량임
- 전하는 양전하(+)와 음전하(-)로 나눌 수 있음
- 동일한 부호의 전하 사이에는 서로 밀어내는 척력이 작용하고, 다른 부호의 전하 사이에는 서로 잡아당기는 인력이 작용함
- 단위는 [C], 쿨롬(Coulomb)

### ■ 원자구조

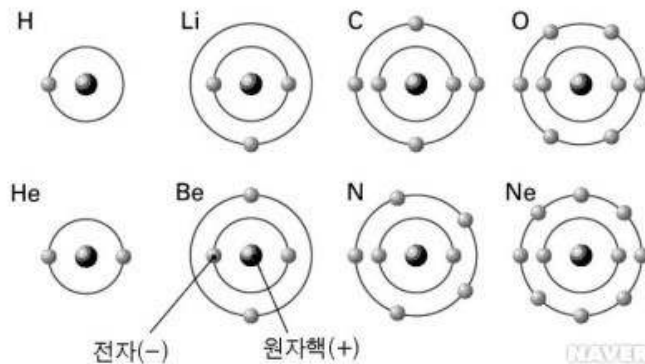
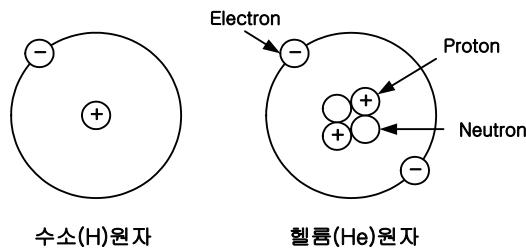


(-) : 음전하(negative charge)

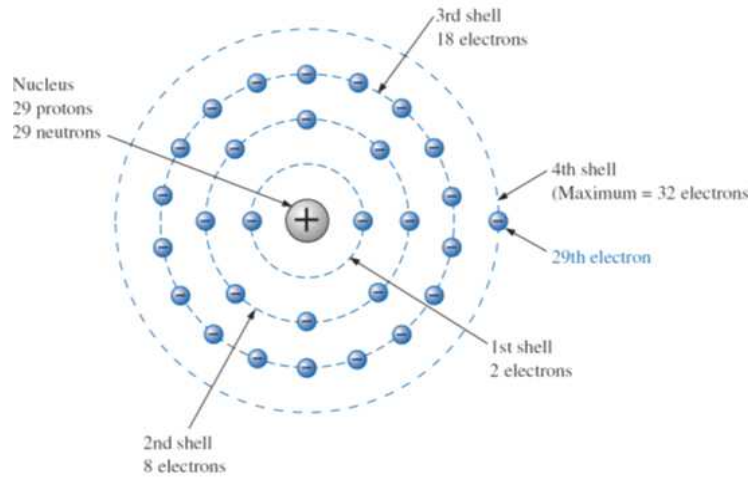
(+) : 양전하(positive charge)

- 원자내의 전자수와 양성자의수는 같음 (원자는 전기적으로 중성임)
- 핵주위의 shell이라 불리는 궤도들에 전자가 분포 (전자의 수가 원자번호임)
- *n*번째 shell에 포함될 수 있는 최대 전자개수:  $2n^2$  (2, 8, 18, 32, ...)

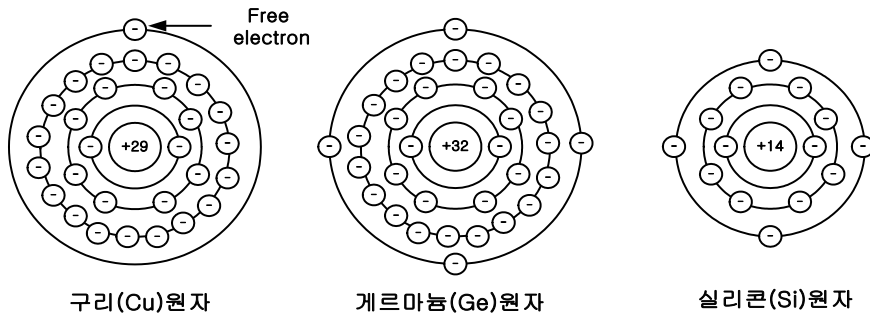
- 원자구조의 예



<원자들의 전자수(원자번호) 예>



< 구리원자(원자번호 29)의 구조 >



- 최외각 궤도의 전자(가전자(valence electron))의 수가 적을수록 전도에 기여하는 자유전자(free electron)가 됨
  - 구리(Cu)는 가전자의 수가 1개인 원자이므로 도체(conductor)임
- 전자 1개의 전하는  $1.602 \times 10^{-19}$ 
  - 1쿨롬은 전자  $1 / (1.602 \times 10^{-19}) = 6.242 \times 10^{18}$ 개의 전기량임

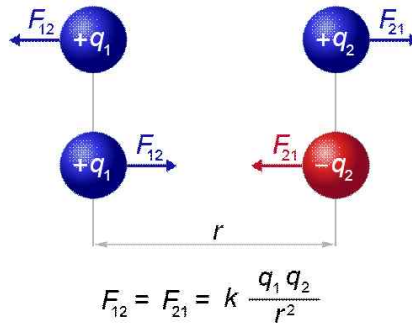
분류	원소	기호	원자번호	가전자(최외각전자) 수	
금속 도체	은	Ag	47	+ 1	1~3
	구리	Cu	29	+ 1	
	금	Au	79	+ 1	
	알루미늄	Al	13	+ 3	
	철	Fe	26	+ 2	
반도체	탄소	C	6	+ 4	4
	실리콘	Si	14	+ 4	
	게르마늄	Ge	32	+ 4	
절연체	네온	Ne	10	+ 8	5~8
	아르곤	Ar	18	+ 8	

■ 쿨롱법칙(Coulomb's law)

- 거리가  $r[m]$ 인 두 전하( $Q_1, Q_2$ )간에 작용하는 힘
  - 동일 극성의 전하는 서로 밀고(척력), 다른 전하는 당기는(인력) 특성을 가짐

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (\text{newton, N})$$

여기서  $k = 9.0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$



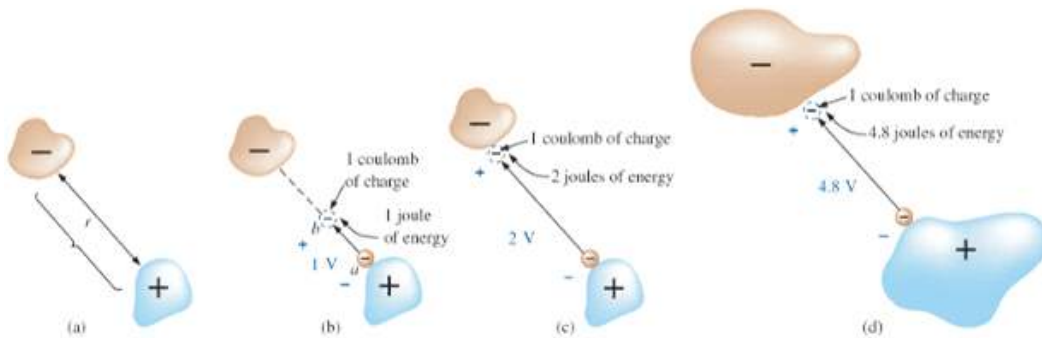
■ 전압(voltage) (또는 전위차(electric potential difference))

- 1쿨롬의 전하가 두 점 사이를 이동할 때 얻거나 잃는 에너지(J, joule)
- 전압 1볼트(volt)는 1쿨롬의 전하가 두 점간을 이동할 때 얻거나 잃는 에너지가 1줄(joule)일 때의 전위차임

$$V = \frac{W}{Q}$$

V = volt (V)  
 W = joules (J)  
 Q = coulombs (C)

- 두 점사이의 전압(전위차)의 예



<(b)의 경우>

- a점에 있는 1[C]의 전자 (-)전하를 b점으로 이동시키는데 1J의 에너지가 소모될 때, b와 a간의 전위차는 1V이다.
- b와 a간의 전위차는 1V이면, b점에 위치한 전자가 a점으로 이동할 때 1[J]의 에너지를 발생한다.

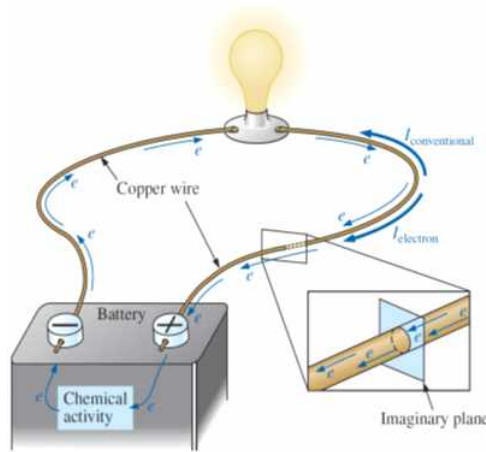
■ 전류(current)

- 어느 단면을 단위시간에 통과하는 전하의 양

$$I = \frac{Q}{t}$$

I = amperes (A)  
Q = coulombs (C)  
t = time (s)

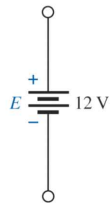
→ 1초에 1[C]의 전하( $6.242 \times 10^{18}$ 개의 전자)가 가상의 단면을 이동할 때 전류 1[A]가 흐른다고 함



<기본적 전기회로>

■ 전압원(voltage source)

- 출력전류에 무관하게 일정 전압을 발생시키는 회로소자 (내부저항은 영임)



<직류(direct current: dc) 전압원의 기호>

- 직류 전압원(dc voltage sources)

① 배터리(batteries)

- 1차 전지(primary cells): 재충전이 되는 않는 배터리
- 2차 전지(secondary cells): 재충전이 가능한 배터리

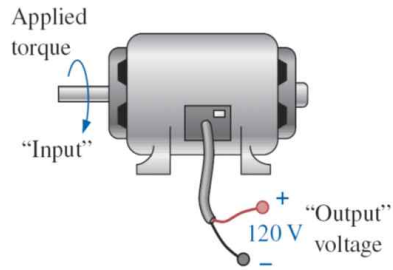


<1차 전지>



<2차 전지>

② 발전기(generator)



③ 전원공급기(power supply)



④ 태양전지(solar cells)



⑤ 연료전지(fuel cells)

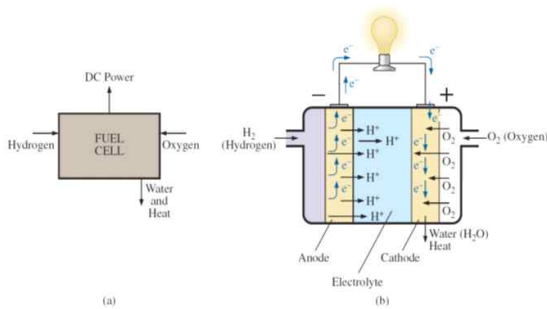


FIG. 2.21 Fuel cell (a) components; (b) basic construction.

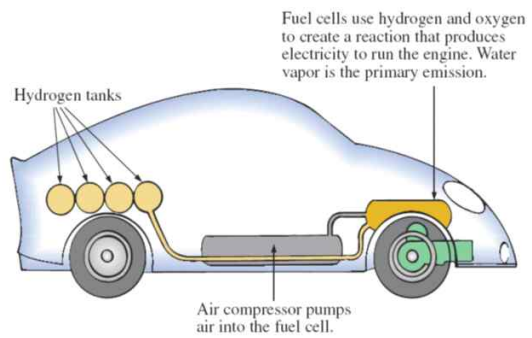
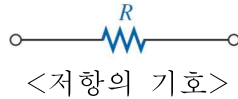


FIG. 2.22 Hydrogen fuel-cell automobile.

### 제 3장. 저항 (resistance)

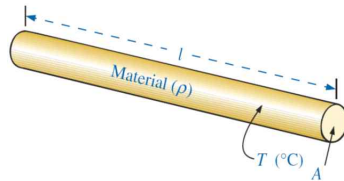
- 저항 : 전기회로에서 전하의 흐름을 방해하는 작용 (단위는 오옴(ohm), Ω)



- 물체의 저항

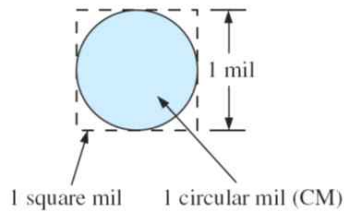
$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$\rho$  = CM-Ω/ft at T=20°C (물질의 저항성(resistivity))  
 $l$  = feet  
 $A$  = area in circular mils (CM)



- Circular Mil (CM)

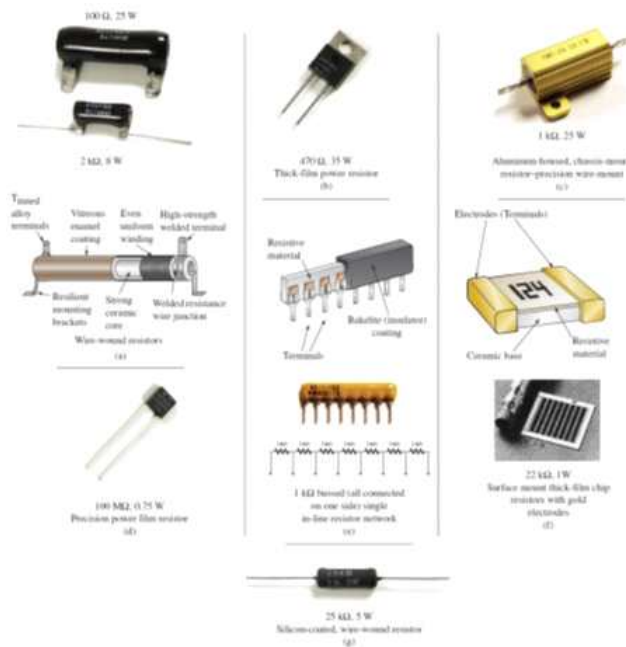
$$1 \text{ mil} = \frac{1}{1000} \text{ in} \quad \text{또는} \quad 1000 \text{ mil} = 1 \text{ in}$$



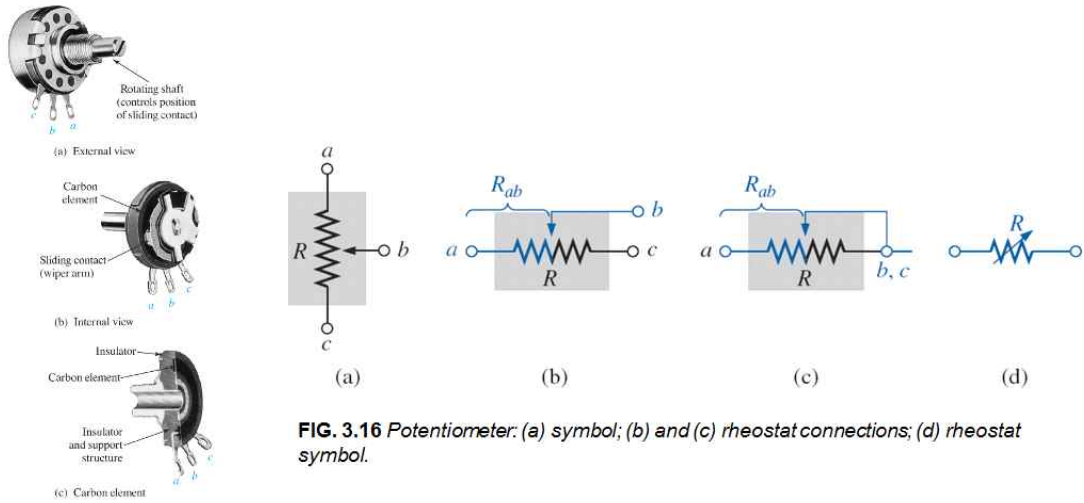
<Circular mil의 정의>

- 저항(resistor)의 종류

① 고정저항(fixed resistor) : 2단자 양단의 저항이 일정함

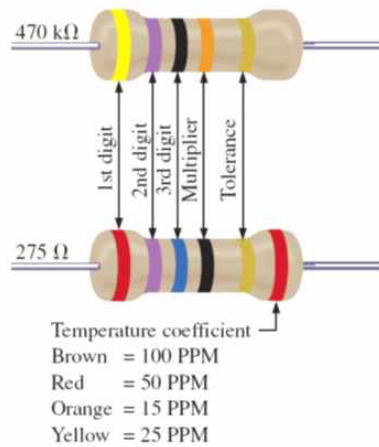


② 가변저항(variable resistor) : 중간단자(b단자)의 위치에 따라 저항이 가변됨  
a단자와 b단자 양단의 저항은 일정함



• 저항값 읽기

Number	Color
0	Black
1	Brown
2	Red
3	Orange
4	Yellow
5	Green
6	Blue
7	Violet
8	Gray
9	White
±5% (0.1 multiplier if 3rd band) Gold	
±10% (0.01 multiplier if 3rd band) Silver	



흑(Black), 갈(Brown), 적(Red), 등(Orange), 황(Yellow),  
녹(Green), 청(Blue), 자(Violet), 회(Gray), 백(White)

저항 예	칼라 코딩	저항값	저항값 범위
 FIG. 3.23 Example 3.11.	갈색(1), 적색(2), 등색(3)	$12 \times 10^3 \Omega = 12k\Omega$	$11.4k\Omega$ ~ $12.6k\Omega$
	금색	오차범위 ±5%	
 FIG. 3.24 Example 3.12.	회색(8), 적색(2), 금색	$82 \times 10^{-1} \Omega = 8.2\Omega$	$7.38\Omega$ ~ $9.02\Omega$
	은색	오차범위 ±10%	



## 제 4장. 옴법칙, 전력 및 에너지 (Ohm's law, Power and Energy)

### ■ 옴의 법칙(Ohm's law)

- 전압( $E$ )는 전류( $I$ )에 비례하며, 비례상수는 저항( $R$ )이다.

$$E = I \cdot R$$

$E$  : 전압 (전위차) [V]  
 $I$  : 전류 [A]  
 $R$  : 저항 [ $\Omega$ ]

$$\left( I = \frac{E}{R}, R = \frac{E}{I} \right)$$

- $1\Omega$ 의 저항( $R$ )양단에 1V의 전압( $E$ )이 인가되면 저항으로 1A의 전류( $I$ )가 흐른다.

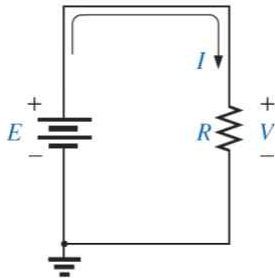


FIG. 4.2 Basic circuit.

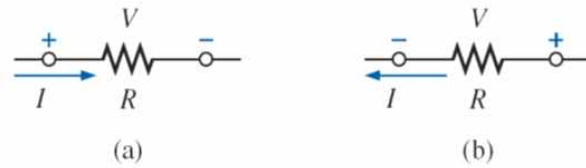


FIG. 4.3 Defining polarities.

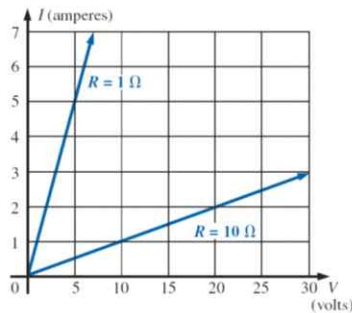


FIG. 4.7 Demonstrating on an I-V plot that the lower the resistance, the steeper is the slope.

### ■ 전력(Power)

- 힘( $P$ )은 단위시간당 소모하는 에너지( $W$ )이다.

$$P = \frac{W}{t} \quad (\text{watts, } W \text{ 또는 joules/second, J/s})$$

- 전력( $P$ ): 전기의 힘

$$P = V \cdot I \quad (\text{watts, } W) \quad P = \frac{V^2}{R}, P = I^2 R$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (\because I = \frac{V}{R})$$

$$P = I^2 R \quad (\because V = IR)$$

### ■ 에너지(Energy)

- 에너지는 시간  $t$  동안 사용한 힘( $P$ )이다.

$$W = P \cdot t \quad (\text{wattseconds, } Ws \text{ 또는 joules})$$

## 제 5장. 직렬 dc회로 (series dc circuits)

### ■ 직렬 저항 (series resistor)

$N$ 개의 저항들이 직렬로 연결되었을 때 전체저항은 각 저항의 합과 같다.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N$$

예) 전체 저항  $R_T = 10\Omega + 30\Omega + 100\Omega = 140\Omega$

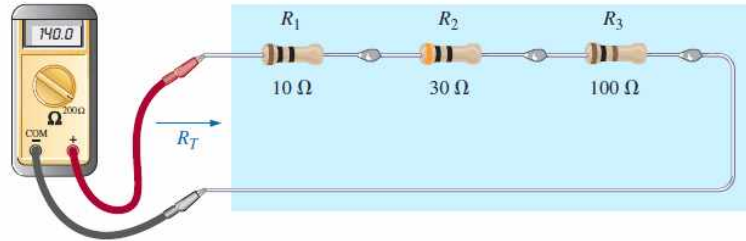


FIG. 5.11

Using an ohmmeter to measure the total resistance of a series circuit.

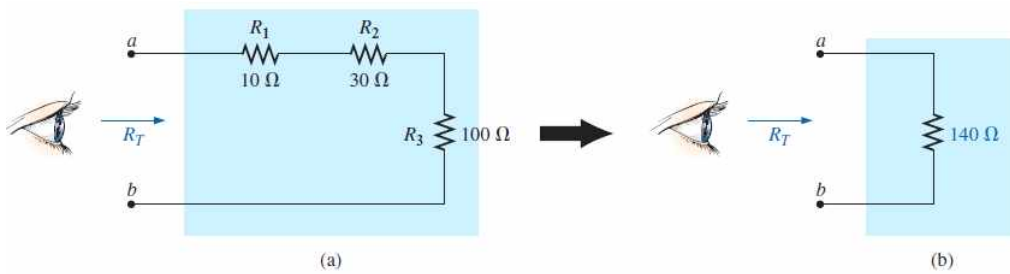


FIG. 5.13

Resistance "seen" at the terminals of a series circuit.

### ■ 직렬 회로 (serial circuits)

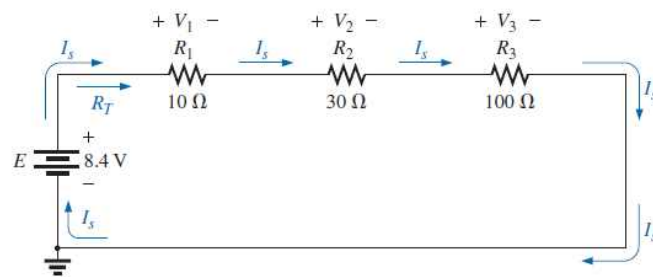


FIG. 5.12

Schematic representation for a dc series circuit.

- 직렬회로에서 흐르는 전류( $I_s$ )는 모든 위치에서 동일하다.
- 직렬회로의 전류 :  $I_s = \frac{E}{R_T} (= \frac{8.4V}{140\Omega} = 0.06A = 60mA)$

- 각 저항간의 전압 :

$$V_1 = R_1 I_s \Rightarrow V_1 = 10\Omega \times 60mA = 0.6V$$

$$V_2 = R_2 I_s \Rightarrow V_2 = 30\Omega \times 60mA = 1.8V$$

$$V_3 = R_3 I_s \Rightarrow V_3 = 100\Omega \times 60mA = 6.0V$$

- 직렬회로에서 인가 전압  $E$ 는 각 저항전압의 합과 같다.

$$E = V_1 + V_2 + V_3 \Rightarrow 8.4V = 0.6V + 1.8V + 6.0V = 8.4V$$

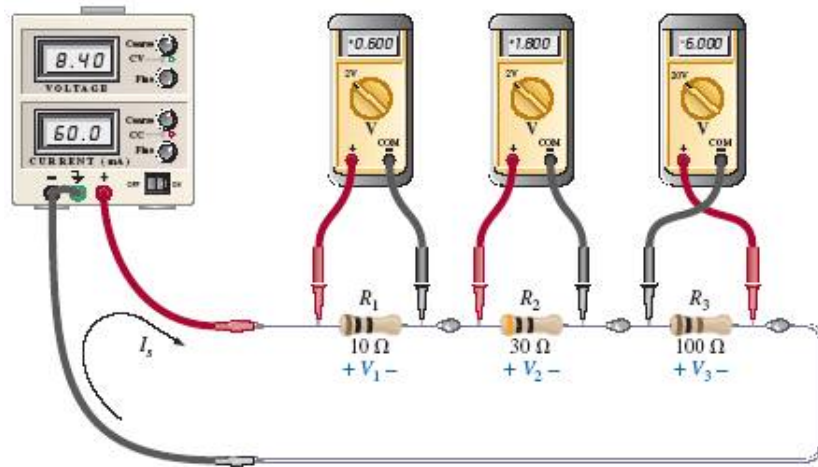


FIG. 5.19

Using voltmeters to measure the voltages across the resistors in Fig. 5.12.

<각 저항 양단의 전압측정 (전압계는 병렬로 연결)>

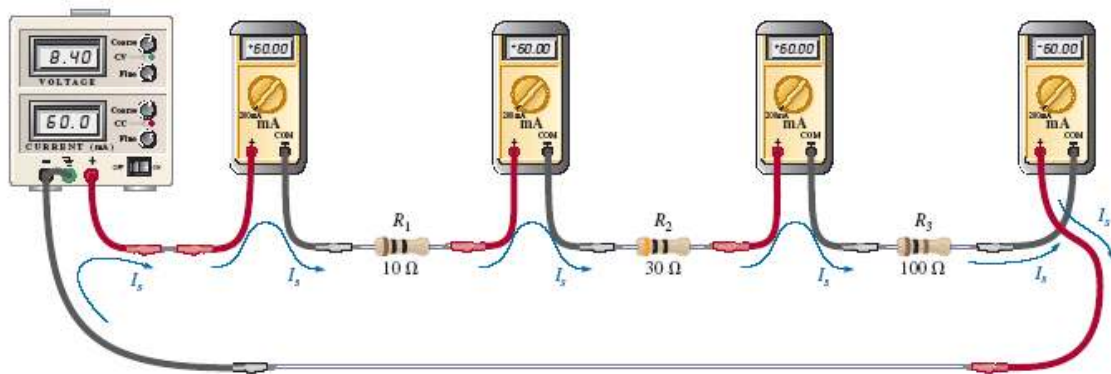


FIG. 5.20

Measuring the current throughout the series circuit in Fig. 5.12.

<모든 회로위치에 흐르는 전류측정 (전류계는 직렬로 연결)>

■ 직렬 회로의 전력분배

- 직렬회로에서 전원에서 제공하는 전력은 각 저항에서 소모하는 전력의 합과 같다.

$$P_E = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3}$$

$$P_E = I_s V_1 + I_s V_2 + I_s V_3 = I_s (V_1 + V_2 + V_3) = I_s E$$

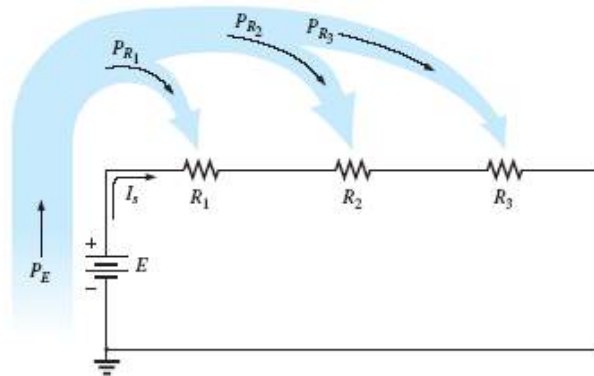


FIG. 5.21  
Power distribution in a series circuit.

**EXAMPLE 5.7** For the series circuit in Fig. 5.22 (all standard values):

- Determine the total resistance  $R_T$ .
- Calculate the current  $I_s$ .
- Determine the voltage across each resistor.
- Find the power supplied by the battery.
- Determine the power dissipated by each resistor.
- Comment on whether the total power supplied equals the total power dissipated.

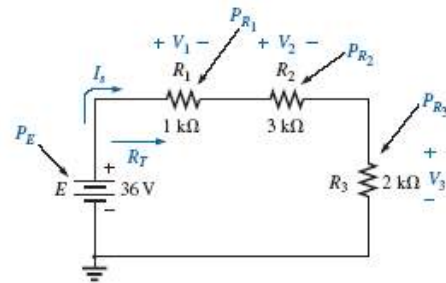


FIG. 5.22  
Series circuit to be investigated in Example 5.7.

**Solutions:**

- $$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

$$= 1 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_T = 6 \text{ k}\Omega$$
- $$I_s = \frac{E}{R_T} = \frac{36 \text{ V}}{6 \text{ k}\Omega} = 6 \text{ mA}$$
- $$V_1 = I_1 R_1 = I_s R_1 = (6 \text{ mA})(1 \text{ k}\Omega) = 6 \text{ V}$$

$$V_2 = I_2 R_2 = I_s R_2 = (6 \text{ mA})(3 \text{ k}\Omega) = 18 \text{ V}$$

$$V_3 = I_3 R_3 = I_s R_3 = (6 \text{ mA})(2 \text{ k}\Omega) = 12 \text{ V}$$
- $$P_E = EI_s = (36 \text{ V})(6 \text{ mA}) = 216 \text{ mW}$$
- $$P_1 = V_1 I_1 = (6 \text{ V})(6 \text{ mA}) = 36 \text{ mW}$$

$$P_2 = I_2^2 R_2 = (6 \text{ mA})^2 (3 \text{ k}\Omega) = 108 \text{ mW}$$

$$P_3 = \frac{V_3^2}{R_3} = \frac{(12 \text{ V})^2}{2 \text{ k}\Omega} = 72 \text{ mW}$$
- $$P_E = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3}$$

$$216 \text{ mW} = 36 \text{ mW} + 108 \text{ mW} + 72 \text{ mW} = 216 \text{ mW} \quad (\text{checks})$$

■ 직렬 전압원 (voltage sources in series)

$N$ 개 전압원이 직렬로 연결되었을 때 전체 전압원의 전압은 각 전압원 전압의 합과 같다.

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_N$$

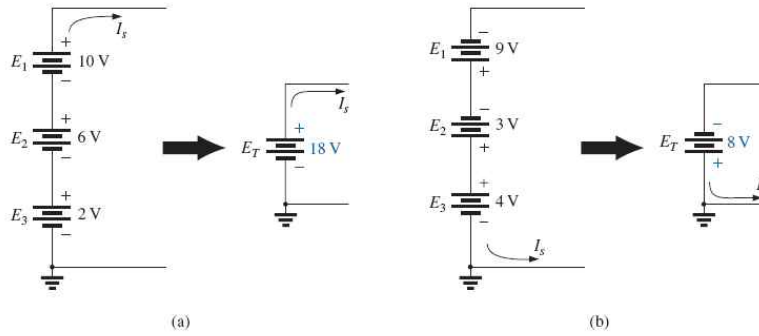


FIG. 5.23

Reducing series dc voltage sources to a single source.

■ 키르히호프 전압법칙 (Kirchhoff's voltage law: KVL)

순환경로(closed path)에 따른 전위차들의 합은 영이다.

$$\sum_{\text{C}} V = 0 \quad (\text{Kirchhoff's voltage law in symbolic form})$$

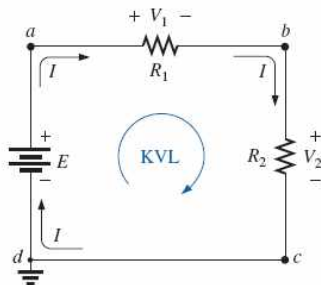


FIG. 5.26

Applying Kirchhoff's voltage law to a series dc circuit.

$$\begin{aligned} -E + V_1 + V_2 &= 0 \\ \Rightarrow (E &= V_1 + V_2) \end{aligned}$$

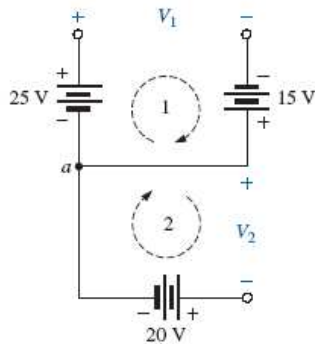


FIG. 5.29

Combination of voltage sources to be examined in Example 5.10.

$$\begin{aligned} +25 \text{ V} - V_1 + 15 \text{ V} &= 0 \\ V_1 &= 40 \text{ V} \\ -V_2 - 20 \text{ V} &= 0 \\ V_2 &= -20 \text{ V} \end{aligned}$$

■ 직렬회로에서의 전압분배 (voltage division in serial circuits)

직렬회로에서 저항 각 단의 전압은 전압 크기에 의해 분배된다.

$$V_{R_1} = E \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$V_{R_2} = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$V_{R_3} = E \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

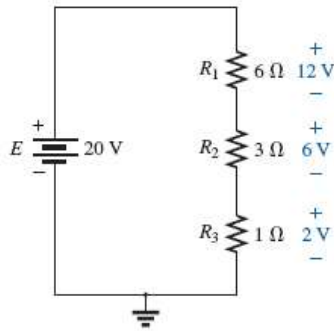


FIG. 5.33

Revealing how the voltage will divide across series resistive elements.

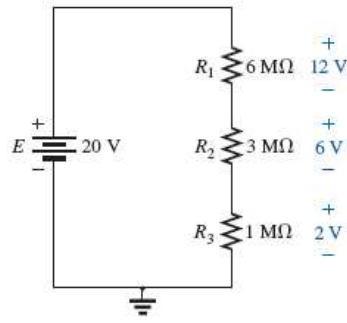


FIG. 5.34

The ratio of the resistive values determines the voltage division of a series dc circuit.

<저항 크기는 다르지만 비율이 같으면 전압분배는 동일함>

■ 전압분배법칙 (voltage divider rule: VDR)

• 직렬회로에서 저항  $R_x$  양단의 전압  $V_x$ :

$$V_x = R_x \frac{E}{R_T} \quad (\text{voltage divider rule})$$

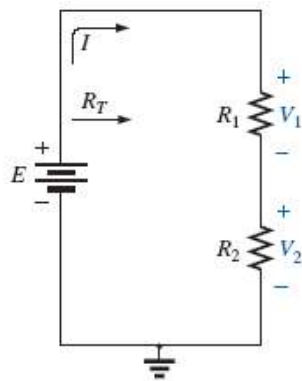
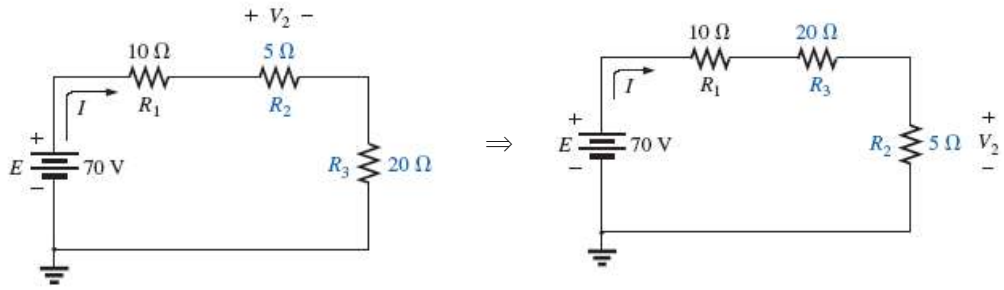


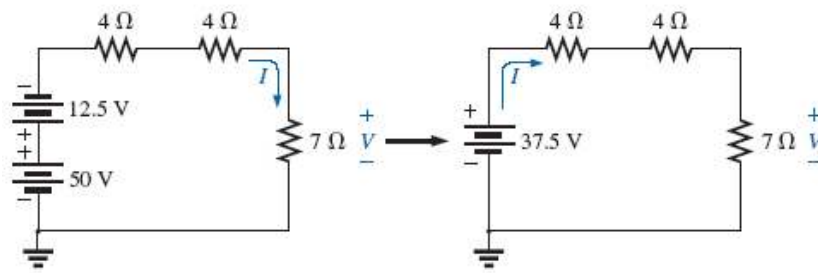
FIG. 5.36

Developing the voltage divider rule.

■ 직렬소자들의 이동



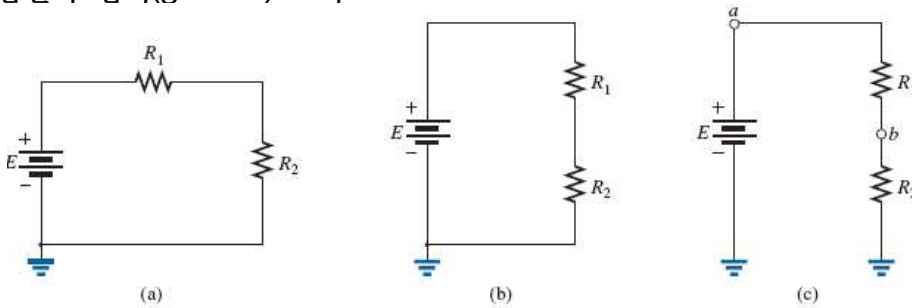
<저항의 위치 이동>



<전압원의 위치 이동>

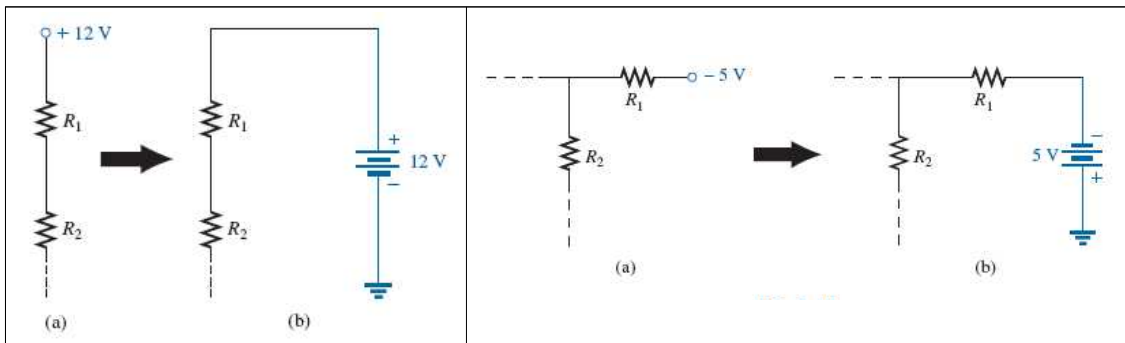
■ 표기 (notation)

■ 전압원과 접지(ground) 표기



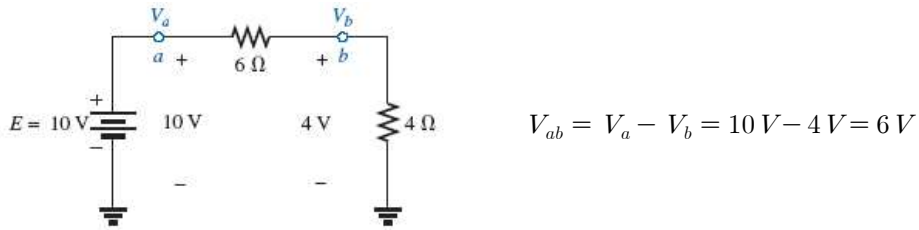
<동일한 직렬회로의 3종류 표기>

■ 전압원 표기



■ 두 양단 전압 표기

$$V_{ab} = V_a - V_b$$



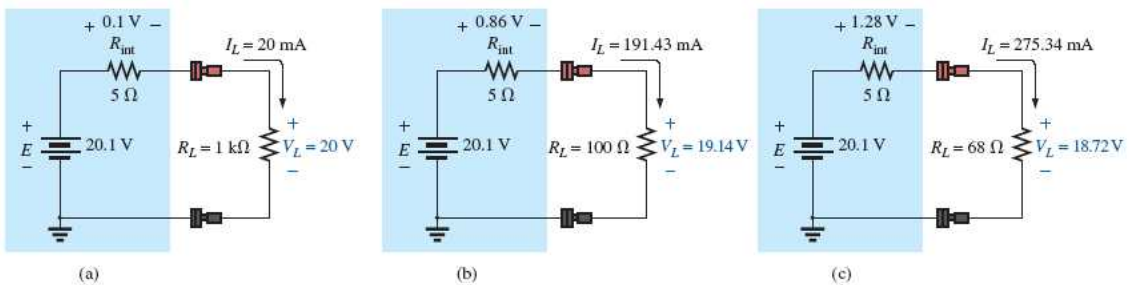
■ 전압원의 내부저항(internal resistance)

- 전압원은 내부저항을 가질 수 있음
- 이상적인 전압원은 내부저항이 0임



□ 전압원의 부하효과(loading effect)

- 전압원이 내부저항  $R_{in}$  을 가질 때, 연결된 부하저항  $R_L$  의 크기에 따라 부하전압  $V_L$  이 달라지는 현상



<내부저항  $R_{in}$  과 부하저항  $R_L$  의 차이에 따른 출력전압의 영향>

$R_{in} \ll R_L$  일수록 부하효과가 적음

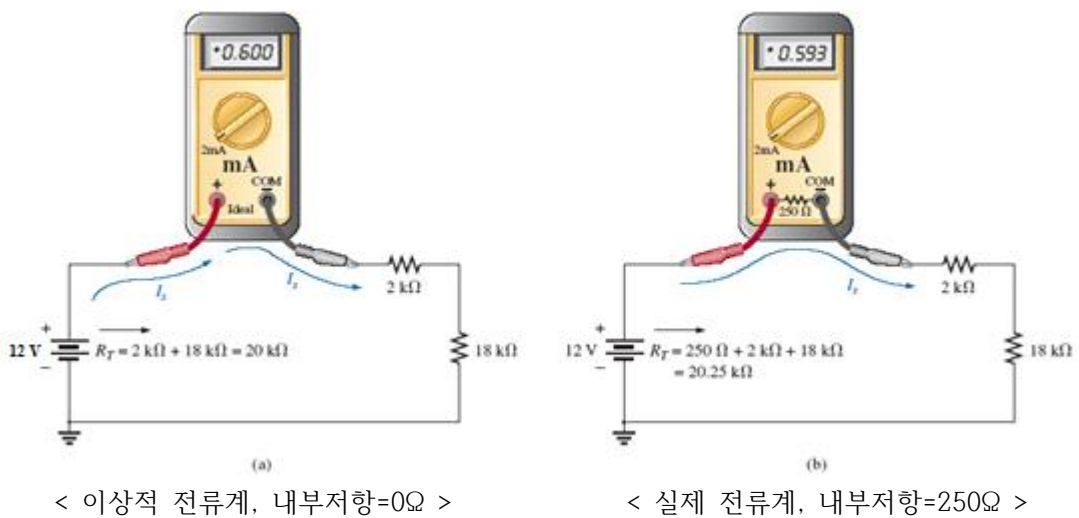


## ■ 계측기의 내부저항

- 계측기는 내부저항을 가질 수 있음
- 이상적인 전류계(ammeter)의 내부저항이 0임
- 이상적인 전압계(voltmeter)의 내부저항은  $\infty$ 임

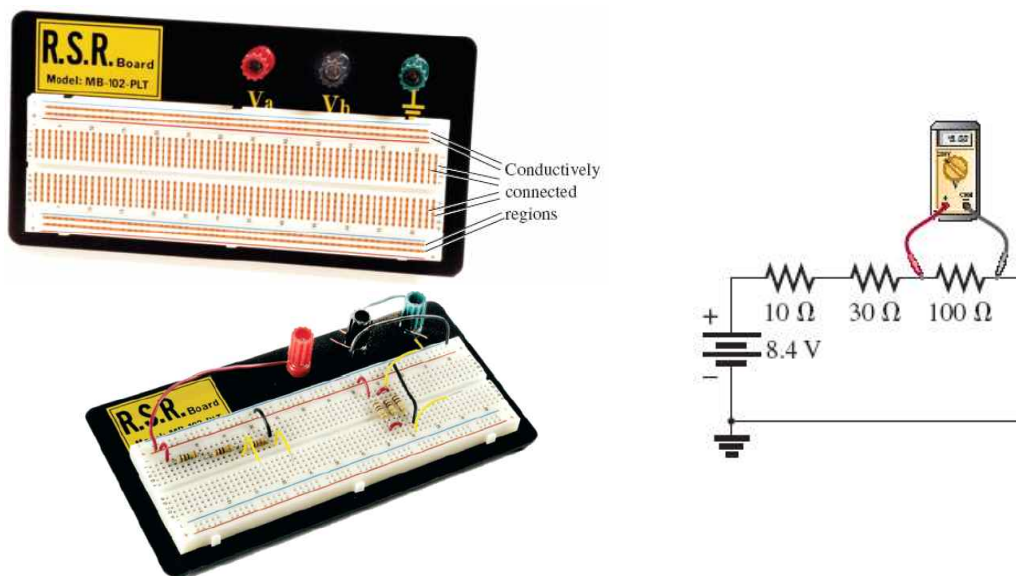
## □ 전류계의 부하효과(loading effect)

- 전류계가 내부저항  $R_m$ 을 가질 때, 연결된 저항의 크기에 따라 전류값이 달라지는 현상
- 전류계의 내부저항이 작을수록 전류오차가 적음



## ■ Protoboards (Breadboards)

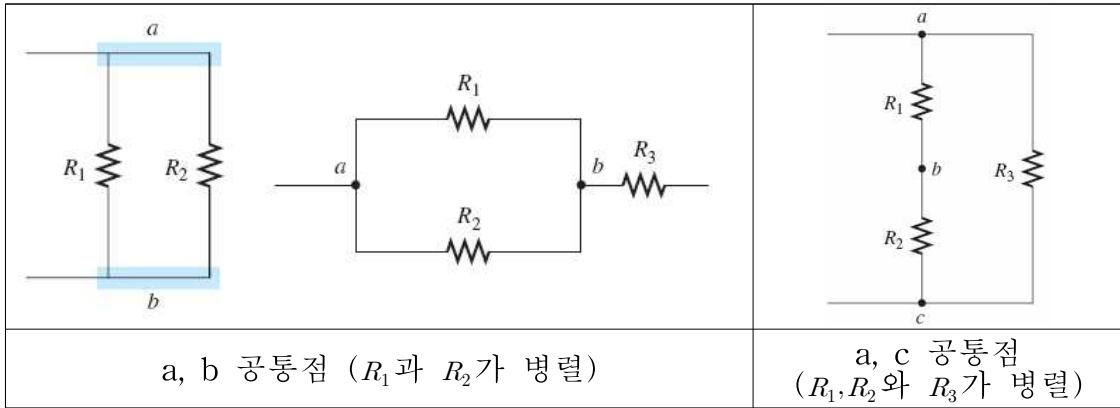
- 회로를 납땜없이 소자를 작은 홀에 삽입하여 실험할 수 있는 실험판



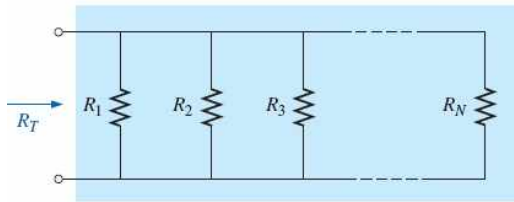
## 제 6장. 병렬 dc회로 (parallel dc circuits)

- 병렬회로: 2개 이상의 소자, 가지(branch) 또는 회로가 2개점에서 만나는 회로

예) 병렬회로의 예



### ▪ 전체 병렬저항



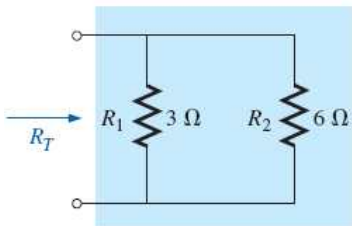
$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

또는  $G = 1/R$ 일 때

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_N \quad [\text{siemens, S}]$$

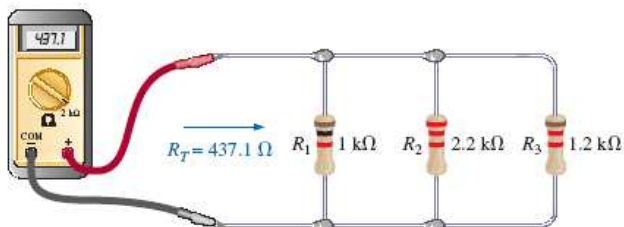
$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}} \quad [\Omega]$$

예)



$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{3\Omega} + \frac{1}{6\Omega}} = 2\Omega$$

예)



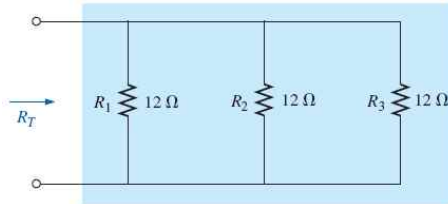
$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{1k\Omega} + \frac{1}{2.2k\Omega} + \frac{1}{1.2k\Omega}} = 437.1\Omega$$

- 동일한 저항 N개가 병렬일 때의 전체저항

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \dots + \frac{1}{R_N}} = \frac{1}{N\left(\frac{1}{R}\right)}$$

$$R_T = \frac{R}{N}$$

예)



- 동일 저항(12Ω) 3개 병렬

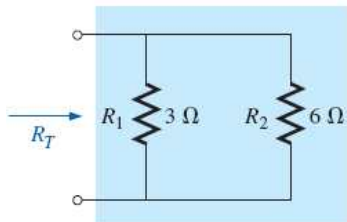
$$R_T = \frac{12\Omega}{3} = 4\Omega$$

- 2개 병렬저항

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{1}{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}} \quad [\Omega]$$

$$R_T = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

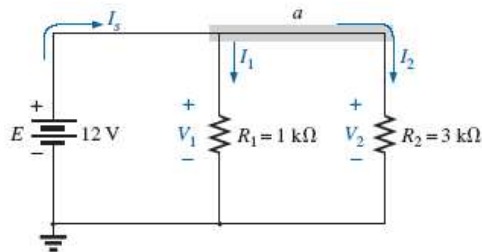
예)



$$R_T = 3\Omega \parallel 6\Omega = \frac{(3\Omega)(6\Omega)}{3\Omega + 6\Omega} = \frac{18}{9}\Omega = 2\Omega$$

### ▪ 병렬회로 (parallel circuits)

병렬회로에서 병렬소자 양단의 전압은 동일하다.



$$E = V_1 = V_2 = 12V$$

$$R_T = R_1 \parallel R_2 = 0.75k\Omega$$

$$I_s = \frac{E}{R_T} = \frac{12V}{0.75k\Omega} = 16mA$$

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{E}{R_1} = \frac{12V}{1k\Omega} = 12mA$$

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{E}{R_2} = \frac{12V}{3k\Omega} = 4mA$$

$$I_s = I_1 + I_2$$

pf)  $\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$  이므로 양변에 인가전압  $E$ 를 곱하면

$$\frac{E}{R_T} = \frac{E}{R_1} + \frac{E}{R_2}$$

이 되고,  $I_s = E/R_T$ ,  $I_1 = E/R_1$  및  $I_2 = E/R_2$ 이므로

$$I_s = I_1 + I_2$$

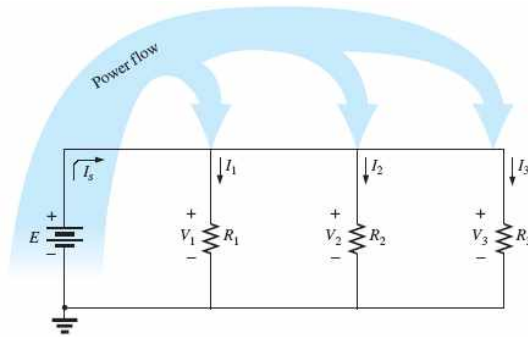
이다.

### ■ 병렬회로의 전력분배

- 전원에서 제공하는 전력은 각 저항에서 소모하는 전력의 합과 같다.

$$P_E = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3}$$

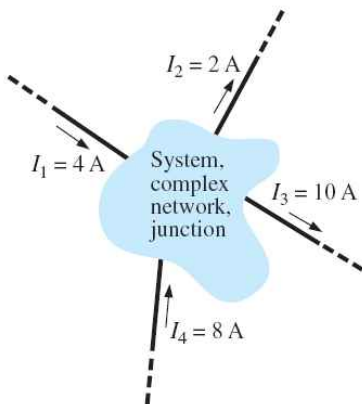
$$P_E = I_1 V_1 + I_2 V_2 + I_3 V_3 = I_1 E + I_2 E + I_3 E = (I_1 + I_2 + I_3) E = I_s E$$



### ■ 키르히호프 전류법칙 (Kirchhoff's current law: KCL)

회로의 한 점 또는 영역으로 들어가는 전류와 나가는 전류의 합은 영이다.

$$\sum I_i = \sum I_o$$



- 유입되는 전류의 합 :

$$\sum I_i = I_1 + I_4 = 4A + 8A = 12A$$

- 유출되는 전류의 합 :

$$\sum I_o = I_2 + I_3 = 2A + 10A = 12A$$

- 유출되는 전류의 합 :  $\sum I_i = \sum I_o = 12A$

■ 전류분배법칙 (current divider rule: CDR)

• 병렬회로에서 저항  $R_x$  에 흐르는 전류  $I_x$  :

$$I_x = \frac{R_T}{R_x} I_T \quad (\text{current divider rule})$$

pf) 전체전류는  $I_T = \frac{V}{R_T}$  이고, 병렬저항 양단의 전압은 모두  $V$ 이므로

$$V = I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3 = \dots = I_x R_x$$

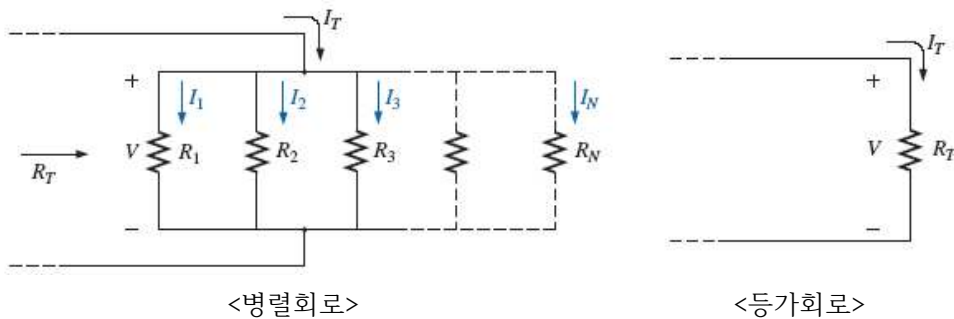
이다. 전체전류는

$$I_T = \frac{V}{R_T} = \frac{I_x R_x}{R_T}$$

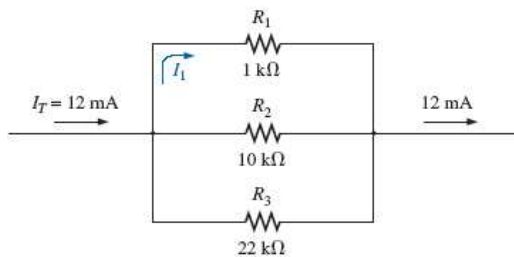
이므로

$$I_x = \frac{R_T}{R_x} I_T$$

이다.



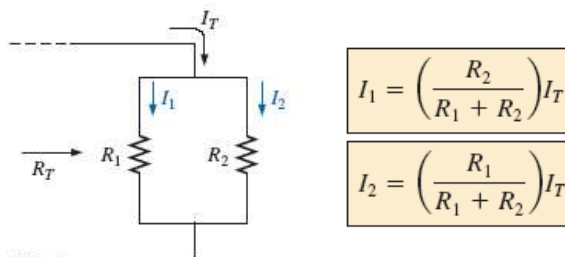
예)



$$R_T = 1k\Omega \parallel 10k\Omega \parallel 22k\Omega = 873.01\Omega$$

$$I_1 = \frac{R_T}{R_1} I_T = \frac{873.01\Omega}{1k\Omega} 12mA = 10.48mA$$

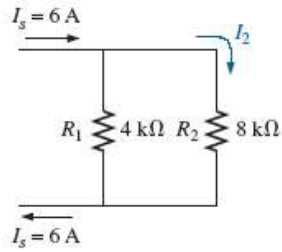
■ 2개 병렬저항의 전류분배



$$I_1 = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) I_T$$

$$I_2 = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) I_T$$

예)



$$I_2 = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) I_s$$

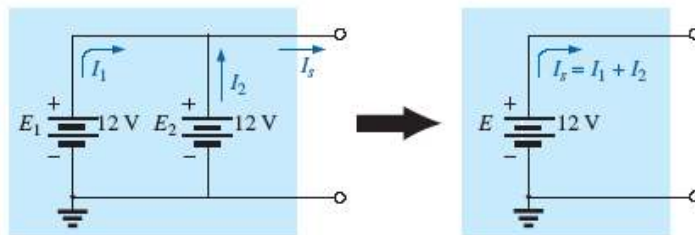
$$= \left( \frac{4k\Omega}{4k\Omega + 8k\Omega} \right) 6A = (0.333)(6A) = 2A$$

$$I_1 = I_s - I_2 = 6A - 2A = 4A$$

$I_1 = I_2 = \frac{I_T}{2}$	$I_1 = 2I_2$	$I_1 = \left( \frac{6}{2} \right) I_2 = 3I_2$	$I_1 = 6I_3$ $I_1 = 3I_2$ $I_2 = \left( \frac{6}{3} \right) I_3 = 2I_3$
저항이 같을 때 전류는 서로 동일	저항이 1/2배일 때 전류는 2배	저항이 1/3배일 때 전류는 3배	두 저항 배율의 역으로 전류가 흐름

### ■ 병렬 전압원 (voltage sources in parallel)

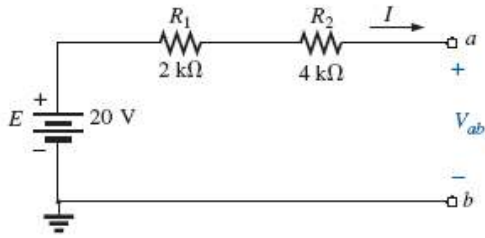
동일한 전압원이 병렬로 연결될 때 1개의 전압원으로 대체할 수 있다.



### ■ 개방(open)과 단락(short)

회로의 개방 (open)	회로의 단락 (short)
<p>System</p> <p><math>I = 0A</math></p> <p>Open circuit</p> <p><math>V</math></p>	<p>Short circuit</p> <p>System</p> <p><math>I</math></p> <p><math>V = 0V</math></p>

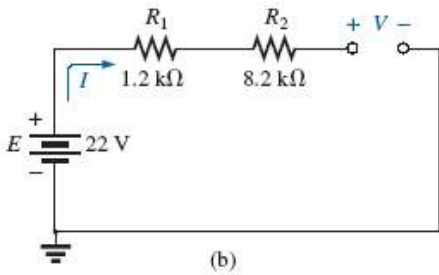
• 개방(open)회로의 예



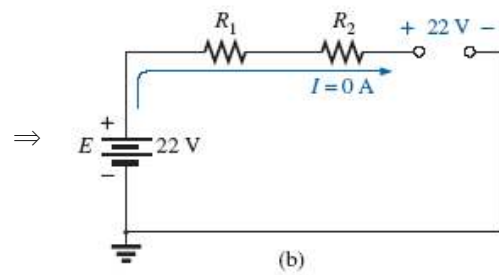
회로가 개방되어 전류가 흐르지 못함

$$I = 0 \text{ [A]}$$

$$V_{ab} = E - V_{R_1} - V_{R_2} \\ = 20 \text{ V} - I(2 \text{ k}\Omega + 4 \text{ k}\Omega) = 20 \text{ V} - 0 = 20 \text{ V}$$



(b)



(b)

• 단락(short)회로의 예

(a) 단락 전

(b) 단락 후

(a) 단락 전에는 전류  $I = 10 \text{ V} / 2 \Omega = 5 \text{ A}$

(b) 저항(2Ω)양단에 선을 연결하면 단락(short)되어  $R_T$ 는 0이 됨 ( $R_T = 5 \Omega \parallel 0 \Omega = 0 \Omega$ )  
 전류는  $I = 10 \text{ V} / 0 \Omega = \infty \text{ A}$ 으로 과도하게 흘러 휴즈가 개방됨 ( $I = 0 \text{ A}$ )  
 저항양단의 전압 (또는 단락회로 양단의 전압)은  $V_{short \ circuit} = 0 \text{ V}$ 이다.

단락회로로 전체전류  $I_T$ 가 모두 흐르고, 단락회로 양단전압은 0V이다.

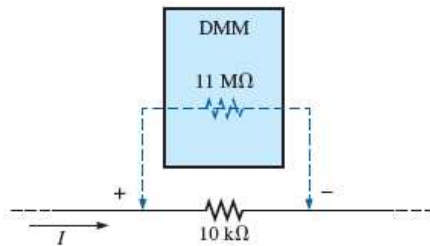
■ 전압계 부하효과 (voltmeter loading effects)

이상적인 전압계는 내부저항이 무한대여야 하며, 실제 전압계는 내부저항이 무한대가 아님  
 으로 인해 측정오차를 유발하는 현상

- 1)  $10k\Omega$  양단의 전압을 측정하기 위해 DMM(digital multimeter)를 연결한 경우  
 DMM의 내부저항이  $11M\Omega$ 이면,  $10k\Omega$ 와 병렬로 연결되어 전체저항은

$$R_T = 11M\Omega \parallel 10k\Omega = 9.99k\Omega$$

로 큰 오차가 없음 ( $\because$  내부저항이 상대적으로 큰 저항임,  $11M\Omega \gg 10k\Omega$ )

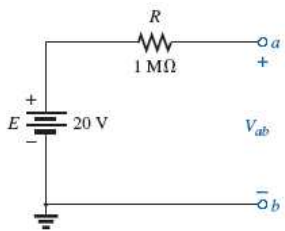


- 2)  $10k\Omega$  양단의 전압을 측정하기 위해 VOM(volt-ohm meter)를 연결한 경우  
 VOM의 내부저항이  $50k\Omega$ 이면,  $10k\Omega$ 와 병렬로 연결되어 전체저항은

$$R_T = 10k\Omega \parallel 50k\Omega = 8.33k\Omega$$

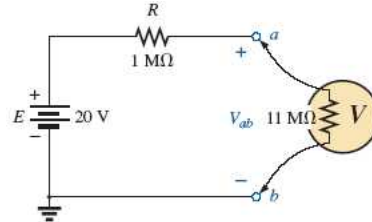
로 큰 오차를 가짐 ( $\because$  내부저항이 상대적으로 큰 저항이 아님)

- 3) 개방회로의  $V_{ab} = 20V$ 을 측정하기 위해 전압계를 연결한 경우



$$V_{ab} = 20V$$

<전압계 연결 전 개방회로>



$$V_{ab} = 20V \frac{11M\Omega}{1M\Omega + 11M\Omega} = 18.33V$$

<전압계(내부저항이  $11M\Omega$ ) 연결 후>

■ 브레드보드(breadboard)에 병렬회로 구성 예

