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)

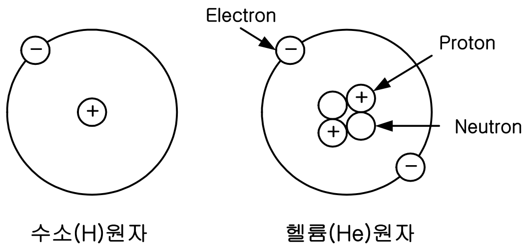
■ 원자구조

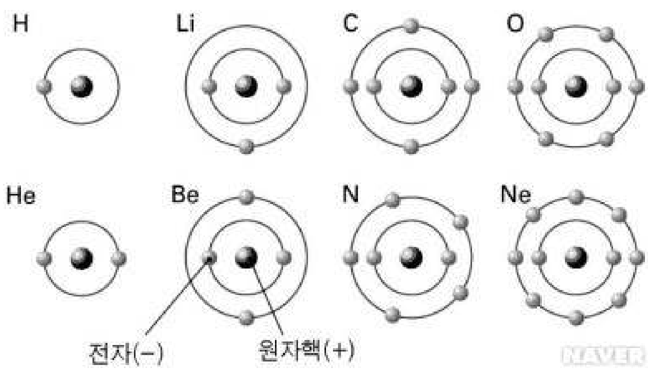
- 원자(atom)
  - 전자(electron) (-)
  - 핵(nucleus)
    - 양성자(proton) (+)
    - 중성자(neutron)

(-) : 음전하(negative charge)
(+) : 양전하(positive charge)

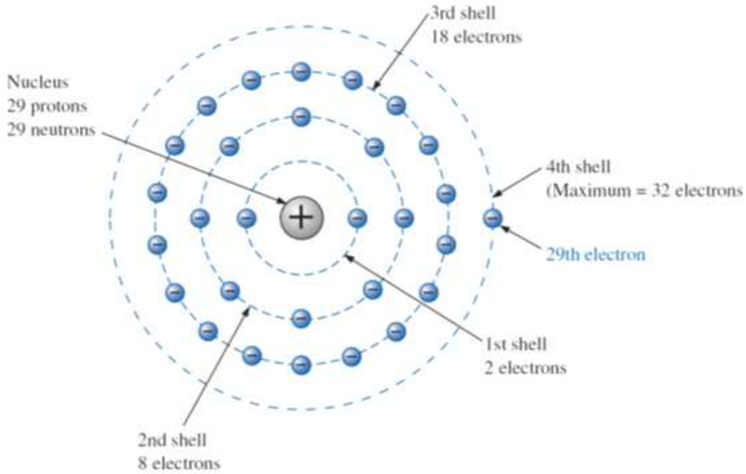
- 원자내의 전자수와 양성자의수는 같음 (원자는 전기적으로 중성임)
- 핵주위의 shell이라 불리는 궤도들에 전자가 분포 (전자의 수가 원자번호임)
- n번째 shell에 포함될 수 있는 최대 전자개수: $2n^2$ (2, 8, 18, 32, ⋯)

- 원자구조의 예

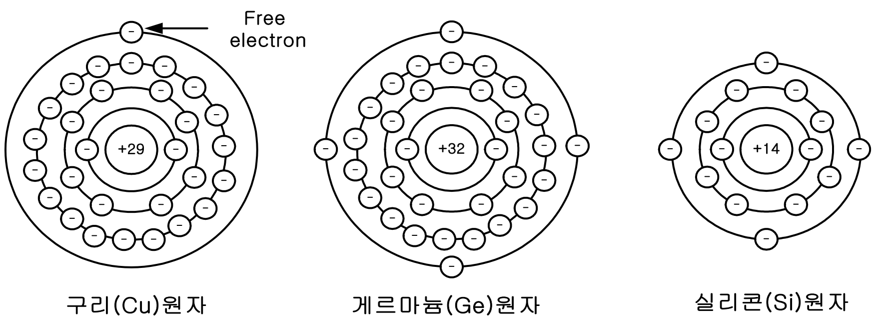




<원자들의 전자수(원자번호) 예>



< 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 1.602×10^{-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	

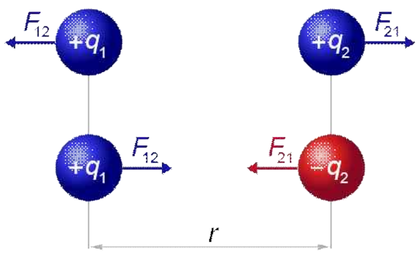
■ 쿨롬법칙(Coulomb's law)

• 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

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

여기서 $k = 9.0 \times 10^9 \quad Nm^2/C^2$



$$F_{12} = F_{21} = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

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

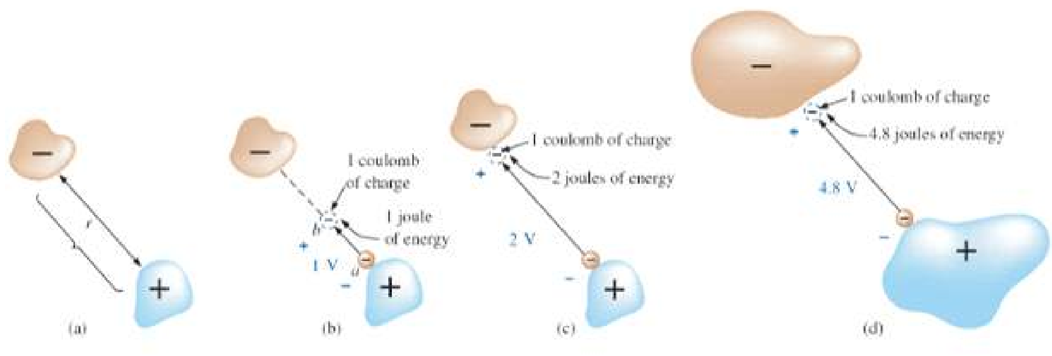
▪ 1쿨롬의 전하가 두 점 사이를 이동할 때 얻거나 잃는 에너지(J, joule)

▪ 전압 1볼트(volt)는 1쿨롬의 전하가 두 점간을 이동할 때 얻거나 잃는 에너지가 1주울(joule)일 때의 전위차임

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

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.

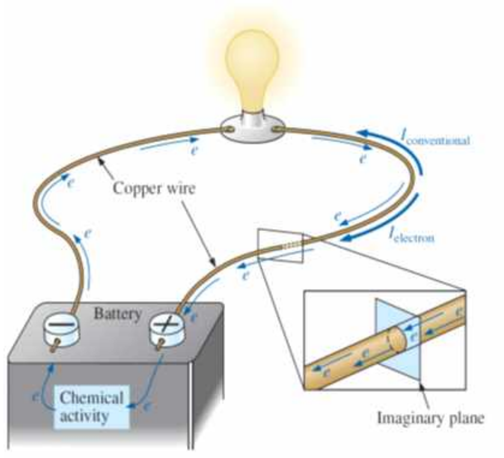
■ 전류(current)

▪ 어느 단면을 단위시간에 통과하는 전하의 양

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

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

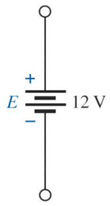
→ 1초에 1[C]의 전하(6.242×10^{18}개의 전자)가 가상의 단면을 이동할 때 전류 1[A]가 흐른다고 함



<기본적 전기회로>

■ 전압원(voltage source)

▪ 출력전류에 무관하게 일정 전압을 발생시키는 회로소자 (내부저항은 영임)



<직류(direct current: dc) 전압원의 기호>

▪ 직류 전압원(dc voltage sources)

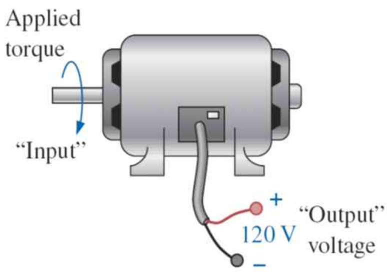
① 배터리(batteries)

- 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)

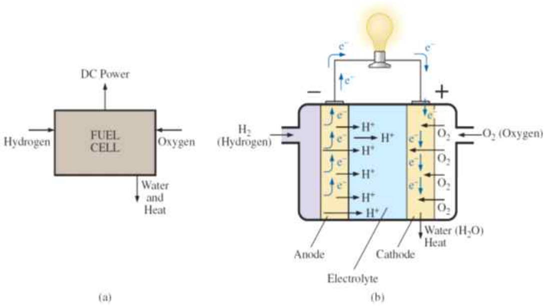


FIG. 2.21 *Fuel cell (a) components; (b) basic construction.*

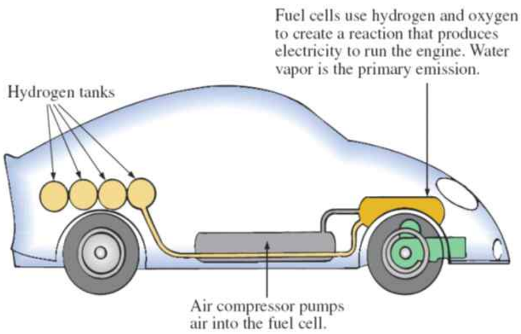


FIG. 2.22 *Hydrogen fuel-cell automobile.*

제 3장. 저항 (resistance)

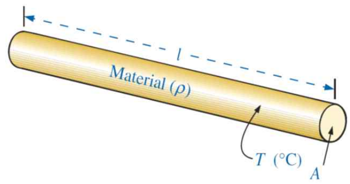
▪ 저항 : 전기회로에서 전하의 흐름을 방해하는 작용 (단위는 오옴(ohm), Ω)

<저항의 기호>

▪ 물체의 저항

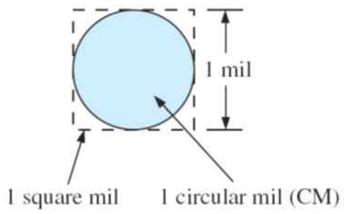
$$\boxed{R = \rho \frac{l}{A}}$$

ρ = CM-Ω/ft at T=20℃ (물질의 저항성(resistivity))
l = feet
A = area in circular mils (CM)



\- Circular Mil (CM)

$$\boxed{1\,mil = \frac{1}{1000}in \qquad \text{또는} \qquad 1000\,mil = 1\,in}$$

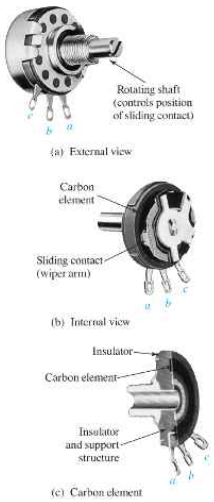


<Circular mil의 정의>

● 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



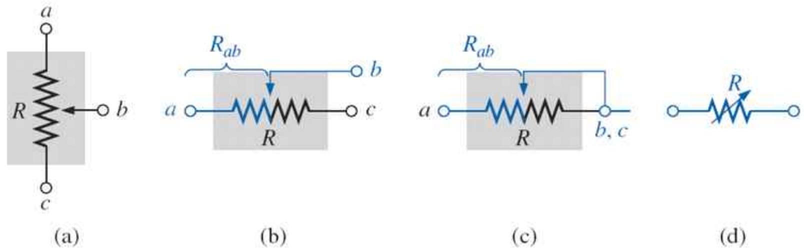
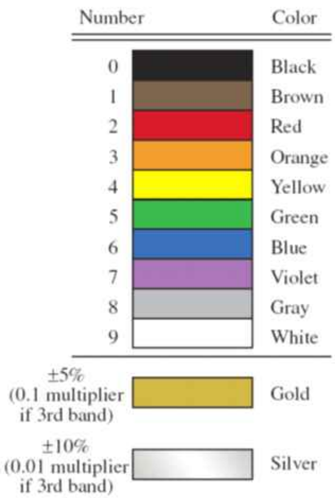
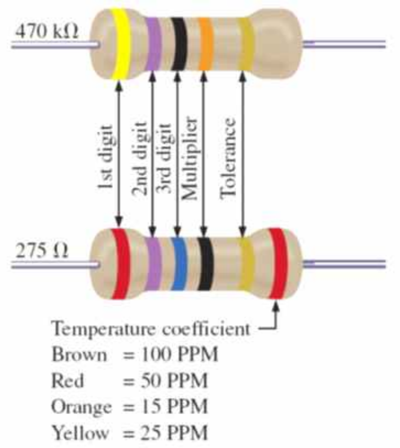


FIG. 3.16 *Potentiometer: (a) symbol; (b) and (c) rheostat connections; (d) rheostat symbol.*

- 저항값 읽기





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	$82 \times 10^{-1}\Omega = 8.2\Omega$	7.38Ω ~ 9.02Ω
	은색	오차범위 ±10%	

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

■ 오옴의 법칙(Ohm's law)

▪ 전압(E)는 전류(I)에 비례하며, 비례상수는 저항(R)이다.

$$\boxed{E = I \cdot R}$$

E : 전압 (전위차) [V]
I : 전류 [A]
R : 저항 [Ω]

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

▪ 1Ω의 저항(R)양단에 1V의 전압(E)이 인가되면 저항으로 1A의 전류(I)가 흐른다.

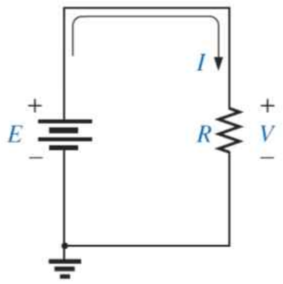


FIG. 4.2 Basic circuit.

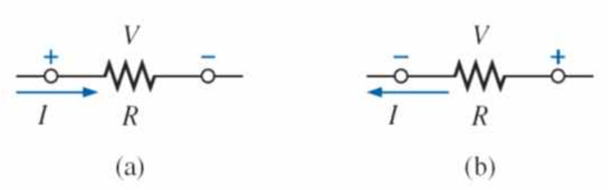


FIG. 4.3 Defining polarities.

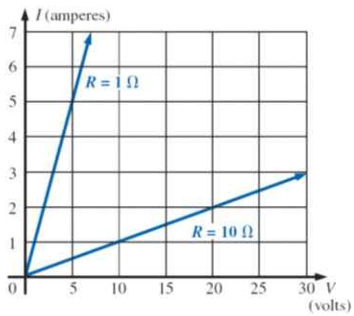


FIG. 4.7 Demonstrating on an I-V plot that the lower the resistance, the steeper is the slope.

■ 전력(Power)

▪ 힘(P)은 단위시간당 소모하는 에너지(W)이다.

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

▪ 전력(P): 전기의 힘

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

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

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

■ 에너지(Energy)

▪ 에너지는 시간 t동안 사용한 힘(P)이다.

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

제 5장. 직렬 dc회로 (series dc circuits)

■ **직렬 저항 (series resistor)**

N개의 저항들이 직렬로 연결되었을 때 전체저항은 각 저항의 합과 같다.

$$\boxed{R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \cdot\cdot\cdot + R_N}$$

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

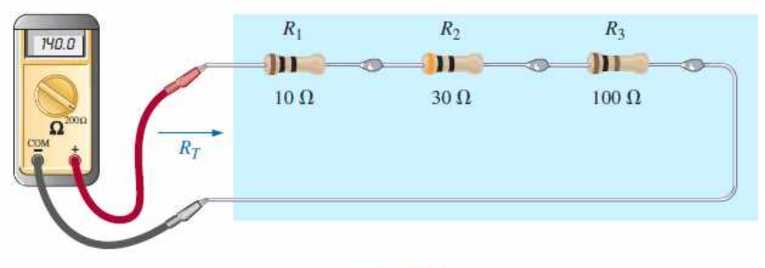


FIG. 5.11
Using an ohmmeter to measure the total resistance of a series circuit.

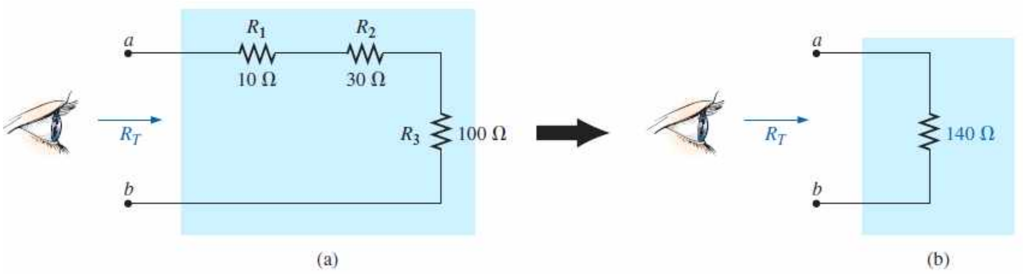


FIG. 5.13
Resistance "seen" at the terminals of a series circuit.

■ **직렬 회로 (serial circuits)**

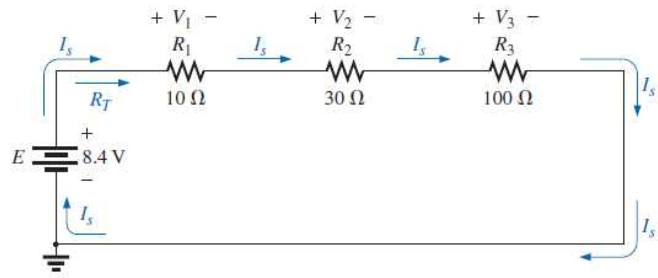


FIG. 5.12
Schematic representation for a dc series circuit.

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

• 각 저항간의 전압 :

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

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

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

• <u>직렬회로에서 인가 전압 E는 각 저항전압의 합과 같다.</u>

$$\boxed{E = V_1 + V_2 + V_3} \quad \Rightarrow \quad 8.4\,V = 0.6\,V + 1.8\,V + 6.0\,V = 8.4\,V$$

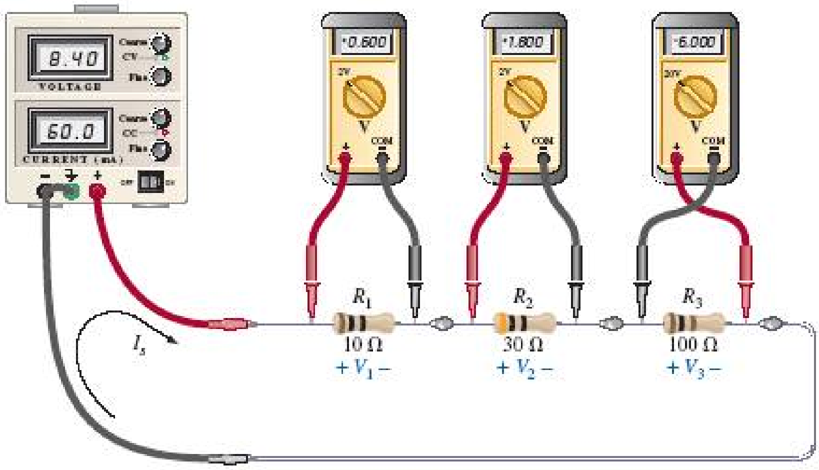


FIG. 5.19
Using voltmeters to measure the voltages across the resistors in Fig. 5.12.

<각 저항 양단의 전압측정 (전압계는 병렬로 연결)>

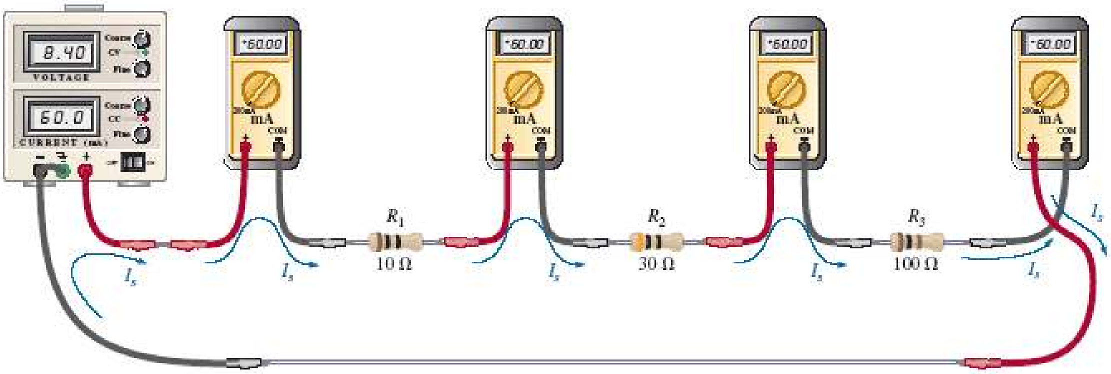


FIG. 5.20
Measuring the current throughout the series circuit in Fig. 5.12.

<모든 회로위치에 흐르는 전류측정 (전류계는 직렬로 연결)>

■ **직렬 회로의 전력분배**

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

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

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

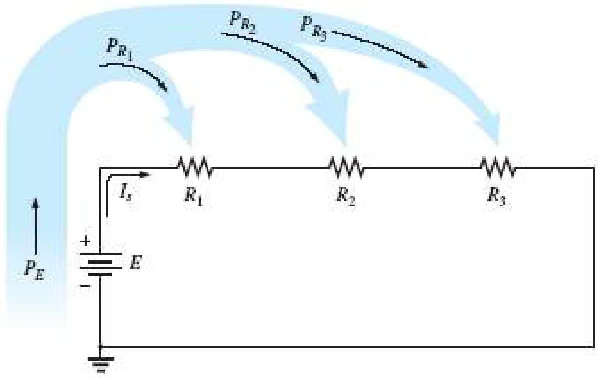


FIG. 5.21
Power distribution in a series circuit.

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

a. Determine the total resistance R_T.
b. Calculate the current I_s.
c. Determine the voltage across each resistor.
d. Find the power supplied by the battery.
e. Determine the power dissipated by each resistor.
f. Comment on whether the total power supplied equals the total power dissipated.

Solutions:

a. $R_T = R_1 + R_2 + R_3$
$\quad = 1\ \text{k}\Omega + 3\ \text{k}\Omega + 2\ \text{k}\Omega$
$R_T = \mathbf{6\ k\Omega}$

b. $I_s = \dfrac{E}{R_T} = \dfrac{36\ \text{V}}{6\ \text{k}\Omega} = \mathbf{6\ mA}$

c. $V_1 = I_1R_1 = I_sR_1 = (6\ \text{mA})(1\ \text{k}\Omega) = \mathbf{6\ V}$
$V_2 = I_2R_2 = I_sR_2 = (6\ \text{mA})(3\ \text{k}\Omega) = \mathbf{18\ V}$
$V_3 = I_3R_3 = I_sR_3 = (6\ \text{mA})(2\ \text{k}\Omega) = \mathbf{12\ V}$

d. $P_E = EI_s = (36\ \text{V})(6\ \text{mA}) = \mathbf{216\ mW}$

e. $P_1 = V_1I_1 = (6\ \text{V})(6\ \text{mA}) = \mathbf{36\ mW}$
$P_2 = I_2^2R_2 = (6\ \text{mA})^2(3\ \text{k}\Omega) = \mathbf{108\ mW}$
$P_3 = \dfrac{V_3^2}{R_3} = \dfrac{(12\ \text{V})^2}{2\ \text{k}\Omega} = \mathbf{72\ mW}$

f. $P_E = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3}$
$216\ \text{mW} = 36\ \text{mW} + 108\ \text{mW} + 72\ \text{mW} = \mathbf{216\ mW}$ (checks)

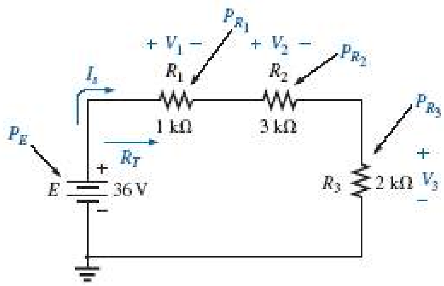


FIG. 5.22
Series circuit to be investigated in Example 5.7.

■ **직렬 전압원 (voltage sources in series)**

N개 전압원이 직렬로 연결되었을 때 전체 전압원의 전압은 각 전압원 전압의 합과 같다.

$$\boxed{E_T = E_1 + E_2 + E_3 + \cdot\cdot\cdot + E_N}$$

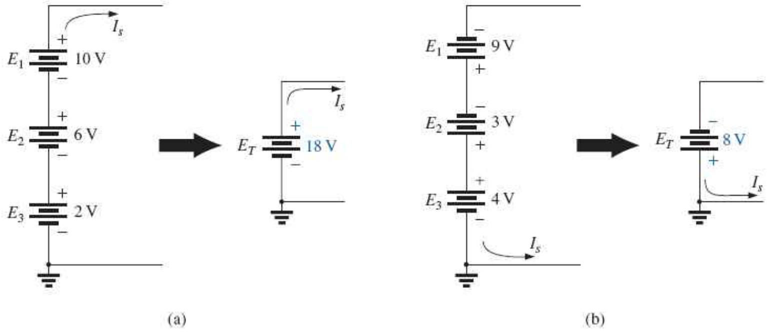


FIG. 5.23
Reducing series dc voltage sources to a single source.

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

<u>순환경로(closed path)에 따른 전위차들의 합은 영이다.</u>

$$\boxed{\Sigma_{\circlearrowright} V = 0}$$ (Kirchhoff's voltage law in symbolic form)

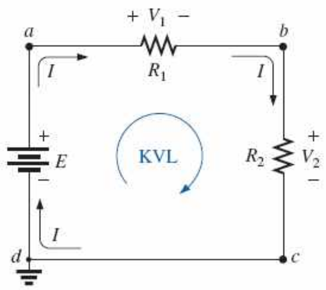


FIG. 5.26
Applying Kirchhoff's voltage law to a series dc circuit.

$$-E + V_1 + V_2 = 0$$
$$\Rightarrow (\ E = V_1 + V_2\ )$$

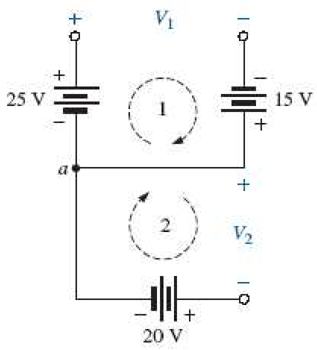


FIG. 5.29
Combination of voltage sources to be examined in Example 5.10.

$$+25\text{ V} - V_1 + 15\text{ V} = 0$$
$$V_1 = \mathbf{40\text{ V}}$$

$$-V_2 - 20\text{ V} = 0$$
$$V_2 = \mathbf{-20\text{ V}}$$

■ **직렬회로에서의 전압분배 (voltage division in serial circuits)**

직렬회로에서 저항 각 단의 전압은 전압 크기에 의해 분배된다.

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

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

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

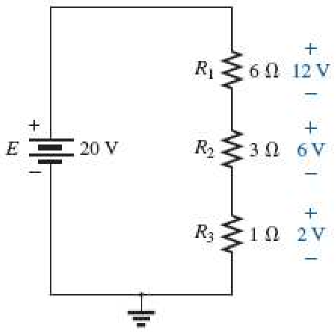


FIG. 5.33
Revealing how the voltage will divide across series resistive elements.

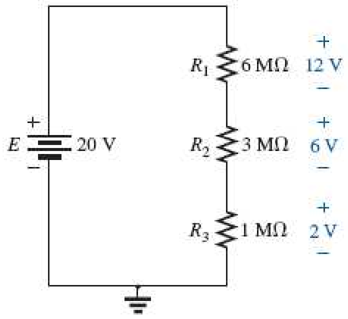


FIG. 5.34
The ratio of the resistive values determines the voltage division of a series dc circuit.

<저항 크기는 다르지만 비율이 같으면 전압분배는 동일함>

■ **전압분배법칙 (voltage divider rule: VDR)**

• 직렬회로에서 저항 R_x 양단의 전압 V_x:

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

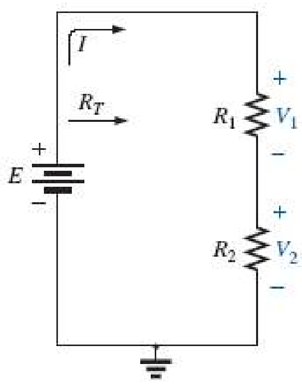
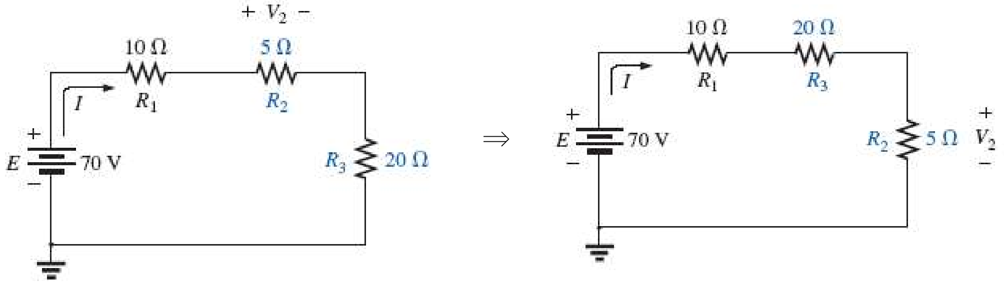
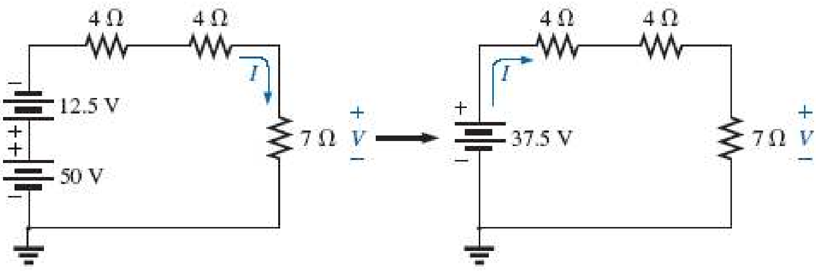


FIG. 5.36
Developing the voltage divider rule.

■ 직렬소자들의 이동



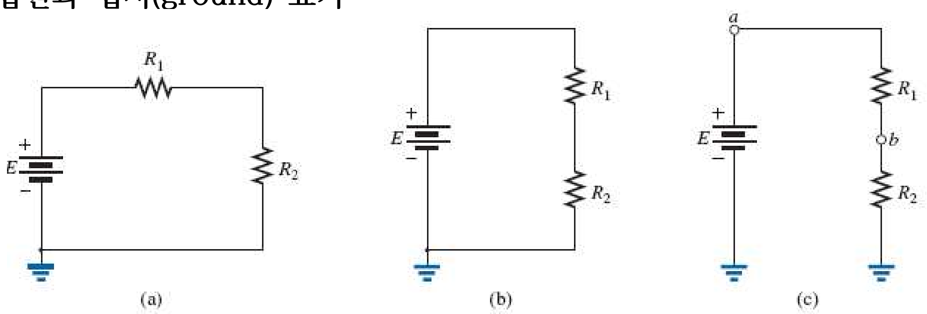
<저항의 위치 이동>



<전압원의 위치 이동>

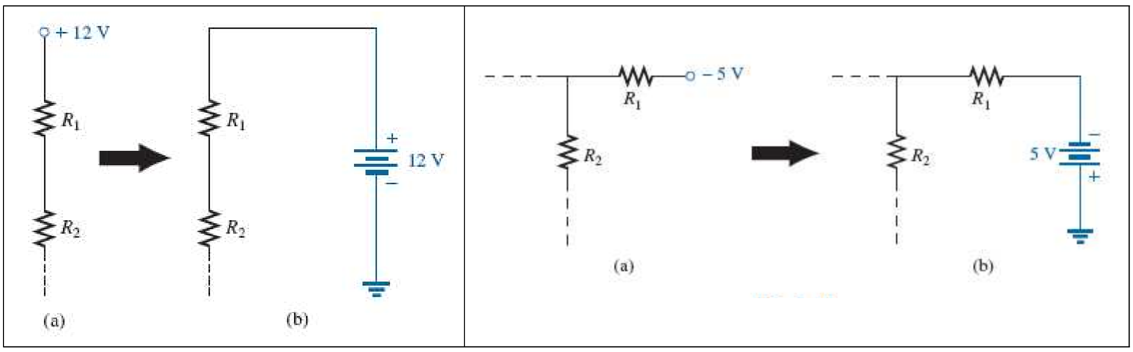
■ 표기 (notation)

■ 전압원과 접지(ground) 표기



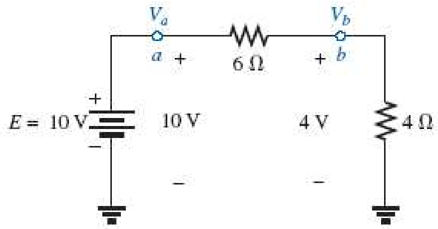
<동일한 직렬회로의 3종류 표기>

■ 전압원 표기



■ **두 양단 전압 표기**

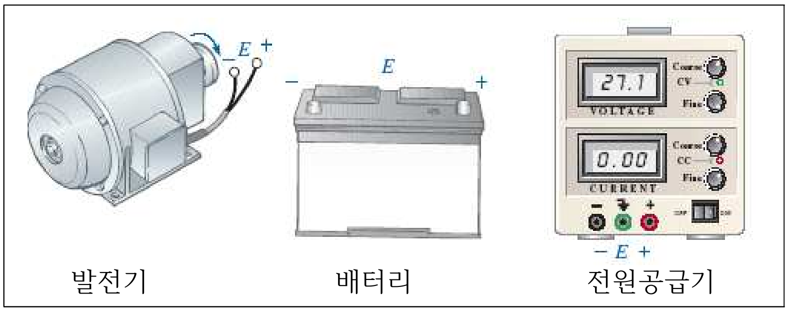
$$V_{ab} = V_a - V_b$$



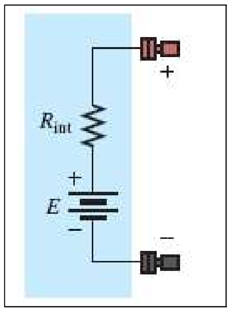
$$V_{ab} = V_a - V_b = 10\,V - 4\,V = 6\,V$$

■ 전압원의 내부저항(internal resistance)

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



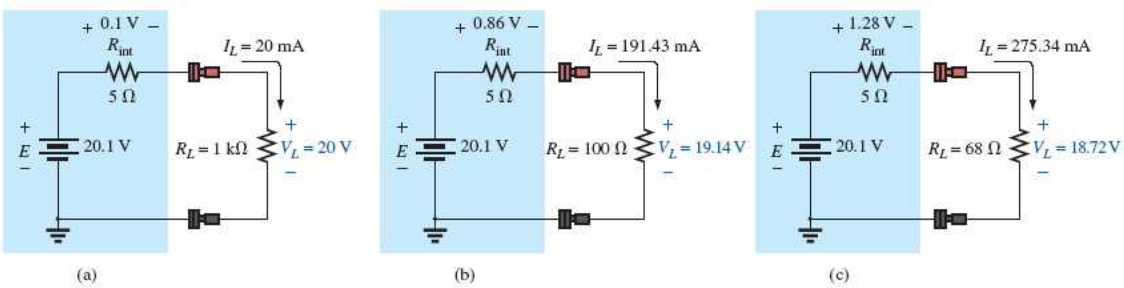
⇒



<전압원> <내부저항 표기>

□ 전압원의 부하효과(loading effect)

- 전압원이 내부저항 R_{in}을 가질 때, 연결된 부하저항 R_L의 크기에 따라 부하전압 V_L이 달라지는 현상



<내부저항 R_{in}과 부하저항 R_L의 차이에 따른 출력전압의 영향>

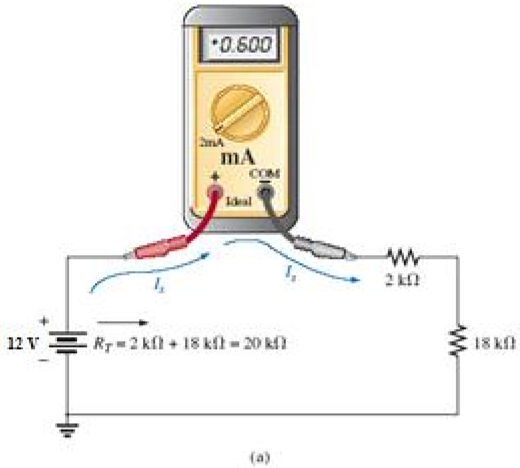
$R_{in} \ll R_L$일수록 부하효과가 적음

■ 계측기의 내부저항

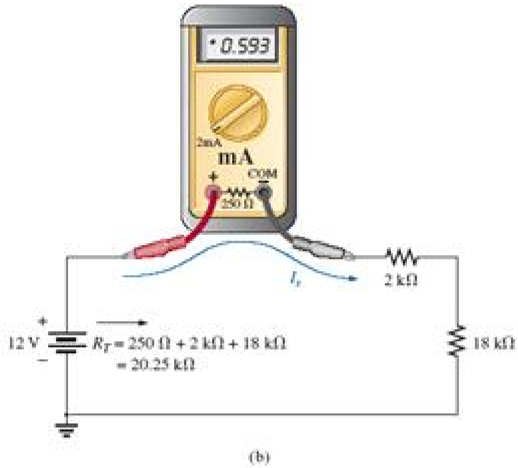
- 계측기는 내부저항을 가질 수 있음
- 이상적인 전류계(ammeter)의 내부저항이 0임
- 이상적인 전압계(voltmeter)의 내부저항은 ∞임

◻ 전류계의 부하효과(loading effect)

- 전류계가 내부저항 R_{in}을 가질 때, 연결된 저항의 크기에 따라 전류값이 달라지는 현상
- 전류계의 내부저항이 작을수록 전류오차가 적음



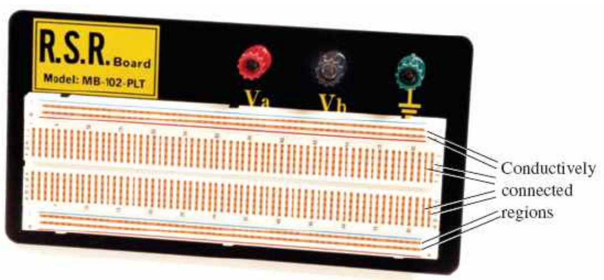
< 이상적 전류계, 내부저항=0Ω >

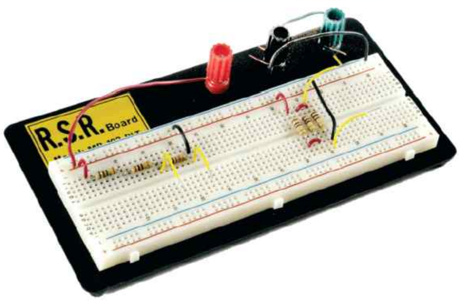


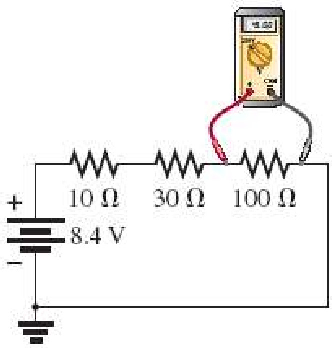
< 실제 전류계, 내부저항=250Ω >

■ Protoboards (Breadboards)

- 회로를 납땜없이 소자를 작은 홀에 삽입하여 실험할 수 있는 실험판



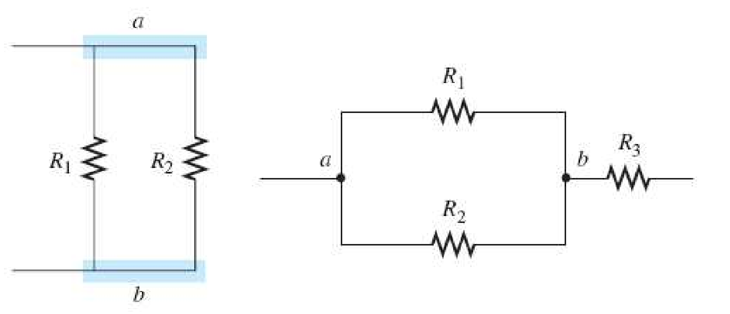
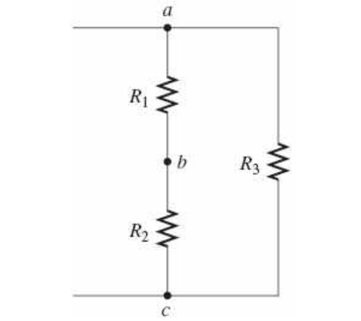




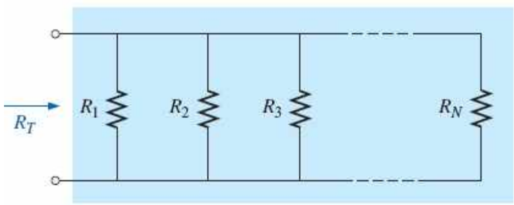
제 6장. 병렬 dc회로 (parallel dc circuits)

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

예) 병렬회로의 예

	
a, b 공통점 (R_1과 R_2가 병렬)	a, c 공통점 (R_1,R_2와 R_3가 병렬)

■ **전체 병렬저항**



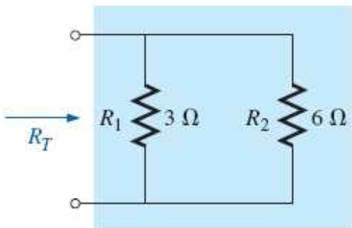
$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdot\cdot\cdot + \frac{1}{R_N}$$

또는 $G = 1/R$일 때

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

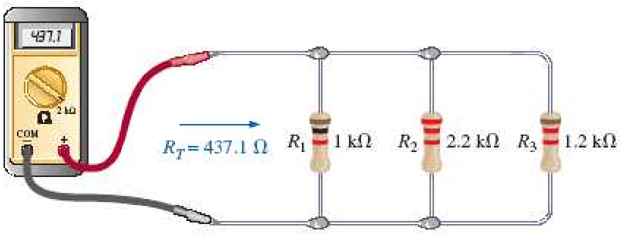
$$\boxed{R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdot\cdot\cdot + \frac{1}{R_N}} \quad [\Omega]}$$

예)



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

예)



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

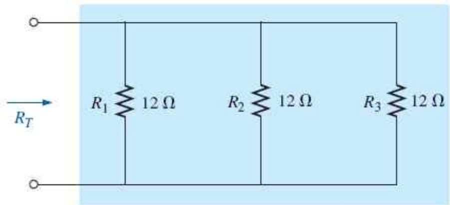
$$= 437.1\Omega$$

▪ 동일한 저항 N개가 병렬일 때의 전체저항

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

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

예)



• 동일 저항(12Ω) 3개 병렬

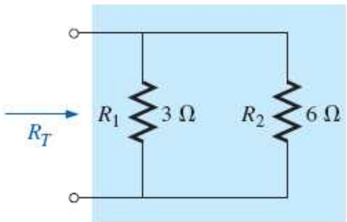
$$R_T = \frac{12\Omega}{3} = 4\Omega$$

▪ 2개 병렬저항

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}} = \frac{1}{\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}} \quad [\Omega]$$

$$\boxed{R_T = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1R_2}{R_1+R_2}}$$

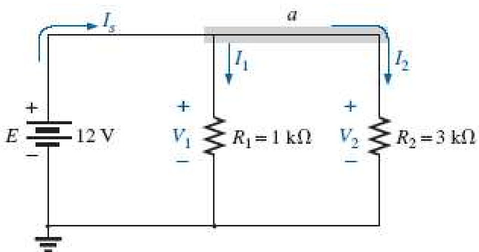
예)



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

■ **병렬회로 (parallel circuits)**

<u>병렬회로에서 병렬소자 양단의 전압은 동일하다.</u>



$$E = V_1 = V_2 = 12\,V$$

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

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

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

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

$$\boxed{I_s = I_1 + I_2}$$

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

$$I_s = I_1 + I_2$$

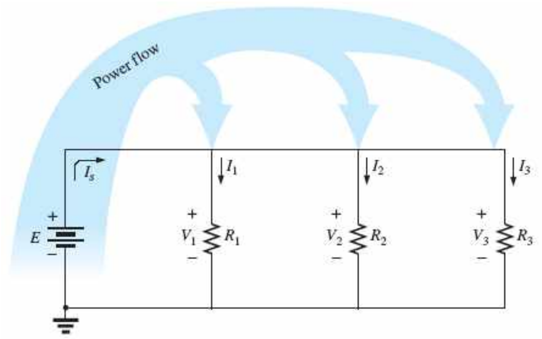
이다.

■ 병렬회로의 전력분배

- 전원에서 제공하는 전력은 각 저항에서 소모하는 전력의 합과 같다.

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

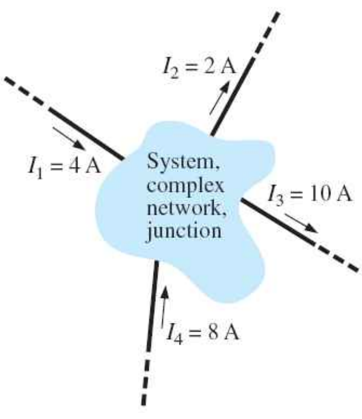
$$P_E = I_1 V_1 + I_2 V_2 + I_3 V_3 = I_1 E + I_2 E + I_3 E = (I_1 + I_2 + I_3) E = I_s E$$



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

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

$$\boxed{\Sigma I_i = \Sigma I_o}$$



- 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_x에 흐르는 전류 V_x:

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

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

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

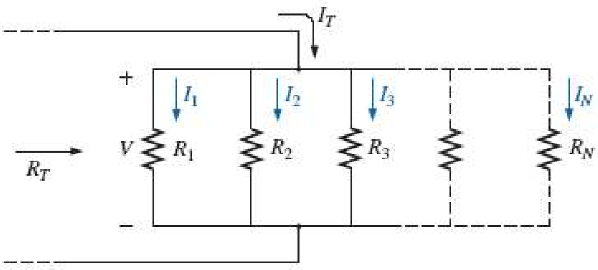
이다. 전체전류는

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

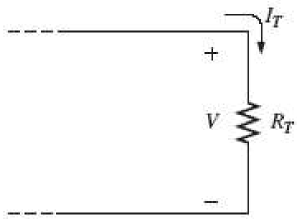
이므로

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

이다.

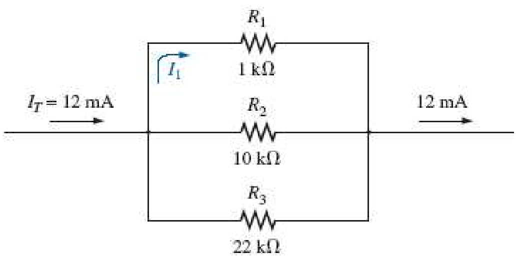


<병렬회로>



<등가회로>

예)

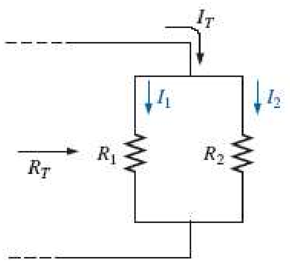


$$R_T = 1k\Omega \parallel 10k\Omega \parallel 22k\Omega = 873.01\Omega$$

$$I_1 = \frac{R_T}{R_1} I_T$$

$$= \frac{873.01\Omega}{1k\Omega} 12mA = 10.48mA$$

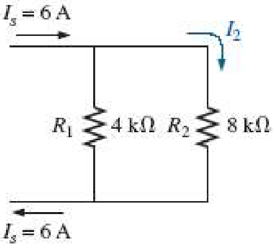
■ 2개 병렬저항의 전류분배



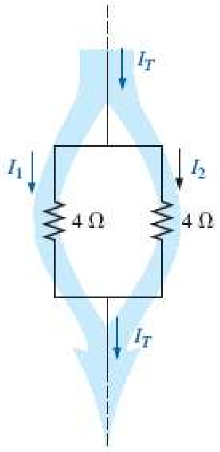
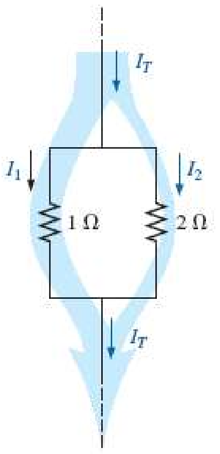
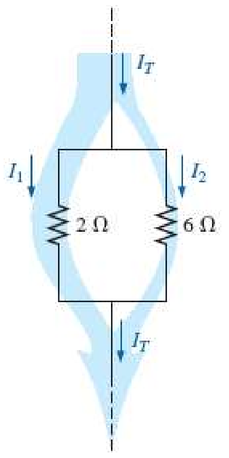
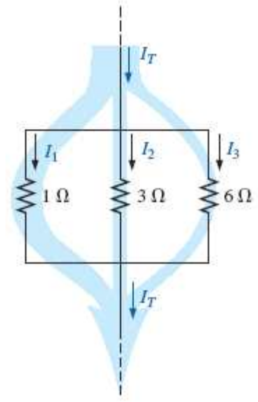
$$\boxed{I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) I_T}$$

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

예)

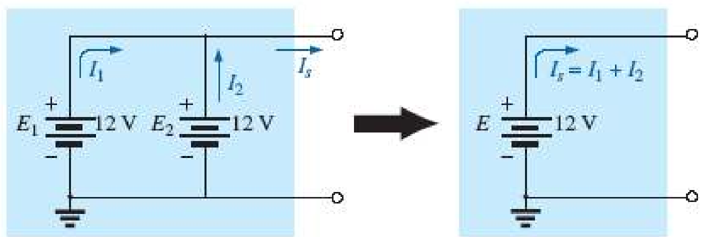


$$I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) I_s$$
$$= \left(\frac{4k\Omega}{4k\Omega + 8k\Omega}\right) 6A = (0.333)(6A) = 2A$$
$$I_1 = I_s - I_2 = 6A - 2A = 4A$$

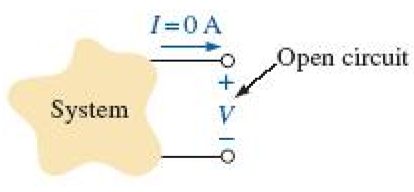
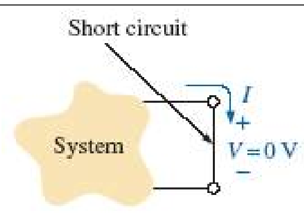
 $I_1 = I_2 = \frac{I_T}{2}$	 $I_1 = 2I_2$	 $I_1 = \left(\frac{6}{2}\right) I_2 = 3I_2$	 $I_1 = 6I_3$ $I_1 = 3I_2$ $I_2 = \left(\frac{6}{3}\right) I_3 = 2I_3$
저항이 같을 때 전류는 서로 동일	저항이 1/2배일 때 전류는 2배	저항이 1/3배일 때 전류는 3배	두 저항 배율의 역으로 전류가 흐름

■ 병렬 전압원 (voltage sources in parallel)

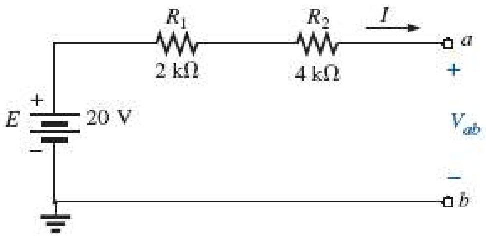
동일한 전압원이 병렬로 연결될 때 1개의 전압원으로 대치할 수 있다.



■ 개방(open)과 단락(short)

회로의 개방 (open)	회로의 단락 (short)
	

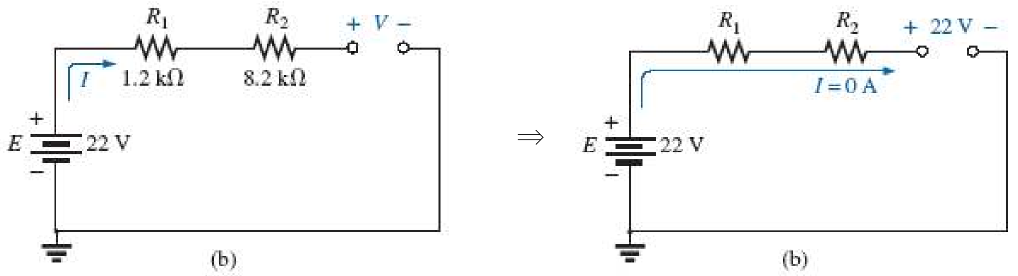
• 개방(open)회로의 예



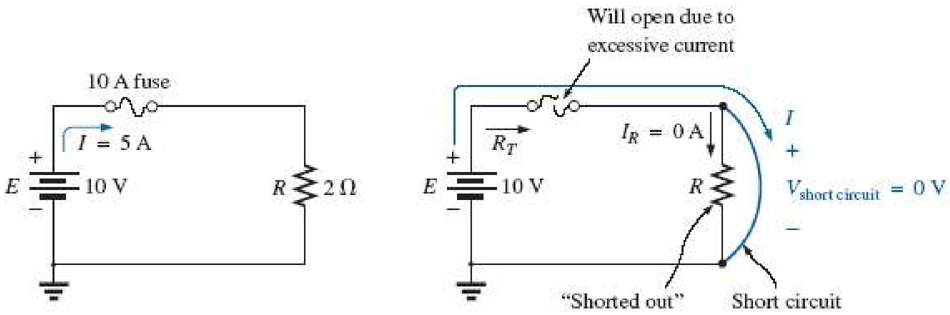
회로가 개방되어 전류가 흐르지 못함

$I = 0 \ [A]$

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



• 단락(short)회로의 예



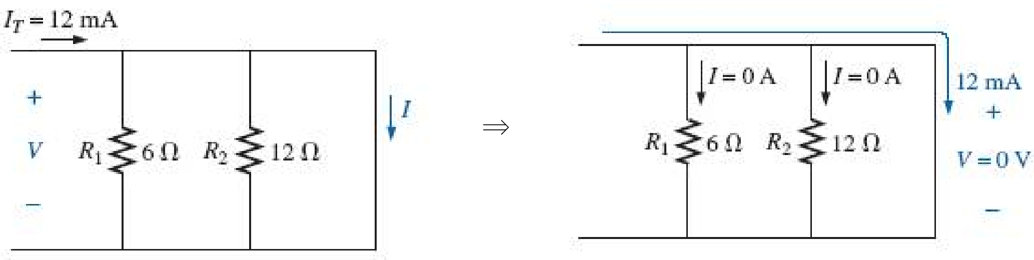
(a) 단락 전 (b) 단락 후

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

(b) 저항(2Ω)양단에 선을 연결하면 단락(short)되어 R_T는 0이 됨 ($R_T = 5\Omega \parallel 0\Omega = 0\Omega$)

전류는 $I = 10\,V / 0\Omega = \infty\,A$으로 과도하게 흘러 휴즈가 개방됨 ($I = 0A$)

저항양단의 전압 (또는 단락회로 양단의 전압)은 $V_{short\ circuit} = 0\,V$이다.



단락회로로 전체전류 I_T가 모두 흐르고, 단락회로 양단전압은 $0\,V$이다.

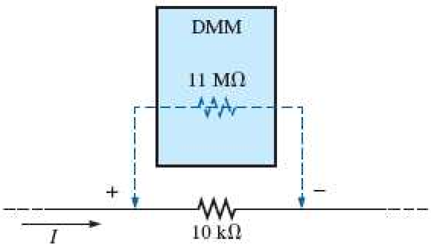
■ 전압계 부하효과 (voltmeter loading effects)

이상적인 전압계는 내부저항이 무한대여야 하며, 실제 전압계는 내부저항이 무한대가 아님으로 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 (∵ 내부저항이 상대적으로 큰 저항임, $11M\Omega \gg 10k\Omega$)

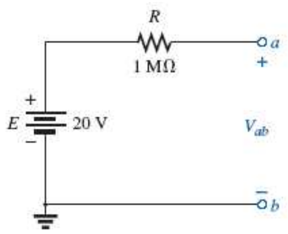


2) $10k\Omega$ 양단의 전압을 측정하기 위해 VOM(volt-ohm meter)를 연결한 경우
VOM의 내부저항이 $50k\Omega$이면, $10k\Omega$와 병렬로 연결되어 전체저항은

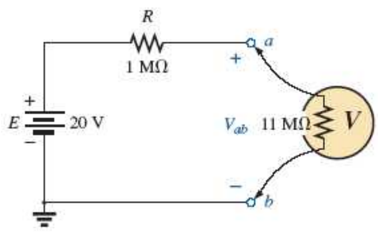
$$R_T = 10k\Omega \parallel 50k\Omega = 8.33k\Omega$$

로 큰 오차를 가짐 (∵ 내부저항이 상대적으로 큰 저항이 아님)

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



⇒



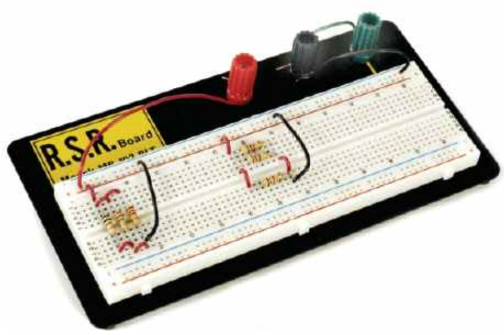
$$V_{ab} = 20\,V$$

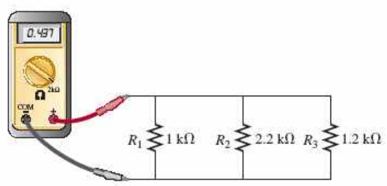
<전압계 연결 전 개방회로>

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

<전압계(내부저항이 $11M\Omega$) 연결 후>

■ 브레드보드(breadboard)에 병렬회로 구성 예

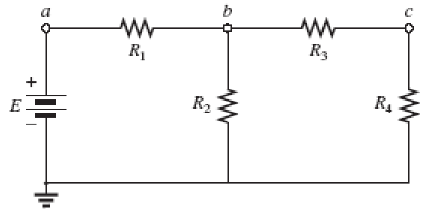




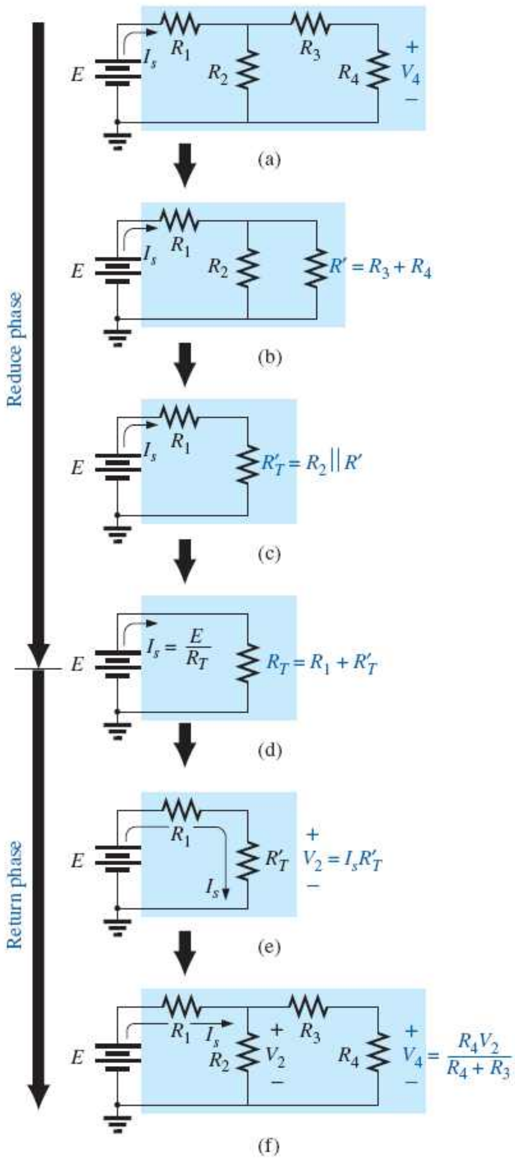
제 7장. 직렬-병렬회로 (series-parallel circuits)

▪ 직렬-병렬회로: 직렬과 병렬이 혼합된 회로

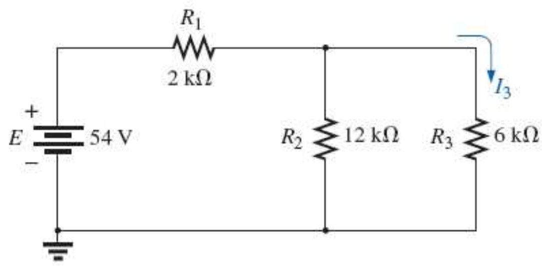
예) 병렬회로의 예



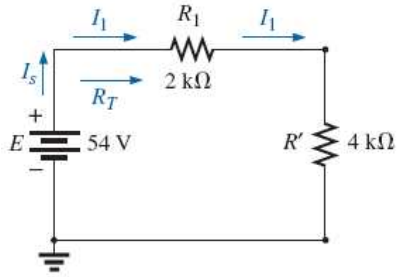
■ **회로의 축소(reduce) 및 복원(return)**



예제 1) 전류 I_3를 구하라.



⇒
Reduce



$$R' = R_2 \parallel R_3 = 12k\Omega \parallel 6k\Omega = 4k\Omega$$

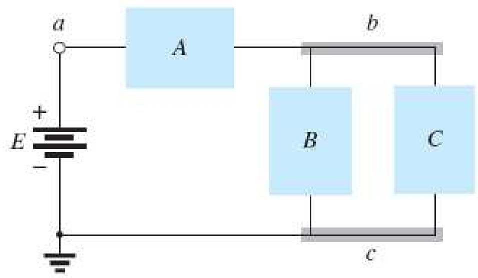
$$R_T = 2k\Omega + 4k\Omega = 6k\Omega$$

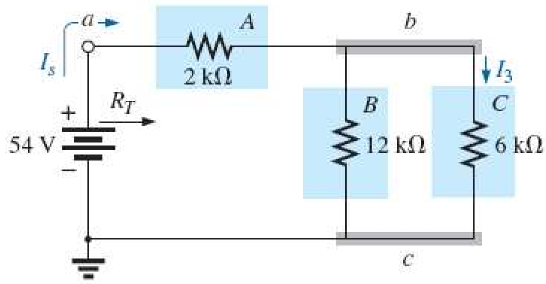
$$I_s = I_1 = \frac{E}{R_T} = \frac{54\,V}{6k\Omega} = 9mA$$

전류분배법칙(CDR)에 의해 $I_3 = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_3}\right) I_1 = \left(\frac{12k\Omega}{12k\Omega + 6k\Omega}\right) 9mA = 6mA$

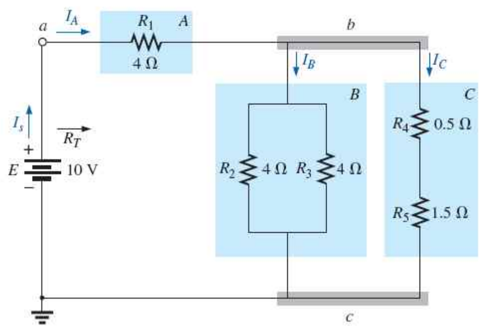
■ **블록도(block diagram) 접근 방법**

▪ 회로망(network)을 블록단위로 분해하여 회로를 해석하는 방법

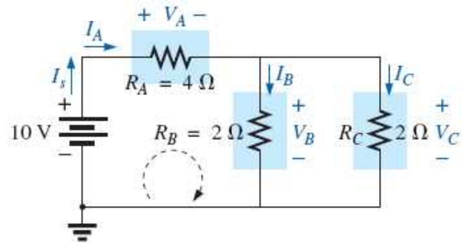




예제 3) 회로망의 모든 전류 및 전압을 구하라.



⇒
Reduce



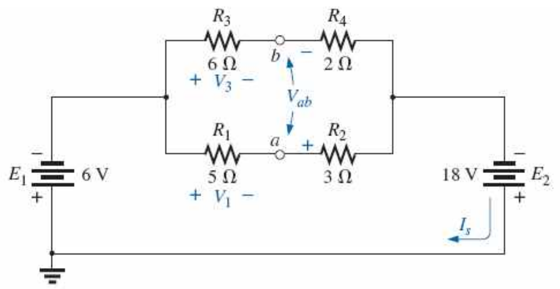
$$I_s = I_A = \frac{E}{R_T} = \frac{10\,V}{5\Omega} = 2A$$

$V_A = I_A R_A = 2A \cdot 4\Omega = 8V$

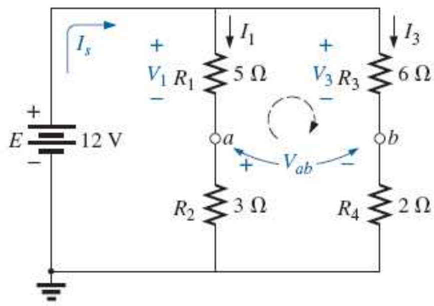
$V_B = V_C = E - V_A = 10V - 8V = 2V$

$I_B = I_C = I_s/2 = 1A$

예제 7) 전압 V_1, V_2 및 V_{ab}을 구하라.



⇒ Redrawn

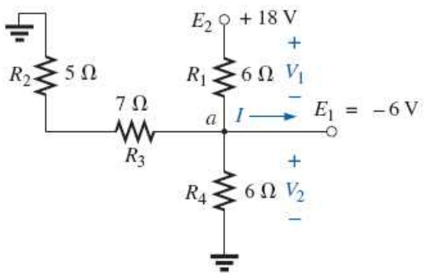


$$V_1 = \frac{R_1 E}{R_1 + R_2} = \frac{(5\Omega)(12V)}{5\Omega + 3\Omega} = \frac{60V}{8} = 7.5V$$

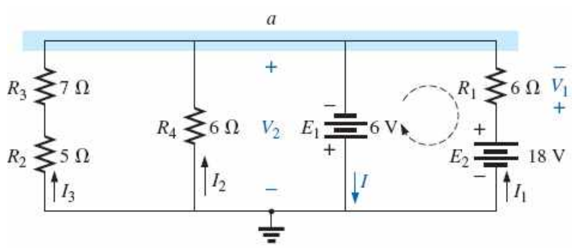
$$V_3 = \frac{R_3 E}{R_3 + R_4} = \frac{(6\Omega)(12V)}{6\Omega + 2\Omega} = \frac{72V}{8} = 9V$$

KVL에 의해 $V_{ab} = V_3 - V_1 = 9V - 7.5V = 1.5V$

예제 8) 전압 V_1, V_2 및 전류 I를 구하라.



⇒ Redrawn



$V_2 = -E_1 = -6V$

KVL에 의해 $V_1 = E_2 + E_1 = 18V + 6V = 24V$

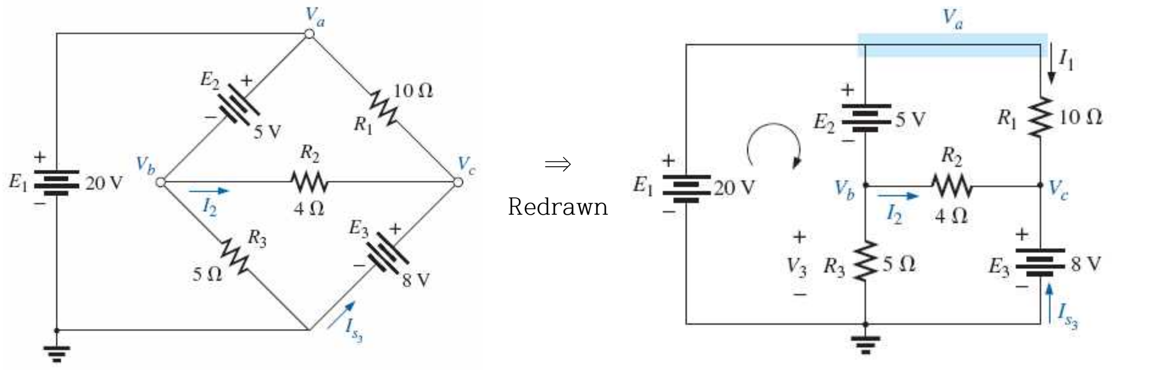
a점에서 KCL을 사용하면, $I = I_1 + I_2 + I_3$

$$= \frac{V_1}{R_1} + \frac{E_1}{R_4} + \frac{E_1}{R_2 + R_3}$$

$$= \frac{24V}{6\Omega} + \frac{6V}{6\Omega} + \frac{6V}{12\Omega}$$

$$= 4A + 1A + 0.5A = 5.5A$$

예제 8) 전압 V_b, V_c, V_3 및 전류 I_2를 구하라.



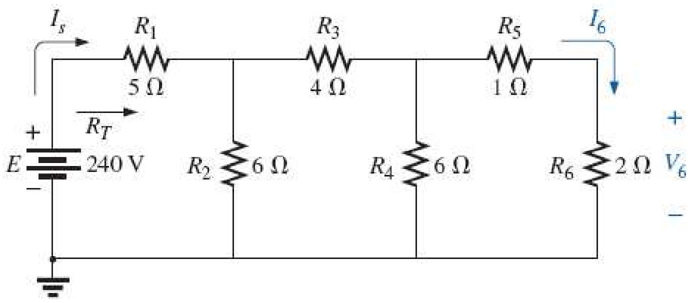
$$V_a = E_1 = 20\,V$$

$$V_c = E_3 = 8\,V$$

$$V_b = E_1 - E_2 = 20\,V - 5\,V = 15\,V \quad \text{(KVL 사용)}$$

$$I_2 = \frac{V_b - V_c}{R_2} = \frac{15\,V - 8\,V}{4\Omega} = 1.75A$$

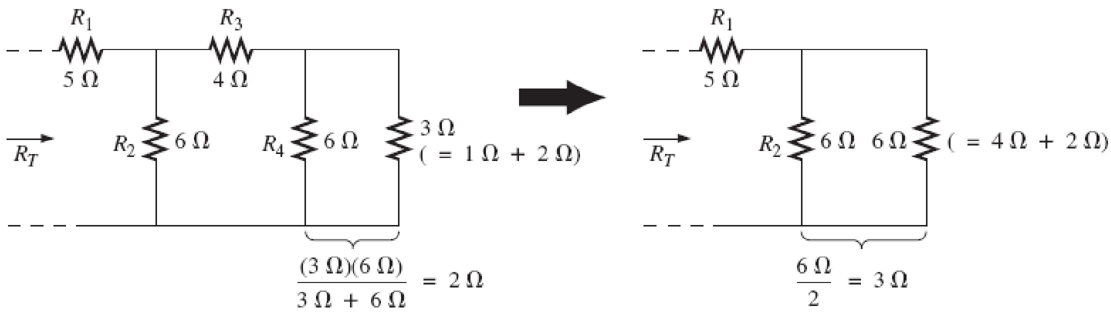
■ **사다리망(ladder networks)**



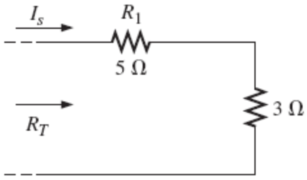
▪ 해석 방법 1)

회로를 축소(reduce)시켜서 전체 저항 R_T와 전체 전류 I_s를 구한 후 다시 재구성(return)하면서 해석하는 방법

① 회로를 축소(reduce)

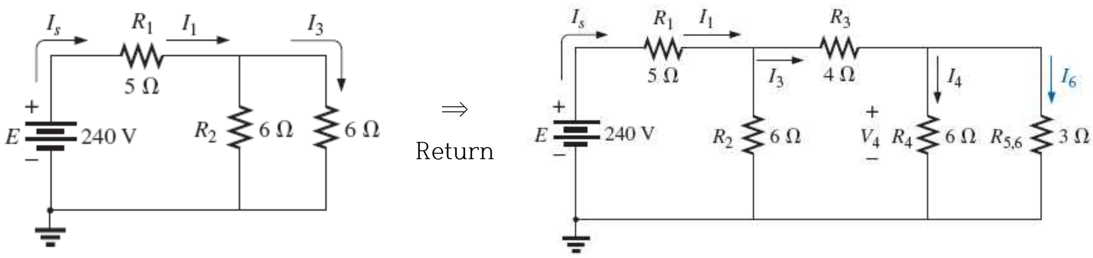


② 전체 저항 R_T 및 전체 전류I_s를 구함



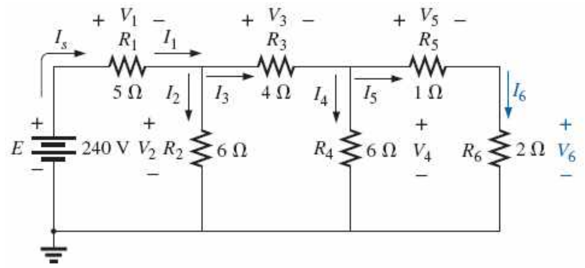
$$R_T = 5\Omega + 3\Omega = 8\Omega$$
$$I_s = \frac{E}{R_T} = \frac{240\,V}{8\Omega} = 30A$$

③ 회로를 재구성(return)하면서 각 단자의 전류 및 전압을 구함



▪ 해석 방법 2)

① 각 소자의 전압 전류를 표기



② 우측부터 전류 및 전압을 구함

	$I_6 = \dfrac{V_4}{R_5 + R_6} = \dfrac{V_4}{1\,\Omega + 2\,\Omega} = \dfrac{V_4}{3\,\Omega}$
or	$V_4 = (3\,\Omega)I_6$
so that	$I_4 = \dfrac{V_4}{R_4} = \dfrac{(3\,\Omega)I_6}{6\,\Omega} = 0.5I_6$
and	$I_3 = I_4 + I_6 = 0.5I_6 + I_6 = 1.5I_6$
	$V_3 = I_3R_3 = (1.5I_6)(4\,\Omega) = (6\,\Omega)I_6$
Also,	$V_2 = V_3 + V_4 = (6\,\Omega)I_6 + (3\,\Omega)I_6 = (9\,\Omega)I_6$
so that	$I_2 = \dfrac{V_2}{R_2} = \dfrac{(9\,\Omega)I_6}{6\,\Omega} = 1.5I_6$
and	$I_s = I_2 + I_3 = 1.5I_6 + 1.5I_6 = 3I_6$
with	$V_1 = I_1R_1 = I_sR_1 = (5\,\Omega)I_s$
so that	$E = V_1 + V_2 = (5\,\Omega)I_s + (9\,\Omega)I_6$
	$= (5\,\Omega)(3I_6) + (9\,\Omega)I_6 = (24\,\Omega)I_6$
and	$I_6 = \dfrac{E}{24\,\Omega} = \dfrac{240\text{ V}}{24\,\Omega} = 10\text{ A}$
with	$V_6 = I_6R_6 = (10\text{ A})(2\,\Omega) = \mathbf{20\text{ V}}$

1) 각 소자의 전류 및 전압을 I_6로 표현

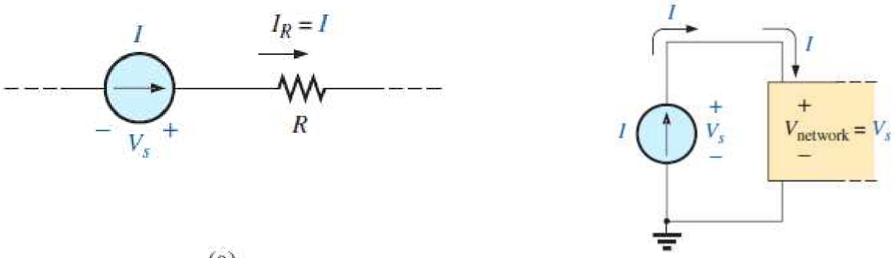
2) I_6를 구함

3) I_6를 사용하여 모든 소자의 전류 및 전압을 구함

제 8장. 해석방법과 선택된 표제 (dc)
(Methods of analysis and selected topics (dc))

■ 전류원 (current sources)

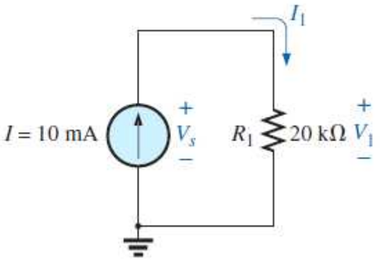
- 전류원은 일정전류를 회로에 공급하며, 전류의 방향과 크기를 가진다.



(a) (b)

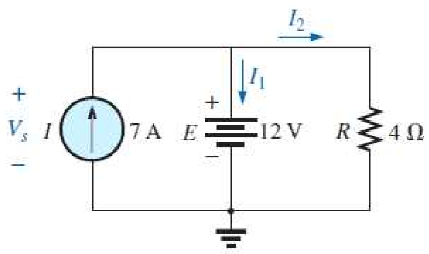
<전류원의 기호>

예제 8.1) 소스(source)전압 V_s, 저항 R_1의 전압 V_1과 전류 I_1을 구하라.



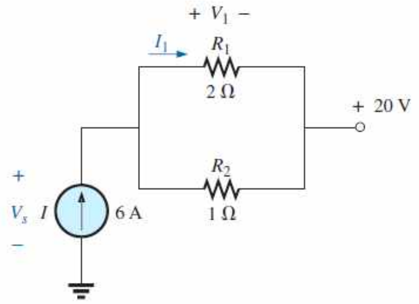
$$I_1 = I = 10mA$$
$$V_1 = I_1R_1 = (10mA)(20\Omega) = 200\,V$$
$$V_s = V_1 = 200\,V$$

예제 8.2) 전압 V_s와 전류 I_1과 I_2를 구하라.



$$V_s = E = 12\,V$$
$$V_R = E = 12\,V$$
$$I_2 = \frac{V_R}{R} = \frac{12\,V}{4\Omega} = 3A$$
$$I_1 = I_s - I_2 = 7A - 3A = 4A$$

예제 8.3) 전류 I_1와 소스전압 V_s를 구하라.



$$I_1 = \frac{R_2 I}{R_1 + R_2} = \frac{(1\Omega)(6A)}{2\Omega + 1\Omega} = \frac{1}{3}(6A) = 2A$$
$$V_1 = I_1R_1 = (2A)(2\Omega) = 4\,V$$
$$V_s = V_1 + 20\,V = 4\,V + 20\,V = 24\,V$$

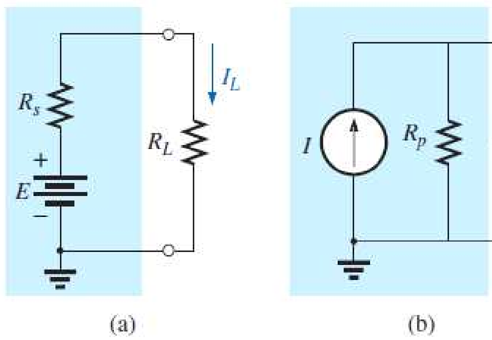
■ 소스의 변환 (source conversion)

▪ 이상적 전압원과 전류원

- 이상적 전압원: 외부의 부하저항 R_L에 무관하게 일정전압을 공급
- 이상적 전류원: 외부의 부하저항 R_L에 무관하게 일정전류를 공급

▪ 실제적 전압원과 전류원

- 실제 전압원은 전압원 E와 소스저항 R_s가 직렬로 연결된다.
  → 이상적 전압원의 소스저항 R_s는 0이어야 함
- 실제 전류원은 전류원 I와 소스저항 R_p가 병렬로 연결된다.
  → 이상적 전류원의 소스저항 R_p는 ∞이어야 함

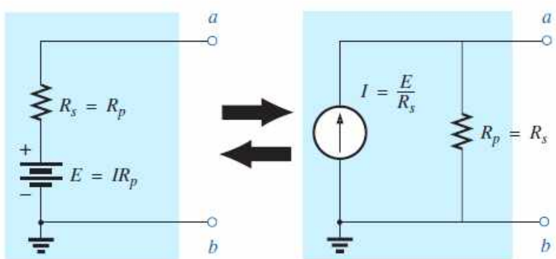


< (a) 실제 전압원($R_s \neq 0$)과 (b) 실제 전류원($R_p \neq \infty$)>

▪ 전압원과 전류원의 변환

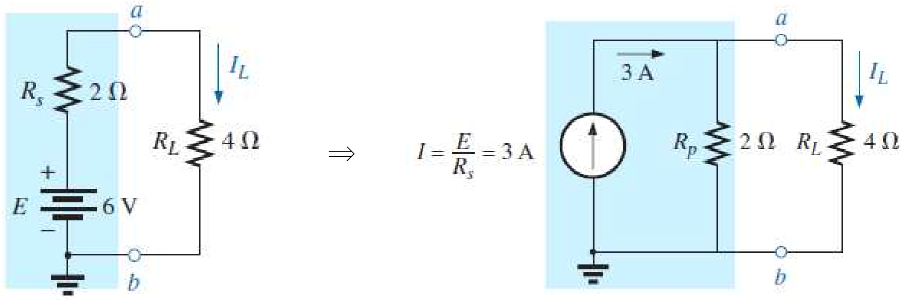
- 전압원은 등가의 전류원으로 변환할 수 있다.
- 전류원은 등가의 전압원으로 변환할 수 있다.

<u>E와 R_s가 직렬인 전압원은 $I = E/R_s$와 $R_p = R_s$가 병렬인 전류원과 동일</u>

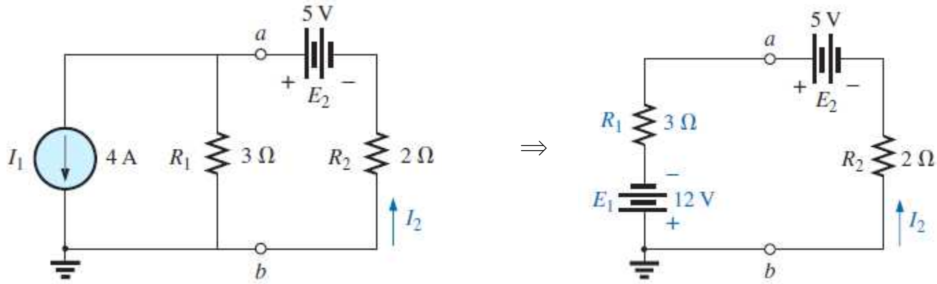
 <등가 전압원> <등가 전류원>	전압원 개방전압 : $V_{ab} = E$ 전압원 단락전류 : $I = \dfrac{E}{R_s} = \dfrac{IR_p}{R_p} = I$
	전류원 개방전압 : $V_{ab} = IR_p = \dfrac{E}{R_p} R_p = E$ 전류원 단락전류 : I

- 두 전압원과 전류원을 개방(open)하였을 때 개방전압은 모두 E이다.
- 두 전압원과 전류원을 단락(short)하였을 때 단락전류는 모두 I이다.

예제 8.4) 전압원(단자 a,b 좌측)을 등가의 전류원으로 변환하라.

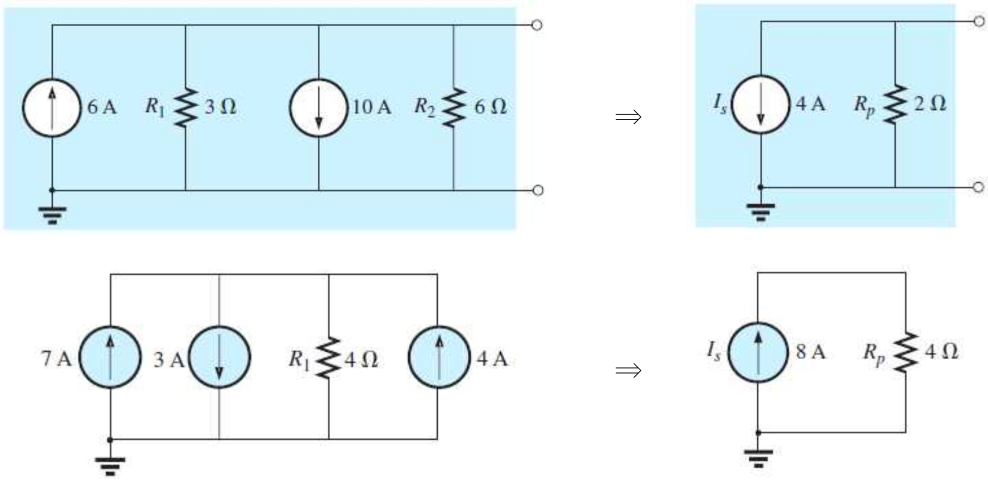


예제 8.5) 전류원을 등가의 전압원으로 변환하라.



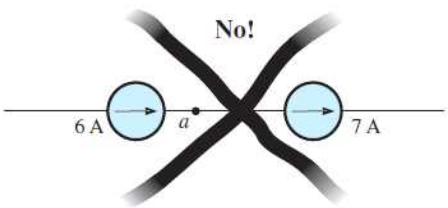
■ 병렬 전류원

- 두개 이상의 전류원이 병렬로 연결되었을 때 1개의 전류원으로 변환가능



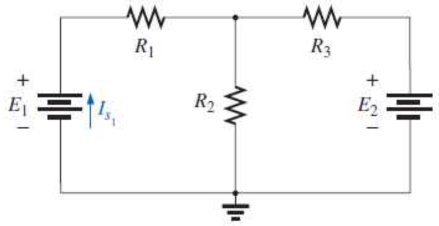
■ 직렬 전류원

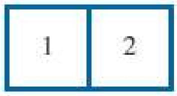
- 다른 전류원들은 서로 직렬로 연결될 수 없다.



■ 가지-전류 해석 (branch-current analysis)

- 회로를 단순화할 수 없는 직병렬회로 해석방법
- 2개 폐루프(closes loop)를 가지는 회로의 예



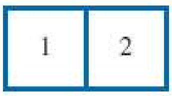


■ 가지-전류 해석 과정

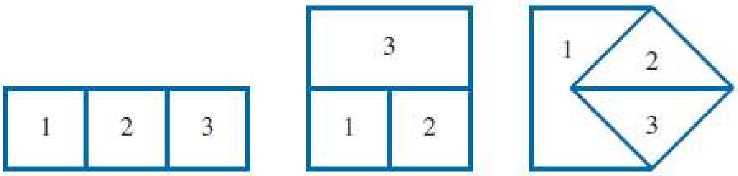
(1) 모든 가지에 임의 방향의 전류를 정의함

(2) 각 저항의 전압을 전류방향에 따라 결정함

(3) KVL을 사용하여 독립된 폐루프(independent closed loop) 마다 식을 작성



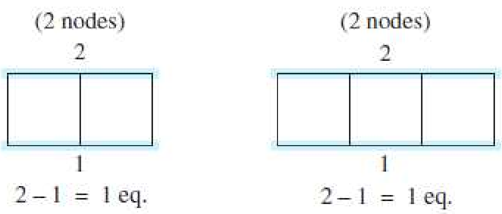
<2개의 폐루프>



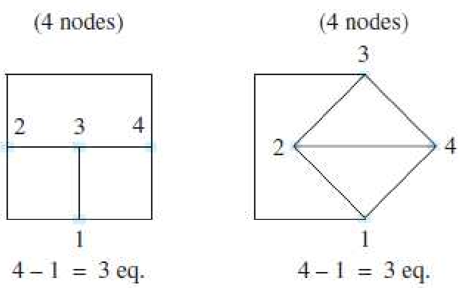
<3개의 폐루프>

(4) 또는 KCL을 사용하여 최소의 절점(node)에 대해 식을 작성

- 각 절점(node)에서 KCL을 사용하여 식으로 표현함
- 최소 식(eq)의 개수 = 총 절점 수 - 1



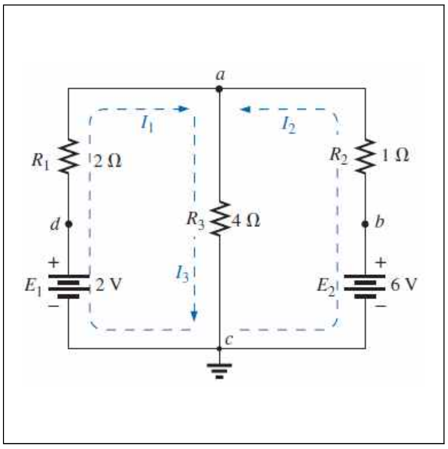
<1개의 수식이 필요>



<3개의 수식이 필요>

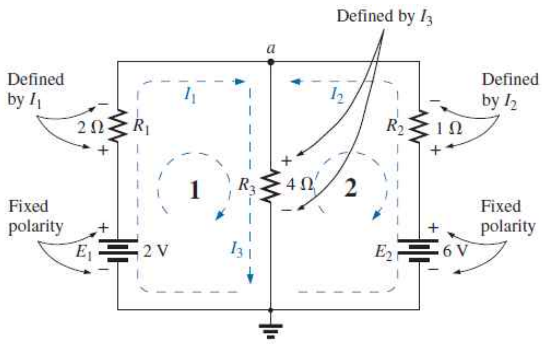
(5) 방정식을 풀어 해(전류 또는 전압)를 구함

예제 8.9) 가지-전류방법으로 회로를 해석하라.



⇒

(1) 모든 가지에 전류(I_1, I_2, I_3)와 각 저항의 전압을 정의함



(2) 2개 루프에 KVL을 사용하여 식을 구함

$$\text{loop 1:}\quad \Sigma_{C}\, V = \underbrace{+2\text{ V}}_{\substack{\text{Battery}\\ \text{potential}}} - \underbrace{(2\ \Omega)I_1}_{\substack{\text{Voltage drop}\\ \text{across } 2\ \Omega\\ \text{resistor}}} - \underbrace{(4\ \Omega)I_3}_{\substack{\text{Voltage drop}\\ \text{across } 4\ \Omega\\ \text{resistor}}} = 0$$

$$\text{loop 2:}\quad \Sigma_{C}\, V = (4\ \Omega)I_3 + (1\ \Omega)I_2 - 6\text{ V} = 0$$

(3) 수식을 풀이하여 각 가지의 전류(I_1, I_2, I_3)를 구함

$I_3 = I_1 + I_2$이므로

$$2 - 2I_1 - 4\overbrace{(I_1 + I_2)}^{I_3} = 0 \qquad 2 - 2I_1 - 4I_1 - 4I_2 = 0$$

$$\overbrace{4(I_1 + I_2)}^{I_3} + I_2 - 6 = 0 \qquad 4I_1 + 4I_2 + I_2 - 6 = 0$$

⇒

$$-6I_1 - 4I_2 = -2$$
$$+4I_1 + 5I_2 = +6$$

$$6I_1 + 4I_2 = +2$$
$$4I_1 + 5I_2 = +6$$

⇒

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} 2 & 4 \\ 6 & 5 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 6 & 4 \\ 4 & 5 \end{vmatrix}} = \frac{10 - 24}{30 - 16} = \frac{-14}{14} = \mathbf{-1\ A}$$

$$I_2 = \frac{\begin{vmatrix} 6 & 2 \\ 4 & 6 \end{vmatrix}}{14} = \frac{36 - 8}{14} = \frac{28}{14} = \mathbf{2\ A}$$

$$I_3 = I_1 + I_2 = -1 + 2 = \mathbf{1\ A}$$

▪ 2차 방정식의 해

2차방정식

$$\begin{array}{ccccc} \text{Col. 1} & & \text{Col. 2} & & \text{Col. 3} \\ \hline a_1x & + & b_1y & = & c_1 \\ a_2x & + & b_2y & = & c_2 \end{array}$$

⇒

해 (x, y)

$$\begin{array}{cc} \begin{array}{cc} \text{Col.} & \text{Col.} \\ 1 & 2 \end{array} & \begin{array}{cc} \text{Col.} & \text{Col.} \\ 1 & 2 \end{array} \\ \hline x = \dfrac{\begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}} & y = \dfrac{\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}} \end{array}$$

$$\begin{array}{cc} \text{Col.} & \text{Col.} \\ \underline{1} & \underline{2} \end{array}$$

$$\text{Determinant} = D = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = a_1b_2 - a_2b_1$$

예) 방정식의 해를 구하라.

$$\begin{aligned} 2x + \ \ y &= 3 \\ 3x + 4y &= 2 \end{aligned} \quad \Rightarrow$$

$$x = \frac{\begin{vmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 3 & 4 \end{vmatrix}} = \frac{(3)(4) - (2)(1)}{(2)(4) - (3)(1)} = \frac{12 - 2}{8 - 3} = \frac{10}{5} = \mathbf{2}$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 2 \end{vmatrix}}{5} = \frac{(2)(2) - (3)(3)}{5} = \frac{4 - 9}{5} = \frac{-5}{5} = \mathbf{-1}$$

EXAMPLE D.5 Evaluate the following determinant:

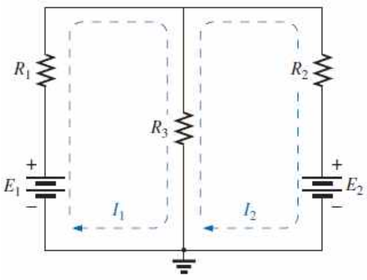
$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ -2 & 1 & 0 \\ 0 & 4 & 2 \end{vmatrix} \longrightarrow \begin{array}{|ccc|cc} & & & (-)\ (-)\ (-) & \\ 1 & 2 & 3 & 1 & 2 \\ -2 & 1 & 0 & -2 & 1 \\ 0 & 4 & 2 & 0 & 4 \\ & & & (+)\ (+)\ (+) & \end{array}$$

Solution:

$$\begin{aligned} &[(1)(1)(2) + (2)(0)(0) + (3)(-2)(4)] \\ &\qquad - [(0)(1)(3) + (4)(0)(1) + (2)(-2)(2)] \\ &= (2 + 0 - 24) - (0 + 0 - 8) = (-22) - (-8) \\ &= -22 + 8 = \mathbf{-14} \end{aligned}$$

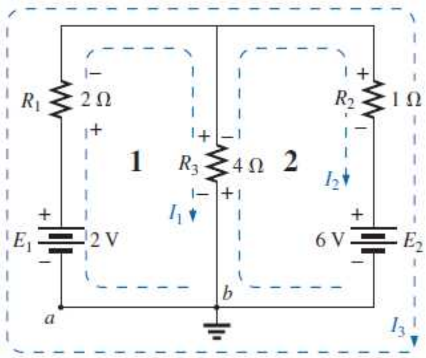
■ 메쉬 해석 (mash analysis)

▪ 가지-전류방법의 확장이며, 메쉬(또는 루프)의 개수만큼 전류를 정함



- 메쉬방법: 2개의 메쉬전류(I_1, I_2)를 정의함
- 가지-전류방법: 3개 가지에 전류(I_1, I_2, I_3)를 정의함

예제 8.11) 메쉬방법으로 회로를 해석하라.



(1) 메쉬(루프)전류를 정의함

I_1, I_2만을 사용함 (I_3는 I_1, I_2을 포함하므로 독립이 아님)

(2) 2개의 루프에 대해 KVL을 사용하여 식을 표현함

loop 1: $+E_1 - V_1 - V_3 = 0$ (clockwise starting at point a)

$$+2\text{ V} - (2\,\Omega)\,I_1 - \overbrace{(4\,\Omega)(\underbrace{I_1 - I_2}_{\substack{\text{Total current}\\ \text{through}\\ 4\,\Omega\text{ resistor}}})}^{\substack{\text{Voltage drop across}\\ 4\,\Omega\text{ resistor}}} = 0$$

Subtracted since I_2 is opposite in direction to I_1.

loop 2: $-V_3 - V_2 - E_2 = 0$ (clockwise starting at point b)

$$-(4\,\Omega)(I_2 - I_1) - (1\,\Omega)I_2 - 6\text{ V} = 0$$

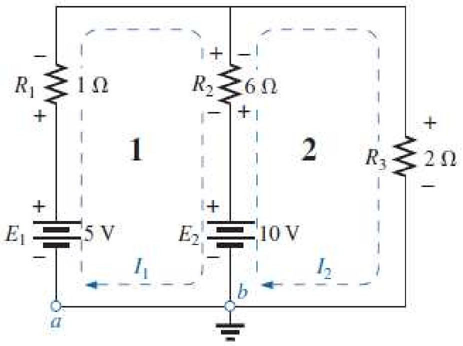
(3) 식을 풀이하여 해를 구함

loop 1: $-6I_1 + 4I_2 = -2$

loop 2: $+4I_1 - 5I_2 = +6$

▫ 해: $I_1 = -1A$ 및 $I_2 = -2A$

예제 8.11)



loop 1:

$$-5V+(1\Omega)I_1+(6\Omega)(I_1-I_2)+10V=0$$

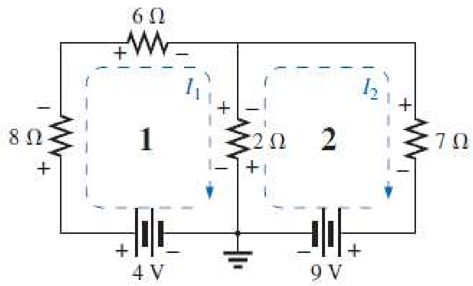
$$\rightarrow \quad (7\Omega)I_1-(6\Omega)I_2=-5V$$

loop 2:

$$-10V+(6\Omega)(I_2-I_1)+(2\Omega)I_2=0$$

$$\rightarrow \quad -(6\Omega)I_1+(8\Omega)I_2=10V$$

예제 8.16)



loop 1:

$$(8\Omega+6\Omega)I_1+(2\Omega)(I_1-I_2)=4V$$

$$\rightarrow \quad 16I_1-2I_2=4$$

loop 2:

$$(2\Omega)(I_2-I_1)+(7\Omega)I_2=-9V$$

$$\rightarrow \quad -2I_1+9I_2=-9$$

■ 절점 해석 (nodal analysis)

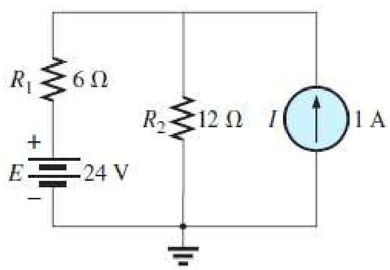
(1) 절점의 수를 결정

(2) 기준절점(reference node)을 기준으로 나머지 절점의 전압을 정의함

(3) 기준절점을 제외한 나머지 절점에서 KCL을 사용하여 식으로 표현함

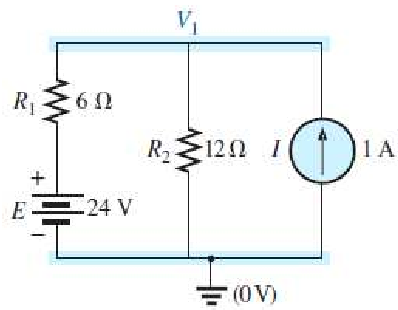
(4) 식을 풀이하여 해(절점전압)을 구함

예제 8.19) 절점해석하라.

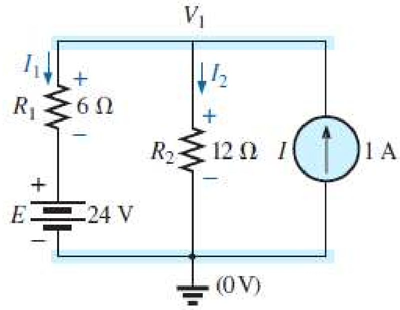


(1) 2개의 절점 중 접지가 기준절점(reference node)임

나머지 1개 절점의 전압을 V_1으로 정의함



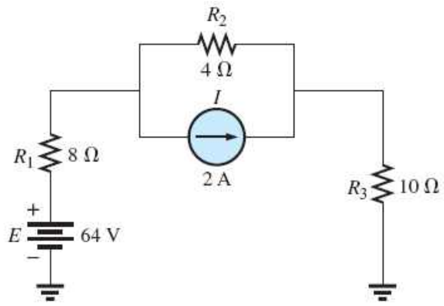
(2) 절점과 연결된 가지에 전류 I_1, I_2를 정의함



(3) 절점에서 KCL을 사용하여 수식으로 표현하고, 해(절점전압)을 구함

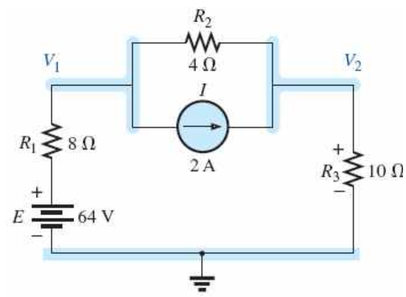
$$I = I_1 + I_2$$
$$= \frac{V_1 - E}{R_1} + \frac{V_1}{R_2} \quad \Rightarrow \quad 1A = \frac{V_1 - 24\,V}{6\Omega} + \frac{V_1}{12\Omega} \quad \Rightarrow \quad V_1 = 20\,V$$

예제 8.20) 절점해석하라.

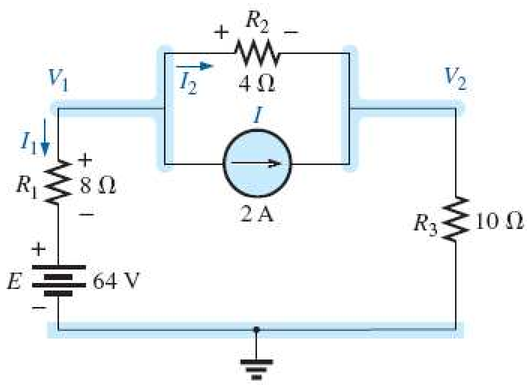


(1) 3개의 절점 중 접지가 기준절점(reference node)임

나머지 2개 절점의 전압을 V_1, V_2로 정의함



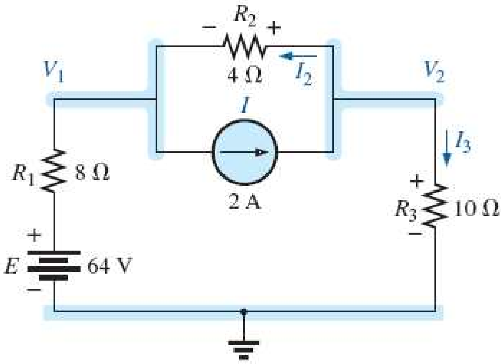
(2) 절점 V_1에 KCL을 적용



$$I_1 + I_2 + I = 0$$
$$\frac{V_1 - E}{R_1} + \frac{V_1 - V_2}{R_2} + I = 0$$

$$\Rightarrow\ 0.375\,V_1 - 0.25\,V_2 = 6$$

(3) 절점 V_2에 KCL을 적용



$$I = I_2 + I_3$$

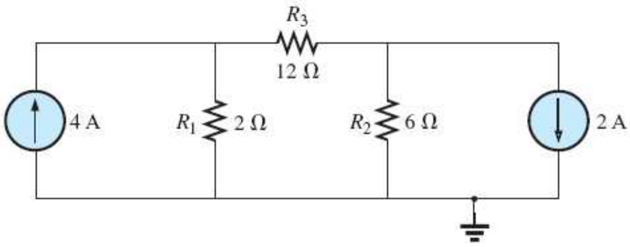
$$I = \frac{V_2 - V_1}{R_2} + \frac{V_2}{R_3}$$

$$\Rightarrow -0.25\,V_1 + 0.35\,V_2 = 2$$

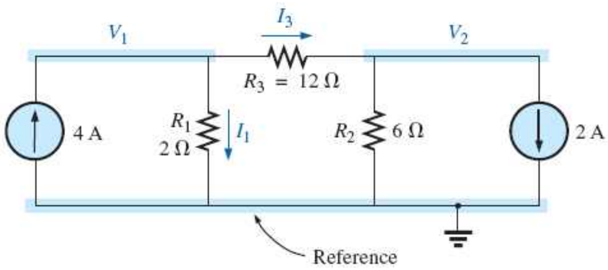
(4) 두 방정식으로부터 해를 구함

$$\begin{array}{l} 0.375\,V_1 - 0.25\,V_2 = 6 \\ -0.25\,V_1 + 0.35\,V_2 = 2 \end{array} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} V_1 = 37.82\,V \\ V_2 = 32.73\,V \end{array}$$

예제 8.21) 절점해석하라.



(1) 절점 V_1에 KCL을 적용



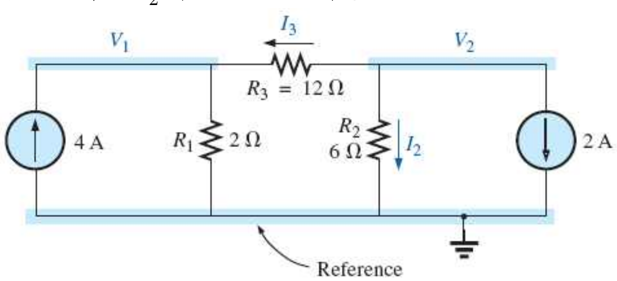
$$I_1 + I_3 = 4A$$

$$\frac{V_1}{2\Omega} + \frac{(V_1 - V_2)}{12\Omega} = 4A$$

$$V_1\left(\frac{1}{2\Omega} + \frac{1}{12\Omega}\right) - V_2\left(\frac{1}{12\Omega}\right) = 4A$$

$$\Rightarrow \frac{7}{12}V_1 - \frac{1}{12}V_2 = 4$$

(2) 절점 V_2에 KCL을 적용



$$I_3 + I_2 + 2A = 0$$

$$\frac{V_2 - V_1}{12\Omega} + \frac{V_2}{2\Omega} + 2A = 0$$

$$\Rightarrow -\frac{1}{12}V_1 + \frac{3}{12}V_2 = -2$$

(3) 해를 구함

$$\begin{array}{l} 7\,V_1 - \;\; V_2 = 48 \\ -1\,V_1 + 3\,V_2 = -24 \end{array} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} V_1 = +6\,V \\ V_2 = -6\,V \end{array}$$