

전기회로 강의노트

2017. 9.

안 상 호

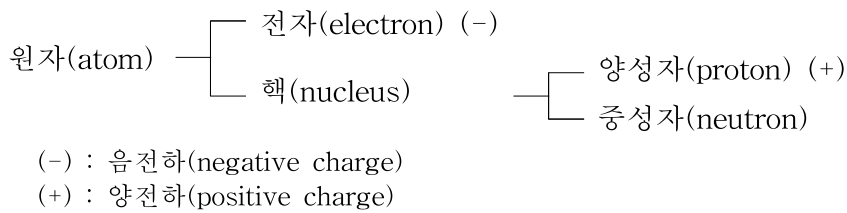
인제대학교 전자IT기계자동차공학부

제 2장. 전압과 전류 (voltage and current)

■ 전하(electric charge)

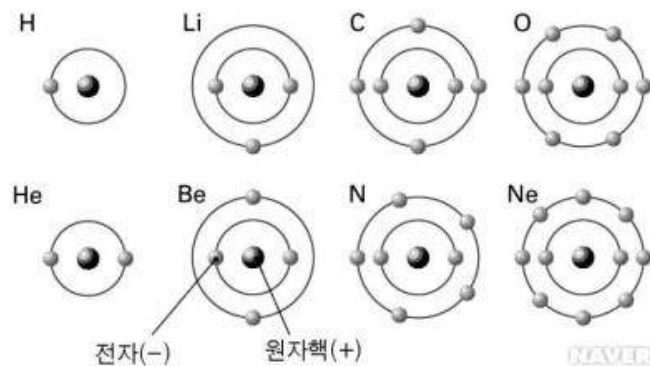
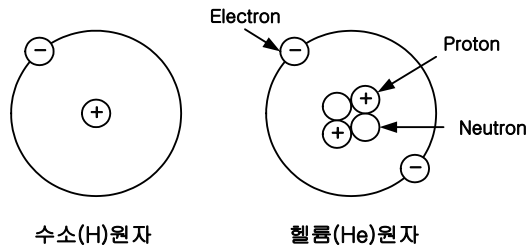
- 전하는 전기현상을 일으키는 물질이 갖고 있는 전기량임
- 전하는 양전하(+)와 음전하(-)로 나눌 수 있음
- 동일한 부호의 전하 사이에는 서로 밀어내는 척력이 작용하고, 다른 부호의 전하 사이에는 서로 잡아당기는 인력이 작용함
- 단위는 [C], 쿨롱(Coulomb)

■ 원자구조

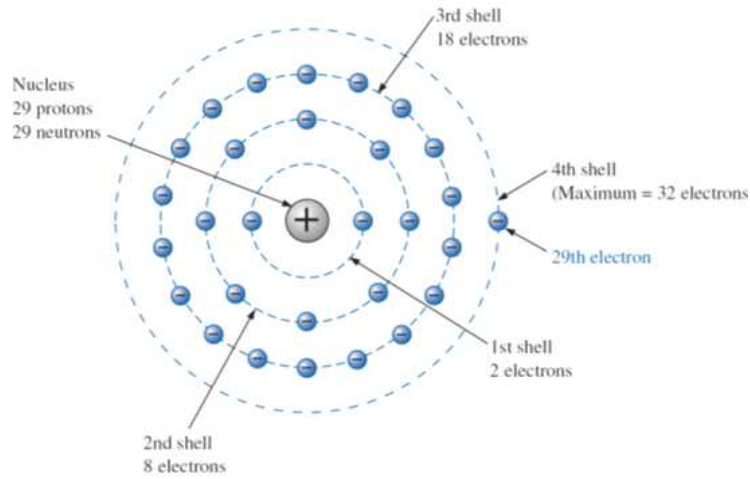


- 원자내의 전자수와 양성자의수는 같음 (원자는 전기적으로 중성임)
- 핵주위의 shell이라 불리는 궤도에 전자가 분포 (전자의 수가 원자번호임)
- n 번째 shell에 포함될 수 있는 최대 전자개수: $2n^2$ (2, 8, 18, 32, ...)

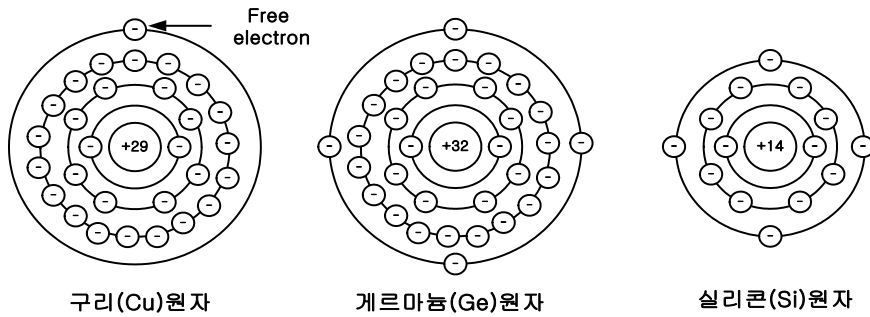
- 원자구조의 예



<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 1.602×10^{-19} [C]
 - 1쿨롬은 전자 1(1.602×10^{-19})= 6.242×10^{18} 개의 전기량임

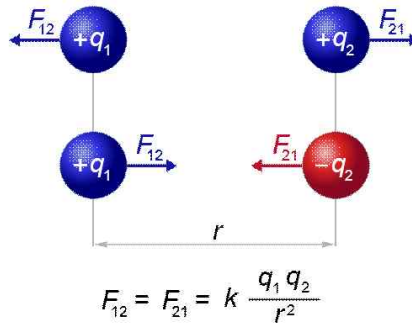
| 분류 | 원소 | 기호 | 원자번호 | 가전자(최외각전자) 수 | |
|-------|------|----|------|--------------|-----|
| 금속 도체 | 은 | Ag | 47 | + 1 | 1~3 |
| | 구리 | Cu | 29 | + 1 | |
| | 금 | Au | 79 | + 1 | |
| | 알루미늄 | Al | 13 | + 3 | |
| | 철 | Fe | 26 | + 2 | |
| 반도체 | 탄소 | C | 6 | + 4 | 4 |
| | 실리콘 | Si | 14 | + 4 | |
| | 게르마늄 | 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 $k = 9.0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$



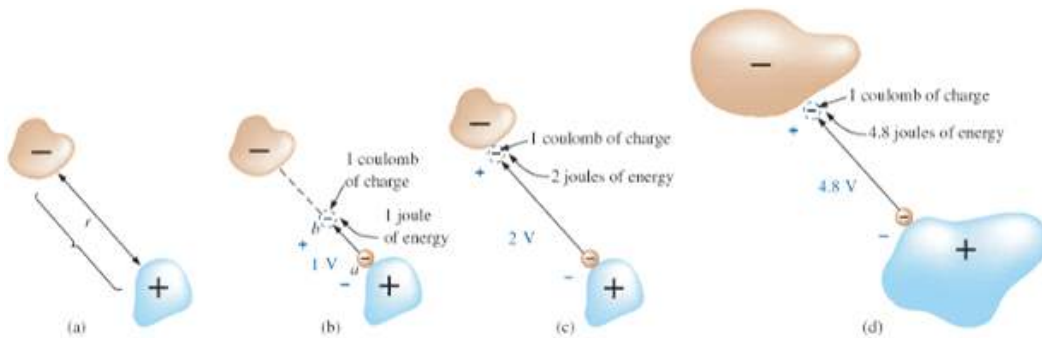
■ 전압(voltage) (또는 전위차(electric potential difference))

- 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.

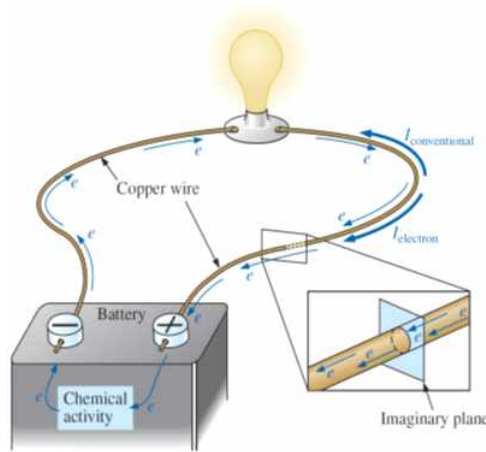
■ 전류(current)

- 어느 단면을 단위시간에 통과하는 전하의 양

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

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

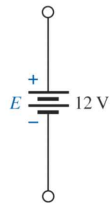
→ 1초에 1[C]의 전하(6.242×10^{18} 개의 전자)가 가상의 단면을 이동할 때 전류 1[A]가 흐른다고 함



<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

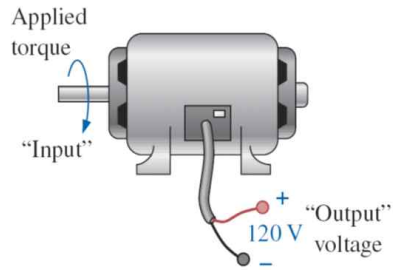


<1차 전지>



<2차 전지>

② 발전기(generator)



③ 전원공급기(power supply)



④ 태양전지(solar cells)



⑤ 연료전지(fuel cells)

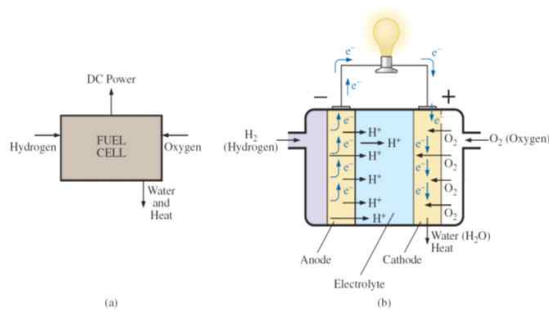


FIG. 2.21 Fuel cell (a) components; (b) basic construction.

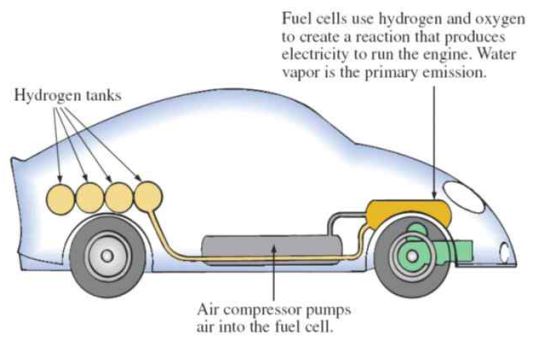
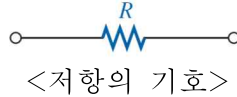


FIG. 2.22 Hydrogen fuel-cell automobile.

제 3장. 저항 (resistance)

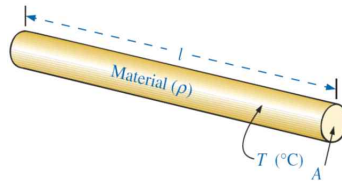
- 저항 : 전기회로에서 전하의 흐름을 방해하는 작용 (단위는 오옴(ohm), Ω)



- 물체의 저항

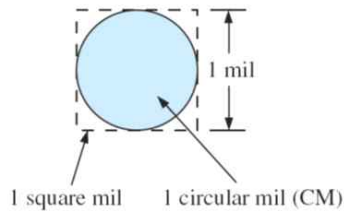
$$R = \rho \frac{l}{A}$$

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



- Circular Mil (CM)

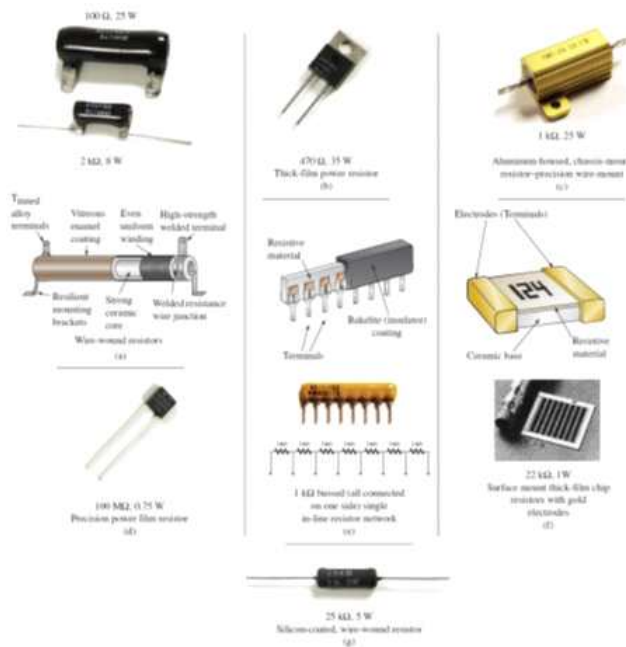
$$1 \text{ mil} = \frac{1}{1000} \text{ in} \quad \text{또는} \quad 1000 \text{ mil} = 1 \text{ in} \quad (\text{참고: } 1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm})$$



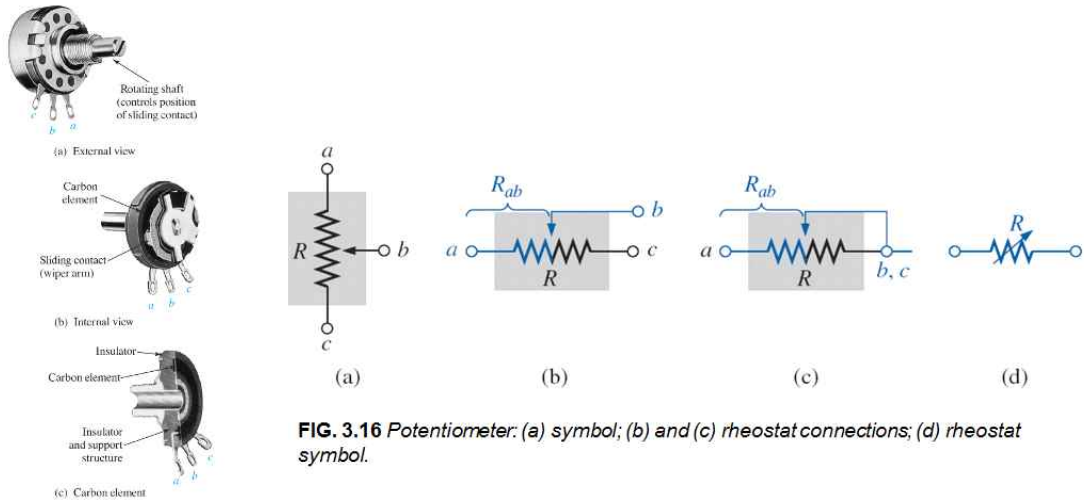
<Circular mil의 정의>

- 저항(resistor)의 종류

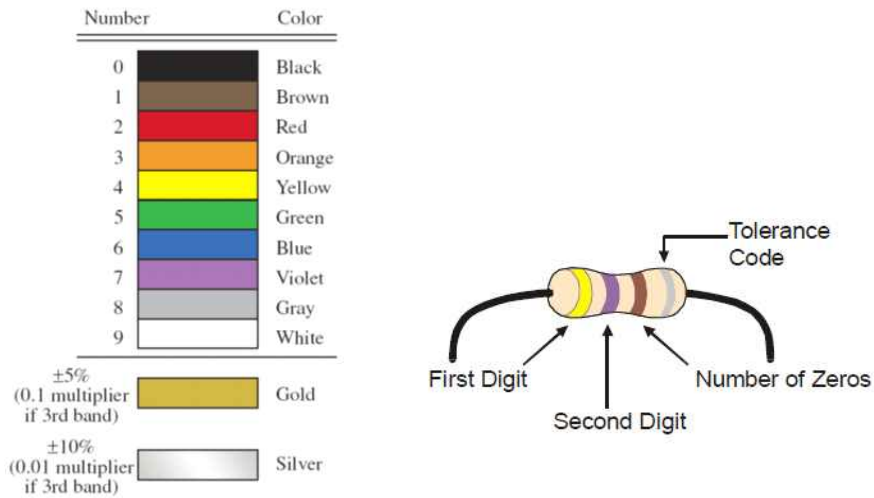
① 고정저항(fixed resistor) : 2단자 양단의 저항이 일정함





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



• 저항값 읽기



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) 금색 | $12 \times 10^3 \Omega = 12k\Omega$ 오차범위 ±5% | $11.4k\Omega$ ~ $12.6k\Omega$ |
|  FIG. 3.24 Example 3.12. | 회색(8), 적색(2), 금색 은색 | $82 \times 10^{-1} \Omega = 8.2\Omega$ 오차범위 ±10% | 7.38Ω ~ 9.02Ω |

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 [Ω]

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

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

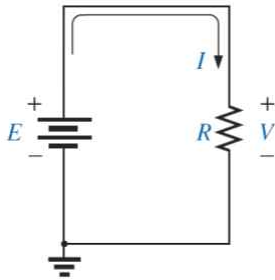


FIG. 4.2 Basic circuit.

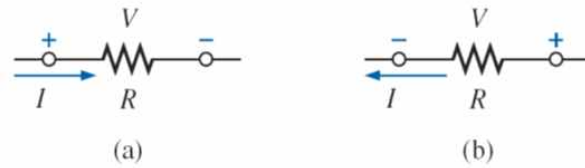


FIG. 4.3 Defining polarities.

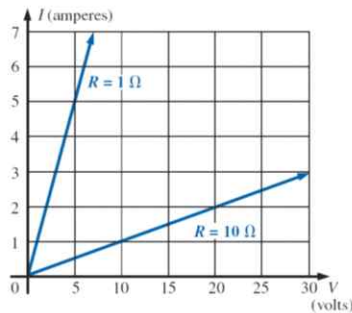


FIG. 4.7 Demonstrating on an I-V plot that the lower the resistance, the steeper is the slope.

■ 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 $R_T = 10\Omega + 30\Omega + 100\Omega = 140\Omega$

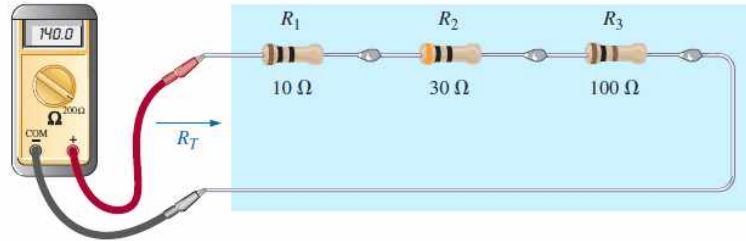


FIG. 5.11

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

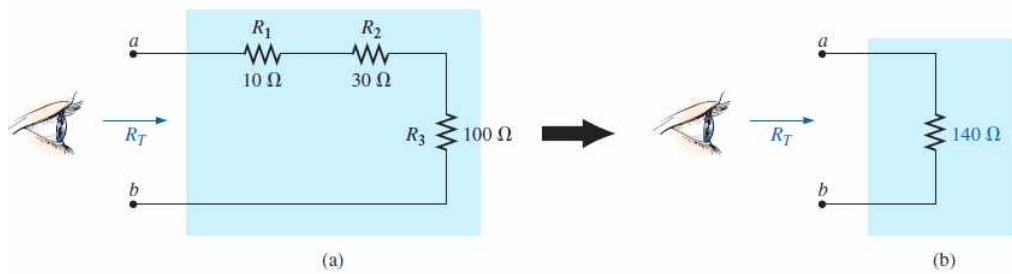


FIG. 5.13

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

■ 직렬 회로 (serial circuits)

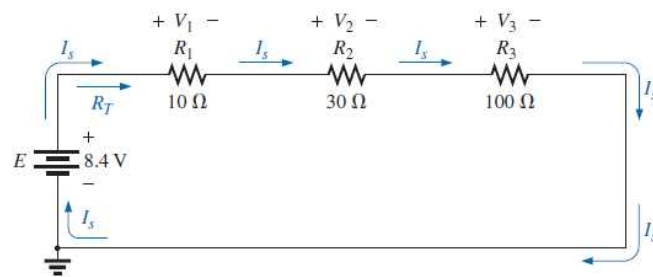


FIG. 5.12

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.

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

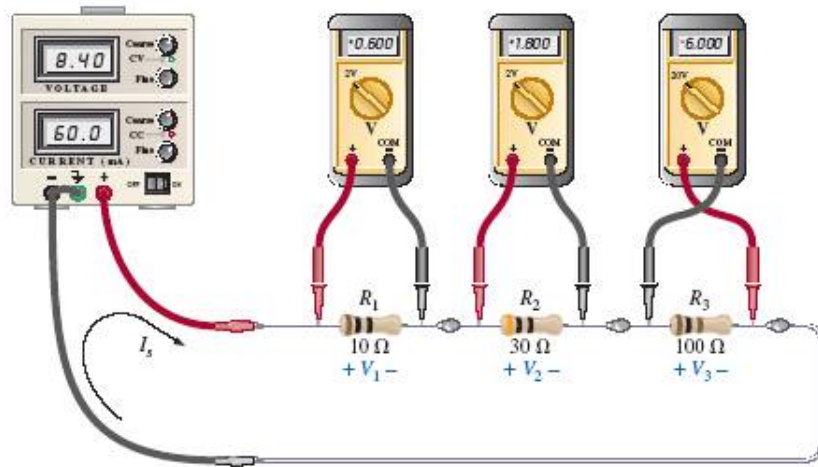


FIG. 5.19

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

<각 저항 양단의 전압측정 (전압계는 병렬로 연결)>

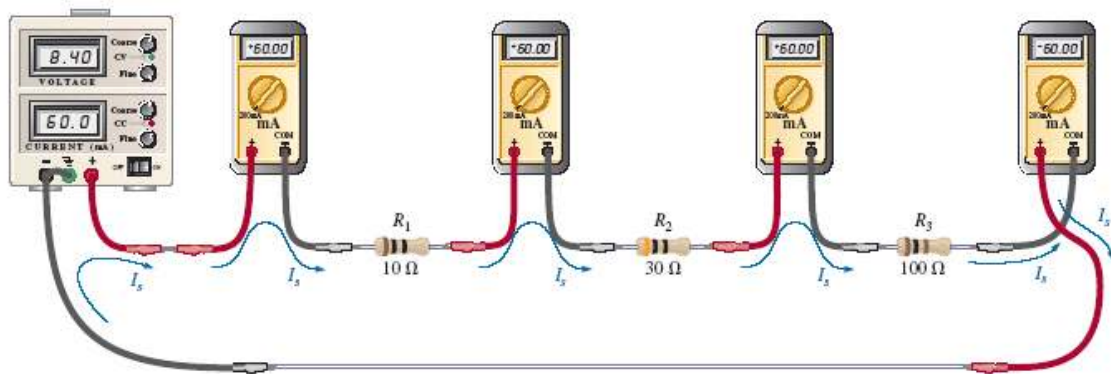


FIG. 5.20

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.

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

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

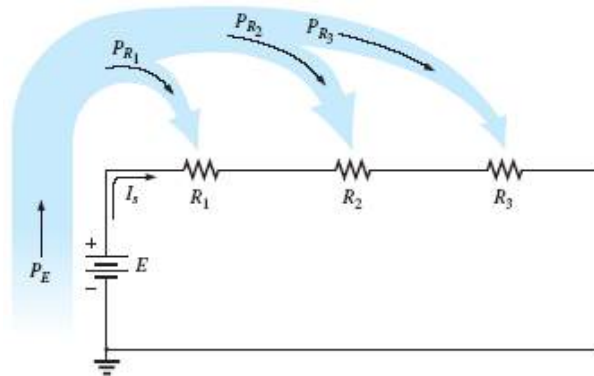


FIG. 5.21
Power distribution in a series circuit.

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.

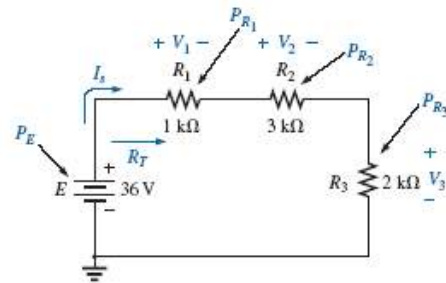


FIG. 5.22
Series circuit to be investigated in Example 5.7.

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.

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

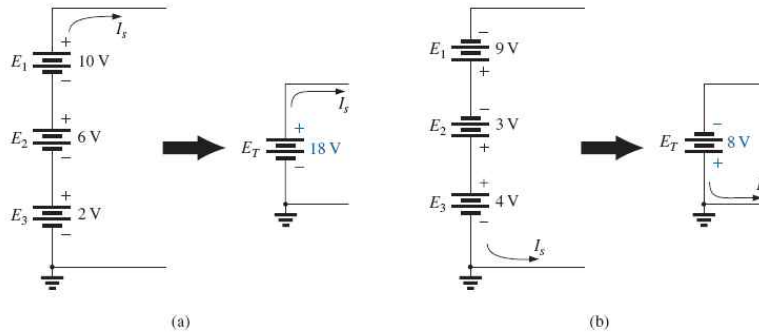


FIG. 5.23

Reducing series dc voltage sources to a single source.

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

순환경로(closed path)에 따른 전위차들의 합은 영이다.

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

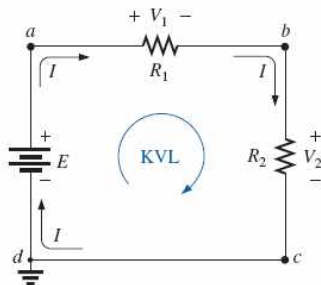


FIG. 5.26

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

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

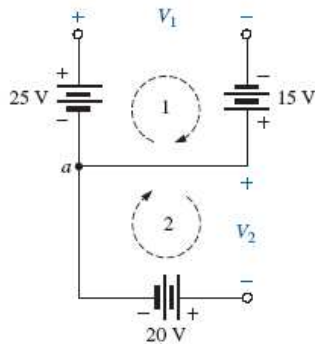


FIG. 5.29

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.

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

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

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

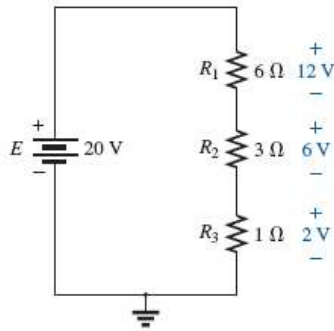


FIG. 5.33

Revealing how the voltage will divide across series resistive elements.

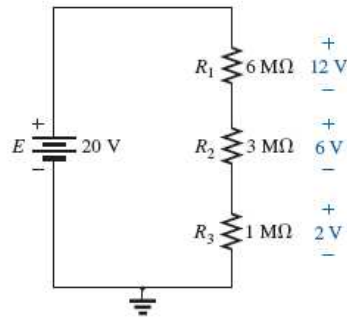


FIG. 5.34

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 :

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

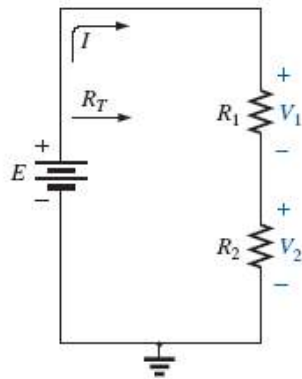
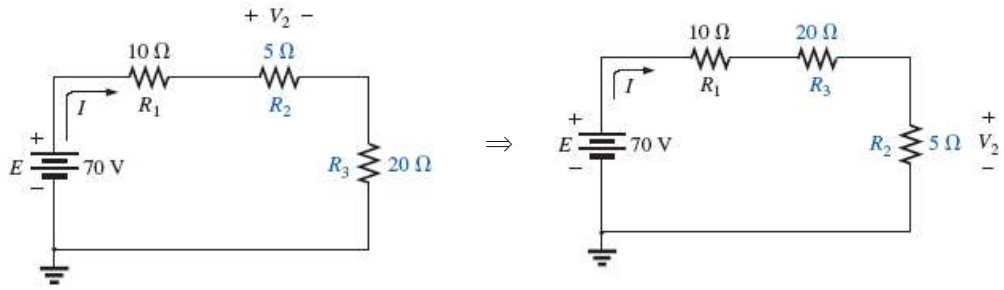


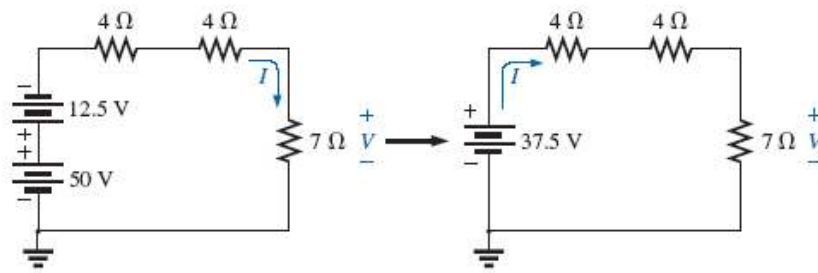
FIG. 5.36

Developing the voltage divider rule.

■ 직렬소자들의 이동



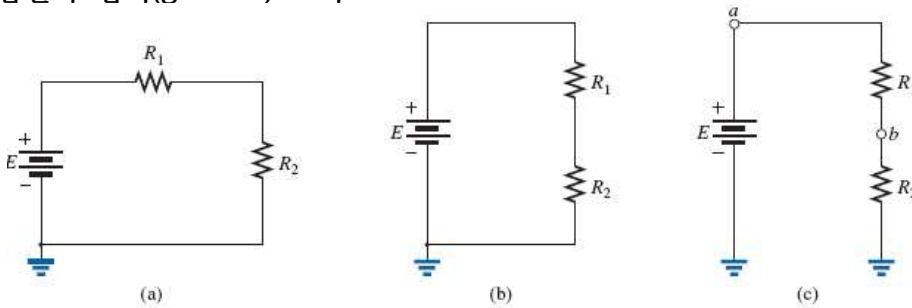
<저항의 위치 이동>



<전압원의 위치 이동>

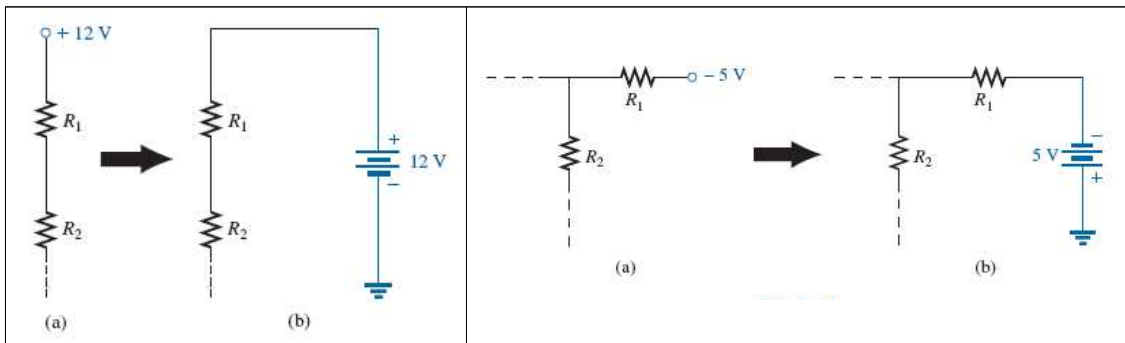
■ 표기 (notation)

■ 전압원과 접지(ground) 표기



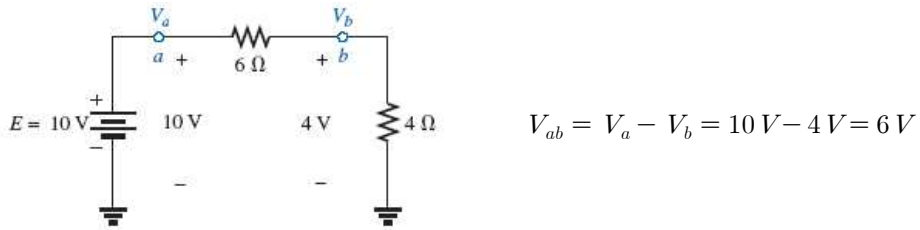
<동일한 직렬회로의 3종류 표기>

■ 전압원 표기



■ 두 양단 전압 표기

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



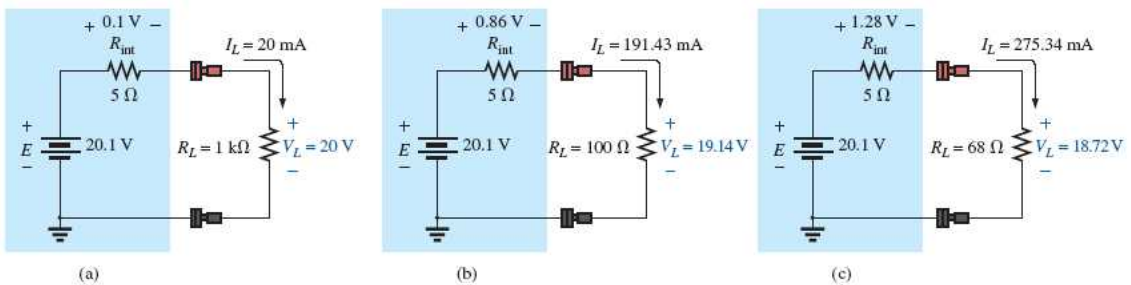
■ 전압원의 내부저항(internal resistance)

- 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>

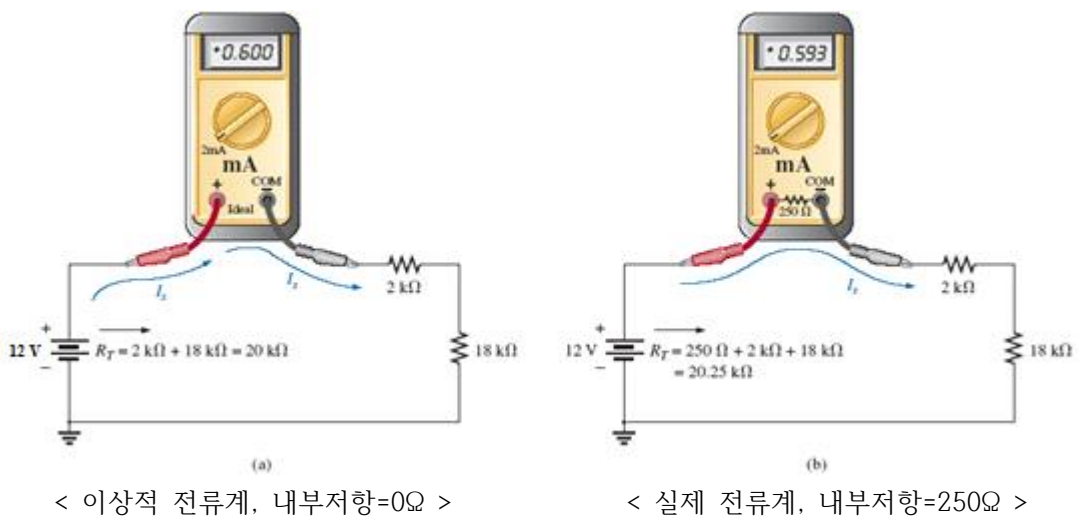
$R_{in} \ll R_L$ 일수록 부하효과가 적음

■ 계측기의 내부저항

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

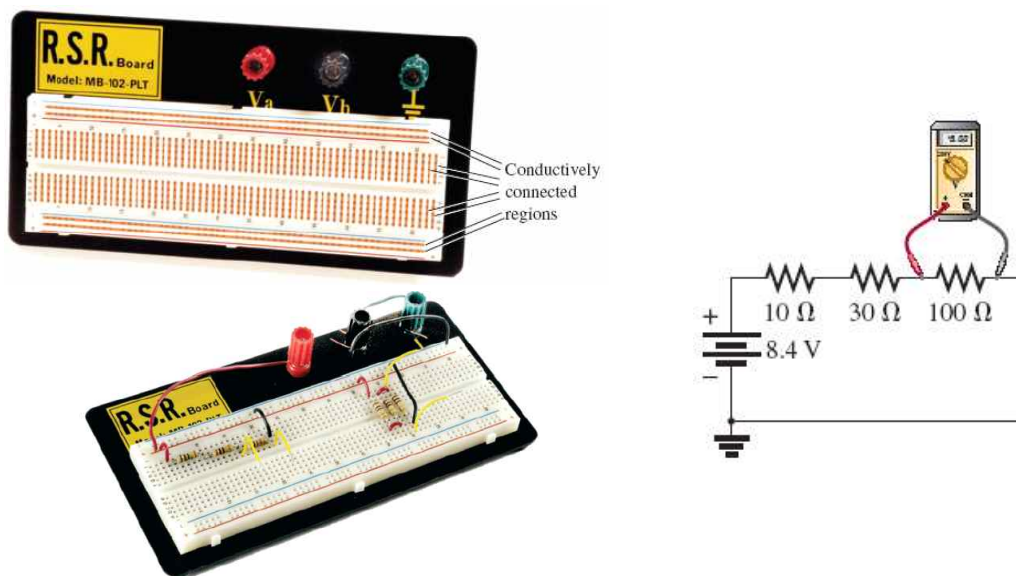
□ 전류계의 부하효과(loading effect)

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



■ Protoboards (Breadboards)

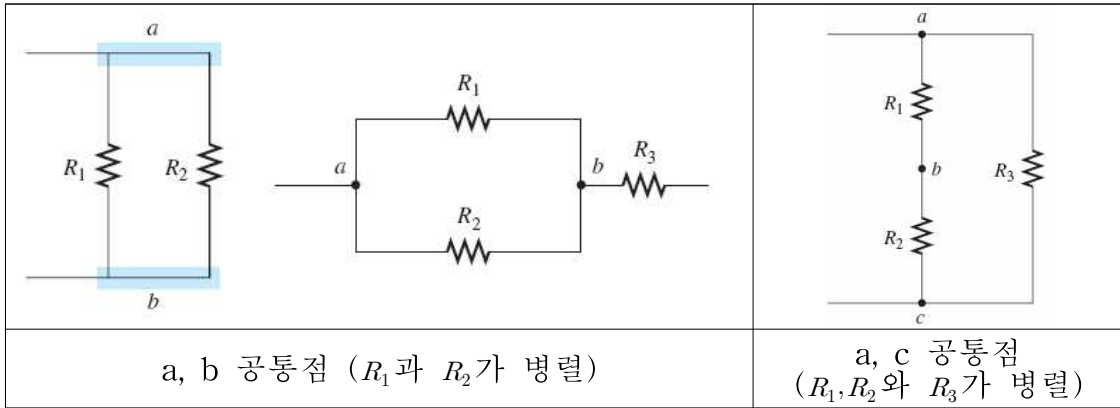
- 회로를 납땜없이 소자를 작은 홀에 삽입하여 실험할 수 있는 실험판



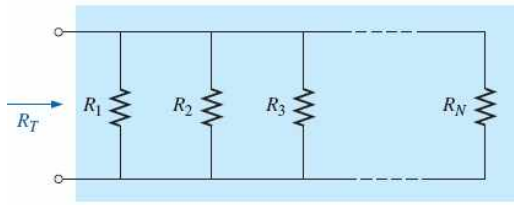
제 6장. 병렬 dc회로 (parallel dc circuits)

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

예) 병렬회로의 예



▪ 전체 병렬저항



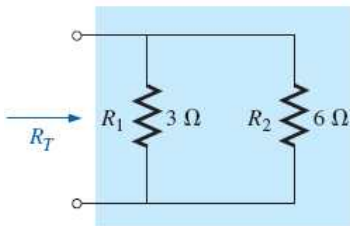
$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

또는 $G = 1/R$ 일 때

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

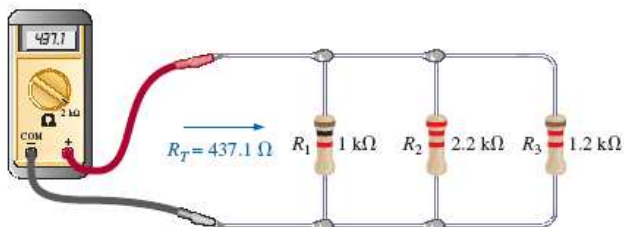
$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}} \quad [\Omega]$$

예)



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

예)



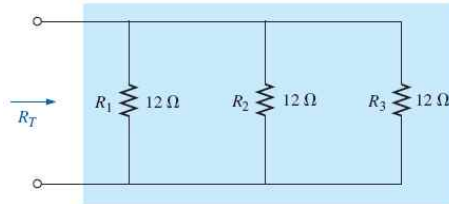
$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{1k\Omega} + \frac{1}{2.2k\Omega} + \frac{1}{1.2k\Omega}} = 437.1\Omega$$

- 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

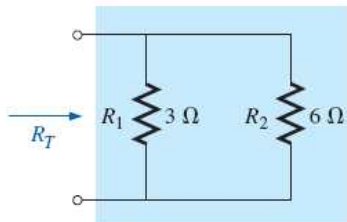
$$R_T = \frac{12\Omega}{3} = 4\Omega$$

- 2개 병렬저항

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

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

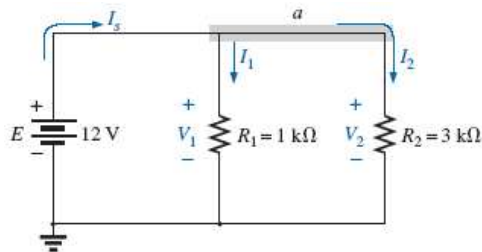
예)



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

▪ 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

$$I_s = I_1 + I_2$$

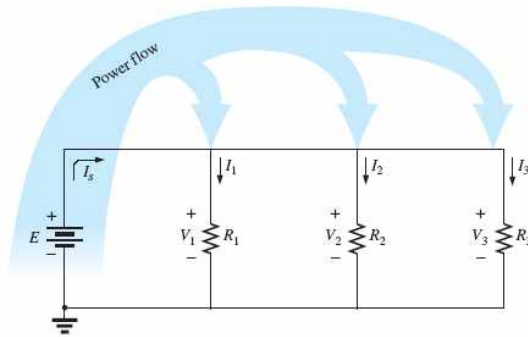
이다.

■ 병렬회로의 전력분배

- 전원에서 제공하는 전력은 각 저항에서 소모하는 전력의 합과 같다.

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

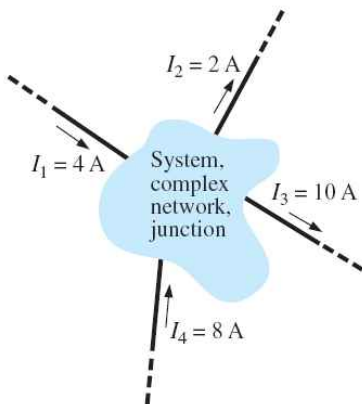
$$P_E = I_1 V_1 + I_2 V_2 + I_3 V_3 = I_1 E + I_2 E + I_3 E = (I_1 + I_2 + I_3) E = I_s E$$



■ 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 :

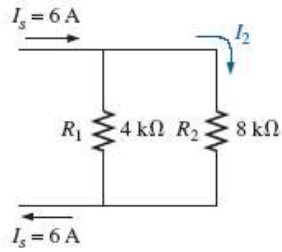
$$\sum I_i = I_1 + I_4 = 4A + 8A = 12A$$

- 유출되는 전류의 합 :

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

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

예)



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

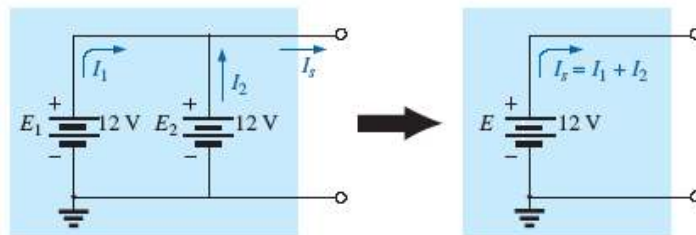
$$= \left(\frac{4k\Omega}{4k\Omega + 8k\Omega} \right) 6A = (0.333)(6A) = 2A$$

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

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---|---|
| $I_1 = I_2 = \frac{I_T}{2}$ | $I_1 = 2I_2$ | $I_1 = \left(\frac{6}{2} \right) I_2 = 3I_2$ | $I_1 = 6I_3$ $I_1 = 3I_2$ $I_2 = \left(\frac{6}{3} \right) I_3 = 2I_3$ |
| 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)

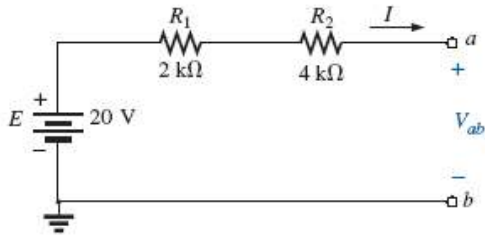
동일한 전압원이 병렬로 연결될 때 1개의 전압원으로 대체할 수 있다.



■ 개방(open)과 단락(short)

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

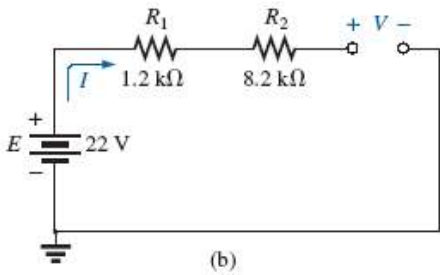
• 개방(open)회로의 예



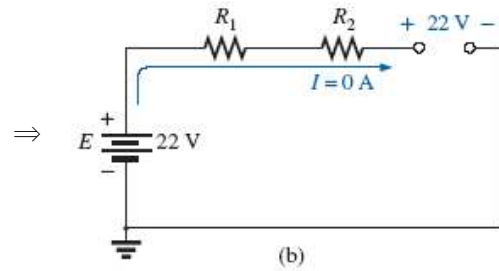
회로가 개방되어 전류가 흐르지 못함

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

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



(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.

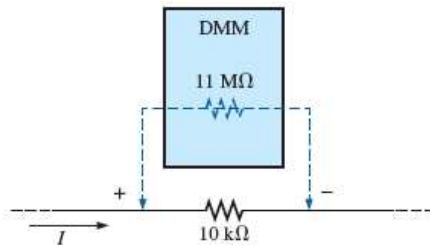
■ 전압계 부하효과 (voltmeter loading effects)

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, $11M\Omega \gg 10k\Omega$)

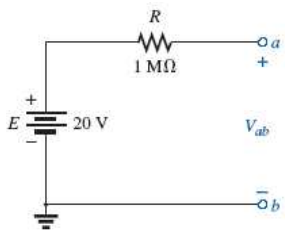


- 2) $10k\Omega$ 양단의 전압을 측정하기 위해 VOM(volt-ohm meter)를 연결한 경우
 VOM의 내부저항이 $50k\Omega$ 이면, $10k\Omega$ 와 병렬로 연결되어 전체저항은

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

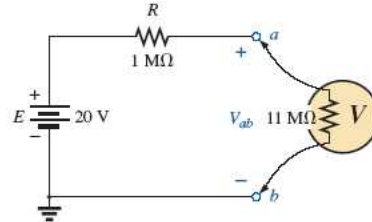
로 큰 오차를 가짐 (\because 내부저항이 상대적으로 큰 저항이 아님)

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



$$V_{ab} = 20V$$

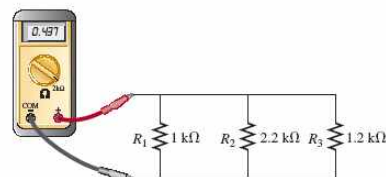
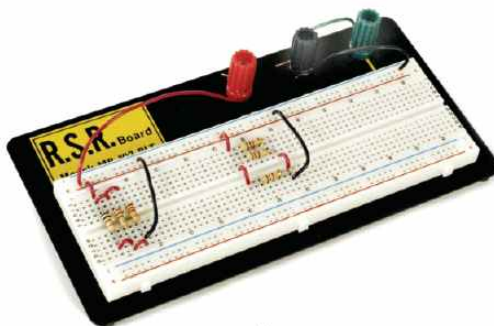
<전압계 연결 전 개방회로>



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

<전압계(내부저항이 $11M\Omega$) 연결 후>

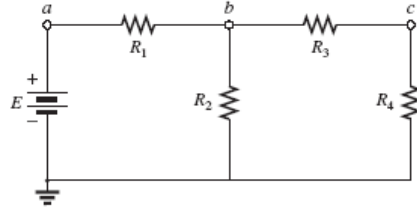
■ 브레드보드(breadboard)에 병렬회로 구성 예



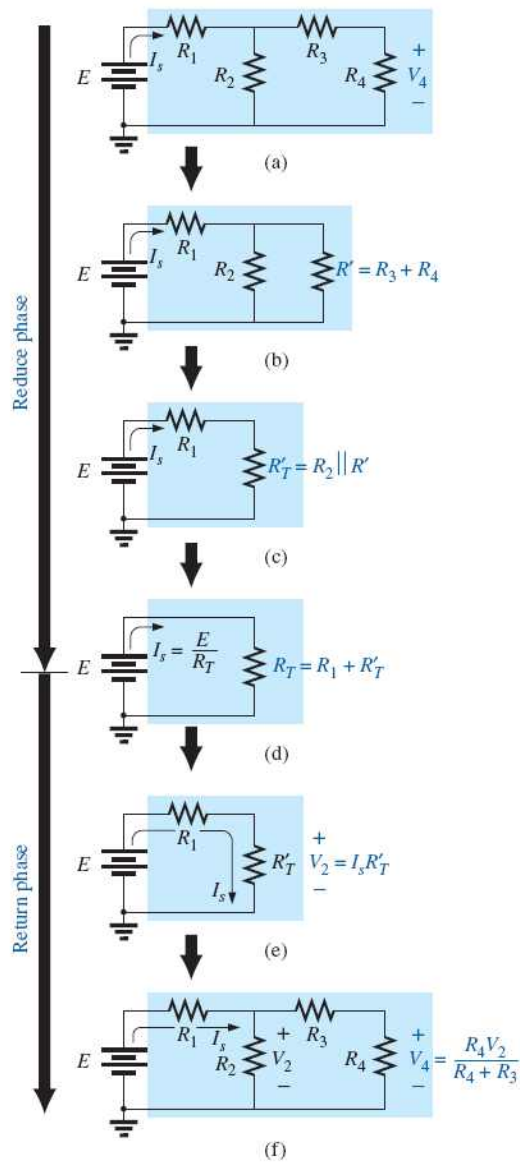
제 7장. 직렬-병렬회로 (series-parallel circuits)

- 직렬-병렬회로: 직렬과 병렬이 혼합된 회로

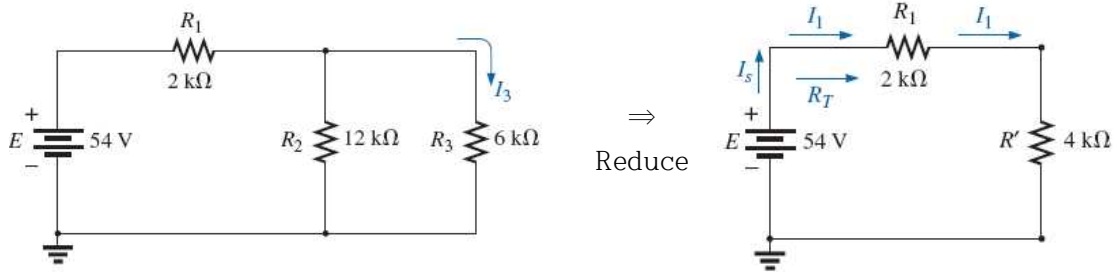
예) 병렬회로의 예



- 회로의 축소(reduce) 및 복원(return)



예제 7.1) 전류 I_3 를 구하라.



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

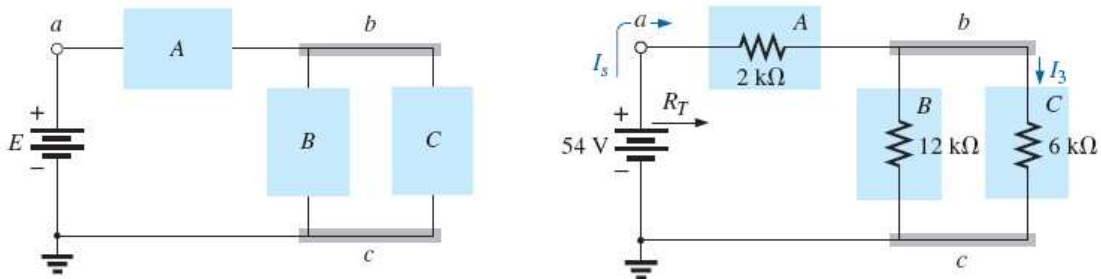
$$R_T = 2k\Omega + 4k\Omega = 6k\Omega$$

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

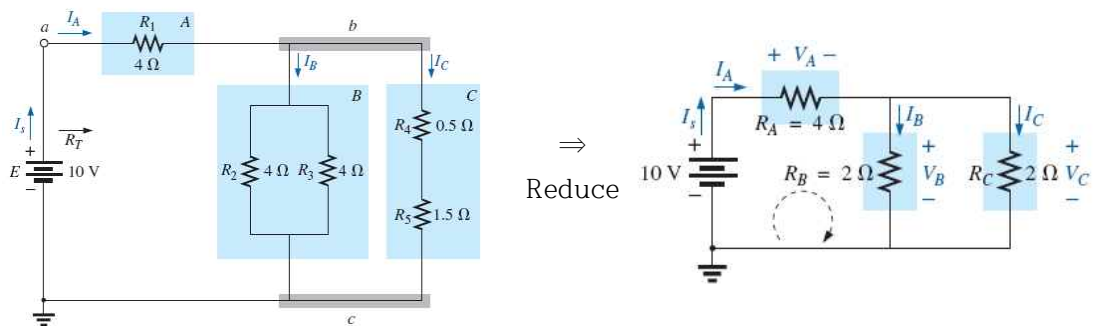
$$\text{전류분배법칙(CDR)에 의해 } I_3 = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) I_1 = \left(\frac{12k\Omega}{12k\Omega + 6k\Omega} \right) 9mA = 6mA$$

■ 블록도(block diagram) 접근 방법

- 회로망(network)을 블록단위로 분해하여 회로를 해석하는 방법



예제 7.3) 회로망의 모든 전류 및 전압을 구하라.



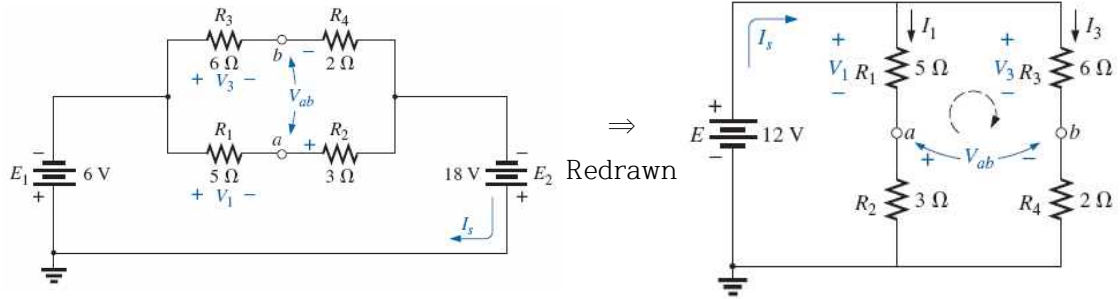
$$I_s = I_A = \frac{E}{R_T} = \frac{10V}{5\Omega} = 2A$$

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

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

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

예제 7.7) 전압 V_1 , V_3 및 V_{ab} 을 구하라.

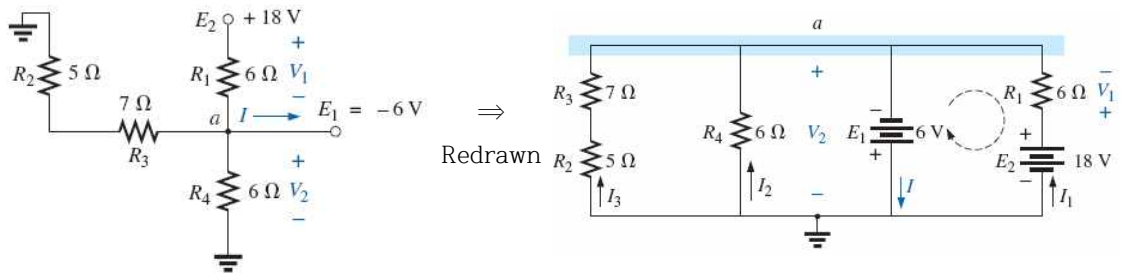


$$V_1 = \frac{R_1 E}{R_1 + R_2} = \frac{(5\Omega)(12V)}{5\Omega + 3\Omega} = \frac{60V}{8} = 7.5V$$

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

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

예제 7.8) 전압 V_1 , V_2 및 전류 I 를 구하라.



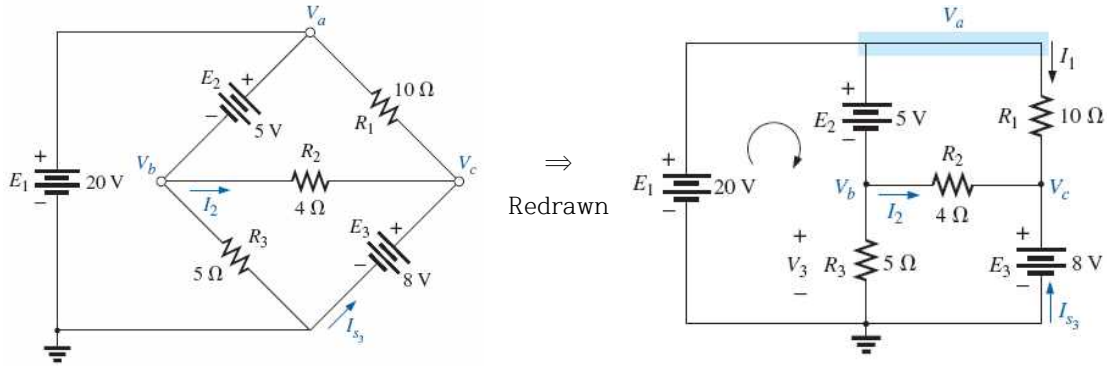
$$V_2 = -E_1 = -6V$$

$$\text{KVL에 의해 } V_1 = E_2 + E_1 = 18V + 6V = 24V$$

a점에서 KCL을 사용하면, $I = I_1 + I_2 + I_3$

$$\begin{aligned} &= \frac{V_1}{R_1} + \frac{E_1}{R_4} + \frac{E_1}{R_2 + R_3} \\ &= \frac{24V}{6\Omega} + \frac{6V}{6\Omega} + \frac{6V}{12\Omega} \\ &= 4A + 1A + 0.5A = 5.5A \end{aligned}$$

예제 7.11) 전압 V_b , V_c , V_3 및 전류 I_2 를 구하라.



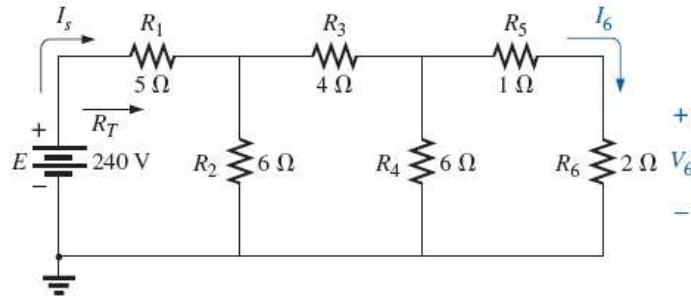
$$V_a = E_1 = 20 V$$

$$V_c = E_3 = 8 V$$

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

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

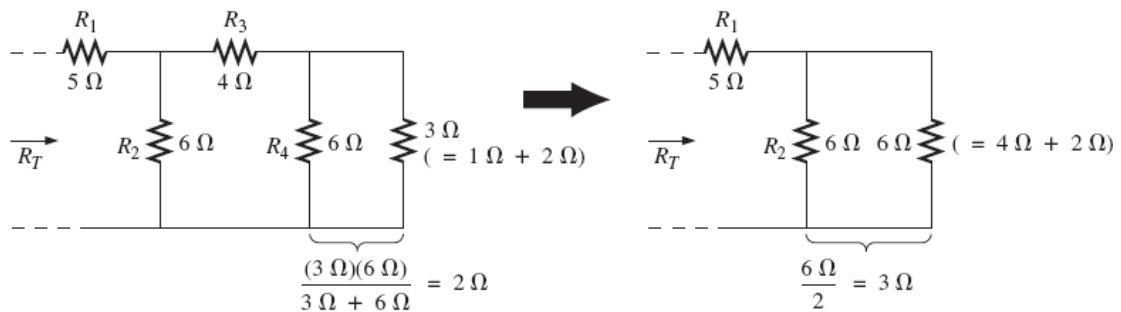
▪ 사다리망(ladder networks)



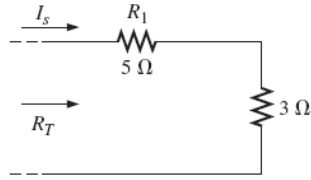
▪ 해석 방법 1)

회로를 축소(reduce)시켜서 전체 저항 R_T 와 전체 전류 I_s 를 구한 후 다시 재구성(return)하면서 해석하는 방법

① 회로를 축소(reduce)



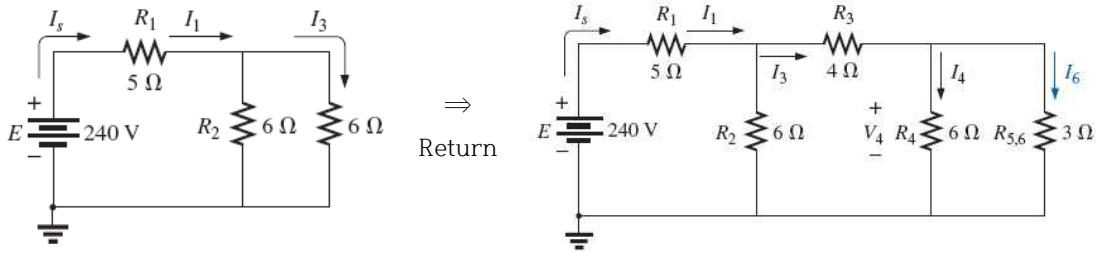
② 전체 저항 R_T 및 전체 전류 I_s 를 구함



$$R_T = 5\Omega + 3\Omega = 8\Omega$$

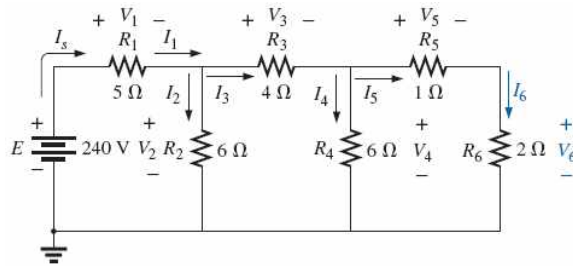
$$I_s = \frac{E}{R_T} = \frac{240V}{8\Omega} = 30A$$

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

$$I_6 = \frac{V_4}{R_5 + R_6} = \frac{V_4}{1\Omega + 2\Omega} = \frac{V_4}{3\Omega}$$

or

$$V_4 = (3\Omega)I_6$$

so that

$$I_4 = \frac{V_4}{R_4} = \frac{(3\Omega)I_6}{6\Omega} = 0.5I_6$$

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

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{(9\Omega)I_6}{6\Omega} = 1.5I_6$$

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

$$I_6 = \frac{E}{24\Omega} = \frac{240V}{24\Omega} = 10A$$

with

$$V_6 = I_6R_6 = (10A)(2\Omega) = 20V$$

1) 각 소자의 전류 및 전압을 I_6 로 표현

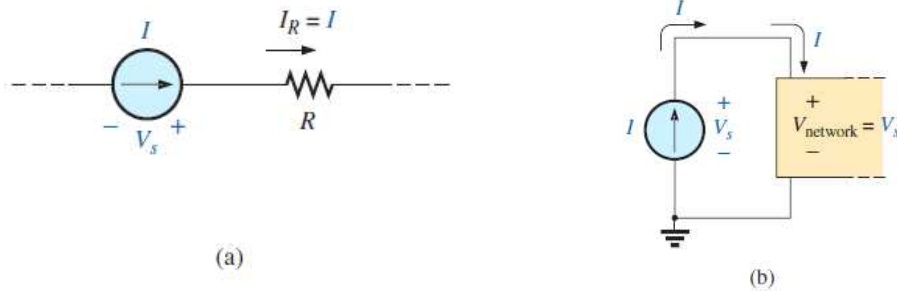
2) I_6 를 구함

3) I_6 를 사용하여 모든 소자의 전류 및 전압을 구함

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

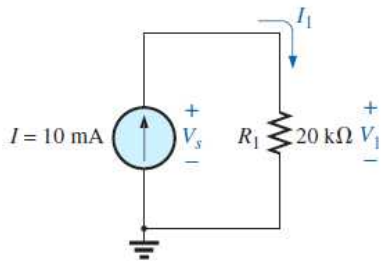
■ 전류원 (current sources)

- 전류원은 일정전류를 회로에 공급하며, 전류의 방향과 크기를 가진다.



<전류원의 기호>

예제 8.1) 소스(source)전압 V_s , 저항 R_1 의 전압 V_1 과 전류 I_1 을 구하라.

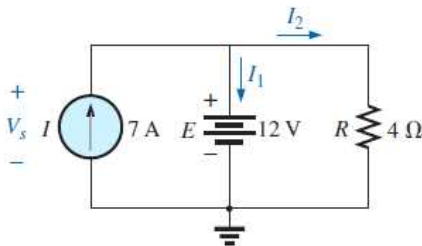


$$I_1 = I = 10 \text{ mA}$$

$$V_1 = I_1 R_1 = (10 \text{ mA})(20 \text{ k}\Omega) = 200 \text{ V}$$

$$V_s = V_1 = 200 \text{ V}$$

예제 8.2) 전압 V_s 와 전류 I_1 과 I_2 를 구하라.



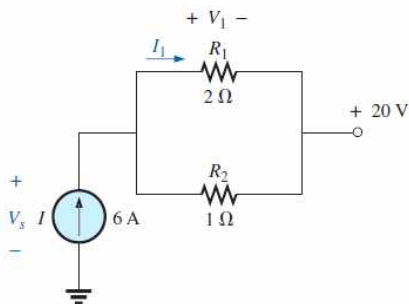
$$V_s = E = 12 \text{ V}$$

$$V_R = E = 12 \text{ V}$$

$$I_2 = \frac{V_R}{R} = \frac{12 \text{ V}}{4 \Omega} = 3 \text{ A}$$

$$I_1 = I_s - I_2 = 7 \text{ A} - 3 \text{ A} = 4 \text{ A}$$

예제 8.3) 전류 I_1 와 소스전압 V_s 를 구하라.



$$I_1 = \frac{R_2 I}{R_1 + R_2} = \frac{(1 \Omega)(6 \text{ A})}{2 \Omega + 1 \Omega} = \frac{1}{3}(6 \text{ A}) = 2 \text{ A}$$

$$V_1 = I_1 R_1 = (2 \text{ A})(2 \Omega) = 4 \text{ V}$$

$$V_s = V_1 + 20 \text{ V} = 4 \text{ V} + 20 \text{ V} = 24 \text{ V}$$

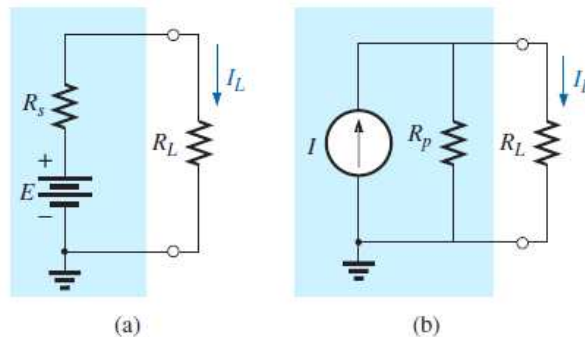
■ 소스의 변환 (source conversion)

■ 이상적 전압원과 전류원

- 이상적 전압원: 외부의 부하저항 R_L 에 무관하게 일정전압을 공급
- 이상적 전류원: 외부의 부하저항 R_L 에 무관하게 일정전류를 공급

■ 실제적 전압원과 전류원

- 실제 전압원은 전압원 E 와 소스저항 R_s 가 직렬로 연결된다.
→ 이상적 전압원의 소스저항 R_s 는 0이어야 함
- 실제 전류원은 전류원 I 와 소스저항 R_p 가 병렬로 연결된다.
→ 이상적 전류원의 소스저항 R_p 는 ∞ 이어야 함



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

■ 전압원과 전류원의 변환

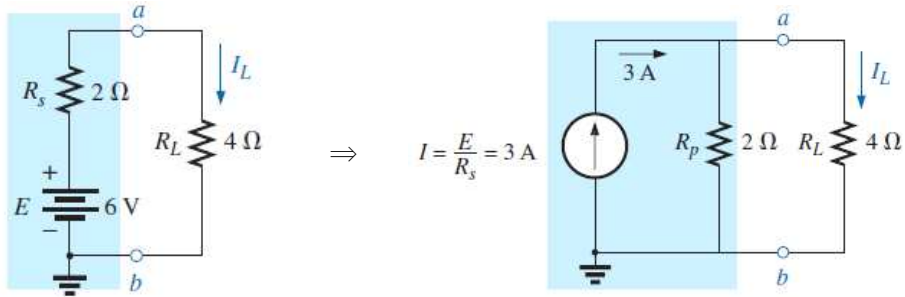
- 전압원은 등가의 전류원으로 변환할 수 있다.
- 전류원은 등가의 전압원으로 변환할 수 있다.

E 와 R_s 가 직렬인 전압원은 $I = E/R_s$ 와 $R_p = R_s$ 가 병렬인 전류원과 동일

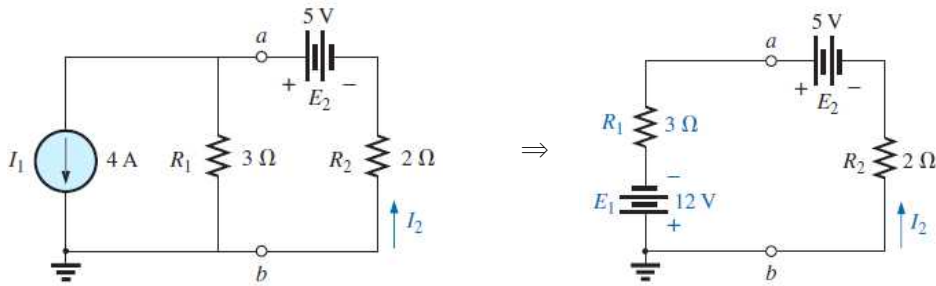
| | |
|---|---|
| <p><등가 전압원> <등가 전류원></p> | <p>전압원 개방전압 : $V_{ab} = E$</p> <p>전압원 단락전류 : $I = \frac{E}{R_s} = \frac{IR_p}{R_p} = I$</p> <hr/> <p>전류원 개방전압 : $V_{ab} = IR_p = \frac{E}{R_p} R_p = E$</p> <p>전류원 단락전류 : I</p> |
|---|---|

- 두 전압원과 전류원을 개방(open)하였을 때 개방전압은 모두 E 이다.
- 두 전압원과 전류원을 단락(short)하였을 때 단락전류는 모두 I 이다.

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

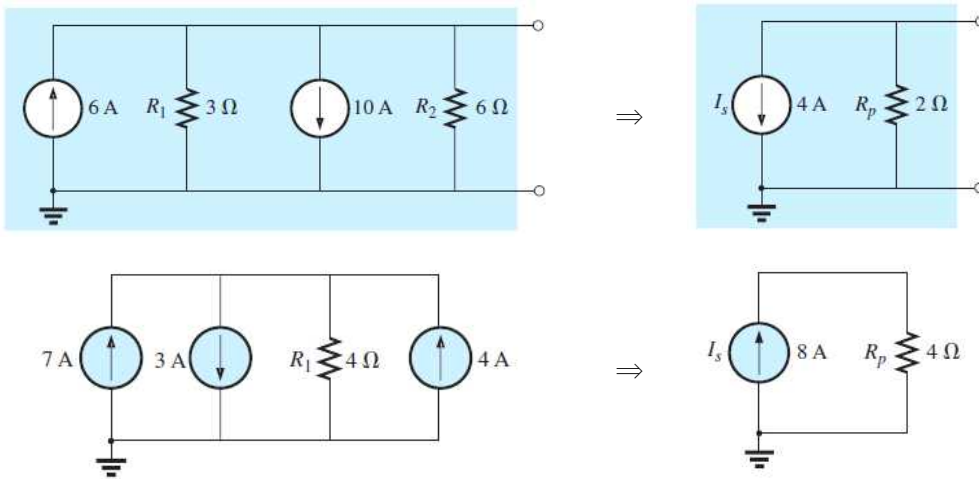


예제 8.5) 전류원을 등가의 전압원으로 변환하라.



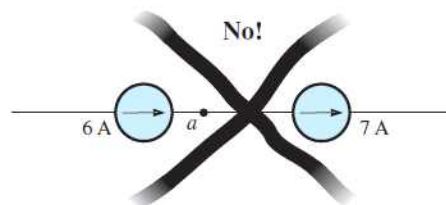
■ 병렬 전류원

- 두개 이상의 전류원이 병렬로 연결되었을 때 1개의 전류원으로 변환가능



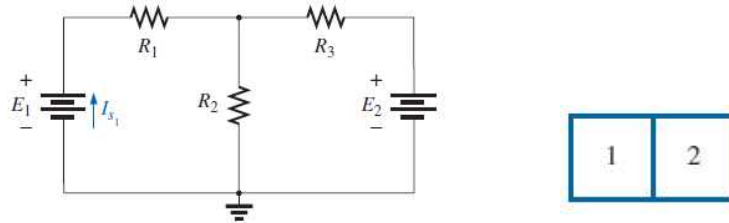
■ 직렬 전류원

- 다른 전류원들은 서로 직렬로 연결될 수 없다.



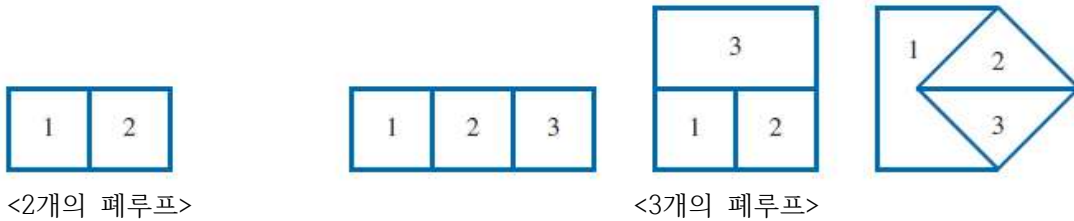
■ 가지-전류 해석 (branch-current analysis)

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



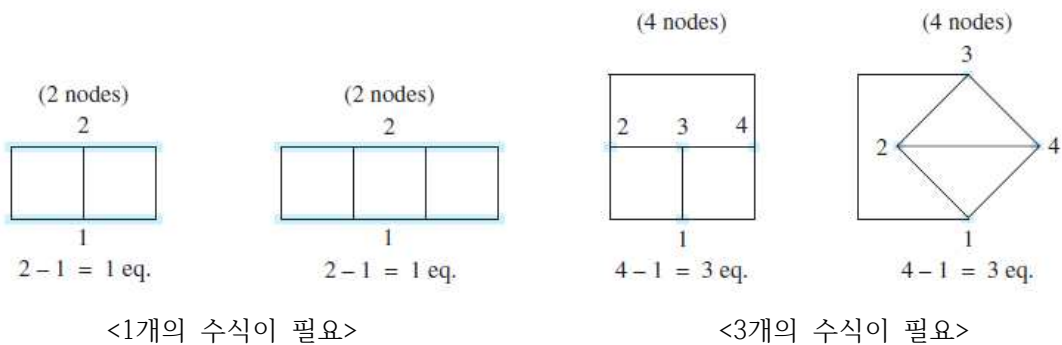
■ 가지-전류 해석 과정

- 모든 가지에 임의 방향의 전류를 정의함
- 각 저항의 전압을 전류방향에 따라 결정함
- KVL을 사용하여 독립된 폐루프(independent closed loop) 마다 식을 작성



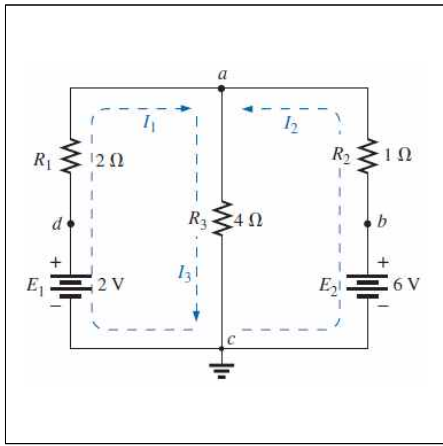
- 또는 KCL을 사용하여 최소의 절점(node)에 대해 식을 작성

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

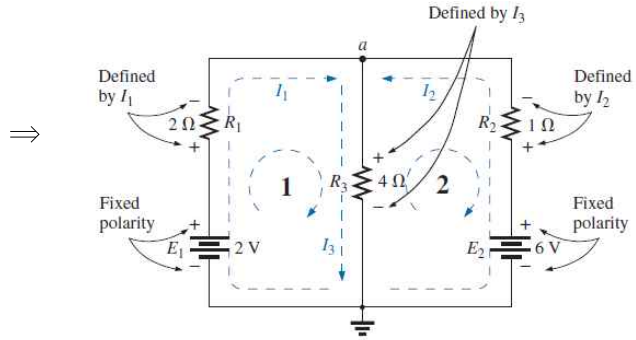


- 방정식을 풀어 해(전류 또는 전압)를 구함

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

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

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

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

$$I_3 = I_1 + I_2 \text{ 이므로}$$

$$\left. \begin{array}{l} 2 - 2I_1 - 4(I_1 + I_2) = 0 \\ 4(I_1 + I_2) + I_2 - 6 = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} 2 - 2I_1 - 4I_1 - 4I_2 = 0 \\ 4I_1 + 4I_2 + I_2 - 6 = 0 \end{array} \Rightarrow \begin{array}{l} -6I_1 - 4I_2 = -2 \\ +4I_1 + 5I_2 = +6 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} 6I_1 + 4I_2 = +2 \\ 4I_1 + 5I_2 = +6 \end{array}$$

\Rightarrow

$$\begin{array}{l} I_1 = \frac{\begin{vmatrix} 2 & 4 \\ 6 & 5 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 6 & 4 \\ 4 & 5 \end{vmatrix}} = \frac{10 - 24}{30 - 16} = \frac{-14}{14} = -1 \text{ A} \\ I_2 = \frac{\begin{vmatrix} 6 & 2 \\ 4 & 6 \end{vmatrix}}{14} = \frac{36 - 8}{14} = \frac{28}{14} = 2 \text{ A} \\ I_3 = I_1 + I_2 = -1 + 2 = 1 \text{ A} \end{array}$$

▪ 2차 방정식의 해

| <p>2차방정식</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="padding: 2px;">Col. 1</th> <th style="padding: 2px;">Col. 2</th> <th style="padding: 2px;">Col. 3</th> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$a_1x + b_1y = c_1$</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$a_2x + b_2y = c_2$</td> <td></td> <td></td> </tr> </table> | Col. 1 | Col. 2 | Col. 3 | $a_1x + b_1y = c_1$ | | | $a_2x + b_2y = c_2$ | | | ⇒ | <p>해 (x, y)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="padding: 2px;">Col. 1</th> <th style="padding: 2px;">Col. 2</th> <th style="padding: 2px;">Col. 1</th> <th style="padding: 2px;">Col. 2</th> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$x = \frac{\begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}$</td> <td></td> <td style="padding: 2px;">$y = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}$</td> <td></td> </tr> </table> | Col. 1 | Col. 2 | Col. 1 | Col. 2 | $x = \frac{\begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}$ | | $y = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}$ | |
|---|--------|---|--------|---------------------|--|--|---------------------|--|--|---|---|--------|--------|--------|--------|---|--|---|--|
| Col. 1 | Col. 2 | Col. 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $a_1x + b_1y = c_1$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $a_2x + b_2y = c_2$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Col. 1 | Col. 2 | Col. 1 | Col. 2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $x = \frac{\begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}$ | | $y = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Col. 1 | Col. 2 |
|--|--------|
| Determinant = $D = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = a_1b_2 - a_2b_1$ | |

예) 방정식의 해를 구하라.

$$\begin{array}{l}
 2x + y = 3 \\
 3x + 4y = 2
 \end{array}
 \Rightarrow
 \begin{array}{l}
 x = \frac{\begin{vmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 3 & 4 \end{vmatrix}} = \frac{(3)(4) - (2)(1)}{(2)(4) - (3)(1)} = \frac{12 - 2}{8 - 3} = \frac{10}{5} = 2 \\
 y = \frac{\begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 2 \end{vmatrix}}{5} = \frac{(2)(2) - (3)(3)}{5} = \frac{4 - 9}{5} = \frac{-5}{5} = -1
 \end{array}$$

EXAMPLE D.5 Evaluate the following determinant:

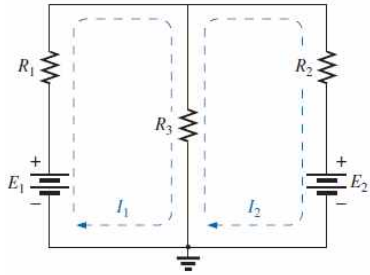
$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ -2 & 1 & 0 \\ 0 & 4 & 2 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} \cancel{1} & \cancel{2} & \cancel{3} & \begin{matrix} (-) & (-) & (-) \\ 1 & 2 \\ -2 & 1 \\ 0 & 4 \end{matrix} \\ \cancel{-2} & \cancel{1} & \cancel{0} & \\ \cancel{0} & \cancel{4} & \cancel{2} & \begin{matrix} (+) & (+) & (+) \\ -2 & 1 \\ 0 & 4 \end{matrix} \end{vmatrix}$$

Solution:

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

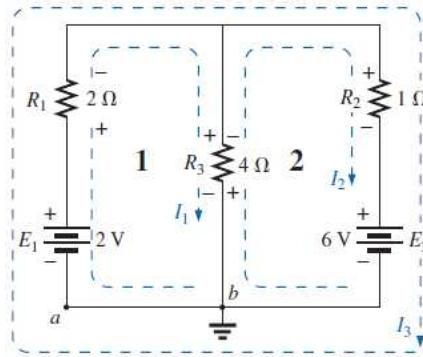
■ 메쉬 해석 (mesh analysis)

- 가지-전류방법의 확장이며, 메쉬(또는 루프)의 개수 만큼 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 8.13) 메쉬방법으로 회로를 해석하라.



(1) 메쉬(루프)전류를 정의함

I_1, I_2 만을 사용함 (I_3 는 I_1, I_2 을 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)

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

Total current through 4 Ω resistor

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)

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

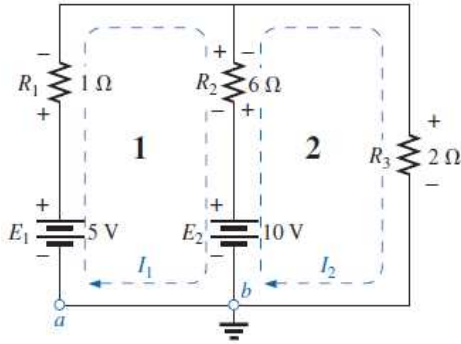
(3) 식을 풀이하여 해를 구함

$$\text{loop 1: } -6I_1 + 4I_2 = -2$$

$$\text{loop 2: } +4I_1 - 5I_2 = +6$$

◦ 해: $I_1 = -1\text{ A}$ 및 $I_2 = -2\text{ A}$

예제 8.14)



loop 1:

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

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

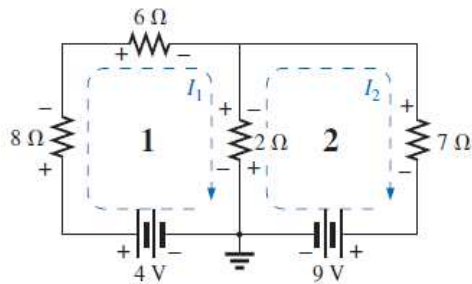
loop 2:

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

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

$$\therefore I_1 = 1A, I_2 = 2A$$

예제 8.18)



loop 1:

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

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

loop 2:

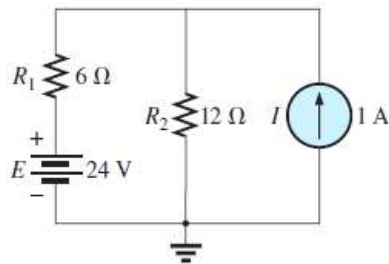
$$(2\Omega)(I_2 - I_1) + (7\Omega)I_2 = -9V$$

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

■ 절점 해석 (nodal analysis)

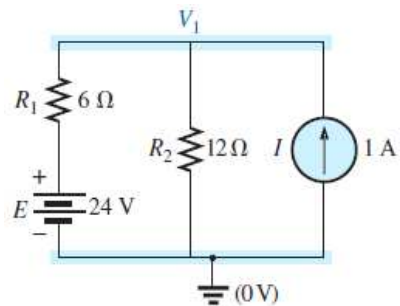
- (1) 절점의 수를 결정
- (2) 기준절점(reference node)을 기준으로 나머지 절점의 전압을 정의함
- (3) 기준절점을 제외한 나머지 절점에서 KCL을 사용하여 식으로 표현함
- (4) 식을 풀이하여 해(절점전압)를 구함

예제 8.21) 절점해석하라.

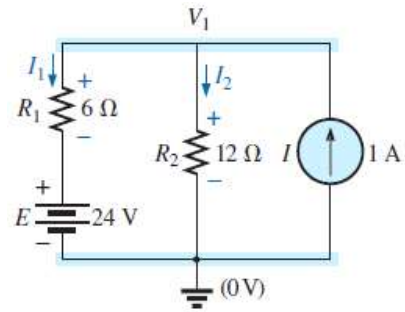


- (1) 2개의 절점 중 접지가 기준절점(reference node)임

나머지 1개 절점의 전압을 V_1 으로 정의함



(2) 절점과 연결된 가지에 전류 I_1, I_2 를 정의함

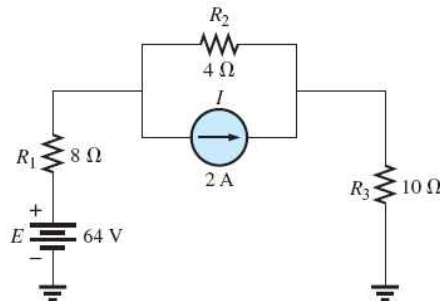


(3) 절점에서 KCL을 사용하여 수식으로 표현하고, 해(절점전압)을 구함

$$I = I_1 + I_2$$

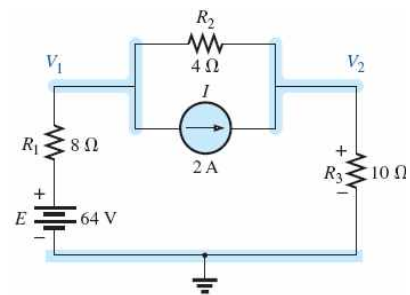
$$= \frac{V_1 - E}{R_1} + \frac{V_1}{R_2} \Rightarrow 1A = \frac{V_1 - 24V}{6\Omega} + \frac{V_1}{12\Omega} \Rightarrow V_1 = 20V$$

예제 8.22) 절점해석하라.

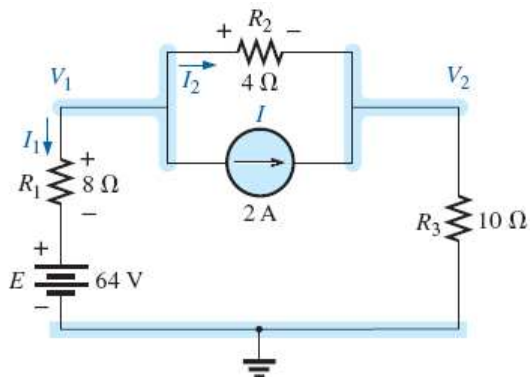


(1) 3개의 절점 중 접지가 기준절점(reference node)임

나머지 2개 절점의 전압을 V_1, V_2 로 정의함



(2) 절점 V_1 에 KCL을 적용

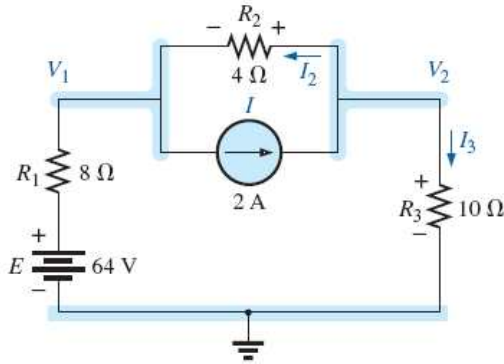


$$I_1 + I_2 + I = 0$$

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

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

(3) 절점 V_2 에 KCL을 적용



$$I = I_2 + I_3$$

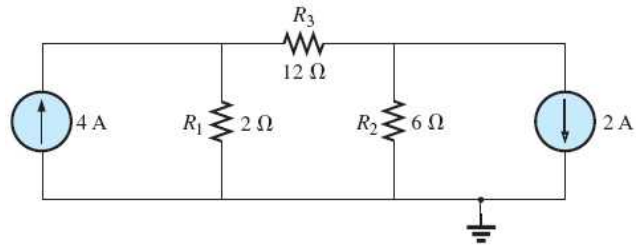
$$I = \frac{V_2 - V_1}{R_2} + \frac{V_2}{R_3}$$

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

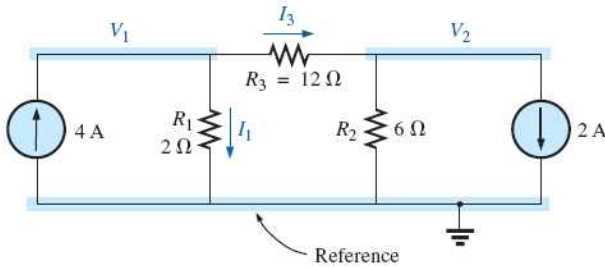
(4) 두 방정식으로부터 해를 구함

$$\begin{aligned} 0.375 V_1 - 0.25 V_2 &= 6 \\ -0.25 V_1 + 0.35 V_2 &= 2 \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} V_1 &= 37.82 V \\ V_2 &= 32.73 V \end{aligned}$$

예제 8.23) 절점 해석하라.



(1) 절점 V_1 에 KCL을 적용



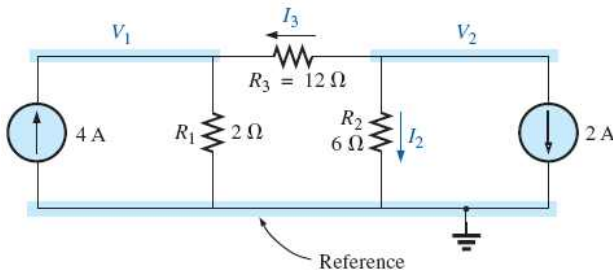
$$I_1 + I_3 = 4A$$

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

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

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

(2) 절점 V_2 에 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

$$\begin{aligned} 7V_1 - V_2 &= 48 \\ -1V_1 + 3V_2 &= -24 \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} V_1 &= +6V \\ V_2 &= -6V \end{aligned}$$

제 9장. 네트워크이론 (Network theorem)

■ 중첩이론 (superposition theorem)

- 선형회로(선형소자로 이루어진 회로)에서 서로 다른 전원이 인가될 때의 결과는 전원 각각 인가되었을 때 결과들의 합과 같다.

예) 선형함수 $y = f(x) = 2x$ 일 때

$$x_1 = 3 \text{ 일 때 } y_1 = f(x_1) = 6$$

$$x_2 = 5 \text{ 일 때 } y_2 = f(x_2) = 10$$

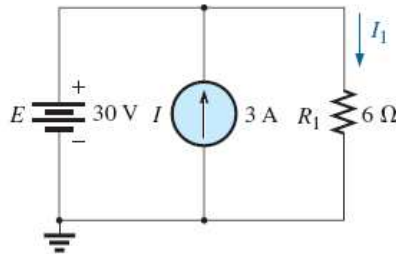
$$x_3 = x_1 + x_2 = 8 \text{ 일 때 } y_3 = f(x_3) = f(x_1 + x_2) = 16$$

$$y_3 = f(x_3) = f(x_1) + f(x_2) = y_1 + y_2 = 6 + 10 = 16$$

→ 중첩성을 만족함

예제 9.1) 2개의 다른 전원(전압원과 전류원)이 인가된 회로의 예

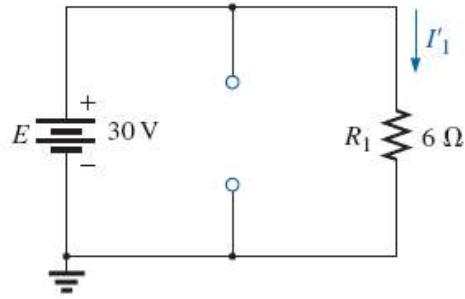
중첩이론을 사용하면 전류 I_1 은 전압원 E 만을 가했을 때의 전류 I_1' 와 전류원 I 만을 가했을 때의 전류 I_1'' 의 합과 같다.



| | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ■ 전압원을 제거 - 전압원 $E=0$ (단락(short)) - 내부저항은 남김 | |
| <ul style="list-style-type: none"> ■ 전류원을 제거 - 전류원 $I=0$ (개방(open)) - 내부저항은 남김 | |

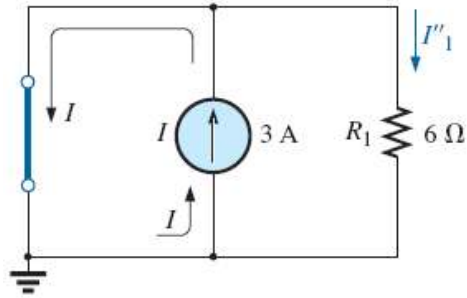
- 전류원을 제거하고 전압원만 인가했을 때의 전류 I_1'

$$I_1' = \frac{30V}{6\Omega} = 5A$$



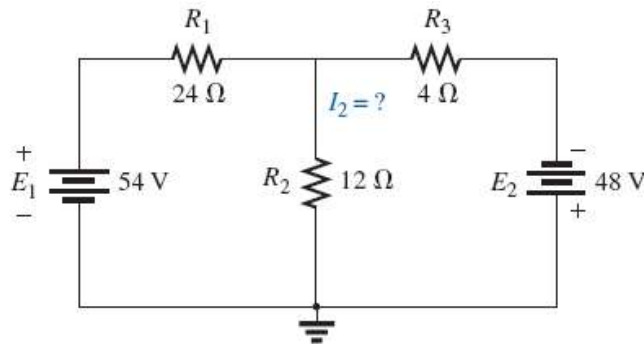
- 전압원을 제거하고 전류원만 인가했을 때의 전류 I_1''

$$I_1'' = 0A$$

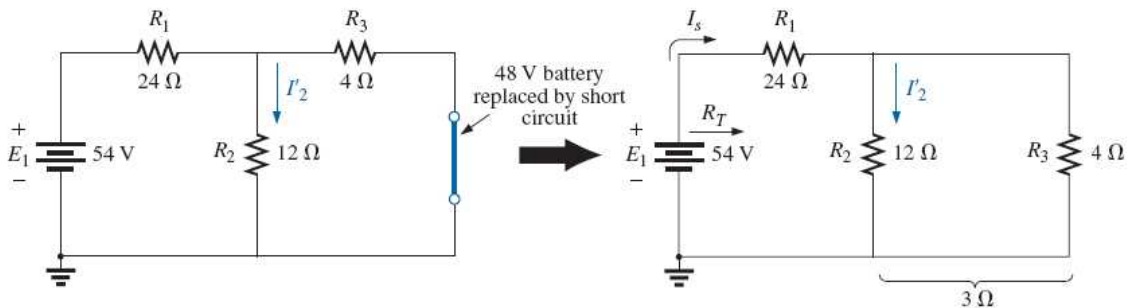


- 두 전원을 모두 인가하였을 때 : $I_1 = I_1' + I_1'' = 5A + 0A = 5A$

예제 9.2) 중첩이론을 이용하여 R_2 에 흐르는 전류 I_2 를 구하라.

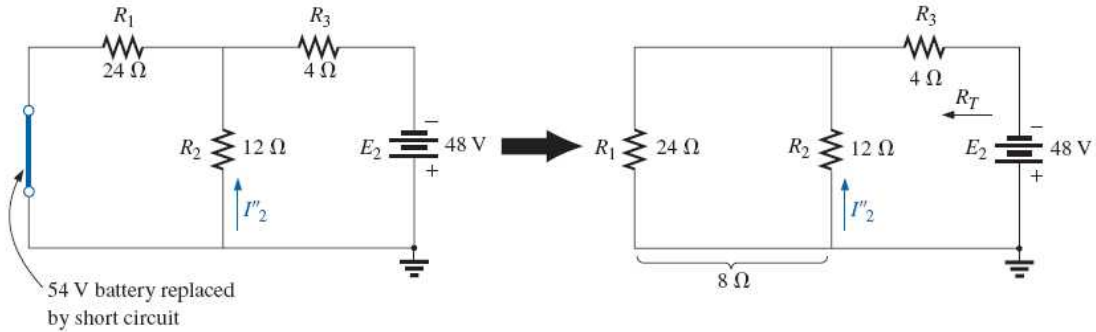


(1) 전원 E_2 를 제거했을 때 I_2' 를 구함



$$I_2' = \frac{R_3 I_s}{R_3 + R_2} = \frac{(4\Omega)(2A)}{4\Omega + 12\Omega} = 0.5A$$

(2) 전원 E_1 를 제거했을 때 I_2'' 를 구함

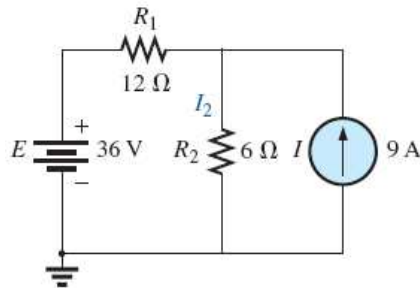


$$I_2'' = \frac{R_1 I_s}{R_1 + R_2} = \frac{(24\Omega)(4A)}{24\Omega + 12\Omega} = 2.67A$$

(3) 중첩이론을 이용하여 $I_2 = I_2'' - I_2'$ 를 구함

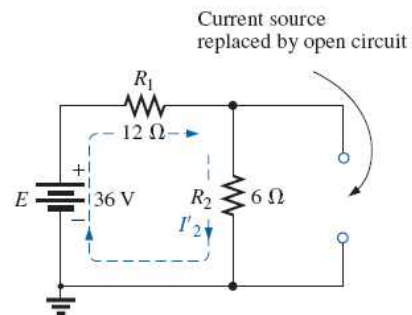
$$I_2 = I_2'' - I_2' = 2.67A - 0.5A = 2.17A \quad (\text{전류방향 } \uparrow)$$

예제 9.3) 중첩이론을 이용하여 R_2 에 흐르는 전류 I_2 를 구하라.



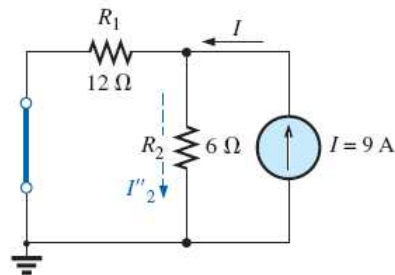
(1) 전류원 9A를 제거했을 때 I_2' 를 구함

$$I_2' = \frac{E}{R_T} = \frac{36V}{18\Omega} = 2A$$



(2) 전압원 36V를 제거했을 때 I_2'' 를 구함

$$I_2'' = 9A \frac{12\Omega}{12\Omega + 6\Omega} = 6A$$



(3) 중첩이론을 이용하여 전체전류 I_2 를 구함

$$I_2 = I_2' + I_2'' = 2A + 6A = 8A$$

※ 전력은 중첩이론을 만족하지 못함

$$I_2' \text{에 의한 소비전력 } P_1 = (I_2')^2(R_2) = (2A)^2(6\Omega) = 24W$$

$$I_2'' \text{에 의한 소비전력 } P_2 = (I_2'')^2(R_2) = (6A)^2(6\Omega) = 216W$$

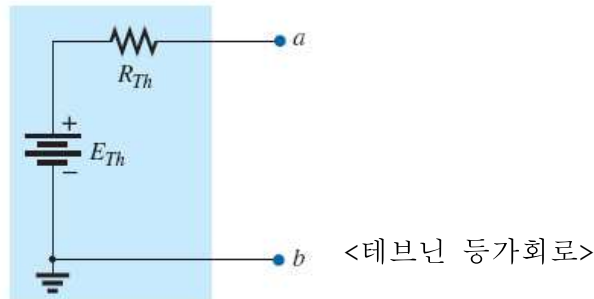
$$P_T = (I_2)^2(R_2) = (8A)^2(6\Omega) = 384W$$

$P_T \neq P_1 + P_2$ 이므로 중첩성을 만족하지 못함

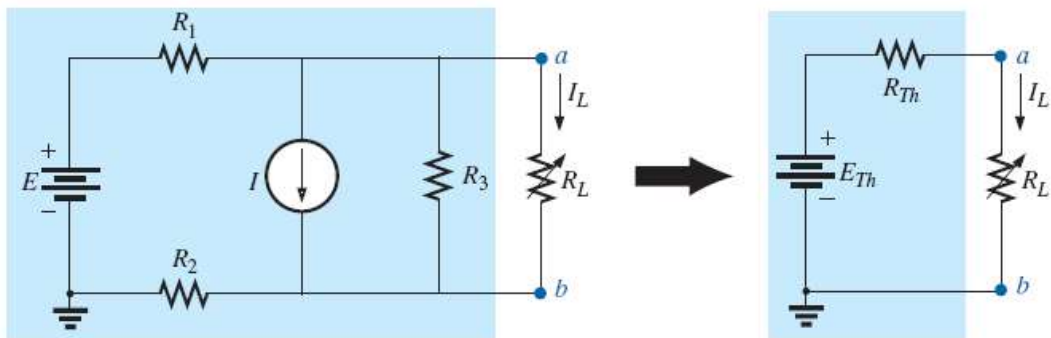
- 6Ω 의 소비전력 P_T 는 각 전원의 소비전력들의 합이 아님.
- 전력 P 는 전류 I 와 비선형관계이므로 중첩성을 만족하지 못함

■ 테브닌이론 (Thevenin theorem)

• 임의의 2단자 dc회로망은 전압원(E_{Th})과 저항(R_{Th})의 직렬로 표현될 수 있다.



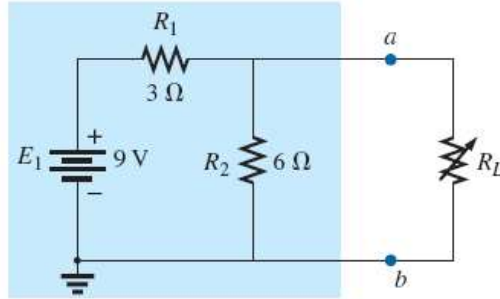
■ a,b 두 단자 좌측의 회로를 테브닌 등가회로로 간략히 표현된 예



■ 테브닌 등가회로로 변환하는 방법

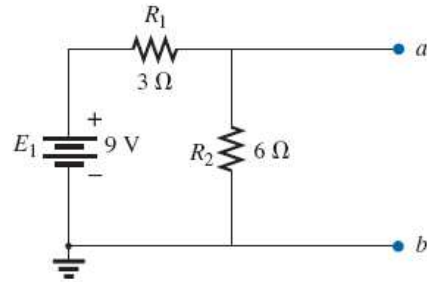
- 테브닌전압 E_{Th} : a,b 단자를 개방하여 회로분리 후, 단자 양단의 전압을 구함
- 테브닌저항 R_{Th} : 전압원은 단락(short)하고 전류원은 개방(open)시킨 후 전체 저항을 구함

예제 9.6) a,b 단자 좌측회로를 테브닌 등가회로로 변환하라.



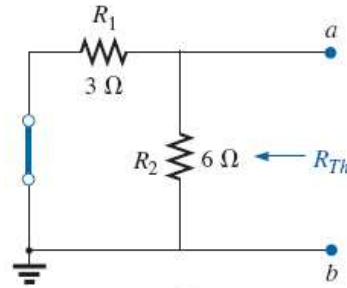
- (1) a,b 단자를 개방하고 단자양단의 전압 V_{ab} ($= E_{Th}$)를 구함

$$E_{Th} = 9V \frac{6\Omega}{3\Omega + 6\Omega} = 6V$$

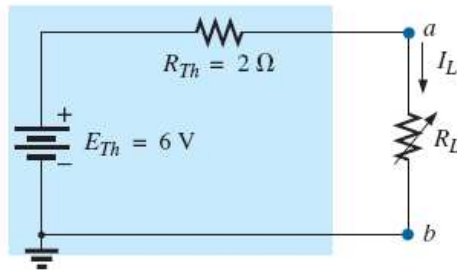


- (2) 전압원 E를 제거하고 전체저항 R_{Th} 을 구함

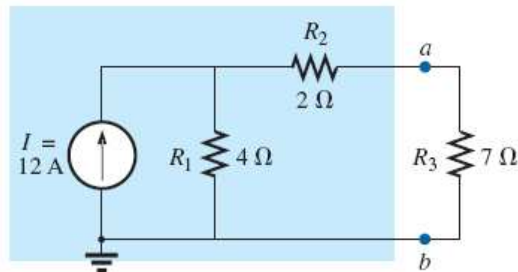
$$R_{Th} = R_1 \parallel R_2 = \frac{(3\Omega)(6\Omega)}{3\Omega + 6\Omega} = 2\Omega$$



- (3) 테브닌 등가회로로 변환된 결과회로

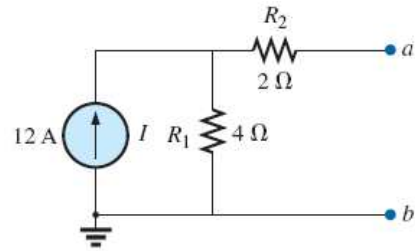


예제 9.7) a,b 단자 좌측회로를 테브닌 등가회로로 변환하라.



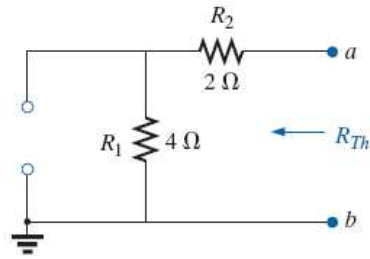
- (1) a,b 단자를 개방하고 단자양단의 전압 V_{ab} ($= E_{Th}$)를 구함

$$E_{Th} = (12A)(4\Omega) = 48V$$

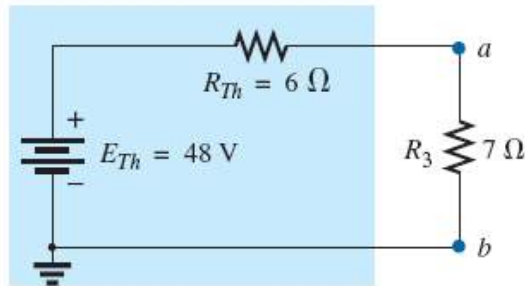


- (2) 전류원 I 를 제거하고 전체저항 R_{Th} 을 구함

$$R_{Th} = 4\Omega + 2\Omega = 6\Omega$$

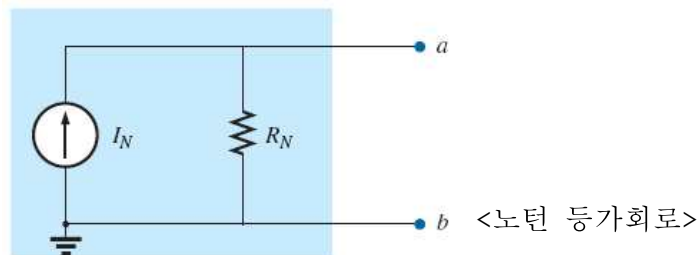


- (3) 테브닌 등가회로로 변환된 결과회로

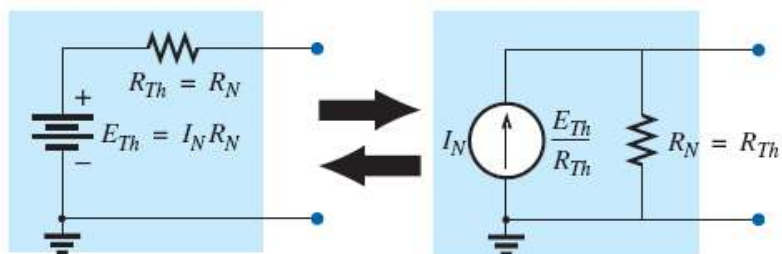


■ 노턴이론 (Norton theorem)

- 임의 2단자 dc회로망은 전류원(I_N)과 저항(R_N)의 병렬로 표현될 수 있다.



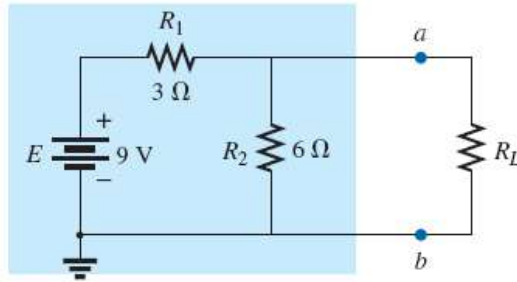
- 테브닌 등가회로는 노턴 등가회로로 변환 가능함



■ 노턴 등가회로로 변환하는 방법

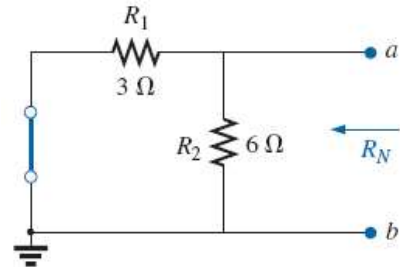
- 노턴전류 I_N : a,b 단자를 단락하고, 단락단자로 흐르는 전류를 구함
- 노턴저항 R_N : 테브닌저항 R_{Th} 를 구하는 방법과 동일함 ($R_N = R_{Th}$)

예제 9.12) a,b 단자 좌측회로를 노턴 등가회로로 변환하라.



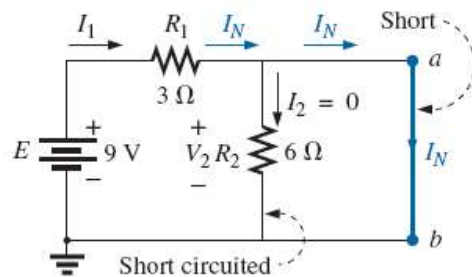
- (1) a,b 단자를 개방하고 전압원을 제거하여 노턴저항 R_N 을 구함

$$R_N = \frac{(3\Omega)(6\Omega)}{3\Omega + 6\Omega} = 2\Omega$$

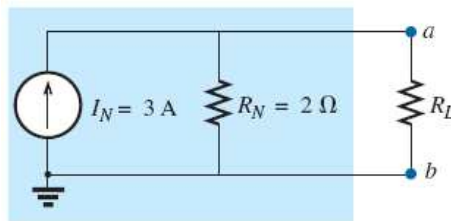


- (2) a,b 단자를 단락(short)하고 단락단자에 흐르는 노턴전류 I_N 을 구함

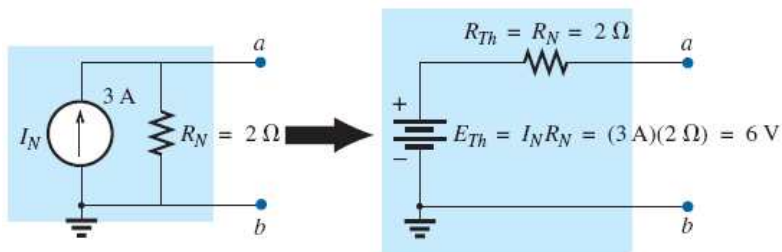
$$I_N = \frac{E}{R_1} = \frac{9V}{3\Omega} = 3A$$



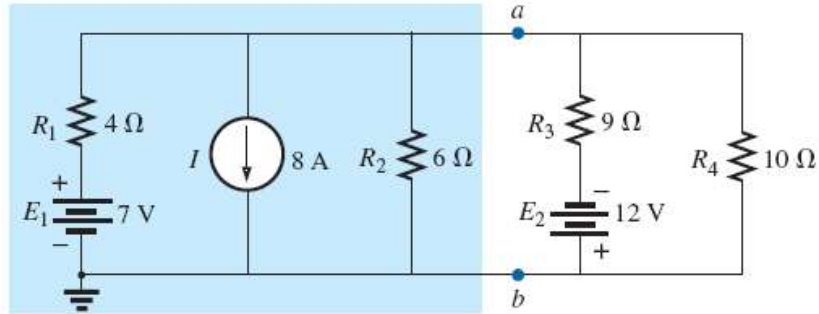
- (3) 노턴 등가회로로 변환된 결과회로



■ 노턴 등가회로에서 테브닌 등가회로로 변환

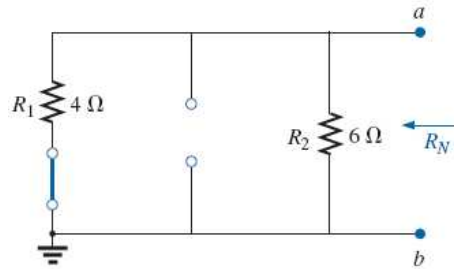


예제 9.14) a,b 단자 좌측회로를 노턴 등가회로로 변환하라.



- (1) a,b 단자를 개방하고 전류원과 전압원을 제거하여 노턴저항 R_N 을 구함

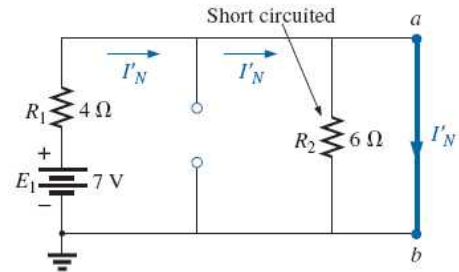
$$R_N = \frac{(4\Omega)(6\Omega)}{4\Omega + 6\Omega} = 2.4\Omega$$



- (2) a,b 단자를 단락(short)하고 단락단자에 흐르는 노턴전류 I_N 을 구함
(중첩이론 이용)

- 전류원 제거 후 I'_N 를 구함

$$I'_N = \frac{E_1}{R_1} = \frac{7V}{4\Omega} = 1.75A$$

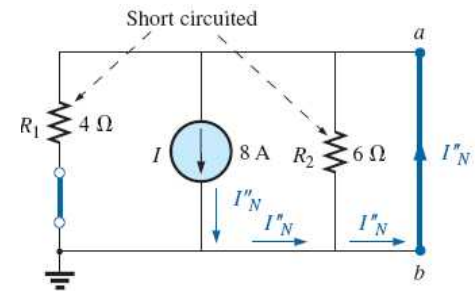


- 전압원 제거 후 I''_N 를 구함

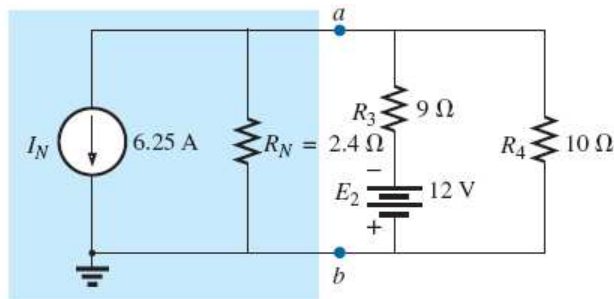
$$I''_N = I = 8A$$

- 중첩이론으로 노턴전류 구함

$$I_N = I''_N - I'_N = 8A - 1.75A = 6.25A$$

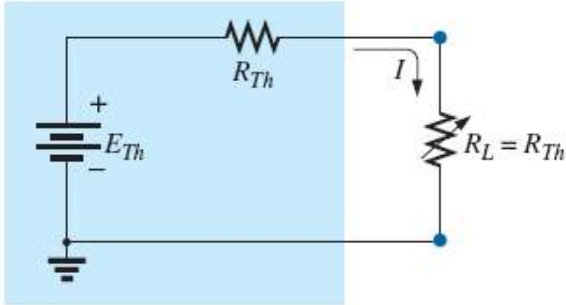


- (3) 노턴 등가회로로 변환된 결과회로



■ 최대전력전달이론 (Maximum power transfer theorem)

- 부하(load)에 전력이 최대로 전달되기 위해서는 테브닌등가저항 R_{Th} 과 부하저항 R_L 이 서로 같을 때이다.



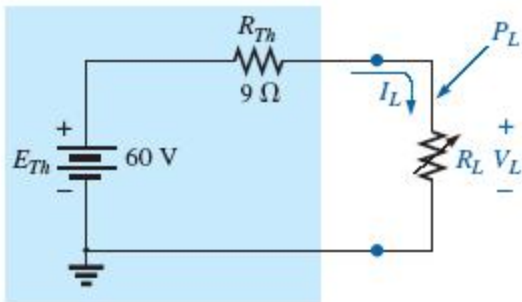
<테브닌등가회로와 부하저항>

$R_L = R_{Th}$ 일 때 부하에 최대전력이 전달된다

- 최대부하전력:

$$P_{L_{max}} = I_L^2 R_L = \left(\frac{E_{Th}}{2R_{Th}} \right)^2 (R_{Th}) = \frac{E_{Th}^2}{4R_{Th}}$$

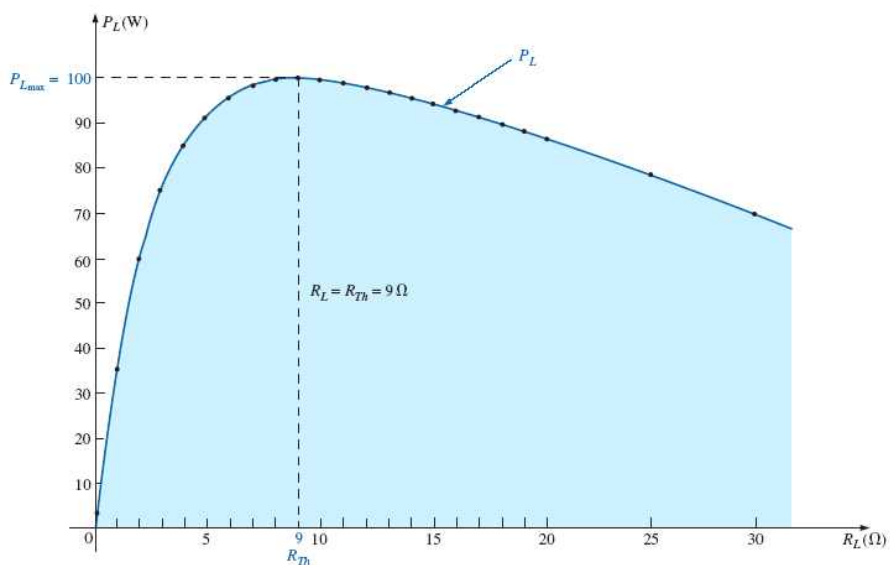
예) 부하저항 R_L 에 전달되는 최대전력은?



$$P_L = I_L^2 R_L = \left(\frac{60V}{9\Omega + R_L} \right)^2 (R_L) = \frac{3600R_L}{(9\Omega + R_L)^2}$$

- 최대전력 ($R_L = R_{Th} = 9\Omega$)

$$P_{L_{max}} = \frac{3600(9\Omega)}{(9\Omega + 9\Omega)^2} = 100W$$



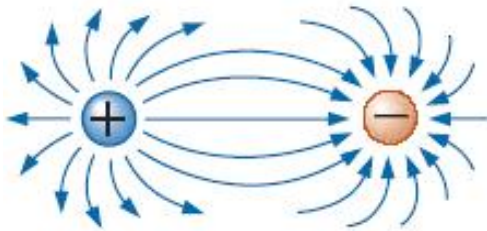
< R_L 에 따른 전력 그래프($R_L = R_{Th} = 9\Omega$ 일 때 최대전력)>

제 10장. 커패시터 (Capacitors)

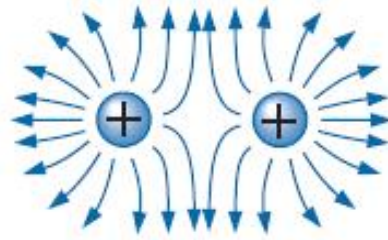
■ 전기장 (또는 전장) (electric field)

▪ 전기장

- 양(+)-전하와 음(-)-전하 사이에 전기적인 힘이 미치는 공간
- 동일한 전하사이에는 반발력이 작용하고, 다른 전하 사이에는 인력이 작용함
- 전기장은 전속선(electric flux lines)으로 표현
- 전속선은 양(+)-전하에서 음(-)-전하로 향함

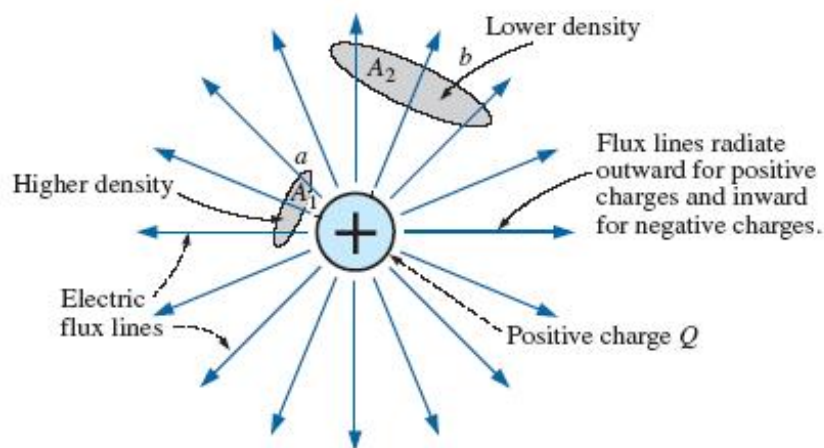


<다른 전하간의 전기장>



<동일 전하간의 전기장>

- 전기장은 임의의 영역 A를 통과하는 전속선의 개수가 많을수록 강함 (아래 그림에서 영역 a가 영역 b에서 보다 전속선의 밀도가 높으므로 전기장이 강함)



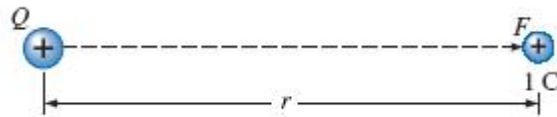
<양의 전하로부터 음의 전하로 향하는 전속선>

▪ 전기장세기(electric field strength)

- 전기장 내의 한 점에 단위전하 $q(+1C)$ 을 놓았을 때 그 전하가 받는 전기력의 크기

$$\mathcal{E} = \frac{F}{Q} \quad (\text{newtons/coulomb, N/C})$$

- 전하 Q 의 전자장 내에 놓인 단위 전하 $q(+1C)$ 가 받는 힘



<전하 Q 의 전자장 내에 놓인 단위 전하 $q(+1C)$ 가 받는 힘>

- 쿨롱법칙에 의해 힘 F 는

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = k \frac{Q(1C)}{r^2} = \frac{kQ}{r^2} \quad (k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)$$

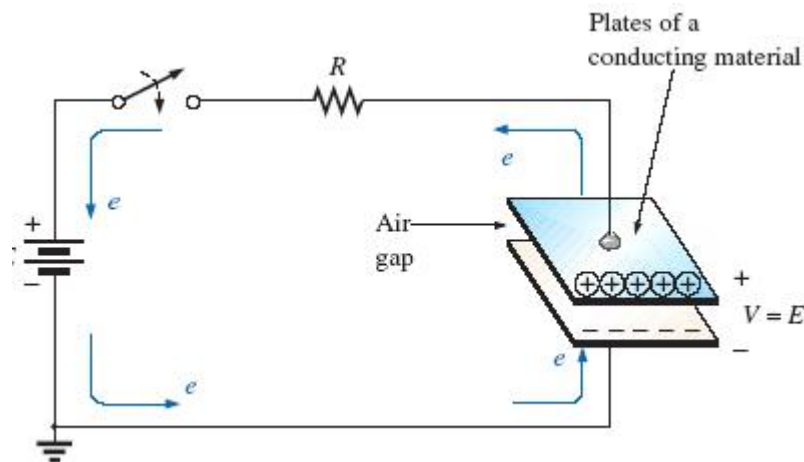
이므로 전기장세기는

$$\mathcal{E} = \frac{kQ}{r^2} \quad (\text{N/C})$$

로 표현할 수 있다.

■ 커패시턴스 (Capacitance)

- 커패시터(capacitor): 두 전도성 판 사이에 절연체(공기 등)가 놓인 소자



<기본 충전 회로>

- 커패시턴스(capacitance): 커패시터에 전하를 축적할 수 있는 능력
 - 커패시턴스가 클수록 동일한 전압에도 더 많은 전하를 축적할 수 있음
 - 커패시턴스 C 는 단위 전압 V 당 축적할 수 있는 전하 Q 임

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

$C = \text{farads (F)}$
 $Q = \text{coulombs (C)}$
 $V = \text{volts (V)}$

$$Q = CV$$

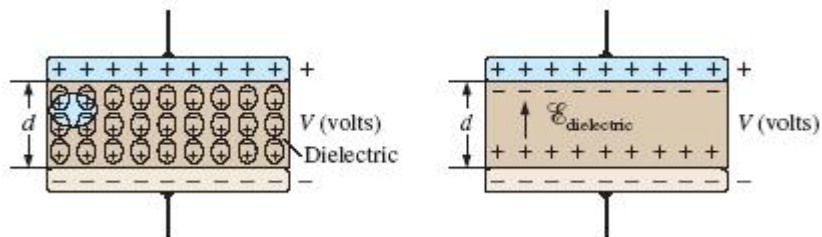
(coulombs, C)

- 전기장세기(電氣場)는 두 판 사이의 거리 d 에 반비례하고 인가전압 V 에 비례함

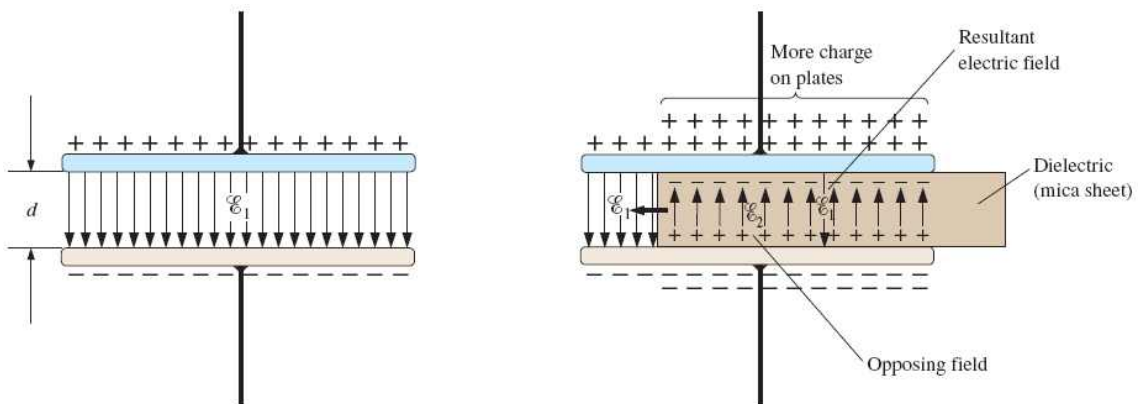
$$\mathcal{E} = \frac{V}{d}$$

$\mathcal{E} = \text{volts/m (V/m)}$
 $V = \text{volts (V)}$
 $d = \text{meters (m)}$

- 커패시터 두 판 사이 유전체(또는 절연체)(dielectric)의 영향
 - 유전체 쌍극(dipole)들이 판의 양단 전압 V 에 의해 일정히 배열
 - (-)전하(전자)는 위로 (+)전하(양성자)는 아래로 배열되어 분극(polarized)
 - 유전체 내의 전하 분극으로 인해 반대 방향의 전기장 $\mathcal{E}_{\text{dielectric}}$ 이 발생함



- 커패시터 판 사이에 유전체의 삽입효과
 - 공기에 비해 유전체가 삽입되면 유전체에 더 많은 전하가 축적됨



<판 사이가 공기>

<판 사이에 유전체 삽입>

- 상대 유전율 또는 비유전율 (relative permittivity)
 - 공기의 유전율 ϵ_0 에 따른 다른 유전체의 상대적 유전율

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (\text{dimensionless})$$

여기서, ϵ 는 유전체의 유전율

Relative permittivity (dielectric constant) ϵ_r of various dielectrics.

| Dielectric | ϵ_r (Average Values) |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| Vacuum | 1.0 |
| Air | 1.0006 |
| Teflon [®] | 2.0 |
| Paper, paraffined | 2.5 |
| Rubber | 3.0 |
| Polystyrene | 3.0 |
| Oil | 4.0 |
| Mica | 5.0 |
| Porcelain | 6.0 |
| Bakelite [®] | 7.0 |
| Aluminum oxide | 7 |
| Glass | 7.5 |
| Tantalum oxide | 30 |
| Ceramics | 20–7500 |
| Barium-strontium titanite (ceramic) | 7500.0 |

Dielectric strength of some dielectric materials.

| Dielectric | Dielectric Strength (Average Value) in Volts/Mil |
|-------------------------------------|--|
| Air | 75 |
| Barium-strontium titanite (ceramic) | 75 |
| Ceramics | 75–1000 |
| Porcelain | 200 |
| Oil | 400 |
| Bakelite [®] | 400 |
| Rubber | 700 |
| Paper paraffined | 1300 |
| Teflon [®] | 1500 |
| Glass | 3000 |
| Mica | 5000 |

■ 커패시터 (Capacitor)

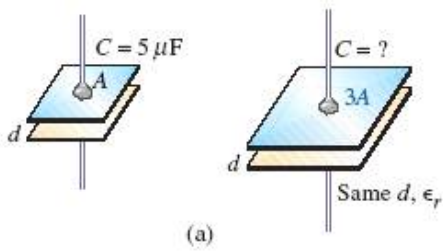
- 커패시터의 커패시턴스

- 커패시턴스는 판 면적이 클수록 유전율이 높을수록 거리가 적을수록 큼

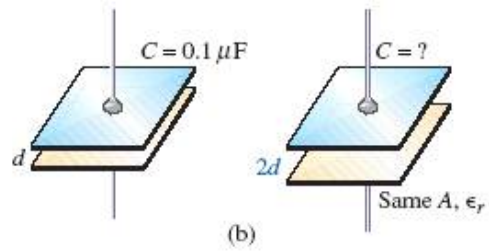
$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

$C = \text{farads (F)}$
 $\epsilon = \text{permittivity (F/m)}$
 $A = \text{m}^2$
 $d = \text{m}$

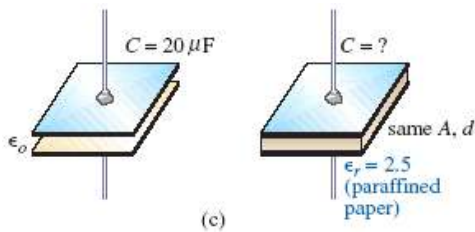
예제 10.2) 커패시턴스를 구하라.



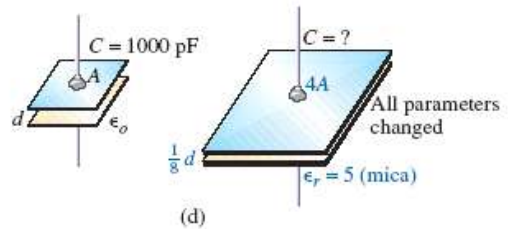
$$C = 3(C_o) = 3(5 \mu\text{F}) = 15 \mu\text{F}$$



$$C = \frac{1}{2}(0.1 \mu\text{F}) = 0.05 \mu\text{F}$$

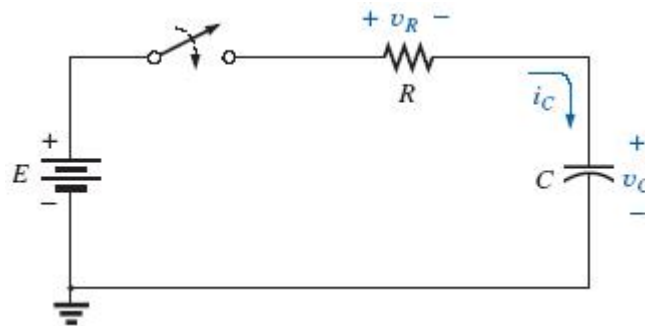


$$C = \epsilon_r C_o = 2.5(20 \mu\text{F}) = 50 \mu\text{F}$$



$$C = (5) \frac{4}{(1/8)} (C_o) = 160(1000 \text{ pF}) = 0.16 \mu\text{F}$$

■ 커패시터 회로의 과도(transients)상태 - 충전단계(charging phase)



<기본적 R-C 충전회로>

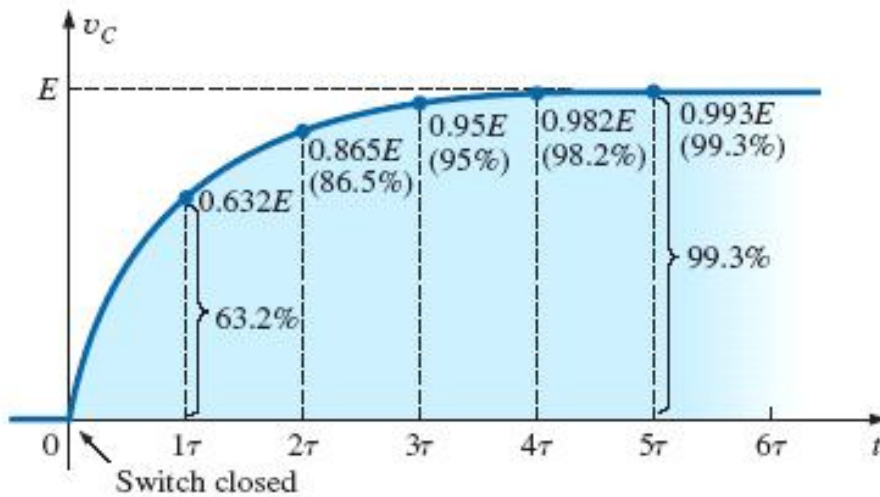
- 충전단계의 커패시터전압

$$v_C = E(1 - e^{-t/\tau}) \quad \text{charging} \quad (\text{volts, V})$$

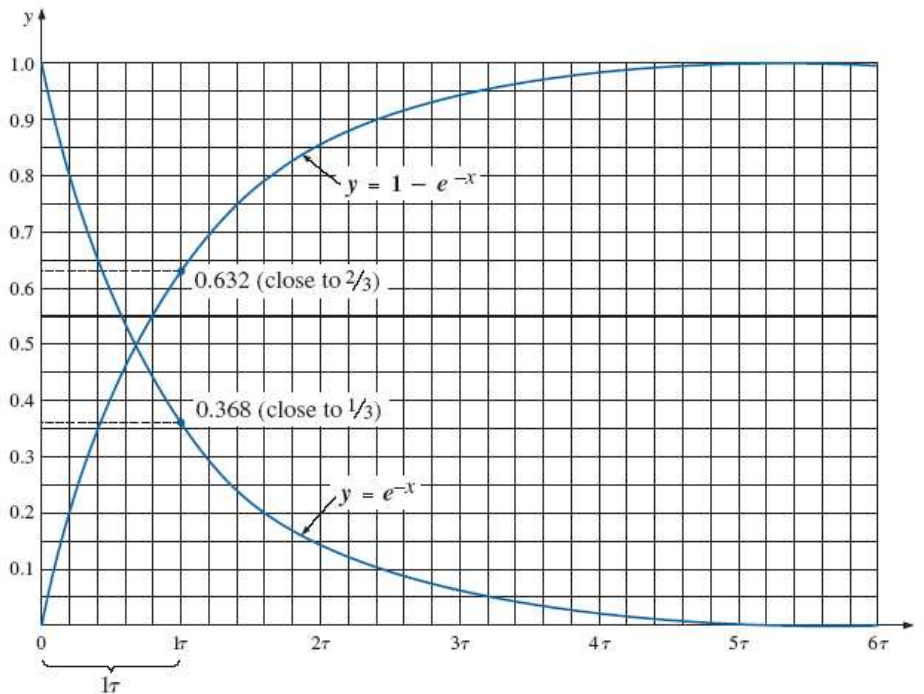
여기서, τ 는 시정수(time constant)이라 부름.

$$\tau = RC \quad (\text{time, s})$$

※ 커패시터전압 v_c 는 $t=5\tau$ 일 때 입력전압 E 까지 충전됨



<충전단계에서의 커패시터전압 변화>



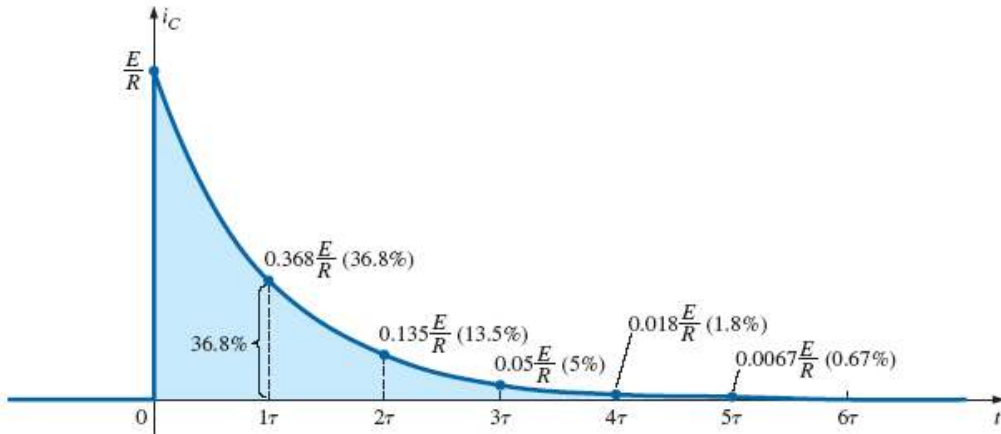
<시정수(time constant) 그래프>

- 충전단계의 커패시터전류

$$i_C = \frac{E}{R} e^{-t/\tau} \quad \text{(amperes, A)}$$

charging

여기서, τ 는 커패시터전압의 시정수와 동일함



<충전단계에서의 커패시터전류 변화>

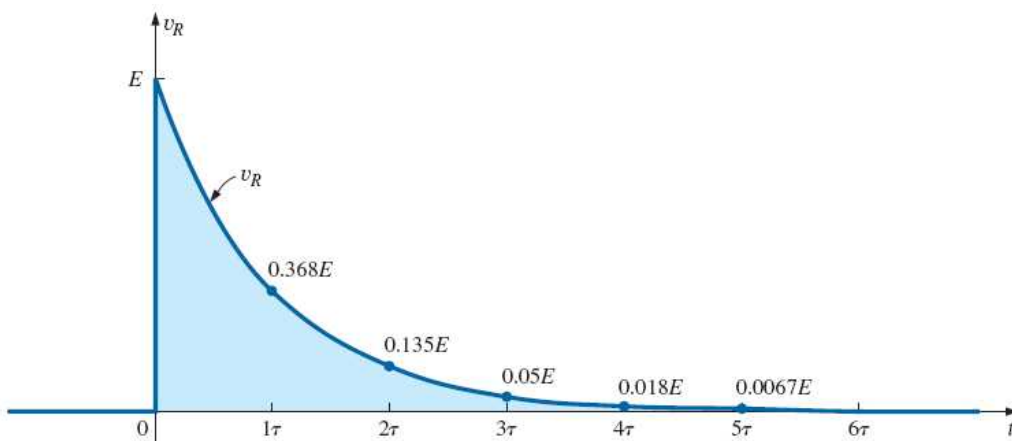
- 충전단계의 저항전압

$$v_R = E e^{-t/\tau} \quad \text{(volts, V)}$$

charging

$$(\because) v_R = i_R R = i_C R \Rightarrow v_R = \left(\frac{E}{R} e^{-t/\tau} \right) R = E e^{-t/\tau}$$

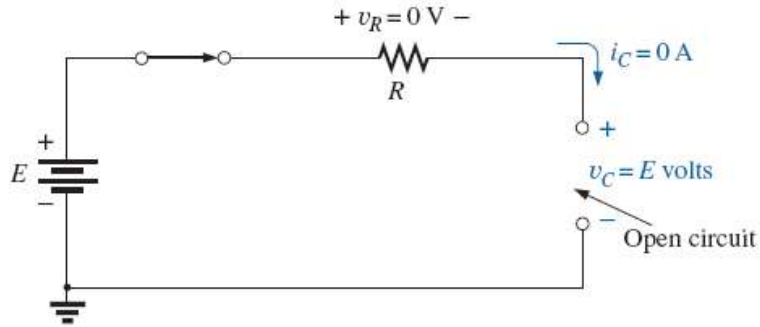
$$\text{또는 } v_R = E - v_c = E - E(1 - e^{-t/\tau}) = E e^{-t/\tau}$$



<충전단계에서의 저항전압 변화>

■ 커패시터 회로의 정상(steady)상태 - 충전완료단계

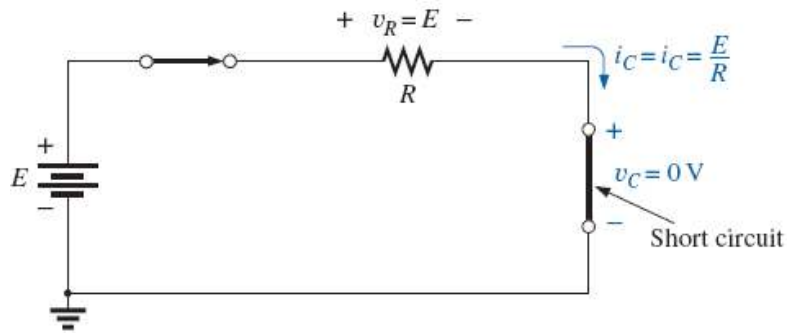
- 충전완료일 때($t > 5\tau$)의 회로는 커패시터가 개방상태와 같음
 $v_c = E [V], v_R = 0 [V], i_c = i_R = 0 [A]$



<충전완료일 때의 등가회로 (커패시터가 개방)>

■ 커패시터 회로의 초기 스위칭 시작단계

- 스위칭시작($t = 0$)일 때의 회로는 커패시터가 단락(short)상태와 같음
 $v_c = 0 [V], v_R = E [V], i_c = i_R = \frac{E}{R} [A]$



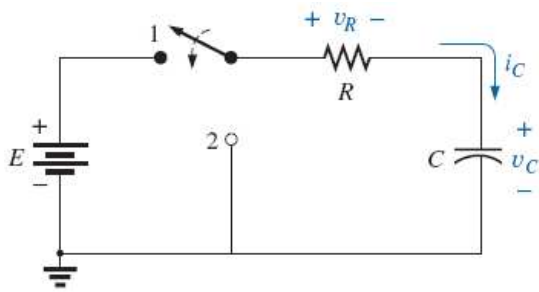
<충전 초기일 때의 등가회로 (커패시터가 단락)>

※ 커패시터 양단의 전압은 순간적으로 변할 수 없다.

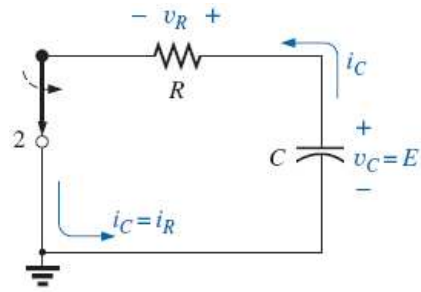
- 시정수의 단위는 시간이다.

$$\tau = RC = \left(\frac{V}{I}\right)\left(\frac{Q}{V}\right) = \left(\frac{V}{Q/t}\right)\left(\frac{Q}{V}\right) = t(\text{seconds})$$

■ 커패시터 회로의 과도(transients)상태 - 방전단계(discharging phase)



- 스위치 1번: 충전단계
- 스위치 2번: 방전단계



< 커패시터에 충전이 완료된 후 스위치 2번으로 전환된 방전단계의 회로도 >

- 방전시의 커패시터전압 변화

$$v_C = Ee^{-t/\tau} \text{ discharging}$$

여기서, 시정수 τ (충전시와 동일함)

$$\tau = RC \text{ discharging}$$

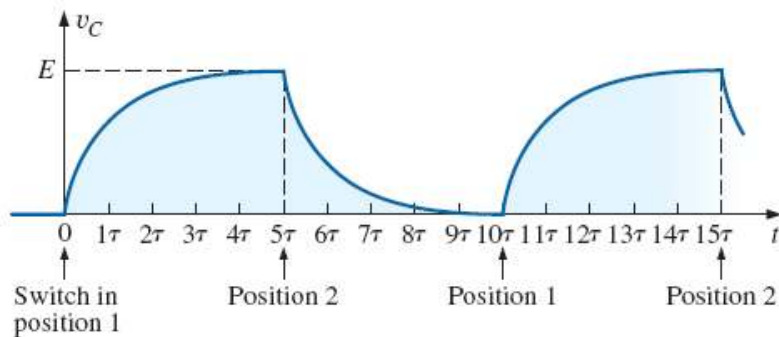
- 방전시의 커패시터전류

$$i_C = \frac{E}{R}e^{-t/\tau} \text{ discharging}$$

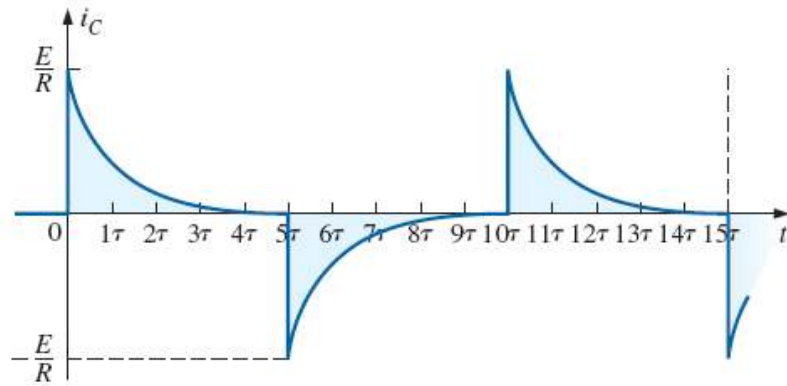
- 방전시의 저항전압

$$v_R = Ee^{-t/\tau} \text{ discharging}$$

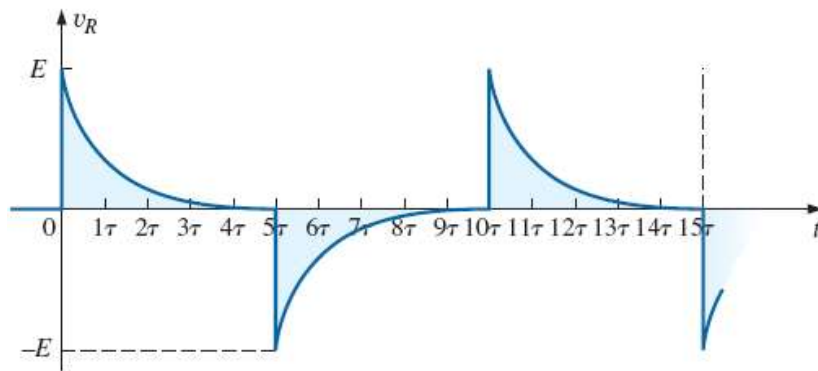
□ 스위칭을 5τ 시간 마다 1번과 2번으로 전환될 때의 파형



<커패시터전압 파형>



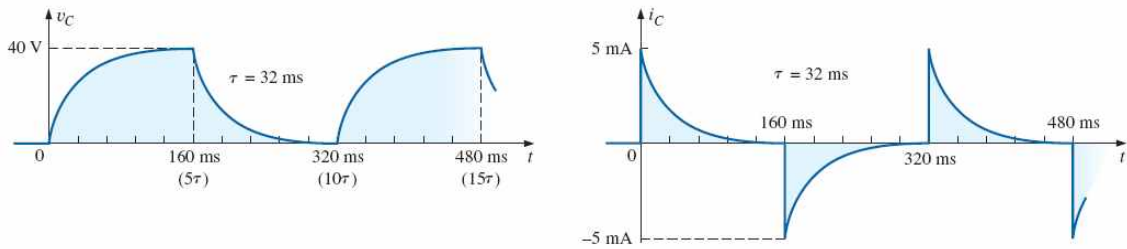
<커패시터전류 파형>



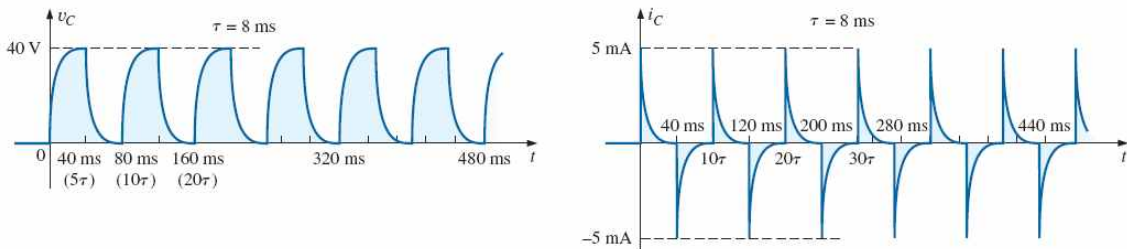
<저항전압 파형>

■ 시정수의 응답효과

- 시정수가 클수록(R과 C가 클수록) 충전시간이 길다. ($\tau = 32ms$ 일 때)

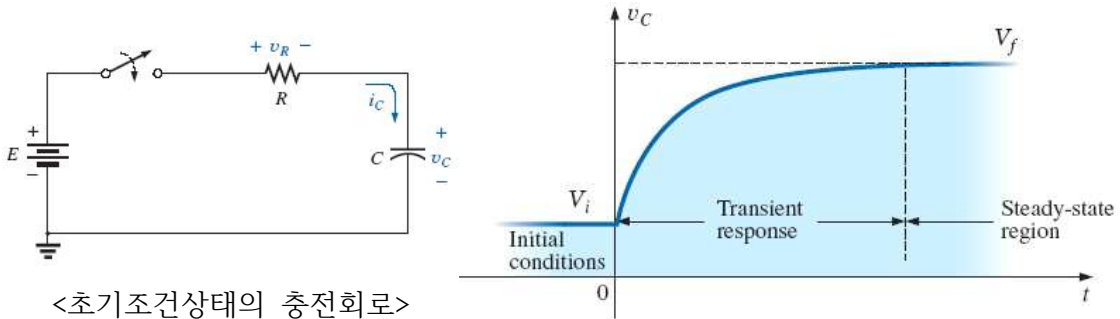


- 시정수가 짧을수록 충전시간이 짧다. ($\tau = 8ms$ 일 때)



■ 초기조건(Initial condition)

- 커패시터에 V_i 로 충전되어 있는 상태($v_c(0) = V_i$)에서 스위칭되었을 때



- 초기조건이 0일 때 커패시터전압:

$$v_c = E(1 - e^{-t/\tau}) = (V_f - V_i)(1 - e^{-t/\tau})$$

여기서 V_f 는 충전 최종(final)전압($V_f = E$), V_i 는 초기(initial)전압($V_i = 0V$)

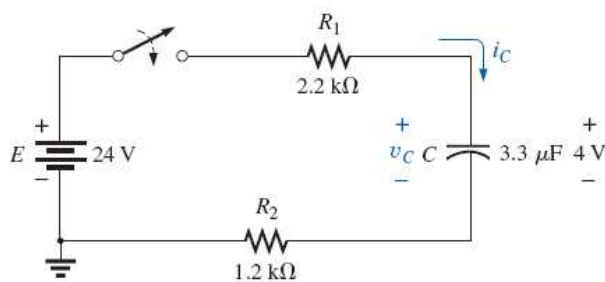
- 초기전압이 V_i 이 있을 경우($V_i \neq 0$)일 때 커패시터전압:

$$v_c = V_i + (V_f - V_i)(1 - e^{-t/\tau})$$

다르게 표현하면,

$$v_c = V_f + (V_i - V_f)e^{-t/\tau} \quad : \text{커패시터의 일반적 과도응답 방정식}$$

예제 10.10) 커패시터의 초기전압은 4V이다.

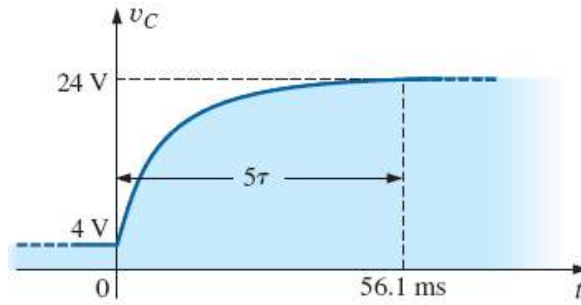


- a. 스위치와 닫힐 때 커패시터전압을 수식으로 표현하라.

$$\text{시정수 } \tau = (R_1 + R_2)C = (2.2k\Omega + 1.2k\Omega)(3.3\mu F) = 11.22ms$$

$$v_c = V_f + (V_i - V_f)e^{-t/\tau} = 24V + (4V - 24V)e^{-t/11.22ms}$$

$$\therefore v_c = 24V - 20Ve^{-t/11.22ms}$$

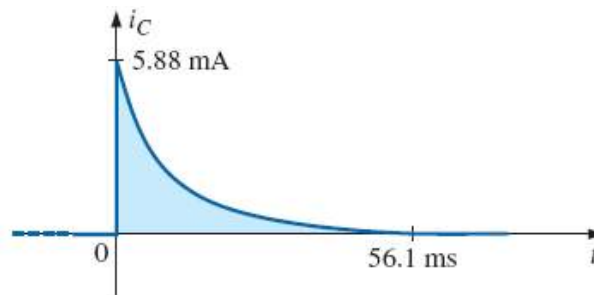


<커패시터 전압>

b. 과도기간(transient period)의 커패시터전류를 수식으로 표현하라.

$$t=0 \text{ 일 때 전류: } I_m = \frac{E - V_i}{R_1 + R_2} = \frac{24V - 4V}{2.2k\Omega + 1.2k\Omega} = 5.88mA$$

$$\text{커패시터전류: } i_c = (5.88mA) e^{-t/11.22ms}$$



■ 순간치 (Instantaneous value)

▪ 순간치: 특정 시간에서의 커패시터 전압 및 전류를 의미함

예) 커패시터전압이 $v_c = 20V(1 - e^{-t/2ms})$ 이면, $t = 5ms$ 일 때의 전압 순간치는?

$$v_c = 20V(1 - e^{-5ms/2ms}) = (20V)(1 - e^{-2.5}) = 18.36V$$

▪ 과도응답 방정식으로부터의 시간 관계식

$$v_c = V_f + (V_i - V_f)e^{-t/\tau} \text{ 으로부터}$$

$$t = \tau(\log_e) \frac{(V_i - V_f)}{(v_c - V_f)}$$

예) $v_c = 20V(1 - e^{-t/2ms})$ 일 때 10V에 도달하는 시간은?

$$t = \tau(\log_e) \frac{(V_i - V_f)}{(v_c - V_f)} = (2ms)(\log_e) \frac{(0V - 20V)}{(10V - 20V)} = 1.386ms$$

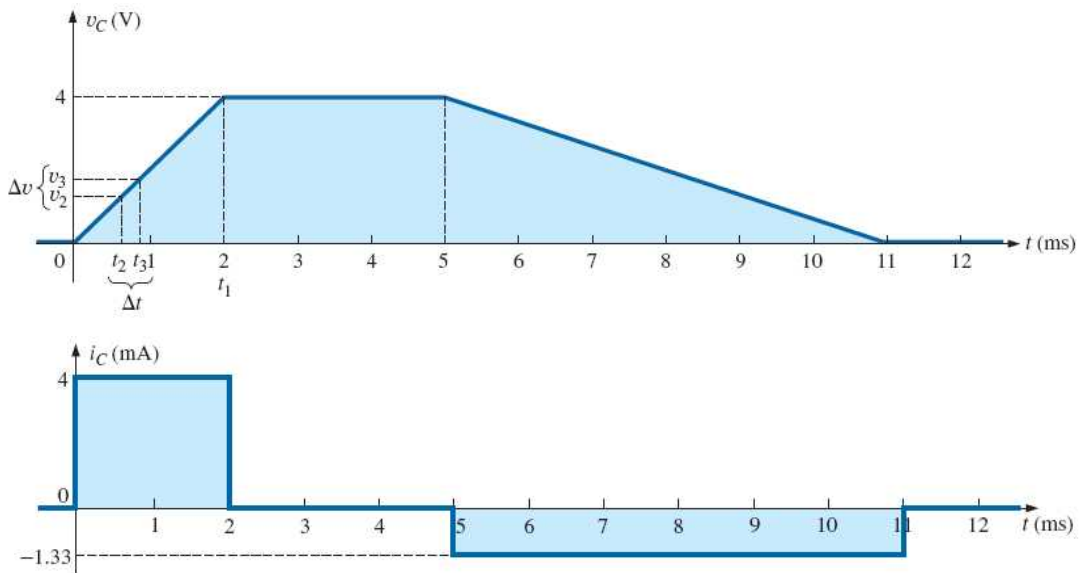
■ 커패시터 전류

- 커패시터 전류와 전압의 관계식

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt}$$

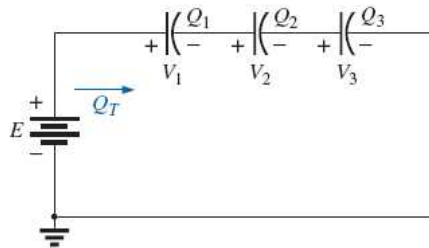
- 커패시터 전류 i_C 는 커패시터 전압 v_C 의 변화율에 비례한다.
(v_C 의 변화가 없으면 i_C 는 영이다)

예제 10.14) $2\mu F$ 의 커패시터 양단의 전압파형이 아래와 같을 때, 전류파형은?



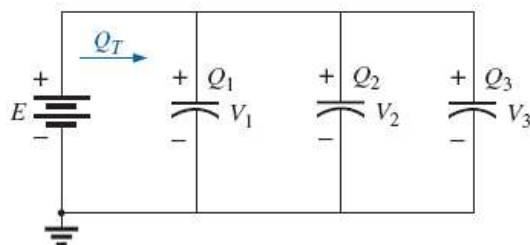
■ 직렬과 병렬의 커패시터

- 직렬 커패시터



$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

- 병렬 커패시터

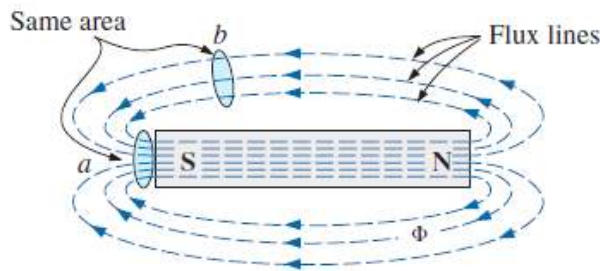


$$C_T = C_1 + C_2 + C_3$$

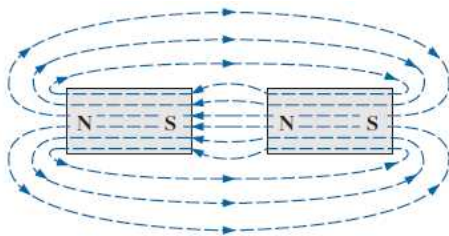
제 11장. 인덕터 (Inductors)

■ 자기장 (또는 자장) (magnetic field)

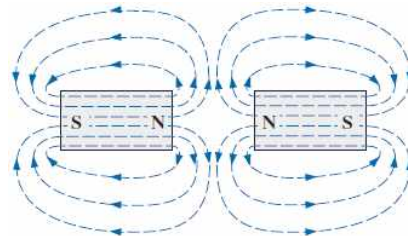
- 자기장
 - 자기장은 영구자석의 주위영역에서 발생하며, 자속선(electric flux lines)으로 표현
 - 자속선은 자석 N(north)극에서 S(south)극으로 향함
 - 지구는 큰 자석이며 자기장에 의해 나침판이 작용함



<영구자석의 자속선 분포>

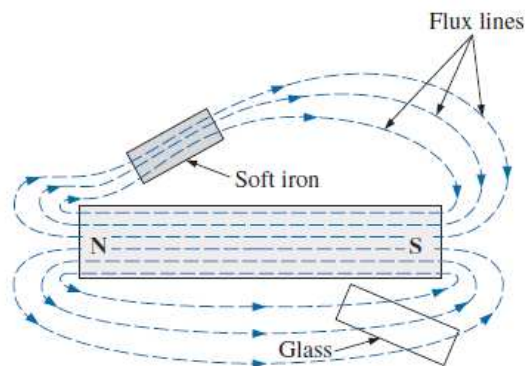


<다른 극성이 인접된 경우>

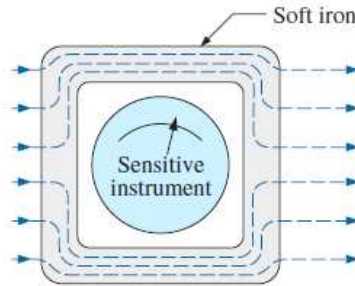


<동일 극성이 인접된 경우>

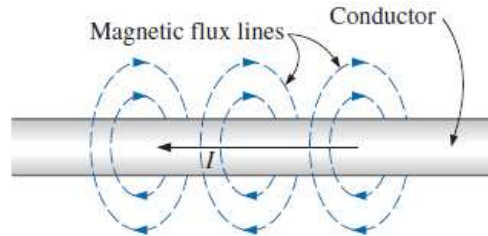
- 영구자석 주위에 유리 또는 구리와 같은 비자성체(nonmagnetic material) 물질이 위치하면 자속선의 분포는 영향이 없으나, 연철(soft iron)과 같은 자성체(nonmagnetic material)가 자속경로 내에 위치하면 자성체로 자속선이 더 많이 지나감



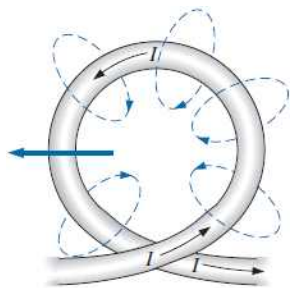
- 민감한 계측기(sensitive instrument) 주위에 자성체로 감싸면 외부자기장에 영향을 받지 않음. 즉, 자기차폐(magnetic shield)됨



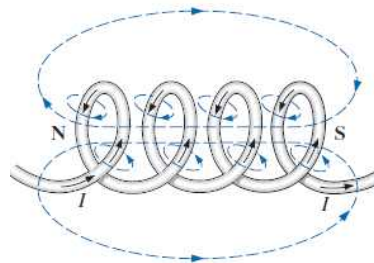
- 오른손법칙(right-hand rule): 도체에 흐르는 전류의 방향으로 오른손 엄지를 향하도록 감쌀 때 감싸는 손가락방향으로 자속선이 발생함



- 코일(coil)에 전류가 흐를 때 자속선의 나오는 방향이 N극이고 들어가는 방향이 S극임

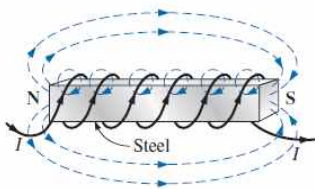


<단일 권회전 코일의 자속선분포>

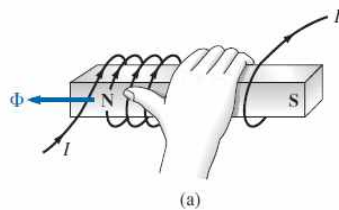


<코일의 자속선분포>

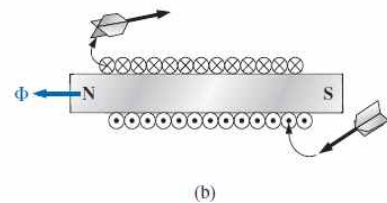
- 코일 내에 금속을 넣고 전류를 인가하면 금속은 자속선이 나가는 방향으로 N극, 들어가는 방향으로 S극의 전자석(electromagnet)이 됨



<전자석>



<전자석의 자속방향 판단방법>

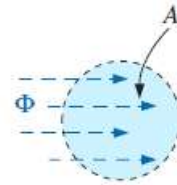


▪ 자속밀도(magnetic flux density)

- 자기장의 강도는 자속선의 밀도(자속밀도)가 높을수록 강함
- 자속밀도 B 는 단위면적당 지나는 자속선의 개수임
 Φ 은 면적 A 을 지나는 자속선의 개수임 (단위는 Wb(weber)임)

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

$B = \text{Wb/m}^2 = \text{teslas (T)}$
 $\Phi = \text{webers (Wb)}$
 $A = \text{m}^2$



- 자속밀도 B 의 단위를 테슬라라고도 함

$$1 \text{ tesla} = 1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$$

▪ 기자력(magnetomotive force)

- 전자석의 자속밀도는 코일의 권선수 N 와 코일에 흐르는 전류 I 에 비례함
- 기자력은 코일의 권선수와 전류의 곱임

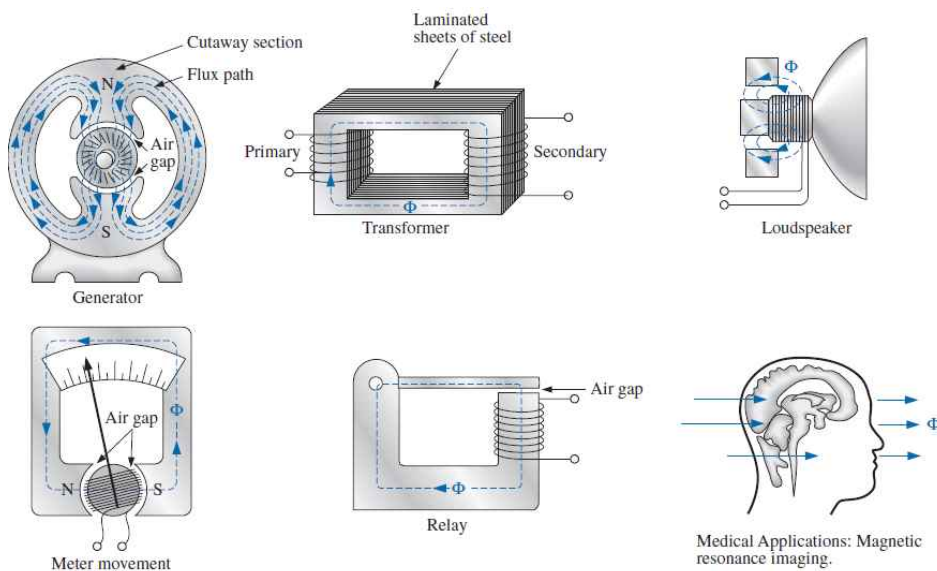
$$\mathcal{F} = NI \quad (\text{ampere-turns, At})$$

▪ 비투자율(relative permeability)

- 자유공간의 투자율 μ_0 에 대한 상대적인 투자율

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

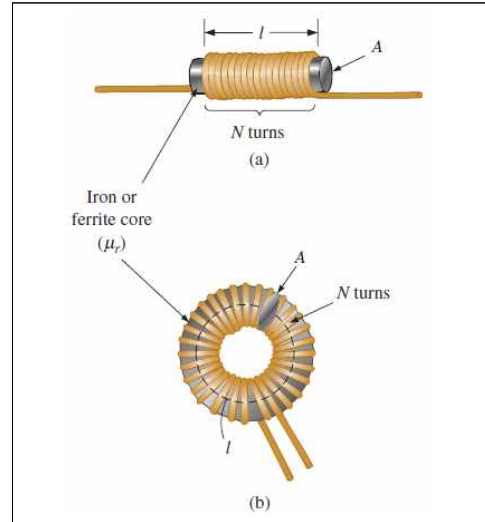
- 강자성체(ferromagnetic material)의 비투자율은 $\mu_r \geq 100$ (비자성체는 1)



<자기효과의 응용 예>

■ 인덕터(Inductor)와 인덕턴스(Inductance)

- 인덕터(inductor)
 - 코일 사이에 투자율이 높은 물질이 삽입되어 있는 소자
 - 강한 자기장을 형성하도록 설계되었음
 - 반면에 커패시터는 두 전도판 사이에 강한 전장을 형성하도록 설계됨



- 인덕턴스(inductance)

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l}$$

μ = permeability (Wb/A · m)

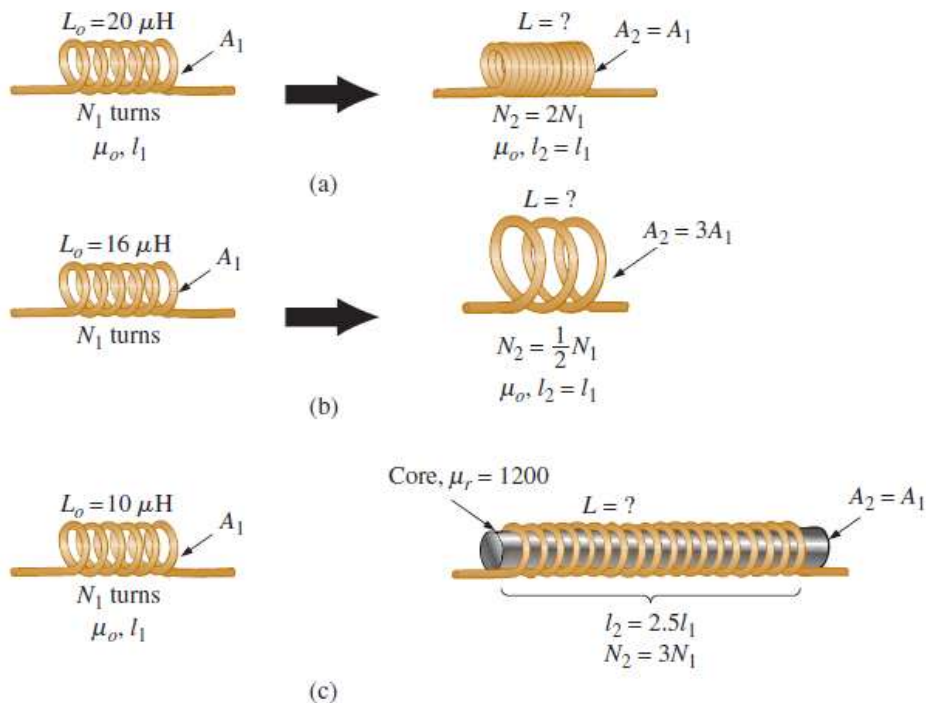
N = number of turns (t)

A = m²

l = m

L = henries (H)

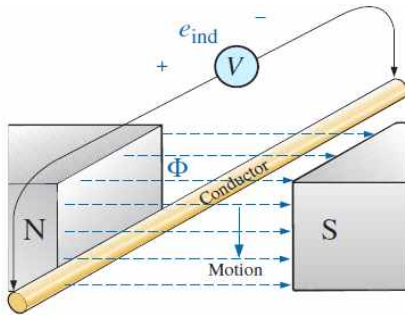
예제 11.2) N, l, A 및 μ 의 변화에 따른 인덕턴스 L 의 변화



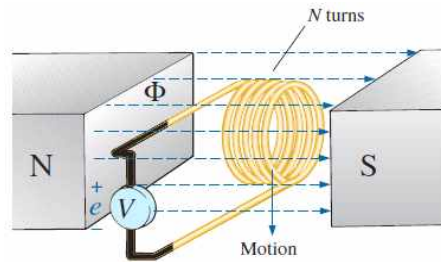
■ 인덕터(코일)전압 v_L

- Faraday 법칙
 - 권선수가 N 인 코일이 자기장을 통해 이동할 때 코일 양단에 유기되는 전압 e 는 코일 권선수 N 과 자속의 변화율 $d\phi/dt$ 의 곱과 같음

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{volts, V})$$



<자기장 내 도체이동에 의해 유기된 전압>



<Faraday 법칙>

- 코일의 인덕턴스(inductance)
 - 인덕턴스는 코일의 전류변화에 의한 자속의 변화율과 코일의 권선수 N 의 곱임

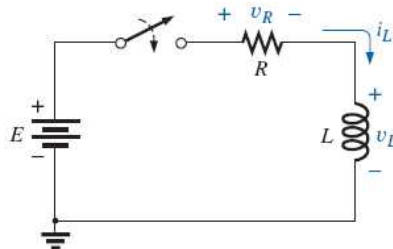
$$L = N \frac{d\phi}{di_L} \quad (\text{henries, H})$$

- 코일 양단에 유기되는 전압

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = \left(N \frac{d\phi}{di_L} \right) \left(\frac{di_L}{dt} \right) \quad \text{이므로} \quad v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{volts, V})$$

- 인덕턴스가 클수록 그리고/또는 코일에 흐르는 전류의 변화가 클수록 코일의 양단에 유기되는 전압은 커짐

■ R-L회로의 과도상태: 저장(storage)단계



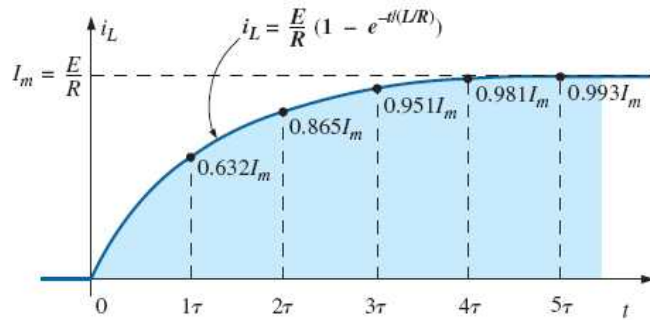
<기본적 R-L 과도회로>

- 과도상태의 코일전류 (초기전류는 0, 최종전류는 E/R)

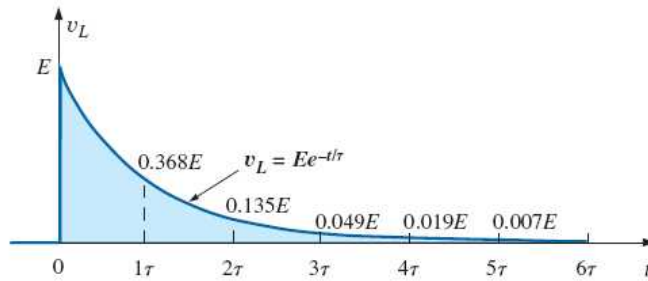
$$i_L = \frac{E}{R}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (\text{amperes, A})$$

여기서, R-L 시정수(time constant)

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (\text{seconds, s})$$

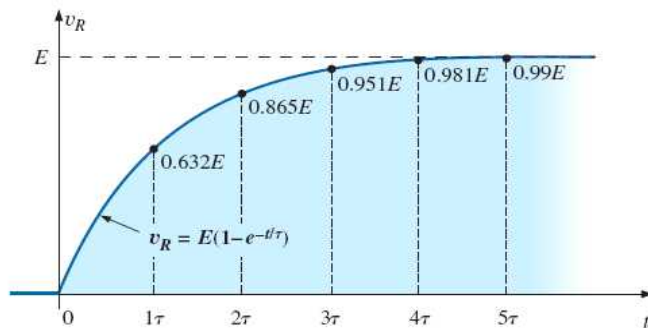


- 과도상태의 코일전압 (초기전압은 E , 최종전압은 0)



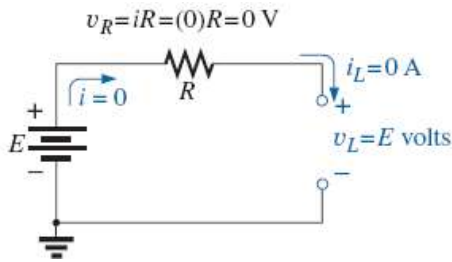
- 과도상태의 저항전압

$$v_R = E - v_L = E - Ee^{-t/\tau} = E(1 - e^{-t/\tau})$$



■ **R-L회로의 초기(initial)상태**

- 스위치가 닫히기 시작하는 초기($t=0$)일 때의 회로는 코일이 개방상태와 같음
- ※ 코일의 전류는 순간적으로 변할 수 없음(연속이어야 함)



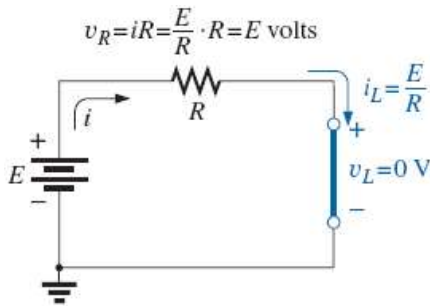
$$v_L = E [V]$$

$$v_R = 0 [V]$$

$$i_L = 0 [A]$$

■ **R-L회로의 정상(steady)상태 : 저장(storage)단계**

- 정상상태일 때($t > 5\tau$)의 회로는 코일은 단락(short)상태와 같음

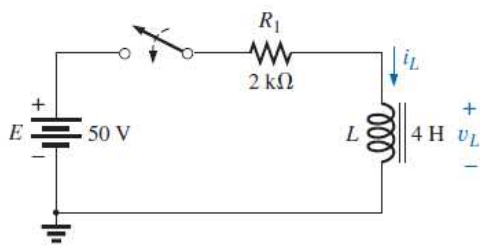


$$v_L = 0 [V]$$

$$v_R = E [V]$$

$$i_L = \frac{E}{R} [A]$$

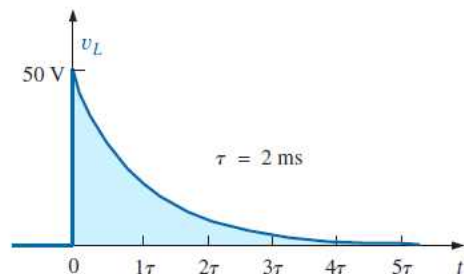
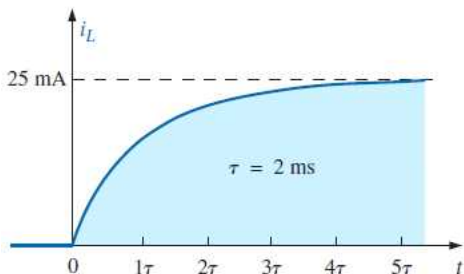
예제 11.3) $t=0$ 에서 스위치가 닫혔을 때, i_L 과 v_L 의 과도응답을 구하라.



$$\tau = \frac{L}{R_1} = \frac{4H}{2k\Omega} = 2ms$$

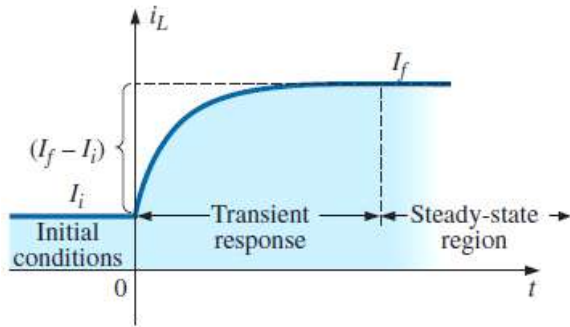
$$i_L = \frac{E}{R_1} (1 - e^{-t/\tau}) = 25mA (1 - e^{-t/2ms})$$

$$v_L = 50V e^{-t/2ms}$$



■ 초기조건(Initial conditions)

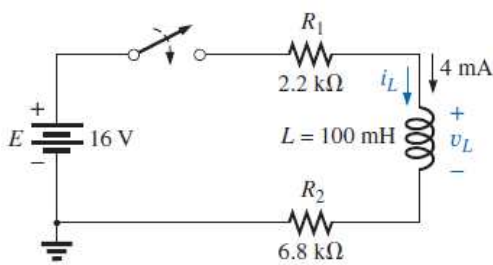
- 코일의 전류는 순간적으로 변할 수 없으므로, 스위칭이 되기 이전의 초기 전류와 연속해서 과도응답이 발생함



$$i_L = I_i + (I_f - I_i)(1 - e^{-t/\tau})$$

$$i_L = I_f + (I_i - I_f)e^{-t/\tau}$$

예제 11.4) 초기 코일전류 $I_i (= i_L(0))$ 가 $4mA$ 에서 스위치가 닫혔을 때, i_L 과 v_L 의 과도응답을 구하라.



$$\tau = \frac{L}{R_1 + R_2} = \frac{100mH}{2.2k\Omega + 6.8k\Omega} = 11.11\mu s$$

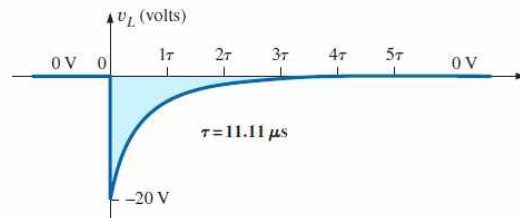
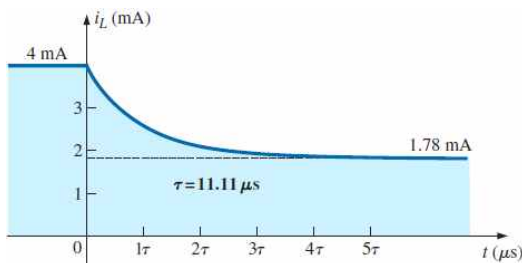
$$I_f = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{16V}{2.2k\Omega + 6.8k\Omega} = 1.78mA$$

$$i_L = I_f + (I_i - I_f)e^{-t/\tau} = 1.78mA + 2.22mA e^{-t/11.11\mu s}$$

$t=0$ 일 때 전류는 $4mA$ 이므로 초기전압은

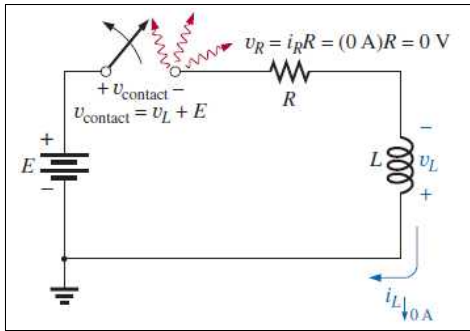
$$V_m = E - V_{R_1} - V_{R_2} = 16V - (4mA)(2.2k\Omega) - (4mA)(6.8k\Omega) = -20V$$

이며, 코일전류는 $v_L = -20V e^{-t/11.11\mu s}$ 임



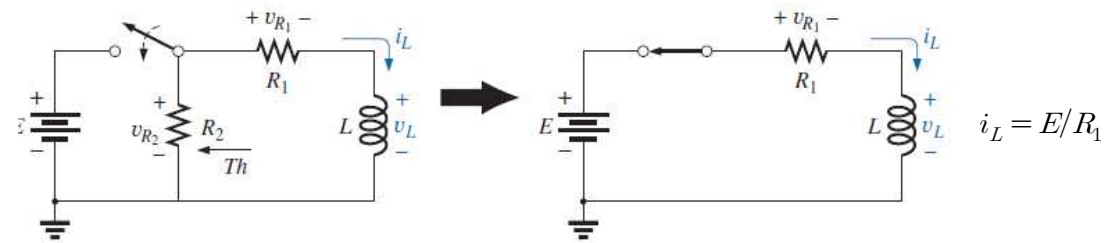
■ R-L 과도응답 : 방출(release)단계

- 정상상태의 전류가 흐르고 있는 상태에서 스위치를 개방하면 스위치에 스파크(spark)가 발생함

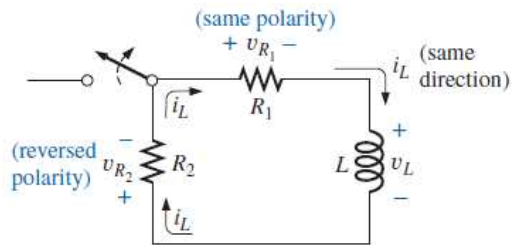


정상상태 코일전류 $i_L = E/R$ 이 흐르고 있는 상태에서 스위치가 개방되면, $i_L = 0A$ 가 되어 전류의 변화율 di/dt 이 커져 $v_L = L(di/dt)$ 이 매우 커짐. 스위치양단전압 $v_{contact} = v_L + E$ 이므로 이 또한 매우 높은 전압이 되어 스파크가 발생함

1) 스위치가 닫히는 초기의 인덕터 저장단계



2) 저장단계가 지나 정상상태가 된 후 스위치가 개방되었을 때 (방출단계)



정상상태 코일전류 $i_L = E/R_1$ 은 동일방향으로 R_1 과 R_2 를 통해 흐름

- 스위치 개방 이후의 초기 코일전압
 - 스위칭 이전의 정상상태 전류는 $i_L = I_m = E/R_1$ 이므로 스위칭 이후의 초기 코일전압은 다음과 같음 (코일의 전류는 변화가 없음)

$$v_L = -(v_{R_1} + v_{R_2}) = -i_L(R_1 + R_2) = -I_m(R_1 + R_2) = -\frac{E}{R_1}(R_1 + R_2) \Rightarrow v_L = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)E \quad \text{switch opened}$$

- 방출단계의 코일전압 (초기전압 V_i 에서 0으로 지수적 감소)

$$v_L = -V_i e^{-t/\tau'} \quad \text{여기서 } V_i = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)E, \quad \tau' = \frac{L}{R_T} = \frac{L}{R_1 + R_2}$$

- 방출단계의 코일전류 (초기전류 $I_i = E/R_1$ 에서 0으로 지수적 감소)

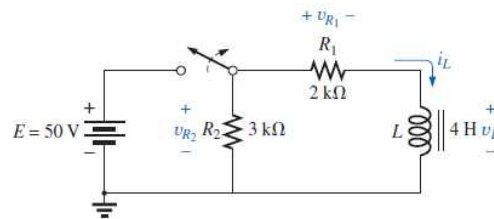
$$i_L = \frac{E}{R_1} e^{-t/\tau'} \quad \text{여기서} \quad \tau' = \frac{L}{R_T} = \frac{L}{R_1 + R_2}$$

- 방출단계의 저항 R_1 과 R_2 의 전압

$$v_{R_1} = i_{R_1} R_1 = i_L R_1 = \frac{E}{R_1} R_1 e^{-t/\tau'} \Rightarrow v_{R_1} = E e^{-t/\tau'}$$

$$v_{R_2} = i_{R_2} R_2 = i_L R_2 = \frac{E}{R_1} R_2 e^{-t/\tau'} \Rightarrow v_{R_2} = -\frac{R_2}{R_1} E e^{-t/\tau'}$$

예제 11.5) 다음 회로에서 저장단계와 방출단계의 전압과 전류를 구하라.



<저장단계>

$$(\tau = L/R_1 = 4H/2k\Omega = 2ms)$$

$$v_L = 50 V e^{-t/2ms}$$

$$i_L = 25mA(1 - e^{-t/2ms})$$

$$v_{R_1} = E(1 - e^{-t/\tau}) = 50 V(1 - e^{-t/2ms})$$

$$v_{R_2} = E = 50 V$$

<방출단계>

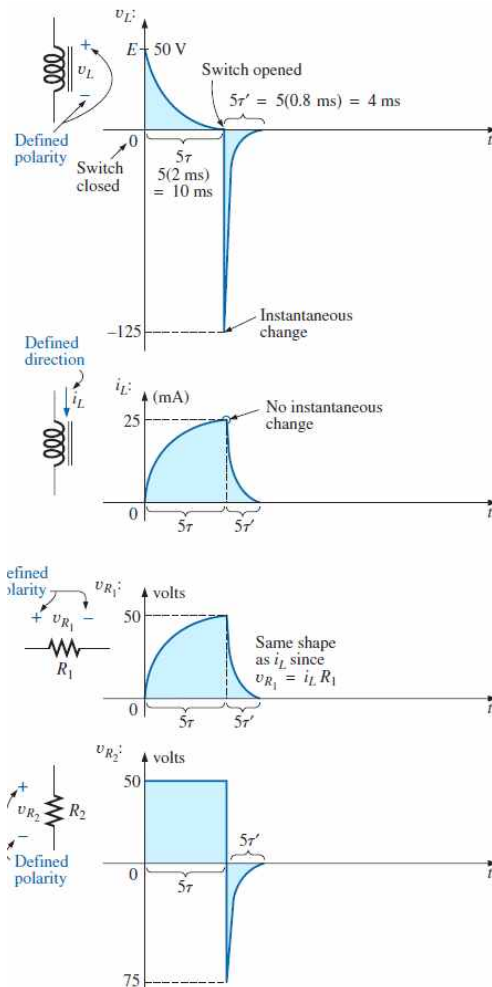
$$(\tau' = \frac{L}{R_1 + R_2} = \frac{4H}{2k\Omega + 3k\Omega} = 0.8ms)$$

$$v_L = -V_i e^{-t/0.8ms} = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) E e^{-t/0.8ms} = -125 V e^{-t/0.8ms}$$

$$i_L = \frac{E}{R_1} e^{-t/2ms} = 25mA e^{-t/2ms}$$

$$v_{R_1} = E e^{-t/\tau} = 50 V e^{-t/0.8ms}$$

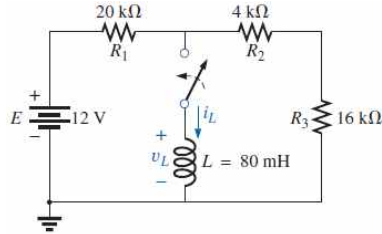
$$v_{R_2} = -\frac{R_2}{R_1} E e^{-t/\tau} = -75 V e^{-t/0.8ms}$$



■ 테브닌등가: $\tau = L/R_{Th}$

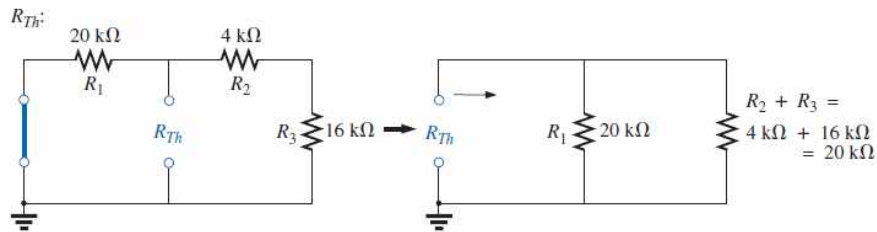
- R-L회로에서 코일 L 에 대한 시정수의 저항은 테브닌저항 R_{Th} 임

예제 11.6) 코일 L 에 대한 테브닌등가회로를 구한 후 과도응답을 구하라.

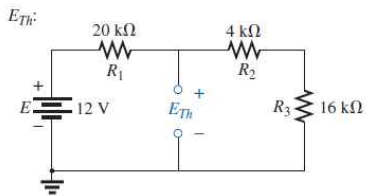


(초기전류는 $I_i = 0mA$ 임)

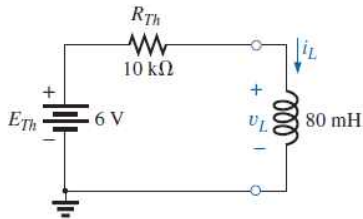
- 코일 L 의 테브닌등가저항 R_{Th} : 전압원 단락(전류원은 개방)한 후 L 에 서 본 저항임 ($R_{Th} = 10k\Omega$)



- 코일 L 의 테브닌등가전압 E_{Th} : 개방한 L 양단의 전압 ($R_{Th} = 10k\Omega$)



$$E_{Th} = \frac{(R_2 + R_3)E}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{(20k\Omega)(12V)}{40k\Omega} = 6V$$



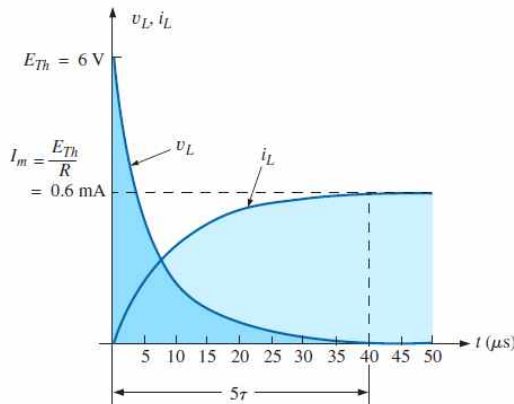
<테브닌 등가회로>

$$i_L = \frac{E_{Th}}{R}(1 - e^{-t/\tau})$$

$$\tau = \frac{L}{R_{Th}} = \frac{80 \times 10^{-3} \text{ H}}{10 \times 10^3 \Omega} = 8 \times 10^{-6} \text{ s} = 8 \mu\text{s}$$

$$I_m = \frac{E_{Th}}{R_{Th}} = \frac{6V}{10 \times 10^3 \Omega} = 0.6 \times 10^{-3} \text{ A} = 0.6 \text{ mA}$$

and $i_L = 0.6 \text{ mA} (1 - e^{-t/8\mu\text{s}})$



<인덕터 전류와 전압의 결과파형>

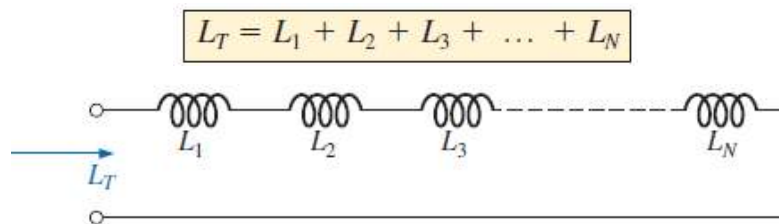
■ 순간값 (Instantaneous value)

- 인덕터전류식 $i_L = I_f + (I_i - I_f)e^{-t/\tau}$ 으로부터 초기전류 I_i 에서 i_L 까지 소요되는 시간:

$$t = \tau \log_e \frac{(I_i - I_f)}{(i_L - I_f)} \quad (\text{seconds, s})$$

■ 직렬과 병렬의 인덕터

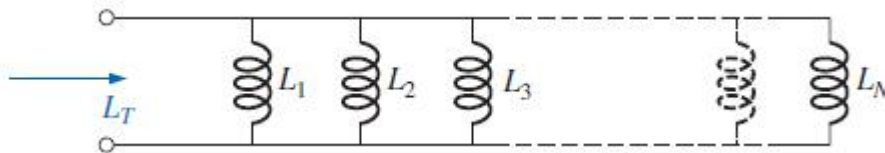
- 직렬연결된 코일들의 전체 인덕턴스는 각 인덕턴스의 합과 같음



- 병렬연결된 코일들의 전체 인덕턴스

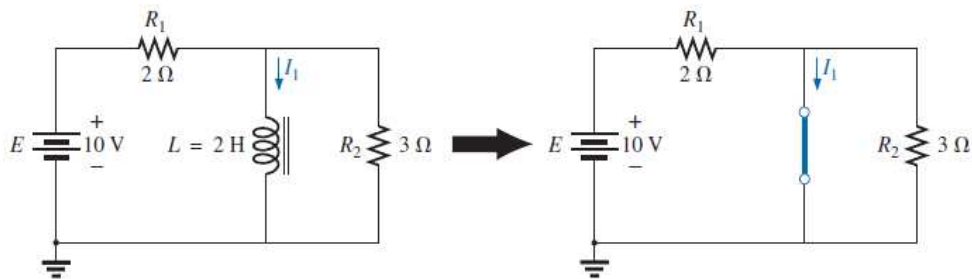
$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_N}$$

2개의 코일이 병렬일 때 : $L_T = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$



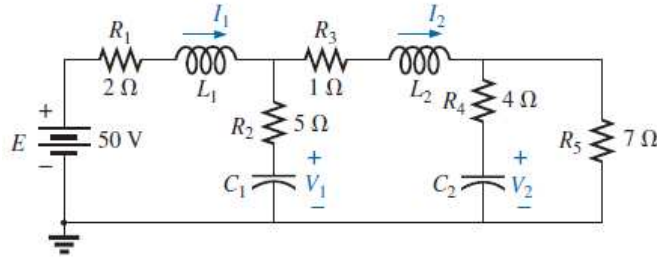
■ 정상상태 조건

- 인덕터는 정상상태일 때 회로에서 단락(short)상태와 같음
- 커패시터는 정상상태일 때 회로에서 개방(open)상태와 같음

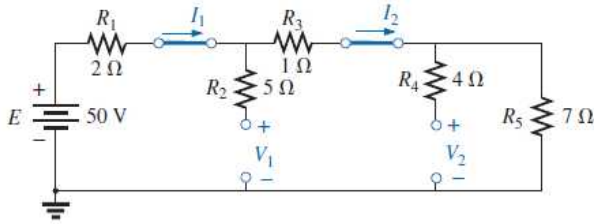


→ 정상상태일 때 코일전류 I_1 은 단락되었을 때의 전류 $10V/2\Omega = 5A$ 임

예제 11.11) 정상상태에서의 코일전류와 커패시터전압을 구하라.



- 정상상태에서는 코일은 단락되고 커패시터는 개방된 것과 같음



$$I_1 = I_2 = \frac{50V}{2\Omega + 1\Omega + 7\Omega} = 5A$$

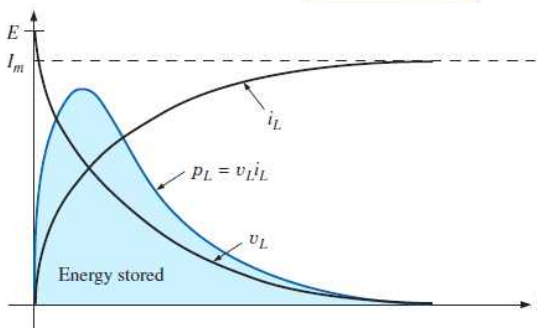
$$V_2 = (5A)(7\Omega) = 35V$$

$$V_1 = \frac{(1\Omega + 7\Omega)(50V)}{2\Omega + 1\Omega + 7\Omega} = 40V$$

■ 인덕터에 저장된 에너지(stored energy)

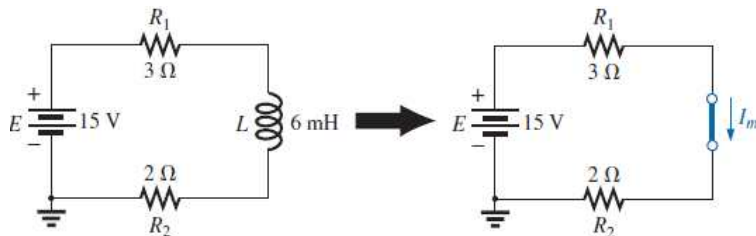
- 인덕터의 전력은 $p_L = v_L i_L$ 이며, 저장된 에너지는 전력을 적분한 것임.
- 그림에서 음영을 가진 영역의 면적이 저장된 에너지임

$$W_{\text{stored}} = \frac{1}{2} L I_m^2 \quad (\text{joules, J})$$



<인덕터 과도상태의 전력곡선>

예제 11.12) 인덕터에 저장된 에너지를 구하라.



$$I_m = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{5V}{3\Omega + 2\Omega} = 3A$$

$$W_{\text{stored}} = \frac{1}{2} L I_m^2 = \frac{1}{2} (6 \times 10^{-3} H)(3A)^2 = 27mJ$$