

제1장 기초 전기회로

1.1 전기회로의 기본요소

◎ 전류, 전압 및 저항

• 전하(Electric Charge)

- 물질을 형성하는 가장 작은 입자, 즉 모든 물질의 기본 구성단위
 - ⇒ 원자(atom) = 원자핵(atomic nucleus) + 전자(electron)
 - ⇒ 원자핵 = 양성자(proton) + 중성자(neutron)
 - ⇒ 중성상태에서 전자(-)의 수 = 양성자(+)의 수

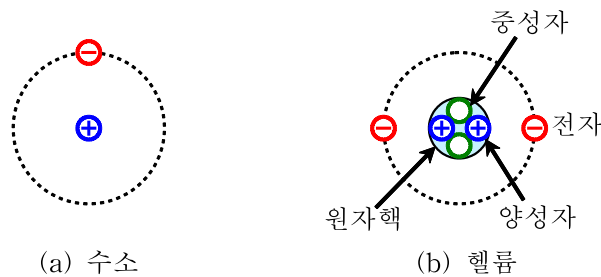


그림 1.1 보어(Bohr)의 원자 모델

- 원자핵 주위를 돌고 있는 전자들 중에서 가장 바깥쪽 궤도의 전자
 - ⇒ 최외각 전자(valence band electron)
- 최외각 전자들은 원자핵과의 결합력이 약하여 에너지를 받으면 궤도를 이탈
 - ⇒ 자유전자(free electron)
- 원자핵에 가까운 전자들은 원자핵과의 결합력이 강하여 궤도에서 이탈 불가
 - ⇒ 구속전자(bound electron)
- 중성상태의 물질이 전자를 얻거나 잃어서 전기적 성질을 띠게 되는 현상
 - ⇒ 대전(electrification) 또는 이온화(ionization)
- 대전에 의해서 대전체가 가지고 있는 양(+) 또는 음(-)의 전기입자
 - ⇒ 전하(electric charge), 쿨롱(coulomb, C)
 - ⇒ 전자의 전하량 $e = -1.6 \times 10^{-16} [C]$, $1[C] = 6.25 \times 10^{18} [\text{개}]$
- 중성상태의 원자가 전자를 잃고 양(+)으로 대전되었을 때 대전된 원자
 - ⇒ 양이온(positive ion), 양성자수 > 전자수
- 중성상태의 원자가 전자를 얻어 음(-)으로 대전되었을 때 대전된 원자
 - ⇒ 음이온(negative ion), 전자수 > 양성자수

• 전류(Current)

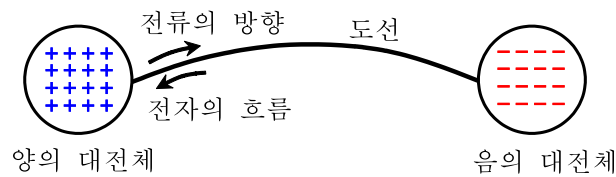


그림 1.2 전자의 흐름과 전류의 방향

- 양으로 대전된 물체와 음으로 대전된 물체를 도체로 연결한 경우
 - ⇒ 양전하가 양의 대전체로부터 음의 대전체로 이동
 - ⇒ 전류(current)
- t 초 동안에 $Q[C]$ 의 전하가 단위면적을 통과했을 때의 전류의 양
 - ⇒ 전류의 세기 I , 암페어(Ampere, A)

$$I = \frac{Q}{t} [C/s = A] \quad (1.1)$$

- 1A는 1초(sec) 동안에 1C의 전하가 단위면적($1m^2$)을 통과했을 때의 전류량

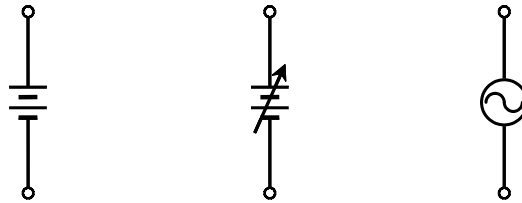
• 전압(Voltage)

- 도체내의 전하분포에 따른 임의의 지점에서의 전기적인 위치에너지가 존재
 - ⇒ 전위(electric potential) V , 볼트(volt, V)
- 전하 $Q[C]$ 이 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동하면서 잃는 에너지 $W[J]$
 - ⇒ 도체내의 두 지점간의 전기적인 위치에너지의 차이를 표시
 - ⇒ 전위차 또는 전압(voltage), 볼트(volt, V)

$$V = \frac{W}{Q} [J/C = V] \quad (1.2)$$

- 1[V]는 1[C]의 전하가 도체 내의 한 지점에서 다른 지점으로 이동할 경우
 - ⇒ 전하가 잃게 되는 에너지가 1[J]일 때의 전위차(전압)
- 전압은 서로 다른 전하량을 갖는 두 전하 사이에 작용하는 상대적인 값
 - ⇒ 전하의 실질적인(절대적인) 양을 나타내는 것이 아님
- 도체에 일정한 크기의 전류를 흘리기 위해서는 도체에 일정한 전위차를 형성
 - ⇒ 전위차를 유지하면서 연속적으로 전류가 흐르게 하는 원동력
 - ⇒ 기전력(electromotive force; emf) E , 볼트(volt, V)

- 기전력은 다른 에너지를 전기에너지로 변환해주는 장치에 의해 생성
 - ⇒ 기전력을 발생시켜 전기에너지를 공급하는 장치
 - ⇒ 전압원(voltage source) 또는 전원(power source)



(a) 직류전압원 (b) 가변 직류전압원 (c) 교류전압원

그림 1.3 전압원의 기호

- 전원의 기전력이 $1[V]$ 이면 전원을 통과하는 $1[C]$ 의 전하가 $1[J]$ 의 일을 수행
 - ⇒ $12[V]$ 의 전지는 $1[C]$ 의 전하들에 의해 $12[J]$ 의 일을 수행
- 전류의 흐름에 따라 전기에너지를 소비하면서 일을 행하는 요소 또는 장치
 - ⇒ 부하(load)
- 전원(전압원)에 의해 전기적인 위치에너지가 발생하여 전압이 증가하는 현상
 - ⇒ 전압상승(voltage rise)
- 전류가 흐름에 따라 부하에서 전기적인 위치에너지가 소모되어 전압이 감소
 - ⇒ 전압강하(voltage drop)

• 직류(DC)와 교류(AC)

- 시간에 따라 크기와 방향이 변하지 않고 일정하게 흐르는 전류 또는 전압
 - ⇒ 직류(direct current; DC)
- 시간에 따라 크기는 변하지만 방향은 변하지 않고 흐르는 전류 또는 전압
 - ⇒ 맥동전류(pulsating current) 또는 맥류(ripple current)
- 시간에 따라 크기와 방향이 지속적으로 변하면서 흐르는 전류 또는 전압
 - ⇒ 교류(alternating current; AC)

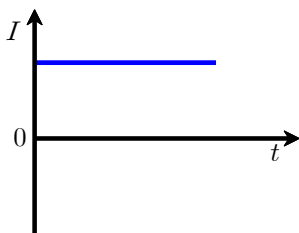


그림 1.4 직류(DC)

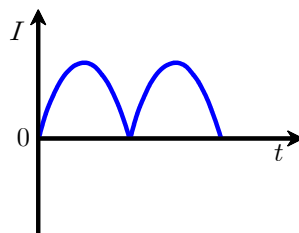


그림 1.5 맥동전류(DC)

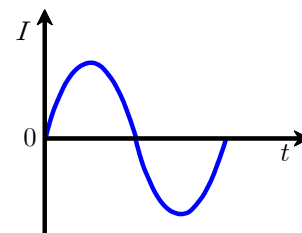


그림 1.6 사인파(AC)

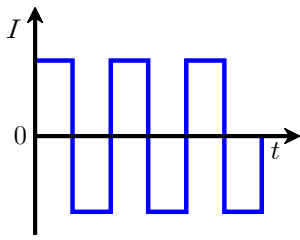


그림 1.7 사각파(AC)

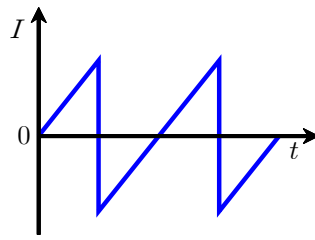


그림 1.8 톱니파(AC)

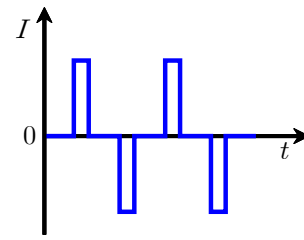


그림 1.9 펄스파(AC)

• 저항(Resistor)

- 도체에 전위차가 발생하면 전류가 흐르고 전위의 일부는 열에너지로 변환
 $\Rightarrow$ 도체가 가지고 있는 전류의 흐름을 방해하는 요소
 $\Rightarrow$ 전기저항(electric resistance) R , 옴(ohm, Ω)
- $1[\Omega]$ 은 도체에 $1[V]$ 의 전위차가 발생하여 $1[A]$ 의 전류가 흘렀을 때의 저항값

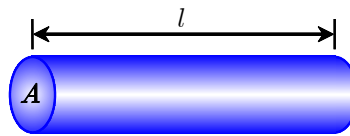


그림 1.10 도체의 저항

- 도체의 단면적이 증가하면 저항은 감소하고, 길이가 증가하면 저항은 증가
 $\Rightarrow$ 도체의 저항은 도체의 길이 l 에 비례하고 단면적 A 에 반비례

$$R = \rho \frac{l}{A} [\Omega] \quad (1.3)$$

- $\rho [\Omega \cdot m]$ 는 단위 길이 $1[m]$ 와 단위 면적 $1[m^2]$ 을 갖는 도체의 전기저항
 $\Rightarrow$ 저항률(resistivity) 또는 고유저항
- 일정한 값 또는 가변의 값을 갖도록 제작되어 전류의 흐름을 제한하는 소자
 $\Rightarrow$ 저항(resistor), 고정저항과 가변저항으로 분류

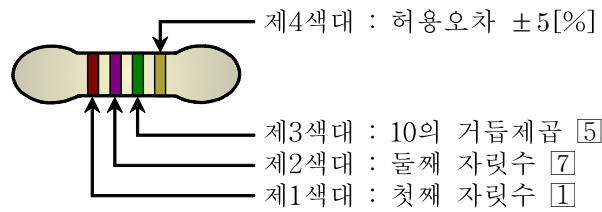


(a) 고정저항



(b) 가변저항

그림 1.11 저항의 기호



$$R = 17 \times 10^5 [\Omega] \pm 5[\%] = 1.7 [\text{M}\Omega] \pm 5[\%]$$

그림 1.12 저항의 색 밴드

표 1.1 저항의 색깔 코드

색깔	검정 black	갈색 brown	빨강 red	주황 orange	노랑 yellow	녹색 green	파랑 blue	보라 violet	회색 gray	흰색 white	금색 gold	은색 silver
저항값	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	-	-
허용오차	-	± 1	± 2	-	± 0.5	-	-	-	-	-	± 5	± 10

• 저항의 온도계수

- $T_1 [^\circ\text{C}]$ 에서의 저항이 $R_{T1} [\Omega]$ 이고 $T_2 [^\circ\text{C}]$ 에서의 저항이 R_{T2} 일 경우
 $\Rightarrow$ 온도가 $1 [^\circ\text{C}]$ 변했을 때의 저항의 변화량 r

$$r = \frac{\Delta R}{\Delta T} = \frac{R_{T2} - R_{T1}}{T_2 - T_1} \quad (1.4)$$

- 온도가 증가하면 도체저항이 증가하며, 온도가 $1 [^\circ\text{C}]$ 변할 때 저항의 변화율
 $\Rightarrow$ 온도계수(temperature coefficient) α_t

$$\alpha_t = \frac{r}{R_{T1}} = \frac{R_{T2} - R_{T1}}{T_2 - T_1} \cdot \frac{1}{R_{T1}} \quad (1.5)$$

- 온도계수 α_t 인 도체의 저항이 $T_1 [^\circ\text{C}]$ 에서 $R_{T1} [\Omega]$, $T_2 [^\circ\text{C}]$ 에서 $R_{T2} [\Omega]$ 인 경우

$$\alpha_t (T_2 - T_1) R_{T1} = R_{T2} - R_{T1}, \quad R_{T1} + \alpha_t (T_2 - T_1) R_{T1} = R_{T2}$$

$$R_{T2} = R_{T1} + \alpha_t (T_2 - T_1) R_{T1} = R_{T1} [1 + \alpha_t (T_2 - T_1)] \quad (1.6)$$

• 컨덕턴스(Conductance)

- 고유저항(저항률)의 역수으로써 전류가 얼마나 잘 흐르는 가를 나타내는 양
⇒ 도전율(conductivity) σ [Ω/m]

$$\sigma = \frac{1}{\rho} [\Omega/\text{m}] \quad (1.7)$$

- 저항의 역수으로써 전기회로에서 전류가 얼마나 잘 흐르는 가를 나타내는 양
⇒ 컨덕턴스(conductance) G , 지멘스(siemens, S) 또는 모호(mho, Ω)

• 전류, 전압 및 저항의 관계

- 그림 1.13에서 A수조와 B수조의 물의 양이 다르거나 높이의 차가 있는 경우
⇒ 물이 많거나 높은 곳에 있는 수조의 수압이 높아 수위차 발생
⇒ 수위가 높은 수조에서 낮은 수조로 물이 흐름
⇒ 두 수조를 연결한 관이 굵고 수압이 높을수록 물이 잘 흐름
- 도체에 전위차가 생기면 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 전류 발생
⇒ 전위차가 크고 저항이 작을수록 큰 전류가 발생

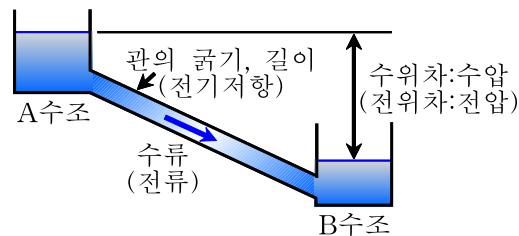


그림 1.13 전류, 전압, 저항의 관계

1.2 전기회로 해석

⊙ 옴의 법칙(Ohm's Law)

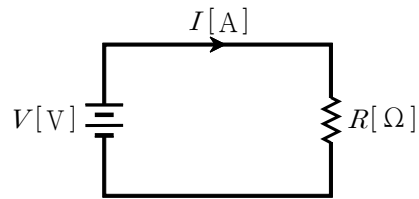


그림 1.14 옴의 법칙

- 도체에 전위차가 발생하여 흐르는 전류는 전압에 비례하고 저항에 반비례

$$I = \frac{V}{R} [\text{A}] \quad (1.8)$$

$$V = RI [\text{V}] \quad (1.9)$$

$$R = \frac{V}{I} [\Omega] \quad (1.10)$$

【예제 1.1】 그림 1.14의 회로에서 회로에 흐르는 전류 I 를 계산하시오.

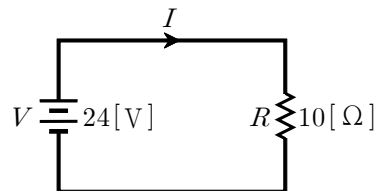


그림 1.15 예제 1.1의 회로

$$V = 24[\text{V}], \quad R = 10[\Omega], \quad \therefore I = \frac{V}{R} = \frac{24[\text{V}]}{10[\Omega]} = 2.4[\text{A}]$$

■

◎ 전력 and 전력량

• 전력(Power)

- 부하에 전류가 흐를 때 단위시간 동안에 부하에서 소비되는 전기에너지의 양
 $\Rightarrow$ 부하에서 단위시간 동안에 전기에너지가 하는 일의 양
 $\Rightarrow t[s]$ 동안 $W[J]$ 의 일을 했을 때의 소비전력 $P[watt]$

$$P = \frac{W}{t} [J/s = W] \quad (1.11)$$

- 1[W]의 부하에서 1[s] 동안에 1[J]의 일을 할 수 있는 전력의 크기

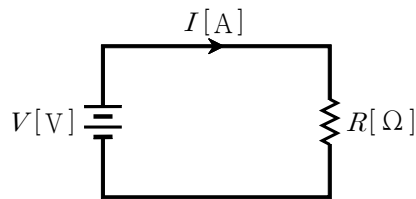


그림 1.16 저항에서 소비전력

- 그림 1.16의 회로에서 $V[V]$ 의 전압이 인가되어 $I[A]$ 의 전류가 흐를 경우
 $\Rightarrow$ 저항 $R[\Omega]$ 에서 소비되는 전력은 식 (1.12)로 표시

$$P = V \cdot I = I^2 R = \frac{V^2}{R} \quad (1.12)$$

- 1[W]는 1[Ω]의 저항에 1[A]의 전류가 흐를 때 저항에서 소비되는 전력

• 전력량(Electric Energy)

- 일정한 시간동안 회로에 전류가 흐를 때 부하에서 소비되는 전력의 총 크기
 $\Rightarrow$ 가정용 또는 상업용 소비전력의 측정 단위, 킬로와트시 [kWh]
 $\Rightarrow$ 1[kWh]는 1[kW]의 전력을 1시간 동안 사용했을 때의 전력량
 $\Rightarrow 1[kWh] = 3,600[kW \cdot s] = 3,600[kJ] = 0.24 \times 3,600[kcal] = 860[kcal]$

$$W = P \times t [Ws = J] \quad (1.13)$$

◎ 기초회로해석

• 저항의 직렬접속(Series Connection)

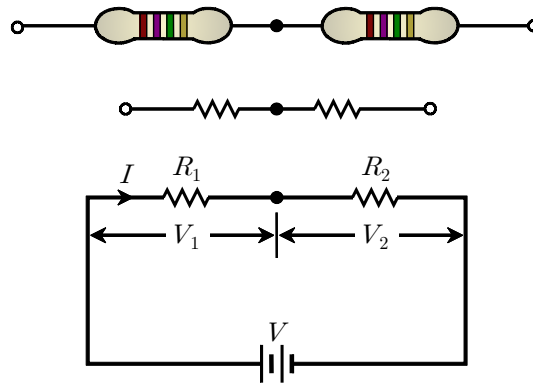


그림 1.17 저항의 직렬접속

- 단일 폐회로에서 회로에 흐르는 전류는 회로 내의 어느 지점에서나 일정

$$V_1 = R_1 I, \quad V_2 = R_2 I$$

- R_1 에서의 전압강하 V_1 과 R_2 에서의 전압강하 V_2 의 합은 인가전압 V 와 동일

$$V = V_1 + V_2 = R_1 I + R_2 I = (R_1 + R_2) I = R I$$

$$R = R_1 + R_2 : R_1 \text{과 } R_2 \text{의 등가 직렬 합성저항}$$

- n 개의 저항을 직렬 접속한 경우의 등가 합성저항 R 은 식 (1.14)로 표시

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n \quad (1.14)$$

- 저항을 직렬 접속한 경우 각 저항 양단의 전압은 저항의 크기에 비례

$$\begin{aligned} I &= \frac{V}{R} = \frac{V}{R_1 + R_2}, \quad V_1 = R_1 I = R_1 \cdot \frac{V}{R}, \quad V_2 = R_2 I = R_2 \cdot \frac{V}{R} \\ V_1 &= \frac{R_1}{R} \cdot V = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V \\ V_2 &= \frac{R_2}{R} \cdot V = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V \end{aligned} \quad (1.15)$$

【예제 1.2】 그림 1.18의 회로에서 직렬 접속된 저항의 등가 합성저항 계산.

단, $R_1 = 100[\Omega]$, $R_2 = 3.3[\text{k}\Omega]$, $R_3 = 470[\Omega]$, $R_4 = 30[\Omega]$

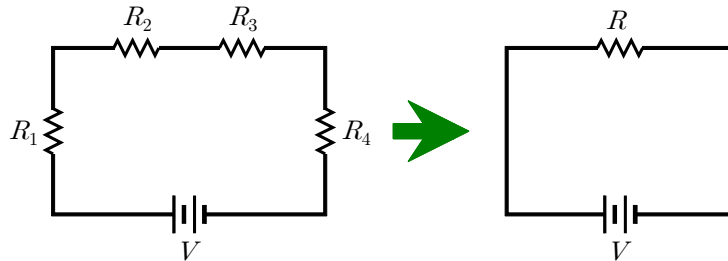


그림 1.18 예제 1.2의 회로

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 100 + 3,300 + 470 + 30 = 3,900[\Omega] = 3.9[\text{k}\Omega]$$

■

【예제 1.3】 그림 1.19의 회로에서 회로에 흐르는 전류와 각 저항에서의 전압강하 계산.

단, $R_1 = 10[\text{k}\Omega]$, $R_2 = 20[\text{k}\Omega]$, $V = 60[\text{V}]$.

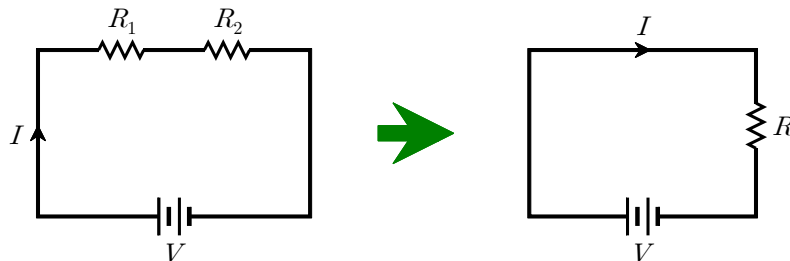


그림 1.19 예제 1.3의 회로

$$R = R_1 + R_2 = 10 + 20 = 30[\text{k}\Omega]$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{60}{30 \times 10^3} = 2 \times 10^{-3}[\text{A}] = 2[\text{mA}]$$

$$V_{R1} = R_1 I = (10 \times 10^3) \cdot (2 \times 10^{-3}) = 20[\text{V}]$$

$$V_{R2} = R_2 I = (20 \times 10^3) \cdot (2 \times 10^{-3}) = 40[\text{V}]$$

■

• 전압 분배 법칙(Voltage Divider Rule)

- 그림 1.20의 직렬회로에서 전류 I 와 저항 R_1, R_2 양단의 전압 V_1, V_2
 $\Rightarrow$ 전원전압은 저항의 크기에 비례하여 분배

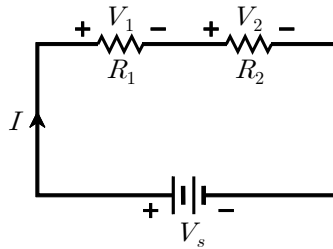


그림 1.20 전압분배기

$$I = \frac{V_s}{R_1 + R_2} \quad (1.16)$$

$$V_1 = R_1 I = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_s, \quad V_2 = R_2 I = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_s \quad (1.17)$$

【예제 1.4】 그림 1.21의 회로에서 각 저항에 인가되는 전압을 구하시오.

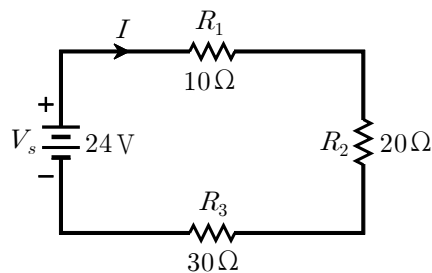


그림 1.21 예제 1.4의 회로

$$V_{R1} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \right) V_s = \left(\frac{10}{10 + 20 + 30} \right) \times 24 = \frac{240}{60} = 4[\text{V}]$$

$$V_{R2} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \right) V_s = \left(\frac{20}{10 + 20 + 30} \right) \times 24 = \frac{480}{60} = 8[\text{V}]$$

$$V_{R3} = \left(\frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \right) V_s = \left(\frac{30}{10 + 20 + 30} \right) \times 24 = \frac{720}{60} = 12[\text{V}]$$

$$V_{R1} + V_{R2} + V_{R3} = 4 + 8 + 12 = 24[\text{V}] = V_s$$

■

• 저항의 병렬접속(Parallel Connection)

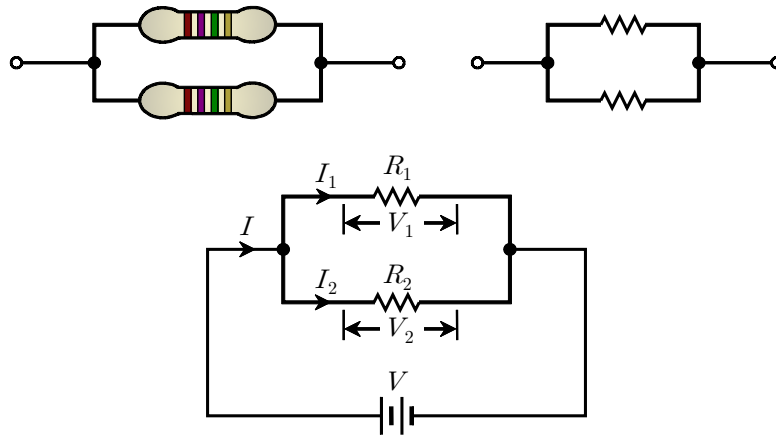


그림 1.22 저항의 병렬접속

- R_1 에서의 전압강하 V_1 과 R_2 에서의 전압강하 V_2 는 인가전압 V 와 동일
 $\Rightarrow$ 각 지로에 흐르는 전류 I_1 과 I_2 의 합은 전체 회로 전류 I

$$V_1 = V_2 = V, \quad I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{V}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{V}{R_2}$$

$$I = I_1 + I_2 = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cdot V = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} V = \frac{V}{R}$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} : R_1 \text{과 } R_2 \text{의 등가 병렬 합성저항}$$

- n 개의 저항을 병렬 접속한 경우의 등가 합성저항 R 은 식 (1.18)으로 표시

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n} \quad (1.18)$$

- 그림 1.22의 회로에서 각 지로에 흐르는 전류 I_1 과 I_2 는 식 (1.19)로 표시

$$V_1 = V_2 = V, \quad R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{RI}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{RI}{R_2}$$

$$I_1 = \frac{1}{R_1} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I$$

$$I_2 = \frac{1}{R_2} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I \quad (1.19)$$

【예제 1.5】 그림 1.23의 회로에서 병렬 접속된 저항의 등가 합성저항을 계산.
단, $R_1 = 300[\Omega]$, $R_2 = 300[\Omega]$, $R_3 = 300[\Omega]$.

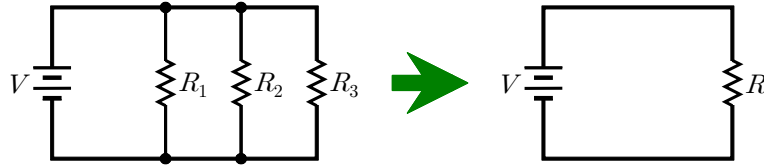


그림 1.23 예제 1.4의 회로

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{300}[\Omega], \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{300} + \frac{1}{300} + \frac{1}{300}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{3}{300} = \frac{1}{100}, \quad \therefore R = 100[\Omega]$$

• 10:1법칙에 의한 병렬 합성저항

- 병렬 접속된 두 저항의 병렬 합성저항은 항상 작은 저항값보다 작거나 동일
 $\Rightarrow$ 한 저항이 다른 저항보다 10배 이상 크면 작은 저항값에 근사

$$R_1 \gg R_2, \quad R = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \simeq \frac{R_1 R_2}{R_1} = R_2$$

【예제 1.6】 그림 1.24의 회로에서 병렬 접속된 저항의 등가 합성저항 계산.

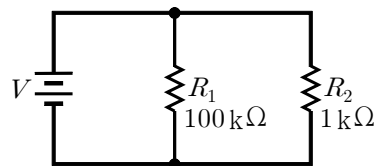


그림 1.24 예제 1.6의 회로

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{100 \times 1}{100 + 1} = \frac{100}{101} \simeq 0.99[\text{k}\Omega]$$

• 전류 분배 법칙(Current Divider Rule)

- 두 개의 병렬 접속된 저항에 흐르는 전류는 두 저항의 크기에 반비례하여 분류
 $\Rightarrow$ 그림 1.25의 회로에서 저항 R_1 , R_2 를 통해 흐르는 전류 I_1 , I_2

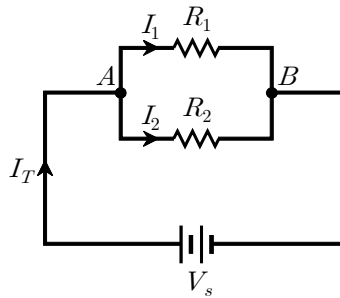


그림 1.25 전류 분류기

$$I_T = \frac{V_s}{R_T}, \quad V_s = R_T I_T \quad (1.20)$$

$$I_1 = \frac{V_s}{R_1} = \frac{R_T}{R_1} I_T = \frac{1}{R_1} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I_T = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) I_T \quad (1.21a)$$

$$I_2 = \frac{V_s}{R_2} = \frac{R_T}{R_2} I_T = \frac{1}{R_2} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I_T = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) I_T \quad (1.21b)$$

【예제 1.7】 전류 분배 법칙을 사용하여 저항 R_1 과 R_2 를 통해서 흐르는 전류 계산.

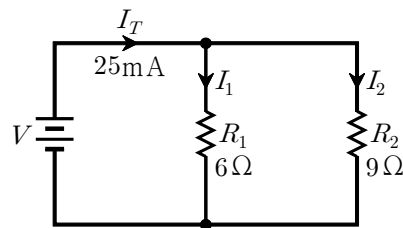


그림 1.26 예제 1.7의 회로

$$I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) I_T = \frac{9}{6+9} \times 25 = \frac{9 \times 25}{15} = 15[\text{mA}]$$

$$I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) I_T = \frac{6}{6+9} \times 25 = \frac{6 \times 25}{15} = 10[\text{mA}]$$

■

• 직-병렬회로(Series-Parallel Circuit)

- 한 회로에 저항의 직렬접속과 병렬접속이 혼합되어 포함된 회로의 해석
 $\Rightarrow$ 저항의 직렬접속과 병렬접속 관계를 파악하는 것이 중요
- 병렬접속된 저항 $R_2 \parallel R_3$ 와 저항 R_1 과 직렬접속된 직-병렬회로의 등가변환

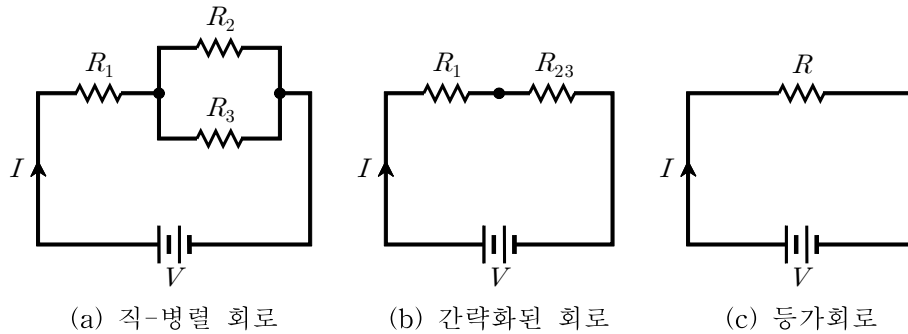


그림 1.27 직-병렬회로의 등가변환 1

$$\begin{aligned}
 R_{23} &= R_2 \parallel R_3 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \\
 R &= R_1 + R_{23} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}
 \end{aligned} \tag{1.22}$$

- 각각 직렬접속된 R_1-R_2 과 R_3-R_4 가 병렬접속된 직-병렬회로의 등가변환

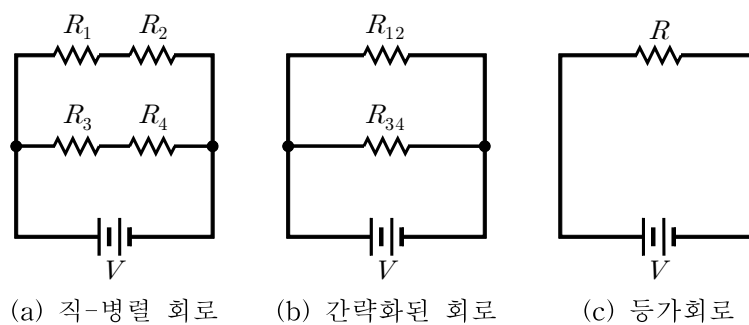


그림 1.28 직-병렬회로의 등가변환 2

$$\begin{aligned}
 R_{12} &= R_1 + R_2, \quad R_{34} = R_3 + R_4 \\
 R &= R_{12} \parallel R_{34} = \frac{R_{12} R_{34}}{R_{12} + R_{34}} = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}
 \end{aligned} \tag{1.23}$$

【예제 1.8】 그림 1.29의 직-병렬회로에서 등가 합성저항을 구하시오.

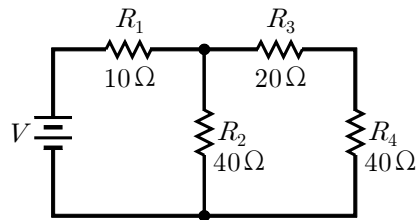


그림 1.29 예제 1.8의 회로

- 그림 1.29의 회로에서 직렬접속된 두 저항 R_3 와 R_4 에 대한 합성저항

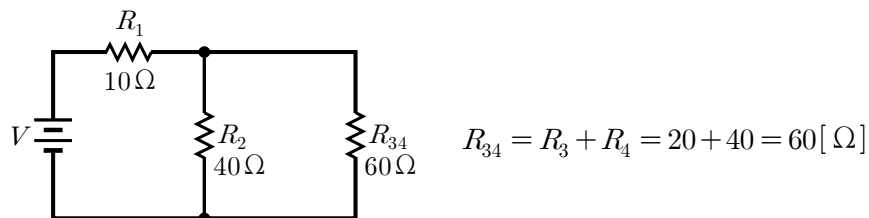


그림 1.30 R_{34} 의 계산

- 그림 1.30의 회로에서 병렬접속된 R_2 와 R_{34} 에 대한 합성저항

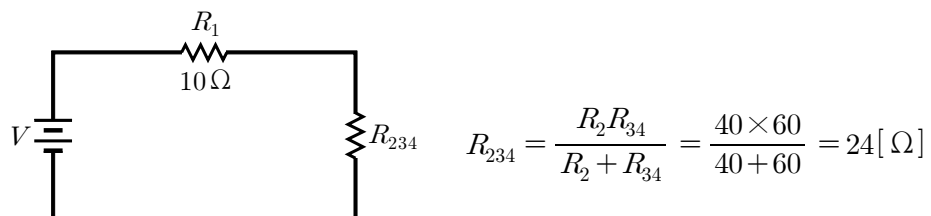


그림 1.31 R_{234} 의 계산

- 그림 1.31의 회로로부터 그림 1.29에 대한 직-병렬 합성저항 계산

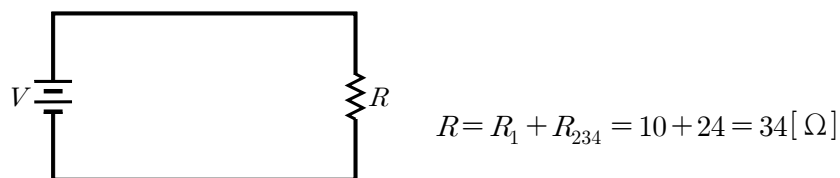


그림 1.32 등가합성저항



• 키르히호프의 전압법칙 (KVL)

- 임의의 폐회로를 따라 생기는 전압강하와 전압상승의 대수적인 총합은 0
 $\Rightarrow$ 폐회로 내의 전압강하의 총합은 인가전압의 총합과 동일
 $\Rightarrow$ 키르히호프의 전압법칙(Kirchhoff's Voltage Law; KVL)
- 폐회로의 루프를 따라 일주하며 생기는 전압강하 및 전압상승의 총합
 $\Rightarrow$ 전압원은 전압상승으로 양(+), 저항은 전압강하로 음(-)

$$V_S - V_1 - V_2 - V_3 = 0 \quad (1.24a)$$

$$V_S = V_1 + V_2 + V_3 \quad (1.24b)$$

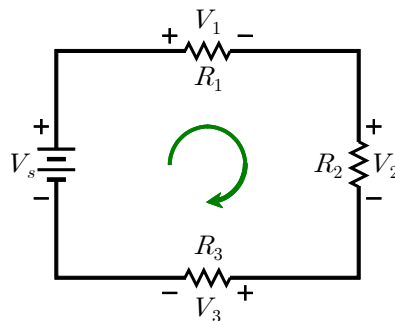


그림 1.33 키르히호프의 전압법칙 (KVL)

【예제 1.9】 그림 1.34(a)에서 전원전압 V_s , 그림 1.34(b)에서 V_{R2} 를 구하시오.

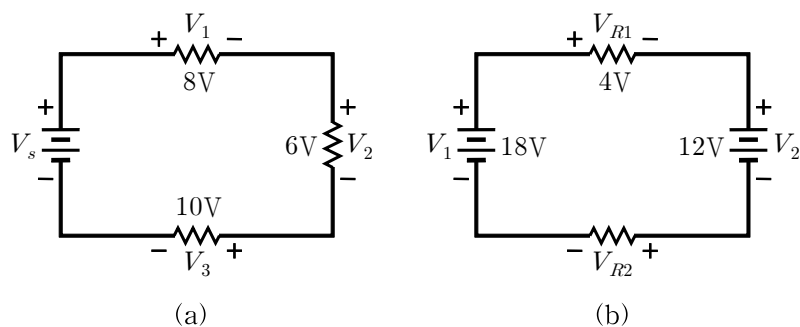


그림 1.34 예제 1.9의 회로

$$V_s - V_1 - V_2 - V_3 = 0, \quad V_s = V_1 + V_2 + V_3 = 8 + 6 + 10 = 24[\text{V}]$$

$$V_1 - V_{R1} - V_2 - V_{R2} = 0, \quad V_{R2} = V_1 - V_{R1} - V_2 = 18 - 4 - 12 = 2[\text{V}]$$

■

• 키르히호프의 전류법칙 (KCL)

- 회로의 임의의 접속점을 통해 유입 또는 유출하는 전류의 대수적인 총합은 0
 $\Rightarrow$ 접속점을 통해 유입하는 전류의 합은 유출하는 전류의 합과 동일
 $\Rightarrow$ 키르히호프의 전류법칙(Kirchhoff's Current Law; KCL)
- 그림 1.35에서 접속점 O 에 유입되는 전류를 양(+), 유출되는 전류를 음(-)

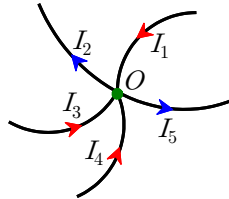


그림 1.35 키르히호프의 전류법칙 (KCL)

$$I_1 - I_2 + I_3 + I_4 - I_5 = 0 \quad (1.25a)$$

$$I_1 + I_3 + I_4 = I_2 + I_5 \quad (1.25b)$$

【예제 1.10】 그림 1.36의 회로에서 저항 R_3 를 통해서 흐르는 전류를 계산하시오.
 단, $I_T = 10[\text{A}]$, $I_1 = 2[\text{A}]$, $I_2 = 5[\text{A}]$.

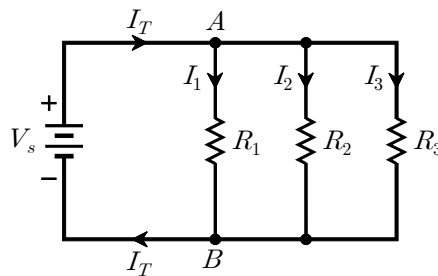


그림 1.36 예제 1.10의 회로

- 그림 1.36의 회로에서 접속점 A 에 키르히호프의 전류법칙(KCL)을 적용

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3, \quad 10 = 2 + 5 + I_3$$

$$\therefore I_3 = 10 - 7 = 3[\text{A}]$$

■

• 내부저항(Internal Resistance)

- 전원의 내부에서 직렬로 연결되어 전압강하를 일으키는 저항 성분
 $\Rightarrow$ 내부저항(internal resistance)
- 내부저항에 의해 발생하는 전압강하는 입·출력단자 사이의 전압손실을 초래
 $\Rightarrow$ 부하에서 이용할 수 있는 전압과 전류를 감소

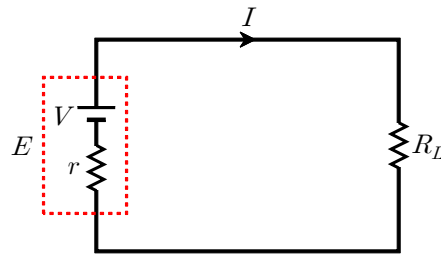


그림 1.37 내부저항을 갖는 실제 전압원

$$V = E - rI \quad (1.26)$$

【예제 1.11】 그림 1.37에서 회로에 4[A]의 전류가 흐를 때 26[V]의 무부하 전원전압이 24[V]로 감소한다면 전원의 내부저항은 얼마인가?

$$I = 4[\text{A}], \quad E = 26[\text{V}], \quad V = 24[\text{V}], \quad rI = E - V$$

$$\therefore r = \frac{E - V}{I} = \frac{26 - 24}{4} = \frac{2}{4} = 0.5[\Omega]$$

■

【예제 1.12】 예제 1.11에서 전원전압의 전력 효율을 구하시오.

$$P_{out} = VI = 24 \times 4 = 96[\text{W}]$$

$$P_{loss} = (E - V)I = (26 - 24) \times 4 = 8[\text{W}]$$

$$P_{in} = P_{out} + P_{loss} = 96 + 8 = 104[\text{W}]$$

$$\therefore \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{96}{104} \times 100 = \frac{9,600}{104} = 92.3[\%]$$

■

• 전류의 측정

- 직렬 회로에서는 회로의 모든 부분에서 흐르는 전류의 양이 동일
⇒ 전류를 측정할 때 회로의 임의의 지점에서 측정 가능
- 전류를 측정하려면 전류계(ammeter)나 멀티미터(multimeter)를 사용
⇒ 전류 측정시 전류계는 회로의 다른 소자들과 직렬연결
- 전류계의 내부저항은 회로에 흐르는 전류에 영향을 주지 않도록 극소
⇒ 이상적인 전류계의 내부저항은 $0[\Omega]$

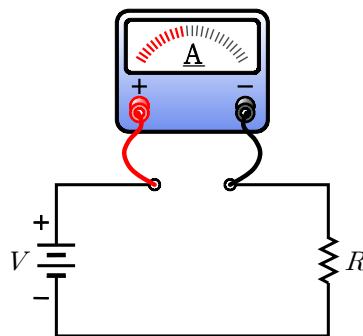


그림 1.38 전류의 측정

• 전압의 측정

- 회로에 전류가 흐르면 저항의 크기에 비례하여 각 저항에서 전압강하 발생
- 전압을 측정하려면 전압계(voltmeter)나 멀티미터(multimeter)를 사용
⇒ 전압 측정시 전압계는 측정하고자 하는 소자와 병렬연결
- 전압계의 내부저항은 전압계를 통해 전류가 거의 흐르지 않도록 극대
⇒ 이상적인 전압계의 내부저항은 $\infty[\Omega]$

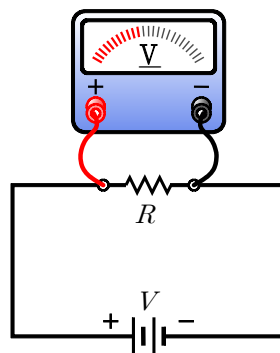
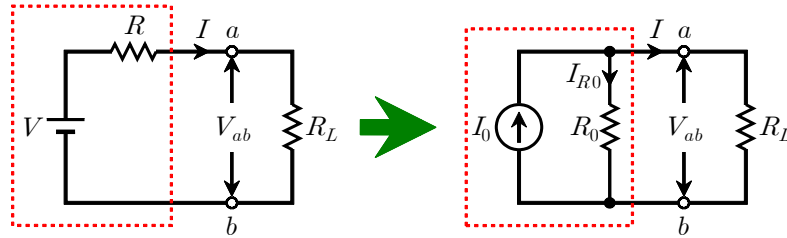


그림 1.39 전압의 측정

◎ 회로망 해석

• 전압원 및 전류원의 상호 변환

- 전압원과 저항의 직렬접속을 전류원과 저항의 병렬접속으로 등가변환
 $\Rightarrow$ 그림 1.40(a)의 회로를 그림 1.40(b)의 회로로 등가변환



(a) 전압원 회로

(b) 전류원 회로

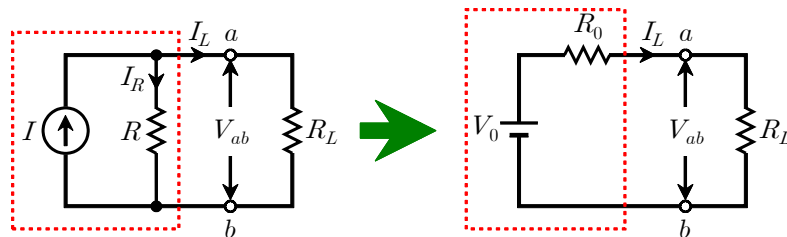
그림 1.40 전압원을 전류원으로 등가변환

$$V_R = V - V_{ab}, \quad RI = V - V_{ab}, \quad I = \frac{V}{R} - \frac{V_{ab}}{R} \quad \cdots \text{그림 1.40(a)}$$

$$I_0 = I + I_{R0}, \quad I = I_0 - I_{R0}, \quad I = I_0 - \frac{V_{ab}}{R_0} \quad \cdots \text{그림 1.40(b)}$$

$$\therefore \frac{V_{ab}}{R} = \frac{V_{ab}}{R_0}, \quad R_0 = R, \quad I_0 = \frac{V}{R}$$

- 전류원과 저항의 병렬접속을 전압원과 저항의 직렬접속으로 등가변환
 $\Rightarrow$ 그림 1.41(a)의 회로를 그림 1.41(b)의 회로로 등가변환



(a) 전류원 회로

(b) 전압원 회로

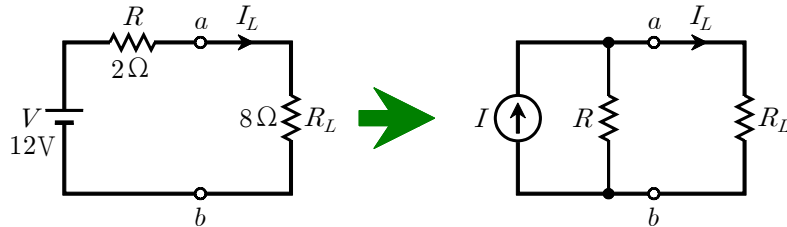
그림 1.41 전류원을 전압원으로 등가변환

$$I = I_R + I_L, \quad I_R = I - I_L, \quad \frac{V_{ab}}{R} = I - I_L, \quad V_{ab} = RI - RI_L \quad \cdots \text{그림 1.41(a)}$$

$$V_0 = V_{R0} + V_{ab}, \quad V_{ab} = V_0 - V_{R0}, \quad V_{ab} = V_0 - R_0 I_L \quad \cdots \text{그림 1.41(b)}$$

$$\therefore RI_L = R_0 I_L, \quad R_0 = R, \quad V_0 = RI$$

【예제 1.13】 그림 1.42(a)에 표시된 전압원 회로를 그림 1.42(b)와 같은 전류원 회로로 변환하고 부하전류 I_L 을 구하시오.



(a) 전압원 회로

(b) 전류원 회로

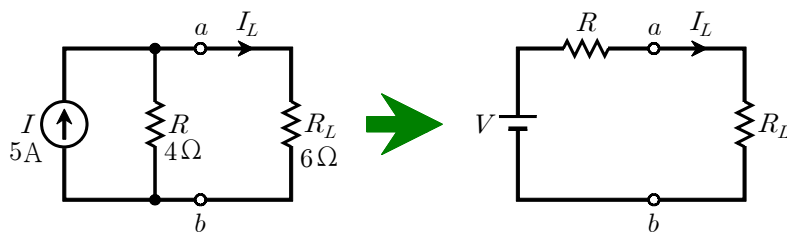
그림 1.42 예제 1.13의 회로

$$R = 2[\Omega], \quad I = \frac{V}{R} = \frac{12}{2} = 6[\text{A}]$$

$$I_L = \left(\frac{R}{R + R_L} \right) I = \frac{2}{2 + 8} \times 6 = \frac{12}{10} = 1.2[\text{A}]$$

■

【예제 1.14】 그림 1.43(a)에 표시된 전류원 회로를 그림 1.43(b)와 같은 전압원 회로로 변환하고 부하전류 I_L 을 구하시오.



(a) 전류원 회로

(b) 전압원 회로

그림 1.43 예제 1.14의 회로

$$R = 4[\Omega], \quad V = RI = 4 \times 5 = 20[\text{V}]$$

$$I_L = \frac{V}{R + R_L} = \frac{20}{4 + 6} = \frac{20}{10} = 2[\text{A}]$$

■

• 중첩의 정리(Superposition Theorem)

- 회로망 내에 여러 개의 전원이 존재할 때 임의의 지로를 통해 흐르는 전류
 - ⇒ 전원이 개별적으로 작용할 때 그 지로를 흐르는 전류의 합
 - ⇒ 중첩의 원리(principle of superposition)
 - ⇒ 선형성의 원리(principle of linearity)
- 전원이 개별적으로 작용할 때 그 외의 전압원은 단락하고 전류원은 개방

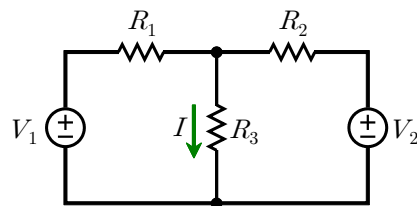
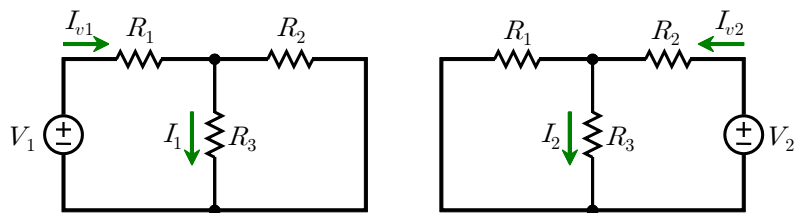


그림 1.44 2개의 전압원 회로



(a) V_1 만에 의한 전류

(b) V_2 만에 의한 전류

그림 1.45 개별적 전원에 의해 흐르는 전류

$$R_{v1} = R_1 + (R_2 \parallel R_3) = R_1 + R_{23} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}, \quad I_{v1} = \frac{V_1}{R_{v1}}$$

$$\therefore I_1 = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I_{v1}$$

$$R_{v2} = R_2 + (R_1 \parallel R_3) = R_2 + R_{13} = R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}, \quad I_{v2} = \frac{V_2}{R_{v2}}$$

$$\therefore I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_3} I_{v2}$$

$$I = I_1 + I_2 \tag{1.27}$$

【예제 1.15】 그림 1.46에서 중첩의 원리를 이용하여 저항 R_2 에 흐르는 전류를 구하시오.

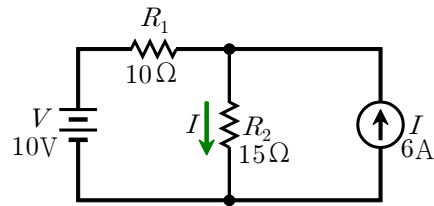


그림 1.46 예제 1.15의 회로

- 전류원을 개방하고 전압원 V 에 의해서만 저항 R_2 에 흐르는 전류 계산

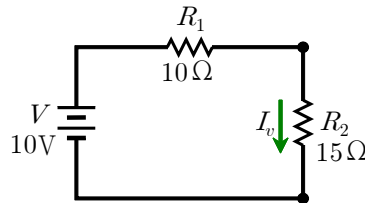


그림 1.47 전압원에 의한 전류

$$I_v = \frac{V}{R_v} = \frac{V}{R_1 + R_2} = \frac{10}{10 + 15} = \frac{10}{25} = 0.4[\text{A}]$$

- 전압원을 단락하고 전류원 I 에 의해서만 저항 R_2 에 흐르는 전류 계산

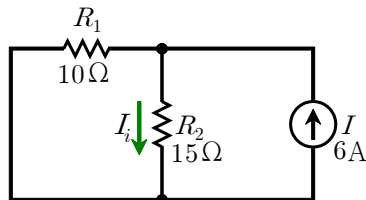


그림 1.48 전류원에 의한 전류

$$I_i = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I = \frac{10}{10 + 15} \times 6 = \frac{60}{25} = 2.4[\text{A}]$$

- 중첩의 원리를 적용하여 전압원과 전류원 모두에 의해 R_2 에 흐르는 전류 계산

$$I = I_v + I_i = 0.4 + 2.4 = 2.8[\text{A}]$$

■

• 루프 해석법(Loop Analysis)

- 회로망에서 2개 이상의 소자가 연결되어 있는 접속점
⇒ 절점 또는 마디(node)
- 절점과 절점 사이에 연결된 회로 소자 또는 절점과 절점 사이의 경로
⇒ 지로 또는 가지(branch)
- 어느 마디도 2번 이상 통과하지 않고 회로를 일주하여 완결되는 폐경로
⇒ 폐로 또는 루프(loop)
- KVL을 이용하여 회로망의 각 루프에 대한 전압방정식을 세워 회로 해석
⇒ 루프 해석법(loop analysis method)
- 각 루프에 대해 시계방향을 기준방향으로 적당히 루프 전류를 설정
⇒ 각 루프에 대해 KVL을 이용하여 전압방정식 유도
⇒ 전압방정식을 풀어 각 루프의 지로전류 계산

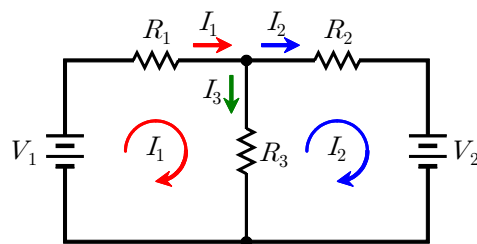


그림 1.49 루프 해석법

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 = V_1, \quad R_1 I_1 + R_3 (I_1 - I_2) = V_1, \quad (R_1 + R_3) I_1 - R_3 I_2 = V_1$$

$$R_2 I_2 - R_3 I_3 = -V_2, \quad R_2 I_2 - R_3 (I_1 - I_2) = -V_2, \quad -R_3 I_1 + (R_2 + R_3) I_2 = -V_2$$

$$\left. \begin{aligned} (R_1 + R_3) I_1 - R_3 I_2 &= V_1 \\ -R_3 I_1 + (R_2 + R_3) I_2 &= -V_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.28a)$$

$$\left. \begin{aligned} (R_1 + R_3) I_1 - R_3 I_2 &= V_1 \\ R_3 I_1 - (R_2 + R_3) I_2 &= V_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.28b)$$

$$\begin{bmatrix} R_1 + R_3 & -R_3 \\ R_3 & -(R_2 + R_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

$$R_{11} = R_1 + R_3, \quad R_{12} = -R_3, \quad R_{21} = R_3, \quad R_{22} = -(R_2 + R_3)$$

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

$$I_3 = I_1 - I_2 \quad (1.32)$$

【예제 1.16】 그림 1.50의 회로에서 각 저항을 통해 흐르는 전류를 구하시오.

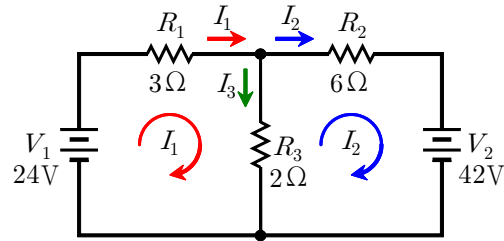


그림 1.50 예제 1.16의 회로

$$3I_1 + 2I_3 = 24, \quad 3I_1 + 2(I_1 - I_2) = 24, \quad 5I_1 - 2I_2 = 24$$

$$6I_2 - 2I_3 = -42, \quad 6I_2 - 2(I_1 - I_2) = -42, \quad -2I_1 + 8I_2 = -42$$

$$\begin{cases} 5I_1 - 2I_2 = 24 \\ I_1 - 4I_2 = 21 \end{cases}, \quad \begin{cases} 10I_1 - 4I_2 = 48 \\ I_1 - 4I_2 = 21 \end{cases}, \quad 9I_1 = 27, \quad \therefore I_1 = 3[\text{A}]$$

$$3 - 4I_2 = 21, \quad 4I_2 = 3 - 21 = -18, \quad \therefore I_2 = -\frac{18}{4} = -4.5[\text{A}]$$

$$\therefore I_3 = I_1 - I_2 = 3 - (-4.5) = 3 + 4.5 = 7.5[\text{A}]$$

별 해1)

$$\begin{bmatrix} 5 & -2 \\ 1 & -4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 24 \\ 21 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & -2 \\ 1 & -4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 24 \\ 21 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} &= \frac{1}{-20+2} \begin{bmatrix} -4 & 2 \\ -1 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 24 \\ 21 \end{bmatrix} = -\frac{1}{18} \begin{bmatrix} (-4) \cdot 24 + 2 \cdot 21 \\ (-1) \cdot 24 + 5 \cdot 21 \end{bmatrix} \\ &= -\frac{1}{18} \begin{bmatrix} -96+42 \\ -24+105 \end{bmatrix} = -\frac{1}{18} \begin{bmatrix} -54 \\ 81 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$I_1 = \frac{-54}{-18} = 3[\text{A}], \quad I_2 = -\frac{81}{18} = -\frac{9}{2} = -4.5[\text{A}]$$

별 해2)

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} 24 & -2 \\ 21 & -4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 5 & -2 \\ 1 & -4 \end{vmatrix}} = \frac{24 \cdot (-4) + 2 \cdot 21}{5 \cdot (-4) + 2 \cdot 1} = \frac{-96+42}{-20+2} = \frac{-54}{-18} = 3[\text{A}]$$

$$I_2 = \frac{\begin{vmatrix} 5 & 24 \\ 1 & 21 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 5 & -2 \\ 1 & -4 \end{vmatrix}} = \frac{5 \cdot 21 - 24 \cdot 1}{5 \cdot (-4) + 2 \cdot 1} = \frac{105-24}{-20+2} = -\frac{81}{18} = -4.5[\text{A}]$$

■

- 그림 1.51과 같이 저항과 전압원을 포함하는 회로는 방정식에 대칭성을 보유
 - ⇒ 회로에 대한 행렬방정식에서 계수행렬은 대칭행렬로 표시
 - ⇒ 관찰을 통해 폐로방정식을 유도 가능
- 첫 번째 루프의 폐로방정식에서 I_1 의 계수는 루프 1 내의 모든 저항값의 합
 - ⇒ I_2 의 계수는 루프 1과 2에 공통인 지로 저항값의 합의 $(-)$ 값
 - ⇒ 우변은 루프 1 내의 전압원들을 대수적으로 합한 값
 - ⇒ 전압원의 부호는 루프전류와 같은 극성이면 $(+)$, 반대 극성이면 $(-)$
- 두 번째 루프의 폐로방정식에서 I_2 의 계수는 루프 2 내의 모든 저항값의 합
 - ⇒ I_1 의 계수는 루프 2와 1에 공통인 지로 저항값의 합의 $(-)$ 값
 - ⇒ 우변은 루프 2 내의 전압원들을 대수적으로 합한 값

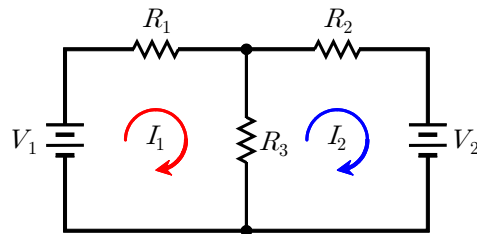


그림 1.51 직관적 해석

$$\begin{bmatrix} R_1 + R_3 & -R_3 \\ -R_3 & R_2 + R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ -V_2 \end{bmatrix} \quad (1.33)$$

【예제 1.17】 그림 1.52의 회로에서 저항 R_3 를 통해 흐르는 전류를 구하시오.

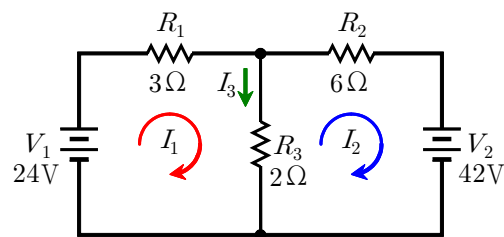


그림 1.52 예제 1.17의 회로

$$\begin{cases} (R_1 + R_3)I_1 - R_3I_2 = V_1 \\ -R_3I_1 + (R_2 + R_3)I_2 = -V_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} (3+2)I_1 - 2I_2 = 24 \\ -2I_1 + (6+2)I_2 = -42 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 5I_1 - 2I_2 = 24 \\ I_1 - 4I_2 = 21 \end{cases}$$

$$\therefore I_1 = 3[\text{A}], \quad I_2 = -4.5[\text{A}], \quad I_3 = I_1 - I_2 = 7.5[\text{A}]$$



【예제 1.18】 그림 1.52의 회로에서 전압 V_o 를 구하시오.

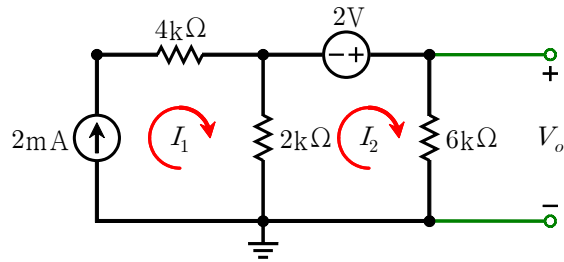


그림 1.53 예제 1.18의 회로

$$\begin{aligned}
 I_1 &= 2[\text{mA}] = 2/\text{k}[\text{A}], \quad 2\text{k}(I_2 - I_1) - 2 + 6\text{k}I_2 = 0, \quad -2\text{k}I_1 + 8\text{k}I_2 = 2 \\
 -\text{k}I_1 + 4\text{k}I_2 &= 1, \quad (-\text{k}) \cdot \frac{2}{\text{k}} + 4\text{k}I_2 = 1, \quad 4\text{k}I_2 = 3, \quad I_2 = \frac{3}{4\text{k}}[\text{A}] = \frac{3}{4}[\text{mA}] \\
 \therefore V_o &= 6\text{k}I_2 = 6\text{k} \cdot \frac{3}{4\text{k}} = \frac{9}{2} = 4.5[\text{V}]
 \end{aligned}$$

【예제 1.19】 그림 1.54의 회로에서 V_o 를 구하시오.

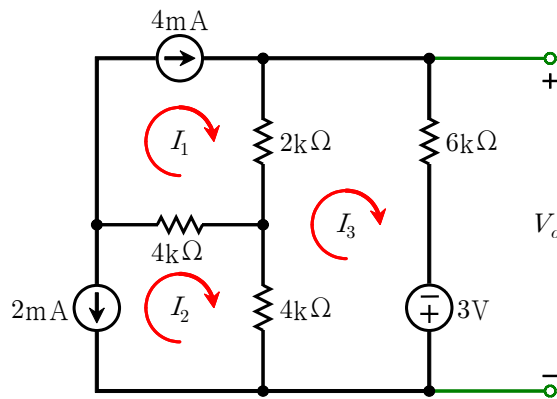


그림 1.54 예제 1.19의 회로

$$\begin{aligned}
 I_1 &= 4[\text{mA}] = 4/\text{k}[\text{A}], \quad I_2 = -2[\text{mA}] = -2/\text{k}[\text{A}] \\
 4\text{k}(I_3 - I_2) + 2\text{k}(I_3 - I_1) + 6\text{k}I_3 - 3 &= 0, \quad -2\text{k}I_1 - 4\text{k}I_2 + 12\text{k}I_3 = 3 \\
 12\text{k}I_3 &= 2\text{k}I_1 + 4\text{k}I_2 + 3 = 2\text{k} \cdot \frac{4}{\text{k}} + 4\text{k} \cdot \left(-\frac{2}{\text{k}}\right) + 3 = 3 \\
 12\text{k}I_3 &= 3, \quad I_3 = \frac{3}{12\text{k}} = \frac{1}{4\text{k}}[\text{A}] = \frac{1}{4}[\text{mA}] = 0.25[\text{mA}] \\
 V_o &= 6\text{k}I_3 - 3 = 6\text{k} \cdot \frac{1}{4\text{k}} - 3 = \frac{3}{2} - 3 = -\frac{3}{2} = -1.5[\text{V}]
 \end{aligned}$$

• 마디 해석법(Node Analysis)

- 하나의 마디를 기준마디로 취하고 다른 마디전압은 기준마디에 대해 정의
 - ⇒ 기준마디는 가장 많은 지로가 연결된 마디를 채택
 - ⇒ 기준마디는 접지(ground)라고 하며 전위는 0V
 - ⇒ 각 마디에 대해 KCL을 적용하여 지로방정식을 구성

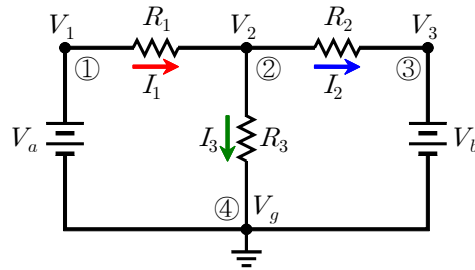


그림 1.55 마디 해석법

- 그림 1.55의 회로에서 마디 ④를 기준마디로 하여 전압 V_1 , V_2 , V_3 를 측정
 - ⇒ 마디 ①과 마디 ③의 전압은 각각 V_a 와 V_b 로 결정
 - ⇒ 마디 ②에 대해서 KCL을 적용하여 마디방정식을 작성
 - ⇒ 식 (1.36)에서 V_2 를 계산하여 식 (1.37)에 의해 전류 계산

$$V_1 = V_a, \quad V_3 = V_b \quad (1.34)$$

$$\frac{V_2 - V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_3} + \frac{V_2 - V_3}{R_2} = 0 \quad (1.35)$$

$$\frac{V_2 - V_a}{R_1} + \frac{V_2}{R_3} + \frac{V_2 - V_b}{R_2} = 0, \quad \frac{V_2}{R_1} - \frac{V_a}{R_1} + \frac{V_2}{R_3} + \frac{V_2}{R_2} - \frac{V_b}{R_2} = 0$$

$$\frac{V_2}{R_1} + \frac{V_2}{R_3} + \frac{V_2}{R_2} = \frac{V_a}{R_1} + \frac{V_b}{R_2}$$

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) V_2 = \frac{V_a}{R_1} + \frac{V_b}{R_2} \quad (1.36)$$

$$I_1 = \frac{V_1 - V_2}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V_2 - V_3}{R_2}, \quad I_3 = \frac{V_2}{R_3} \quad (1.37)$$

【예제 1.20】 그림 1.56의 회로에서 각 저항을 통해 흐르는 전류를 구하시오.

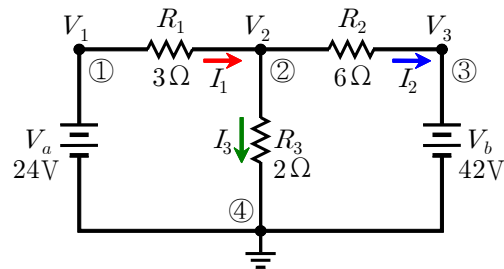


그림 1.56 예제 1.20의 회로

$$\begin{aligned}
 V_1 &= 24[\text{V}], \quad V_3 = 42[\text{V}], \quad \frac{V_2 - 24}{3} + \frac{V_2}{2} + \frac{V_2 - 42}{6} = 0 \\
 2V_2 - 48 + 3V_2 + V_2 - 42 &= 0, \quad 6V_2 = 90, \quad V_2 = 15[\text{V}] \\
 I_1 &= \frac{24 - 15}{3} = 3[\text{A}], \quad I_2 = \frac{15 - 42}{6} = -4.5[\text{A}], \quad I_3 = \frac{15}{2} = 7.5[\text{A}]
 \end{aligned}$$

■

【예제 1.21】 그림 1.57의 회로에서 전압 V_o 를 구하시오.

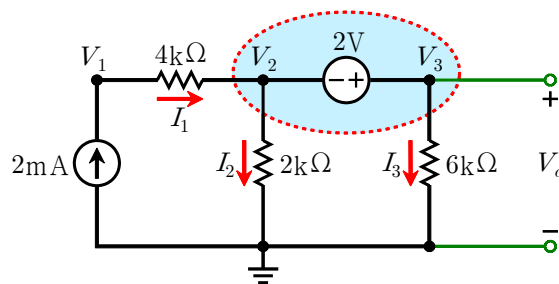


그림 1.57 예제 1.21의 회로

$$\begin{aligned}
 V_2 - V_3 &= -2[\text{V}], \quad I_1 = 2[\text{mA}] = 2/\text{k}[\text{A}], \quad -I_1 + I_2 + I_3 = 0 \\
 -\frac{2}{\text{k}} + \frac{V_2}{2\text{k}} + \frac{V_3}{6\text{k}} &= 0, \quad -12 + 3V_2 + V_3 = 0, \quad 3V_2 + V_3 = 12 \\
 \begin{cases} V_2 - V_3 = -2 \\ 3V_2 + V_3 = 12 \end{cases}, \quad 4V_2 &= 10, \quad V_2 = \frac{5}{2} = 2.5[\text{V}] \\
 \therefore V_o = V_3 = V_2 + 2 &= 2.5 + 2 = 4.5[\text{V}] \\
 I_2 = \frac{V_2}{2\text{k}} = \frac{5}{2} \frac{1}{2\text{k}} &= \frac{5}{4}[\text{mA}], \quad I_3 = \frac{V_3}{6\text{k}} = \frac{9}{2} \frac{1}{6\text{k}} = \frac{3}{4}[\text{mA}]
 \end{aligned}$$

■

• 테브난의 정리(Thevenin's Theorem)

- 어떠한 구조를 갖는 회로망도 하나의 전압원 V_{th} 와 저항 R_{th} 로 대치 가능
 $\Rightarrow$ 테브난의 정리(Thevenin's theorem)
- 그림 1.58의 선형회로망에 대한 그림 1.52의 테브난 등가회로 유도

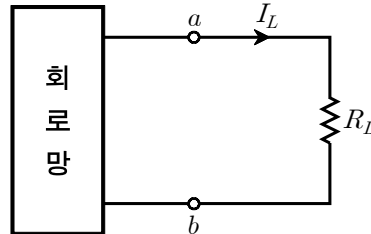


그림 1.58 선형 회로망

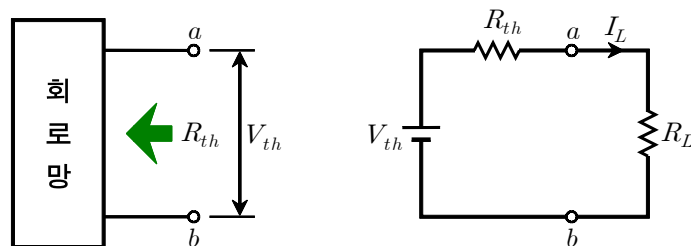


그림 1.59 테브난 등가회로 유도

- 그림 1.59(a)와 같이 단자 a-b를 개방했을 때 두 단자 사이에 나타나는 전압
 $\Rightarrow$ 테브난 등가전압 V_{th}
- 회로망내의 전압원은 단락, 전류원은 개방하고 회로망 쪽으로 본 합성저항
 $\Rightarrow$ 테브난 등가저항 R_{th}
- 그림 1.59(b)의 테브난 등가회로로부터 부하를 통해 흐르는 부하전류 계산
 $\Rightarrow$ 부하에 공급되는 부하전력 계산

$$I_L = \frac{V_{th}}{R_{th} + R_L} \quad (1.38)$$

$$P_L = I_L^2 R_L \quad (1.39)$$

【예제 1.22】 그림 1.60의 회로에 대한 테브난 등가전압 V_{th} 와 등가저항 R_{th} 를 구하시오.

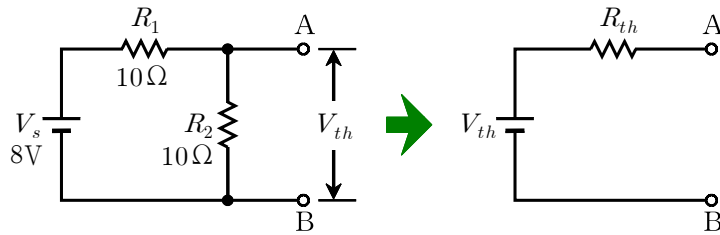


그림 1.60 예제 1.22의 회로

$$V_{th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_s = \frac{10}{10 + 10} \times 8 = \frac{10}{20} \times 8 = 4[\text{V}]$$

$$R_{th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10 \times 10}{10 + 10} = \frac{100}{20} = 5[\Omega]$$

■

【예제 1.23】 그림 1.61의 회로에서 테브난 등가회로를 이용하여 부하저항 R_L 에 흐르는 전류 I_L 을 구하시오.

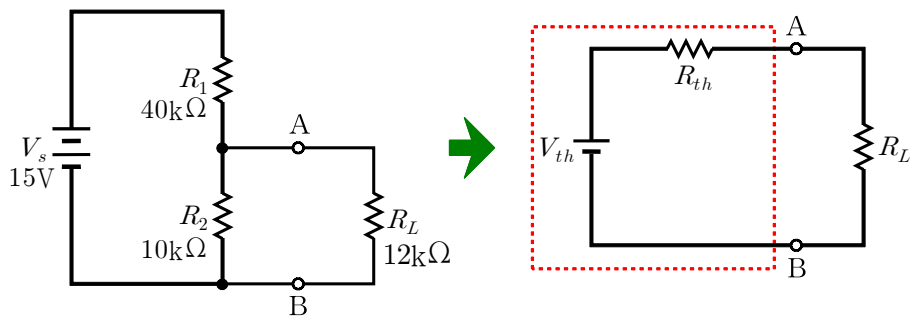


그림 1.61 예제 1.23의 회로

$$V_{th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_s = \frac{10}{40 + 10} \times 15 = \frac{10}{50} \times 15 = \frac{150}{50} = 3[\text{V}]$$

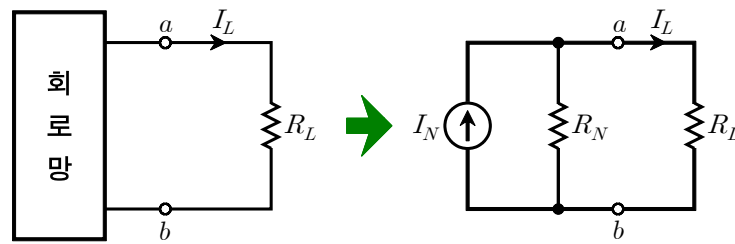
$$R_{th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{40 \times 10}{40 + 10} = \frac{400}{50} = 8[\text{k}\Omega]$$

$$\therefore I_L = \frac{V_T}{R_T + R_L} = \frac{3}{(8 + 12) \times 10^3} = 0.15[\text{mA}]$$

■

• 노턴의 정리(Norton's Theorem)

- 임의의 2단자 회로를 하나의 전류원과 병렬접속된 하나의 저항으로 대치 가능
 $\Rightarrow$ 노턴의 정리(Norton's theorem)
- 그림 1.62(a)의 선형회로망을 그림 1.62(b)의 노턴 등가회로로 변환



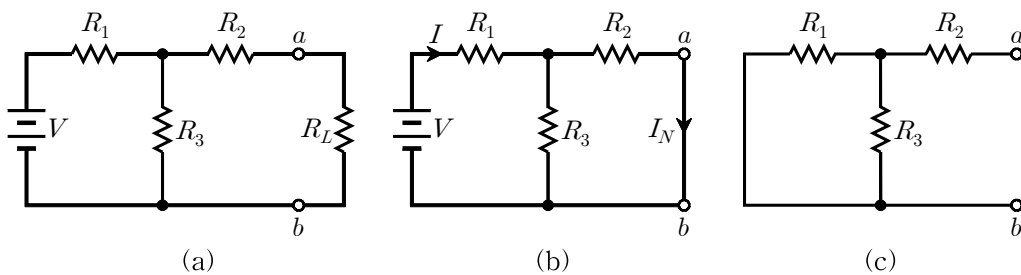
(a) 선형회로망

(b) 등가회로

그림 1.62 노턴의 등가회로 변환

- 전류 I_N 은 단자 $a-b$ 를 단락했을 때 두 단자 사이를 통해 흐르는 전류
- R_N 은 회로망 내의 모든 전원을 제거하고 $a-b$ 에서 회로망 쪽으로 본 합성저항

【예제 1.24】 그림 1.63의 회로에 대해 노턴의 등가저항 R_N 과 전류원 I_N 을 구하시오.



(a)

(b)

(c)

그림 1.63 예제 1.24의 회로

- 그림 1.63(b)에서 전류 I_N 을 계산하고, 그림 1.63(c)에서 저항 R_N 계산

$$R = R_1 + (R_2 \parallel R_3) = R_1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad I = \frac{V}{R}$$

$$I_N = \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) I, \quad R_N = R_2 + R_1 \parallel R_3 = R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}$$

■

【예제 1.25】 그림 1.64에서 저항 R_3 에 흐르는 전류를 노턴의 정리를 이용하여 계산.

단, $V_1 = 24[\text{V}]$, $V_2 = 42[\text{V}]$, $R_1 = 3[\Omega]$, $R_2 = 6[\Omega]$, $R_3 = 2[\Omega]$

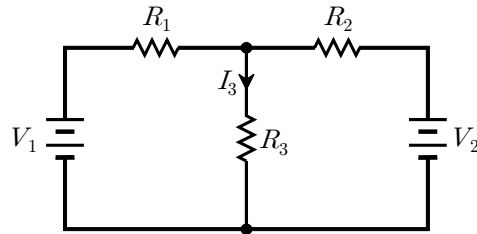


그림 1.64 예제 1.25의 회로

- 그림 1.65의 회로에서 전압원 V_1 과 V_2 를 전류원으로 등가변환

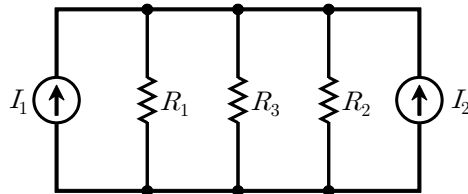


그림 1.65 전압원을 전류원으로 변환

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{24}{3} = 8[\text{A}], \quad I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{42}{6} = 7[\text{A}]$$

- 그림 1.66의 회로를 변환하여 노턴의 등가회로 구성

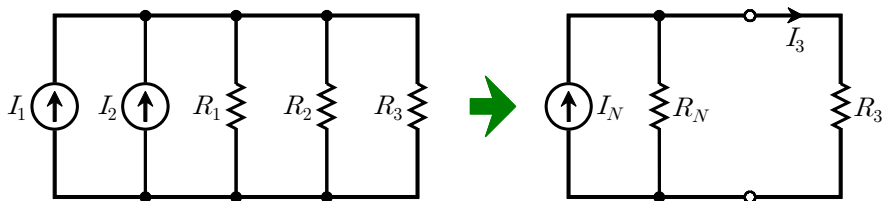


그림 1.66 노턴의 등가회로 변환

$$I_N = I_1 + I_2 = 8 + 7 = 15[\text{A}]$$

$$R_N = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{3 \times 6}{3 + 6} = \frac{18}{9} = 2[\Omega]$$

$$\therefore I_3 = \left(\frac{R_N}{R_N + R_3} \right) I_N = \frac{2}{2 + 2} \times 15 = \frac{30}{4} = 7.5[\text{A}]$$

■

1.3 정전회로

⊙ 정전력(Electrostatic Force)

• 전하 상호간의 작용력

- 두 개의 전하 또는 대전체를 인접해 놓으면 상호간에 전기적인 힘이 작용
 - ⇒ 동일 극성의 전하들 사이에는 서로 밀어내는 반발력(척력) 작용
 - ⇒ 다른 극성의 전하들 사이에는 서로 끌어당기는 흡인력(인력) 작용

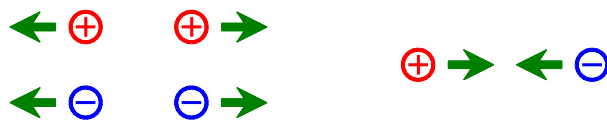


그림 1.67 전하 상호간의 작용력

• 쿨롱의 법칙(Coulomb's Rule)

- 진공상태에서 두 대전체 사이에는 두 대전체를 연결하는 선상으로 전기력 작용
 - ⇒ 크기는 두 대전체의 전하량의 곱에 비례하고 거리의 제곱에 반비례
 - ⇒ Q_1, Q_2 : 전하량, r : 대전체 사이의 거리, k : 비례상수
 - ⇒ ϵ_0 : 진공 상태의 유전율(permittivity or dielectric constant)

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} [\text{N}] \quad (1.40)$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \times 10^9} \doteq 8.855 \times 10^{-12} [\text{F/m}], \quad k = 9 \times 10^9 [\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2]$$

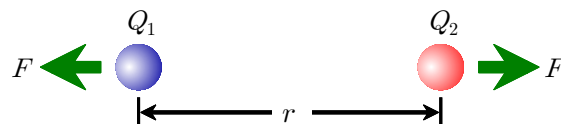


그림 1.68 쿨롱의 법칙

• 전계(Electric Field)

- 대전체 주위에 점전하를 놓으면 점전하에 전기적인 힘이 작용
 - ⇒ 대전체 주위의 전기적인 힘이 미치는 공간
 - ⇒ 전계(電界, electric field)

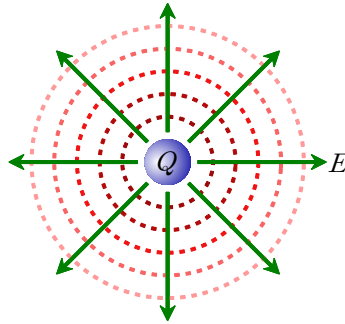


그림 1.69 전계(전기장)

- 진공 중에 $Q[\text{C}]$ 의 대전체가 만드는 전계 내에 $+1[\text{C}]$ 의 단위전하를 놓았을 때
 - ⇒ $+1[\text{C}]$ 의 단위전하가 받는 힘의 세기
 - ⇒ 전계의 세기(intensity of electric field)

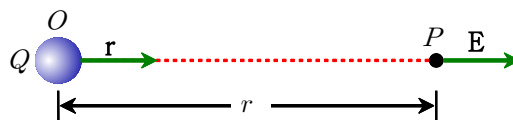


그림 1.70 전계의 세기

$$E = F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q \cdot 1}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} [\text{V/m}] \quad (1.41)$$

• 전위(Electric Potential)

- 전계 내에서 단위전하를 전계와 반대방향으로 이동시키고자 하는 경우
 - ⇒ 전계의 세기와 크기는 같고 방향은 반대인 힘이 필요
 - ⇒ 외부에서 전계에 대한 일(에너지)이 필요
- $+1[\text{C}]$ 의 전하를 무한원점에서 임의의 P 점까지 이동시키는데 필요한 에너지
 - ⇒ $Q[\text{C}]$ 의 점전하가 만드는 전계 $\mathbf{E}$ 내에서의 전기적 위치에너지
 - ⇒ 전계 내의 임의의 지점에서의 전위(electric potential)
 - ⇒ 전계의 세기가 0인 무한원점은 기준 영전위

- $Q[C]$ 의 점전하에 의한 전기장 E 내에서 r 만큼 떨어진 임의의 P 점에서의 전위

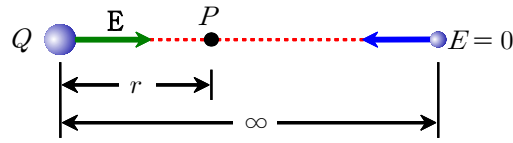


그림 1.71 전기장 내에서의 전위

$$V_P = - \int_{\infty}^r E dr = - \int_{\infty}^r \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} [V] \quad (1.42)$$

- 점전하 Q 가 만드는 전기장 내에서 전기장의 세기와 전위 사이의 관계
 $\Rightarrow$ 전하 Q 로부터 $r[m]$ 떨어진 지점에서의 전위 및 전기장

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} [V/m], \quad W = F \cdot d$$

$$V = E \cdot r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \cdot r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} [V/m \cdot m = V]$$

• 전위차(Difference of Electric Potential)

- $+1[C]$ 의 단위전하를 한 지점에서 다른 지점으로 이동시키는데 필요한 에너지
 $\Rightarrow$ 두 지점 사이의 전기적인 위치에너지의 차이
- 점전하 Q 로부터 $r_1[m]$ 및 $r_2[m]$ 떨어진 A 지점과 B 지점 사이의 전위차
 $\Rightarrow$ 단위전하를 B 지점에서 A 지점까지 이동시키는데 필요한 에너지

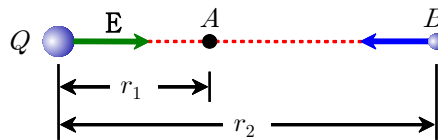


그림 1.72 전기장 내에서의 전위차

$$\begin{aligned} V_{AB} &= - \int_{r_2}^{r_1} E dr = - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_2}^{r_1} \frac{1}{r^2} dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{r} \right]_{r_2}^{r_1} \\ &= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_1} - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_2} = V_A - V_B \end{aligned} \quad (1.43)$$

◎ 유전체(Dielectric Material)

- 절연체에는 자유전자가 없고 구속전자들이 원자력이나 분자력에 의해 구속
⇒ 절연체 내의 전하는 도전 작용에 기여 불가
- 절연체 중에서 전계를 가하면 양과 음의 전하들 서로 간에 약간의 변위 발생
⇒ 전기쌍극자를 형성하고, 새로운 전계가 형성되어 전기 작용에 영향
⇒ 절연체 중에서 분극작용에 의해 전기적인 작용을 일으키는 물질
⇒ 유전체(誘電體)

• 무극성 유전체

- 절연물질을 구성하고 있는 분자들이 전기쌍극자를 가지고 있지 않는 유전체
⇒ 전계를 가하면 분자 내의 전하가 분극을 일으켜 전기쌍극자 형성
⇒ 전기쌍극자들이 전계 내에서 전계와 나란히 정렬

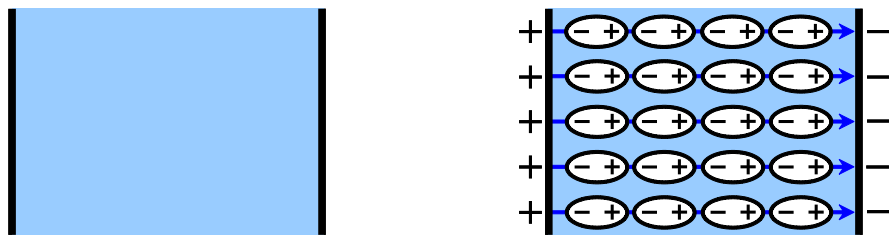


그림 1.73 무극성 유전체의 분극현상

• 극성 유전체

- 절연물질을 구성하고 있는 분자들이 고유의 전기쌍극자를 가지고 있는 유전체
⇒ 전계를 가하지 않으면 유전체 내의 전기쌍극자들이 무질서하게 분포
⇒ 전계를 가하면 전기쌍극자들이 전계와 나란히 정렬

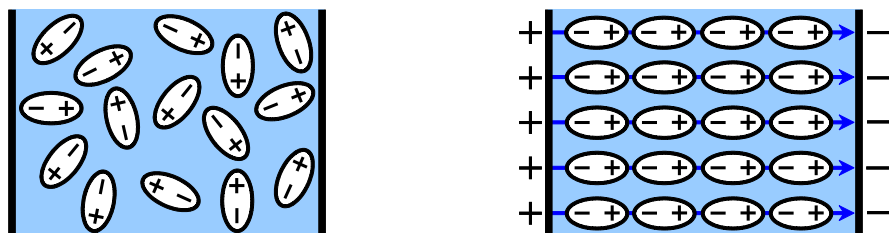


그림 1.74 극성 유전체의 분극현상

• 유전율(Permittivity)

- 전계가 매질(유전체)에 의해 얼마나 영향을 받는지를 나타내는 물리적인 척도
 - ⇒ 유전율(permittivity) 또는 유전상수(dielectric constant)
 - ⇒ 유전체가 얼마만큼의 전하를 저장할 수 있는 가를 나타내는 지표
 - ⇒ 같은 양의 물질이라도 유전율이 크면 더 많은 전하를 저장

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (1.44)$$

ϵ_0 : 진공상태의 유전율(permittivity)

ϵ_r : 비유전율(relative permittivity)

- 식 (1.44)에서 ϵ_r 은 진공상태의 유전율에 대한 다른 매질에서의 유전율의 비

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1.45)$$

표 1.2 유전체의 비유전율

물질	비유전율
공기	1.0006
종이	2.0~4.0
고무	2.3~2.6
석영	3.5~4.0
유리	4.4~10
운모	5.5
소금	5.5~5.8

◎ 정전용량 및 캐패시터

• 정전용량(Capacitance)

- 절연되어 있는 두 도체 사이에 1[V]의 전위차가 발생할 때 축적되는 전하량
 $\Rightarrow$ 전위차(전압) $V[V]$ 에 대한 전하량 $Q[C]$ 의 비
 $\Rightarrow$ 정전용량(Capacitance), 패럿[Farad, F]

$$C = \frac{Q}{V} [C/V = F] \quad (1.46)$$

- 정전용량은 전위차나 전하량과는 무관하며 유전체의 유전율에 의해 결정
 $\Rightarrow$ 면적 $S[m^2]$, 거리 $d[m]$ 인 두 도체 사이에 유전체가 채워진 경우
 $\Rightarrow$ 두 평행 평판 도체 사이의 정전용량

$$C = \epsilon \frac{S}{d} [F] \quad (1.47)$$

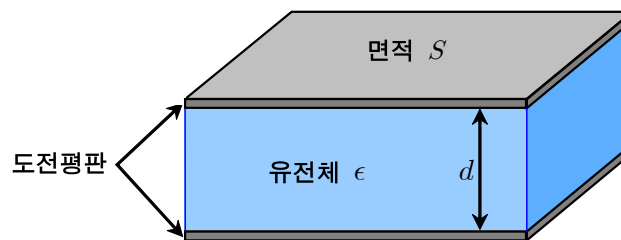


그림 1.75 평행 평판 도체 사이의 정전용량

【예제 1.26】 한 변이 50[cm]인 정사각형 전극을 가진 평판 콘덴서가 있다. 극판 간격이 5[mm]일 때 정전용량은? 단, 극판 사이는 진공상태이다.

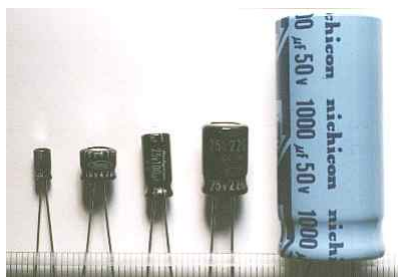
$$\epsilon_0 = 8.855 \times 10^{-12} [F/m], \quad d = 5[mm] = 5 \times 10^{-3} [m], \quad S = 0.5^2 = 0.25 [m^2]$$

$$\therefore C = \epsilon_0 \frac{S}{d} = 8.855 \times 10^{-12} \times \frac{25 \times 10^{-2}}{5 \times 10^{-3}} = 44.3 \times 10^{-11} [F] = 443 [pF]$$

■

• 캐패시터(Capacitor)

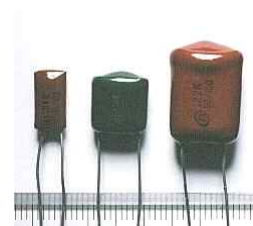
- 두 평행 평판 도체 사이에 유전체를 넣어 전하를 축적할 수 있도록 만든 소자
⇒ 충전과 방전 작용을 하며, 직류는 차단하고 교류는 통과
- 콘덴서에는 용량을 늘리기 위해 사용하는 유전체에 따라 많은 종류가 존재
⇒ 용량, 내전압, 주파수 특성, 누설전류, 내부저항 등 다양한 특성
- 전해콘덴서나 탄탈콘덴서는 극성이 있는 극성콘덴서
⇒ (-)부호가 붙어 있거나 부품의 다리가 짧은 쪽이 (-)극성
⇒ 콘덴서의 정전용량과 정격전압은 콘덴서 표면에 표시
- 세라믹콘덴서나 마일러콘덴서는 극성이 없는 무극성 콘덴서
⇒ 정전용량은 3자리의 숫자와 1자리 영문자로 구성
⇒ 왼쪽 2자리는 유효숫자, 3번째 자리는 10의 누승을 표시
⇒ 영문자는 허용오차, J : $\pm 5\%$, K : $\pm 10\%$, M : $\pm 20\%$
⇒ 기본 단위는 피코패럿($\text{pF} = 10^{-12}$)을 사용



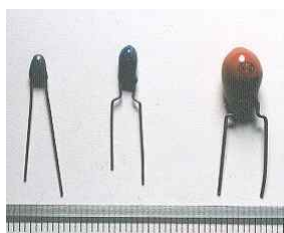
(a) 전해콘덴서



(b) 세라믹콘덴서



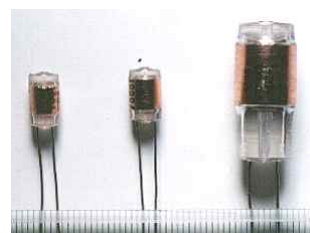
(c) 마일러콘덴서



(c) 탄탈콘덴서



(c) 마이카콘덴서

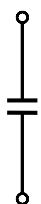


(c) 스티롤콘덴서

그림 1.76 콘덴서의 종류



(a) 극성콘덴서



(b) 무극성 콘덴서



(c) 가변콘덴서

그림 1.77 콘덴서의 기호

◎ 캐패시터의 연결

• 직렬연결(Series Connection)

- 두 캐패시터 C_1, C_2 를 직렬연결하고 A, B 단자 간에 전압 V 를 인가
 $\Rightarrow$ 정전유도에 의해 각 캐패시터의 극판에 전하 Q 가 축적
 $\Rightarrow$ 각 캐패시터의 전압이 V_1, V_2 일 때 합성 정전용량 C

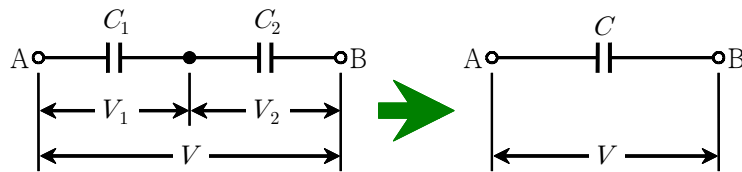


그림 1.78 직렬 연결된 캐패시터의 합성 정전용량

$$\begin{aligned}
 V_1 &= \frac{Q}{C_1}, \quad V_2 = \frac{Q}{C_2} \\
 V &= V_1 + V_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) Q = \frac{Q}{C} \\
 \frac{1}{C} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}, \quad C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} [\text{F}]
 \end{aligned} \tag{1.48}$$

- n 개의 캐패시터를 직렬 접속한 경우의 등가 직렬 합성 정전용량 C

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n} [\text{F}] \tag{1.49}$$

【예제 1.27】 3개의 캐패시터 $4[\mu\text{F}]$, $6[\mu\text{F}]$, $8[\mu\text{F}]$ 를 직렬 접속한 경우의 합성 정전용량을 계산하시오.

$$\begin{aligned}
 C_1 &= 4[\mu\text{F}], \quad C_2 = 6[\mu\text{F}], \quad C_3 = 8[\mu\text{F}] \\
 \frac{1}{C} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{4} + \frac{1}{6} + \frac{1}{8} = \frac{6+4+3}{24} = \frac{13}{24} \\
 \therefore C &= \frac{24}{13} = 1.846[\mu\text{F}]
 \end{aligned}$$

■

• 병렬연결(Parallel Connection)

- 두 캐패시터 C_1, C_2 를 병렬연결하고 A, B 단자 간에 전압 V 를 인가
 $\Rightarrow$ 캐패시터 C_1 에는 전하 Q_1 , C_2 에는 전하 Q_2 가 축적
 $\Rightarrow$ 캐패시터 C_1, C_2 의 전압은 단자전압과 동일

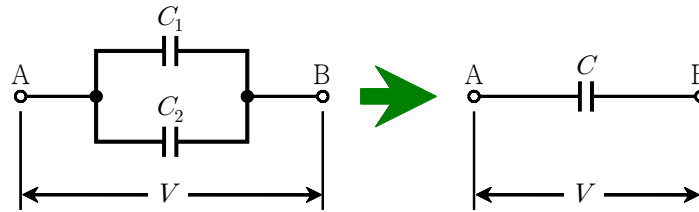


그림 1.79 병렬 연결된 캐패시터의 합성정전용량

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= C_1 V, \quad Q_2 = C_2 V \\
 Q &= Q_1 + Q_2 = C_1 V + C_2 V = (C_1 + C_2) V = CV \\
 C &= C_1 + C_2 [\text{F}]
 \end{aligned} \tag{1.50}$$

- n 개의 캐패시터를 병렬 접속한 경우의 등가 병렬 합성 정전용량 C

$$C = C_1 + C_2 + \cdots + C_n [\text{F}] \tag{1.51}$$

- 각 캐패시터에 축적되는 전하는 캐패시터의 용량에 비례하여 분배

$$Q_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} Q, \quad Q_2 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} Q [\text{C}] \tag{1.52}$$

【예제 1.28】 $2[\mu\text{F}]$ 의 캐패시터를 $80[\text{V}]$, $2[\mu\text{F}]$ 의 캐패시터를 $50[\text{V}]$ 로 충전하고 병렬로 접속한 경우의 전위차는?

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= C_1 V_1, \quad Q_2 = C_2 V_2, \quad Q = Q_1 + Q_2 = C_1 V_1 + C_2 V_2, \quad C = C_1 + C_2 \\
 \therefore V &= \frac{Q}{C} = \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2}{C_1 + C_2} = \frac{2 \times 80 + 2 \times 50}{2 + 2} = \frac{260}{4} = 65 [\text{V}]
 \end{aligned}$$

■

• 캐패시터 전압

- 식 (1.46)로부터 캐패시터에서의 전압강하 V_C 는 충전 전하량 Q 에 비례

$$V_C = \frac{Q}{C} \quad (1.53)$$

- 일정 전류의 경우 전류는 전하가 단위면적을 통과했을 때의 전하량으로 표시
 $\Rightarrow$ 시간의 변화에 대한 전하량 변화의 비로 표시

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} [\text{A}] \quad (1.54)$$

- 전류가 일정하지 않은 경우 미소 시간 변화에 대한 미소 전하량 변화의 비

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} \quad (1.55)$$

- 교류전류 $i(t)$ 가 캐패시터를 통해 흐를 때 캐패시터에서의 전압강하
 $\Rightarrow$ 회로 전류의 적분값에 비례

$$\begin{aligned} dQ &= i(t) dt, \quad Q(t) = \int i(t) dt, \quad v_C(t) = \frac{Q(t)}{C} \\ v_C(t) &= \frac{1}{C} \int i(t) dt \end{aligned} \quad (1.56)$$