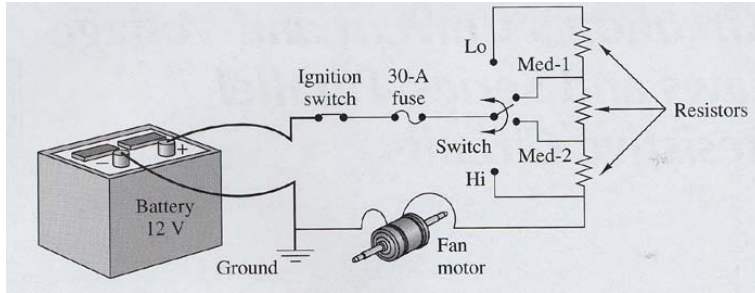


## Car Heater Fan Speed-Control Application



- 차의 풍량 조절을 위해 손잡이를 돌리면 저항 값이 바뀐다.
- 전동기의 전류가 바뀌면서 풍량이 바뀐다.
- 이런 저항 회로를 해석하기 위하여 **KCL**, **KVL** 등의 회로이론을 도입하여 회로를 다룬다.

## Maxwell Equations

미분형

적분형

**Gauss** 법칙

$$\vec{\nabla} \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho$$

$$\oint_S \epsilon \vec{E} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho dV$$

자속 보존의 법칙

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

**Ampere**의 둘레법칙

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial(\epsilon \vec{E})}{\partial t}$$

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} + \frac{\partial \int_S \epsilon \vec{E} \cdot d\vec{S}}{\partial t}$$

**Faraday**의  
전자유도법칙

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}}{\partial t}$$

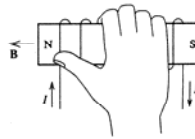
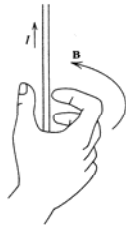
전하 보존의 법칙

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

$$\oint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} + \frac{\partial \int_V \rho dV}{\partial t} = 0$$

## 암페어 둘레 법칙과 패러데이 전자 유도 법칙

- 암페어가 발견한 암페어 둘레 법칙은 전류가 흐르는 도선 주위에는 자계(磁界)가 형성된다는 것이다.
- 이때 자계의 방향은 오른손을 사용하여 정할 수 있는데 오른손의 엄지 손가락을 도선의 전류방향에 맞추면 다른 손가락의 방향이 자계의 방향을 나타낸다.
- 패러데이 전자 유도 법칙은 도선으로 코일을 만든 후 코일면을 통과하는 자속을 시간적으로 변화(예를 들어, 자석을 가까이 했다 멀리했다 하는 것)시키면 코일의 양단에는 전압이 발생되는 것을 의미한다.
- 이 전압을 유기(誘起)전압이라 한다.



## 회로 이론의 가정

- 회로 이론은 전자기학의 일부.
- 가정을 통해 이론을 단순화.
- 회로 이론을 적용할 때에는 가정을 만족하는 지를 따져야 한다.

### 가정

(1) 전파(傳播) 효과가 무시될 만큼 계가 작다.

즉, 계가 순간적으로, 동시에 변화한다 → 집중정수 계.

(2) 계에 알짜 전하는 없다.

(3) 계의 구성 부품 간에 자기적인 결합은 없다.

## 전하 보존의 법칙

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad \oint \vec{J} \cdot d\vec{s} + \frac{\partial \int_V \rho dv}{\partial t} = 0$$

- 가정 (2) 는 회로에 알짜 전하가 없으므로 제 2 항의 전하 밀도가 영이다.

$$\rho = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

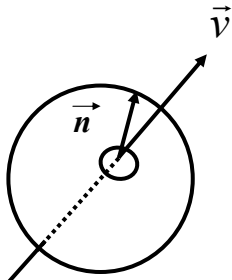
따라서,  $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$ .

이것의 의미는 무엇인가?

발산(**divergence**)이 영이라는 것의 의미는?

## Divergence

- 발산(**Divergence**)은 부피 개념이다.
- 어떤 영역의 부피를 통과하며 나가는 알짜 양을 나타내는 것이 발산이다.
- 어떤 영역으로 들어오는 양과 나가는 양이 같으면 발산은 영이다.
- 들어오는 양보다 나가는 양이 많으면 발산은 양이다.



$$\oint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} + \frac{\partial \int_V \rho dV}{\partial t} = 0$$

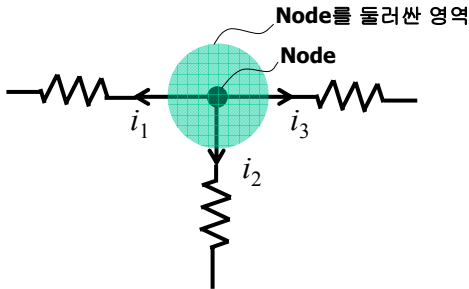
$\vec{\nabla} \cdot \vec{v}$ : 발산(스칼라량)

- 서울대라는 울타리(영역) 안으로 들어오는 학생이 나가는 학생보다 많으면 발산은 음이 된다.
- 만약, 서울대 울타리 안에서 사람이 소멸하거나 생겨나지 않는다면(전하가 보존되는 것과 같다) 서울대 울타리 안의 사람 밀도는 계속(시간적으로) 증가할 것이다.
- 이것을 나타내는 것이 연속 방정식, 전하 보존의 법칙 이다.

## Kirchhoff's Current Law (KCL)

- 회로에 알짜 전하는 없음. 양의 전하와 음의 전하가 같은 양으로 존재.
- 전하 보존의 법칙에서 제 2 항이 영.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \Rightarrow \oint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = 0$$



- 회로에서는 전류가 존재하는 곳이 도선뿐이다.
- 따라서, 영역의 표면 면적분이 도선에 흐르는 전류의 합으로 표현된다.

$$\oint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = 0 \Rightarrow \sum_j i_j = 0$$

## Faraday의 전자유도 법칙

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}}{\partial t}$$

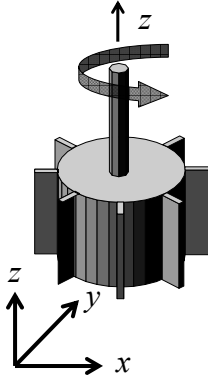
- 가정 (3) 은 구성 부품간의 자기적인 결합이 없으므로 회로가 만드는 면을 통과하는 자속의 시간적인 변화가 영이다.

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0.$$

- 따라서,  $\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0.$
- 회전(rotation)이 영이라는 것은 무엇을 의미하는가?

## Rotation

- 회전(Rotation)은 면 개념이다.
- 바람 개비 모양의 수차(水車)를 흐르는 물에 담갔을 때 수차가 돈다면 수차의 축 방향 회전이 영이 아니다.
- 즉,  $x$ - $y$  평면상으로 흐르는 물에 수차를 담갔다면  $z$  방향 회전 성분이 있다는 것이다.



$$(\vec{\nabla} \times \vec{v})_z \neq 0 \quad \vec{\nabla} \times \vec{v} : \text{회전 (벡터양)}$$

회전은 벡터이므로 수차를  $x$ - $y$  평면,  $y$ - $z$  평면,  $z$ - $x$  평면에 담가서 각 축이 회전하는 양을 보고 이를 그 방향 성분으로 하면 회전( $\vec{\nabla} \times \vec{v}$ )을 나타내는 것이다. 수차를 회전시키는 힘은 수차 들레에 있는 날개에 가해지는 힘을 적분한 것과 같다.

### Stoke's theorem

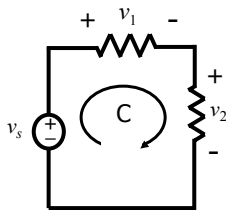
$$\int_S \vec{\nabla} \times \vec{v} \cdot d\vec{S} = \oint_C \vec{v} \cdot d\vec{l}$$

## Kirchhoff's Voltage Law (KVL)

- 회로에 가해지는 자계의 시간적인 변화는 없다.

Faraday의 전자 유도 법칙에서 우변이 영.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \Rightarrow \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$



- 회로가 만드는 면을 통과하는 자계의 시간적인 변화가 영이면 회로를 따라서 전계를 적분하면 영이 된다.

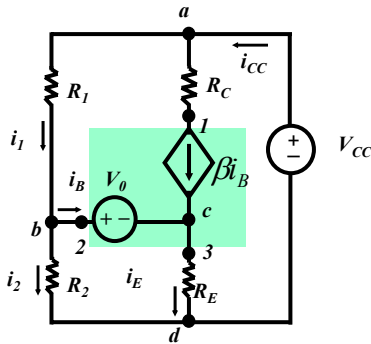
- 그런데, 전계가 존재하는 곳은 소자에서만 이므로 회로의 선적분은 소자에서의 전압 강하의 합으로 표현된다.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \Rightarrow \sum_j v_j = 0$$

- 회로에서 전계를 선적분할 때, 전압이 떨어지는 것을 양으로 하였다.
- 즉, 전압 강하(Voltage drop)가 양이다. 따라서, 그림의 회로의 경우, 다음과 같이 된다.

$$v_1 + v_2 + (-v_s) = 0$$

## 회로의 해석 예(KCL, KVL)



트랜지스터를 **dependent source**로 치환한 회로

Transistor :  $\beta i_B$ , 전류증폭.

$V_0$ , Transistor의 전압강하.

$$\text{node a: } (-i_{cc}) + i_1 + i_c = 0$$

$$\text{node b: } (-i_1) + i_2 + i_B = 0$$

$$\text{node c: } (-\beta i_B) + (-i_B) + i_E = 0$$

$$i_c = \beta i_B$$

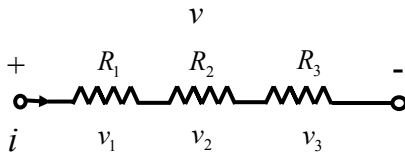
$$\text{closed path (bcdcb): } V_0 + R_E i_E + (-R_2 i_2) = 0$$

$$\text{closed path (badb): } (-R_1 i_1) + V_{cc} + (-R_2 i_2) = 0$$

**node**에서는 **KCL**,

**closed path**에서는 **KVL**을 적용한다.

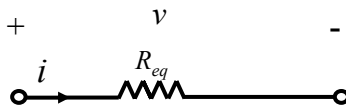
## 직렬 저항 회로



$$v = v_1 + v_2 + v_3$$

$$= R_1 i + R_2 i + R_3 i$$

$$= (R_1 + R_2 + R_3) i$$

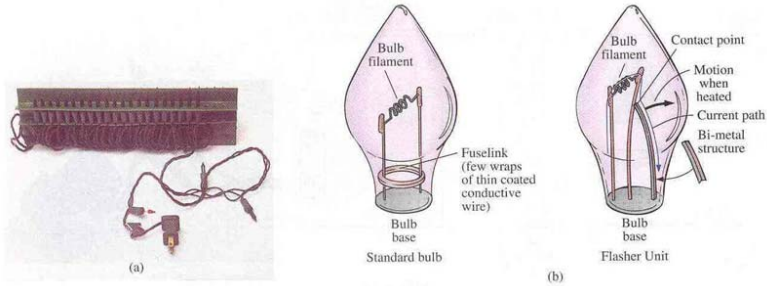


$$v = R_{eq} i$$

$$\therefore R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

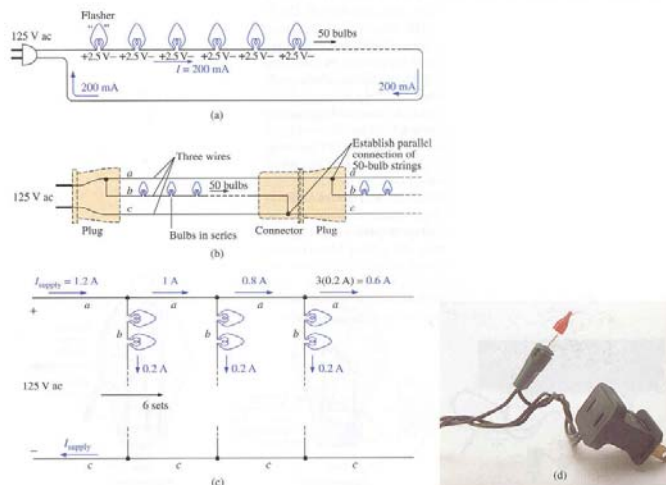
## Holiday Lights – Series Circuits (I)

- Bulb 정격 : 2.5 V at 0.2 A
- 50 개가 직렬로 연결.
- $50 \times 2.5 \text{ V} = 125 \text{ V}$ .
- 소모전력  $50 \times 2.5 \times 0.2 = 25 \text{ W}$
- 전구(그림 (b) flasher unit)가 반짝이는(켜졌다 꺼졌다 하는) 원리를 그림을 보고 설명해볼 것.
- 직렬로 연결된 전구 중 하나의 전구의 filament 가 끊어졌을 때 직렬로 연결된 모든 전구를 사용할 수 없다. 그러나, 그림의 전구 (a) 와 (b) 를 사용하면 다시 전류를 흐르게 할 수 있다. 그 원리는?



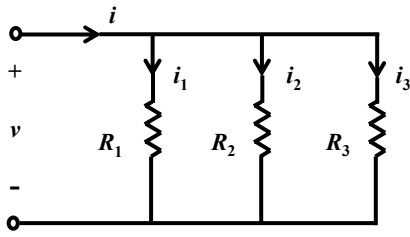
Holiday lights: (a) 50 unit set; (b) bulb construction  
Boylestad 책 151쪽 그림 5.62

## Holiday Lights – Series Circuits (II)



(a) Single-set wiring diagram; (b) special wiring arrangement;  
(c) redrawn schematic; (d) special plug and flasher unit  
Boylestad 책 152쪽 그림 5.63

## 병렬 저항 회로

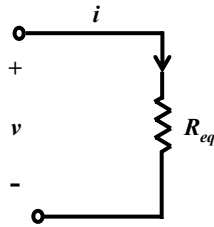


$$v = R_1 i_1 = R_2 i_2 = R_3 i_3$$

$$i_1 = \frac{v}{R_1}, \quad i_2 = \frac{v}{R_2}, \quad i_3 = \frac{v}{R_3}$$

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

$$= \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) v$$



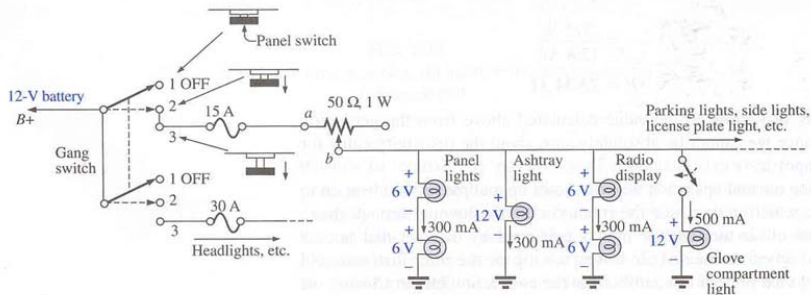
$$v = R_{eq} i$$

$$i = \frac{v}{R_{eq}}$$

$$\therefore \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = R_1 // R_2 // R_3 = G_{eq}$$

## Dimmer Control in Automobile – Parallel Circuits

- 누름 스위치를 누르면 켜진다.
- 이 스위치는  $50 \Omega$  rheostat과 dashboard의 여러 조명으로 연결된다.
- Rheostat의 위치를 a 에서 뒤로 움직이면 저항이 커지면서 전류가 작아지고 조명이 어두워진다.
- Panel light 는 큰 (12 V) bulb를 사용하지 않고, 두 개의 작은 (6 V) bulb 를 사용했다.  
- 이유: panel의 특정한 위치에 부드럽고, 균일한 조명을 발생한다.
- 12 V bulb 의 저항 =  $12 \text{ V} / 300 \text{ mA} = 40 \Omega$ .
- 6 V bulb 의 저항 =  $6 \text{ V} / 300 \text{ mA} = 20 \Omega$ .

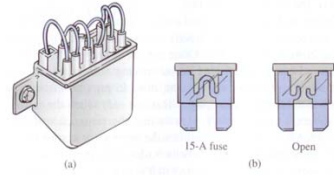


Dashboard dimmer control in an automobile  
Boylestad 책 88쪽 그림 3.40

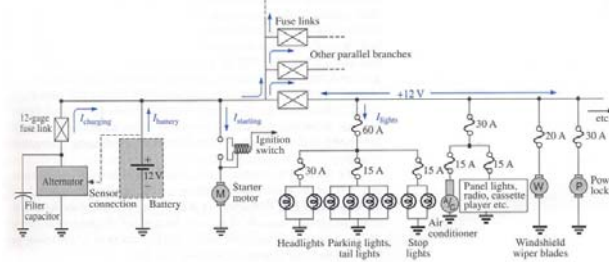


## Car System – Parallel Circuits

- 자동차의 전기 시스템은 직류 시스템.
- 시동을 걸 때, **500 A** 이상의 대전류가 **starter motor**로 흐른다.
- **Battery** 정격전류는 **700 ~ 1,000 A** 정도이다.
- **Fuse link** : **100 A** 이상의 전류가 흐르면 개방(**open**)된다.
- **Fuse** : 각 소자의 전류를 제한한다.
- 미국 차는 **ground** 로 차체를 사용한다. 즉, 회로에서 가는 선만 있고, 돌아오는 회선은 없고 차체를 이용한다.

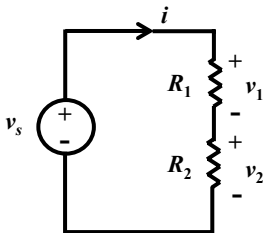


Car fuses : (a) fuse link; (b) plug-in.  
Boylestad 책 196쪽 그림 6.61



Expanded view of an automobile's electrical system  
Boylestad 책 195쪽 그림 6.60

## 분압(分壓) 회로



$$v_s = R_1 i + R_2 i$$

$$v_2 = R_2 i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_s$$

$$v_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_s, \quad v_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_s$$

따라서, 전압은 저항의 비율로 나뉘어진다.

$$R_L \text{을 연결하기 전에는} \quad v_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_s$$

$R_L$ 을 연결 후  $v_2 = ?$

$R_2 \rightarrow R_2$ 와  $R_L$ 이 병렬 연결.

$$R_{eq} = \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L}$$

$$v_2 = \frac{R_{eq}}{R_{eq} + R_1} v_s, \quad R_L \rightarrow \infty \text{이면 } R_{eq} = R_2$$

## Voltmeter – Loading Effect

- 10 kΩ의 저항과 voltmeter를 병렬로 연결하면 등가 저항은?

Voltmeter로는 DMM (11 MΩ)과 VOM(50 kΩ on 2.5 V scale)을 각각 이용하라.

**DMM**

$$R_T = 10 \text{ k}\Omega \parallel 11 \text{ M}\Omega = 9.99 \text{ k}\Omega$$

**VOM**

$$R_T = 10 \text{ k}\Omega \parallel 50 \text{ k}\Omega = 8.33 \text{ k}\Omega$$

- VOM은 ohm / volt rating으로 등급 지워진다.

이것은 전압계가 병렬로 연결될 때 병렬로 연결되는 저항 값을 나타낸다.

예를 들어, 20,000 Ω / V의 VOM으로 측정할 때 전압의 측정 범위에 따라 삽입 저항이 바뀐다.

$$2.5 \text{ V scale: } 2.5 \text{ V} \times 20,000 \text{ }\Omega/\text{V} = 50 \text{ k}\Omega$$

$$100 \text{ V scale: } 100 \text{ V} \times 20,000 \text{ }\Omega/\text{V} = 2 \text{ M}\Omega$$

$$250 \text{ V scale: } 250 \text{ V} \times 20,000 \text{ }\Omega/\text{V} = 5 \text{ M}\Omega$$

## Voltmeter – Ohm/Volt Rating

- 그림의 전압을 측정하라.

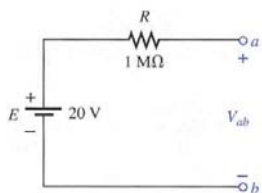
Voltmeter로는 DMM (내부저항 11 MΩ)과 VOM (20,000 Ω / V)을 각각 이용하여 측정하라.

(a) 개방시 단자 간 전압은?

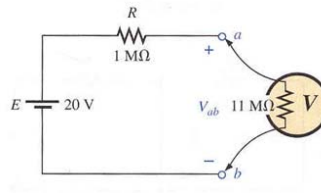
(b) 내부 저항이 11 MΩ인 DMM으로 측정하면 전압은?

(c) VOM (20,000 Ω / V)으로 측정하면 전압은?

Scale을 20 V와 100 V로 해서 각각 측정해보라.

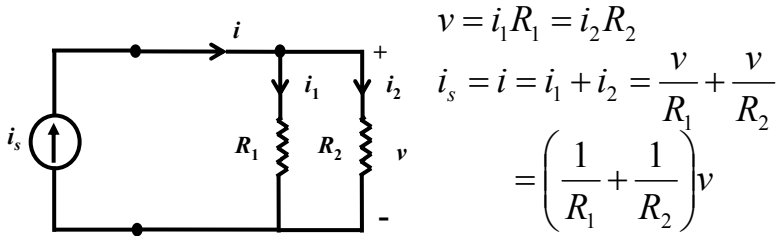


Example 6.26  
Boylestad 책 192쪽 그림 6.55



Applying a DMM to the circuit of Fig 6.55  
Boylestad 책 192쪽 그림 6.56

## 분류(分流) 회로



따라서,  $i_s$ 는 병렬회로  $R_1$ 과  $R_2$ 로 나누어져 흐른다.

$$i_2 = \frac{v}{R_2} = \frac{1}{R_2} \cdot \frac{i_s}{\left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} = \frac{\frac{1}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \cdot i_s$$

$$i_1 = \frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \cdot i_s$$

## Circuit Elements - Independent Sources

### - Voltage and current sources

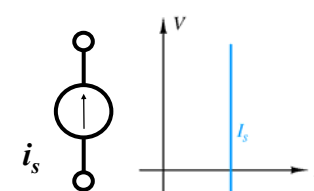
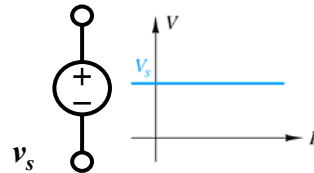
**Source** : non-electric energy를 electric energy로 변환.

**independent** : 회로내의 전류와 전압에 관계없이 불변.

**dependent** : 회로내의 전류와 전압에 따라 변화.

- **Ideal independent voltage source** : 전압원 내의 전류 값에 관계없이 지시된 전압  $v_s$ 를 유지.

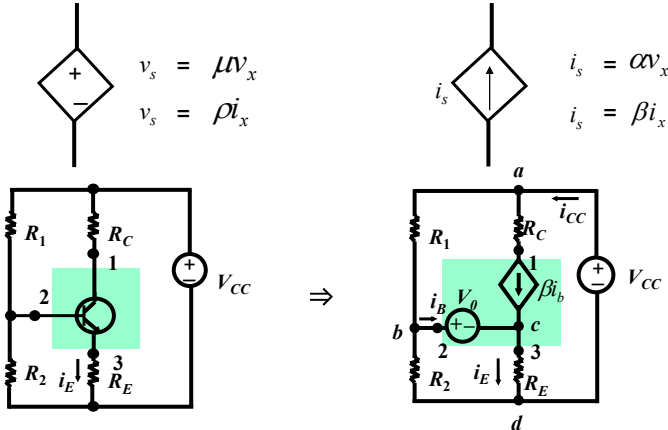
- **Ideal independent current source** : 전류원 내의 전압 값에 관계없이 지시된 전류  $i_s$ 를 유지.



# Circuit Elements - Dependent Sources

- Ideal dependent voltage and current sources.

회로의 다른 곳의 전압 또는 전류 ( $v_x, i_x$ )에 의해서 변화.



트랜지스터 증폭회로

트랜지스터를 dependent source로 치환한 회로

# Dependent Sources

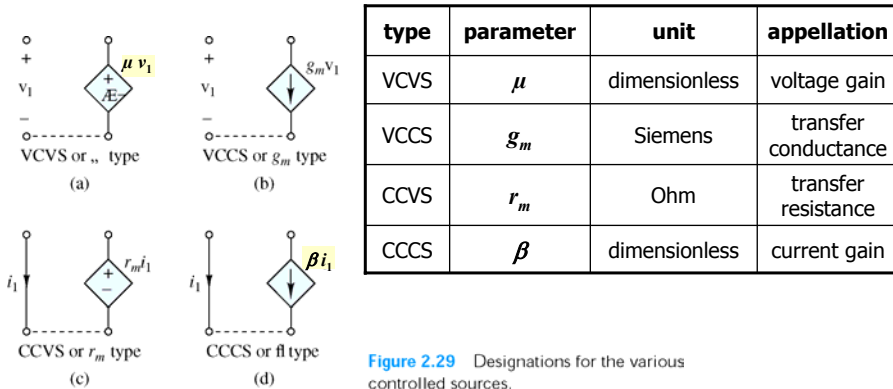
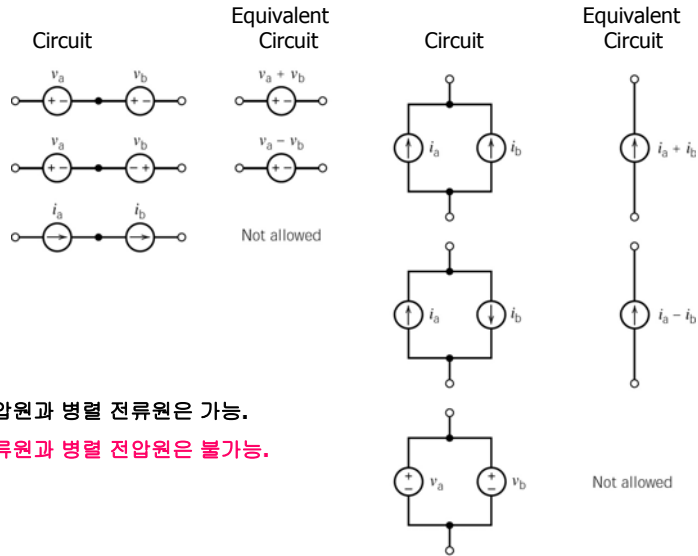


Figure 2.29 Designations for the various controlled sources.

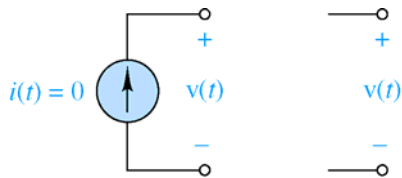
- Dependent source : potential of generating power  $\Rightarrow$  Active element

## 직렬 전압원과 병렬 전류원



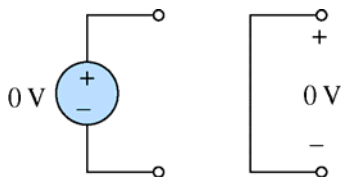
- 직렬 전압원과 병렬 전류원은 가능.
- 직렬 전류원과 병렬 전압원은 불가능.

## Ideal Independent Sources



**Figure 2.7** Ideal current source with  $i(t) = 0$  is an open circuit.

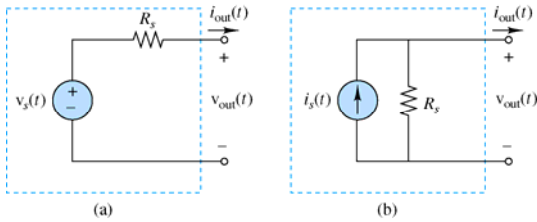
전류원의 내부 저항은 무한대.



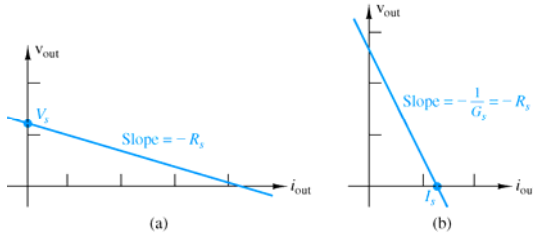
**Figure 2.17** A 0-V voltage source is equivalent to a short circuit.

전압원의 내부 저항은 0.

## Non-ideal Sources



**Figure 2.36** (a) Nonideal voltage source as an ideal voltage source with an internal series resistance. (b) Nonideal current source as an ideal current source with a parallel internal resistance.



$$v_{out} = -R_s i_{out} + V_s$$

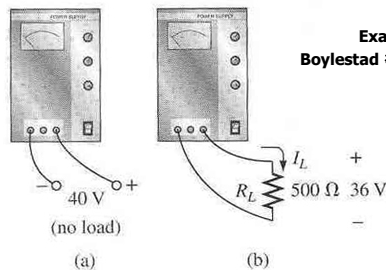
**(non-ideal voltage source)**

$$i_{out} = -G_s v_{out} + I_s$$

**(non-ideal current source)**

## Internal Resistance of Source

- 부하가 연결되기 전에 전압원의 전압이 40 V 이었다.
- 500 Ω의 저항을 연결하니 전압이 36 V 로 떨어졌다.
- 왜 이런 현상이 일어나는가?
- 전원의 내부저항은 얼마인가?
- 500 Ω 보다 큰 부하 저항을 연결할 때와 작은 저항을 연결할 때 전압은 어떻게 변할 것인가?



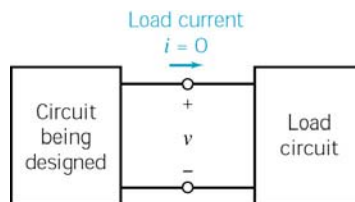
**Example 5.1**  
Boylestad 책 147쪽 그림 5.54

## Adjustable Voltage Source (I)

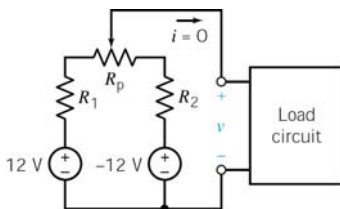
- 회로에서 전압이 조정되는 전압원이 필요하다.
- 사양 :
  - - 5 V 와 +5 V 사이의 전압이어야 한다.
  - 부하전류는 무시할 만큼 작다.
  - 회로는 가능한 한 적은 전력을 사용해야 한다.
- 사용 가능한 부품
  - Potentiometers : 10 k $\Omega$ , 20 k $\Omega$ , and 50 k $\Omega$ .
  - 저항: 10  $\Omega$ 에서 1 M $\Omega$ 사이의 표준 2% 저항들.
  - 두 전압원 : 12 V 1 개, -12 V 1 개, 정격 전류는 각각 100 mA.

## Adjustable Voltage Source (II)

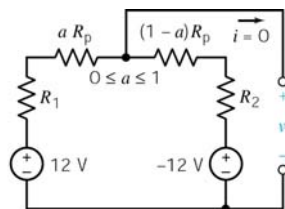
- $v$  는 - 5 V 와 +5 V 사이의 전압이어야 한다.
- $i$  는 영이다.
- 저항 1과 저항 2의 저항 값을 같게 하고, 가변 저항을 사용한다.
- 분압 회로를 이용하여  $v$  를 구한다.
- 소모 전력과 전류를 구한다.



The circuit being designed provides an adjustable voltage,  $v$  to the load circuit.



(a)



(b)

(a) A proposed circuit for producing the variable voltage,  $v$ , and (b) the equivalent circuit after the potentiometer is modeled.