2008 Spring Lecture Schedule

Course No.	420.213	Section No.	002	Course title	Circuit Theory I	Credits	4

Lectures	Class days	TUE & THUR	Hours	14:30 - 15:45	Room	301-202	Credits	3
Lab sessions	Class days	TUE	Hours	18:30 - 20:30	Room	301-308	Credits	1

Lecturor	Name :	Kim Yong-Kweon (professor)	Web page :	
	E-mail :	yongkkim@snu.ac.kr	Office phone :	02 - 880 -7440
	Ofice hours :	during 30 munite after class		

Course objectives	We introduce you to the most important and essential theory to analyze electric circuits and related lab sessions. And we introduce you to the terminal caracteristics, and linear and lumped constant characteristics about electric circuit elements, which are voltage source, current source, resister, This course will combine - Linear electric circuit analization by means of linear section of Op Amp. - Application of Kirchhoff's voltage law and Kirchhoff's current law to analize circuit and circuit components. - Introducing concepts about equivalent circuit which use Thevenin's Theorem and Norton's Theorem, and maximum power transfer. - Teaching about transient phenomena on time field and emission and storage of energy by analysis of RL, RC and RCL circuit. - Teaching about principle and handling of electronic circuit device. Then, you can measure the voltage and current of circuit element. - Designing the circuit which is introduced in the text and comparing between expected result and mesured result. - Operating the project which will improve your practical ability by designing and manufacturing a practical circuit which is related with text contents.

Textbook & references	Textbook : Richard C. Dorf and James A. Svobada, Introduction to Electric Circuits, 7th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2006. References : [1] Raymond A. DeCarlo and Pen-Min Lin, Linear Circuit Analysis, Oxford Uniersity Press, New York, 2001 [2] Charles K. Alexander and Matthew N.O. Sadiku, Fundamentals of Electric Circuits, 2dn ed., McGraw-Hill, New York, 2003. [3] Charles A. Desoer, Basic Circuit Theory, McGraw Hill, New York, 1969 [4] Giorgio Rizzoni, Principles and Applications of Electrical Engineering, McGraw-Hill, New York, 2003. [5] George B. Arfken and Hans-Jurgen Weber, Mathematical Methods for Physicists, Harcourt/Academic Press, 2001. [6] Erwin Kreyszig, Advanced Engineering Mathemattics, John Wiley & Sons,Inc., New York,1993. [7] Robert L. Boylestad, Introductory Circuit Analysis, 10th ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, 2003. [8] Raymond A. DeCarlo and Pen-Min Lin, Linear Circuit Analysis, Oxford Uniersity Press, New York, 2001 * [7] and [8] are resources for lecture and lab sessions.

Course evaluation	Attendance	Homework	Midterm exam	Final exam	Lab	Other	Total
	5%	5%	30%	35%	25%	0%	100%
	Remarks	Unexcused seven class or two exam absences will result in an "F" grade for the course					

General	TA : Jin Joo-Young, damugi@snu.ac.kr; Lee Yong-Suk, aca657@snu.ac.kr; Song Eun-Suk, geimelf9@snu.ac.kr Class board will be open at EE coarse bulletin.

Policies on cheating & attendance	Cheating in any component of the course, including exams, quizzes and labs, reports, will be severely punished, according to Seoul National University policies. Also, anyone who has more than seven class unexcused absences will receive an "F" grade for the course.

Fall, 2007
Circuit theory I (420.213 002)

Course Schedule

Prof. : Kim Yong-Kweon

Date	Day	Cat	Class	Chapter	Topic	Course supplies	Week	Remark
2008-03-04	TUES	lecture	1	Ch. 1	Introduction of Lecture, Pre-test		1	
2008-03-06	THUR	lecture	2	Ch. 1				
2008-03-11	TUES	lecture	3	Ch. 2	Circuit Elements		2	
2008-03-13	THUR	lecture	4	Ch. 2				
2008-03-18	TUES	lecture	5	Ch. 3	Resistive Circuits		3	
2008-03-20	THUR	lecture	6	Ch. 3				
2008-03-25	TUES	lecture	7	Ch. 3			4	
2008-03-27	THUR	lecture	8	Ch. 4	Methods of Analysis of Resistive Circuits			
2008-04-01	TUES	lecture	9	Ch. 4			5	
2008-04-03	THUR	lecture	10	Ch. 4				
2008-04-08	TUES	lecture	11	Ch. 5	Circuit Theorems		6	
2008-04-10	THUR	lecture	12	Ch. 5				
2008-04-15	TUES	lecture	13	Ch. 5			7	
2008-04-17	THUR	lecture	14	Ch. 6	Operational Amplifier			
2008-04-22	TUES	lecture	15		Reserve Day		8	
2008-04-24	THUR	exam	1		Ch. 1 ~ 5			
2008-04-29	TUES	lecture	16	Ch. 6			9	
2008-05-01	THUR	lecture	17	Ch. 6				
2008-05-06	TUES	lecture	18	Ch. 7	Inductors and Capacitors		10	
2008-05-08	THUR	lecture	19	Ch. 7				
2008-05-13	TUES	lecture	20	Ch. 7			11	
2008-05-15	THUR	lecture	21	Ch. 8	First-Order RL and RC Circutis			
2008-05-20	TUES	lecture	22	Ch. 8			12	
2008-05-22	THUR	lecture	23	Ch. 8				
2008-05-27	TUES	lecture	24	Ch. 9	Second-Order Linear Circuits		13	
2008-05-29	THUR	lecture	25	Ch. 9				
2008-06-03	TUES	lecture	26	Ch. 9			14	
2008-06-05	TUES	lecture	27		Reserve Day		8	
2008-06-10	THUR	exam	2		Ch. 6 ~ 9			

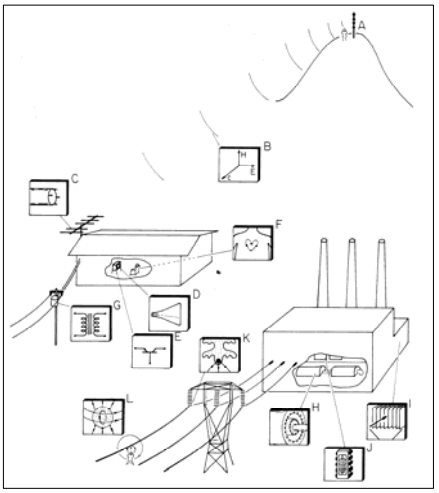
Date	Day	Cat	Lab	Chapter	Topic	Course supplies	Week	Remark
2008-03-06	THR	lab	0		Laboratory Arrangement		1	
2008-03-13	THR	lab	1		equipment guiding, team organization		2	
2008-03-20	THR	lab	2		Introduction, Muli-sim		3	
2008-03-27	THR	lab	3	Ch. 1	Electric Circuit Variables		4	
2008-04-03	THR	lab	4	Ch. 2	Circuit Elements		5	
2008-04-10	THR	lab			Reserve Day		6	
2008-04-17	THR	lab	5	Ch. 3	Resistive Circuits		7	
2008-04-24	THR	lab	6	Ch. 4	Methodes of Analysis of Resistive Circuits		8	
2008-05-01	THR	lab	7	Ch. 5	Circuit Theorems		9	
2008-05-08	THR	lab	8	Ch. 6	Operational Amplifier		10	
2008-05-15	THR	lab	9	Ch. 7	Inductors and capacitors		11	
2008-05-22	THR	lab			Reserve Day		12	
2008-05-29	THR	lab	10	Ch. 8	First-Order RL and RC Circuits		13	
2008-06-05	THR	lab	11	Ch. 9	Second-Order Linear Circuits		14	

전기 공학

• 전기공학은 전력을 발생시키고 이를 수송하며 각 사용자가 이를 유용하게 쓸 수 있도록 하는 학문 분야이다.

• 그림에서 보는 바와 같이 발전소의 발전기(대개는 동기기(同期機))가 발전을 하여 이것을 삼상(三相)으로 송전한다. 이것은 변전소와 배전소를 거쳐 단상(單相)으로 가정에 공급된다.

• 가정에서는 전자파(電磁波)로 수송되는 TV신호를 받아 TV를 볼 수 있다. TV에는 트랜지스터, Op Amp(Operational Amplifier), 인덕터, 캐패시터 등의 회로소자를 사용하고 있다.



전기 시스템 (I)

A : TV signal : 주파수 **60 - 400 MHz**
파장 . $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3\times10^8 \text{m/sec}}{f}$
Ch2 : 60 MHz 파장 **= 5 m**
Ch54 : 1,500 MHz 파장 **= 0.2 m**

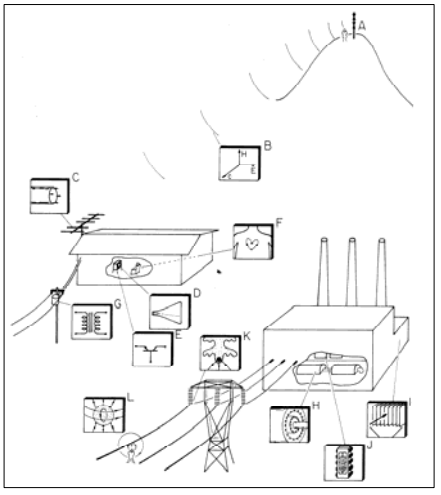
B : 전자파의 형태로 전파.

C : 전자파가 안테나에서 전하와 전류를 유도.

D : 전자가 전계에 의해 가속이 되어 **CRT**면을 때려서 빛을 발함

E : 트랜지스터 내의 전자와 정공(正孔)의 움직임으로 신호를 처리.

F : TV를 보는 사람의 심장에도 전류가 흐르고 있음.



전기 시스템 (II)

G : 집으로 들어오는 전압은 변압기에 의해 강압(降壓)됨.

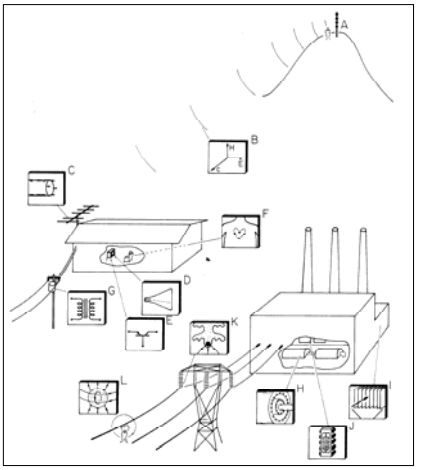
H : 동기 발전기에 의해서 전력이 만들어짐.

I : 화력 발전소에 발생하는 미진(微塵)을 정전력으로 포집(捕集) 하는 집진기(集塵機).

J : 조정실의 컴퓨터에 의해 전력이 분배되고 제어 되어짐.

K : 만들어진 전력은 삼상(三相) 회선에 의해서 수송되며, 이 선들은 절연체에 의해 송전탑으로부터 절연되고 있음

L : 송전선 아래에 사람이 서 있는 경우, 송전선의 전압과 전류가 만들어 내는 전계와 자계의 영향을 받을 수 있음.



전하

전하의 중요 특성

(1) positive, negative 극성을 갖고 있다.

(2) 전자 전하의 정수배**(-1.6×10^{-19} C)**

(3) 전기적 효과를 발생시킨다.

- 전하가 분리되면 전압이 발생, 전하가 흐르면 전류 발생.

- 전하양은 전자 전하양의 정수배로 불연속하지만 워낙 작은 양 **(-1.6×10^{-19}C)** 이 굉장히 많으므로(예: **20 °C** 구리의 경우 전자 밀도 **10^{23}개/cm^3)** 연속적이라고 본다.

Systems of Units

- **1960년 General Conference of Weights and Measures 에서 SI units 를 정했다.**

- 사람의 이름을 딴 단위는 대문자로 쓴다.
- 기호 다음에 마침표(period)를 찍지 않는다.
- 또한 기호에 복수형은 쓰지 않는다.
- 단위는 정자체(正字體)로 쓴다.
- 숫자와 단위 사이는 띄어쓰기를 한다.
  예: **100 m (o), 100 *m* (x), 100m (x).**

- 참고: 변수 표현법
- 변수는 기울임체로 쓴다.
- 윗첨자와 아래 첨자의 경우, 숫자는 정자체로, 알파베트는 기울임체로 쓴다.
  예: v_{x}, v_{1}, **100 V**(여기서 **V**는 단위임).

Table 1.4-1 SI Base Units

Table 1.4–1 SI Base Units

QUANTITY	SI UNIT NAME	SI UNIT SYMBOL
Length	meter	m
Mass	kilogram	kg
Time	second	s
Electric current	ampere	A
Thermodynamic temperature	kelvin	K
Amount of substance	mole	mol
Luminous intensity	candela	cd

Derived Units in SI and SI Prefixes

- 기본 단위들을 조합하면 유도 단위를 나타낼 수 있다.
  예: **C = A·s, W=J/s**

Table 1.4-2 Derived Units in SI

Table 1.4–2 Derived Units in SI

QUANTITY	UNIT NAME	FORMULA	SYMBOL
Acceleration—linear	meter per second per second	m/s^2	
Velocity—linear	meter per second	m/s	
Frequency	hertz	s^{-1}	Hz
Force	newton	$kg \cdot m/s^2$	N
Pressure or stress	pascal	N/m^2	Pa
Density	kilogram per cubic meter	kg/m^3	
Energy or work	joule	$N \cdot m$	J
Power	watt	J/s	W
Electric charge	coulomb	$A \cdot s$	C
Electric potential	volt	W/A	V
Electric resistance	ohm	V/A	Ω
Electric conductance	siemens	A/V	S
Electric capacitance	farad	C/V	F
Magnetic flux	weber	$V \cdot s$	Wb
Inductance	henry	Wb/A	H

Table 1.4-3 Prefixes

Table 1.4–3 SI Prefixes

MULTIPLE	PREFIX	SYMBOL
10^{12}	tera	T
10^{9}	giga	G
10^{6}	mega	M
10^{3}	kilo	k
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f

- **1000**을 의미하는 **k**는 소문자.
- **1/100**을 의미하는 **c**는 소문자.

전류

전류

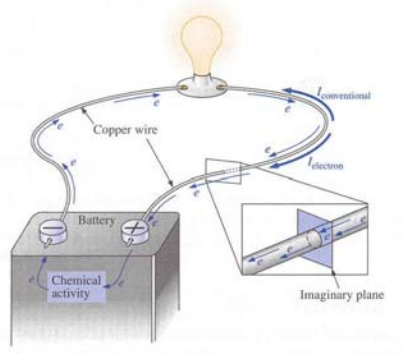
정의 : 단위 시간당 전하의 알짜 흐름.

단위 : C/s = A (amperes)

$$i = \frac{dq}{dt}$$

1 A는 1 초에 1 coulomb의 전하가 흐른다는 의미.

Basic electric circuit
Boylestad 책 34쪽 그림 2.7



전압

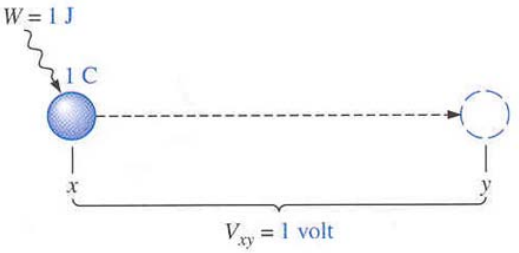
전압

정의 : 전하를 분리시키는 데 드는 단위 전하 당 에너지.

단위 : J/C = V (volts)

$$v = \frac{dW}{dq}$$

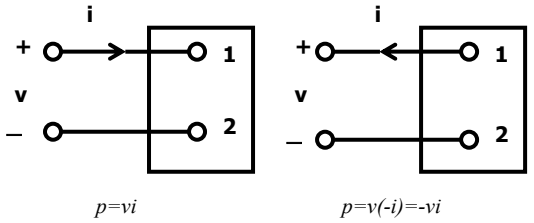
1 V는 1 Joule의 에너지로 1 coulomb의 전하를 분리시켰다는 의미.



Defining the unit of measurement for voltage
Boylestad 책 37쪽 그림 2.10

에너지와 **Power**

$$p(t) = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = vi$$



$p=vi$ $p=v(-i)=-vi$

Passive reference configuration

Power : positive

상자 안의 회로에
에너지가 전달됨.

Power : negative

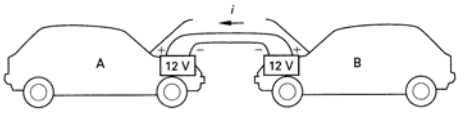
상자 안의 회로로부터
에너지가 나옴.

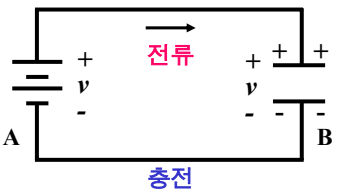
충방전과 에너지의 흐름

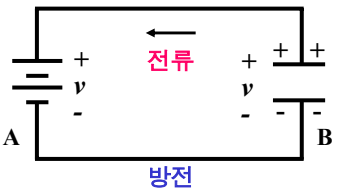
축전지도 캐패시터이다. 캐패시터는 에너지를 저장하기도 하고 방출하기도 한다. 캐패시터에 에너지가 충전될 때에는 전류가 흘러들어와서 전하가 축적되며, 전압이 상승한다.

방전시에는 전류가 캐패시터로부터 흘러나가 축적된 전하가 줄어들며 전압이 떨어지게 된다.

자동차의 축전지를 충전하는 것도 같은 원리이다. 충방전 시의 에너지 흐름에 대해서 생각해 보자.







Dc Voltage Sources and Batteries

- **Dc voltage sources**

(1) batteries (chemical action)

(2) generators (electromechanical)

(3) power supplies (rectification)

- **Batteries**

(1) battery 는 battery of cells 로부터 유래.

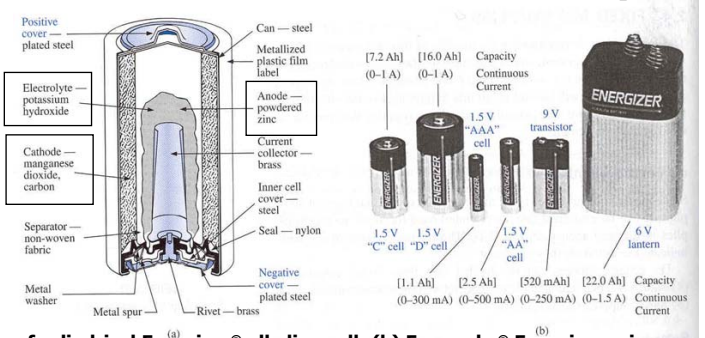
(2) 따라서, battery 는 두 개 이상의 cell 의 조합으로 구성.

(3) primary 와 secondary 로 구분.

(4) secondary 는 rechargeable.

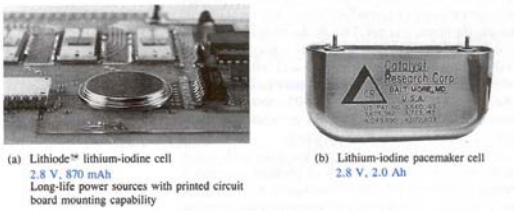
(5) 대표적인 이차전지는 lead-acid battery (주로 자동차에 쓰임)와 nickel-cadmium battery (계산기, 휴대용 장비, 카메라 플래시, 면도기 등)가 있다.

Alkaline and Lithium-Iodine Primary Cells

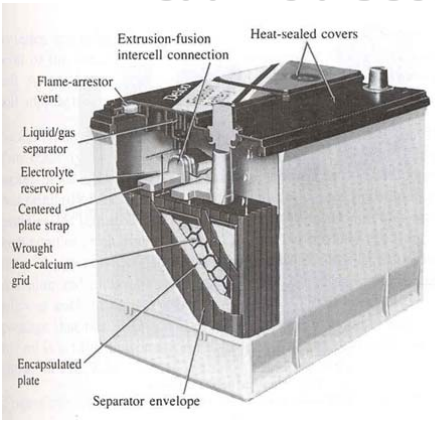


(a) Cutaway of cylindrical Energizer® alkaline cell; (b) Eveready ® Energizer primary cells.
Boylestad 책 40쪽 그림 2.12

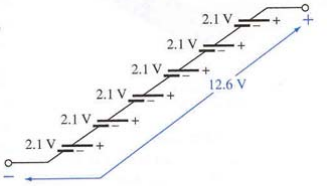
Lithium-Iodine primary cells,
Boylestad 책 40쪽 그림 2.13



Lead-Acid Secondary Cell



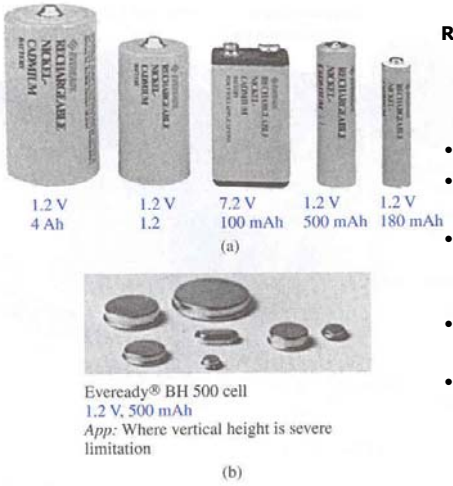
- electrolyte : sulfuric acid
- electrodes : spongy lead and lead peroxide.
- electrons: spongy lead -> lead peroxide during discharge.



Maintenance-free 12-V (actually 12.6-V) lead-acid battery
Boylestad 책 41쪽 그림 2.14

- 방전량은 **specific gravity**를 측정하면 알 수 있다. **1.28 ~ 1.30** 이면 정상이고, **1.1** 정도이면 충전해야 한다.
- 충전하기 위해서는 **dc current source** 가 필요하다.

Nickel-Cadmium Secondary Cell



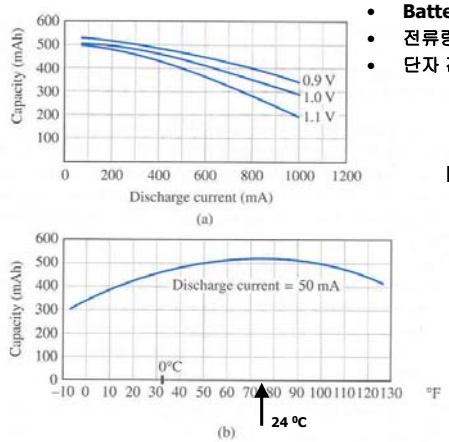
Rechargeable nickel-cadmium batteries.
Boylestad 책 42쪽 그림 2.15

- **1000 charge/discharge cycles.**
- **Ni-Cad battery**를 사용해야 하는 기구에 일차 건전지를 사용하면 안된다.
- 이차 전지는 **1.2 V** 이나, 일차 전지는 **1.5 V** 이며, 이차 전지를 사용하는 기구는 내부에 충전하는 회로를 갖고 있기도 하기 때문이다.
- **Ni-Cad battery** 는 충전할 때 거의 단자 전압이 변하지 않으면서 정 전류원으로 충전한다.
- 그러나, **lead-acid battery** 는 **battery**의 상태에 따라 전류량이 변하는 정전압원에 의해서 충전된다.

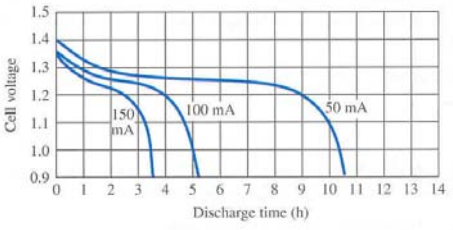
Ampere-Hour Rating

- **Battery**의 용량 정격은 **Ah** 또는 **mAh**로 표시.
- 전류량이 많아지면 줄고, 상온보다 높거나 낮으면 준다.
- 단자 전압은 방전시간이 길어지면 줄어든다.

$$\text{Life(hours)} = \frac{\text{ampere–hour rating(Ah)}}{\text{amperes drawn(A)}}$$



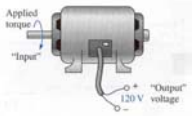
Eveready ® BH 500 cell characteristics:
(a) capacity versus discharge current;
(b) capacity versus temperature.
Boylestad 책 44쪽 그림 2.18



Eveready ® BH 500 cell discharge curves.
Boylestad 책 44쪽 그림 2.19

Generators and Power Supplies

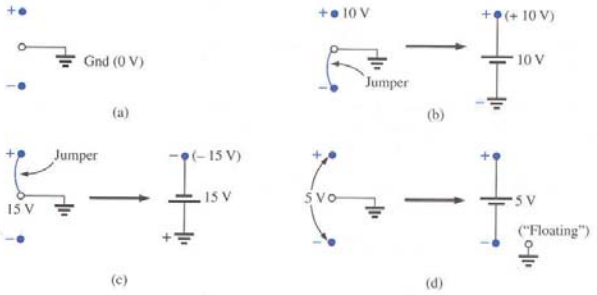
- **Dc generators :**
  120 V or 240 V



dc generator
Boylestad 책 45쪽 그림 2.20

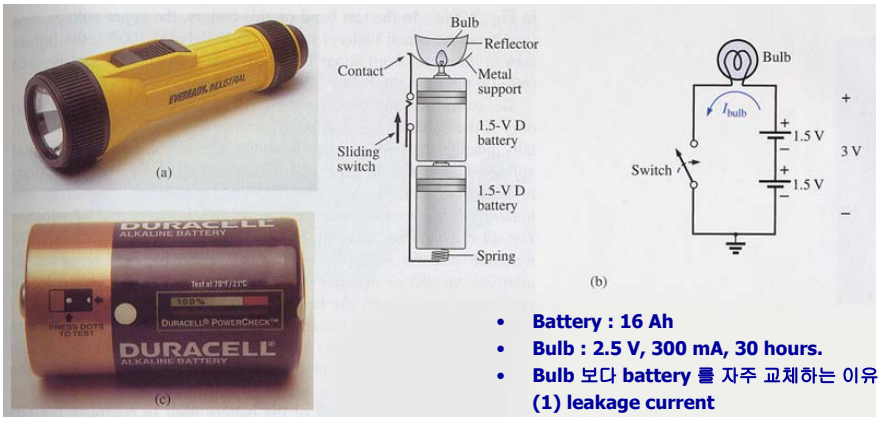
- **Power Supplies :**
  Rectification and filtering

dc laboratory supply.
Boylestad 책 45쪽
그림 2.21



dc laboratory supply :
(a) available terminals;
(b) positive voltage with respect to (w.r.t) ground;
(c) negative voltage w.r.t. ground;
(d) floating supply
Boylestad 책 46쪽 그림 2.22

Applications - Flashlight

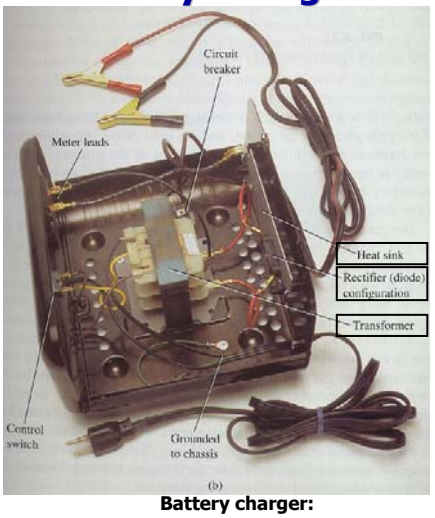


(a) Eveready® D cell flashlight;
(b) electrical schematic of flashlight of part (a);
(c) Duracell® Powercheck™ D cell battery
Boylestad 책 51쪽 그림 2.29

- **Battery : 16 Ah**
- **Bulb : 2.5 V, 300 mA, 30 hours.**
- **Bulb 보다 battery 를 자주 교체하는 이유**
  (1) leakage current
  (2) 연속사용이 아님
  - bulb: cool down 효과
  - battery: initial surge current
- **Battery 는 대개 1.2 ~ 1.3 V 에서 동작.**
- **0.9 V 이하에서는 교체해야 함.**

Applications – 12 V Car Battery Charger

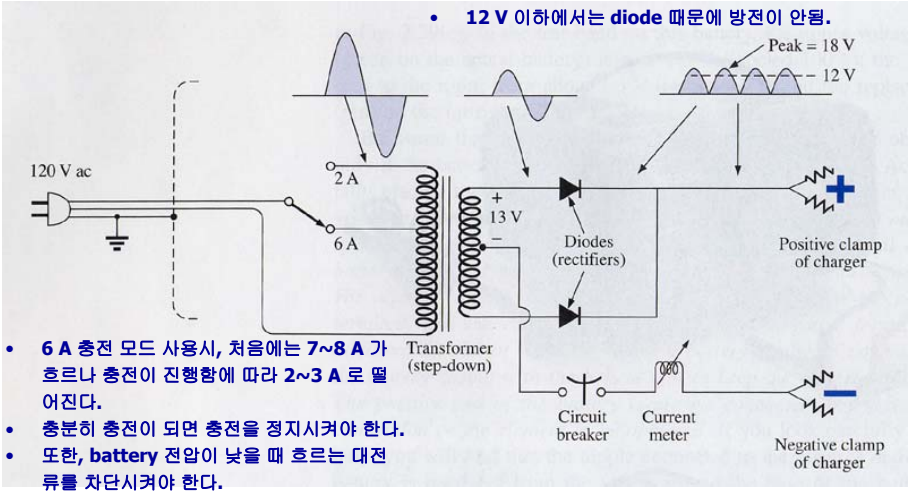
Battery charger:
(a) external appearance
Boylestad 책 53쪽 그림 2.30(a)



Battery charger:
(b) internal construction
Boylestad 책 53쪽 그림 2.30(b)

Applications – 12 V Car Battery Charger Circuit

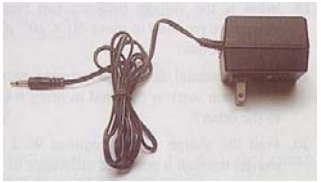
- **12 V** 이상일 때 충전.
- **12 V** 이하에서는 **diode** 때문에 방전이 안됨.



- **6 A** 충전 모드 사용시, 처음에는 **7~8 A** 가 흐르나 충전이 진행함에 따라 **2~3 A** 로 떨어진다.
- 충분히 충전이 되면 충전을 정지시켜야 한다.
- 또한, **battery** 전압이 낮을 때 흐르는 대전류를 차단시켜야 한다.

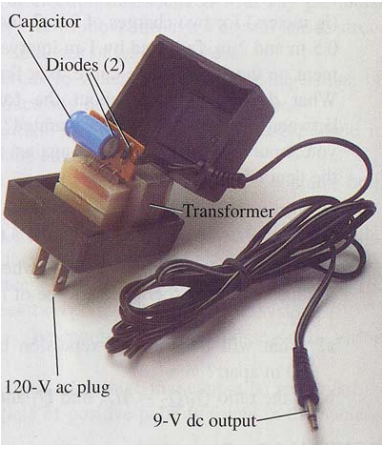
Electrical schematic for the battery charger of Fig.2. 30
Boylestad 책 54쪽 그림 2.31

App. – Answer Machines/Phones dc Supply



Answering machine/phone 9-V dc supply
Boylestad 책 55쪽 그림 2.32

- **9 V, 200 mA.**
- **Regulator chip** 을 수신단에 설치.
- 이유
  - 발생 열 분리
  - 잡음과 진동을 줄이기 위해 부하 가까이에 설치.



Internal construction of the 9-V dc supply of Fig. 2.32
Boylestad 책 55쪽 그림 2.33

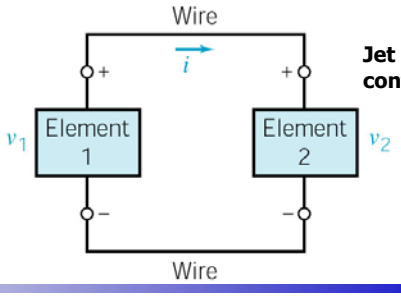
Jet Valve Controller

• 작은 실험용 우주 로켓에서 그림과 같이 두 개의 회로 소자로 회로를 구성하여 1분간 jet valve 제어기에 에너지를 전달한다. 1분간 40 mJ을 전달하는 배터리(회로소자 1)를 골라야 한다.

• $i(t) = De^{-t/60}$ mA for $t >= 0$ 이고, 소자 2 에 걸리는 전압은 $v_2(t) = B\,e^{-t/60}$ V for $t >= 0$ 이다.

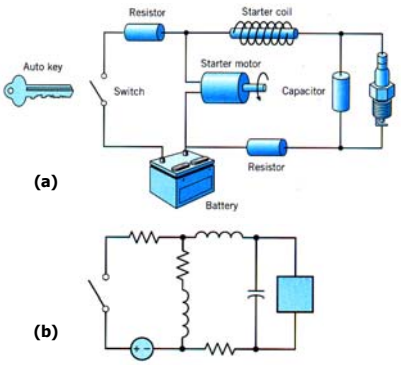
•전류의 크기 D 가 최대 1 mA 로 제한되어있다면, B 는 얼마이어야 하나?

•요구되는 배터리는 어떤 것인가?

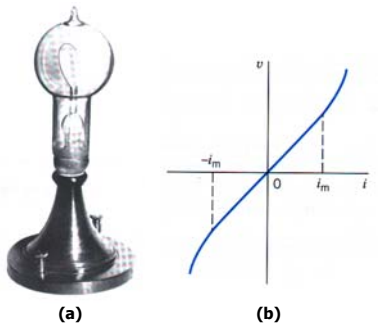


Jet valve controller

회로 이론의 선형 모델링



(a) An automobile ignition circuit.
(b) Model of the ignition circuit for starting a car.



(a) An incandescent lamp.
(b) Voltage-current relationship for an incandescent lamp. The lamp is linear within the range $-i_m < i < i_m$.

- 선형 소자는 superposition과 homogeneity를 만족한다.

Superposition : i_1의 응답 v_1 , i_2의 응답 v_2 이면 $i_1 + i_2$의 응답은 $v_1 + v_2$.

Homogeneity : i의 응답 v 이면 ki 의 응답은 kv.

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.

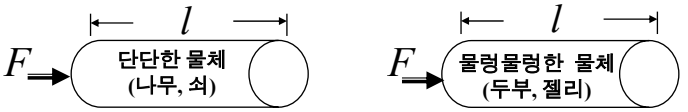
즉, 계가 순간적으로, 동시적으로 변화한다 → 집중정수 계.

(2) 계에 알짜 전하는 없다.

(3) 계의 구성 부품 간에 자기적인 결합은 없다.

집중정수 계와 분포정수 계

- 가정 (1)은 외부에서 인가하는 물리량 (힘, 전류, 전압)이 동시에 계의 전부에 작용한다는 것을 의미.



- 물질에는 파동의 전파 속도가 있음. $v_p = \sqrt{E/\rho}$

- 물체의 반대편에 신호가 전파되는 데 걸리는 시간 (지연 시간)은

  $\Delta t = l/v \quad (s)$ 이다.

- 왼쪽의 단단한 물체는 전파속도가 빠르므로 계의 모든 부분이 동시적으로 외부 물리량을 느낀다.
- 오른쪽의 물렁물렁한 물체는 전파 속도가 느리므로 계의 모든 부분이 같은 시간에 같은 물리량을 갖지 못한다. 따라서, 분포 정수계의 문제로 다루어야 한다.

집중정수 계로 판단하는 기준

- 지연 시간의 외부에서 가해 주는 물리량의 주기보다 매우 작아야 한다.

$$\Delta t / T \ll 1$$

  이 조건을 만족시키면 집중정수 계로 볼 수 있다.

- 전자계에서 전자파의 진행 속도는 c 이다. $c = \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3\times 10^8$ m/s

- 시스템의 특성 길이가 l 이라 하면 지연 시간은 $\Delta t = l/c$ 이 되고,

  60 Hz의 상용 전원에 대해서 생각해 보면 $\dfrac{\Delta t}{T} = \dfrac{l/3\times 10^8}{1/60} = \dfrac{l\times 2}{10^7}$

  따라서, l 이 웬만큼 (수천 km) 길지 않으면 집중정수 계로 보아도 무방하다.

- 만약, 주파수가 10^9 Hz이면 어느 정도의 시스템까지 집중정수 계로 볼 것인가?

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{l/3\times 10^8}{1/10^9} = \frac{l}{0.3} \ll 1$$

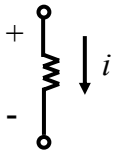
  0.3 m보다 매우 작아야 한다.

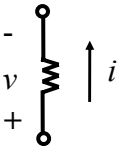
회로소자 -저항

R : resistance Ω (Ohm)

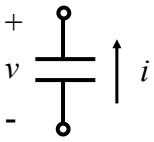
$$R = \frac{v}{i}$$

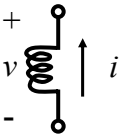
- 저항의 중요특성 : 전압의 부호에 따라 전류의 부호가 바뀜.





- *Inductor* 나 *Capacitor*는 전압의 부호에 따라 전류의 부호가 바뀌지 않음.

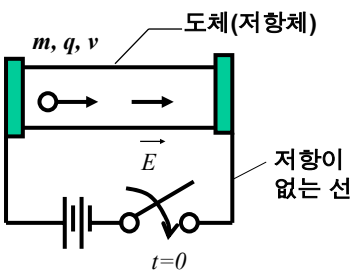




Ohm's Law (I)

- 19세기초 *George Simon Ohm* 이 확립

$\vec{J} = \sigma \vec{E}$ ($\vec{J}$: 전류밀도, σ : 도전율, $\vec{E}$: 전계)



• 전원을 연결해서 강제로 전류를 흘리면 도체(저항체) 내부에 전계가 존재.

• $t = 0$ 일 때 전류를 가하면 도체 내부의 자 유 전하는 전계에 의해서 가속되고, 방해하 는 힘이 없다면 전하는 무한히 가속된다.

•그러나, 도체 내부에는 무수히 많은 전하가 있어서 곧 충돌하게 되며 가속 운동이 방해 받고 일정한 속도의 움직임으로 된다.

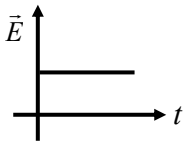
운동 방정식

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{E} - m\mu\vec{v}$$

$\vec{v}$: 속도, μ : 충돌 빈도수 (실효 충돌 주파수)

Ohm's Law (II)

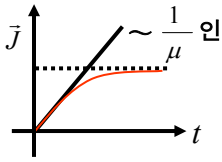
회로의 인덕턴스를 무시하고, 전계를 *step function*으로 가정하자.



$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \mu\vec{v} = \frac{q}{m}\vec{E}$$

$$\vec{v}(t) = \frac{q}{m\mu}(1 - e^{-\mu t})\vec{E}$$

전류는 전하의 단위 시간당 흐름이므로



$$\vec{J}(t) = N \cdot q \cdot \vec{v}(t) = \frac{Nq^2}{m\mu}(1 - e^{-\mu t})\vec{E}$$

(N : 개수, q : 전하량, $\vec{v}(t)$: 속도)

$$t \to \infty \quad \vec{J} = \frac{Nq^2}{m\mu}\vec{E} = \sigma\vec{E}$$

$$(\sigma = \frac{Nq^2}{m\mu} \left(\frac{\mathrm{S}}{\mathrm{m}}\right), \text{ 도전율})$$

- *t =0* 근처에서는 $1/\mu$인 시정수로 전류가 증가하고, 충분한 시간이 흐른 후 결정.
- 구리의 경우, $\mu = 10^{14}\,\mathrm{Hz}$ 이므로, 시정수는 10^{-14} 초이다.
- 따라서, 과도항 $(e^{-\mu t})$ 이 무시되며, *Ohm*의 법칙이 성립.

저 항 율

300 K 에서의 저항율 (Ωm)

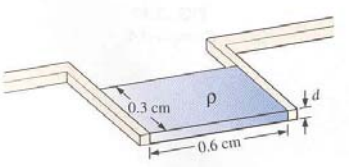
Conductors	
Aluminum	2.73×10^{-8}
Carbon (amorphous)	3.50×10^{-5}
Copper	1.72×10^{-8}
Gold	2.27×10^{-8}
Nichrome	1.12×10^{-6}
Silver	1.63×10^{-8}
Tungsten	5.44×10^{-8}
Semiconductors	
Silicon (device grade) depends on impurity concentration	10^{-5} ***to*** 1
Insulators	
Fused quartz	$>10^{21}$
Glass (typical)	1×10^{12}
Teflon	1×10^{19}

Sheet Resistance

- **Sheet resistance**

$$R_s = \rho/d \qquad (\Omega)$$

- **그림과 같은 thin film resistor의 저항을 구하라. 여기서, sheet resistance 은 100 Ω 이다.**

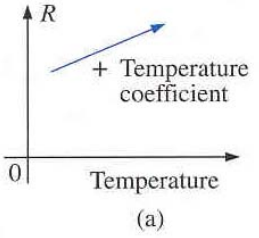


Thin film resistor
Boylestad 책 66쪽 그림 3.12

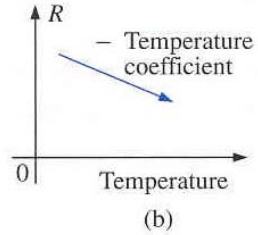
$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{l}{dw} = \frac{\rho}{d}\frac{l}{w} = R_s \frac{l}{w}$$

Temperature Effects

- **Conductors**
  - **Thermal energy increases the intensity of the random motion of the particles.**
  - **Positive temperature coefficient.**
- **Semiconductors**
  - **An increase in temperature results in an increase in the number of free carriers.**
  - **Negative temperature coefficient.**
- **Insulators**
  - **Positive temperature coefficient.**

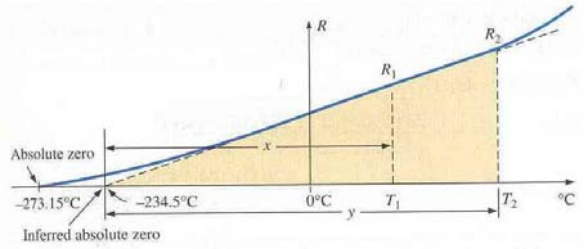


(a) Positive temperature coefficient-conductors;



(b) negative temperature coefficient-semiconductors.
Boylestad 책 68쪽 그림 3.13

Inferred Absolute Temperature



Effect of temperature on the resistance of copper.
Boylestad 책 69쪽 그림 3.14

$$\frac{x}{R_1} = \frac{y}{R_2} \Rightarrow \frac{234.5 + T_1}{R_1} = \frac{234.5 + T_2}{R_2}$$

- **-234.5 °C : inferred absolute temperature of copper.**

$$\boxed{\frac{|T_i| + T_1}{R_1} = \frac{|T_i| + T_2}{R_2}}$$

Inferred absolute temperatures(T_i).
Boylestad 책 69쪽 표 3.5

Material	°C
Silver	−243
Copper	−234.5
Gold	−274
Aluminum	−236
Tungsten	−204
Nickel	−147
Iron	−162
Nichrome	−2,250
Constantan	−125,000

Temperature Coefficients of Resistance

- **α_{20} : temperature coefficient of resistance at a temperature of 20 °C**

$$\alpha_{20} = \frac{1}{|T_i| + 20\ ^0\text{C}} \quad (\Omega/\ ^0\text{C}/\Omega)$$

$$R_1 = R_{20}\left[1 + \alpha_{20}(T_1 - 20\ ^0\text{C})\right]$$

- **R_{20} : resistance of the sample at 20 °C.**
- **R_1 : resistance at a temperature T_1.**

Temperature coefficient of resistance for various conductors at 20℃.
Boylestad 책 70쪽 표 3.6

Material	Temperature Coefficient (α_{20})
Silver	0.0038
Copper	0.00393
Gold	0.0034
Aluminum	0.00391
Tungsten	0.005
Nickel	0.006
Iron	0.0055
Constantan	0.000008
Nichrome	0.00044

- **PPM/°C**

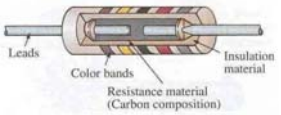
$$\Delta R = \frac{R_{\text{nominal}}}{10^6}(\text{PPM})(\Delta T)$$

- **R_{nominal} : resistance at room temperature.**
- **ΔT : the change in temperature from the reference level of 20 °C.**

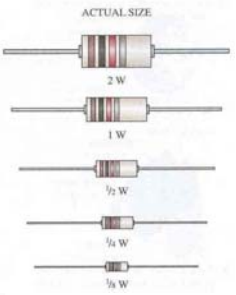
Types of Resistors

Fixed resistor 와 **variable resistor** 가 있다.

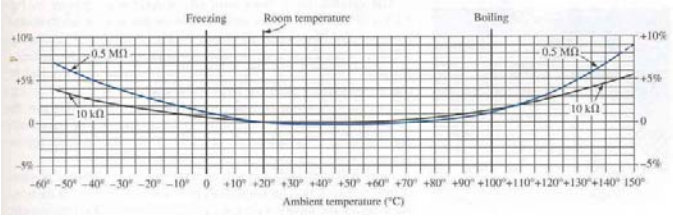
- **Fixed Resistors**
  - **Low-wattage.**
  - **Molded carbon composition resistor.**



Fixed composition resistor. Boylestad 책 75쪽 그림 3.17

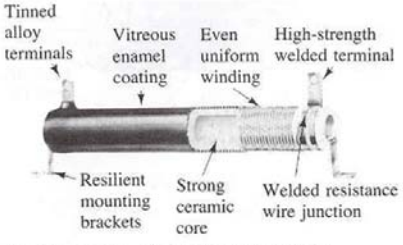


Fixed composition resistors of different wattage ratings. Boylestad 책 75쪽 그림 3.18

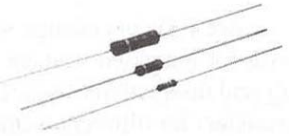


Curves showing percentage temporary resistance changes from +20℃ values. (Courtesy of Allen-Bradley Co.) Boylestad 책 75쪽 그림 3.19

Fixed Resistors (I)



(a) Vitreous-enameled wire-wound resistor
App: All types of equipment

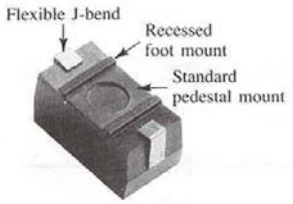


(b) High-voltage cermet film resistors (on a high grade ceramic body).
App: For high-voltage applications up to 10 kV requiring high levels of stability.

(c) Metal-film precision resistors
App: Where high stability, low temperature coefficient, and low noise level desired

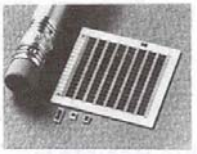
Fixed resistors. [Parts (a) and (c) courtesy of Ohmite Manufacturing Co. Part (b) courtesy of Philips Components Inc.]
Boylestad 책 76쪽 그림 3.20

Miniature Fixed Resistors



(a) Surface mount power resistor ideal for printed circuit boards. Patented J-bends eliminate need for solder connections. (0.8 W to 3 W in wire-wound, film, or power film construction)

(b) Precision power wire-wound resistors with ratings as high as 2 W and tolerances as low as 0.05%. Temperature coefficients as low as 20 ppm/°C are also available.

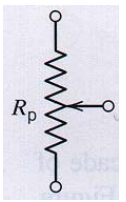


(c) Thick-film chip resistors for design flexibility with hybrid circuitry. Pre-tinned, gold or silver electrodes available. Operating temperature range −55°C to +150°C.

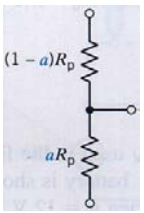
Miniature fixed resistors. [Parts (a) courtesy of Ohmite Manufacturing Co. Parts (b) and (c) courtesy of Dale Electronics, Inc.], Boylestad 책 76쪽 그림 3.21

Variable Resistors

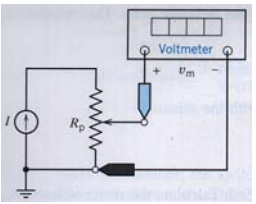
- **Rheostat 또는 potentiometer 로 부른다.**



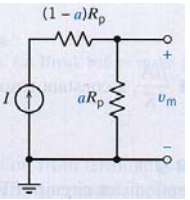
(a) The symbol



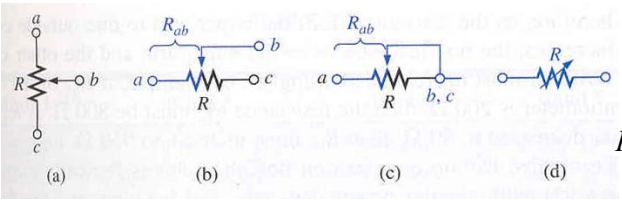
(b) A model for the potentiometer



(a) A circuit containing a potentiometer



(b)An equivalent circuit containing a model of the potentiometer

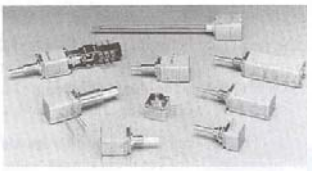


$$R_{ac} = R_{ab} + R_{bc}$$

Potentiometer: (a) symbol; (b) and (c) rheostat connections; (d) rheostat symbol.
Boylestad 책 77쪽 그림 3.23

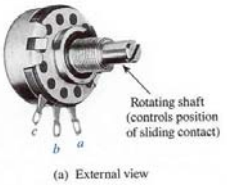
Potentiometers

(a)

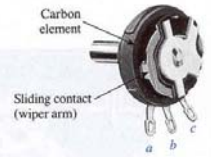


(b)

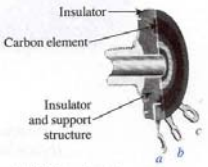
Potentiometers: (a) 4-mm(≈5/32")trimmer(courtesy of Bourns, Inc.); (b) conductive plastic and cermet element (courtesy of Clarostat Mfg. Co.).
Boylestad 책 78쪽 그림 3.26



(a) External view



(b) Internal view

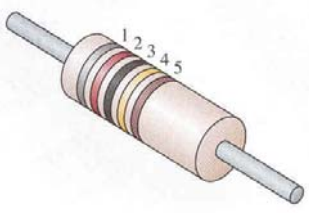


(c) Carbon element

Molded composition-type potentiometer
(Courtesy of Allen-Bradley Co.)
Boylestad 책 77쪽 그림 3.24

Color Coding

- 숫자를 쓰기에 작은 저항에는 색으로 저항 값을 나타낸다.
- 색 띠의 위치는 저항을 옆으로 놓고 보면 비 대칭적이다.
- 저항의 끝에서 가까운 쪽부터 읽는다.
- 띠의 의미
  - 첫 두 개: 두 자리 숫자.
  - 세번째: **10**의 승수 **(power-of-ten)**
  - 네번째: 제작자의 허용오차 **(manufacturer's tolerance)**
  - 다섯번째: **1,000**시간 사용시 오동작할 확률.



Color coding of fixed molded composition resistor.
Boylestad 책 78쪽 그림 3.28

Resistor color coding.
Boylestad 책 79쪽 표 3.7

Bands 1–3*	Band 3	Band 4	Band 5
0 Black	0.1 Gold (multiplying factors)	5% Gold	1% Brown
1 Brown	0.01 Silver (multiplying factors)	10% Silver	0.1% Red
2 Red		20% No band	0.01% Orange
3 Orange			0.001% Yellow
4 Yellow			
5 Green			
6 Blue			
7 Violet			
8 Gray			
9 White			

*With the exception that black is not a valid color for the first band.

Standard Resistors (I)

Standard values of commercially available resistors.
Boylestad 책 80쪽 표 3.8

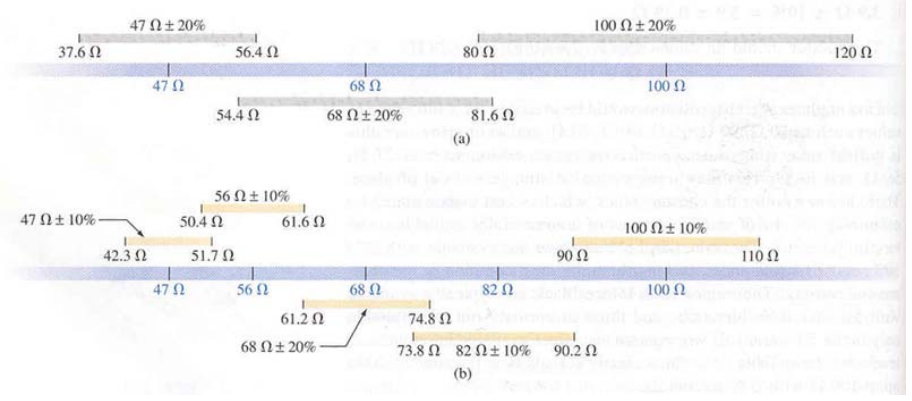
Ohms (Ω)					Kilohms (kΩ)		Megohms (MΩ)	
0.10	1.0	10	100	1000	10	100	1.0	10.0
0.11	1.1	11	110	1100	11	110	1.1	11.0
0.12	1.2	12	120	1200	12	120	1.2	12.0
0.13	1.3	13	130	1300	13	130	1.3	13.0
0.15	1.5	15	150	1500	15	150	1.5	15.0
0.16	1.6	16	160	1600	16	160	1.6	16.0
0.18	1.8	18	180	1800	18	180	1.8	18.0
0.20	2.0	20	200	2000	20	200	2.0	20.0
0.22	2.2	22	220	2200	22	220	2.2	22.0
0.24	2.4	24	240	2400	24	240	2.4	
0.27	2.7	27	270	2700	27	270	2.7	
0.30	3.0	30	300	3000	30	300	3.0	
0.33	3.3	33	330	3300	33	330	3.3	
0.36	3.6	36	360	3600	36	360	3.6	
0.39	3.9	39	390	3900	39	390	3.9	
0.43	4.3	43	430	4300	43	430	4.3	
0.47	4.7	47	470	4700	47	470	4.7	
0.51	5.1	51	510	5100	51	510	5.1	
0.56	5.6	56	560	5600	56	560	5.6	
0.62	6.2	62	620	6200	62	620	6.2	
0.68	6.8	68	680	6800	68	680	6.8	
0.75	7.5	75	750	7500	75	750	7.5	
0.82	8.2	82	820	8200	82	820	8.2	
0.91	9.1	91	910	9100	91	910	9.1	

Standard values and their tolerances.
Boylestad 책 80쪽 표 3.9

±5%	±10%	±20%
10	10	10
11		
12	12	
13		
15	15	15
16		
18	18	
20		
22	22	22
24		
27	27	
30		
33	33	33
36		
39	39	
43		
47	47	47
51		
56	56	
62		
68	68	68
75		
82	82	
91		

- **10** 씩 증가하지 않는 이유?

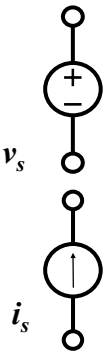
Standard Resistors (II)



Guaranteeing the full range of resistor values for the given tolerance: (a) 20 %; (b) 10 %.
Boylestad 책 80쪽 그림 3.29

Circuit Elements - Independent Sources

- **Voltage and current sources**
  Source : non-electric energy를 **electric energy**로 변환.
  independent : 회로내의 전류와 전압에 관계없이 불변.
  dependent : 회로내의 전류와 전압에 따라 변화.

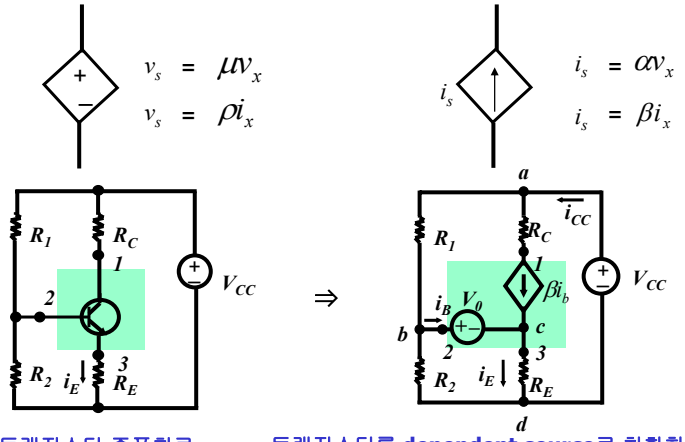


- **Ideal independent voltage source :** 전압원 내의 전류 값에 관계없이 지시된 전압 v_s를 유지.

- **Ideal independent current source :** 전류원 내의 전압 값에 관계없이 지시된 전류 i_s를 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 source**로 치환한 회로

Voltmeters and Ammeters

- The probes are color coded.
- Positive: red, negative: black.
- Ammeters: series connection.
- Voltmeter: parallel connection.
- Voltage-ohm-milliammeter (VOM) and digital multimeter (DMM).
- Ideal ammeter: internal resistance = 0.
- Ideal voltmeter: internal resistance = ∞.

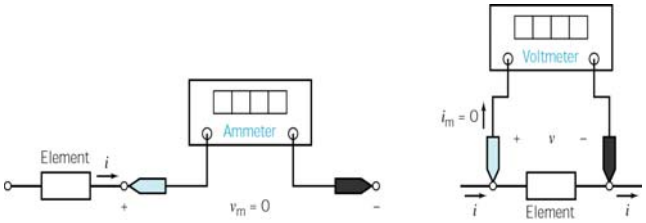
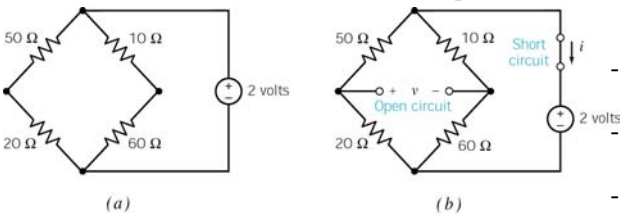
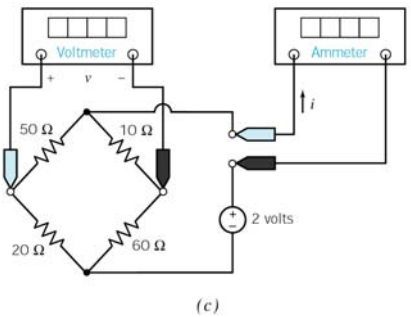


Figure 2.7-2 (p. 39)
(*a*) Ideal ammeter. (*b*) Ideal voltmeter.

Figure 2.7-1 (p. 38)
(*a*) A direct-reading (analog) meter.
(*b*) A digital meter.

An Example Circuit





- Ideal ammeter: short circuits.
- Ideal voltmeter: open circuits.
- Ideally, adding the voltmeter and ammeter does not disturb the circuit.
- The reference direction is important.

Figure 2.7-3 (p. 39)
(*a*) An example circuit,
(*b*) plus an open circuit and a short circuit.
(*c*) The open circuit is replaced by a voltmeter, and the short circuit is replaced by an ammeter.
All resistances are in ohms.

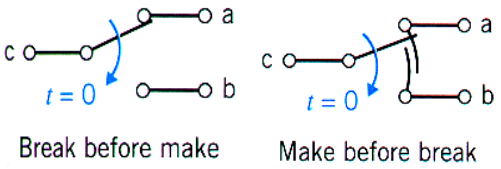
Switches

Switches have two distinct states : open and closed.

SPST : Single-Pole, Single-Throw

(a) **Initially open.** *(b)* **Initially closed.**

SPDT : Single-Pole, Double-Throw

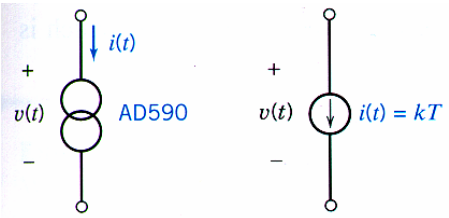


스위칭은 아주 짧은 시간 내에 이루어지고, 회로의 응답시간에 비해 아주 빠르게 스위칭한다.

Transducer - Temperature Sensor

Transducer : Devices that convert physical quantities to electrical quantities.

- **Analog Device** 사의 **AD590** 은 온도를 전류로 바꾸어서 온도를 측정하는 소자이다.
- 소자는 그림과 같이 표시한다.
- 이 센서를 적절히 동작시키려면 전압은 **4 V** 에서 **30 V** 사이에 있어야 한다.
- 이런 조건에서 전류는 온도 **1 K** 의 변화에 **1 μA**의 전류가 흐르게 된다.



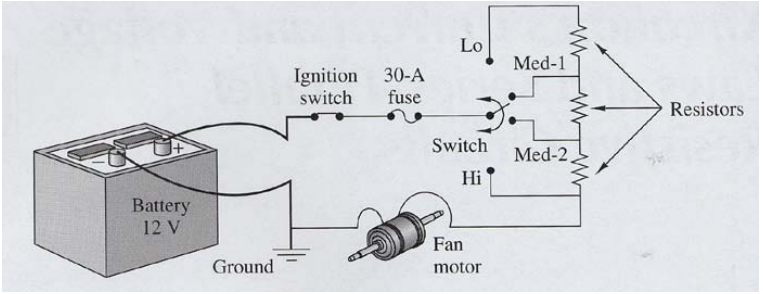
(a) The symbol and (b) a model for the temperature sensor

$$i = k \cdot T \quad \text{where} \quad k = 1\ \mu\text{A}/\ ^{\circ}\text{K}$$

- **AD590** 을 이용하여 수조의 물 온도를 측정하는 회로를 설계하라.
  AD590, 전류계, 저항, 전압원**(10, 12, 15, 18, 24 V)**이 사용 가능하다.

  300 K 이면 전류는 얼마가 흐르는가?
  이상적인 전류계와 실제적인 전류계를 사용했을 때 어떤 변화가 있는가?
  여러 전원 중 어떤 전원을 사용해야 하는가? 그 이유는?

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	$\vec{\nabla}\cdot(\varepsilon\vec{E})=\rho$	$\oint_S \varepsilon\vec{E}\cdot d\vec{S}=\int_v \rho dV$
자속 보존의 법칙	$\vec{\nabla}\cdot\vec{B}=0$	$\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S}=0$
Ampere의 둘레법칙	$\vec{\nabla}\times\vec{H}=\vec{J}+\frac{\partial(\varepsilon\vec{E})}{\partial t}$	$\oint_C \vec{H}\cdot d\vec{l}=\int_S \vec{J}\cdot d\vec{S}+\frac{\partial\int_s \varepsilon\vec{E}\cdot d\vec{S}}{\partial t}$
Faraday의 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	$\vec{\nabla}\cdot\vec{J}+\frac{\partial\rho}{\partial t}=0$	$\oint_S \vec{J}\cdot d\vec{S}+\frac{\partial\int_V \rho dV}{\partial t}=0$

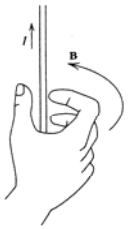
암페어 둘레 법칙과 패러데이 전자 유도 법칙

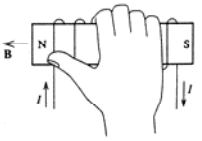
• 암페어가 발견한 암페어 둘레 법칙은 전류가 흐르는 도선 주위에는 자계(磁界)가 형성된다는 것이다.

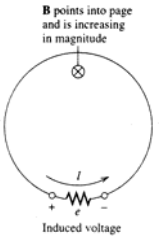
• 이때 자계의 방향은 오른손을 사용하여 정할 수 있는데 오른손의 엄지 손가락을 도선의 전류방향에 맞추면 다른 손가락의 방향이 자계의 방향을 나타낸다.

• 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, 동시적으로 변화한다 → 집중정수 계.

(2) 계에 알짜 전하는 없다.

(3) 계의 구성 부품 간에 자기적인 결합은 없다.

전하 보존의 법칙

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

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

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

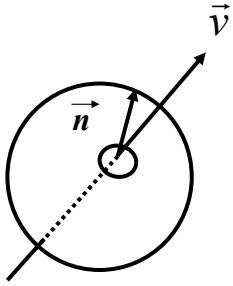
따라서, $\vec{\nabla}\cdot\vec{J}=0.$

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.



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

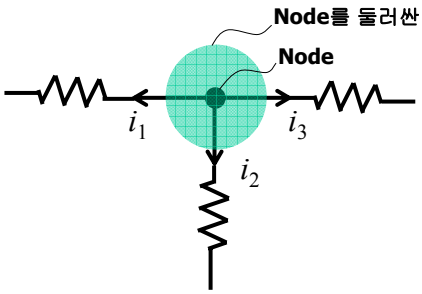
$\vec{\nabla}\cdot\vec{v}$: 발산 (스칼라 양)

- 서울대라는 울타리(영역) 안으로 들어오는 학생이 나가는 학생보다 많으면 발산은 음이 된다.
- 만약, 서울대 울타리 안에서 사람이 소멸하거나 생겨나지 않는다면(전하가 보존되는 것과 같다면) 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.

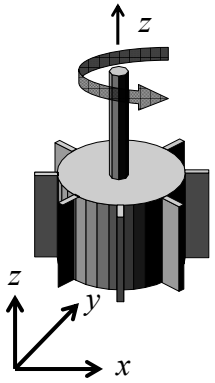
$$\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}=0.$$

• 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.



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

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 둘레에 있는 날개에 가해지는 힘을 적분한 것과 같다.

Stoke's theorem

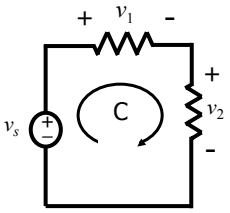
$$\int_S \vec{\nabla}\times\vec{v}\cdot d\vec{S} = \oint_C \vec{v}\cdot d\vec{l}$$

Kirchhoff's Voltage Law (KVL)

- 회로에 가해지는 자계의 시간적인 변화는 없다.

Faraday의 전자 유도 법칙에서 우변이 영.

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



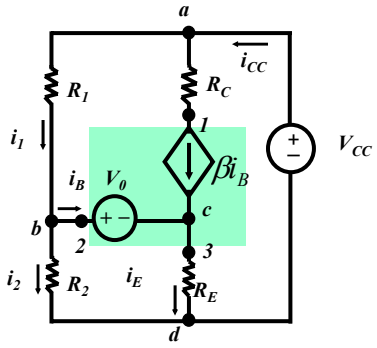
- 회로가 만드는 면을 통과하는 자계의 시간적인 변화가 영이면 회로를 따라서 전계를 적분하면 영이 된다.
- 그런데, 전계가 존재하는 곳은 소자에서만 이므로 회로의 선적분은 소자에서의 전압 강하의 합으로 표현된다.

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

- 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 source로 치환한 회로

Transistor : βi_B, 전류증폭.

V_0, **Transistor** 의 전압강하.

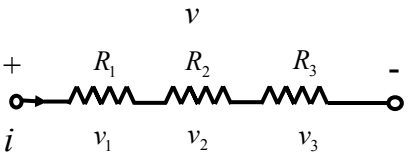
$$\text{node a}: (-i_{cc}) + i_1 + i_c = 0$$
$$\text{node b}: (-i_1) + i_2 + i_B = 0$$
$$\text{node c}: (-\beta i_B) + (-i_B) + i_E = 0$$
$$i_c = \beta i_B$$

$$\text{closed path (bcdb)}: V_0 + R_E i_E + (-R_2 i_2) = 0$$
$$\text{closed path (badb)}: (-R_1 i_1) + V_{cc} + (-R_2 i_2) = 0$$

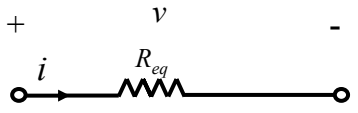
node에서는 **KCL,**

closed path에서는 **KVL**을 적용한다.

직렬 저항 회로



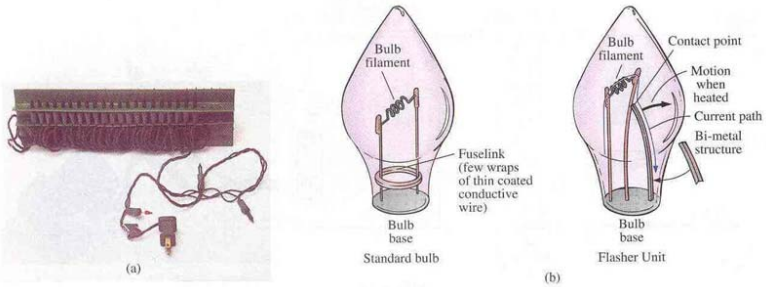
$$v = v_1 + v_2 + v_3$$
$$= R_1 i + R_2 i + R_3 i$$
$$= (R_1 + R_2 + R_3) i$$



$$v = R_{eq}\, i$$
$$\therefore \quad R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

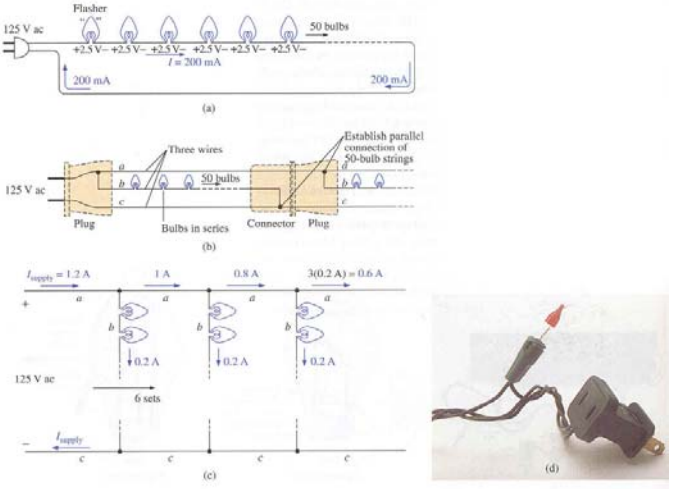
Holiday Lights – Series Circuits (I)

- **Bulb 정격 : 2.5 V at 0.2 A**
- **50 개가 직렬로 연결.**
- **50 x 2.5 V = 125 V.**
- **소모전력 50 x 2.5 x 0.2 = 25 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?**



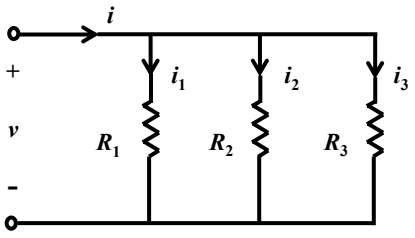
Holiday lights: (a) 50 unit set; (b) bulb construction
Boylestad 책 151쪽 그림 5.62

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

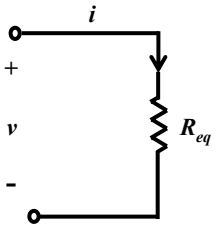
병렬 저항 회로



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

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

$$i = i_1 + i_2 + i_3 = (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3})v$$



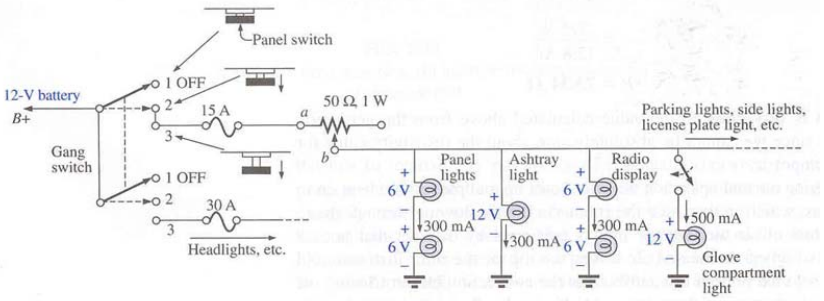
$$v = R_{eq} i$$

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

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

Dimmer Control in Automobile – Parallel Circuits

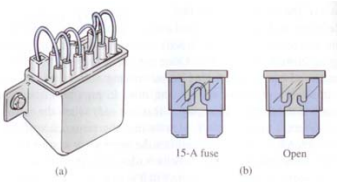
- 누름 스위치를 누르면 켜진다.
- 이 스위치는 **50 Ω rheostat**와 **dashboard**의 여러 조명으로 연결된다.
- **Rheostat**의 위치를 **a** 에서 뒤로 움직이면 저항이 커지면서 전류가 작아지고 조명이 어두워진다.
- **Panel light** 는 큰 **(12 V) bulb**를 사용하지 않고, 두 개의 작은 **(6 V) bulb** 를 사용했다.
  - 이유: **panel**의 특정한 위치에 부드럽고, 균일한 조명을 발생한다.
- **12 V bulb** 의 저항 = **12 V/ 300 mA = 40 Ω.**
- **6 V bulb** 의 저항 = **6 V/ 300 mA = 20 Ω.**



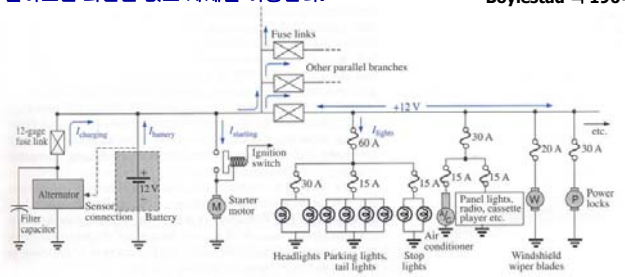
Dashboard dimmer control in an automobile
Boylestad 책 88쪽 그림 3.40

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.

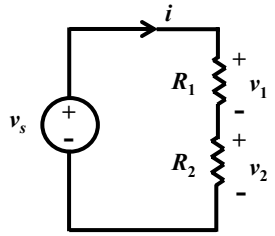


Car fuses : (a) fuse link; (b) plug-in.
Boylestad 책 196쪽 그림 6.61



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

분압(分壓) 회로



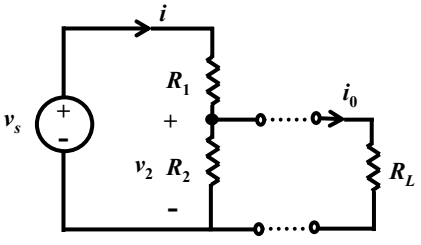
$$v_s = R_1 i + R_2 i$$

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

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

따라서, 전압은 저항의 비율로 나뉘어진다.

R_L을 연결하기 전에는 $v_2 = \dfrac{R_2}{R_1 + R_2} v_s$



R_L을 연결 후 v_2 = ?

$R_2 \rightarrow R_2$와 R_L이 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 kΩ** 의 저항과 **voltmeter** 를 병렬로 연결하면 등가 저항은 **?**
  Voltmeter 로는 **DMM (11 MΩ)**과 **VOM(50 kΩ on 2.5 V scale)** 을 각각 이용하라.

DMM

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

VOM

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

- **VOM** 은 **ohm / volt rating** 으로 등급 지워진다.
  이것은 전압계가 병렬로 연결될 때 병렬로 연결되는 저항 값을 나타낸다.

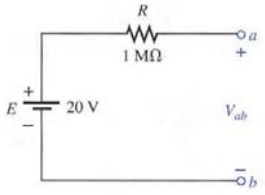
  예를 들어, **20,000 Ω/ V** 의 **VOM** 으로 측정할 때 전압의 측정 범위에 따라 삽입 저항이 바뀐다.

$$2.5\text{ V scale}: 2.5\text{ V} \times 20{,}000\,\Omega/\text{V} = 50\,\text{k}\Omega$$
$$100\text{ V scale}: 100\text{ V} \times 20{,}000\,\Omega/\text{V} = 2\,\text{M}\Omega$$
$$250\text{ V scale}: 250\text{ V} \times 20{,}000\,\Omega/\text{V} = 5\,\text{M}\Omega$$

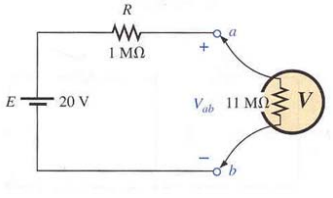
Voltmeter – Ohm/Volt Rating

- 그림의 전압을 측정하라.
  Voltmeter 로는 **DMM (**내부저항 **11 MΩ)**과 **VOM (20,000 Ω / V)** 을 각각 이용하여 측정하라.

(a) 개방시 단자 간 전압은**?**
(b) 내부 저항이 **11 MΩ** 인 **DMM** 으로 측정하면 전압은**?**
(c) VOM (20,000 Ω / V) 으로 측정하면 전압은**?**
Scale을 **20 V**와 **100 V**로 해서 각각 측정해보라.

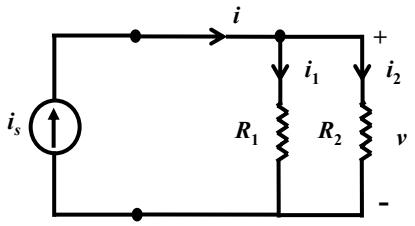


Example 6.26
Boylestad 책 192쪽 그림 6.55



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

분류(分流) 회로



$$v = i_1 R_1 = i_2 R_2$$

$$i_s = i = i_1 + i_2 = \frac{v}{R_1} + \frac{v}{R_2}$$

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

따라서, i_s는 병렬회로 R_1과 R_2로 나누어져 흐른다.

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

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

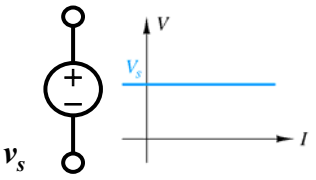
Circuit Elements - Independent Sources

- **Voltage and current sources**

  Source : non-electric energy를 **electric energy**로 변환.

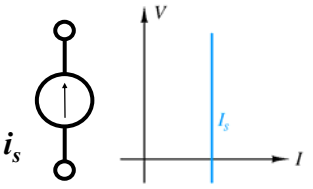
  independent : 회로내의 전류와 전압에 관계없이 불변.

  dependent : 회로내의 전류와 전압에 따라 변화.



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

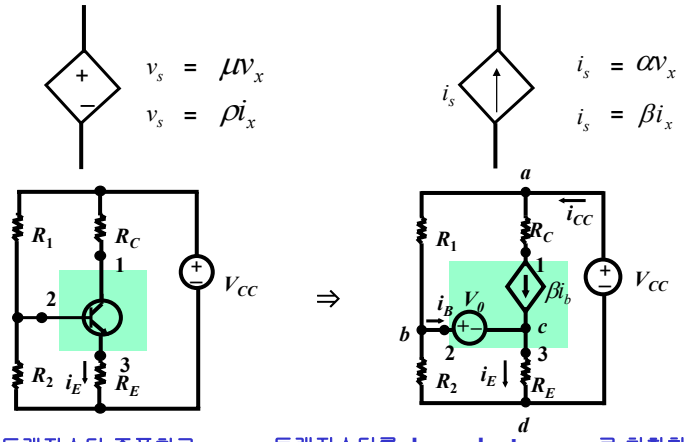
- **Ideal independent current source :** 전류원 내의 전압 값에 관계없이 지시된 전류 i_s를 유지.



Circuit Elements - Dependent Sources

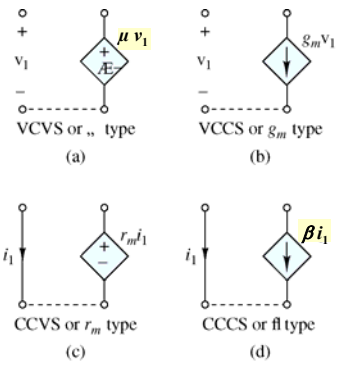
- Ideal dependent voltage and current sources.

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



트랜지스터 증폭회로 ⇒ 트랜지스터를 **dependent source**로 치환한 회로

Dependent Sources

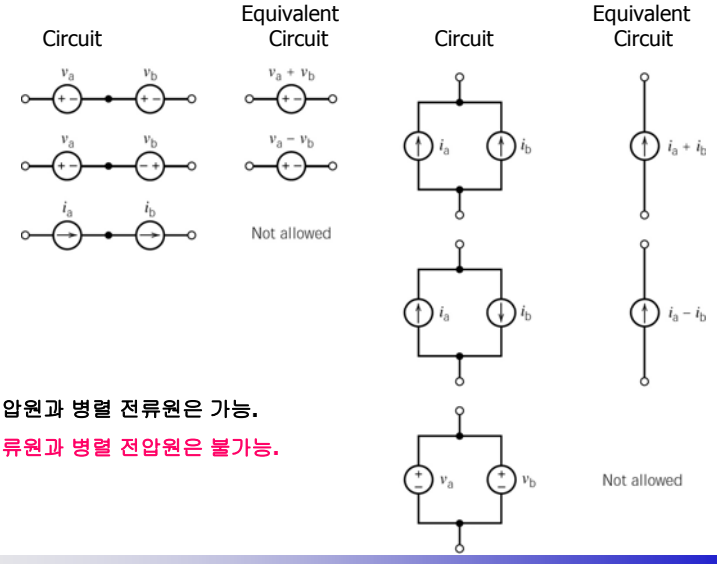


type	parameter	unit	appellation
VCVS	μ	dimensionless	voltage gain
VCCS	g_m	Siemens	transfer conductance
CCVS	r_m	Ohm	transfer resistance
CCCS	β	dimensionless	current gain

Figure 2.29 Designations for the various controlled sources.

- Dependent source : potential of generating power ⇨ Active element

직렬 전압원과 병렬 전류원



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

Ideal Independent Sources

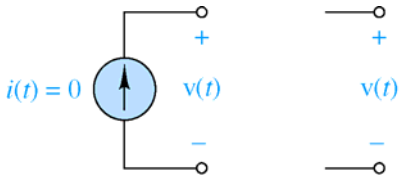


Figure 2.7 Ideal current source with $i(t) = 0$ is an open circuit.

전류원의 내부 저항은 무한대.

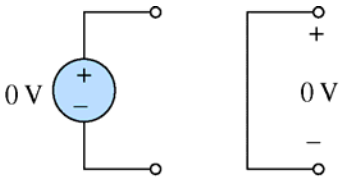


Figure 2.17 A 0-V voltage source is equivalent to a short circuit.

전압원의 내부 저항은 **0**.

Non-ideal Sources

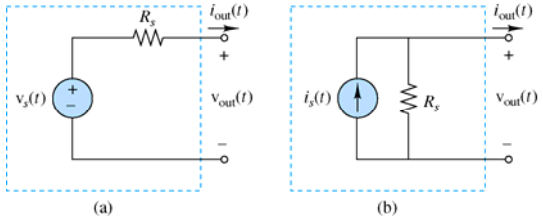
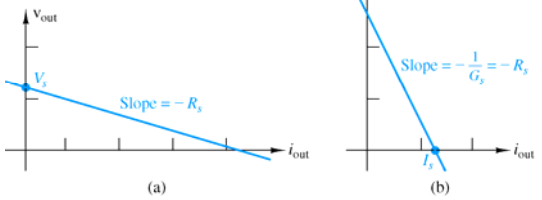


Figure 2.36 (a) Nonideal voltage source as an ideal voltage source with an internal series resistance. (b) Nonideal current source as an ideal current source with a parallel internal resistance.



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

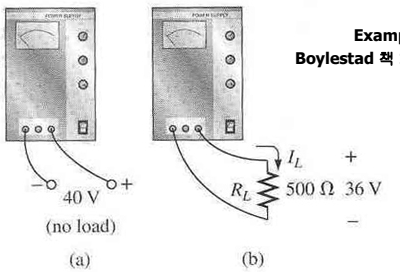
(non-ideal voltage source)

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

(non-ideal current source)

Internal Resistance of Source

- 부하가 연결되기 전에 전압원의 전압이 **40 V** 이었다.
- **500 Ω**의 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 5.51
Boylestad 책 147쪽 그림 5.54

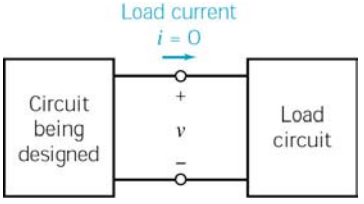
Adjustable Voltage Source (I)

- 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.

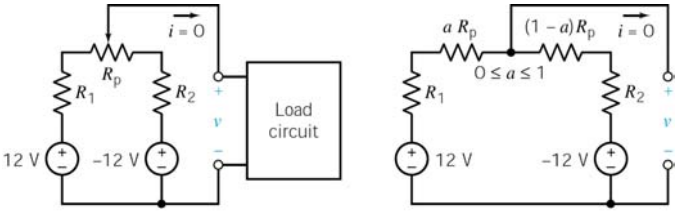
- 사용 가능한 부품
  - **Potentiometers : 10 kΩ, 20 kΩ, and 50 kΩ.**
  - 저항**: 10 Ω**에서 **1 M**Ω사이의 표준 **2 %** 저항들.
  - 두 전압원 **: 12 V 1** 개**, -12 V 1** 개**,** 정격 전류는 각각 **100 mA.**

Adjustable Voltage Source (II)

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



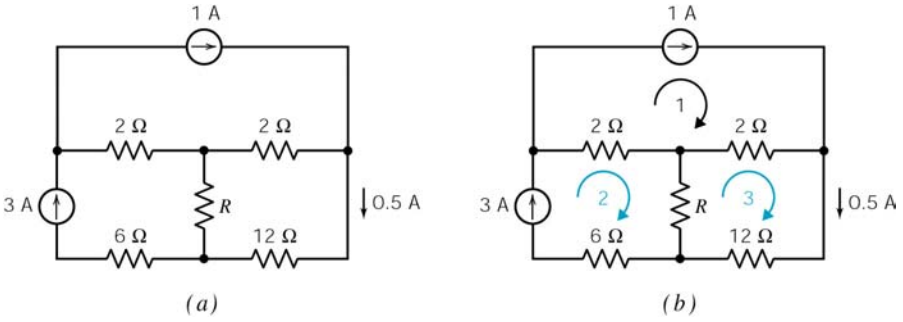
The circuit being designed provides an adjustable voltage, v to the load circuit.



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

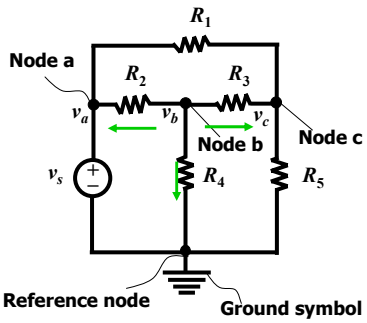
Methods of Analysis of Resistive Circuits

- 여러 개의 전압원, 전류원이 동시에 연결되어 있는 복잡한 회로를 해석할 필요.
-아래와 같은 회로를 해석할 때 기본적으로 사용하는 방법이 있음.
-복잡한 회로를 다룰 때 해석하는 방법 : **Node voltage** 와 **mesh current** 를 사용.



Node Voltage Analysis-KCL(I)

- **Node**는 두개 이상의 회로 소자가 모이는 점.
- 기준 전위로 생각하는 **node**를 **reference node**로 하고, **ground symbol**을 표시.
- **reference node**와 각 **node a, b, c** 사이의 전위를 v_a , v_b , v_c로 표시.
- v_a , v_b , v_c 가 변수이고 미지수가 될 수 있음.
- v_a=v_s 이므로 미지수가 아님.



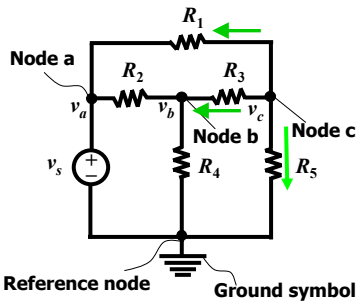
KCL을 이용해서 **node b, c**에서 방정식을 만들 수 있다.

node b :

(*R*$_2$를 통해 b →a로 흐르는 전류)
+ (*R*$_4$를 통해 b →ground로 흐르는 전류)
+ (*R*$_3$를 통해 b →c로 흐르는 전류)=0

$$\frac{v_b - v_a}{R_2} + \frac{v_b - 0}{R_4} + \frac{v_b - v_c}{R_3} = 0$$

Node Voltage Analysis-KCL(II)



node c :

(R_3를 통해 c→ b로 흐르는 전류)

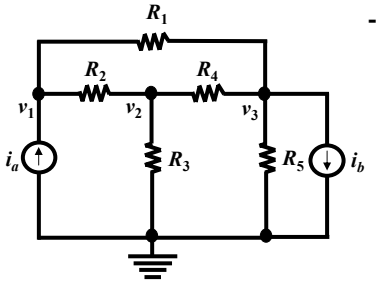
+(R_5를 통해 c→ ground로 흐르는 전류)

+(R_1를 통해 c→ a로 흐르는 전류) = 0

$$\frac{v_c - v_b}{R_3} + \frac{v_c - 0}{R_5} + \frac{v_c - v_a}{R_1} = 0 \qquad (2)$$

(1)과 (2)를 정리하고, $v_a = v_s$를 대입하면 연립방정식을 얻게 된다.

전류원이 있는 회로



- 전류원이 있는 회로.

$$\text{node } 1: \frac{v_1 - v_3}{R_1} + \frac{v_1 - v_2}{R_2} + (-i_a) = 0$$

$$\text{node } 2: \frac{v_2 - v_1}{R_2} + \frac{v_2 - 0}{R_3} + \frac{v_2 - v_3}{R_4} = 0$$

$$\text{node } 3: \frac{v_3 - v_1}{R_1} + \frac{v_3 - v_2}{R_4} + \frac{v_3 - 0}{R_5} + i_b = 0$$

Cramer's Rule

• 연립 방정식을 푸는 방법

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \qquad D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}$$

$$x_1 = \frac{D_1}{D}, \quad x_2 = \frac{D_2}{D}, \quad x_3 = \frac{D_3}{D}, \quad x_4 = \frac{D_4}{D}$$

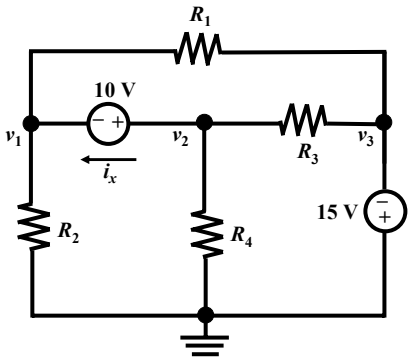
$$D_1 = \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ b_2 & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ b_3 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ b_4 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} = b_1 \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} - b_2 \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}$$

$$+ b_3 \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} - b_4 \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{vmatrix}$$

전압원이 있는 회로

- 전압원은 일정한 전압을 유지하면서 전류는 자유로이 흘린다.

Node 2에서 **1**으로 흐르는 전류 = i_x



$v_2 = v_1 + 10$ **(1)**

$v_3 = -15$ **(2)**

KCL

node 1 : $\frac{v_1 - 0}{R_2} + (-i_x) + \frac{v_1 - v_3}{R_1} = 0$ **(3)**

node 2 : $i_x + \frac{v_2 - 0}{R_4} + \frac{v_2 - v_3}{R_3} = 0$ **(4)**

미지수 : v_1, v_2, i_x

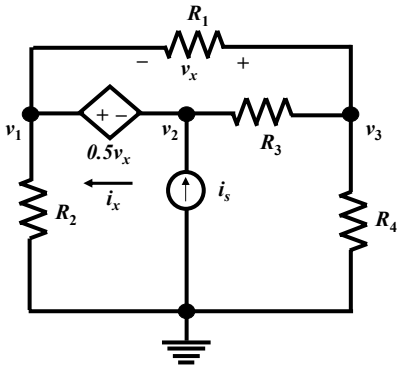
식 : **3**개

Dependent Voltage Source가 있는 회로

$v_x = v_3 - v_1$ (1)

$v_1 = v_2 + 0.5v_x$ (2)

node 2에서 1로 Dependent voltage source에 흐르는 전류 : i_x



KCL

node 1 : $\frac{v_1 - 0}{R_2} + (-i_x) + \frac{v_1 - v_3}{R_1} = 0$ (3)

node 2 : $i_x + (-i_s) + \frac{v_2 - v_3}{R_3} = 0$ (4)

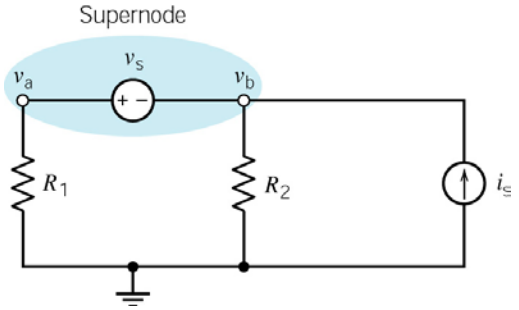
node 3 : $\frac{v_3 - v_1}{R_1} + \frac{v_3 - v_2}{R_3} + \frac{v_3 - 0}{R_4} = 0$ (5)

미지수 : v_x, i_x, v_1, v_2, v_3

식 : 5개

Supernode

• **Supernode:** 독립 또는 종속 전압원이 연결되어있는 두 개의 node로 구성.



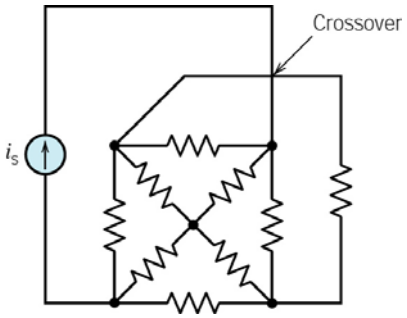
$$\frac{v_a - 0}{R_1} + \frac{v_b - 0}{R_2} + (-i_s) = 0$$

$$v_a - v_b = v_s$$

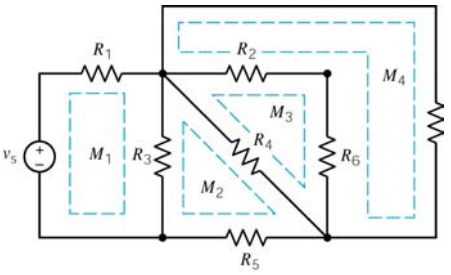
• 미지수가 두 개이고 식이 두 개.

Mesh Current Analysis - Planar and Nonplanar Circuits

- Mesh current analysis is applicable only to planar networks.



- Nonplanar circuit with a crossover.



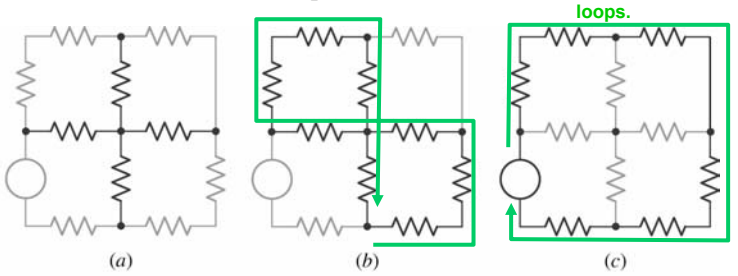
- Planar circuit with four meshes.

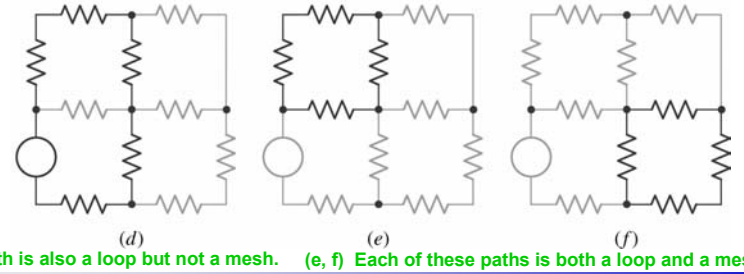
Path, Loop and Mesh

(a) The set of branches identified by the heavy lines is neither a path nor a loop.

(b) The set of branches here is not a path, since it can be traversed only by passing through the central node twice.

(c) This path is a loop but not a mesh, since it encloses other loops.



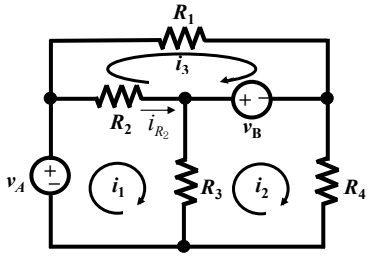


(d) This path is also a loop but not a mesh.

(e, f) Each of these paths is both a loop and a mesh.

Mesh Current Analysis-KVL

- **Mesh :** 가장 기본이 되는 回路
- **Mesh**마다 **mesh current**를 지정.
- **KCL**은 자동적으로 만족.
- 각 소자에 흐르는 전류는 **mesh current**의 합 또는 차로 표현.
- 예 : R_2 저항에 흐르는 전류 (i_{R_2}) = $i_1 - i_3$



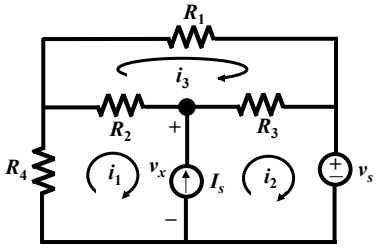
mesh 1 : $R_2(i_1 - i_3) + R_3(i_1 - i_2) + (-v_A) = 0$

mesh 2 : $R_3(i_2 - i_1) + v_B + R_4 i_2 = 0$

mesh 3 : $R_1 i_3 + (-v_B) + R_2(i_3 - i_1) = 0$

– 소자 내에서 전압이 강하되는 방향이 양.

Node 사이에 전류원이 있는 회로



- 전류원에 걸리는 전압을 v_x라 하자.

mesh 1 : $R_4 i_1 + R_2(i_1 - i_3) + v_x = 0$

mesh 2 : $V_s + (-v_x) + R_3(i_2 - i_3) = 0$

mesh 3 : $R_1 i_3 + R_3(i_3 - i_2) + R_2(i_3 - i_1) = 0$

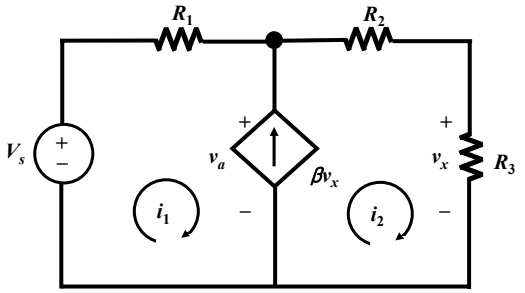
또한, 전류원에서 I_s의 전류가 흘러야 하므로

$$I_s = i_2 - i_1$$

미지수 : i_1, i_2, i_3, v_x

식 : **4**개

Dependent Current Source가 있는 회로



$v_x = R_3 i_2$

$\beta v_x = i_2 - i_1$

mesh 1 : $R_1 i_1 + v_a + (-V_s) = 0$

mesh 2 : $R_2 i_2 + R_3 i_2 + (-v_a) = 0$

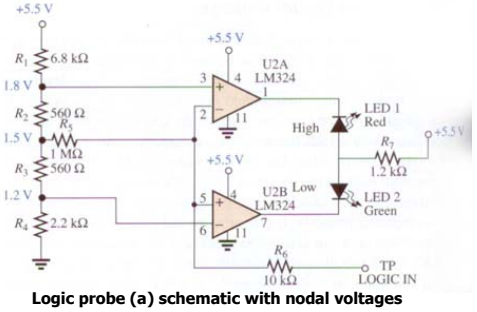
미지수 : i_1, i_2, v_x, v_a

식 : **4**개

Applications – Logic Probe (I)

- 시스템이 잘 동작하는지 알기 위하여 **node voltage** 를 점검한다.
- 그림은 **logic probe** 회로를 보이고 있다.
- 프루브의 **LOGIC IN** 단자를 회로의 **node** 에 접촉하여 전압을 측정.
- **High** 상태 : **1.8 ~ 5 V** 라면 **red LED** 가 동작.
- **LOW** 상태 : **0 ~ 1.2 V** 라면 **green LED** 가 동작.
- **Floating** 상태 : **1.2 ~ 1.8 V** 라면 오동작 상태.

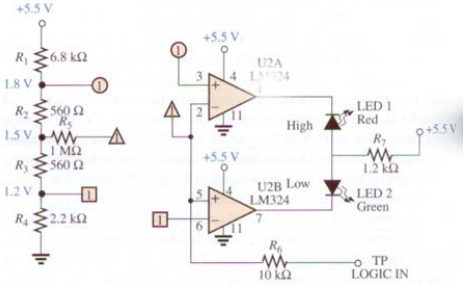
- 회로의 왼쪽 부분은 분압회로.
- **Op amp** 는 입력 저항(임피던스)가 매우 크고, 입력 전압을 증폭하여 출력.
- **Op amp** 를 사용하는 이유?
- 저항 R_5 = **1 MΩ** 과 같이 큰 저항을 사용하는 이유?



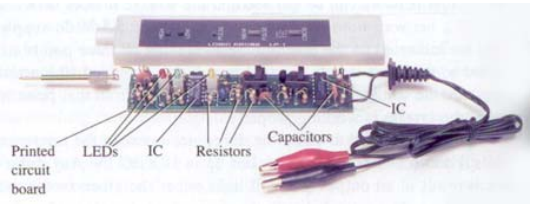
Logic probe (a) schematic with nodal voltages
Boylestad 책 306쪽 그림 8.90 (a)

Applications – Logic Probe (II)

- **LOGIC IN** 전압이 **1 V** 인 경우, 어떤 **LED** 가 동작하는가?
- **LED** 는 **diode**와 같은 특성을 보이고, 전류가 흐르면 빛을 발한다.
- **LOGIC IN** 전압이 **3 V** 인 경우, 어떤 **LED** 가 동작하는가?
- **LOGIC IN** 전압이 **1.6 V** 인 경우, 어떤 **LED** 가 동작하는가?
- 그림 **(c)** 는 실제 회로이고 ,여러 기능이 추가되어 있다.



Logic probe (b) network with global connections
Boylestad 책 306쪽 그림 8.90 (b)



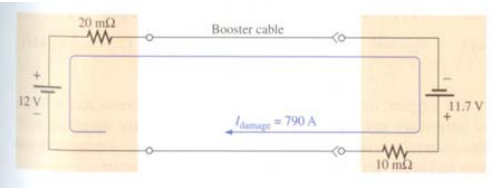
Logic probe (c) photograph of commercially available unit.
Boylestad 책 306쪽 그림 8.90 (c)

Applications – Boosting a Car Battery (I)

- 자동차의 배터리가 방전되었을 경우 다른 차의 배터리로 충전하는 경우가 있다.
- 두 배터리를 케이블로 연결하고 **10 ~ 15** 분 정도 충전한다.
- 자동차 배터리의 내부 저항은 수십 **mΩ** 정도이므로 전압 차가 수 **V** 정도라도 전류는 수십 **A** 가 흐른다. 따라서, 자동차 배터리 전용 케이블을 사용해야 한다.
- 잘못 연결하면 수 백 **A** 의 전류가 흘러서 자동차의 전기시스템을 망가뜨린다.

연결 방법

- 멀쩡한 차는 계속 시동을 걸어둔다.
- 보안경과 장갑을 착용한다.
- 연결 케이블의 빨간 단자를 시름거리는 차의 배터리 + 단자에 연결한다.
- 연결 케이블의 다른 쪽 빨간 단자를 멀쩡한 차의 배터리 + 단자에 연결한다.
- 연결 케이블의 까만 단자를 멀쩡한 차의 배터리 - 단자에 연결하고, 다른 쪽을 시름거리는 차의 배터리 - 단자에 연결한다.
- 연결 중 단자가 차체나 부품에 닿지 않도록 주의한다.



Current level if the booster battery is improperly connected.
Boylestad 책 239쪽 그림 7.57

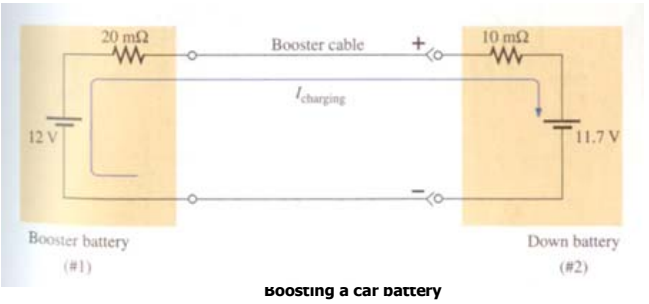
Applications – Boosting a Car Battery (II)

- 그림과 같이 제대로 연결이 되었다면 다음과 같이 해석.
- 연결 케이블의 + 단자 쪽 전압을 v 라 하자.
- 정상 배터리의 전압은 **12 V**, 방전된 배터리의 전압은 **11.7 V** 라 하자.

$$\frac{v-12}{0.02}+\frac{v-11.7}{0.01}=0$$

$$v=11.8\ \text{V}$$

- 따라서, 연결 케이블에 흐르는 전류 **10 A** 이다.



Boosting a car battery
Boylestad 책 237쪽 그림 7.55

Applications – Boosting a Car Battery (III)

- 충전이 진행될 때 방전된 차의 시동을 걸 때 전류는 어떻게 흐르는지 살펴보자.
- 연결 케이블의 + 단자 쪽 전압을 v 라 하자.
- 시동 모터가 배터리에 병렬적으로 연결되고 모터저항은 **100 mΩ** 정도이다.
- 정상 배터리의 전압은 **12 V**, 방전된 배터리의 전압은 **11.8 V** 라 하자.

$$\frac{v-12}{0.02}+\frac{v-0}{0.1}+\frac{v-11.8}{0.01}=0,$$

$$v=11.125\ \text{V}$$

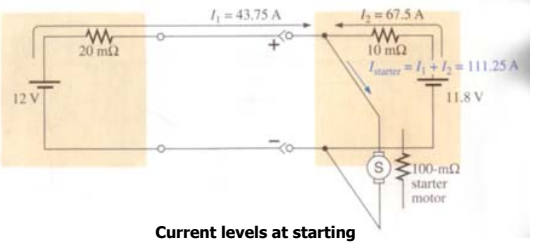
- 따라서, 시동 모터에 흐르는 전류 **111.25 A** 이다.
- 정상 차의 배터리에서 **43. 75 A**, 방전 차의 배터리에서 **67.5 A** 가 흘러나온다.

- 방전된 배터리의 전압은 **11 V** 라 하자.

$$\frac{v-12}{0.02}+\frac{v-0}{0.1}+\frac{v-11}{0.01}=0,$$

$$v=10.625\ \text{V}$$

- 따라서, 시동 모터에 흐르는 전류 **106.25 A** 이다.
- 정상 차의 배터리에서 **68. 75 A**, 방전 차의 배터리에서 **37.5 A** 가 흘러나온다.



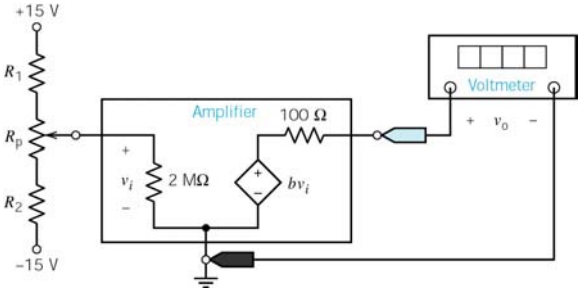
Current levels at starting
Boylestad 책 238쪽 그림 7.56

Potentiometer Angle Display (I)

- Potentiometer 회전각을 표시하는 소자 만들기.
- 회전각은 – 180 ^{0} 에서 180 ^{0} 까지 회전.
- + 15 V, – 15 V power supplies, 저항 R_1, R_2, potentiometer 를 사용한다.
- 그림의 v_i 는 회전각 θ 에 비례하고, 증폭기를 이용하여 v_i 를 v_o 로 비례적으로 증폭한다.

$$v_o = k \cdot \theta \quad \text{where } k = 0.1 \frac{\text{volt}}{\text{degree}}$$

- 증폭기의 내부 회로는 그림과 같다.



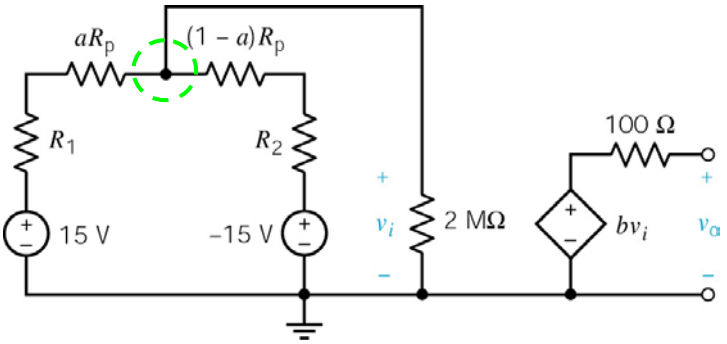
Potentiometer Angle Display (II)

- a 와 θ 의 관계 $a = \frac{\theta}{360^0} + \frac{1}{2} \Rightarrow \theta = \left(a - \frac{1}{2}\right) \cdot 360^0$

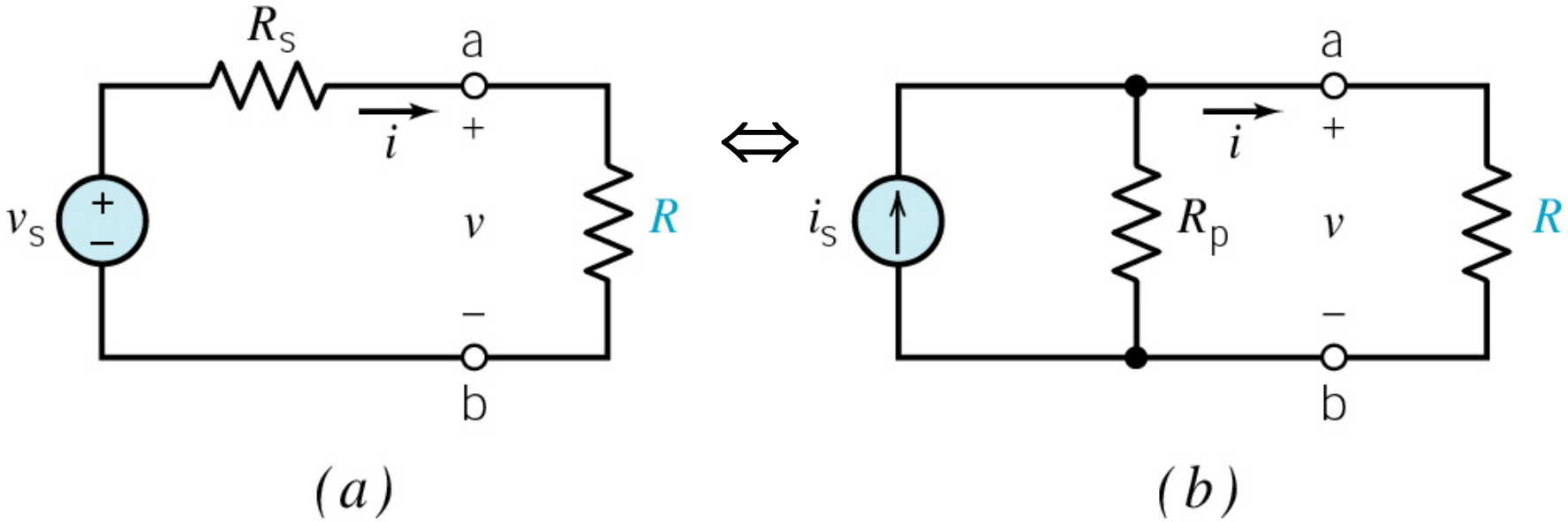
$$\frac{v_i}{2\text{M}\Omega} + \frac{v_i - 15}{R_1 + aR_p} + \frac{v_i - (-15)}{R_2 + (1-a)R_p} = 0$$

$R_1 = R_2$를 가정

근사식을 구함.



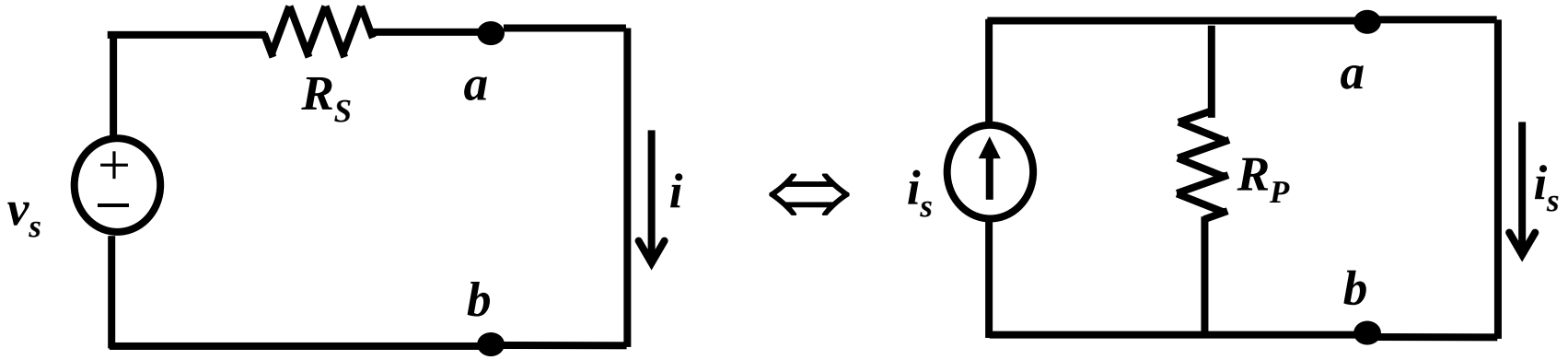
Source Transformations



- Nonideal voltage source 나 **nonideal current source** 를 그림과 같이 등가회로로 표현한다**.**

- R 을 **ab**단자에 연결해도 같은 단자 전압 및 전류를 유지**.**

Source Transformations – R_s and R_p



– R_L을 ab단자에 연결해도 같은 단자 전압 및 전류를 유지해야 하므로,
극단적인 예로 short circuit 와 open circuit 가 연결된 경우를 생각하자.

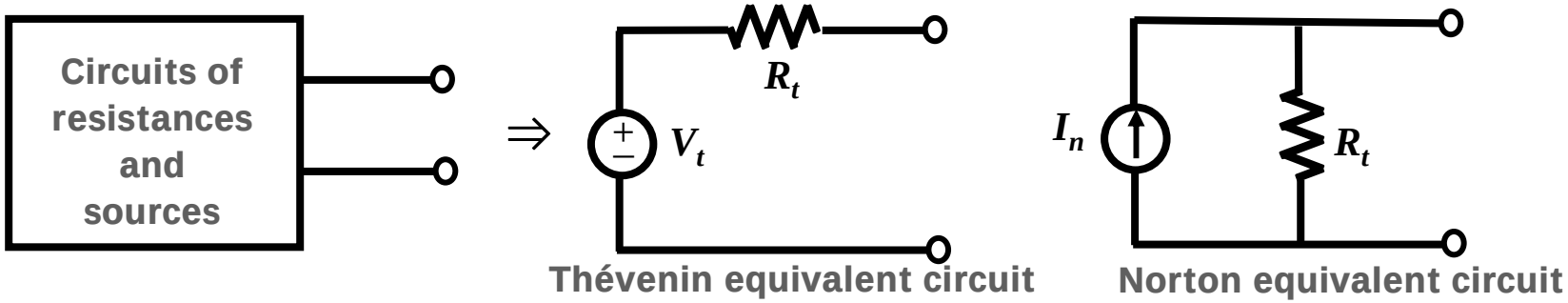
For open circuit, ab 단자 사이의 전압 $v = v_s = i_s R_p$

For short circuit, ab 단자 사이의 전류 $i = \dfrac{v_s}{R_s} = i_s$ $\quad \therefore R_s = R_p$

종속 전원인 경우에도 **source transformation**은 마찬가지로 가능하다.
단, 이 경우에는 변환에 의해 종속 전원의 제어 변수가 변화하지 않아야 한다. **=>** 예제

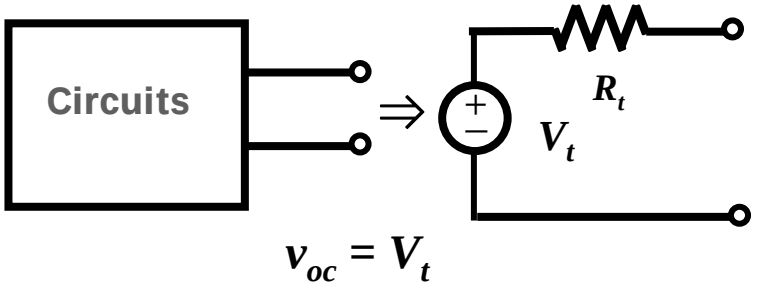
Thévenin and Norton Equivalent Circuits for Networks

– 복잡한 회로를 단순화시킨 등가 회로화 하여 해석.

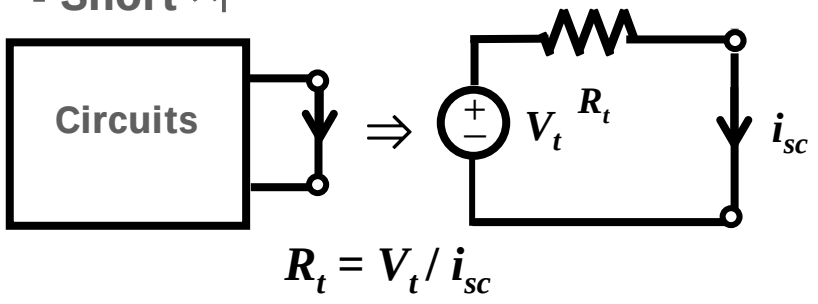


- 저항 회로만이 아니라 모든 선형 회로 소자로 이루어진 회로는 등가화가 가능.

- Open시

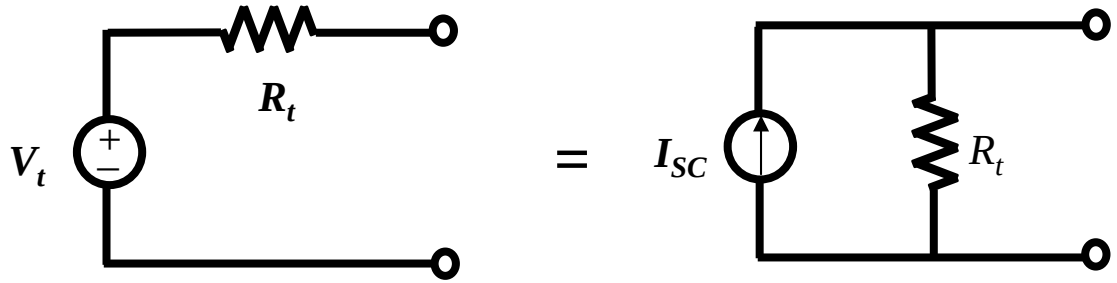


- Short 시



- Open과 **short** 상태로 V_t와 R_t를 알 수 있다.

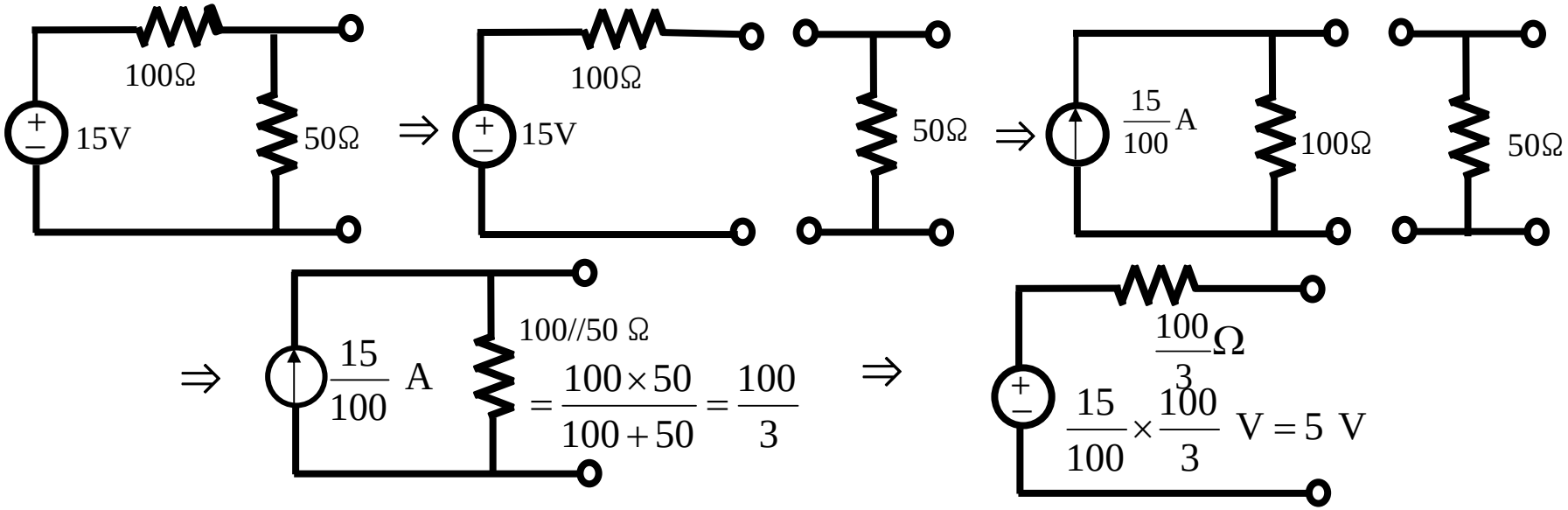
Thévenin and Norton Equivalents



$v_{oc} = V_t$
$i_{sc} = V_t / R_t$

$v_{oc} = I_{sc} \cdot R_t = V_t$
$i_{sc} = I_{sc}$

Example (Source Transformation)



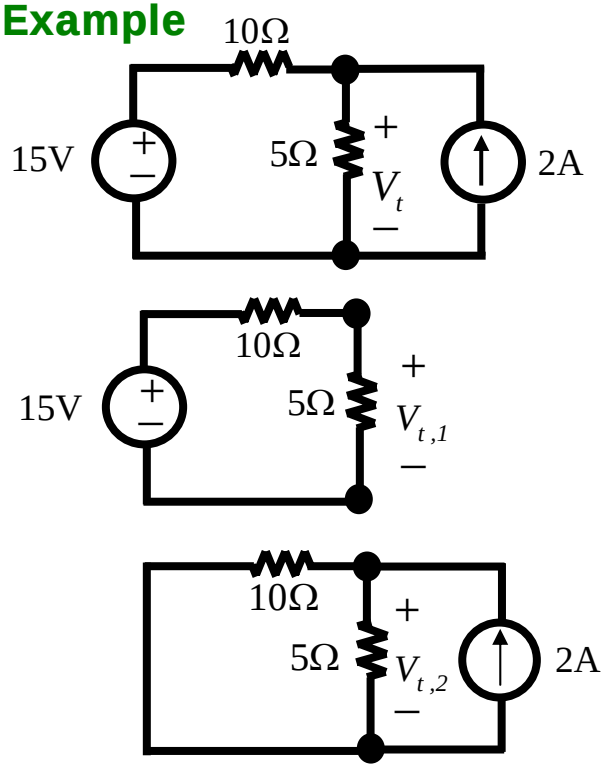
Superposition Principle

- Linear system의 특성 **: superposition**

$$y = ax_1 + bx_2$$

- 회로에 있어서는 한 개 이상의 **indep. source**가 있으면 각각의 **indep. source**의 해**(**응답**)**를 합한 것은 전체 **source** 의 해**(**응답**)**와 같다**.** 단**,** 전력에는 적용되지 않는다**.**

Example



우선 전류원을 **deactivate , 전류 = 0 . => open.**

그러면 $V_{t,1}$ **= 15 x 5/ (10+5) = 5 V**

다음에 전압원을 **deactivate,** 전압 **= 0 . => short.**

$V_{t,2}$ **= 5 x (5Ω**에 흐르는 전류**)**

5 Ω과 **10** Ω에 흐르는 전류의 합은 **2 A**이고**,** 비율은

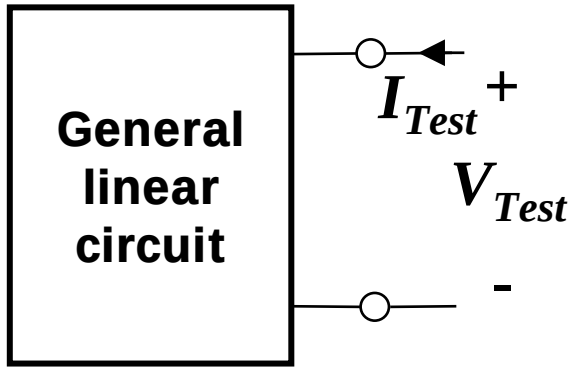
10 : 5로 나뉘어서 흐른다**.**

5 Ω에 흐르는 전류 **= 2 x 10 / (10+5) = 4/3 A**

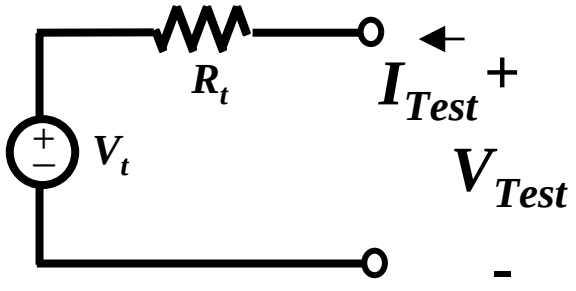
따라서, $V_{t,2} = 5 \times 4/3 = 20/3$

그러므로, $V_t = V_{t,1} + V_{t,2} = 5 + \frac{20}{3} = 11\frac{2}{3}\,\mathrm{V}$ **=>** 예제

Thévenin Equivalent Circuit를 구하는 방법
독립 전원과 종속 전원을 가리지 않음



- 회로에 독립 전원과 종속 전원이같이 있는 경우 또는 독립전원만 있는 경우, 종속 전원만 있는 경우 등 모든 경우에 사용할 수 있는 방법.



Thévenin equivalent circuit

$$\frac{V_{Test} - V_t}{R_t} = I_{Test}$$

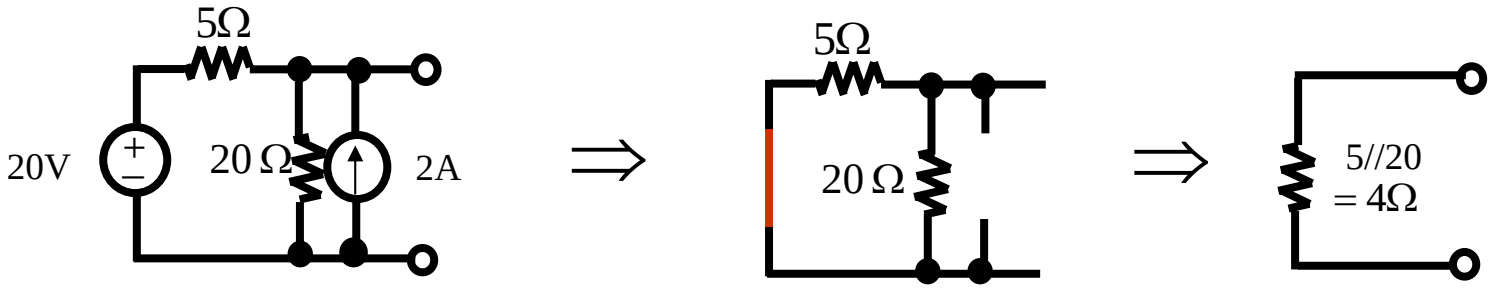
$$\therefore V_{Test} = R_t I_{Test} + V_t$$

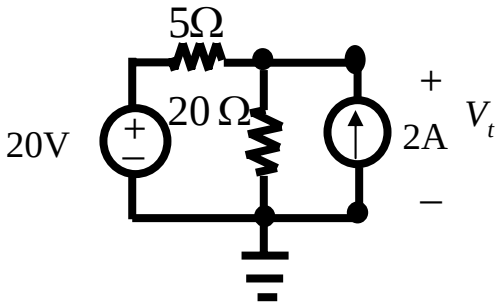
=> 예제

Thévenin Equivalent Circuit를 구하는 방법
독립 전원만 있는 경우

독립전원만을 갖고 있는 회로

- V_t : **Open circuit**로 구함
- R_t : 독립 전압원 → **short** , 독립 전류원 → **open**으로 놓고, 두 단자 사이의 등가 저항을 구한다. 즉, 전원을 **deactivate** 시킨다.



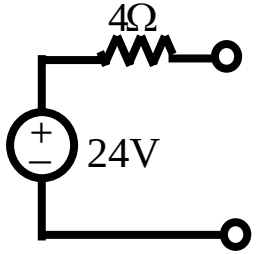


KCL

$$\frac{V_t - 20}{5} + \frac{V_t}{20} + (-2) = 0$$

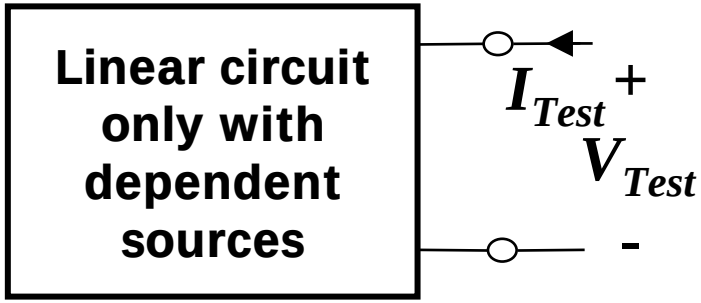
$$4(V_t - 20) + V_t - 40 = 0$$

$$V_t = 24\,\mathrm{V}$$

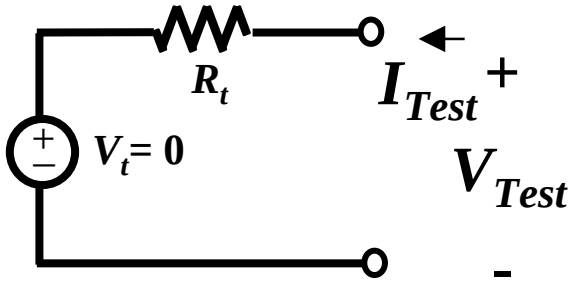


= > 예제

Thévenin Equivalent Circuit를 구하는 방법
종속 전원만 갖는 경우



- 회로에 종속 전원만 있는 경우.
- 개방시 단자 간 전압이 영이므로 **The'venin** 등가회로의 전원 전압은 영이 된다.

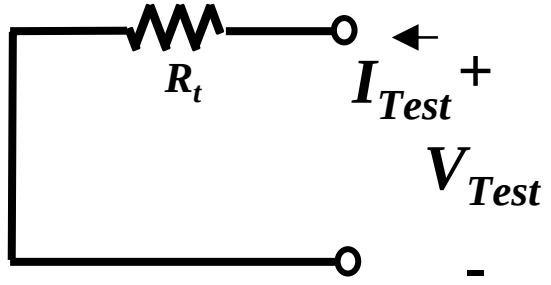


Thévenin equivalent circuit

$$\frac{V_{Test} - V_t}{R_t} = I_{Test}$$

$$\therefore V_{Test} = R_t I_{Test}$$

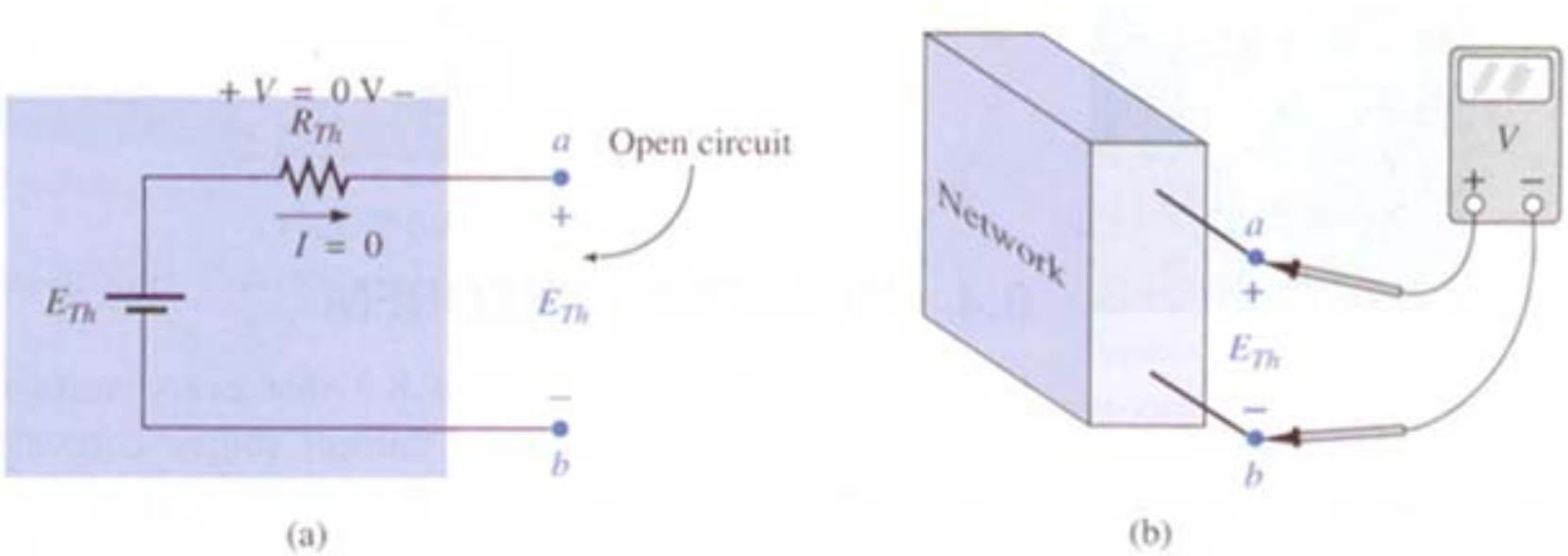
$$R_t = V_{Test} / I_{Test}$$



Thévenin equivalent circuit

=> 예제

Experimental Procedures for Thévenin Equivalent Circuit (I)

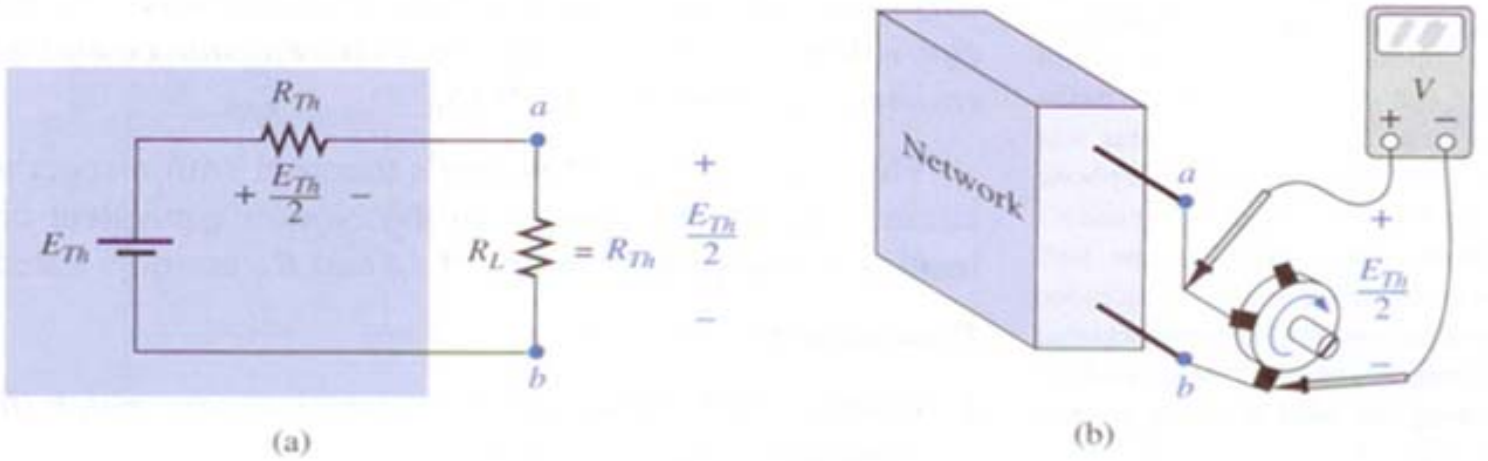


Determining E_{Th} experimentally
Boylestad 책 337쪽 그림 9.55

- The'venin 등가회로를 실험적으로 구할 수 있다**.**

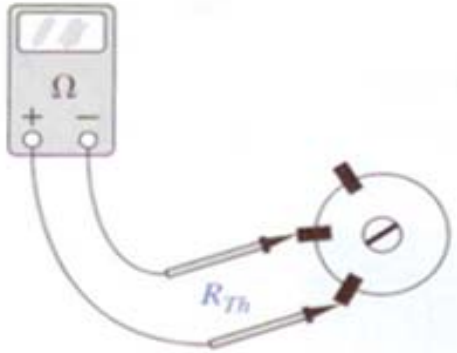
$$V_t (= E_{th}) = v_{OC} = v_{ab}$$

Experimental Procedures for Thévenin Equivalent Circuit (II)

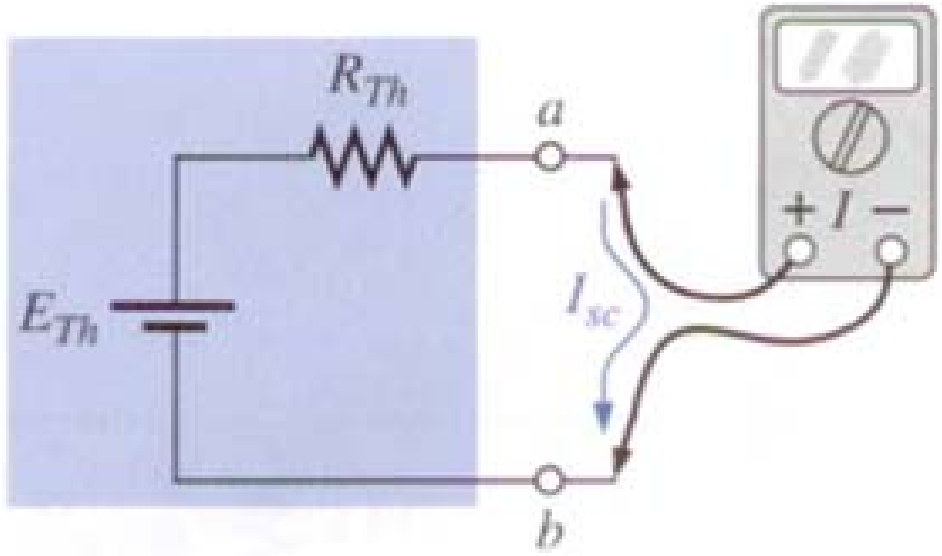


Determining R_{Th} experimentally
Boylestad 책 337쪽 그림 9.56

- 가변 저항을 연결하고 개방 시의 단자 전압의 ½ 이 되도록 가변 저항을 조정한다.
- 그런 후, 가변 저항의 값을 측정한다.
- 가변 저항의 값이 등가회로의 저항 값이다.



Experimental Procedures for Thévenin Equivalent Circuit (III)



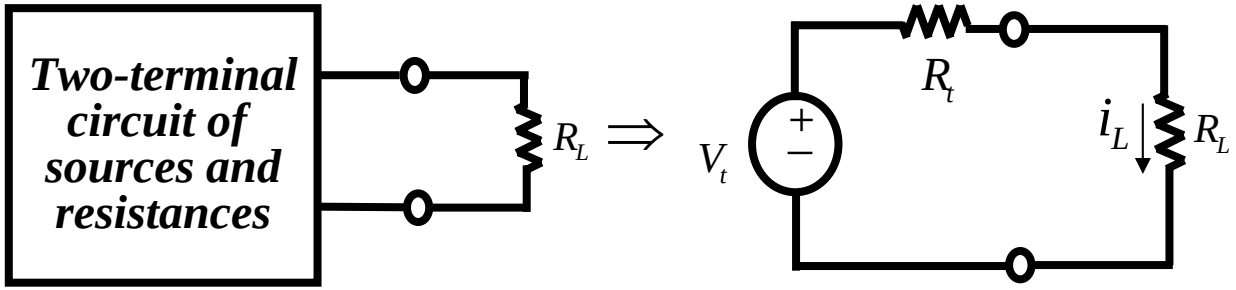
Measuring I_{sc}
Boylestad 책 338쪽 그림 9.57

- 개방시의 전압을 측정하고, 위와 같이 단락시의 전류를 측정한다.
- 아래의 관계에서 등가회로를 실험적으로 구할 수 있다.

$$I_{SC} = V_t (= E_{Th}) / R_t$$

Maximum Power Transfer

- 효율보다는 최대 전력 전달이 중요시 되는 시스템, 예를 들면, **radio receiver**와 같이 수신 안테나로부터 수신 신호를 최대한으로 얻어야 하는 시스템 등에서 사용.



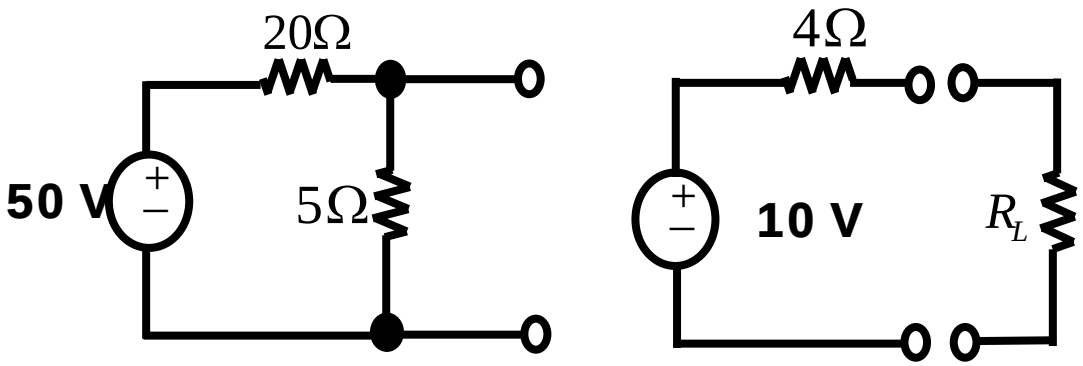
R_L에서의 **power** $\quad p = R_L i_L^2 = R_L \left(\dfrac{V_t}{R_t + R_L}\right)^2$

R_L에서의 **power**를 최대로 하는 R_L $\quad \dfrac{dp}{dR_L} = V_t^2 \dfrac{d}{dR_L}\left\{\dfrac{R_L}{(R_t + R_L)^2}\right\} = 0 \Rightarrow \boxed{R_L = R_t}$

그 때의 **power** $\quad \boxed{p_{\max} = \dfrac{1}{4}\dfrac{V_t^2}{R_L}}$

Maximum Power Transfer (Example)

Example. 두 단자로 전달되는 최대 전력은 ?



우선 이 회로를 **Thévenin** 등가회로로 변환

$$V_t = 50 \cdot 5/(20+5) = 10\,\text{V} \quad R_t = 20 // 5 = 4\,\Omega$$

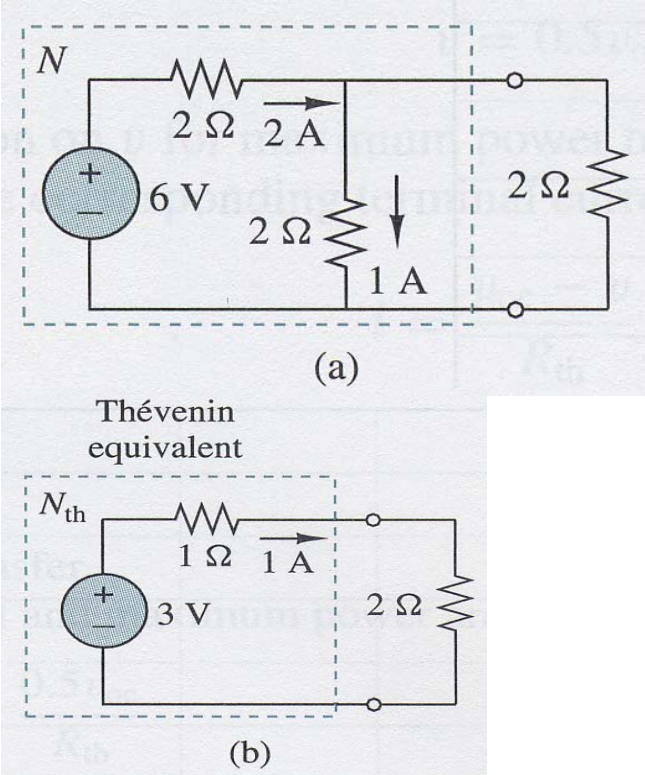
R_L은 **4 Ω** 일 때 최대 전력이 전달

$$p_{\max} = R_L \left(\frac{V_t}{R_t + R_L} \right)^2 = 4 \cdot \left(\frac{10}{4+4} \right)^2 = 6.25\,\text{W}$$

= > 예제

Power in Equivalent Circuits

The The'venin equivalent cannot be used to calculate power consumption within the network N.



Compute the power loss within the actual N and within it's The'venin equivalent.

Within N,

$$P_N = 2\times 2^2 + 1\times 2 = 10\ \text{W}$$

Within N_{th},

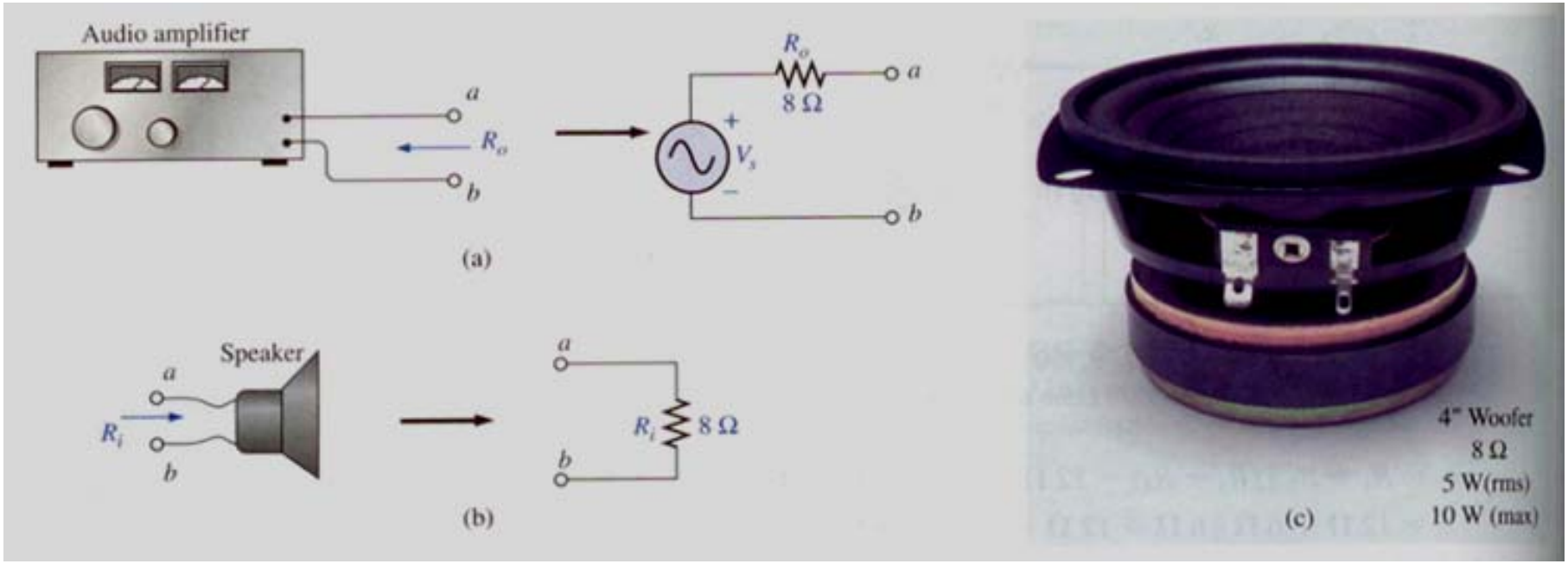
$$P_{N_{th}} = 1\times 1 = 1\ \text{W}$$

Clearly, $P_N \neq P_{N_{th}}$

- The The'venin equivalent is not in general representative of power relationships within the network.

- The The'venin equivalent simply maintains terminal *i-v* relationships.

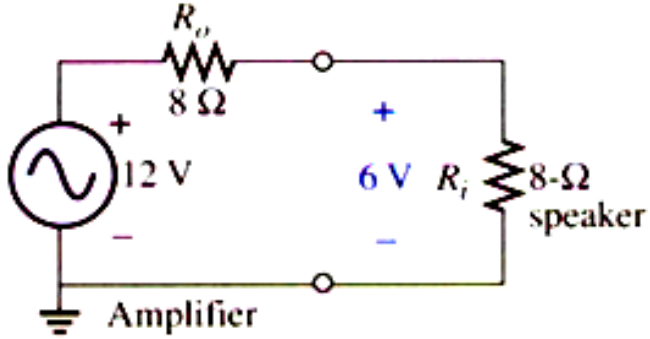
Applications – Speaker System (I)



Component of a speaker system:
(a) amplifier; (b) speaker; (c) commercially
Boylestad 책 358쪽 그림 9.111

- **Audio amp** 는 출력 임피던스**(**저항**)**을 갖고 있고**,**
- **Speaker** 도 내부 임피던스**(**저항**)**을 갖고 있다**.**
- 그림 **(b)** 는 표준 **8 Ω** 스피커이고**,** 그림 **(c)** 는 **8 Ω woofer** 를 보이고 있다**.**

Applications – Speaker System (II)

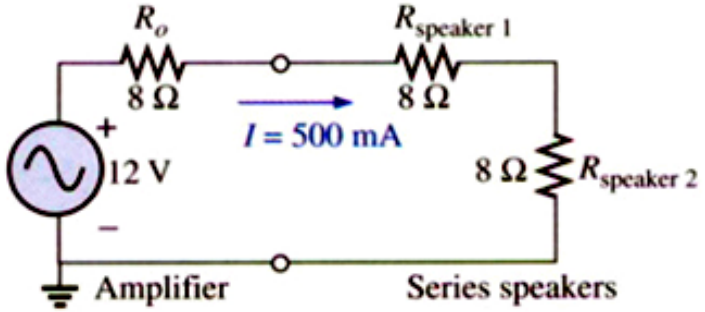


(a)

- 8 Ω 스피커의 최대 출력은 $6^2/8 = 4.5$ W 이다.

Speaker connections:
(a) single unit; (b) in series; (c) in parallel
Boylestad 책 358쪽 그림 9.112

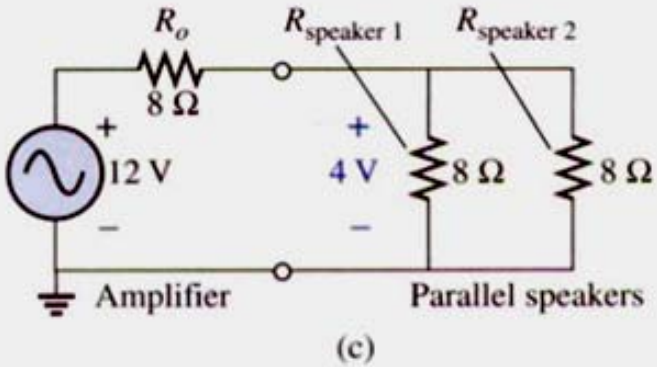
- 8 Ω 스피커를 두 개를 접속하여 얻을 수 있는 출력은 얼마일까?



(b)

- 직렬로 연결한 경우가 **(b)** 이며, 스피커 각각의 출력은 최대 출력은 $4^2/8 = 2$ W 이고, 합이 **4 W**이다.

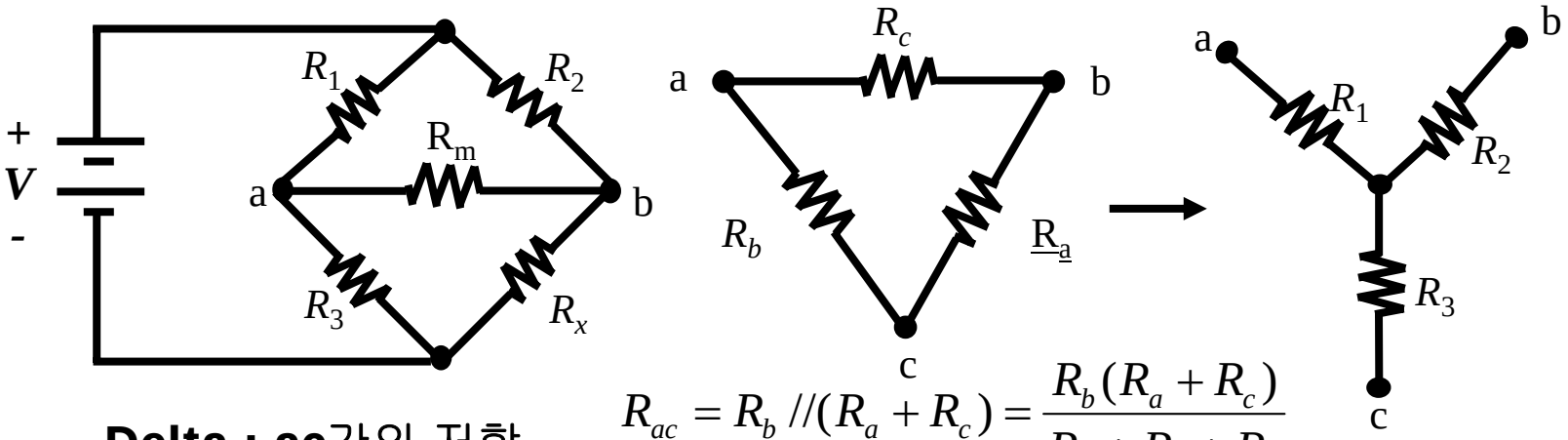
- 병렬로 연결한 경우가 **(c)** 이며, 스피커 각각의 출력은 최대 출력은 $4^2/8 = 2$ W 이고, 합이 **4 W**이다.



(c)

-임의의 같은 저항을 갖는 스피커 두 개를 직렬 또는 병렬로 연결해서 최대 전력이 전달되도록 한다면 어떤 저항을 갖는 스피커를 사용해야 할까?

Delta-to-Wye Equivalent Circuits (I)



Delta : ac간의 저항 $$R_{ac} = R_b \,//\,(R_a + R_c) = \frac{R_b(R_a + R_c)}{R_a + R_b + R_c}$$

bc간의 저항 $$R_{bc} = R_a \,//\,(R_b + R_c) = \frac{R_a(R_b + R_c)}{R_a + R_b + R_c}$$

ab간의 저항 $$R_{ab} = R_c \,//\,(R_a + R_b) = \frac{R_c(R_a + R_b)}{R_a + R_b + R_c}$$

$$R_{ac} + R_{bc} + R_{ab} = \frac{2(R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a)}{R_a + R_b + R_c}$$

Wye : $$R_{ac} = R_1 + R_3, \quad R_{bc} = R_2 + R_3, \quad R_{ab} = R_1 + R_2$$

$$R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{2}(R_{ac} + R_{bc} + R_{ab}) = \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}{R_a + R_b + R_c} = S$$

Delta-to-Wye Equivalent Circuits (II)

- Delta to Wye

$$R_1 = S - (R_2 + R_3) = S - R_{bc} = \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}{R_a + R_b + R_c} - \frac{R_a (R_b + R_c)}{R_a + R_b + R_c} = \frac{R_b R_c}{R_a + R_b + R_c}$$

$$R_2 = S - (R_3 + R_1) = S - R_{ac} = \frac{R_a R_c}{R_a + R_b + R_c}$$

$$R_3 = S - (R_1 + R_2) = S - R_{ab} = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b + R_c}$$

- Wye to Delta

$$R_1 R_a = \frac{R_a R_b R_c}{R_a + R_b + R_c} = R_2 R_b = R_3 R_c = T, \quad R_a = \frac{T}{R_1}, \quad R_b = \frac{T}{R_2}, \quad R_c = \frac{T}{R_3}$$

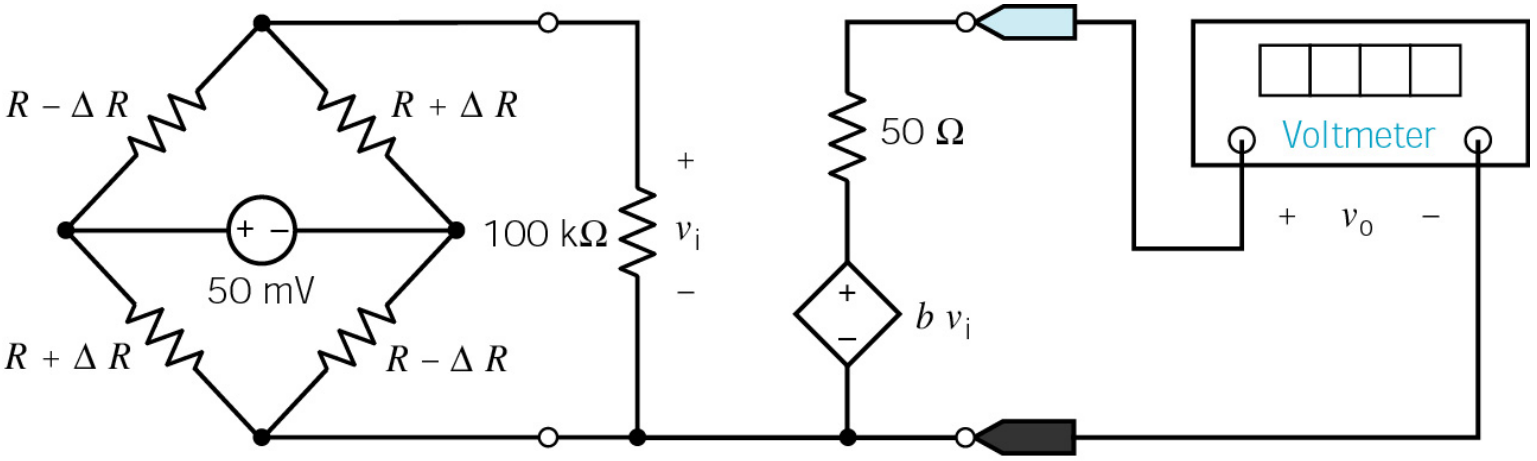
$$R_1 R_a = T = \frac{T^3 / (R_1 R_2 R_3)}{T(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3)} = \frac{T^2}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} = \frac{(R_1 R_a)^2}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}$$

$$\therefore R_a = \frac{1}{R_1}(R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1), \quad R_b = \frac{1}{R_2}(R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1),$$

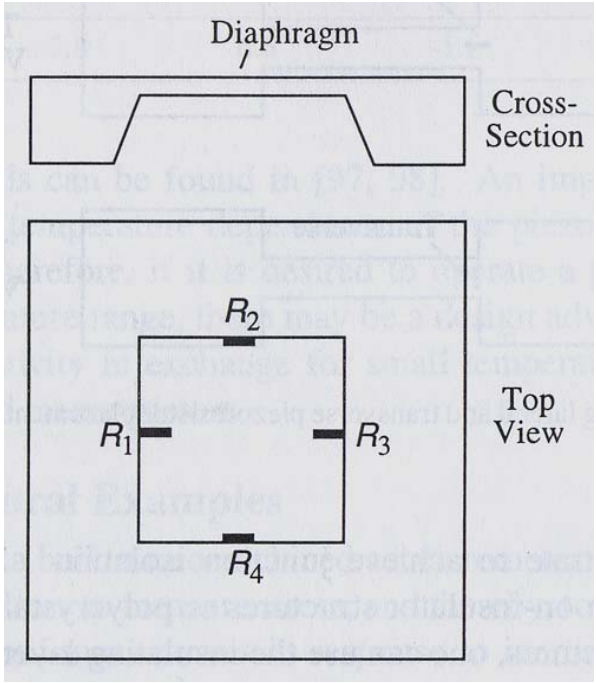
$$R_c = \frac{1}{R_3}(R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1)$$

Strain Gauge Bridge

- **Strain gauge:** 힘으로부터 유발되는 기계적인 변위**(strain)**을 측정하는 변환기**.**
- 압저항 성질을 이용**.** 변위에 비례하는 저항의 변화를 발생**.**
- 네 개의 압저항으로 **Bridge** 회로를 구성하여 힘이나 압력센서를 구성한다**.**
- **Bridge** 회로의 출력 전압 v_i 는 작기 때문에 증폭하여 전압계로 읽는다**.**



Silicon Pressure Sensors - Structural Examples (I)



- **All resistor axes are along one of the <110> directions.**
- **The longitudinal stress on R_1 and R_3 is the transverse stress at R_2 and R_4, and vice versa.**
- **If resistor R_1 experiences a longitudinal stress σ_l, it must simultaneously experience a transverse stress $\nu\,\sigma_l$ (ν is the Poisson ratio).**
- **The total change in resistance for R_1 would be**

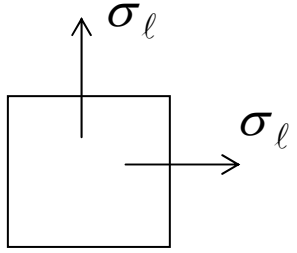
$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \pi_\ell \sigma_\ell + \pi_t \sigma_t = (\pi_\ell + \nu \pi_t)\sigma_\ell$$

$\nu = 0.064$ **in the [110] direction of (100) plane.**

p-type

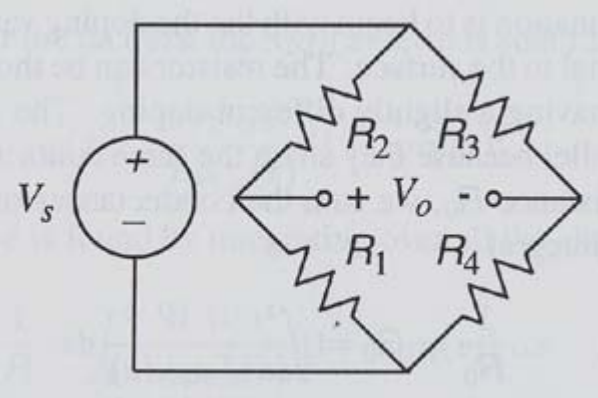
$$\pi_\ell = 71.8 \times 10^{-11},\ \pi_t = -66.3 \times 10^{-11} \rightarrow \frac{\Delta R_1}{R_1} = 67.556 \times 10^{-11} \sigma_\ell$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = (-66.3 + 0.064 \times 71.8)\sigma_\ell = -61.704 \times 10^{-11} \sigma_\ell$$



From Microsystem Design

Silicon Pressure Sensors - Structural Examples (II)



- **Wheatstone-bridge circuit**

$$R_1 = R_3 = (1+\alpha_1)R_o, \quad R_2 = R_4 = (1-\alpha_2)R_o$$

- **α_1 and α_2 represent the product of the effective piezoresistive coefficient and the stress.**

$$V_o = \frac{R_1}{R_1+R_2}V_S - \frac{R_4}{R_3+R_4}V_S = \frac{R_1R_3 - R_2R_4}{(R_1+R_2)(R_3+R_4)}V_S \qquad \because R_1 = R_3,\ R_2 = R_4$$

$$= \frac{R_1 - R_2}{R_1+R_2}V_S = \frac{(1+\alpha_1)-(1-\alpha_2)}{(1+\alpha_1)+(1-\alpha_2)} = \frac{\alpha_1+\alpha_2}{2+\alpha_1-\alpha_2}$$

Therefore, $$\frac{V_o}{V_S} = \frac{\alpha_1+\alpha_2}{2+\alpha_1-\alpha_2}$$

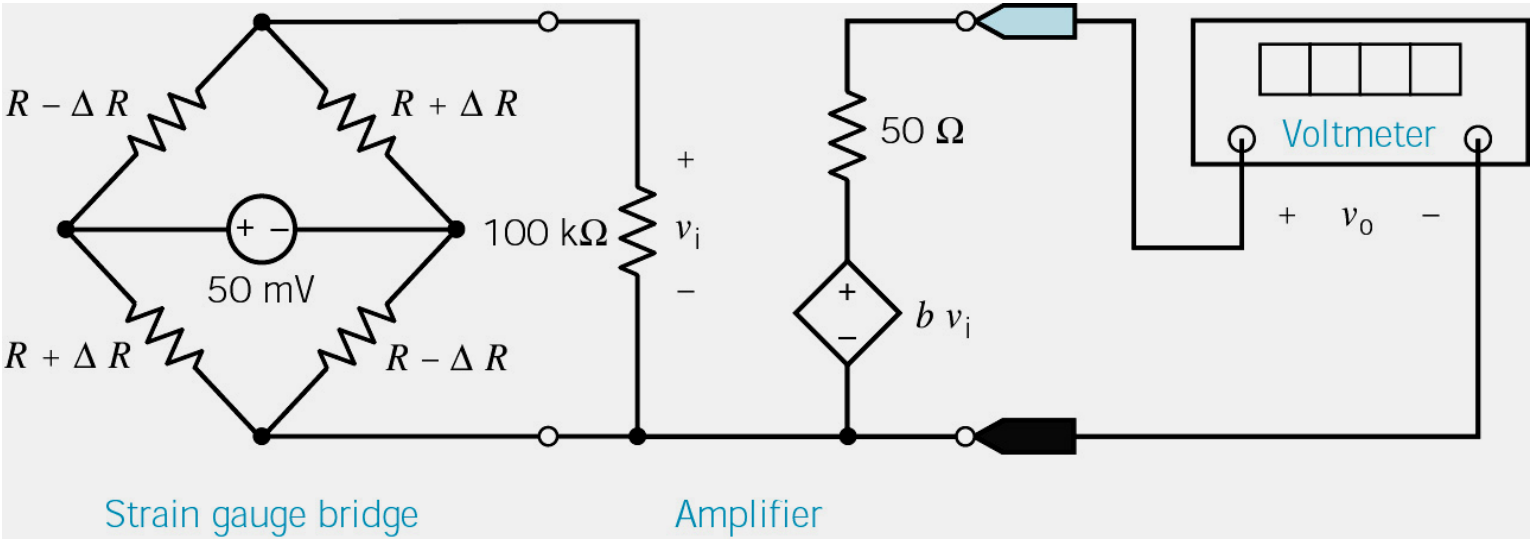
- Since α_1 and α_2 are typically small (on the order of 0.02 or less), and differ from each other by only 10 %, this bridge gives an optimally large output without a large nonlinearity.

From Microsystem Design

Strain Gauge Bridge – Situation, Assumptions and Goals

- R = 120 Ω when the strain is zero.
- -2 Ω ≤ ΔR ≤ 2 Ω
- -2 Ω ≤ ΔR ≤ 2 Ω 로 변할 때 v_o는 – 10 V 에서 10 V 로 변해야 한다.
- 따라서, 다음과 같이 설계해야 한다.

$$v_o = 5\,\frac{\mathrm{V}}{\Omega}\cdot\Delta R$$

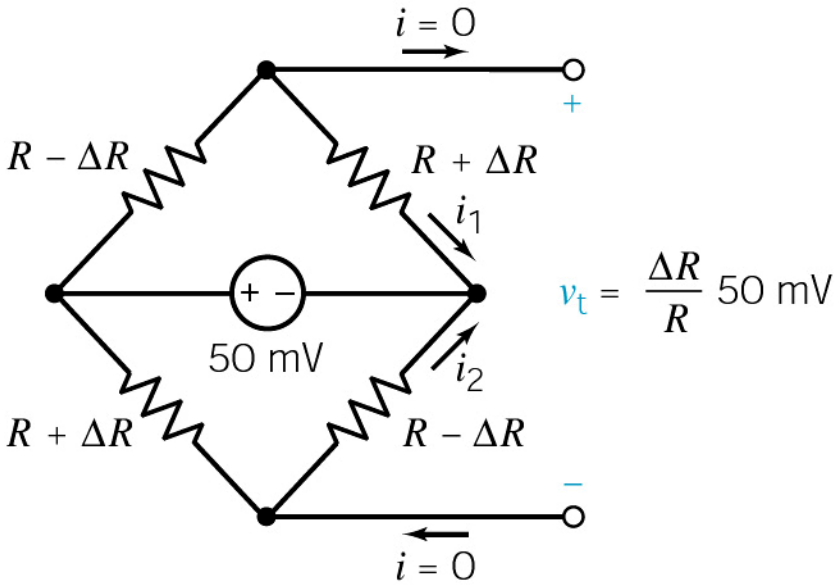


Strain Gauge Bridge – Plan

- **Bridge** 회로의 **The'venin** 등가회로를 구한다.
- 개방시의 전압과 등가 저항을 구한다.
- 개방시 전압 :

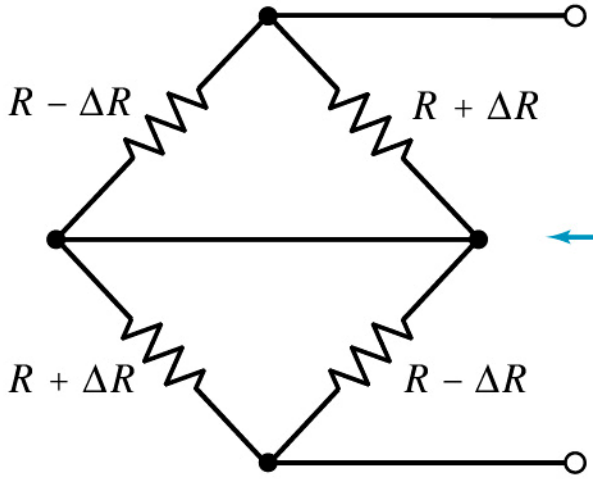
$$v_t = 50\ \text{mV}\ \frac{\Delta R}{R}$$

- 등가 저항 : $R >> \Delta R$ 이면 $R_t = R$.



$v_t = \frac{\Delta R}{R}$ 50 mV

(a)



$R_t = \frac{R^2 - \Delta R^2}{R}$

(b)

Strain Gauge Bridge – Solution

- **Bridge** 회로의 출력 전압 v_i 는 분압 회로에 의하여 구한다.

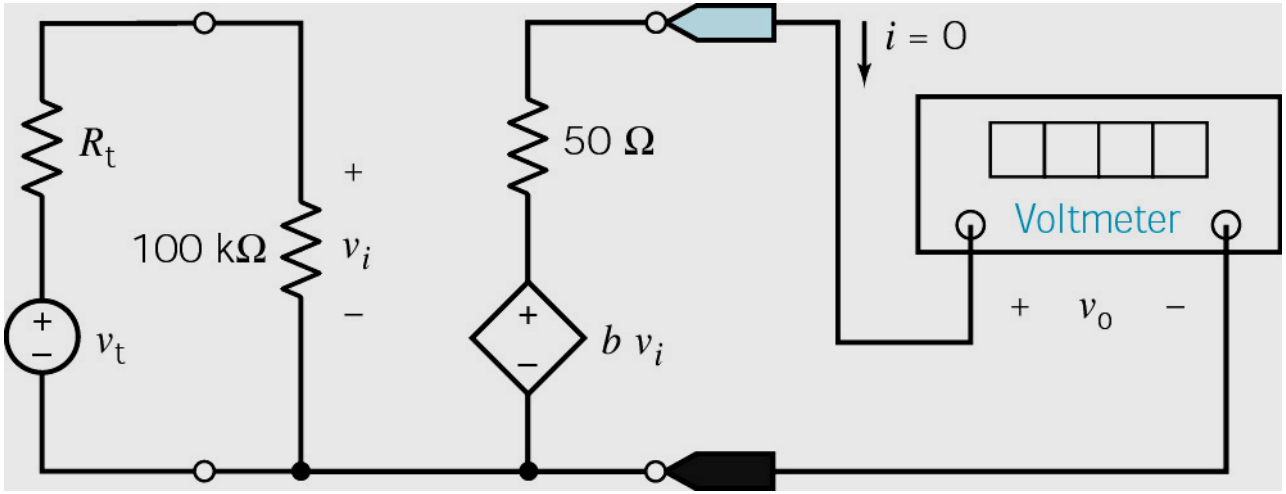
$$v_i = 50\ \text{mV}\ \frac{\Delta R}{R} \times \frac{100\ \text{k}\Omega}{100\ \text{k}\Omega + R_t} = 50\ \text{mV}\ \frac{\Delta R}{R} \times 0.9988 = 0.4162 \cdot \Delta R\ \text{mV}$$

- 전압계의 전압 $v_o = bv_i = b \cdot 0.4162 \cdot \Delta R\ \text{mV}$

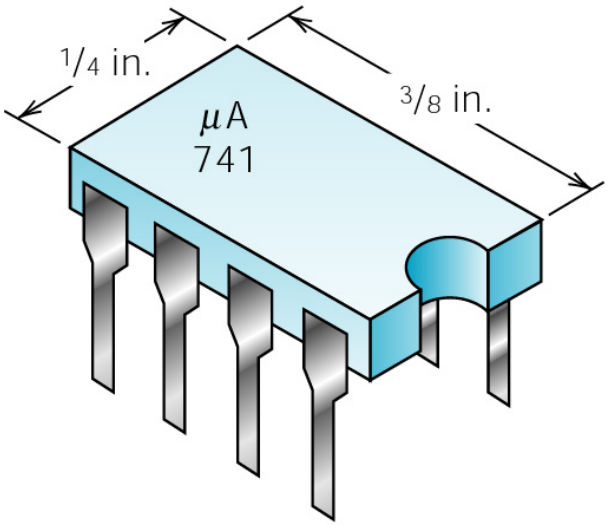
$$b \cdot 0.4162\ /1000 = 5 \qquad \because\ v_o = 5\,\frac{\text{V}}{\Omega} \cdot \Delta R$$

$$b = 12{,}013$$

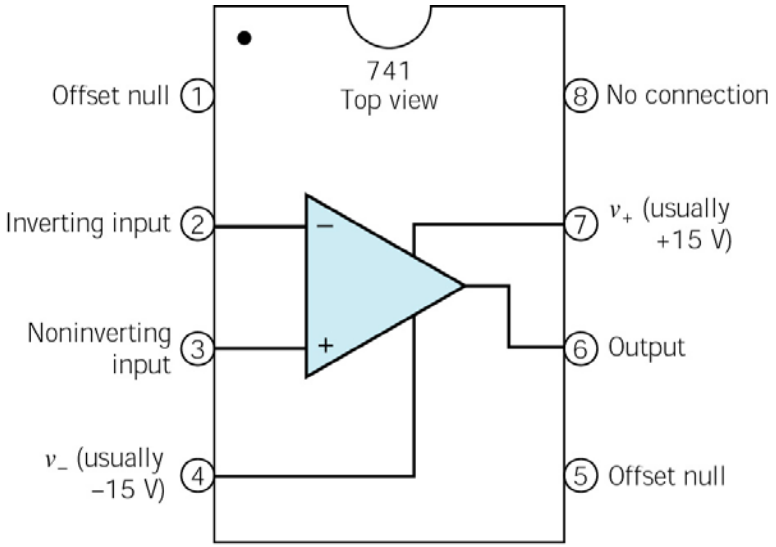
- 최종 설계 $v_o = 12{,}013 \times 0.4162\ /1000 \cdot \Delta R = 4.9998 \cdot \Delta R\ \text{V}$



Operational Amplifier



(a) A μA741 integrated circuit has eight connecting pins



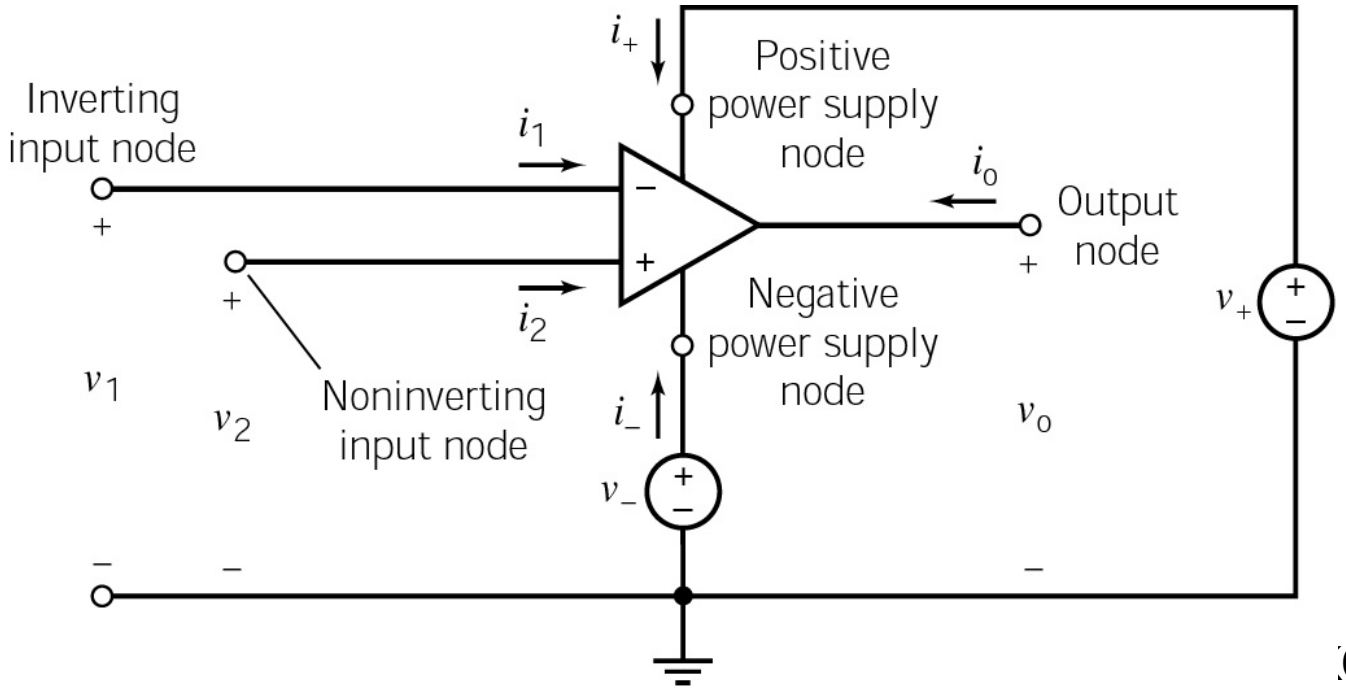
(b) The correspondence between the circled pin numbers of the integrated circuit and the nodes of the operational amplifier.

주요한 단자

1. **inverting input**
2. **noninverting input**
3. **output**
4. **positive power supply (v^+)**
5. **negative power supply (v^-)**

- **NC : no connection**
- **Balance(offset null) : compensate for a degradation**

Symbol and Circuits



KCL

$$i_1 + i_2 + i_o + i_+ + i_- = 0$$

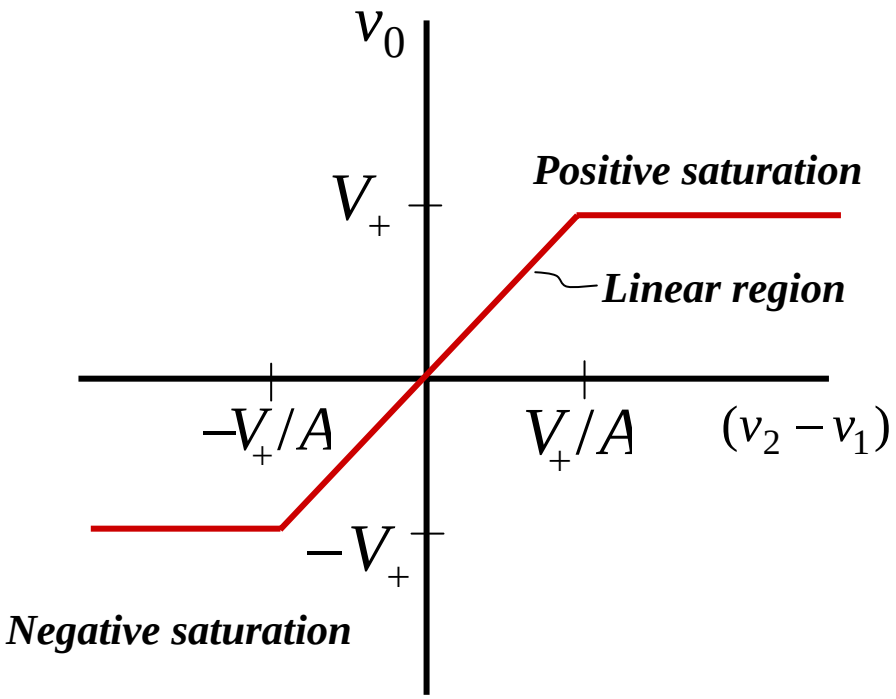
An op amp, including power supplies v^+ and v^-.

Common node : reference

- All voltages rise from the reference node.

- All currents come into the amplifier.

Ideal Operational Amplifier



- ***Op amp***가 선형이기 위해서는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$|v_o| \le v_{sat}$$

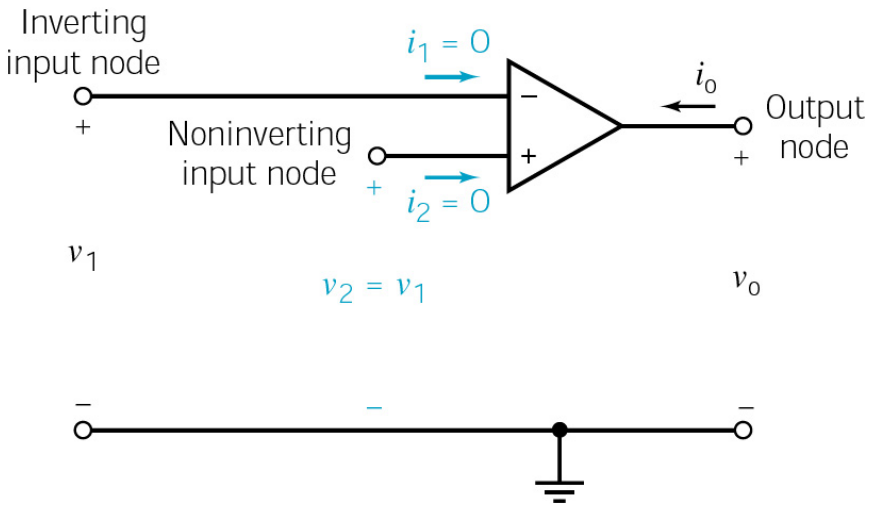
$$|i_o| \le i_{sat}$$

$$\left|\frac{dv_o(t)}{dt}\right| \le SR \quad (SR,\ slew\ rate)$$

– *For* $\mu A741$,

$$v_{sat} = 14V, \quad i_{sat} = 2mA, \quad SR = 500{,}000\,V/s$$

Ideal Operational Amplifier



The ideal operational amplifier

Table. Operating Condition for an Ideal Operational Amplifier

Variable	*Ideal Condition*
Inverting node input current	$i_1 = 0$ ⇐ $R_i \to \infty$
Noninverting node input current	$i_2 = 0$
Voltage difference between inverting node voltage v_1 and noninverting node voltage v_2	$v_2 - v_1 = 0$ ⇐ $A \to \infty$

- Ideal operational amplifier

Op amp input current는 영이다.

$$i_1 = 0, \quad i_2 = 0$$

Input node voltage는 같다.

$$v_2 = v_1$$

* Virtual short condition.

Ideal Operational Amplifier

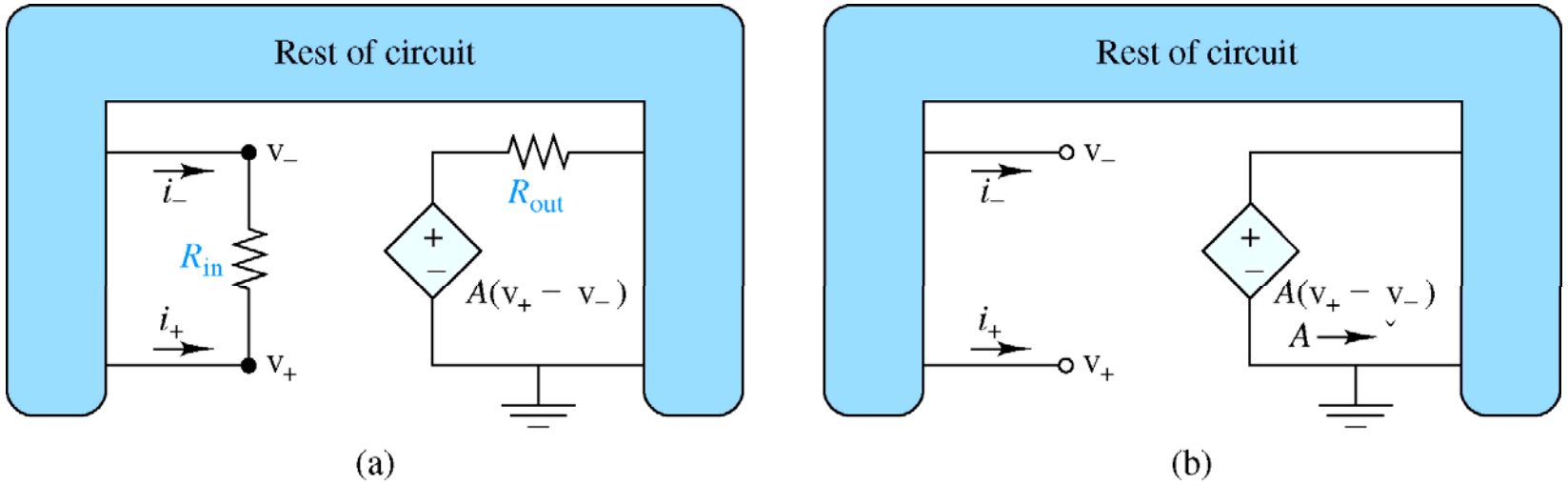


Figure 4.4 (a) Op amp model. (b) Idealized model.

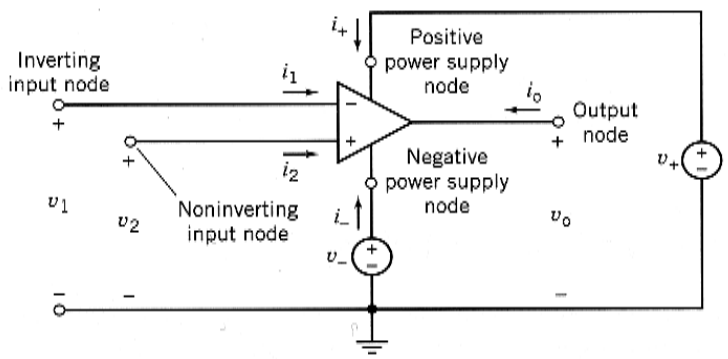
-Ideal OP Amp

(1) Infinite gain, (2) infinite input resistance, (3) zero output resistance

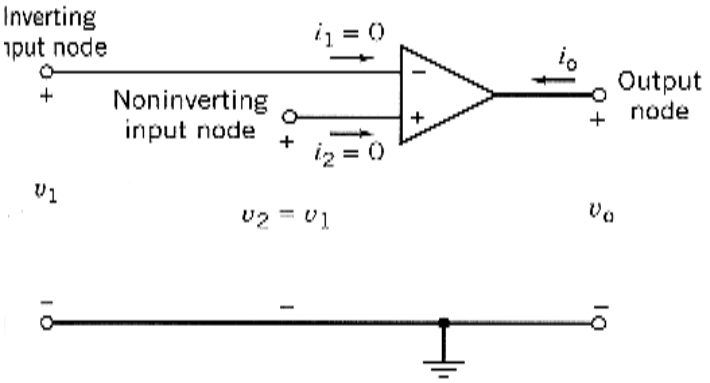
$$R_i \to \infty, \quad R_o \to 0, \quad A \to \infty$$

- 실제 소자 거동(e.g. saturation)을 정확히 묘사하지 못하나, 해석을 단순화.

Op amp 회로의 간략화



An op amp, including power supplies v^+ and v^-.



The ideal operational amplifier

KCL

$i_2 + i_1 + i_o + i_+ + i_- = 0$

여기서 i_2 , i_1은 매우 작으므로

$$i_2 = i_1 \approx 0$$

따라서, $i_o = -(i_+ + i_-)$

Input current는 영이지만 **output current**는 상당히 흐른다.

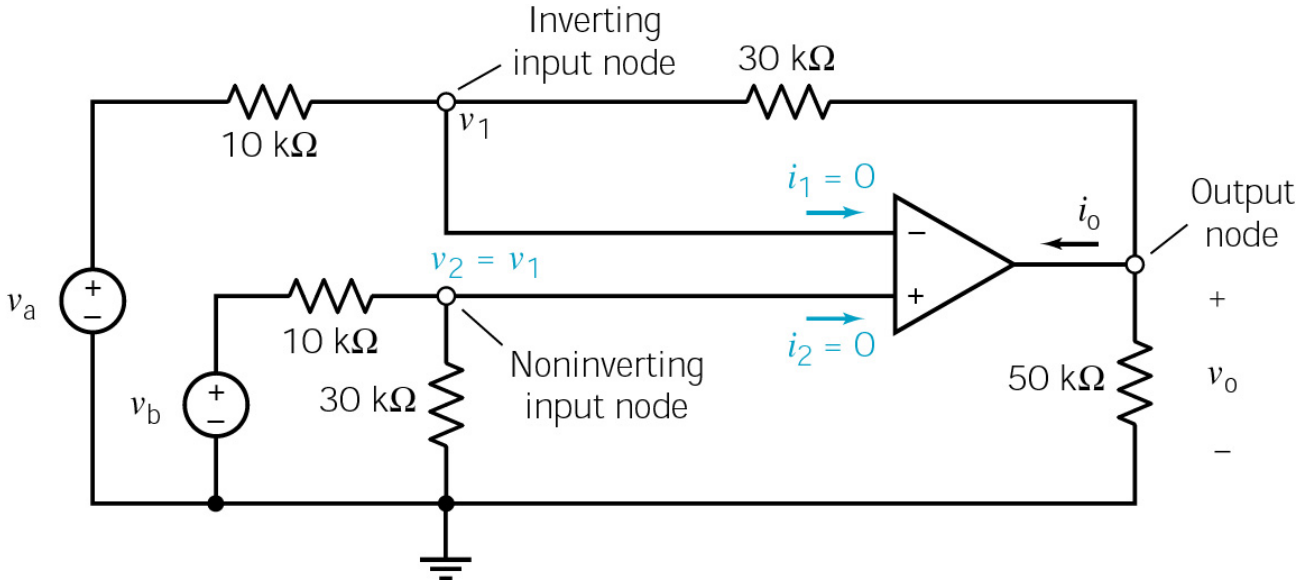
Op amp 회로는 선형 구간에서 그림과 같이 간략화 할 수 있다.

여기서 $|v_0| < V_+$ 이고

$i_2 + i_1 + i_o = 0$ 은 성립하지 않는다.

왜냐하면 이 회로는 간략화한 회로이기 때문이다.

Nodal Analysis of Op Amp Circuits



Op amp : virtual short condition

$$v_2 = v_1, \quad i_1 = i_2 = 0$$

Input 단자에서 **KCL** 적용.

Node 1

$$\frac{v_1 - v_a}{10k\Omega} + \frac{v_1 - v_o}{30k\Omega} + 0 = 0 \qquad (1)$$

Node 2

$$\frac{v_1 - v_b}{10k\Omega} + \frac{v_1 - 0}{30k\Omega} + 0 = 0 \qquad (2)$$

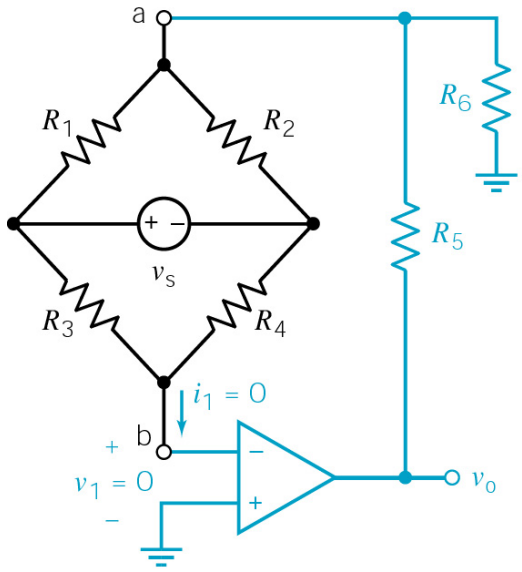
v_1 , v_o가 미지수

$$\frac{4}{3}v_1 - v_a - \frac{v_o}{3} = 0 \qquad (1')$$

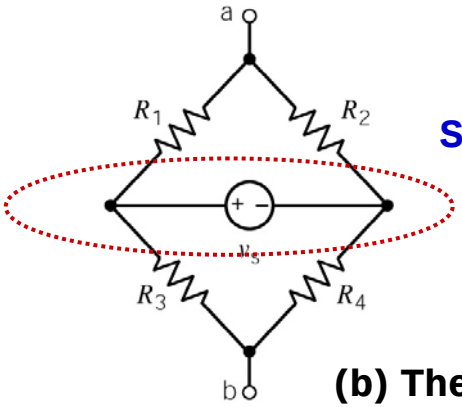
$$\frac{4}{3}v_1 - v_b = 0 \qquad (2')$$

따라서, $v_o = -3(v_b - b_a)$

Bridge Amplifier Circuits (I)



(a) A bridge amplifier, including the bridge circuit



Supernode

(b) The bridge circuit

Virtual short condition

$v_2=v_1=v_b=0, \quad i_1=0$

v_c, v_c+v_s로 *Node Voltage* 정의

Node b*의 *KCL

$$\frac{0-(v_c+v_s)}{R_3}+\frac{0-v_c}{R_4}=0 \qquad (1)$$

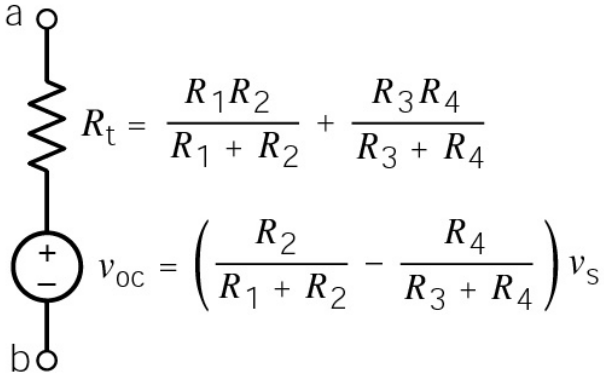
Node a*의 *KCL

$$\frac{v_a-(v_c+v_s)}{R_1}+\frac{v_a-v_c}{R_2}+\frac{v_a-v_o}{R_5}+\frac{v_a}{R_6}=0 \qquad (2)$$

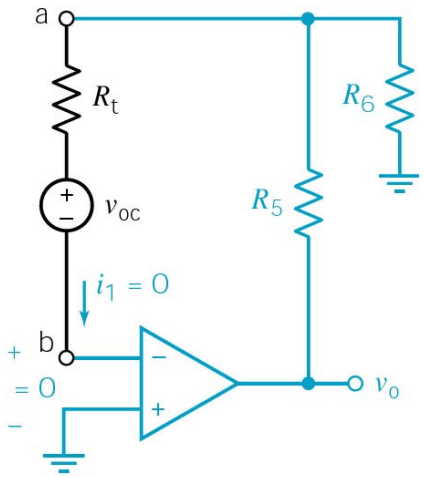
Supernode c, d*의 *KCL

$$\frac{v_c-v_a}{R_2}+\frac{v_c-0}{R_4}+\frac{v_c+v_s-v_a}{R_1}+\frac{v_c+v_s-0}{R_3}=0 \qquad (3)$$

Bridge Amplifier Circuits (II)



(c) Its Thévenin equivalent circuit



(d) The bridge amplifier, including the Thévenin equivalent of the bridge

v_c, v_a, v_o가 미지수.

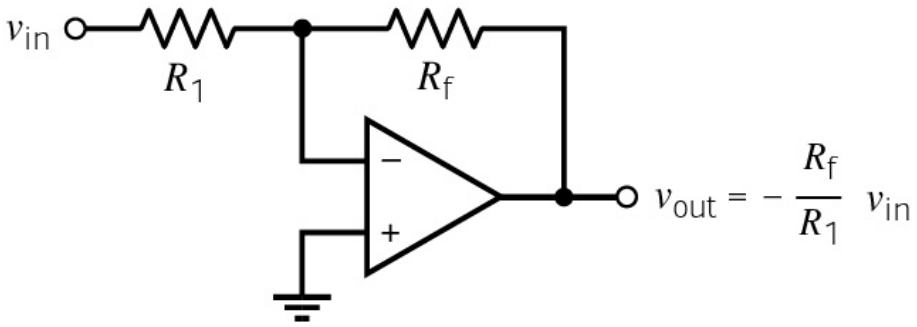
$$v_c\left(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}\right)=-\frac{v_s}{R_3} \quad (1')$$

$$\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_5}+\frac{1}{R_6}\right)v_a-\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)v_c-\frac{1}{R_5}v_0=\frac{v_s}{R_1} \quad (2')$$

$$-\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)v_a+\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}\right)v_c=-\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_3}\right)v_s \quad (3')$$

v_a, v_c를 소거하면 v_0를 구할 수 있다.

Inverting Amplifier



(a) Inverting amplifier

$v_2 = 0$ 이고 $v_2 = v_1$ 이므로 $v_1 = 0, i_1 = 0$

KCL에서 $i_{R1} + i_{Rf} = 0$.

$$\frac{0 - v_{in}}{R_1} + \frac{0 - v_0}{R_f} = 0$$

$$v_0 = -\frac{R_f}{R_1} v_{in} \quad (\frac{R_f}{R_1} : scaling \ \ factor)$$

$|v_0| < V_+$ 이어야 하므로

$$\left|\frac{R_f}{R_1} v_{in}\right| < V_+ \rightarrow |v_{in}| < \frac{V_+}{R_f / R_1}$$

R_f가 없는 *open loop*인 경우

$v_0 = -Av_1$이 되고 $i_1 \approx 0$ 이므로

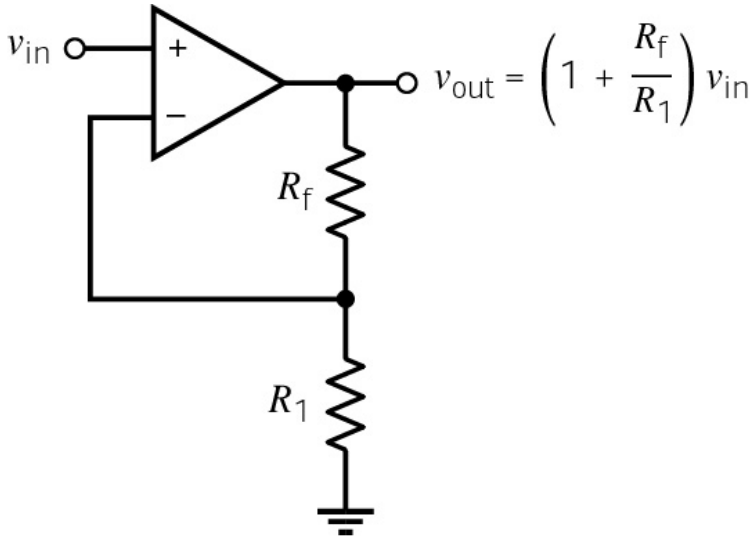
$v_1 \approx v_{in}$가 된다.

따라서, $v_0 = -Av_{in}$이고

$|v_s| < V_+ / A$ 이어야 하므로

v_{in}는 매우 작아야 *Op amp*가 선형동작한다.

Noninverting Amplifier



(b) Noninverting amplifier

$i_2 \approx 0$ 이므로 R_g 에서의 전압강하 = 0.

따라서, $v_2 \approx v_{in}$이고 $v_1 \approx v_2$이므로

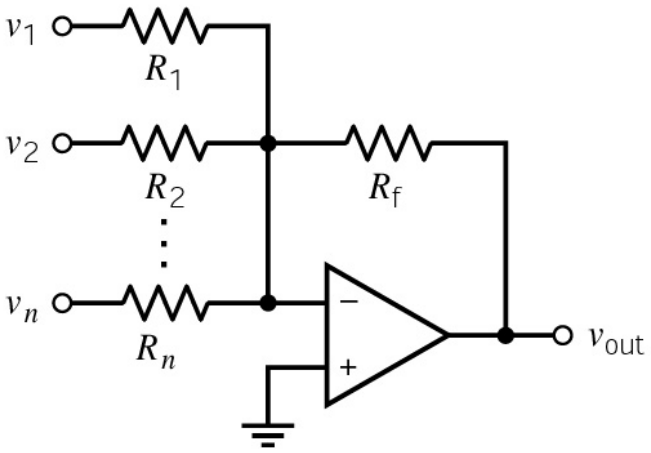
$$v_1 = v_{in}$$

KCL에서 $$\frac{v_{in} - 0}{R_1} + \frac{v_{in} - v_o}{R_f} = 0$$

$$\frac{v_o}{R_f} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_f}\right) v_{in}$$

$$v_o = \left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right) v_{in}$$

Summing Amplifier



$$v_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \cdots + \frac{R_f}{R_n} v_n\right)$$

(d) Summing amplifier

$v_p = v_n = 0$ 이고 ***KCL***을 적용.

$$\frac{v_n - v_o}{R_f} + \frac{v_n - v_1}{R_1} + \frac{v_n - v_2}{R_2} + \frac{v_n - v_3}{R_3} = 0$$

$$v_o = (-\frac{R_f}{R_1})v_1 + (-\frac{R_f}{R_2})v_2 + (-\frac{R_f}{R_3})v_3$$

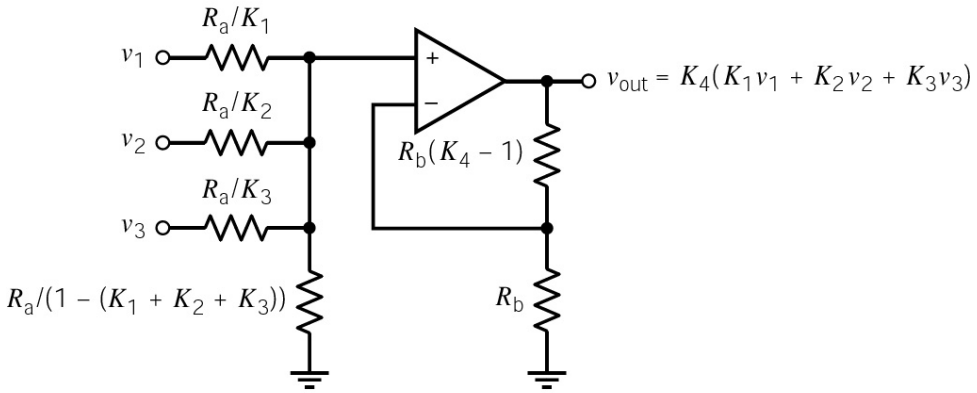
따라서, v_o는 ***scale***된 **n**개의 입력 전압의 합이고 부호는 역전되어 있다.

Noninverting Summing Amplifier

$v_p = v_n$ 이고 ***KCL***을 적용.

$$\frac{v_n - 0}{R_b} + \frac{v_n - v_0}{(K_4 - 1)R_b} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{K_4 v_n}{(K_4 - 1)R_b} = \frac{v_0}{(K_4 - 1)R_b} \Rightarrow v_n = \frac{v_0}{K_4}$$



(e) Noninverting summing amplifier

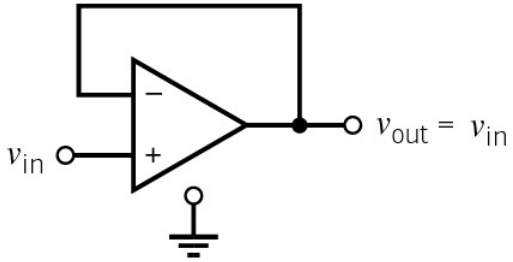
$$\frac{v_n - v_1}{R_a / K_1} + \frac{v_n - v_2}{R_a / K_2} + \frac{v_n - v_3}{R_a / K_3} + \frac{v_n - 0}{R_a /(1-(K_1 + K_2 + K_3))} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{K_1 v_n}{R_a} + \frac{K_2 v_n}{R_a} + \frac{K_3 v_n}{R_a} + \frac{(1-(K_1 + K_2 + K_3))v_n}{R_a} = \frac{K_1 v_1 + K_2 v_2 + K_3 v_3}{R_a}$$

$$v_n = K_1 v_1 + K_2 v_2 + K_3 v_3$$

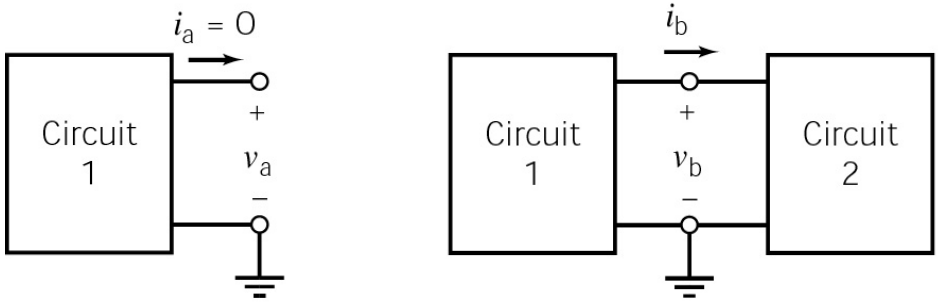
따라서, $v_o = K_4(K_1 v_1 + K_2 v_2 + K_3 v_3)$

Voltage Follower and Loading Effect



Voltage follower (buffer amplifier)

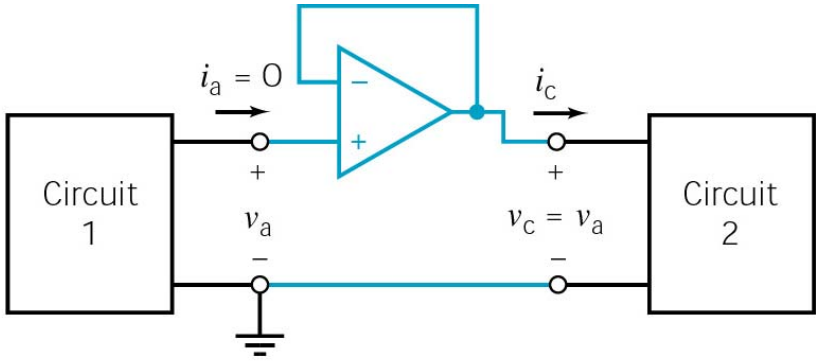
$$v_- = v_{in} = v_{out}$$



(a) Circuit#1 before **(b) After Circuit#2 is connected**

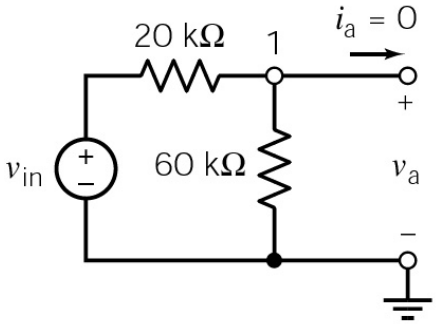
Circuit #1의 출력은 **Circuit #2**를 연결하는 순간 변하고 만다. 이를 **Loading effect**라고 한다.

그림**(b)**와 같은 전압은 바뀌게 된다. **Op amp**의 **voltage follower**를 이용하면 출력전압을 그대로 유지할 수 있다.

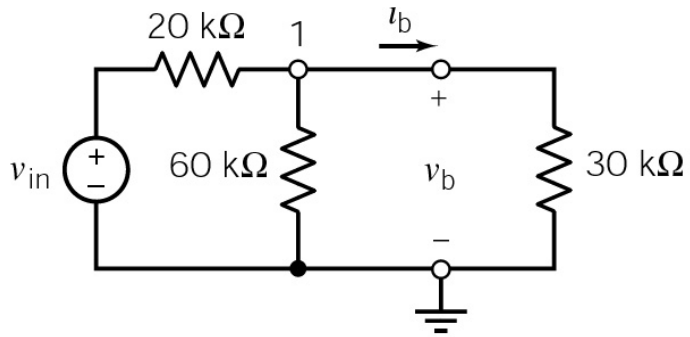


(c) Preventing loading using a voltage follower

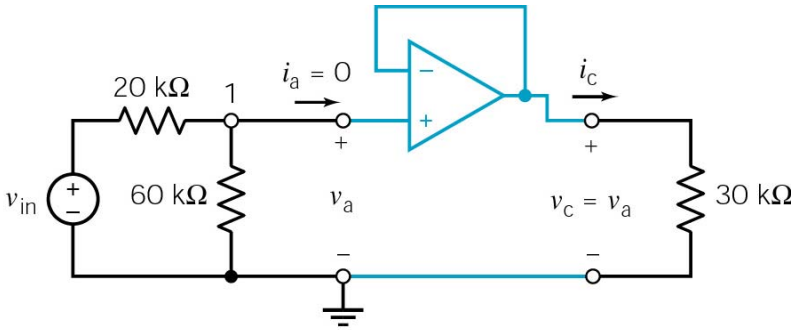
Voltage Follower (Buffer or Isolation Amplifier)



(a) A voltage divider before a 30 kΩ resistor is added



(b) A voltage divider after a 30-kΩ resistor is added



(c) A voltage follower is added to prevent loading

그림 (a)의 경우 $v_a = \frac{60}{20+60} v_{in} = \frac{3}{4} v_{in}$

그림 (b)의 경우.

30 kΩ 의 저항을 연결했으므로

$$v_b = \frac{60//30}{20+60//30} = \frac{1}{2} v_{in}$$

그림 (c)와 같이voltage follower를 삽입.

Node a의 KCL

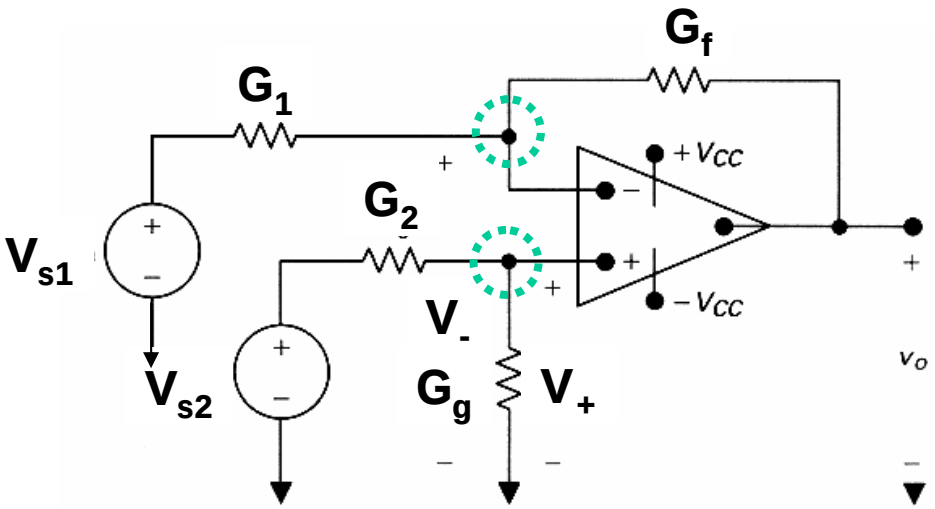
$$\frac{v_a - v_{in}}{20k\Omega} + \frac{v_a - 0}{60k\Omega} = 0 \Rightarrow \left(\frac{1}{20k\Omega} + \frac{1}{60k\Omega}\right) v_a = \frac{v_{in}}{20k\Omega}$$

$$v_a = 3/4\, v_{in}$$

$v_{out} = v_a$ 이므로 $v_{out} = 3/4\, v_{in}$

$i_c = \frac{3}{4} v_{in} / 30k\Omega = v_{in} / 40k\Omega$

Difference Amplifier



$i_+ = 0$ 이므로

$$G_2(v_+ - v_{s2}) + G_g v_+ = 0$$

$i_- = 0$ 이므로

$$G_1(v_+ - v_{s1}) + G_f(v_+ - v_o) = 0$$

두 식에서

$$v_o = -\frac{G_1}{G_f} v_{s1} + (1 + \frac{G_1}{G_f})\left(\frac{G_2}{G_2 + G_g}\right) v_{s2}$$

만약 $G_1 = G_f$ 이고 $G_2 = G_g$ 이면 $v_o = v_{s2} - v_{s1}$

만약 $G_1 = kG_f$ 이고 $G_2 = kG_g$ 이면 $v_o = k(v_{s2} - v_{s1})$

Saturation & the Active Mode

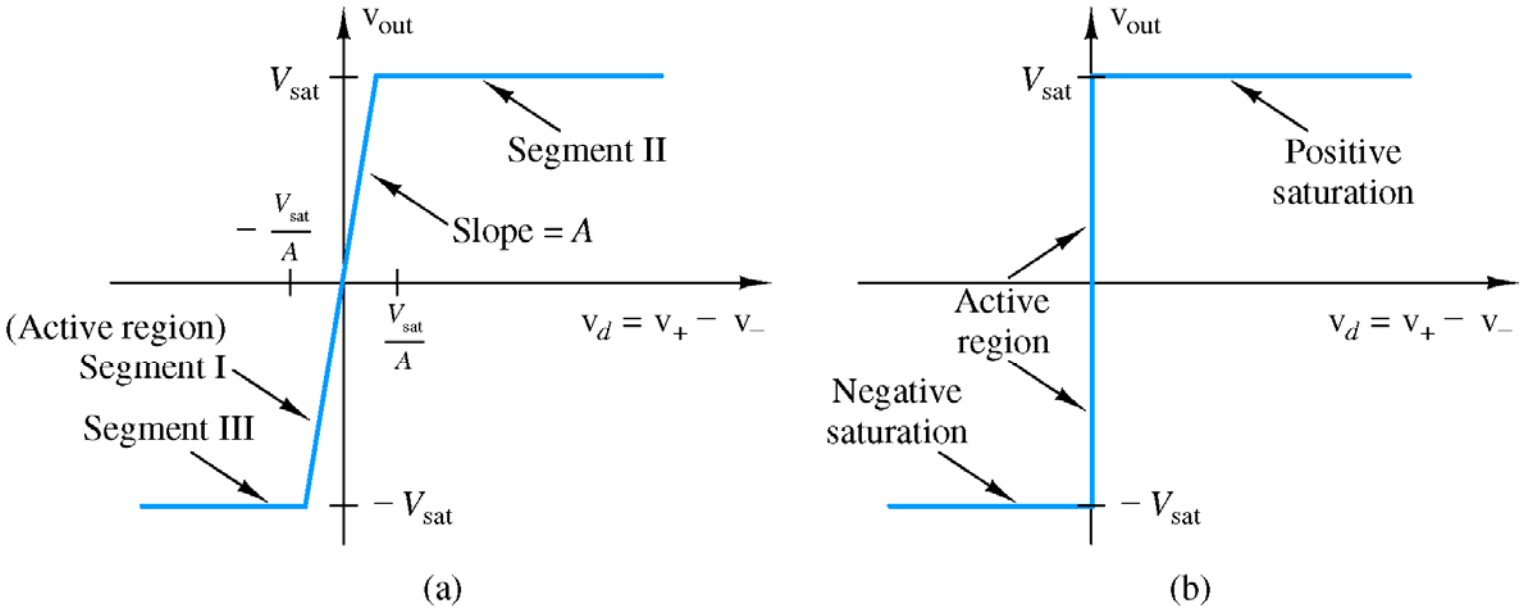


Figure 4.17 Piecewise linear (three-segment) curve for op amp, specifying the active and the positive and negative saturation regions of operation. (a) Finite gain A. (b) (Ideal) infinite gain A.

$$v_d = v_+ - v_- \neq 0$$

(1) Finite gain : typically 10^4 to 10^6.

(2) Saturation : Output voltage cannot exceed the saturation voltage

Typical Op-Amp

Parameter	Units	μA741	LF351	TL051C	OPA101 AM	OP-07E
Saturation voltage, v_{sat}	V	13	13.5	13.2	13	13
Saturation current, i_{sat}	mA	2	15	6	30	6
Slew rate, SR	V/μs	0.5	13	23.7	6.5	0.17
Bias current, i_b	nA	80	0.05	0.03	0.012	1.2
Offset current, i_{os}	nA	20	0.025	0.025	0.003	0.5
Input offset voltage, v_{os}	mV	1	5	0.59	0.1	0.03
Input resistance, R_i	MΩ	2	10^6	10^6	10^6	50
Output resistance, R_o	Ω	75	1000	250	500	60
Differential gain, A	V/mV	200	100	105	178	5000
Common mode rejection ratio, $CMRR$	V/mv	31.6	100	44	178	1413
Gain bandwidth product, B	MHz	1	4	3.1	20	0.6

Equivalent Circuit of a 741 Op Amp

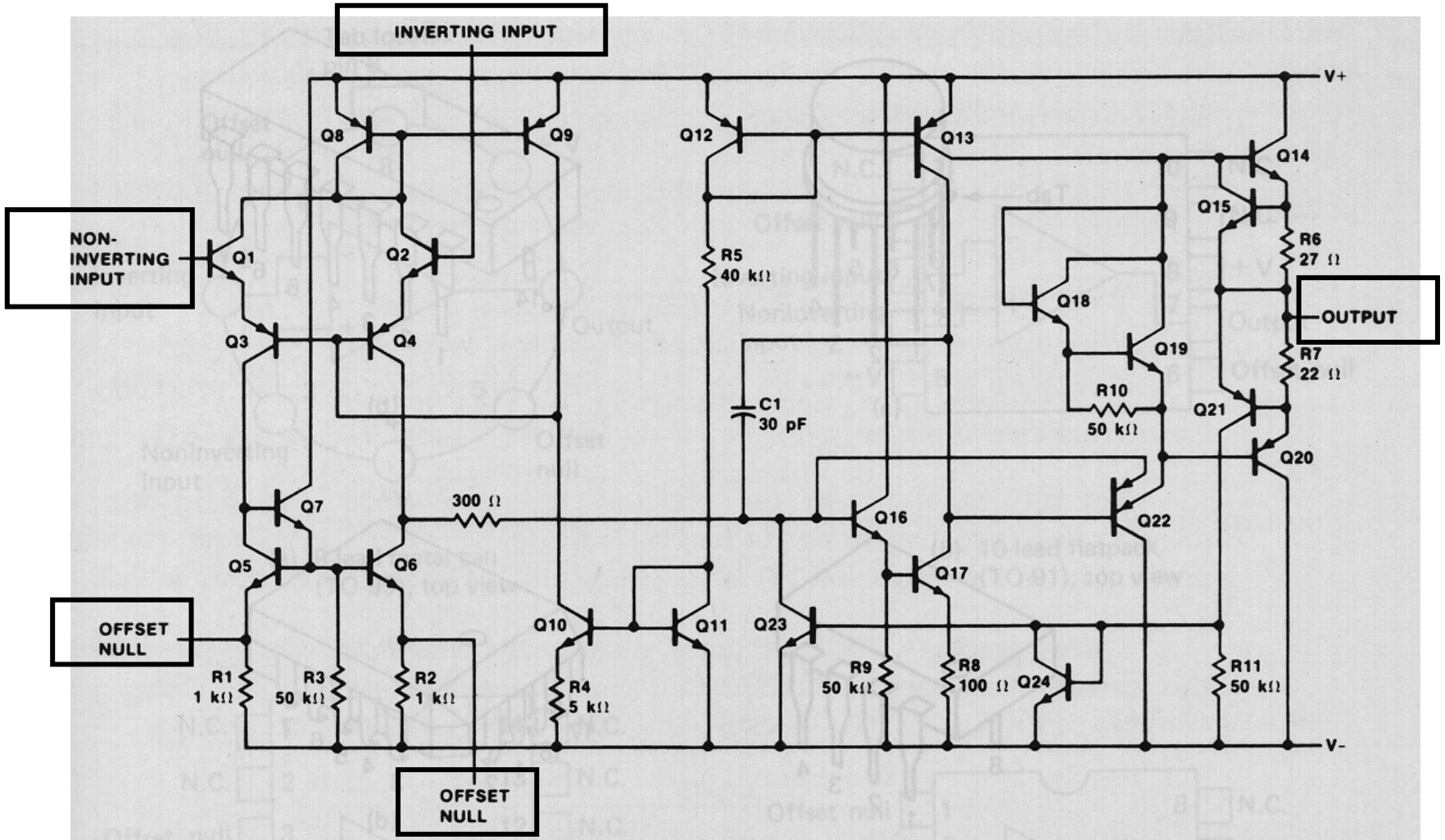


FIGURE 1-2 Equivalent circuit of a 741 op amp. (Courtesy of Fairchild Semiconductor, a Division of Fairchild Camera and Instrument Corporation.)

Simplified Internal Circuitry of a Basic Op Amp

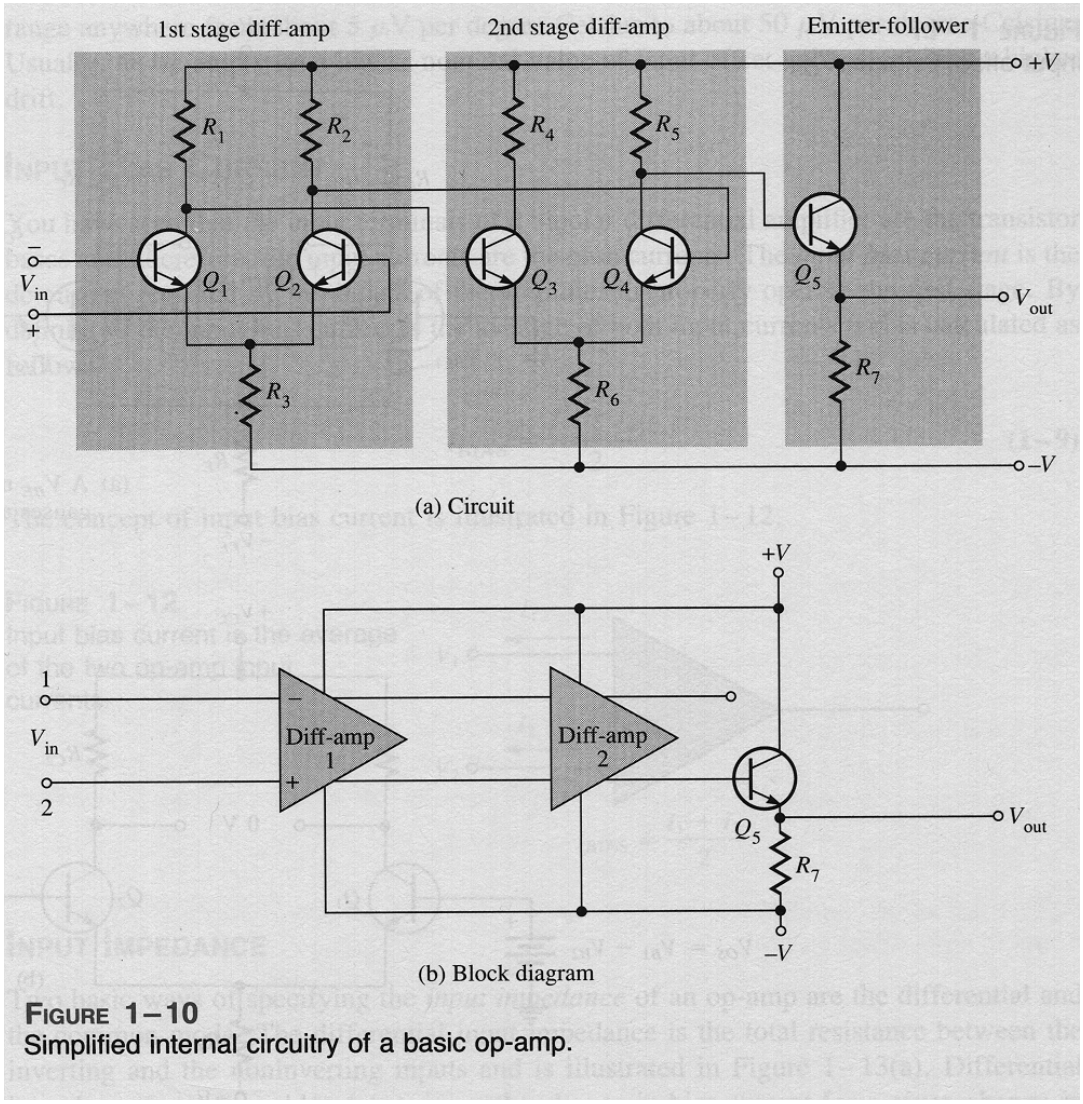


FIGURE 1–10
Simplified internal circuitry of a basic op-amp.

Practical Op-Amp

Ideal op amp.

$i_1 = 0,\ \ i_2 = 0,\ \ v_1 - v_2 = 0$

Practical op amp.

- ***nonzero bias currents*** $(i_{b1},\ i_{b2})$
- ***nonzero input offset voltage*** (v_{os})
- ***finite input resistance*** (R_i)
- ***nonzero output resistance*** (R_o)
- ***finite voltage gain (A)***

$i_1 = i_{b1},\ \ i_2 = i_{b2},\ \ v_1 - v_2 = v_{os}$

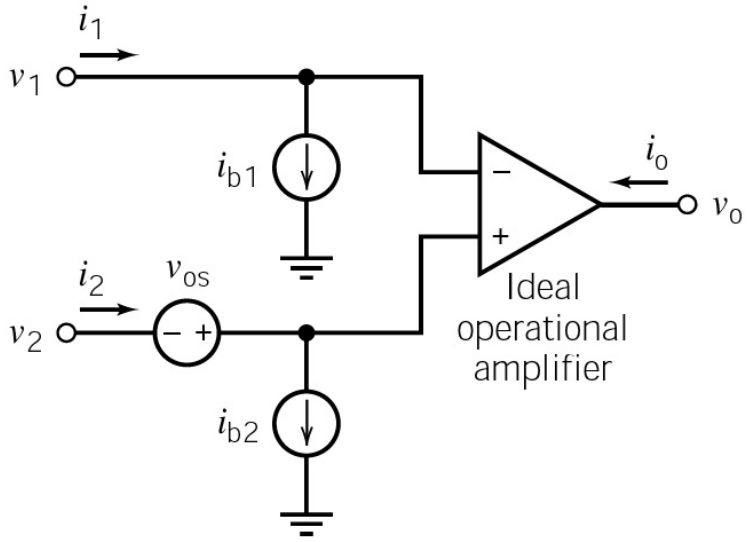
$i_{os} = i_{b1} - i_{b2}$

For μA 741,

$$|i_{b1}| \le 500nA, \quad |i_{b2}| \le 500nA$$

$$|i_{b1} - i_{b2}| \le 200nA$$

$$|v_{os}| \le 5mV$$



(b) The offsets model of an operational amplifier

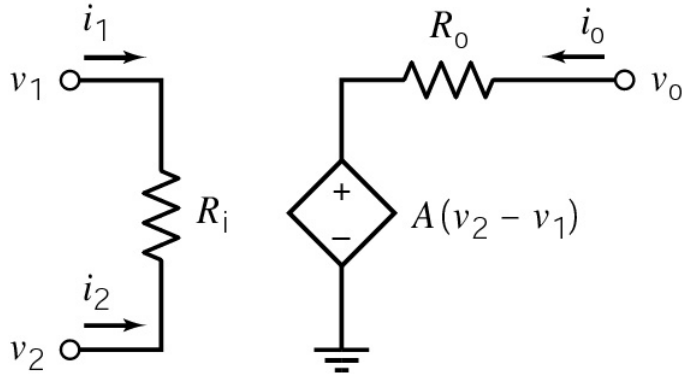
Practical Op-Amp

Ideal op amp.

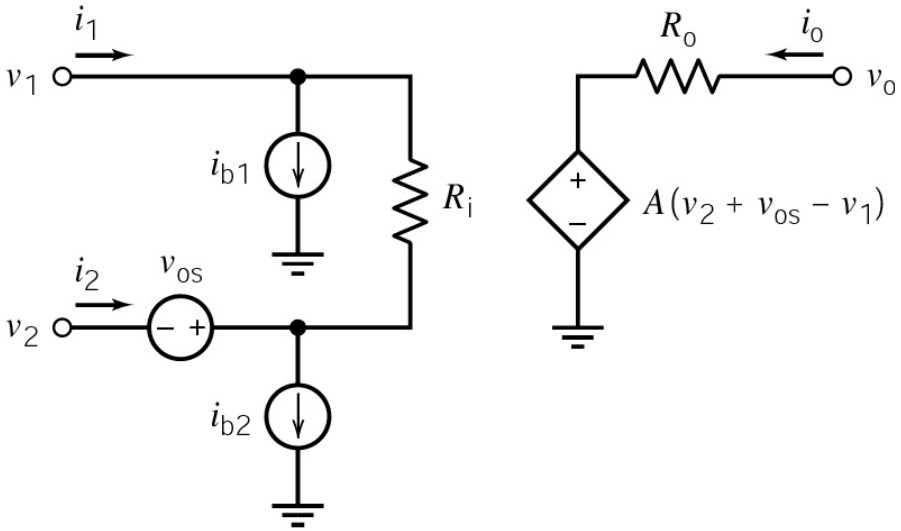
$i_1 = 0,\ \ i_2 = 0,\ \ v_1 - v_2 = 0$

Practical op amp.

- *nonzero bias currents* $(i_{b1},\ i_{b2})$
- *nonzero input offset voltage* (v_{os})
- *finite input resistance* (R_i)
- *nonzero output resistance* (R_o)
- *finite voltage gain (A)*

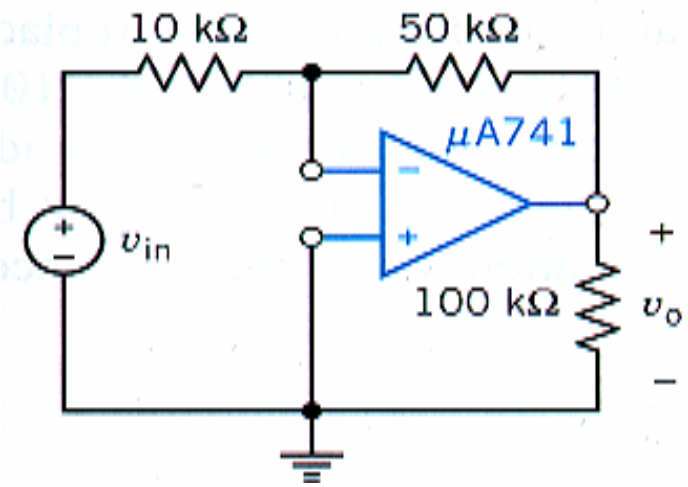


(c) The finite gain model of and operational amplifier

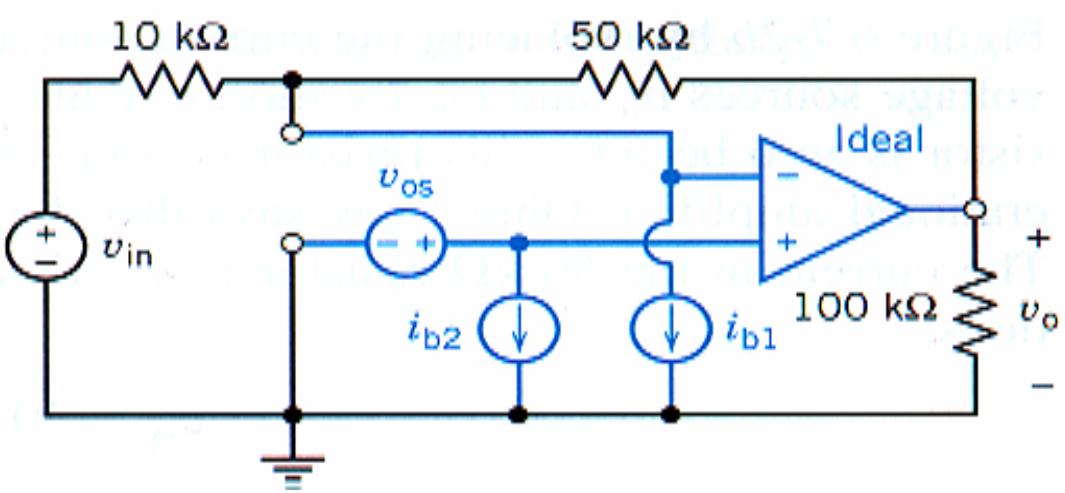


(d) The offsets and finite gain model of an operational amplifier

Realistic Model - Inverting Amp(I)



(a) An inverting amplifier

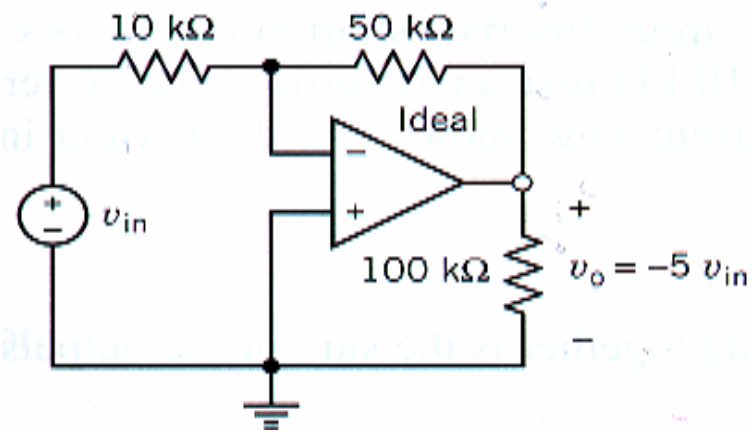


(b) An equivalent circuit that accounts for the input offset voltage and bias currents of the operational amplifier

- Op amp는 **μA 741**임**.**

- 실제 **Op amp**는 **bias current source** 두 개와 **offset voltage source** 한 개가 **ideal Op amp**에 더해져 있는 것으로 간주 **(**그림 **(b)).**

Realistic Model - Inverting Amp (II)

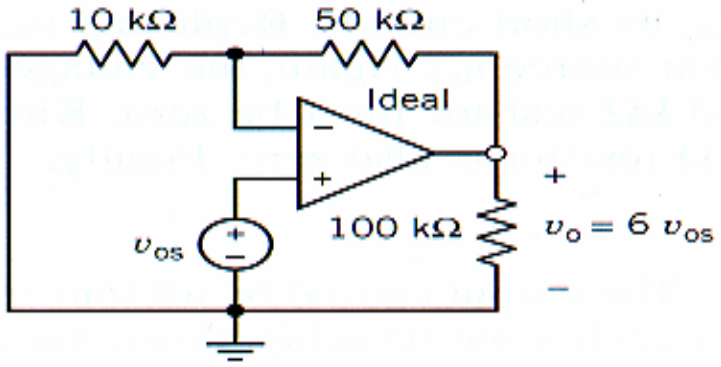


(c) Analysis using superposition

- 그림 **(c)**는 **ideal Op amp.**

$$\frac{0-v_{in}}{10k\Omega}+\frac{0-v_o}{50k\Omega}=0$$

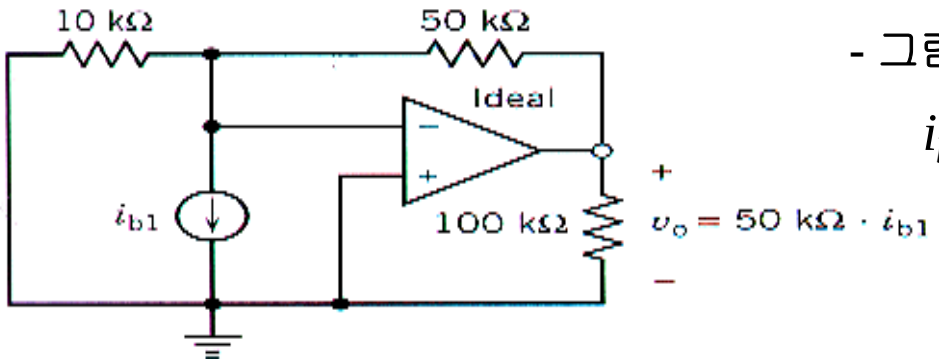
$$v_o=-5v_{in}$$



- 그림 **(d) : Offset voltage source**

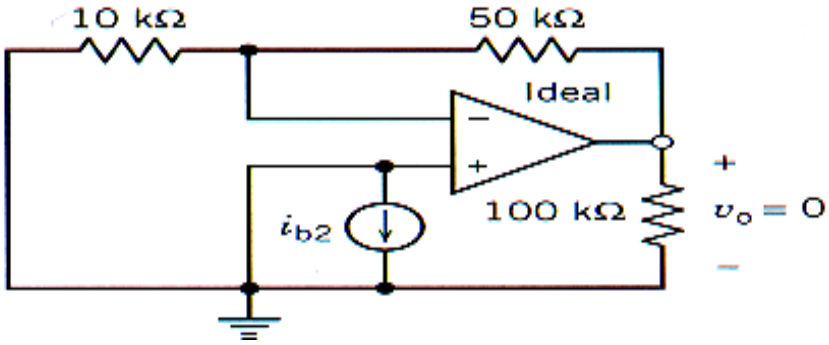
$$\frac{v_{os}-0}{10k\Omega}+\frac{v_{os}-v_o}{50k\Omega}=0 \quad \Rightarrow \quad v_o=6v_{os}$$

Realistic Model - Inverting Amp (III)



- 그림 **(e) : Bias current source, i_{b1}**

$$i_{b1} + \frac{0-0}{10k\Omega} + \frac{0-v_o}{50k\Omega} = 0 \quad \Rightarrow \quad v_o = 50k\Omega \cdot i_{b1}$$



- 그림 **(f) : Bias current source, i_{b2}**

$i_n = 0$, $v_p = v_n = 0$ 이므로

$10k\Omega$에 흐르는 전류=0 이고

$50k\Omega$에 흐르는 전류=0. $v_0 = 0$

Superposition에 의해서

$$v_o = -5v_{in} + \underbrace{6v_{os}}_{\textit{output offset voltage}} + 50k\Omega \cdot i_{b1}$$

Output offset voltage for μA 741

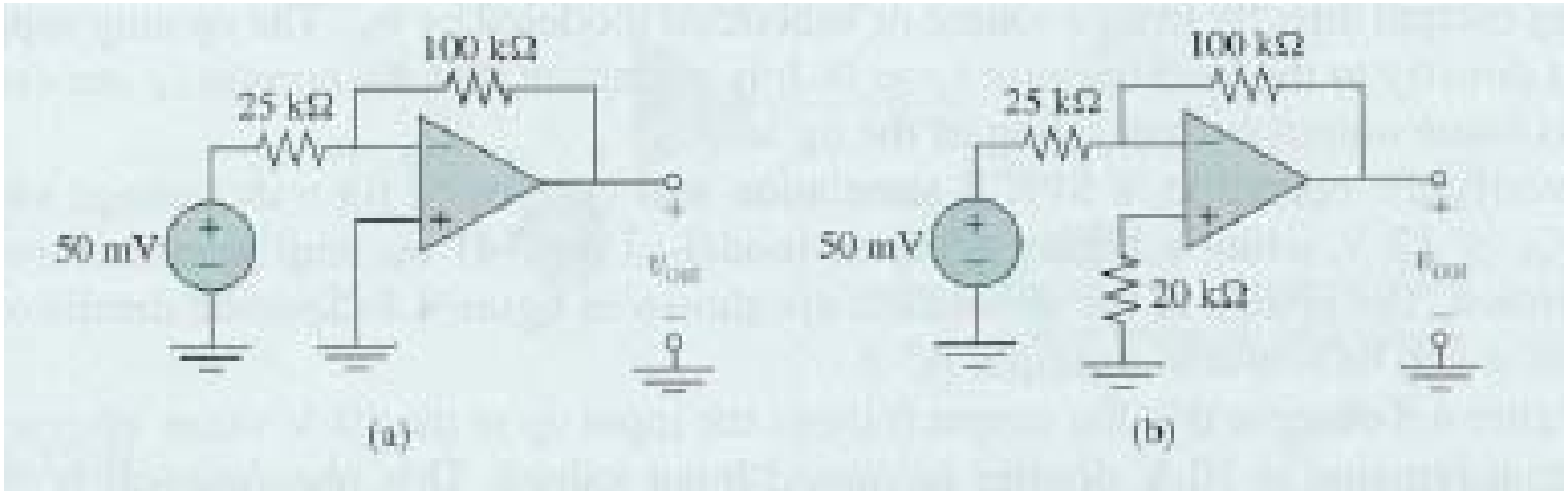
= 6×5 mV + 50 kΩ· 500 nA = 55 mV

최대 최대

$5v_{in}$>*500* **mV**인 영역에서 ***offset voltage***를 무시.

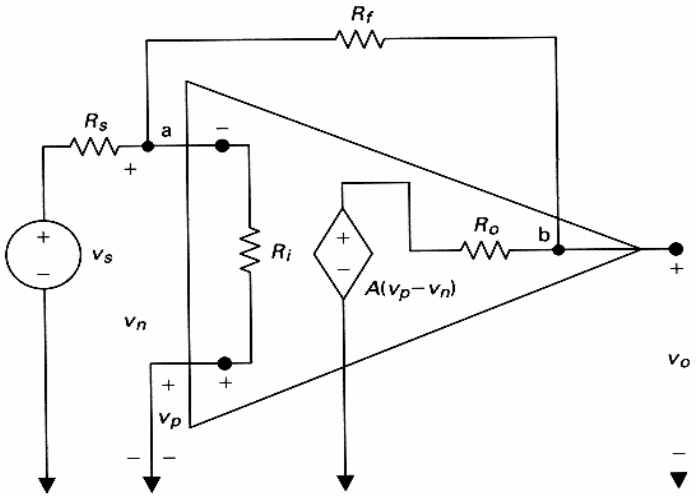
Offset Voltage - Inverting Amp

20 kΩ 의 역할



(a) Bias current 에 의해 **offset** 전압이 발생**.**
(b) Offset current에 의해 **offset** 전압이 발생**.**
(c) 대개 **offset current**는 **bias current** 의 ¼ 정도**.**

Real Inverting Op-Amp Circuit



$$node\ a: \quad \frac{v_n - 0}{R_i} + \frac{v_n - v_s}{R_s} + \frac{v_n - v_o}{R_f} = 0$$

$$node\ b: \quad \frac{v_o - v_n}{R_f} + \frac{v_o - A(0 - v_n)}{R_o} = 0$$

$\frac{1}{R_i} = G_i, \frac{1}{R_s} = G_s, \frac{1}{R_f} = G_f, \frac{1}{R_o} = G_o$ 라 하면

$$(G_i + G_s + G_f)v_n - G_f v_o = G_s v_s$$

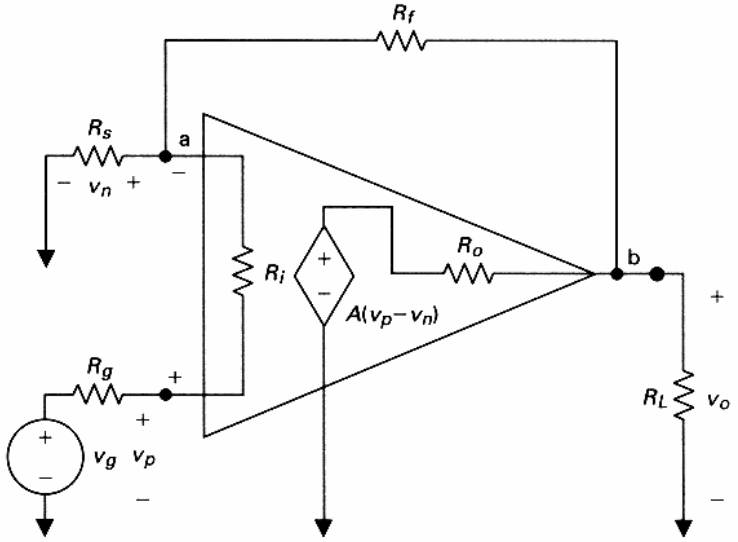
$$(AG_o - G_f)v_n + (G_f + G_o)v_o = 0$$

$$v_0 = \frac{D_2}{D} = \frac{-G_s(AG_o - G_f)v_s}{(G_i + G_s + G_f)(G_f + G_o) + G_f(AG_o - G_f)}$$

Ideal op amp의 경우, $A \to \infty$, $G_i \to 0$, $G_o \to \infty$ 이므로 이를 대입하면 앞의 예와 같다.

출력 단에 부하저항 R_L을 연결하면 v_o가 바뀌며 이 값도 ***KCL***에 의해서 구할 수 있다.

Real Noninverting Op-Amp Circuit



$$node\ a: G_s v_n + \frac{v_n - v_g}{R_i + R_g} + G_f (v_n - v_o) = 0$$

$$node\ b: G_f (v_o - v_n) + G_o (v_o - A(v_p - v_n)) + G_L v_o = 0$$

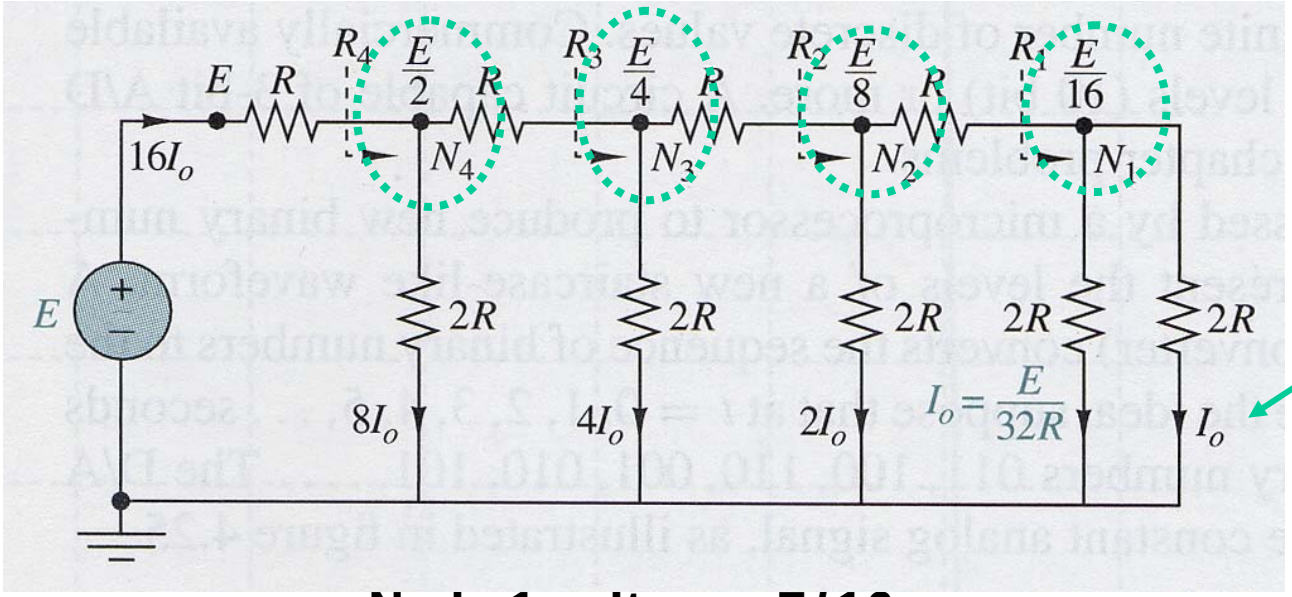
또한 R_i 와 R_g 에 흐르는 전류가 같으므로

$$\frac{v_n - v_g}{R_i + R_g} = \frac{v_p - v_g}{R_g}$$

여기서, v_p, v_n, v_o가 미지수이고 식이 세 개이므로 v_o를 구할 수 있다.

Applications - D/A Converter
Building-Weighted Summing Circuit (I)

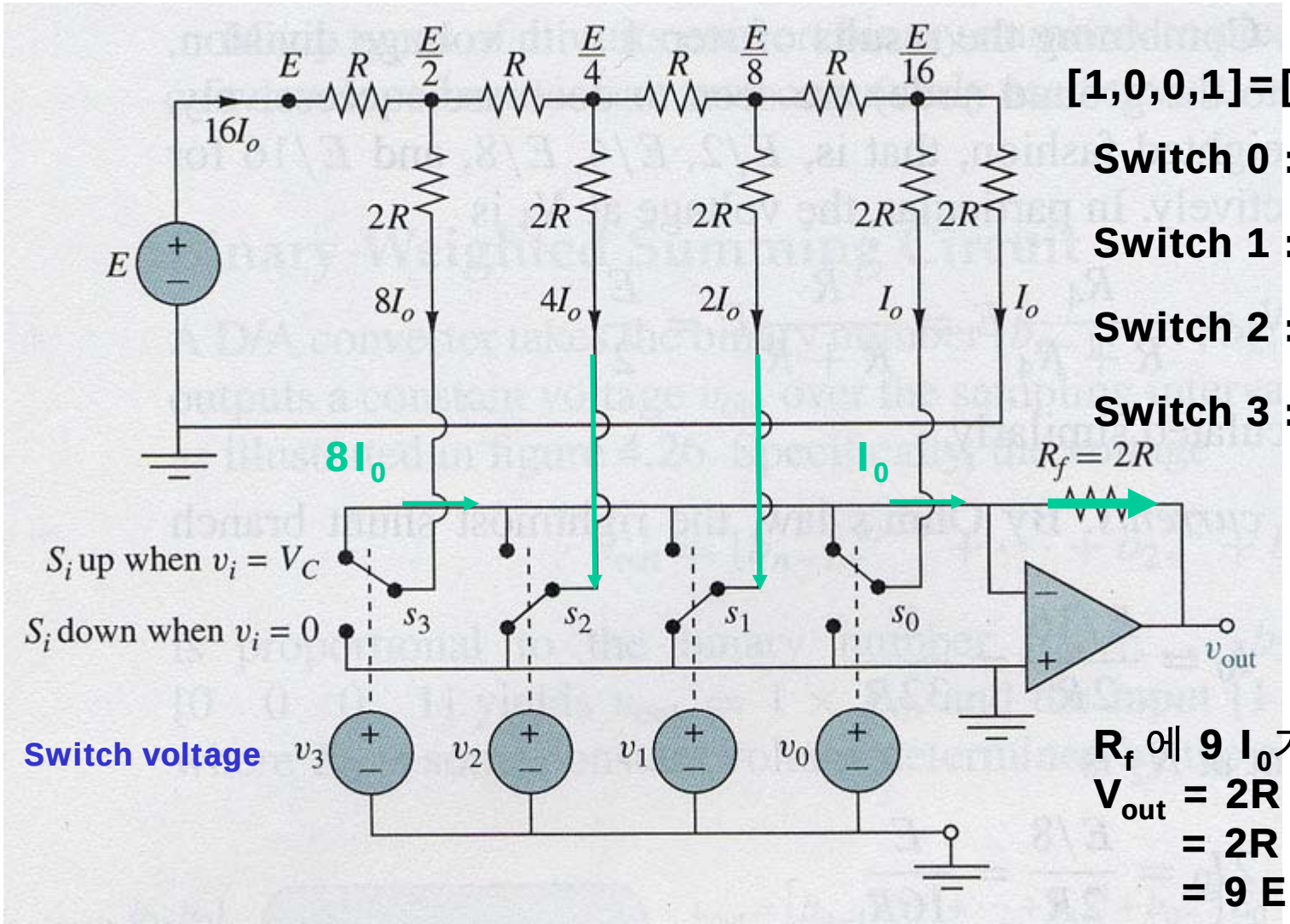
$[b_{n-1},\ldots,b_0]$ → **D/A converter** → $v_{out} = [b_{n-1}2^{n-1} + .. + b_1 2^1 + b_0]E_0$



$$I_0 = \frac{E}{32R}$$

Node 1 voltage : E/16
Node 2 voltage : E/8
Node 3 voltage : E/4
Node 4 voltage : E/2

Applications - D/A Converter
Building-Weighted Summing Circuit (II)



[1,0,0,1] = [b_3,b_2,b_1,b_0]

Switch 0 : up

Switch 1 : down

Switch 2 : down

Switch 3 : up

R_f 에 9 I_0가 흐르므로

V_{out} = 2R x 9 I_0

= 2R X 9 E/32R

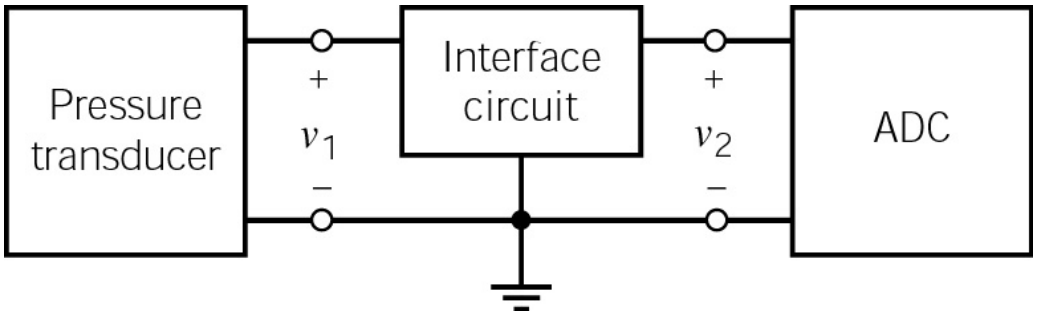
= 9 E/16

Transducer Interface Circuit (I)

- Pressure sensor 의 출력을 **PC**에 입력을 하려면 **ADC (analog-digital converter)**를 이용해야 한다**.**

- ADC 는 **0 ~ 10 V** 의 입력을 필요로 하는데 **pressure sensor**의 출력은 **– 250 mV ~ 250 mV** 이다**.**

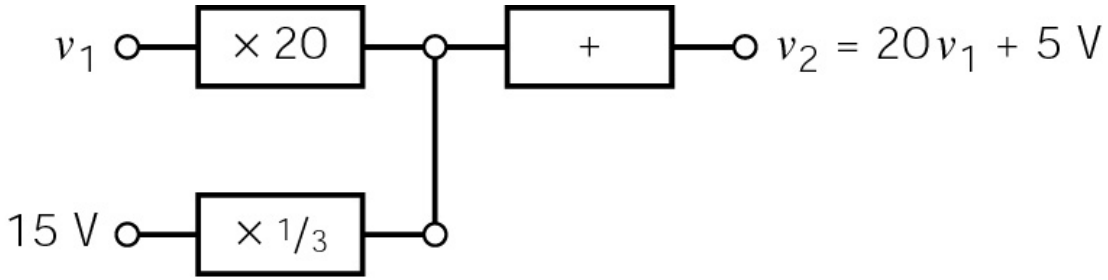
- 이것을 증폭시켜야 한다**.**



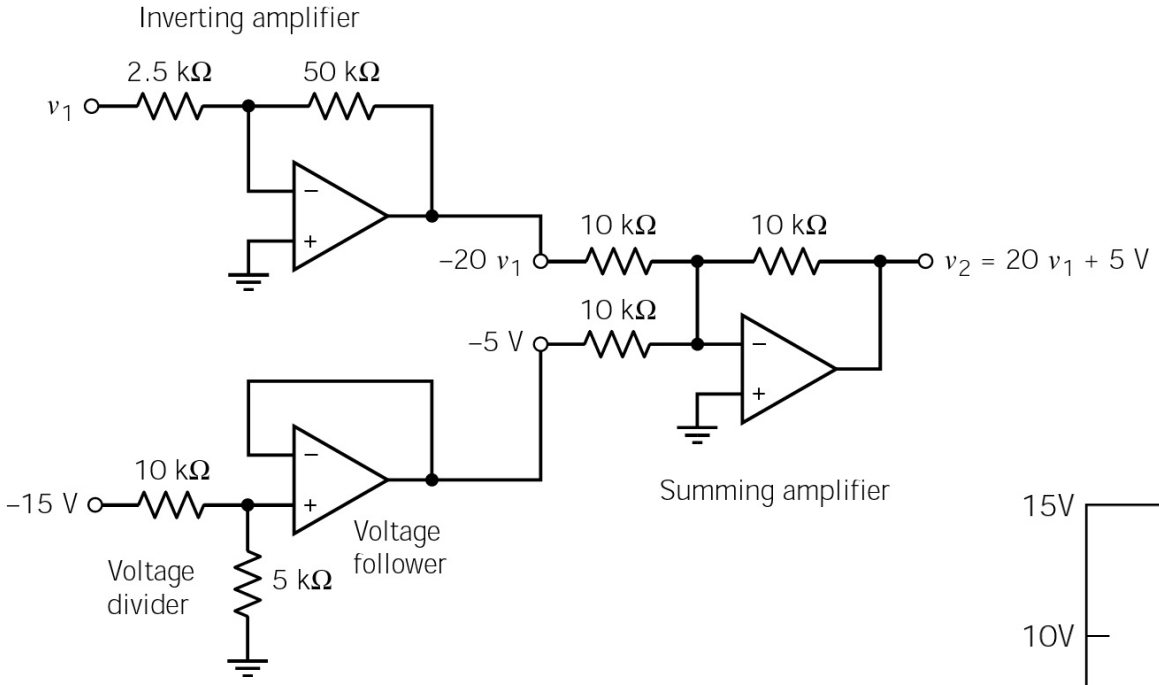
$$-250\,\text{mV} \le v_1 \le 250\,\text{mV}$$

$$0\,\text{V} \le v_2 \le 10\,\text{V}$$

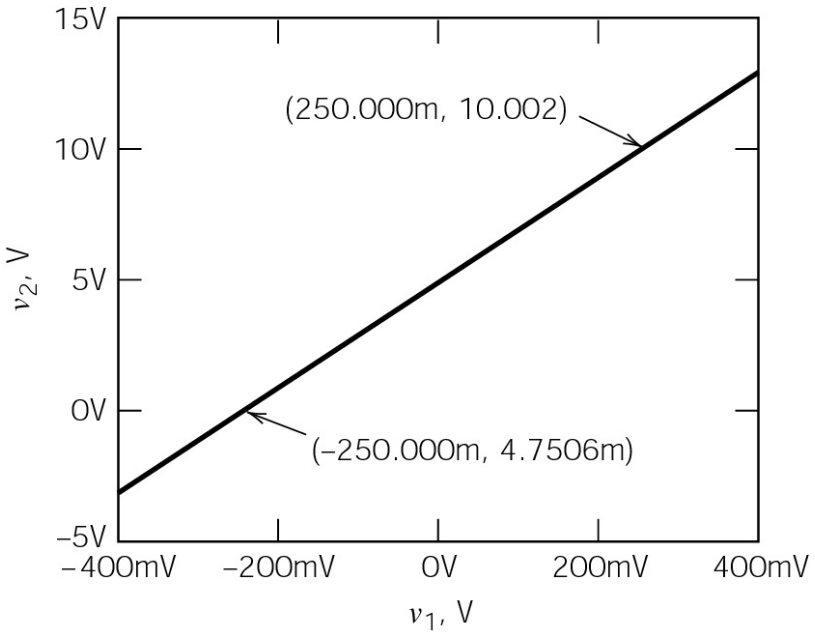
$$v_2 = a \cdot v_1 + b \;\Rightarrow\; v_2 = 20v_1 + 5 \quad \text{V}$$



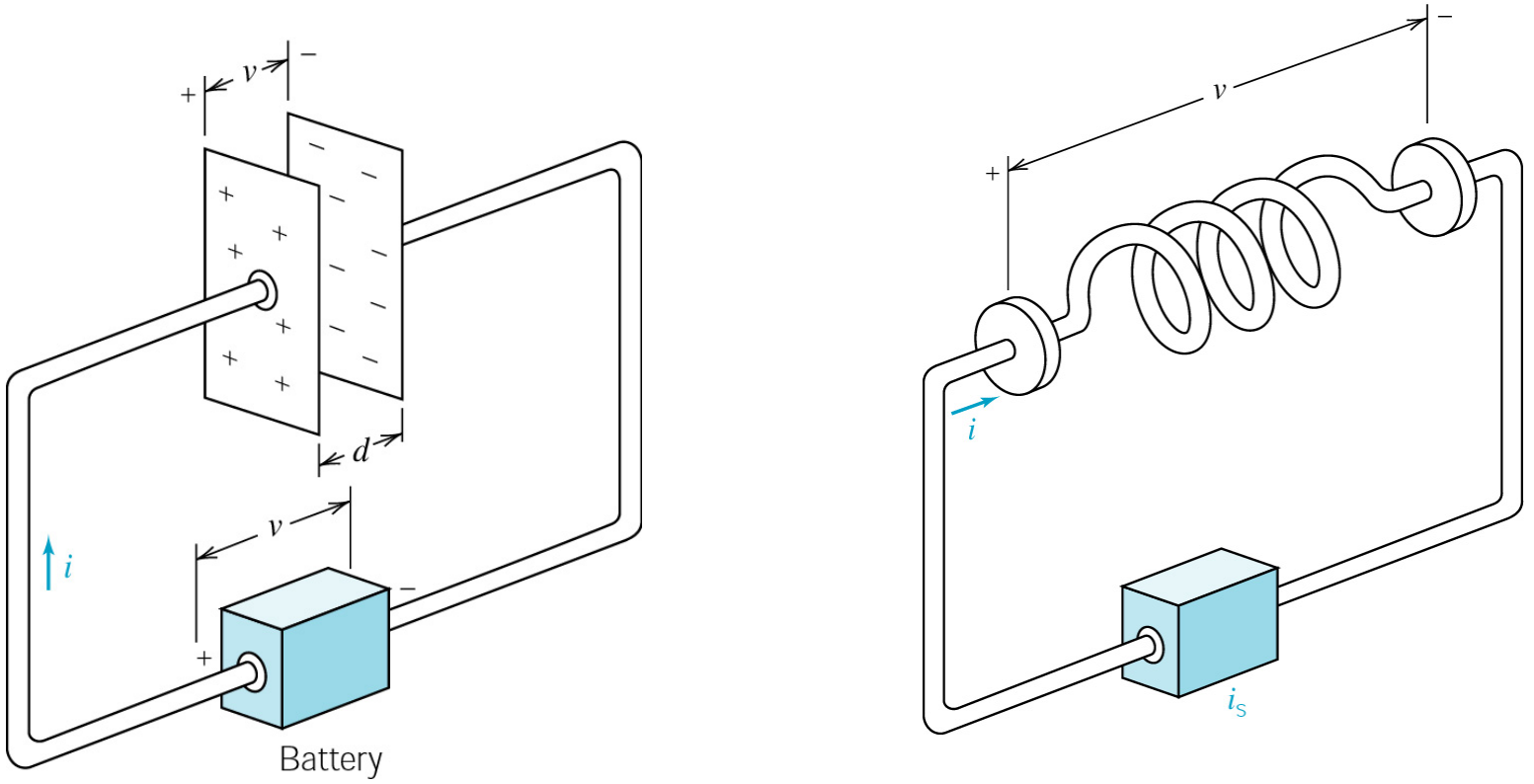
Transducer Interface Circuit (II)



- Inverting amplifier, voltage follower, summing amplifier를 이용하여 회로를 완성한다.



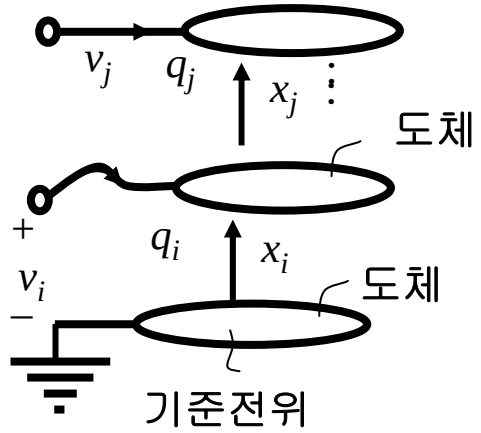
Electric Energy Storage Devices



- Capacitor와 inductor는 전기적인 에너지를 저장하는 소자.
- 캐패시터는 전하를 축적하여 에너지를 저장.
- 인덕터는 자속을 축적하여 에너지를 저장.

Capacitance

- Capacitance는 전하와 전압과의 관계를 정해주는 계수.



$$C_{ij} = \frac{q_i}{v_j \text{ (이때 } v_j\text{외의 전압은 영)}}$$

n+1 개의 도체가 있고 기준 도체에 대해서 각 도체가 v_i의 전압을 갖고 있다. C_{ij}는 **j**번째 도체에 전압이 v_j로 가해질 때 **i**번째 도체에 생기는 전하가 q_i이며, 이 관계를 나타내고 있다.

따라서, **i** 번째 도체에 생기는 총 전하는 $q_i = \sum_{j=1}^{n} C_{ij} v_j$ 가 된다.

전하는 전압과 위치의 함수로 쓸 수 있어서 $q(v, x)$ 가 된다.

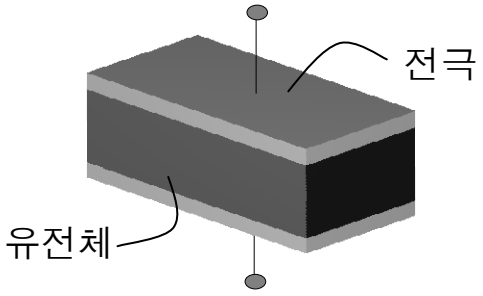
전류 **i**는 $i = \frac{dq}{dt} = \frac{\partial q}{\partial v}\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial t}$ 가 되고,

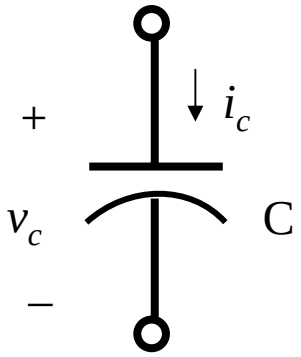
전극간 물질이 전기적으로 선형이라면 $q = C(x)v$ 이어서

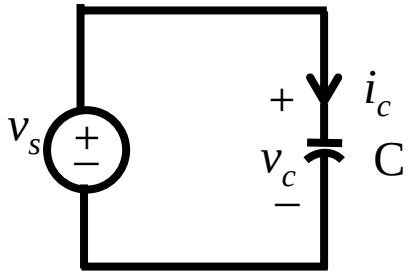
$$i = C(x)\frac{dv}{dt} + v\frac{dC(x)}{dx}\frac{dx}{dt}$$ (제 2항은 속도 전류, 회로이론에서는 영) .

Displacement Current and Capacitor Current

- **Capacitor**의 구조는 전극 사이에 절연 물질(유전체, 誘電體)을 끼워 넣는 구조이다.
- 앞에서 구한 전류는 **Capacitor**에 흐르는 전류이다. 그러면 절연체를 통해서 전류가 흐르는 이유는 무엇인가?
- **Ampere**의 둘레 법칙 $$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_f + \frac{\partial(\varepsilon_0 \vec{E})}{\partial t}$$
- 전류에 의해 자계가 생긴다는 법칙인데, 좌변 제 1항은 전하에 의한 전류를 의미하고, 제 2항이 변위 전류를 의미한다. (제 2항은 **Maxwell**이 주창).
- 전계가 시간적으로 변하면 그것이 전류가 된다는 것이다.
- 회로에서 v_s가 직류 전원이라면 전류는 영이다. v_s가 예를 들어 시간적으로 변하는 교류 전원이라면 전류는 영이 아니다.







Capacitor Current

- 전극 간에 흐르는 전류는 일반적으로 두 개 항의 합으로 정의된다.

$$i = C(x)\frac{dv}{dt} + v\frac{dC(x)}{dx}\frac{dx}{dt}$$

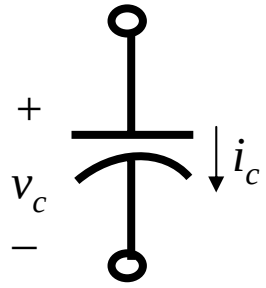
– 제 **2**항은 전극이 움직여서 전극 사이의 거리가 시간적으로 변하거나 전극의 형상이 변하기 때문에 발생하는 항이다**.** 전기기계에서는 이런 일이 벌어진다**.**

- 회로 이론에서 다루는 **Capacitor**는 전극이 고정되어 있으므로 제 **2**항은 항상 영이다**.**

$$i_c = C\frac{dv_c}{dt} \qquad C\text{ : 상수(Farads)}$$

- **Capacitor**에 흐르는 전류 i_c는 **Capacitor** 양단에 걸리는 전압의 양에서 음으로 흐른다고 부호를 취한다**.**

- 또한 i_c의 방향은 v_c의 부호에 따라 바뀌는 것이 아니라 v_c의 시간 변화율의 부호에 따라 바뀐다**.**



$$dv_c = \frac{1}{C}i_c dt, \quad v_c(t) = \frac{1}{C}\int_{t_0}^{t} i_c dt + v(t_0)$$

$v(t_0)$는 초기 $(t = t_0)$ 에 **Capacitor**에 걸린 전압이다**.**

Stored Energy

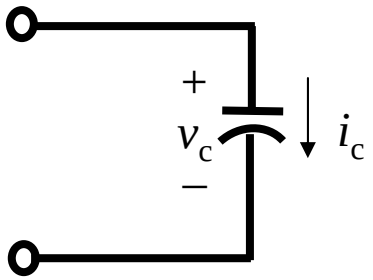
- Capacitor는 전하의 형태로 에너지를 저장하기도 하고 방출하기도 한다**.**

$$p = v \cdot i = v \cdot C \frac{dv}{dt}$$

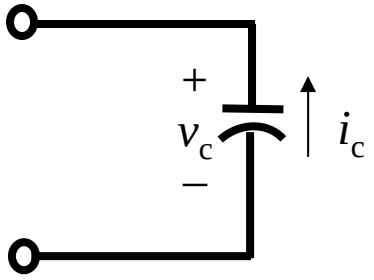
$$dW = Cvdv \quad , \quad W = \frac{1}{2} Cv^2$$

- 에너지의 흐름

Capacitor 전류가 v_c에 관계 없이 v_c의 시간 변화율의 부호에 따라 방향이 바뀌므로 에너지가 소자로 들어가기도 하고 나가기도 한다**.**

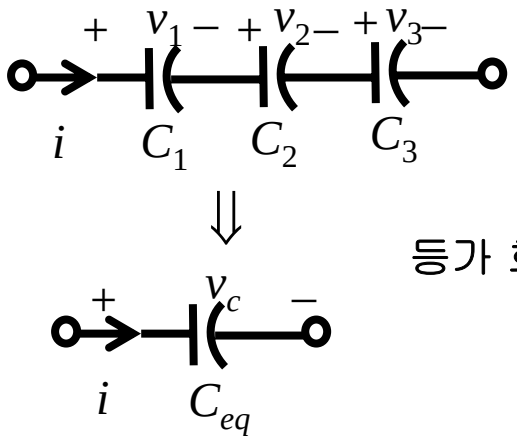


p* = v_c i_c : *positive
에너지를 **Capacitor**에 저장



p* = v_c *i* = v_c (-i_c) : *negative
에너지를 **Capacitor**로부터 방출

Capacitances in Series and Parallel

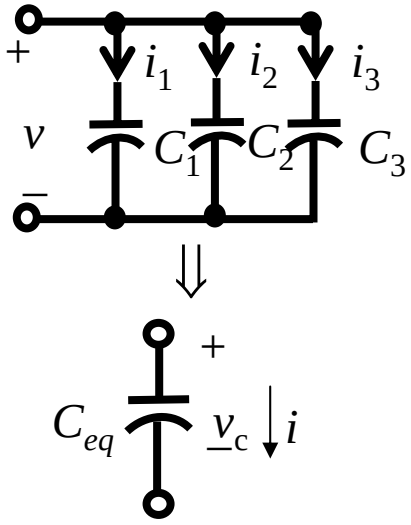


$v = v_1+v_2+v_3$, 직렬이므로 전류는 모두 같음.

$$i = C_1\frac{dv_1}{dt} = C_2\frac{dv_2}{dt} = C_3\frac{dv_3}{dt}$$

등가 회로에서 $$i = C_{eq}\frac{dv_c}{dt} = C_{eq}\frac{d(v_1+v_2+v_3)}{dt} = C_{eq}\left(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}\right)i$$

$$\therefore \frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}$$



$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

병렬이므로 전압이 모두 같음.

$$i = C_1\frac{dv}{dt}+C_2\frac{dv}{dt}+C_3\frac{dv}{dt} = (C_1+C_2+C_3)\frac{dv}{dt}$$

등가회로에서 $$i = C_{eq}\frac{dv_c}{dt} = (C_1+C_2+C_3)\frac{dv}{dt}$$

$$\therefore C_{eq} = C_1+C_2+C_3$$

Relative Permittivity and Dielectric Strength

– 마주 보는 두 전극 사이의 정전 용량

– 전극 사이 유전체의 유전율에 영향을 받음.

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$$

Relative permittivity (dielectric constant) of various dielectrics.

Boylestad 책 381쪽 표 10.1

Dielectric	ϵ_r (Average Values)
Vacuum	1.0
Air	1.0006
Teflon	2.0
Paper, paraffined	2.5
Rubber	3.0
Transformer oil	4.0
Mica	5.0
Porcelain	6.0
Bakelite	7.0
Glass	7.5
Distilled water	80.0
Barium-strontium titanite (ceramic)	7500.0

- Dielectric strength.

- 유전체는 전기적인 응력에 견딜 수 있는 한계가 있음**.**

- 파괴 전압이라고도 함**.**

- 1 mil = 1/1000 in = 0.0254 mm

Table 10.2 Dielectric strength of some dielectric materials

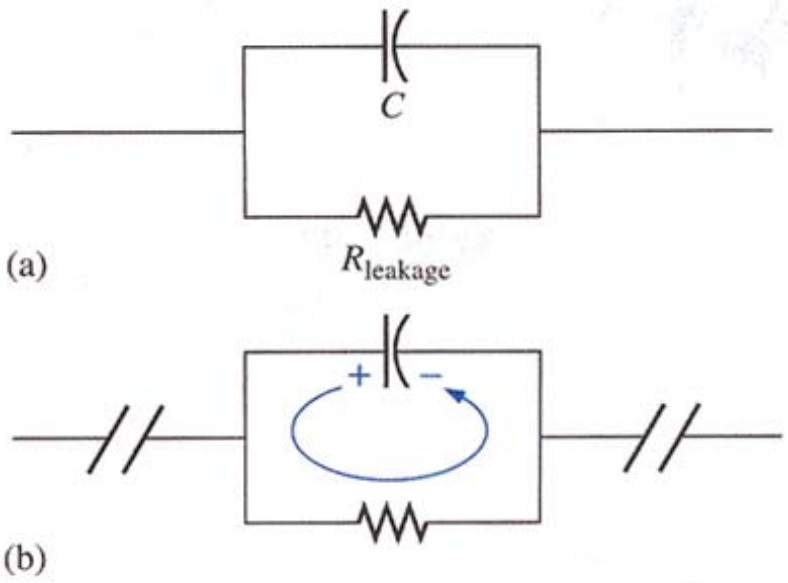
Boylestad 책 382쪽 표 10.2

Dielectric	Dielectric Strength (Average Value), in Volts/Mil	(ϵ_r)
Air	75	(1.0006)
Barium-strontium titanite (ceramic)	75	(7500)
Porcelain	200	(6.0)
Transformer oil	400	(4.0)
Bakelite	400	(7.0)
Rubber	700	(3.0)
Paper, paraffined	1300	(2.5)
Teflon	1500	(2.0)
Glass	3000	(7.5)
Mica	5000	(5.0)

Leakage Current

- 파괴 전압에 다다를 때까지 자유 전자의 흐름은 없다고 가정한다.
- 실제로는 유전체 내의 불순물이나 유전체 내의 힘의 의하여 파괴전압에 이르기 전에도 자유 전자는 존재한다.
- 전극 간에 전압이 걸리면 자유 전자는 흐른다.
- 이것은 누설 전류를 야기한다.

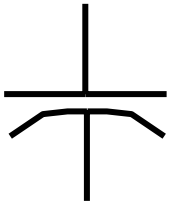
- 이 누설 전류는 아주 작아서 대부분의 응용에서는 무시한다.
- 대부분 그림과 같이 **100 MΩ** 의 저항을 병렬로 연결한 모델링을 한다.
- **Electrolytic type capacitor** 의 경우, 누설 전류는 꽤 크다.
- 충전된 캐패시터가 충전 회로로부터 연결이 끊어지면 전극 간 전류의 흐름으로 인해 수초 동안 방전한다.



Demonstrating the effect of the leakage current
Boylestad 책 383쪽 그림 10.9

Fixed Capacitors – Mica

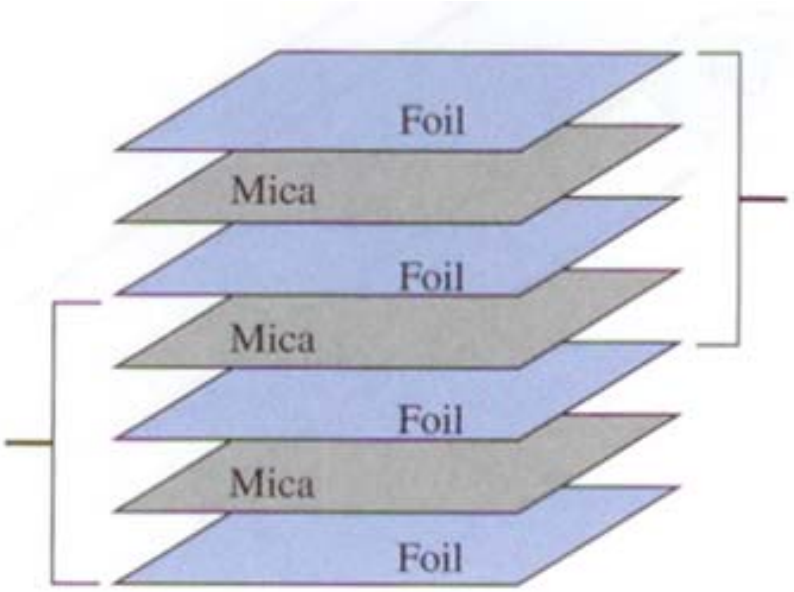
- Mica, ceramic, electrolytic, tantalum and polyester film capacitors.



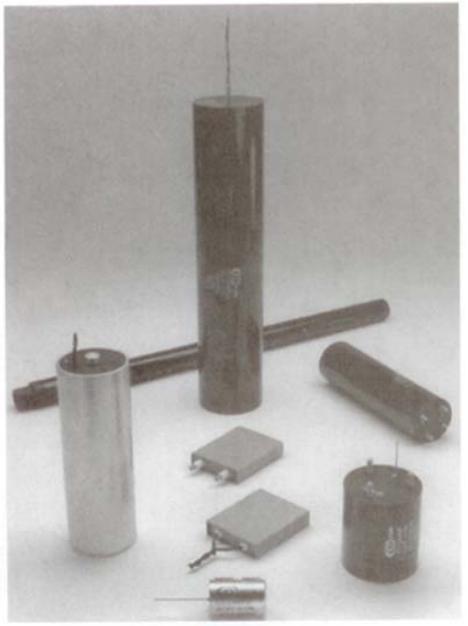
- Mica : 온도 변화의 스트레스에 강하고, 고 전압 응용에 적합.

– 누설 전류는 아주 작다 ($R_{leakage}$ 는 약 **1000 MΩ**).

– **Mica capacitors** 는 대개 수 **pF** 에서 **200 pF** 까지 쓰이고, 전압은 **100 V** 정도이다.



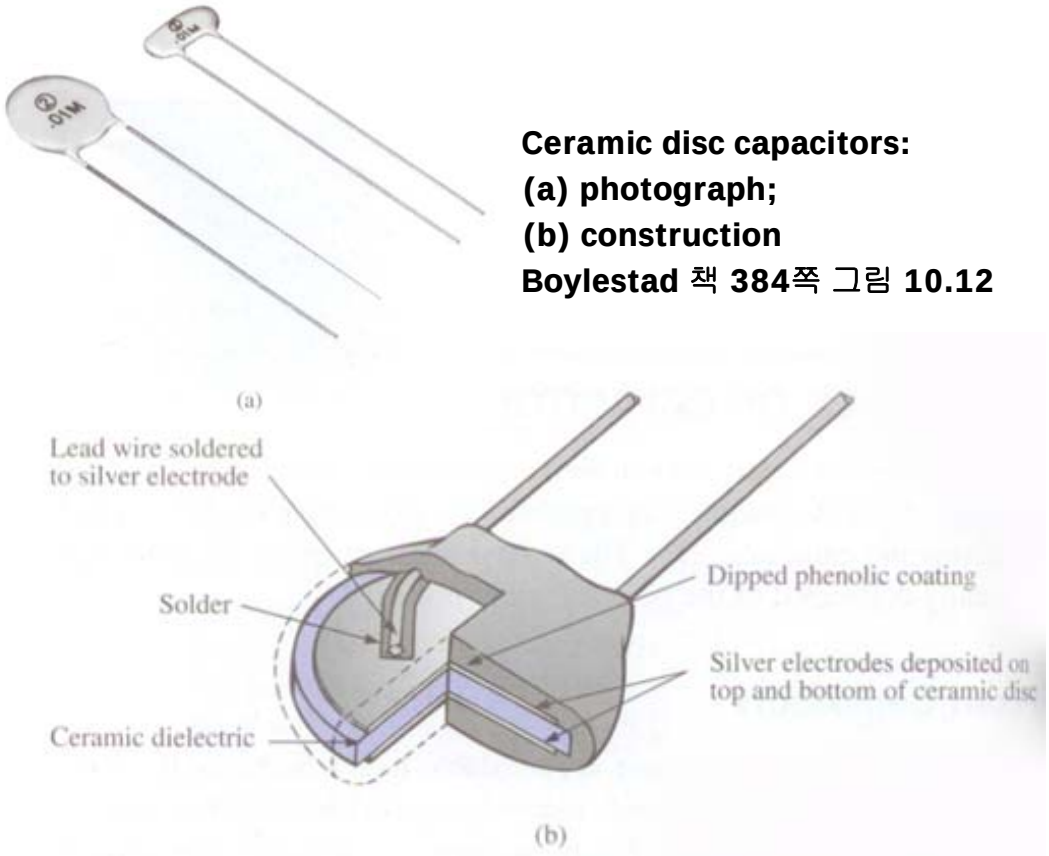
Basic structure of a stacked mica capacitor
Boylestad 책 383쪽 그림 10.10



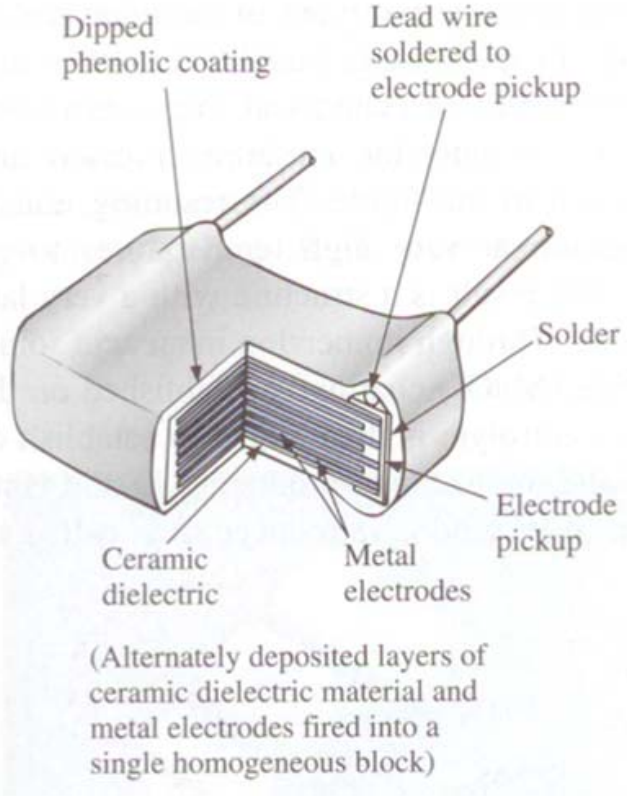
Mica capacitors
(Courtesy of Custom Electronics Inc.)
Boylestad 책 384쪽 그림 10.11

Fixed Capacitors – Ceramic Capacitors (I)

- 아래의 그림과 같이 두 가지 형태가 있다.
- 누설 전류는 아주 작고 ($R_{leakage}$ 는 약 **1000** MΩ), 직류와 교류 회로에 사용한다.
- 대개 수 **pF** 에서 **2,000 pF** 까지 쓰이고, 전압은 **5,000 V** 정도이다.



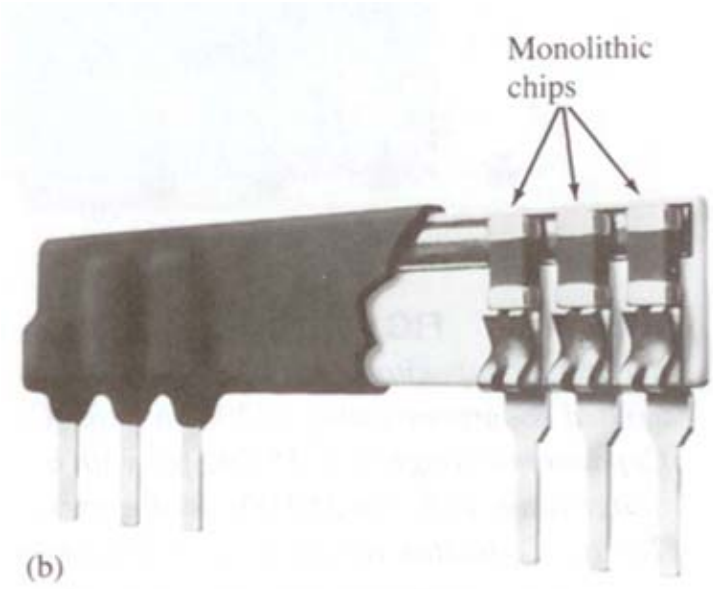
Ceramic disc capacitors:
(a) photograph;
(b) construction
Boylestad 책 384쪽 그림 10.12



Multilayer, radial-lead ceramic capacitor
Boylestad 책 385쪽 그림 10.13

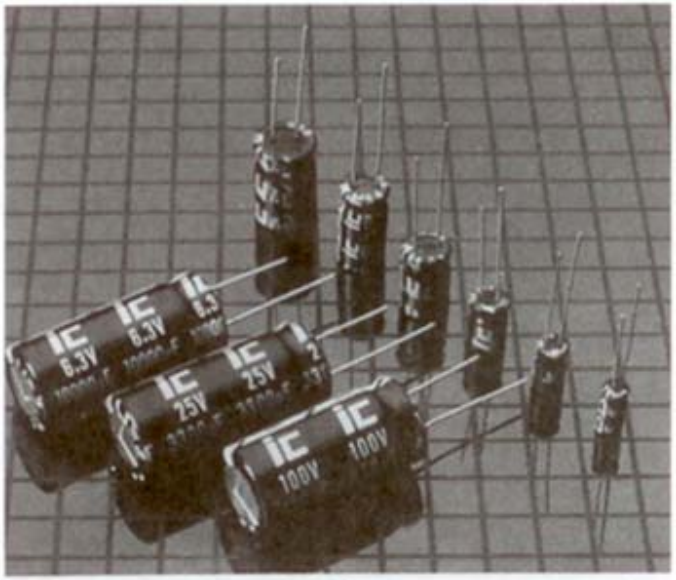
Fixed Capacitors – Ceramic Capacitors (II)

- Monolithic (single-structure) chip capacitors as shown in Fig. (a).
- Microstrip (strip-line) circuitry as shown in Fig. (b)

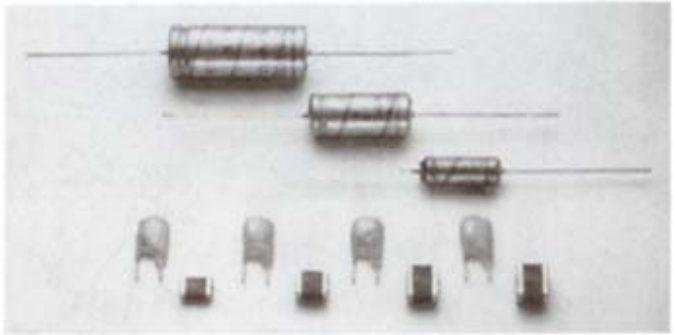


Monolithic chip capacitors
(Courtesy of Vitramon, Inc.)
Boylestad 책 385쪽 그림 10.14

Fixed Capacitors – Electrolytic Capacitors

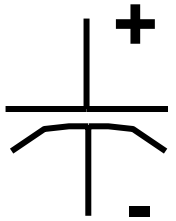


(a)



(b)

- 수 **mF** 에서 수천 **mF** 까지의 응용에 가장 많이 사용된다.
- 한 방향으로는 절연체이지만 다른 방향으로는 도전체.
- 주로 직류 응용에 사용되고, 짧은 시간 교류 응용에 사용된다.
- **DC working voltage :** 장시간 파괴되지 않고 인가될 수 있는 직류 전압.
- **Surge voltage :** 짧은 시간에 인가될 수 있는 최대 전압.
- 누설 전류는 아주 크고 **($R_{leakage}$** 는 약 **1 MΩ),** 파괴전압은 낮다.
- 대개 수 **μF** 에서 수천 **μF** 까지 쓰이고, 동작 전압은 **500 V** 정도이다.



Electrolytic capacitors:
(a) Radial lead with extended endurance rating of 2000 h at 85 ℃. Capacitance range: 0.1-15,000 μF with a voltage range of 6.3 to 250 WV dc (Courtesy of Illinois Capacitor, Inc.)
(b) Solid aluminum electrolytic capacitors available on axial, resin-dipped, and surface-mount configurations to withstand harsh environmental conditions (Courtesy of Philips Components, Inc.)

Boylestad 책 386쪽 그림 10.15

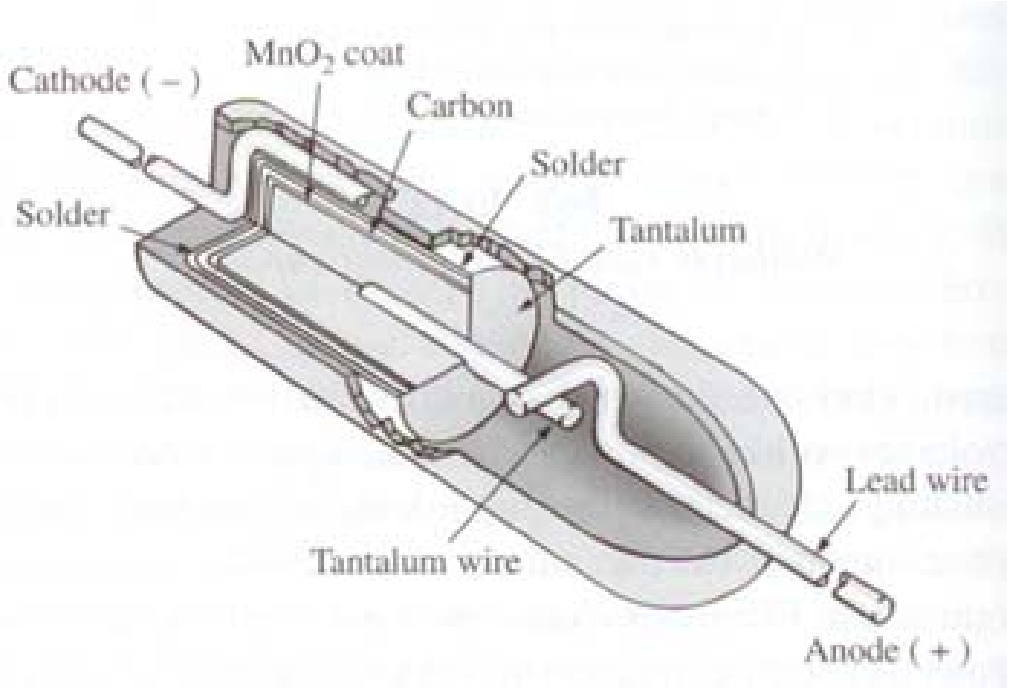
Fixed Capacitors – Tantalum Capacitors

- 두 가지 형태 : **solid** 와 **wet-slug.**
- 고 순도 **tantalum powder**를 사각형 또는 원통형으로 다져 넣는다.
- 양극은 **lead wire**를 구조물에 밀어 넣는다.
- 구조물은 진공 상태에서 고온 소결**(**고온에서 굽는 것**)** 하여서 다공성**(**多空性**)**으로 만든다.
- 다공성이 되면 부피당 표면적이 넓어진다.

- 산 용액에 담그면 얇은 산화망간 **(MNO_2)** 막이 다공성 물질 위에 형성된다.

-solid tantalum capacitor 를 만들기 위하여 산화망간 막과 음극 사이에 전해물질을 넣어서 접촉을 시킨다.

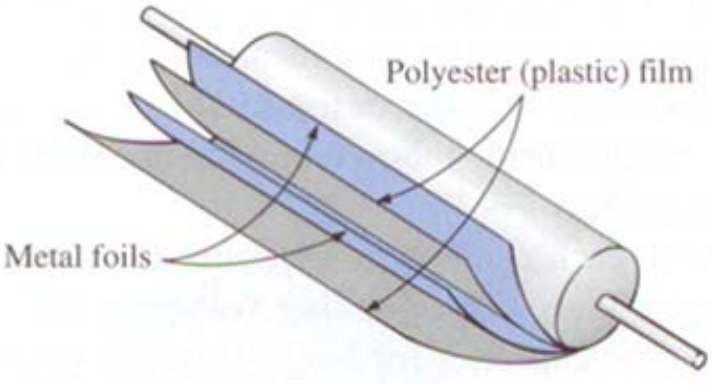
- 산 용액**(wet acid)**을 넣으면 **wet-slug tantalum capacitor** 가 된다.



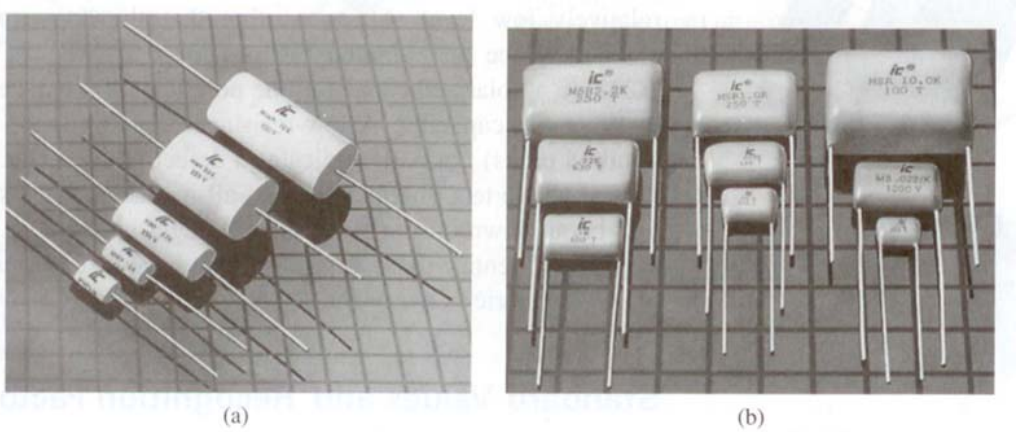
Tantalum capacitor (Courtesy of Union Carbide Corp.)
Boylestad 책 386쪽 그림 10.16

Fixed Capacitors – Polyester-film Capacitors

- 두 금속 막이 절연물(예를 들면, **Mylar®**)로 분리되어 있다.
- 크기가 크면 정전용량이나 동작 전압은 겉에 **data**를 인쇄한다.
- 그러나, 크기가 작으면 **color coding** 을 한다.
- 검은 띠**(band)**가 바깥 쪽 금속 막에 연결된 **lead** 가까운 쪽에 인쇄되어 있다.
- 이 띠에 가까운 **lead** 가 낮은 전압에 연결되어야 한다.
- 누설 전류는 아주 작고 ($R_{leakage}$ 는 약 **1000** MΩ), 직류와 교류 회로에 사용한다.
- **Axial lead variety** 는 **0.1** μ**F** 에서 **18** μ**F** 까지 사용되고, 동작 전압은 **630 V** 까지 이다.
- **Radial lead variety** 는 **0.01** μ**F** 에서 **10** μ**F**까지 사용되고, 동작 전압은 **1,000 V** 까지 이다.



Polyester-film capacitor
Boylestad 책 386쪽 그림 10.17



Polyester-film capacitors: (a) axial lead; (b) radial lead (Courtesy of Illinois Capacitor, Inc.)
Boylestad 책 387쪽 그림 10.18

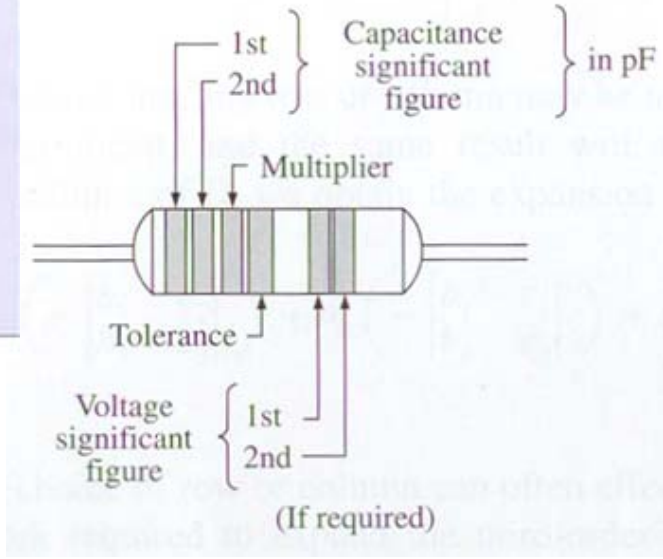
Color Coding of Molded Tubular Capacitors (pF)

Color coding of molded tubular capacitors (picofarads)

Boylestad 책 1206쪽 Appendix D

Color	Significant Figure	Decimal Multiplier	Tolerance ±%
Black	0	1	20
Brown	1	10	—
Red	2	100	—
Orange	3	1000	30
Yellow	4	10,000	40
Green	5	10^5	5
Blue	6	10^6	—
Violet	7	—	—
Gray	8	—	—
White	9	—	10

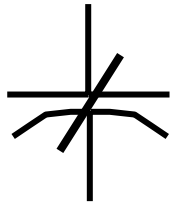
Note: Voltage rating is identified by a single-digit number for ratings up to 900V and a two-digit number above 900V. Two zeros follow the voltage figure.



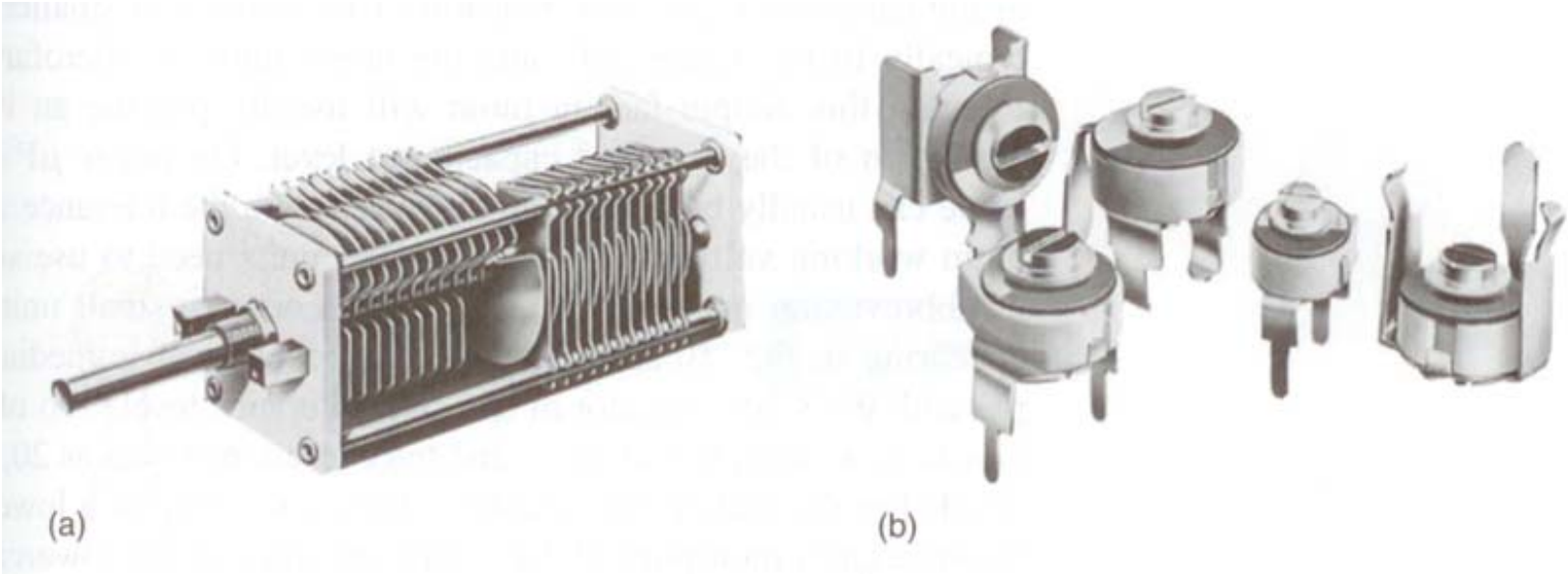
Boylestad 책 1206쪽 Appendix D Fig. D.1

Variable Capacitors

- 절연물이 공기이다.
- 그림 **(a)**는 마주 보는 전극 면적을 달리하는 형태이다.
- 그림 **(b)**는 마주 보는 전극 간 거리를 달리하는 형태이다.



$$C = \varepsilon \frac{A}{d} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$$



Variable air capacitors

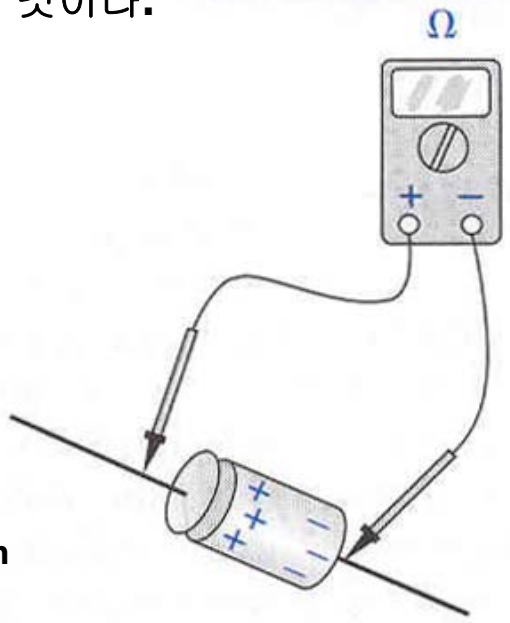
[Part (a) courtesy of James Millen Manufacturing Co.; part (b) courtesy of Johnson Manufacturing Co.]

Boylestad 책 387쪽 그림 10.19

Measurement and Testing

- **Capacitance meter** 로 극성을 고려하여 측정한다.
- 유전체가 열화 되었는지**(**특히**,** 종이나 **electrolytic capacitors)**의 여부는 저항계로 측정한다.
- 유전체가 파괴되었으면 절연성이 나빠져서 저항이 작아진다.
- 완전히 방전을 시킨 후 저항계를 캐패시터의 양단에 대어서 측정한다.
- 극성이 있는 캐패시터의 경우**,** 극성을 고려하여 연결한다.
- 절연이 파괴되었다면 **0** Ω에서 수백 Ω정도의 저항을 보일 것이다.

Digital reading capacitance meter.
(Courtesy of BK PRECISION,
Maxtec International Corp.)
Boylestad 책 **388**쪽 그림 **10.20**



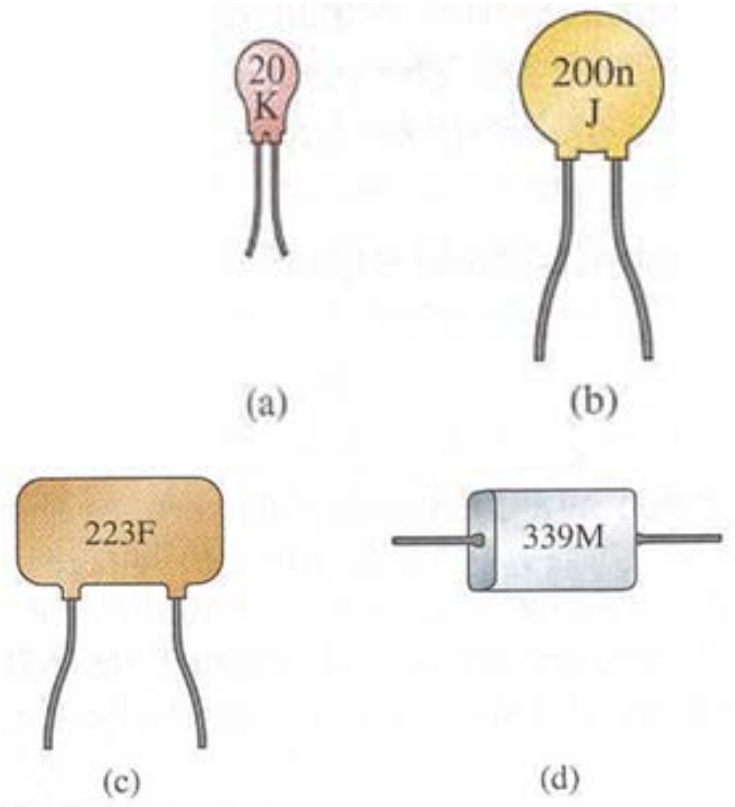
Checking the dielectric of an electrolytic capacitor.
Boylestad 책 **388**쪽 그림 **10.21**

Standard Values and Marking Schemes

- 표준 값은 저항과 같은 값을 사용한다.
- **0.1 μF, 0.15 μF, 0.22 μF, 0.22 μF, 0.47 μF, 0.68 μF** 등 표준 값을 사용한다.

Marking Schemes

- 정전용량 값과 허용 오차, 필요하다면 최대 동작 전압을 기입한다.
- 캐패시터의 크기가 정전 용량 값을 의미한다.
- 작은 것은 **pF** 단위이고, 큰 것은 **μF** 단위를 쓴다.
- 큰 것(**μF** 단위)에는 보통 겉 면에 허용오차와 최대 동작전압도 같이 기입한다.
- 작은 것은 **pF** 단위로 기입이 되어 있고, 영문으로 허용오차를 표시한다.
- **M : ± 20, K : ± 10, J : ± 5, F : ± 1 %.**
- **20 K : 20 pF ± 10 %, 200 nJ : 200 nF ± 5 %.**
- 앞의 두 자리 숫자는 크기를, 세번째 자리의 숫자는 **10**의 제곱수를 의미한다**(8 : 0.01, 9 : 0.1** 을 의미**).**
- **223 F : 22 x 10^3 pF ± 1 %, 339 M : 33 x 0.1 pF ± 20 %.**



Various marking schemes for small capacitors.
Boylestad 책 389쪽 그림 10.23

Summary of Capacitive Elements (I)

Type: Miniature Axial Electrolytic
Typical Values: 0.1 μF to 15,000 μF
Typical Voltage Range: 5 V to 450 V
Capacitor tolerance: ±20%
Applications: Polarized, used in DC power supplies, bypass filters, DC blocking.

Type: Miniature Radial Electrolyte
Typical Values: 0.1 μF to 15,000 μF
Typical Voltage Range: 5 V to 450 V
Capacitor tolerance: ±20%
Applications: Polarized, used in DC power supplies, bypass filters, DC blocking.

Type: Ceramic Disc
Typical Values: 10 pF to 0.047 μF
Typical Voltage Range: 100 V to 6 kV
Capacitor tolerance: ±5%, ±10%
Applications: Non-polarized, NPO type, stable for a wide range of temperatures. Used in oscillators, noise filters, circuit coupling, tank circuits.

Type: Silver Mica
Typical Value: 10 pF to 0.001 μF
Typical Voltage Range: 50 V to 500 V
Capacitor tolerance: ±5%
Applications: Non-polarized, used in oscillators, in circuits that require a stable component over a range of temperatures and voltages.

Type: Mylar Paper
Typical Value: 0.001 μF to 0.68 μF
Typical Voltage Range: 50 V to 600 V
Capacitor tolerance: ±22%
Applications: Non-polarized, used in all types of circuits, moisture resistant.

Type: AC/DC Motor Run
Typical Value: 0.25 μF to 1200 μF
Typical Voltage Range: 240 V to 660 V
Capacitor tolerance: ±10%
Applications: Non-polarized, used in motor run-start, high-intensity lighting supplies, AC noise filtering.

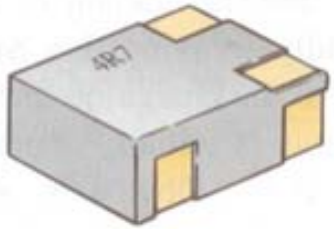
Boylestad 책 389쪽 그림 10.22

Summary of Capacitive Elements (II)

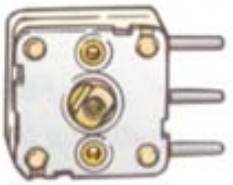
Type: Dipped Tantalum (solid and wet)
Typical Values: 0.047 μF to 470 μF
Typical Voltage Range: 6.3 V to 50 V
Capacitor tolerance: ±10%, ±20%
Applications: Polarized, low leakage current, used in power supplies, high frequency noise filters, bypass filter.

Type: Trimmer Variable
Typical Value: 1.5 pF to 600 pF
Typical Voltage Range: 5 V to 100 V
Capacitor tolerance: ±10%
Applications: Non-polarized, used in oscillators, tuning circuits, AC filters.

Type: Surface Mount Type (SMT)
Typical Values: 10 pF to 10 μF
Typical Voltage Range: 6.3 V to 16 V
Capacitor tolerance: ±10%
Applications: Polarized and non-polarized, used in all types of circuits, requires a minimum amount of PC board real estate.



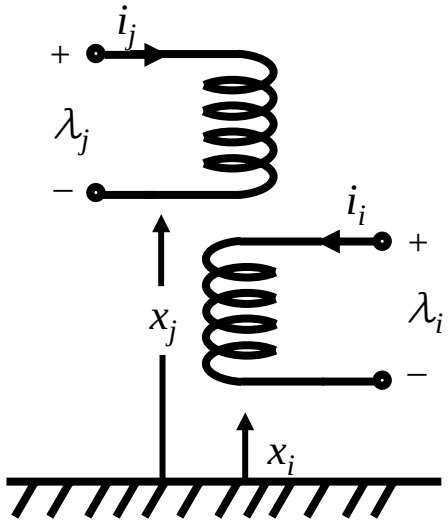
Type: Tuning variable
Typical Value: 10 pF to 600 pF
Typical Voltage Range: 5 V to 100 V
Capacitor tolerance: ±10%
Applications: Non-polarized, used in oscillators, radio tuning circuit.



Boylestad 책 389쪽 그림 10.22

Inductance

- **Inductance**는 전류와 쇄교 자속과의 관계를 정해주는 계수.



$$L_{ij} = \frac{\lambda_i}{i_j} \quad (\text{이때 } i_j\text{외의 전류는 영})$$

n개의 코일이 있고, 각 코일에 전류 i_j가 흐른다. L_{ij}는 j 번째 코일에 전류 i_j가 흐를 때 i번째 코일 단자에 생기는 자속**(**쇄교 자속**)**이 λ_i이며, 이 관계를 나타내고 있다.

따라서, i번째 코일에 생기는 총 쇄교 자속은 $\lambda_i = \sum_{j=1}^{n} L_{ij}\, i_j$ 가 된다.

쇄교 자속은 전류와 위치의 함수로 쓸 수 있어서 $\lambda = \lambda(i, x)$ 가 된다.

전압 v는 $v = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{\partial\lambda}{\partial i}\frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial\lambda}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial t}$ 가 되고

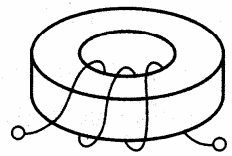
코일간 물질이 전기적으로 선형이라면 $\lambda = L(x)i$ 이어서

$v = L(x)\frac{di}{dt} + i\frac{dL(x)}{dx}\frac{dx}{dt}$ **(**제 **2**항은 속도 전압, 회로 이론에서는 영**).**

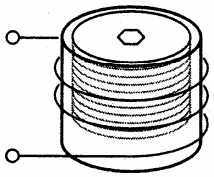
Inductor Voltage (I)

- **Inductor**의 구조는 도체를 감아 놓고 그 가운데에 자성 물질을 넣어 놓은 구조 이다.
- 앞에서 구한 전압은 **Inductor**에 걸리는 (생기는) 전압이다. 그러면, 저항도 없는 도체의 양단에 전압이 발생하는 이유는 무엇인가?
- **Faraday**의 전자 유도 법칙 $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
- 자계의 시간적인 변화가 전압을 발생시키는 것을 의미한다.
- 회로에서 v_s가 직류 전원이라면 v_L은 영이다.

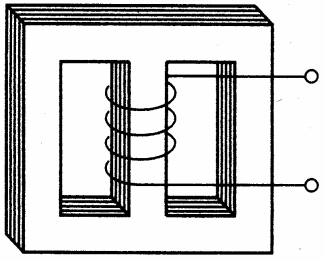
  v_s가 시간적으로 변하는 교류 전원이라면 v_L은 영이 아니다.



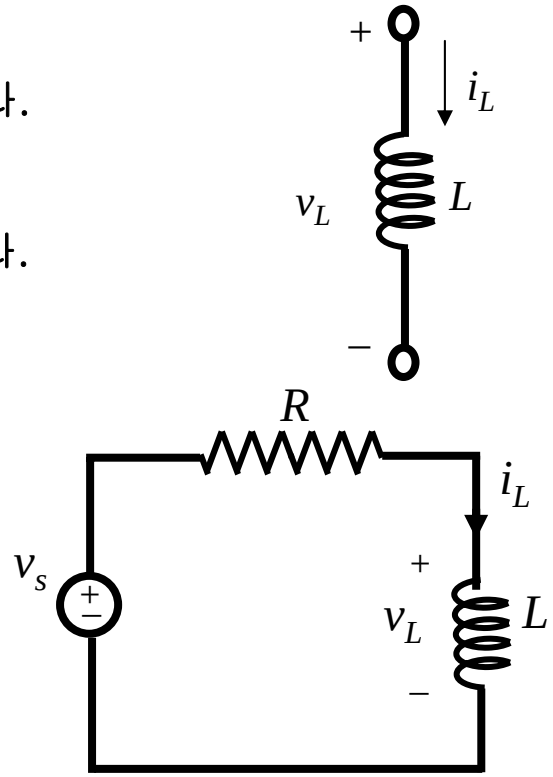
(a) Toriodal inductor



(b) Coil with an iron-oxide slug that can be screwed in or out to adjust the inductance



(c) Inductor with a laminated iron core



Inductor Voltage (II)

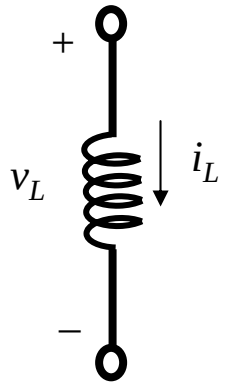
- 코일의 양단에 발생하는 전압은 일반적으로 두 개의 항의 합으로 정의된다.

$$v = L(x)\frac{di}{dt} + i\frac{dL(x)}{dx}\frac{dx}{dt}$$

- 제 **2**항은 코일이 움직여서 각 코일 사이의 거리가 시간적으로 변하거나 코일의 형상이 변하기 때문에 발생하는 항이다. 전기 기계에서는 이런 일이 벌어진다.
- 회로 이론에서 다루는 **Inductor**는 코일이 고정되어 있으므로 제 **2**항은 항상 영이다.

$$v_L = L\frac{di_L}{dt}$$ ***L*** **: 상수 (H)**

- **Inductor**에 흐르는 전류 ***i***는 **Inductor** 양단에 걸리는 전압의 양에서 음으로 흐른다고 부호를 취한다.



- 또한 v_L의 방향은 i_L의 부호에 따라 바뀌는 것이 아니라 i_L의 시간 변화율의 부호에 따라 바뀐다.

- $di_L = \frac{1}{L}v_L\,dt$, $i_L(t) = \frac{1}{L}\int_{t_0}^{t} v_L dt + i(t_0)$

$i(t_0)$는 초기 $(t = t_0)$ 에 **Inductor**에 흐르는 전류이다.

Stored Energy

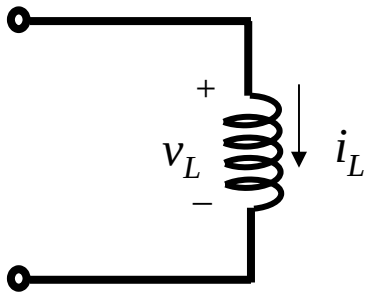
- **Inductor**는 자속의 형태로 에너지를 저장하기도 하고 방출하기도 한다.

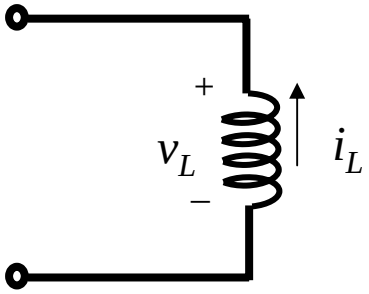
$$p = vi = L\frac{di}{dt}i$$

$$dW = Lidi, \qquad W = \frac{1}{2}Li^2$$

- 에너지의 흐름

  Inductor 전압이 i_L의 부호에 관계없이 i_L의 시간 변화율의 부호에 따라 방향이 바뀌므로 에너지가 소자로 들어가기도 하고 나가기도 한다.





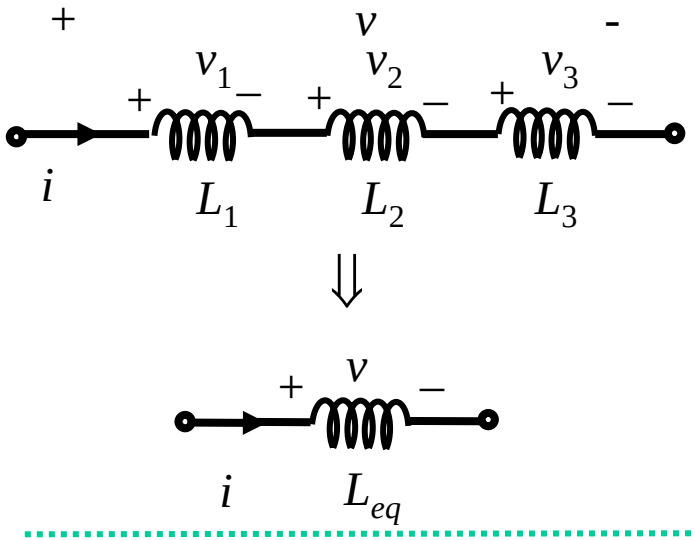
$p = v_L\, i_L$: *positive*

에너지를 **Inductor**에 저장

$p = v_L\, i = v_L(-i_L)$: *negative*

에너지를 **Inductor**로부터 방출

Inductances in Series and Parallel



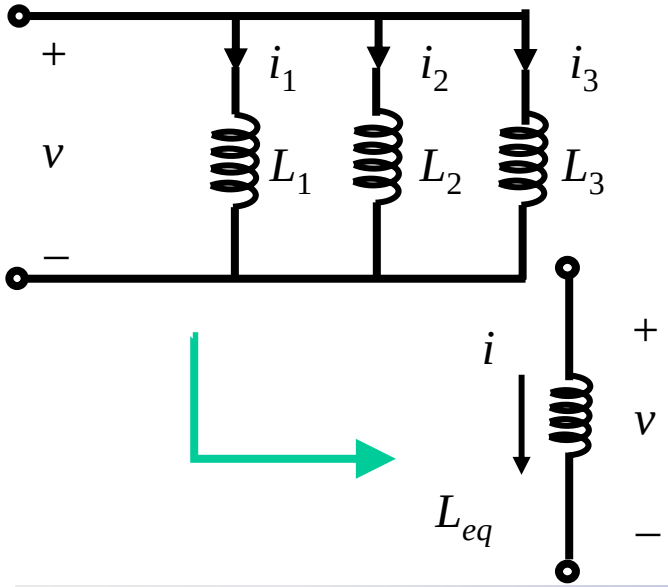
$v = v_1 + v_2 + v_3$ 직렬이므로 전류는 모두 같음.

등가회로에서

$$v_1 = L_1 \frac{di}{dt}, \quad v_2 = L_2 \frac{di}{dt}, \quad v_3 = L_3 \frac{di}{dt}$$

$$v = L_{eq} \frac{di}{dt} = (L_1 + L_2 + L_3) \frac{di}{dt}$$

$$\therefore L_{eq} = L_1 + L_2 + L_3$$



$i = i_1 + i_2 + i_3$ 병렬이므로 전압이 모두 같음.

$$v = L_1 \frac{di}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} = L_3 \frac{di_3}{dt}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} + \frac{di_3}{dt} = \left(\frac{v}{L_1} + \frac{v}{L_2} + \frac{v}{L_3}\right)$$

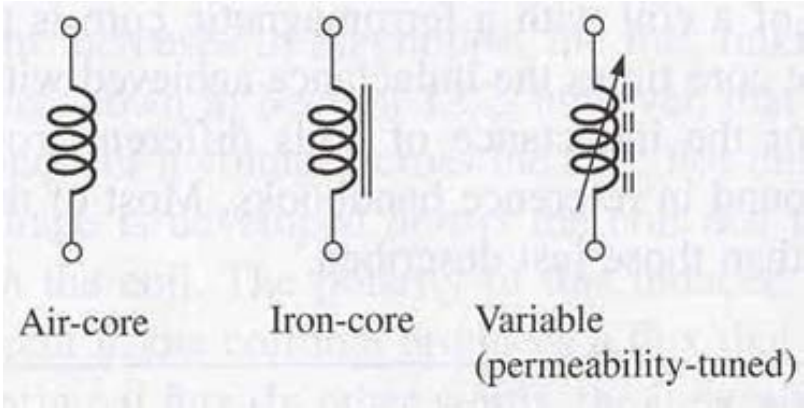
등가 회로에서

$$v = L_{eq} \frac{di}{dt} \quad \Rightarrow \quad \frac{di}{dt} = \frac{v}{L_{eq}} \quad \therefore \quad \frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$$

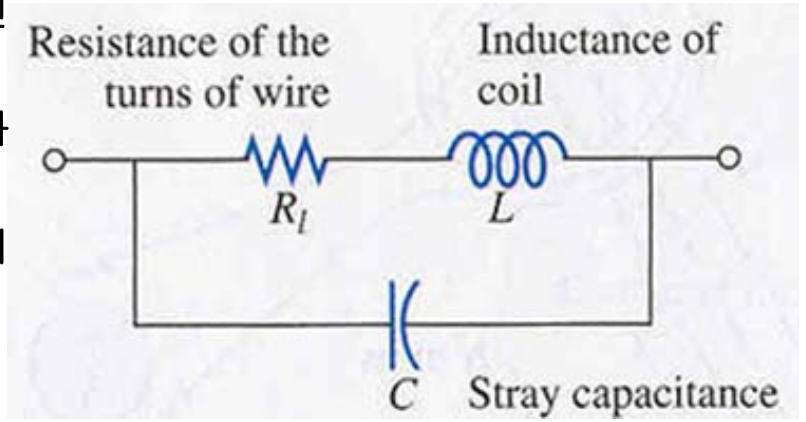
Practical Equivalent

- 실제 인덕터는 저항과 캐패시터를 가지고 있는 모양으로 모델링된다.
- 그러나, 실제 응용에 있어서는 캐패시터를 무시한 등가모델을 사용한다 (그림 12.8).
- 그림에서 저항 R_l은 유도성 회로 해석에 있어서 중요한 역할을 한다.
- 대부분의 응용에서 캐패시터는 이상적이라고 다루어도 꽤 정밀한 해석을 할 수 있다.

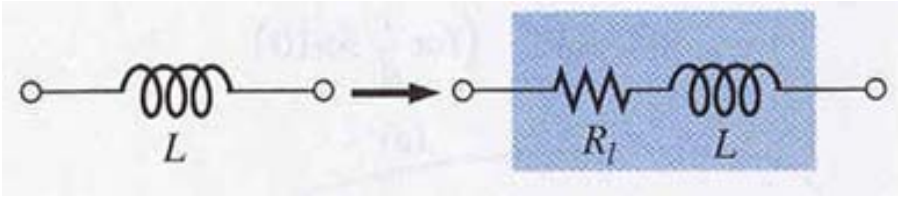
- 그러나, 인덕터의 저항은 고려해야 하고, 특히 공진 해석에 영향을 준다.
- R_l은 수 Ω 에서 수백 Ω 정도 이고, 인덕터의 도체가 가늘고 길면, 저항 값이 커진다.
- 공기, 철심을 코아로 사용하기도 하고, 인덕터 값이 고정되어 있는 것과 변화하는 것이 있다.



Inductor symbols. Boylestad 책 476쪽 그림 12.8

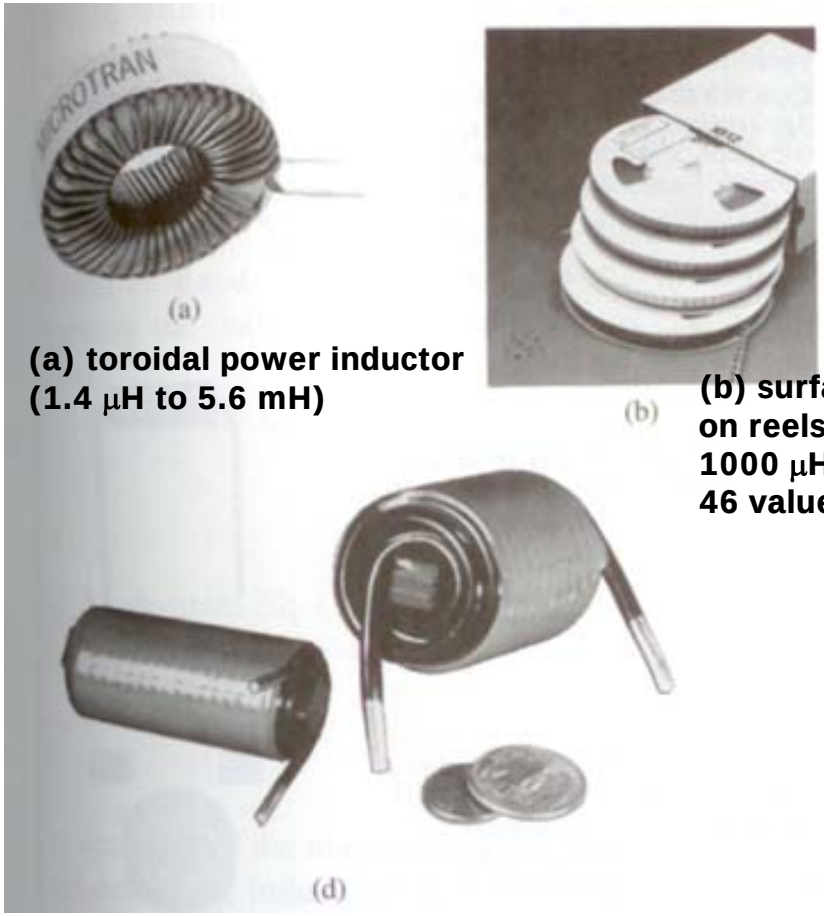


Complete equivalent model for an inductor.
Boylestad 책 476쪽 그림 12.7



Practical equivalent model for an inductor.
Boylestad 책 476쪽 그림 12.8

Various Types of Inductors



(a) toroidal power inductor (1.4 μH to 5.6 mH)

(b) surface-mount inductors on reels (0.1 μH through 1000 μH on 500-piece reels in 46 values)

(c) molded inductors (0.1 μH to 10 μH)

(d) high-current filter inductors (24 μH at 60 A to 500 μH at 15 A)

(e) toroid filter inductors (40 μH to 5 H)

(f) air-core inductors (1 to 32 turns) for high-frequency applications

Boylestad 책 477쪽 그림 12.10

Typical Areas of Application for Inductive Elements (I)

Type: Open Core Coil
Typical Values: 3 mH to 40 mH
Applications: Used in low-pass filter circuits. Found in speaker crossover networks.

Type: RF Chokes
Typical Values: 10 μH to 50 μH
Applications: Used in radio, television, and communication circuits. Found in AM, FM, and UHF circuits.

Type: Toroid Coil
Typical Values: 1 mH to 30 mH
Applications: Used as a choke in AC power lines circuits to filter transient and reduce EMI interference. This coil is found in many electronic appliances.

Type: Moiled Coils
Typical Values: 0.1 μH to 100 μH
Applications: Used in a wide variety of circuit such as oscillators, filters, pass-band filters, and others.

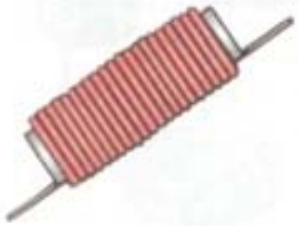
Boylestad 책 478쪽 그림 12.11

Testing

- 고장 : 권선 간의 **short** 와 과도한 전류, 과열, 경년 열화에 의한 **open**이 있다.
- **Open** 은 쉽게 저항계로 측정할 수 있다.
- **Short** 은 쉽사리 판독할 수 없다. 권선 간의 **short** 이라면 저항의 변화가 작기 때문이다.
- 원래의 저항 값과 측정 값을 비교해야 한다.
- 권선과 코아와의 **short** 이라면 둘 간의 저항을 측정한다.
- 인덕터 값은 **LCR meter** 로 측정한다.

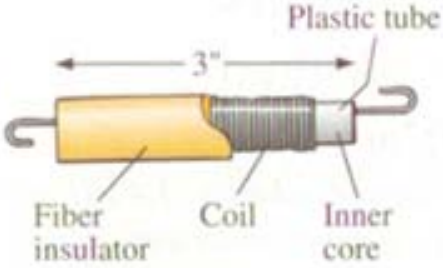
Typical Areas of Application for Inductive Elements (II)

Type: Hash Choke Coil
Typical Values: 3 μH to 1 mH
Applications: Used in AC supply lines that deliver high currents.



Type: Surface Mounted Inductors
Typical Values: 0.01 μH to 100 μH
Applications: Found in many electronic circuits that require miniature components on multilayered PCB.

Type: Delay Line Coil
Typical Values: 10 μH to 50 μH
Applications: Used in color televisions to correct for timing differences between the color signal and black and white signal.



Type: Adjustable RF Coil
Typical Values: 1 μH to 100 μH
Applications: Variable inductor used in oscillators and various RF circuits such as CB transceivers, televisions, and radios.

Type: Common Mode Choke Coil
Typical Values: 0.6 mH to 50 mH
Applications: Used in AC line filters, switching power supplies, battery charges and other electronic equipment.

Boylestad 책 478쪽 그림 12.11

Standard Values

- 저항이나 캐패시터과 같이 표준 값**(5, 10 %)**을 사용한다.
- **0.1 μH, 0.12 μH, 0.15 μH, 0.18 μH, 0.22 μH, 0.27 μH, 0.33 μH, 0.39 μH, 0.47 μH, 0.56 μH, 0.68 μH, 0.82 μH and 1 mH** 등.

Capacitance and Inductance in DC State

$$i_c = C\frac{dv_c}{dt} \quad , \quad v_L = L\frac{di_L}{dt}$$

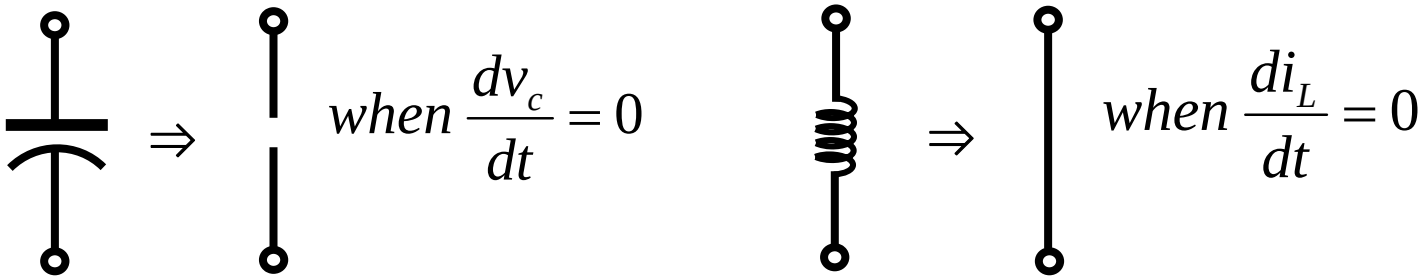
Capacitor 전압과 **Inductor** 전류가 시간적으로 변하지 않는다면

Capacitor 전류와 **Inductor** 전압은 각각 영이 된다.

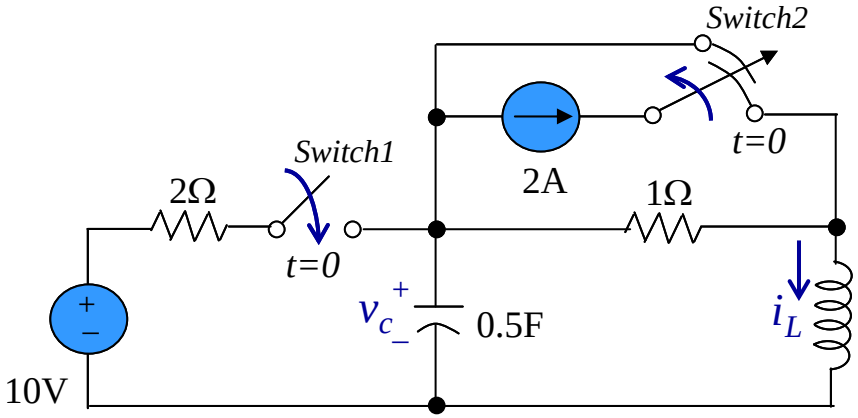
$$i_c = 0 \quad when \quad \frac{dv_c}{dt} = 0$$

$$v_L = 0 \quad when \quad \frac{di_L}{dt} = 0$$

따라서, **Capacitor**는 개방으로, **Inductor**는 단락으로 표현된다.



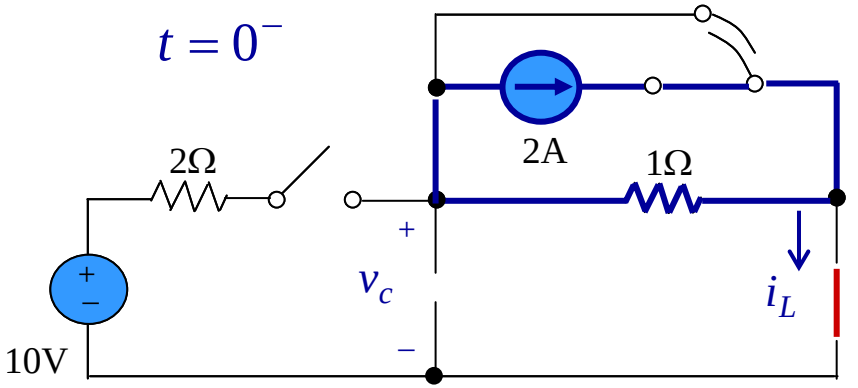
Initial Values of RLC Circuits (I)



왼쪽의 회로에서 다음 값을 구하라.

$$i_L(0^+),\ v_c(0^+),\ \frac{dv_c(0^+)}{dt},\quad \frac{di_L(0^+)}{dt}$$

가정: 오랜 시간 동안 스위치 **1**은 열려 있었고, 스위치 **2**는 아래 쪽으로 연결되어 있다. 그리고, $t = 0^-$까지 정상상태가 유지되었다.



우선, $t = 0^-$에서 **Capacitor**는 개방으로, **Inductor**는 단락으로 표현되므로 왼쪽의 회로가 된다.

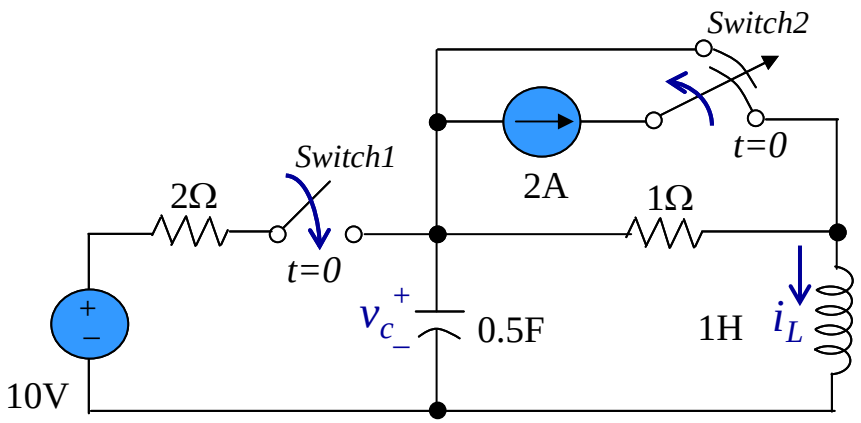
따라서, 회로는 굵은 선과 같이 된다.

$i_L(0^-) = 0 = i_L(0^+)$ 이고,

Capacitor 사이의 전압은 **1 Ω** 저항 사이의 전압과 같다.

$$v_C(0^-) = -2\ \text{V} = v_C(0^+)$$

Initial Values of RLC Circuits (II)



다음으로 t =**0**$^+$에서 스위치 **1**이 닫히고, 스위치 **2**가 위쪽으로 연결되면 왼쪽의 회로는 아래의 굵은 선과 같은 회로가 된다.

즉, 전류원으로는 회로가 구성되지 못한다.

또한, 앞에서 구한 조건에 의해서

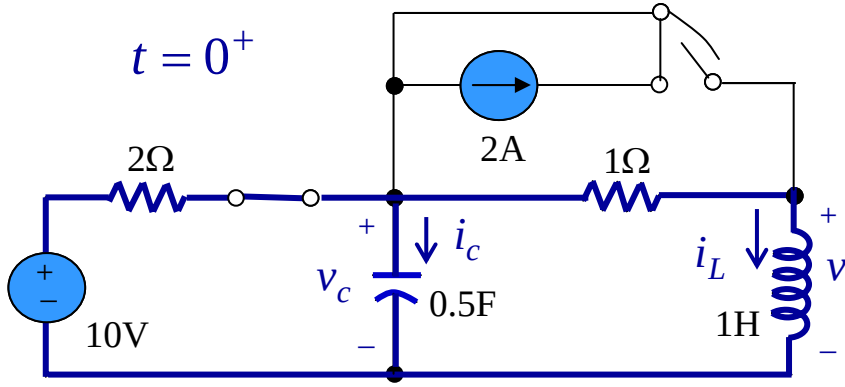
$$v_C(0^-) = -2\ \text{V} = v_C(0^+)$$ 이므로,

2 Ω 저항 에는 **12 V**가 걸리고, **6 A** 가 흐른다.

$$i_L(0^-) = 0 = i_L(0^+)$$ 이므로,

6 A는 모두 **Capacitor**로 흐른다.

$$i_c(0^+) = C\frac{dv_c(0^+)}{dt} = 6 \qquad \frac{dv_c(0^+)}{dt} = \frac{6}{1/2} = 12\ \text{V/s}$$

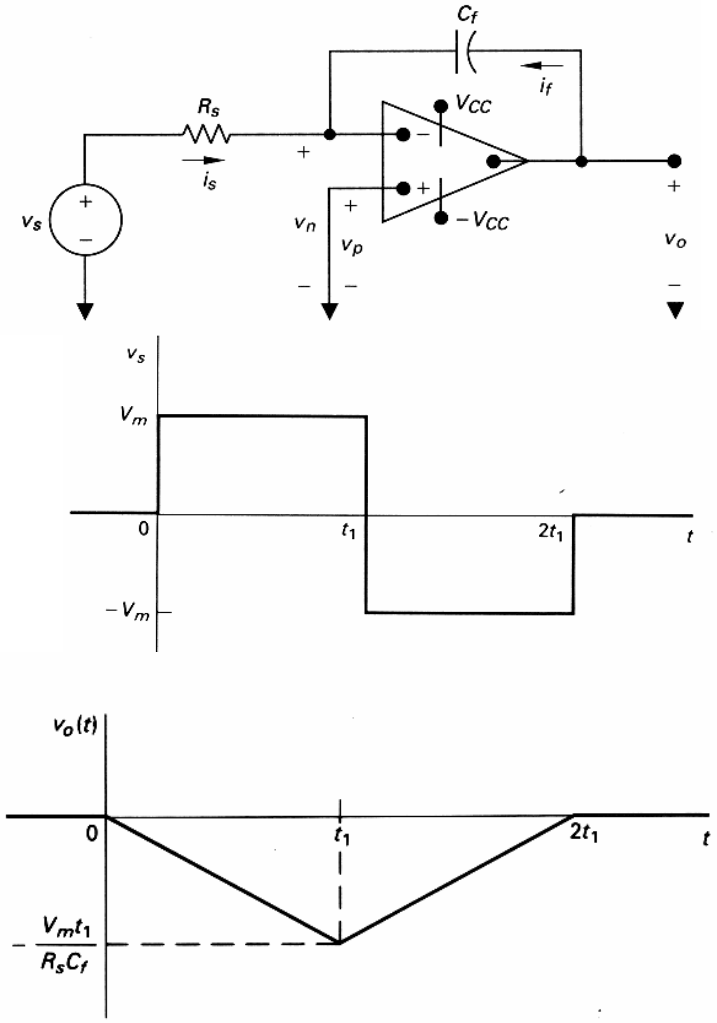


$$i_L(0^-) = 0 = i_L(0^+)$$ 이므로,

1 Ω 저항에는 전압강하가 없고, **Capacitor**의 전압이 **Inductor** 에 모두 걸린다.

$$v_L(0^+) = L\frac{di_L(0^+)}{dt} = -2 \qquad \frac{di_L(0^+)}{dt} = \frac{-2}{1} = -2\ \text{A/s}$$

Integrating Amplifier



입력을 적분하는 회로.

$$v_p = v_n = 0$$

Node a에서 **KCL** 적용.

$$\frac{0 - v_s}{R_s} + C_f \frac{d}{dt}(0 - v_o) = 0$$

$$\frac{dv_o}{dt} + \frac{v_s}{R_s C_f} = 0$$

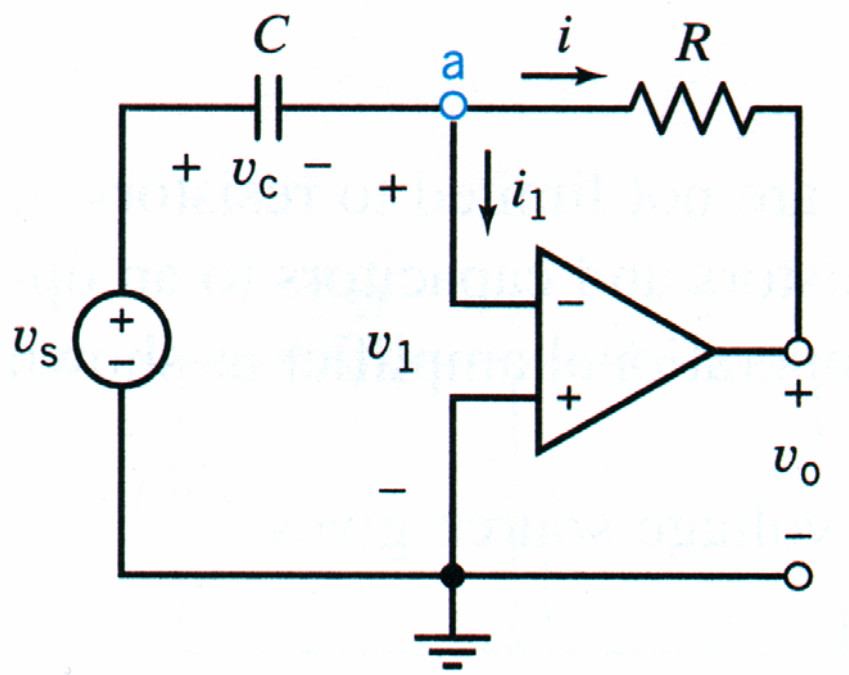
$$v_o(t) = -\int_{t_0}^{t} \frac{v_s}{R_s C_f} dt' + v_0(t_0)$$

선형 동작 영역 안에서는 출력은 입력의 적분 값이 됨.

만약 $v_o(t_0) = 0$ 이면

$$v_o(t) = -\frac{1}{R_s C_f} \int_{t_0}^{t} v_s(t') dt'$$

Differentiating Amplifier



A differentiator implemented using an operational amplifier

입력을 미분하는 회로.

$$v_p = v_n = v_1 = 0$$

Node a에서 **KCL** 적용.

$$C\frac{d}{dt}(0 - v_s) + \frac{0 - v_o}{R} = 0$$

$$\frac{dv_s}{dt} + \frac{v_o}{RC} = 0$$

$$v_o(t) = -RC\frac{dv_s}{dt}$$

Integrator and Voltage-controlled Switch (I)

– 적분기와 전압제어 스위치를 설계.

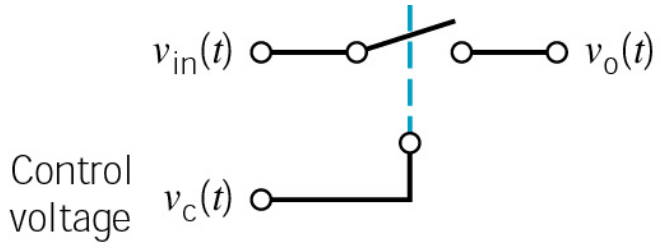
$$v_o = K \cdot \int_{t_1}^{t_2} v_s(t)dt + v_o(t_1)$$

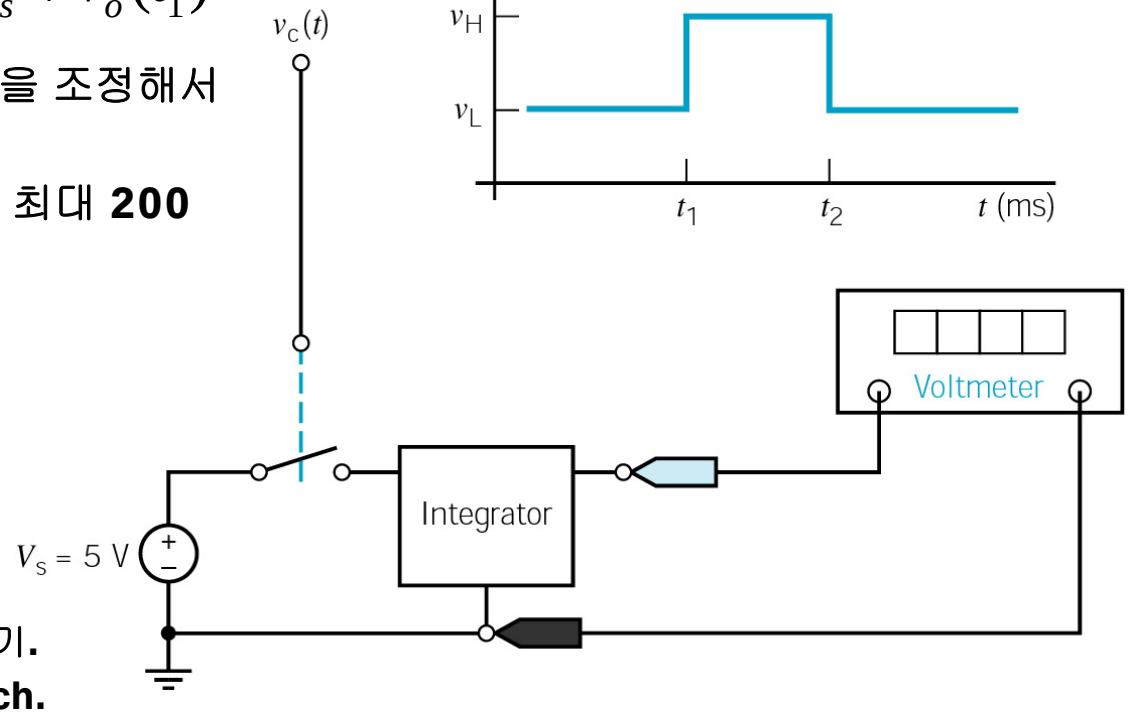
– 입력이 직류 전압이라면 아래와 같다.

$$v_o(t_2) = K \cdot (t_2 - t_1) \cdot V_s + v_o(t_1)$$

- 전자적으로 스위치 제어전압을 조정해서 입력 전압을 제어**.**

- 시간 간격은 최소 **5 ms** 에서 최대 **200 ms** 까지 조절이 가능**.**





- 사용 가능한 부품

(1) 표준 **2 %** 저항

(2) 1μF, 0.2 μF, 0.1 μF capacitor.

(3) Op amp.

(4) + 15 V / - 15 V 전원**.**

(5) 1 kΩ, 10 kΩ, 100 kΩ 가변 저항기**.**

(6) voltage-controlled SPST switch.

Integrator and Voltage-controlled Switch (II)

- t_1 에서 출력 전압이 영이라고 가정.
- 최대 시간 간격일 때 **10 V** 가 출력이 되도록 설계.

$$v_o(t_2) = \frac{10\ \text{V}}{200\ \text{ms}}(t_2 - t_1)$$

- 입력 전압이 **5 V**이므로 **K** 를 정할 수 있다.

$$K \cdot V_s = \frac{10\ \text{V}}{200\ \text{ms}} \Rightarrow K = 10\,\frac{1}{s}$$

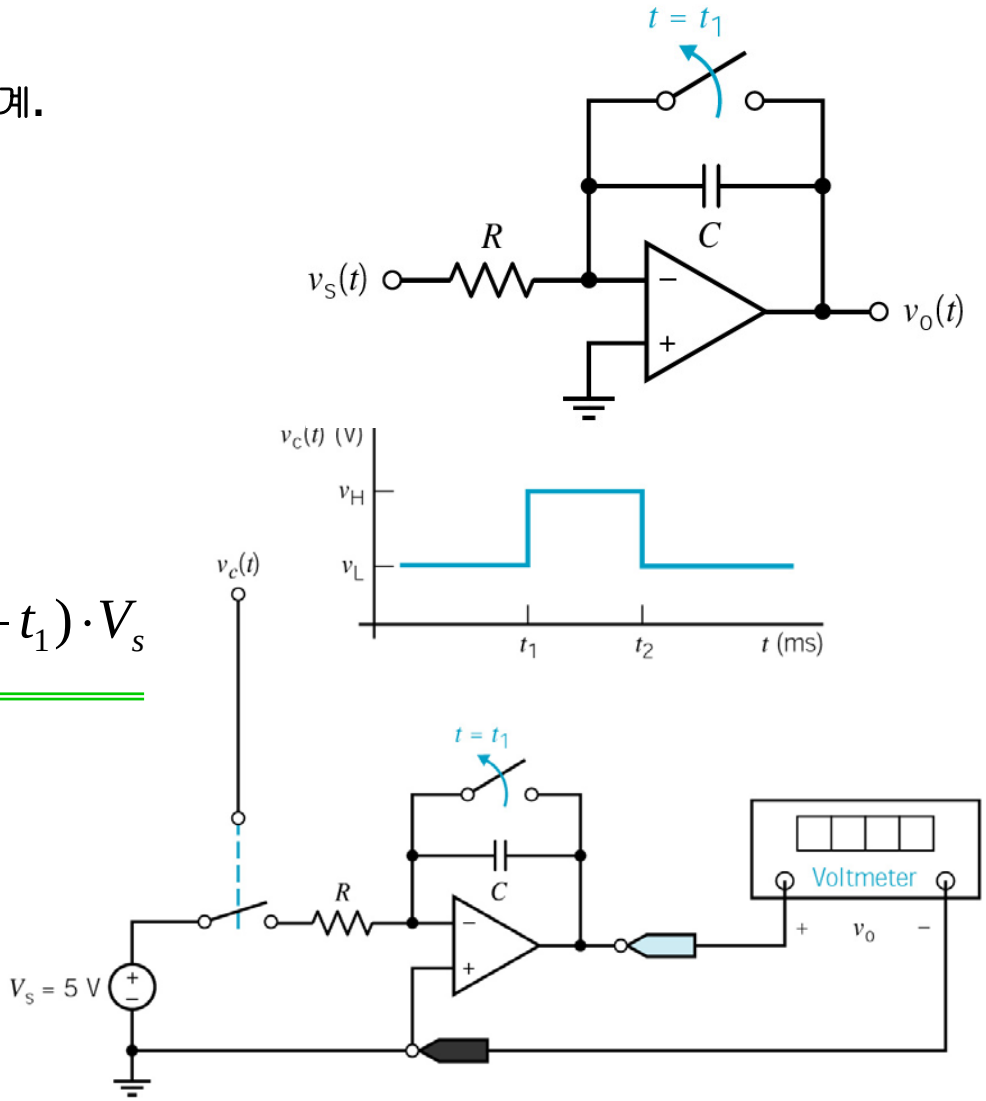
- **Op amp**를 사용하여 적분기 설계.

$$v_o(t) = -\frac{1}{RC}\int_{t_1}^{t_2} v_s(t)dt = -10(t_2 - t_1)\cdot V_s$$

- 캐패시터를 **1 μF**로 정한다.

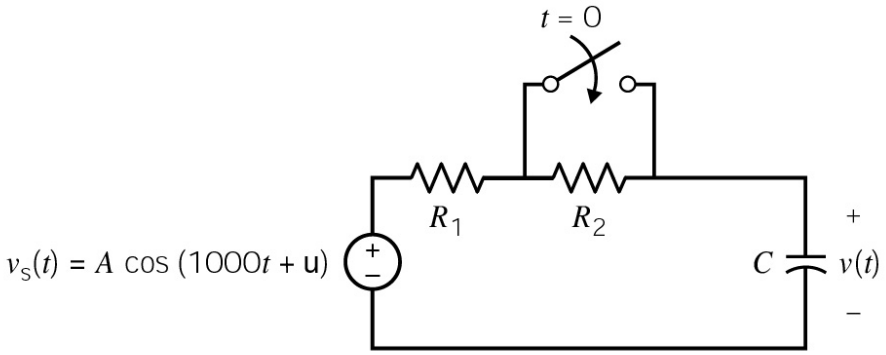
$$\frac{1}{RC} = 10 \Rightarrow R = \frac{1}{10C} = 100\ \text{k}\Omega$$

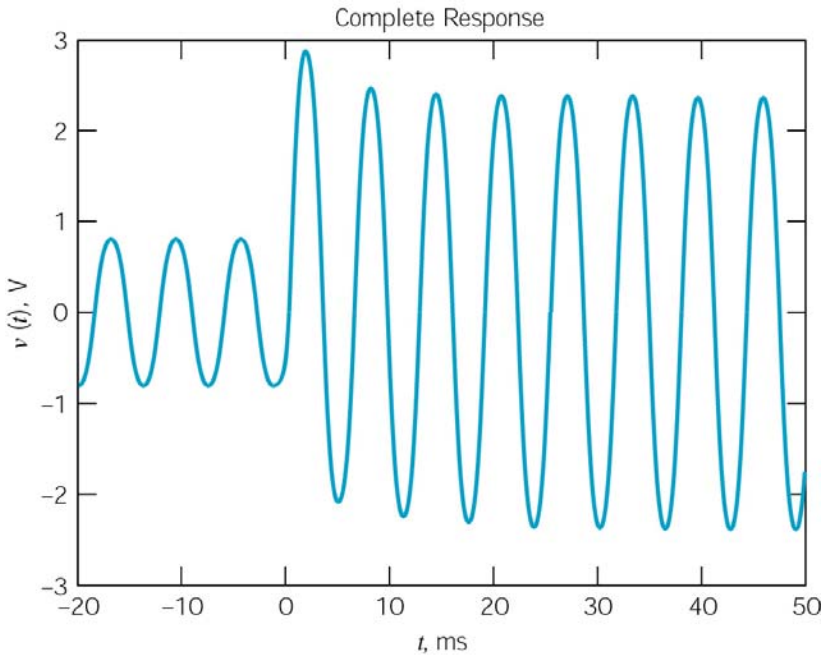
$$v_o(t) = -50(t_2 - t_1)\ \text{V}$$



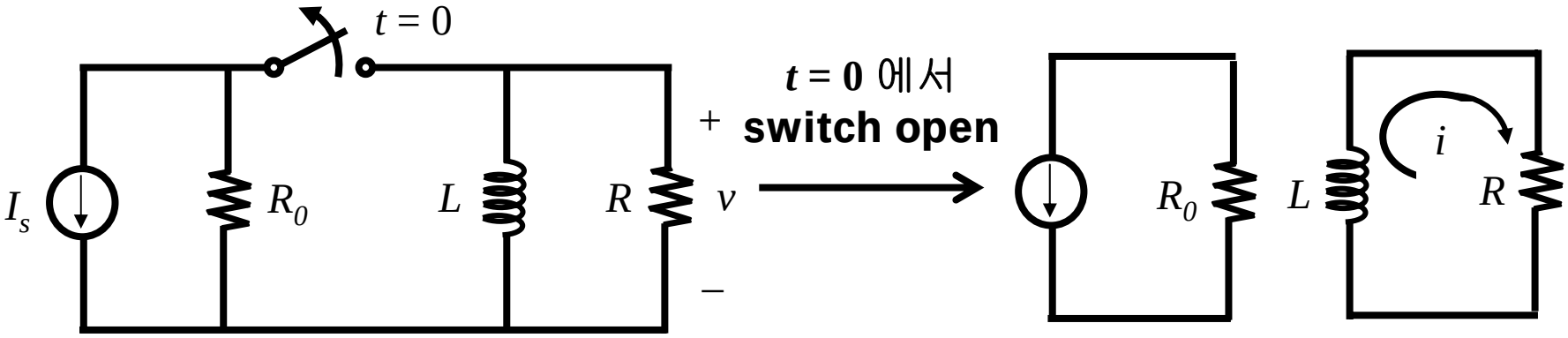
Response of First-Order RL and RC Circuits

- ***RL*** 또는 ***RC*** 회로만을 다룸.
- 우선, 외부 전원이 없는 회로, 즉 초기조건에 의해서 전류, 전압이 결정되는 회로의 응답 : **natural response**.
- 다음, 직류 전압이나 전류가 갑자기 가해질 때의 응답 : **step response.**
- 마지막으로, **natural response**, **step response**를 구하는 일반적인 방법을 배운다.





RL Circuit-Natural Response



$t < 0$ 일 때에는 $L\dfrac{di}{dt} = 0$ 이므로

inductor L에 I_s가 흐름.

$t > 0$ 일 때에는 $i(0^+) = I_s$

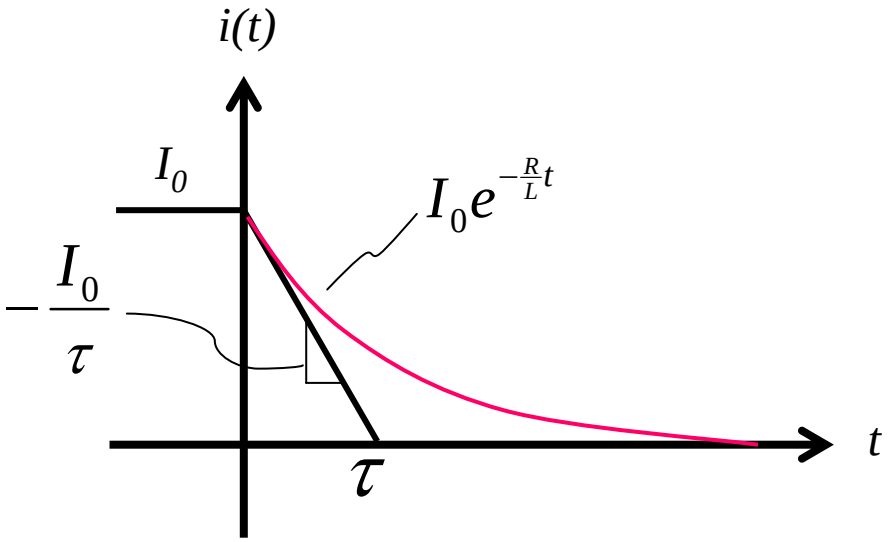
전류는 연속이므로 $i(0^-) = i(0^+)$

$t > 0$ 일 때에는 **KVL**에 의해서

$$L\frac{di}{dt} + Ri = 0 \ , \quad \text{초기조건} \ \ i(0^+) = I_s$$

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L}i = 0 \, , \quad (e^{\frac{R}{L}t} i)' = 0 \, , \quad i = K\, e^{-\frac{R}{L}t} \rightarrow i(t) = I_s e^{-\frac{R}{L}t} = I_0\, e^{-\frac{R}{L}t}$$

Time Constant



$$i(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$\tau = L/R$ **(time constant,** 시정수**) :**

특성을 나타내는 시간**.**

만약 $t = \tau$ 이면 e^{-1}배 **(37 %)**

$t = 5\tau$ 이면 e^{-5}배 **(1 %** 이하**).**

$1/\tau$ 은 $t = 0$ 에서의 변화율을 의미.

τ가 작다 : 전류가 빨리 변화.

τ가 크다 : 전류가 천천히 변화.

Resistor에서 소모되는 Power

$$p = vi = Ri^2 = RI_0^2 e^{-2t/\tau} \quad for \quad t \geq 0^+$$

Energy

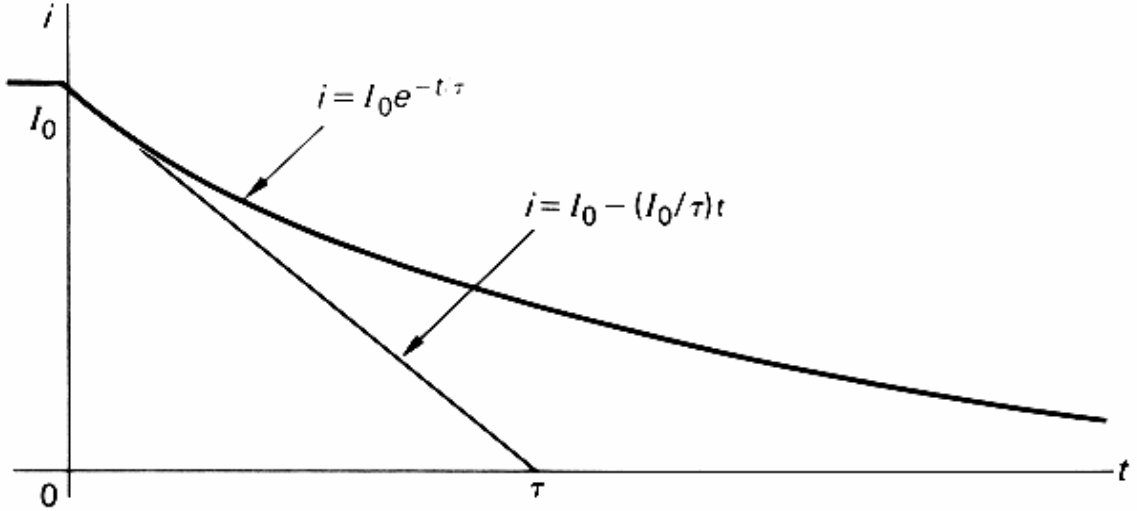
$$W = \int_0^t p\,dx = RI_0^2 \int_0^t e^{-2x/\tau}\,dx = RI_0^2 \frac{\tau}{2}\left[1 - e^{-2t/\tau}\right]$$

$$= \frac{1}{2} LI_0^2 (1 - e^{-2t/\tau}) \qquad \because \tau = \frac{L}{R}$$

$t \to \infty$ 이면 $W = 1/2\, LI_0^2$ 이 되어서

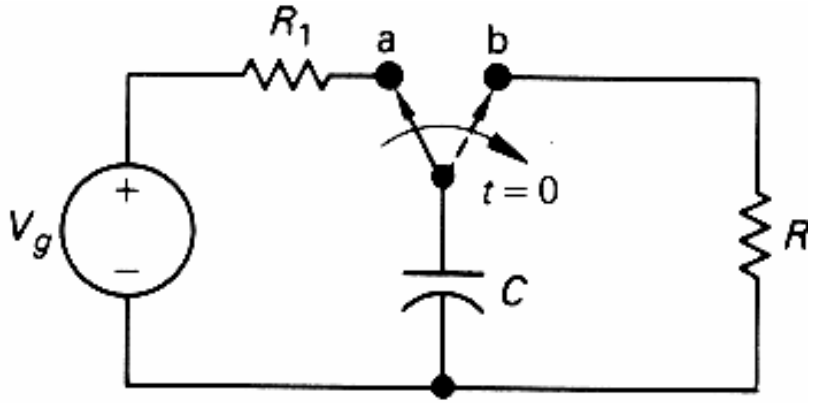
저항에서 소모하는 에너지는 인덕터에 축적한 양과 같아진다.

전류는 처음에는 I_0이었지만 5τ 후에는 거의 영이 된다.



- 따라서, 과도응답은 switching후 짧은 시간에 존재하고, 정상응답은 switching후 충분히 긴 시간이 지난 후 존재한다.

RC Circuit-Natural Response



Capacitor에는 v_g가 걸린다 **(∵ 전류 = 0).**

$$v(0^+)=V_0, \quad i_c=-i=C\frac{dv}{dt}$$

$$KVL: -v+Ri=0 \Rightarrow -v-RC\frac{dv}{dt}=0$$

$$\frac{dv}{dt}+\frac{1}{RC}v=0, \quad (e^{\frac{t}{RC}}v)'=0$$

$$v=Ke^{-\frac{t}{RC}}, \; v(0^+)=V_0=K$$

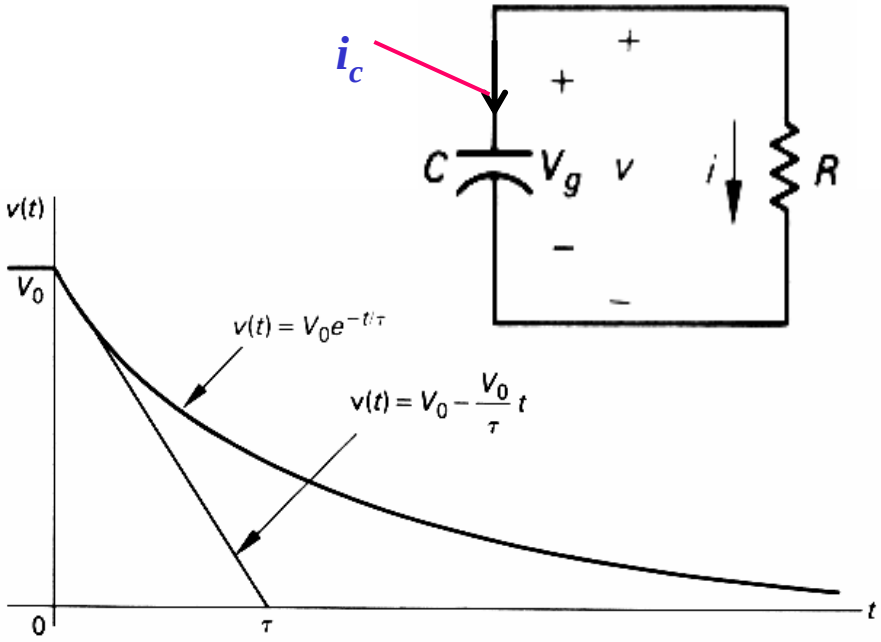
$$v(t)=V_0e^{-t/RC} \quad for \;\; t\ge 0$$

$$=V_0e^{-t/\tau} \quad \text{여기서} \quad \tau=RC$$

$$p=vi=v(-C\frac{dv}{dt})=(V_0e^{-t/RC})(C\cdot\frac{V_0}{RC}e^{-t/RC})$$

$$=\frac{V_0^2}{R}e^{-2t/RC}$$

$$W=\int_0^t pdt'=\frac{1}{2}CV_0^2(1-e^{-2t/RC})$$

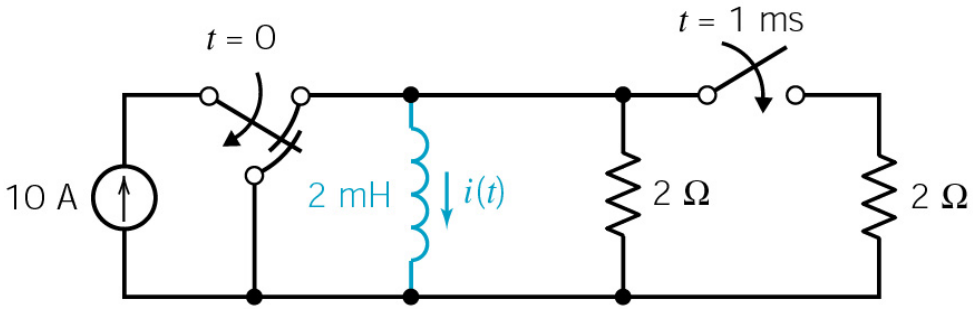


Sequential Switching (I)

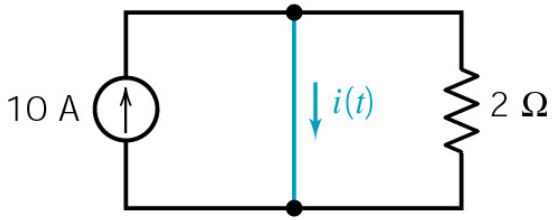
회로에서 **switching**을 두 번 이상 하는 경우 **- sequential switching**

Inductor 전류와 **capacitor** 전압이 연속이므로 이 조건을 이용한다.

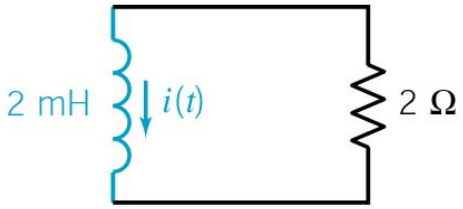
Example



(a) A circuit with sequential switching



(b) $t < 0$



(c) $0 \le t < 1$ **ms**

$t < 0$ 일 때 회로는 **(b)**와 같다.

따라서, $i(0^-) = 10$ **A** $= i(0^+)$

$0 \le t < 1$ **ms** 일 때 회로는 **(c)**와 같다.

$$2 \times 10^{-3} \frac{di}{dt} + 2i = 0, \quad i(0^+) = 10$$

$$\frac{di}{dt} + 1000\, i = 0$$

$$i(t) = K\, e^{-1000\, t}$$

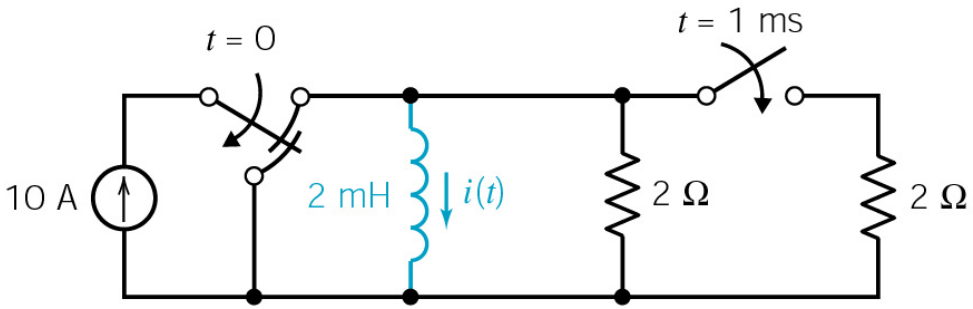
초기값에 의해 K**=10**

$0 \le t < 1$ **ms** 에 대해서

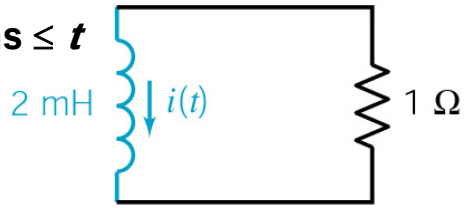
$$i(t) = 10\, e^{-1000\, t}$$

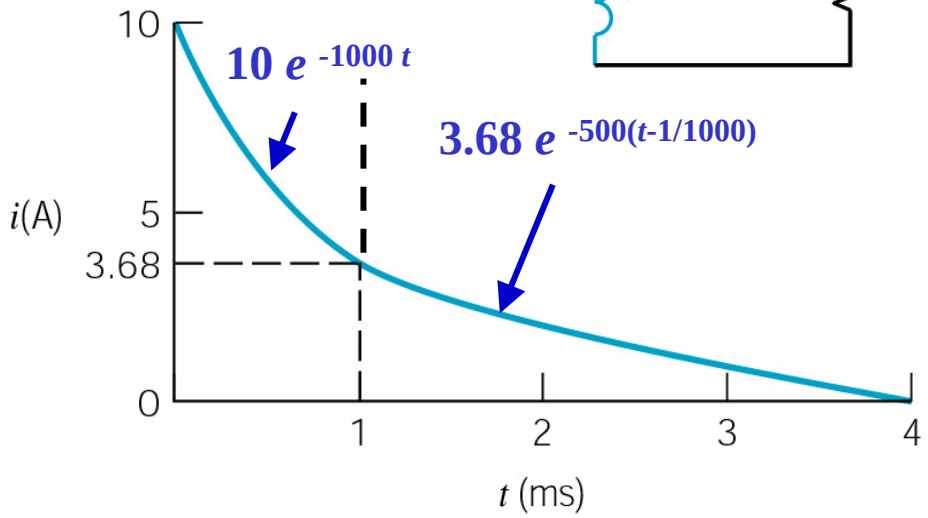
$$i(1\,\text{ms}) = 10\, e^{-1} = 3.68\ \text{A}$$

Sequential Switching (II)



(d) 1 ms ≤ *t*





1 ms < *t* 일 때 회로는 (d)와 같다.

t = 1 ms 일 때 전류는 연속이므로

$$2\times10^{-3}\frac{di}{dt}+1i=0,\quad i(1\,\text{ms})=3.68$$

$$\frac{di}{dt}+500\,i=0$$

$$i(t)=K\,e^{-500\,t}$$

초기값 $i(1\,\text{ms})=3.68=K\,e^{-0.5}$

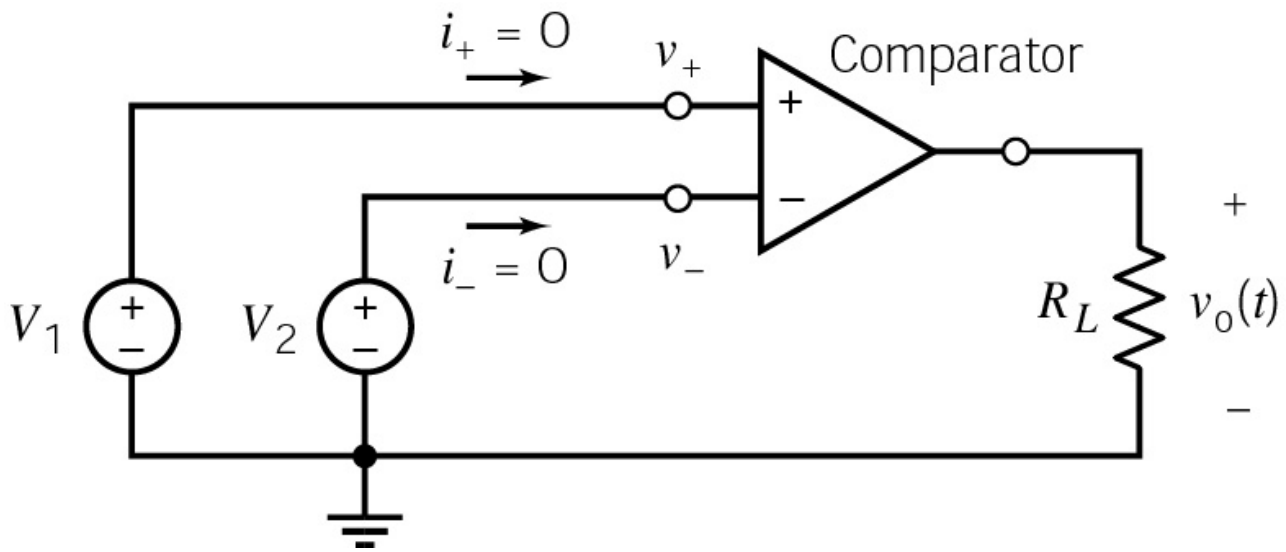
$$K=3.68\,e^{0.5}$$

$$i(t)=3.68\,e^{-500\,t+0.5}$$

$$=3.68\,e^{-500\,(t-1/1000)}$$

Current waveform for $t \geq 0$.
The exponential has a different time constant for $0 \leq t < t_1$ and for $t \geq t_1$ where t_1 =1 ms.

Comparator

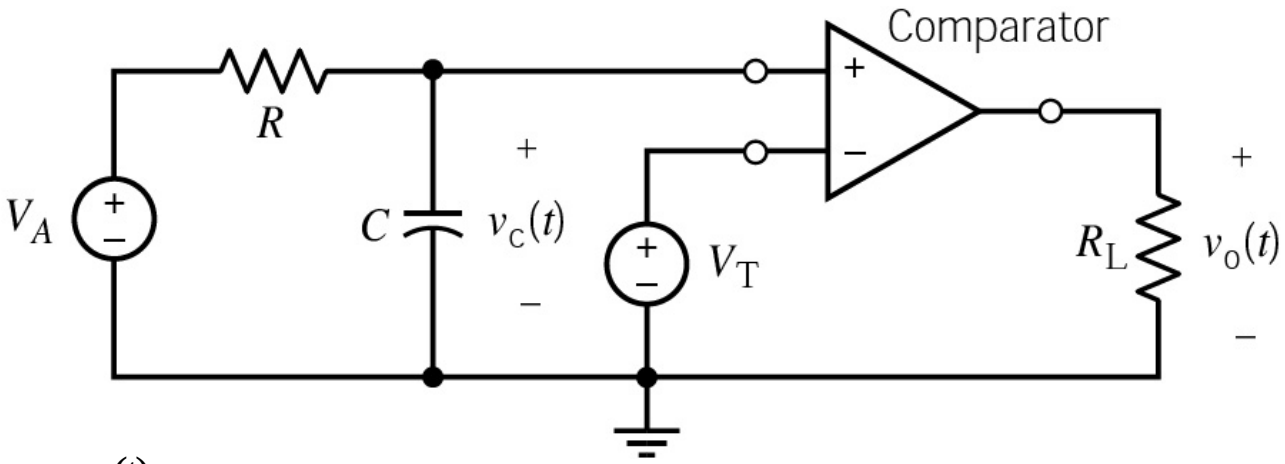


- 입력을 비교하여 두 출력 중 하나를 출력으로 함.

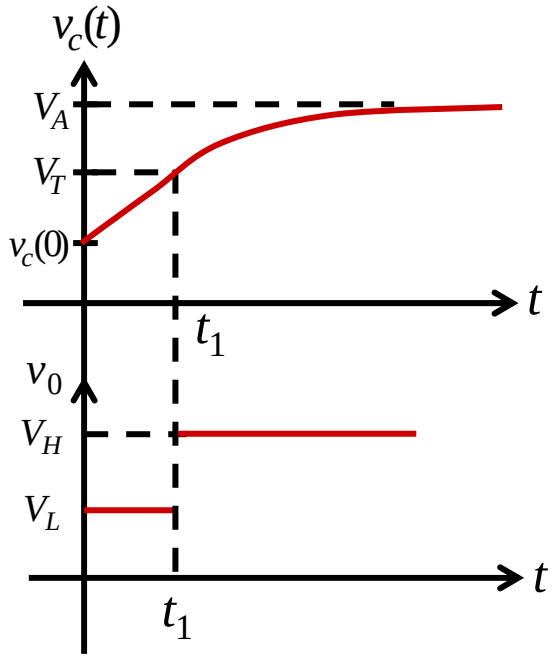
$$v_0(t) = \begin{cases} V_H & if \quad v_+ > v_- \\ V_L & if \quad v_+ < v_- \end{cases}$$

- 입력 전류는 영.
- 기호 : **Op amp**에 **comparator**라고 씀.

Comparator of Capacitor Voltage (I)



A comparator is used to compare the capacitor voltage, $v_c(t)$, to a threshold voltage, V_T.



$V_A > V_T > V_C(0)$ 라고 가정.
$v_c(t)$가 $v_c(0)$로부터 V_A로 커지면서 V_T에서 스위칭이 일어나고
$v_0 = V_L$로부터 V_H로 바뀐다.
이 때 걸리는 시간을 구해 보자.

$$v_0(t) = \begin{cases} V_H & if \quad v_c(t) > V_T \\ V_L & if \quad v_c(t) < V_T \end{cases}$$

Comparator of Capacitor Voltage (II)

- Noninverting 단자에서 KCL.

$$\frac{v_c - V_A}{R} + C\frac{dv_c}{dt} = 0$$

$$RC\frac{dv_c}{dt} + v_c = V_A$$

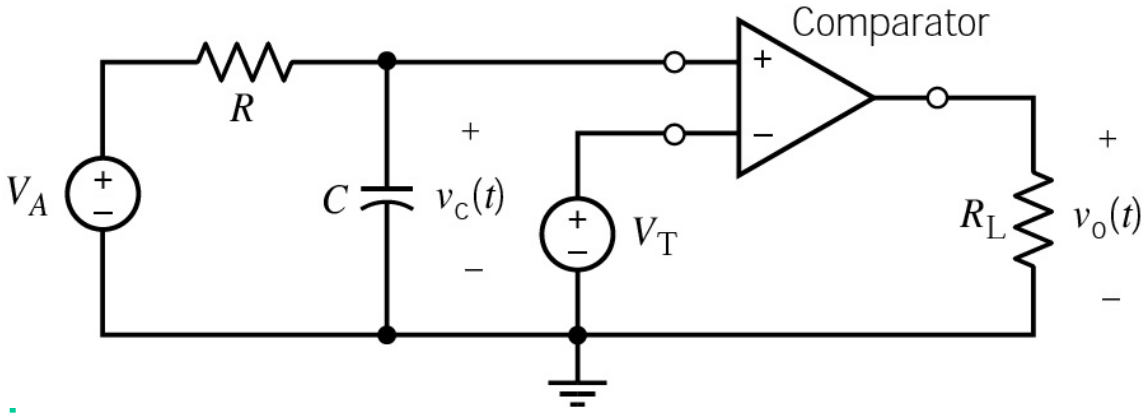
$$\frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{RC} = \frac{V_A}{RC}$$

$$v_c = V_A + K\, e^{-\frac{t}{RC}}$$

초기값 $v_c(0) = V_A + K$

$$K = v_c(0) - V_A$$

$$v_c(t) = V_A + (v_c(0) - V_A)e^{-\frac{t}{RC}}$$

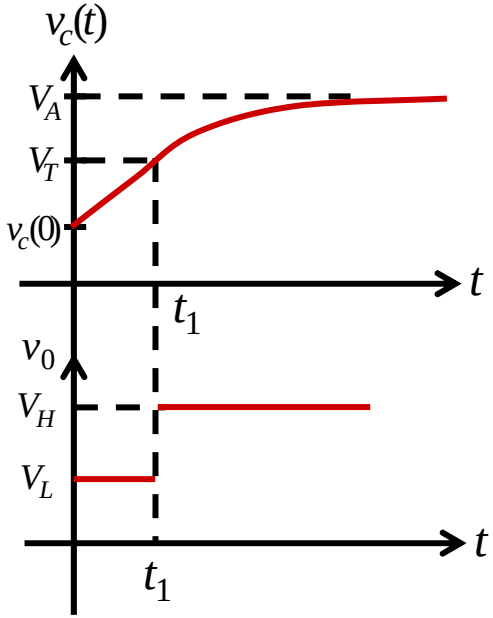


$t = t_1$ 에서 $v_c(t) = V_T$ 라면

$$V_T = V_A + (v_c(0) - V_A)e^{-\frac{t_1}{RC}}$$

$$-\frac{t_1}{RC} = \ln\left(\frac{V_A - V_T}{V_A - v_c(0)}\right)$$

$$\therefore t_1 = RC\ln\left(\frac{V_A - v_c(0)}{V_A - V_T}\right)$$



Stability of First-Order Circuits

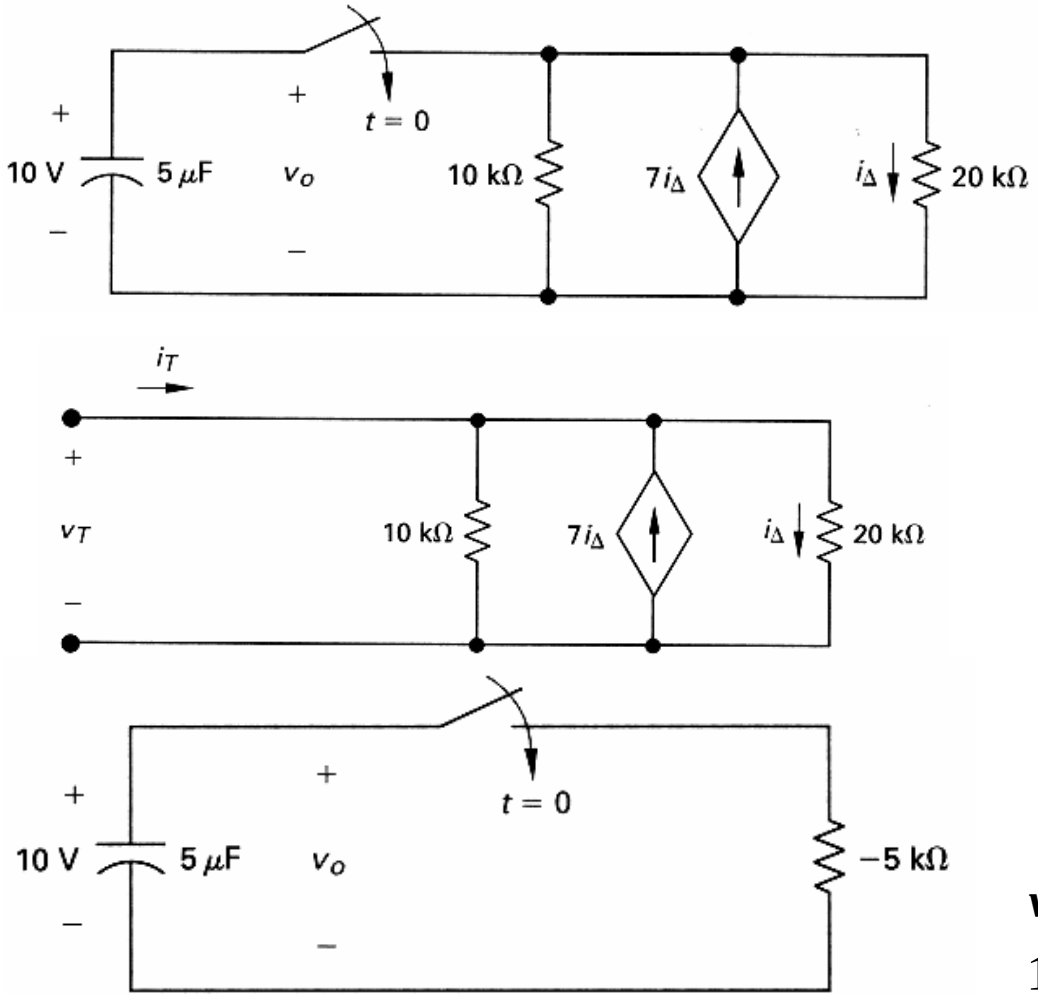
- **Inductor, capacitor, resistor, independent source** 만을 가진 회로는 **stable**하다.
- 그러나, 회로 응답이 시간적으로 감쇠하지 않고 지수 함수적으로 증가할 수도 있다. **Dependent source**를 갖는 경우 가능하다.
- **Inductor**나 **capacitor**에서 본 $\mathbf{R_{Th}}$가 음이면 **unbounded response**가 나타나서 **unstable**하다.
- **RC**회로의 경우

$$\frac{dv_c}{dt} - \frac{1}{R_{Th}C} v_c = 0 \quad \rightarrow \quad v_c = V_0 e^{\frac{t}{R_{Th}C}}$$

- 최종 값은 소자의 특성에 따라 제한된다.

Example of Stability of First Order Circuits

$t = 0$ 에서 스위치가 닫힌다. 이 때 $V_c(0) = 10$ V 이다. $\quad v_o(t) = ?$



KCL에서

$$5\times10^{-6}\frac{dv_o}{dt}+\frac{v_o}{10000}-7i_\Delta+\frac{v_o}{20000}=0$$

여기서 $i_\Delta=\dfrac{v_o}{20000}$ 이므로

$$5\times10^{-6}\frac{dv_o}{dt}+\frac{v_o}{10000}\left(1-\frac{7}{2}+\frac{1}{2}\right)=0$$

$$5\times10^{-6}\frac{dv_o}{dt}+\frac{v_o}{-5\times10^3}=0$$

$$R_{Th}=-5\times10^3\,\Omega$$

$$\frac{dv_o}{dt}-40v_o=0$$

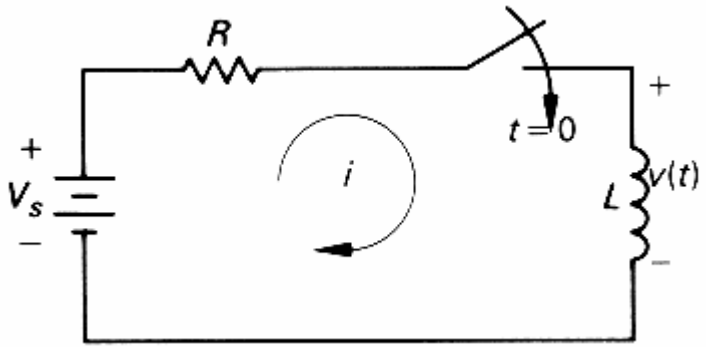
$$v_o=v_c=10e^{40t}\qquad(\because v_c(0)=10\text{ V})$$

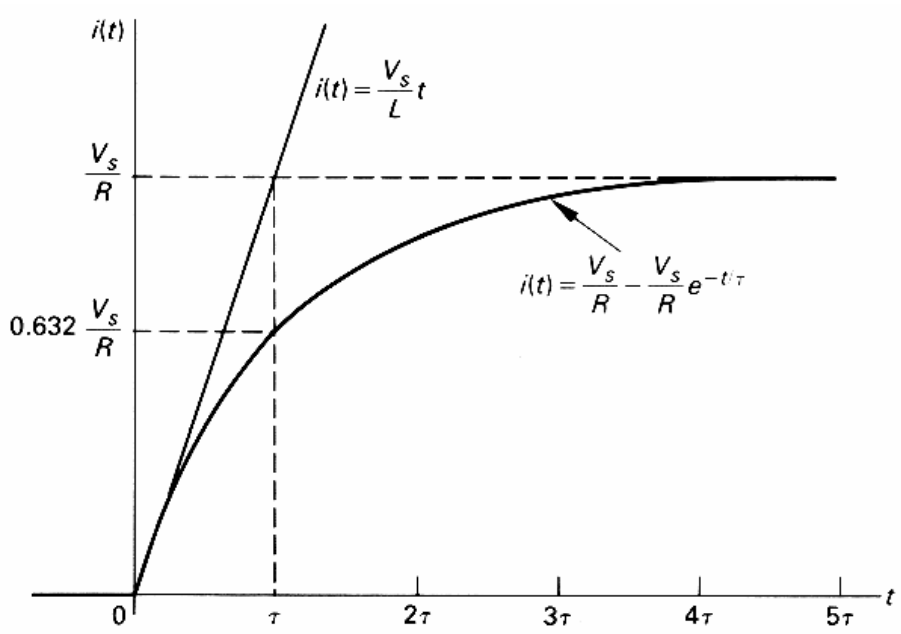
$v_c = 150$ V 일 때 절연파괴.

$$150=10e^{40t}\Rightarrow\quad t=(\ln15)/40\ \text{ sec}$$

Step Response of RL Circuit (I)

회로에 갑자기 일정 전압이나 전류를 가했을 때의 응답 : **step response**.





$t > 0$ 일 때 $V_s = Ri + L\frac{di}{dt}$

$$i = i_h + i_p$$

For i_h $\quad Ri + L\frac{di}{dt} = 0,\ i_h = Ke^{-t/\tau}$

For i_p $\quad Ri + L\frac{di}{dt} = V_s,\ i_p = \frac{V_s}{R}$

$$i(t) = Ke^{-t/\tau} + \frac{V_s}{R}$$

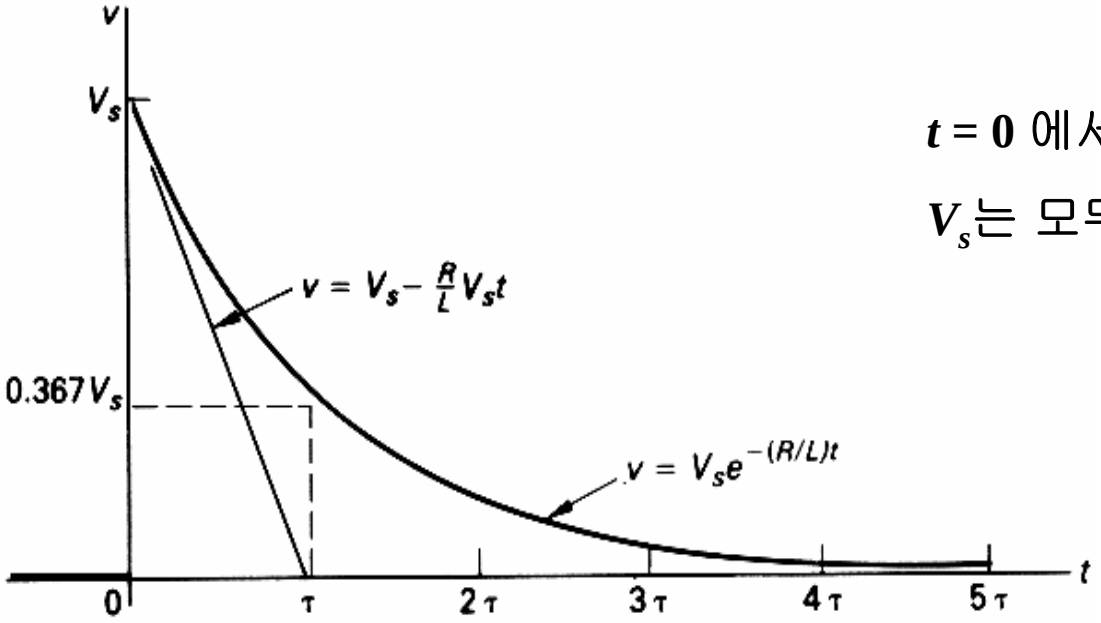
$i(0) = I_0$ 라하면 $\quad I_0 = K + \frac{V_s}{R}$

Step Response of RL Circuit (II)

$$i(t) = (I_0 - \frac{V_s}{R})e^{-t/\tau} + \frac{V_s}{R}$$

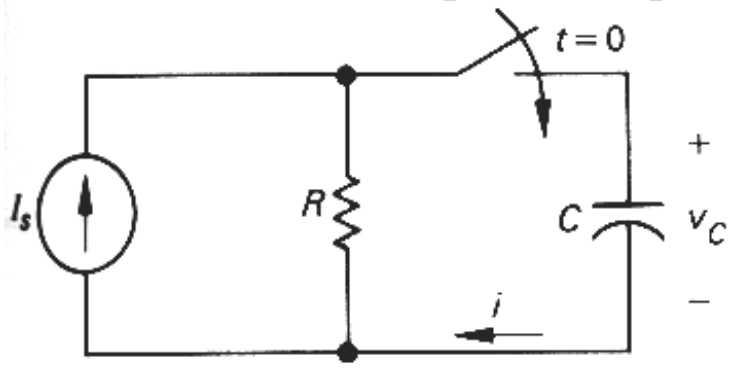
만약 $I_0 = 0,\ i(t) = \frac{V_s}{R}(1 - e^{-t/\tau})$

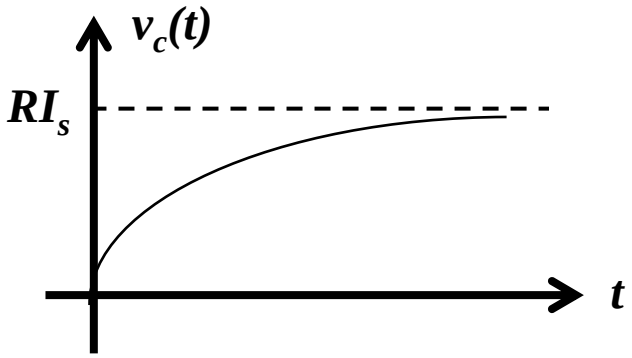
$t = 0$ 에서의 증가율 : $\left.\frac{di}{dt}\right|_{t=0} = \frac{V_s}{R} \cdot \frac{1}{\tau} = \frac{V_s}{L}$

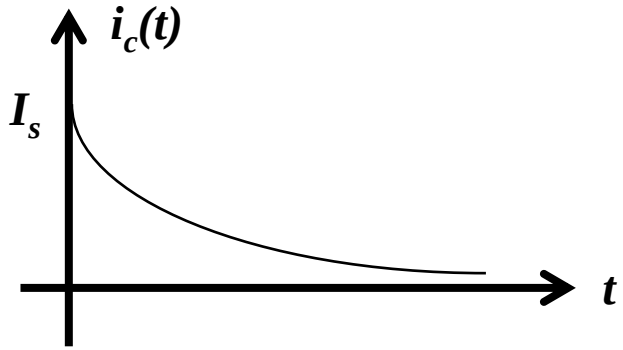


$t = 0$ 에서 R 에서의 전압강하는 영이므로 V_s는 모두 **inductor**에 걸림.

Step Response of RC Circuit







$t < 0$ 에서 $v_c(0^-) = v_c(0^+) = V_0$

$t > 0$ 에서

KCL : $-I_s + \frac{v_c}{R} + C\frac{dv_c}{dt} = 0$

$$\frac{dv_c}{dt} + \frac{1}{RC}v_c = \frac{I_s}{C}$$

$v_c(t) = v_{ch} + v_{cp}$ $\quad v_{ch}(t) = Ke^{-t/\tau}$

$v_{cp}(t) = RI_s$

$v_c(t) = Ke^{-t/\tau} + RI_s$

$= (v_0 - RI_s)e^{-t/\tau} + RI_s \quad for\ t \geq 0$

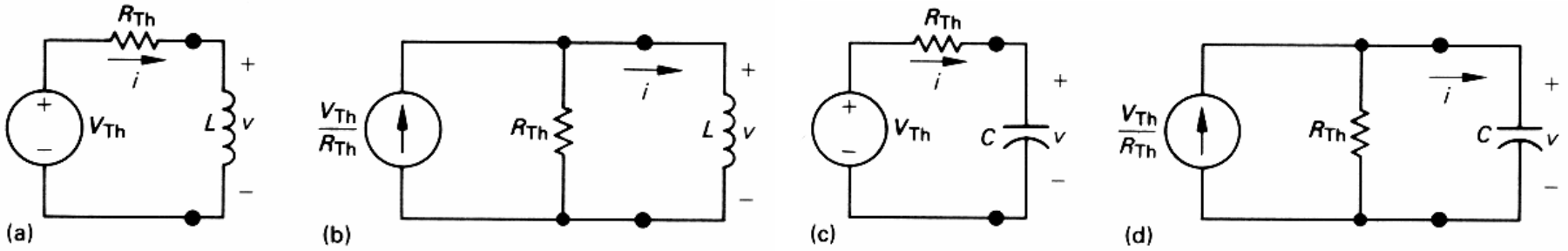
If $V_0 = 0$,

$v_c(t) = RI_s(1 - e^{-t/\tau})$

$i_c(t) = C\frac{dv_c}{dt} = I_s e^{-t/\tau}$

General Solution of Constant Source

– ***RL, RC*** 회로는 다음의 네 회로로 정리.



식을 정리하면

$$\frac{dx}{dt}+\frac{x}{\tau}=K, \quad K:\text{상수}$$

$$x = x_h + x_p$$

$$x_h = Ce^{-\frac{t}{\tau}}, \quad x_p = \tau \cdot K$$

$$x(t) = Ce^{-t/\tau} + \tau K$$

$t = t_0$ 일 때 초기값 $x(t_0)$

$$x(t_0) = Ce^{-t/\tau} + \tau K \Rightarrow C = \{x(t_0) - \tau K\}e^{t_0/\tau}$$

$$x(t) = \{x(t_0) - \tau K\}e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} + \tau K$$

- Inductor에서 전류,
capacitor에서 전압이 연속.

$$x(t_0^+) = x(t_0^-)$$

즉, $i_L(t_0^+) = i_L(t_0^-), v_c(t_0^+) = v_c(t_0^-)$

General Solution of Nonconstant Source

Steady-State Response to a Forcing Function

Forcing Function $y(t)$	Steady-State Response $x_f(t)$
1. Constant $y(t) = M$	$x_f = N$, **a constant**
2. Exponential $y(t) = M\,e^{-bt}$	$x_f = N\,e^{-bt}$
3. Sinusoid $y(t) = M \sin(\omega t + \theta)$	$x_f = A \sin\omega t + B \cos \omega t$

Application – Flash Lamp Circuits (I)

- 일회용 플래시가 달린 카메라.
- **1.5 V** 의 건전지로 수천 **V** 를 발생시켜 플래시를 동작.
- 캐패시터가 에너지($W=Pt=(VI)\ t$)를 저장했다가 짧은 시간에 작은 전류를 흘려서 큰 전압을 얻는다.

- 주요 부품 :

(1) 160 μF, 330 V 극성화된 전해 캐패시터 : 플래시 램프에 필요한 전하를 축적.

(2) 플래시 램프

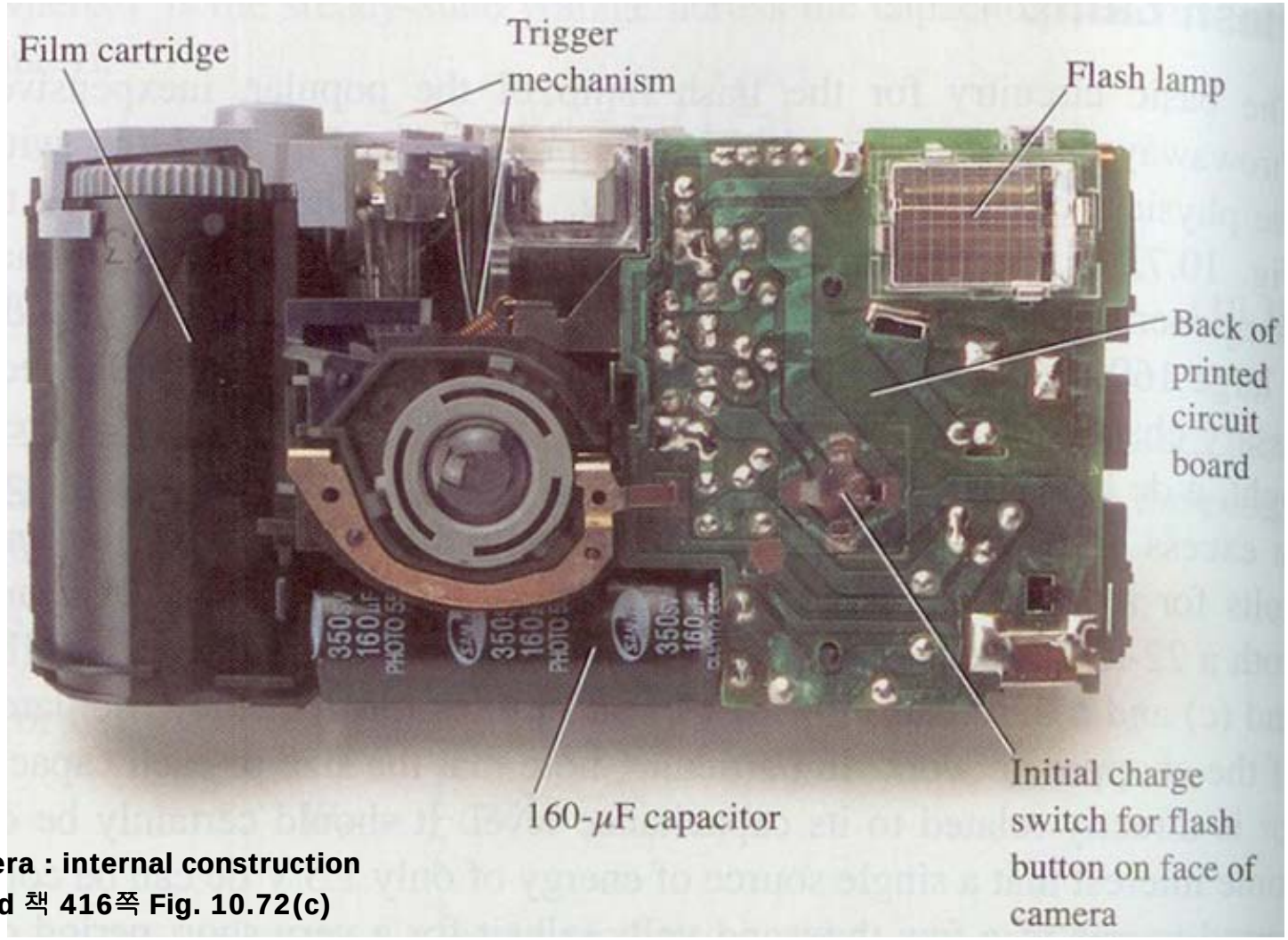
(3) 1.5 V 건전지

(4) chopper 회로 : **300 V** 를 넘는 직류 전압을 발생시킴.

(5) trigger 회로 : 짧은 시간이지만 수천 **V** 를 발생시킴.

Flash camera : general appearance
Boylestad 책 415쪽 Fig. 10.72(a)

Application – Flash Lamp Circuits (II)



Flash camera : internal construction
Boylestad 책 416쪽 Fig. 10.72(c)

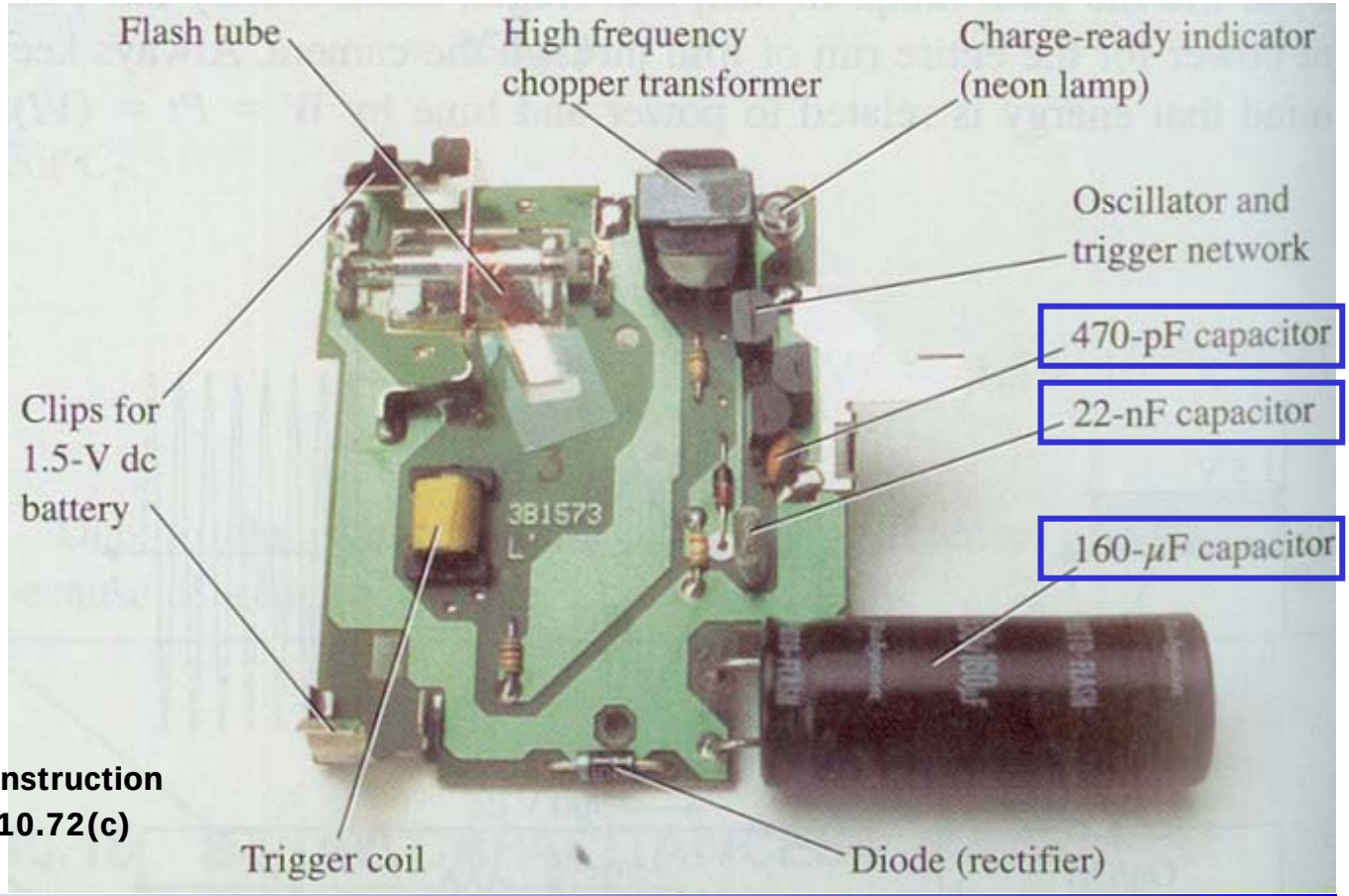
Application – Flash Lamp Circuits (III)

- 세 종류의 캐패시터가 사용됨

(1) 160 μF, 330 V 극성화된 전해 캐패시터 **:** 플래시 램프에 필요한 전하를 축적**.**

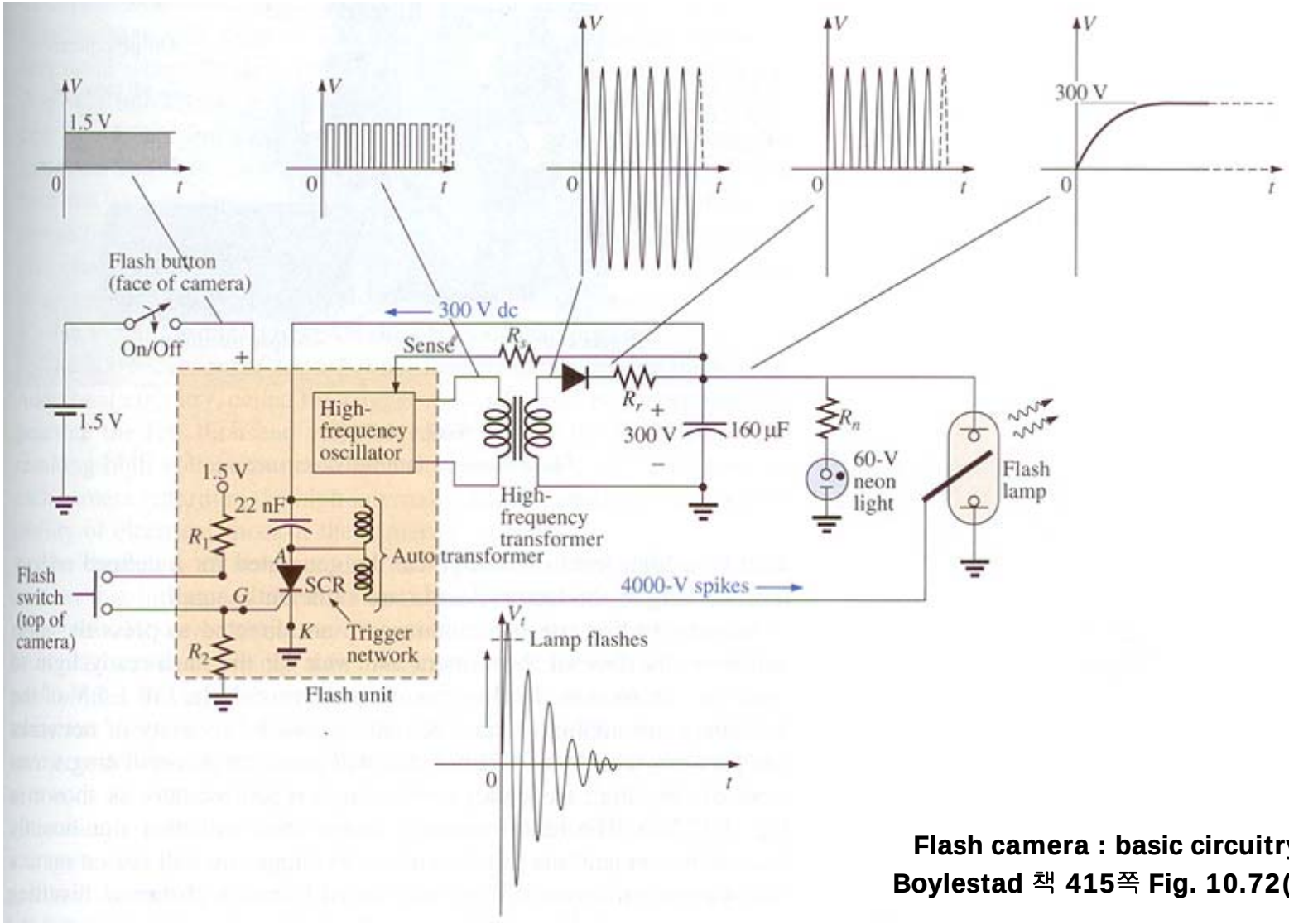
(2) 22 nF 캐패시터 **: trigger** 회로에 사용**.**

(3) 470 pF 캐패시터 **: chopper** 회로에서 고주파 발진에 사용**.**



Flash camera : internal construction
Boylestad 책 416쪽 Fig. 10.72(c)

Application – Flash Lamp Circuits (IV)



Flash camera : basic circuitry
Boylestad 책 415쪽 Fig. 10.72(b)

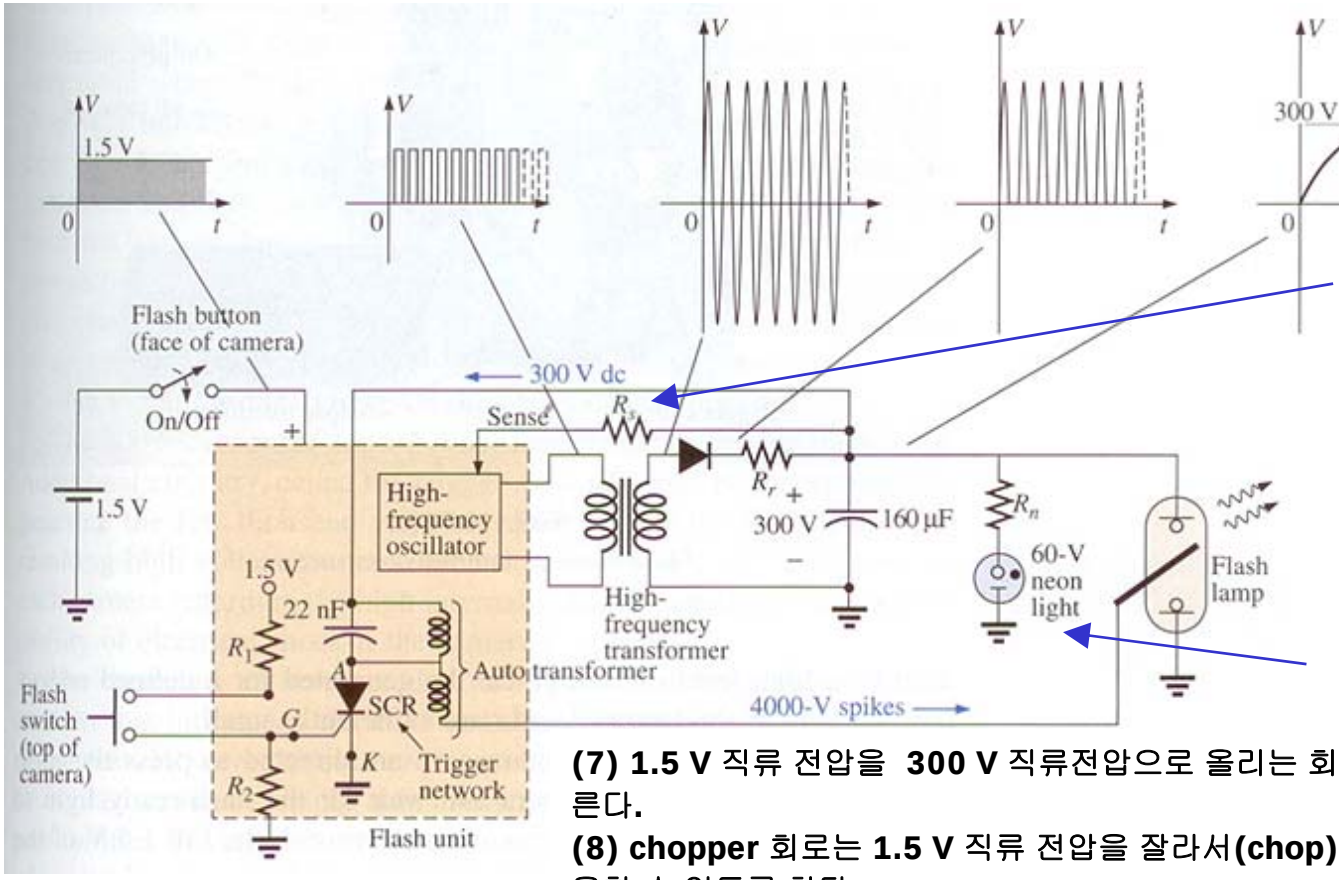
Application – Flash Lamp Circuits (V)

(1) 플래시 버튼을 누르면 **1.5 V**가 전자회로에 가해진다.

(2) 이 회로는 고주파 발진 파형을 만든다.

(3) 고주파 변압기가 발생한 전압의 크기를 크게 해서 반파**(**半波**)** 정류기에 전압이 걸린다.

(4) 이 전압은 **160 μF** 캐패시터를 충전해서 **300 V** 까지 전압이 올라간다.



(5) 전압이 **300 V** 까지 올라가면 **"sense"** 라고 표기된 도선을 통해 신호를 보내 발진기를 끄고**,** 출력 직류전압이 낮은 **threshold** 전압 아래로 떨어질 때까지 이 상태를 유지한다.

(6) 160 μF 캐패시터가 충전되면 **neon** 램프**(flash ready lamp)**가 커진다.

(7) 1.5 V 직류 전압을 **300 V** 직류전압으로 올리는 회로를 **dc-dc converter** 라고 부른다.

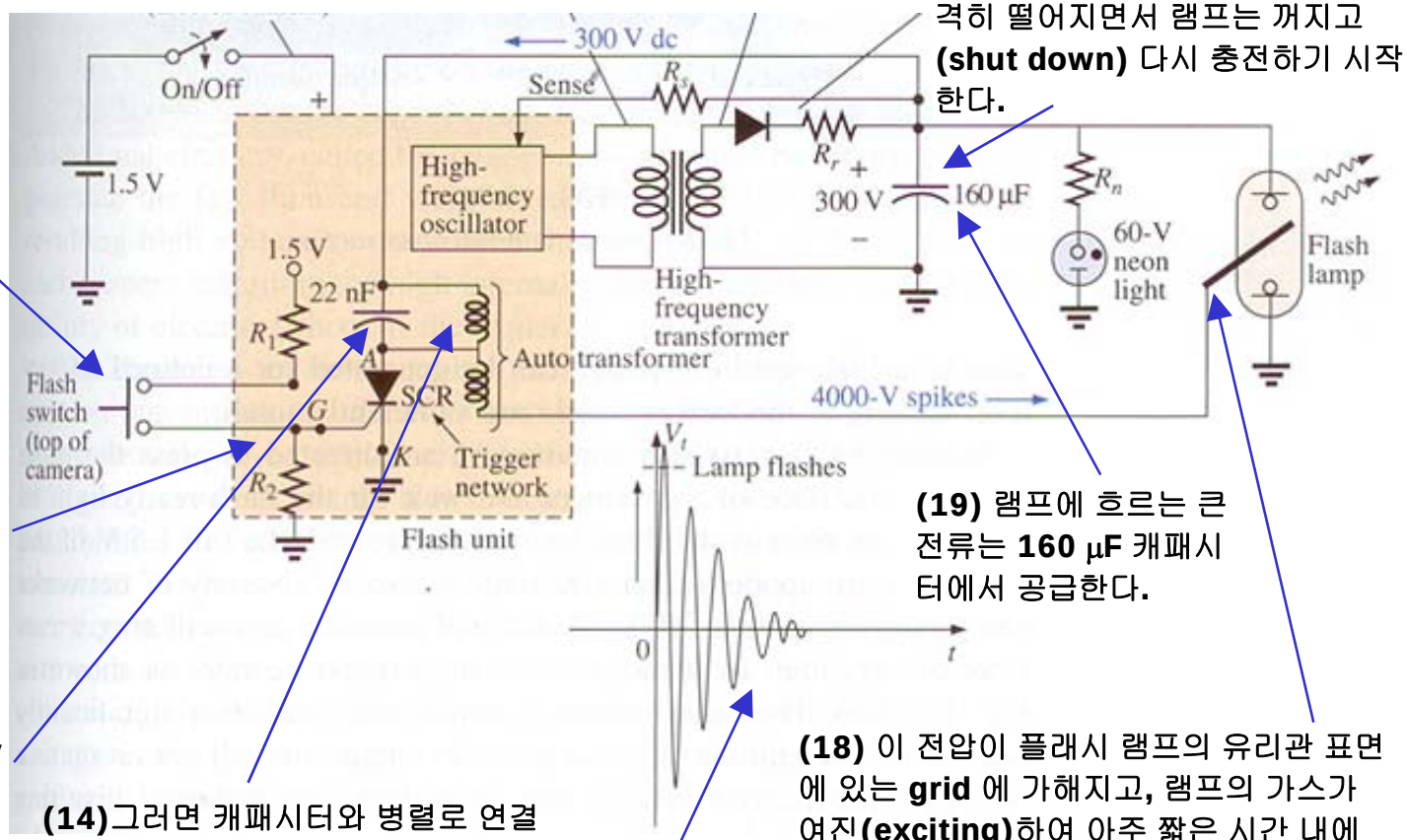
(8) chopper 회로는 **1.5 V** 직류 전압을 잘라서**(chop)** 교류처럼 만들어서 변압기에 사용할 수 있도록 한다.

Application – Flash Lamp Circuits (VI)

(9) trigger 회로는 **300 V** 를 수천 **V** 로 높여서 플래시 램프를 점화 **(“firing”)**시킨다.
(10) flash switch 가 닫히면 저항 R_1과 R_2 가 분압 회로를 구성하게 된다.

(11) R_2 에 걸리는 전압은 **SCR(silicon-controlled rectifier)**의 **gate G** 에 인가하여 **SCR**을 동작시켜 **SCR** 의 **A(anode)** 단자와 **K(cathode)** 단자 사이를 **short** 으로 만든다.

(12) 22 nF 의 캐패시터는 **300 V** 로 충전되고, **300 V** 에 다다르면 전류가 흐르지 않게 된다.
(13) SCR 에 흐르는 전류가 영이 되므로 소자 특성에 의해서 **SCR** 은 다시 **open** 이 된다.



(14)그러면 캐패시터와 병렬로 연결된 **coil** 을 통해서 방전하기 시작한다.
(15) 병렬 **coil** 은 인덕터와 저항으로 모델링 된다. 이 때 에너지는 캐패시터와 인덕터 사이를 오가게 되고, 이를 **“flyback effect”** 라고 한다.

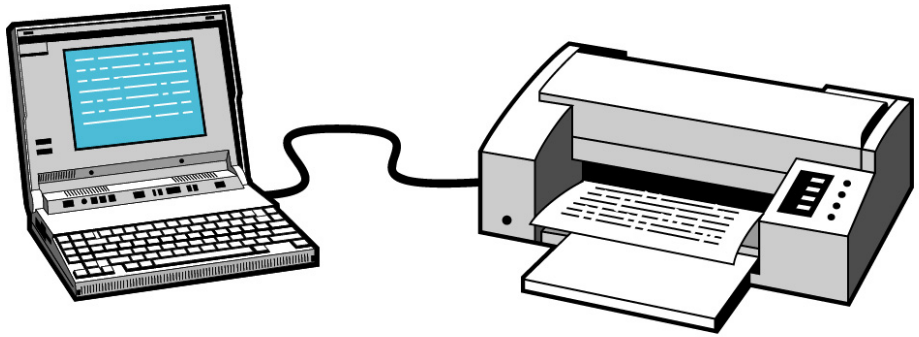
(16) coil 전압은 진동**(“ringing”)**하면서 감쇄하게 된다.
(17) 이 전압은 변압기를 통해서 크기가 커져서 플래시를 점화 **(“firing”)** 할 수 있는 **4,000 V**에 이르게 된다.

(18) 이 전압이 플래시 램프의 유리관 표면에 있는 **grid** 에 가해지고, 램프의 가스가 여진**(exciting)**하여 아주 짧은 시간 내에 큰 전류가 흐르면서 발광한다.

(19) 램프에 흐르는 큰 전류는 **160 μF** 캐패시터에서 공급한다.

(20) 160 μF 캐패시터 전압은 급격히 떨어지면서 램프는 꺼지고 **(shut down)** 다시 충전하기 시작한다.

Delay between Computer and Printer (I)

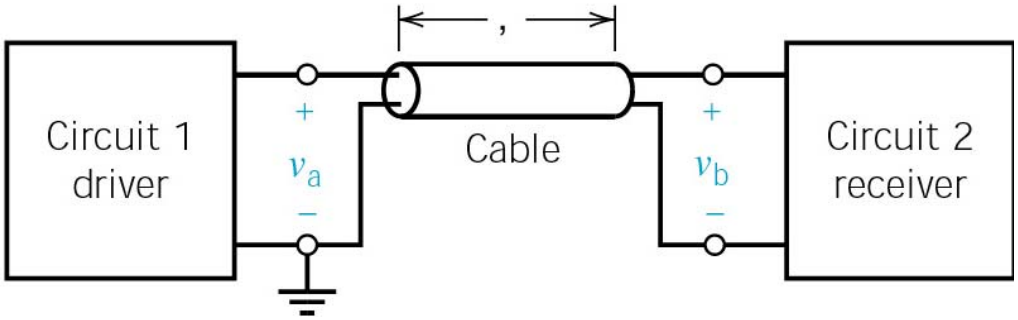


(a) A printer Connected to a laptop computer

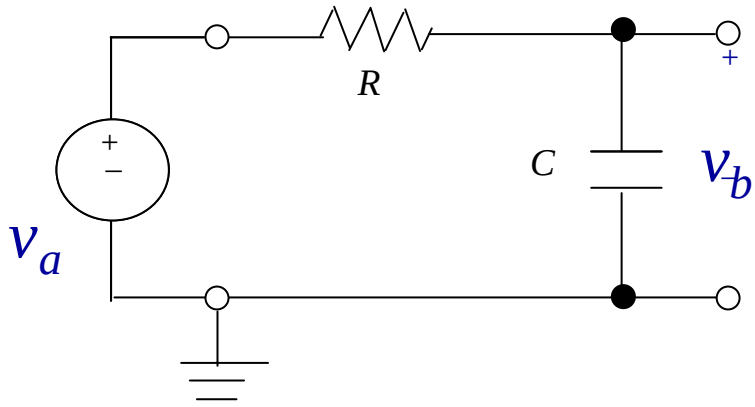
- **Computer**와 **printer**사이의 신호 전달 회로는 그림**(b)**와 같이 볼 수 있다.
- 신호는 **RG58** 동축 케이블과 같은 신호선으로 전달되며 이는 RC회로로 볼 수 있다.

- 예를 들면 $R = r \cdot L$, $r = 0.54\ \Omega/\text{m}$

$C = c \cdot L$, $c = 88\ \text{pF/m}$



(b) Two circuits connected by a cable

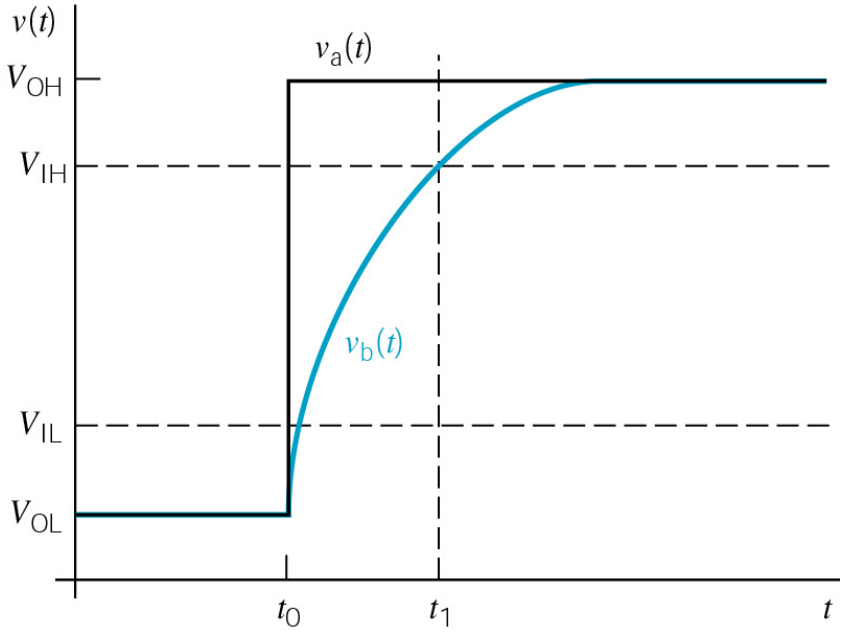


(c) An equivalent circuits

Delay between Computer and Printer (II)

- 이 회로를 디지털 회로라고 하면 v_a는 **TTL (transistor-transistor logic)**회로에서는 **2.4 V(V_{OH}, '1')**와 **0.4 V(V_{OL}, '0')**로 전압이 바뀐다.

- 이에 따라 v_b는 그림과 같이 지수 함수적으로 바뀌는데 v_b 는 **2.0 V(V_{IH})** 이상이면 **'1'**로, **0.8 V(V_{IL})** 이하이면 **'0'**으로 본다. v_b가 **0.8 V**에서 **2.0 V**일 때에는 **'0'**일 수도, **'1'**일 수도 있다.



Voltage that occur during a transition from a logic 0 to a logic 1.

- 그림에서 v_b는 t_1 이후에 **'1'**이 되므로 v_a가 스위칭한 시간 t_0 로부터 t_1 까지는 디지털 회로의 지연시간에 해당한다.

$$\Delta t = t_1 - t_0$$

- 그러면, **RG58** 동축케이블을 사용해서 지연시간을 **2 ns** 이하로 하려면 케이블의 길이를 얼마로 해야 하는가?

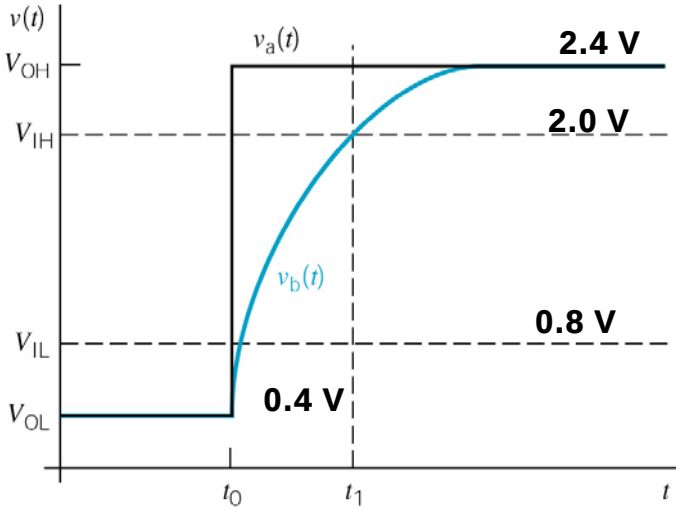
Delay between Computer and Printer (III)

- 시정수 $\tau = RC = 0.54 \cdot \ell \times 88 \times 10^{-12} \cdot \ell = 47.52\ell^2 \times 10^{-12}$

- 전압 $v_b(t) = V_{OH} + (V_{OL} - V_{OH})e^{-(t-t_0)/\tau}$

- Δt 시간 이후의 전압은 V_{IH}

$$V_{IH} = V_{OH} + (V_{OL} - V_{OH})e^{-\Delta t/\tau}$$



Voltage that occur during a transition from a logic 0 to a logic 1.

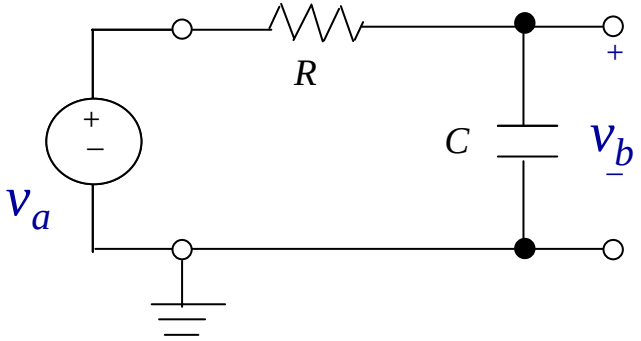
$$(V_{IH} - V_{OH})/(V_{OL} - V_{OH}) = e^{-\Delta t/\tau}$$

$$\ln[(V_{IH} - V_{OH})/(V_{OL} - V_{OH})] = -\Delta t/\tau$$

$$\tau = \frac{-\Delta t}{\ln[(V_{IH} - V_{OH})/(V_{OL} - V_{OH})]}$$

$$47.52\ell^2 \times 10^{-12} = \frac{-2 \times 10^{-9}}{\ln[(2.0-2.4)/(0.4-2.4)]}$$

$$\ell = 5.11\,\text{m}$$



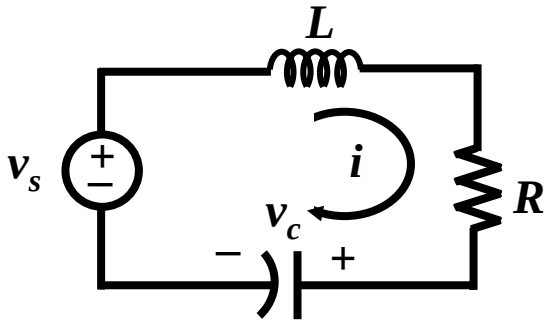
Communications and Power System

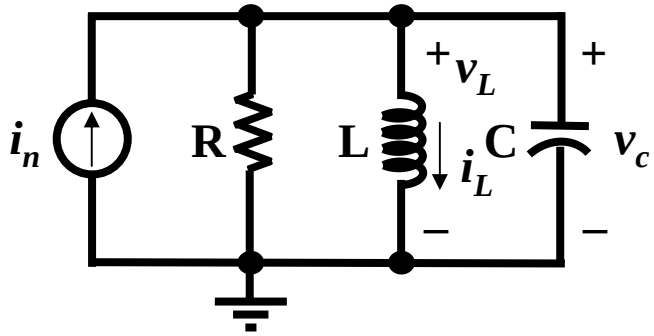
- 전기 회로는 **electrical signal** 또는 **electrical power**를 전송하는 데 사용한다.

Electrical system

- 통신 시스템 **(**예**: Morse code, radio)**에서는 전압 신호 등과 같은 입력 신호가 전원이 된다.
- 변환기는 전파 매체에 적당하도록 신호를 변환한다.
- 변환기의 출력은 수신기에 도착할 때까지 매체를 진행한다.
- 수신기는 사용자가 쓰기에 적절한 형태로 변환시킨다.
- 전력 시스템 에서는 발전기가 **30 - 70 MW**의 전력을 발생시킨다.
- 전선을 통해서 전력을 효율적으로 수용가에 수송한다.
- 통신시스템**: undistorted transmission,** 전력시스템**: efficient power transmission.**

Natural Response of Second-Order Circuits





KVL $L\dfrac{di}{dt} + Ri + v_c - v_s = 0$

$i = C\dfrac{dv_c}{dt}$

$LC\dfrac{d^2v_c}{dt^2} + RC\dfrac{dv_c}{dt} + v_c = v_s$

$\dfrac{d^2v_c}{dt^2} + \dfrac{R}{L}\dfrac{dv_c}{dt} + \dfrac{v_c}{LC} = \dfrac{v_s}{LC}$

$\dfrac{d^2x}{dt^2} + 2\alpha\dfrac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = f(t)$

$\alpha = \dfrac{R}{2L}, \quad \omega_0^2 = \dfrac{1}{LC}, \quad f = \dfrac{v_s}{LC}$

KCL $(-i_n) + \dfrac{v_c}{R} + i_L + C\dfrac{dv_c}{dt} = 0$

$v_c = v_L, \quad v_L = L\dfrac{di_L}{dt}$

$\dfrac{v_L}{R} + i_L + C\dfrac{dv_L}{dt} = i_n$

$\dfrac{d^2i_L}{dt^2} + \dfrac{1}{RC}\dfrac{di_L}{dt} + \dfrac{i_L}{LC} = \dfrac{i_n}{LC}$

$\alpha = \dfrac{1}{2RC}, \quad \omega_0^2 = \dfrac{1}{LC}, \quad f = \dfrac{i_n}{LC}$

Second-Order Differential Equation

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\alpha\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = f, \quad x = x_h + x_p$$

$$\frac{d^2x_h}{dt^2} + 2\alpha\frac{dx_h}{dt} + \omega_0^2 x_h = 0 \quad \Rightarrow \quad x_h = Ke^{st} \text{ 로 가정.}$$

$$Ke^{st}(s^2 + 2\alpha s + \omega_0^2) = 0 \quad \Rightarrow \text{ 특성방정식} \quad s^2 + 2\alpha s + \omega_0^2 = 0$$

$$s_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}, \quad s_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

damping ratio $\zeta = \alpha/\omega_0$

1. Over damped $(\zeta > 1, \alpha > \omega_0)$ — **s_1, s_2 : negative real**

2. Critically damped $(\zeta = 1, \alpha = \omega_0)$ — **s_1 : negative real**

$$x_h = K_1 e^{s_1 t} + K_2 t\, e^{s_1 t}$$

3. Under damped $(\zeta < 1, \alpha < \omega_0)$ — **s_1, s_2 : complex with negative real**

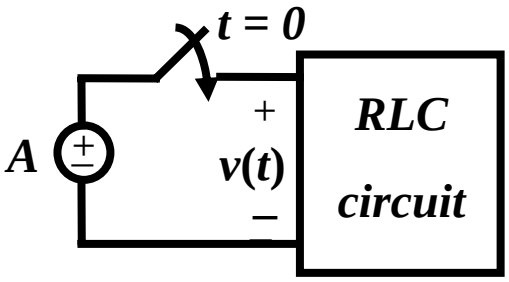
$$x_h = K_1 e^{(-\alpha + j\omega_d)t} + K_2 e^{(-\alpha - j\omega_d)t} \qquad (\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2})$$

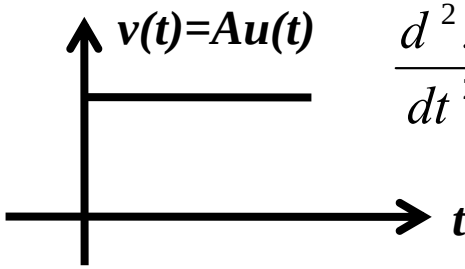
damped resonant frequency

$$= K_3 e^{-\alpha t}\cos\omega_d t + K_4 e^{-\alpha t}\sin\omega_d t$$

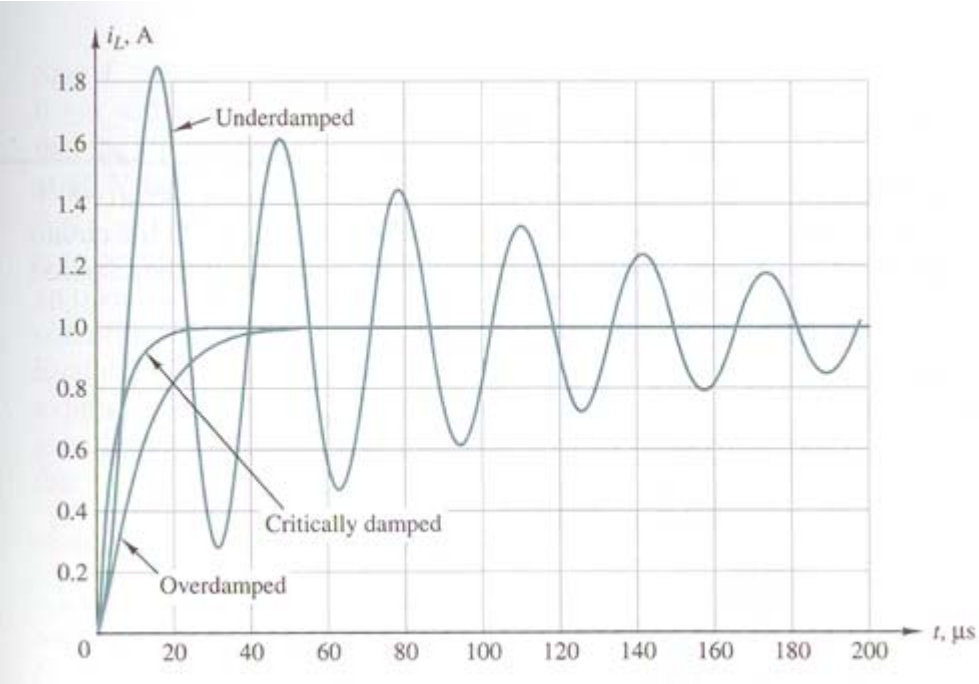
Normalized Step Response of Second-Order Systems

- **RLC** 회로에 **step function**의 전압을 가했다.





$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\alpha\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = Au(t)$$



– $\zeta = \alpha / \omega_0$의 값에 따라 출력 값에 변화가 있음.

- 특히 $\zeta = 1$ 을 경계로 **overshoot** 보인다.

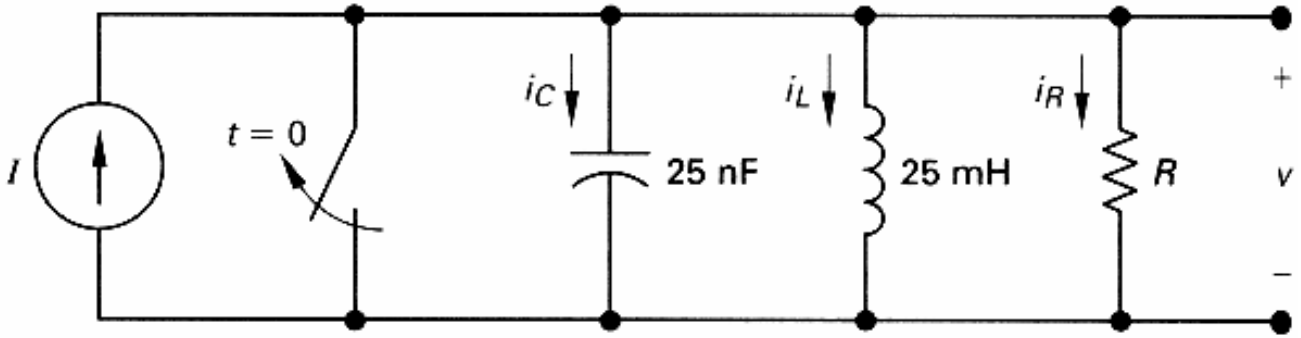
- 응용의 특성에 따라 **damping ratio**을 변화시킨다.

Underdamped, critically damped, and overdamped response curves for parallel RCL circuit of example 9.7.

DeCarlo 책 351쪽 Fig. 9.9

Parallel RLC Circuit (I)

$t = 0$ 인 순간 switch가 열리고 전류 **24** mA가 회로에 가해진다.
저항 값은 **400** Ω 이다.



$$a)\ i_L(0^+) = ? \quad i_L(0^-) = 0 \ \text{이므로} \quad i_L(0^+) = i_L(0^-) = 0.$$

$$b)\ \left.\frac{di_L}{dt}\right|_{t=0^+} = ? \quad v(0^-) = 0 \ \text{이므로} \quad v(0^+) = 0 \therefore \quad \left.\frac{di_L}{dt}\right|_{t=0^+} = 0.$$

$$c)\ C\frac{dv_c}{dt} + i_L + \frac{v_c}{R} = I, \quad L\frac{di_L}{dt} = v_c, \quad LC\frac{d^2 i_L}{dt^2} + i_L + \frac{L}{R}\frac{di_L}{dt} = I.$$

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{1}{RC}\frac{di_L}{dt} + \frac{1}{LC} i_L = \frac{I}{LC}$$

Parallel RLC Circuit (II)

특성방정식

$$s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC} = 0, \quad s^2 + 100000s + 16\times10^8 = 0$$

$$\alpha = \frac{1}{2RC} = 5\times10^4, \ \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 4\times10^4$$

$$s = -5\times10^4 \pm 3\times10^4, \ s_1 = -20000, \ s_2 = -80000$$

$$i_L = 24\times10^{-3} + A_1 e^{-20000t} + A_2 e^{-80000t}$$

$$i_L(0^+) = 0, \quad \frac{di_L}{dt}(0^+) = 0$$

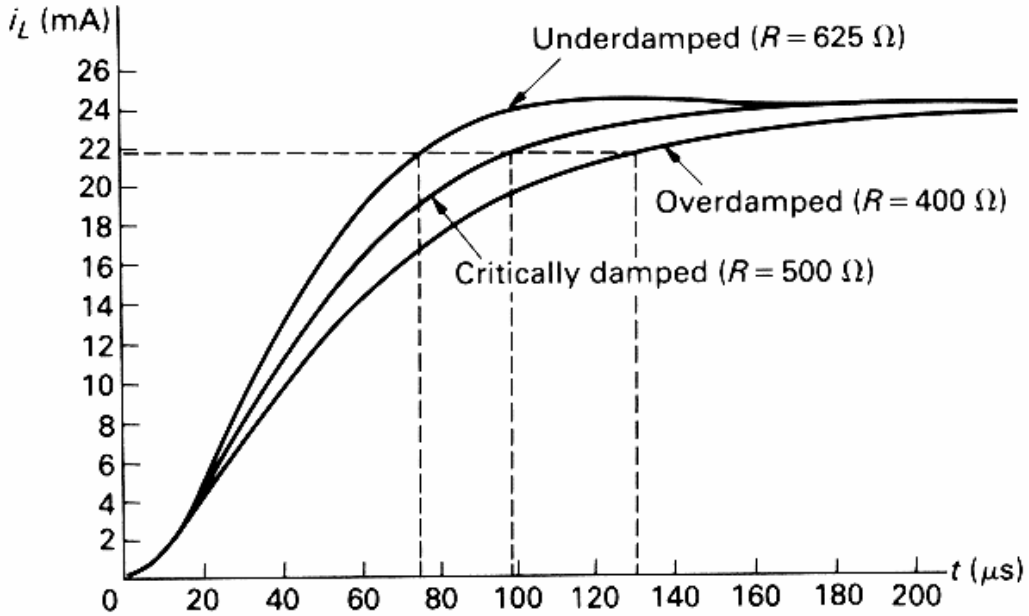
$$\Rightarrow A_1 = 8\times10^{-3}, \ A_2 = -32\times10^{-3}$$

$If \ R = 625\,\Omega,$

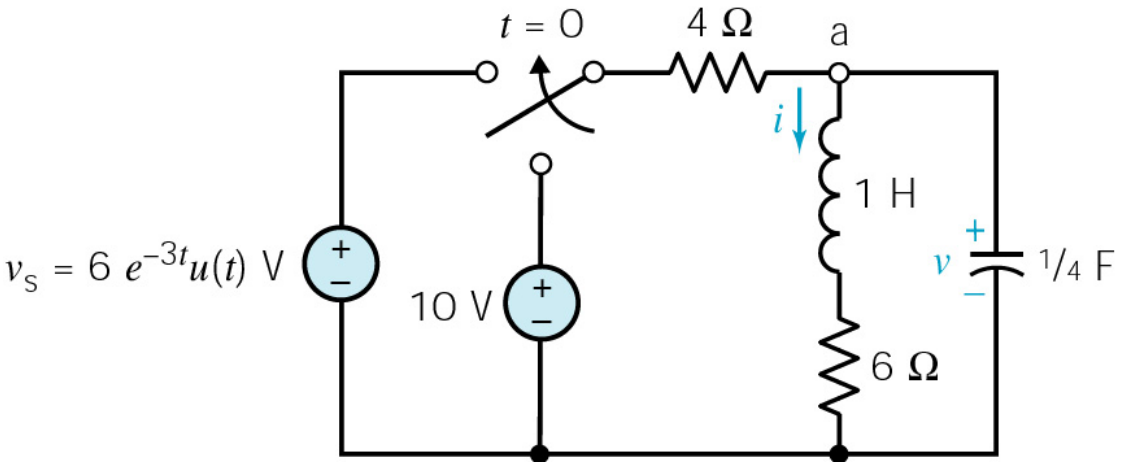
$$\alpha = 3.2\times10^4 < \omega_0$$

$If \ R = 500\,\Omega,$

$$\alpha = 4\times10^4 = \omega_0$$



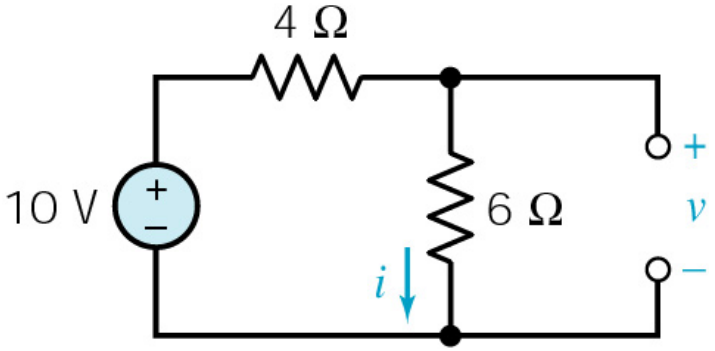
Complete Response of RLC Circuits (I)



전압 ***v***를 구하라.

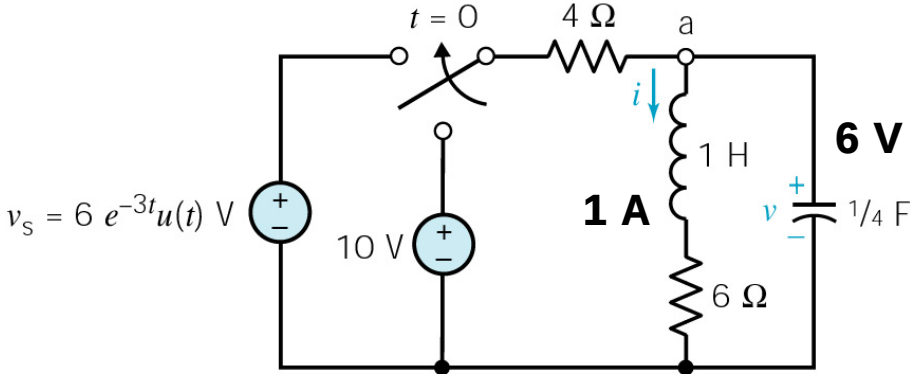
(a) 초기조건을 구하라.

- $t = 0^-$ 의 회로



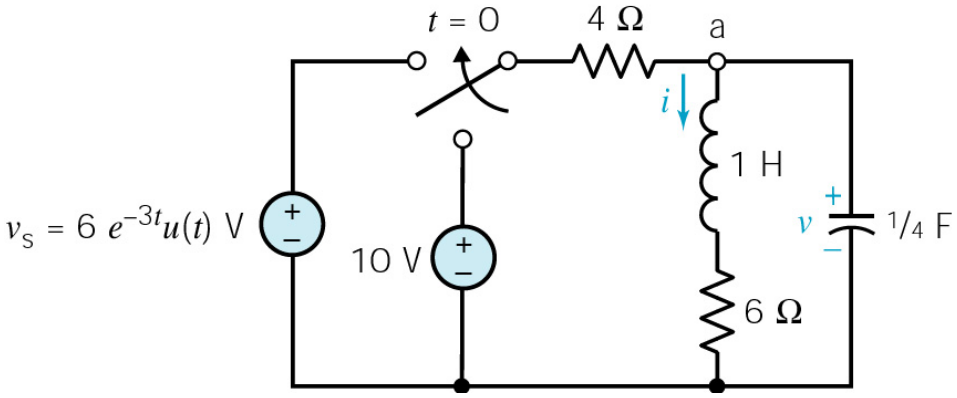
$$v_C(0^-) = 6\,\text{V},\quad i_L(0^-) = 1\,\text{A}$$

- $t = 0^+$ 의 회로



$$v_L(0^+) = L\left.\frac{di_L}{dt}\right|_{0^+} = 0 \quad \therefore \left.\frac{di_L}{dt}\right|_{0^+} = 0$$

Complete Response of RLC Circuits (II)



(b) KCL 로 식을 세워라.

$$\frac{v_C - v_s}{4} + i_L + 0.25\frac{dv_C}{dt} = 0$$

$$v_C = 1\frac{di_L}{dt} + 6i_L$$

$$(\frac{di_L}{dt} + 6i_L) - v_s + 4i_L + \frac{d}{dt}(\frac{di_L}{dt} + 6i_L) = 0$$

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + 7\frac{di_L}{dt} + 10i_L = v_s = 6e^{-3t}u(t)$$

$$i_L = i_{Lh} + i_{Lp}$$

set $i_{Lp} = Ae^{-3t}$

$$9A + (-21A) + 10A = 6$$

$$A = -3$$

set $i_{Lh} = Ke^{st}$

$$s^2 + 7s + 10 = 0$$

$$s = -2, -5$$

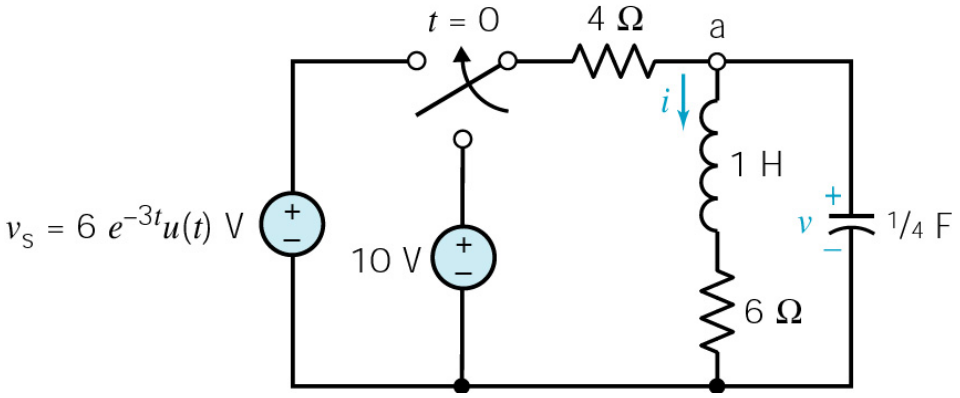
$$i_{Lh} = K_1 e^{-2t} + K_2 e^{-5t}$$

$$i_L = K_1 e^{-2t} + K_2 e^{-5t} - 3e^{-3t}$$

$$i_L(0^+) = 1 = K_1 + K_2 - 3$$

$$i_L'(0^+) = 0 = -2K_1 - 5K_2 + 9$$

Complete Response of RLC Circuits (III)



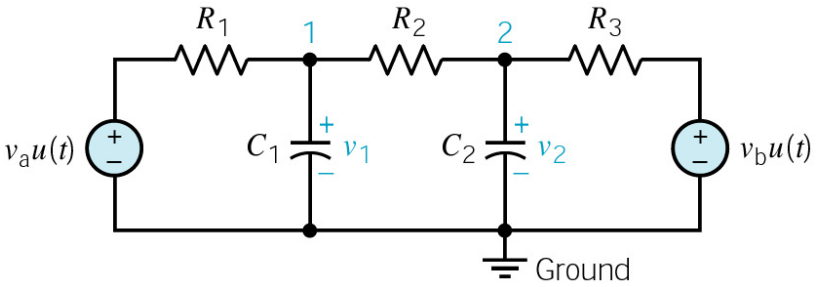
$$K_1 + K_2 = 4$$
$$2K_1 + 5K_2 = 9$$
$$K_1 = 11/3, \quad K_2 = 1/3$$
$$i_L = \frac{11}{3}e^{-2t} + \frac{1}{3}e^{-5t} - 3e^{-3t}$$

$$v_C = 1\frac{di_L}{dt} + 6i_L \quad \text{이므로}$$

$$v_C = \frac{d}{dt}\left(\frac{11}{3}e^{-2t} + \frac{1}{3}e^{-5t} - 3e^{-3t}\right) + 6\left(\frac{11}{3}e^{-2t} + \frac{1}{3}e^{-5t} - 3e^{-3t}\right)$$
$$= -\frac{22}{3}e^{-2t} - \frac{5}{3}e^{-5t} + 9e^{-3t} + \frac{66}{3}e^{-2t} + \frac{6}{3}e^{-5t} - 18e^{-3t}$$
$$= \frac{44}{3}e^{-2t} + \frac{1}{3}e^{-5t} - 9e^{-3t}$$

State Variable Approach to Circuit Analysis

- **State variable method :** 회로의 전체 응답을 구하기 위해서 **state variable**의 **1**계 미분방정식을 이용한다.
- **Inductor**의 전류나 **capacitor**의 전압을 **state variable**로 이용한다.



KCL

$$node\,1: \quad C_1\frac{dv_1}{dt}+\frac{v_1-v_a}{R_1}+\frac{v_1-v_2}{R_2}=0$$

$$node\,2: \quad C_2\frac{dv_2}{dt}+\frac{v_2-v_1}{R_2}+\frac{v_2-v_b}{R_3}=0$$

$\frac{d}{dt}$ 를 **operator s**로 써서 정리하면,

$$\begin{bmatrix} C_1 s+1/R_1+1/R_2, & -1/R_2 \\ -1/R_2, & C_2 s+1/R_2+1/R_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1/R_1, & 0 \\ 0, & 1/R_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix}$$

v_1과 v_2는 아래의 꼴로 쓰여진다.

$$v_1,\, v_2=\frac{(Cs+D)v_a+(Es+F)v_b}{s^2+As+B}$$

이것의 해를 구하는 방법은 **14**장 **Laplace transform**에서 다루겠다.

Roots in the Complex Plane (I)

- **2**계 미분 방정식 시스템

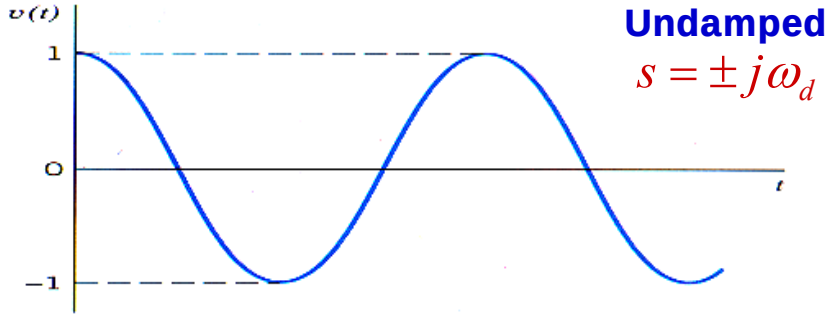
(parallel RLC 회로)

$$s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC} = 0$$

$$s = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

$$if \quad \omega_0 \rangle \alpha, \quad s = -\alpha \pm j\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = -\alpha \pm j\omega_d$$

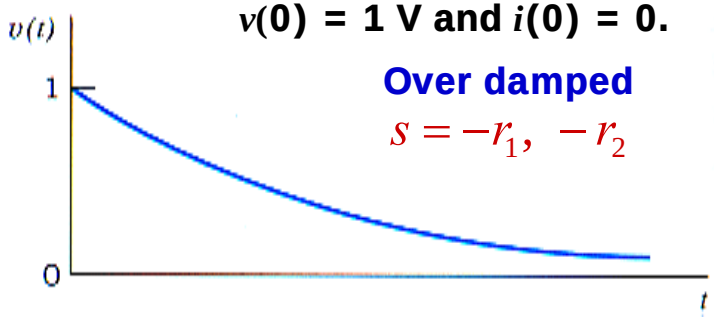
- 해를 복소 평면에 그릴 수 있다.
- 실수 축과 허수 축, σ **and** $j\omega$



Undamped

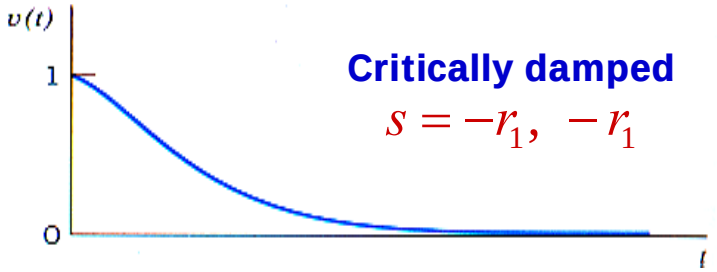
$s = \pm j\omega_d$

Form of response for $v(0) = 1$ V and $i(0) = 0$.



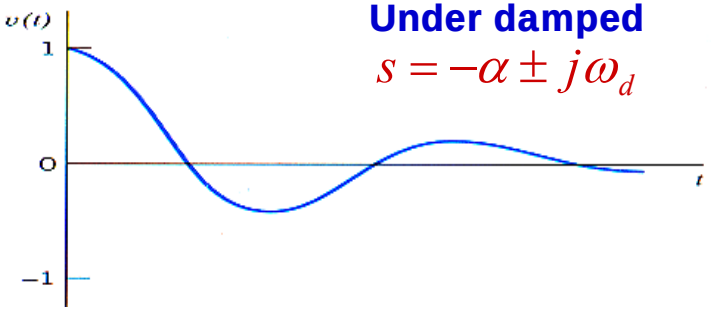
Over damped

$s = -r_1, \ -r_2$



Critically damped

$s = -r_1, \ -r_1$

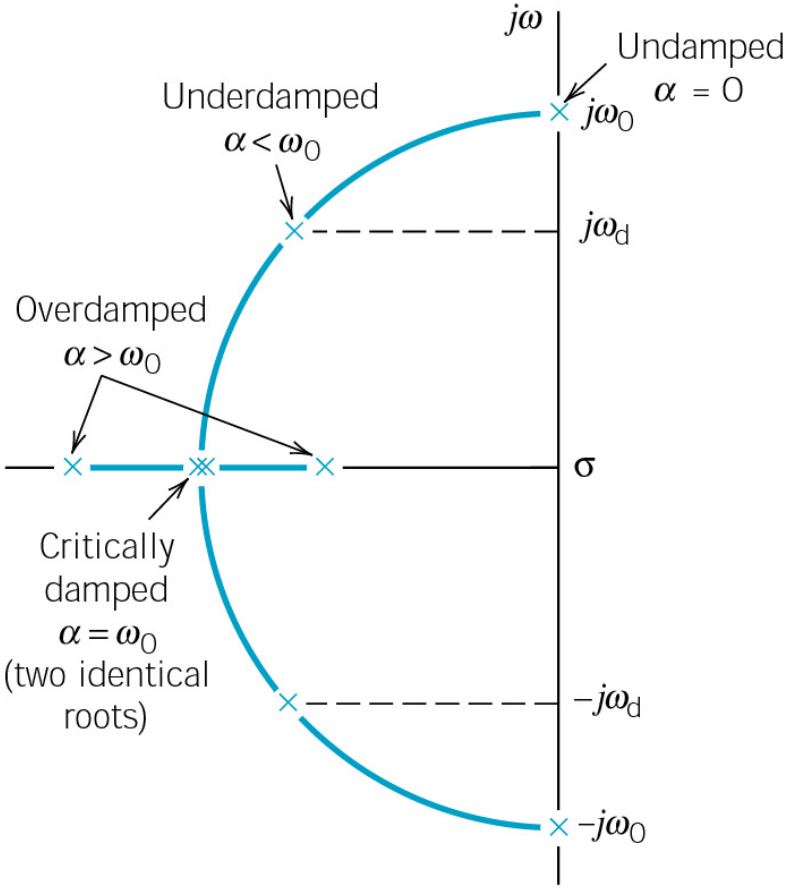


Under damped

$s = -\alpha \pm j\omega_d$

Natural response of a parallel RLC circuit

Roots in the Complex Plane (II)



해의 각 경우를 복소 평면에 그려 보면

i) Over damped

$s = -r_1 , -r_2$ **(음의 실수 축 위의 두 점)**

ii) Critically damped

$s = -r_1 , -r_1$ **(음의 실수 축 위의 한 점)**

iii) Under damped

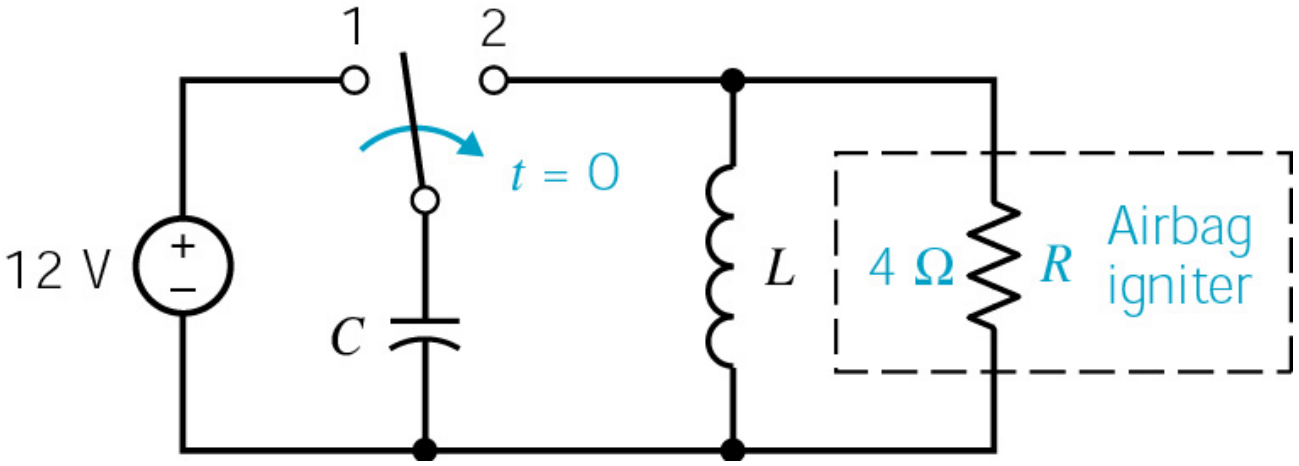
$s = -\alpha \pm j\,\omega_d$ **(음의 실수 평면 위의 두 점)**

iv) Undamped

$s = \pm j\,\omega_d$ **(허수 축 위의 두 점)**

The complete s-plate showing the location of the two roots, s_1 and s_2, of the characteristic equation in the left-hand portion of the s-plane. The roots are designated by the × symbol.

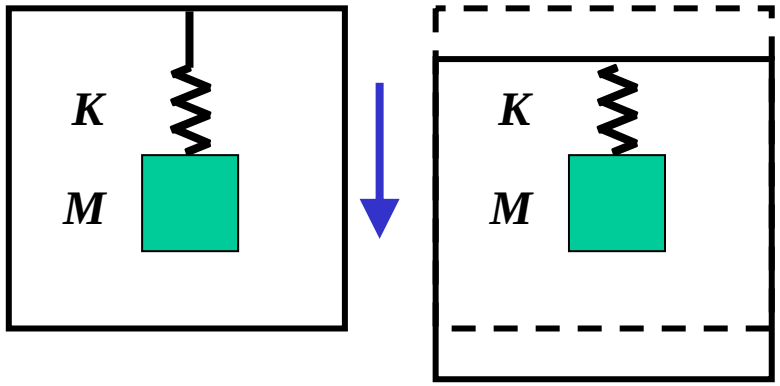
Auto Airbag Igniter (I)



An automobile airbag ignition device

- **Airbag**은 운전자의 안전을 위해서 이용된다**.**
- **Pendulum**이 **capacitor energy**를 **igniter**로 보내도록 스위치한다**.**
- 저항 ***R***에서 받은 에너지로 화약 등을 폭발시켜 **airbag**을 팽창시킨다**.**
- 저항 ***R***에서 **1 J**의 에너지를 소모해야 하고**, 0.1** 초 이내에 트리거해야 한다**.**
- ***L***, ***C***의 값을 정하라**.**

Auto Airbag Igniter (II)



- **Box** 안에 **pendulum** 이 매달려 있다.
- 가속도가 가해지면 관성력에 의하여 **pendulum** 과 **box**벽의 거리가 변화한다.

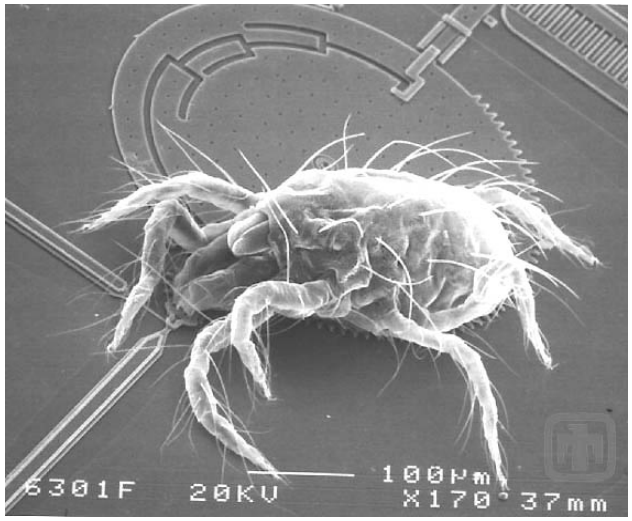
$$ma = k\Delta x \Rightarrow a = \frac{k}{m}\Delta x$$

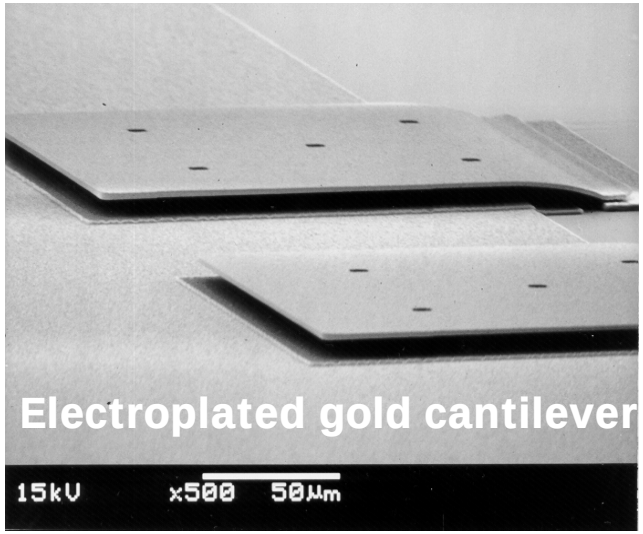
- **Box**의 위, 아래 벽에 전극을 설치하고, **pendulum**을 전극으로 이용한다.
- **Box**의 위, 아래 벽 전극과 **pendulum** 전극에 전압을 인가한다.
- **pendulum**의 위치 변화에 따라 위 아래 전극과의 정전용량이 변화한다.
- 이들 값의 차분을 구하면 위치변화분을 알 수 있다.

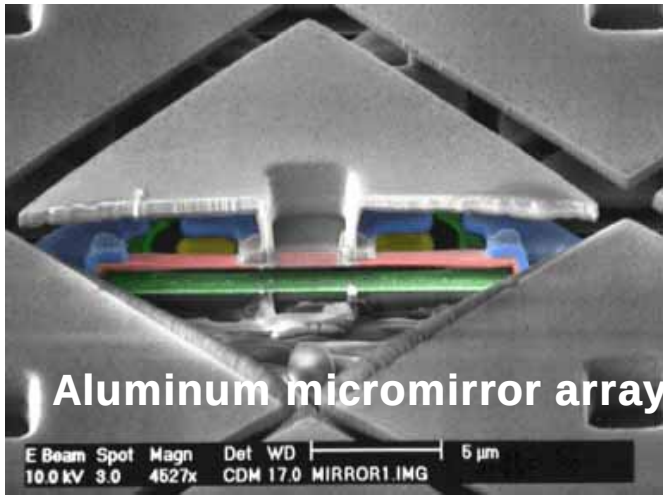
$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 A}{d-\Delta x},\ C_2 = \frac{\varepsilon_0 A}{d+\Delta x}$$

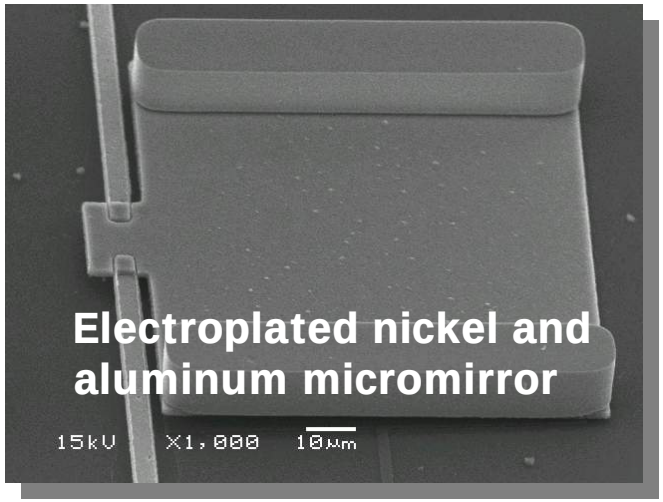
$$\begin{aligned}
\Delta C &= C_1 - C_2 \\
&= \frac{\varepsilon_0 A}{d-\Delta x} - \frac{\varepsilon_0 A}{d+\Delta x} \\
&= \frac{\varepsilon_0 A}{d}\left(\frac{1}{1-\Delta x/d} - \frac{1}{1+\Delta x/d}\right) \\
&\approx \frac{\varepsilon_0 A}{d}\left[(1+\Delta x/d) - (1-\Delta x/d)\right] \\
&= \frac{\varepsilon_0 A}{d}\frac{2}{d}\Delta x
\end{aligned}$$

Auto Airbag Igniter (III)

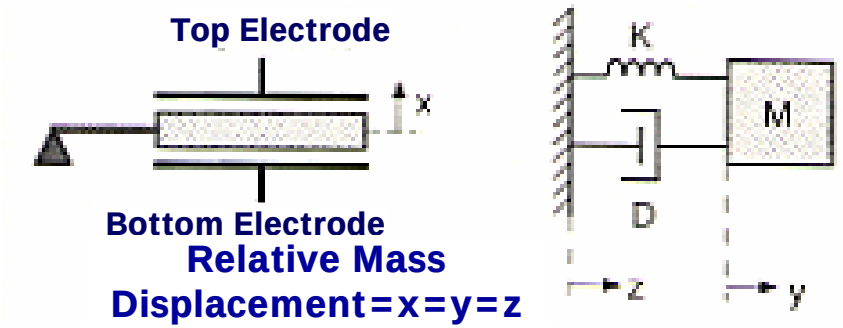




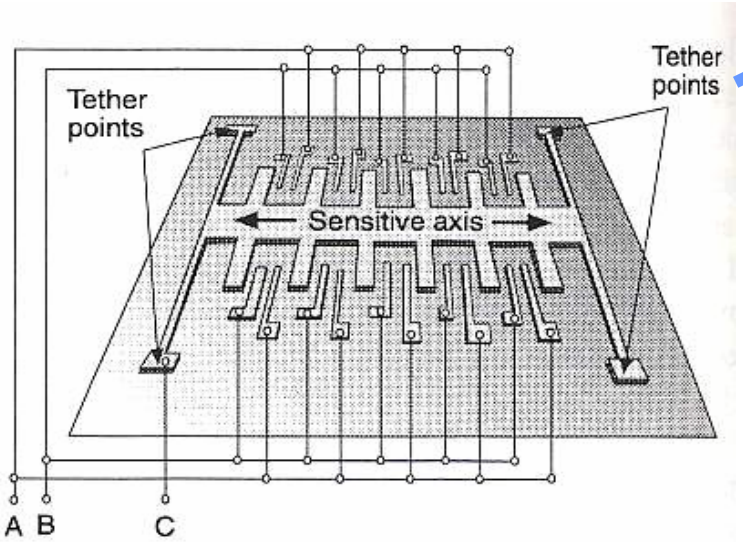




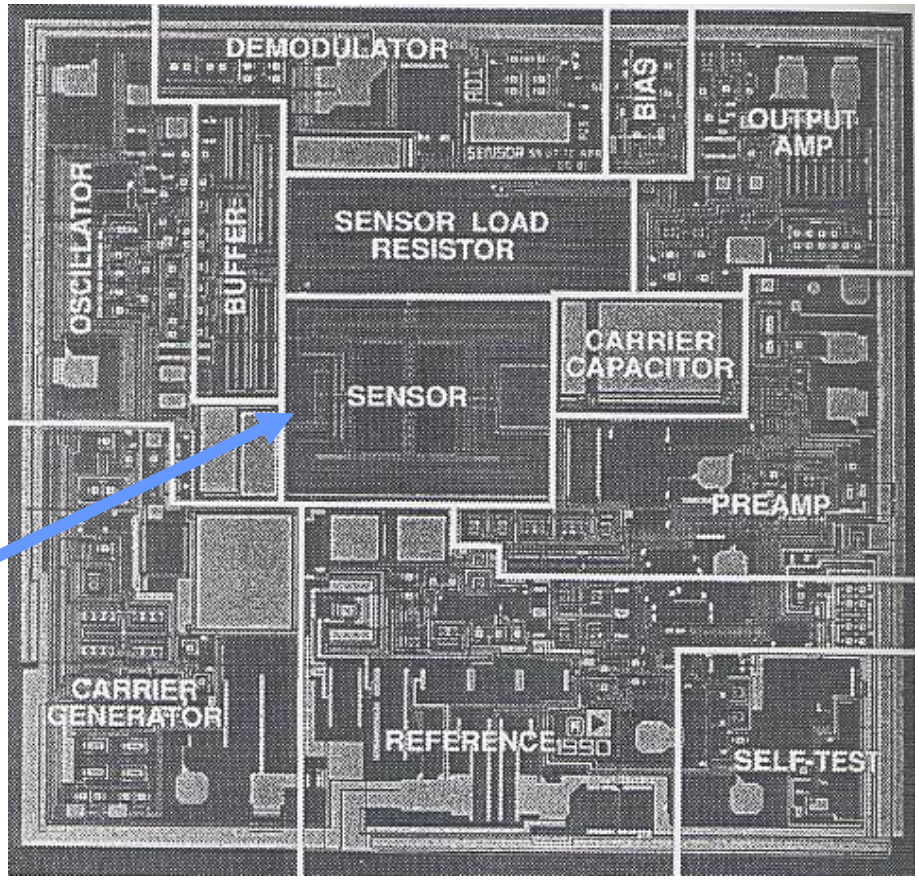
MEMS Accelerometer



General accelerometer structure and is mechanical lumped model.



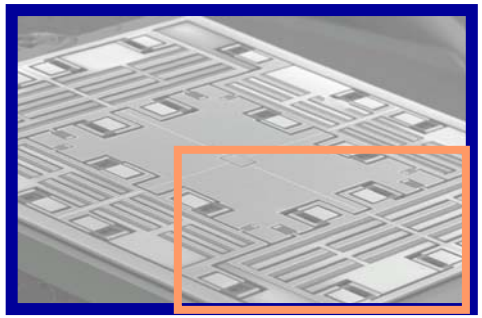
ADXL 50 accelerometer

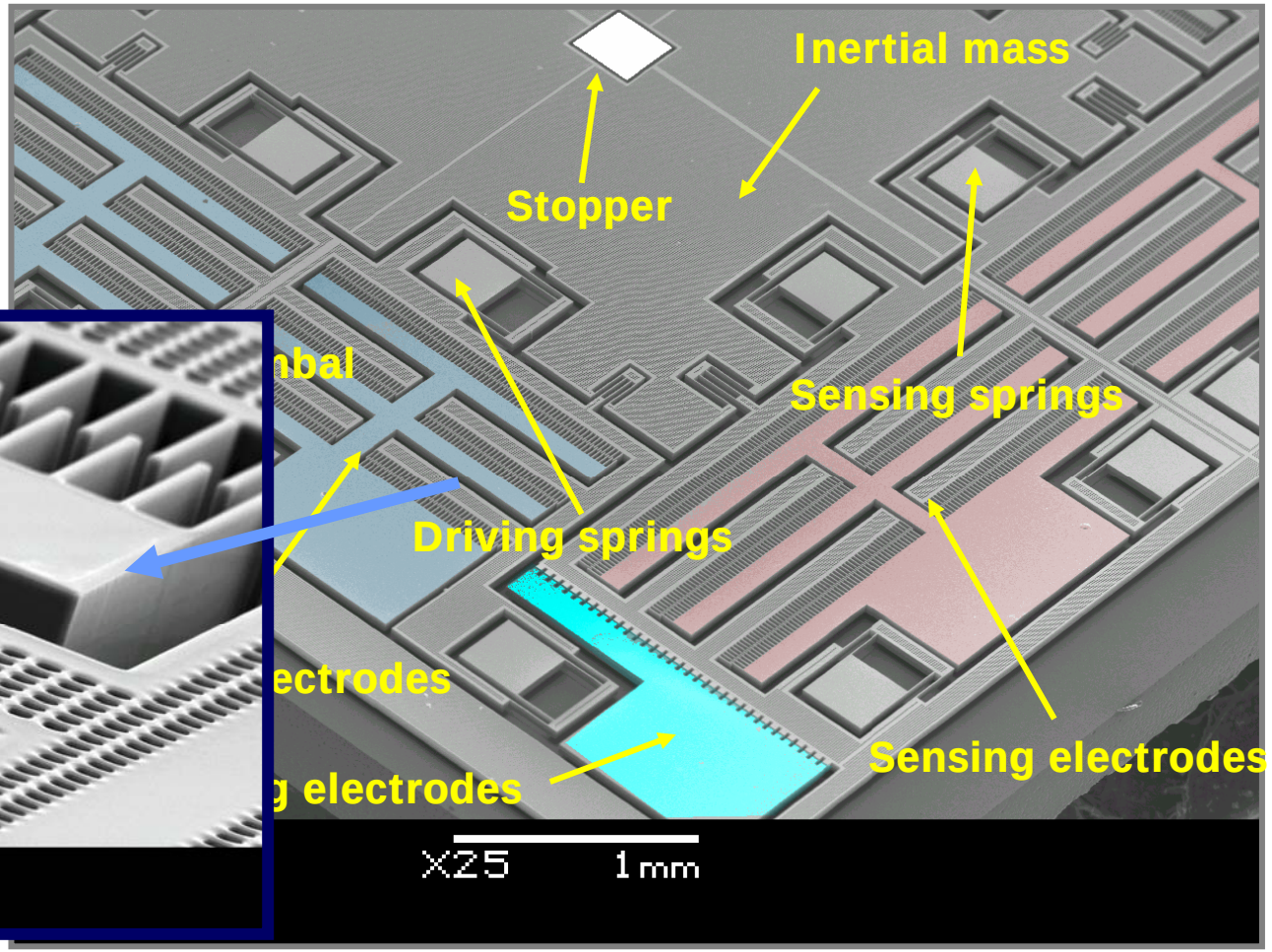


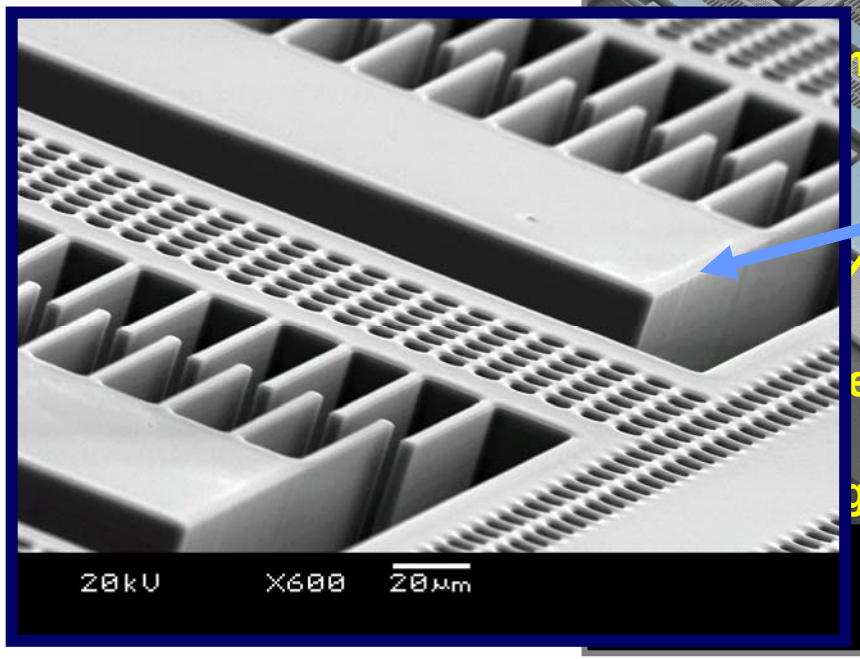
ADXL 50 accelerometer. The sensing element in the center is surrounded by active electronics. Chip size is 3 mm x 3 mm.

From Analog Devices, Inc.

Non-Vacuum Sealed MEMS Gyroscope



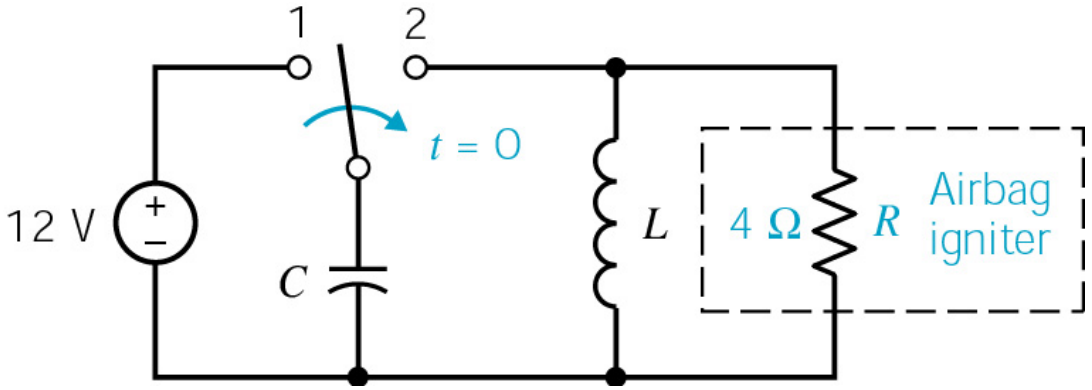




Comb electrodes after deep RIE(DRIE)

From Lab. for MiSA, SNU

Auto Airbag Igniter (IV)



$$v_C(0^-) = 12\ \text{V} = v_C(0^+)$$

$$i_L(0^-) = 0\ \text{A} = i_L(0^+)$$

- **0.1** 초 이내에서 트리거되려면 **under damped response**를 보여야 한다.
- **0.1** 초가 주기의 **¼** 정도가 되어야 한다.

$$C\frac{dv}{dt} + i_L + \frac{v}{R} = 0, v = L\frac{di_L}{dt}$$

$$\therefore LC\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{L}{R}\frac{di_L}{dt} + i_L = 0$$

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{1}{RC}\frac{di_L}{dt} + \frac{i_L}{LC} = 0$$

$$\alpha = 1/2RC, \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$$

underdapmed condition : $\alpha < \omega_0$

$$i_L = K_1 e^{-\alpha t}\cos\omega_d t + K_2 e^{-\alpha t}\sin\omega_d t$$

$$(\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2})$$

Auto Airbag Igniter (V)

$$i_L = K_1 e^{-\alpha t}\cos\omega_d t + K_2 e^{-\alpha t}\sin\omega_d t$$

- 빠른 응답을 위하여 α = 2 로 선택한다.

$\alpha = 1/2RC, \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ 이므로

$C = 1/2R\alpha = 1/16$ F 이고

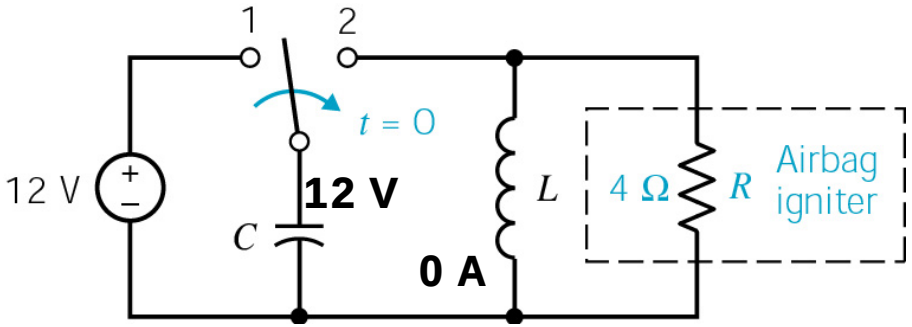
$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega_d} \approx \frac{2\pi}{\omega_0} = 0.4 \text{ 이므로}$$

$$L = (0.4/2\pi)^2 / C = 16(0.4/2\pi)^2 = 65 \text{ mH}$$

$$i_L = K_1 e^{-2t}\cos 15.57t + K_2 e^{-2t}\sin 15.57t$$

$$(\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = 15.57)$$

$t = 0^+$



$$i_L(0^-) = 0 \text{ A} = i_L(0^+)$$

$$v_L(0^+) = 12 \text{ V} = L\left.\frac{di_L}{dt}\right|_{0^+}$$

$$K_1 = 0$$

$$\left.\frac{di_L}{dt}\right|_{0^+} = \frac{12}{L} = K_2 15.57$$

$$K_2 = \frac{12}{15.57L} = 11.86$$

Auto Airbag Igniter (VI)

$$i_L = 11.86e^{-2t}\sin 15.57t$$

$$v = L\frac{di_L}{dt}$$

$$= 0.065 \times 11.86(-2e^{-2t}\sin 15.57t + 15.57e^{-2t}\cos 15.57t)$$

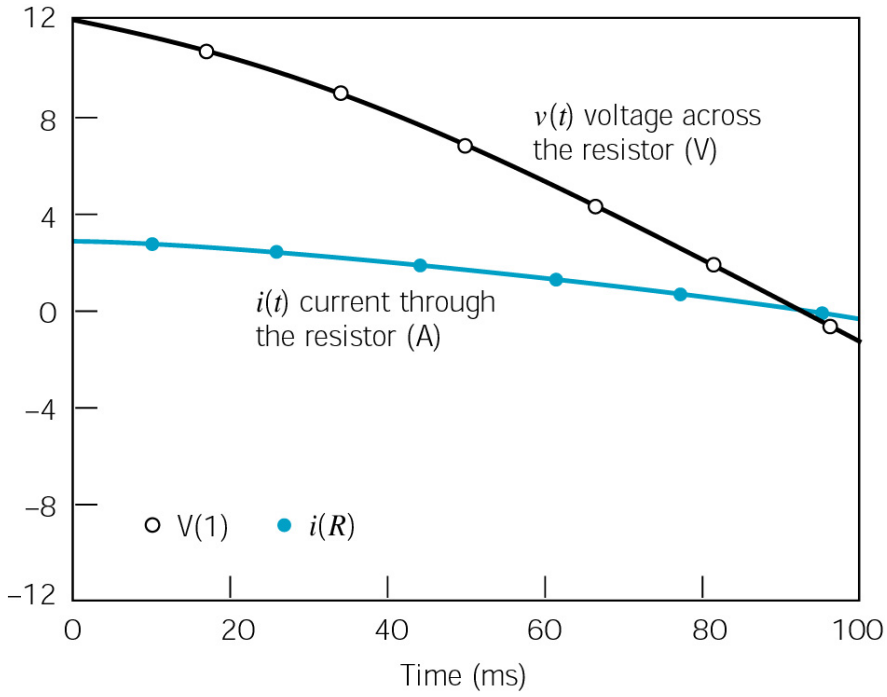
$$\approx 12e^{-2t}\cos 15.57t$$

$$p = v^2/R = 36e^{-4t}\cos^2 15.57t$$

- 저항의 전압과 전류를 보여준다.
- **0** 초에서 **0.1** 초 까지 거의 직선적으로 변하기 때문에 전력을 삼각형으로 여기고 에너지를 구한다.

$$W = \int_0^{0.1} p\,dt = \int_0^{0.1} vi\,dt$$

$$= \frac{1}{2}36 \times 0.095 = 1.71\ \text{J} > 1\ \text{J}$$



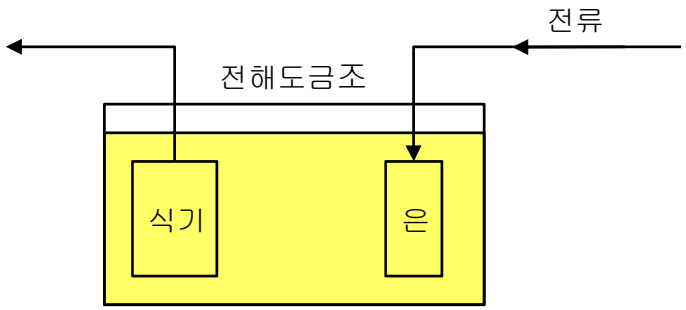
연습문제 목록 (6판)

교과서	예제	장 말 문제													설계 문제				문제수
Ch.1	모두	1.3-1	1.3-2	1.3-4	1.6-1	1.6-2	1.6-4	1.6-8							DP 1-1	DP1-2			9
Ch.2	모두	2.3-1	2.3-3	2.5-1	2.5-5	2.5-7	2.5-8	2.6-1	2.6-4	2.7-2	2.8-1	2.8-3	2.9-2	2.10-2	DP 2-1	DP 2-3			15
Ch.3	모두	3.3-2	3.3-5	3.3-10	3.4-3	3.4-6	3.5-3	3.5-5	3.7-6	3.7-9	3.7-12	3.7-14			DP 3-1	DP 3-2	DP 3-3	DP 3-4	15
Ch.4	모두	4.3-2	4.3-4	4.4-4	4.4-6	4.5-1	4.5-5	4.6-1	4.6-4	4.7-4	4.7-9	4.7-12	4.7-13		DP 4-2	DP 4-4			14
Ch.5	모두	5.3-3	5.3-6	5.4-5	5.5-3	5.5-7	5.5-10	5.6-2	5.6-5	5.7-2	5.7-5				DP 5-1	DP 5-3			12
Ch.6	모두	6.4-5	6.4-8	6.5-4	6.5-7	6.5-10	6.6-3	6.6-9	6.8-4	6.8-5					DP 6-2	DP 6-4	DP6-5		12
Ch.7	모두	7.3-4	7.3-7	7.4-3	7.4-5	7.5-3	7.6-3	7.6-7	7.7-2	7.8-2	7.9-2	7.9-6	7.10-3		DP 7-4	DP 7-5			14
Ch.8	모두	8.3-4	8.3-7	8.3-9	8.4-1	8.4-4	8.5-3	8.6-3	8.6-8	8.7-5	8.7-6	8.7-10			DP 8-1	DP 8-5	DP 8-6		14
Ch.9	모두	9.-3-3	9.4-3	9.5-3	9.6-3	9.6-5	9.7-3	9.7-5	9.8-2	9.9-3	9.9-7	9.9-10	9.10-4	9.11-4	DP 9-1	DP 9-5	DP 9-9		16

연습문제 목록 (7판)

교과서	예제	장 말 문제													설계 문제				문제수
Ch.1	모두	1.2-1	1.2-2	1.2-6	1.5-1	1.5-2	1.5-4	1.5-8							DP 1-1	DP1-2			9
Ch.2	모두	2.2-1	2.2-3	2.4-1	2.4-5	2.4-7	2.4-8	2.5-1	2.5-4	2.6-2	2.7-1	2.7-3	2.8-2	2.9-2	DP 2-1	DP 2-3			15
Ch.3	모두	3.2-2	3.2-5	3.2-10	3.3-3	3.3-6	3.4-3	3.4-5	3.6-6	3.6-9	3.6-12	3.6-14			DP 3-1	DP 3-2	DP 3-3	DP 3-4	15
Ch.4	모두	4.2-2	4.2-4	4.3-4	4.3-6	4.4-1	4.4-5	4.5-1	4.5-4	4.6-4	4.7-2	4.7-5	4.7-6		DP 4-2	DP 4-4			14
Ch.5	모두	5.2-3	5.2-6	5.3-5	5.4-3	5.4-7	5.4-10	5.5-2	5.5-5	5.6-2	5.6-5				DP 5-1	DP 5-3			12
Ch.6	모두	6.3-5	6.3-8	6.4-4	6.4-7	6.4-10	6.5-3	6.5-9	6.7-4	6.7-5					DP 6-2	DP 6-4	DP6-5		12
Ch.7	모두	7.2-4	7.2-7	7.3-3	7.3-5	7.4-3	7.5-3	7.5-7	7.6-2	7.7-2	7.8-2	7.8-6	7.9-3		DP 7-4	DP 7-5			14
Ch.8	모두	8.3-4	8.3-7	8.3-9	8.4-1	8.4-4	8.5-3	8.6-3	8.6-8	8.7-5	8.7-6	8.7-10			DP 8-1	DP 8-5	DP 8-6		14
Ch.9	모두	9.2-3	9.3-3	9.4-3	9.5-3	9.5-5	9.6-3	9.6-5	9.7-2	9.8-3	9.8-7	9.8-10	9.9-4	9.10-4	DP 9-1	DP 9-5	DP 9-9		16

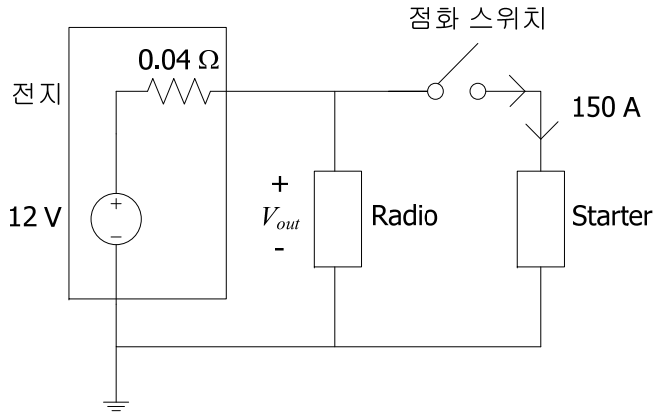
[1] 그림과 같은 전해도금조를 만들고 식기에 은도금을 하려 한다. 1 C은 1.118 mg의 은을 수송한다고 한다. 600 A의 전류가 20 분간 흘렀다면 식기에 도금된 은은 몇 g인가? (10점)



[2] 자동차의 라디오는 시동이 꺼져 있을 때에도 전지에 의해 켤 수 있다. 이런 상태에서 시동을 걸면 라디오는 잠시 꺼진다. 다음 등가 회로로 이 현상을 설명하라. 자동차 전지는 12 V이고, 내부 저항은 0.04 Ω 이다. 라디오의 저항은 200 Ω이고, 시동이 걸릴 때 스타터에는 150 A의 전류가 흘러야 한다 (10점).

(a) 점화 스위치가 열려 있을 때 V_{out} 은 12 V 에서 몇 % 작아졌는가? (5점)

(b) 점화 스위치가 닫히면 V_{out}은 몇 V 인가? (5점)



[3] 12 V 전원으로 8 V 전원을 만들어서 부하저항 68 kΩ (1/4 W)을 연결하여 사용하려 한다. 표준저항(10 % 오차, 1/8 W)를 이용하여 회로를 설계하라 (20점). 표준저항 : 10,12,15,18,22,27,33,39,47,56,68,82 x 10″

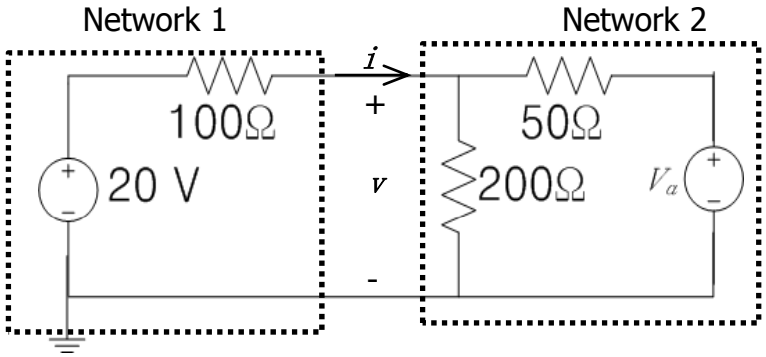
Hint: X<<1 일때 $\frac{1}{1+X} = 1 - X$

(a) 표준저항 두 개만을 이용하여 8 V 전원을 설계하며 8 V에 가장 가까워야 하고 부하를 연결했을 때 부하효과가 가장 적게 설계하라 (10점). 회로를 그리고 각각의 저항 값을 써라.

(b) 내부저항이 11 MΩ인 전압계로 8 V 전원 양단을 측정하면 설계 전압((a)의 결과로 설계된 전압)으로부터 몇 % 달라지는가? (5점). 부하 저항은 연결하지 않은 상태임.

(c) 8 V 전원 양단에 부하저항을 연결하면 전압은 설계전압으로부터 몇 % 달라지는가? (5점).

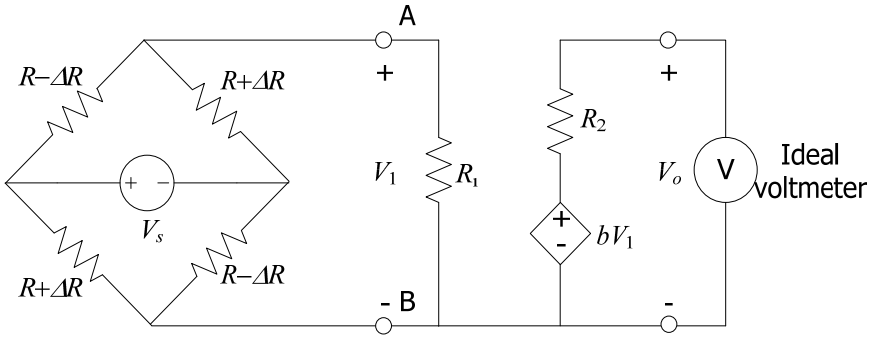
[4] 네트워크1 에서 네트워크2 로 최대 전력을 전달하려 한다. 이 때, 다음을 구하라.(15점)



(a) V_a 는 몇 V 인가? (10 점)

(b) 네트워크2 에 전달되는 전력은 몇 W 인가? (5점)

[5] Strain guage 회로에 대해서 답하라. Strain이 생기면 저항이 변화하고 이를 전압으로 읽는다. 그 회로는 다음과 같다. $-2 \le \Delta R \le 2$ 로 변하고, $V_o = K\Delta R$ 을 얻으려하고 K의 단위는 V/ohm 이다 (25점).

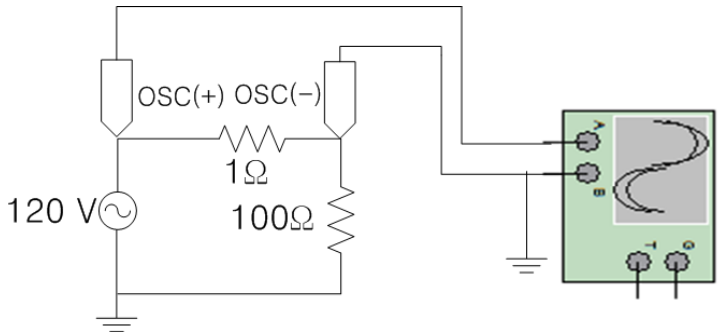


(a) AB 단자에서 bridge를 바라본 등가 회로를 구하라. (10점)

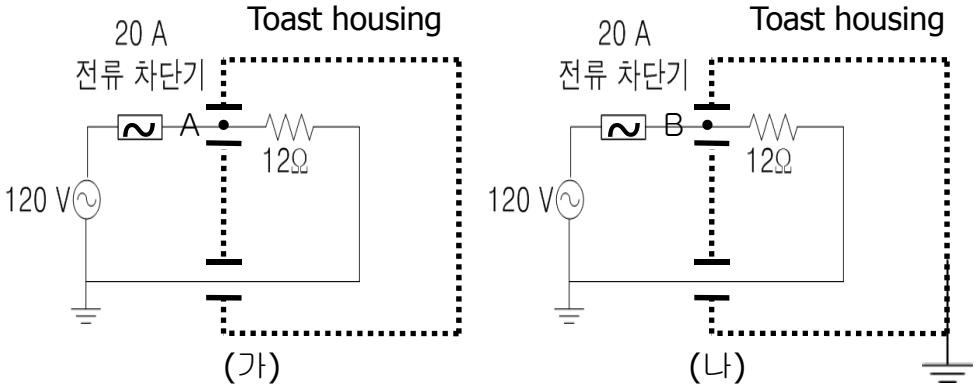
(b) 출력 전압 V_o 를 구하라. (15점)

(c) R = 200 Ω, R_1 = 10 kΩ, R_2 = 50 Ω, V_s = 50 mV 일 때 K = 5가 되도록 b를 정하라. (계산 시 $\Delta R^2 / R = 0$ 으로 계산할 것) (5점)

[6]



(a) 위 회로에서 저항 1 Ω 사이의 전압 파형을 측정하고자 한다. OSC(+) 와 OSC(-)는 오실로스코프의 단자이다.
이 회로가 전압 파형을 측정하기에 올바른 회로인지 논하라. 올바르지 않다면, 그 이유는 무엇인지 논하고, 올바른 전압 파형이 나올 수 있는 회로를 그리고 설명하라.(10점)



(b) 토스터의 껍데기가 접지되어 있지 않은 경우와 접지된 경우에 대해서 다음을 논하라. (10점)
- (가)와 (나)의 경우에 대해 회로를 그려라.
- (가)의 A점과 토스터의 껍데기가 접촉한 경우와 (나)의 B점과 토스터의 껍데기가 접촉한 경우에 대해서 논하고 안전에 대해서 설명하라.

[1]

식기에 도금된 은을 구하기 위해서는 먼저 20분 동안의 전하량을 구해야 한다.

$Q = i \times t = 600 \times 20 \times 60 = 720000 \ \ C$ (➔5점)

식기에 도금된 은의 양은 전하량에 비례하므로,

$720000 \ \ C \times 1.118 \ mg = 804960 \ mg = 804.96 \ g$ 의 은이 식기에 석출된다. (➔5점)

1% 오차까지는 정답으로 허용. 정답이 틀릴 경우 부분적으로 추가점수 인정

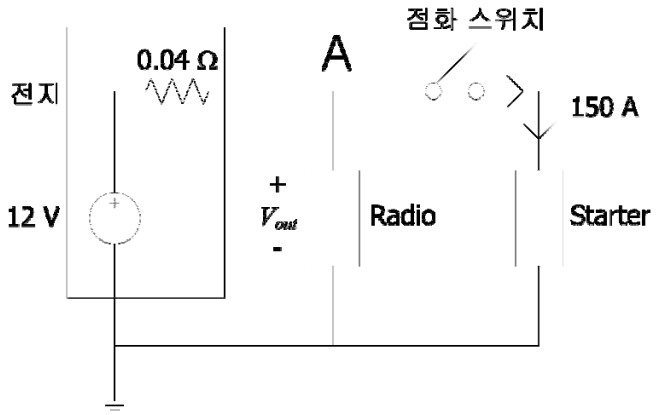
[2]

(a)

$$V_{out} = \frac{200}{200 + 0.04} \times 12 \text{ V}$$
$$= \frac{1}{1 + \frac{0.04}{200}} \times 12 \text{ V}$$
$$\cong \left(1 - \frac{0.04}{200}\right) \times 12\text{V}$$
$$\therefore \frac{12 - V_{out}}{12} \times 100 = 0.02\ \%$$

➔ 5점

(b)



점화 스위치가 닫힐 경우 node A에서 방정식은 아래와 같이 나온다.

$$\frac{V_{out} - 12}{0.04} + \frac{V_{out}}{200} + 150 = 0$$
$$\left(\frac{1}{0.04} + \frac{1}{200}\right) V_{out} = 12 \times 25 - 150$$
$$V_{out} = \frac{150}{\frac{1}{0.04} + \frac{1}{200}}$$
$$= 6 \frac{1}{1 + (\frac{0.002}{25})}$$
$$= 6(1 - \frac{2}{25} \times 10^{-3})$$
$$= 6(1 - 8 \times 10^{-4})$$
$$\cong 6 \text{ V}$$

➔ 5점

[3]

(a) 저항값의 비율이 1:2 인 표준저항을 각각 R1, R2라 할 때,
부하저항의 효과가 적게 나타나기 위해서는 부하저항 보다 표준저항의 크기를 작게, 그리고 표준저항의 최대 소모전력이 1/8W이므로 소모전력이 이보다 작게 설계되어야한다.

$P = V^2/R_2 = 64/R_2 < 0.125$
$\therefore\ R_2 > 512\ \Omega$

이를 만족하는 표준저항의 조합은 (330, 680), (390, 820) 이다.
$\frac{680}{330+680} \cong 0.673,\ \frac{820}{390+820} \cong 0.677$
이 2가지 조합 중 8V 에 가장 근접한 조합은 R1,R2가 각각 330Ω, 680Ω일 때 이므로
회로를 그리면,

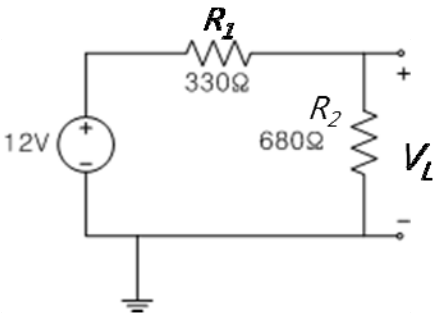


그림 1.

저항의 조합이 (390, 820) 이면, → 7점.
저항의 조합 설계시, 소모전력 조건과, 저항 오차를 감안하여 계산 → 5점
그 이외의 경우는 0점.

(b) 전압계 연결시 회로도를 그리면 아래 그림과 같다. 이때 680 Ω 와 11 MΩ의 합성저항을 구하면

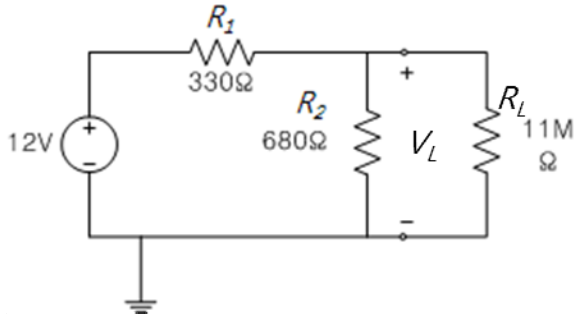


그림 2.

$$\frac{680\times11\times10^6}{680+11\times10^6}=\frac{680}{1+\frac{680}{11\times10^6}}=680\times\frac{1}{1+\frac{680}{11\times10^6}}$$

$$\cong 680\times\left(1-\frac{680}{11\times10^6}\right)=680(1-6.181\times10^5)$$

$\therefore$ 6.18×10^{-3} % 감소

합성저항에 걸리는 전압을 계산하면,

$$V_L=\frac{680(1-6.181\times10^{-5})}{330+680(1-6.181\times10^{-5})}\times12$$

한편,

이론적인 $V_L=\frac{680}{330+680}\times12$ 이므로

전압의 변화율을 계산하면,

이론적 $V_L\sim V_L$는

$$\frac{\frac{680}{330+680}\times12-\frac{680(1-6.181\times10^{-5})}{330+680(1-6.181\times10^{-5})}\times12}{\frac{680}{330+680}\times12},\quad 6.181\times10^{-5}=\varepsilon \text{ 라하면}$$

$$=\frac{\frac{1}{330+680}-\frac{(1-\varepsilon)}{330+680(1-\varepsilon)}}{\frac{1}{330+680}}$$

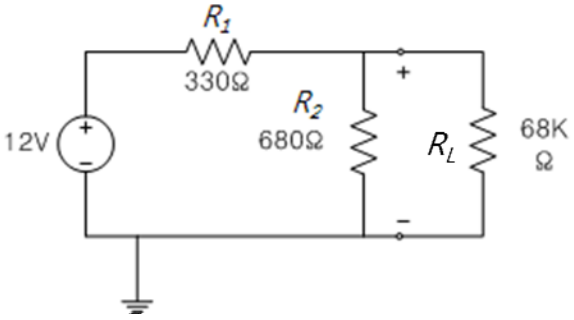
$$=1-(1-\varepsilon)(1+\frac{680}{330+680}\varepsilon)\cong\frac{330}{330+680}\times6.181\times10^{-5}$$

전압의 변화를 계산하면

$\therefore$ 2.019×10^{-3} % 감소

근사값의 계산이 정답과 근사한 경우 (10^{-3} order) → 3점.

(c) 부하저항 연결시 회로도를 그리면 아래 그림과 같다. 이때 R2와 RL의 합성저항을 구하면



합성저항.

$$\frac{680\times 68\times 10^3}{680+68\times 10^3}=\frac{680}{1+\frac{680}{68\times 10^3}}=680\times\frac{1}{1+\frac{1}{10^2}}$$

$$\cong 680\times\left(1-\frac{1}{10^2}\right)=680(1-10^{-2})$$

(*b*)번과 마찬가지 방법으로 전압 변화율을 계산하면

$\varepsilon=10^{-2}$이므로

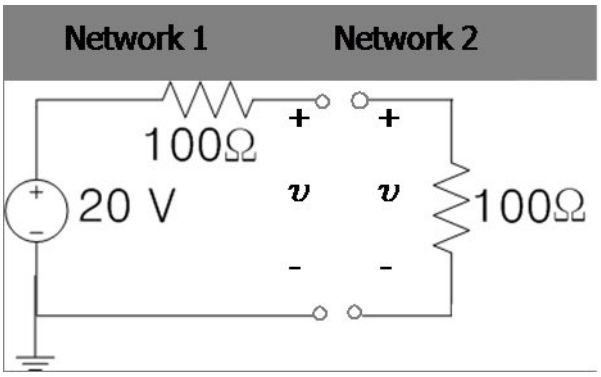
$$\frac{330}{330+680}\times 10^{-2}$$

∴ 0.327 % 감소

근사값의 계산이 정답과 근사한 경우 (10^{-1} order) → 3점.

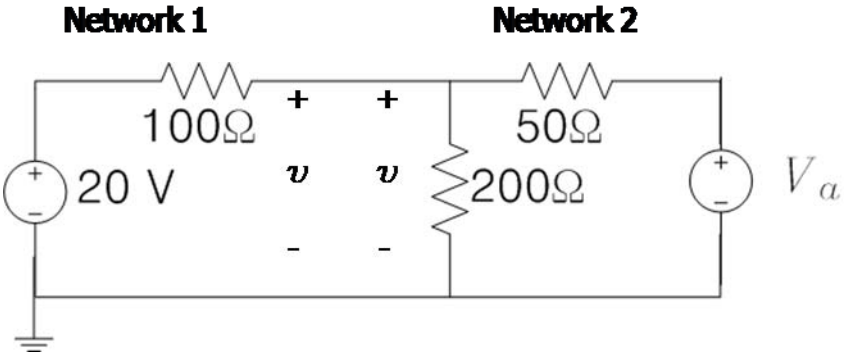
[4]

(a) 네트워크1에서 네트워크2로 최대의 전력이 전달되기 위해서는 아래와 같은 등가회로를 가져야 한다. 따라서 전압 v는 10 V 임을 알 수 있다.



따라서 P의 최대값은 v=10 [v] 일 때이다.

이때의 V_a를 구하기 위해 node equation 적용하면,



$$\frac{v-20}{100}+\frac{v-V_a}{50}+\frac{v-0}{200}=0$$

위의 식에 v=10 [v] 대입하여 V_a 구하면,

Va=7.5 [v]

가 된다.

(b)

이때의 최대전달전력 P는

$$P=v\times i=10\times\frac{20-10}{100}=1\,\mathrm{W}$$ ----------(1)

임을 알 수 있다.

4 번 (a) : 아무것도 안쓰면- 0 점

풀이개념 틀리면 – 2 점

풀이방식 맞으면 -5 점

답까지 맞으면 -10 점

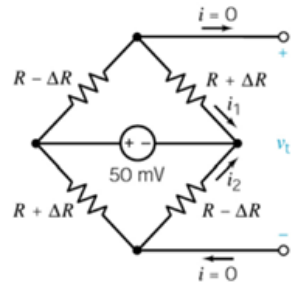
(b) : 아무것도 않쓰거나 풀이개념 틀리면 – 0 점

풀이방식 맞으면 – 2 점

답까지 맞으면 – 5 점

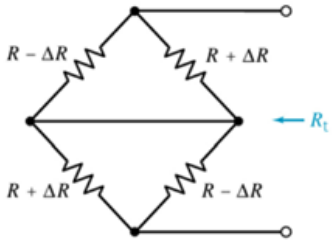
[5]

a) 개방전압과 등가 저항을 구한다



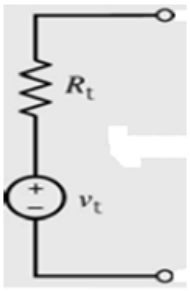
$$V_t = (-\frac{R-\Delta R}{R+\Delta R+R-\Delta R}+\frac{R+\Delta R}{R+\Delta R+R-\Delta R})V_s = \frac{\Delta R}{R}V_s$$

.....4점



$$R_t = 2(R-\Delta R \,\square\, R+\Delta R) = \frac{R^2-\Delta R^2}{R}$$

.....4점



.....2점

b)

$V_1 = \frac{R_1}{R_t+R_1}Vt$, Ideal voltmeter 이므로 $i=0$.....5점

$$V_o = bV_1 = b\frac{R_1}{R_t+R_1}V_t = b\frac{R_1}{\frac{R^2-\Delta R^2}{R}+R_1}\times\frac{\Delta R}{R}V_s$$

.....5점

c)

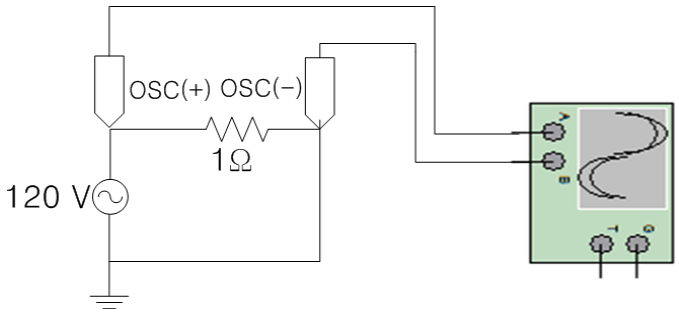
$$b\frac{R_1}{\frac{R^2-\Delta R^2}{R}+R_1}\times\frac{\Delta R}{R}V$$

$$= b\frac{10000}{200+10000}\times\frac{\Delta R}{200}\times 0.05 = 5$$

$==> b = 20400$ 답이 맞으면 5점, 틀리면 0점

한 채점 기준에 정답과 오답을 같이 적을 경우, 감점 처리 합니다. 오답만 있을 경우 0 점.

[6] (a) 올바르지 않다. OSC(-)단자가 접지 되어 있기 때문에, 오실로스코프를 회로에 연결할 경우 2 개의 ground 사이의 100 Ω은 무시되어진다. 회로를 다시 그려보면



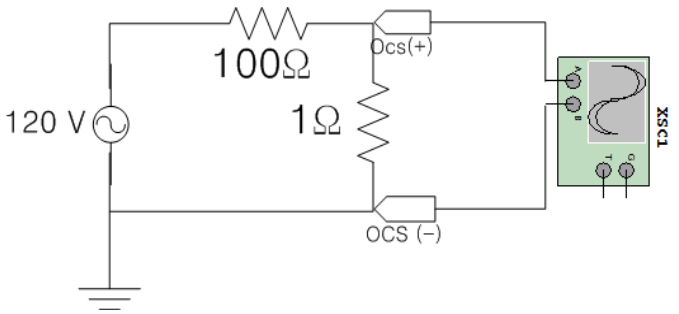
위와 같은 회로가 되어 $V_{1\Omega}$ 에 최대 120 V 의 전압이 걸리고, 이는 올바른 전압 파형이 아니므로, 올바른 측정 방법이 아니다.

OSC(-)단자의 접지가 문제임을 명시 (2 점)

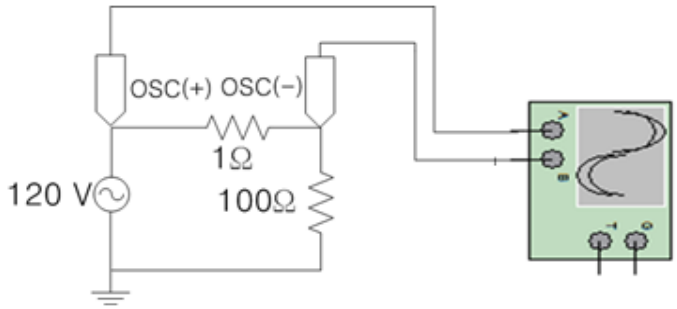
오실로스코프를 연결했을 때, 회로가 받는 영향을 설명(3 점)

1Ω의 전압 파형을 제대로 측정하기 위하여, 2 가지 방법을 생각할 수 있다.

① 1 Ω과 100 Ω의 위치를 바꾸어서 측정한다. 회로도는 아래와 같다. 이 회로의 경우에는 OCS(-) 단자에 연결된 접지와 회로의 접지 사이에 전선만이 존재하므로, 오실로스코프를 연결 했을 시에 회로의 변형이 없다. 그러므로 정확한 전압 파형을 얻을 수 있다.



② OSC(-) 단자의 ground 를 제거하여 floating 상태로 만든 후에, 전압 파형을 측정한다. 회로도는 아래와 같다. 이 경우에도 오실로스코프에 연결 했을 시에 회로에 영향을 끼치지 않기 때문에, 정확한 전압 파형을 얻을 수 있다.



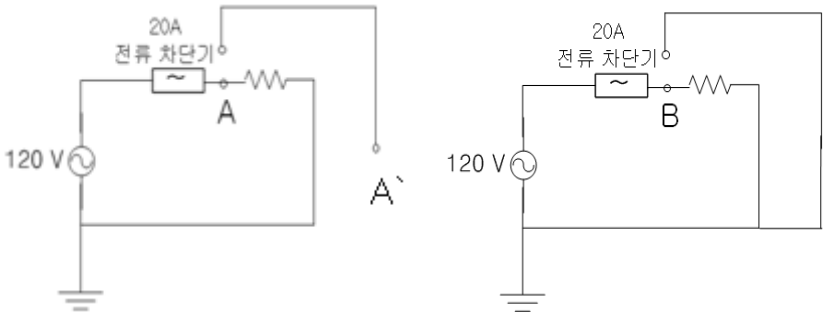
둘 중 하나의 회로도를 정확히 그렸을 경우 (2 점)

회로도에 올바르게 설명했을 경우 (3 점)

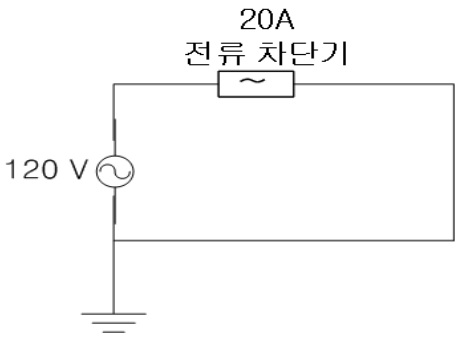
기타 논리적인 답안도 회로도와 그에 대한 충분한 설명이 있을 시 (5 점)

(b)

토스터의 껍데기는 금속으로 이루어져 있어서 아주 작은 저항을 가지고 있다. 그러므로 (가)와 (나)의 회로를 그리면



이러한 회로도를 그릴 수 있다. (가)의 경우 A 지점이 토스터의 껍데기와 연결될 경우에는 아무 일도 일어나지 않는다. 그러므로 토스터의 껍데기 A`에는 120 V 가 걸려 있게 된다. 이 상태에서 사람이 손으로 만졌을 경우에 전류가 사람 몸으로 흘러 들어간다. 그러므로 (가)의 경우에는 안전하지 못하다.



(나)의 경우에는 B 지점이 토스터의 껍데기와 연결된다면, 아래와 같은 회로가 된다.

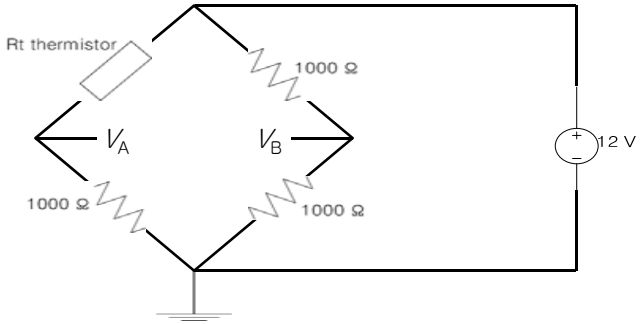
120 V 의 전압과 전원의 낮은 내부 저항에 의하여, 회로에는 20 A 이상의 높은 전류가 흐르게 되고, 전류차단기가 작동하여 토스터의 회로는 끊기게 된다. 따라서 사고를 먼저 감지할 수 있기 때문에 안전하다.

회로도를 (가)와 (나)를 둘 다 제대로 그렸을 경우 (5 점)

A,B 점과 껍데기가 접촉했을 시 일어나는 상황을 정확히 설명(3 점)

안전에 관해서 설명(2 점)

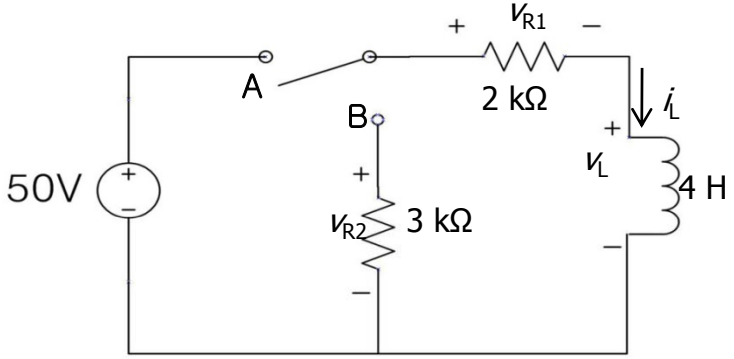
[1] 다음 회로는 써미스터(thermistor)를 이용한 온도 측정 회로이다. 써미스터는 온도에 대해서 일차적으로 저항이 변하고, 300 K에서 1000 Ω, 325 K에서 900 Ω이다. 온도가 250 K~350 K 로 변한다면, 출력전압 ($V_A - V_B$)는 온도에 대해서 어떻게 변하는지 그래프로 그려라.(10점) 또한 온도가 300 K 근처에서 약간 변한다고 할 때,출력전압과 온도 (또는 300 K와의 차이 값)을 선형화된 식으로 구하고, 그래프를 그려라.(10점)



[2] 다음에 답하라.

t=0에서 스위치가 A로 옮겨진다. 회로가 구성된 후 5τ(τ 는 시정수)가 되면 스위치는 B로 옮겨진다. 단, $i_L(0^-)=0$ 이다.

(a) 스위치가 A에 있을 때 회로의 시정수를 구하라(2점)
(b) 스위치가 B에 있을 때 회로의 시정수를 구하라(2점)
(c) 0<t< 5τ 까지의 , $i_L(t)$, $v_L(t)$ 를 구하라(각2점)
(d) 5τ <t 에서의 $i_L(t)$, $v_L(t)$ 를 구하라(각2점)
(e) 0<t 에서의 $i_L(t)$, $v_L(t)$, $v_{R1}(t)$, $v_{R2}(t)$ 를 그려라 (8점)



[3] 다음을 구하라.

그림 3.1은 정상적인 inverting 증폭회로이다. 그런데, 이상적인 Op amp라면 , 그림 3.2와 같이 연결하여도 같은 결과를 얻게 된다. 실제적인 Op amp 로 실험하면 작은 stray capacitance가 삽입된 그림 3.3과 같은 회로로 표현된다.

V_d가 0이 아니라 $V_d=\varepsilon$(작은 전압)가 존재하며 C=1 pF 이고, $A=10^4$이라고 가정 할 때, V_0는 어떻게 되는지 설명하라.(20점)

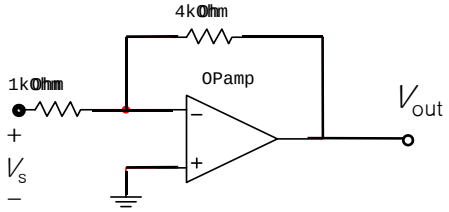


그림 3.1

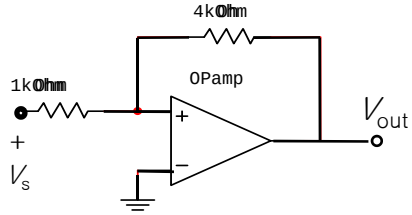


그림 3.2

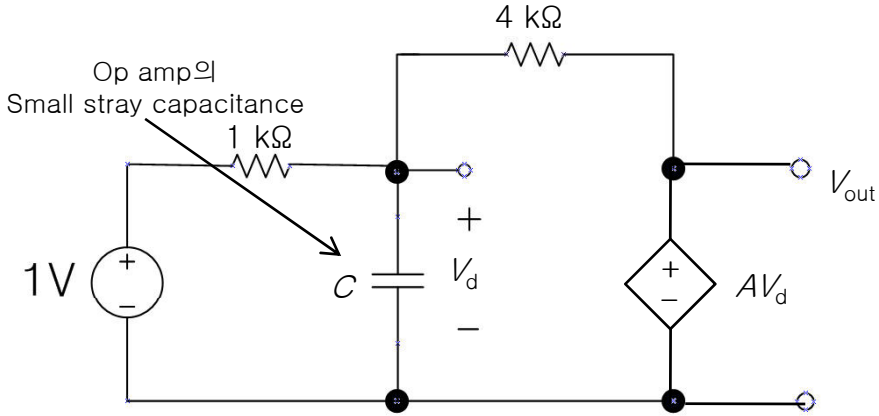
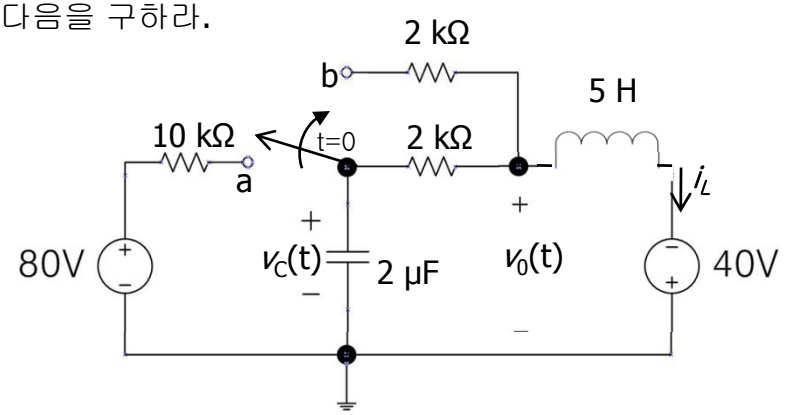


그림 3.3

[4] t=0에서 스위치가 a의 위치에서 b의 위치로 옮겨진다. 이때 다음을 구하라.

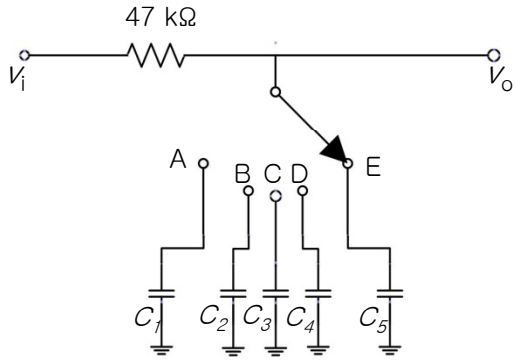


(a) $v_C(0^+)$, $i_L(0^+)$를 구하여라 (각2점)

(b) $\left.\frac{dv_c}{dt}\right|_{0^+}$, $\left.\frac{di_L}{dt}\right|_{0^+}$ 를 구하여라 (각 3점)

(c) $v_0(t)$ 를 구하여라(10점)

[5] 다음 물음에 답하라



입력 unit step 전압(5V)이 입력되면 출력 전압에는 지연되어 전압이 출력된다. 지연시간을 시정수의 5배로 정의할 때 다음에 답하라.
스위치를 A,B,C,D,E 로 옮길 때 지연시간을 각각 10, 25, 40, 65, 85ms 로 하려 한다. 이를 만족하는 C_1~C_5를 구하라 (20점)
단, 표준캐패시터 10 %를 사용해야 하며, 캐패시터는 단일 소자로 구성한다.
(1, 1.2, 1.5, 1.8, 2.2, 2.7, 3.3, 3.9, 4.7, 5.6, 6.8, 8.2 x 10^n F)

[1]

① 온도에 따른 R_t 구하기

R_t는 온도에 따라서 일차적으로 변한다고 하였으므로

$R_t(T) = aT + b$ (a, b는 상수) 의 꼴이다.

$R_t(300) = 1000$, $R_t(325) = 900$ 을 대입하여 a, b를 구하면

$a = -4$, $b = 2200$ 이다.

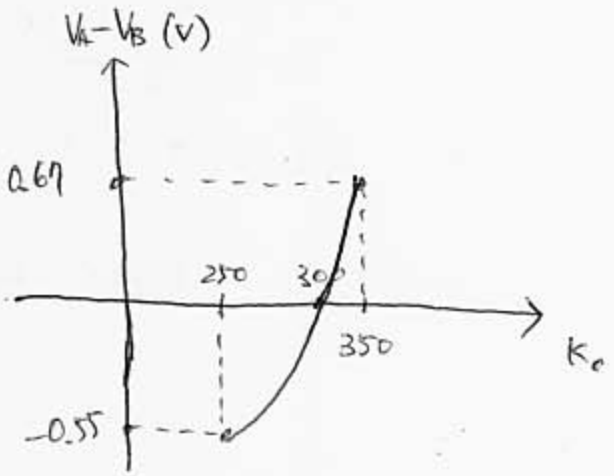
$\therefore R_t(T) = -4T + 2200$

② 온도에 따른 $V_A - V_B$ 구하기

$$V_A = \frac{1000}{R_t + 1000} \cdot 12 \quad (V), \quad V_B = \frac{1000}{1000+1000} \cdot 12 = 6$$

$$V_A - V_B = \frac{1000}{R_t + 1000} \cdot 12 - 6 = \frac{12}{\frac{T}{-250} + 3.2} - 6 \quad (V)$$

③ 그래프



④ 300K 근처에서 선형화된 식 구하기

$$T = 300 + \Delta T$$

②번의 식에 T 대입

$$V_A - V_B = \frac{12}{\frac{300+\Delta T}{-256} + 3.2} - 6 \quad (V)$$

$$= \frac{12}{\frac{-\Delta T}{250} + 2} - 6$$

$$= \frac{6}{\left(1 - \frac{\Delta T}{500}\right)} - 6$$

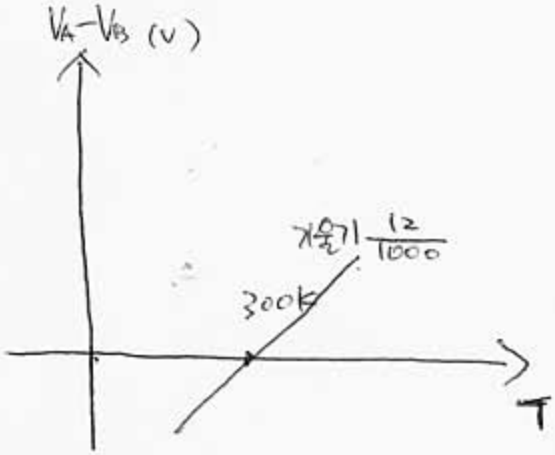
$\left(\frac{\Delta T}{500} \ll 1 \text{ 이므로 } \frac{1}{1-\frac{\Delta T}{500}} \cong 1 + \frac{\Delta T}{500}\right)$

$$\cong 6\left(1 + \frac{\Delta T}{500}\right) - 6$$

$$= \frac{6}{500}\Delta T$$

$$= 0.012\,\Delta T \quad (V)$$

⑤ 그래프 그리기



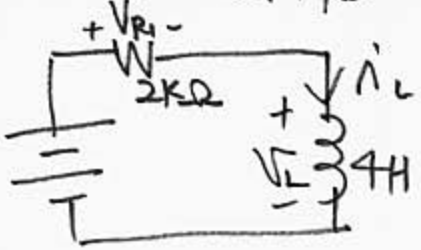
배점	
①	2
②	3
③	5
④	5
⑤	5

#2

ⓐ $\tau_1 = \frac{L}{R_1} = 2(ms)$ 답맞으면 2점

ⓑ $\tau_2 = \frac{L}{R_1+R_2} = 0.8(ms)$

ⓒ



$i_L' + \frac{R_1}{L} i_L = \frac{V_s}{L}$

$\therefore i_L = Ae^{-\frac{R}{L}t} + \frac{1}{40}$

$i_L(0^-) = i_L(0^+)$ 이므로

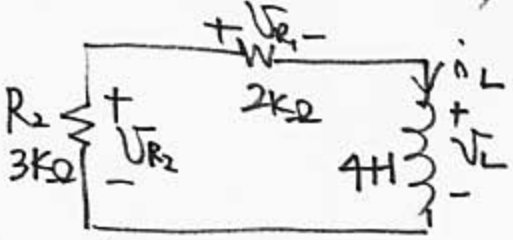
$A = -0.025$

$\therefore i_L = 0.025\left(1 - e^{-t/0.002}\right)(A)$

$\therefore V_L = L\frac{di_L}{dt}$

$= 50\, e^{-t/0.002}\ (V)$

ⓓ $5\tau_1 < t$,



$\frac{di_L}{dt} + \left(\frac{R_1+R_2}{L}\right) i_L = 0$

(switch가 B로 가는 순간이 $t'=0$ 인 시간축이 t'일때)

$i_L(5\tau_1^-) \simeq 0.025$ 이므로

앞서와 같은 방식으로

풀면,

$i_L(t) = 0.025\, e^{-(t-0.01)/0.0008}(A)$

$\therefore V_L(t) = L\frac{di_L}{dt}$

$= -125\, e^{-(t-0.01)/0.0008}(V)$

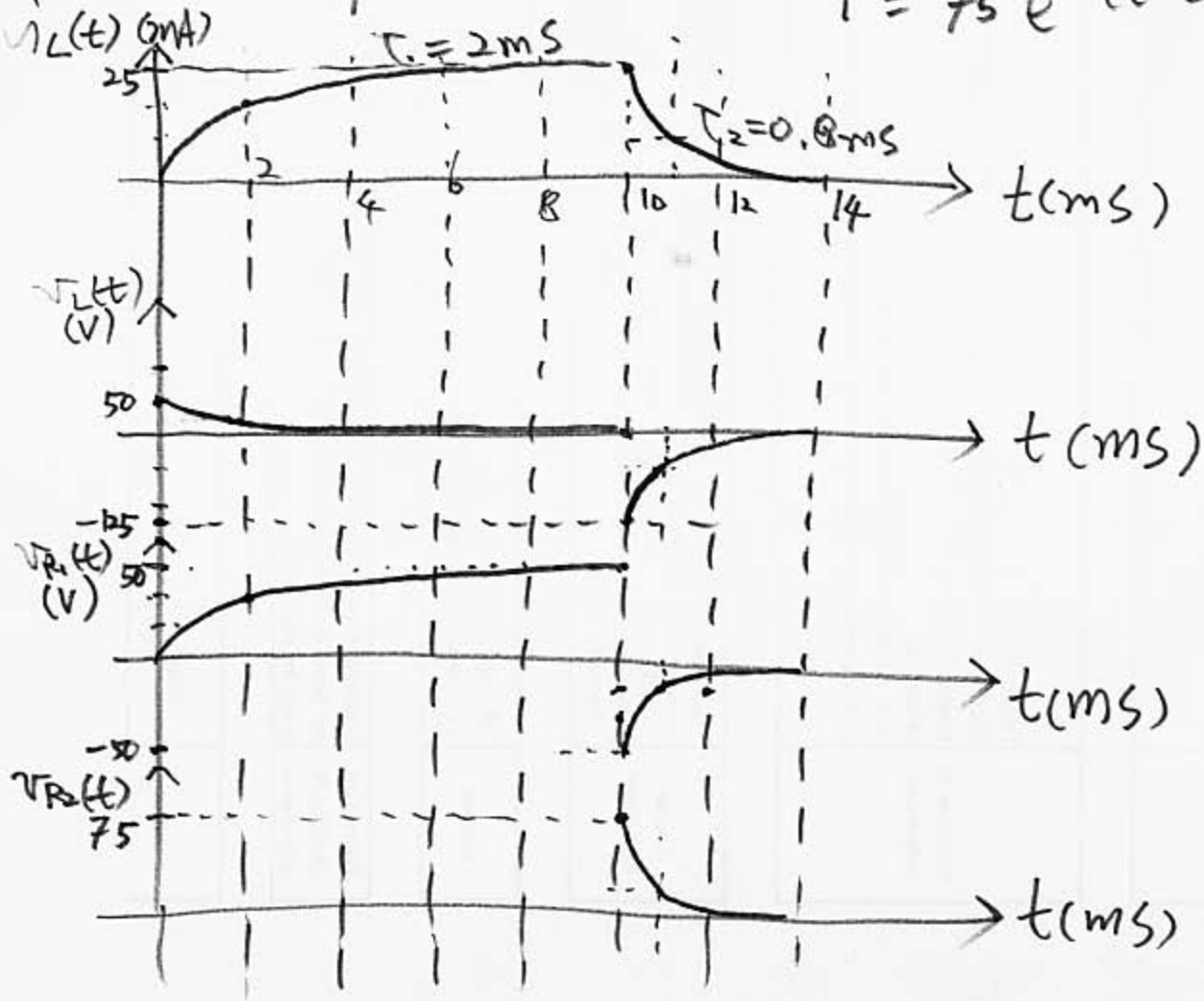
답맞으면 i_L, V_L 각 2점씩.

Governing eq.를 잘쓰고 답만 틀리면

i_L, V_L 각 1점씩

(e)

	$0 \le t < 5\tau_1$	$5\tau_1 \le t$
$v_{R_1}(t)$	$v_{R_1}(t) = V_s - V_L$ $= 50(1-e^{-t/0.002})(V)$	$v_{R_1} = \frac{2}{5}v_L$ $= -50e^{-(t-0.01)/0.0008}(V)$
$v_{R_2}(t)$	0	$v_{R_2} = -\frac{3}{5}v_L$ $= 75e^{-(t-0.01)/0.0008}(V)$

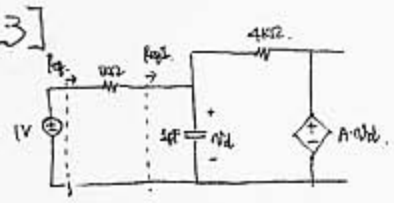


각 graph 당 2점씩

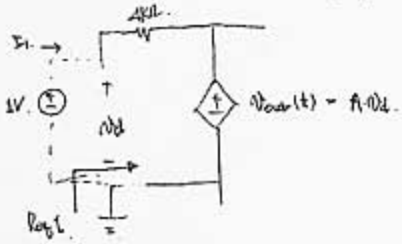
τ_1, τ_2가 구분이 안가거나 비현실적으로 graph를 그리거 나타내면 1점씩.

static point 자체가 틀리면 0 점씩

[3]



i) RC constant를 얻기위해서, C와 연결된 Rth를 구한다.



① $I_1 = \frac{1 - A v_d}{4k\Omega} = \frac{1 - 10^4}{4000} \fallingdotseq -2.5A$

② $R_{eq1} = \frac{1V}{I_1} = \frac{1V}{-2.5A} = -0.4\Omega$

③ C와 연결된 $R_{th} = (R_{eq1} \parallel 1k\Omega)$

$= (1000\Omega \parallel -0.4\Omega)$

$\fallingdotseq -0.4\Omega$

ii) 주어진 Rth와 C를 이용해서 time constant를 구한다.

: $\tau = R_{th} \cdot C = -0.4 \times 10^{-12}$, 이때 시정수가 음의 값을 갖는다는 것의 의미는 불안정하다는 것이다.

iii) $v_o(t)$를 구한다.

$v_o(t) = V_o + [v_o(t_0) - V_o] \cdot e^{-(\frac{t-t_0}{\tau})}$, V_o : C를 open 시킨 상태에서의 v_{out}.

$V_o = 1 \times \frac{-0.4}{1000 - 0.4} \times 10^4 \fallingdotseq -4V$; 1kΩ과 Req1의 분압회로.

$\therefore v_o(t) = -4 + [\varepsilon \cdot 10^4 + 4] \cdot e^{2.5 \times 10^{12} t}$

따라서 v_o는 saturation 되는 것을 알 수 있다.

1. V_o 구하는 계산방식은 맞으나 계산실수일경우 : 5점

2. 시정수 맞으면 : 10점

3. V_o 식만 맞으면 : 18점

4. V_o가 포화 (Op amp에 공급되는 양의 전압으로 포화) 된다는 표현들어가면 : 20

4 번

$a) t \le 0$

$$V_c(0^-) = V_c(0^+) = \frac{80-(-40)}{10000+2000} \times 2 - 40 = -20 \text{ V}$$

$$i_L(0^-) = \frac{120}{12000} = \frac{1}{100} \text{ A}$$

답까지 맞을 경우 각각 2점

부호 -1점

$b) t \ge 0^+$

$$i_c = i_L$$

$$\left.\frac{dV_c}{dt}\right|_{t=0^+} = -\frac{1}{C} i_c(0^+) = -\frac{1}{C} i_L(0^+) = -\frac{1}{2\times10^{-6}} \times \frac{1}{100} = 5000 \text{ V/S}$$

$$\left.\frac{di_L}{dt}\right|_{t=0^+} = \frac{1}{L} VL(0^+) = \frac{1}{L}(Vc(0^+) - I \cdot 1000 + 40) = \frac{1}{5}(-20 - \frac{1}{100} \cdot 1000 + 40) = 2 \text{ A/S}$$

과정만 맞을 경우 각각1점

답까지 맞을 경우 각각 3점

부호 -1점

$c) V_L$에 관하여 푼다

$$-V_c - IR - V_L + 40 = 0 \cdots (1)$$

$$I = i_C = i_L, R = 2k \parallel 2k = 1 \text{ k}\Omega$$

$$C\frac{d^2V_c}{dt^2} = \frac{V_L}{L}, \quad \frac{dI}{dt} = \frac{V_c}{LC}$$

(1)의 양변을 $\frac{d^2}{dt^2}$ 하면

$$\ddot{V}_L + \frac{R}{L}\dot{V}_L + \frac{V_L}{LC} = 0$$

$$\Rightarrow \ddot{V}_L + 200\dot{V}_L + 100000V_L = 0 \cdots (2)$$

$$S^2 + 200S + 100000 = 0$$

$$S = -100 \pm \sqrt{10000 - 100000} = -100 \pm 300i$$

$$\therefore V_L(t) = e^{-100t}(A\sin 300t + B\cos 300t) \cdots (3)$$

$a), b)$의 초기조건에 의해

$$V_L(t) = e^{-100t}(-20\sin 300t + 10\cos 300t)$$

$$V_o(t) = V_L(t) - 40 = -40 + e^{-100t}(-20\sin 300t + 10\cos 300t)$$

(1)번 식 맞으면 +2점 ,(2)번 식 맞으면 +2점 ,(3)번 식 맞으면 +3점

답 맞으면 +3점

5번 답안.

Delay time(10, 25, 40, 65, 85) $= 5\tau$ 이므로

$\tau = (2, 5, 8, 13, 17) = RC = 47\times10^{3} \times C$

따라서 각각의 경우에 대하여 C값을 계산하면

$$C = \begin{cases} 4.25\times10^{-5} \text{ ----> } 3.9\times10^{-5} \text{ F} \\ 1.06\times10^{-4} \text{ ----> } 1.0\times10^{-4} \text{ F} \\ 1.70\times10^{-4} \text{ ----> } 1.8\times10^{-4} \text{ F} \\ 2.77\times10^{-4} \text{ ----> } 2.7\times10^{-4} \text{ F} \\ 3.62\times10^{-4} \text{ ----> } 3.9\times10^{-4} \text{ F} \end{cases}$$

채점기준

1. Time constant를 제대로 구하기까지 5점
2. Exact C 값을 제대로 구하기까지 5점
3. 표준C 골라내기 10점