

## 제 5 장 트랜스듀서 (Transducer)

\* 참조: 참고문헌 (2) \*

### 5.1 서론

전기적 요소의 장점:

- 증폭, 감쇠가 용이
- 관성의 영향이 최소화
- 마찰의 영향이 최소화
- 거의 모든 크기의 출력이 제공
- 원격측정이나 계측이 가능
- 변환기가 소형화

#### 1) 계측 시스템:

- 계측 시스템의 구성
  - sensor-detector 단계
  - signal conditioning 단계
  - readout 단계
- sensor-detector (transducer) 단계
  - 피측정량과 처음 접촉; 입력에 대한 출력을 발생
  - 검출기:  $I_{out} = f(I_{in})$
  - Transfer efficiency:  $\frac{I_{out}}{I_{in}}$
  - Sensitivity :  $\eta = \frac{dI_{out}}{dI_{in}}$
  - 감도: 많은 경우에 근사화하여 constant로 간주
- 신호소스의 부담
  - source loading;
  - 검출기는 항상 신호원으로부터 에너지를 입수

## 2) 계측계의 응답

- 정특성: 감도, 정오차(靜誤差)
- 동특성

- (1) 진폭응답 (amplitude response): 사용 범위의 입력의 크기에 대한 gain
- (2) 주파수 응답 (frequency response): 주파수에 따른 gain
- (3) 위상응답 (phase response): 주파수에 따른 지연 위상각
- (4) 비틀림률 (slew rate)

시스템이 다룰 수 있는 최대변화율:  $de/dt$

sine 파 시험:

$$\text{input: } V_{in} = V_i \sin(2\pi ft)$$

$$\text{output: } V_{out} = V_o \sin(2\pi ft + \phi)$$

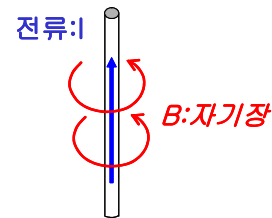
## 5.2 가변 인덕턴스 (Variable inductance)

\* 개요

### 1) ideal inductor:

절연체 또는 철심 주위에 전선을 감아서 만든 것

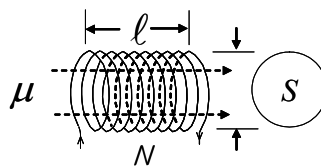
\* 도체에 전류가 흐르면 주위에 자기장 발생: Ampere 법칙



무한solenoid의 자기인덕턴스(self inductance)

원통형 코일의 인덕턴스  $L$ , 장강계수  $k$ , 투자율을  $\mu$ , 코일의 감은 수(권선 수)를  $N$ , 코일의 단면적을  $S$ , 코일의 축방향 길이를  $\ell$ ;

$$L = k \frac{\mu N^2 S}{\ell} [H]$$



공기중 투자율 (permeability):  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H/m]$

장강계수  $k$  :

코일의 직경( $D$ )와 코일의 길이( $\ell$ )의 비율로 정해지는 값

$$k = 1 \quad \text{if } \ell = \infty$$

core 형태 및 재료: iron core, toroidal core

용량 읽는 법:  $H, mH, \mu H$

$$470: 47 \mu H$$

\* 참고문헌 (4) 그림 4.10 참고

Principles and Applications of Electrical Engineering Giorgio Rizzoni, 5<sup>th</sup> Ed. McGraw-Hill  
 솔레노이드 자력선 분포, 토로이달 인덕터

2) Inductor의 수학적 관계식

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

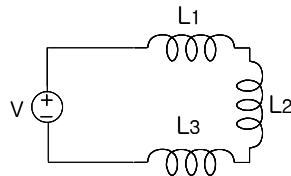
L: self inductance [H] Henrys

$$1H = 1 V/(A/s)$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t v_L(t') dt'$$

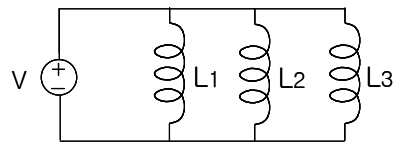
코일 직렬연결 등가인덕턴스:

$$L = L_1 + L_2 + L_3$$



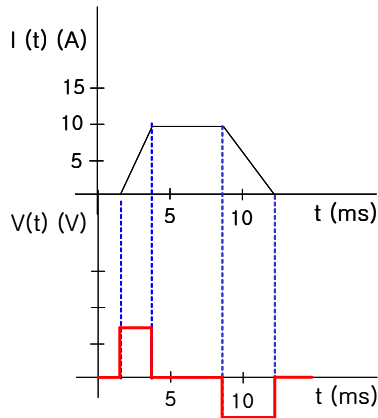
코일 병렬연결 등가인덕턴스:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$$



예제 4.5 (참고문헌 4)

Principles and Applications of Electrical Engineering Giorgio Rizzoni, 5<sup>th</sup> Ed. McGraw-Hill



스위칭 시에 역기전력 발생

악영향: 역기전력에 의하여 노이즈 발생, 또는 기기 손상

예) 전구가 스위치를 켤 때 고장난다.

이용: 형광등 스타트 전구

자동차 점화 코일

3) inductance를 이용한 transducer

철심과 같은 투자율이 높은 재료를 삽입하여 변화

(a) 투자율변화형:

core(철심)의 투자율은 기계적 스트레인에 의하여 변화

(b) 자기저항변화형:

磁路중의 자기저항을 변화

(c) 자기력응용:

전자석 => 전류-힘변환기

(d) 자기유도작용:

코일에 교류전류를 가했을 때

(d-1) 상호인덕턴스: 두개의 코일을 접근 시켰을 때

코일의 상호형상과 위치관계에 따라 변화

-> 차동트랜스

(d-2) eddy current: 교류를 인가하고 도체판에 접근 시켰을 때

### 5.3 용량형 변환기 (capacitive transducer)

#### 1) ideal capacitor

유전체로 격리된 평행한 전도체 평판

유전체 (dielectric)

전기도체가 아니고, 전기장에서 극대화 되는 전기 양극 (dipole)을 많이 포함하는 물질이다.

충전되는 전하량:

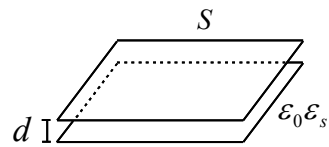
$$Q [C] = C[F] * V[V]$$

정전용량

$$C = \epsilon_s \epsilon_o \frac{S}{d}$$

$\epsilon_o = 8.855 \times 10^{-12} (F/m)$  : 진공의 유전율

$\epsilon_s$  : 비유전율, 공기의 비유전율  $\epsilon_s = 1$



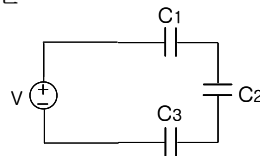
#### 2) Capacitor의 수학적 관계식

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$$

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_c(t') dt'$$

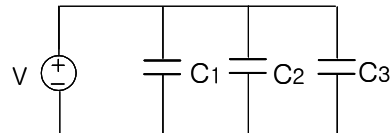
capacitor 직렬연결 등가캐패시턴스:

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



capacitor 병렬연결 등가캐패시턴스:

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$



#### 실제 capacitor

최대전압

극성

주파수 범위

### 3) capacitance를 이용한 transducer

임피던스변화형

비접촉계측

- 전극간격변화형
- 넓이 변화형
- 유전율 변화형

(i) 거리변화형

전극간격  $d$ 의 변화에 의하여 용량  $C$ 를 변화

-> 용량식 변위변환기

$$\Delta c = \epsilon_o \epsilon_s \frac{s}{d^2} \Delta d$$

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta d}{d}$$

$d$ : 50 ~ 300  $\mu\text{m}$

응용: 축의 편심측정

용량식 압력변환기 - diaphragm/film -> condenser

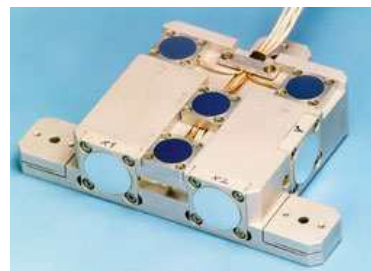
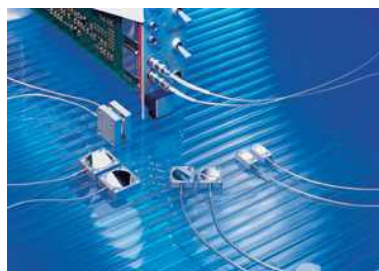
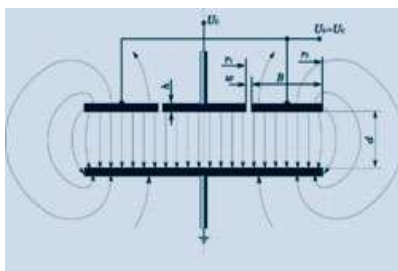
발진기를 구성

$\pm 0.1\text{psi}$ ,  $\pm 0.8\text{MHz}$  신호를 얻음

차동용량식변위기

두 개의 고정전극사이에 가동전극

두께계, 미량계, 미차압계, 온도계



거리변화형 capacitive 변위 센서

(ii) 넓이변화형

대향넓이 S의 변화

$$\Delta C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s}{d} \Delta S$$

선형변위:  $\Delta S = wx$

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{x}{l}$$

회전변위: 검출감도:  $1^\circ \times 10^{-1}$

선형변위에서 감도증가 방법

감도는  $1/l$  에 비례

-> 빗살형구조

$$1.0\text{pF}/0.0001''$$

전극을 움직이는데 힘이 적게 든다.

(iii) 유전율 변화형

유전율  $\varepsilon_s$ 는 재료에 따라 다르고, 온도, 압력, 습도에 따라 달라짐.

-> 온도변환기, 압력변환기

습도(목재의 습도)

저항법-온도의 영향

용량법-온도의 영향이 났다.

용량검출법: 발진주파수 검출

건조기의 습도 제어

분체의 유량측정: 분체의 유전율이 공기의 유전율보다 높다.

4) 정전용량 변화 검출회로

용량 bridge 사용

정류회로

반송파 전원: 리플을 줄이기 위해

1~3MHz

$\pm 5\text{pF}$  까지 사용가능

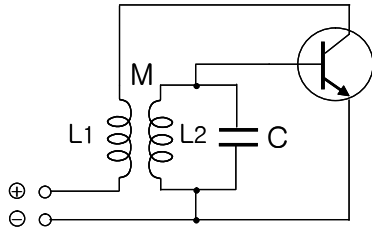
용량검출법: 발진주파수 검출

※ 참고

## 발진회로

### LC 발진회로

베이스동조

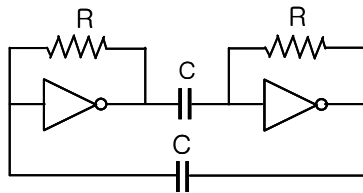


코일의 상호유도 작용을 이용, 위상 반전 결합

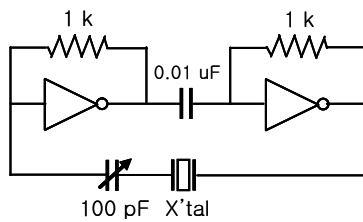
$$f \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{C(L_1 + L_2)}}$$

### 인버터를 이용한 디지털 발진회로

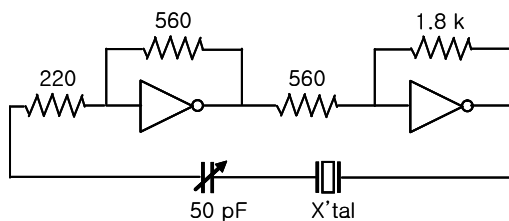
(1) astable oscillator



(2) astable oscillator using X-tal (AC coupling)



(3) astable oscillator using X-tal (DC coupling)





## 5.4 압전현상

압전현상: piezo-electric phenomena

Curie 형제 (P. Curie, J. Curie) 가 1880년에 발견

수정과 같은 결정체에 힘을 가하면 이에 상대한 결정면에 전하발생

-> 수정발전기; 압전작용, 고유진동

로셀염, 티탄산바륨, 이수소인산암모늄(ADP)

-> 힘의 계측; 진동 및 폭발력 등의 측정에 유효

$$V = gt \frac{F}{A}$$

재료:

로셀염, 티탄산바륨, 이수소인산암모늄(ADP)

수정; 가장 안정, ~550°C, 큰 힘의 측정에 적합

로셀염; 용해성 <86% 습도, ~55°C

ADP; ~125°C

황산리튬; 인공결정체, 수정보다 감도가 좋음

티탄산바륨자기; 다결정체, 유전율, 감도가 높음, 안정.

PZT(납(Pb) 지르콘 티탄산연계자기); 티탄산바륨과 유사한 특성

비유전율: 1700, 저항율:  $100 \times 10^9 \Omega \cdot \text{m}$ ,

전압감도:  $10 \sim 40 \times 10^{-3} \text{ (V} \cdot \text{m/N)}$

제조방법:

제조후 고압 (천~수만볼트)를 1시간가량 인가, 분극축 생성

특성:

RLC회로

직류적인 힘 (정적인 힘)의 측정은 곤란



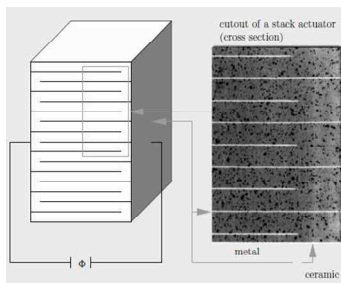
응용례:

- (1) 센서
  - 진동변환기
  - 가속도계
  - 힘센서



- (2) 압전 구동기 (piezo-actuator)

수정과 같은 결정체에 전압을 가하면 변형한다.



E-663 3-Channel Piezo Amplifier  
For Open-Loop Piezo Systems and Actuators without Position Sensors

## 5.5 반도체 센서

전자회로 제작기술 응용

### 1) 반도체의 전기적 거동

Si (Silicon), Ge (Germanium), GaAs (Galium Arsenide) , CdS (Cardmium sulphide)

전자, 정공의 흐름

반도체내의 charge carrier의 수: 온도 T의 함수

$$n_c \propto T^{3/2} \exp\left(\frac{-\text{Constant}}{T}\right)$$

Resistivity :  $1/n_c$  에 비례

온도가 증가함에 따라 급격히 감소

실내온도 근처의 실리콘; 약  $8\%/^{\circ}C$

반도체의 전기적 거동을 조절: 불순물 첨가

인, 비소 (donor); 재료내의 자유전자의 수를 증가 => n 형 반도체

갈륨, 알루미늄 (acceptor); 재료내의 정공의 수를 증가 => p 형 반도체

$\therefore$  순수 반도체내의 전자의 수보다 불순물내의 전자의 수가 더 많음.

### 2) pn Junction (접합)

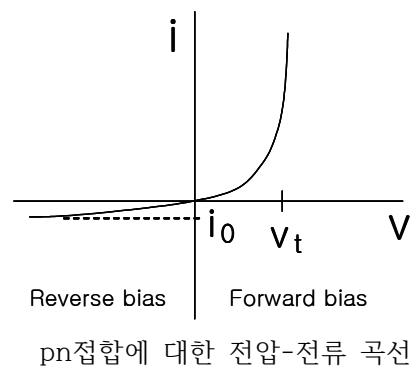
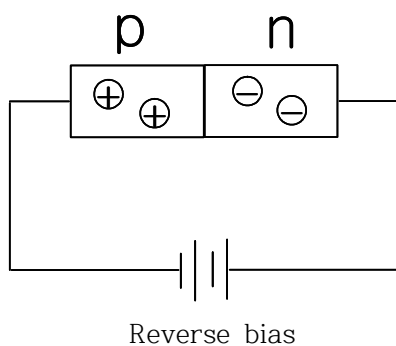
Forward bias; p +, n - 연결

Reverse bias; p -, n + 연결 : 역포화전류 흐름

역포화전류

$$i = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q}{kT} V\right) - 1 \right] \quad , \quad k: \text{ Boltzmann 상수}$$

온도에 의존



### 3) 광 diode

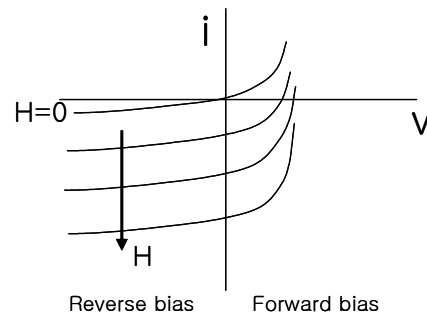
#### (1) pn 접합

역포화전류의 광 의존

$$i = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q}{kT} V\right) - 1 \right] - I_\lambda$$

$$I_\lambda = \text{constant} \times H$$

$H$ : 입사광량 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

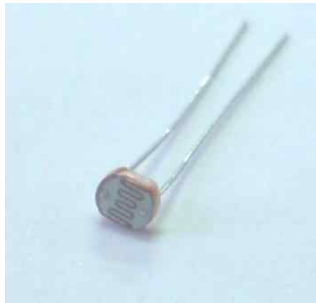


광전류는 수 mA; 역포화 전류보다 매우 큼

#### (2) 접합이 아닌 반도체

CdS (Cadmium sulphide, cadmium selenide); (photoconductive cell)

광자(photon)가 전자-정공 쌍을 발생



## 5.6 광검출변환기

Photosensor, photocell

- 광도전 셀 (photoconductive cell)
- 광전지 (태양전지) (photovoltaic cell)
- 광다이오우드 (photo diode)

pn 형

PIN형; p - intrinsic layer - n

광트랜지스터 (photo transistor)

내부광전효과: Photodiode (PIN)



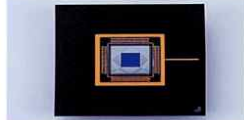

외부광전효과: 알칼리금속(Sb-K-Cs, Sb-Rb-Cs, Sb-Cs ...)

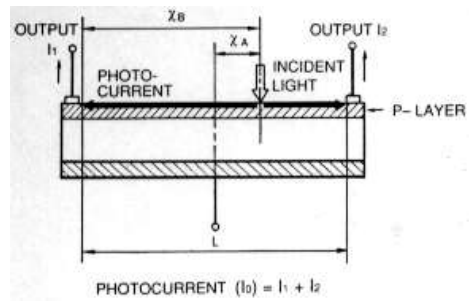
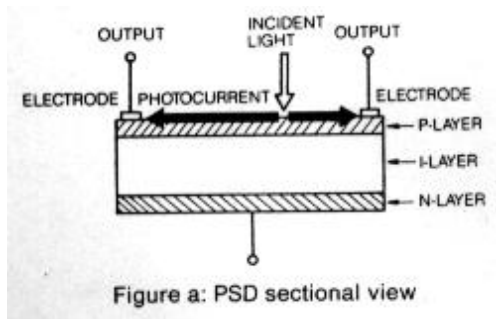
III-V 반도체 (GaAs)

광방출 검출기 (photoemissive detector)

Photomultiplier

## PSD (Position Sensitive Detector)

Type	Application	Features
1 Dimensional PSD	Camera auto focus Range finder Optical proximity switch Displacement meter	
2 Dimensional PSD	Optical position and angle sensing Remote optical control system Automatic range finder system Displacement and vibration monitor Laser beam alignment Medical equipment	
Special type PSD	Incident angle detection	
PSD signal processing circuit	-	



$$I_1 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2}{L} \chi_A\right) I_0 \dots\dots (1) \quad I_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2}{L} \chi_A\right) I_0 \dots\dots (2)$$

$$\frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} = \frac{2\chi_A}{L} \dots\dots\dots (3) \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{L - 2\chi_A}{L + 2\chi_A} \dots\dots\dots (4)$$

## 5.7 Hall 센서

E. H. Hall이 1879년에 발견

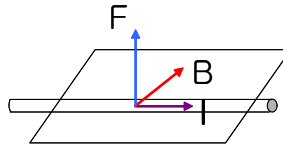
\* 단위길이의 전류에 작용하는 힘

$$F_0 = I \times B \text{ [N/m]}$$

$F_0$  : 단위 길이 도체에 작용하는 힘

$I$  : 전류의 세기

$B$  : 자계의 자속밀도



길이가  $l$  인 도체에 작용되는 힘

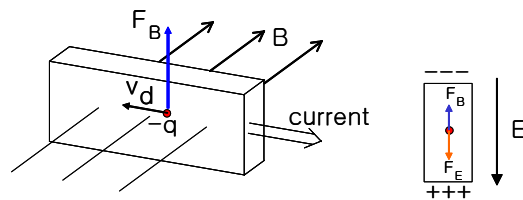
$$F_0 = I \times Bl \text{ [N]}$$

Fleming의 왼손 법칙

엄지: 힘 방향

둘째: 자속의 방향

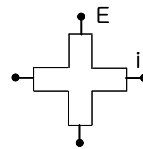
중지: 전류 방향



재료: Ge, Si, InSb, InAs<sub>x</sub>P<sub>1-x</sub>

$$\begin{aligned} F_B &= -q \mathbf{v}_d \times \mathbf{B} \\ &= -qE \end{aligned}$$

$$V_{\text{Hall}} = IE = v_d l B$$



반도체내에서 효과가 크게 나타남.

- (1) 전류센서; 자기장을 일정하게 설정, 전류 변화에 따른 홀 전압 검출
- (2) 자기장 센서; 전류의 크기를 일정하게 설정, 자기장의 세기에 따른 홀 전압 검출  
회전속도계측에 응용

## 5.8 설계와 관련된 문제

- 가공 공차
- 온도와 관련된 문제
  - 온도오차를 제한하는 방법
  - 최소화
  - 보상, 제거