

# 4장 온도 센서 (B)

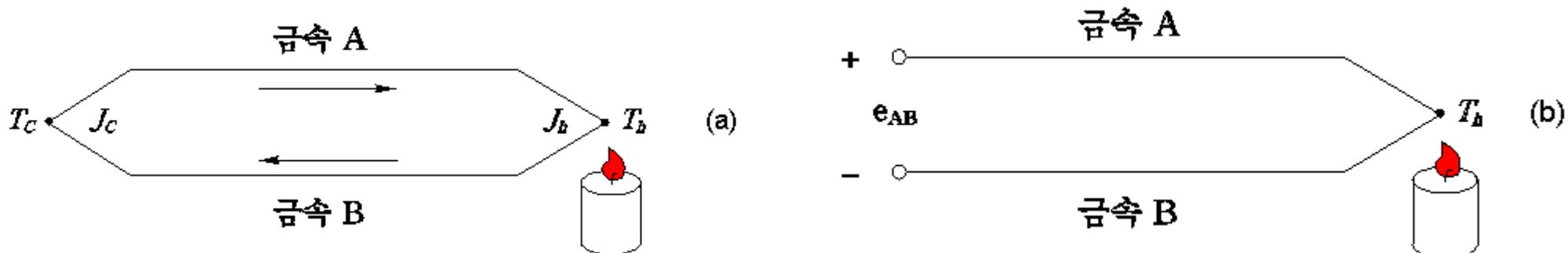
# 온도 센서

- RTD (Resistance Temperature Detector)
- 써미스터 (Thermistor)
- 열전대 (Thermocouple)
- 반도체 온도센서

## 4.4 열전대

### ■ 구조와 동작원리

- 열전대(熱電對; thermocouple)는 재질이 다른 2 종류의 금속선으로 구성.
- 그림 (a)와 같이 서로 다른 금속선 A, B를 접합하여 2개의 접점  $J_h$ 와  $J_c$  사이에 온도차( $T_h > T_c$ )를 주면 일정한 방향으로 전류가 흐른다. → thermoelectric 현상 (Thomas Seebeck, 1821)
- 그림 (b)와 같이 폐회로의 한 쪽 또는 금속선 B를 도중에 절단하여 개방하면 2 접점 간의 온도차에 비례하는 기전력(emf)이 나타난다. 이 현상을 지백효과(Seebeck effect)라 하며, 이때 발생한 개방전압을 지백 전압 또는 기전력(Seebeck voltage or emf)이라고 부른다.
- 이와 같은 현상은 접점을 형성하는 두 이종금속 사이의 일함수(work function) 차이에 기인한다.

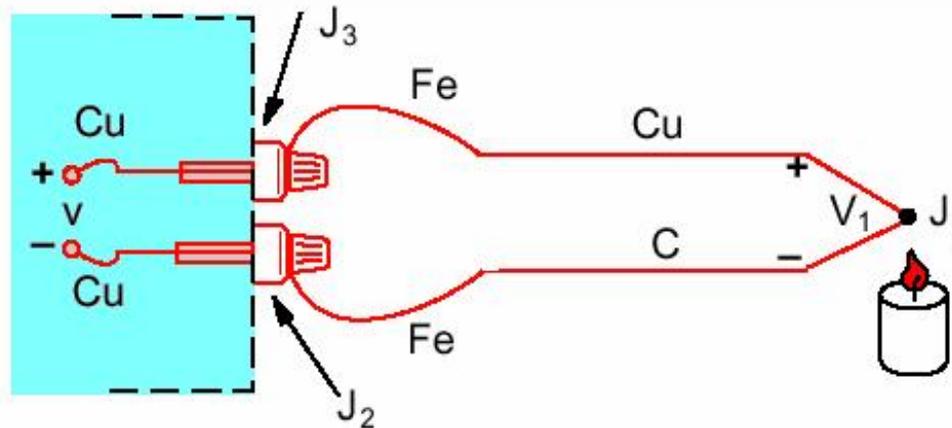


- 온도 변화가 작을 경우, 지백 전압은 온도에 직선적으로 변화한다. 즉,

$$\Delta e_{AB} = \alpha(T_h - T_c)$$

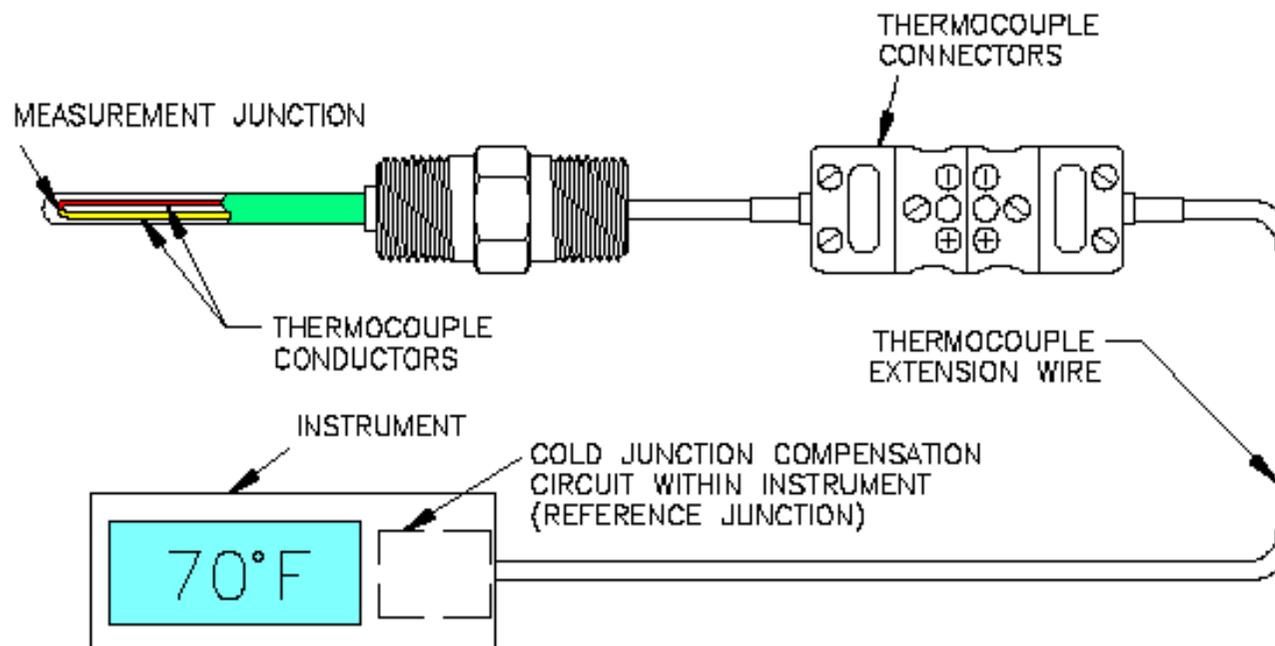
$\alpha$  : 지백 계수(Seebeck coefficient)

- 열전대에 전압계를 접속하면 열기전력을 측정할 수 있으며, 이 값에서 역으로 온도차를 알 수 있다. 이것이 열전대 온도 센서의 원리이다.



copper-constantan (Type T)

- Thermocouple assembly



## ■ 각종 열전대의 구성재료, 사용온도범위, 특징

열전대 종 류	구 성 재 료		사 용 온 도 범 위	비 고
	(+)	(-)		
B	Pt(70 [%]) Rh(30 [%])	Pt(94 [%]) Rh(6 [%])	0 [°C]~1700 [°C]	· 고가, 환원성 분위기에 약함 · 고온 측정에 적합
S	Pt(90 [%]) Rh(10 [%])	Pt	0 [°C]~1450 [°C]	· 고가, 환원성 분위기에 약함 · 고온 측정용
R	Pt(87 [%]) Rh(13 [%])	Pt	0 [°C]~1450 [°C]	· 고가, 환원성 분위기에 약함 · 고온 측정용
K	<u>크로멜(Chromel)</u> Ni(90 [%]) Cr(10 [%])	알루멜(Alumel) Ni(90 [%]) Al, Mn, Si 등 소량	-200 [°C] ~1250 [°C]	· 가장 널리 사용됨 · 측정온도범위가 넓다. · 완전한 불활성 분위기에서 사용
E	<u>크로멜</u>	콘스탄탄(Constantan) Cu(55 [%]) Ni(45 [%])	-200 [°C] ~900 [°C]	· 감도가 가장 우수함 · 환원성 분위기에 약함 · K보다 저렴
J	Ir	콘스탄탄	0 [°C]~750 [°C]	· 철이 녹슬기 쉽다 · 저온 측정에 부적합
T	Cu	콘스탄탄	-200 [°C] ~350 [°C]	· 저온 측정용 · 산화하기 쉽다

- 전압온도 관계

- 전압온도 관계가 직선으로부터 벗어나기 때문에 출력전압을 온도로 변환하기 위해서는 다음과 같은 다항식이 사용된다

$$T = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + \dots + a_nx^n$$

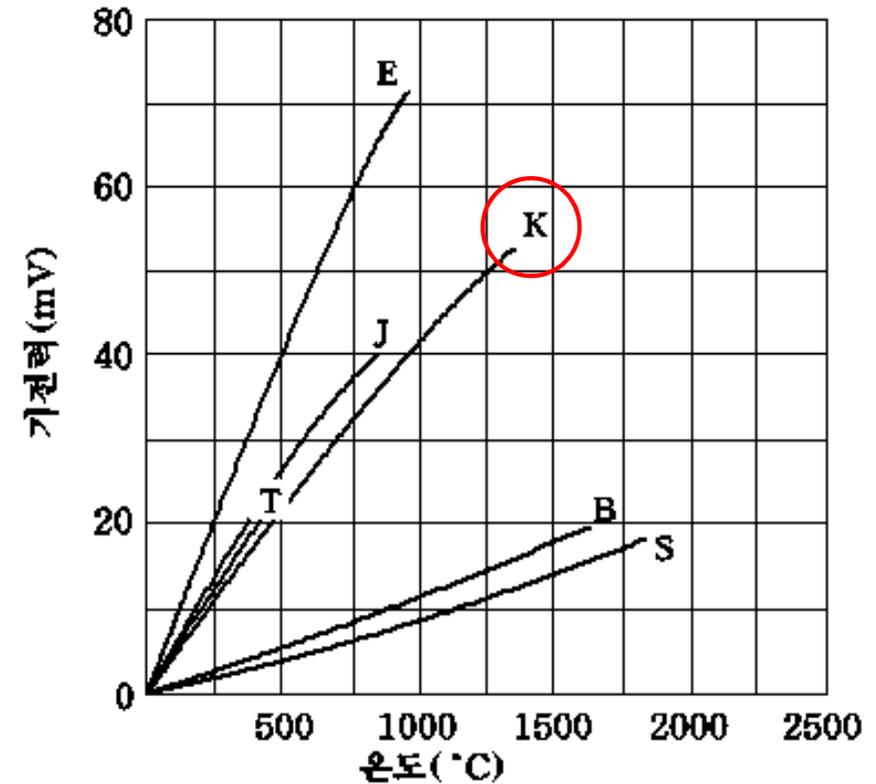
T= 온도

x= 열전대의 기전력(V)

$a_n$ =각 열전대에 의존하는 다항식 계수

n= 다항식의 최대차수

차수 이 증가하면, 다항식의 정확도도 증가한다. 대표적인 값은  $n=9$  이다.



- 시스템의 응답속도를 빠르게 하기 위해서 좁은 온도범위에 대해서는 더 낮은 차수가 사용될 수 있다.
- 열기전력을 온도로 변환하는데 사용되는 다항식의 예. → 표 4.6

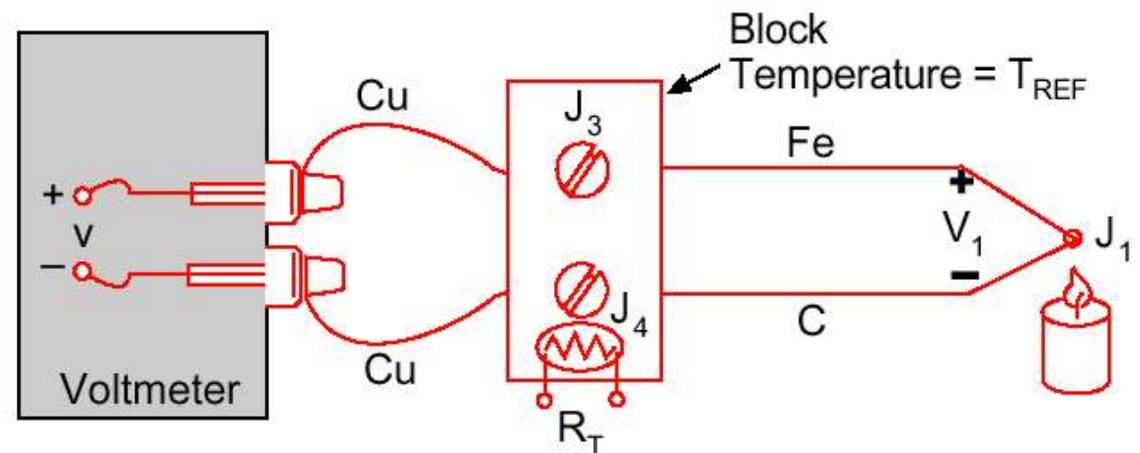
## ■ 열전대의 보상

- 열전대의 열기전력은 측온 접점과 기준접점의 온도 차에 의해서 결정되므로, 기준접점의 온도를 일정하게 유지하는 것이 매우 중요하다.
- 또, 열전대의 열기전력 규격은 기준접점의 온도가 0[°C]일 때의 값으로 규정하고 있다. 따라서, 기준접점의 온도가 0[°C]가 아닐 경우는 등가적으로 0[°C]가 되도록 기준접점 온도에 해당하는 열기전력을 보상해야 한다.
- 초기에는 얼음이나 전자냉각으로 0 °C 환경을 만들었으나 최근에는 회로적으로 처리하고 있다.
- 보상 방식에는
  - > 소프트웨어 보상(software compensation)
  - > 하드웨어 보상(hardware compensation)

HARDWARE COMPENSATION	SOFTWARE COMPENSATION
Fast Restricted to one thermocouple type per card	Requires more computer manipulation time Versatile - accepts any thermocouple

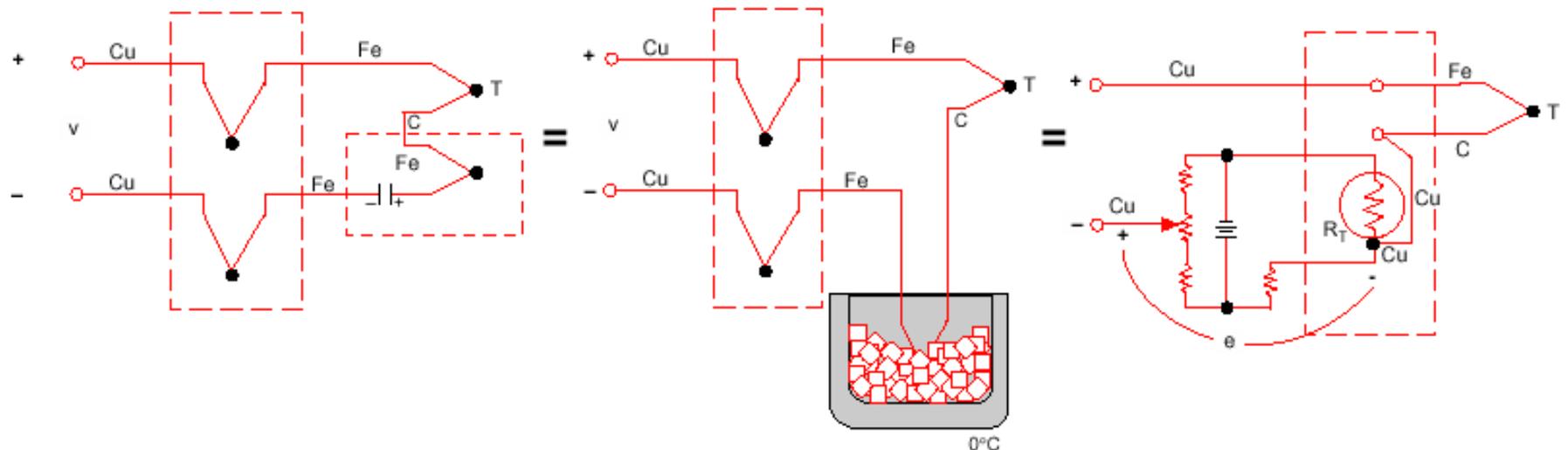
- 소프트웨어 보상(software compensation)

- 컴퓨터를 이용한 측정 시스템에서는 기준접점온도를 정밀한 다른 온도 센서로 측정하여 컴퓨터로 보내 열전대의 온도측정신호를 소프트웨어적으로 보상한다.
- 그림에서 기준 접점 ( $J_3$ 와  $J_4$ )은 같은 온도로 유지되도록 등온 블록(isothermal block)에 만들어진다. 먼저 기준 접점의 온도를 다른 온도센서(RTD, 서미스터, IC온도센서 등)로 측정하여 기준온도  $T_{ref}$  를 결정하고 이것을 등가 기준접점 전압  $V_{ref}$  로 변환한 다음, 전압계로 측정된 전압  $V$  에서  $V_{ref}$  를 뺀다. 이것으로부터  $V_1$  이 구해지면 이  $V_1$  을 온도  $T_{J_1}$  으로 변환한다. 이 과정을 컴퓨터가 수행한다.
- 소프트웨어 보상방식은 어느 열전대에도 적용 가능한 다양성이 있는 반면 기준접점 온도를 계산하는 데 추가의 시간이 요구된다.
- 그러므로 측정속도를 최대로 하기 위해서는 하드웨어 보상 방식을 사용한다.



- 하드웨어 보상(software compensation)

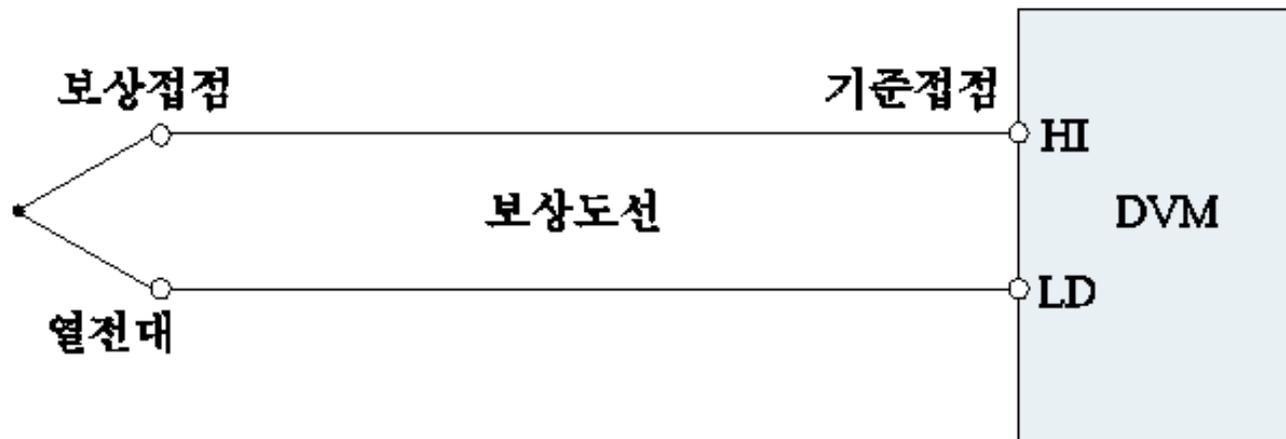
- 그림(a)와 같이 기준점점의 오프셋 전압을 상쇄하기 위해서는 배터리를 삽입하고, 이 보상전압과 기준점점 전압을 합하면 그림 (b)와 같이 기준점점 전압이  $0^{\circ}\text{C}$  점점의 전압과 동일하다.
- 그림 (c)는 이와 같은 원리를 이용한 보상회로이며, 전자빙점기준 (electronic ice point reference)이라고 부른다. 여기서, 보상전압  $e$ 는 온도 센서  $R_T$ 의 함수이며, 이제 기준점점의 온도가  $0^{\circ}\text{C}$ 와 동가이므로 측정 전압  $V$ 를 직접 온도로 변환하면 측정 점의 온도를 알 수 있다.
- 하드웨어 보상방식에서는 기준온도를 계산할 필요가 없으며, 속도가 빠른 장점이 있으나, 개개의 열전대 종류마다 이 회로가 필요한 것이 단점



HARDWARE COMPENSATION CIRCUIT

## ■ 열전대 배선 방법

- 열전대를 사용해서 온도를 측정하는 경우, 열전대를 계기에 직접 접속하는 것이 이상적이다. 그러나 일반적으로 열전대 단자(보상접점)로부터 기준접점까지는 거리가 떨어져 있다.
- 측정점과 계기사이의 거리가 먼 경우 열전대를 계기까지 연장하면 매우 고가로 되고, 구리 도선으로 접속하여 양 접점간에 온도차가 존재하면 새로운 열전대 회로가 형성되어 오차가 발생한다.
- 그래서 열전대와 같거나 거의 유사한 열기전력 특성을 갖는 보상도선을 사용하여 그림 4.16과 같이 열전대와 계기사이를 접속한다. 보상도선을 사용하면 기준접점까지 열전대를 연장한 것과 등가이다.



- 보상도선의 종류

> 확장형(extension) :

- 열전대와 동일한 재질을 사용
- 열전대와 동일 재질이므로 넓은 온도범위에 걸쳐 높은 정도를 유지할 수 있음
- 보상접점에서의 문제가 발생하는 일이 없으나, 가격이 고가로 됨

> 보상형(compensation) :

- 보상도선의 사용온도범위에서 열전대의 열기전력 특성과 거의 같다고 생각할 수 있는 대용합금을 사용
- 저렴
- 사용온도범위에 제약을 받음
- 오차가 크고
- 보상접점에서 문제가 발생할 가능성이 큼

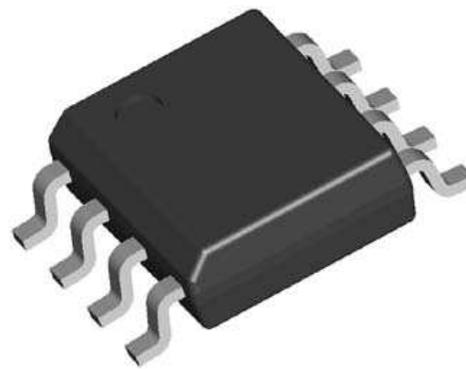
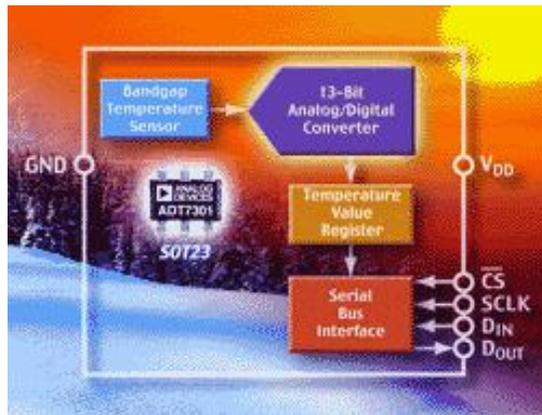
- 열전대 요약

ADVANTAGES	DISADVANTAGES
No Excitation Required	Non-Linear
Inexpensive	Needs Absolute Temperature Reference
Wide Variety of Materials	Small Voltage Output Signals
Wide Temperature Ranges	
Very Rugged	

*Thermocouple Advantages and Disadvantages*

## 4.5 반도체 온도센서

- 전통적으로 온도 센서하면 서미스터, 열전대, RTD 등이 주로 사용되었다. 이들 대부분은 출력특성이 비직선성을 갖기 때문에 외부에서 직선화(直線化; linearization)를 통하여 직선 출력을 얻는다.
- 근래에는 다이오드나 트랜지스터 온도센서와 직선화 회로를 일체화한 IC 온도센서가 개발되어 사용되고 있다.



## ■ 다이오드와 트랜지스터 온도센서

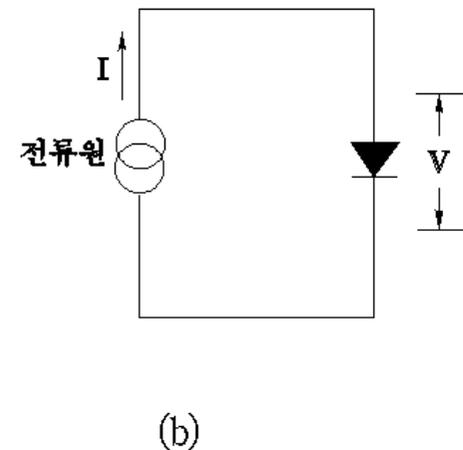
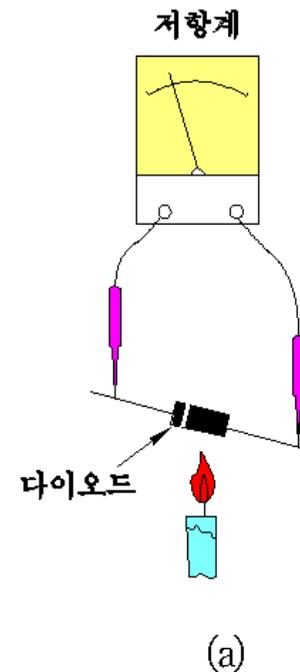
- 반도체 다이오드를 이용한 온도센서는 pn 접합에 걸리는 순방향 전압의 온도 의존성을 이용한다.
- 다이오드에 전압을 인가하였을 때 다이오드에 흐르는 전류는 다음 식으로 주어진다.

$$I = I_o \left[ \exp \left( \frac{qV}{k_B T} \right) - 1 \right] \quad I = I_S \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad V_T = \frac{kT}{q} = 25mV \text{ @ room temperature}$$

$$V = \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{I}{I_o} + 1 \right)$$

- 전압 감도는

$$S_T = \frac{dV}{dT} = \frac{k_B}{q} \ln \left( \frac{I}{I_o} + 1 \right)$$



- 만약 다이오드의 구동전류를  $I \gg I_o$  로 하면, 센서 출력전압과 감도는 각각

$$V \approx \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I}{I_o}\right)$$

$$S_T \approx \frac{k_B}{q} \ln\left(\frac{I}{I_o}\right)$$

- 위 식에서 전압온도 관계가 직선으로 될 것 같지만, 실제의 다이오드에서는 역방향 포화전류가 여러 전류 성분으로 구성되어 있고 또한 온도 의존성을 가지기 때문에 오차가 발생한다.
- 다이오드 온도센서의 측정 감도는  $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ 이다.

## ■ IC 센서의 기본 원리

- 서로 다른 전류 밀도로 동작하는 두 트랜지스터의 base - emitter 전압차를 이용한다.

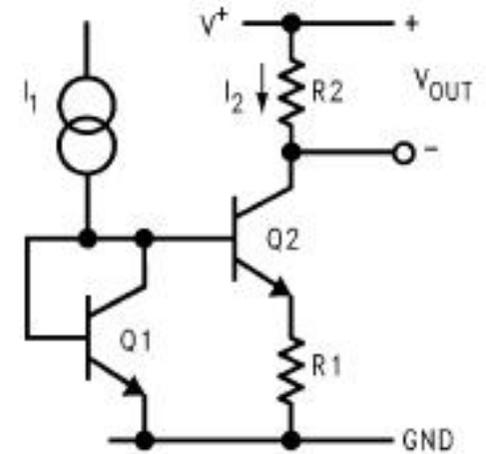
$$V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2}$$

- 저항  $R_1$ 의 양단전압은 트랜지스터  $Q_1$ 과  $Q_2$ 의 B-E 전압 차와 같으므로

$$V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_{E1}}{J_{E2}}\right)$$

$J_{E1}$ ,  $J_{E2}$  : 각각 트랜지스터  $Q_1$ 과  $Q_2$ 의 이미터 전류밀도

- $J_{E1}$  와  $J_{E2}$  의 비 ( $J_{E1} / J_{E2}$ )가 일정하게 유지되는 한, 이 전압 차는 온도와 직선관계로 된다. 오늘날 IC 온도센서의 대부분이 이 원리를 이용한다.



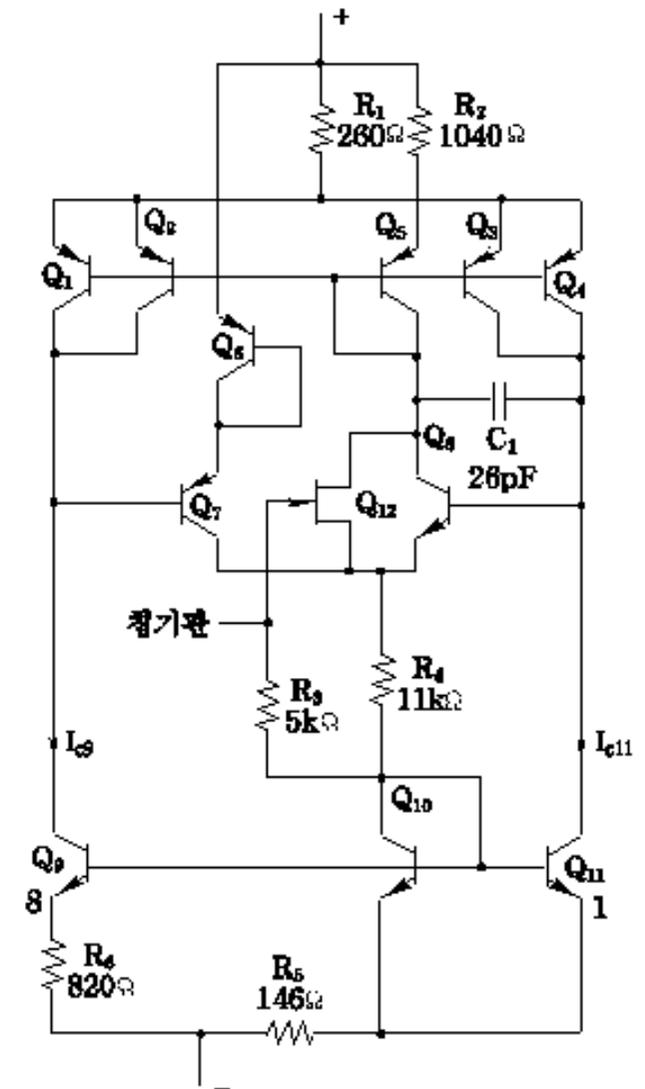
## ■ IC 센서 예 (I) - AD

### ● 회로

- 그림 (a)의 내부회로에서, 전류 미러 (current mirror) 회로에 의해서  $I_{C9} = I_{C11}$  로 만들고,  $Q_9$ 의 전류밀도는  $Q_{11}$ 의 8배가 되고 있다. 그 때문에의  $Q_9$ 의 베이스이미터 전압  $V_{BE9}$  과  $Q_{11}$ 의 베이스이미터 전압  $V_{BE11}$  사이에 전위차가 발생한다.

$$V_{BE} = V_{BE9} - V_{BE11}$$

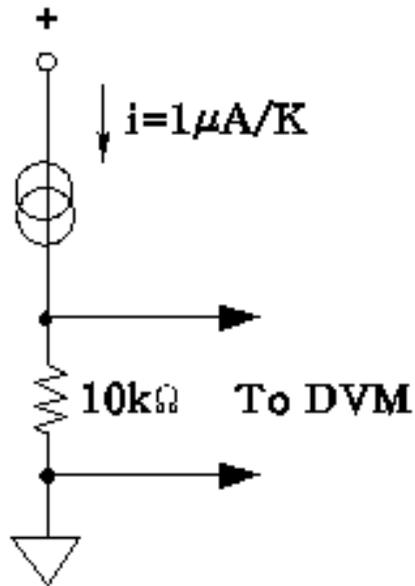
- 이 전압차가 온도와 직선관계로 된다. 이 전압차는 낮은 온도계수를 갖는 박막저항  $R_5$  와  $V_6$  를 통해 전류로 변환된다.



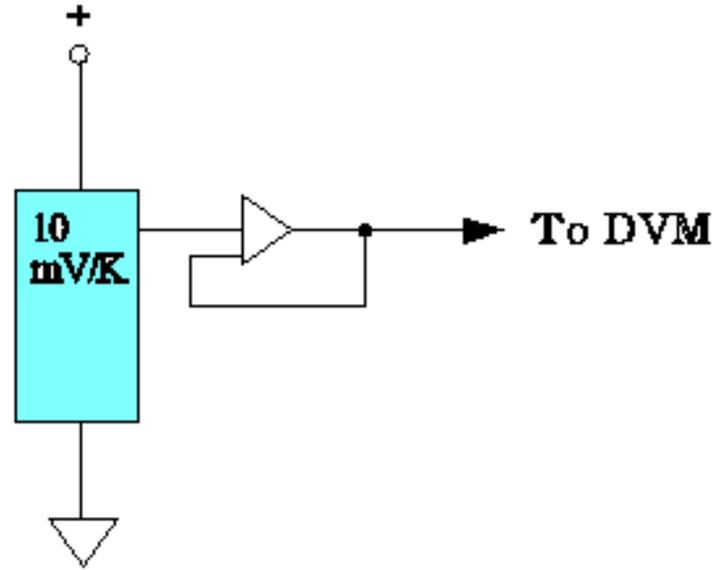
(a) 내부회로

- 출력 특성

- 전류 출력형(current output) : 감도는  $1 \mu\text{A}/^\circ\text{C} \sim 3 \mu\text{A}/^\circ\text{C}$
- 전압 출력형(voltage output) : 감도는  $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$



(a)



(b)

- 특성

- 온도에 대한 출력의 직선성이 우수함
- 출력 임피던스가 낮음
- 출력신호 레벨이 큼
- 정도가 충분히 실용적인 범위에 있음
- 결점 : 트랜지스터의 온도특성 변화를 이용하고 있기 때문에 사용온도범위가 한정되어 있음

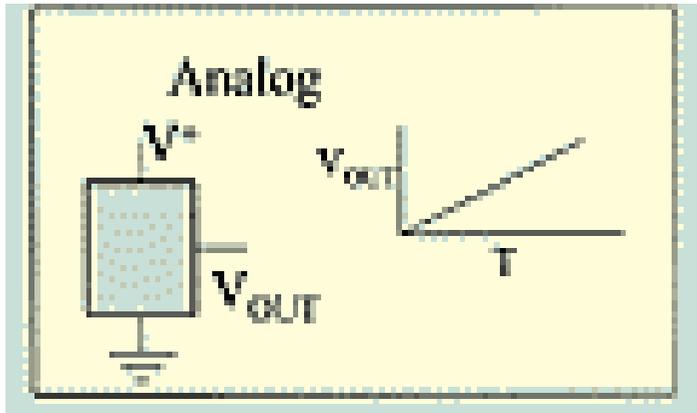
아날로그 출력을 갖는 각종 IC 온도센서의 특성 예

모델	감도	사용 온도 범위	확도
AD592CN	1 [ $\mu$ A/K]	-25 [°C] ~ +105 [°C]	$\pm$ 0.5 [°C]
ADT43	20.0 [mV/°C]	5 [°C] ~ +100 [°C]	$\pm$ 1.0 [°C]
AD22100K	22.5 [mV/°C]	-50 [°C] ~ +150 [°C]	$\pm$ 2.0 [°C]
LM35A	10.0 [mV/°C]	-55 [°C] ~ +150 [°C]	$\pm$ 1.0 [°C]
LM35D	10.0 [mV/°C]	0 [°C] ~ +100 [°C]	$\pm$ 2.0 [°C]
LM35B	10.0 [mV/°C]	-30 [°C] ~ +100 [°C]	$\pm$ 2.0 [°C]
LM62	15.6 [mV/°C]	-10 [°C] ~ +125 [°C]	$\pm$ 2.0 [°C]
TC1046	6.25 [mV/°C]	-40 [°C] ~ +125 [°C]	$\pm$ 2.0 [°C]
TMP1	5 [mV/K]	-55 [°C] ~ +125 [°C]	$\pm$ 1.0 [°C]
TMP17F	1 [ $\mu$ A/K]	-40 [°C] ~ +105 [°C]	$\pm$ 2.5 [°C]

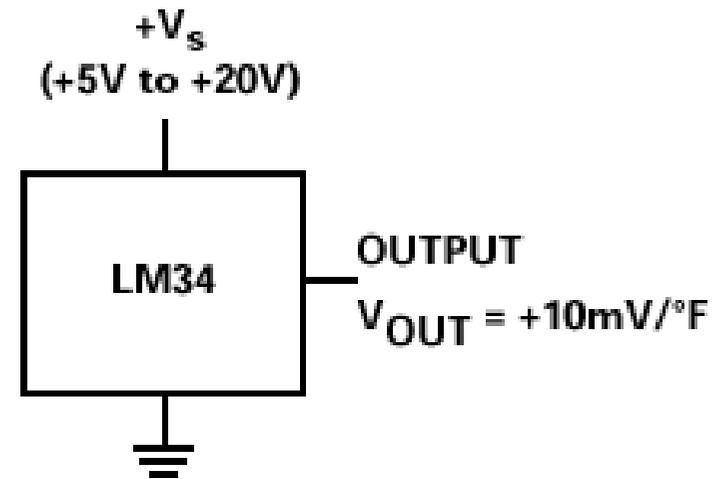
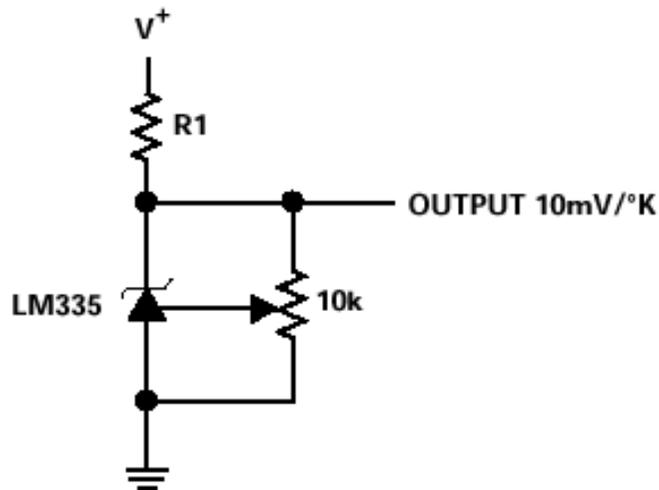
- IC 센서의 응용

- (a) Analog temperature sensor

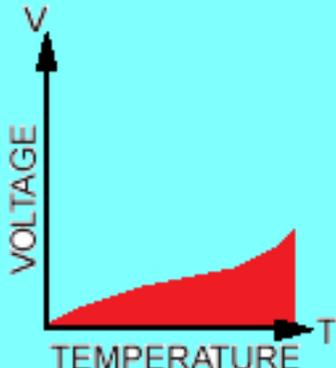
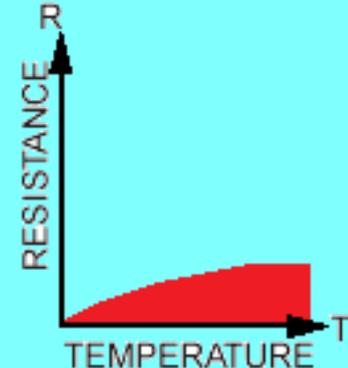
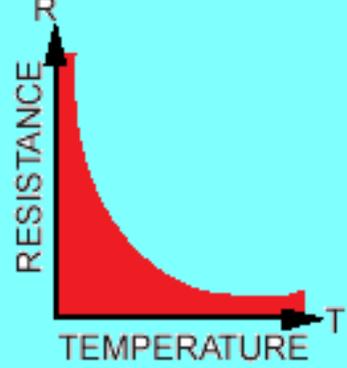
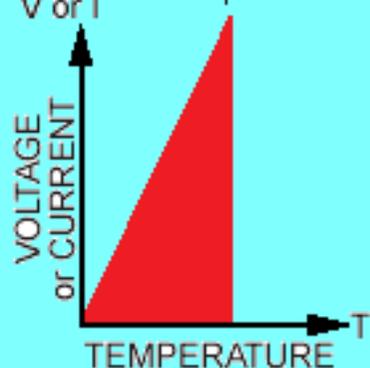
An ideal analog sensor provides an output voltage that is a perfectly linear function of temperature .



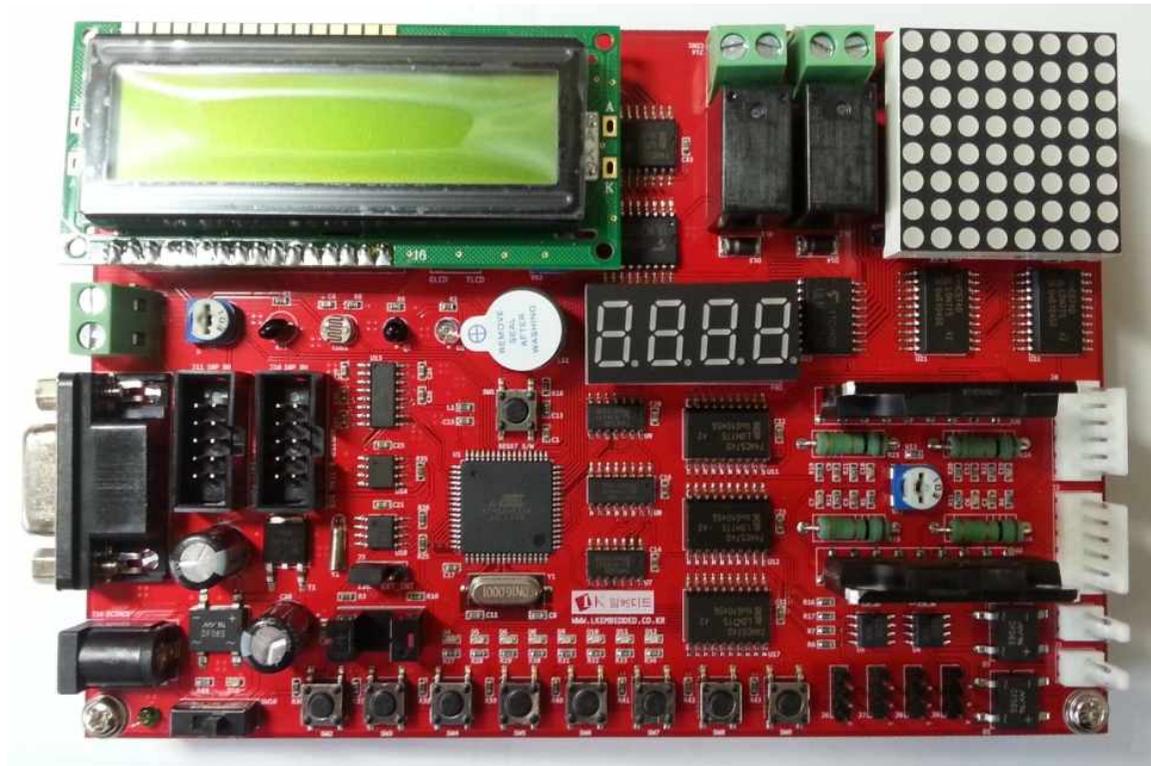
Voltage output analog sensor



# Summary

	<b>Thermocouple</b>  	<b>RTD</b>  	<b>Thermistor</b>  	<b>IC Sensor</b>  
<b>Advantages</b>	<input type="checkbox"/> Self-powered <input type="checkbox"/> Simple <input type="checkbox"/> Rugged <input type="checkbox"/> Inexpensive <input type="checkbox"/> Wide variety <input type="checkbox"/> Wide temperature range	<input type="checkbox"/> Most stable <input type="checkbox"/> Most accurate <input type="checkbox"/> More linear than thermocouple	<input type="checkbox"/> High output <input type="checkbox"/> Fast <input type="checkbox"/> Two-wire ohms measurement	<input type="checkbox"/> Most linear <input type="checkbox"/> Highest output <input type="checkbox"/> Inexpensive
<b>Disadvantages</b>	<input type="checkbox"/> Non-linear <input type="checkbox"/> Low voltage <input type="checkbox"/> Reference required <input type="checkbox"/> Least stable <input type="checkbox"/> Least sensitive	<input type="checkbox"/> Expensive <input type="checkbox"/> Current source required <input type="checkbox"/> Small $\Delta R$ <input type="checkbox"/> Low absolute resistance <input type="checkbox"/> Self-heating	<input type="checkbox"/> Non-linear <input type="checkbox"/> Limited temperature range <input type="checkbox"/> Fragile <input type="checkbox"/> Current source required <input type="checkbox"/> Self-heating	<input type="checkbox"/> $T < 200^{\circ}\text{C}$ <input type="checkbox"/> Power supply required <input type="checkbox"/> Slow <input type="checkbox"/> Self-heating <input type="checkbox"/> Limited configurations

# Sensor System Design



- Stepping motor, Buzzer, Relay
- Stepping motor 동작 원리

- 과제내용

- 기본 예제 프로그램 이해(stepping motor)
- 예제 프로그램을 수정하여 스위치와 모터 회전 속도, 방향 등을 표현하기
- Buzzer, Relay 프로그램 이해하고 예제 프로그램에 대한 동작 확인하기