

# 제 11 장 온도 측정과 열전도도

## 1. 목 적

온도 측정의 여러가지 방법을 살펴보고 그 중에서 열전대(Thermocouple)를 이용한 방법을 익힌다. 열전대 시그널의 신호 처리와 온도 환산과 관련한 측정의 불확실성에 대해서도 알아본다. 온도 측정을 통하여 고체의 열전도도를 결정하는 실험을 한다.

## 2. 예습부분

- (1) Mechanical Measurements(4th Ed.), T. G. Beckwith & R. D. Marangoni, pp. 23-26, pp. 571-601, pp. 611-628

## 3. 실험장치

- (1) DC Power Supply 2대
- (2) 보온 용기
- (3) 유리 막대형 온도계
- (4) Thermocouple T형, K형
- (5) Digital Thermometer
- (6) Home made Amplifier Set
- (7) A/D Converter, PC/AT
- (8) 열전도 측정 간이 실험 장치
- (9) 촛불, 비이커, 소형 Heater, 얼음

## 4. 이 론

### 4.1 온도의 측정

온도는 질량, 길이, 시간과 같이 중요한 물리량이나 정의하기가 매우 힘들다. 온도는 「열을 이동하게 하는 포텐셜」이라든가 「열원(heat source)과 수열

체(heat sink)가 있는 Carnot 기관에서 출입한 열량을 비례적으로 나타내주는 양』이라는 정의를 포함해 많은 종류의 정의가 있다. 「뜨겁다」, 「차갑다」는 표현을 가능하게 하는 온도는 기체의 경우 분자 운동의 정도를 나타내는 개념이며, 열의 형태로 에너지가 들어가거나 빠져나와 전달되면 분자 운동이 달라져서 온도의 변화가 생기게 된다.

온도의 변화에 따라 몇가지 기본적인 변화가 생기게 되는데, 이것을 이용해 온도를 측정할 수 있다. 이것은 곧 (1) 물리적 상태의 변화 (2) 화학적 상태의 변화 (3) 물리적 크기의 변화 (4) 전기적 성질의 변화 (5) 복사량의 변화 등이다. 위의 (1), (2)의 성질을 직접 온도 측정에 응용하지는 않으나 물리적 상태의 변화, 즉 응고, 용해, 비등에 따라 온도의 표준을 정한다. 일반적으로 많이 사용되는 liquid-in-glass, gas, bimetal-type 온도계는 물리적 크기의 변화를 이용하여 온도를 측정한다. 전기적인 방법을 이용한 온도 측정은 온도 변화에 의해 전기 전도도가 달라지는 성질을 이용하거나 (Thermistor), 서로 다른 두 금속의 접점에서 열전기적 효과에 의해 기전력(emf : electromotive force)이 발생하는 것을 이용하는 것(Thermocouple)이다. 표 11.1은 여러가지 온도 측정 방법과 각 경우의 정밀도를 나타낸다.

표 11.1 온도 측정방법의 종류

Type	Useful Range*	Limits of Uncertainty*	Comments
<b>Liquid in Glass</b>			
Mercury filled	-35 to 600°F -37 to 320°C	0.5°F 0.3°C	Low cost. Remote reading not practical.
Pressurized mercury	-35 to 1000°F	"	Lower limit of mercury-filled thermometers determined by freezing point of mercury.
Alcohol	-100 to 200°F -75 to 129°C	1°F 0.6°C	Upper limit determined by boiling point.
<b>Pressure Systems</b>			
Gas (laboratory)	-450 to 212°F -270 to 100°C	0.002 to 0.5°F 0.002 to 0.2°C	Very accurate. Quite fragile. Not easily used.
Gas (industrial)	-450 to 1400°F -270 to 760°C	0.5 to 2% "	Bourdon pressure gage used for readout. Rugged, with wide range.
Liquid (except mercury)	-125 to 700°F -90 to 370°C	2°F 1°C	Relative elevations of readout and sensing bulb are critical. Smallest bulb. Up to 10 ft (3 m) capillary.
Liquid (mercury)	-35 to 1200°F -37 to 630°C	1 to 2% "	" " "
Vapor pressure	-100 to 650°F	1 to 2%	Fast response. Nonlinear. Lowest cost.
Bimetal	-80 to 800°F -65 to 430°C	1 to 20°F 1 to 12°C	Rugged. Inexpensive.

Table 16.1 continuing

Type	Useful Range*	Limits of Uncertainty*	Comments
<b>Thermocouples</b>			
<i>General</i>	-420 to 4400°F -250 to 2400°C	1°F 0.6°C	Extreme ranges—all types.
<i>Type B (Pt, 30% Rh(+) vs. Pt, 6% Rh(-))</i>	1600 to 3100°F	±½%	Not for reducing atmosphere or vacuum. Generates high emf per degree.
<i>Type E (Chromel†(+) vs. Constantan†(-))</i>	-300 to 1600°F -184 to 870°C	±½%	Highest output of common thermocouples.
<i>Type J (Fe(+) vs. Alumel†(-))</i>	32 to 1400°F	2 to 10°F‡ 1 to 6°C	For reducing or neutral atmosphere. Popular and inexpensive.
<i>Type K (Chromel(+) vs. Alumel†(-))</i>	32 to 2300°F 0 to 1260°C	±½%‡	For oxidizing or neutral atmosphere. Attacked by sulfur. Most linear of all thermocouples.
<i>Type R (Pt(+) vs. Pt, 13% Rh(-))</i>	32 to 2700°F 0 to 1480°C	½%	Requires protection in all atmospheres. Higher output than Type S. Linearity poor below 1000°F (540°C).
<i>Type S (Pt(+) vs. Pt, 10% Rh(-))</i>	32 to 2700°F 0 to 1480°C	¼%‡	Requires protection in all atmospheres. Under proper conditions yields highest precision. Used as interpolating device for IPTS-68 (see Section 2.8).
<i>Type T (Cu(+) vs. Constantan†(-))</i>	-420 to 650°F -250 to 340°C	1°F 0.6°C	May be used in either oxidizing or reducing atmospheres. Good stability.
<i>W, 5% Rh(+) vs. W, 26% Rh(-)</i>	-450 to 4200°F -270 to 2310°C	—	No standards. Reducing or neutral atmospheres. Highest temperature limit of all thermocouples.
<b>Resistance</b>			
<i>Platinum</i>	-450 to 1800°F -180 to 980°C	0.2°F 0.1°C	High repeatability. Linear. Used as an interpolating device for IPTS-68 (see Section 2.8). Sensor can be used as far as 5000 ft (1500 m) from readout.
<i>Nickel</i>	-300 to 500°F	—	High repeatability. Nonlinear. Produces greater resistance change per degree than does Pt. Sensor can be as far as 5000 ft (1500 m) from readout.
<i>Thermistor</i>	-150 to 600°F -100 to 315°C	½°F 1.4°C	Negative temperature coefficient. Highly nonlinear. Less stable than metal types.
<i>Semiconductor</i>	-67 to 300°F -55 to 150°C	2°F 1°C	Limited range. Easily adapted to electronic circuitry.
<b>Pyrometers</b>			
<i>Optical</i>	1400 to 6300°F	¼ to 2%	Used only for high temperatures. Requires manual manipulation by operator.
<i>Radiation</i>	0 to 7000°F -15 to 3870°C	"	Can measure "spot" or average temperatures.
<i>Infrared</i>	0 to 6000°F -15 to 3300°C	"	Portable. Self-contained. Expensive.
<i>Acoustic</i>	-400 to 5600°F -240 to 3100°C	1%	
<i>Crystal</i>	-420 to 1830°F -250 to 1000°C	0.4°F 0.2°C	

## 4.2 전도열전달

열의 전달은 온도 차이가 있는 곳에서 일어난다. 어떤 물체의 두 지점이 각각 다른 온도에 놓여 있다면 그 사이에 있는 물질의 성질에 따라서 전달되는 열의 양이 다르게 나타난다. 이와 같이 물질 내부의 온도차에 의하여 열이 전달되는 것을 전도(conduction)라고 부른다. 이 현상은 전류가 저항이 있는 도선을 거치면서 흐르는 것과 상사 관계에 있다.

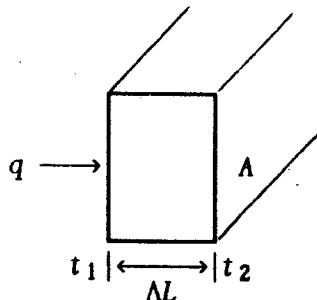
전도에 의하여 전달되는 열량은 그 물질의 단면적에 비례하여 늘어나고 거리에 따라 역비례하며 온도차에 비례한다. 이 관계식을 정리하여 표시하면,

$$\frac{q}{A} \propto \frac{\Delta t}{\Delta L} \quad \text{또는} \quad q = kA \frac{dt}{dx}$$

이 되며 이것을 흔히 Fourier의 열전도 관계식이라고 부른다. 이 비례 관계식의 비례 상수  $k$ 는 물질의 고유 특성으로서 열전도도(thermal conductivity)라고 부르며 온도범위가 크지 않은 경우에는 일정한 값을 갖는다. 전형적인 물질의 열전도도를 비교하여 보면 표 11.2와 같다.

표 11.2 각종 물질의 열전도도 (상온기준, 단위 W/m°C)

기 체		액 체		고 체	
수 증 기	0.025	엔진오일	0.14	유리성분	0.038
헬륨 기	0.15	굴리세린	0.28	나 무	0.1
공 기	0.026	물	0.59	유 리	0.878
이산화탄소	0.025	수 은	8.69	스테인레스강	19
				철	73
				알루미늄	204
				구 리	386
				은	419

Fig 11.1  $t_1$ 과  $t_2$ 의 온도를 유지하고, 두께가  $\Delta L$ 인 평면벽

그러면 Fourier의 법칙을 Fig.11.1과 같은 평면벽에 적용하여보자.(1-D, steady state) 열전도도가  $k$ 인 물질이  $\Delta L$ 의 간격을 두고  $t_1$ 과  $t_2$ 의 온도를 유지하고 있다면, 이때의 열전달량은

$$q = - \frac{kA}{\Delta L} (t_2 - t_1), \quad (k \text{는 일정})$$

이 된다.

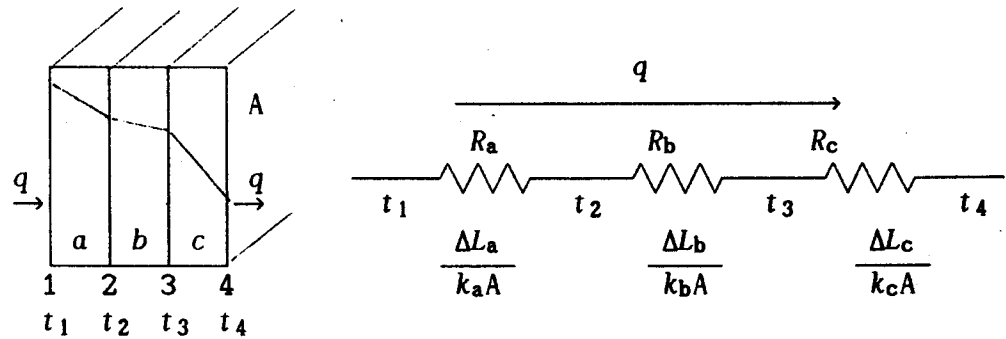


Fig.11.2 재질  $a, b, c$ 의 열전도도가 각각  $k_a, k_b, k_c$ 이고, 두께가 각각  $\Delta L_a, \Delta L_b, \Delta L_c$ 인 평면벽

Fig.11.2와 같은 3개의 다른 재질로 된 벽을 고려 할때 열의 전달량은 모든 단면 위치에서 같으므로

$$q = - k_a A \frac{t_2 - t_1}{\Delta L_a} = - k_b A \frac{t_3 - t_2}{\Delta L_b} = - k_c A \frac{t_4 - t_3}{\Delta L_c}$$

$$\therefore q = \frac{t_1 - t_4}{\Delta L_a / k_a A + \Delta L_b / k_b A + \Delta L_c / k_c A}$$

따라서 Heat flow( $q$ ) =  $\frac{\text{total temperature difference}}{\text{thermal resistance}}$ 로 표현할 때

열저항(thermal resistance)은 위식 우변의 분모를 뜻한다.

#### 4.3 열전대를 이용한 온도 측정

##### (1) 열전대(熱電帶, Thermocouples)

열전대(熱電帶, Thermocouples)는 온도 측정기 중에서 체온계를 제외

하고 제일 많이 쓰이는 기기이다. 열전대는 비교적 염가이며, 크기가 작고, 또한 특성을 적절히 이해하고 있으면 놀랄만하게 정확하다.

## (2) 재 료

熱電(thermoelectric)효과가 다른 두가지 재료의 선을 연결하면 바로 열전대로 사용할 수 있다. 선을 한쪽 끝에서 접합시키고 나머지 두 끝을 전압 측정 장치에 연결하기만 하면 사용 가능한 온도 측정 시스템이 된다. 접합된 부분의 온도가 나머지 끝부분의 온도와 다르면 온도차에 따라서 전압차가 발생한다. 아래 표 11.3에 나열되어 있는 재료들은 열전극성의 순서로 되어 있다. 이 표의 윗 부분에 나타난 재질은 아랫 부분 어떤 재질에 대해서도 '양(+)'의 극성을 나타내며, 각 사용온도 범위에 따라 분류하였다. 따라서 Copper-Constantan 열전대의 경우 차가운 쪽의 copper선은 constantan(Cu 55%, Ni 44%, Mn, Fe 1%의 합금)의 차가운쪽 도선보다 양의 극성을 나타낸다.(일반적으로 열전대 명칭은 양극재의 소재를 붙여, 예컨대 '크로멜-알루멜 열전대'처럼 붙이거나 관용상 'K형', 'T형' 처럼 붙이기도 한다.)

표 11.3

100℃	500℃	900℃
antimony chromel iron nichrome copper silver Pt 90 Rh 10 platinum alumel constantan bismuth	chromel nichrome copper silver Pt 90 Rh 10 Pt cobalt alumel constantan	chromel nichrome silver gold iron Pt 90 Rh 10 Pt alumel nickel constantan

흔히 사용되는 열전대의 쌍을 표11.4에 나열하였다. 이들 조합은 다년간의 경험으로 온도 대비 emf 특성의 선형성, 안정성 및 재현성이 매우 높고 온도 측정 범위가 넓은 이유로 선정되었다. 널리 쓰이는 열전대는 피복의 색깔을 달리하여 쉽게 구분하는 것에 유의하라.

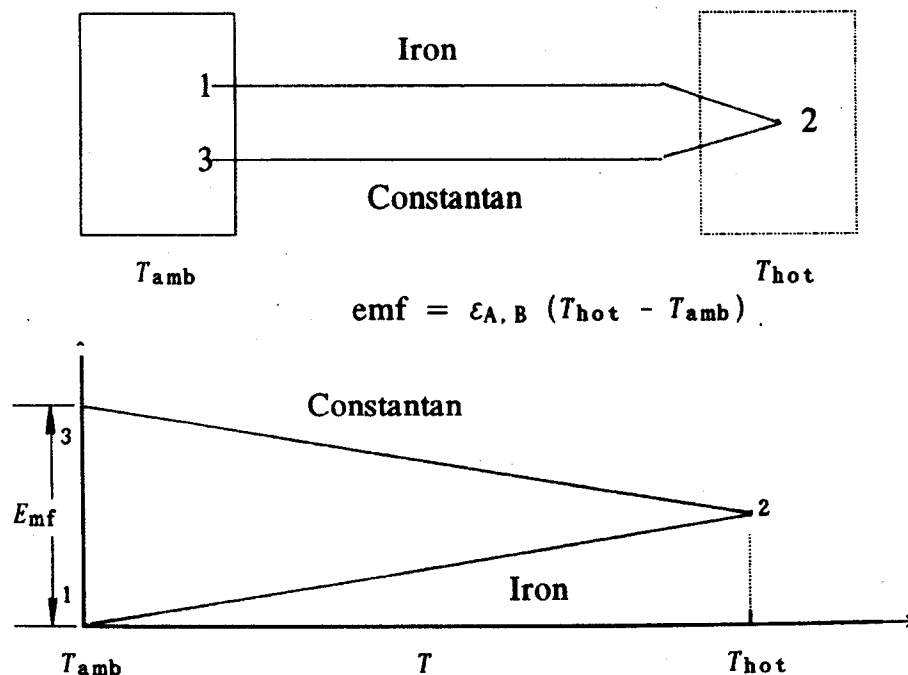
표 11.4

Type	Color-Code	Element	Operating Range	Output mV/100°C
R		Pt-Pt, 13% Rh	600~1600°C	1.2
S		Pt-Pt, 10% Rh	600~1600°C	1.2
K	Yellow-Red	Chromel-Alumel	0~1400°C	4.1
(E)		Chromel-Constantan	0~1000°C	6.5
J	White-Red	Iron-Constantan	-200~ 800°C	5.4
T	Blue-Red	Copper-Constantan	0~ 400°C	4.8

D.C. 전압을 millivolt 단위로 측정하고 5~10 microvolt의 분해 능력이 있으면 열전대의 측정기로 사용할 수 있다. 이때 전압 측정기의 정확도가 온도 측정 결과를 직접적으로 결정하게 된다. 또한 열전대의 전압차는 열전대 양단의 온도차를 나타내므로 온도 측정의 정밀도는 전압 측정과 함께 『기준접점(reference junction)』의 온도를 얼마나 정확하게 알고 있는가에 따라 결정된다.

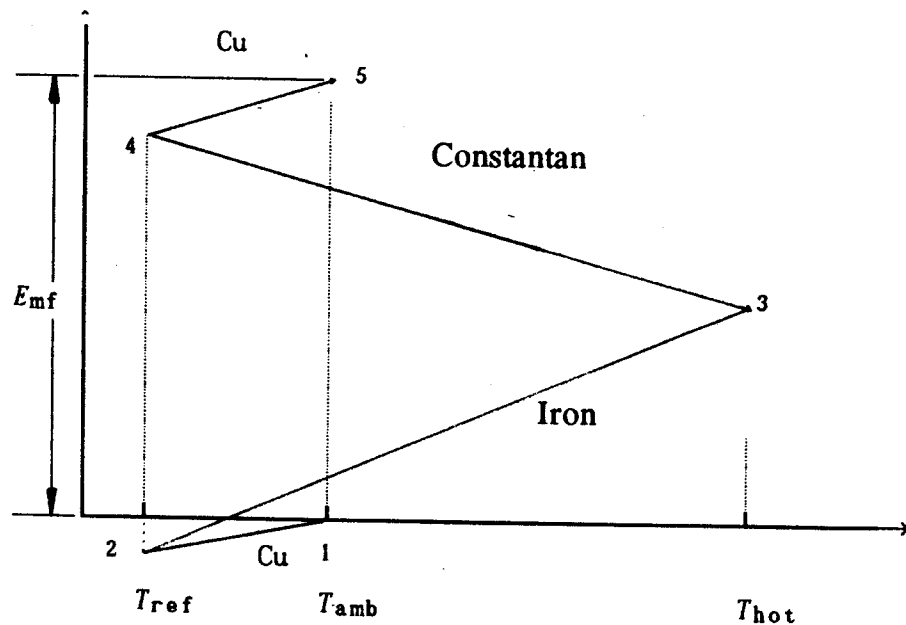
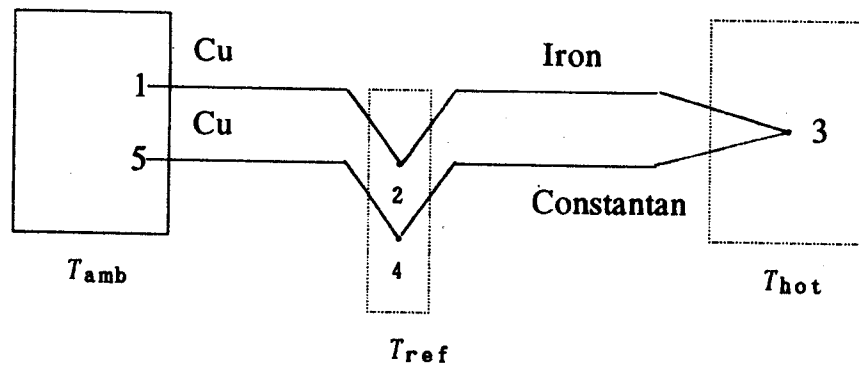
### (3) 열전대회로

가장 간단한 회로는 아래 그림과 같이 두 개의 선을 한쪽에서 접합시키고 측정하고자 하는 곳에 놓은 뒤 다른 두 끝단을 측정 기기에 연결한 것이다.



이와 같은 회로는 실내 온도가 수시로 바뀌므로  $1^{\circ}\text{C}$ 이내의 정확도로 측정하고자 할 때는 사용되지 않고 있다.

실내 온도 측정이 필요없게 하는 방법으로 기준 온도 접점을 활용할 수 있다. 기준점은 빙점이나, 삼중점 또는 전기적으로 제어할 수 있는 온도를 쓸 수 있다. 아래 그림에 간략하게 나타나 있다.



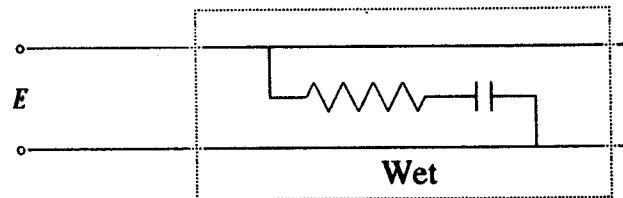
여기에서 구리 도선은 회로의 기전력 측정에 아무 영향도 미치지 않는다는 것을 주목하여야 한다.

#### (4) 열전대 측정의 오류 발생 요인

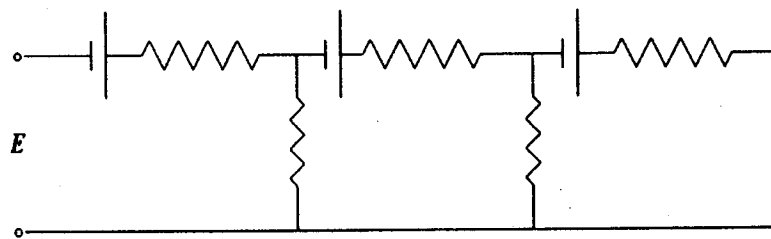
열전대는 D.C.시그널을 주기 때문에 측정기에서 감지되는 A.C.시그널



은 소음으로 처리하여 없애주고 접지를 주의깊게 유지시켜 주어야 한다. 열전대 자체의 문제로 流電 기전력(galvanic emf)과 변형에 따른 기전력(strain-induced emf)을 들 수 있다. 열전대는 극성이 다른 전압원의 쌍이 존재하기 때문에 전해물질이 있는 경우에는 流電 기전력이 발생할 수 있다. Iron-constantan의 경우에는 이 효과가 가장 크게 나타나서 전해질 속에 담가 두었을때 약 250 mV를 발생시킨다. Type K 또는 Type T는 이같은 효과가 크지 않은 것으로 알려져 있다. 이 때의 회로구성은 아래와 같이 표시할 수 있다. 따라서 이 때의 시스템 출력은 온도차에 의한 emf에 순환 전류 회로에서의 유전 기전력을 더한 값이 될 것이다.



이와 같은 상황은 길다란 열전대 도선의 중간에서 일부 단락(partial shunt)되는 경우에도 나타난다. 도선의 절연 재질이 일부 파손되어 저항을 갖고 연결되어 있는 형태로 이해할 수 있다. 이 때 측정되는 기전력은 다음의 가상 회로를 해석하여 평가할 수 있다.



K형 열전대는 유전 기전력은 걱정하지 않아도 좋으나 변형에 매우 민감하다.(즉, 잡아당기거나 하는 등의 냉각 변형이 일어나면 보정을 새로 해주어야 한다.) 이것은 마치 스트레인-게이지와 같이 변형에 따라서 emf를 유기시킨다. 온도 측정은 열전대가 연결된 도선이 진동하는 경우에 온도 측정이 교란받을 수 있다. T형은 이같은 문제가 비교적 적다.

## 5. 참고자료

### 5.1 에너지, 열, 온도, 열전달, 열유속

#### (1) 온도 눈금

우리가 흔히 사용하는 온도계는 유리 막대 온도계와 같이 온도 차이를 눈금으로 바로 읽을 수 있게 해 주고 있다. 이렇게 읽을 수 있는 온도는 어떤 값인가? 온도는 덥고 차가운 정도를 나타내는 척도이며 사람의 감각으로도 느낄 수 있는 차이를 수치값으로 환산하여 정량화한 표준 단위라고 할 수 있다. 실제로 사람의 감각은 약  $1^{\circ}\text{C}$  정도의 기온 변화에도 민감하게 반응하여 옷을 꺼입거나 벗어내기도 하며, 목욕물의 온도가  $0.5^{\circ}\text{C}$  정도 다를 때 알아차리고 불평을 털어놓기도 한다.

이렇게 온도값을 수치로 환산해서 표시하고자 하는 노력은 독일의 기기 제작 전문가인 Fahrenheit(1686 - 1736)가 포도주의 저장 조건을 반복성있게 지적해 주기위해 역시 포도주가 들어있는 병의 눈금을 정하면서 본격화되었다. 이 눈금에 의하면 대기압 상태에서 물이 어는 온도가  $32^{\circ}\text{F}$  그리고 끓는 온도가  $212^{\circ}\text{F}$ 으로 된다. Celcius의 눈금에 의하면 이 온도가 각각  $0^{\circ}\text{C}$  그리고  $100^{\circ}\text{C}$ 가 된다. 그러나 물이 녹거나 끓는 온도는 대기압이 바뀔에 따라 바뀔 수 있으므로 완벽하게 재생 가능한 조건이 아닐 수 있다. 이러한 이유에서 온도 기준점을 선정하게 되었으며 이 중에 가장 잘 알려져 있는 기준점이 물의 삼중점 온도로  $0.01^{\circ}\text{C}$ 에 해당한다. 물과 얼음 그리고 수증기가 공존할 수 있는 온도는  $0.01^{\circ}\text{C}$  밖에 없다 (이 때의 압력은  $0.6113\text{ kPa}$ 이며 이것은 대기압의 6천분의 1에 해당한다.)

또 한 가지 유용하게 사용되는 온도 눈금으로 절대 온도 눈금을 들 수 있다. 이 이름에서 의미하는 바와 같이 이 눈금으로는 마이너스 값이 존재하지 않으며, 가장 낮은 값이 영이 된다. 국제 표준에서 쓰이는 절대 온도는 Kelvin(1824 - 1907)의 이름을 따라 켈빈 눈금이라고 부르고 'K'라는 약자로 단위를 표시한다. 절대 온도 눈금은 물질의 성질과 그 성질 상호간의 관계에서 자주 등장하게 된다. 특별히 이상적인 기체의 압력과 체적의 관계는 온도에 따라 결정되는데 이러한 현상을 이용하여 온도를 측정하는 온도계를 만들 수 있으며 이를 기체 온도계(또는 등체적 기체 온도계)라고 부른다. 즉 일정한 체적안에 들어있는 기체의 압

력이 온도와 비례한다는 것을 이용하여 압력을 측정하는 계기(예를 들면 U-관 마노미터 등)를 통하여 기체의 온도를 알아낼 수 있다.

절대 온도와 관련있는 중요한 현상으로 흑체 복사를 들 수 있다. 스테판·볼츠만 법칙 또는 플랑크 관계식으로 잘 알려져 있는 이 관계식은 어떤 물체든지 자기 자신의 온도의 네 제곱에 비례하는 에너지를 밖으로 내 보내고 있다는 것이다. 이 관계는 고온 물체의 온도를 결정하는데 결정적으로 중요한 역할을 하고 있다. 즉 복사 에너지의 양을 알면 그 물체의 온도를 알 수 있게 되는 것이다.

## (2) 熱, 에너지, 溫度

熱과 溫度는 우리의 일상 생활에서 매우 자주 접함에도 불구하고 그 정확한 의미를 혼동하기가 쉽다. 예를 들어 감기들어 고생하는 아이의 머리를 짚으면서 어머니는 『아이구, 열이 대단히 높구나』하고 걱정을 한다. 여기에서 정확한 표현은 열이 높은 것이 아니라 온도가(즉 체온이) 높다고 하여야 할 것이다. 그러나 체온이 높아 『열이 많이 난다』고 하는 표현은 올바른 것이다. 간단하게 이야기 한다면 열은 에너지가 이동하는 방법중의 한 가지이며 온도는 에너지의 높고 낮음을 나타내는 척도라고 말할 수 있다. 열을 많이 받아들이면 에너지의 수준이 높아지며 그에 따라서 온도는 올라가게 된다. 또한 특별한 措置를 취하지 않는다면 두 물체 사이에서의 열전달은 높은 온도쪽으로 부터 낮은 온도쪽으로 일어나게 된다. 이와 같이 열과 온도는 항상 붙어 다니는 친구와 같이 매번 함께 모습을 나타나는 것 같으나 다른 얼굴을 가진 쌍둥이와 같다고 표현해 볼 수 있다.

다른 예를 들어서 설명해 보기로 하자. 두 개의 물탱크가 관으로 연결되어 있다고 하자. 우리는 직관적으로 두 탱크의 물 높이가 같지 않으면 높은 쪽에 있는 물이 낮은 쪽으로 옮겨와 결국에는 두 탱크의 물 높이가 같아지며 이러한 상태가 특별히 외부에서 영향을 미치지 않는한(예를 들면 연결관 사이에 펌프를 설치하고 작동시켰다든가) 그대로 유지될 것이라는 것을 의심하지 않고 당연하게 생각하고 있다. 물탱크 A와 B사이에서 물이 흘러가게 만드는 원동력은 각각 탱크에서의 물 높이이다. 물 높이가 높은 탱크는 낮은 탱크 쪽으로 물을 흐르게 할 수 있는 잠재 능력을 갖고 있다고 말 할 수 있다.

에너지는 변화를 일으킬 수 있는 잠재력이다. 그 변화는 물이 흐른다면

가 또는 열이 전달되는 것을 뜻한다. 그런데 이 변화를 일으키게 만드는 잠재 능력의 크기를 말할때 물 탱크의 예에서는 물 높이가 적당한 척도일 것이며 열을 전달하는 물질과 물질사이(때로는 이것을 시스템과 주변 환경이라고 부르기도 한다)에서는 온도가 알맞은 잣대가 된다. 즉 온도가 높은(에너지가 많은) 물질이 온도가 낮은(에너지가 적은) 물질과 맞닿으면 그 사이에서는 열전달이 일어나게 되며 궁극적으로 두 물질이 같은 온도가 될 때까지(마치 물높이가 같아지듯) 계속하여 열이 흐르게 된다.

앞에서 말한 類似(analogy)를 생각해 볼 때 물 높이와 물의 흐름은 혼동되지 않으나 온도와 에너지는 명확하게 구분하지 못하고 있었다는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 물의 흐름은 눈으로 쉽게 관찰이 가능하지만 열이 옮겨 간다는 것은 특별한 경우에 피부로 겨우 느낄 수는 있지만 눈으로 직접 볼 수 없기 때문에 그만큼 덜 익숙하기 때문일 뿐이다. 마찬가지로 온도의 높고 낮음도 잴 수는 있지만 물탱크의 물 높이처럼 분명하게 변화를 일으킬 수 있는 잠재력의 척도로서 쉽게 와 닿지 않는 것은 단지 과학적 사고에 대한 연습과 훈련의 부족일 뿐이다.

### (3) 열전달, 열유속

열은 에너지와 동등한 개념이지만 한 곳에서 다른 곳으로 이동중일 때에 정의되는 값이라고 할 수 있다. 이와 같이 열이 이동하는 현상을 열의 전달 즉 열전달이라고 부른다. 열전달은 열역학 제 2법칙에서 뜻하는 바와 같은 높은 온도에 있는 물질이 갖고 있는 에너지 중 일부가 낮은 온도에 있는 물체로 옮겨가는 이동현상(transport phenomena)의 한 가지로서 흔히 구분하기로는 3가지 주된 전달 방법에 의하여 나타나게 되며 이것을 『전도』, 『대류』 그리고 『복사』에 의한 열전달이라고 부른다.

한편 열이 전달되는 양은 앞에 거론한 3가지 전달 방법 모두의 경우에 전달 현상이 일어나고 있는 면적의 크기에 따라 비례하여 증감하게 된다. 따라서 전달중에 있는 열량(즉 단위 시간당 전달된 열량의 크기)은 그 자체의 값도 중요하나 단위면적당 전달되는 열량이 더 큰 의미를 가질 수 있다. 이렇게 전달되는 면적당의 전달 과정의 열량 (즉 단위 시간당 단위 면적당 열량의 크기)을 열유속(heat flux 熱流束)이라고 부른다. 이 열유속은 열전달이 일어나는 물체간의 경계면 면적에 대하여 정의하게 되며 물체의 크기에 관계없이 전달 현상이 얼마나 활발하게 진

행되고 있는가를 표시하는 물리량이라고 할 수 있다.

열전달의 3가지 중요한 방법은 아래 표11.5와 같이 요약하여 볼 수 있으며 각각의 방법에 대하여 전도 열전달의 열유속, 대류 열전달의 열유속 그리고 복사 열전달의 열유속으로 구분하여 부를 수 있다. 한편 실용적인 상황에서는 이들 방법이 중복되어 나타나게 되며 이 때의 전체 열전달량의 총 열전달율(total heat transfer rate)또는 총 열전달 유속(total heat flux)등으로 나타내어 부른다.

표11.5

구분	기본 관계식	파 라 미 터	비 고
전도	$q'' = k \frac{\Delta T}{\Delta X}$	열전도율 ( $k$ ) (물질의 고유성질)	Fourier의 열전도 법칙
대류	$q'' = h\Delta T$	열전달 계수 ( $h$ ) (현상의 상황변수)	Newton의 냉각 법칙 (관계식)
전도	$q'' = \sigma(T_1^4 - T_2^4)$	열방사율 ( $\epsilon$ ) (물체표면 상황에 따른 변수)	Stefan-Boltzman 법칙

## 5.2 국제 온도 눈금과 온도 표준

온도 측정의 궁극적인 목표는 열역학적인 온도를 정밀 정확하게 측정하는 것이다. 열역학적인 온도 눈금은 Kelvin에 의해 제창되었으며 지금 현재는 주로 기체 온도계 (gas thermometer), 잡음 온도계 (noise thermometer)에 의해 측정되고 있으며 이중 기체 온도계를 이용한 열역학적 온도 측정방법이 가장 광범위하게 이용되고 있다. 그러나 열역학적 온도를 모든 범위에 걸쳐 온도계로 직접 측정하는 것은 비실용적인 경우가 많고 또한 그 정밀도와 정확도를 높이기가 매우 어렵다. 그리하여 1927년에 세계적으로 공통으로 적용되고 열역학적인 온도와 가장 근사하고 간편하게 측정할수 있는 국제 온도 눈금을 제창하게 되었는데 이 눈금이 국제 온도 눈금-27(International Temperature Scale - 1927 : ITS-27)이다.

국제 온도 눈금의 핵심은 온도 눈금 제정 당시의 가장 정확한 열역학적인 온도 측정 data를 바탕으로 순수 금속이나 기체의 융고점, 끓는점 및 삼중점 등 상변이 온도를 고정점으로 정하고 이 온도 사이의 온도는 내삽 온도계(표준 온도계)의 특성을 이용하여 결정하고 내삽 공식에 따라 온도를 결정하도록 되어 있다. 이렇게 정해진 체계는 열역학적인 온도 측정 기술의 발달과 표준 온도계의 특성 향상에 따라 약 20년 간격으로 국제 온도 눈금이 변경되어 1948년 이후의 국제 실용 온도 눈금-48 (International Practical Temperature Scale - 1948 : IPTS-48) 및 1968년 이후의 국제 실용 온도 눈금-68 (International Practical Temperature Scale-1968 : IPTS-68)을 거친 후 1990년 1월 1일 부터는 국제 온도 눈금-90 (International Temperature Scale - 1990 : ITS-90)에 준한 국제 온도 표준이 통용되고 있으며 따라서 온도 표준 체계는 표 11.6과 같이 요약 할 수 있다.

국제 온도 눈금에서 정의된 표준 온도계는 요구되는 전 온도 영역에서 사용할 수 있는 정밀한 온도계가 현재 없기 때문에 온도 영역별로 안정도가 높고 가장 정밀한 온도계를 표준 온도계로 정의하고 있으며 각 표준 온도계의 내삽 공식을 정의하고 있다. 또한 ITS-90 온도 눈금의 표준 온도계들은 사용 온도 영역이 서로 약간 중복되는 특징을 가지고 있는데 표 11.7에는 ITS-90의 표준 온도계와 사용 온도 영역이 나타나 있다. 증기압 온도계나 기체 온도계를 표준 온도계로 사용하는 온도 영역에서는 압력을 측정함으로써 온도를 결정할 수 있고, 표준 백금 저항 온도계 사용 온도 영역에서는

$$W(T_{90}) = \frac{R(T_{90})}{R(273.16 \text{ K})}$$

로 정의된 물의 삼중점에 대한 저항비와 표준 백금 저항 온도계의 온도에 따른 평균적인 저항비 특성을 내포하는 기준함수  $W_r(T_{90})$ 과의 차이를 보정하여 온도를 결정 하도록 정의되어 있다. 은의 융고점(961.78°C)이상의 온도 영역에서는 은, 금 또는 구리의 융고점 온도에서의 흑체 분광 복사밀도의 비로 부터 온도를 결정하게 되어 있다. 각 온도계를 내삽 공식에 따라 교정할 때 사용되는 온도 고정점과 정의된 온도는 표 11.8에 요약되어 있다. 0°C 이상에서는 순수 금속의 융고점과 녹는점을, 0°C 이하에서는 삼중점을 고정점으로 채택하고 있다. 표준 온도계가 아닌 모든 온도센서는 각각의 사용 온도 영역에 따라 정의된 표준 온도계와 비교 교정하거나 표준 온도계로 교정된 기준 온도계 (reference thermometer)와 비교 교정하여 온도 측정에 사용해야만 한다.

표 11.6 온도 표준 공급 체계도

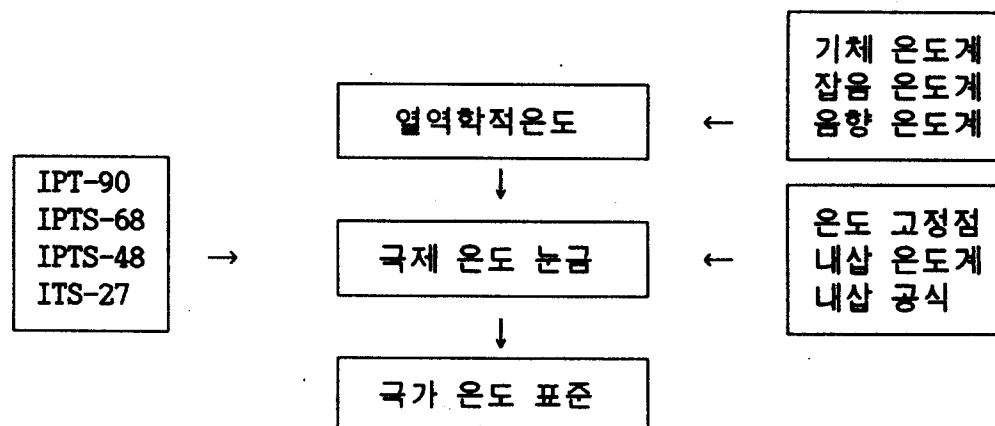


표 11.7 ITS-90의 표준 온도계 및 사용 온도 영역

표 준 온 도 계	사 용 온 도 영 역
복 사 온 도 계 백금 저항 온도계 기 체 온 도 계 증기압 온도계	961.78℃ 이상 13.8033 K - 961.78 ℃ 3.0 K - 24.5561 K 0.65 K - 5.0 K

표 11.8 ITS-90의 온도 고정점과 고정점 온도

온 도 고 정 점	고 정 점 온 도
H <sub>2</sub> 삼중점	13.8033 K
Ne 삼중점	24.5561 K
O <sub>2</sub> 삼중점	54.3584 K
Ar 삼중점	83.8058 K
Hg 삼중점	234.3156 K
H <sub>2</sub> O 삼중점	0.01 ℃
Ga 녹는점	29.7646℃
In 융고점	156.5985℃
Sn 융고점	231.928 ℃
Zn 융고점	419.527 ℃
Al 융고점	660.323 ℃
Ag 융고점	961.78 ℃
Au 융고점	1064.18 ℃
Cu 융고점	1084.62 ℃

## 5.3 용어 및 기호, 단위 환산

온도의 표시는 섭씨(Celcius) 온도, 화씨(Fahrenheit) 온도, 켈빈 온도, 랭킨 온도가 주로 쓰인다. 가장 일반적으로는 켈빈 온도만 사용하는 것도 가능하지만 실용적인 목적을 위하여는 이들 모두를 혼용하는 것이 보통이다. 이들 사이의 관계는 아래와 같다.

$$T(^{\circ}\text{F}) = 1.8 \cdot T(^{\circ}\text{C}) + 32$$

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$$

$$T(\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 459.67$$

섭씨와 화씨의 단위 표시에서는  $^{\circ}$  표시를 붙이고 있으나 켈빈과 랭킨 온도에서는 각각 K와 R로만 표시 하는 것을 유의하기 바란다.

열, 에너지, 그리고 일은 모두 같은 단위를 갖는 물리량이며 이들값의 시간당 값을 일을 또는 열전달율이라고 한다. 한편 열전달율을 단위 면적당 표시한 것이 열유속이 된다.

열 에너지 일	일을 열전달율	열유속
Joule J = N·m	Watt W = J/sec	W/m <sup>2</sup>

이들을 나타내는 단위중 Joule과 Watt는 표준 단위처럼 취급되며 열유속의 경우 W/m<sup>2</sup>이 가장 기본적 단위가 된다.

이와 관련하여 흔히 사용되는 단위는 아래와 같다.

유사 열량 단위

$$1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J},$$

$$1 \text{ kJ} = 0.94783 \text{ Btu}$$

비열

$$1 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = 0.23885 \text{ Btu/lb}_m \cdot \text{R}$$

$$(1 \text{ Btu/lb}_m \cdot \text{F} = 1 \text{ cal/g} \cdot \text{C})$$



열전달 계수

$$1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} = 0.1761 \text{ Btu/hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$$

열전도율

$$1 \text{ W/m} \cdot \text{k} = 0.5788 \text{ Btu/hr} \cdot \text{ft} \cdot \text{R}$$

일을

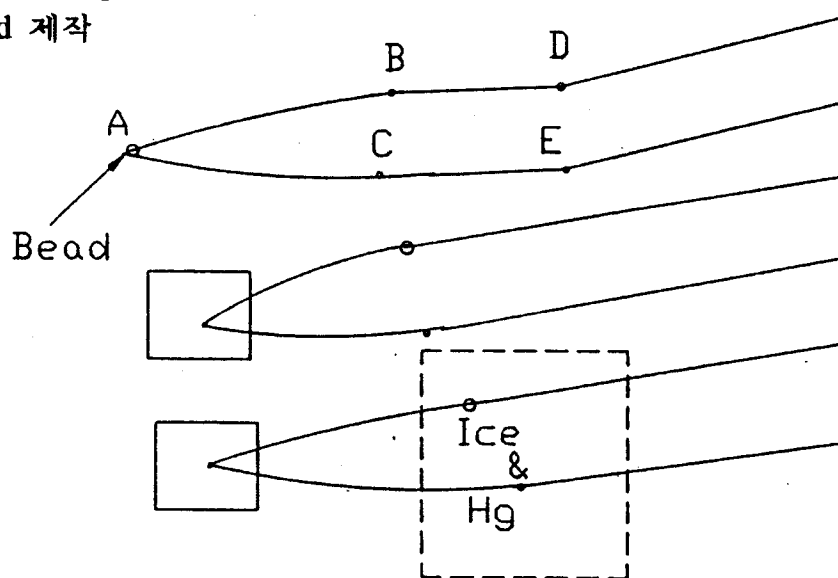
$$1 \text{ kW} = 3412.2 \text{ Btu/hr} = 1.3441 \text{ hp}$$

# 실험 11 : 고체의 열전도도 측정

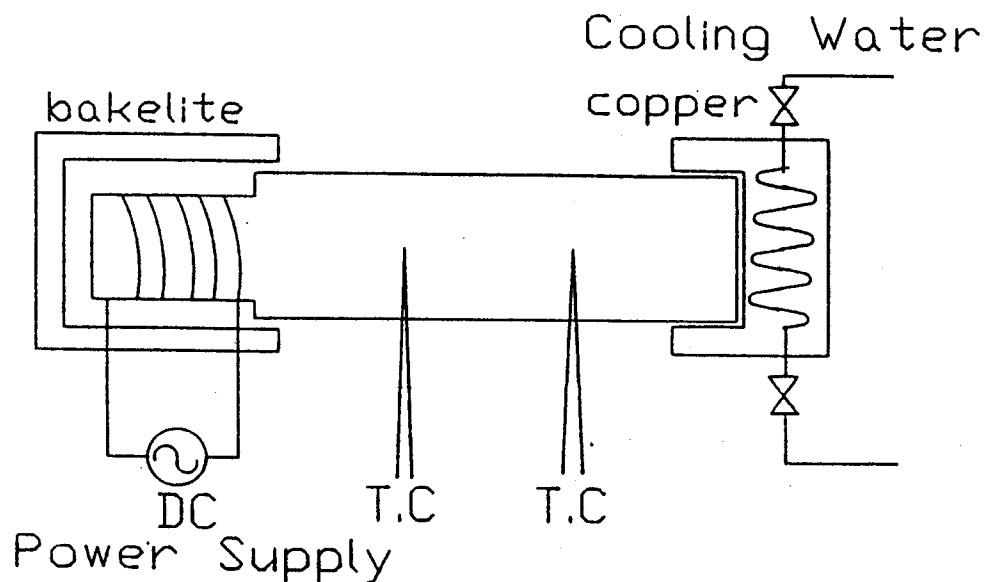
## 1. Experimental Set up

### 1-1. Thermocouple의 제작 및 온도 측정

Bead 제작

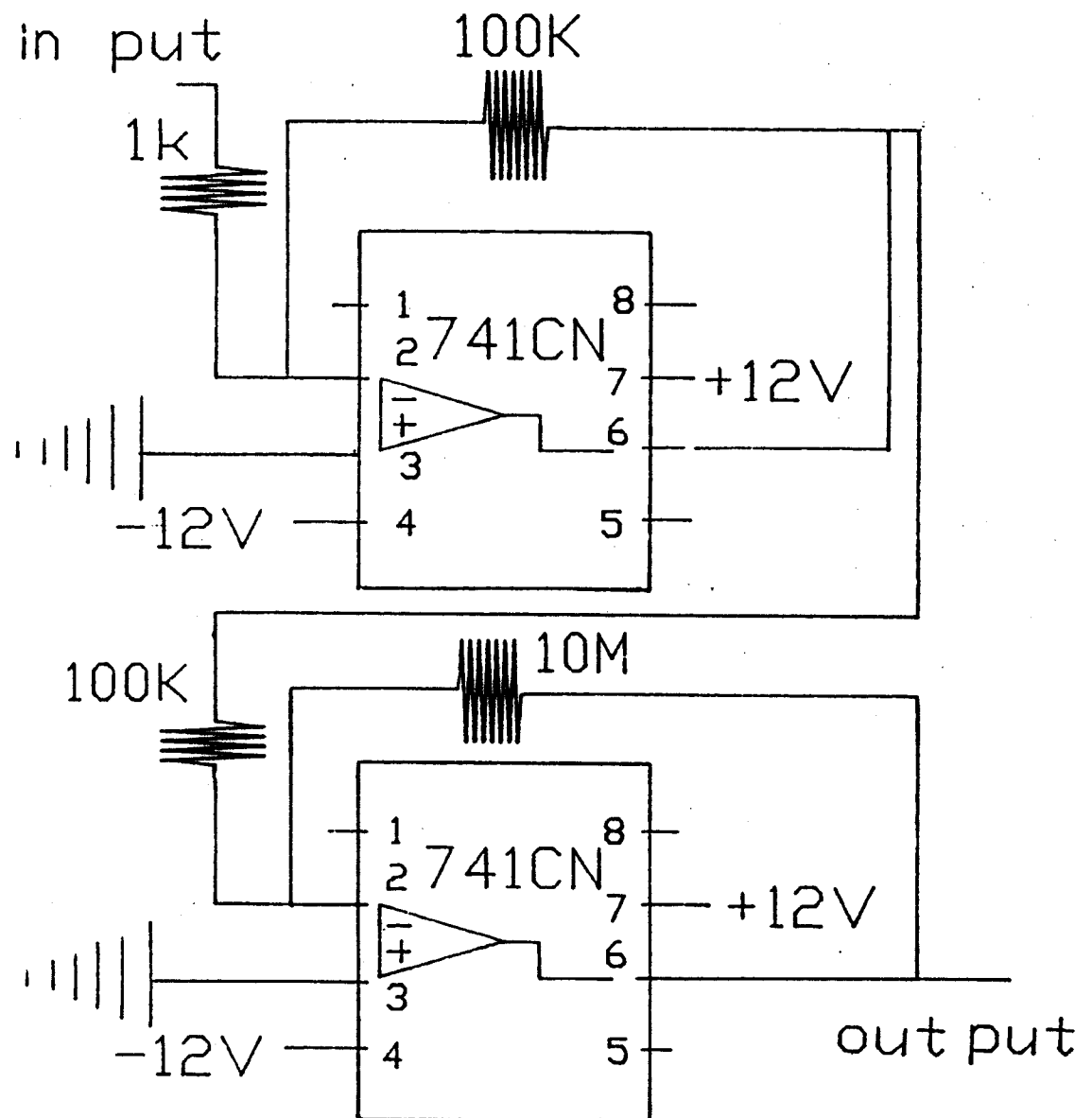


### 1-2. 구리봉의 열전도도 측정



### 1-3. O.P. Amp.를 이용한 Signal Conditioner제작

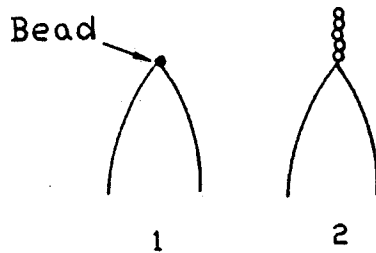
$\mu A741CN$ 를 이용하여 다음과 같은 Signal Conditioner를 제작한다. Thermocouple의 열기전력은 Appendix A.4에 나와있다. 또한 Appendix A.3장을 참조하여 AD594/595를 이용한 Signal Conditioner를 제작할 수도 있다.



## 2. 실험절차

## 2-1. Thermocouple Bead의 제작

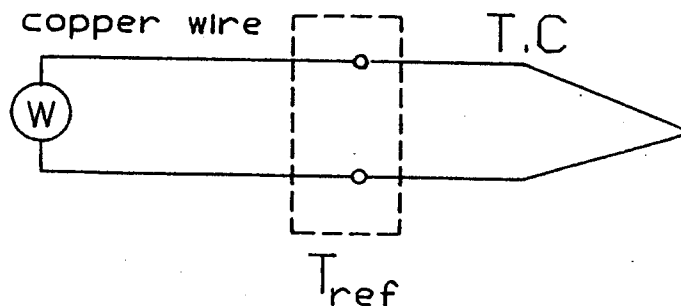
T형 Thermocouple의 두 개 선의 재질, 색깔, 피복의 색깔등을 관찰한다. 열전대를 길이 30cm 정도로 자른후 한쪽 끝 부분을 연결하여 접점을 만든다. 가능하면 아크용접이나 흑연봉 방전을 이용하며 1번과 같은 구모양(도선의 1.2배)의 Bead를 만든다.



다른쪽 끝부분에 대하여 양극과 음극을 구분해 본다.

Fluke 디지털 온도계를 이용하여, 별도의 구리도선 없이 온도를 측정해 본다. 온도는 실험자의 체온, 비이커에 담겨있는 상온의 수돗물, 끓는물, 물과 얼음의 혼합액의 온도를 측정해 본다. 유리 막대 온도계로 측정한 온도와 비교해 본다. 그리고 촛불의 온도를 측정해 본다. 촛불의 온도가 화염의 위치에 따라 다르게 나타나는 것을 개략적으로 측정하여 등온선으로 표시해 본다.

열전대로 온도를 측정하여  $T_{ref}$ 와  $T_{measure}$ 의 차이를 측정하게 된다.



자체 제작한 Amp.를 이용하여 구리도선으로 연결된 부분의 전압차를 기록함으로써 온도 변화를 기록해 본다. 비이커에 담긴 얼음물을 서서히 가열하면서 온도가 상승해 가는 것을 관측하고 Amp.의 출구측의 전압을 A/D변환기의 입력으로 택하여 기록한다. 시간과 온도의 함수로서 표시하고 그래프

로 그려본다.

이를 통하여 Amp.의 Gain을 정확하게 측정해 둔다. (뒤에서 구리봉의 온도 측정시 이용하게 된다.)

온도 측정 방법의 비교 : 몇가지 온도 측정 방법의 장·단점을 비교하여 본다.

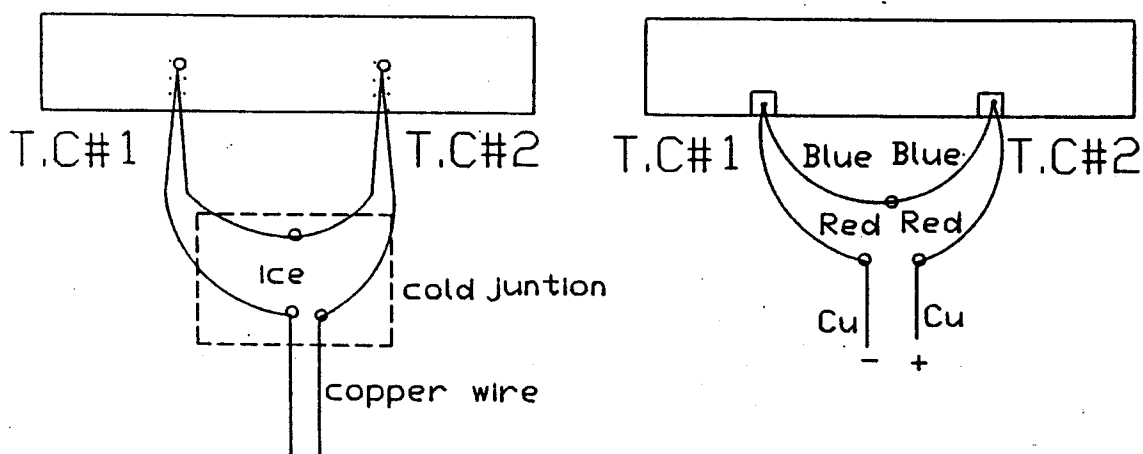
## 2-2. 구리봉의 열전도도 측정

간이 열전도도 측정 장치를 설치하고 냉각수 연결을 확인하고 가열히터의 전원을 Power Supply측과 연결해 둔다. (아직 전원을 공급하지는 않는다.) 가열 히터의 저항을 측정해 둔다.

그림과 같이 Thermocouple및 구리 도선의 연결을 확인하고 이를 이용해서 TC#1과 TC#2의 두 접점간 온도차를 측정할 수 있음을 확인한다.

서서히 전원을 공급하면서 구리봉에서의 온도차가 나타나는 것을 관측한다. 이때 공급된 전력( $V^2/R$ )이 곧 전도된 열  $q$ 이므로  $q$ 를 기록하고  $\Delta T$ 를 약 5군데(또는 10군데) 정도에서 측정한다. 실제로 읽는 값은 전원의 공급전압  $V$ , 그리고 열전대의 기전력이 앰프에 의하여 증폭된 값이 될 것이다. 이것을 바탕으로  $q$ 와  $\Delta T$ 사이의 관계를 그래프로서 표시하고 이 물질의 열전도 계수를 계산해 보라. 나타난 값이 예측했던 것과 다소 다른 이유를 생각해 보자.

히터의 전압을 낮추어 전원을 꺼버리고 실험 장치를 정돈한다.



$T_{T.C}$	$V$	$V^2$	$\Delta T$

- 1) 얼음물의 온도
- 2) 수돗물의 온도
- 3) 끓는 물의 온도
- 4) 화염 온도

## (3) 열전도도 측정

 $\Delta X =$  $A =$  $R =$ 

$V$	$q$	$\Delta T_{T, c}$	$K$