

비선형 특성을 보정한 휴대용 열전대 온도계

김 성국*(金 成國), 송 재원*(宋 在元)

Portable thermocouple thermometer on the nonlinearity compensation

Seong-Kuk Kim, Jae-Won Song

요 약

1000℃까지 비직선 특성을 보상할 수 있는 휴대용 K형 열전대 온도계를 설계 및 제작하였다. 열전대를 이용한 온도계에서 해결해야 할 문제는 비선형특성 보상과 기준점 보상이다. 열전대의 비선형특성은 EPROM을 사용하여 보상하였으며, 기준점 보상은 집적 소자 AD595A를 사용하여 수행하였다. 비선형 특성을 보상하기 전에는 876℃에서 최대 23.6℃(2.69%)의 오차가 있었으나, 제작된 휴대용 K형 열전대 온도계로 측정된 결과는 전체 온도 범위 내에서 $\pm 2^\circ\text{C}$ (0.2%)의 오차 특성을 가진다. 이런 특성은 K형 열전대를 사용하여 측정할 수 있는 상용 온도 1000℃범위에서 온도센서의 정밀도 규격을 만족한다. 그러므로 제작된 휴대용 K형 열전대 온도계는 넓은 온도 측정에 비교적 정확하게 사용할 수 있다. 그리고 이러한 비선형 특성을 보상하는 기법은 다른 종류의 온도 센서의 보상에 적용할 수 있다.

Abstract

A portable type K thermocouple thermometer is designed and fabricated to compensate the linearity to the high temperature 1000℃. The problems to be solved, which use a thermocouple thermometer are the compensation of the nonlinearity characters and reference compensation. The nonlinear character of the thermocouple is compensated, using an EPROM, and the reference compensation done using an IC AD595A. Before this compensation, there was the maximum error of 23.6℃(2.69%) at 876℃. However the results measured by the portable type K thermocouple thermometer fabricated show the character of the error of $\pm 2^\circ\text{C}$ (0.2%) in the range of the total temperature. This character satisfies the precision specifications of the type K thermal sensors in the range available 1000℃, which can be measured by the use of type K thermocouples. Therefore the portable type K thermocouple thermometer fabricated can be comparatively exactly used for the wide range of temperature of interest. Then this technique of compensating the nonlinear characters can be applied to the other kinds of thermal sensor compensation.

I. 서론

현재 각종 산업에 있어서 열의 역할이 매우 중요하고, 보다 나은 제품, 품질관리에는 보다 확실한 온도 관리가 필요하다. 이 온도를 검출하는 센서가 온도 센서이다. 가장 널리 사용되고 있는 온도센서의 사용용도는 우리생활과 아주 밀접한 가전제품, 의료용기기 및 연구소의 실험용 정밀성과 안정성을 요구하는 원자로와 발전소등 첨단 로봇트까지 모든 산업분야 및 생활

* 경북대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics, Kyungpook Nat'l Univ.)
<접수일자 : 1995년 1월 14일>
※본 연구는 센서기술연구소의 연구비 지원으로 수행되었음.

에 사용되고 있다^[1].

온도 계측 기술은 크게 측온 물체에 온도계를 직접 접촉시켜서 측정하는 접촉방식과 측온 물체에서의 열복사를 원격관측하여 측정하는 비접촉방식으로 분류된다^[2]. 접촉방식은 주로 물리측정이나 공업계측에 이용되며 열전대, 금속저항체, 써미스터, 반도체형 등 여러가지가 있다. 복잡한 구조물 내부의 한점의 온도를 측정하고자 할때는 접촉방식이 유리하다. 비접촉방식은 주로 고온도 측정이나 광역에 걸친 온도 분포를 측정할때 이용되며, 광검출방식, 방사에너지 검출방식 등이 있다. 각각 사용목적과 용도에 따라서 온도센서의 선택은 매우 중요하다. 실제의 온도 계측은 거의 모두 이차 온도계에 의해 실행되며, 대부분의 모든 온도센서는 비선형특성을 가지므로 정밀한 측정을 위해 적절한 구간마다 보정이 필요하다.

특히 산업체에서 가장 많이 사용되는 온도계는 열전대를 이용한 온도계이다. 열전대는 금속이 열에 감응하여 나타나는 열전효과를 이용한 것으로 -270℃의 극저온에서 1000℃이상의 고온까지 넓은 영역에서 온도를 비교적 정확하게 측정할 수 있고, 가격이 저렴하고, 구조가 간단하고 기계적으로 견고하다. 그러나 열전대 온도계는 기준 접점이 필요하며, 출력이 비교적 작으므로 측정 회로의 잡음이나 드리프트 등에 주의해야 하며, 비선형 특성을 보상해 주어야 한다.

본 논문에서는 측정온도 범위가 넓고, 저가인 K형 열전대를 이용하여 정밀하고, 0~1000℃의 넓은 온도 범위에서 사용 가능한 휴대용 K형 열전대 온도계를 설계 및 제작하였다. 열전대의 열기전력 특성은 비선형이며, 열전대를 이용한 온도측정은 기준점보상이 필요하다. 이러한 단점들을 해결하기 위해 기준점보상 및 증폭은 집적회로 온도센서 AD595A를 사용하여 수행하였고, 비선형특성은 EPROM 27C256을 사용하여 보정하였다. 그리고, 제작된 휴대용 K형 열전대 온도계의 특성을 조사하였다.

II. 열전대를 이용한 고온도계의 설계 및 제작

열전대의 기전력은 비직선 특성을 나타낸다. 그래서 열전대를 이용한 온도측정은 측정된 기전력의 값을 표에서 직접 찾아 실제 온도로 환산해야 하는 번거로움이 있다. 이러한 번거로움을 없애기 위해 K형 열전대의 비직선적인 특성을 EPROM을 사용하여 직선화

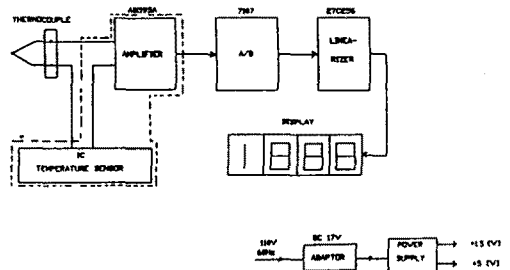
하였으며, 기준점 보상은 집적소자 AD595A를 사용하여 보상하여 직접 온도를 측정할 수 있도록 휴대용 K형 열전대 온도계를 설계하였다. 설계에 제시되는 사양은 다음 표 1과 같다.

표 1. 열전대 온도계의 제시사양

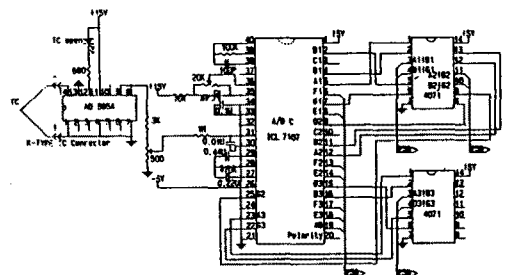
Table 1. Presented specification of the thermocouple thermometer.

항 목	사 양
측정 온도 범위	0~1000℃
측정 오차	±1℃
전원 전압	+17 V _{dc}

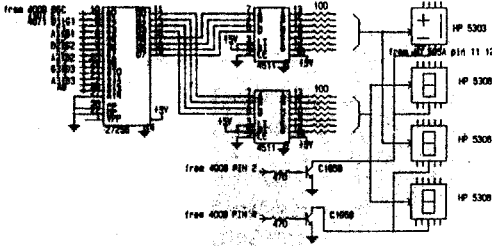
이러한 제시 사양을 만족하는 휴대용 K형 열전대 온도계를 설계하였는데 그 결과를 그림 1에 보여 준다. 그림 1(a)에서는 설계된 휴대용 K형 열전대 온도계의 전체 개략도, 그림 1(b), 1(c), 1(d)에서는 휴대용 K형 열전대 온도계의 실제 회로도를 보여준다.



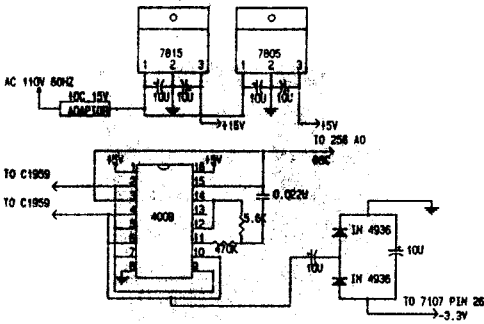
(a) 계통도
(a) Block diagram.



(b) 회로도(기준점 보상 및 증폭회로 부분)
(b) Circuit diagram(reference compensation and amplification circuit).



(c) 회로도(직선화와 표시회로 부분)
(c) Circuit diagram(linearization and indication circuit).



(d) 회로도(전원 회로 부분)
(d) Circuit diagram(power supply circuit).

그림 1. 휴대용 K형 열전대 온도계
Fig. 1. Portable type K thermocouple thermometer.

열전대를 이용한 휴대용 K형 열전대 온도 시스템은 반드시 기준점 보상(Reference junction compensation)을 해주어야 한다. 이 기준점 보상 방법으로 종전에는 얼음통(ice box)을 사용하는 방법과 부속온도계와 기준표를 동시에 사용하였으나, 요즘은 집적회로화하여 기준점 보상 및 증폭기능을 갖는 것을 사용한다. 이들 집적회로중 AD590 계열이 많이 쓰여지고 있으며, 본 논문에서는 기준점 보상과 증폭기능을 수행하기 위하여 AD595A를 사용하였다. 집적회로 소자 AD595A의 특성은 K-형(크로멜/알루멜) 열전대에 대해 $40.44 \mu V / ^\circ C$ 의 기전력을 가지며, $10mV / ^\circ C$ 의 출력을 위해 247.3배 증폭해 준다. AD595A의 출력은 다음과 같다^[3].

$$\text{AD595A output} = (\text{Type K Voltage} + 11 \mu V) \times 247.3 \dots (1)$$

$$\text{Type K voltage} = (\text{AD595 output} / 247.3) - 11 \mu V \dots (2)$$

여기서, $11 \mu V$ 는 AD595A의 입력 오프셋(input offset) 전압이다.

K형 열전대에 대한 AD595A의 출력을 실제 온도와 비교해 보면 그림 2와 같은 오차가 있다. 오차를 살펴보면 $876^\circ C$ 에서 최고 $-23.6^\circ C$ 를 가지며, $1372^\circ C$ 에서 $+14.7^\circ C$ 를 가진다. 즉 측정범위 전 구간에 걸쳐 비직선적 특성을 가진다. 이들 비직선 특성을 보정하여 주기 위해서 다음과 같이 하였다. EPROM을 사용하여 아날로그/디지털 변환기 IC7107로부터 표시되는 값을 EPROM의 어드레스(address)를 넣어주고 실제온도에 해당하는 BCD 값을 EPROM 데이터 값으로 나오게 하였다. IC7107의 출력은 공통 양극 7-세그먼트 LED를 구동하여 각 출력은 인버터된 논리값이 나온다. 이를 각 숫자에 대하여 표 2에 정리하였다. 10개의 숫자를 구분해서 EPROM 어드레스를 만들기 위해 표 2의 출력을 OR 게이트 2개를 이용하여 표 3과 같이 각 숫자를 4비트로 구분하였다. 7-세그먼트 7개 출력 가운데 6개를 사용하여 OR 게이트를 2개 거쳐 4개출력으로 줄였다.

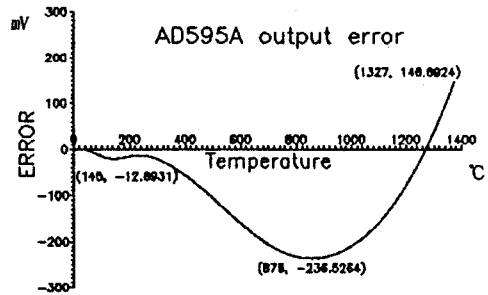


그림 2. 온도에 따른 AD595A 출력오차(비직선성오차)
Fig. 2. AD595A output error with temperature (Nonlinear error).

표 2. A/D 변환기 7107의 LED 출력
Table 2. LED output of the A/D converter IC7107.

세그먼트 숫자	A	B	C	D	E	F	G
0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	0	0	1	1	1	1
2	0	0	1	0	0	1	0
3	0	0	0	0	1	1	0
4	1	0	1	1	0	0	0
5	0	1	0	0	1	0	0
6	0	1	0	0	0	0	0
7	0	0	0	1	1	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	0	0

표 3. 어드레스 구성을 위한 BCD

Table 3. BCD for address construction.

숫자	AB(MSB)	F	DG	E(LSB)	등가 BCD
0	0	0	1	0	2
1	1	1	1	1	F
2	0	1	0	0	4
3	0	1	0	1	5
4	1	0	1	1	8
5	1	0	0	1	9
6	1	0	0	0	8
7	0	1	1	1	7
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1	1

이들 변환된 값을 어드레스로 취하여 각각 어드레스에 해당하는 보정된 값을 EPROM IC 27C256 데이터로 나오게 하였다. 그리고 AD595A의 핀 12번에 연결된 발광다이오드(LED)는 열전대가 단락되거나, 출력 영역 이상의 전압이 유기될때 불이 점등되어 이 상태를 표시하도록 설계하였다.

다음 단계로 EPROM 27C256의 데이터를 표시하기 위해 7-세그먼트 디코더(decoder) 및 구동 IC인 CD4511 2개와 특히 구동 IC수를 줄이기 위해, 트랜지스터 두개를 스위치로 사용하였으며, 발진 주파수는 인버터 IC 4009에서 $f \approx 3 \text{ kHz}$ 로 하였다. 이 주파수는 EPROM 27C256와 부전원 공급을 위한 인버터 IC 4009에 공통으로 사용하였다. EPROM 27C256의 데이터는 CD4511의 입력으로 들어와 4511에 2개의 7-세그먼트 발광다이오드를 부착하여 두개의 스위치 트랜지스터C1959에 의해 교대로 표시되도록 하였다.

전원회로는 상용 어댑터 15[V] 800[mA]를 입력으로 하여 3단자 레귤레이터 IC 7805와 7815를 통하여 각각 +5[V], +15[V]의 전원을 구성하였다. 부전원(Negative Power Supply)은 인버터 IC 4009를 이용하여 그림 1의 전원 회로에 구성되어진 것과 같이하여 -3.3[V]를 공급하였다. 실제 -5[V]전원을 요구하지만 -3.3[V]로도 충분히 집적회로를 구동할 수 있고 문제되지 않는다.

이렇게 설계한 휴대용 K형 열전대 온도계를 직접 제작하였다. 실제 제작한 실물은 그림 3과 같다.

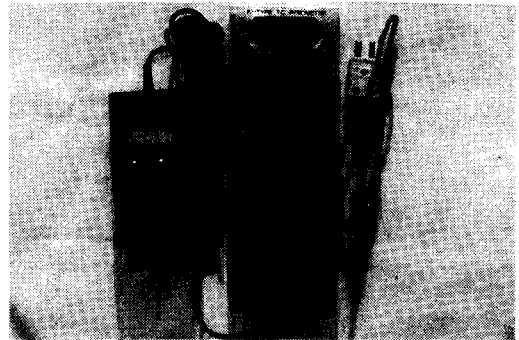
III. 실험결과 및 고찰

3.1. 특성측정



(a) 내부 사진

(a) inner photograph.



(b) 외형 사진

(b) outer photograph.

그림 3. 제작된 휴대용 K형 열전대 온도계

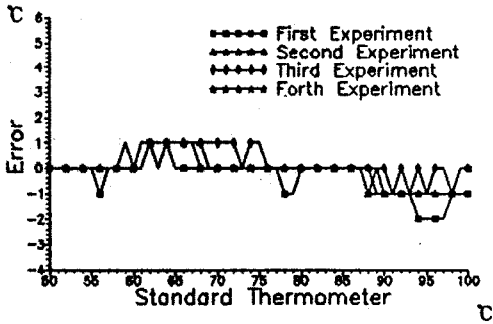
Fig. 3. Fabricated portable type K thermocouple thermometer.

제작된 휴대용 K형 열전대 온도계의 특성 측정은 온도범위가 50~100℃인 표준온도계와 여러 제품의 온도계를 동시에 투입해서 증류수를 가열하면서 비교 측정하였다^[4]. 그 결과는 표 4에서와 같다. 실험에 사용된 표준온도계는 WERTHEIM사의 모델번호 1.370.005로 최소눈금이 0.1℃이며, 국립공업 시험원의 검정을 거친 제품이다. 측정 결과는 제작된 휴대용 K형 열전대 온도계(측정온도범위 0~1000℃, 분해능 1℃), 수은온도계(측정온도범위 0~360℃, 최소눈금 2℃) 및 FLUKE사의 디지털 온도계(측정온도범위 -2000~1370℃, 분해능 0.1℃)에 대해 각각 ±1℃, ±2.7℃, ±1.5℃의 오차 특성을 보였다. 50 ~ 100℃까지 1℃단위로 측정된 오차 특성은 그림 4와 같다.

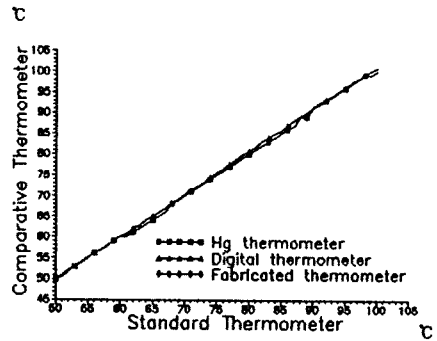
표 4. 측정된 데이터(표준온도계와 비교측정, 단위 : °C)

Table 4. Measured data(comparative measurement with standard thermometer, unit : °C).

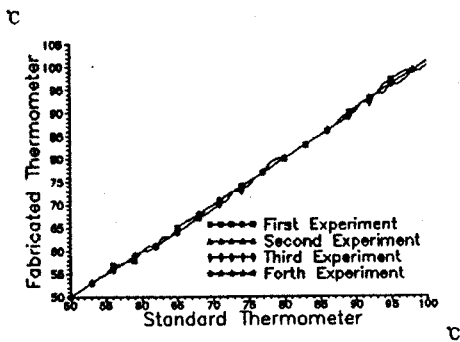
표준 온도계	제작된 휴대용 K형 열전대 온도계				수은 온도계				디지털 온도계(FLUKE-51)			
	1차	2차	3차	4차	1차	2차	3차	4차	1차	2차	3차	4차
50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	51.9	52.0	52.0	52.0	49.6	49.5	49.8	49.2
55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	56.8	57.0	57.0	57.0	54.9	54.2	54.9	54.9
60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	61.9	62.2	62.0	62.0	60.1	59.2	60.1	60.0
65.0	64.0	64.0	64.0	65.0	67.0	67.2	67.0	67.0	65.1	64.2	65.3	64.8
70.0	70.0	69.0	70.0	70.0	72.0	72.0	72.0	72.0	70.2	69.9	70.5	70.0
75.0	75.0	74.0	75.0	75.0	76.9	77.2	77.0	77.0	75.4	74.7	75.7	75.4
80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	82.0	82.7	82.0	82.0	80.7	79.9	80.9	80.6
85.0	85.0	85.0	85.0	85.0	87.0	87.3	87.0	87.0	85.8	85.0	86.1	86.0
90.0	91.0	90.0	91.0	91.0	92.0	92.0	92.0	92.0	91.1	90.0	91.4	90.9
95.0	96.0	96.0	96.0	97.0	97.0	97.2	97.0	97.0	96.2	95.3	96.5	96.2
100.0	100.0	100.0	100.0	101.0	102.0	102.2	102.0	102.0	100.8	100.7	101.5	101.3



(a) 제작된 온도계의 오차곡선
(a) Error curve of the fabricated thermoemter.



(c) 여러 제품에 대한 측정 데이터 비교
(c) Comparison of measured data for the several goods.



(b) 제작된 온도계의 비교법에 의한 측정값
(b) Measured values of the fabricated thermoemter with comparative method.

그림 4. 측정된 오차특성(표준 온도계와 비교측정, 단위 : °C), 측정 온도 범위 : 50 ~ 100°C
Fig. 4. Measured error characters(comparative measurement with standard thermometer, unit : °C), Measured temperature range : 50 ~ 100°C.

온도계의 교정방법 중 정점법과 비교법^[4]으로 증류수를 사용하여 병점 및 비등점에 대한 표준온도계, 제작된 휴대용 K형 열전대 온도계, 수은 온도계, 디지털

온도계의 측정결과는 표 5와 같다.

표 5. 정점법과 비교법에 의한 빙점 및 비등점의 온도 측정 데이터 (단위 : °C)

Table 5. Measured data of the ice point and boiling point with fixed point and comparative method(unit : °C).

종 류	표준	제작된 휴대용 K형	수은	디지털
	온도계	열전대 온도계	온도계	온도계
빙 점	0.0	1	2	-0.1
비등점	100.0	100	102	101.1

1000°C까지 온도를 높이면서 측정할 수 없었기 때문에 그림 5와 같이 온도에 대한 열전대 전압을 인가하여 간접적인 측정을 하였다. 측정에 사용된 기기는 기준 전압 발생기로 FLUKE사의 760A 미터 교정기 (meter calibrator)이다. 이 실험은 기준 전압 발생기로 K-형의 열전대에 해당되는 전압을 가해줌으로써 그 전압에 해당하는 온도가 측정된다^[5]. 이때 얼음통(ice bath)은 기준점 보상 역할을 한다. 얼음통은 표준온도계로 측정된 결과 표 5에서와 같이 표준빙점의 조건을 만족한다. 각 단계는 50°C 간격으로 하였으며 측정된 데이터는 표 6과 같다. 전체 측정오차는 ± 2°C이며, 1000°C 이상에 해당되는 K형 열전대의 전압이 인가될 때 발광다이오드에 불이 점등되어 이 상태를 표시하였다.

표 6. 제작된 휴대용 K형 열전대 온도계로 측정된 데이터

Table 6. Measured data by the fabricated portable type K thermocouple thermometer.

K형 열전대의 열기전력[mV]	이론치 °C	실험치 °C	K형 열전대의 열기전력[mV]	이론치 °C	실험치 °C
2.0	50	49	31.2	750	750
4.11	100	99	33.3	800	800
6.1	150	148	35.3	850	849
8.1	200	198	37.3	900	898
10.2	250	250	39.3	950	950
12.2	300	299	41.3	1000	998
14.3	350	349	43.2	1050	1049
16.4	400	399	45.1	1100	1075
18.5	450	449	47.0	1150	1067
20.6	500	500	48.8	1200	1065
22.8	550	552	50.6	1250	1065
24.9	600	600	52.4	1300	1064
27.0	650	650	54.1	1350	1064
29.1	700	698	LED open 표시됨 ↙		

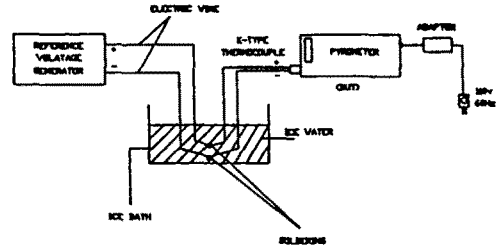


그림 5. 휴대용 K형 열전대 온도계 특성 측정(간접 측정법 : 0 ~ 1000°C)

Fig. 5. Experimental setup for the characteristic measurement of the portable type K thermocouple thermometer.(Indirect measurement method : 0~1000°C).

3.2 고찰

실험 결과 제작된 휴대용 K형 열전대 온도계의 측정오차는 측정 전범위에 대해 ±2°C이다. 실제 기준점 보상 및 증폭기능을 갖는 온도센서 집적회로 소자 AD 595A의 출력은 K형 열전대에 대하여 시뮬레이션 해보면 876°C근방에서 최대 23.6°C의 오차가 있으며, 그림 2와 같이 0~1000°C의 넓은 온도 범위에서 비직선특성을 보인다. 그러나 EPROM 27C256으로 보상한 결과는 측정 전범위에 걸쳐 ±2°C의 오차내에 있음을 알 수 있다.

표 7. 열전대의 정밀도 규격(KS C 1602 - 1982)^[6]Table 7. Precision specification of the thermocouple(KS C 1602 - 1982)^[6].

열전대의 기호	구기호	측 정 온 도	계 급	허 용 차
K	CA	0°C ~ 1000°C	0.4급	±1.5°C 또는 온도측정의 ±0.4%
		0°C ~ 1200°C	0.75급	±2.5°C 또는 온도측정의 ±0.75%
		-200°C ~ 0°C	1.5급	±2.5°C 또는 온도측정의 ±1.5%

표 8. KS C 1615 - 1991^[7]Table 8. KS C 1615 - 1991^[7].

시스 열전대	측 정 온 도	계 급	허 용 차
SK	0°C ~ 1050°C	0.75급	±2.5°C 또는 측정온도의 ±0.75%
	-200°C ~ 0°C	1.5급	±2.5°C 또는 측정온도의 ±1.5%

이 특성은 K형 열전대를 사용하여 측정할 수 있는 상용온도 1000°C범위에서 표 7, 표 8의 정밀도 규격^[6, 7]을 만족함을 알 수 있다. 열전대의 정밀도 규격에서 허용차는 열기전력을 기준 열기전력표에 의해 환산한 온도에서, 측온점점 온도를 뺀 값의 최대한도를 말한다. 또 허용차는, °C 또는 %에서 큰 쪽의 값으로 한다. 그러므로, 제작된 열전대를 이용한 휴대용 K형 열전대 온도계는 1000°C이내의 고온에서도 측정 오차를 ±2°C 이내로 줄일 수 있음을 알 수 있다.

제작된 휴대용 K형 열전대 온도계는 열전대를 이용한 온도측정이 측정된 기전력의 값을 표에서 직접 찾아 실제 온도로 환산해야 하는 번거로움을 해결하였으며, 기준점 보상을 위해 얼음통 또는 부속온도계와 기준표를 동시에 사용해야 하는 문제는 집적회로 온도 센서 AD595A를 사용하여 휴대할 수 있도록 하였다.

IV. 결론

K형 열전대를 이용하여 광범위한 측정 전 범위에 걸쳐 ±2°C 즉 ±0.2%이내의 오차를 가지는 휴대용 K형 열전대 온도계를 설계 및 제작하였다. 비선형특성을 보상하기 전에는 876°C에서 -23.6°C의 오차, 1372°C에서는 14.7°C의 오차를 나타낸다. 그러나 제작된 휴대용 K형 열전대 온도계는 EPROM 27C256에 의한 비선형 특성의 보상과 IC AD595A에 의한 기준점 보상으로 측정 전범위에 걸쳐 ±2°C의 오차 특성을 보였다. 이 특성은 K형 열전대를 사용하여 측정할 수 있는 상용온도 1000°C범위에서 온도센서의 정밀도 규격을 만족함

을 알 수 있다. 즉, 제작된 고온도계는 측정범위 0 ~ 1000°C에서 0.4급의 허용차는 ±1.5°C 또는 측정온도의 0.4%, 0 ~ 1200°C에서 0.75급의 허용차 ±2.5°C 또는 측정온도의 ±0.75%를 만족시키고 있다. 그러므로 제작된 휴대용 K형 열전대 온도계는 측정 전범위에 오차가 ±0.2%이내의 오차를 가지므로 정밀한 온도 측정이 요구되는 모든 분야에 사용할 수 있다. 그리고 다른 종류의 열전대(R형)에 대해서도 같은 방법으로 설계 제작한다면 1700°C까지 고온도 측정에 응용할 수 있으리라 사료된다.

참고문헌

- [1] 황 규섭, 센서활용기술, 기전 연구사, p.405, 1989.
- [2] 백 수현, 센서 핸드북, 세화, pp.411~415, 1990.
- [3] "Linear products databook." Analog Device, pp.13-9~13-16, 1990.
- [4] 한국 공업 규격 KS A 0511 - 1991, pp.14 ~ 18.
- [5] 김 영해, 센서인터페이스 No.1, 기전연구사, p.425, 1987.
- [6] 한국 공업 규격 KS C 1602 - 1982, p.6.
- [7] 한국 공업 규격 KS C 1615 - 1991, p.5.

 著 者 紹 介


김 성 국(金 成 國)

1962년 12월 26일생. 1985년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1988년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1991년 3월 ~ 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중.

주관심 분야 : 광통신, 집적광학, 센서시스템.


송 재 원(宋 在 元)

1955년 11월 6일생. 1978년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1980년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1984년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사).

1984년 3월 ~ 현재 경북대학교 전자공학과, 조교수, 부교수. 1995년 현재 경북대학교 전자계산소 소장.
주관심 분야 : 광통신, 집적광학.