

열전대(熱電對)



배길호
((주)우진 품질보증부)

- '77-'81 한양대학교 전자공학과(학사)
- '90-'92 경희대학교 산업정보대학원 계측제어과(석사)
- '81-현재 (주)우진 품질보증부 차장
공진청 정밀계측기술 지도위원
공기반 기술개발 전문위원
공업표준화법 전문위원회 온도실무위원
한국측정기기 교정협회 온도분과위원
Alumel-Chromel 선재개발(공기반 연구과제)
위촉연구원



김창주
(KIMM 재료기술연구부)

- '67-'71 성균관대학교 금속과(학사)
- '73-'76 서울기계공고 교사
- '76-'78 연세대학교 산업대학원 재료과(석사)
- '78-'79 포항제철 기술연구소 주임연구원
- '82-'86 부산대학교 대학원 금속과(박사)
- '70-현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 개요

근래의 과학기술은 온도, 압력, 진공 및 청정 분야에 대하여 극한기술에 도전하고 있으며, 이에 따라 극도의 정확성과 정밀성을 요구하게 되었다. 정확한 온도의 측정과 제어는 금속공업, 기계공업, 화학공업 뿐만 아니라 반도체 등의 전자산업분야에서도 매우 중요한 요소기술이 되고 있으며, 이에 부응하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다.

온도를 측정하는 방법 중에서 가장 일반화된 것으로는 열전 온도계를 사용하며, 이는 열전대를 측온부로 하여 열전대로부터 얻어진 온도에 대응하는 열기전력을 계측기로 감지하여 온도를 측정한다. 열전 온도계는 열전대, 보상도선 및 계측기로 구성되며 열전대는 성질이 다른 2개의 금속선을 연결하여 한 쪽 부분을 가열하고 다른 쪽 부분을 일정한 온도로 차감계 하면 그 온도차에 대응하는 열기전력이 발생하는 것으로, 열전대의 가열부를 측온접점(Hot Junction)이라 하며, 이때 2개의 금속선은 용접하여 완전하게 연결한다. 일정한 온도로 차감계한 부분은 기준접점(Cold Junction)이라 하며, 도선 또는 계측기에 연결되어 기준온도를 유지하게 된다.

열전대를 실용화하기 위해서는 다음과 같은 조건들을 만족해야 한다.

- 1) 열기전력이 클 것.
- 2) 고온 또는 저온에서 사용하여도 열기전력이 안정하고 수명이 길 것.
- 3) 내열성이 좋아, 고온에서도 기계적인 강도가 유지될 것.
- 4) 내식성이 좋고 가스 등에 강할 것.

5) 같은 종류의 열전대 소선에서는 특성이 균일하여 호환성이 있을 것.

그러나 이러한 모든 조건을 완전히 만족하는 재료는 얻기 어려우므로 사용 조건에 알맞는 열전대를 선택할 필요가 있다.

한편, 열전대의 약점을 보완하여 장시간 사용하기 위해서는 보호관을 사용하는 데, 보호관은 고온에 대하여 기계적으로 강하고, 화학적으로 안정하여 내식성이 우수한 재료로 만들어야 한다.

열전대의 위치와 계측기를 설치한 장소가 떨어져 있을 경우, 열전대와 계측기의 사이를 보상도선으로 연결한다. 보상도선은 열전대와 비슷한 열기전력 특성을 갖는 재료로 구성되어 전체적으로는 열전대를 연장한 것과 거의 같게 된다. 보상도선과 열전대의 접속장소를 보상접점이라고 하고 보상도선과 도선 또는 계측기와의 접속장소를 기준접점이라고 한다.

계측기는 온도치를 직접 또는 간접으로 나타내는 기능을 갖는 기기로 지시계, 기록계, 전위차계 및 디지털 전압계 등이 있다.

일반적인 온도계측에는 지시계와 기록계를 사용하며, 이 계기에는 가동코일형 계기와 전자식 계기가 있다. 전자는 보조전력을 사용하여 측정하며 구조가 간단하나 특정의 넓은 범위만을 미분화하는 것이 불가능하고 높은 정도를 기대하기는 어려운 단점이 있지만 가격이 저렴하여 간단한 온도측정에 사용된다. 그리고 후자는 표시기구의 torque가 매우 강하여 좋고, 진동에 잘 견딘다. 분위법을 사용하므로 정도가 좋고, 기준점점의 온도를 전기적으로 보상해 준다. 또한 특정의 넓은 범위만을 미분화하는 것이 가능하여 눈금을 크게 나타낼 수 있는 점이 장점이다. 그러나 가격이 비싸고 보수에 전문적인 지식을 요함에도 불구하고 광범위하게 사용되고 있다. 또한 지시계와 기록계에 조절기능을 부가하여 온도 조절계로도 사용된다. 전위차계는 정도가 매우 좋아서 표준으로 사용되나 수동인 경우에 숙련을 요하는 디지털 전압계는 사용하는 환경에 주의하여 전위차계에 준하여 표준교정 후 사용하는 것이 좋다.

2. 열전대의 기본원리

2.1 Seebeck 효과

열전대의 원리를 처음 발견한 사람은 Seebeck (1821)으로, 그림 1에서와 같이 A와 B 두개의 서로 다른 금속도체가 접점을 이룬 체, 폐회로를 구성하여 그들의 양 접점이 다른 온도상태에 놓이게 되면, 회로상에 미량의 전류가 흐르게 된다는 것이다. 이러한 조건 하에서 발생하는 기전력(electromotive force)을 Seebeck emf, 열전회로를 구성하는 한 쌍의 도체 또는 열소자들을 열전대라고 한다.

냉접점에서 전류가 A로 부터 B로 흐른다면, 도체 A를 B에 대하여 +로 정의한다. 간단히 말해서 열전대는 열에너지를 전기에너지로 변환시키는 기구이며 발생하는 전기에너지의 양으로 온도를 측정할 수 있다. 또한 Seebeck 효과는 Peltier 효과와 Thomson 효과의 기본이 된다.

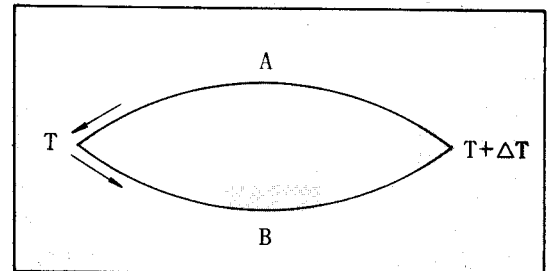


그림 1. Seebeck 효과

2.2 Peltier 효과

Peltier(1834)는 전류가 두 금속(Sb와 Bi)의 접점을 통과할 때, 열을 방출하거나 흡수하는 것을 발견하였다.

Peltier 효과는 이상 기체의 등(等) entropy의 팽창에 의한 냉각의 원리로 반도체 내의 전자기체에 적용하여 설명할 수 있으며, 전자농도가 높은 반도체로 부터 전자농도가 낮은 반도체가 이동할 때 전자기체는 팽창하여 화학 전위가 같은 두 물체 사이의 전위장벽에 대해 일을 하게 되는 데, 그 결과 나타나는 전기적 냉각현상이 바로 Peltier 효과이다. 이를 이용하여 보통 195K까지 냉각이 가능하며 다단계적 장치로는 135K 까지도 가능

하다.

즉, 그림 2에서와 같이 전류가 Seebeck 전류와 동일한 방향으로 흐를 때, 열은 온접점에서 흡수되고 냉접점에서 방출되는 데, Peltier 효과는 1 coulomb의 전기가 서로 다른 두 금속의 접점을 통과할 때의 열량의 변화로 정의되며 두 도체의 접촉상태 만으로서는 일어나지 않는다.

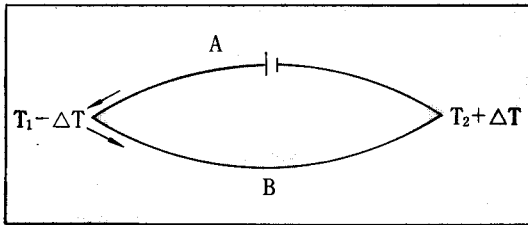


그림 2. Peltier 효과

전류의 방향은 열이 방출되거나 흡수되는 것에 의해 결정된다. 이 효과는 역으로도 가능하며 접점을 이루고 있는 도체들의 모양이나 크기와는 무관하며, 단지 도체의 구성재질과 접점부의 온도에만 관계된다.

Peltier 효과는 도체에 흐르는 전류의 제곱과 저항에 따라 변화하는 I^2R joule 열과는 전혀 다르다. joule 열은 도체의 크기에 따라 변하며, 서로 다른 재질들의 접점과는 무관하다. Peltier 효과와는 대조적으로, joule 열은 전류의 극성이 바뀌어도 그 값의 부호가 변하지 않는다.

2.3 Thomson 효과

열전대의 원리를 온도와 두 접점에서의 Peltier 효과로 설명하기 위해 Thomson(Lord Kelvin)은 접점의 엔트로피에 근거를 두어서 열전대의 기전력이 두 접점 사이의 온도차에 대하여 선형관계임을 제시하였다. 그러나 이것은 알려져 있는 모든 열전대의 비선형 온도-기전력 관계와는 대조적인 것이어서 Thomson은 열전회로에서 Peltier 효과 외에 다른 가역적인 열적 변화에 기인한 것이라고 생각하였다.

그리하여 Thomson(1854)은 한 개의 도체에 전류를 열의 흐름과 같거나 다른 방향으로 흘려주었을 때 단일 도체 내에서의 열용량의 역변환이

바로 Thomson 열이다.

Thomson 효과는 단위 전기량이 온도구배가 1 K인 단일 순수도체(a single homogeneous conductor)를 따라 흐를 때 도체의 단위면적에 대한 열용량의 변화로 정의된다.

$$Q = \int j \rho - \sigma j \frac{dT}{dX} \quad (1)$$

여기서 j : 전류밀도

ρ : 도체의 전기저항

σ : Thomson 계수

$\frac{dT}{dX}$: 온도구배

$\int j \rho$ 는 비가역적인 joule 열이고 dT/dX 는 가역적인 Thomson 효과를 나타낸다. Thomson은 σ 가 도체 내에서의 단위전류와 단위온도 구배에 대한 에너지의 변화를 나타내기 때문에 전기 열용량(specific heat of electricity)라고 정의하였다.

그림 3은 Thomson 효과를 나타낸 것으로 단일 순수도체가 어떤 지점에서 T_2 의 온도로 가열되면 그 지점의 양쪽에 열적 구배(thermal gradient)가 존재하게 되고 T_2 의 양쪽 P_1, P_2 지점은 동일온도

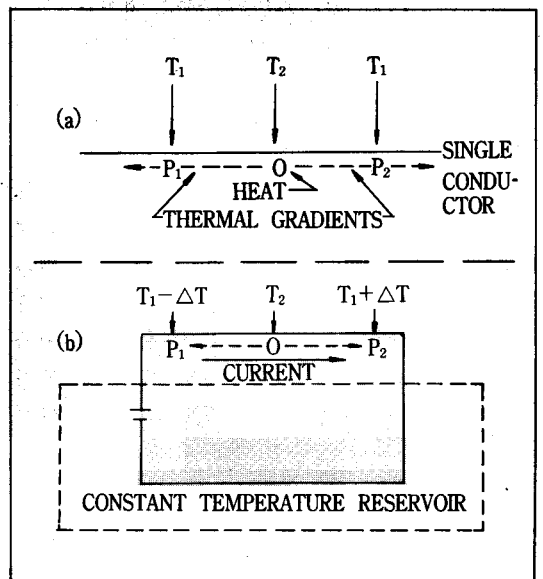


그림 3. Thomson 효과

T_1 으로 된다. 만일 회로가 단일도체를 포함하여 구성되어 있다면, P_1 , P_2 에서의 온도는 전류가 흐를 때 서로 달라지게 된다. 이러한 온도변화는 온도 구배의 역방향으로 향한 전자의 운동에 의한 것이며, 열적 구배가 증가함에 따라 운동중인 전자는 에너지를 흡수하여 위치 에너지가 증가하게 된다. 열은 전자의 유동방향이 열흐름과 반대인 P_1 에서 흡수되고, 이것은 P_1 의 온도를 감소시키는 원인이 된다. 반면에, 열은 전자의 유동방향과 열흐름의 방향이 같은 P_2 에서 방출되어 온도가 높아지게 된다. 바로 이러한 도체의 열용량 변화가 Thomson 효과이다.

3. 열전대의 종류와 특성

3.1 열전대용 소선(素線)의 종류와 특성

열전식 온도계의 구성에서 가장 중요한 것은 열전대이다. 이에 관해서는 KS C 1602에 그 종류와 특성이 규격화 되어 있다. 고온용의 예를 보면 백금(Pt)과 로듐(Rh)을 조합하여 만든 것으로, 백금(Pt)과 백금(Pt)-로듐(Rh) 합금, 로듐(Rh)의 비율을 달리한 백금(Pt)-로듐(Rh) 합금을 조합

하여 만든 것을 사용하고 있다.

열전대의 종류는 구성재료 및 계급에 의해 표 1과 표 2와 같이 구분된다. 온도 1°C 에 발생하는 기전력차는 열전대의 조합에 따라 달라지며, 같은 조합의 열전대라도 온도영역에 따라 각기 다르다. 따라서 KS에는 열전대의 종류에 따라 열기전력 표를 정해 놓고 있다. 그 표에 의하면 B-type의 경우에 0°C 부근에서는 5°C 변화하더라도 $1\mu\text{V}$ 정도로 변화가 거의 없으나, R-type은 0°C 부근에서 1°C 변화에 수 μV 가 변화한다. 이러한 정도는 500°C 부근에서는 1°C 변화에 대하여 B-type은 수 μV , R-type은 $10\mu\text{V}$ 정도이며, $1,000^\circ\text{C}$ 부근에서는 각각 $9\mu\text{V}$ 와 $13\mu\text{V}$ 의 변화로 커진다.

그리고 열전대는 구성재료의 종류, 선경에 따라 사용한도와 0°C 에서의 전기비저항이 달라지게 되는데, KS에서는 표 3과 표 4와 같이 정하고 있다. 이 표에서 사용한도라 함은 공기 중에서 연속사용이 가능한 온도의 한도이며, 과열 사용한도는 어쩔 수 없는 경우에 단시간 사용이 가능한 온도의 한도이다. 또한 열전대는 구성재료 및 계급에 따라 온도에 대한 허용차가 다른 데, 이를 표 5에 나타내었다. 여기서 허용차는 열기전력을 기준 열기전력표에서 온도로 환산하여 측온점점의 온도를 뺀 값의 최대한도를 말한다.

표 1. KS에 선정된 열전대의 종류별 구성재료

기 호	구기호 (참고)	구 성 재 료	
		+	-
B		로듐 30%를 함유한 백금·로듐 합금	로듐 6%를 함유한 백금·로듐합금
R		로듐 13%를 함유한 백금·로듐 합금	백 금
S		로듐 10%를 함유한 백금·로듐 합금	백 금
K	CA	니켈 및 크롬을 주로한 합금 (Chromel)	니켈을 주로한 합금 (Alumel)
E	CRC	니켈 및 크롬을 주로한 합금 (Chromel)	동 및 니켈을 주로한 합금 (Constantan)
J	IC	철 (Iron)	동 및 니켈을 주로한 합금 (Constantan)
T	CC	동 (Copper)	동 및 니켈을 주로한 합금 (Constantan)

표 2. KS에 선정된 열전대의 계급

기 호	계 급(CLASS)	구성재료의 기호	구 기 호(참고)
0.25	0.25 급	R	-
		S	-
0.4	0.4 급	K	CA
		E	CRC
		J	IC
		T	CC
0.5	0.5 급	B	-
0.75	0.75 급	K	CA
		E	CRC
		J	IC
		T	CC
1.5	1.5 급	K	CA
		E	CRC
		T	CC

표 3. KS에 선정된 열전대의 사용한도

구성재료의 기 호	구 기 호 (참고)	선 경 (mm)	사 용 한 도 (°C)	과열사용한도 (°C)
B	-	0.50	1,500	1,700
R	-	0.50	1,400	1,600
S				
K	CA	0.65	650	850
		1.00	750	950
		1.60	850	1,050
		2.30	900	1,100
		3.20	1,000	1,200
E	CRC	0.65	450	500
		1.00	500	550
		1.60	550	650
		2.30	600	750
		3.20	700	750
J	IC	0.65	400	500
		1.00	450	550
		1.60	500	650
		2.30	550	750
		3.20	600	750
T	CC	0.32	200	250
		0.65	200	250
		1.00	250	300
		1.60	300	350

표 4. KS에 선정된 열전대의 0°C에서의 전기비저항

(단위 : Ω/m)

구성재료의 기호 구기호 (참고) 선경(mm)	B	R	S	K	E	J	T
	—	—	—	CA	CRC	IC	CC
0.32	—	—	—	—	—	—	6.17
0.50	1.75	1.47	1.43	—	—	—	—
0.65	—	—	—	2.95	3.56	1.70	1.50
1.00	—	—	—	1.25	1.50	0.72	0.63
1.60	—	—	—	0.49	0.59	0.28	0.25
2.30	—	—	—	0.24	0.28	0.14	—
3.20	—	—	—	0.12	0.15	0.07	—

표 5. KS에 선정된 열전대의 온도에 대한 허용차

구성재료의기호	구기호(참고)	측 정 온 도	계 급	허 용 차
B	—	600°C이상, 1,700°C미만	0.5 급	$\pm 4^\circ\text{C}$ 또는 측정온도의 $\pm 0.5\%$
R, S	—	0°C이상, 1,600°C미만	0.25 급	$\pm 1.5^\circ\text{C}$ 또는 측정온도의 $\pm 0.25\%$
K	CA	0°C이상, 1,000°C미만	0.4 급	$\pm 1.5^\circ\text{C}$ 또는 측정온도의 $\pm 0.4\%$
		0°C이상, 1,200°C미만	0.75 급	$\pm 2.5^\circ\text{C}$ 또는 측정온도의 $\pm 0.75\%$
E	CRC	-200°C이상, 0°C미만	1.5 급	$\pm 2.5^\circ\text{C}$ 또는 측정온도의 $\pm 1.5\%$
		0°C이상, 800°C미만	0.4 급	$\pm 1.5^\circ\text{C}$ 또는 측정온도의 $\pm 0.4\%$
J	CC	0°C이상, 800°C미만	0.75 급	$\pm 2.5^\circ\text{C}$ 또는 측정온도의 $\pm 0.75\%$
		-200°C이상, 0°C미만	1.5 급	$\pm 2.5^\circ\text{C}$ 또는 측정온도의 $\pm 1.5\%$
T	IC	0°C이상, 750°C미만	0.4 급	$\pm 1.5^\circ\text{C}$ 또는 측정온도의 $\pm 0.4\%$
		0°C이상, 750°C미만	0.75 급	$\pm 2.5^\circ\text{C}$ 또는 측정온도의 $\pm 0.75\%$
T	IC	0°C이상, 350°C미만	0.4 급	$\pm 0.5^\circ\text{C}$ 또는 측정온도의 $\pm 0.4\%$
		0°C이상, 350°C미만	0.75 급	$\pm 1^\circ\text{C}$ 또는 측정온도의 $\pm 0.75\%$
T	IC	-200°C이상, 0°C미만	1.5 급	$\pm 1^\circ\text{C}$ 또는 측정온도의 $\pm 1.5\%$
		-200°C이상, 0°C미만	1.5 급	$\pm 1^\circ\text{C}$ 또는 측정온도의 $\pm 1.5\%$

3.1.1 귀금속 열전대(Noble metal thermocouple)

귀금속 열전대는 소재인 백금(Pt)과 로듐(Rh)은 모두 고순도로 정련이 가능하고 균질한 합금의 제작이 가능하여 열전대로서 정도가 매우 높다. 백금(Pt)은 대기 중에서 가열시 1,400°C에서 재결정하고 입자가 성장하기 시작하므로 상용한도도 1,400°C로 규정되어 있다. 그러나 수소 중에서 사용하는 경우는 수소침입에 따른 단선의 위험이 높아 이보다 낮은 1,100°C까지 사용한다. 그리고

일산화탄소(CO)나 금속성 가스 중에서는 나쁜 영향이 있으므로 1,000°C 이내에서 사용하며, 보호관도 금속성의 사용을 피하는 것이 좋다.

백금(Pt)-로듐(Rh) 합금에서 로듐(Rh)의 함량에 의한 특성이 다르므로 KS에서는 로듐(Rh)의 함량에 따라 R-type(PR₁₃, 13% Rh)과 S-type(PR₁₀, 10% Rh)으로 구분하고 있으며, 이것은 미국 규격 및 IEC(국제전기표준협회) 규격에 따른 것이다.

가. S-type 열전대

보통 PR₁₀이라 하는데, 이 열전대는 열기전력이 안정하고 사용온도 영역이 넓으며 균질성과 호

환성이 매우 우수하여 IPTS-68에서는 630.74°C~1,064.43°C의 영역에서 표준기로 정하고 있다. 전술한 표 3에서 알 수 있듯이 실용한도가 1,400°C이고 과열사용한 도는 1,600°C이며, 1,000°C 이하에서 사용할 경우에 사용조건이 좋다면 장시간에 걸쳐 ±0.2°C 정도의 정확도를 유지할 수 있다. 일반적으로 산화분위기에서는 안정하나, 수소, 일산화탄소 등의 환원분위기와 금속증기, 유기물, 철 등에는 특히 약하다.

우리나라는 S-type을 주로 표준용으로 사용한다. 그러나 0°C~1,064°C 범위의 열전대 표준기로서는 최고의 안정도가 있으나 다른 이력적인 변화에 주의하지 않으면 0.6°C 정도의 오차가 생기게 된다.

630.74°C~1,064.43°C의 범위에서 열기전력의 온도에 관한 특성식은 2차식으로 표시되며, 그 외의 영역에서는 영국, 미국, 캐나다 등 3국의 연구소에서 협의되어 IEC가 채용한 것이 기준열기전력 보간식으로 표 6과 같다.

나. R-type 열전대

보통 PR₁₃이라 하며, 우리나라의 경우, 공업분야의 고온용 열전대로서 가장 널리 사용되고 있으며 0°C~1,554°C 영역의 상용 표준열전대로 적당하다.

S-type에 비하여 단위 온도당 열기전력이 15% 정도 크나, 그 외의 특성은 거의 비슷하다. 일본 규격 JIS는 1981년에 R-type으로 개정되었으나, 과거의 규격에는 PR-type으로 표시되었으며 백금(Pt)-로듐(Rh) 합금에서 로듐(Rh)의 함량이 12.8%이므로 현재의 JIS R-type(KS R-type)에 비하여 1,550°C에서 약 100μV 낮은 열기전력 특성을 갖고 있다. 이 열전대의 보간식도 역시 표 6에 나타내었다.

다. B-type 열전대

순 백금선은 고온에서 열화되기 쉬우므로 로듐(Rh) 30%와 6%씩 함유한 백금(Pt)-로듐(Rh) 합금의 열전대로서, 1,600°C 이하에서 상용된다. 이것도 역시 환원성 분위기에는 극히 약하나 산화성이나 불활성 기체 분위기에서는 1,700°C까지 사용이 가능하다. 상온 부근에서 발생하는 열기전력이 매우 작아 기준점점의 오차를 무시해도 되는 특징이 있다. 1,600°C에서의 열전도성은 S-

type과 매우 다르며, 강도와 안전성이 우수하여 고온용 표준에 적합하다.

라. 표준 열전대

IPTS-68에서 630.74°C~1,064.43°C 영역의 표준 온도계로 정한 S-type 열전대의 온도와 기전력의 관계식을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$E = a + bt + ct^2$$

여기서 상수 a, b 및 c는 금(Au)의 응고점 1064.43°C, 은(Ag)의 응고점 961.93°C 및 백금(Pt) 저장 온도계로 측정되는 630.74±0.2°C에서 열전대에 나타나는 기전력으로 결정된다.

표준 열전대를 구성하고 있는 백금선의 순도는 R(100°C)/R(0°C)>1.3925이어야 하며, 백금(Pt)-로듐(Rh)의 중량백분율로 90% Pt-10% Rh의 합금이어야 한다. 또한 금(Au)과 은(Ag)의 응고점, 그리고 630.74°C에서의 열기전력이 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$V[t(\text{Au})] = 10,334\mu\text{V} \pm 30\mu\text{V} \quad (1)$$

$$V[t(\text{Au})] - V[t(\text{Ag})] = 1,186\mu\text{V} + 0.17\{V[t(\text{Au})] - 10,334\mu\text{V}\} \pm 3\mu\text{V} \quad (2)$$

$$V[t(\text{Au})] - V[t(630.74^\circ\text{C})] = 4,782\mu\text{V} + 0.64\{V[t(\text{Au}) - 10,334\mu\text{V}\} \pm 5\mu\text{V} \quad (3)$$

만족할 만한 표준열전대는 0.35mm와 0.65mm 사이의 일정한 직경의 소선으로 만들어진다. 사용 중에 열기전력이 변화하지 않는 것을 보증하기 위해, 열전대 소선은 충분히 열처리되어야 한다. 그러기 위해서는 백금(Pt)선은 1,250°C, 백금(Pt)-로듐(Rh)선은 1,450°C의 온도로 어닐링 열처리한다. 만일 소선을 절연체에 조립하기 전에 열처리를 하려면 조립된 열전대는 1,250°C에서 그 기전력이 안정하고, 비틀림에 의하여 생긴 국부적인 불균질이 없어질 때까지 가열한다. 이러한 열처리를 적절히 하였을 때에는 소선의 길이가 받는 온도의 기울기가 변하여도 열전대의 열기전력은 변하지 않는다.

표 6. KS에 선정된 열전대의 기준열기전력 보간식

E ; 기준열기전력

t ; 온도(°C)

기 호	구기호	온도변위(°C)	보 간 식
B	-	0~1820	$E = \sum_{i=0}^8 a_i t^i \mu V$ <p>여기에서 $a_0 = 0$</p> $a_1 = -2.467\ 460\ 162\ 0 \times 10^{-1}$ $a_2 = 5.910\ 211\ 116\ 9 \times 10^{-3}$ $a_3 = -1.430\ 712\ 343\ 0 \times 10^{-6}$ $a_4 = 2.150\ 914\ 975\ 0 \times 10^{-9}$ $a_5 = -3.175\ 780\ 072\ 0 \times 10^{-12}$ $a_6 = 2.401\ 036\ 745\ 9 \times 10^{-15}$ $a_7 = -9.092\ 814\ 815\ 9 \times 10^{-19}$ $a_8 = 1.329\ 950\ 513\ 7 \times 10^{-22}$
R	-	-50~630.74	$E = \sum_{i=0}^7 a_i t^i \mu V$ <p>여기에서 $a_0 = 0$</p> $a_1 = 5.289\ 139$ $a_2 = 1.391\ 111 \times 10^{-2}$ $a_3 = -2.400\ 524 \times 10^{-5}$ $a_4 = 3.620\ 141 \times 10^{-8}$ $a_5 = -4.464\ 502 \times 10^{-11}$ $a_6 = 3.849\ 769 \times 10^{-14}$ $a_7 = -1.537\ 264 \times 10^{-17}$
		630.74~1064.43	$E = \sum_{i=0}^3 b_i t^i \mu V$ <p>여기에서 $b_0 = -2.641\ 801 \times 10^2$</p> $b_1 = 8.046\ 868$ $b_2 = 2.989\ 229 \times 10^{-3}$ $b_3 = -2.687\ 606 \times 10^{-7}$
		1064.43~1665	$E = \sum_{i=0}^3 c_i (t^*)^i \mu V$ <p>여기에서 $t^* = (t - 1365)/300$</p> $c_0 = 1.554\ 041\ 4 \times 10^4$ $c_1 = 4.235\ 777\ 3 \times 10^3$ $c_2 = 1.469\ 308\ 7 \times 10$ $c_3 = -5.221\ 389\ 0 \times 10$

기 호	구기호	온도변위(℃)	보 간 식
R	-	1665~1767.6	$E = \sum_{i=0}^3 d_i(t^*)^i \mu V$ 여기서 $t^* = (t - 1715)/50$ $d_0 = 2.041\ 669\ 5 \times 10^4$ $d_1 = 6.685\ 091\ 4 \times 10^2$ $d_2 = -1.230\ 147\ 2 \times 10$ $d_3 = -2.786\ 152\ 1$
S	-	-50~630.74	$E = \sum_{i=0}^6 a_i t^i \mu V$ 여기서 $a_0 = 0$ $a_1 = 5.399\ 578$ $a_2 = 1.251\ 977 \times 10^{-2}$ $a_3 = -2.244\ 822 \times 10^{-5}$ $a_4 = 2.845\ 216 \times 10^{-8}$ $a_5 = -2.244\ 058 \times 10^{-11}$ $a_6 = 8.505\ 417 \times 10^{-15}$
		630.74~1064.43	$E = \sum_{i=0}^2 b_i t^i \mu V$ 여기서 $b_0 = -2.982\ 448 \times 10^2$ $b_1 = 8.237\ 553$ $b_2 = 1.645\ 391 \times 10^{-3}$
		1064.43~1665	$E = \sum_{i=0}^3 c_i(t^*)^i \mu V$ 여기서 $t^* = (t - 1365)/300$ $t^* = (t - 1365)/300$ $c_0 = 1.394\ 343\ 9 \times 10^4$ $c_1 = 3.639\ 868\ 7 \times 10^3$ $c_2 = -5.028\ 120\ 6$ $c_3 = -4.245\ 054\ 6 \times 10$
		1665~1767.6	$E = \sum_{i=0}^3 d_i(t^*)^i \mu V$ 여기서 $t^* = (t - 1715)/50$ $d_0 = 1.811\ 308\ 3 \times 10^4$ $d_1 = 5.679\ 537\ 5 \times 10^2$ $d_2 = -1.211\ 249\ 2 \times 10$ $d_3 = -2.811\ 758\ 9$

기 호	구기호	온도변위(°C)	보 간 식
K	CA	-270~0	$E = \sum_{i=0}^{10} a_i t^i \mu V$ <p>여기에서</p> $a_0 = 0$ $a_1 = 3.947\ 543\ 313\ 9 \times 10$ $a_2 = 2.746\ 525\ 113\ 8 \times 10^{-2}$ $a_3 = -1.656\ 540\ 671\ 6 \times 10^{-4}$ $a_4 = -1.519\ 091\ 239\ 2 \times 10^{-6}$ $a_5 = -2.458\ 167\ 092\ 4 \times 10^{-8}$ $a_6 = -2.475\ 791\ 781\ 6 \times 10^{-10}$ $a_7 = -1.558\ 527\ 617\ 3 \times 10^{-12}$ $a_8 = -5.972\ 992\ 125\ 5 \times 10^{-15}$ $a_9 = -1.268\ 880\ 121\ 6 \times 10^{-17}$ $a_{10} = -1.138\ 279\ 737\ 4 \times 10^{-20}$
		0~1372	$E = \sum_{i=0}^{11} b_i t^i + 125 \exp\left[-1/2\left(\frac{t-127}{65}\right)^2\right] \mu V$ <p>여기에서</p> $b_0 = -1.853\ 306\ 327\ 3 \times 10$ $b_1 = 3.891\ 834\ 461\ 2 \times 10$ $b_2 = 1.664\ 515\ 435\ 6 \times 10^{-2}$ $b_3 = -7.870\ 237\ 444\ 8 \times 10^{-5}$ $b_4 = 2.283\ 578\ 555\ 7 \times 10^{-7}$ $b_5 = -3.570\ 023\ 125\ 8 \times 10^{-10}$ $b_6 = 2.993\ 290\ 913\ 6 \times 10^{-13}$ $b_7 = -1.284\ 984\ 879\ 8 \times 10^{-16}$ $b_8 = 2.223\ 997\ 433\ 6 \times 10^{-20}$
E	CRC	-270~0	$E = \sum_{i=0}^{12} d_i (t^*)^i \mu V$ <p>여기에서</p> $a_0 = 0$ $a_1 = 5.869\ 585\ 779\ 9 \times 10$ $a_2 = 5.166\ 751\ 770\ 5 \times 10^{-2}$ $a_3 = -4.465\ 268\ 334\ 7 \times 10^{-4}$ $a_4 = -1.734\ 627\ 090\ 5 \times 10^{-5}$ $a_5 = -4.871\ 936\ 842\ 7 \times 10^{-7}$ $a_6 = -8.889\ 655\ 044\ 7 \times 10^{-9}$ $a_7 = -1.093\ 076\ 737\ 5 \times 10^{-10}$ $a_8 = -9.178\ 453\ 503\ 9 \times 10^{-13}$ $a_9 = -5.257\ 515\ 852\ 1 \times 10^{-15}$ $a_{10} = -2.016\ 960\ 199\ 6 \times 10^{-17}$ $a_{11} = -4.950\ 213\ 878\ 2 \times 10^{-20}$ $a_{12} = -7.017\ 798\ 063\ 3 \times 10^{-23}$ $a_{13} = -4.367\ 180\ 848\ 8 \times 10^{-28}$

기 호	구 기 호	온도변위(℃)	보 간 식
E	CRC	0~1000	$E = \sum_{i=0}^9 b_i t^i \mu V$ <p>여기에서 $b_0 = 0$</p> $b_1 = 5.869\ 585\ 779\ 9 \times 10$ $b_2 = 4.311\ 194\ 546\ 2 \times 10^{-2}$ $b_3 = 5.722\ 035\ 820\ 2 \times 10^{-5}$ $b_4 = -5.402\ 066\ 808\ 5 \times 10^{-7}$ $b_5 = -1.542\ 592\ 211\ 1 \times 10^{-9}$ $b_6 = -2.485\ 008\ 913\ 6 \times 10^{-12}$ $b_7 = 2.338\ 972\ 145\ 9 \times 10^{-15}$ $b_8 = -1.194\ 629\ 681\ 5 \times 10^{-18}$ $b_9 = 2.556\ 112\ 749\ 7 \times 10^{-22}$
J	IC	-210~760	$E = \sum_{i=0}^7 a_i t^i \mu V$ <p>여기에서 $a_0 = 0$</p> $a_1 = 5.037\ 275\ 302\ 7 \times 10$ $a_2 = 3.042\ 549\ 128\ 4 \times 10^{-2}$ $a_3 = -8.566\ 975\ 046\ 4 \times 10^{-5}$ $a_4 = 1.334\ 882\ 573\ 5 \times 10^{-7}$ $a_5 = -1.702\ 240\ 596\ 6 \times 10^{-10}$ $a_6 = 1.941\ 609\ 100\ 1 \times 10^{-13}$ $a_7 = -9.639\ 184\ 485\ 9 \times 10^{-17}$
		760~1200	$E = \sum_{i=0}^5 b_i t^i \mu V$ <p>여기에서 $b_0 = 2.972\ 175\ 177\ 8 \times 10^5$</p> $b_1 = -1.505\ 963\ 287\ 3 \times 10^3$ $b_2 = 3.205\ 106\ 421\ 5$ $b_3 = -3.221\ 017\ 423\ 0 \times 10^{-3}$ $b_4 = 1.594\ 996\ 878\ 8 \times 10^{-6}$ $b_5 = -3.123\ 980\ 175\ 2 \times 10^{-10}$

기 호	구 기 호	온도변위(°C)	보 간 식
T	CC	-270~0	$E = \sum_{i=0}^{14} a_i t^i \mu V$ <p>여기에서 $a_0 = 0$</p> $a_1 = 3.874\ 077\ 384\ 0 \times 10$ $a_2 = 4.412\ 393\ 248\ 2 \times 10^{-2}$ $a_3 = 1.140\ 523\ 849\ 8 \times 10^{-4}$ $a_4 = 1.997\ 440\ 656\ 8 \times 10^{-5}$ $a_5 = 9.044\ 540\ 118\ 7 \times 10^{-7}$ $a_6 = 2.276\ 601\ 850\ 4 \times 10^{-8}$ $a_7 = 3.624\ 740\ 938\ 0 \times 10^{-10}$ $a_8 = 3.864\ 892\ 420\ 1 \times 10^{-12}$ $a_9 = 2.829\ 867\ 851\ 9 \times 10^{-14}$ $a_{10} = 1.428\ 138\ 334\ 9 \times 10^{-16}$ $a_{11} = 4.883\ 325\ 436\ 4 \times 10^{-18}$ $a_{12} = 1.080\ 347\ 468\ 3 \times 10^{-21}$ $a_{13} = 1.394\ 929\ 102\ 6 \times 10^{-24}$ $a_{14} = 7.979\ 589\ 315\ 6 \times 10^{-28}$
		0~400	$E = \sum_{i=0}^8 b_i t^i \mu V$ <p>여기에서 $b_0 = 0$</p> $b_1 = 3.874\ 077\ 384\ 0 \times 10$ $b_2 = 3.319\ 019\ 809\ 2 \times 10^{-2}$ $b_3 = 2.071\ 418\ 364\ 5 \times 10^{-4}$ $b_4 = -2.194\ 583\ 482\ 3 \times 10^{-6}$ $b_5 = 1.103\ 190\ 055\ 0 \times 10^{-8}$ $b_6 = -3.092\ 758\ 189\ 8 \times 10^{-11}$ $b_7 = 4.565\ 333\ 716\ 5 \times 10^{-14}$ $b_8 = -2.761\ 687\ 804\ 0 \times 10^{-17}$

3.1.2 비금속 열전대(Base metal thermocouple)

가. K-type 열전대

CA열전대로 알려져 있으며, 가장 범용화 되어 있는 니켈기 합금재 Chromel-Alumel 열전대는 약 50년전 Hoskins Manufacturing Company of Detroit에서 만들어진 상품명이나, 2차대전 이후 동일한 특성을 갖는 K-type의 유사한 상품들의 각국의 여러 제조사들에 의해 생산되고 있으며 대표적인 예를 보면 다음의 표 7과 같다.

표 7. K-type 열전대와 제조사

KP	KN	제 조 사
Chromel	Alumel	Hoskins
T1	T2	Driver Harris
Tophel	Nial	Amax Specialty Metals

+측 소선인 Chromel은 Ni-10Cr계이며, -측 소선인 Alumel은 Ni-2Mn-2Al-1.5Si계로서 -측은 약간의 자성체여서 극성판별시 자석을 이용하기도 한다.

공기 중에서 특히 강하여 열전대 가운데 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 환원성 가스에 약하며 내부의 경우, 유황가스에 대해서는 열기전력의 저하보다 기계적인 강도가 더 빨리 약해진다. 탄소에도 약해서 열전대와 보호관에 기름이나 오염물질이 부착되어 있으면, 고온에서 이들이 탄소가 되어 열기전력 저하의 원인이 되므로 열전대와 보호관은 항상 깨끗이 유지되어야 한다. 금속 가스에는 영향을 받지 않아 실제의 경우 금속제 보호관이 많이 사용된다.

K-type 열전대는 1,000°C 이하에서 주로 사용되고 있으며, 선경에 따라 Φ3.2mm는 상용한도가 1,000°C임 과열사용한도는 1,200°C이나 저온에서도 -200°C 정도까지 사용된다. 이슬점이 -40°C 이하인 경우는 수소나 암모니아 분위기에서 사용해도 좋으며, 열기전력이 크고 온도특성이 직선적이기 때문에 공업적으로 사용되나 안정성은 별로 좋지 못하다.

일반적으로 산화 분위기와 금속 증기에는 강하나 환원성 분위기에 약하며 수소 분위기 중에서는 기전력의 변화가 작아져 단시간에도 전기 저항이 급속히 증가한다. 또한 Chromel 선의 열기전력이 이례적으로 변화하는 경우, 표준으로 사용하는 데에는 일정한 열 cycle, 일정 온도구배를 유지해야 하며 온도구배가 변하면 수 °C의 오차를 일으킨다.

실용화된 K-type 열전대는 전술한 바와 같이 제조사와 사용 목적에 따라 여러 종류의 상품이 있으며, 분위기와 온도에 대한 내구성과 이력변화, 안정성 또는 호환성이 특성에 차가 있으므로 기준 열기전력표와의 편차특성도 달라, 높은 내삽정도를 기대하기가 어렵다.

KS의 기준 열기전력은 여러나라의 것과 동일하며, NBS mograph 125에 의하면 열기전력 E는

$$E = (\mu V) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 \quad (4)$$

여기서 온도상수 a_1, a_2, a_3 및 a_4 는 표 6에 나타나 있다.

나. E-type 열전대

Chromel-Constantan 열전대로서 +측은 Chromel 선을, -측은 Constantan(55% Cu, 45% Ni)을 조합하여 사용한 것이다.

이 열전대의 가장 큰 장점은 열기전력에 있어서 다른 열전대에 비하여 매우 큰 것이며, 비교적 안정하기 때문에 넓은 범위의 온도측정에 이용된다. 그림 4는 E-type과 K-type, J-type을 비교한 열기전력의 관계로, E-type 열전대의 열기전력은 K-type의 약 50%, J-type의 약 20% 정도 높다. 또한 E-type은 K-type 보다 저렴하고, J-type 보다 내식, 내산성이 우수하며 양 단자도 비자성이어서 현재 쓰이고 있는 열전대 중에서 가장 열전도율이 낮은 특징이 있다.

저온은 -200°C까지, 고온은 1,000°C까지 사용 가능하여 대형 화력발전소, 원자력발전소, 화학공업 및 석유공업 등의 산화나 불활성 분위기의 온도측정과 제어에 널리 사용되고 있다. 단 K-type과 마찬가지로 환원성 분위기에 사용하면 전기 저항이 급속히 증가하는 결점이 있다.

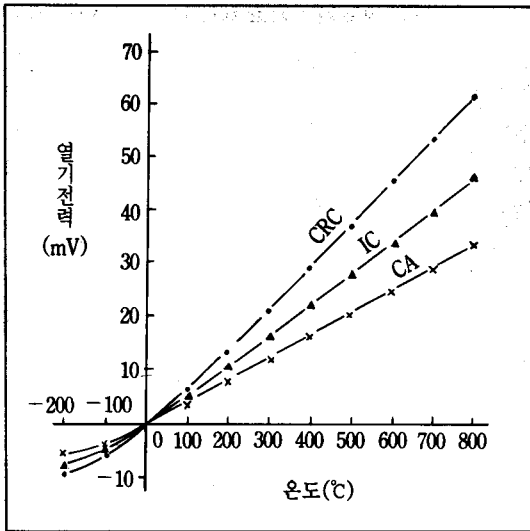


그림 4. K-type, E-type 및 J-type 열전대의 열기전력 비교

다. J-type 열전대

철(Fe)-Constantan 열전대이며, +측은 순수한 철(Fe), -측은 Constantan을 사용한 것으로 순철의 제조가 어렵기 때문에 기전력 특성이 불안정하고 열기전력 규격이 대단히 복잡하여 기준 열기전력표는 나라와 규격마다 다르다. KS에서 정한 기준 열기전력 표는 IEC의 것을 기본으로 한 것이며, -100°C에서 부터 800°C의 영역에서 10⁻²mV까지 사용이 가능하다.

J-type은 철선에 방청처리를 하지 않으면 0°C 이하의 저온에서 산화되기 쉬운 단점이 있으나 환원성 분위기에서 사용이 가능하고 가격도 저렴한 것이 특징이다. 소선경이 Φ3.2mm인 것의 사용한도는 600°C 이하로 되어있으나 그림 5에서 760°C의 실험결과에 의하면 600°C가 넘을 때 급격히 안정도가 나빠진다.

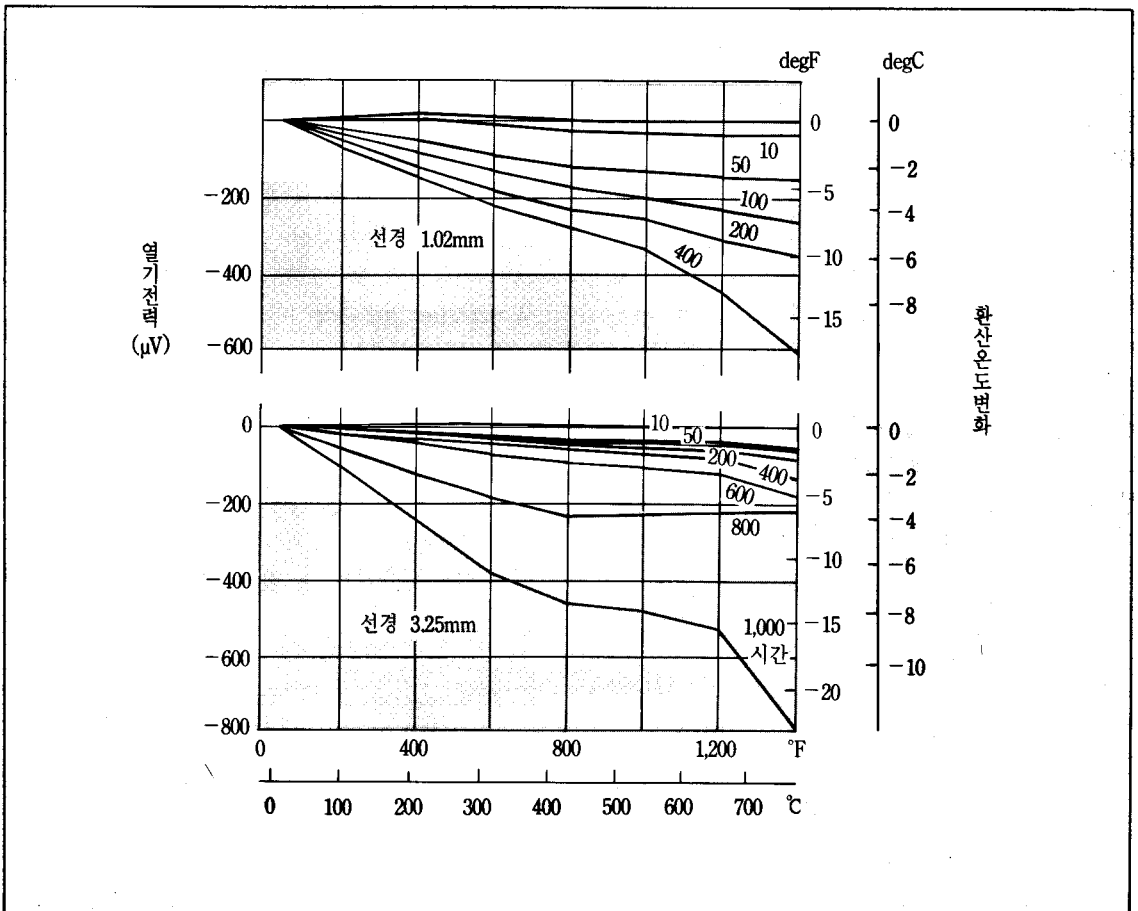


그림 5. J-type 열전대의 760°C에서 안정도

최근 석유화학공업이나 가스화학공업 등의 분야에는 500°C 이하의 환원성 분위기에서의 측정에 많이 사용된다. 공기 중의 내구성에 있어서 D. H. Dahl에 의하면 537°C의 대기 중에서는 1,000 시간에 약 0.4°C의 변화를 보인다.

라. T-type 열전대

동(Cu)-Constantan 열전대이며, +측은 동(Cu), -측은 Constantan으로, 동(Cu)의 산화때문에 대기 중에서의 사용한도는 소선경 $\Phi 1.6\text{mm}$ 의 경우가 300°C이다. 이 열전대는 -100°C에서 300°C의 영역에서 10^{-3}mV 까지 사용되며, 습기가 많은 분위기에서 부식저항이 높으며 주로 영하의 온도(-270°C까지도 가능) 측정에 적합한 저온용 열전대이다.

3.1.3 기타 열전대

일반적인 사용에는 규격화된 열전대가 사용되지만 특별한 목적에 사용하는 경우는 규격화된 것보다 성능이 우수한 새로운 열전대가 많으며, 현재에도 개발 중에 있는 것들이 많다. 여기서 특수한 목적이란 아주 고온용, 원자로 등과 같은 특별한 환경, 또는 심한 진동의 경우 등을 말한다.

가. Ir-Ir · 40%Rh, Ir-Ir · 50%Rh 및 Ir-Ir · 60%Rh 열전대

열전대로 사용되기 시작한 것은 1909년 경으로 오래된 역사를 갖고 있으나 실제로 사용한 것은 1933년 Feussner가 제안한 후였다. 이리듐(Ir)-로듐(Rh) 합금은 용점이 높아서 로듐(Rh) 함량에 따라 여러 종류가 있으나 모두 2,000°C 이상의 고온측정에 사용된다. 그리고 종류에 따른 사용 한도는 다음과 같다.

- Ir-Ir · 40%Rh 2,250°C
- Ir-Ir · 50%Rh 2,202°C
- Ir-Ir · 60%Rh 2,153°C

열전대로는 50% 로듐(Rh) 합금이 좋으나, 일반적으로 40% 로듐(Rh) 합금 열전대가 많이 사용되고 있다. 이 열전대는 진공, 불활성 및 산화성 분위기에 적당하여 고온측정에 사용되나 소선의 제조가 어렵고 매우 고가여서 비경제적이다.

나. W-Ir 열전대

텅스텐(W)-이리듐(Ir) 열전대는 1950년 미국

에서 개발한 것으로, 상용한도가 2,100°C인 고온용이다. 이는 수소 분위기와 불활성 분위기에서는 기전력의 노화가 적지만 이리듐(Ir)이 물리지게 된다. 그리고 산화 분위기에서는 재질적으로 연한 텅스텐(W)이 변질하므로 사용이 어렵다. 그러나 열기전력은 다른 귀금속 열전대에 비해 크다.

다. W-W · 26%Re와 W · 5%Re-W · 26%Re 열전대

텅스텐(W)-레늄(Re) 합금 열전대는 고온측정이 가능하고, 그 종류로는 W-W · 26%Re 열전대, W · 3%Re-W · 25%Re 열전대 및 W · 5%Re-W · 26%Re 열전대가 있다. 열전대 소선으로는 26% 이상의 레늄(Re) 함량을 가진 열전대가 좋으나 고순도 레늄은 가격이 비싸고, 제조상의 문제가 있어 실용화에 어렵다. W-W · 26%Re의 용점은 2,980°C로 2,870°C까지의 온도측정이 가능하나 순수한 텅스텐(W) 소선은 고온에서 연하게 되므로 실용적이지 못하다.

W-W · 26%Re 열전대는 Hoskins사에서 제작 시 판되고 있으며, 2,320°C까지 열기전력표가 작성되어 있으나 전술한 바와 같이 대기 중에서 텅스텐(Wh)이 연화하므로 사용이 불가능하다. 그러나 고온의 환원성, 불활성 및 수소 분위기에서는 사용이 가능하다. W · 5%Re-W · 26%Re 열전대는 W-W · 26%Re 열전대에 비하여 저온에서 사용한다.

라. Platinel 열전대

Engelhard사에서 개발한 열전대로 Platinel-I 과 Platinel-II가 있으나 Platinel-I 열전대를 단순히 Platinel이라고 한다.

열전대의 조성은 Pd · 14%Pt · 3%Au-Au · 35%Pd로서 특징은 표 8과 같이 열기전력이 K-type 열전대와 비슷하며 표 9와 같은 물리적 성질을

표 8. Platinel과 K-type의 열기전력 비교

Temp (°C)	Platinel(mV)	K type(mV)
200	7.133	8.133
400	15.665	16.396
600	24.658	24.902
800	33.414	33.277
1000	41.521	41.269
1200	48.877	48.828

갖고 있다. K-type 열전대와 비교하여 500°C에서 +4°C, 1,000°C에서 +4°C, 1,200°C에서 -23°C의 편차를 보이고 있어서 실용적으로는 K-type과 호환성이 있다.

열기전력의 안정성은, 1,000°C 이상에는 K-type 열전대 보다도 매우 양호하여 1,000°C에서 360시간, 1,100°C에서 290시간 1,200°C에서 200시간 실험을 지속하여도 기전력의 변화는 0.5% 이내이다. 따라서 K-type 열전대 보다도 고온에서 안정하다.

표 9. Platinel 열전대의 물리적 성질

	Platinel (+)	Platinel (-)
Melting Temp.	1608°C (액상) 1570°C (고상)	1447°C (액상) 1426°C (고상)
Density	14.93 g/cc	15.91 g/cc
Composition	55% Pd · 31%Pt · 14%Au	65% Au · 35%Pd
Resistivity		
0°C	184 ohm	144 ohm
200°C	216	158
400°C	247	164
600°C	273	172
800°C	297	184
1000°C	321	199
1200°C	342	215
Expansion Coefficients	Unit/unit°C from 21°C	
200°C	5.89×10 ⁻⁶	7.92×10 ⁻⁶
400°C	8.80×10 ⁻⁶	1.10×10 ⁻⁶
600°C	1.03×10 ⁻⁶	1.05×10 ⁻⁶
800°C	1.12×10 ⁻⁶	1.21×10 ⁻⁶
1000°C	1.19×10 ⁻⁶	1.29×10 ⁻⁶
Thermal Conductivity	Watts/cm°C	
20°C	9.332	0.281
100°C	0.390	0.317
200°C	0.463	0.369
300°C	0.529	0.420
400°C	0.590	0.470
500°C	0.644	0.518
600°C	0.691	0.564
700°C	0.733	0.610
800°C	0.768	0.655
900°C	0.797	0.697

Platinel-II (Pd · 31%Pt · 14%Au-Au · 35%Pd) 는 Platinel-I 과 비슷한 특성을 갖고 있으나 기계적 강도가 Platinel-I 보다 높고 내구성이 좋다.

마. Pallaplat 열전대

Degussa에서 제작한 열전대로, 그 조성은 Pt · 5%Rh-Au · 46%Pd · 2%Pt이며 열기전력이 고온에서 안정하여 높은 정도로 고온측정이 가능하다.

바. Ag-Pd 열전대

저온용 귀금속 열전대로서 고순도 재료를 사용하므로 열기전력 특성이 안정하며, 사용온도 범위는 0°C~600°C이다.

사. Geminol 열전대

+측은 Ni · 20%Cr · 1%Nb · 1%Si, -측은 Ni · 3%Si으로서 K-type 열전대가 환원성 분위기에 약한 점을 개량하기 위하여 Driver-Harris사에서 만든 것이며, 열기전력이 저온에서는 K-type의 약 60%, 1,000°C에서는 약 80% 정도이다.

아. Ni · 10%Cr-Ni 열전대

K-type 열전대 소선에 실리콘(Si)을 첨가한 것으로, 독일 DIN 규격에 규정되어 있으며 K-type 열전대보다 월등히 우수하다. 이것의 특징은 K-type 열전대와 거의 비슷하며 Degussa사의 Nicrosil-Nisil과 Vacuum Schmelz사의 Vacominus가 제품으로써 시판되고 있으며 기준 열기전력은 표 10과 같다.

미국, 일본에서는 K-type 대체 열전대로 사용하기 위한 시험을 완료하여 규격화하려는 움직임이 있다.

자. Cu · 12%Mn · 4%Ni-Cu · 45%Ni 열전대

망간(Mn)-콘스탄탄(Constantan) 열전대로 불리우며 저항의 온도계수가 0에 가까운 열전대로 유명하다. 이 열전대는 소선의 온도에 의한 저항의 변화가 무시되며 기전력은 K-type 열전대와 근사하고 사용범위는 0~600°C이다.

차. Ni-Ni · Fe 열전대

열기전력이 작고 200°C 정도까지는 열기전력이 전부 0인 점이 특징이다. 그리고 기준 접점의 온도변화에 대해 고려할 필요가 없어서 경우에 따라서는 기준접점을 생략할 수도 있다.

카. Ag · 0.37%Au-Au · 0.02%Fe 열전대

극저온용 열전대로서 그 사용범위는 1~40K이

표 10. Ni · Cr-Ni 열전대의 기준 열기전력(DIN 43710)

℃	單位 mV											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	mV/℃
0	0	0.40	0.80	1.20	1.61	2.02	2.43	2.85	3.26	3.68	4.10	0.041
100	4.10	4.51	4.92	5.33	5.73	6.13	6.53	6.93	7.33	7.73	8.13	0.040
200	8.13	8.54	8.94	9.34	9.75	10.16	10.57	10.98	11.39	11.80	12.21	0.041
300	12.21	12.63	13.04	13.46	13.88	14.29	14.71	15.13	15.55	15.98	16.40	0.042
400	16.40	16.82	17.24	17.67	18.09	18.51	18.94	19.36	19.79	20.22	20.65	0.042
500	20.65	21.07	21.50	21.92	22.35	22.78	23.20	23.63	24.06	24.49	24.91	0.043
600	24.91	25.34	25.76	26.19	26.61	27.03	27.45	27.87	28.29	28.72	29.14	0.042
700	29.14	29.56	29.97	30.39	30.81	31.23	31.65	32.06	32.48	32.89	33.30	0.042
800	33.30	33.71	34.12	34.53	34.93	35.34	35.75	36.15	36.55	36.96	37.36	0.041
900	37.36	37.76	38.16	38.56	38.95	39.35	39.75	40.14	40.53	40.92	41.31	0.040
1000	41.31	41.70	42.09	42.48	42.87	43.25	43.65	44.02	44.40	44.78	45.16	0.039
1100	45.16	45.54	45.92	46.29	46.67	47.04	47.41	47.78	48.15	48.52	48.89	0.037
1200	48.89	49.25	49.62	49.98	50.34	50.69	51.05	51.41	51.76	52.11	52.46	0.036

* 100℃ 범위에서의 평균치

다. 같은 목적으로 사용하기 위해 Cu-Au · 0.02%Fe, Cu-Au · 0.07%Fe 등도 있으며, 귀금속을 사용하면 안정성이 약 ±0.02K 정도로 좋다.

타. Pt · Rh-Pt · Rh 열전대

표준화된 S-type이나 R-type 열전대는 짧은 시간 동안이라면 백금(Pt)의 녹는 점인 1,769℃까지도 사용할 수 있으나, 1,200℃ 이상의 고온에서 장시간 사용하기 위해서는 특수한 백금(Pt)-로듐(Rh) 열전대가 필요하다.

Pt · 40%Rh-Pt · 20%Rh 열전대는 Land-Jewell 열전대라 불리우며, 1,800℃까지의 온도영역에서 계속해서 사용할 수 있고 경우에 따라서는 1,850℃까지도 사용된다. 그러나 이 열전대는 열기전력이 작고 값이 비싸므로 B-type 열전대를 사용할 수 있는 온도영역에서는 거의 사용되지 않는다. 고온 측정에 사용되는 열전대로는 Pt · 13%Rh-Pt · 1%Rh type과 Pt · 20%Rh-Pt · 5%Rh type이 있다. 전자는 R-type이나 S-type 보다 오염과 열화화적인 특성이 우수하며, 후자는 B-type과 비슷하다.

파. Pt · 15%Ir-Pd 열전대

기전력이 큰 귀금속 열전대로 개발된 것인데,

기전력이 다른 귀금속 열전대보다 크고 가격도 비교적 저렴하다.

또한 열전대 출력의 선형성이 좋으며 제백계수는 온도가 증가함에 따라 증가하며, 진동이 없는 경우에는 파라듐(Pd)이 녹는 점인 1,554℃까지도 사용할 수 있다. 그리고 내산화성은 백금(Pt) 합금에 비해 다소 못하지만 다른 여러가지 특성이 비금속(base metal)보다 우수하다.

하. Pt · 5%Mo-Pt · 0.1%Mo 열전대

로듐(Rh)을 포함한 백금(Pt) 합금은 중성자를 쪼이면 로듐(Rh)이 서서히 파라듐(Pd)으로 바뀌므로 중성자가 있는 환경에서는 적합하지 못하다. 그러나 이 열전대는 가스로 냉각시키는 원자로의 헬륨(He) 분위기에서 사용하기에 알맞으며, 1,400℃까지도 사용할 수 있으며 열전대의 출력도 크고 온도가 증가함에 따라 비교적 균일하게 증가한다. 그리고 대개 Pt · 5%Mo 합금의 sheath에 넣어 사용한다.

한편 그림 6과 표 11에는 각각 이상의 기타로 분류된 각종 열전대의 온도에 따른 열기전력과 기준 열기전력 보간식을 나타내고 있다.

표 11. 기타 열전대의 기준열기전력 보간식

열전대 종류	온도구간(℃)	보 간 식
Platinel II	0~800	$E = \sum_{i=0}^5 a_i t^i \mu V$ 여기서 $a_0 = 0$ $a_1 = 0.298\ 123\ 15 \times 10^{-1}$ $a_2 = 0.351\ 103\ 97 \times 10^{-4}$ $a_3 = -0.343\ 228\ 15 \times 10^{-7}$ $a_4 = 0.134\ 995\ 59 \times 10^{-10}$ $a_5 = -0.263\ 115\ 23 \times 10^{-14}$
	800~1395	$E = \sum_{i=0}^5 b_i t^i \mu V$ 여기서 $b_0 = 0$ $b_1 = 0.298\ 413\ 07 \times 10^{-1}$ $b_2 = 0.399\ 908\ 39 \times 10^{-4}$ $b_3 = -0.429\ 030\ 13 \times 10^{-7}$ $b_4 = 0.189\ 358\ 61 \times 10^{-10}$ $b_5 = -0.344\ 353\ 53 \times 10^{-14}$
W-3%Re vs W-25% Re	0~783	$E = \sum_{i=0}^5 a_i t^i \mu V$ 여기서 $a_0 = 0$ $a_1 = 0.956\ 852\ 56 \times 10^{-2}$ $a_2 = 0.205\ 926\ 21 \times 10^{-4}$ $a_3 = -0.184\ 645\ 73 \times 10^{-7}$ $a_4 = 0.794\ 980\ 33 \times 10^{-11}$ $a_5 = -0.142\ 407\ 35 \times 10^{-14}$
	783~2495	$E = \sum_{i=0}^5 b_i t^i \mu V$ 여기서 $b_0 = 0$ $b_1 = 0.991\ 094\ 62 \times 10^{-2}$ $b_2 = 0.186\ 664\ 88 \times 10^{-4}$ $b_3 = -0.149\ 352\ 66 \times 10^{-7}$ $b_4 = 0.537\ 438\ 21 \times 10^{-11}$ $b_5 = -0.790\ 267\ 26 \times 10^{-15}$

열전대 종류	온도구간(°C)	보 간 식
Ir-40%Rh vs Ir	0~520	$E = \sum_{i=0}^6 a_i t^i \mu V$ 여기서 $a_0 = 0$ $a_1 = 0.308\ 706\ 56 \times 10^{-2}$ $a_2 = 0.696\ 206\ 82 \times 10^{-5}$ $a_3 = -0.842\ 173\ 12 \times 10^{-8}$ $a_4 = 0.102\ 574\ 17 \times 10^{-10}$ $a_5 = -0.149\ 198\ 28 \times 10^{-13}$ $a_6 = 0.994\ 674\ 98 \times 10^{-17}$
	520~2110	$E = \sum_{i=0}^5 b_i t^i \mu V$ 여기서 $b_0 = -0.299\ 540\ 20$ $b_1 = 0.462\ 868\ 82 \times 10^{-2}$ $b_2 = 0.389\ 155\ 10 \times 10^{-5}$ $b_3 = -0.423\ 350\ 27 \times 10^{-8}$ $b_4 = 0.174\ 718\ 18 \times 10^{-11}$ $b_5 = -0.246\ 126\ 66 \times 10^{-15}$
Pt-5% Mo vs Pt-0.1% Mo	0~490.077	$E = \sum_{i=0}^7 a_i t^i \mu V$ 여기서 $a_0 = 0$ $a_1 = 0.105\ 265\ 70 \times 10^{-1}$ $a_2 = 0.273\ 213\ 56 \times 10^{-4}$ $a_3 = -0.289\ 861\ 01 \times 10^{-7}$ $a_4 = 0.162\ 980\ 84 \times 10^{-10}$ $a_5 = 0.476\ 797\ 15 \times 10^{-13}$ $a_6 = -0.116\ 897\ 62 \times 10^{-15}$ $a_7 = 0.784\ 156\ 91 \times 10^{-19}$
	490.077~1600	$E = \sum_{i=0}^7 b_i t^i \mu V$ 여기서 $b_0 = 0.152\ 901\ 36 \times 10^{-1}$ $b_1 = 0.298\ 850\ 06 \times 10^{-2}$ $b_2 = 0.368\ 226\ 17 \times 10^{-4}$ $b_3 = -0.206\ 303\ 42 \times 10^{-7}$ $b_4 = -0.363\ 644\ 35 \times 10^{-11}$ $b_5 = 0.149\ 679\ 51 \times 10^{-13}$ $b_6 = -0.899\ 564\ 29 \times 10^{-17}$ $b_7 = 0.177\ 766\ 75 \times 10^{-20}$

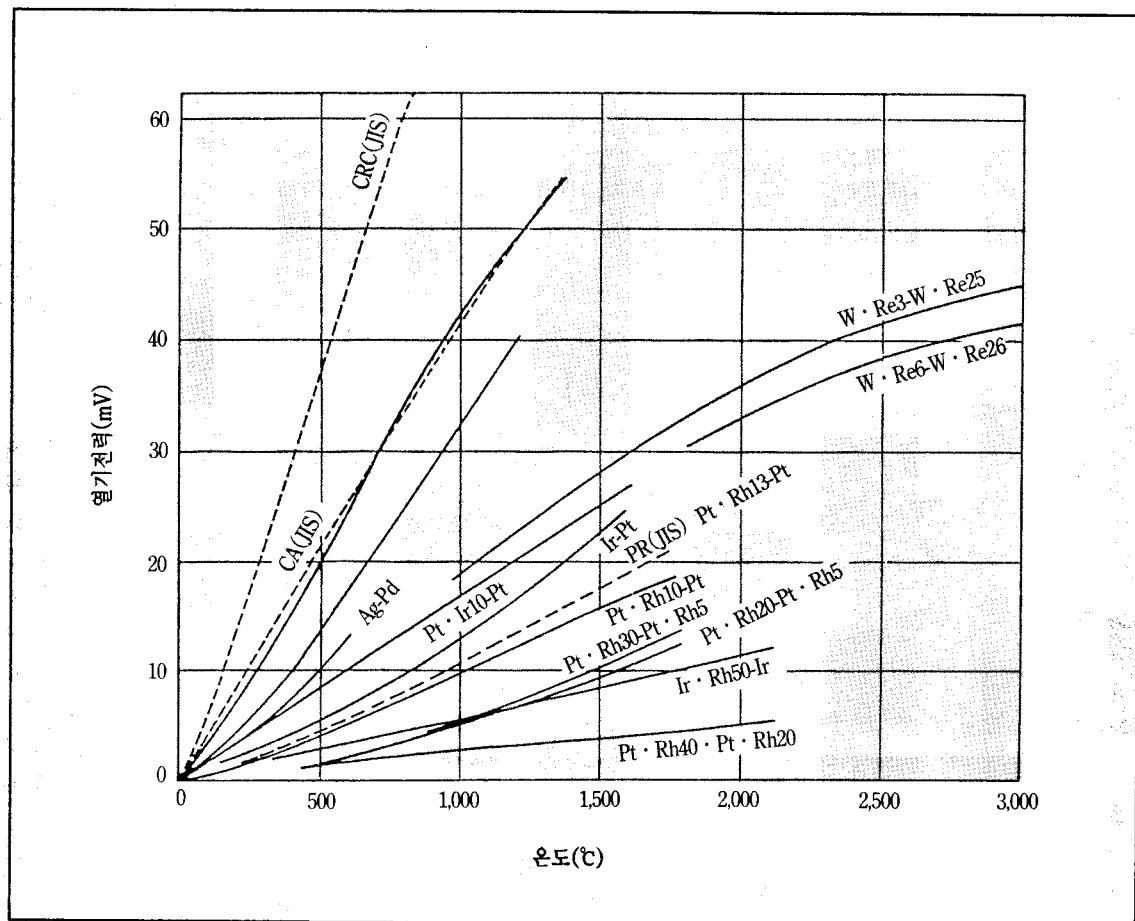


그림 6. 기타 열전대의 온도에 따른 열기전력

참 고 문 헌

1. 日本學術振興會, 製鋼 第19委員會: 第2分科會, 高溫測定の標準化研究(1988)
2. 溫도의計測: 計測技術 series 5, ユロナ社
3. 因招靜一 責任編集: 低溫 工立實驗物理學講座, 工立出版(1988)
4. 佐佐木政治: 實用溫度測定, 日本熱エネルギー技術協會(1977)
5. 배길호, 김형규: Proceeding of the 2nd Rok-Roc, Metrology Symposium(KSRI-88-75-SP)
6. Robert P. Bendeict: Fundamentals of temperature pressure and flow measurement, 2nd Ed, John Wiley & Sons, Inc., USA(1976)
7. American Society for Testing and Materials: Manual on the use of thermocouples in temperature measurement, STP 470A, Philadelphia, Pa (1916)
8. 김창주, 한광현, 오충섭: Alumel-Chromel 선재 제조, MBI 101-1923C
9. KS C 1602
10. KS A 0511
11. KS C 1609