

Pt/Pd 열전대의 실온보상을 위한 Cu-Ni 합금 개발

김용규[†] · 강기훈 · 감기술 · 이영희

Development of Cu-Ni Binary Alloys for Room Temperature Compensation of Pt/Pd Thermocouple

Yong-Gyoo Kim[†], Kee Hoon Kang, Kee Sool Gam, and Young Hee Lee

Abstract

Compensation wires for Pt/Pd thermocouple was manufactured using Cu/Ni alloys. Their thermoelectric voltage has been tested from room temperature to about 150 °C. Alloys of Cu_{95.5}Ni_{4.5} and Cu_{89.5}Ni_{10.5} introduced only small emf differences to Pt/Pd thermocouples, indicating a real possibility of industrial use. Above 1000 °C, the temperature difference was expected to be small as ±0.5 °C, and the difference would be minimized by adjusting the Ni content with a small amount.

Key Words : Pt/Pd thermocouple, compensation wire, Cu/Ni alloy, thermoelectric voltage

1. 서 론

최근 국제적으로 금, 백금 혹은 팔라듐을 이용한 순금속 열전대의 연구가 활발히 진행되고 있다. 순금속 열전대의 대표적인 것으로는 Au/Pt와 Pt/Pd를 들 수 있다^[1-6]. 이러한 열전대들이 널리 연구되고 있는 것은 열전대를 구성하는 성분이 순수 금속으로써 기존 열전대 재료에서 나타나는 조성변화에 따른 열기전력 특성 변화가 거의 나타나지 않아 안정적인 열전기적 성질을 보여주기 때문이다.

Au/Pt 열전대는 상온에서 최대 1000 °C까지 사용될 수 있으며, 10 mK 이내의 최고 측정능력을 보인다고 보고되었다^[3]. 그러나 Au/Pt의 허용 온도영역이 1000 °C 이하로 제한되어 있어 실제 철강, 반도체, 초자산업 등에서 요구하는 1000 °C 이상 온도영역에서의 정밀 온도측정이 불가능하므로 최근에 백금과 팔라듐을 이용한 Pt/Pd 열전대가 개발되었다. Pt/Pd 열전대의 온도에 따른 열기전력 테이블은 이태리 표준기관(IMGC)와 미국 NIST에서 공동으로 연구하여 만들어졌으며 현재

미국 공업시험규격(ASTM)으로 제정되어 있다^[4,7].

그러나 현재 상기 열전대들은 현재까지 실험실 수준에서만 사용이 가능하다. 열전대를 산업체에서 사용하기 위해서는 가격 면에서 매우 고가인 순금속을 대체하여 사용할 수 있는 실온 보상선이 개발되어 있어야 한다. 지금까지 순금속 열전대를 대상으로 한 실온 보상선 개발에 관한 연구 보고가 거의 없어 이에 대한 연구가 필요한 실정이다. 최근 구리와 니켈을 주 원료로 사용한 금속 재료의 온도에 따른 실온영역 부근의 Seebeck 계수가 발표되었다^[8]. 저자들에 따르면 Ni 함량이 상대적으로 5.0 wt% 정도 차이가 있는 구리-니켈 합금쌍의 열기전력 특성이 Pt/Pd 열전대와 유사하다는 결과가 발표되었다. 이 결과는 구리-니켈 합금이 Pt/Pd 열전대의 실온 보상선으로 사용될 수 있음을 알려주고 있다.

이 연구에서는 안정적이고 정확하며 산업용으로 적용 가능성이 더 큰 Pt/Pd 순금속 열전대를 산업체에 적용하기 위하여 저가의 천이금속을 주재료로 한 보상선을 개발하고자 하였다. 현재 상용 열전대 중에서 귀금속 타입인 S형과 R형, B형은 모두 구리를 주 금속으로 한 구리 합금을 보상선으로 사용하고 있다^[9]. 일반적으로 보상선 재료로 구리가 많이 사용되고 있고 또한 가격 면에서 유리하므로 이 연구에서도 구리를 주 원료로 선택하였으며, 합금원소로 열전체재료로 많이 이용되

한국표준과학연구원 물리표준부 온습도그룹(Temperature-Humidity Group, Div. Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS))

[†]Corresponding author: dragon@kriiss.re.kr

(Received : October 1, 2004, Accepted : October 13, 2004)

는 니켈을 선택하였다. 최종적으로 Pt/Pd 열전대의 상온보상용 소선으로 적합한 구리-니켈 합금선을 제작하여 온도에 따른 열기전력을 측정된 뒤 실온 보상선으로 가장 적합한 합금쌍을 선택하고자 하였다.

2. 제 1차 구리/니켈 합금선 제조 및 특성평가

실험에 사용된 구리와 니켈은 모두 99.9% 정도의 상용제품이었다. 초기에 제작된 시편의 조성은 각각 중량비로 5% 차이가 있도록 $Cu_{90}Ni_{10}$ (S/N : 2002Ni5)과 $Cu_{95}Ni_5$ (S/N : 2002Ni10)를 목표로 하였다. 합금선은 국내 소선제작업체에 의뢰하여 지름 1.0 mm 굵기로 제작되었다. 제조된 시편의 성분을 EPMA(Electron Probe Micro Analysis)를 사용하여 분석하였으며 Table 1에 그 결과를 나타내었다.

모든 시편의 경우 목표조성에 비하여 Ni의 함량이 미달된 것으로 분석되었다. 시편간의 니켈 함량 차이는 약 4.5 wt%이었다. X-선 회절분석기를 이용하여 이 시편들의 제2상 존재여부 및 결정구조를 분석하였다. Fig. 1은 각 시편의 X-선 회절 분석 결과이다. 구리와 니켈은 상태도 상에서 전용고용체를 형성하며 따라서 면심입방체(FCC) 구조를 가지고 있다. Fig. 1은 전형

표 1. 1차 제작된 시편의 성분분석

Table 1. Composition analysis of samples made at the first test

시편 분류번호	목표조성/wt %	실제 조성/wt %
2002Ni5	5.0 % Ni	4.5 % Ni
2002Ni10	10.0 % Ni	9.0 % Ni

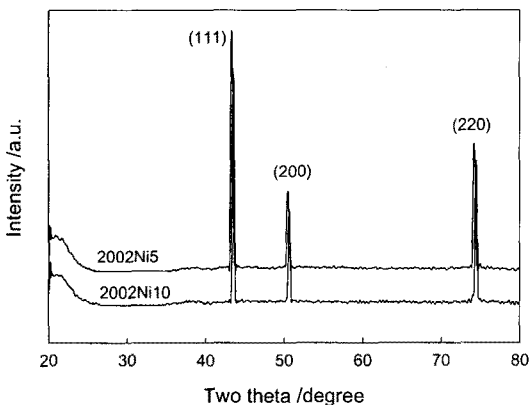


그림 1. 2002Ni5와 2002Ni10 시편의 X-선 회절패턴
Fig. 1. XRD diffraction patterns for 2002Ni5 and 2002Ni10 wires.

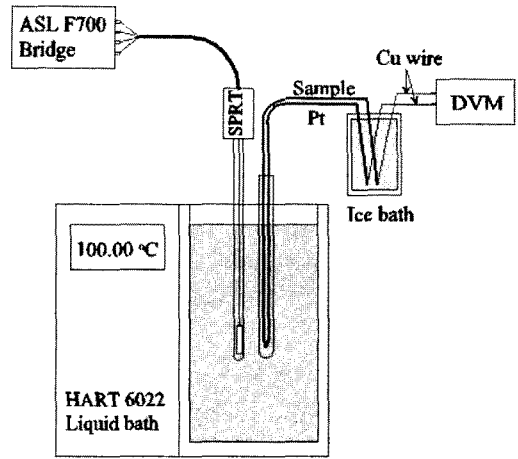


그림 2. 열기전력 측정시스템의 개요도

Fig. 2. Schematic diagram of the thermal emf measurement system.

적인 FCC 결정의 X-선 회절선을 보여주며 제2상의 존재가 관찰되지 않고 있다. 또한 니켈의 함량이 증가함에 따라 (111) 회절선의 위치가 높은 각도로 움직이고 있다. 이는 니켈의 원자 반경이 구리에 비해 작아 면간 거리가 니켈 함량에 따라 감소하기 때문이다. 이러한 분석으로부터 시편은 균일하게 제조되었음을 확인할 수 있었다.

제작된 시편의 온도에 따른 열기전력은 순수 백금선을 기준선으로 연결하여 측정하였으며, 측정은 상온에서 150 °C까지 실시하였다. Fig. 2는 열기전력 측정 시스템의 개요도이다. 5 mK 이내의 온도안정도를 가지고 일정한 온도로 유지되고 있는 액체항온조 내에 시편과 백금을 접촉시킨 열전대와 기준온도를 측정하기 위한 표준 백금 저항온도계(Standard Platinum Resistance Thermometer, SPRT)를 장입하고 온도에 따른 열기전력을 측정하였다. 백금선을 음극으로 하고 시편은 양극선으로 연결하여 측정하였다. 열기전력 측정은 디지털 볼트미터(Keithley 2001)를 사용하였으며, SPRT (Rosemount 162 CE)는 AC 브리지(ASL F700)를 이용하여 저항변화를 측정하였다. 시편 소선과 디지털 볼트미터와의 연결은 고순도 구리선을 사용하였으며, 열전대 시편의 기준점(Reference point)은 상용의 물과 얼음 혼합 빙점조를 사용하였다.

Fig. 3에 2002Ni10과 2002Ni5 소선에 대한 백금과의 상대기전력(Relative thermal emf) 변화를 측정 온도에 따라 나타내었다. 온도가 증가함에 따라 두 소선 모두 백금과의 상대기전력 값이 감소하는 거동을 보여주었으며 니켈 함량이 상대적으로 높은 2002Ni10 시편

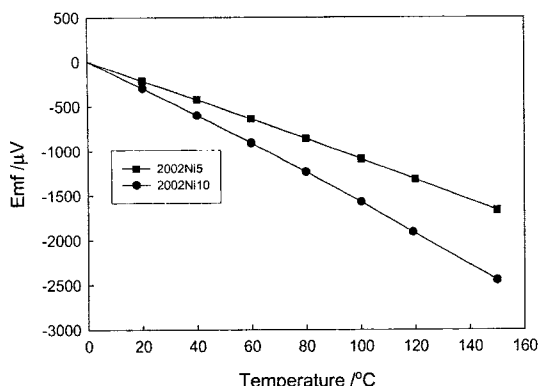


그림 3. 백금을 기준으로 측정된 각 시편의 온도에 따른 열기전력
 Fig. 3. Thermal emf of 2002Ni5 and 2002Ni10 wires with reference to Pt wire.

이 보다 낮은 기전력을 보여주었다. 이것은 2002Ni5 시편이 2002Ni10에 비해 높은 열전기적 포텐살을 가지고 있다는 것을 의미하여 두 소선을 접합시켜 열전 회로를 구성하였을 때 양극으로 작용하는 것을 나타낸다. 그림의 실선은 2차 다항식으로 내삽한 것이다. 실선의 내삽 값이 0°C일때 0 μV로 접근하는 것을 알 수 있는데 이것은 빙점에서 열전대의 열기전력이 발생하지 않아야 한다는 이론적 해석^[10]과 일치하여 측정결과가 신뢰성있게 얻어졌음을 확인할 수 있다. 2002Ni5 소선과 2002Ni10 소선의 열기전력, E(2002Ni5 vs 2002Ni10),는 다음 식(1)과 같이 표현되며 그림의 두 실선 간의 상대적 차이를 나타낸다.

$$E(2002Ni5 \text{ vs } 2002Ni10) = E(2002Ni5 \text{ vs Pt}) - E(2002Ni10 \text{ vs Pt}) \quad (1)$$

Fig. 4(a)는 식(1)을 사용하여 구한 두 소선간의 열기전력 변화와, 비교를 위하여 Pt/Pd 열전대의 온도에 따른 열기전력을 나타내었다. 그림의 실선은 실제 Pt/Pd 열전대의 열기전력 변화 곡선이며, 원형 마크는 Fig. 3의 측정 결과를 이용하여 계산한 값이다. 그림에서 보는 바와 같이 온도가 증가함에 따라 Pt/Pd 열전대의 기전력과 편차가 점차 증가하고 있으며 Pt/Pd의 열기전력에 비해 음의 값을 보이고 있다. 이는 이 연구에서 제작된 소선을 이용하여 실온 보상선 회로를 구성하였을 경우 실제 온도에 비하여 낮은 값을 지시함을 의미한다. 이 편차를 자세히 살펴보기 위하여 Fig. 4(b)에 온도에 따른 편차 기전력(Deviation emf)과 편차 온도(Deviation temperature)를 나타내었다. 그림의 좌측 Y축은 편차 기전력을 나타내고, 우측 Y축은 편차온도를

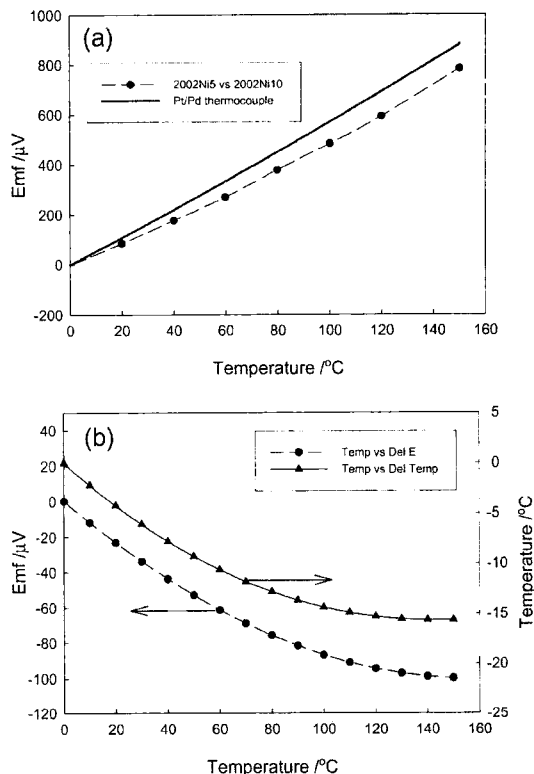


그림 4. (a) 2002Ni5/2002Ni10 쌍의 열기전력, (b) Pt/Pd 열전대와와의 편차기전력 및 편차온도
 Fig. 4. (a) Thermal emf of 2002Ni5/2002Ni10 thermocouple combination and (b) Deviation emf and temperature against Pt/Pd thermocouple.

나타낸다. 편차기전력은 시편의 기전력에서 Pt/Pd 열전대의 기전력 값을 뺀 것이고, 편차온도는 편차기전력을 Pt/Pd 열전대의 Seebeck 계수^[6]로 나누어 구하였다. 온도가 증가함에 따라 편차기전력의 크기가 음의 값으로 증가하며 초기에는 직선적으로 변화한 후 비교적 높은 온도에서는 포화되는 경향을 보이고 있다. 최대 15°C 이상의 큰 온도편차를 보이고 있으며, 이와 같이 큰 편차를 갖는 경우에는 실온 보상선으로써 사용이 불가능한 것으로 판단되어 제작된 소선의 열전기적 특성이 Pt/Pd 열전대의 실온 보상선으로 적합하지 않음을 알 수 있었다.

3. 제 2차 구리/니켈 합금선 제조 및 특성평가

제 2차 실험에서는 모두 5종류의 소선을 제작하였다. Table 2에 제조된 시편의 조성을 나타내었다. 시편의 제작 과정 및 성분 분석은 제 1차 실험과 동일하였다.

표 2. 2차 제작된 시편의 성분분석

Table 2. Composition analysis of samples made at the second test

시편 분류번호	조성/wt %
2003Ni2	1.9 % Ni
2003Ni4	3.9 % Ni
2003Ni6	6.5 % Ni
2003Ni10	9.5 % Ni
2003Ni14	13.9 % Ni

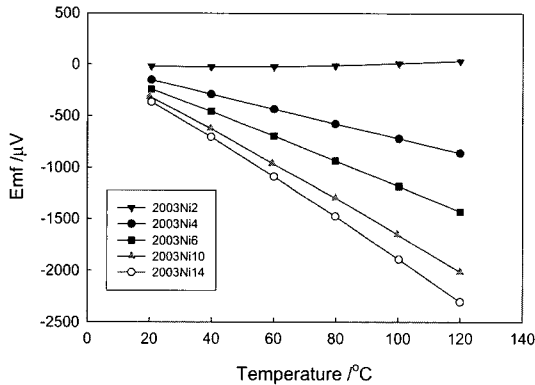


그림 5. 백금을 기준으로 측정한 각 시편의 온도에 따른 열기전력

Fig. 5. Thermal emf of several Cu-Ni wires with reference to Pt wire.

제조된 소선의 결정구조 및 제 2상 존재여부는 제 1차 실험과 동일한 방법으로 X-선 회절 분석기를 이용하여 조사하였으며, FCC 구조를 갖는 단일 구리-니켈 고용체 합금만이 관찰되었다. 니켈의 함량이 증가할수록 니켈과 구리의 원자반경의 차이로 인하여 회절선의 위치는 더 높은 회절각에서 나타났다.

Fig. 5는 제 2차 실험에서 제조된 소선의 온도에 따른 열기전력 변화를 나타낸 것이다. 소선의 열기전력은 백금을 기준선으로 측정하였으며 모든 측정 과정은 Fig. 3의 경우와 동일하였다. 니켈 함량이 증가할수록 Fig. 3의 경우와 마찬가지로 열기전력이 감소하며 니켈의 함량에 의존하는 조성 의존성을 나타내었다. Fig. 3의 결과와 Fig. 5의 결과를 바탕으로 이 연구에서 제작된 7개의 합금 중에서 Pt/Pd 열전대의 온도에 따른 열기전력 변화 특성에 가장 유사한 합금쌍을 찾고자 하였으며 다양한 조합 중에서 최적의 합금쌍으로 2002Ni5와 2003Ni10 소선을 찾을 수 있었다.

Fig. 6은 위에서 선택된 2002Ni5와 2003Ni10 합금선의 온도에 따른 열기전력 변화 곡선을 나타낸다. 열

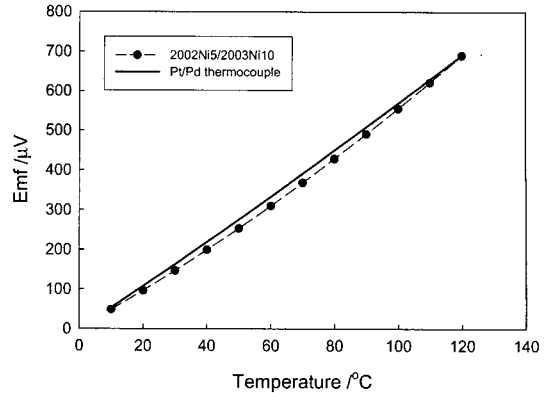


그림 6. 2002Ni5/2003Ni10 쌍과 Pt/Pd 열전대의 열기전력
Fig. 6. Thermal emf of 2002Ni5/2003Ni10 and Pt/Pd thermocouple combination.

기전력은 식(1)을 이용하여 계산되었으며 비교를 위해 Pt/Pd 열전대의 열기전력 변화를 같이 나타내었다. 조사된 전체 영역에서 서로간의 열기전력이 상당히 일치함을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 60°C에서 80°C 구간에서 가장 큰 편차를 보이고 있으나 저온과 고온 영역에서는 일치도가 매우 높음을 알 수 있다. Fig. 4와 Fig. 6의 결과를 비교해보면 편차의 방향이 음의 방향으로 동일하게 나타나고 있는데 Fig. 4의 경우에는 Ni 함량의 차이가 4.5%였으며, Fig. 6의 경우에는 5.0%이었다. 따라서 Ni 함량의 차이가 5.0% 보다 조금 더 클 경우 음의 편차는 극복될 수 있는 것으로 믿어진다. 그것은 구리-니켈 합금선의 열기전력이 니켈 함량에 의존성을 가지기 때문이며 더욱 정밀한 소선 조성은 추가적인 연구를 통하여 밝혀질 것으로 생각된다.

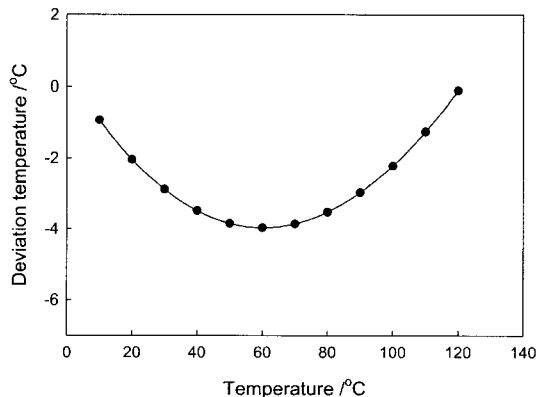


그림 7. Pt/Pd 열전대에 대한 2002Ni5/2003Ni10 시편의 편차온도

Fig. 7. Deviation temperature of 2002Ni5/2003Ni10 thermocouple combination against Pt/Pd thermocouple.

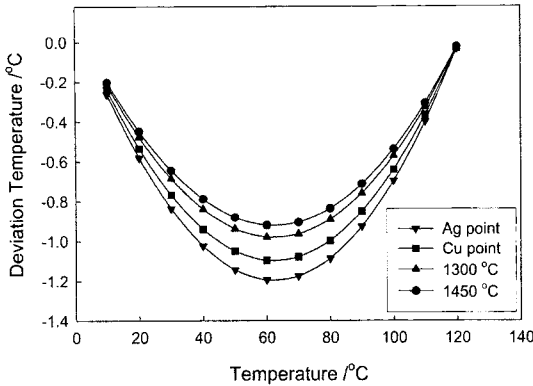


그림 8. 2002Ni5/2003Ni10쌍을 Pt/Pd 열전대에 연결시켰을 때 각각의 온도에서 예상되는 편차온도변화 거동
Fig. 8. Expected temperature reading error of 2002Ni5/2003Ni10 compensation wires at the elevated temperatures in case of connection to the Pt/Pd thermocouple.

Fig. 7은 2002Ni5와 2003Ni10 소선의 열기전력파 Pt/Pd 열전대의 열기전력 차이를 온도로 환산하여 나타난 것이다. 조사된 전체 온도영역에서 4 °C 이내의 편차를 보이고 있으며 약 60 °C 부근에서 최대 편차를 보이고 있다. 전체적으로 ± 2 °C 내의 편차를 보이고 있는데 이는 기존 S형이나 R형 열전대의 실온 보상선 허용 오차한계인 ± 5 °C 보다 적게 나타나고 있음을 알 수 있다^[9]. 특히 실온 보상선이 주로 사용되는 온도영역인 30 °C 이하에서는 ± 1.5 °C 정도로 적게 나타나 실용적으로 가치가 있음을 보여주고 있다.

Fig. 8은 이 연구에서 선정된 실온 보상선을 실제 온도 측정에 적용하였을 때 예상되는 측정온도 편차를 여러 온도에서 나타낸 것이다. 평가된 온도는 은 응고점 (961.78 °C), 구리 응고점(1084.62 °C), 1300 °C 및 1450 °C이다. 은과 구리 응고점은 국제온도준급 1990에서 정의된 고정점이고^[11], 1300 °C와 1450 °C는 상용 한계온도 및 과열 한계온도이다. X축은 실온 보상선과 Pt/Pd 열전대가 서로 접합되는 접합점의 온도를 의미하고, Y축은 예상 편차온도를 나타낸다.

온도가 증가함에 따라 편차온도의 폭은 감소하며 은 응고점에서 최대 약 1.2 °C의 편차가 예상되고 1450 °C에서는 0.8 °C 정도의 작은 편차가 예상되고 있다. 온도가 증가함에 따라 편차 온도가 감소하는 것은 Pt/Pd 열전대의 Seebeck 계수가 온도에 따라 변화하는 온도 의존성을 가지고 있기 때문이다^[4]. 상온 25 °C에서 Pt/Pd 열전대의 Seebeck 계수는 약 $5.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 이나 은 응고점에서는 $19.1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 로 약 4배 가까이 증가하고 1450 °C

에서는 $24.9 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 정도의 큰 값을 보이고 있다. 따라서 실온 보상선이 가지고 있는 고유한 온도 편차는 열전대와 실온보상선의 연결점 온도가 상온부근으로 낮을 경우 전체 기전력에 미치는 영향이 상대적으로 줄어들어 Fig. 8과 같이 낮은 온도편차를 보여주게 된다.

이를 확인하기 위하여 연구에서 제작한 $\text{Cu}_{95.5}\text{Ni}_{4.5}$ 와 $\text{Cu}_{89.5}\text{Ni}_{10.5}$ 실온 보상선을 이용하여 구리 응고점(1084.62 °C)의 실현 온도를 Pt/Pd 열전대로 측정하였다. 측정 시 실험실 온도는 23 ± 1 °C였다. 온도 측정은 별도로 제작한 Pt/Pd 열전대 전용 디지털 온도 지시계를 이용하였다. 구리 응고점이 실현된 후 Pt/Pd 열전대를 온도 지시계에 직접 연결하였을 때 지시 온도는 1082.7 °C를 나타내었다. 구리응고점 온도와 약 2 °C 정도의 편차를 보이고 있는데 이것은 실험에 사용된 Pt/Pd 열전대 소선의 자체 특성과 온도지시계의 정밀정확도에 기인한 것이다. 이후 실온보상선의 한 쪽 끝을 Pt/Pd 열전대에 연결하고 다른 쪽 끝을 온도 지시계에 연결하였을 때 지시온도는 1082.5 °C를 나타내었다. 실온보상선 연결 전 후에 약 -0.2 °C의 편차를 보이고 있는데 이 값은 Fig. 8의 예측값 -0.5 °C와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 또한 Pt/Pd 열전대와 실온보상선 열결점의 온도를 60 °C로 상승시켰을 때 온도 지시계는 1081.2 °C를 나타내었다. 즉, 실제 온도에 비해 약 -1.5 °C 정도의 온도측정 편차가 발생하였고 이 결과는 Fig. 8의 예측값인 -1.1 °C에 접근한 값을 보여주고 있다. 결국 이 연구에서 제작한 실온 보상선을 사용하여 온도 측정을 실시한 결과 실온에서 1 °C 이내의 정확도를 가지고 온도측정이 가능함을 확인할 수 있었다.

Pt/Pd 열전대 연구의 주된 목적이 1000 °C 이상의 고온에서 기존의 열전대를 대체할 보다 정밀한 온도센서 개발임을 감안하면 이 연구에서 선정된 구리-니켈 합금 실온보상선의 특성이 상당히 우수함을 알 수 있다. 결론적으로 $\text{Cu}_{95.5}\text{Ni}_{4.5}$ 와 $\text{Cu}_{89.5}\text{Ni}_{10.5}$ 합금은 Pt/Pd 열전대의 실온 보상선으로 사용이 가능하며 1000 °C 이상에서 약 ± 0.5 °C 정도의 온도편차를 나타내었다.

4. 결 론

순금속 열전대인 Pt/Pd의 산업체 적용을 위한 실온 보상선 개발을 위해 구리-니켈을 주원료로 한 이원계 합금선을 제작하였다. 제작된 7개의 소선을 액체 항온조에서 최대 150 °C까지 액체항온조에서 백금을 기준선으로 설정하여 온도에 따른 열기전력을 측정하였으며 조사된 소선 중 Pt/Pd 열전대의 실온 보상선 재료로 최적의 조성으로 $\text{Cu}_{95.5}\text{Ni}_{4.5}$ 와 $\text{Cu}_{89.5}\text{Ni}_{10.5}$ 을 선정하였

다. 이 합금쌍과 Pt/Pd 열전대와의 온도편차는 실온부근에서 최대 4 °C 정도의 편차를 보였으며 구리 응고점에서는 1.0 °C로 감소하여 실용성이 있음이 확인되었다. 이러한 편차는 니켈 함량을 미량 조절함으로써 더욱 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 결국 $\text{Cu}_{95.5}\text{Ni}_{4.5}$ 와 $\text{Cu}_{89.5}\text{Ni}_{10.5}$ 합금은 Pt/Pd 열전대의 실온 보상선으로 사용이 가능함을 알 수 있었으며 1000 °C 이상에서 약 ± 0.5 °C 정도의 온도편차를 나타내었다.

참고 문헌

- [1] Y.-G. Kim, K. S. Gam, and K. H. Kang, "Thermoelectric Properties of the Au/Pt Thermocouple", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 69, pp. 3577-3582, 1998.
- [2] E. H. McLaren and E. G. Murdock, "The Pt/Au Thermocouple", *NRCC Publication 27703*, 1987.
- [3] D. C. Ripple and G. W. Burns, "Thermoelectric Properties of a Selected Lot of Gold Versus Platinum Thermocouples", *9th Int. Symp. on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science*, Dubrovnik, 22-25 June, Croatia, 2004.
- [4] G. W. Burns, D. C. Ripple, and M. Battuello, "Platinum Versus Palladium Thermocouples; An Emf-temperature Reference Function for the Range 0 °C to 1500 °C", *Metrologia*, vol. 35, pp. 761-780, 1998.
- [5] F. Edler and H. Lehmann, "Mechanical Stability of Pt/Pd Thermocouple", *9th Int. Symp. on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science*, Dubrovnik, 22-25 June, Croatia, 2004.
- [6] K. D. Hill, "An Investigation of Palladium Oxidation in the Platinum/Palladium Thermocouple System", *Metrologia*, vol. 39, pp. 51-58, 2002.
- [7] "Standard Guide for Temperature Electromotive Force (EMF) Tables for Non-Letter Designated Thermocouple Combination", ASTM E1751.
- [8] Y.-G. Kim, K. H. Kang, K. S. Gam, J. C. Kim, and J. H. Kim, "Measurement of the Seebeck Coefficients of Binary Cu-Ni Alloys", *Mea. Sci. Instrum.*, vol. 15, pp. 1266-1270, 2004.
- [9] "열전대용 보상도선", KS C 1609.
- [10] R. E. Bentley, "Theory and Practice of Thermoelectric Thermometry", Springer, Singapore, 1998.
- [11] H. Preston-Thomas, "The International Temperature Scale of 1990", *Metrologia*, vol. 27, pp. 3-10, 1990.

김 용 규

- [센서학회지 제3권 제1호, 논문 94-3-1-09. p. 61 참조]
- 현재 한국표준과학연구원 온습도그룹 책임연구원

감 기 슬

- [센서학회지 제3권 제1호, 논문 94-3-1-09. p. 61 참조]
- 현재 한국표준과학연구원 온습도그룹 책임연구원

강 기 훈

- [센서학회지 제9권 제3호, 논문 2000-9-3-01 p. 153 참조]
- 현재 한국표준과학연구원 온습도그룹 책임연구원

이 영 희

- 한국표준과학연구원 온습도그룹 선임연구기원