

산업용 백금저항온도센서의 결선방식에 따른 측정불확도 평가방법

김용규 · 감기술[†] · 양인석

Uncertainty assessment of industrial platinum resistance thermometers for different lead-wire connection methods

Yong-Gyoo Kim, Kee Sool Gam[†], and Inseok Yang

Abstract

To estimate the measurement uncertainty for industrial platinum resistance thermometers(IPRTs) made with 3-wire connection, the immersion temperature profile was investigated using a liquid bath. Two types of IPRTs having lead wires made of silver and nickel were constructed and the immersion profiles were measured at temperatures from -50°C to 250°C using 3-wire and 4-wire method. As immersion depth and temperature increased, the resistances measured by 3-wire method increased linearly but not for 4-wire method. To calibrate a 3-wire IPRT, the immersion effect must be accounted for. We propose a linear equation to assess correctly the measurement uncertainty.

Key Words : industrial platinum resistance thermometer, 3-wire method, immersion effect, standard uncertainty, calibration

1. 서 론

산업용 백금저항온도계(industrial platinum resistance thermometer; IPRT)는 백금의 저항이 온도에 따라 변화하는 물리적 성질을 이용하여 개발된 온도센서로서 백금의 비저항이 온도증가에 따라 대체로 선형적으로 증가하며, 정밀한 온도를 안정적으로 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. IPRT는 -200°C 에서부터 850°C 까지 넓은 사용온도 범위를 가지고 있으며 $0.01^{\circ}\text{C}\sim 0.1^{\circ}\text{C}$ 정도의 측정불확도 수준을 보여주고 있어 비교적 정밀한 온도측정에 이용되고 있다¹⁻³⁾.

IPRT는 백금선 혹은 백금합금선 2개를 양단에 부착한 백금저항체에 측정용 연결선을 붙이는 방법에 따라 3선식과 4선식으로 제작하여 사용된다. 3선식은 백금저항체의 한쪽선에 2개의 리드선을 붙이고, 나머지 한쪽선에 1개의 리드선을 붙여서 저항측정브릿지에 연결되는 센서로서, 이 경우 1개의 리드선을 붙인 선은 전류, 전압 공통 측정선으로 사용된다. 4선식은 백금저항체의 양단에 각

각 2개의 리드선을 붙여 전류인가선과 전압측정선을 분리시킨 것으로 리드선의 저항이 측정에 영향을 미치지 않도록 제작함으로써, 리드선에 의한 저항측정 오차가 발생하지 않도록 제작한 것이다. 3선식은 한 개의 선이 공통선으로 사용됨에 따라 백금저항체의 저항값에 리드선의 저항이 포함되어 측정되는 구조를 가지고 있으나, 산업현장에서는 경제적인 이유로 인하여 3선식 센서 및 측정장비(온도지시계 혹은 조절계)가 많이 활용되고 있다.

최근 국내에서 3선식 및 4선식 IPRT의 차이를 간과하여 온도측정 및 교정과정에서 온도측정값 및 교정불확도 산정방법에 대한 혼란이 야기되고 있다. 이 문제는 기존 IPRT 교정절차서에서 4선식 IPRT에 대해서만 온도측정 방법 및 불확도 산정법이 제시되어 있을 뿐, 3선식 방법에 대해서는 별도의 절차가 구비되어 있지 않아 발생한 것이다⁴⁾. 본 연구에서는 3선식과 4선식 IPRT의 결선방식에 따라 항온조 내에서의 담금깊이에 따른 측정값의 변화를 조사하였으며, 그 결과를 바탕으로 3선식 IPRT에 대한 측정불확도 평가방법을 제안하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

리드선의 종류에 따른 변화 정도를 조사하기 위하여

한국표준과학연구원 기술표준본부(Div. Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science)

[†]Corresponding author : ksgam@kriss.re.kr
(Received : April 2, 2009, Accepted : July 16, 2009)

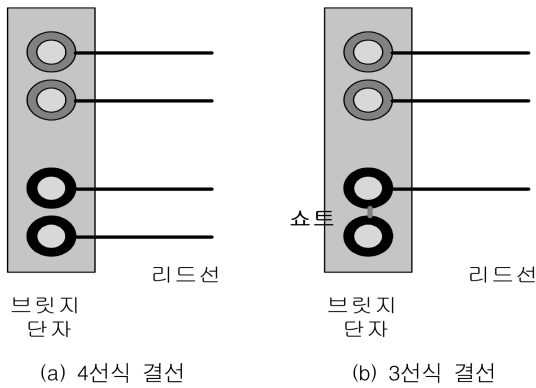
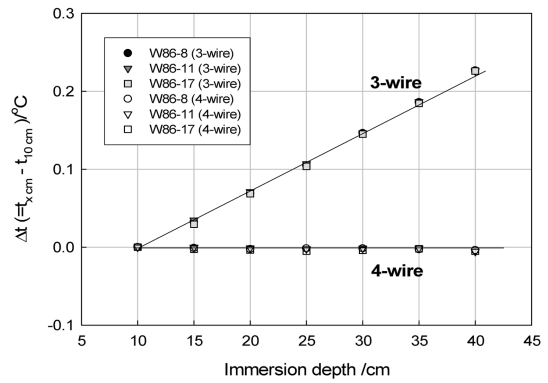


Fig 1. Connecting method of 4-wire and 3-wire measurements.

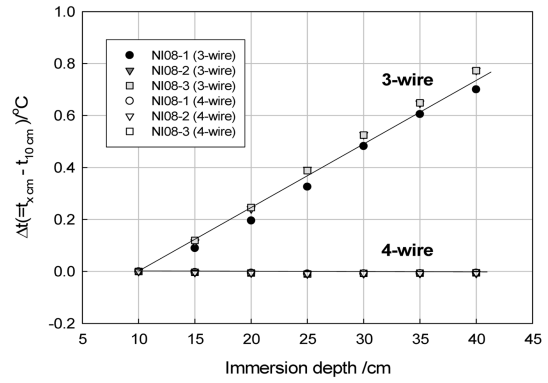
비저항이 다른 은¹⁾과 니켈²⁾ 리드선을 선택하여 IPRT 센서를 제작하였다⁴⁾. 니켈 리드선은 국내에서 제작하는 대부분의 IPRT에 사용되고 있으며, 연구용으로 제작할 경우는 리드선을 사용하는 경우가 있다. 세라믹 봉입형 센서에 은(S/N: W86-6, W86-11, W86-17)과 니켈(S/N: NI08-1, NI08-2, NI08-3) 리드선을 부착한 IPRT를 각각 3개씩 준비하였다. 각 센서의 공칭저항은 빙점에서 100 Ω이며 온도계수(α 값; 0 °C에서 100 °C까지의 단위 온도당 평균 저항 변화율)는 국제표준규격인 0.00385 이었다. 센서는 60 cm 길이의 쉬스형으로 제작하였으며 4선식으로 리드선을 연결하였다.

액체항온조의 온도를 -50, 50, 150 및 250 °C로 단계별로 변화시키면서 4개의 교정점에서 담금깊이에 따른 IPRT의 저항을 측정하였다. IPRT의 센서부를 항온조 액면에서부터 10 cm 깊이에서 40 cm 깊이까지 5 cm 간격으로 변화시키면서 담금 깊이에 따른 영향을 조사하였다. 이때 IPRT의 저항측정은 AC 브릿지(ASL사 Model F700)를 사용하였으며, 액체항온조의 기준온도 측정에 사용된 기준온도계는 국제온도준급-1990에 명시된 방법으로 일차교정된 표준백금저항온도계를 사용하였다⁴⁾. 본 연구에서 3선식 방식으로 IPRT를 측정하고자 할 경우에는 리드선 한 개를 사용하지 않고 브릿지에 3개의 리드선을 연결한 후 브릿지의 단자를 서로 합선시키는 방법을 사용하였다. 이 방법은 리드선을 3개만 부착한 IPRT를 브릿지로 측정할 경우에 사용하는 것으로서 본 연구에서와 같이 4선식으로 만든 IPRT를 3선식 방식으로 측정할 때 통상적으로 적용하는 방법이다. Fig. 1에 4선식과 3선식으로 IPRT를 결선하는 방법을 나타내었다. 기준온도계는 항온조 온도를 정확하게

1) 20 °C에서 은의 비저항과 온도계수: $1.59 \times 10^{-8} \Omega m, 4.1 \times 10^{-3} / ^\circ C$
 2) 20 °C에서 니켈의 비저항과 온도계수: $6.84 \times 10^{-8} \Omega m, 6.8 \times 10^{-3} / ^\circ C$



(a) 은 리드선



(b) 니켈 리드선

Fig. 2. Temperature difference with the immersion depth at 250 °C for 3-wire measurement and 4-wire measurement of (a) IPRTs with silver lead wires and (b) IPRTs with nickel lead wires.

측정하기 위하여 사용하였다. 각각의 센서는 -50 °C에서부터 250 °C까지 순차적으로 온도를 증가시키면서 측정하였다. 측정에 앞서 IPRT는 안정화를 위해 400 °C에서 24시간 동안 열처리하였으며, 열처리 직후 10mK 이내의 변화를 보여 안정화되었다고 판단하였다.

3. 실험결과

Fig 2의 (a) 및 (b)는 각각 250 °C에서 은 리드선과 니켈 리드선 IPRT를 깊이에 따라 측정하여 온도로 환산하여 나타낸 그림이다. 온도차이는 담금깊이가 10 cm 인 값을 기준으로 상대적인 변화로 나타내었다. 그림에서 실선은 3개의 IPRT에 대한 측정값을 1차식으로 내삽한 것이다. 4선식의 경우에는 리드선의 종류에 관계 없이 담금 깊이가 증가함에 따라 일정한 값을 보여주고 있으나, 3선식의 경우에는 담금 깊이가 증가함에 따

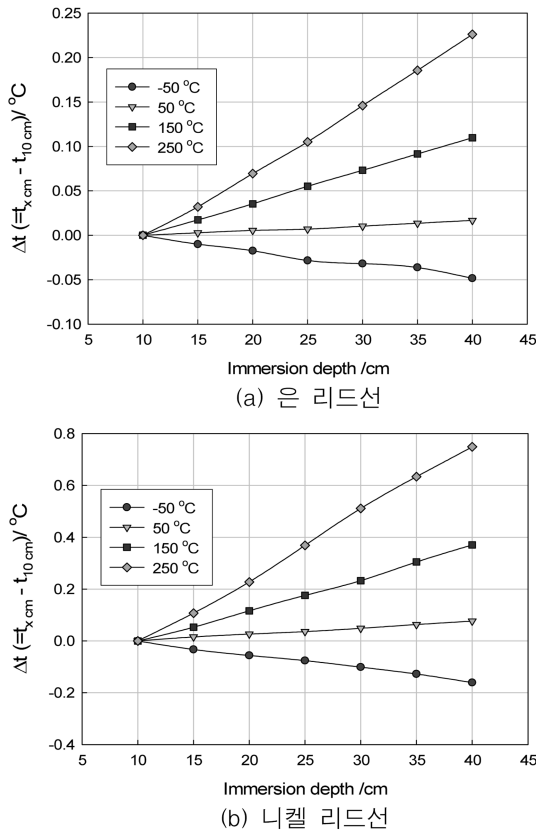


Fig. 3. Temperature changes of IPRTs made of (a) silver and (b) nickel lead wires with the immersion depth by 3-wire measurements at each bath temperature.

라 거의 직선적으로 저항값이 증가하고 있다. 리드선 종류에 따른 온도변화 폭은 비저항과 온도계수가 은에 비하여 큰 니켈 리드선이 크게 나타나고 있다. 이것은 측정선으로 사용된 리드선의 저항이 측정값에 영향을 미치고 있다고 사료된다.

Fig. 3의 (a) 및 (b)는 각각의 온도에서 담금깊이에 따른 온도변화량을 10 cm를 기준점으로 하여 종합적으로 나타낸 그림이다. 이 그림에서 각 데이터는 3개의 IPRT 측정값을 평균하여 나타낸 것이다. 빙점이하의 온도에서는 담금깊이가 증가할수록 점진적으로 IPRT 저항값이 감소하였으며, 50 °C 이상 온도의 경우에는 온도가 증가함에 따라 IPRT 저항값도 증가하였다.

Table 1은 각 온도에서 은과 니켈선으로 리드선을 제작한 IPRT의 담금깊이 의존성을 정리하여 나타낸 것이다. 실온 이하의 온도에서는 은의 값을 가지며 온도가 올라감에 따라 점차 증가하고 있다. 250 °C에서는 니켈 리드선의 경우 1 cm 길이 변화에 따라 무려 25 mK

Table 1. Temperature coefficients with immersion depth of 3-wire measurement of IPRTs with Ag and Ni lead wires.

Measurement temperature(°C)	IPRT of Ag lead wire (mK/cm)	IPRT of Ni lead wire (mK/cm)
-50	-1.61	-5.36
50	0.56	2.55
150	3.66	12.35
250	7.54	24.97

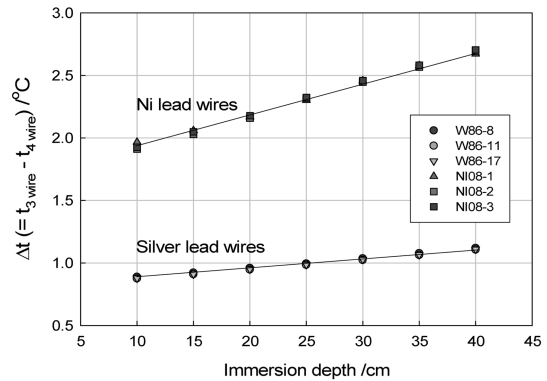


Fig. 4. Temperature differences between 3-wire and 4-wire measurements for each lead wires with the immersion depth at 250 °C.

정도의 온도변화를 나타내고 있어 측정불확도 평가시에 매우 주의하여야 한다. 반면 은 리드선의 경우에는 니켈의 1/3 정도로 작은 값을 보여주고 있으나 정밀한 온도측정에서는 담금깊이 효과에 의한 온도측정오차가 발생하므로 역시 주의하여야 할 것이다.

Fig. 4는 250 °C에서 각각의 IPRT를 3선식으로 측정 한 값과 4선식으로 측정 한 값과의 온도차이를 담금깊이에 따라 나타낸 것이다. 담금깊이가 증가할수록 온도 차이가 커지고 있으며, 니켈 리드선으로 제작한 IPRT의 변화폭이 은 리드선에 비하여 훨씬 크게 나타나고 있다. 온도편차는 담금깊이에 직선적으로 변화하는 결과를 보여주고 있으며 각 리드선 타입별로 3개의 IPRT 센서가 매우 유사한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 5의 (a) 및 (b)는 각각 전체 측정온도에서 담금깊이 별로 3선식과 4선식 측정방법의 차이에 따른 온도 차이를 각각의 리드선 종류에 따라 나타낸 것이다. 측정온도가 증가할수록 온도차이가 증가하고 있으며, 250 °C에서는 니켈 리드선의 경우 무려 2.69 °C에 달할 만큼 큰 편차가 나타났다. 통상적으로 4선식 IPRT의 교정불확도가 0.1 °C를 넘지 않는 것을 감안하면 3선식으로 사용할 경우에 발생하는 온도측정 편차로 인하여, 온도측정 및 교정결과를 더 이상 신뢰할 수 없는 것으

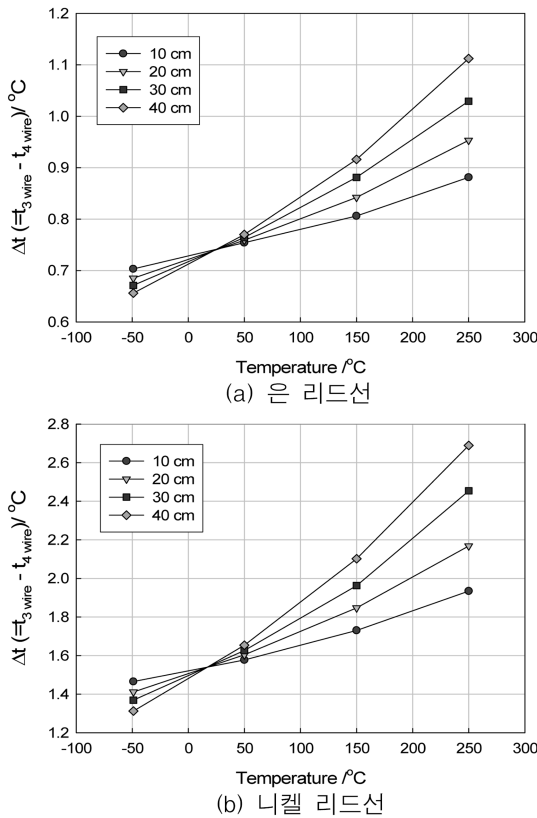


Fig. 5. Temperature differences between 3-wire and 4-wire measurements at each immersion depth with bath temperature. (a) Silver lead wires (b) Nickel lead wires.

로 판단된다. -50°C 에서는 담금깊이가 커질수록 3선식과 4선식간의 온도차이가 작게 나타난다. 이것은 3선식 측정방법에서 추가되는 리드선의 저항이 온도가 감소할수록 작아지게 되어 전체 측정값에 영향을 미치는 정도가 작아지기 때문이다. 실온 부근에서는 각 담금위치에 따른 온도편차 내삽선들이 서로 교차하고 있다. 그러나 실온이상인 50°C 부터 담금깊이가 깊을수록 온도 차이가 커지며, 250°C 까지 항온조 온도가 올라감에 따라 담금위치에 따른 편차폭이 크게 증가하고 있다.

4. 측정 불확도 평가

일반적으로 온도센서의 교정은 사용자의 요구조건에 맞추어 실시하나 센서의 담금깊이에 대한 요구는 하지 않는다. 그런데 교정실의 교정용 항온조와 온도센서가 실제 사용되는 현장에서의 조건이 동일하지 않아 3선식 IPRT나 열전대(thermocouple)는 담금깊이가 측정값

의 불확도에 큰 영향을 미친다.

3선식 IPRT의 담금깊이에 따른 온도편차를 평가하기 위해서는 먼저 Fig. 3과 같이 담금깊이를 달리하면서 측정을 하여야 한다. 그런데 본 실험결과에서 알 수 있듯이 일정온도에서 IPRT의 반응특성은 직선성을 잘 나타내고 있으므로 비교적 간단하게 불확도를 평가할 수 있다. 측정불확도 평가는 GUM(guide to the expression of uncertainty in measurement)에 명시된 방법을 준수하여 다음과 같은 방식으로 불확도를 산정한다^[7].

먼저 교정용 항온조의 최대 담금깊이를 확인하여야 한다. 통상적으로 30 cm 이상이면 적당하다고 할 수 있다. 교정하고자 하는 IPRT를 20 cm 깊이에 설치한 후 항온조의 온도를 교정하고자 하는 온도영역의 최대 온도로 설정하여 온도를 안정화시킨다. 온도가 안정화된 후 20 cm 깊이에서 IPRT의 저항을 측정한다(이 예에서는 R_{20} 으로 표기한다). 그후 IPRT를 다시 5 cm 정도 더 깊게 담그거나 혹은 빼내어 다시 저항을 측정한다. 이 예에서는 25 cm 깊이를 선택하였으며, 이를 R_{25} 로 나타낸다. 두 지점에서 측정된 값을 이용하여 (1)식과 같이 IPRT의 담금깊이에 따른 저항 의존성($R_{t,i}$)를 구한다.

$$R_{t,i} = \frac{(R_{25} - R_{20})}{5} (\Omega/\text{cm}) \quad (1)$$

3선식 IPRT의 교정불확도 평가시에 위 (1)식으로 구한 담금깊이 효과에 따른 불확도 인자 $u(t_{imm})$ 를 추가하여야 한다. 표준불확도는 담금깊이 의존성을 직사각형 분포로 가정하여 (2)식과 같이 구한다.

$$u(t_{imm}) = C_r \cdot \frac{R_{t,i}}{\sqrt{3}} (x - 20) (^{\circ}\text{C}) \quad (2)$$

여기서, $u(t_{imm})$ 는 담금깊이에 따른 저항측정 표준불확도($^{\circ}\text{C}$), C_r 는 IPRT의 저항에 따른 온도변화 계수($^{\circ}\text{C}/\Omega$), x 는 임의의 담금 깊이(cm)이다. 따라서, 교정된 IPRT를 사용하여 온도를 측정할 경우, 혹은 비교교정에 IPRT를 기준기로 사용할 경우 담금깊이에 따른 IPRT의 저항값 변화를 측정 후 (2)식에 준용하여 표준불확도를 산정하여야 한다. 만약 IPRT를 (2)식과 같이 교정성적서에 주어진 기준 위치와 다른 깊이에서 사용할 경우에는 확장 불확도를 실제 상황에 맞게 재평가하여야 한다. 이를 위해 교정검사기관에서는 3선식 IPRT를 교정하여 성적서를 발행할 경우 필히 담금깊이에 따른 온도편차 정도를 확인한 후 교정성적서에 담금깊이 효과에 의한 표준불확도 인자값을 제공해야 한다.

5. 결 론

3선식 IPRT를 액체 항온조에서 교정할 때 담금 깊이에 따라 측정값의 변화가 발생하였다. 담금 깊이가 증가하거나 교정온도가 높아질수록 깊이에 따른 변화폭이 증가하였다. 이는 3선식 온도센서의 공통도선이 저항측정에 포함되기 때문에 나타나는 현상으로 통상적인 금속 재질을 사용할 경우 피할 수 없는 현상이다. 3선식 IPRT를 4선식 방식으로 교정할 경우 매우 큰 오차가 발생하였으며, 니켈리드선을 사용하여 제작한 센서의 경우 250 °C에서 40 cm 길이로 담가 교정하였을 경우 2.69 °C 결선방식 차이에 따른 온도차이가 발생하였다. 3선식 IPRT를 교정할 경우 담금 깊이에 따른 IPRT의 저항변화를 추가하여 교정 불확도인자를 산정해 주어야 한다. 또한, 교정성적서에는 IPRT 교정에 사용된 담금깊이를 분명히 명시하고, 담금깊이에 의해 발생하는 추가 불확도 인자를 교정성적서에 포함하여야 한다.

참고 문헌

- [1] *Techniques for approximating the international temperature scale of 1990*, BIPM, 2005.
- [2] P.Marcarino, A.Merlone, P.P.M.Steur, A.Actis, and M.Antinori, "Proposal:new reference functions for industrial platinum resistance thermometers", *TEMP-MEKO 2004*, vol. 2, pp. 807-812, 2004.
- [3] T.Weckstrom, "Pt-100 thermometers and the ITS-90", *TEMPMEKO 2004*, vol. 2, pp. 813-816, 2004.
- [4] 산업용 저항온도계 표준교정절차서, KASTO 03-50106-077, 한국계량측정협회, 2003.
- [5] *Smithells Metals Reference Book*, 8th edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
- [6] H. Preston-Thomas, "The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)", *Metrologia*, vol. 27, pp. 3-10, 1990.
- [7] 측정불확도 표현지침, KRIS-98-096-SP, 한국표준과학연구원, 1998.

김 용 규

- 센서학회지 제13권, 제6호, (2004) pp. 416 참조
- 현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 책임연구원

감 기 술

- 센서학회지 제18권, 제2호, (2009) pp. 116 참조
- 현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 책임연구원

양 인 석

- 센서학회지 제15권, 제4호, (2006) pp. 262참조
- 현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 선임연구원