

정밀온도측정을 위한 서미스터 교정

감기술 · 김용규 · 양인석*

Calibration of Thermistors for Precision Temperature Measurements

Kee Sool Gam, Yong-Gyoo Kim, and Inseok Yang*

Abstract

We demonstrated that high-stability thermistors can be calibrated with an uncertainty less than 1 mK, if the error due to the heat conduction is minimized. We first investigated the effect of the self-heating of typical thermistor probes to see how accurate we need to determine the effect of self-heating. We, then, calibrated thermistors and fitted the results using various modeling equations. We found out that the heat conduction is an important factor in achieving the calibration uncertainty under 1 mK for thermistors when the diameter of the probe is as thick as 10 mm. Therefore, we controlled the room temperature within 0.5 °C to minimize the heat conduction error during the calibration. The calibration with an uncertainty below 1 mK was possible when the stabilization time for each calibration was long enough to obtain a good thermal equilibrium.

Keywords : Thermistor, Calibration, Steinhart-Hart, Fitting Order, Self-Heating

1. 서론

서미스터는 온도에 따라 저항이 변화하는 성질을 이용하는 세라믹 반도체 소자로서 주로 온도제어용 센서에 활용되고 있다. 이와 같은 특성을 이용하여 온도계로도 활용이 가능하며 작은 크기로 만들 수 있어서 빠르게 변화하는 온도 측정에 이용할 수 있다. 또, 개별 센서 따라 조금씩 차이가 있지만 상대 감도계수가 약 4 %/°C 정도로서 백금저항온도계가 약 0.4 %/°C 인 것에 비하면 10 배 정도의 상대감도계수를 갖는다. 즉, 작은 온도 변화에도 큰 상대저항변화를 나타내므로 미세한 온도 변화를 감지하는데 적합하다. 그러나 저항온도계에 비해서 자기가열효과(self-heating effect)가 크고 안정도가 떨어지며, 온도-저항의 관계가 매우 비선형적이므로 정밀 측정에 사용되기에는 약점을 갖고 있었다. 따라서 서미스터는 0.1 °C 정도의 정밀도가 요구되는 실용적인 온도 측정에 많이 이용되었다.

그러나 최근에는 공정기술의 발달로 1 mK 수준의 높은 안정도를 갖는 센서들이 제품화되고 있다[1]. 또 과거에는 서미스터의 비선형적인 저항 특성을 선형적인 출력 신호로 변환해주는 추가적인 전자회로의 구성이 필요했지만, 최근에는 마이크로프로세서의 발달로 인하여 온도-저항의 관계를 실시간으로 소프트웨어적으로 계산하

여 사용하는 것이 어렵지 않기 때문에 비선형성이 더 이상 문제가 되지 않는다. 따라서 충분히 높은 안정도를 갖는 서미스터의 자기가열효과를 적절히 고려하여 정밀하게 교정하고 알맞은 온도-저항 관계식을 사용하면 서미스터를 이용하여 온도를 1 mK의 불확도 이내로 측정하는 것이 가능할 수도 있다.

본 연구에서는 서미스터를 이용하여 온도를 1 mK 이내의 불확도로 측정할 수 있도록 교정하는 것이 가능한지를 시험하였으며, 이를 위해서 어떤 점에 주의를 기울여야 하는지를 조사하였다.

2. 이론

서미스터의 온도-저항간의 관계식으로서 가장 일반적인 식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{T} = \sum_{i=0}^N a_i (\ln(R/R_0))^i \quad (1)$$

여기서 T 는 절대온도로 나타낸 온도, R 은 서미스터의 저항, 그리고 R_0 는 일정한 고정저항값으로서 보통 1 Ω이나 1 kΩ을 대입한다. 계수 a_i 는 $1/T$ 을 종속변수, $\ln(R/R_0)$ 를 독립변수로 하는 다항식에 교정결과를 대입하여 최소자승법으로 얻어내는 계수이다.

정밀하지 않은 측정에서는 $1/T$ 이 $\ln(R/R_0)$ 와 선형적인 관계를 갖는다고 가정하여 식 (1)에서 로 둔 식을 사용하는 것으로 충분하다.

한국표준과학연구원 기반표준본부(Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science)

*Corresponding author : iyang@kriss.re.kr

(Received : Aug. 11. 2011, Accepted : Sep. 2. 2011)

하지만 이것은 0.1 °C 보다 더 좋은 온도측정 정확도가 필요할 경우에는 적합하지 않고, 일반적으로 정밀측정을 위해서는 $N=2$ 혹은 $N=3$ 을 사용한다. 또는 $N=3$ 이면서 $a_2=0$ 로 고정된 식을 사용하기도 하는데, 이 식을 Steinhart-Hart 식이라고 한다[2]. Steinhart-Hart식의 경우 fitting으로 결정할 계수의 개수가 $N=2$ 식과 같다.

서미스터의 단위 온도변화당 저항 변화, 즉, 감도계수를 구하기 위해서는 식(1)에서 $N=1$ 을 대입한 식을 사용하는 것으로 충분하다. 이 경우에는

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} &= a_0 + a_1 \ln(R/R_0) \\ &= a_0 + \frac{\ln(R/R_0)}{B} \end{aligned} \quad (2)$$

라고 쓸 수 있으며, 여기서 $B(=1/a_1)$ 는 서미스터의 'B 상수' 라고 부르며 보통 2000 K에서 6000 K 사이의 값을 갖는다[3]. 서미스터의 감도계수는 위 식으로부터

$$\frac{dR}{dT} = - \frac{R}{T^2 a_1} = - \frac{RB}{T^2} \quad (3)$$

이며, 서미스터의 상대감도계수는

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = - \frac{1}{T^2 a_1} = - \frac{B}{T^2} \quad (4)$$

이 된다. 따라서 $a_1=0.000285(B=3510K)$ 인 서미스터의 상대감도계수는 0 °C에서는 4.70 %/°C이며, 온도가 증가할수록 서서히 감소하여 50 °C에서는 3.36 %/°C가 된다.

서미스터는 온도에 민감하게 반응하는 저항 센서이므로 저항 측정을 위하여 전류를 흐르게 하면 줄(Joule)열의 발생으로 온도가 상승하게 되고 따라서 저항값이 변한다. 이것을 온도계의 자기가열효과라고 하는데, 서미스터의 경우에는 큰 저항값으로 인하여 다른 저항온도계에 비해서 큰 자기가열효과를 가지고 있다. 따라서 1mK 급의 정밀한 온도측정을 위해서는 사용하고 있는 서미스터의 자기가열효과가 얼마나 큰지에 대한 정보를 갖고 있어야 한다. 서미스터의 자기가열효과와 크기와 관련된 파라미터는 손실상수(dissipation constant)로서 다음과 같이 정의한다[4]:

$$\delta = \frac{\Delta P}{\Delta T} \quad (5)$$

여기서 ΔP 는 서미스터로부터 단위시간에 방출되는 열량(일률)이며, ΔT 는 그 결과로 발생하는 서미스터의 온도변화이다. 이 값은 서미스터가 방출하는 단위 일률당 해당 서미스터의 저항변화 $\frac{dR}{dP}$ 를

통해서 측정가능하며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta = \frac{dR/dT}{dR/dP} = - \frac{RB}{T^2 dR/dP} \quad (6)$$

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 서미스터와 교정 시스템

이 실험에 사용한 서미스터는 기계적 충격에 강하고 안정도가 우수한 비드형 서미스터로서 제작사가 제시한 안정도는 105 °C에서 연간 0.005 °C 이내이다. 이 센서를 이용하여 Fig. 1과 같이 서미스터 프로브(probe)를 제작하였다. 서미스터 프로브는 충격과 화학적인 부식이 발생할 수 있는 실제 측정 현장에서 사용하는 프로브들과 비슷한 조건이 되도록 길이 450 mm, 직경 10 mm인 스테인레스 스틸 316을 사용하였다. 보호관내의 서미스터는 테플론 코팅된 구리선을 사용하여 손잡이를 통하여 외부 연장선과 연결되어 있다. 서미스터의 열전달을 향상시키기 위하여 보호관 내에는 고열전도면서 열전도가 좋은 에폭시를 충전하였다. 본 실험에서는 여섯 개의 서미스터 소자를 제작하여 각각 TT-10-001에서 TT-100-006까지의 고유번호를 부여하였다. 개별 소자는 동일한 제작사의 동일한 배치(batch)의 센서로부터 제작한 것이므로 25 °C에서의 저항값, 온도감도계수 등의 명칭특성값은 동일한 것으로 볼 수 있다.

서미스터의 비교교정을 위해서 액체항온조와 빙점조를 사용하였다. 액체항온조는 Hart Scientific사의 모델 7012 항온조로서 온도안정도 및 온도구배가 0.5 mK 이내이기 때문에 1 mK의 불확도로 서미스터를 교정하는데에 적합하다. 빙점의 온도안정도 및 구배도 1 mK 이내였다.

비교교정의 기준온도는 표준백금저항온도계(Hart Scientific, 모델 5699)를 이용하여 측정하였다. 이 기준온도계는 국제온도논의금-1990[5]에 의해 교정불확도 1 mK 이내로 교정하였으며, 기준온도계의 저항측정을 위해서 ASL사의 AC 브리지 모델 F900을 사용하였다. 서미스터의 저항측정을 위해서 Keithley사의 모델 6221 정전류원을 이용하여 직류전류를 서미스터에 흐르도록 하고 HP사의 모델 3458A 디지털 멀티미터를 이용하여 서미스터 양단의 전위차를 측정하였다.

서미스터의 교정이 얼마나 정확한지를 정량적으로 평가하기 위하여 교정결과를 식(1)을 이용하여 fitting한 결과의 잔차(residual)를 이용하였다. 교정점의 수가 fitting으로부터 결정되는 계수보다 충분히 많다면, 즉 fitting의 자유도가 충분히 높다면, 각각의 교정점에서의 잔차는 해당 교정결과를 그 온도에서 적용했을 때 얼마나 정확한지를 판단할 수 있는 기준이 될 수 있다. 따라서 교정을 수행하고, 교정결과를 fitting 한 후, 잔차의 표준편차를 이용하여 해당 교정의 정확도를 간접적으로 평가하는 기준으로 삼았다.

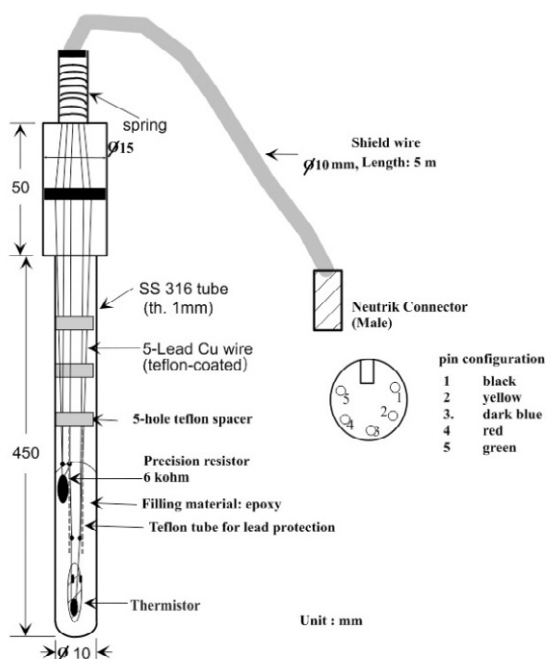


Fig. 1. Schematic diagram of the thermistor probe used for this work.

3.2 서미스터의 자기가열효과

서미스터의 자기가열효과를 측정하기 위하여 서미스터를 0 °C에서 50 °C 사이에서 0.01 mA, 0.05 mA, 0.1 mA, 0.2 mA, 0.3 mA의 서로 다른 직류전류 I 를 흐르게 하여 서미스터의 저항을 측정하였다. 이렇게 하여 정해진 온도에서 서미스터의 저항값 R 과 서미스터의 발열량 $P=I^2R$ 의 관계를 조사하였다. Fig. 2은 서미스터 TT-10-003의 0 °C에서 R 과 P 의 관계를 나타낸 것이며, 두 물리량의 관계가 충분한 직선성을 갖고 있음을 보여주고 있다. 이 그래프의 기울기 dR/dP 로부터 식(6)에 의해 해당 서미스터의 손실상수를 구할 수 있다. Fig. 2의 서미스터의 경우 0 °C에서 손실상수가 4.38 mW/K이었다. 따라서 서미스터 TT-10-003의 경우 0 °C에서 0.1 mA의 전류로 저항을 측정했을 때 발열량은 0.062 mW이며, 이것은 14 mK의 온도 상승에 해당한다. 만약, 서미스터의 발열로 인한 저항변화를 7 % 정도의 정확도로 결정할 수 있다면 자기가열효과로 인한 불확도가 1 mK에 해당한다. Fig. 2에서 볼 수 있는 저항 대 발열량 그래프의 좋은 직선성으로 볼 때, 이것은 충분히 가능한 일이다. 따라서 서미스터의 자기가열효과를 감안하여 보정한다면 자기가열효과는 서미스터를 이용한 1 mK 온도측정에 장애가 되지 않음을 알 수 있다.

Fig. 3에서 네 개의 서미스터에 대하여 0 °C에서 50 °C 구간에서 서미스터의 손실상수를 표시하였다. 대체로 손실상수는 25 °C까지 4 mW/K에서 5 mW/K 사이의 일정한 값을 유지하다가 그보다 높은 온도에서는 3 mW/K 정도로 감소하는 경향을 보였다. 손실상수가 감소하는 것은 일정한 발열량에 대한 서미스터의 온도 상승이 커지는 것을 의미한다. 그러나 일반적으로는 측정에 일정한 크기의

여기전류(excitation current)를 사용하므로 온도가 올라갈수록 낮은 서미스터 저항으로 인하여 서미스터의 발열이 지수함수적으로 줄어들게 된다. 따라서 자기가열에 의한 온도상승의 정도는 높은 온도일수록 감소하게 되어, 그 불확도가 전체 불확도에 미치는 영향은 감소한다. 자기가열효과가 가장 큰 0 °C에서 서로 다른 서미스터 프로브들간의 손실상수는 최대 10 % 정도의 차이를 보였다. 이는 같은 형태의 센서와 같은 프로브 구조로 만든 서미스터들 간의 자기가열효과가 10 % 정도 차이 날 수 있음을 보여준다. 이것을 온도로 환산하면 1.4 mK 정도로서, 개별 서미스터 간의 자기가열효과 차이를 무시할 경우 1 mK의 불확도로 온도차이를 측정하는 것이 어렵다는 것을 보여준다.

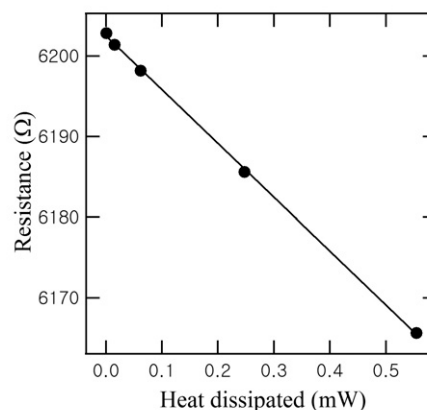


Fig. 2. Variation of resistance of the thermistor TT-10-003 at 0 °C as a function of the heat dissipation from the thermistor.

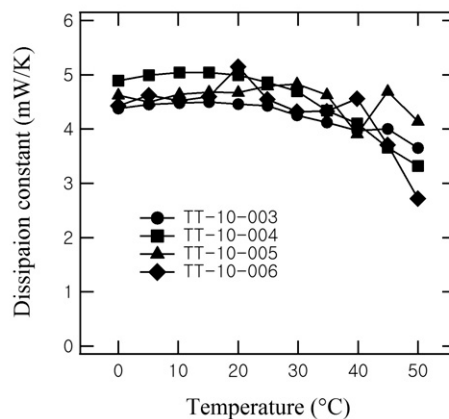


Fig. 3. Dissipation constant as a function of temperature for four thermistors with the same sensor element and probe structure.

3.3 서미스터의 교정과 열손실 오차

Table 1에서 두 서미스터 TT-10-003과 TT-10-004를 0 °C에서 35 °C 사이에서 교정한 결과를 표시하였다. 해당 온도범위의 14 개 측정점에서 기준온도계로 측정된 온도와 서미스터의 저항값을 나타내었다.

Table 1. Calibration results of two thermistors TT-10-003 and TT-10-004

$t(^{\circ}\text{C})$	$R(\Omega)$	
	TT-10-003	TT-10-004
-0.0070	6193.1285	5004.0825
2.4549	5530.4570	4466.5105
5.0990	4911.1250	3964.1730
7.6682	4383.8635	3537.2335
10.1833	3927.5855	3167.3365
12.6650	3532.3520	2847.6580
15.1266	3183.3535	2564.8760
17.5710	2874.7260	2315.3240
20.0088	2600.2575	2093.6095
22.4503	2355.6955	1895.9540
24.9000	2136.6985	1718.8450
27.3562	1939.9745	1559.9450
29.8246	1762.6815	1416.9215
34.8134	1458.1110	1171.3360

Fig. 4은 식(2)를 이용하여 서미스터 TT-10-004의 교정 데이터를 fitting한 결과의 잔차를 표시해주고 있다. 서미스터 TT-10-003의 교정 데이터를 마찬가지로 fitting한 결과의 잔차도 비슷한 것으로 나타났다. Fig. 4로부터 몇 가지를 알 수 있다. 첫째, 잔차가 최대 0.12 °C까지로 크기 때문에, 식(2)는 0.1 °C보다 나은 정밀도를 요구하는 온도 측정에는 적합하지 않다. 둘째는 잔차와 온도의 관계식이 일정한 경향을 갖고, 이차함수와 유사한 형태를 보이므로 고차항을 추가시키면 fitting 결과를 훨씬 더 향상시킬 수 있을 것으로 보인다는 것이다.

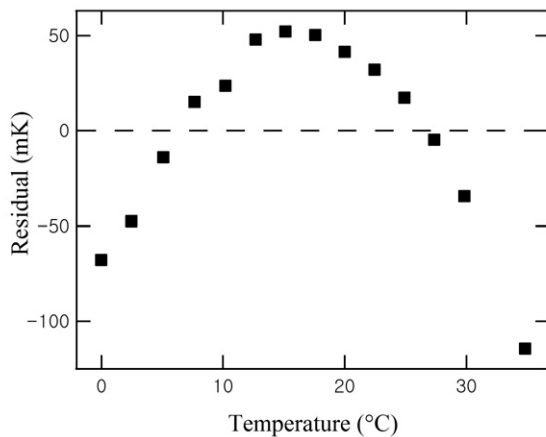


Fig. 4. Residuals of the fitting when the calibration result of TT-10-004 is fitted using the equation (2). The residual is as large as 0.12 °C and behaves as a quadratic function.

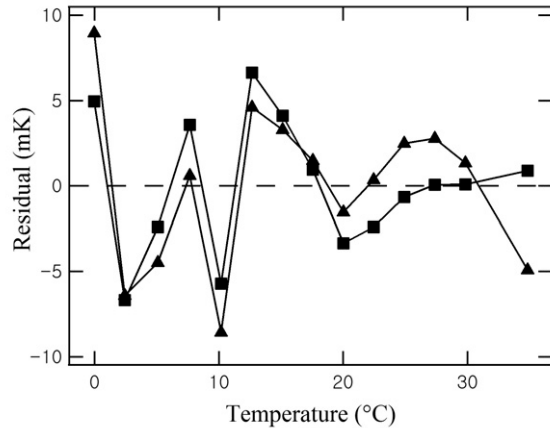


Fig. 5. Residuals of the fitting when the calibration result of TT-10-004 is fitted using the equation (1) with $N=2$ (■), $N=3$ (●), and Steinhart-Hart equation(▲).

Fig 5은 식(1)에서 $N=2$, $N=3$ 을 대입한 것, 그리고 Steinhart-Hart 식을 이용하여 서미스터 TT-10-004의 교정 데이터를 fitting했을 때의 잔차를 표시하였다. 각 잔차의 표준편차는 4.3 mK, 3.9 mK, 4.7 mK이었다. 서미스터 TT-10-003의 경우에는 각 fitting 방법으로 인한 잔차의 표준편차가 각각 4.5 mK, 4.0 mK, 5.0 mK 이었다. 따라서 식(2)에 비해서 고차항을 한 개, 혹은 두 개 추가했을 때 fitting 결과는 크게 좋아졌지만, 위 세 방법끼리는 큰 차이가 없었다는 것을 알 수 있다. 또, 이 데이터의 경우에는 $N=2$ 로 fitting을 한 것이 Steinhart-Hart식을 이용한 것에 비해서 더 작은 잔차를 갖는 것으로 나타났다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 고차항을 추가하더라도 표준편차 약 4 mK의 잔차가 여전히 남는 것은 실온변화에 의한 열손실 효과로 추정되었다. 실온의 변화로 인하여 온도계 보호관을 통하여 전도되어 서미스터에까지 전달되는 열의 크기가 변하고, 따라서 온도 측정의 오차가 발생하는 것이다. 이를 확인하기 위하여 동시에 교정된 TT-10-003과 TT-10-004의 데이터를 $N=3$ 식을 이용하여 fitting한 후 잔차를 서로 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 두 서미스터의 잔차는 상관계수(correlation coefficient)가 0.952로서, 매우 강한 상관관계를 갖고 비슷한 양상으로 변했음을 알 수 있다. 이것은 이 잔차가 서미스터 저항의 측정이나 개별 센서의 특성으로부터 발생하는 것이 아닌, 기준온도계를 이용한 온도 측정 혹은 서미스터 보호관을 통한 실온과 열교환으로 인한 온도 측정의 오차 때문이라는 간접적인 증거가 된다. 만약 두 온도계의 잔차의 원인이 온도계 보호관을 통한 열손실이 아니라 하더라도, 두 잔차가 서로 강한 상관관계를 갖는다면, 두 온도계를 이용하여 온도차이를 측정할 때의 불확도는 각각의 온도계로 온도를 측정할 때의 불확도에 비해서 크게 줄어든다는 것을 알 수 있다. 두 서미스터의 잔차의 차이는 최대 2 mK을 넘지 않으며 그 표준편차가 1.2 mK이었다.

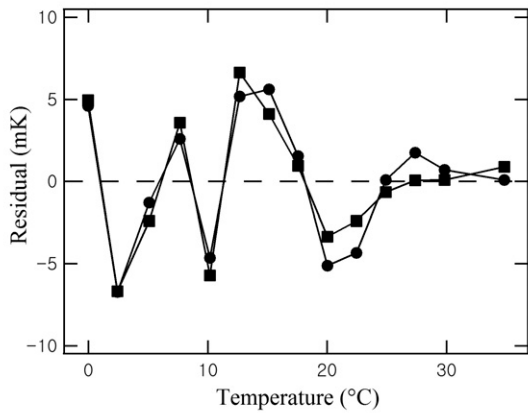


Fig. 6. Residuals of the fitting when the calibration results of TT-10-003(●) and TT-10-004(■) are fitted using the equation (1) with $N=3$. The two sets of residuals are strongly correlated.

3.4 실온 제어 상태에서 서미스터 교정

3.3절의 실험에서 교정시의 실온제어가 교정의 불확도에 중요한 영향을 미칠 수 있다는 것을 알아낸 후에 실온을 0.5°C 이내로 제어하는 상황에서 두 서미스터 TT-10-001과 TT-002를 교정하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Calibration results of two thermistors TT-10-001 and TT-10-002. Calibration was done while the room temperature was controlled within 0.5°C

$t(^{\circ}\text{C})$	$R(Q)$	
	TT-10-001	TT-10-002
-0.0026	6485.8925	6516.6705
2.4580	5796.2090	5821.3665
5.1027	5144.8185	5166.4335
7.6718	4590.5560	4607.6180
10.1875	4113.4540	4126.7960
12.6691	3697.1510	3708.3685
15.1331	3330.7760	3339.8945
17.5761	3007.5720	3014.7365
20.0137	2720.5960	2726.6335
22.4548	2463.8860	2468.7755
24.9044	2233.9555	2237.7820
27.3663	2027.3130	2030.1640
29.8338	1841.8175	1843.9665
34.8223	1523.1690	1524.0750

Table 2의 데이터를 식(1)에서 $N=3$ 으로 둔 식을 이용하여 fitting한 후 결과의 잔차를 온도에 대한 그래프로 나타내면 Fig. 7과 같다. 두 온도계의 잔차의 표준편차는 각각 1.0 mK과 1.8 mK로서 실온을 제어하지 않은 상태에서 측정했을 때에 비해서 크게 줄어든 것을 알 수 있다. 또, 두 온도계의 잔차의 상관관계가 상관계수 0.481로서 크게 약해졌으며, 표준편차가 3.3절의 두 온도계의 잔차의 차이의 표준편차와 비슷한 크기이다. 따라서 두 온도계의 잔차 중 공통된 원인로부터 발생한 요소만큼 제거된 것을 알 수 있다. 이것은 3.3절의 측정에서 두 온도계 모두에서 나타나는 큰 잔차의 요인이 실온 변화에 의한 열손실이라는 강한 증거가 된다. 따라서 실온을 0.5°C 이내로 잘 제어했을 경우에 2 mK 이내의 불확도로 서미스터를 교정하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다.

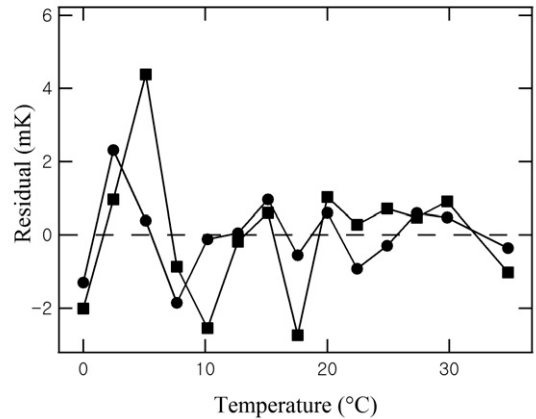


Fig. 7. Residuals of the fitting when the calibration results of TT-10-001(●) and TT-10-002(■) are fitted using the equation (1) with $N=3$. The room temperature was controlled within 0.5°C when the calibration was conducted.

좀 더 정밀한 교정을 위해서 교정점의 수를 줄이더라도 온도 설정 후에 충분한 시간을 기다려서 항온조의 온도 안정도를 높이고 기준온도계와 서미스터가 항온환경과 더 좋은 열적평형을 이루도록 한다면 더 낮은 불확도로 교정이 가능한지를 시험해 보았다. Table 3는 0°C 에서 35°C 사이의 8개의 교정점에서 서미스터 TT-10-005와 TT-10-006을 교정한 결과를 보여주고 있다. 이 데이터를 이용하여 식(1)의 $N=3$ 인 식을 이용하여 fitting을 한 후 잔차를 구하면 Fig. 8과 같다. 두 온도계 교정결과와 잔차의 표준편차는 각각 0.21 mK과 0.18 mK으로서 1 mK에 비해서 현저히 낮았다. 따라서 실온을 잘 제어하고 교정시에 충분한 안정시간을 가지면 개별 서미스터에 대해서 1 mK 이하의 불확도로 교정하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다. 두 온도계를 식(1)의 $N=2$ 를 이용하여 fitting한 잔차의 표준편차는 각각 1.3 mK, 1.4 mK이며, Steinhart-Hart식을 이용하여 fitting한 잔차의 표준편차는 각각 0.33 mK, 0.37 mK으로서, 이 경우에는 Steinhart-Hart식이 $N=2$ 식에 비해 더 작은 잔차를 내는 것으로 나타났다.

Table 3. Calibration results of two thermistors TT-10-005 and TT-10-006. Calibration was done while the room temperature was controlled within 0.5 °C, and the waiting time for temperature stabilization for each calibration point was longer than that of Table 2

$t(^{\circ}\text{C})$	$R(\Omega)$	
	TT-10-005	TT-10-006
-0.0001	6475.6820	5768.6200
5.1061	5134.1325	4574.8095
10.1910	4103.1060	3657.0140
15.1400	3320.0475	2959.8450
20.0221	2710.1780	2416.7400
24.9139	2224.1450	1983.7965
29.8355	1833.1920	1635.5140
34.8230	1515.3555	1352.2895

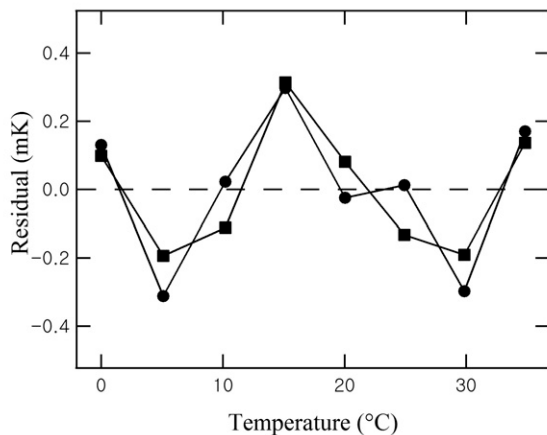


Fig. 8. Residuals of the fitting when the calibration results of TT-10-005(●) and TT-10-006(■) are fitted using the equation (1) with $N=3$. The room temperature was controlled with in 0.5 °C when the calibration was conducted, and the waiting time for temperature stabilization for each calibration point was longer than that of Fig. 7.

4. 결론

이상의 실험에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 같은 제작과정으로 만들어진 센서를 사용하여 동일한 구조의 프로브로 만들어진 서미스터라도 그 자기가열효과가 10 %정도 차이를 나타낼 수 있으므로 정밀온도측정을 위한 교정을 위해서는 해당

서미스터의 자기가열효과가 어느 정도인지 측정해야 한다.

- (2) 실온을 잘 제어해서 보호관을 통한 열손실로 인한 측정오차를 줄이면 서미스터의 온도 측정의 불확도를 1 mK 이하로 줄이는 것도 가능하다.

- (3) 불확도 1 mK 이내의 교정을 위해서는 서미스터의 fitting식으로 $N=3$ 이상의 식을 사용해야 한다. 반면에 $N=2$ 식은 충분하지 않으며, Steinhart-Hart식은 결정해야 할 계수의 개수가 같은 $N=2$ 식에 비해 잔차가 더 큰 경우도 발견되어 1 mK 이내의 불확도를 요구하는 교정에는 적합하지 않을 수 있다.

위의 사항에 주의하면 안정도가 높은 서미스터를 이용하여 1 mK 이내의 불확도로 온도를 측정할 수 있도록 교정하는 것이 가능하다. 그러나 온도계의 손실상수가 온도계 센서 자체의 형태와 구조뿐만 아니라, 주변환경, 즉 온도계를 둘러싼 유체의 종류와 유속에 따라서 크게 변한다는 것에 주의해야 한다. 즉, 온도계의 자기가열효과를 측정하여, 그 효과를 완전히 보정하지 않는다면, 교정할 때의 환경과 실제 측정할때의 환경의 차이로 인하여 온도측정에서 자기가열효과와의 차이로 인하여 수 mK의 오차가 발생할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2009년 ~ 2011년 중소기업청에서 시행한 중소기업기술포발 지원사업 (구매조건부신제품개발사업: 과제번호 S1062765)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] J. V. Nicholas and D. R. White, *Traceable Temperatures*, 2nd Ed. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 249-250, 2001.
- [2] J. S. Steinhart and S. R. Hart, "Calibration curves for thermistors", *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, vol. 15, no. 4, pp. 497-503, 1968.
- [3] E. D. Macklen, *Thermistors*, Electrochemical Publications Limited, Glasgow, pp. 32-35, 1979.
- [4] ASTM Standard E 879 - 01, "Standard specification for thermistor sensors for clinical laboratory temperature measurements", *ASTM International*, West Conshohocken, PA, www.astm.org, 2007.
- [5] H. Preston-Tomas, "The international temperature scale of 1990 (ITS-90)", *Metrologia*, vol. 27, no. 1, pp. 3-10, 1990.



감기술(Kee Sool Gam)

- [센서학회지 제18권 제2호, p. 121 참조]
- 현재 한국표준과학연구원 온도센터 책임연구원

김용규(Yong-Gyoo Kim)

- [센서학회지 제3권 제1호, p. 61 참조]
- 현재 한국표준과학연구원 온도센터 책임연구원



양인석(Inseok Yang)

- 1999년 한국과학기술원 물리학과(이학사)
- 2005년 University of Chicago 물리학과(이학박사)
- 2005년 ~ 한국표준과학연구원 온도센터 선임연구원
- 주관심분야 : 온도센서, 열역학적 온도측정, 저온 물리