

극저온 냉동기를 이용한 온도센서 교정시스템 개발[§]

김명수* · 최연석*[†] · 김동락*

* 한국기초과학지원연구원

Development of Temperature Sensor Calibration System Using Cryocooler

Myung Su Kim*, Yeon Suk Choi*[†] and Dong Lak Kim*

* Korea Basic Science Institute

(Received May 2, 2012 ; Revised September 28, 2012 ; Accepted October 4, 2012)

Key Words: Temperature Calibration(온도교정), Heat Transfer(열전달), Cryocooler(극저온 냉동기)

초록: 극저온시스템에서는 측정하려는 온도의 범위, 온도센서의 형상 및 정확도 등을 고려하여 온도센서를 선택하여 사용한다. 이 중 온도센서의 정확도는 실험 신뢰성의 매우 중요한 요소이다. 극저온용 온도센서의 교정을 위해서 2단 극저온냉동기를 이용하여 시스템을 개발하였다. 극저온냉동기의 1단부에 열 차폐층을 설치하고 MLI(Multiple layer insulation)을 이용하여 외부로 부터의 열 침입을 최소화 하였다. 그리고 시간과 비용의 절약을 위해 동시에 다수의 온도센서를 교정하기 위한 센서홀더를 개발하여 20개 이상의 센서를 동시에 교정할 수 있도록 하였다. 또한 히터를 사용하여 온도조절을 통해 다양한 온도에서의 온도교정이 가능하도록 하였다. 본 논문에서는 온도센서 교정시스템의 설계 및 제작 그리고 대표적인 온도 교정 실험 결과를 소개한다.

Abstract: The selection of the temperature sensor in a cryogenic system depends on the temperature range, shape, and accuracy. An accurate temperature sensor is essential for improving the reliability of an experiment. We have developed a calibration system for cryogenic temperature sensors using a two-stage cryocooler. To reduce the heat load, a thermal shield is installed at the first stage with multiple layer insulation (MLI). We have also developed a sensor holder for calibrating more than 20 sensors simultaneously in order to save time and reduce costs. This system can calibrate sensors at variable temperatures via temperature control using a heater. In this paper, we present the design and fabrication of the temperature sensor calibration system and a representative experimental result.

- 기호설명 -

A : 면적, m²
 a₀ : 수용계수
 a₁ : 저온부의 수용계수
 a₂ : 고온부의 수용계수
 F : 형상계수
 F₂₁ : 고온부와 저온부 사이의 형태계수
 k : 열전도도, W/m·K
 L : 길이, m
 M : 몰당 질량, kg/kmol
 P : 압력, N/m²
 Q : 열전달량, W
 Q_g : 잔류가스에 의한 전도열전달, W

Q_k : 전도열전달, W
 Q_r : 복사열전달, W
 Q_w : 계측선 및 센서의 발열량, W
 R : 기체상수; 8.314, kJ/kmol·K
 T : 온도, K
 T₁, T_L : 저온부의 온도, K
 T₂, T_H : 고온부의 온도, K
 T_{ave} : 고온부와 저온부의 평균온도, K
 γ : 비열비
 ρ : 표면 방사율
 ρ₁ : 저온부의 표면 방사율
 ρ₂ : 고온부의 표면 방사율
 σ : Stefan-Boltzmann 상수; 5.67×10⁻⁸, W/m²·K⁴

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 열공학부문 춘계학술대회 (2012. 5. 23-26., 용평리조트) 발표논문임

[†] Corresponding Author, ychoi@kbsi.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

극저온에서 사용하는 온도센서는 측정하는 온

도 범위, 정확도, 반응속도, 크기 등을 고려하여 선택해야 한다. 이 중 온도센서의 정확도는 실험의 신뢰성을 위해서 매우 중요한 요소이다. 극저온용 온도센서로 많이 사용되는 RTD(Resistance temperature detector)는 14-873 K 온도 범위의 PT (Platinum resistance thermometers)센서와 1.4-325 K 온도 범위의 Cernox™센서가 대표적으로 사용된다. 극저온 온도센서가 정밀하게 교정되었을 때는 넓은 온도측정 범위에서 높은 신뢰성과 정확성을 갖기 때문에 온도센서 교정은 극저온시스템 개발의 필수 조건이다. 하지만 정밀하게 온도 교정된 센서는 가격이 매우 높기 때문에 많은 비용이 필요하다는 단점이 있다.

기존의 Szymrka-Grzebyk 등⁽¹⁾의 연구에서는 흡열원으로 수소, 네온, 산소, 아르곤등을 사용하여 특수한 단열용기에 흡열원을 채우는 방법으로 RhFe (Rhodium-iron)센서를 교정하였으며, Rickeston 등⁽²⁾은 RhFe센서를 액체헬륨과 액체질소를 흡열원으로 사용하여 진공용기에 흡열원을 채우고 온도센서를 담귀 온도교정을 하였다. 그리고 Kamran 등⁽³⁾의 연구에서는 PT센서를 참조센서로 사용하여 DUT(Device-under-test)를 열전도가 좋은 기름에 담귀 온도조절오븐을 이용하여 온도교정을 하였다. 이러한 유체를 흡열원으로 사용하게 되면 특정한 온도에서는 온도 교정이 가능하지만 온도교정 범위가 한정된다. 그리고 액체질소나 헬륨의 경우에는 지속적으로 증발하기 때문에 장시간의 실험이 어렵다.

본 연구에서는 극저온시스템의 정밀한 온도 측정을 위해서 간편하고 경제적으로 온도센서의 교정을 위한 시스템을 개발하였다. 소형 극저온 냉동기를 흡열원으로 사용하여 극저온 유체로 얻을 수 없는 넓은 온도 영역에서 온도센서의 교정이 가능하며 정확성 및 반복성 검증을 위한 연속 실험이 가능하다. 또한 액체헬륨 이하의 낮은 온도 까지 온도센서의 교정을 위하여 센서홀더로 유입되는 열침입량을 최소화하기 위해 시스템을 최적화하였다. 본 논문에서는 극저온 냉동기를 이용한 온도센서 교정시스템의 설계 및 제작 그리고 온도교정 결과를 자세히 소개한다.

2. 온도센서 교정시스템 설계

Fig. 1은 극저온냉동기를 이용한 온도센서 교정 시스템의 일반적인 개략도이며, Fig. 2는 센서홀

더를 확대한 그림이다. 낮은 온도 범위에서 온도 교정을 위해서 냉동기의 2단부에 위치하는 센서 홀더까지의 열침입을 최소화시켜야 한다. 상온으로부터의 열 유입은 계측선을 통한 전도열전달 (Q_k), 복사열(Q_r), 잔류가스 전도열(Q_g), 계측선 및 센서의 발열(Q_h)로 나눌 수 있다. 열침입량을 최소화하기 위해서 계측선을 통한 전도열전달을 중간냉각 시키며 복사차폐장치와 MLI를 설치하여 복사열을 최소화하고 진공을 유지하여 잔류가스 에 의한 전도열을 최소화 할 수 있다.

2.1 전도열전달

온도 센서의 교정을 위해서 온도제어 및 측정을 위한 히터 및 참조센서가 있고 이를 제어하고

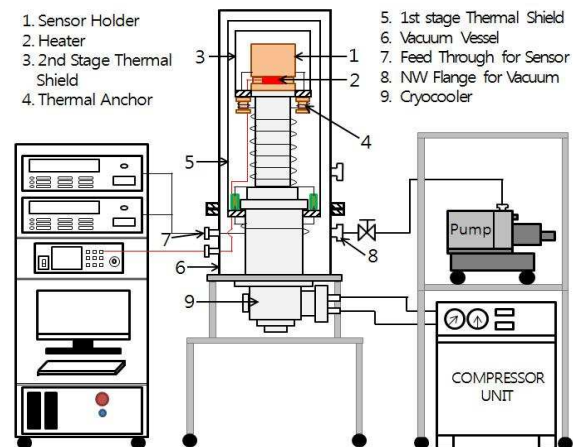


Fig. 1 Schematic diagram of temperature sensor calibration system

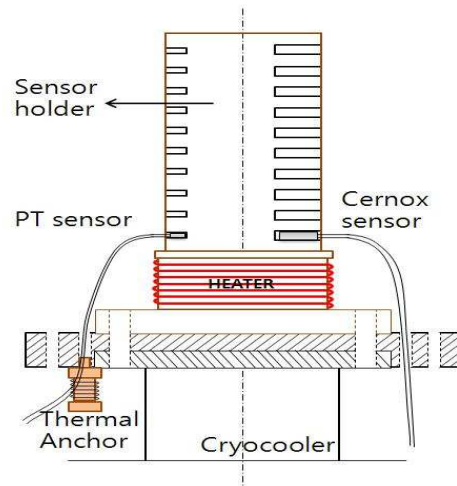


Fig. 2 Drawing of sensor holder

측정할 수 있는 계측선이 필요하다. 계측선은 지름이 작지만 고온부와 저온부의 온도차이가 크기 때문에 유입되는 열침입량의 크기를 고려해야 한다. 계측선을 통한 열침입량(Q_k)을 계산하는 식은 다음과 같다.⁽⁴⁾

$$Q_k = N \cdot \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} k dT \quad (1)$$

여기서 N , A , L , k 는 각각 계측선의 수, 단면적, 길이, 온도에 따른 열전도도이며, T_1 은 저온부, T_2 는 고온부의 온도이다.

2.2 복사열전달

물질의 표면에서 방사되는 에너지인 열복사에 의한 열 침입량(Q_r)은 다음과 같다.⁽⁴⁾

$$Q_r = \frac{\sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2} + \frac{1}{A_2 F_{21}} + \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}} \quad (2)$$

여기서 σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, ε 은 표면방사율, A 는 단면적, F 는 형상계수이며, T_1 은 저온부, T_2 는 고온부의 온도이다. 복사에 의한 열 침입량을 최소화하기 위해서 열 차폐층을 설치해야 하며 열 차폐층의 수가 늘어날수록 열 침입량은 감소한다. 하지만 제작이 어렵고 열 차폐층의 수가 늘어날수록 장치의 크기가 커지게 된다.

2.3 잔류가스에 의한 전도열전달

실험장치 내부를 고진공으로 유지하지만 극소량의 잔류가스가 남아있기 때문에 잔류가스에 의한 열전달(Q_g)을 고려해야 한다. 잔류가스 전도열은 다음의 식으로부터 구할 수 있다.⁽⁵⁾

$$Q_g = \frac{a_0}{4} \cdot \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R}{\pi \cdot M}} \cdot P \cdot \frac{T_2 - T_1}{\sqrt{T_{ave}}} \quad (3)$$

여기서 a_0 는 수용계수, γ 는 기체의 비열비, R 은 기체상수, M 은 기체의 몰 당 질량, P 는 기체의 압력이며, T_1 은 저온부, T_2 는 고온부의 온도이다. 식 (3)에서 수용계수 a_0 및 T_{ave} 는 다음과 같다.

$$a_0 = \frac{a_1 \cdot a_2}{a_2 + \left(\frac{A_2}{A_1}\right) \cdot (1 - a_2) \cdot a_1} \quad (4)$$

$$T_{ave} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (5)$$

2.4 계측선 및 센서의 발열

센서의 계측선은 열전도도가 낮은 망가닌이 사용된다. 망가닌은 열전도도가 낮지만 비저항이 크기 때문에 계측선류와 센서에 의한 발열(Q_h)을 고려해야 하며 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$Q_h = N \cdot I^2 \cdot \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (6)$$

여기서 N 은 계측선 및 센서의 수, I 는 전류, ρ 는 계측선의 비저항이며 L 과 A 는 각각 길이와 단면적이다.

2.5 1단부 열 침입량

온도센서 교정시스템의 외부로부터 1단부로 유입되는 총열유입량을 테이블1에 요약된 제원을 사용하여 예측하였다. Fig. 3은 고온부의 온도를 300 K로 하고 1단부의 온도가 변할 때 열침입량을 그린 그림이다. 1단부의 온도가 낮아질수록 전도열전달, 복사열전달, 잔류가스에 의한 전도열전달은 증가하지만 계측선에 의한 발열량은 온도가 낮아짐에 따라 계측선의 비저항이 작아지기 때문에 단면적과 길이가 일정할 때 감소하게 된다. 저온부의 온도가 28 K일 때, 전도열전달량은

Table 1 Specification for heat load estimation

Part		Unit	Data
Instrumentation wire	Copper	current	A
		length	m
	Manganin	diameter	m
		current	A
	resistance	Ω/m	
Vacuum vessel	diameter	m	
	height	m	
	material	-	
First stage thermal shield	diameter	m	
	height	m	
	material	-	
Sensor holder	area	m^2	
	material	-	

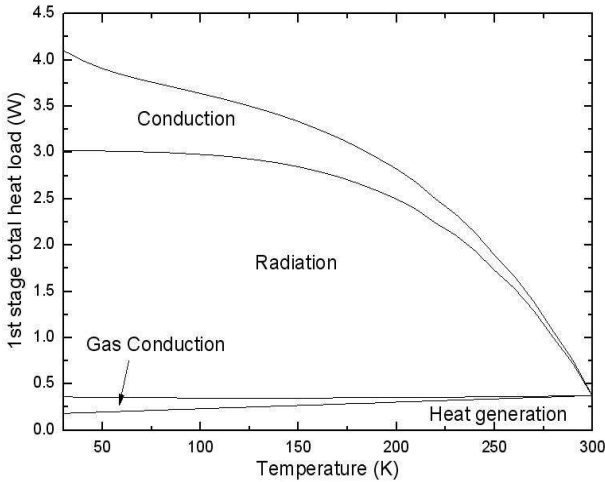


Fig. 3 Heat load at first stage of system

식 (1)을 이용해 구할 수 있다. 계측선의 수는 82, 계측선의 단면적은 $4.5 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, 계측선의 길이는 0.45 m, 구리선의 열전도도의 적분값은 $13.29 \times 10^4 \text{ W/m}$ 이며, 따라서 계산에 의한 전도열전달량은 1.07 W이다. 복사열전달은 식 (2)를 이용해 구할 수 있다. Stefan-Boltzmann 상수 σ 은 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, 고온부의 표면방사율, 면적은 각각 0.017, 0.373 m^2 이며 저온부의 표면방사율, 면적은 각각 0.03, 0.209 m^2 이다. 계산결과 복사열전달은 2.66 W이다. 잔류가스에 의한 전도열전달은 식 (3)-(5)를 이용하여 계산할 수 있다. 수용계수 (a_0)는 식 (4)를 이용하여 구할 수 있으며 저온부와 고온부의 수용계수 a_1, a_2 는 각각 0.666, 0.828이다. 기체의 비열비 γ 는 1.4, 기체의 몰당 질량 M 은 28.84 g/mol , 기체상수 R 은 $8.314 \text{ KJ/kmol} \cdot \text{K}$, 기체의 압력 P 는 0.133 Pa 이다. 계산을 통해 구해진 잔류가스에 의한 전도열전달은 0.17 W이다. 계측선의 발열량은 식 (6)을 이용하여 구할 수 있으며 온도계측을 위한 구리선과 히터의 전류공급을 위한 구리선으로의 길이와 전류가 서로 다르기 때문에 나누어 계산하였다. 온도계측을 위한 구리선의 수는 80, 길이는 0.45 m, 전류는 0.001 A 이며 히터의 전류공급을 위한 구리선의 수는 2, 길이는 1.9 m, 전류는 0.5 A이다. 비저항은 $8.56 \times 10^{-9} \Omega/\text{m}$ 이며 단면적은 $4.45 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ 이다. 계산하여 구한 계측선의 발열량은 0.18 W이며, 따라서 1단부의 총 열 침입량은 4.1 W이다.

열 침입 중 가장 큰 비중을 차지하는 복사열전달을 줄이기 위해서 열 차폐층 및 MLI를 설치할 수 있다. Fig. 4는 28-300 K 온도에서 MLI의 수에

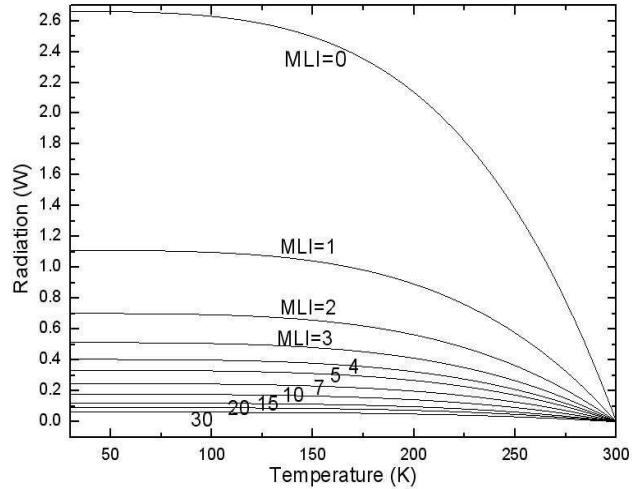


Fig. 4 Thermal radiation with respect to the number of MLI

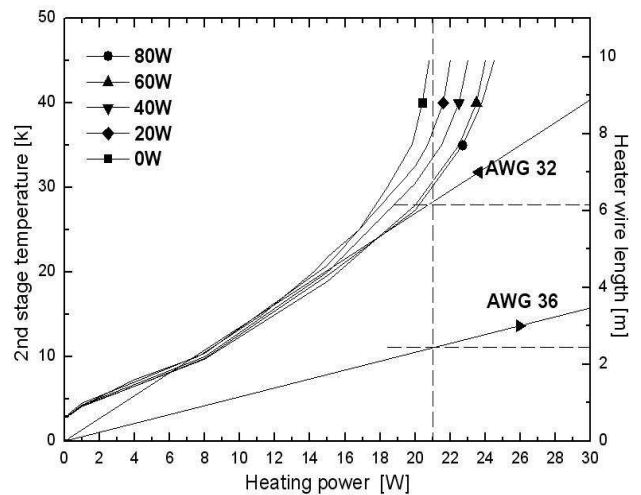


Fig. 5 Heater length with respect to the heating power

따른 복사열전달량을 나타낸 것으로 MLI가 없을 때 복사열전달은 약 2.66 W, MLI가 1개 일 때, 약 1.11 W로 58% 감소하는 것을 알 수 있으며 MLI의 개수가 늘어날수록 복사열전달량이 점차 줄어드는 것을 알 수 있다. 하지만 MLI가 일정 수 이상 증가할 때에는 복사열전달량의 감소폭이 작아지는 것을 알 수 있다. 본 시스템에는 1단부 열 차폐층에 20개의 MLI를 설치하였으며 이 때 복사열전달량은 약 0.09 W로 MLI를 사용하지 않을 때와 비교하여 96% 이상을 감소시켰으며, 이 때 1단부의 총 열침입량은 1.52 W이다.

2.6 극저온냉동기의 열부하와 히터 설계

Fig. 5는 시스템에 사용된 극저온냉동기 1단부

의 열부하에 따른 2단부의 온도변화와 히터 길이의 상관관계를 나타낸 그림이다. 극저온 냉동기의 열부하 곡선⁶⁾에 따르면 1단부의 열침입량이 0 W 일 때 2단부의 온도를 45 K을 만들기 위해서는 2단부에 약 20.8 W를 가열해야 한다. 계산결과 1단부의 열 침입량이 1.52 W이므로 실제로 2단부를 45 K부근의 온도를 만들기 위해서는 약 21 W를 가열해야 한다. 가열을 위하여 히터를 사용하며 본 시스템에서는 망가닌선을 히터로 사용하였다. 히터에 공급해주는 전류가 0.5 A로 일정할 때, AWG36 ($\Phi 0.127$ mm)은 약 2.42 m, AWG32 ($\Phi 0.203$ mm)는 약 6.22 m의 길이가 필요하다.

2.7 2단부 열 침입량

2단부의 열 침입량을 테이블1에 요약된 제원을 사용하여 예측하였다. 극저온냉동기의 냉각곡선⁶⁾에서 1단부의 온도는 2단부의 냉각부하에 크게 영향을 받지 않으므로 1단부의 총 열 침입량이 1.52 W일 때 1단부의 온도는 약 27-28 K로 예측된다.

Fig. 6은 센서홀더의 온도가 3 K, 1단부의 온도가 28 K일 때 열 침입량을 나타낸 그림이다. 전도열침입은 0.0879 mW, 복사열침입은 0.0146 mW, 잔류가스에 의한 전도열침입은 0.185 mW, 계측선의 발열은 2.459 mW로 총 열침입량은 2.7465 mW 이다. 계산결과 계측선의 발열이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 이는 망가닌선이 구리선과 비교하여 작은 단면적과 높은 비저항을 가지며 계측선의 수가 많기 때문이다.

3. 시스템 제작

Fig. 7은 제작한 온도센서 교정시스템의 사진이다. 진공용기를 두 부분으로 나누어 조립의 편의성을 고려했으며 진공용기 1단부에는 극저온냉동기가 부착되고, 다수의 온도센서를 교정하기 위해서 6개의 진공커넥터를 통해 데이터수집과 히터조절을 위한 구리선을 삽입하였다. 외부로부터의 열침입을 고려하여 냉동기의 1단부와 2단부에 열차폐층을 설치하였으며 1단부 열 차폐층 상판에 센서 중간연결부를 설치하여 센서들을 필요에 따라 분리하거나 교체할 수 있도록 하였다. 2단부의 열차폐층 상판과 센서홀더는 냉동기의 2단 냉각부와 볼트를 이용해서 조립하였으며 금속면 사이에 열전도도가 우수한 써멀그리스를 삽입

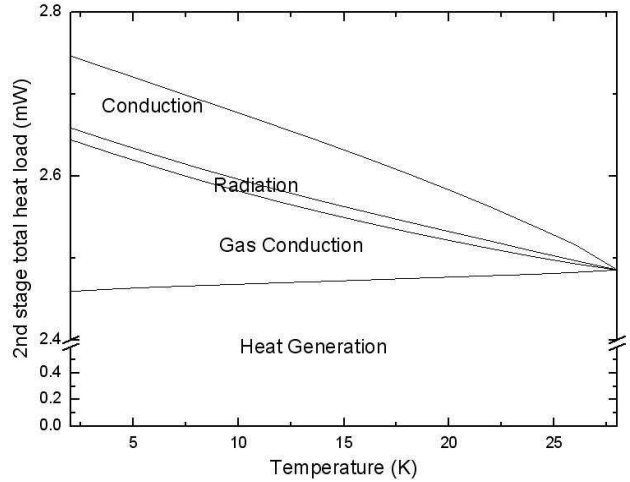


Fig. 6 Heat load at second stage of system



Fig. 7 3D-modeling and photo of calibration system

하여 냉동부로부터 센서홀더까지 열전달이 향상 되도록 하였다. 정밀한 계측을 위하여 극저온 냉동기의 진동에 의한 신호 잡음을 최소화하기 위해 냉동기와 테이블사이의 지지대에 고무 패드를 설치하였다.

4. 실험결과

Fig. 8은 온도 교정실험을 위한 시스템 전체의 사진이다. 진공펌프를 이용해서 실험동안 진공상태를 유지하며 미세 잔류가스에 의한 열전도를 최소화하고, 온도센서 2개를 참조용으로 사용하였다. 참조용 센서의 온도를 모니터 하고 동시에 교정하려는 센서들의 각 온도에서의 저항값을 수집하였다. 본 실험에서 온도교정 대상 센서는 Cernox센서를 사용하였다. 망가닌선으로 만든 히

터는 소형 DC 전원공급장치를 이용하여 전류를 조절하였다. 냉동기를 이용해서 최저온도까지 냉각시킨 다음 히터를 이용하여 2단부의 온도를 45 K 부근까지 가열하며 참조센서의 온도와 온도교정이 필요한 센서들의 온도에 따른 저항값을 수집하였다. 이와 같은 방법으로 센서홀더의 가열과 냉각과정을 여러 차례 반복하였으며 마지막으로 냉동기의 전원을 차단한 후 자연적으로 온도가 상승할 때 온도에 따른 저항값을 측정하여 상호 비교함으로써 온도교정의 정확성을 높였다.

Fig. 9는 온도교정시스템의 초기 냉각곡선이다. 교정시스템의 온도 측정은 제조사에서 교정 온도센서를 사용하였으며 PT1은 냉동기의 1단 냉동부, PT2는 1단부 열 차폐층, CX1은 냉동기의 2

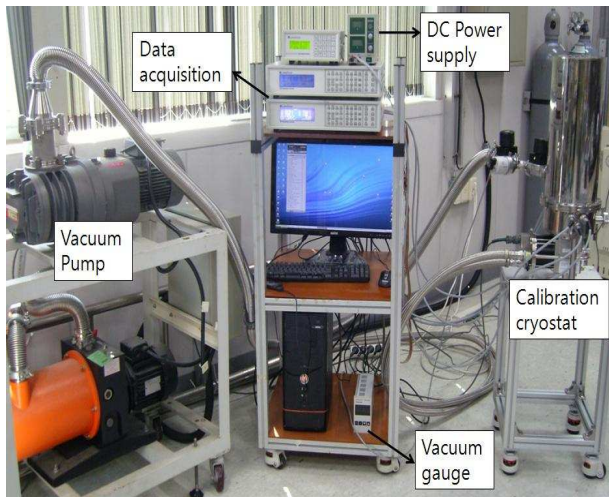


Fig. 8 Photo of experimental apparatus and instrumentation system

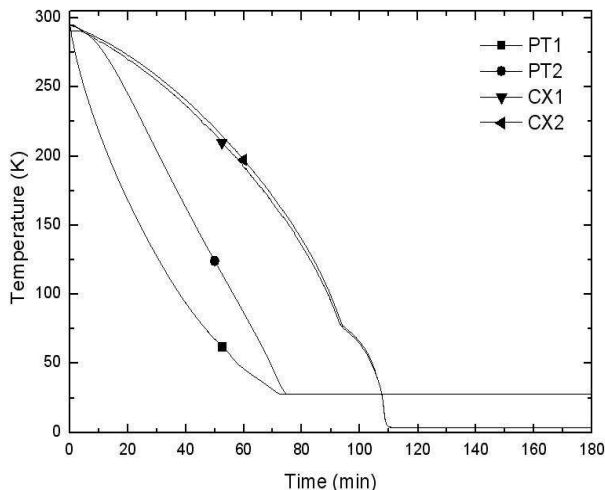


Fig. 9 Initial cooldown of sensor calibration system

단 냉동부, CX2은 센서홀더의 온도이다. 1단 냉동부와 2단 냉동부가 최저온도까지 냉각되는데 소요되는 시간은 각각 약 70분, 110분이었으며 온도는 각각 28 K미만, 3.25 K 이었다. 따라서 본 실험에서는 3.25 K부터 상온까지의 온도교정 데이터를 확보할 수 있었다.

교정이 되지 않은 온도센서는 제조사에서 액체 헬륨, 액체 질소, 상온에서의 저항값⁽⁷⁾을 제공한다. 온도교정실험 결과값을 제공된 데이터와 비교하여 실험의 정확도를 판단하였다. 테이블 2는 제조사로부터 제공된 액체 질소와 액체 헬륨 온도에서의 저항값과 실제 실험을 통해 측정된 저항값을 비교한 표이다. 실험결과 1번 온도 센서는 히터를 이용한 1차, 2차 실험에서 각각 4.203 K에서 266.12 Ω, 4.201 K에서 266.07 Ω의 값을 얻었으며 히터를 이용하지 않은 자연온도상승시에는 4.205 K에서 265.99 Ω이 측정되어 참조값과 비교하여 0.003-0.04%의 오차가 있었으며 77.3 K에서는 77.46 Ω으로 0.05%의 오차가 있었다.

2번 온도센서는 1차 가열실험에서 210.87 Ω, 2차 가열실험에서 211.04 Ω, 자연온도상승시에는 210.86 Ω이 측정되었으며 참조값과 비교하여 0.01-0.06%의 오차가 있었으며, 77.3 K에서는 62.07 Ω으로 오차범위 0.04% 이내였다.

Fig. 10은 센서1의 55 K 이하에서 반복 측정된 저항값을 그린 그림이다. 히터의 전류를 0부터 1.6 A까지 0.2 A간격으로 상승시키면서 실험하였다. 1, 2차 가열실험에서 측정된 저항값은 온도를 자연 상승하면서 측정된 저항값과 비교하여 0.03% 이내의 반복성이 관찰되었다. 이 결과를 이용하여 센서 1의 고유 교정식과 계수를 얻었으며 식은 아래와 같고 계수는 Fig. 10에 제시하였다.

Table 2 Data of reference and experiment result

Sensor No	Reference ⁽⁷⁾	resistance (Ω)		
		warmup (4.205K) (77.32K)	가열1 4.203K	가열2 4.201K
1	266 @ LHe	265.99	266.12	266.07
	77.5 @ LN ₂	77.46	.	.
2	211 @ LHe	210.86	210.87	211.04
	62.1 @ LN ₂	62.07	.	.

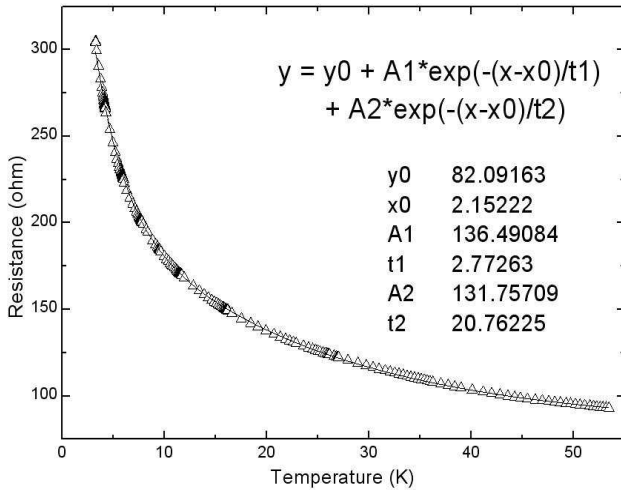


Fig. 10 Calibration data curve of No.1 temperature sensor and curve equation

$$Y = y_0 + A_1 \exp\left(\frac{-(x-x_0)}{t_1}\right) + A_2 \exp\left(\frac{-(x-x_0)}{t_2}\right) \quad (7)$$

실제 실험 결과와 비교하였을 때 4.2 K에서 약 0.04%, 20 K에서 약 0.03%, 50 K에서 0.001% 이내의 오차를 보였다.

5. 결론

2단 극저온 냉동기를 이용하여 3 K에서 상온까지 동시에 20개 이상의 온도 센서를 정밀하게 교정을 할 수 있는 시스템을 개발하였다. 최적화된 설계를 통해 센서홀더로의 열침입량을 최소화하여 최저온도까지 교정할 수 있게 하였으며 교정신뢰성 및 반복성 향상을 위해 연속운전 할 수 있도록 제작하였다. 온도센서 교정실험결과 액체 질소온도 이하에서 참조데이터 대비 약 0.06% 오

차의 정확성을 보였으며 0.03% 오차이내의 반복성을 검증하였다. 본 시스템을 이용하여 극저온 온도센서를 교정하여 다양한 극저온시스템에 활용 예정이다.

후 기

본 연구는 출연연-중소기업 공동기술 개발사업(연구장비활용기술개발사업)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Szmyrka-Grzebyk, A., Szmyrka-Grzebyk, A., Lipinski, L., Manuszkiewicz, H., Kowal, A., Grykalowska, A. and Jancewicz, D., 2011, "Measuring Systems for Thermometer Calibration in Low-Temperature Range" *SpringerLink Int J Thermophys* 32, pp. 2466~2476.
- (2) Ricketson, B.W.A. and Watkins, R.E.J., 2009, "The 27Ω Rhodium-Iron Ceramic Sensor" *Cryogenics*, Vol. 49, pp. 320~325.
- (3) Souri, K. and Makinwa, K., 2011 "Ramp Calibration of Temperature Senosors" *IEEE 4th Internaional Workshop*, pp.67~70.
- (4) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 2002, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (5) White, G. K., 1979, *Experimental Techniques in Low-Temperature Physics*, Clarendon press, Oxford, pp. 127~131.
- (6) SRDK-408D2 4K-Cryocooler Manual., <http://www.shicryogenics.com>
- (7) Temperature Measurement and Control Catalog., <http://www.lakeshore.com>