

# 열량법에 의한 열침입량의 계측

김동락, 양형석, 김도형, 조승연, 정원목, 이재묘  
한국기초과학지원연구원

## Calorimetry for the Measurement of Heat Leak

D.L. Kim, H.S. Yang, D.H. Kim, S. Cho, W.M. Jung, J.M Lee  
Korea Basic Science Institute

dlkim@kbsi.re.kr

**Abstract** - In this study, the experimental study based on calorimetry for terminal cryostat has been performed and evaluated. The experiments performed here were divided into two types, those are test without and with current lead. The former is intended for the evaluation of feasibility and precision of our calorimetry, the later for the application to terminal cryostat of our study. As a result, it was found that the calorimetry performed in this study could predict well the heat transfer rate into the terminal cryostat.

### 1. 서론

지난 2001년도부터 21C 프론티어 사업의 일환으로 고온초전도체를 이용한 전력시스템에 대한 연구가 국내에서 시작하였다. 저자 등이 소속된 한국기초과학지원연구원에서는 고온초전도 전력 cable 개발과 관련하여 고온초전도 cable 단말의 냉각계 개발을 담당하고 있다. 본 논문에서는 고온초전도 전력케이블용 단말을 통한 열침입량을 측정하기 위하여 cryostat를 설계하였으며, 증발열량법을 이용한 실험을 통해 단말 cryostat(극저온용기)의 열전달 특성을 실험하였다.

### 2. 실험장치 및 방법

#### 2.1 실험 장치

본 연구에서 설계된 단말 극저온용기의 전류 도입선을 장착한 형상을 Fig.1에 나타내었고, 각 부분을 Table 1에 설명하였다. 저온용기 내에서 저온질소가스의 대류에 의한 냉각영향을 줄이기 위해, 전류도입선이 질소가스와 닿는 부분을 없애 하였고, 전류도입선의 저온 끝단이 항상 액체질소와 접촉하도록 하여 전도에 의한 열전달만을 고려할 수 있게 설계하였다.

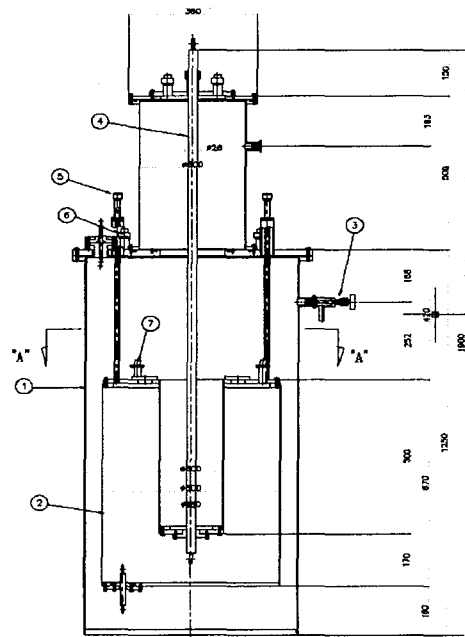


Fig. 1 Schematic view of terminal cryostat.

Table 1. The individual parts of cryostat

No	Name
①	Vacuum vessel
②	LN <sub>2</sub> vessel
③	Vacuum valve
④	Current lead
⑤	LN <sub>2</sub> inlet
⑥, ⑦	Feed through

단말 극저온용기는 진공 단열을 위한 진공용기와 전류도입선 냉각을 위한 액체질소 용기로 나눌 수 있으며, 액체질소용기의 외부에 다층단열재(MLI)를 부착하여 복사열전달을 최소화 하였

다.

단말 극저온용기의 냉각 성능을 실험하기 위한 측정 시스템의 구성은 Fig.2와 같다. 액체질소가 채워진 cryostat에 외부로부터의 열침입에 의하여 증발된 질소가스의 체적을 유량계로서 측정한다. 전류 도입선의 온도 분포와 액체 질소의 액면을 측정하기 위해 20 채널을 지원하는 디지털 멀티미터(Keithley, 2700)를 사용하였다. 증발가스의 유량측정에는 습식 유량계(Sinagawa)를 사용하였으며 계측은 Lab-view로서 이루어졌다.

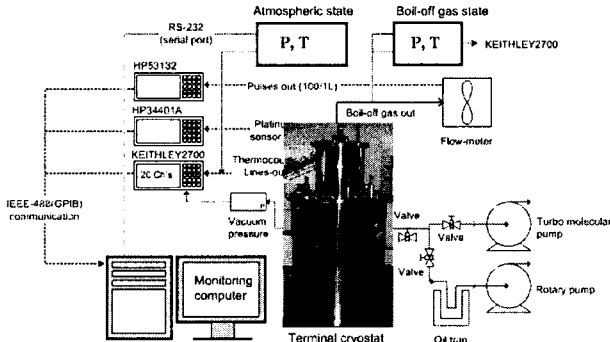


Fig 2. Block diagram for calorimetry

## 2.2 실험 방법

본 연구에서 사용한 열량법은 기저의 증발잠열을 가지는 물질을 작동유체로 사용하고, 증발된 가스 유량을 측정하여 cryostat 내부로의 열침입량을 구하는 방법으로서 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$Q = \dot{m} \cdot h_{fg} \quad (1)$$

여기서,  $\dot{m}$ ,  $h_{fg}$ 는 각각 액체질소의 증발질량유량과 증발잠열이다.

본 연구에서는 액체질소를 증발유체로 사용하여 열량법을 적용하였으며, 전류도입선을 장착하지 않은 실험과 장착한 실험의 2가지로 진행하였다. 전자의 경우는 단말 극저온용기에서의 열침입량을 측정하기 위함이며, 후자의 실험은 전류도입선을 통해 들어오는 열량을 측정하기 위함이다.

### 2.2.1 전류 도입선이 없는 경우의 실험

이 경우는 전류도입선이 없는 경우의 단말 극저온용기로 전달되는 열량을 측정하는 것을 목적으로 하였다. 또한 내부에 장착된 히터를 이용하여, 인위적으로 입력한 열량을 통하여 본 실험의 열량법이 어느 정도의 정확도를 유지하며 측정되는지를 평가하여 본 실험 방법의 해상도를 검증한다.

### 2.2.2 전류 도입선이 있는 경우의 실험

전류 도입선을 포함한 경우의 실험은 상온으로부터 전류 도입선을 통한 열전달량을 측정하고, 또한 해석적으로도 계산하여 비교하도록 한다. 전류 도입선의 하부는 액체 질소에 잠겨 있으므로 전체 전류 도입선은 전체적으로 250K 이하로 냉각되고, 이러한 경우 전류 도입선의 상온 노출 부분은 대기 중의 수증기가 응축되어 절연성이 좋지 않다. 본 실험에서는 이러한 현상을 방지하고 해석적인 계산의 편의를 위해, 전류 도입선의 끝부분에 온도센서와 히터로 구성된 온도 조절기를 설치하고 원하는 온도를 유지하도록 하였다. 설정온도로는 290, 298, 310, 320K를 사용하여 각각에 따른 전류도입선의 온도분포를 기록하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 열량법을 이용한 실험에 의한 결과

#### 3.1.1 전류 도입선이 없는 경우

전류 도입선이 없는 경우의 실험 결과를 Table 2에 정리하였다.

Table 2. The summary of test without C.L

$Q_{base}$ ①	$Q_{h-cal}$ ②	$Q_{h-meas}$ ③=④-①	$Q_{calo}$ ④	Error  ③-② /③
8.2W	9.2W	9.11W	17.31W	1%
8.08W	23.01W	22.89W	30.97W	0.52%
7.53W	9.202W	9.27W	16.8W	0.8%

표에서  $Q_{base}$ (①)는 cryostat에의 열침입량,  $Q_{h-cal}$ (②)는 액체질소 중에 있는 heater에 흘린 전류치를 측정하여 계산한 heater의 발열량,  $Q_{h-meas}$ (③)은 실험에서 측정된 총열량에서 구한 heater의 발열량,  $Q_{calo}$ (④)는 증발열량법으로 측정한, heater의 발열량을 포함한 총열량이다. 이 결과로부터 heater의 발열량을 1% 이내에서 측정되었다는 것을 확인할 수 있으며, 이는 본 실험에서 적용한 열량법이 매우 정확하다는 것을 의미하고 있으며 적은 침입열량도 측정할 수 있을 정도의 해상도를 가진다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구의 실험방법(열량법)을 전류도입선을 포함한 실험에도 적용할 수 있을 뿐만 아니라, 차후 다른 경우의 냉각 실험에도 적용할 수 있다는 중요한 사실을 알 수 있다.

그리고 Fig. 3에 나타난  $Q_{base}$ 의 변화를 살펴보면, 액체질소의 액면이 점차 낮아질수록  $Q_{base}$ 가 점점 감소하는 사실을 확인할 수 있다. 이는 액면이 낮아짐에 따라 cryostat 상부로부터 벽면을 타고 들어오는 침입열이 cryostat 내부의 저온의 질소가스에 의하여 냉각되기 때문이다.

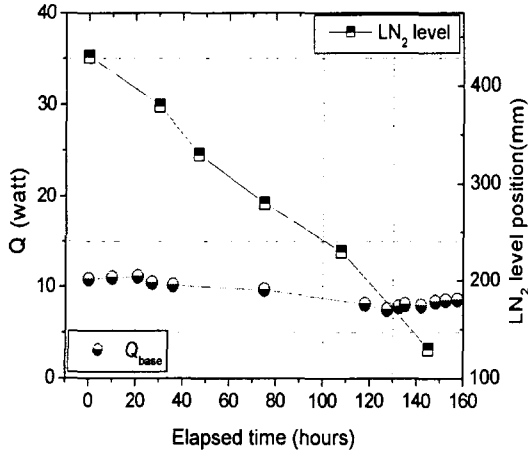


Fig 3. The heat load on cryostat and LN<sub>2</sub> level

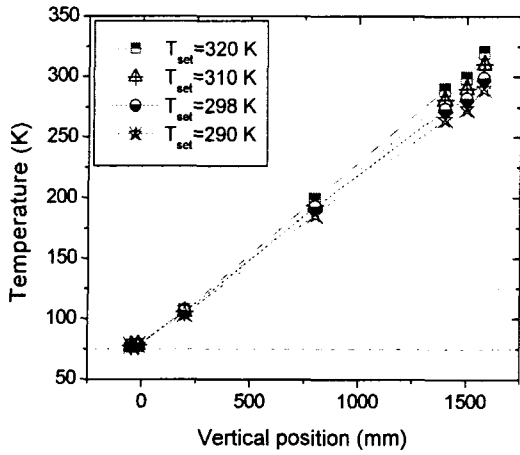


Fig 4. The temperature distribution of current lead.

### 3.1.2 전류 도입선이 있는 경우

이미 언급한 바와 같이 전류도입선이 있는 경우에는 4가지의 설정온도를 사용하여 전류도입선의 온도분포와  $Q_{calo}$ 를 구하였다. Fig 4에 설정온도에 따른 전류도입선의 온도분포를 나타내었다. 전류도입선 끝 부분의 설정온도에 따라 전류도입선의 온도분포가 달라지는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 해석적인 계산에 의한 결과

Fig.1에 나타낸 단말 극저온용기로의 열전달량을 해석적으로 계산하기 위해서는 Fig. 5과 같은 복사열전달의 네트워크를 이용해야 한다. Fig.5의 네트워크는 다음의 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i A_i}} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{\frac{1}{A_i F_{ij}}} \quad (2)$$

여기서,  $E_{bi}$ ,  $J_i$ ,  $\epsilon_i$ ,  $A_i$ ,  $F_{ij}$ 는 각각 표면  $i$ 의 흑체방사도, 출사(radiosity), 방사율, 표면적, 표면  $j$ 로의 형상계수를 의미한다. 식(2)를 복사열전달에 관계하는 각 표면에 대하여 전개하면  $J_i$ 에 대한 연립방정식을 구할 수 있으며, 이를 행렬식으로 정리하고 해를 구하였다.

그리고 support 및 전류도입선으로의 열전도는 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{CL} = (A/L)_{CL} \cdot \int_{T_L}^{T_H} k(T) dT \quad (3)$$

계산에서 전류도입선의 온도가 액체 질소 온도부터 상온까지 변화하므로 이 온도구간에서 재료의 열전도도는 온도의 함수인 것을 고려하여 계산해야 한다.

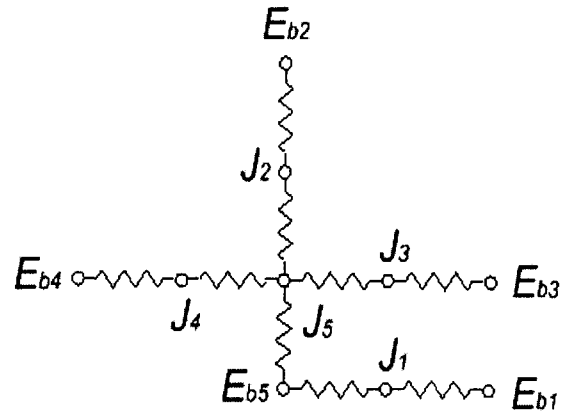


Fig 5. The heat transfer network for radiative heat transfer with MLI

### 3.3 결과 비교 분석

실험을 통해 얻어진 전류도입선을 통한 열침입량을 Table 3에 나타내었다. 이 열침입량(B)은 전류도입선의 상부의 온도를 각각 290.30K, 298.44K, 310.32K, 320.23K로 고정하고 측정된 결과로 식 (3)을 이용한 계산결과(A)와 3%이내로 일치하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 본 실험장치를 이용하여 전류도입선의 열침입량을 정확히 측정할 수 있다는 것을 확인하였다.

## 4. 결론

본 연구에서 전류도입선 냉각을 위한 단말 극저온용기를 설계하고, 증발열방법에 의한 열침입량 측정 실험을 수행하여 단말 극저온용기에서의 열전달 특성을 평가하였다.

Table 3. The summary of analytic calculation and experimental method

$T_H$	$T_L$	전류도입선 열침입량 (계산) A	Cryostat 열침입량 (전류도입선 없을경우)	Cryostat 열침입량 (전류도입선 있을경우)	전류도입선 열침입량 (측정) B	B/A
290.30K	77.68K	30.77W	11.0W	41.30W	30.30W	0.98
298.44K	77.67K	31.83W	11.0W	43.75W	32.75W	1.03
310.32K	77.67K	33.35W	11.0W	44.75W	33.75W	1.01
320.23K	77.68K	34.58W	11.0W	45.56W	34.56W	0.99

[참고문헌]

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

1. Klaus D. Timmerhaus nad Thomas M. Flynn., 1986, Cryogenic process engineering, Plenum press.