

# 고온초전도 케이블용 cryostat의 단열조건에 대한 열침입량 측정

김도형<sup>†</sup>·정원목<sup>\*</sup>·김동락<sup>\*</sup>·양형석<sup>\*</sup>·조승연<sup>\*</sup>·황시돌<sup>\*\*</sup>

## Experiment on Heat Loads Invaded into HTS Cable Cryostat under Cryogenic Insulation System

Do-Hyeong Kim, Won-moog Jung, Dong-Lak Kim, HyungSuk Yang,  
Seungyon Cho and Si-Dole Hwang

**Key words:** Calorimetry(열량법), Cryogenic system(극저온시스템), Insulation(단열)

### Abstract

Insulating a heat from the environment is the most important in cryogenic applications like HTS cable system. Vacuum and MLI(Multi-Layer Insulation) have been widely used to get highly efficient cryogenic insulation. In this study, experiment on annular cylinder regarded as basic model of HTS cable cryostat has been performed to measure the heat loads. To investigate the effectiveness of radiation shields in cryogenic insulation system, the experiments are carried out to various number of the shields. The measured values are compared with the results estimated theoretically. The heat loads invaded from the environment was determined by liquid nitrogen boil-off calorimetry.

### 기호 설명

$h_{fg}$	: 증발잠열 [J/kg]
$\dot{m}$	: 질량유속 [kg/s]
$\dot{q}$	: 열전달률 [W]
$\varepsilon$	: 방사율
A	: 면적[m <sup>2</sup> ]

### 1. 서론

도시로의 인구 집중현상으로 인해 대도시에서의 전력에 대한 수요는 매년 증가하고 있다. 기

존의 구리케이블로 수요를 충족하기 위해서는 선로를 추가로 설치하여야 하는데, 도심이기 때문에 가공선로보다는 지중선로를 확장하여야 할 것이며, 이때 막대한 선로 설치비용이 들게 될 것이다. 이러한 환경적 제약을 극복하기 위한 해결책으로 초전도 케이블이 대두되고 있다.<sup>(1),(2)</sup> 현재 상업적으로 적용할 수준까지 도달하지는 않았지만, 머지 않은 시기에 초전도 케이블은 실제 선로에 적용될 것이며, 그렇게 되면 기존의 구리케이블보다 송전 용량이 3~8배 증가되므로 추가적인 지중선로의 확장없이 기존의 지중케이블을 초전도 케이블로 교체한다면 설치비용을 절감하면서 증가하는 전력수요에 대응할 수 있을 것이다.

초전도현상은 극히 낮은 온도에서 발현하는 물리현상으로서 초전도 케이블의 정상적인 동작을 위해서는 케이블 시스템의 온도를 극저온으로 유지하기 위한 기술이 반드시 필요하다. 고온초전도 케이블 시스템(HTS cable system)에서는 초전도상태를 유지하기 위한 한계로서 1기압 상태 혹은 과냉각 상태의 액체질소를 이용하게 되는데,

<sup>†</sup> 한국기초과학지원연구원 장치운영부 응용개발팀

E-mail : kimdh@kbsi.re.kr

TEL : (042)870-1634 FAX : (042)870-1639

<sup>\*</sup> 한국기초과학지원연구원 장치운영부 응용개발팀

<sup>\*\*</sup> 한국전력연구원

이때의 온도는 대략 77K 이하가 된다. 그러므로, 상온인 주위와의 큰 온도차로 인해 활발한 열침입이 이루어지게 되는데, 이를 방지하기 위해 고온초전도 케이블과 액체질소를 저온용기에 담고 그 주위에 단열 시스템을 적용하게 된다. 효과적인 단열 시스템에 의한 극저온의 유지는 초전도 케이블등의 초전도 응용기술의 성공을 위하여 반드시 해결되어야 할 과제이다. 극저온의 유지를 위한 단열방법으로 진공단열과 복사차폐재가 적용되는데, Fesmire et al.<sup>(3),(4)</sup>은 복사차폐재의 종류 및 설치 방법, 진공도에 따른 저온용기의 단열성능을 측정하였으며, 고진공영역에서 차폐재의 종류와 설치방법에 따라 단열성능에 큰 차이가 있음을 보여주었다. 전도에 의한 열전달을 막기 위해서는 저온부와 고온부의 연결을 가능한 한 회피하고, 가능한 한 연결부의 단면적이 최대한 작도록 설계하고, 열전도도가 낮은 재료를 선택하여야 한다.

본 연구에서는 고온초전도 케이블용 저온유지 장치의 모델을 제작하고, 적용되는 단열방법에 대한 효과를 평가하기 위한 실험을 수행한다. 각 단열조건에서의 열침입량의 측정에는 액체질소의 비등(boil-off)을 이용한 열량법을 이용한다. 먼저, 복사차폐재의 단열능력을 평가하기 위하여 복사차폐재 없는 경우에 대해서 열침입량을 구하고 그 결과를 바탕으로 추가되는 차폐재의 수에 따른 열침입량을 측정하여 단열성능의 개선정도를 알아본다. 한편, 각 실험조건에서의 열침입량에 대한 이론적인 예측치를 구하여 실험결과와 비교해보고, 이를 통해 저온으로의 열침입량을 줄이기 위한 방법을 고찰한다.

## 2. 실험 장치 및 열침입에 대한 이론적 고찰

### 2.1 실험장치

저온장치의 제작형태는 Fig.1에 나타내었듯이 2개의 파이프로 이루어져 있다. 액체질소용기는 외부 진공용기의 플랜지에 볼트로 고정할 수 있도록 제작되었으며, 베크라이트로 만든 스페이서로 지지하여 외부 진공용기의 중심부에 위치할 수 있도록 하였다. 각 용기의 길이 및 외경등의

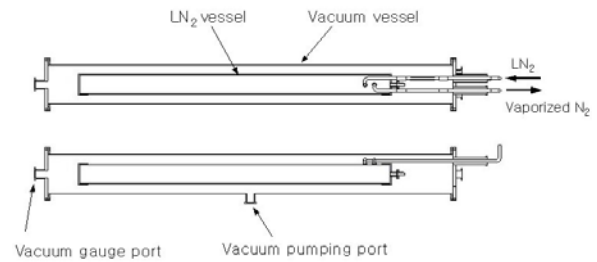


Fig. 1 Schematic view of the cryostat.

Table 1 Physical dimensions of the cryostat

Dimension	LN <sub>2</sub> vessel	Vacuum vessel
Length(m)	1	1.3
Outer Diameter(mm)	127	63.5
Thickness(mm)	2	1.5

수치는 Table 1에 나타내었다. 실험장치의 재질은 SUS이고 그림에서 확인 할 수 있듯이 외부 진공용기와 액체질소용기 사이에는 약 30mm정도의 공간이 있고, 여기에 복사차폐재를 설치하고 진공배기하여 단열시스템을 구성한다. 질소용기의 중간 지점에서 윗면, 아랫면 그리고, 옆면에 온도측정용 백금저항센서를 부착하고, 용기의 표면으로부터 5mm정도의 공간에 백금센서를 추가로 설치하였다.(Fig. 2)

복사차폐재에 의한 단열효과를 보기 위하여 차폐재의 층수를 변경해가면서 실험을 실시하였다. 열침입량을 측정하기 위한 실험순서는 먼저 질소용기에 복사차폐재를 설치한 후, 진공용기 내부에 장착을 하고 로터리 펌프와 터보 분자 펌프를 사용하여 진공배기하고, 그 후에 액체질소를 주입한다. 액체질소의 주입 후에는 주입구를 막고, 증발되는 질소 가스의 유량을 유량계 통해 측정한다. 그리고, 실험이 진행되는 동안 센서를 통해

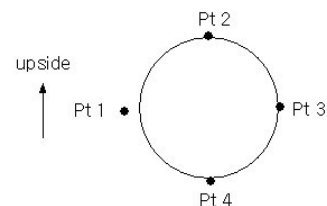


Fig. 2 Circumferential locations of the temperature sensors at the middle of LN<sub>2</sub> vessel.

액체질소용기 표면의 온도, 진공용기 내부의 진공도, 유량계를 통과하는 증발질소의 온도와 압력을 측정한다. 실험결과를 평가하기 위한 자료로는 측정값들 시간에 따른 변화가 없는 정상적인 구간에서의 값을 이용하였다.

2.2 열침입에 대한 이론적 고찰

2.2.1 복사

Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 액체질소용기와 진공용기 사이에는 공간이 있고, 이 공간을 진공 배기하여 대류에 의한 열전달을 차단하게 되며, 진공도가 높아질수록 잔류 가스분자들에 의한 전도현상도 현저히 줄일 수 있다.

본 실험장치와 같이 두 원형관 사이에서의 복사열전달은 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{q} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{R} \tag{1}$$

여기서  $R$ 은 복사열전달에 대한 저항으로 볼 수있으며, 단열을 위해  $N$ 장의 복사차폐재를 두 원형관 사이에 설치하게 되는 경우, 아래의 식(2)와 같이 정리된다.<sup>(5)</sup>

$$R = \frac{1 - \epsilon_H}{\epsilon_H A_H} + \frac{1}{A} \left( \frac{1}{\epsilon_L} + \frac{2N}{\epsilon_s} - N \right) \tag{2}$$

여기서, 하첨자  $H$ 는 고온부,  $L$ 은 저온부를 나타낸다. 복사차폐재의 수( $N$ )가 증가할수록 복사저

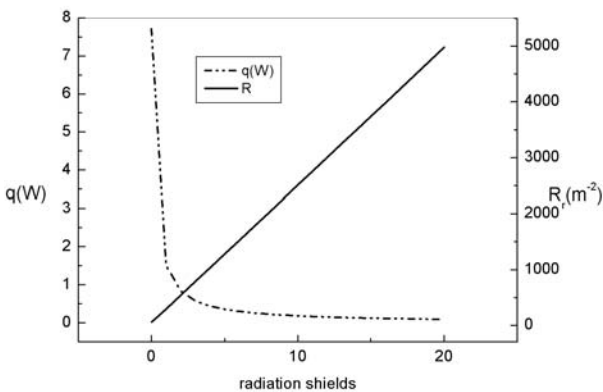


Fig. 3 Heat load and radiative resistance with respect to the number of radiation shields

항의 값은 증가하는 것을 알 수 있다.(Fig. 3)

2.2.2 전도

액체질소용기와 상온의 진공용기를 연결하는 구조물에 대해서 고려하여야 하는데, 그 예로 액체질소의 공급포트, 배기포트, 지지대, 온도센서를 연결하기 위한 와이어등을 들 수 있다. 전도에 의한 열전달율에 대한 식은 다음과 같다.

$$q = \frac{A}{L} \int_{T_L}^{T_H} k(T) dT \tag{3}$$

$$= \frac{A}{L} \bar{k} (T_H - T_L)$$

여기서,  $\bar{k}$ 는 아래와 같이 정의되고 스테인레스강에 대하여 12.3(W/m-K)의 값을 가진다.<sup>(6)</sup>

$$\bar{k} = \frac{1}{(T_H - T_L)} \int_{T_L}^{T_H} k(T) dT$$

2.2.3 가스전도

대기압 상태에서는 기체분자의 평균자유행로가 매우 짧아서 기체분자에 의한 전도현상은 일어날 수가 없다. 하지만, 진공도가 높아지면 기체분자의 밀도가 낮아지고, 평균자유행로도 길어지게 된다. 그러므로, 가스전도현상이 활발히 일어나게 된다. 하지만, 진공도가 더 높아지면, 기체분자의 감소로 인해 가스전도의 영향은 감소한다. 아래는 가스전도에 의한 열전달률에 대한 표현식이다.<sup>(7)</sup>

$$q = A \left( \frac{y+1}{y-1} \right) \left[ \frac{R}{8\pi T} \right]^{1/2} F_a p (T_H - T_L) \tag{13}$$

여기서, 적응인자(accomodation factor)인  $F_a$ 는 표면에 부딪히고 반사되는 기체분자들의 에너지 전달 효율을 나타낸다.

$$F_a = \left[ \frac{1}{\alpha_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{\alpha_2} - 1 \right) \right]^{-1} \tag{14}$$

여기서,  $\alpha_i$ 는 표면  $i$ 에서의 적응계수(accom-

ation coefficient)를 의미하며, 공기의 77K와 300K의 표면에 대한 값은 각각 1.0, 0.8~0.9이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 단일조건에 대한 이론적 예측치

복사차폐재의 수에 따른 복사열침량과 전도 및 가스전도에 의한 열침량을 Table 2에 정리하였다. 진공상태에서 열전달은 주로 복사와 전도에 의해 일어나는 것을 표에서 알 수 있다. 한편, 복사차폐재가 유무에 따라 열침입량에는 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

#### 3.2 단일조건에 따른 열침량 측정결과

진공도가  $1 \times 10^{-4}$  torr 정도에 도달했을 때 액체질소를 공급하기 시작하였고, 냉각된 액체질소용기가 저온펌프의 역할을 하게 되어 실험기간동안 진공도는 더 개선된 것을 확인할 수 있었다.

Table 3은 복사차폐재가 설치되지 않은 경우와 1장 설치된 경우에 대한 실험에서 Fig. 2에 표시된 위치에서의 온도를 나타내고 있다. 복사차폐재가 1장 설치된 경우에 Pt 1의 온도는 가장 바깥의 복사차폐재의 표면에 온도센서를 부착하여 측정된 값이며, 다른 온도센서들은 차폐재에 의해 쌓여있다. 액체 질소용기 표면의 온도를 살펴보면 차폐재가 없는 경우, 표면의 온도가 1기압에서의 액체질소의 포화온도인 77K보다 높은 것을 알 수가 있다. 하지만, 차폐재에 쌓인 다른 경우들에서는 77K에 가까운 온도를 보이는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 극저온 영역에서는 복사열전달에 의한 영향이 대단히 큰 것을 알 수 있다.

Table 2 Theoretical estimation of heat transfer rate of the cryostat

Heat transfer mode	No. of radiation shields			
	0	1	5	10
Radition	7.7	1.5	0.36	0.18
Conduction	0.56			
Gas conduction	0.048	<0.048	<0.048	<0.048
Total Heat transfer rate(W)	8.31	<2.11	<0.97	<0.79

Table 3 Temperature distribution

Sensor	No. of the radiation shield	
	0	1
Pt 1	218.9	279.7
Pt 2	85.3	78.7
Pt 3	80.0	78.0
Pt 4	79.5	78.4

Table 4는 복사차폐재의 수에 대한 열침입량을 나타내고 있다. 표에서 알 수 있듯이 복사차폐재가 한 장만 설치되어도 차폐재가 없는 경우보다 열침입량이 64%정도로 줄어드는 것을 알 수 있다. 차폐재가 증가할 수록 이러한 차이는 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 복사차폐재 수에 따른 열유속을 나타낸 것으로서 이론적인 예측치와 측정치 그리고, Amano와 Ohara<sup>(8)</sup>의 결과를 나타내었다. 측정치의 열침입량이 복사차폐재의 증가에 따라 경향은 이론치와 매우 유사한 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 하지만, 측정치는 복사차폐재의 수가 증가하여도 열침입량은 더 이상 감소하지 않고 일정한 값으로 수렴되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이론치와 Amano와 Ohara<sup>(8)</sup>의 실험결과와 비교해 볼 때, 이는 본 실험장치로 복사사이외의 다른 열전달 요인이 있는 것으로 추측이 되고 앞으로 이에 대한 규명이 필요하리라 사료된다.

선을 통한 전도와 계측을 위한 미세전류에 의한 발열도 모두 고려되었다. 차폐재가 없는 경우에는 이론적으로 얻어진 열침입량과 실험치가 거의 일치하지만, 차폐재가 설치된 경우는 이론치와 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 실험결과와 이론치 사이의 오차를 넘는 것으로 추측되며, 이후로도 이 차이점에 대한 연구와 실험이 필요하리라 사료된다.

Table 4 Heat loads with respect to the number of radiation shields

No. of radiation shield	Heat load(W)
0	7.06
1	2.58
5	1.24
10	0.93
20	0.78
30	0.70

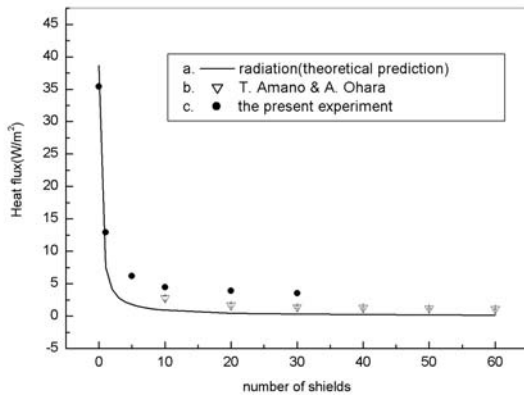


Fig. 4 Comparison between present results and theoretical ones.

#### 4. 결론

저온에서의 열전달현상에 대한 연구를 수행하였다. 이를 초전도 케이블의 단열성능을 평가하기 위해 제작한 저온장치에 실제로 적용하여 주어진 단열조건에 대하여 열침입량을 측정하고 이론적인 계산결과와 비교하였다. 이를 통해 실제 고온초전도 케이블용 저온장치의 단열성능 평가를 위한 기초자료를 얻을 수 있었다.

이론적인 고찰에서는 진공단열을 고려하기 때문에 대류에 의한 열전달은 고려대상에서 제외되었고, 다른 열전달 기구를 통한 열침입에 대해 고려하였다. 진공상태에서는 복사에 의한 열전달이 우세하게 되는데, 저온용기로 들어오는 열침입량의 대부분을 차지하게 된다. 하지만, 복사차폐재의 사용으로 복사열침입을 효과적으로 줄일 수 있는 것을 알 수 있었다. 물론, 진공도는 높게 유지되어야 하며 진공도가 개선될수록 자유 기체 분자에 의한 가스전도도 차단할 수 있음을 알 수 있었다. 한편, 고온부와 저온부의 구조적인 연결에 의한 전도 열침입은 진공도와 복사차폐재의 유무에 관계없이 일정하게 유지되는 양이다. 그러므로, 저온장치의 설계단계에서부터 전도열전달량을 줄이기 위한 고려가 필요하다는 것을 알 수 있었다.

단열성능실험에서는 저온용기에 들어오는 열침입량을 측정하여 단열성능을 평가하였다. 이를 위해 액체질소의 비등을 이용한 열량법을 적용하였다. 액체질소가 공급되었을 때, 액체질소용기는

진공용기 내에서 저온펌프의 역할을 하여 진공도가 개선되는 것을 관찰할 수 있었다. 그리하여, 측정시간 동안 고진공 상태를 유지할 수 있었다. 이러한 고진공상태에서 복사차폐재의 수에 따른 열침입량의 측정실험을 수행하였으며, 차폐재의 수가 많을수록 열침입량은 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 이론치와 비교해보았을 때, 복사차폐재가 증가할수록 계통적인 변화를 보이는 것을 확인할 수는 있었지만, 일정한 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 앞으로 이 문제의 원인을 규명하기 위한 노력이 필요하다고 생각되며, 이를 위해 보다 정밀한 실험장치의 설계가 필요한 것으로 생각된다.

#### 후 기

본 연구는 한전 전력연구원의 전력산업기술개발사업기금의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Politano, D., Sjöström, M., Schnyder, G. and Rhyner, J., 2001, "Technical and Economical Assessment of HTS Cables," IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 2477~2480
- (2) Honjo, S., Matsuo, K., Mimura, T. and Takahashi, Y., 2001, "High-Tc Superconducting Power Cable Development," Physica C 357-360, 1234~1240
- (3) Fesmire, J. E., Augustynowicz, S. D. and Demko, J. A., 2002, "Thermal Insulation Performance of Flexible Piping for Use in HTS Power Cables," Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 47, pp. 1525~1532
- (4) Fesmire, J. E., Augustynowicz, S. D. and Demko, J. A., 2002, "Overall Thermal Performance of Flexible Piping under Simulated Bending Conditions," Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 47, pp. 1533~1540
- (5) 김도형, 정원목, 김동락, 양형석, 정기호, 조승연, 2003, "고온초전도 케이블용 cryostat의 단열 조건에 따른 열침입량에 대한 이론적 고찰," 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 150

- (6) White, G. K., 1979, "Experimental Techniques in Low-Temperature Physics," 3rd ed., Clarendon Press, pp. 131-134.
- (7) Timmerhaus, K. D. and Flynn, T. M., 1989, "Cryogenic Process Engineering," Plenum Press, pp. 378-387.
- (8) Amano, T. and Ohara, A., 1994, "Thermal Performance of Multilayer Insulation(3rd Report, Effects of Various Parameters on Heat Flux)," 日本機械學會論文集(B編), Vol. 60, No. 569, pp. 292~299