

열량법을 이용한 초전도 케이블 냉각시스템의 열침입량 측정

김도형, 김익생, 김춘동, 고득용, 염한길
LG 전선, 한국기계연구원

Measurement of Superconduct Cable Cooling System Heat Invasion by Calorimetry

Do-Hyoung Kim, Ik-Saeng Kim, Chun-Dong Kim, Deuk-Yong Ko, Han-Kil Yeom
LG Cable, KIMM

kimdoh@ofmail.mach.lg.co.kr

Abstract - The heat loads invaded from the environment to several parts of superconduct cable cooling system were measured by liquid boiloff calorimetry. The measuring system was verified by the measurement to a uniform heat loads. The heat loads by the tubes for relief and pressure gauges were greater than the estimated.

1. 서 론

최근 지구 온난화와 산업 발달로 인한 대도시의 전력 소비가 크게 늘어나고 있으며, 이에 따라 더 많은 전력을 수송하기 위한 방법이 연구되고 있다. 1980년도에 초전도 전력 케이블이 기존의 지화관로를 이용한 전력수송 방법을 대체할 것이라고 기대를 모았으나, 액체헬륨을 냉매로 사용하기 때문에 유지보수 및 경제적인 면에서 실용화에 어려움이 있었다. 그러나 액체질소를 냉매로 사용하는 고온초전도체가 1986년에 발견된 이후, 동일한 단면적으로 최대 수배의 전력을 수송할 수 있는 고온초전도 전력케이블은 현재까지의 수송방법을 대체할 거의 유일한 방법으로 인식되고 있으며 이에 미국, 일본, 덴마크, 독일 등의 여러 선진국들은 연구개발에 많은 투자를 하고 있다.

국내에서도 지난 2001년부터 21C 프론티어 연구개발 사업의 일환으로 고온 초전도체를 이용한 전력시스템에 대한 연구를 시작하였다.

이 중의 일환으로 이루어진 본 과제의 연구에서는 초전도 상태가 유지되기 위한 온도를 유지시켜 주기 위해 Fig. 1처럼 10m 초전도 케이블의 냉각시스템을 설계하여 테스트 하였다. 액체질소 (e.g. 77K)와 상온(e.g. 300K)과의 온도차가 크고 극저온 냉동기의 용량 대비 가격이 비싸기 때문에 각 부품은 높은 수준의 단열이 요구된다. 본 과제의 연구에서는 단열재로 MLI(Multi Layer Insulation)를 사용하였으며, 각 부품의 이중 챔버 진공부를 10^{-4} torr 이하로 추기시켜 주었다.

그러나 본 과제의 10m 냉각시스템 성능실험

을 하는 동안 설계구간에서 각 부품의 입출구 온도차가 0.1 K 차이 밖에 나지 않기 때문에, 온도계의 오차(e.g. 0.1K)에 의해 열손실량(상온으로부터의 열침입량) 계산이 정확하게 이루어질 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 각 부품 내 액체질소의 증발량을 통해 측정하는 열량법(증발법)을 사용하여 각 부품의 열 손실량을 측정하여 보았다. 열량법은 MLI 등의 단열 성능을 측정하기 위해 이미 Fesmire^[1] 등을 통해 많은 연구가 이루어져 왔다. 본 연구에서는 또한 이론적으로 계산하여 측정된 열손실 값을 검증해 보았다.

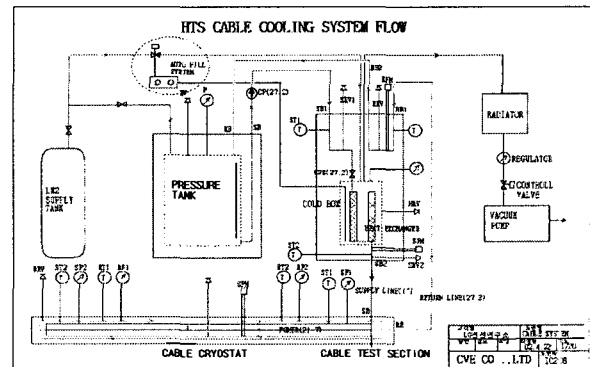


Fig. 1. Schematic diagram of 10m superconduct cable cooling system

2. 본 론

2.1 실험 장치 및 작동 원리

10m 초전도 케이블 냉각시스템의 주요 장치는 케이블 cryostat, 저온 용기(Cold box), 열교환기(Heat exchanger), 압력용기(Pressure tank), 순환 펌프(Circulation pump, CP), 및 배관 등이 있으며, Fig. 1의 개략도에 나타나 있다.

압력용기(Pressure tank)에 차 있던 액체질소(e.g. 77K)는 순환펌프를 거치며 구동력을 얻고, 저온용기(Cold box)내의 제어 밸브를 거치며 유량이 조절되어, 열교환기를 거치며 과냉각 상태

(e.g. 70K)로 된 후, 케이블 Cryostat내의 포머관 (3ea)을 통하여 케이블 끝단까지 갔다가 외곽의 리턴관을 통하여 케이블 시작 부로 돌아오면서 케이블 온도를 초전도 유지 온도 구간으로 유지시켜 주며 포화온도 범위 내에서 온도가 상승되어(e.g. 75K) 압력용기로 돌아오게 된다.

앞질에서도 밝혔듯이 입출구 온도차가 온도계 오차 범위를 벗어나지 못하는 관계로 열량법을 통하여 측정하였다. 열량법을 통해 각 부품의 손실열량을 구하는 원리는 다음과 같다.

액체질소를 부품내의 액체질소의 유로에 꽉 채워주면(실제 운전조건), 상온의 대기로부터 복사와 전도(이중챔버의 진공을 충분히 뽑아주었다면 대류 무시 가능)를 통해 가열되어 액체질소는 그 열량만큼 해당하는 액체질소가 증발하여 액체질소 유로의 입출구를 통해 나오게 된다. 따라서 이 증발되어 나오는 가스질소의 질량 유량을 측정하면 식(1)에 의해서 대기로부터의 열손실을 구할 수 있다.

$$q = \dot{m} h_{fg} \quad (h_{fg} : \text{증발잠열}) \quad (1)$$

가스 유량계는 일본 Shinagawa사의 유량범위가 10~3000 liter/hr인 제품을 사용하였다.

2.2 실험 방법

열량법은 압력용기와 저온용기, 배관 및 순환 펌프에서 측정하였다. 실제 운전조건처럼 액체질소의 유로에 액체질소를 꽉 채워주고 안정화가 된 후에 액체질소 입출구 배관을 T자 형태로 유량계에 연결하여 증발량을 테스트 하였다.

배관 등의 경우 액체질소통에서 직접 주입하면 속도에 의해 반대측 출구로 넘어가 버리므로, 저온용 Dewar를 사용하여 따라 부어 액체질소 유로에 안정되게 채워 주었다.

유량계는 부피 유량계이므로 이 때의 질소가스 온도를 측정하여 밀도에 의해 질량 유량으로 환산을 해 주었다.

2.3 실험 결과 및 분석

각 부품 들은 시간에 따라 증발량이 일정하게 유지되었으며, Fig. 2는 그 일례로 순환펌프에서 시간변화에 따른 증발량 변화를 보여주는 그림이다. 그림에서 보듯이 시간에 따라 증발량이 선형적으로 증가하는 경향은 충분히 정상상태로 되었음을 보여주고 있다.

Table 1은 각 부품들의 열손실량을 측정하여 이론적으로 계산한 값과 비교한 표이다. 펌프의 부품의 단열 성능은 MLI의 종류와 밀도, 진공도에 따라 크게 달라지는데^[2], 여기에서 이론치로는 실제 조건인 NRC-2 재질과 1.0×10^{-4} torr 이하의 진공도에서, 적정 밀도로 30매씩 감기였다고 가정하고 계산하였다. 펌프는 진공챔버와 MLI로 단열하지 못하고, 대기중에 노출된 표면을

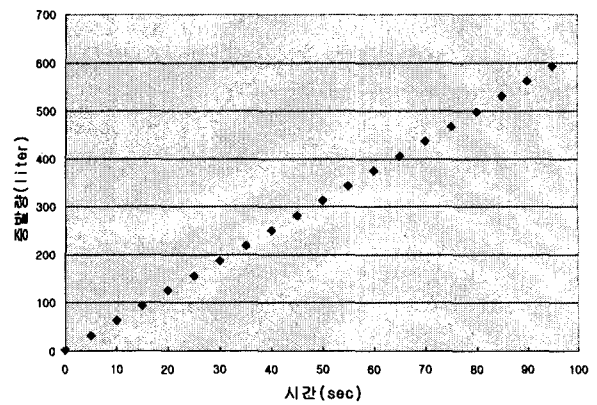


Fig. 2. 순환 펌프에서 시간변화에 따른 증발량 변화

폴리우레탄으로 단열하여 측정하였다. 측정치가 이론치보다 1.2~6.7배 정도 더 크며, 압력용기가 가장 근사한 값을 나타내고 배관이 가장 큰 차이를 나타내고 있다.

이 중 배관이 이론치보다 가장 큰 차이가 나는 것은 액체질소가 잠기는 부피에 비해 MLI 미단열 단면적(진공부와 MLI로 단열되지 못하고 대기에 노출된 부분)이 크기 때문이며, 저온용기 열손실의 이론치에 비한 상대값이 압력용기 열손실의 이론치에 비한 상대값보다 훨씬 큰 이유는 저온용기 내에 압력용기 보다 릴리프 배관이나 압력계용 배관 등이 복잡하게 구성되어 있어, 이를 통한 전도효과가 크기 때문으로 판단되어 진다.

Table 1. Comparison between measured and estimated

구분	측정치	이론치	측정치/이론치
압력용기	39.7	33.6	1.2
배관	23.5	3.5	6.7
정온용기	24.1	11.8	2.0
펌프	36.1	#	#
총열손	123	48.9	2.5

3. 결 론

1. 냉각시스템의 각 부품에 대해 열량법으로 열 손실을 체크해 보았다.
2. 이론치에 비해 상대적으로 배관이 제일 크게 나타났으며, 압력용기가 제일 적게 나타났다.
3. 릴리프 배관이나 압력용 배관에 의한 열손실이 예상보다 크게 나타났다.
4. 릴리프 배관 등은 편의상 있으면 유용하게 쓰여질 수 있으나, 실제 상용화 단계에서는 열손실을 줄이기 위해 이러한 릴리프 배관이나 압력계용 배관 등을 줄여나가야겠다.

(참 고 문 헌)

- [1] J. E. Fesmire, S. D. Augustunowicz, and J. A. Demko, "Overall Thermal Performance of Flexible Piping under Simulated Bending Conditions", Advances in Cryogenic Engineering Conference, Vol. 47, pp.1533~1540, 2002
- [2] Randall F. Barron, "Cryogenic Systems", oxford university press, New york, pp.396-399, 1985