

저항형 한류기 운전조건에서의 과냉각 액체질소 특성 실험

조승연, 김동락, 양형석, 정원숙, 김도형, 김혜림*, 현옥배*
한국기초과학지원연구원, *한전전력연구원

Experimental Investigation of the Subcooled Liquid Nitrogen for Resistive Superconducting Fault Current Limiter

S. Cho, D.L. Kim, H.S. Yang, W.M. Jung, D.H. Kim, H.R. Kim, O.B. Hyun
Korea Basic Science Institute, Korea Electric Power Research Institute

sycho@kbsi.re.kr

Abstract - A subcooled liquid nitrogen cryostat is required for the cooling of a 6.6 kV, 200 A resistive type superconductive fault current limiter (SFCL). To help understand and design an appropriate cryostat for SFCL a prototype cryostat was fabricated and tested. Several states of subcooled liquid nitrogen were obtained by using cryocooler and helium gas. The temperature was uniformly distributed inside the liquid nitrogen vessel within the range of 0.4 K proving the effectiveness of the conduction cylinder.

1. 서 론

과냉각액체질소는 고온초전도 한류기 및 고온초전도 케이블과 같은 고온초전도 전력 응용 기기의 우수한 냉매로서 이용되고 있다. 과냉각액체질소를 이용하여 안정적이며 효율적 냉각을 하기 위해서는 초전도체의 펜치가 발생했을 때와 같은 비정상적인 열전달 특성을 이해하는 것이 중요하며, 특히 이와 같은 이해는 저항형 한류기의 냉각시스템 설계에 있어서는 꼭 필요한 부분이다[1-3]. 예를 들어 한류소자가 펜치가 발생하면 급격한 온도 상승을 동반한다. 온도 상승한 액체질소내에서는 기포가 발생하고 결국 액체질소용기는 액체에서 증기로의 상변화에 의한 체적팽창으로 압력이 증가한다. 이 압력증가는 경우에 따라서는 용기의 파손도 초래할 수 있으므로 이와 같은 일련의 비정상적인 열전달 현상의 이해는 냉각시스템 설계에 있어서 효율적 냉각 측면 뿐만 아니라 안전상의 문제에 있어서도 대단히 중요하다.

본 연구는 6.6 kV, 200 A급 저항형 한류기의 냉각시스템을 설계하는데 필요한 과냉각 액체질소의 열전달 특성을 이해하는 것을 목적으로 하고 있다. 연구 내용은, 앞에서 언급한 비정상 열전달 특성 이해를 포함하여 과냉각 액체질소의 생성과 유지, 이완(relaxation)의 이해에 있다. 본고에

서는 그 첫 번째 단계로 과냉각 액체질소의 비정상 열전달 특성을 실험하기 위한 실험장치와 성능 테스트 결과를 소개한다.

2. 실험장치

과냉각 액체질소 열전달 실험을 하기 위한 실험장치의 사진을 Fig. 1에 보인다. 실험장치는 크게 나누어 진공용기, 액체질소용기, 냉동기를 포함한 냉각부분의 3부분으로 나누어진다. 진공용기(Vacuum vessel)는 최외각에 위치하며, 지름 400 mm, 길이 800 mm로, 그 상판에는 냉동기가 부착되어 있다. 액체질소용기(LN_2 vessel)는 지름 200 mm, 길이 600 mm로 그 속에 냉동기와 연결되어 액체질소를 냉각시키기 위한 전도냉각봉과 실린더 형태의 냉각판이 위치한다. 냉동기는 2단 GM냉동기를 사용하였으며, 액체질소의 냉각은 1단에 부착된 편조구리선에의 한 전도냉각 방식에 의한다. 액체질소에 한류소자의 발열을 모사하기 위해 실험용 히터를 액체

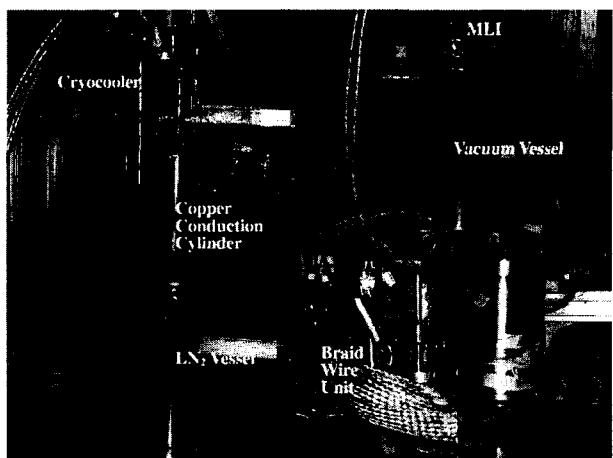


Figure 1. Components of the prototype cryostat for SFCL.

질소용기 속에 장착하였고, 이 히터에는 펄스생성기(function generator)를 이용하여 퀸치시 발생하는 열량에 상당하는 열펄스를 발생시킨다. 또한, 생성하려고 하는 과냉각 액체질소의 온도는 냉동기 1단에 설치된 온도조절기에 의해 냉동기의 냉동부하를 조절하여 도달시킨다. 본 실험장치의 특징은, 액체질소용기를 헬륨가스에 의해 가압 가능도록 설계되어, 1기압정도의 과냉각 액체질소 뿐만 아니라 보다 높은 기압의 과냉각 액체질소의 생성 및 열전달 특성을 연구할 수 있도록 되어 있는 점에 있다. 과냉각액체질소의 온도구배 및 가열시의 온도변화는 액체질소 속에 설치한 온도센서로 측정하며, 압력변화는 액체질소용기 속에 설치한 압력센서를 이용한다. 측정센서의 배치도 및 측정 시스템의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

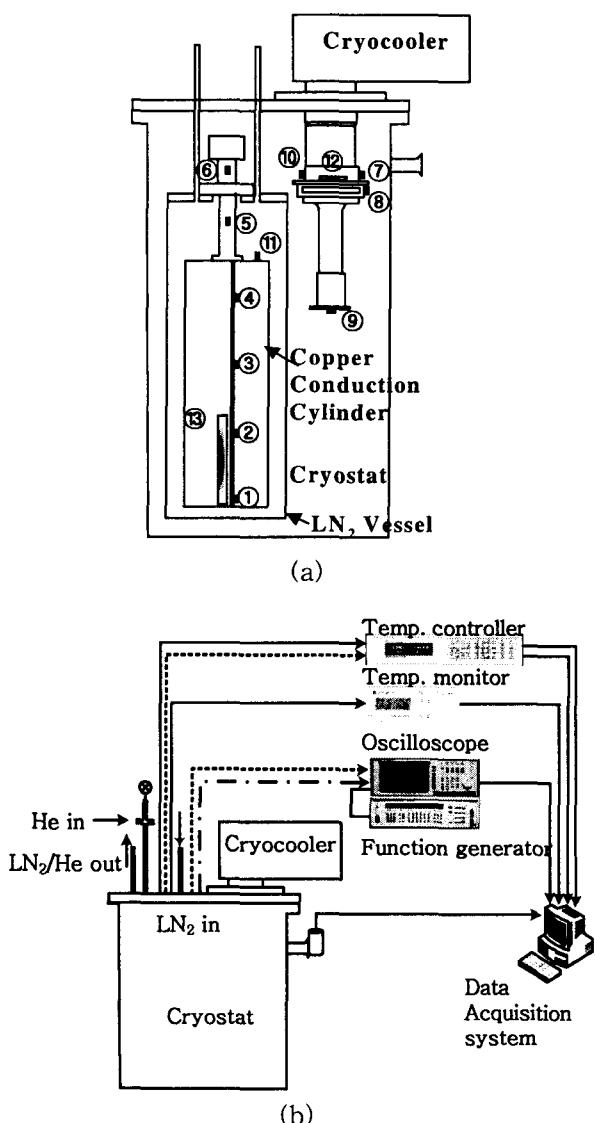


Figure 2. Cryostat measurement system. (a) sensor type and location, 1- 10: temperature sensors, 11: pressure transducer, 12: temperature control heater, 13: SFCL simulating heater; (b) test flow circuit.

3. 실험결과 및 논의

3.1 과냉각 액체질소 생성

과냉각 액체질소의 생성을 검증하기 위해 68 ~ 77 K의 온도범위와 1.4 ~ 2.8 bar의 압력범위에 걸쳐 다양한 상태의 과냉각 액체질소를 생성하여 보았다. 생성한 과냉각 액체질소의 온도와 압력범위를 질소상태도상에 표시하여 Fig. 3에 나타내었다. 압력은 dial gauge 압력계로 측정하였으며 온도는 3번 온도센서 (Fig. 2 참조)의 온도를 기준으로 측정하였다. 이것으로 본 장치에서 다양한 조건의 과냉각 액체질소의 생성이 가능한 것을 확인 할 수 있었다.

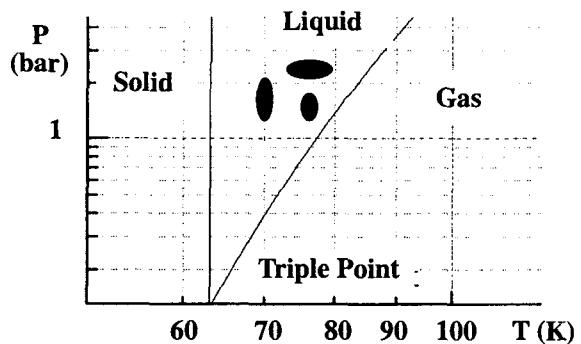


Figure 3. Pressure temperature diagram for the nitrogen. Subcooled liquid nitrogen zone is shown. Temperature is based on the sensor #3.

3.2 냉각부하 및 열침입량

냉각시스템의 구성성분에 대해 cold mass 및 냉각부하를 계산하여 Table 1에 정리하였다. 냉각시스템은 액체질소 용기, 구리전열실린더, 편조선 유닛, 액체질소 등으로 구성되며, 총 60 kg에 달하는 cold mass에 각각의 저온에서의 비열을 곱하면, cold mass 전체를 77 K를 기준으로 1 K 내리는데 필요한 에너지를 얻을 수 있으며 값은 37 kJ이다.

Table 1. Cold mass and cooling load.

Component	M (kg)	C _p @ 77 K, (J/kg K)	M C _p (J/K)	dT/d t (K/s)	Cooling load (W)
LN ₂ Vessel	15	188	2,820	9.6 x 10^{-4}	2.7
LN ₂	14	2014	28,19 6	9.6 x 10^{-4}	27.1
Copper Conduction Cylinder	25	195	4,875	1.0 x 10^{-3}	4.9
Braid Wire Unit	6	195	1,170	2.6 x 10^{-4}	0.3
Total	60		37.06 1		35.0

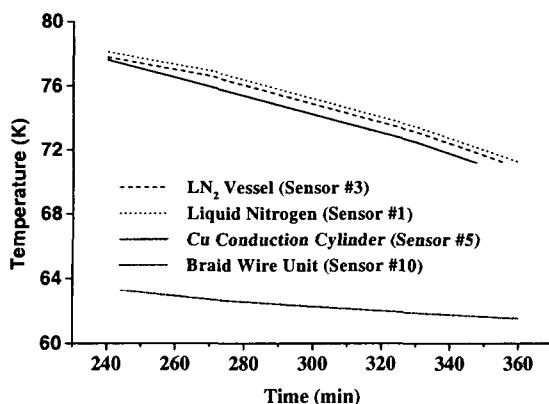


Figure 4. Temperature profile of the cryostat cold mass. Subcooled nitrogen is generated and cryocooler is operating during this period.

또한 일정시간 동안에 각 cold mass의 온도 강하 실험결과를 Fig. 4에 나타내었다. 실험결과로부터 시간에 따른 온도 구배를 계산하여 Table 1에 정리 하였으며, 이를 기준으로 냉동기의 냉각부하를 계산하면 총 35 W이다. 실험에서 사용한 GM 2단 냉동기의 용량을 1단 및 2단의 온도로부터 계산하면 약 60 W이다. 따라서 냉각시스템의 냉각부하를 제외한 약 25 W가 진공용기에서 액체질소용기로 가해지는 외부 열침입량으로 생각되며. 이러한 외부 열 침입량의 대부분은 MLI 차폐가 실험장치 구성상 완벽하게 시공되기 어려운 액체질소용기 상부를 통해 상온의 진공용기로부터 전달되는 복사열로 추정된다.

3.3 온도 분포 시험

액체질소내부에 설치 된 4개의 온도센서를 사용하여 과냉각 액체질소의 수직방향 온도분포를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 냉동기를 사용하지 않을 경우 진공용기 상부로부터 액체질소 용기 상부로의 복사열과, 편조선을 통해 들어오는 전도열, 그리고 액체질소 용기의 지지대를 통해 들어오는 전도열 등으로 인해 액체질소의 상부와 하부의 온도차가 1.5 K까지 벌어짐을 알 수 있다. 그러나 냉동기를 가동할 경우 액체질소 내부 깊숙이까지 설치되어 있는 높은 열전도 특성을 가진 구리전열실린더를 통해 열전달이 이루어져, 액체질소 내부에서의 온도차 이가 0.4 K 이내로 유지 되었다.

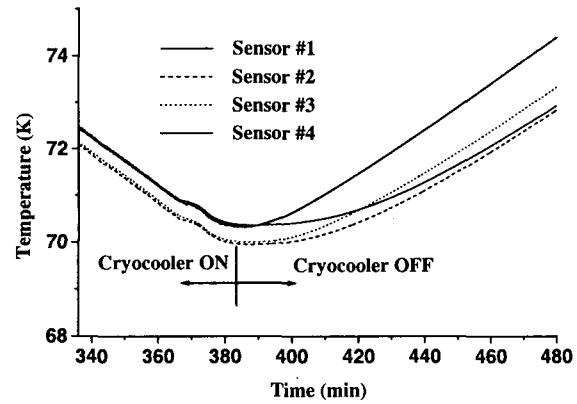


Figure 5. Temperature profile of the subcooled liquid nitrogen in the vertical position at the radial center of the cryostat before and after cryocooler operates.

4. 정리

저항형 고온초전도 한류기의 냉각 시스템의 냉매로 사용되는 과냉각 액체질소 열전달 특성을 조사하기 위한 실험장치를 제작하고, 그 성능 테스트를 하였다. 성능 테스트 결과 여러 조건의 과냉각 액체질소의 생성을 확인 할 수 있었다. 과냉각 액체질소의 수직온도 구배는 약 1.5 K정도 존재하는 것을 확인 하였고, 이 온도 구배는 냉동기 가동에 의해 0.4 K 이내까지 작아졌다.

추후 과냉각 액체 질소의 열전달 특성을 이해하기 위한 퀜치를 모사한 열펄스 실험이 진행될 예정이다.

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

(참 고 문 헌)

- [1] Ohkuma T and Iwata Y 1997 Cryogenic Engineering (in Japanese) Vol. 32, No. 8 366-373
- [2] Kim H R 2002 The Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics 281-284
- [3] Mills A F 1995 and Mass Transfer (IRWIN)