

초전도케이블 냉각시스템의 냉각특성 시험

염한길*, 고득용*, 김익생**, 김춘동**, 김도형**
한국기계연구원*, LG전선 기계연구소**

Test of The HTS Power Cable Cooling System

Han-Kil Yeom*, Deuk-Yong Koh*, Ig-Sang Kim**,
Chun-Dong Kim**, Do-Hyung Kim**

Korea Institute of Machinery & Materials*, LG Cable Ltd.**

hkyeom@kimm.re.kr

Abstract - High temperature superconducting power cable requires forced flow cooling. Liquid nitrogen is circulated by a pump and cooled back by cooling system. Typical operating temperature range is expected to be between 65K and 80K. Subcooler heat exchanger uses saturated liquid nitrogen boiling on the shell side to subcool the circulating liquid nitrogen stream that cools the HTS cable.

The paper describes performance tests of the cooling system. The test items are heat exchanging performance of subcooler, pressure drop between supply and return lines, heat transfer coefficient inside former, cable cryostat heat leak and simulation of electrical load of HTS cable.

1. 서 론

고온 초전도체는 일정 온도영역(일반적으로 액체질소 온도인 77K 이하)에서만 고유의 특성을 갖는 초전도 현상이 나타나기 때문에 초전도 케이블의 선재를 초전도 상태로 유지하기 위해서는 냉각이 반드시 필요하게 된다[1].

냉각방식은 크게 액체 헬륨이나 액체 질소 등을 이용하는 액체 냉각방식과 냉동기로 직접 냉각하는 전도 냉각방식으로 나눌 수 있다. 액체 냉각방식은 저온의 액체를 순환시켜 냉각하는 방식으로 열적 안정성(thermal stability)이 우수하다. 즉 초전도 시스템에 열적 교란에 의한 발열이 있을 때 초전도 도체 표면에서 저온 액체의 비등(boiling)을 동반한 열전달이 이루어지므로, 단위 면적당 열전달이 매우 크고, 일정한 압력 하에서는 액체의 온도로 일정하게 유지된다. 반면, 저온 액체의 저장이나 이송에 따른 열손실이 존재하고, 저온 액체 용기에 대한 열부하로 인해 냉각 시스템 효율이 떨어진다. 또한 시스템의 소

형, 경량화가 어렵다. 전도 냉각방식은 냉동기 헤드에 냉각 대상을 직접 접촉시켜 냉각하는 방식으로 액체 냉각방식에 비해 어느 곳에서나 전원만 연결하면 초전도 시스템을 운전할 수 있고, 저온 액체나 고압가스 등에 대한 전문 인력이 필요 없으며, 또한 액체의 저장이나 순환에 따른 열손실을 줄일 수 있고, 시스템의 소형, 경량화가 가능하며, 설치 위치나 각도에 있어서도 유연한 구성을 할 수 있는 등 여러 가지의 장점을 가지고 있지만 액체 냉각방식에 비해 열적 안정성이 떨어진다. 즉, 액체 냉각방식의 경우 냉각되는 초전도 도체의 주위 온도는 기본적으로 액체의 포화 온도로 일정한 반면에, 극저온 냉동기의 온도는 부하에 따라 크게 변화할 수 있어 열적 안정성이 극저온 냉동기의 냉동 특성과 초전도 도체의 발열 특성에 좌우된다.

따라서 일반적으로 대용량의 안정적인 냉각능력 확보를 위해서는 액체 냉각방식을 적용하고 있다[2,3]. 순환하는 액체질소의 냉각능력 범위는 액체질소의 어느 점에서 초전도 선재의 임계 온도까지이며, 이 범위에서 냉각시스템의 안정성과 경제성을 고려하여 운전 온도를 결정해야 한다. 안정적인 냉각능력 확보를 위해 과냉각된 액체질소를 가압하여 순환시키고, 액체질소의 증발을 막기 위해 외부 열침입을 최소화할 수 있도록 cryostat의 외부를 진공 단열하고 MLI를 시공한다.

2. 본 론

2.1 초전도 케이블 냉각시스템 설계

전도 및 복사에 의한 냉각시스템의 열부하는 Table 1에 나타난 바와 같이 108.3W로 액체질소 저장용기, 케이블 cryostat, cold box, transfer line, dummy HTS cable 등을 포함하고 있다. Table 2는 초전도 케이블의 길이에 따른 운전조건으로 순환하는 액체질소의 증발을 막기 위해 케이블 출구압력을 3기압 이상으로 유지하고, 정상 상태의 케이블 입출구 온도차는 2K이다.

Table 1. Thermal load of the cooling system components.

Component	Type	Load(Watt)
Storage Dewar	Radiation	32.00
	Conduction	1.62
	Sub-sum.	33.62
Transfer Line	Radiation	6.10
	Conduction	1.40
	Sub-sum.	7.50
Core Cryostat	Radiation	16.50
	Conduction	0.95
	Sub-sum.	17.45
Cold Box	Radiation	10.00
	Conduction	1.76
	Sub-sum.	11.76
HTS Dummy Cable	Radiation	37.00
	Conduction	0.93
	Sub-sum.	37.93
Total Load		108.26

Table 2. Operating condition of cooling system

Item	Condition	30m Sys.	250m Sys.
Pressure Condition & Pressure drop	Cable del P	0.03 bar ↓	2.0 bar ↓
	Cable out P	3.00 bar ↑	3.0 bar ↑
	Other del P	0.005 bar ↓	3.0 bar ↓
Temperature Condition	Cable inlet	70K	70K
	Cable out	72K	72K
	Max. del T	7K	7K
Mass flowrate Condition	Former	0.0144 kg/s	0.12 kg/s
	Return	0.0432 kg/s	0.36 kg/s

2.2 초전도 케이블 냉각시스템 개요

극저온 생성 및 유지를 위한 실험장치는 액체질소 저장 용기, 과냉각 시스템, core cryostat 등으로 구성되어 있다. 저장 용기는 cryostat에 공급되는 액체 질소를 저장하기 위한 것으로 외부 침입열에 의한 액체 질소의 증발을 막기 위해 10^{-5} torr 이상의 고진공으로 단열되어 있어 장기간 저장이 가능하다. 과냉각 시스템은 cryostat에 공급되는 액체 질소의 온도를 과냉각 상태로 일정하게 유지하기 위한 것으로 과냉각 액체 질소가 채워진 용기에 코일 형태의 냉각기를 이용하였다[4]. Core cryostat은 초전도 케이블 냉각을 위한 장치로 액체 질소는 3개의 former를 통해 공급되고, 하나로 모아져 회수된다. 케이블의 자체 발열과 외부 침입열에 대한 모사를 위해 전기 히터를 코어 cryostat의 외부에 설치하였다. 액체 질소의 순환 유량은 질량 유량계와 유량제어 밸브에 의해 조절되며, 시스템의 운전 상태는 온도,

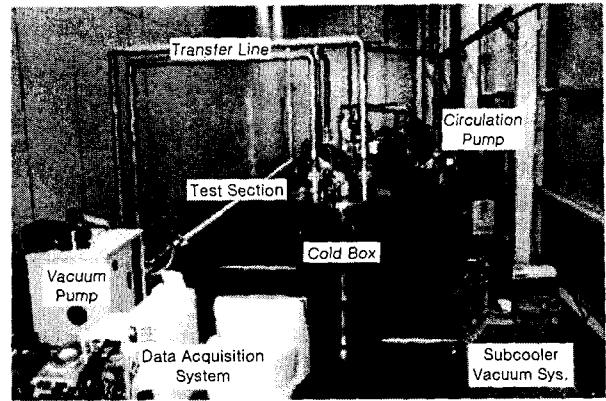


Fig. 1. HTS power cable cooling system

압력, 유량 변화를 측정하여 모니터링 할 수 있도록 설계하였다. Fig. 1은 초전도 케이블 냉각시스템의 장치 전경을 나타내고 있다. 그림에 보이는 순환펌프는 순환되는 액체질소의 유량 및 압력을 유지시켜 주고, 유량 제어 밸브는 former로 공급되는 액체질소의 온도를 감지하여 순환유량을 조절한다. Test section의 유량과 압력손실 측정을 위해 질량유량계 및 차압계를 각각 설치하였다.

2.3 기초 실험

액체질소의 질량 유량에 따른 former 및 회수라인의 압력손실은 장척의 케이블 cryostat의 설계에 있어 상당히 중요한 설계 인자가 된다. 왜냐하면 설계된 former의 압력 강하 정도에 따라 케이블 cryostat의 구조 강도, 길이, 순환 압력, 순환 펌프 용량 등이 결정되기 때문이다. 일반적으로 유로에서의 압력손실은 유로를 통과하는 질량유량 및 수력직경, 유로길이, 마찰계수(friction factor)의 함수로 표현된다.[5] 이때 마찰계수는 유동상태 및 유로표면의 상태에 의해 결정되기 때문에 본 실험에서와 같이 former의 경우에는 일반적인 관의 경우를 적용할 수 없다. 따라서 본 실험장치에 사용된 former의 압력손실은 물을 순환 매체로 하여 실험한 마찰계수를 토대로 추정하였다[2].

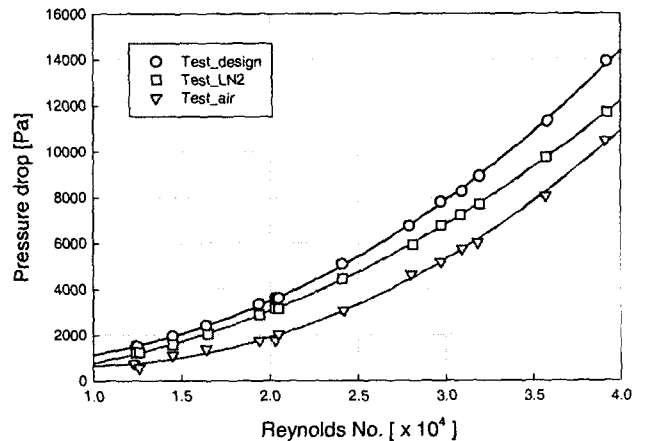


Fig. 2. Pressure drop distribution for the Reynolds No.

3. 결 론

초전도 케이블 냉각시스템에 대한 기초실험을 수행하여 액체 질소 질량유량 및 레이놀즈 수에 따른 former 및 냉각시스템 각 구성품의 압력손실을 측정하였다. 측정결과 설계 데이터와 잘 부합되는 측정값을 얻었다. 또한 former에 대한 총괄열전달계수를 측정한 결과 former 입출구 온도차가 매우 적어 정확한 평가는 어려운 상황이나 설계값 보다 낮은 측정값을 설계값에 가까운 값으로 향상시키기 위해서는 과냉각시스템에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

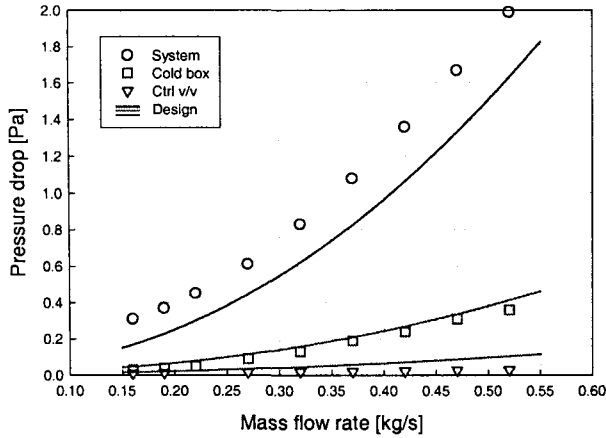


Fig. 3. Pressure drop distribution for the mass flow rate

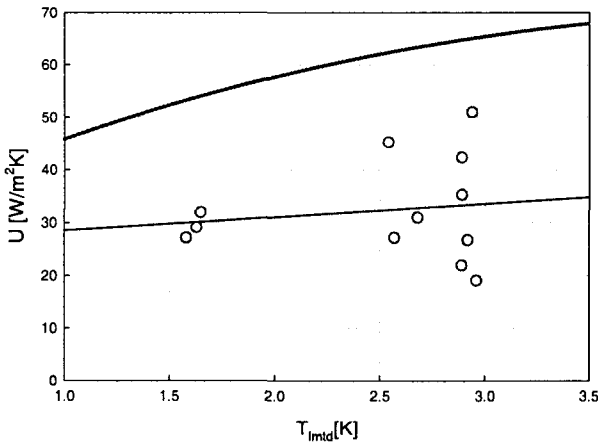


Fig. 4. Overall heat transfer coefficient for the log mean temperature

Fig. 2는 레이놀즈 수에 따른 former 및 return line의 압력손실 측정치로, 공기를 이용하여 모사 실험한 측정치 보다는 높지만 물을 이용하여 측정된 값(설계값)보다는 20~40% 정도 낮은 값으로 측정되어 시스템 운전에는 전혀 문제가 없는 것으로 판단된다. Fig. 3은 액체 질소 질량유량에 따른 제어밸브 및 cold box 등의 압력손실 측정값으로 시스템 전체의 압력손실이 설계치 보다 20% 정도 높게 나타나고 있다. 이는 시스템 기동시 원활한 액체 질소의 순환을 위해 밸브가 추가되었기 때문이다. Fig. 4는 former의 총괄열전달계수 변화로 상당히 변동이 심하게 나타나고 있다. 측정값이 설계값 보다 25% 정도 낮은 값을 나타내고 있는데 이는 former 입출구 온도차가 평균 0.37K로 센서의 오차범위 $\pm 0.15K$ (6)를 고려할 때, 이를 근거로 former의 총괄열전달계수를 평가하는 것이 상당한 오차를 수반할 것으로 판단되나, 과냉각시스템의 진공펌프 용량을 조절하면 설계값에 부합되는 총괄열전달계수 값을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. M. Wolsky, "Cooling for Future Power Sector Equipment Incorporating Ceramic Superconductors", IEA Report, 2002.
- [2] 성기철, "배전급 초전도 전력케이블 개발", 2003 DAPAS Program Workshop, 차세대초전도응용기술개발사업단, 2003.
- [3] Randall F. Barron, "Cryogenic Systems", Oxford University Press, 1985.
- [4] J. A. Demko, J. W. Lue, M. J. Gouge, J. P. Stovall, R. Martin, J. Sinha and R. L. Hughey, "Cryogenic Systems For A High-Temperature Superconducting Power Transmission Cable", Advanced in Cryogenic Engineering, Volume 45, pp. 1411~1418., 2000.
- [5] G.F.Hewitt, G.L.Shires and T.R. Bott, "Process Heat Transfer", CRC Press, 1994.
- [6] Lake Shore Cryotronics, Inc., "Temperature Measurement and Control", 2001.