

초전도케이블 냉각시험

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

Cooling Test of The HTS Power Cable

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

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

hkyeom@kimm.re.kr

Abstract - Cryogenic systems is requirement for the operation of HTS power cables. In general, HTS power cables require temperature below 77K, a temperature that can be achieved from the liquid nitrogen or sub-cooled LN2. HTS power cable is needed for sufficient refrigeration to overcome its low temperature heat loading. This loading typically comes in two forms : (1) heat leaks from the surroundings and (2) internal heat generation. This paper is a explanation for the cooling test of 10m HTS power cable.

1. 서 론

초전도 케이블의 선재를 초전도 상태로 유지하기 위해서는 극저온 환경이 필요하다.[1] 고온 초전도 선재의 경우 액체질소(LN2) 온도인 77K이하를 유지해야 하며, 본 연구에서는 이를 위해 cable cryostat에 액체질소를 순환시켜 냉각하는 방법을 채택하였다.[2,3] 안정적인 냉각 능력 확보를 위해 과냉각된 액체질소를 가압하여 순환시키고, 액체질소의 증발을 막기 위해 외부 열침입을 최소화할 수 있도록 cryostat의 외부를 진공 단열하고 MLI(Multi-Layer Insulation)를 시공하였다.

2. 본 론

극저온 생성 및 유지를 위한 실험장치는 액체질소 저장 용기, 과냉각 시스템, core cryostat 등으로 구성되어 있다. 저장 용기는 cryostat에 공급되는 액체질소를 저장하기 위한 것으로 외부 침입열에 의한 액체질소의 증발을 막기 위해 10^{-5} torr 이상의 진공층으로 단열되어 있어 장기간 저장이 가능하다. 외부 침입열에 의한 용기의 열 손실은 약 34W 정도이다.

과냉각 시스템은 cryostat에 공급되는 액체질소의 온도를 과냉각 상태로 일정하게 유지하기 위한 것으로 과냉각 액체 질소가 채워진 용기(shell side)

에 코일 형태(tube side)의 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 질소는 펌프에 의해 순환되고, 순환되는 동안 증발을 막기 위해 약 10bar 정도로 가압된다. 순환 유량은 질량 유량계와 유량제어 밸브에 의해 조절되며, 시스템의 운전 상태는 온도, 압력, 유량 등을 통해 모니터링 할 수 있도록 설계하였다. Fig. 1은 실험장치의 액체 질소 순환도를 나타내고 있다. 그림에 보이는 auto-fill system은 과냉각기 shell side의 액체질소가 진공 배기에 의해 외부로 배출되어 액면이 낮아지면 액면을 감지하여 액체질소를 다시 보충하기 위한 장치로 level meter와 solenoid valve 등으로 구성되어 있다. 순환펌프는 순환되는 액체질소의 유량 및 압력을 유지시켜 주고, 유량 제어 밸브는 former로 공급되는 액체질소의 온도를 감지

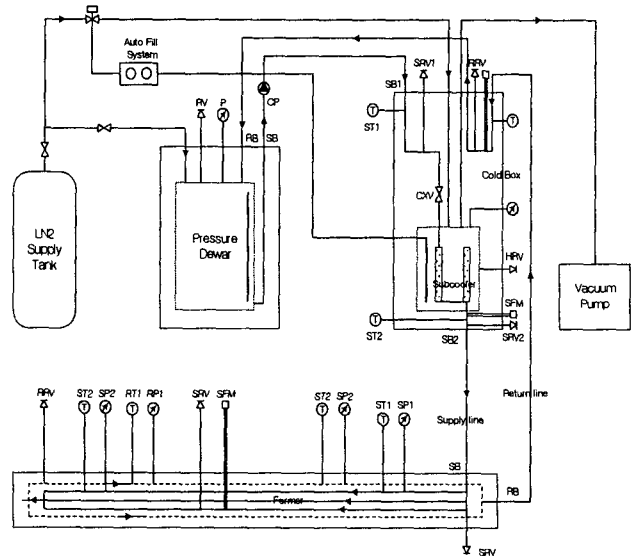


Fig. 1. Liquid nitrogen flow diagram 하여 순환유량을 조절한다.

Former 및 회수라인의 유량과 압력강하 측

정을 위해 질량유량계 및 차압계를 각각 설치하였다. 온도는 Si-Di 센서를 이용하여 측정하였다.

2.1 과냉각 실험

액체질소의 증발에 의한 냉각능력 저하를 막고 안정적인 액체질소의 공급을 위해 former로 공급되는 액체질소를 과냉각해야 한다. 이를 위해 shell & tube 형태의 과냉각기를 이용하여, shell side에 채워진 액체질소를 진공배기를 통해 감압 과냉각시키고, 이를 tube side로 순환되는 액체질소와 열교환시켜 공급되는 액체질소의 온도를 과냉각 되도록 제어한다. Fig. 2는 과냉각기 shell side의 압력 및 온도 변화를 나타내고 있다. 5시간 정도 경과한 시점에서 압력과 온도가 상승한 이유는 former에 공급되는 액체질소의 유량을 조절하여 임의적으로 냉각부하를 증가시켰기 때문이다. 순간적으로 급격한 온도, 압력의 변화는 있지만 순간적인 피크값이 77K, 760torr 이하로 former 입구의 액체질소는 과냉 상태를 유지하고 있어 시스템 운전에는 이상이 없었다.

Fig. 3은 과냉각기 전후의 액체질소 온도분포를 나타내고 있다. 그림에 보는 바와 같이 급격한 부하변화에도 불구하고 former로 공급되는 과냉각기 출구의 액체질소 온도는 거의 일정하게 유지되고 있는 것으로 보아 본 케이블 냉각시스템이 설계 조건을 만족함을 알 수 있었다.

Fig. 4는 former 입출구 온도 변화로 보여주고 있다. 5시간 정도 경과하여 시스템이 정상 상태에 진입한 이후 입출구 온도차는 평균 0.37K를 나타내고 있다. 이 온도차는 초전도 케이블에 전류를 흘리지 않은 상태에서 발생한 것으로 외부 침입열에 의한 변화로 볼 수 있다. 이 온도차는 온도센서의 오차범위($\pm 0.15K$, 적용범위 : 60 ~ 345K)[5]를 고려할 때, 이를 근거로 하여 외부 열침입량을 평가하는 것은 상당한 오차를 수반하게 된다.

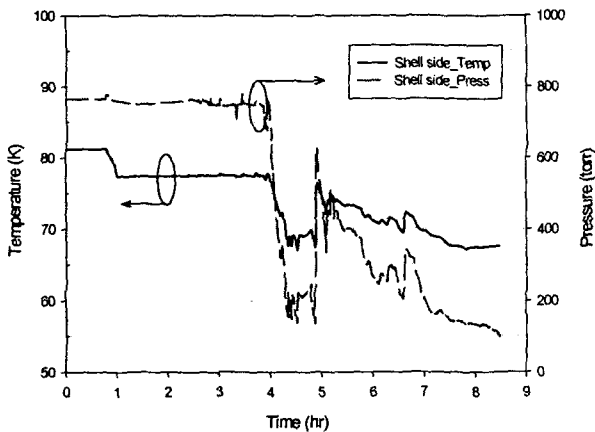


Fig. 2. Temperature and pressure distribution of LN2 shell of Subcooler

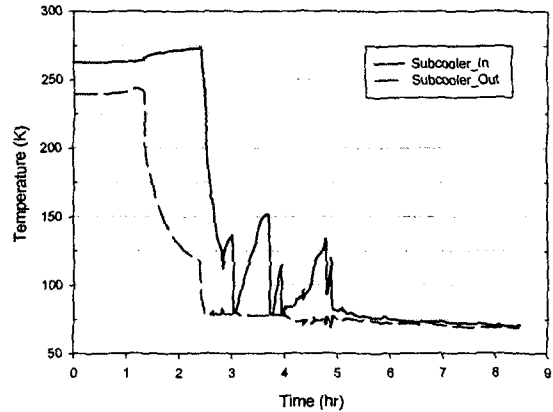


Fig. 3. Temperature distribution of LN2 through the subcooler

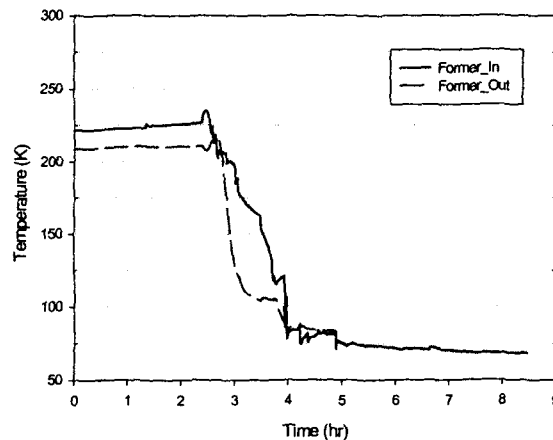


Fig. 4. Temperature distribution of LN2 through the former

그러나 액체질소의 질량유량이 변화하는 경우에도 former 입출구의 온도차는 큰 변화를 나타내지 않는 것으로 보아 외부 침입열량은 그다지 크지 않을 것으로 예측된다. 따라서 케이블 cryostat의 진공단열 및 MLI의 성능 저하는 크게 발생하지 않는 것으로 판단된다.

2.2 Former 압력강하 측정

액체질소의 질량 유량에 따른 former 및 회수라인의 압력강하는 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 압력강하는 유로를 통과하는 질량유량 및 수력직경, 유로길이, 마찰계수(friction factor)의 함수로 표현된다.[6] 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 압력강하는 물을 순환 매체로 하여 실험한 마찰계수를 토대로 추정하였다[2].

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

(참고 문헌)

- [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, U. 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] Lake Shore Cryotronics, Inc., "Temperature Measurement and Control", 2001
- [6] G.F.Hewitt, G.L.Shires and T.R. Bott, "Process Heat Transfer", CRC Press, 1994

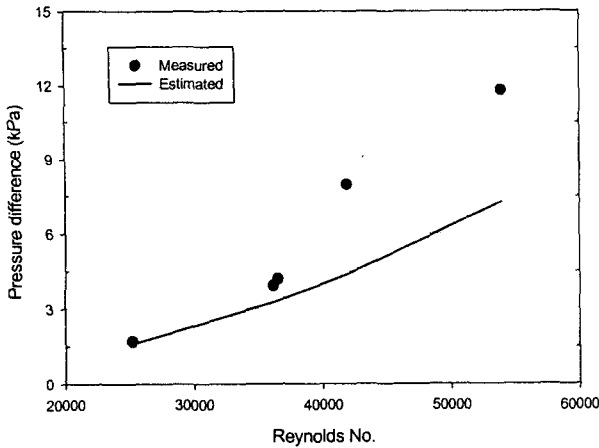


Fig. 5. Pressure difference distribution for the Reynolds No.

Fig. 5는 레이놀즈 수에 따른 former의 압력강하 측정치로, 레이놀즈 수 40,000 이상에서는 물을 이용하여 추정된 값보다 상당히 큰 값을 나타내고 있다. 이러한 차이는 액체질소의 흐름상태가 완난류(smooth turbulent flow)에서 전난류(completely rough turbulent flow) 영역으로 천이되는 구간이 존재하거나 물과는 달리 외부의 열침입량을 줄이기 위해 차압 측정시, 액체상태로 측정하지 않고 cryostat 외부에서 기화시켜 측정함으로 인해 발생하는 오차일 가능성도 있다. 그렇지만 실제 측정값이 설계값보다 작아 냉각시스템을 운전하는 데는 문제가 없을 것으로 판단된다.

3. 결 론

초전도 케이블 냉각시스템에 대한 기초실험을 수행하여 순환 액체질소의 과냉각 추이와 공급 및 순환 유로에서 압력강하 특성 등을 측정하였다.

측정결과 과냉각기는 former로 공급되는 액체질소의 온도를 충분히 냉각할 수 있었으며, 급격한 부하 변동에도 잘 대응하였다.

또한 케이블 cryostat의 외부 열침입량은 유량변화에 대한 former 입출구 온도 변화로 판단해 볼 때 상당히 작을 것으로 예측된다.

Former 입출구 온도 및 차압 측정결과 순환 액체질소는 과냉각 상태를 잘 유지하고 있어 충분한 냉각능력을 발휘할 것으로 판단되었다.