

초전도 케이블 냉각유로에서의 압력강하 특성

고 득 용^{*}, 염 한 길, 이 관 수^{*}

한국기계연구원 에너지기계연구센터, ^{*}한양대학교 기계공학과

Pressure Drop Characteristics on HTS Power Cables with LN2 Flow

Deuk-Yong Koh^{*}, Han-Kil Yeom, Kwan-Soo Lee^{*}

Korea Institute of Machinery & Materials, P. O. Box 101, Daejeon 305-600, Korea

^{*}Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received September 30, 2005; revision received December 15, 2005)

ABSTRACT: High temperature superconducting (HTS) power cable requires forced sub-cooled LN2 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 77 K. The HTS power cable needs sufficient cooling to overcome its low temperature heat load. For successful cooling, the hydraulic characteristics of the HTS power cable must be well investigated to design the cables. Especially, the pressure drop in the cable is an important design parameter, because the pressure drop decides the length of the cable, size of the coolant circulation pump and circulation pressure, etc. This paper describes measurement and investigation of the pressure drop of the cooling system. In order to reduce the total pressure drop of the cooling system, the flow rate of liquid nitrogen must be controlled by rotational speed of the circulation pump.

Key words: HTS(고온 초전도체), Pressure drop(압력강하), Cryostat(저온용기), Friction factor (마찰계수)

기 호 설 명

D : 냉각유로 직경 [m]
 d_e : Corrugate tube의 평균 직경 [mm]
 e : Corrugate tube의 리브 높이 [mm]
 f : 마찰계수
 L : 냉각유로 길이 [m]
 p : Corrugate tube의 리브 피치 [mm]
 ΔP : 압력손실 [Pa]
 v : 속도 [m/s]

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

고온 초전도체는 일정 온도영역에서만 고유의 특성을 갖는 초전도 현상이 나타나기 때문에 초전도 케이블의 선재를 초전도 상태로 유지하기 위해서는 냉각이 반드시 필요하게 된다. 냉각방식은 크게 액체 헬륨이나 액체 질소 등을 이용하는 액체 냉각방식(liquid cooling)과 냉동기로 직접 냉각하는 전도 냉각방식(conduction cooling)으로 나눌 수 있다. 액체 냉각방식은 저온의 액체를 순

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-868-7422; fax: +82-42-868-7335

E-mail address: dykoh@kimm.re.kr

환시켜 생각하는 방식으로 열적인 안정성이 우수하다. 즉, 초전도 시스템에 열적 교란에 의한 발열이 있을 때 초전도 도체 표면에서 저온 액체의 비등(boiling)을 동반한 열전달이 이루어지므로, 단위면적당 열전달이 매우 크고, 일정한 압력 하에서는 액체의 포화온도로 일정하게 유지된다.⁽¹⁾ 반면, 저온 액체의 저장이나 이송에 따른 열손실이 존재하고, 저온 액체 용기에 대한 열부하로 인해 냉각시스템 효율이 떨어진다. 또한 시스템의 소형, 경량화가 어렵다.

전도 냉각방식은 냉동기 헤드에 냉각 대상을 직접 접촉시켜 생각하는 방식으로 액체 냉각방식에 비해 어느 곳에서나 전원만 연결하면 초전도 시스템을 운전할 수 있고, 저온 액체나 고압가스 등에 대한 전문인력이 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 포화온도로 일정한 반면에, 극저온 냉동기의 온도는 부하에 따라 크게 변화할 수 있어 열적 안정성이 극저온 냉동기의 냉동 특성과 초전도 도체의 발열 특성에 좌우된다.⁽²⁾

따라서 고온 초전도체를 이용한 전력 케이블의 냉각에는 액체 냉각방식을 이용하여 과냉각된 액체 질소를 강제 순환시켜 생각하는 방법을 사용한다. 순환하는 액체 질소의 냉각능력 범위는 액체 질소의 어는점에서 초전도 선재의 임계온도까지이며, 이 범위에서 냉각시스템의 안정성과 경제성을 고려하여 운전온도를 결정해야 한다. 안정적인 냉각능력 확보를 위해 과냉각된 액체 질소를 가압하여 순환시키고, 액체 질소의 증발을 막기 위해 외부 열침입을 최소화할 수 있도록 저온용기(cryostat)의 외부를 진공 단열하고, 다층 단열재인 MLI(Multi-Layer Insulation)를 시공한다.

초전도 전력 케이블의 열부하(thermal load)는 주위로부터 침입되는 열과 통전시 케이블 내부에서 발생하는 열에 의해 결정되는데, 특히 외부에서 침입되는 열은 저온 용기의 단열 성능에 큰 영향을 받는다.

초전도 전력 케이블의 수력학적 특성 또한 케이블 설계시 고려되어야 할 중요한 사항이다. 특

히 케이블의 압력손실은 전체 케이블의 길이를 결정하는 데 중요한 설계인자이다. 초전도 전력 케이블의 저온 용기는 전체 케이블의 유연성을 위해 주름관(corrugated pipe) 형태를 사용한다. 그러나 주름관의 마찰계수에 대한 연구는 충분하지 않다. Hawthorne and Helms의 결과는 30% 내의 정확성밖에 갖추지 못했고,⁽³⁾ 1990년 Weisend and Van Sciver은 레이놀즈수에 따른 주름관의 마찰계수에 대한 연구결과를 발표하였으나 주름관의 직경이 매우 작은 것으로 한정되어 있다.⁽⁴⁾ 2001년 Fuchino et al.이 1.0×10^4 이상의 레이놀즈수 영역에서 실험데이터와 비교적 잘 맞는 수정된 Blasius 식을 제안하였다.⁽⁵⁾ 그러나 이 식도 주름관의 기하학적 형상에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 공기를 이용하여 레이놀즈수 10,000 ~ 50,000 사이에서 레이놀즈수에 무관하고 주름관 형상에만 의존된 관계식을 제시하였다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 고온 초전도 전력 케이블의 냉각 유로 및 유량계, 제어밸브를 통해 발생하는 압력강하 특성을 측정, 분석함으로써 냉각거리, 순환압력 등 실제 냉각시스템의 운전에 활용하고자 한다.

2. 초전도 케이블 냉각시스템 개요

2.1 냉각시스템 개요

극저온 생성 및 유지를 위한 실험장치는 액체 질소 저장용기, 과냉각시스템(cold box), 주저온용기(core cryostat) 등으로 구성되어 있다. 저장용기는 케이블 저온용기에 공급되는 액체 질소를 저장하기 위한 것으로 외부 침입열에 의한 액체 질소의 증발을 막기 위해 10^{-5} torr 이상의 진공층으로 단열되어 있어 장기간 저장이 가능하다. 외부 침입열에 의한 용기의 열손실은 약 34 W 정도이다. 과냉각시스템은 케이블 저온용기에 공급되는 액체 질소의 온도를 과냉각상태로 일정하게 유지하기 위한 것으로 과냉각 액체 질소가 채워진 용기(shell side)에 코일 형태(tube side)의 냉각기를 이용하였다. 주저온용기(Core cryostat)는 초전도 케이블 냉각을 위한 장치로 액체 질소는 평균 직경 25.6 mm의 3개의 주름관으로 이루어진 공급유로(former line)를 통해 공급되고, 케이블 끝에서 하나로 모아져 직경 90.0 mm의 저온용기

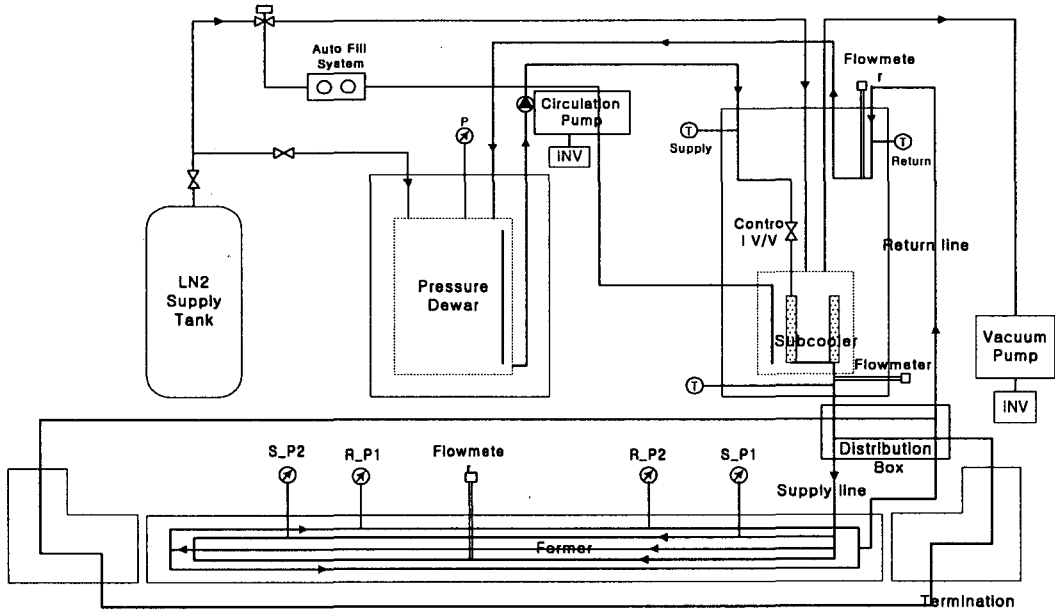


Fig. 1 Liquid nitrogen flow diagram.

내부와 3개의 공급유로 외부공간인 회수유로(return line)를 통해 회수된다. 액체 질소는 펌프에 의해 순환되고, 순환되는 동안 증발을 막기 위해 약 10 bar 정도로 가압된다. 순환유량은 질량유량계(Micro-motion: F025S)와 유량제어밸브(Weka: DN25)에 의해 조절되며, 시스템의 운전상태는 온도, 압력, 유량 등을 통해 모니터링할 수 있도록 설계하였다.

Fig.1은 실험장치의 액체 질소 순환도를 나타내고 있다. 그림에 보이는 액체 질소 자동 보충 시스템(auto-fill system)은 과냉각기 shell side의

액체 질소가 진공배기에 의해 외부로 배출되어 액면이 낮아지면 액면을 감지하여 액체 질소를 다시 보충하기 위한 장치이다. 순환펌프는 순환되는 액체 질소의 유량 및 압력을 유지시켜 주고, 유량제어밸브는 공급유로로 공급되는 액체 질소의 온도를 감지하여 순환유량을 조절한다. 공급 및 회수 유로의 유량과 압력강하 측정을 위해 질량 유량계 및 차압계를 각각 설치하였다. Fig. 2는 실험장치 전체 모습을 보여주고 있다.

2.2 압력강하 측정

냉각유로의 압력강하에 따라 장척 케이블 저온 용기의 구조적 강도, 길이, 냉각매체의 순환압력, 펌프동력 등이 결정되므로 초전도 전력 케이블의 설계에 있어 냉각유로의 압력강하는 매우 중요한 설계인자이다. 일반적으로 유로의 압력강하(ΔP)는 식(1)에 표현한 바와 같이 유체의 흐름 속도(v), 밀도(ρ), 유로의 수력학적 직경(D), 유로의 길이(L) 및 마찰계수(f) 등으로 나타난다.

$$\Delta P = (1/2)fv^2(L/D) \quad (1)$$

주름관의 경우 흐름의 재순환(re-circulation), 재

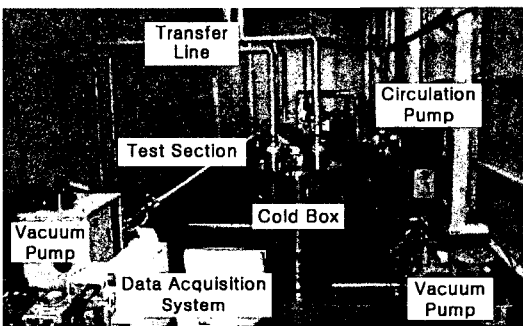


Fig. 2: An apparatus of cooling system for HTS power cable.

부착(reattachment) 등 흐름형태가 복잡해지기 때문에 주름이 없는 관에 비해 압력 강하가 크게 나타난다. 주름관에 대한 마찰계수(f)는 식(2)의 실험식에 나타난 바와 같이 리브의 높이(e), 리브의 피치(p), 주름관의 평균 지름(d_e) 등의 함수이다.⁽⁶⁾

$$f = 2.596 \left(\frac{e}{d_e} \right)^{1.08} \left(\frac{p}{d_e} \right)^{-0.57} \quad (2)$$

위 식에 의해 본 실험에 사용된 주름관의 마찰계수는 0.38($e=1.92$, $p=5.6$, $d_e=25.6$)로 추정된다. 압력강하 측정은 전체 냉각유로(공급, 회수)와 고압부 단말, 저압부 단말, 제어밸브, 유량계 등에서의 각각 측정할 수 있도록 압력 및 차압 센서를 설치하였고, 액체 질소의 순환유량을 변화시키면서 측정하였다. 또한 제어밸브의 개도를 변화시키면서 제어밸브에서 발생하는 압력강하도 측정하였다.

2.3 실험결과 및 분석

Fig.3은 공급 및 회수, 전체 유로에 대한 압력 강하를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 회수유로에 비해 공급유로에 대한 압력강하가 크게 나타나고 있는데, 이는 회수유로의 유로면적이 공급유로의 유로면적에 비해 약 2.5배 정도 크기 때문에 속도가 약 1/10으로 줄고 이로 인해 압력강하가 줄어들기 때문이다. 또한 그림에서 케이블 전체 유로에서의 압력강하보다 공급, 회수 라

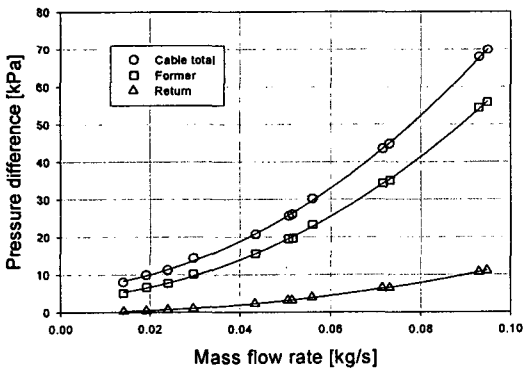


Fig. 3 Pressure drop of the cable cooling passage versus mass flow rate.

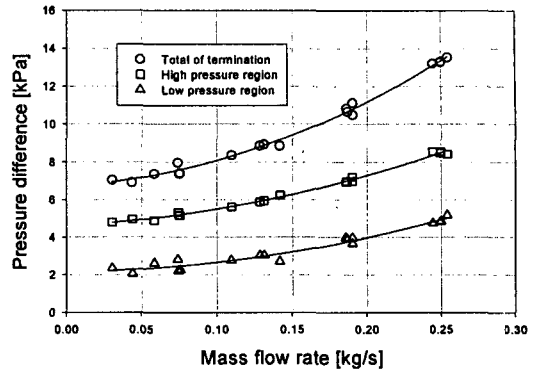


Fig. 4 Pressure drop of termination cooling passage versus mass flow rate.

인의 압력강하의 합이 약간 작게 나는 것은 케이블 끝단, 즉 3개의 공급유로가 합쳐져 회수 라인으로 연결되는 부분의 압력강하가 포함되어 있지 않기 때문이다.

레이놀즈수가 10,000~13,000 사이일 때 공급유로에서 측정된 주름관의 마찰계수는 0.44로 식(2)에 의해 추정한 값과 15% 범위 내에서 잘 맞지만, 레이놀즈수가 15,000 이상일 때에는 추정값보다 3~5배 정도 큰 값이 측정되는 것으로 보아 식(2)에 대한 검증이 필요한 것으로 판단된다.

Fig.4는 유량에 따른 단말에서의 압력강하를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 고압부에서의 압력강하가 크게 나타나고 있는데, 이는 고압부 유로형상이 저압부 유로형상에 비해 복잡하게 설계되어 있기 때문이다.

Fig.5는 콜드박스(cold box), 케이블 유로, 단말

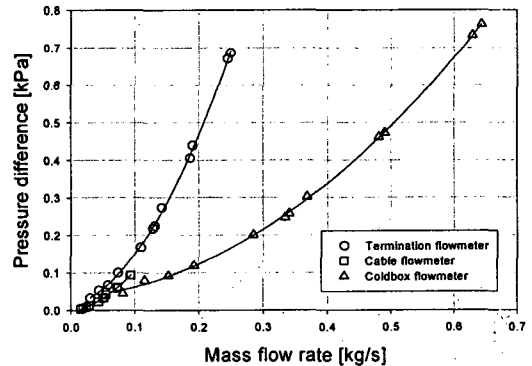


Fig. 5 Pressure drop of the each flowmeter versus mass flow rate.

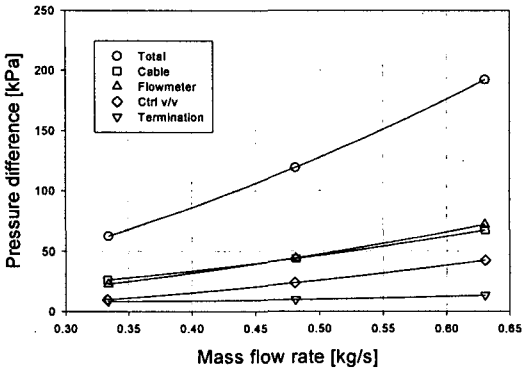


Fig. 6 Pressure drop of the each component versus mass flow rate.

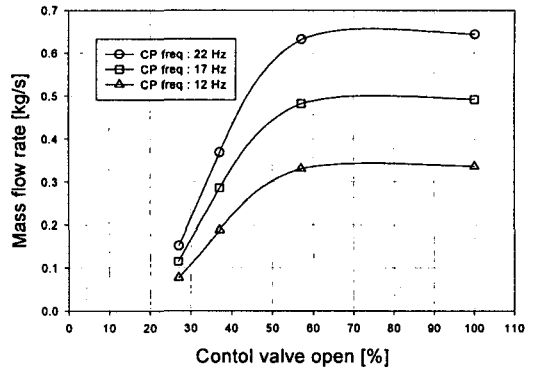


Fig. 8 Mass flow rate versus control valve open with variable pump frequency.

에 설치되어 있는 유량계를 지나면서 발생하는 압력강하를 나타낸 것으로 termination 부에 설치된 유량계에서 압력강하가 가장 크게 나타나고 있는데, 이는 termination 부로 공급되는 유량이 크기 때문이다. 그림에서 각 위치에 따라 유량이 다른 것은 전체 순환유량은 콜드박스를 통과하고 여기서 과냉된 액체 질소는 케이블과 단말을 냉각하기 위해 분리함에서 각각의 유로로 분리되기 때문이다.

Fig. 6은 유량제어밸브의 밸브개도가 57%일 때 각 부분(케이블 유로, 단말 유로, 유량계, 유량제어밸브 등)에서 발생하는 압력강하를 나타내고 있다. 그림에 보는 바와 같이 케이블 유로 및 유량계에서 발생하는 압력강하가 제어밸브나 단말에서 발생하는 압력강하보다 큰 것을 알 수 있다.

이는 케이블 냉각유로가 단말 냉각유로에 비해

길고, 설치된 유량계의 수가 많기 때문이다. 그러나 유량제어밸브의 밸브개도가 57% 이상일 경우에는 압력강하가 거의 없지만, 밸브개도가 45% 이하일 때는 유량제어밸브를 통과하면서 발생하는 압력강하가 다른 것에 비해 가장 크게 나타남을 Fig. 7을 통해 알 수 있다. 따라서 순환되는 액체 질소의 유량제어시 밸브개도를 45% 이하로 제어해야 할 경우에는 밸브개도로 유량제어하는 것보다 순환펌프의 회전수를 변경하여 유량제어하는 것이 전체 압력강하를 줄일 수 있는 방법임을 알 수 있다. Fig. 8은 펌프 회전수에 따른 제어밸브의 개도와 유량의 관계로 밸브개도가 60% 이상이 되면 유량이 거의 일정하게 나타남을 알 수 있다.

3. 결 론

고온 초전도 전력 케이블 냉각시스템의 압력강하를 측정, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 냉각유로의 면적 차이에 의해 전체 냉각유로 중 공급 라인에서 발생하는 압력강하가 크게 나타남에 따라 장거리 냉각을 위해서는 former 형상에 대한 최적화가 반드시 필요함을 알았다.
- (2) 유량제어밸브의 개도가 45% 이하일 경우 밸브에서 발생하는 압력강하가 매우 크기 때문에 밸브개도는 60% 이상을 유지해야 한다.
- (3) 유량제어시 제어밸브의 개도를 45% 이하로 유지해야 할 경우에는 순환펌프의 회전수를 제어하여 유량을 조절하는 것이 압력강하를 줄일 수 있는 운전방법임을 알 수 있었다.

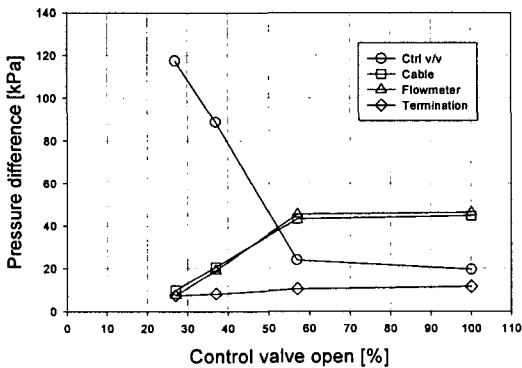


Fig. 7 Pressure drop of the each component for the control valve opening.

후 기

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

참고문헌

1. Cryogenic Association of Japan, 1994, Handbook of Superconductivity and cryogenics, p. 318.
2. Hiroyasu Ogiwara, 1999, An Introduction to Cryogenics, pp. 257-258.
3. Hawthorne, R. C. and Von Helms, H. C., 1963, Prod. Engineering 34, p. 475.
4. Weisend, J. G. and Van Sciver, S. W., 1990, Cryogenics 30, p. 935.
5. Fuchino, S., Tamada, N., Ishii, I. and Higuchi, N., 2001, Hydraulic characteristics in superconducting power transmission cables, Physica 345, pp. 125-128.
6. Korea Electrotechnology Research Institute, 2004, Development of Distribution Level HTS Power Cable, p. 250.