

고온초전도 전력케이블 저온용기의 최적단열설계에 관한 연구

고 득 용, 이 관 수^{†*}

한양대학교 대학원, *한양대학교 기계공학과

A Study of Optimum Insulation Conditions of a HTS Power Cable Cryostat

Deuk-Yong Koh, Kwan-Soo Lee^{†*}

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

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

(Received October 26, 2006; revision received March 6, 2007)

ABSTRACT: The object of this study is to find the optimal insulation design conditions of a HTS power cable cryostat. The optimum condition of a cable cryostat is obtained by varying types of MLIs, cable core weights, spacer diameters, winding pitches and MLI layer numbers. As the weight of cable core is increased, conduction heat transfer from surroundings to cable cryostat is increased. But as the spacer pitch is increased from 120 mm to 200 mm, the heat leak of cable cryostat remains almost constant. The optimal number of MLI layers is suggested. Double ply MLI is more effective than triple ply MLI and the insulation effect is best when the number of MLI layers is 36.

Key words: High temperature superconductor(고온초전도체), Power cable(전력케이블), Multi layer insulation(다층 단열재), Cryostat(저온용기)

1. 서 론

저온용기의 설계, 제작시 가장 중요한 것은 지속적으로 높은 단열 성능을 유지하도록 하는 것이다. 단열 성능이 좋지 않을 경우 저온 액체의 증발량이 커져 수시로 저온 액체를 보충해야 하므로 작업성이나 경제성이 떨어지기 때문이다. 냉동기를 이용하여 냉각하는 경우에도 단열 성능이 낮으면 냉동능력이 큰 냉동기를 사용해야 하므로 초기비용과 운전비용이 증대하게 된다.

고온부에서 저온부로 열전달은 복사, 대류, 전도, 비등, 응축 등 다양한 형태가 존재하지만 저온용기에서는 특히 고온부와 저온부 사이에 존재

하는 기체분자에 의한 열전달(대류), 고온부와 저온부의 복사에 의한 열전달, 고온부와 저온부에 걸쳐있는 고체에 의한 열전달(전도)이 대부분을 차지한다. 고온면과 저온면 사이에 존재하는 기체분자에 의한 열전달량은 양면의 위치와 온도구배에 의해 결정되는데, 일반적으로 압력이 낮아져 고온면과 저온면 사이의 거리가 기체분자의 평균 자유행로보다 충분히 작은 압력범위(일반적으로 10^{-3} torr 이하)에서는 열전달량이 압력과 비례하게 된다.⁽¹⁾ 따라서 이와 같은 경우에는 진공도를 높일수록 열전달량을 줄일 수 있고, 진공도 10^{-4} torr 이하가 되면 대류에 의한 열전달은 거의 무시될 수 있을 정도로 작아지게 된다. 복사에 의한 열전달은 고온면과 저온면 사이에 방사율이 낮은 복사차폐막을 삽입함으로써 줄일 수가 있다. 즉, N장의 차폐막을 삽입하면 복사 열전달량을 $1/(N+1)$ 로 줄일 수 있게 된다.⁽²⁾ 이러한 원

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2220-0426; fax: +82-2-2295-9021

E-mail address: ksleehy@hanyang.ac.kr

리를 이용한 단열방법으로 진공용기의 열차폐막 사이에 MLI를 시공함으로써 복사 열전달을 줄이게 된다. 그렇지만 너무 많은 매수의 MLI를 시공하는 경우 MLI 사이의 접촉으로 인해 열전도가 발생하여 오히려 단열 성능이 떨어지므로 적당한 양의 MLI 시공이 필요하다. 고온부와 저온부의 직접 접촉에 의한 전도 열전달은 열전도율이 작은 재료를 사용하고, 열이동 경로를 길게 하며, 접촉부 단면적을 최소화하고, 고온부와 저온부의 온도차를 작게 함으로써 줄일 수 있다.

Ohmori⁽³⁾는 수평 원통관에 시공된 MLI의 단열 성능을 평가하고, MLI 시공시 접촉 압력에 대한 무차원 매개변수를 제안하였다. Paulo et al.⁽⁴⁾은 MLI가 시공된 냉각 차폐막을 갖춘 극저온 냉각 시스템의 소비전력을 최소화하기 위한 방안을 제시하였으며, Neumann⁽⁵⁾은 긴 케이블 저온용기에 적용할 수 있는 새로운 단열 시공방법을 제안하였다. 또한 Fesmire et al.^(6,7)은 내부 저온용기와 진공용기의 단면 중심의 편심 정도를 조절함으로써 케이블 저온용기의 굽힘 효과(bending effect)에 대한 연구와 고온초전도 전력케이블에 사용되는 유연관(flexible pipe)과 강성관(rigid pipe), MLI 자체의 단열 성능에 대한 비교 연구를 수행하였고, Hedayat et al.⁽⁸⁾은 MLI의 층밀도에 관한 해석적 연구를 수행하였다. 그러나 이러한 선행 연구들은 접촉 압력, 굽힘 효과, MLI 종류에 따른 단열 성능 등 각각의 효과에 대해 한정되어 있다. 본 연구에서는 이들 각각의 효과는 물론 MLI의 적층수, 감는 방법, 케이블 코어의 자중(自重) 효과, 스페이서 피치 등 고온초전도 전력케이블 저

온용기의 실제 설계에 필요한 요소들을 종합하여 최적의 설계조건을 제시하였다.

2. 고온초전도 전력케이블 단열 성능시험

2.1 성능시험장치

2.1.1 저온용기

저온용기는 진공조(OD139 mm/ID121 mm×L2500 mm, 알루미늄, corrugated type)와 액체질소조(OD96 mm/ID83 mm×L2000 mm, 알루미늄, corrugated type)로 이루어져 있고, 하부 플랜지에는 진공배기 및 진공도 측정(Alcatel ACC1009, Dual gauge, $5.0 \times 10^{-10} \sim 1,000$ mbar)을 위한 포트(port)가 설치되어 있고, 상부 플랜지에는 액체질소 공급 및 배기관, 신호선 처리를 위한 19핀 진공 feed-through가 설치되어 있다.

질소조의 질소 충전량과 냉각상태를 확인하기 위해 질소조의 하부, 중하부, 중상부, 상부 표면 4곳에 E-type 열전대를 설치하였으며, 열침입량 산정을 위해 필요한 액체질소 증발량 측정을 위해 2대의 가스유량계(Aalborg, GFM17, 0~1,000 mL/min)를 설치하였다. 액체질소 주입 및 배출관 중간 접속부는 알루미늄 관과 스테인리스관의 연결을 위해 플랜지를 사용하였으며 액체질소 온도에서 기밀을 유지하기 위해 인듐을 사용하였다. MLI는 Fig. 2의 저온용기 단면에서 보는 바와 같이 저온면(액체 질소조 표면)에 시공하고, 전도에 의한 열전달을 줄이기 위해 스페이서를 두어 진공조와의 간격이 일정하게 유지되도록 제작하였다.

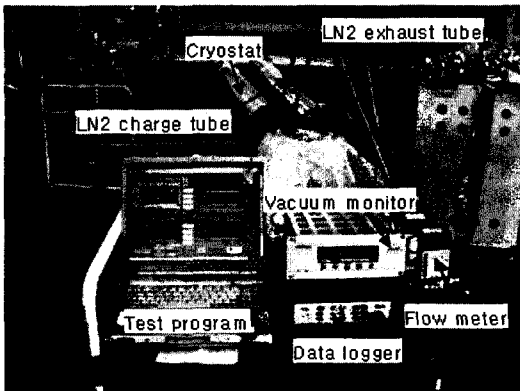


Fig. 1 Test equipment.

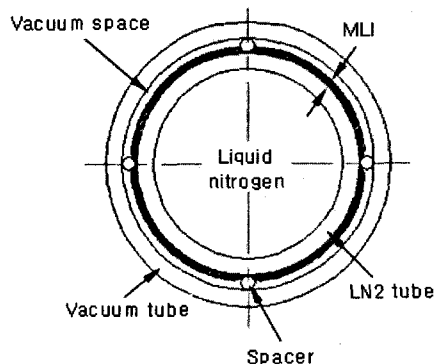


Fig. 2 Cross section of the cryostat.

2.1.2 열계산

고온초전도 전력케이블 저온용기로 침입되는 열량만을 측정하기 위해 액체질소 주입 및 배출관을 통한 열침입량, 저온용기 양끝단을 통한 열침입량 등의 값을 계산하여 측정값에서 제외하였다. 계산값은 주입 및 배출관(재질 : 스테인리스강, 방사율 : 0.11, OD/ID : 12.7/10.9 mm) 손실 0.67 W (전도 열침입량 : 0.34 W, 복사 열침입량 : 0.33 W) 와 양끝단 열침입량 0.2 W를 합하여 0.87 W로 산정되었다.

2.2 시험조건

시험은 Table 1에 나타난 바와 같이 MLI의 종류, MLI 적층수, MLI 매수, MLI 시공방법, 고온초전도케이블 곡률 반경(굽힘 효과), 스페이서 피치 등을 변화시키면서 수행하였다. 우선, MLI 한쪽 면에 간격 유지를 위해 섬유질이 코팅된 C사 제품과 3장의 MLI 사이에 2장의 네트(net)가 삽입되어 5층으로 이루어진 J사의 다층 단열재를 비교 시험하여 한 종류의 MLI를 선정하였다. 선정된 MLI를 2장, 3장 적층하여, 1/2 겹치기, 겹침이 없는 맞대기 시공방법으로 전체 MLI 매수가 36, 48, 54장이 되는 경우에 대해 열침입량을 측정하였다. 또한 고온초전도 전력케이블이 현장에 포설되는 조건을 모사하기 위해 곡률 반경이 없는 경우(직관)와 곡률 반경이 5m 되는 경우에 대한 열침입량을 측정하였고, 진공조와 액체질소조의 간격유지를 위한 스페이서의 직경과 피치에 따른 열침입량도 측정하였다. 진공조를 충분히 배기하여 진공도를 10^{-4} torr 이하를 유지한 상태에서 액체질소를 질소조에 가득 채운 후, 저온용기가 충분히 냉각되기를 기다렸다가 주위로부터 진공조 표면을 통해 진공층, 스페이서, MLI를 통해 액체질소조로 침입되는 열에 의해 증발되는 액체

질소의 양을 측정함으로써 케이블 저온용기의 열부하를 계산할 수 있는데 계산식은 아래와 같다.

$$\dot{Q} = \dot{m}_g h_{fg} \tag{1}$$

여기서, \dot{Q} 는 열침입량[W]을 나타내고, \dot{m}_g 는 액체질소 증발량[g/s], h_{fg} 는 액체질소 잠열량[J/g]을 나타낸다.

2.3 시험결과

Fig. 3은 액체질소 주입 후 액체질소 관의 온도가 안정될 때까지의 온도변화로, 액체질소 관이 냉각되어 액체질소로 가득 채워질 때까지 약 1.2시간이 소요되는 것으로 나타났고, 액체질소가 채워진 이후에는 안정되어 거의 온도변화 없이 일정한 값을 유지하고 있음을 알 수 있다.

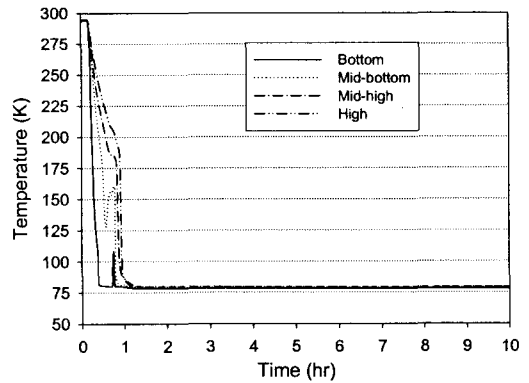


Fig. 3 Temperature distribution of LN2 tube.

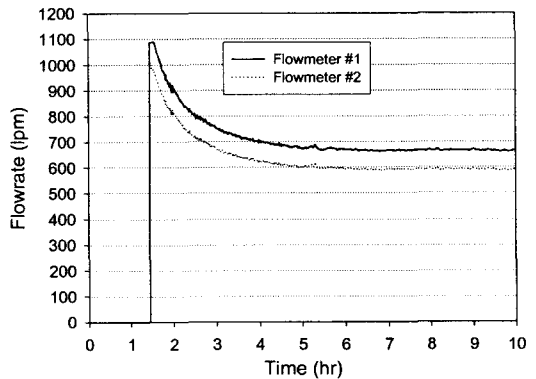


Fig. 4 Evaporating flow rate of LN2.

Table 1 Test conditions

Test item	Test conditions
Types of MLI	C company/J company
Ply number	Double/Triple
Layer number	36/48/54 layers
Winding method	1/2 Overlap, Face to face
Bending radius	Straight (8.5 kg/m)/5 m (10.0 kg/m)
Spacer pitch	120/150, 180/200 mm

증발량은 Fig. 4에 보는 바와 같이 6.5시간 이후에 안정된 모습을 보여주고 있는데, 저온용기의 열침입량 산정을 위한 액체질소 증발량 측정 은 6.5시간 이후 약 3.5~4.0시간 동안 측정하여 평균하였다. Table 1의 각 시험조건에 대해 이와 같은 방법으로 저온용기의 열침입량을 반복 측정 하였다.

Fig. 5는 3장의 MLI를 적층한 후 1/2 겹치기 형태로 36층이 되게 감은 경우 C사와 J사의 MLI를 비교한 것으로 그림에 보는 바와 같이 C사의 단열 성능이 약 34% 정도 우수한 것으로 나타나 나머지 조건에 대한 실험은 C사의 MLI를 이용하여 수행하였다.

Fig. 6은 케이블의 자중(自重)과 곡률반경 효과를 보여준다. 케이블 코어의 무게에 의한 압축과 케이블이 굽은 상태에서 냉각, 수축하게 되면 굽은 부분의 저온용기 진공조와 질소조 사이의 MLI

가 스페이서에 의해 압축됨으로써 MLI의 충밀도가 증가하여 외부로부터의 열침입이 증가하게 되는데⁽⁹⁾ 이를 모사하기 위해 케이블 코어의 무게와 추가로 곡률반경에 의해 압축되는 힘에 맞게 스테인리스강 재질의 하중재(load bar)를 액체질소조에 삽입하여 변화되는 열침입량을 측정하였다. 그림에서와 같이 C사의 MLI를 1/2 겹치기 형태로 36층을 시공한 상태로 스테인리스 하중재를 8.5, 10.0 kgt/m로 바꾸어 압축력에 대한 열침입량을 측정하였다. 측정결과 반경 5m의 케이블 굽힘 효과에 의해 단위길이당 열침입이 약 10% 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 액체질소조와 진공층의 간격유지를 위해 시공되는 스페이서의 피치에 따른 열침입량 변화로 1/2 겹치기와 맞대기 시공에 대해 스페이서 피치를 120, 130, 150, 170, 200 mm로 변화시키면서 열침입량을 측정하였다. 그림에서 보는 바와

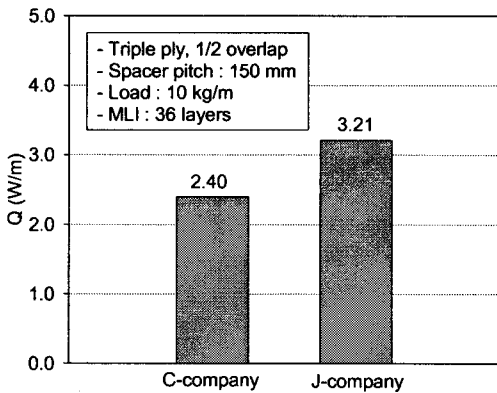


Fig. 5 Selection of MLI.

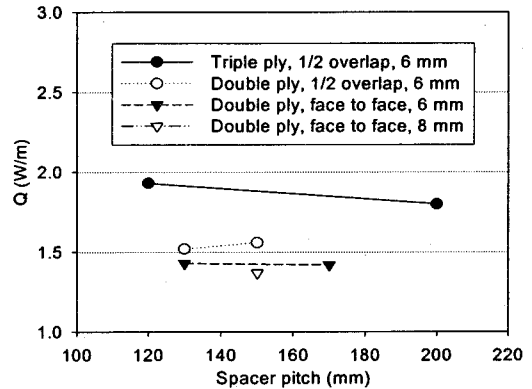


Fig. 7 Cable weight and bending radius effect.

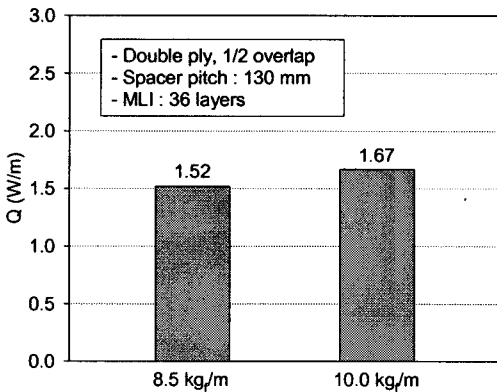


Fig. 6 Cable weight and bending radius effect.

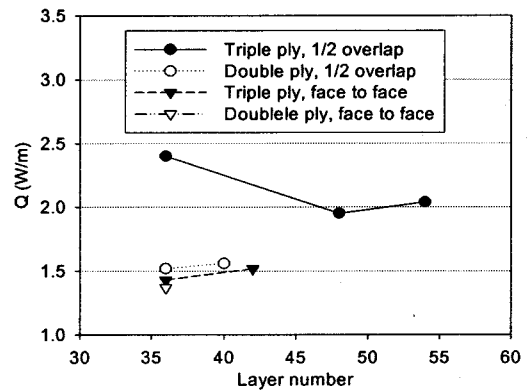


Fig. 8 Cable weight and bending radius effect.

같이 2가지 시공방법에 대해 스페이스 피치변화량 10mm당 열침입량 변화는 1% 미만으로 스페이스 피치의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

MLI의 시공 매수는 이론적인 계산과 여러 실험값들^(3,4,6,7,8)을 참고로 총밀도를 고려하여 정하였다. Fig. 8은 MLI의 매수에 따른 열침입량 변화로 2겹의 맞대기 방법으로 36층을 시공하는 것이 열침입량을 최소화하는 것으로 나타났다. 1/2 겹치기와 맞대기를 비교해 보면 2겹으로 36매를 시공한 경우 1/2 겹치기 시공방법이 10% 정도 열침입량이 많은 것으로 나타났다. 또한 맞대기 방법으로 36매를 시공할 경우, 2겹이나 3겹의 열침입량 차이가 5% 미만으로 거의 무시할 정도로 작지만 1/2 겹치기 방법으로 시공하는 경우에는 2겹 시공이 3겹 시공에 비해 약 37% 정도 작게 나타난다. 이는 맞대기 시공을 할 경우, MLI를 전체 36매를 시공했을 때 시공된 MLI의 총밀도가 거의 일정하지만, 1/2 겹치기 시공인 경우에는 겹치는 부분의 총밀도가 겹수에 따라 차이가 많이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

3. 결 론

고온초전도 전력케이블 저온용기의 최적단열 설계조건을 도출하기 위해 MLI의 종류, MLI 적층수, 총 MLI 매수, MLI 시공방법, 고온초전도 케이블 곡률 반경(굽힘 효과), 스페이스 피치 등을 변화시키면서 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 1/2 겹치기 형태로 총 36층을 시공하여 열침입량을 비교한 결과, MLI 한쪽 면에 간격유지를 위해 섬유질이 코팅된 MLI(C사)의 단열 성능이 3장의 MLI 사이에 2장의 네트(net)가 삽입되어 5층으로 이루어진 MLI(J사)보다 약 34% 정도 우수한 것으로 나타나 C사의 MLI를 선정하였다.

(2) 케이블의 자중 및 굽힘 효과를 모사하기 위해 압축력에 따른 열침입량을 측정한 결과, 직관부에 비해 케이블 굽힘 효과(반경 5m)로 인한 단위길이당 열침입량이 약 10% 증가하는 것으로 나타났다.

(3) 액체질소조와 진공층의 간격유지를 위해 시공되는 스페이스 피치를 변화시켜 가면서 측정한 열침입량 차이는 1% 미만으로, 스페이스 피치 120~200 mm 사이에서는 스페이스 피치에 따른

열침입량 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

(4) MLI 시공 매수는 2겹으로 전체 36매가 되도록 맞대기 방법으로 시공한 것이 열침입이 가장 적은 것으로 나타났다.

위의 실험결과에 따르면 2겹을 맞대기로 36매 시공하는 것이 가장 열침입량이 작게 나타났으나, 실제로 현장에서 케이블 제조사의 작업성, 신뢰성, 효율 등을 고려하여 최종적으로 C사의 MLI를 2겹으로 1/2 겹치기 형태로 36층을 시공하는 것으로 설계를 확정하였다. 또한 스페이스는 직경 6.0 mm의 테프론 와이어를 이용하여 피치 150 mm로 시공하는 것으로 결정하였다.

후 기

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

참고문헌

1. Klaus, D. T. and Thomas, M. F., 1989, Cryogenic process engineering, Plenum Press., pp. 381-382.
2. Ogihara, 1999, Introduction to cryogenic engineering, Tokyo Denki University Press, pp. 263-265.
3. Ohmori, T., 2006, Thermal performance of multilayer insulation around a horizontal cylinder, Cryogenics, Vol. 45, pp. 725-732.
4. Paulo, A., Augusto, T. C., Pedro, A. and Domingos, B., 2006, Optimization of refrigerated shields using multilayer thermal insulation: Cryostats design-analytical solution, Cryogenics, Vol. 46, pp. 449-457.
5. Neumann, H., 2004, Concept for thermal insulation arrangement within a flexible cryostat for HTS power cables, Cryogenics, Vol. 44, pp. 93-99.
6. Fesmire, J. E., Augustynowicz, S. D. and Demko, J. A., 2002, Overall thermal performance of flexible piping under simulated bending conditions, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 47, pp. 1533-1540.

7. Fesmire, J.E., Augustynowicz, S.D. and Demko, J.A., 2002, Thermal insulation performance of flexible piping for use in HTS power cables, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 47, pp. 1525-1532.
8. Hedayat, A., Hastings, L.J. and Brown, T., 2002, Analytical modeling of variable density multilayer insulation for cryogenic storage, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 47, pp. 1557-1564.
9. Furukawa Electric Co. Ltd., 2003, Study of Cooling Improvement of a Long Length Insulation Pipe, pp. 13-14.