

적층단열재의 열침입량 측정

Measurement of Heat Leak through Multi-Layer Insulation

김동락*, 양형석**, 정원목***, 이병섭**, 신필권****, 황시돌*****

D. L. Kim*, H. S. Yang**, W. M. Jung***, B. S. Lee**, P. K. Shin**** and S. D. Hwang*****

Abstract: In this paper, the thermal characteristics of multilayer insulation (MLI) were experimentally investigated by using boil-off calorimetry method for seeking optimum standards of thermal insulation conditions. It is necessary to design the thermal insulating efficiency for applying to cryogenic instruments such as HTS power cable system. It is well known that the thermal characteristics and heat transfer of MLI are greatly affected by various MLI structures such as the number of layers and layer density, etc. However, it is difficult to know the thermal characteristics of MLI correctly. The heat leak by MLI between room temperature and liquid nitrogen temperature was measured at various conditions using a cylindrical cryostat. The cryostat consists of two guard vessels located at both end sides and a test vessel between them. The guard vessels are also filled with liquid nitrogen to prevent radiation heat leak through the both end side of the cylindrical test vessel to measure the heat leak only through MLI.

Key Words: thermal insulation, radiation heat transfer, MLI, boil-off calorimetry

1. 서 론

고온초전도케이블은 현재 시험장 중심의 실험을 거쳐 설계통에 설치되어 시험되고 있으며, 현재 그 길이도 수백미터에 달하고 있다. 초전도케이블의 길이가 길어질수록 케이블의 열침입이 증가하여 효율적이고 경제적인 냉각을 위해서는 단열성능 향상이 요구되고 있다. 적층단열재(Multi-Layer Insulation, MLI)는 복사열침입을 차단하여 단열성능을 향상시키기 위해 고온초전도 케이블시스템과 같은 저온장치에 주로 사용된다. 그러나, 아직도 MLI의 정량적인 설치방법의 데이터가 거의 없는 실정으로 같은 적층수의 MLI를 설치하여도 설치방법에 따라 단열성능이 크게 달라지는 등 설치시의 기술에 많이 의존하며, 성능향상을 위해 많은 연구가 진행되어 왔으나, 아직 시공방법은 정량

화되었다고 할 수 없다[1-5]. 본 연구에서는 저온용기의 단열성능 향상을 연구목적으로 하여 MLI의 종류, 적층층수, 적층밀도, 적층방식 등의 시공방식에 따른 단열성능을 정량화하여 최적조건을 도출한다. 최적조건은 같은 적층층수에 대한 적층밀도 영향성 평가 및 틈새효과 영향성 평가 등, 시공상의 관점에서 도출한다.

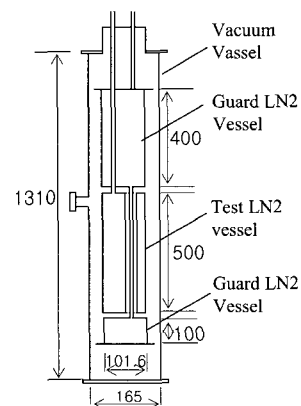
단열성능평가 방법은 액체질소를 이용한 증발열량법[6-8]을 이용하였고, MLI를 통한 열침입량을 보다 정확하게 측정하기 위해 상하부에 질소용기가 부착된 실험장치인 guarded cryostat[4]을 제작하였다.

본고에서는 실험장치인 guarded cryostat의 특징을 소개하고 MLI의 적층방식에 따른 단열성능 차이를 논의한다.

2. 실험 장치

2.1. Guarded Cryostat

실험장치인 guarded cryostat의 단면도를 Fig. 1에, 사진을 Fig.2에 보인다. guarded cryostat은 진공용기와 액체질소를 충전하여 열침입에 따른 증발량을 측정하는 액체질소용기로 구성된다. 액체질소용기는 수직방향으로 3부분으로 나누어져, 상부부터 guard 용기 1, 테스트용기, guard 용기2로 구성되어 있고, MLI의 단열성능 측정은 테스트용기의 측면에 MLI를 설치하여 테스트 용기에 충전되어 있는 액체질소의 증발을 대상으로 한다. guard 용기1과 2는 테스트용기의 상하부에서 침입하는 복사열침입을 차단을 위하여 설치되었다. 즉, guard 용기에 액체질소를 충전함에 따라 guard 용기1의 하부온도와 guard 용기2의 상부온도를 액체질소 온도로 유지하여 테스트 용기와 같은 온도로 유지되어 테스트용기의 상하부를 통한 복사열침입을 차단한다.



(unit : mm)

Fig. 1. Schematic illustration of the guarded cryostat.

* 정 회 원: 한국기초과학지원연구원 책임연구원
 ** 정 회 원: 한국기초과학지원연구원 선임연구원
 *** 정 회 원: 충남대학교 기계설계학과 박사과정
 **** 비 회 원: 한국기초과학지원연구원 박사후연수원
 ***** 정 회 원: 한국전력연구원 책임연구원
 원고접수: 2005년 09월 09일
 심사완료: 2005년 09월 22일

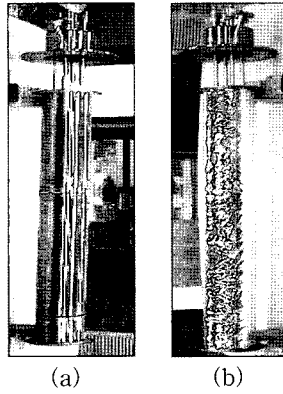


Fig. 2. Photographs of LN2 vessel. (a) Before MLI wrapping (b) After MLI wrapping.

MLI의 설치시에는 테스트 용기의 액면변화에 따른 MLI의 온도구배를 없애기 위해 guard 용기 1,2에 걸쳐서 설치된다. 또한 테스트용기와 guard용기의 사이 간격으로 들어오는 복사열침입을 막기 위해 구리재질의 보호대가 상하부 guard 용기 1,2에 부착되어 있다.

2.2. 계측시스템

증발열량법 계측시스템을 Fig. 3에 보인다. 테스트 용기에서 증발된 질소가스의 유량은 습식체적유량계에 의해 측정되어 펄스로 전환 출력되어 카운터를 통해 데이터 저장시스템에 저장된다. 질소가스의 온도와 압력측정은 체적유량계를 통해 측정된 질소가스의 질량 환산에 사용된다. 또한, 대기압이 변화하면, 그 영향을 받아서 테스트용기속의 압력이 변화한다. 그 결과 증발가스의 밀도, 액체질소의 온도가 변화하여 증발량이 변화하고 있는 것과 같은 측정치가 얻어지는 경우가 있다. 그러므로 가스 증발량의 변화에 영향을 주는 대기온도 및 대기압도 측정하여 온도 및 압력변화에 의한 영향성을 확인한다. 이와 같은 증발열량법 측정에 있어서 유의해야 할 점은 참고문헌 [9]에 자세하기 때문에 본문에서는 생략한다. 진공계지를 통해 진공용기의 진공도를 모니터 한다. 실험 중 진공은 가스 대류효과를 막기 위해 10^{-5} torr 이하를 유지하였다.

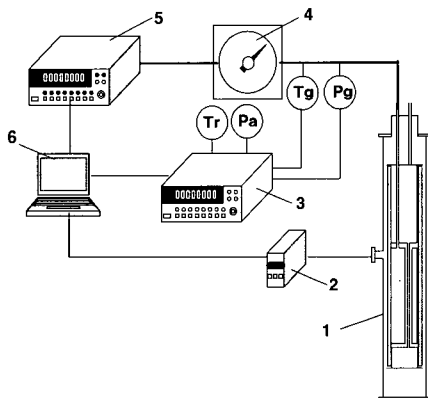


Fig. 3. Schematic illustration of measurement system. 1. Guarded cryostat, 2. Vacuum gauge, 3. Digital multimeter, 4. Gas flow meter, 5. Universal counter, 6. Data acquisition system, Tg: Nitrogen gas temperature, Pg: Nitrogen gas pressure, Pa: atmospheric pressure, Tr: Room temperature.

2.3 MLI의 준비 및 적층방식

본 실험에서는 MLI의 적층을 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50장 적층하여 수행하였다. MLI를 적층시 특히 주의해야 할 점은, 층방향에 온도분포를 일정하게 하고 층밀도를 증가시키지 않으면서 틈을 열어두지 않는 것이다. 그러나 MLI를 여러형태의 장치에 적층하려고 하면, 어딘가에 구멍을 열어두어야 할 경우와 틈이 생기는 경우가 자주 발생한다. 본 연구에서는 MLI를 여러층 적층하였을 경우의 발생한 틈의 영향성과 그 보수대책의 방향을 제시하기 위해 적층방식을 2가지로 나누어 수행하였고, 그 개요를 Fig.4에 보인다. MLI의 적층방식은 적층하는 사란에 (a)는 MLI를 적층 할 때 가장 바깥면에만 알루미늄 테이프로 부착하여 안 쪽에는 약 1mm 정도의 틈이 있게 고정하는 방식이다, (b)의 경우는 MLI 적층시 매 10장 단위로 알루미늄 테이프로 고정하여 10장 단위로 틈 효과를 막았다. 실험에 사용한 MLI의 종류는 MPI사의 NRC-2로 그 사양을 Table 1에 정리하였다.

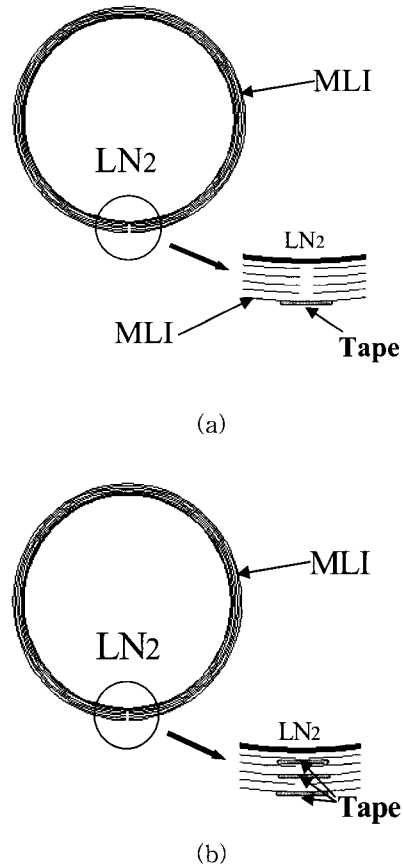


Fig. 4. Two different wrapping methods adopted in the experiment. (a) Once fix by a tape, (b) Every ten layers fix by tapes.

Table 1. Specification of MLI.

NRC-2 (MPI)	- Single aluminized polyester film - Thickness : 6 m - Thickness of aluminized coating : 250 Å - Crinkled film
-------------	---

3. 결과 및 토의

MLI를 통한 열침입량 측정결과를 MLI의 적층수에 대해 나타낸 그래프를 Fig.5에 보인다. 측정결과를 Fig.4-(a), (b)에 보인 2가지의 적층방식에 따른 열침입량을 각각 나타내고, 곡선은 아래의 식 (1)과 (2)를 사용하여 계산한 계산결과를 나타낸다.

$$\frac{Q}{A} = \sigma Fe (T_2^4 - T_1^4) \tag{1}$$

$$Fe = \left(\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} + 2\frac{N}{e_s} - N - 1 \right)^{-1} \tag{2}$$

여기서, 하첨자 1은 77K의 저온부(재질: SUS304), 2는 300K의 고온부(재질: SUS304), s는 MLI를 나타내고, e는 방사율, σ 는 스테판 볼츠만 상수, N은 MLI의 적층 수를 나타낸다. 계산에 사용한 방사율(e)는 e_1 : 0.1[10], e_2 : 0.22[11], e_s : 0.04[12]를 사용하였다. 계산 결과는 MLI의 적층수가 늘려갈 수록 열침입량이 감소하며 그 감소폭은 20층 이상이 되면 거의 미미하게 된다. 실험결과도 정성적으로는 그와 같은 변화를 보이고 있으나, 적층방식에 따라서는 열침입량의 차이가 크게 보인다. 예를 들어, 20층 또는 30층 적층하였을 경우, 방법 (a)로 적층 하였을 경우가 방법 (b)로 적층하였을 경우보다 약 2배에 달하는 많은 열침입량이 측정되었다. 이것은 방법 (a)의 경우는 가장 바깥측에만 알루미늄 테이프로 고정하였기 때문에 상온의 진공용기로부터 전달된 복사열이 그 안쪽에 적층된 MLI의 틈사이로 여과없이 액체질소용기로 전달되어 열침입량이 증가되었다고 생각된다. 한편, 방법 (b)의 경우는 안쪽에 알루미늄 테이프로 MLI사이의 틈이 막혀 있기 때문에 (a)에서 보이는 복사열 침입이 감소하여 열침입량이 감소하였다고 생각된다. 또한 방법 (b)의 경우는 식 (1), (2)의 계산치와도 잘 일치되는 것을 알 수 있다. 이를 통해 MLI 적층시에는 MLI의 틈효과가 큰 것을 알 수 있고, 적층방식에 따라서는 열침입량의 변화가 큰 것을 알 수 있다. 그리고 (b)와 같이 적층하였을 경우에, 계산식 (1), (2)를 이용하여 복사열을 바르게 예측할 수 있는 것을 알 수 있다.

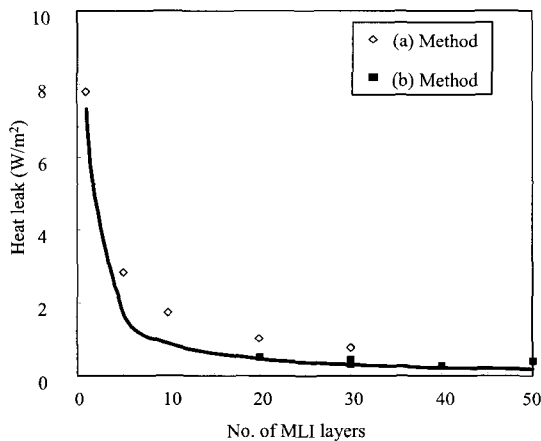


Fig. 5. Heat leaks plotted against MLI layer number. The experimental data obtained from the two methods of (a) and (b) shown in figure 4 are symbolized as \diamond and \blacksquare , respectively. The curve is the result calculated from the equation (1).

4. 결론

MLI의 단열성능 평가를 위해 guarded cryostat을 제작하여 열침입량을 측정하였다. 측정은 액체질소를 이용한 증발열량법을 이용하였고, 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. MLI를 20층 미만 적층하였을 경우에는 적층수를 늘려감에 따라 단열성능이 크게 증가하여 열침입량이 현저히 감소하나, 20층 이상 적층하였을 경우 크게 감소하지 않는다.
2. 틈새효과에 의해 적층방식에 따라 같은 수의 MLI를 적층하여도 열침입량의 차이가 보인다.
3. 단열성능이 좋은 적층방식은 MLI의 틈새를 막아 외부로부터의 복사열침입을 차단하는 방식이다. (본 실험에서는 (b)방법)

감사의 글

본 연구는 한전 전력연구원의 전력산업기술개발 사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Fesmire, J. E. et al. "Thermal Insulation Performance of Flexible Piping for Use in HTS Power Cables", *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 47, pp.1525-1532, 2002.
- [2] Fesmire, J. E. et al., "Overall Thermal Performance of Flexible Piping under Simulated Bending Conditions", *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 47, pp.1533-1540, 2002.
- [3] Nobuhiko Inai, "Recent Advances in the investigation of Multilayer Insulation", *일본저온공학회 논문집* Vol. 13, pp. 53-62, 1978.
- [4] Ohmori, T. et al. "Lightweight multilayer insulation to reduce the self-compression of insulation films" *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 47, pp.1565-1572, 2002.
- [5] Senthil Kumar, A. et al " Thermal Performance of Multilayer Insulation down to 4.2K", *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 45, pp.1675-1682, 2000.
- [6] 정기호, 양형석, 김동락, 조승연, 정원목, 김도형 "열량법을 이용한 고온초전도 케이블용 전류도입선의 열침입량 계측 및 평가", 대한설비공학회 2003 하계학술발표대회 논문집, pp. 858-863, 2003.
- [7] 김동락, 양형석, 김도형, 조승연, 정원목, 이제묘 "열량법에 의한 열침입량 계측", 2003년도 한국초전도저온공학회 학술대회 논문집, pp. 328-331, 2003.
- [8] 김도형, 김동락, 양형석, 정원목, 황시돌 "열량법을 이용한 MLI의 단열성 평가", 2004년도 한국초전도저온공학회 학술대회 논문집, pp. 74-77, 2004.
- [9] Tsutomu Ohi, "Calorimetry by Boil-off Measurement", *일본저온공학회논문지*, Vol. 27, pp.315-324, 1992.
- [10] Obert, W. et al. "Emissivity Measurement of Metallic Surfaces used in Cryogenic Applications", *ACE* Vol. 127, pp.293-300.

- [11] William C. Turner and John F. Malloy, "Thermal Insulation Handbook" McGraw-hill book company, 1981.
- [12] Klaus D. Timmerhaus and Thomas M. Flynn, "Cryogenic Process Engineering", Plenum Press, 1989.

저 자 소 개



김동락(金東洛)
 1953년 04월 04일생, 1976년 경북대학교 물리학과 졸업, 1993년 일본 오사카 시립대학 대학원 학위과정 수료(초저온 물리학, 이학박사), 1993 ~ 현재 : 한국기초과학지원연구원 고자기장개발팀 책임연구원.



양형석(梁炯皙)
 1969년 05월 08일생, 1994년 홍익대학교 기계공학과 졸업, 1998년 Tsukuba 대학 대학원 이공학연구과 졸업(공학석사), 2001년 동대학 대학원 공학연구과 저온공학전공 (공학박사), 현재 한국기초과학지원연구원 고자기장개발팀 선임연구원.



정원묵(鄭元默)
 1972년 11월 17일생, 1998년 한밭대학교 기계공학과 졸업, 2001년 충남대학교 기계설계학과 열유체전공 졸업 (공학석사), 현재 동대학원 박사과정.



이병섭(李炳燮)
 1968년 9월 3일생, 1994년 충남대학교 기계공학과 졸업, 1996년 동 대학원 기계공학과 공학석사, 2001년 8월 동 대학원 기계공학과 공학박사 졸업(Ph. D), 2004년 6월 ~ 2004년 11월 미국 NHMFL 방문연구원, 현재 한국기초과학지원연구원 고자기장개발팀 선임연구원.



신필권(辛泌權)
 1971년 10월 10일생, 1997년 충남대학교 기계공학과 졸업, 1999년 동 대학원 기계공학과 (공학석사), 2005년 동대학원 기계공학과 (공학박사), 현재 한국기초과학지원연구원 고자기장 개발팀 박사후 연수원.



황시돌(黃時玆)
 1957년 1월 12일생, 1981년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업, 1986년 8월 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1980년 12월 한국전력공사 입사, 현재 한국전력공사 전력연구원 신에너지그룹 책임연구원.