

# 복사 차폐막이 극저온 용기의 부하에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

김 영 민, 강 병 하<sup>\*\*</sup>, 박 성 제<sup>\*\*</sup>

국민대학교 대학원, <sup>\*</sup> 국민대학교 기계·자동차공학부, <sup>\*\*</sup>한국기계연구원 에너지기계연구센터

## An Experimental Study on the Effects of a Radiation Shield on the Thermal Load of a Cryochamber

Young Min Kim, Byung Ha Kang<sup>\*\*</sup>, Seong-Je Park<sup>\*\*</sup>

ABSTRACT: Infrared (IR) detectors are widely used for such applications as thermoelastic stress analysis, medical diagnostics and temperature measurement. Infrared detectors commonly need to be refrigerated below 80 K, and thus a cooling system should be equipped together with the detector system. The cooling load, which should be removed by the cooling system to maintain the nominal operating temperature of the detector, critically depends on the insulation efficiency of the cryochamber housing the detector. Cryochamber considers the conduction heat transfer through a cold finger, the gases conduction and radiation heat transfer. The thermal loads of an infrared detector cryochamber with radiation shield are investigated experimentally in present study. Since the effect of radiation heat transfer on thermal loads is significant, radiation shields is installed in the cold finger part to protect heat input through radiation. It is found that the thermal load can be substantially reduced by increasing the number of radiation shield.

**Key words:** Cryochamber(극저온 용기), IR detector(적외선 검출기), Radiation shield(복사 차폐막), Boil-off test(증발률 실험), Multi-layer insulation(적층단열재)

### 기 호 설 명

- $Q$  : 열유입량 [W]
- $\dot{m}$  : 질량유량 [kg/s]
- $T$  : 온도 [K]

### 하첨자

*load*: 열부하를 가한 경우

no-load 열부하를 가하지 않은 경우

### 1. 서 론

적외선 검출기를 이용하는 야간투시경이나 감시, 조준 망원경 등은 현대전에 있어서 필수 장비로 사용되고 있다<sup>(1,2)</sup>. 적외선 검출기란 물체에 서 방사되는 파장 0.75  $\mu\text{m}$  이상의 복사선을 검출 하여 식별하는 소자로서 기계, 구조 및 건물의 이상 검지를 위한 열화상진단, 의학 분야에서의 신경기구 분석, 에너지 분야의 화염, 연소가스의 온도분포 측정 등에 활용되고 있다.<sup>(1-4)</sup> 그러나

† Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4681; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: bhkang@kookmin.ac.kr

Table 1 Part lists of cryochamber

Part	Material	Dimensions
Vacuum vessel	Stainless steel(301)	Length=74 mm Inner diameter=25 mm
Radiation shield	MLI	Length=40 mm Diameter=15 mm
Cold finger	Stainless steel(301)	Outer diameter=9 mm Thickness=0.15 mm Length=48 mm

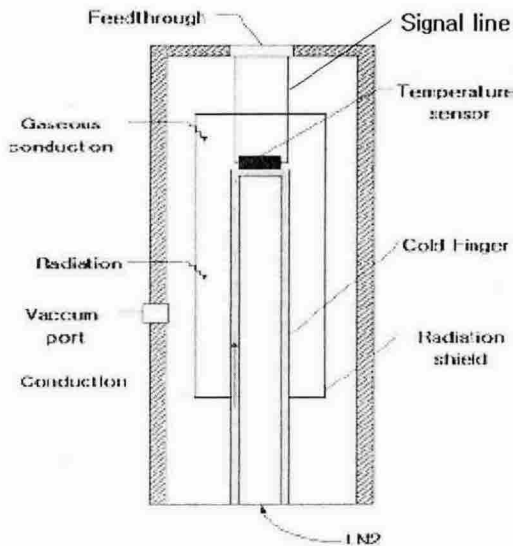


Fig. 1 Schematic diagram of cryochamber.

적외선 검출기는 액체질소 온도 이하의 저온에서 우수한 성능을 가지므로 휴대용 열상장비의 개발을 위해서는 77 K 이하까지 냉각이 가능한 극저온 소형 냉동기의 개발이 선행되어야 한다.

한편 냉동기는 저온부의 온도가 낮아질수록 냉동효율이 이에 비례하여 낮아지며, 80 K 근처에서는 통상적으로 2~5% 정도의 매우 낮은 값을 가진다. 따라서 극저온을 유지하기 위한 단위 냉동용량당 냉동기의 소요동력이 매우 커지므로, 극저온 냉각장비의 효율적 운영을 위해서는 냉동부하 자체를 최소화하는 것이 매우 중요하다.

극저온 용기 내 열유입은 진공 용기로의 전도 및 복사 열전달에 의한 열유입이 상당한 냉동부하를 차지하게 된다. 이러한 열유입이 클 경우, 극저온을 유지하지 못하거나, 또는 장비 기동시 상온으로부터 극저온 상태로 도달하게 되는 시간

이 매우 길어지게 된다. 따라서 이러한 열유입을 최소화할 수 있도록 극저온 진공 용기를 설계 제작하여야 한다.

기존의 연구는 극저온 용기 내 복사 차폐막이 존재하지 않는 경우에 대하여 극저온 용기의 냉각특성에 대해서 실험적으로 연구한 바 있다.<sup>(5,6)</sup> 그러나 진공용기 내 열유입량의 일부가 복사에 의해 이루어지고 있기 때문에 본 연구에서는 MLI를 사용하여 복사 차폐막이 설치된 용기에 대해서 용기 자체의 냉각부하를 측정하였고 복사 차폐막에 의한 열차단효과를 측정하여 복사 차폐막이 용기 내 열유입량에 미치는 영향을 규명하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구의 모델인 적외선 센서용 극저온 용기의 형상과 열전달 모드에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용된 극저온 용기의 크기, 재질들은 Table 1에 나타내었다. 또한 극저온 용기의 냉각부하를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 실험장치를 제작하였다.

극저온 용기 실험장치는 시험부인 극저온 용기와 용기 내부를 진공으로 만들기 위한 진공펌프, finger부분을 냉각시키기 위한 액체질소 주입기로 구성되어 있다. Cold tip부분의 온도를 측정하기 위해 측정범위 1.4~500 K, ±0.5 K의 정확도를 갖는 실리콘 다이오드 온도센서(DT-670-SD, Lake shore)를 사용하였고, 용기 내 고진공을 유지하기 위하여 터보형 진공펌프를 사용하였다. 또한 cold tip 부분에 열부하를 주기 위해 Fig. 3과 같이 cold finger 끝단에 열선(MW-36, Lake shore)을 감아 외부로부터 전압 공급 시 발열할

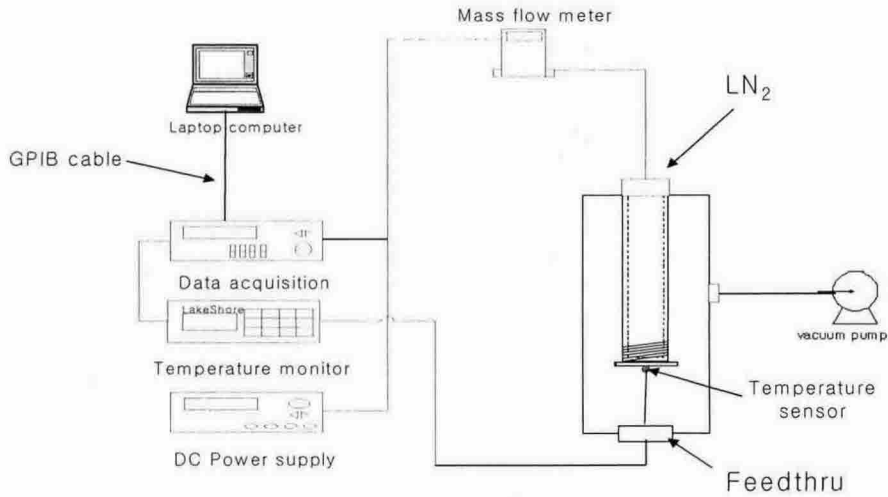


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup.

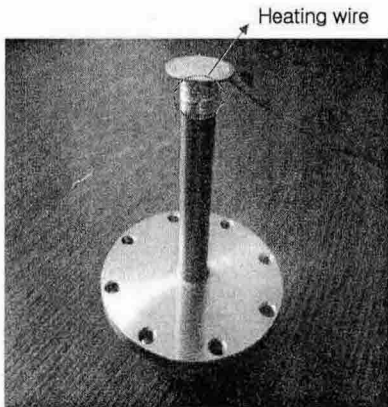


Fig. 3 Picture of cold finger and heating wire

수 있도록 제작하였다. 또한 열선을 은박테이프로 감아 열분포를 고르게 하였다. 증발률 실험을 위해서 액체질소 증발 시 유량을 측정하기 위해 측정범위 0~50 slpm,  $\pm 1.5\%$ 의 정확도를 갖는 질량유량계(Top Trak 822, Sierra)를 사용하였다. 복사 차폐막은 외부로부터 열전도를 줄이기 위하여 용기와 닿는 부분은 플라스틱으로 제작하였다.

실험은 극저온 용기의 냉각부하를 측정하기 위하여 증발률 실험을 하였고 액체질소를 cold finger 주입구로 주입하여 cold tip 부분의 온도가

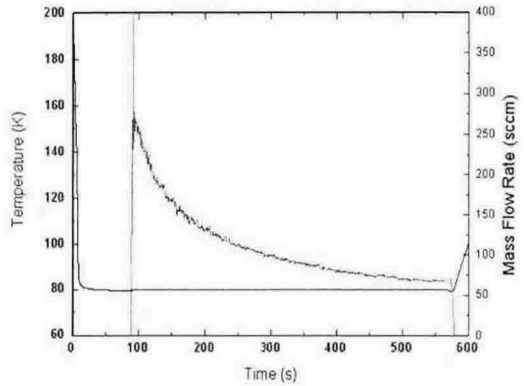


Fig. 4 LN<sub>2</sub> flow rate during boil-off test.

정상상태에 도달할 때까지 떨어뜨린 후 유량계를 연결하여 액체질소의 증발량을 측정하였다. 또한 cold tip 부분에 열부하를 가하여 열부하에 따른 증발량을 같은 방법을 통하여 측정하였다. 정상상태에서 저온부로의 열침입량은 다음과 같이 액체질소의 증발잠열과의 열평형을 이루게 된다.<sup>(8)</sup>

$$Q_{no-load} = \dot{m}_{no-load} h_{fg} \quad (1)$$

한편 저온부에서 열부하를 투입할 경우 다음과

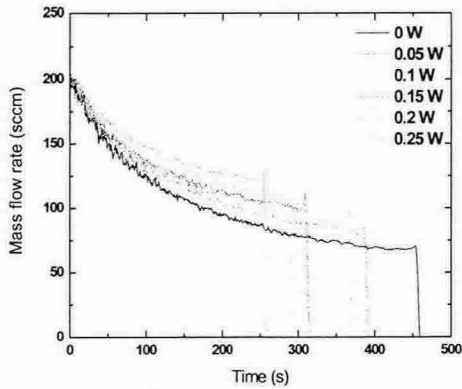


Fig. 5 Transient variation of mass flow rate for various thermal loads.

같이 에너지 평형을 이루게 된다.

$$Q_{load} = Q_{no-load} + \Delta Q \quad (2)$$

$$Q_{load} = (\dot{m}_{no-load} + \Delta \dot{m})h_{fg} \quad (3)$$

따라서 cold tip부분에서 정상상태 열유입량은 다음과 같다.

$$Q_{no-load} = \frac{\Delta Q}{\Delta \dot{m}} \dot{m}_{no-load} \quad (4)$$

이때 (4)의 기울기는 다수의 실험을 통해 구할 수 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구는 적외선 검출기용 극저온 용기의 자체부하를 측정하기 위하여 용기 내 cold tip부분에 액체 질소를 주입하고 열부하를 가하여 이때 증발되는 액체질소의 증발량을 측정하는 실험을 수행 하였다. 실험은 용기 내 대류 열전달로 인한 열유입을 차단하기 위하여 고진공( $2 \times 10^{-5}$  Torr) 이하에서 수행하였다. Cold tip 부분의 온도가 정상상태에 도달하는 것을 알아보기 위해서 온도센서를 인듐을 사용하여 cold tip 부분에 부착하였다.

Fig. 4는 복사 차폐막이 설치되지 않은 용기

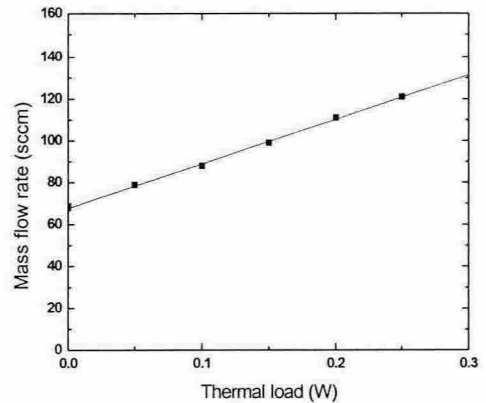


Fig. 6 Effect of thermal load on the boil-off.

내 무부하시 boil-off test 중 시간에 따른 온도강하와 증발되는 액체질소 유량을 나타낸 것이다. 처음 액체질소 주입 시 cold tip 부분의 온도는 급격하게 떨어져 약 80 K 근처에서 정상상태를 보인다. 정상상태에서 유량계와 연결을 하여 액체질소의 증발량을 측정하였다. 액체질소 증발량은 급격히 감소하다가 약 500초가 지난 후 정상상태를 보인다. 그 후 약 570초가 지난 후 급격히 boil-off 되는 것을 알 수 있다. 액체질소 boil-off 후 cold tip 부분의 온도는 다시 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다.

위와 같은 실험을 cold tip 부분에 열부하를 가하며 반복실험을 하였다. 열부하는 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 mW를 가하였다. 반복 실험한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 마지막으로 Boil-off 되어 급격히 유량이 감소되는 지점의 질량유량을 이용하여 열부하와 질량유량의 관계 그래프를 그리면 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. 식 (4)를 이용하면 복사 차폐막이 없는 경우 극저온 용기의 부하는 320 mW이다.

복사 차폐막으로서 MLI를 설치했을 때 cold tip 부분으로 침입되는 열량을 측정하였다. 그리고 MLI의 개수에 따른 열 차단 효과를 알아보았다. 실험은 이전과 동일하며 MLI를 설치 할 때 온도를 낮추기 위해 cold finger 부분에 접촉시켜 cold tip 부분을 감쌌다. 복사 차폐막의 개수를 증가 시키면서 열유입 정도의 변화 과정을 Fig. 7에 나타내었다. MLI를 1개 설치한 경우 극저온

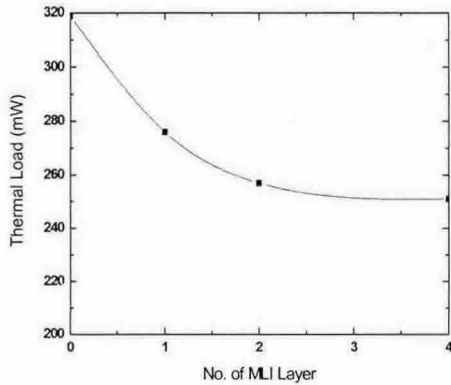


Fig. 7 The effect of number of radiation shield on thermal load.

용기 내 cold tip으로 들어오는 열유입량은 약 276 mW로 MLI가 설치되지 않았을 때의 320 mW보다 약 13.8% 가량 감소하였고 2개를 설치했을 경우 열부하는 257 mW로 약 20% 정도 열유입량이 감소하였다. 그러나 4개를 설치한 경우 열부하는 251 mW로 2개를 설치한 경우와 비교하였을 때 크게 감소하지 않았다. 이는 복사로 인한 열유입량이 cold finger를 통해서 전도로 들어오는 열유입량에 비해 작은 수준이므로 복사 차폐로 인한 열유입량 감소의 효과를 줄인 것으로 판단할 수 있다.

극저온 용기 내부를 대류 열전달을 무시할 수 있을 정도의 고진공으로 유지시켰으므로 진공용기 내 cold tip 부분으로 들어오는 대부분의 열유입은 cold finger를 통해 전도로 들어오는 열과 외부에서 복사로 인해 들어오는 열로 생각할 수 있다. 그러나 MLI의 설치로 인해 줄일 수 있는 열유입량은 최대 100 mW를 넘지 않을 것으로 보인다. 따라서 차폐막이 존재하지 않을 시 cold finger를 통해서 전도로 들어오는 열유입량이 200 mW 이상일 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 복사 차폐막에 따른 적외선 검출기용 극저온 용기의 부하를 측정하였다. 외부에서 들어오는 열유입 형태는 희박가스에 의한

전도, cold finger를 통한 열전달 그리고 복사에 의한 열유입이 있다. 그러나 용기 내 진공압력을 고진공으로 유지하였기 때문에 희박가스에 의한 열전도는 다른 열유입에 비해 매우 작아서 무시할 수 있다. 실험 결과 MLI를 1개 설치한 경우 약 13.8% 가량 감소하였고 2개를 설치한 경우 약 20%, 4개를 설치한 경우 약 21.5% 정도 감소하였다. 위의 결과로 인해 200 mW 이상의 열유입이 cold finger를 통해서 전도로 이루어지는 것을 알 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 민간겸용기술개발사업의 지원으로 이루어졌습니다.

#### 참고문헌

1. Morten, F. D., 1971, Applications of infrared detectors. In: Infrared detectors and their applications, Philips Publication Dept., Eindhoven, Netherlands, Chapter 1.
2. Kaplan, H., 1992, Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment, SPIE, Bellingham.
3. Kim, H.-Y., Kang, B. H. and Lee D.-Y., 2000, A parametric study on the cooling characteristics of an infrared detector cryochamber, Cryogenics, Vol. 40, pp. 779-788.
4. Lee, J. H., Kim, H.-Y. and Kang, B. H., 2002, Numerical analysis on the transient cooling characteristics of an infrared detector cryochamber. The Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 4, No. 2, pp. 68-72.
5. Lee, J. H., Kim, H.-Y. and Kang B. H., 2003, An experimental study on the cooling characteristics of an infrared detector cryochamber, proceedings of the SAREK 2004 summer annual conference, pp. 1190-1195.
6. Kang B. H., Lee, J. H. and Kim, H.-Y., 2004, An experimental study on the cooling

- characteristics of an infrared detector cryochamber, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 10, pp. 889-894.
7. Mills, A. F., 1992, Heat and Mass Transfer, Irwin, Concord. Chapter 3.
  8. Hong Y.-J., Park S.-J., Kim H.-B., Kim Y.-H. and Choi Y.-D., 2004, The experimental study of the performance of the rotary Stirling refrigerator, Proceedings of the KSME 2004 Autumn Annual Conference.