

복사 차폐막이 설치된 극저온 용기의 열부하 특성에 관한 실험적 연구

김 영 민, 강 병 하*, 박 성 제**

국민대학교 대학원, *국민대학교 기계·자동차공학부, **한국기계연구원 에너지기계연구센터

An Experimental Study on the Thermal Load of a Cryochamber with Radiation Shields

Young Min Kim, Byung Ha Kang*, Seong-Je Park**

Graduate School, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

*School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 132-702, Korea

**Energy System Research Center, KIMM, Daejeon 305-343, Korea

(Received September 13, 2006; revision received November 19, 2007)

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. Thermal load of a cryochamber is attributed to the conduction heat transfer through a cold finger, the gases conduction and radiation heat transfer. The thermal loads of an infrared detector cryochamber with a 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.

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

기 호 설 명

하첨자

Q : 열유입량 [W]

\dot{m} : 질량유량 [kg/s]

T : 온도 [K]

P : 압력 [kPa]

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.^(1,2) 적외선 검출기관 물체에

† Corresponding author

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

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

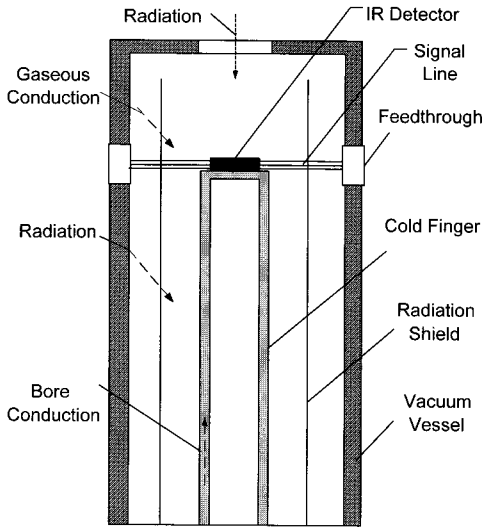


Fig. 1 Schematic diagram of cryochamber.

Table 1 Part lists of cryochamber

Part	Material	Dimensions
Vacuum vessel	Stainless steel(SUS301)	Length = 74 mm Inner diameter = 25 mm
Radiation shield	Alloy(6061)	Length = 33 mm Diameter = 20 mm
	Plastic	Length = 33 mm Diameter = 20 mm
Cold finger	Stainless steel(SUS301)	Outer diameter = 9 mm Thickness = 0.15 mm Length = 48 mm

서 방사되는 파장 $0.75 \mu\text{m}$ 이상의 복사선을 검출하여 식별하는 소자로서 기계, 구조 및 건물의 이상 검지를 위한 열화상진단, 의학 분야에서의 신경기구 분석, 에너지 분야의 화염, 연소가스의 온도분포 측정 등에 활용되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 그러나 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 일반적으로 냉동기는 저온부의 온도가 낮아질수록 냉동효율이 낮아지며, 80 K 근처에서는 성능계수(COP)가 매우 낮은 값을 가진다. 따라서 극저온을 유지하기 위한 단위 냉동용량 당 냉동기의 소요동력이 매우 커지므로, 극저온 냉각장

비의 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 기동시상은으로부터 극저온 상태로 도달하게 되는 시간이 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 냉각 특성에 대해서 실험적으로 연구한 바 있고 또한 극저온 용기 내 복사 차폐막이 설치된 경우에 대해서 열부하를 수치해석적으로 연구한 바 있다.^(5,6) 그러나 진공용기 내 열유입량의 일부가 복사에 의해 이루어지고 있기 때문에 본 연구에서는 복사 차폐막이 설치된 용기에 대해서 용기 자체의 냉각부하를 측정하였고 복사 차폐막에 의한 열차단 효과를 측정하여 복사 차폐막이 용기 내 열유입량에 미치는 영향을 규명하였다. 또한 용기 내 진공도가 용기의 열 부하에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구의 모델인 적외선 센서용 극저온 용기의 형상과 열전달 모드에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 극저온 용기로 들어오는 열유입 형태는 외부로부터의 복사와 회박가스에 의한 대류 그리고 보어를 통한 열전도가 있다. 실험에 사용된 극저온 용기의 크기, 재질들은 Table 1에 나타내었다. 극저온 용기의 크기는 직경 25 mm, 높이 74 mm로 매우 작은 용기이며 저온부는 소형 냉동기의 냉각기 부분이 삽입 되는 크기인 직경 9 mm인 원형관으로 제작 되었다. 또한 극저온 용기의 냉각부하를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 실험장치를 제작하였다. 극저온 용기 실험장치는 시험부인 극저온 용기와 용기 내부를 진공으로 만들기 위한 진공펌프, 저온부 부분을 냉각시키기 위한 액체질소 주입기로 구성되어 있다. 저온부 끝단 부분의 온도를 측정하기 위해 측정범위 1.4~500 K, ± 0.5 K의 정확도를 갖는 실리콘 다이오드 온도센서(DT-670-SD, Lake shore)

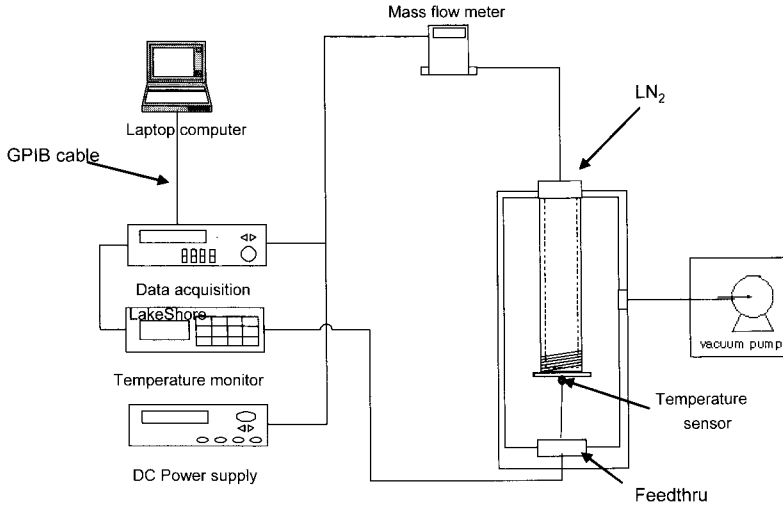


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup.

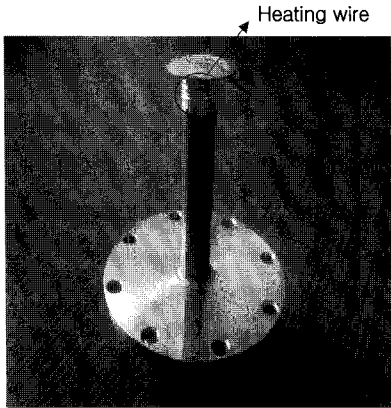


Fig. 3 Photo of cold finger and heating wire.

를 사용하였고, 용기 내 고진공을 유지하기 위하여 터보형 진공펌프를 사용하였다. 또한 저온부 부분에 열부하를 가하기 위해 Fig. 3과 같이 저온부 끝단에 열선(MW-36, Lake shore)을 감아 외부로부터 전압 공급 시 발열할 수 있도록 제작하였다. 또한 열선을 은박테잎으로 감아 열분포를 고르게 하였다. 액체질소의 증발률 실험에서는 액체질소 증발시 유량을 측정하기 위해 측정범위 0~50 slpm, ±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 위

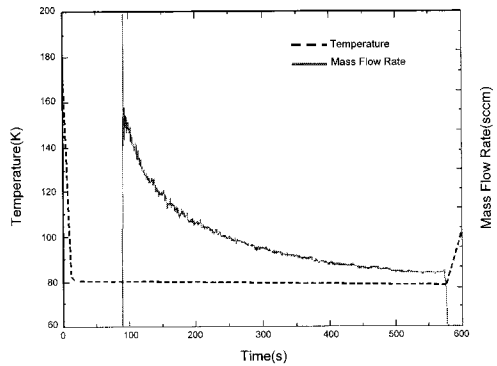


Fig. 4 LN₂ flow rate during boil-off test.

하여 증발률을 측정하였고 액체질소를 저온부 주입구로 주입하여 저온부 부분의 온도가 정상상태에 도달할 때까지 떨어뜨린 후 유량계를 연결하여 액체질소의 증발량을 계측하였다. 또한 저온부 끝단 부분에 열부하를 가하여 열부하에 따른 증발량을 같은 방법을 통하여 측정하였다. Cha et al.⁽⁷⁾은 비정상상태에서 압력변화에 따라 증발률을 구하기 위한 에너지 평형식에 대한 해석을 수행하여 식(1)을 도출하였다.

$$Q = \frac{h_{fg} \dot{m}}{\left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_f}\right)} + \left[m_g C_{v,g} + m_f C_{v,f} + A \left(\frac{u_{fg}}{\left(\frac{\rho_f}{\rho_g} - 1\right)} \right) \right] \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

$$A = \left[\left(\frac{m_g}{m_f} \right) \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^2 \left(\frac{d\rho_g}{dT} \right) + \left(\frac{d\rho_f}{dT} \right) \right] \left(\frac{m_f}{\rho_f} \right)$$

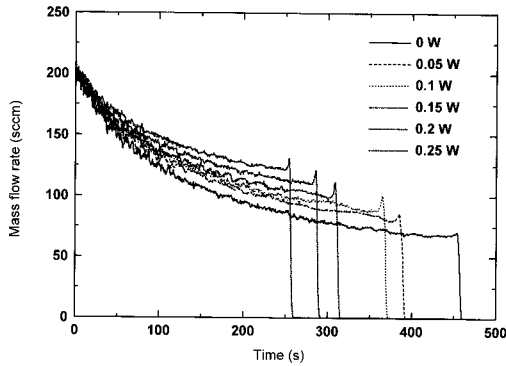


Fig. 5 Transient variation of mass flow rate for various thermal loads.

식(1)은 압력변화에 따라 증발온도가 시간에 따라 변화하지만, 본 연구에서는 대기압 상태에서 수행되어 시간변화에 따른 온도변화가 거의 없으므로, 정상상태에서 저온부로의 열침입량은 식(2)와 같이 액체질소의 증발잠열과의 열평형을 이루게 된다.⁽⁸⁾

$$Q_{no-load} = \dot{m}_{no-load} h_{fg} \quad (2)$$

한편 저온부에서 열부하를 고려할 경우 다음과 같이 에너지 평형을 이루게 된다.

$$Q_{load} = Q_{no-load} + \Delta Q \quad (3)$$

$$Q_{load} = (\dot{m}_{no-load} + \Delta \dot{m}) h_{fg} \quad (4)$$

따라서 저온부 부분에서 정상상태 열유입량은 다음식과 같다.

$$Q_{no-load} = \frac{\Delta Q}{\Delta \dot{m}} \cdot \dot{m}_{no-load} \quad (5)$$

이때 식(5)의 기울기는 다수의 실험을 통해 구할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구는 적외선 검출기용 극저온 용기의 자체부하를 측정하기 위하여 용기 내 저온부 끝단 부분에 액체 질소를 주입하고 열부하를 가하여 이때 증발되는 액체질소의 증발량을 측정하는 실험을 수행 하였다. 실험은 용기 내 대류 열전달로 인한 열유입을 차단하기 위하여 고진공상태

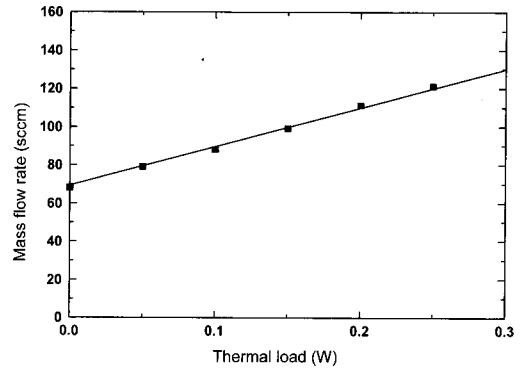


Fig. 6 The relation between thermal load and mass flow rate at the boil-off.

(1.333×10^{-6} kPa 이하)에서 수행하였다. 저온부 끝단 부분의 온도가 정상상태에 도달하는 것을 알아보기 위해서 온도센서로 인듐을 사용하여 저온부 끝단 부분에 부착하였다.

Fig. 4는 복사 차폐막이 설치되지 않은 용기 내 무부하시 시간에 따른 저온부 끝단부분의 온도변화와 증발되는 액체질소 유량을 나타낸 것이다. 처음 액체질소 주입 시 저온부 끝단 부분의 온도는 급격하게 떨어져 약 10 sec가 지나면 80 K 근처에서 정상상태를 보인다. 85 sec가 지난 후 정상상태에서 유량계와 연결을 하여 액체질소의 증발량을 측정하였다. 액체질소 증발량은 초기에는 급격히 감소하나, 시간이 지나면서 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었으며, 약 500 sec가 지난 후 정상상태에 가까이 도달한다. 그 후 약 570 sec초가 지난 후 급격히 증발 되는 것을 알 수 있다. 액체질소 증발 후 저온부 끝단 부분의 온도는 다시 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다.

위와 같은 실험을 저온부 끝단 부분에 열부하를 가하며 반복실험을 하였다. 열부하는 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 W를 가하였다. 반복 실험 한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이 때 x-축의 시간은 저온부 끝단 부분의 온도가 정상상태에 충분히 도달한 후인 액체질소 주입 후 85 sec 이후부터 시작된다. 저온부 끝단 부분의 열부하가 증가 할수록 액체질소의 증발률이 증가하며, 증발에 걸리는 시간이 단축됨을 알 수 있다.

Fig. 5를 바탕으로 각 부하별로 액체질소가 완전히 증발되는 시점(boil-off)에서의 증발질량유량과 열부하의 관계를 Fig. 6에 나타내었으며, 이 관계의 그림에서 식(5)에서 요구되는 기울기 $\Delta Q/$

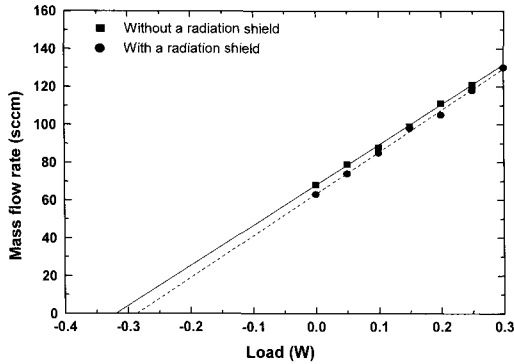


Fig. 7 Effect of a radiation shield on thermal load.

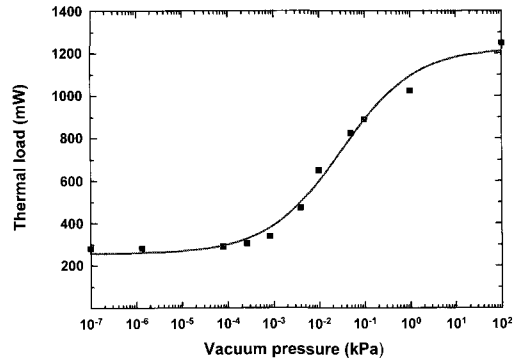


Fig. 8 Effect of vacuum pressure of cryochamber on thermal load.

$\Delta \dot{m}$ 을 구할 수 있다.

Fig. 7은 복사 차폐막이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 각각 임의의 부하를 가하여 액체 질소가 완전히 증발되는 시점(boil-off)에서의 증발 질량유량과 열부하와의 관계를 나타낸 것이다. 즉 Fig. 6을 x축과 교차할 시킨 그림으로 x축과 만나는 점의 절편값이 극저온 용기의 부하가 된다. 또 다른 방식으로 식(5)를 이용하면 복사 차폐막이 없는 경우 극저온 용기의 부하는 320 mW이고 복사 차폐막을 설치한 경우에는 280 mW로 약 12.5% 가량 감소한 것을 알 수 있다.

용기 내 진공도가 용기의 열부하에 미치는 영향을 규명하기 위하여, 복사 차폐막이 설치된 용기 내 압력을 각각 7.5×10^{-7} , 7.5×10^{-6} , 1×10^{-4} , 1×10^{-3} , 1×10^{-2} , 1×10^{-1} , 1, 101.3 kPa로 변화 시키며 증발률 실험을 수행하였다. 용기 내 진공압력이 1×10^{-4} kPa 이하일 경우 용기의 열부하는 약 280 mW로 비슷하였으나 용기 내 진공압력이 증가 할수록 용기의 열부하는 급격히 증가하게 되고, 진공압력이 1 kPa 이상이 되면 다시 열부하 증가율은 감소하게 된다. 이것은 진공압력이 1×10^{-4} kPa 이상이 되면 용기 내 회박가스에 의한 대류 열전달 현상으로 인하여 외부로부터 열유입이 많아지게 되고 진공압력이 증가하면 용기 내벽의 고온과 저온부의 저온 사이에 자연대류의 영향으로 인하여 열유입이 급격히 증가되기 때문에 용기의 열부하가 급격히 증가하게 된다. 또한 진공압력이 1 kPa 이상이 되면 이미 용기 내 공기로 부터 충분한 대류 현상이 발생하기 때문에 열유입량의 증가율이 둔화 되는 것을 알 수 있다. 따

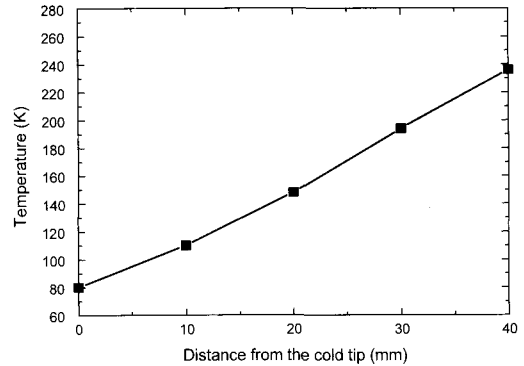


Fig. 9 Temperature profile of cold finger.

라서 용기내부의 압력이 대기압으로 유지되는 경우는 최고 1250 mW의 열부하를 갖는 것을 알 수 있다.

고진공하에서 저온부의 온도분포를 알아보기 위하여 저온부 끝단으로부터 각각 10 mm 간격으로 온도센서 4개를 부착하였다. 저온부 끝단으로부터 거리에 따라 저온부의 온도분포를 Fig. 9에 나타내었다. 저온부의 온도분포는 거의 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 이러한 선형 온도분포를 근거로 열전도에 의한 열유입량을 환산하면, 고진공하에서 용기 내로의 열침입량 중 약 200 mW 이상이 진도열전달 형태로 저온부를 통해서 유입되는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 복사 차폐막에 따른 적외선 검

출기용 극저온 용기의 부하 측정과 용기 내 압력 변화에 따른 용기 부하의 변화를 측정하였다. 외부에서 들어오는 열유입 형태는 희박가스에 의한 전도, 저온부를 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 복사 차폐막을 설치하였을 경우 설치하지 않았을 때 보다 12.5% 가량 열유입을 감소시킬 수 있었다. 또한 용기 내 압력을 변화시켰을 때 용기 내 압력이 1×10^{-4} kPa 이상의 저진공이 되면 용기의 부하가 급격히 증가를 하다가 1 kPa 보다 저진공이 되면 증가율이 점점 감소하는 것을 알 수 있었고 대기압 하에서 용기의 부하는 1250 mW로 나타났다. 또한 극저온 용기 내 저온부의 온도분포는 선형적으로 나타났으며 이 결과들로 인해 200 mW 이상의 열유입이 저온부를 통해서 전도로 이루어지는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 민군겸용기술개발사업의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- Morten, F.D., 1971, Applications of infrared detectors. In: Infrared detectors and their applications, Philips Publication Dept. Eindhoven, Netherlands, Chapter 1.
- Kaplan, H., 1992, Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment, SPIE, Bellingham.
- 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.
- 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.
- Lee, J. H., Kim, H. Y. and Kang B. H., 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.
- Kim, Y. M. and Kang, B. H., 2006, Thermal analysis of a cryochamber with radiation shield for infrared detector, *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 18, No. 8, pp. 889-894.
- Cha, Y. S., Niemann, R. C. and Hull, J. R., 1993, Thermodynamic analysis of helium boil-off experiments with pressure variations, *Cryogenics*, Vol. 33, No. 7, pp. 675-679.
- 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*.