

# 적외선 검출기용 극저온 챔버에서 복사 차폐막을 고려한 열해석

김 영 민, 강 병 하\*

국민대학교 대학원, \*국민대학교 기계·자동차공학부

## Thermal Analysis of a Cryochamber for an Infrared Detector Considering a Radiation Shield

Young Min Kim, Byung Ha Kang\*

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

\*School of Mechanical & Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received September 1, 2005; revision received July 10, 2006)

**ABSTRACT:** The steady cooling characteristics of a cryochamber for infrared (IR) detector have been investigated analytically, considering radiation shields. The thermal modeling considers the conduction heat transfer through cold finger, the gaseous conduction due to outgassing, and the radiation heat transfer. The cooling load of the cryochamber is obtained by using a fin equation. The results obtained indicate that the gaseous conduction plays an important role in determining the steady cooling load. The steady cooling load is increased as the gas pressure is increased. It is also found that the cooling load is substantially decreased with a radiation shield. The most thermal load of a cryochamber occurs through the cold finger.

**Key words:** Cryochamber(극저온용기), IR detector(적외선 검출기), Radiation shield(복사 차폐막)

### 기 호 설 명

$F$  : 형상계수  
 $P$  : 압력 [Torr]  
 $Q$  : 열유입량 [W]  
 $R$  : 복사 차폐막의 반경 [mm]  
 $T$  : 온도 [K]

### 그리스 문자

$\varepsilon$  : 방사율

$\sigma$  : Stefan-Boltzmann 상수

### 하첨자

$d$  : 검출기  
 $f$  : 저온부(cold finger)  
 $gc$  : 희박가스상태  
 $rad$  : 복사에 의한 영향  
 $s$  : 복사 차폐막  
 $v$  : 진공용기

### 1. 서 론

† Corresponding author

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

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

적외선 검출기를 이용하는 야간투시경이나 감시, 조준 망원경 등은 현대전에 있어서 필수 장

비로 사용되고 있다.<sup>(1,2)</sup> 그러나 적외선 검출기는 액체질소 온도 이하의 저온에서 우수한 성능을 가지므로 휴대용 열상장비의 개발을 위해서는 77 K 이하까지 냉각이 되어야 하기 때문에 극저온 냉각장비의 효율적 운영을 위해서는 냉동부하 자체를 최소화하는 것이 매우 중요하다.

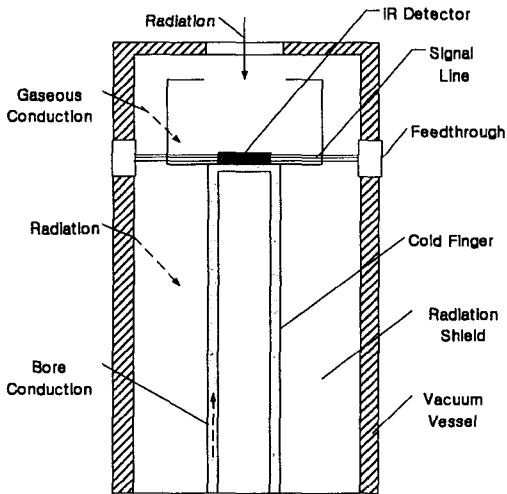
극저온용기 내 열유입은 진공용기로의 전도 및 복사 열전달에 의한 열유입이 상당한 냉동부하를 차지하게 된다. 이러한 열유입이 클 경우, 극저온을 유지하지 못하거나, 또는 장비 기동시 상온으로부터 극저온 상태로 도달하게 되는 시간이 매우 길어지게 된다. 따라서 이러한 열유입을 최소화할 수 있도록 극저온 진공용기를 설계 제작하여야 한다.

기존의 연구는 극저온용기 내 복사 차폐막이 존재하지 않는 경우에 대하여 정상상태 열전달과 과도상태의 열전달을 해석한 바 있다.<sup>(3-5)</sup> 그러나 진공용기 내 열유입량의 일부가 복사에 의해 이루어지고 있기 때문에 본 연구에서는 복사 차폐막이 설치된 용기 내 열유입량을 해석적으로 구하였고 용기 내 차폐막이 설치된 위치에 따라 용기 내 열유입에 미치는 영향을 규명하였다.

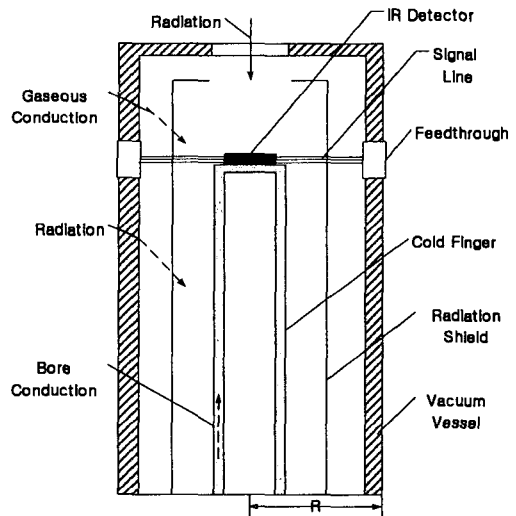
## 2. 해석모델링

### 2.1 검출기 부분에만 차폐막이 있는 경우

Fig. 1(a)는 검출기 부분에만 복사 차폐막이 설



(a) Installation of a radiation shield only in the detector part



(b) Installation of a radiation shield both in the detector and cold finger part

Fig. 1 Schematic diagram of cryochamber and heat transfer path.

Table 1 Part lists of cryochamber

Element	Material	Dimensions	Properties (at 300 K)
Vacuum vessel	Stainless steel (301)	Inner length = 60 mm Inner diameter = 25 mm	$\epsilon = 0.89$
Radiation shield	Alloy (6061)	Length = 10 mm Diameter = 20 mm	$\epsilon = 0.37$
IR detector	CdHgTe	7 mm × 7 mm	$\epsilon = 0.72$
Cold finger	Stainless steel (301)	Outer diameter = 9 mm Thickness = 0.12 mm Length = 48 mm	$\epsilon = 0.89$ $k = 13 \text{ W/mK}$

치되어 있는 형상으로 외부의 열이 진공용기의 가장 차가운 지점으로 전달되는 각종 열전달 형태를 표시한 것이다. 또한 Table 1은 본 해석에 사용될 적외선 검출기의 크기, 재료 및 물성치를 나타내었다. 극저온용기에 대한 열해석을 위하여 진공용기를 검출기 부분과 저온부(cold finger) 두 부분으로 구분하였다.<sup>(6)</sup>

검출기 부분으로 들어오는 열유입 형태는 진공용기를 통한 복사열과 회박가스로 전도되는 열, 그리고 optical window를 통한 복사열이 있다. 검출기 부분에서 진공용기를 통한 열전달  $Q_{rad}$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{rad} = \frac{\sigma(T_v^4 - T_f^4)}{R_{rad}} \quad (1)$$

여기서  $R_{rad}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$R_{rad} = \frac{1 - \epsilon_v}{\epsilon_v A_v} + \frac{1}{A_s F_{sv}} + \frac{1 - \epsilon_s}{\epsilon_s A_s} + \frac{1 - \epsilon_s}{\epsilon_s A_s} + \frac{1}{A_f F_{fs}} + \frac{1 - \epsilon_f}{\epsilon_f A_f} \quad (2)$$

용기의 내부는 가스에 의한 열전달을 막기 위해 진공으로 제작하나 벽에 붙은 기체분자가 떨어져 나오는 아웃개싱(outgassing) 현상을 피할 수는 없다. 따라서 회박기체에서의 열전달을 고려해야 하며 이때 다음의 식과 같이 가스압력에 의존하는 자유분자, 전이, 연속체 열전도 영역으로 나누어  $h_d$ 를 구할 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$h_d = 1.48P' \quad \text{for } P < 10^{-4} \text{ Torr} \quad (3)$$

$$h_d = \frac{1.48P'}{1 + 1.11P'} \quad \text{for } 10^{-4} < P < 1 \text{ Torr} \quad (4)$$

$$h_d = 1.33 \quad \text{for } P > 1 \text{ Torr} \quad (5)$$

여기서  $P'$ 의 단위는  $\text{Pa}[\text{N}/\text{m}^2]$ 이고  $P$ 단위는 Torr이다. 따라서 회박가스에 의한 열전달  $Q_{gc}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{gc} = h_d A_d (T_v - T_d) \quad (6)$$

Optical window를 통해서 들어오는 복사열은 다

음 식(7)을 식(1)에 대입함으로써 구할 수 있다.

$$R_{rad} = \frac{1 - \epsilon_v}{\epsilon_v A_v} + \frac{1}{A_d F_{dv}} + \frac{1 - \epsilon_d}{\epsilon_d A_d} \quad (7)$$

저온부를 통해서 들어오는 열유입은 저온부의 두께가 0.12 mm이며 축을 따라서 전도가 이루어진다. 이때 Biot 수는  $Bi = hl/2k$ 로 정의되어진다. 본 연구에서는 Biot 수가 0.1보다 작으므로 축방향의 열구배에 비해서 횡방향의 열전도는 무시할 수 있다.

정상상태에서 검출기의 온도는 77 K로 유지된다. 저온부의 온도분포에 대한 편방정식은 다음과 같이 유도되었다.<sup>(6)</sup>

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0 \quad (8)$$

여기서  $\theta$ 는  $\theta = T_f - T_b$ 이다. 또  $m^2$ 은  $m^2 = \pi d_f h / k A_f$ 으로 나타낸다.

금속바닥(stainless steel)과 저온부 사이에 접촉 열저항은 무시할 수 있다. 따라서  $T_b$ 는 외부 온도  $T_\infty$ 와 동일한 금속바닥의 온도와 같다. 검출기와 그 밑바닥은 매우 얇다. 따라서 검출기와 저온부 상부의 온도는 같다. 그러므로 저온부 양쪽에서의 온도가 식(8)의 해를 구할 수 있는 경계조건을 제공해 준다.

앞선 경계조건을 대입하고 식(8)의 해는 식(9)와 같이 얻어진다.

$$T = T_\infty - (T_\infty - T_d) \frac{\sinh mx}{\sinh mL} \quad (9)$$

정상 냉각부하  $Q_L$ 은 끝단( $x=L$ ) 전도 열유속과 검출기에서의 열발생의 합으로 결정되어진다.

$$Q_L = -k A_f m (T_d - T_\infty) \frac{\cosh mL}{\sinh mL} + Q_{bias} \quad (10)$$

$m$ 값을 계산하기 위해서는  $h$ 값이 필요하며, 저온부 표면에서의 열전달은 가스에 의한 전도와 진공용기 벽으로부터의 방사에 의한 것으로 구성된다. 따라서,  $h$ 는  $h = h_{gc} + h_{rad}$ 으로 나타내어진다.

$h_{gc}$ 는 앞에서와 같이 회박가스에서의 열전달을 고려하여 계산한다.  $h_{gc}$ 는 다음 식에서 구할 수 있다.<sup>(3,7)</sup>

$$h_{gc} = 1.48P' \quad \text{for } P < 10^{-4} \text{ Torr} \quad (11)$$

$$h_{gc} = \frac{1.48P'}{1 + 0.34P'} \quad \text{for } 10^{-4} < P < 1 \text{ Torr} \quad (12)$$

$$h_{gc} = 4.35 \quad \text{for } P > 1 \text{ Torr} \quad (13)$$

$h_{rad}$ 는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$Q_{rad} = \frac{\sigma(T_v^4 - T_f^4)}{R_{rad}} = \frac{4\sigma T_m^3(T_v - T_f)}{R_{rad}} \quad (14)$$

$$= h_{rad}A_f(T_v - T_f)$$

여기에서  $R_{rad}$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$R_{rad} = \frac{1 - \epsilon_v}{\epsilon_v A_v} + \frac{1}{A_f F_{fs}} + \frac{1 - \epsilon_f}{\epsilon_f A_f} \quad (15)$$

이제  $T_v^4 - T_f^4 \approx 4T_m^3(T_v - T_f)$ 라고 가정하여  $T_m$ 는 표면의 온도가 크게 차이가 나지 않을 경우 평균 온도로 표시할 수 있다. 하지만 위의 경우에서  $T_v$ 가  $T_f$ 보다 4배나 크기 때문에  $T_m$ 은 정확하지가 않다. 따라서 아래의  $F$ 를 최소화할 수 있는 온도를 찾아야 한다.

$$F = \left| \int_{T_m}^{T_v} [T_v^4 - T^4 - 4T_m^3(T_v - T)] dT \right| \quad (16)$$

이것은 온도분포가 위치에 따라서 선형적일 경우 exact and approximate 방법에 의한 총방사 열유속의 차이를 측정한다.  $T_m = 237 \text{ K}$ 일 경우  $F = 0$ 가 된다. 위에서 구한  $h_{gc}$ 와  $h_{rad}$ 을 이용해서 식(10)으로부터 정상상태 냉각부하를 구할 수 있다.

## 2.2 검출기와 저온부 부분 모두 차폐막이 있는 경우

Fig. 1(b)는 검출기 부분과 저온부 부분 모두 복사 차폐막이 설치되어 있는 형상이다. 열유입 형태는 검출기에만 차폐막이 설치되어 있는 경우와 같으며 단지 저온부로 들어가는 복사열이 차

폐막으로 인하여 일부 차단이 된다. 따라서 Fig. 1(b)도 검출기 부분과 저온부 부분으로 나누어 해석할 수 있다. 검출기 부분은 앞부분의 검출기 부분에 차폐막이 있는 경우 같은 형상이므로 위에서 해석한 것과 같다. 하지만 저온부 부분은 차폐막이 존재하기 때문에  $h_{rad}$ 값이 달라지게 된다. 즉, 열저항  $R_{rad}$ 의 식(15)를 식(2)로 대체해 계산할 수 있다.

또한 용기 내 열유입의 대부분이 저온부를 통해서 들어올 것을 예측하여 저온부 내 복사 차폐막의 위치에 따른 열유입량의 변화를 계산하였다. 복사 차폐막의 위치가 변하는 경우 식(2)에서 형상계수  $F_{sv}$ ,  $F_{fs}$ 와 차폐막의 면적  $A_s$ 가 변하게 된다. 형상계수와 면적의 변화로 인하여 열저항  $R_{rad}$ 이 변하고, 저온부를 통해서 들어오는 열유입량이 변하게 된다. 여기에서는 형상계수와 면적의 곱인  $A_s F_{sv}$ ,  $A_f F_{fs}$ 를 변수로 두었다.

## 3. 해석결과 및 검토

위에 기술된 수치해석방법을 이용해서 진공용기 내 열유입을 계산하였다. Fig. 2는 진공용기로부터 검출기로 들어오는 열유입량을 나타낸 것이고, Fig. 3은 저온부 부분을 통하여 검출기로 유입되는 열유입량을 용기 내 압력에 대해 복사 차폐막이 있는 경우와 없는 경우에 대해 나타내었다. 복사 차폐막이 있는 경우 차폐막 위치는 반경 10mm로 설정하였다. 용기 내 압력이  $10^{-3}$  Torr 이상이 되면 검출기 부분과 저온부 부분 모두 열유입량의 구배가 급격히 커지게 되는 것을 볼 수 있다. 이것은 용기 내 압력이 높아지면서 기체에 의한 대류 현상이 발생하고 따라서 열전달량이 많아지기 때문이다. 검출기부로 들어오는 열유입량과 저온부를 통해서 전달되는 열유입량을 비교하였을 때 복사 차폐막이 없는 경우 저온부를 통해 들어오는 열유입량이 전체 열유입량의 97% 이상을 차지한다. 또한 검출기와 저온부 부분 모두 복사 차폐막이 있는 경우 검출기 부분으로 들어오는 열유입량은 검출기 부분에만 차폐막이 있는 경우의 해석결과와 동일하다. 그러나 저온부 부분으로 들어오는 열유입량은 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 복사 차폐막의 영향으로 차폐막이 없을 때보다 압력이  $10^{-5}$  Torr에서는 26%, 1 Torr에서는 12% 가량 감소하였다.

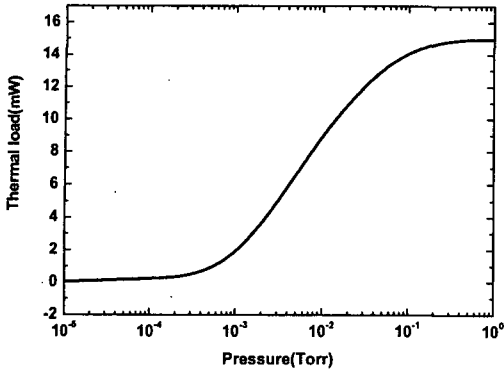


Fig. 2 Thermal load through the IR detector part.

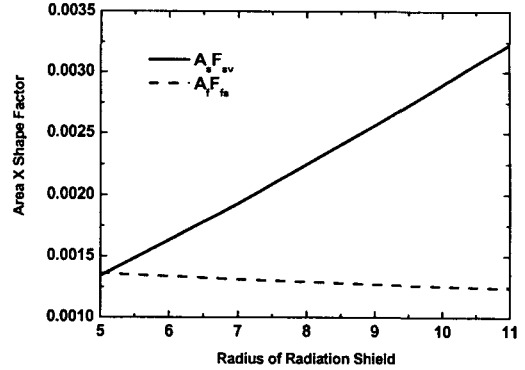


Fig. 4 Effect of the radius of radiation shield on  $A F$ .

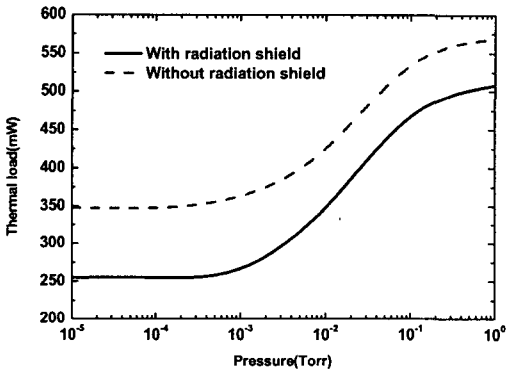


Fig. 3 Thermal load through cold finger.

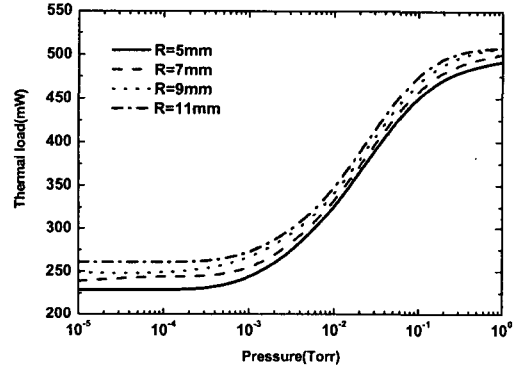


Fig. 5 Effect of location of radiation shield on thermal load through cold finger.

복사 차폐막의 위치에 대한 영향은 Fig. 4에 나타내었다. 복사 차폐막의 위치 반경  $R$ 의 변화에 따라 위의 두 변수  $A_s F_{sv}$ ,  $A_f F_{fs}$ 가 변화하는 것을 볼 수 있다.  $A_f F_{fs}$ 는 반경  $R$ 이 증가하여도 큰 변화가 없으나  $A_s \times F_{sv}$ 는  $R$ 이 증가함에 따라 선형적으로 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 식(2)에서 복사 차폐막의 반경이 커질수록  $R_{rad}$  값이 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 외부에서 들어오는 열이 많은 저항을 거치지 않고 들어오는 것을 의미하기 때문에 열유입량이 증가하는 것을 알 수 있다. 복사 차폐막의 위치에 따른 열유입량의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 복사 차폐막의 반경이 5 mm 일 때보다 반경이 11 mm일 때 열유입량은  $10^{-5}$  Torr에서 15%, 1 Torr에서는 3% 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 용기 내 압력이 높아질수록 대

류로 인한 열유입량의 증가로 복사에 의한 열유입량의 비중이 줄어들기 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 복사 차폐막이 설치된 적외선 검출기용 극저온 용기 내 열유입 현상을 해석하였다. 용기 내 열유입의 97% 이상이 cold finger 부분으로 들어오고, 용기 내 복사 차폐막을 검출기 부분과 저온부 부분에 모두 설치하였을 때 검출기 부분에만 차폐막을 설치한 경우보다  $10^{-5}$  Torr에서 열유입량이 26%, 1 Torr에서는 12% 감소하였다.

또한, 저온부 부분에 설치된 차폐막의 위치 반경이 11 mm일 때보다 반경이 5 mm일 때  $10^{-5}$  Torr에서 15%, 1 Torr에서는 3%까지 열유입량이

감소하는 것을 알 수 있다. 압력이  $10^{-3}$  Torr 이상에서는 용기 내 대류현상으로 인해 열유입량이 급격하게 증가한다.

따라서 용기 내 열유입량을 최소화하기 위해서는 용기 내 압력을  $10^{-3}$  Torr 이하로 유지시키고 저온부 부분으로 유입되는 열을 복사 차폐막을 통하여 효과적으로 차단해야 하며 이 경우 복사 차폐막의 반경이 작을수록 열을 차단하는 효과가 더 뛰어난 것으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부와 국방과학연구소의 민군겸용기술개발사업의 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. 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.
5. 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.
6. Mills, A. F., 1992, Heat and transfer, Irwin, Concord, Chapter 3.
7. Rohsenow, W. M. and Hartnett, J. P., 1973, Handbook of heat transfer, McGraw-Hill, New York, Chapter 9.1.