

적외선 센서 냉각용 극저온 용기의 과도 냉각 특성에 관한 수치해석

Numerical Analysis on the Transient Cooling Characteristics of an Infrared Detector Cryochamber

이 정 훈*, 김 호 영**, 강 병 하***

Jung Hoon Lee*, Ho-Young Kim**, Byung Ha Kang***

Abstract : This work investigates the transient cooling characteristics of an Infrared(IR) detector cryochamber, which has a critical effect on the cooling load. The current thermal modeling considers the conduction heat transfer through a cold well, the gaseous conduction due to outgassing, and the radiation heat transfer. The transient cooling performance, i.e. the penetration depth and cooling load, is determined using a finite difference method. It is found that the penetration depth increases as the bore conductivity increases. Gaseous conduction and radiation hardly affect the penetration depth. The transient cooling load increases as the bore conductivity increases. The effects of gaseous conduction and radiation on transient heat transfer are weak at initial stages of cooling. However, their effects become significant as the cooling process proceeds.

Key Words : cryochamber, penetration depth, cooling load, heat transfer

1. 서 론

적외선 센서를 이용하는 야간 투시경이나 감시, 조준 망원경 등은 현대전에 있어서 필수 장비로 되어있다. 적외선 센서란 물체에서 방사되는 파장 0.75 μ m 이상의 복사선을 검출하여 식별하는 소자로서 기계, 구조 및 건물의 이상검지를 위한 열화상진단, 의학분야에서의 신경기구분석, 에너지분야의 화염, 연소가스의 온도 분포 측정 등에 활용되고 있다.[1,2] 그러나 적외선 센서는 액체질소 온도이하의 저온에서 우수한 성능을 가지므로 휴대용 열상장비의 개발을 위해서는 77K 이하까지 냉각이 가능한 극저온 소형 냉동기의 개발이 선행되어야 한다.[3]

한편 냉동기는 저온부의 온도가 낮아질수록 냉동효율이 이에 비례하여 낮아지며, 70K 근처에서는 통상적으로 2-5% 정도의 매우 낮은 값을 가진다. 따라서 극저온을 유지하기 위한 단위 냉동용량 당 냉동기의 소요동력이 매우 커지므로 극저온 냉각장비의 효율적 운영을 위해서는 냉동부하 자체를 최소화하는 것이 매

우 중요하다. 실제적으로 사용하는 적외선 센서 챔버의 개략도가 그림 1에 나타나있다. 기본적으로 극저온 챔버는 진공용기(vacuum vessel), 유리보어(cold well), 피드쓰루(feedthrough) 유닛으로 이루어져 있다. 가스에 의한 열손실을 최소화하기 위하여 진공용기내부는 진공으로 되어있다. 적외선 센서는 보어의 상부에 위치하여 적외선신호를 받는다. 적외선센서의 열을 제거하기 위해 극저온 냉동기의 저온부가 보어의 내부에 삽입된다. 피드쓰루 유닛은 적외선센서에서 발생한 전기적신호를 외부로 전달한다. 보어의 외부표면에는 금박막을 하여 적외선센서와 피드쓰루 유닛의 전기적신호를 연결한다.

극저온에서의 작동이 필요한 적외선 센서 및 초전도 필터 어셈블리의 경우, 어셈블리 자체의 발열량이 냉동부하로 작용하게 되지만, 극저온 챔버로의 전도 및 복사 열전달에 의한 열유입이 상당한 냉동부하를 차지하게 된다. 이러한 열유입이 클 경우 극저온을 유지하지 못하거나, 또한 장비 기동시 상온으로부터 극저온 상태로 도달하게 되는 시간이 매우 길어지게 된다. 따라서 전체 시스템의 원활한 동작을 위해서는 이러한 열유입을 최소화 할 수 있도록 전류도입선 및 극저온 용기를 설계·제작하여야 한다.

본 연구팀은 이러한 극저온 용기에 대하여 정상상태 열전달이 용기 재료 및 기체 압력 등에 의하여 변화하는 양상을 해석적으로 구한 바 있다.[4] 또한 주어진 냉동기 성능을 가정하여 상온에서 77K까지 냉각되는 시간인 Cool-down 시간을 계산하였다.[4] 그러나 본 연구에서는 극저온 용기의 과도 열전달 특성에 대한 보다 더 깊이 있는 이해를 위하여 열침투 깊이 및 과도열유속에 대한 수치해석을 수행하였다. 또한 냉동기 성능을 가정하는 대신 본 연구에서는 적외선 센서 부분이 액체질소 온도로 유지됨을 가정하였다. 이 액체질소가 센서의 열을 흡수하며 기체로 상변화를 하면서 유리 보어의 내부 끝부분(적외선 센서가 위치한 자리)을 등온의 상태로 유지한다. 이러한 조건에서 극저온 용기 재료의 열적 성질이 과도 열응답에 미치는 영향을 아래에서 수치해석적인 방법을 통하여 구하였다. 이러한 연구를 통하여 극저온 용기 설계에 유용한 열 해석 방법을 제시하였다.

2. 해석 모델링

그림 1은 외부의 열이 챔버의 가장 차가운 지점으로 전달되는 센서 어셈블리에서 일어나는 각종 열전달 양태를 표시한다. 또한 Table 1은 본 해석에 사용될 적

* 학생회원 : 국민대 대학원 기계공학과
 ** 정 회 원 : KIST열·유동제어연구센터
 *** 정 회 원 : 국민대 기계·자동차공학부
 원고접수 : 2002년 10월 11일
 심사완료 : 2002년 12월 20일

외선 센서 챔버의 크기, 재료, 물성치를 보여준다. 열은 얇은 보어를 따라 상부의 지온지역까지 전도되며, 보어의 외부벽과 진공용기의 내부벽에서 복사열전달이 일어난다. 용기내부를 진공으로 만들어도 남아있는 잔류기체로 인하여 압력에 따른 열전달이 일어난다. 그러나 용기내부의 압력이 낮고 보어와 진공용기 내부벽 사이의 거리가 작기 때문에 자연대류의 영향을 무시할 수 있으며 기체 전도만이 일어난다. 극저온 센서 운전 초기에는 기체 압력이 낮기 때문에 외부에서 유리보어를 통하여 전달되는 전도열과 진공의 공간을 통하여 전달되는 복사열이 가장 중요한 열유입 형태라고 할 수 있다. 그러나 센서 어셈블리를 장시간 작동시키면 용기내 표면의 아웃개싱(outgassing)으로 인하여 진공도가 떨어짐이 잘 알려져 있고, 이러한 희박 기체가 열 유입에 기여할 수 있다.[6]

해석의 대상이 되는 센서 어셈블리는 원통형의 비교적 간단한 형태를 가지고, 또한 열전도의 통로가 되는 보어의 두께가 극히 얇아서 Bi수가 0.03 정도이기 때문에 전도 현상을 일차원으로 가정 할 수 있다.[7] 즉 반경방향의 온도구배는 축방향의 온도구배에 비교하여 무시할 수 있다. 보어 내벽은 액체질소와 접촉하는 면을 제외한 영역은 단열로 가정하여 보어 내부로의 열전달을 무시하였다. 금속바닥과 유리 보어사이의 접촉열저항은 유리가 바닥에 녹아서 붙어있기 때문에 무시할 수 있다. 금속바닥의 열전도도가 크기 때문에 금속바닥의 온도가 외기온도와 같다고 가정하였다. 본 논문에서는 탐지기를 고정하는 예폭시의 열저항이 매우 작다고 가정하였으므로, 탐지기와 유리보어 상부의 온도는 같다고 하였다. 유리보어 상부의 내부는 액체질소로 냉각이 되어 77K의 경계조건을 가진다.

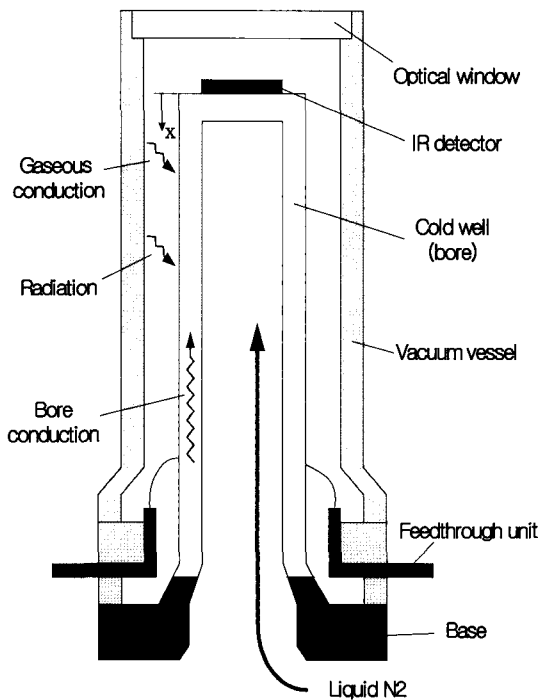


그림 1. 극저온 용기 및 열전달 경로의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of cryochamber and paths of heat transfer.

유리보어의 x방향의 유한체적에서 에너지 평형식을 다음과 같이 쓸 수 있다.[7]

$$\rho C \Delta V \frac{\partial T}{\partial t} = k A_c \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - h A_s (T - T_\infty) \quad (1)$$

여기서 ρ 와 C 는 유리의 밀도와 비열, ΔV 는 체적, T 는 온도, t 는 시간, k 는 유리의 열전도도, A_c 는 유한체적의 단면적, h 는 열전달계수, A_s 는 외부표면적, T_∞ 는 상온이다. 유리보어와 감지기의 초기 온도가 T_∞ 이고, 바닥에서의 온도와 보어상부의 내부에서의 온도는 각각 T_∞ 와 77K로 유지한다. 따라서 다음과 같이 초기조건과 경계조건이 주어진다.

$$T = T_\infty \quad \text{at } t = 0 \quad (2)$$

$$T = T_\infty \quad \text{at } x = L \quad \text{for all } t \quad (3)$$

$$T = 77K \quad \text{at } x = 0 \quad \text{for all } t \quad (4)$$

여기서 L 은 유리보어의 전체 길이이다.

식 (1)을 풀기 위해서는 h 값이 필요하며, 유리보어 외부표면에서의 열전달은 기체에 의한 전도와 진공용기 벽으로부터의 복사에 의한 것으로 구성된다. 따라서 $h = h_{gc} + h_{rad}$ 으로 나타내어진다. 내부공간에서의 가스에 의한 열전달을 막기 위해서 가스제거기(getter)가 잔류가스를 제거하기 위해서 일반적으로 사용되지만 벽에 붙은 기체 분자가 떨어져 나오는 아웃개싱 현상을 피할 수 없다. 따라서 내부 기체 압력이 높아지게 되고 이것은 기체전도에 의한 열손실을 증가시킨다. 아웃개싱이 일어남에도 불구하고 기체압력은 연속체 가정의 한계 값 아래에 있다. 따라서 희박기체에서의 열전달을 고려해야 하며 이 때 다음의 식과 같이 가스압력에 의존하는 자유분자, 전이, 연속체 열전도 영역으로 나누어 h 를 구할 수 있다.[4]

$$h_{gc} = 1.48P' \quad \text{for } P < 10^{-4} \text{ Torr} \quad (5)$$

$$h_{gc} = \frac{1.48P'}{1 + 0.34P'} \quad \text{for } 10^{-4} < P < 1 \text{ Torr} \quad (6)$$

$$h_{gc} = 4.35 \quad \text{for } P > 1 \text{ Torr} \quad (7)$$

여기서 P' 의 단위는 $\text{Pa}(\text{N/m}^2)$ 이고 P 단위는 Torr이다. 진공용기의 내부표면을 회색체라고 가정했을 때 복사에 의한 열전달 Q_{rad} 는 다음과 같이 주어진다.

$$Q_{rad} = \frac{\sigma (T_v^4 - T_b^4)}{R_{rad}} \quad (8)$$

여기서 σ 는 Stefan-Boltzmann 상수이며, T_v 는 용기벽의 온도로서 냉각부와 열전달이 무시할 만큼 작으므로 외부 온도 T_∞ 와 같다고 가정한다. R_{rad} 는 다음과 같이 주어진다.[7]

$$R_{rad} = \frac{1 - \epsilon_v}{\epsilon_v A_v} + \frac{1}{A_b F_{bv}} + \frac{1 - \epsilon_b}{\epsilon_b A_b} \quad (9)$$

여기서 ϵ 은 방사율을 뜻하며, A 는 표면적, 하첨자 v 와 b 는 각각 용기와 보어를 의미한다. 진공용기 벽 표면의 방사율은 1에 가깝고 형상계수 F_{bv} 는 그림 1에서 나타나 있는 기하학적인 모양에서 보듯이 1의 값을 가진다.[7] 따라서 진공용기 표면으로부터 유리보어의 미

표 1. 열해석에서 중요하게 쓰이는 극저온 용기 구성요소의 재원

Table 1. List of elements constituting the cryochamber which are important in the thermal modeling

| Element | Material | Dimensions | Properties |
|------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vacuum vessel | Stainless steel | inner diameter=25mm | $\epsilon \approx 1$ |
| Cold well (glass bore) | Pyrex glass | outer diameter =9mm thickness=1mm length=48mm | $\epsilon \approx 0.02$ (gold coated)[5] $\rho=2640\text{kg/m}^3$ $C=800\text{J/kgK}$ $k=1.0\text{W/mK}$ |
| Base | Stainless steel | | |

소 면적이 받는 복사 열유속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dQ_{rad} = \sigma \epsilon_b dA_b (T_\infty^4 - T_b^4) \quad (10)$$

식 (10)에 나타나 있는 온도 차이를 선형화하기 위해서 $T_\infty^4 - T_b^4 \approx 4 T_m^3 (T_\infty - T_b)$ 라고 가정한다. 이때 T_m 는 표면의 온도가 크게 차이가 나지 않을 경우에는 T_∞ 와 T_b 의 평균온도로 볼 수 있지만 위의 경우에는 T_∞ 가 77K보다 4배나 크기 때문에 T_m 을 산술적 평균온도로 정할 수 없다. 따라서 아래의 functional F를 최소화 할 수 있는 온도를 T_∞ 로 정하기로 한다.

$$F = \left| \int_{T_m}^{T_\infty} [T_\infty^4 - T_b^4 - 4 T_m^3 (T_\infty - T_b)] dT \right| \quad (11)$$

위의 식은 복사 열전달량을 온도에 대하여 선형화하기 전과 선형화한 후의 값들의 차이의 절대값을 나타내며, 이를 최소화하는 T_m 을 이용하는 것이 타당할 것이다. $T_m = 273\text{K}$ 일 경우 $F=0$ 이 됨을 쉽게 계산할 수 있다. 이 온도를 이용할 경우 복사에 의한 열전달 계수는 $h_{rad} = 4 \epsilon_b \sigma T_m^3 \approx 3 \epsilon_b$ 로 나타내어진다. 위에서 구한 hg와 hrad를 이용하여 열전달계수 h값을 구한다.

이 문제를 풀기 위해서 음해법(Implicit scheme)을 이용한 유한 차분법이 이용되었다.[8] 식(1)의 에너지 방정식을 이산화하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho C \Delta V \frac{T_n^{i+1} - T_n^i}{\Delta t} = -k A_c \frac{T_n^{i+1} - T_{n-1}^{i+1}}{\Delta x} - h \Delta A_s (T_n^{i+1} - T_\infty) \quad (12)$$

여기서 i는 시간 스텝을, n은 공간 격자 번호를 나타낸다. 이때 $x=0$ 에 해당하는 격자는 원판의 모양을 가지며, 나머지 격자는 속이 빈 원통 모양임을 그림 1에서 쉽게 알 수 있다.

본 연구에서는 과도 열전달의 특성을 구하기 위하여 열침투 깊이(thermal penetration depth)의 변화와 유입된 열전달량의 변화를 계산하였다. 열침투 깊이를 정의할 수 있는 온도로서 시간상수 t_c 를 도입하여 정의하였다.

$$\theta = \frac{T - 77}{T_\infty - 77} = e^{-t/t_c}, \quad t_c = \frac{\rho C V}{h A} \quad (13)$$

무차원온도 θ 의 값이 0.632의 값이 될 때의 시간을 시간상수라고 하는데 t 가 t_c 의 5배가 될 때 θ 는 0.993이 되고 온도 T는 298.4K이 된다. 질소에 의한 냉각이 이루어지는 유리보어 끝에서 이 온도에 도달하는 위치까지의 거리를 열침투 깊이로 두었다.

한편 보어에 전달되는 열전달량 Q_T 는 다음과 같은 식으로 구하였다.

$$Q_T = k A_c \frac{T_2^i - T_1^i}{\Delta x} - h \Delta A_s (T_1^i - T_\infty) \quad (14)$$

여기서 상첨자 i는 시간 스텝을 나타내고, 1과 2는 보어 최상부와 인접 격자를 각각 나타낸다.

3. 해석결과 및 검토

위에 기술된 수치해석방법을 이용해서 과도 열전달의 특성을 조사하였다. 긴 유리보어의 한쪽 끝에 냉각 작용이 이루어지기 때문에 그 끝 부분의 주변에는 기울기가 큰 온도구배가 존재한다. 따라서 이 부분에는 좀더 조밀한 격자를 이용했다. $x=0$ 에서 0.2L까지는 500개의 격자를 만들었고, $x=0.2L$ 에서 L까지 500개의 격자를 사용하였다. 이러한 방법의 타당성을 입증하기 위해서 이미 그 해석해가 알려져 있는 유사한 문제의 해석해(analytical solution)를 구해서 수치적 해와 비교했다. 이를 위해 반무한체의 표면온도가 300K에서 $t=0$ 에서 갑자기 77K로 낮아져서 그대로 유지되는 교체 열전도 문제를 고려하였다. 이 때의 표면 열유속의 해석해는 다음과 같이 구할 수 있다.[9]

$$q_s = -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = k \frac{T_s - 77}{(\pi \alpha t)^{1/2}} \quad (15)$$

그림 2는 해석적인 해와 수치적으로 구한 해를 비교한 것이며 이때 수치적인 해는 유리를 통한 보어의 전도 열전달만을 고려하여 비교하였다. 이 그림에서 보듯이 수치적인 해가 정확히 해석해를 모사함을 알 수 있다. 이러한 계산 방법을 이용해서 비정상상태의 극저온 용기의 냉각에 대한 다양한 변수의 영향을 조사하였다.

그림 3은 시간에 따른 유리보어의 온도분포를 보여준다. 시간이 증가할수록 열침투깊이가 증가하는 것을 볼 수 있으며 보어의 하단부까지 열침투가 도달하는데는 상당한 시간이 걸린다. 그림 4는 유리보어의 열전도도의 변화에 따른 시간에 대한 열침투 깊이의 변화를 나타낸다. 이때 전도도가 증가할수록 열침투 깊이가 증가하는 것을 볼 수 있다. 여기서 주목할 점은 대략적으로 전도의 경우 열침투 깊이는 시간의 제곱근에 비례하며 그림의 곡선 모양도 이에 따르고 있다는 것이다. 방사율과 기체 압력의 영향을 조사한 결과 열침투 깊이는 보어 열전도도 이외의 변수의 영향은 거의 받지 않음을 알 수 있었다. 이는 초기 냉각에서는 열침투 깊이가 짧아서 표면을 통한 복사와 기체 전도 열전달이 큰 영향을 주지 못 한다는 것을 의미한다.

그림 5는 보어의 열전도도의 변화에 따른 과도 열유속의 변화를 나타낸다. 보어의 열전도도가 증가할수록 열전달은 증가한다. 냉각초기에는 급격한 온도의 변화로 큰 값의 열전달이 이루어지지만, 시간이 증가할 수

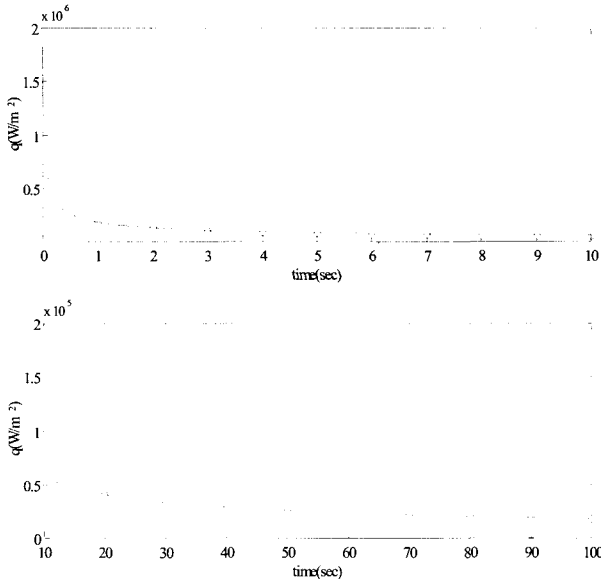


그림 2. 계산 결과의 검증. 선과 원은 각각 해석해와 수치해를 나타낸다.
Fig. 2. Verification of computational accuracy. The line is the analytical solution and circles are from numerical simulation.

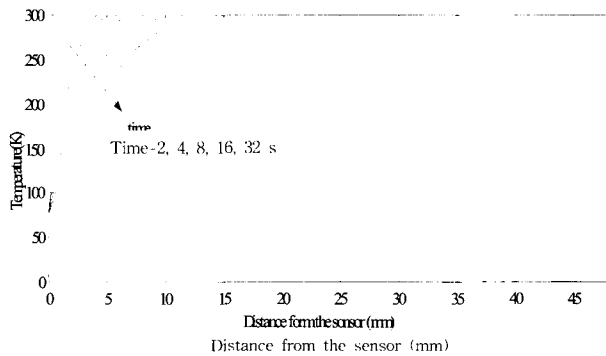


그림 3. 유리 보어에서의 과도 온도 분포.
Fig. 3. Transient temperature profile in the glass bore.

록 보어에 유입되어 액체 질소에 의하여 제거되는 열 유속이 서서히 작아짐을 나타낸다. 이는 다음의 scaling 식을 이용하면 쉽게 이해될 수 있다.

$$Q_c \sim k A_c \frac{\Delta T}{\sqrt{at}} \quad (16)$$

즉 센서와 외기온도의 차이 ΔT 가 일정할 때, 표면 열유속 Q_c 는 시간의 제곱근에 반비례하므로 시간이 증가할수록 비정상 열전달은 작아진다.

한편 그림 6과 그림 7은 잔류 기체의 압력과 유리보어의 방사율에 따른 과도 열유속의 변화를 보여준다. 초기에는 이들 변수가 바뀌어도 열유속에 거의 영향이 없음을 알 수 있다. 그리고 시간이 증가할수록 방사율과 압력의 영향이 점점 커짐을 볼 수 있는데 이는 정상상태로 갈수록 이들 변수가 열유속에 크게 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 즉 정상상태에 가까이 가면 용기내의 압력이 증가할수록, 또한 유리보어의 방사율

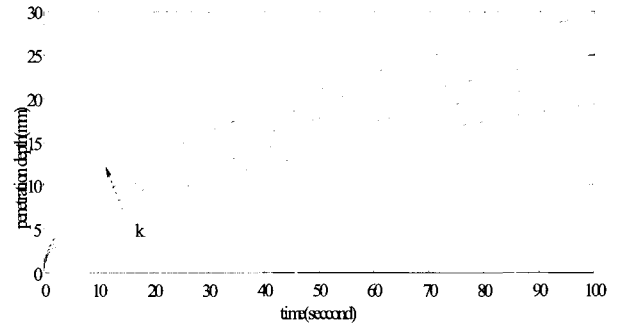


그림 4. 유리 보어 전도도의 침투 깊이에 대한 영향. 화살표 방향으로 k는 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 W/mK로 증가한다.
Fig. 4. Effect of glass bore thermal conductivity on penetration depth variation. Along the arrow, the k increases as 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, and 5.0 W/mK.

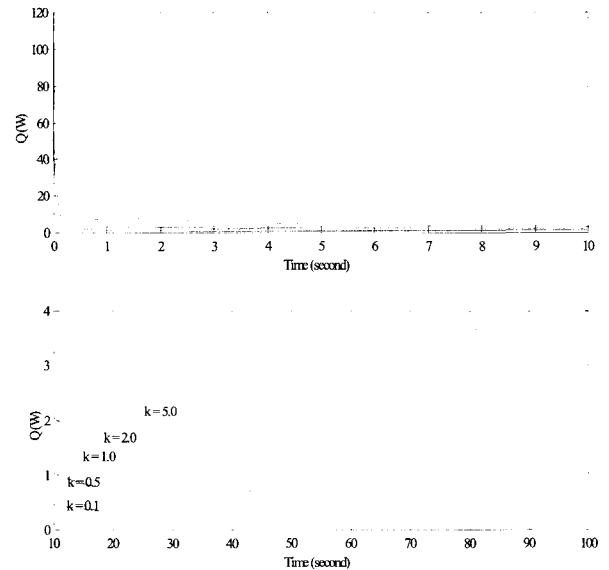


그림 5. 유리 보어 전도도의 과도 열유속에 대한 영향.
Fig. 5. Effect of bore conductivity on transient heat transfer variation.

이 증가할수록 열유입이 증가할 수 있다. 특히 방사율의 경우 열유입에 미치는 영향이 시간이 갈수록 증가하지만, 회색체 가정이 큰 오차를 일으킬 만큼 열유입의 의존도가 커지는 않는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 적외선센서 냉각용 극저온 용기의 과도상태 냉각특성을 예측하기 위한 열해석 방법을 제시하였다. 외기에서 적외선 탐지기로의 열전달은 유리보어를 통한 전도와 잔류 기체에 의한 전도, 그리고 복사 열전달로 구성된다. 비정상상태의 열전달 특성을 수치해석을 통하여 모델링하였고, 유리보어의 열전도계수, 기체압력, 유리보어 외부표면에서의 방사율의 영향을 조사하였다. 유리보어의 두께가 얇기 때문에 1차원의 전도 열전달을 가정하였다. 기체 압력에 의존하는 기체 전도는 회박기체 열전달 이론을 이용해서 결정하였다.

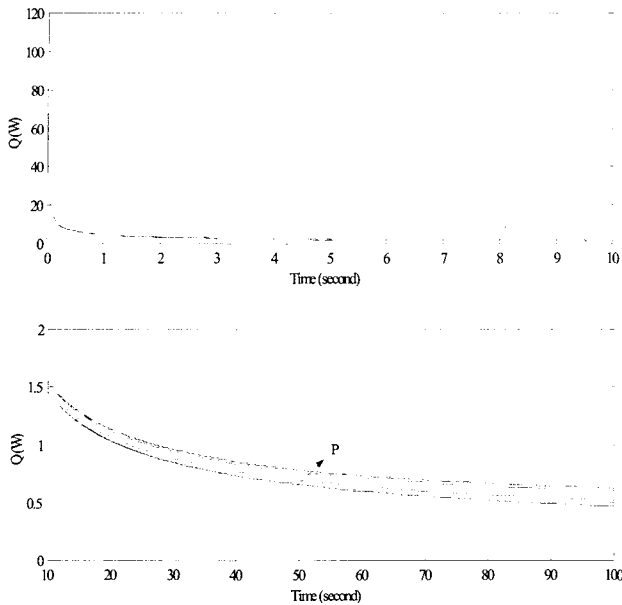


그림 6. 기체 압력의 과도 열유속에 대한 영향. 화살표 방향으로 P는 10⁻⁴, 10⁻³, 10⁻², 10⁻¹, 1 Torr로 증가한다.
 Fig. 6. Effect of gas pressure on transient heat transfer variation. Along the arrow, P increases as 10⁻⁴, 10⁻³, 10⁻², 10⁻¹, and 1 Torr.

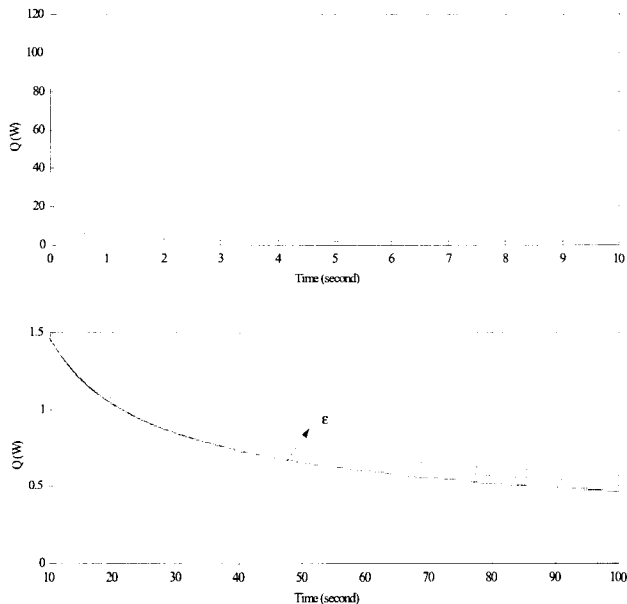


그림 7. 방사율의 과도 열유속에 대한 영향. 화살표 방향으로 ε이 0.1, 0.2, 0.5, 1.0으로 증가한다.
 Fig. 7. Effect of emissivity on transient heat transfer variation. Along the arrow, ε increases as 0.1, 0.2, 0.5, and 1.0.

과도상태의 냉각성능과 매개변수에 대한 관계를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. (1) 열침투 깊이는 열전도도의 영향을 가장 크게 받는다. (2) 잔류 기체와 복사에 의한 열전달은 초기에는 짧은 침투깊이 때문에 열유속에 거의 영향을 주지 않는다. 시간이 증가할수록 침투깊이가 충분히 길어진다면 기체와 복사에 의한 열전달이 중요하게 된다. (3) 유리보어의 열전도도가 높을 경우에는 열침투깊이가 길어지면서 열유

입량이 증가하게 된다. (4) 과도상태에서 열유입의 양은 시간의 제곱근에 반비례한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부와 국방과학연구소의 민군겸용 기술개발사업(과제번호 99-DU-04-A-02)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고 문헌

- [1] F. D. Morten, Infrared Detectors and Their Applications chap. 1, Philips Publication, Eindhoven, Netherlands, 1971.
- [2] H. Kaplan, Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment SPIE, Bellingham, 1992.
- [3] R. E. Fisher, "Lens design for the infrared," Infrared Optical Design and Fabrication (Ed. R. Hartmann and W. J. Smith), SPIE, Bellingham, 1991.
- [4] H.-Y. Kim, B. H. Kang, and D.-Y. Lee, "A parametric study on the cooling characteristics of an infrared detector cryochamber," Cryogenics, Vol. 40, pp. 779-788, 2000.
- [5] T. M. Flynn, Cryogenic Engineering Marcel Dekker, New York, 1965
- [6] W. M. Rohsenow and J. P. Hartnett, Handbook of Heat Transfer chap. 9, McGraw-Hill, New York, 1973.
- [7] A. F. Mills, Heat Transfer Irwin, Concord, 1992.
- [8] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow McGraw-Hill, New York, 1980.
- [9] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, Conduction of Heat in Solids 2nd ed. Oxford Univ. Press, Oxford, 1959.

저 자 소 개



이정훈(李政勳)
 1974년 12월 22일생, 2001년 국민대학교 기계공학과 졸업, 현재 동대학원 기계공학과 석사과정



김호영(金昊永)
 1971년 12월 4일생, 1994년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1996년 MIT 기계공학과 석사, 1999년 MIT 기계공학과 박사, 현재 KIST 선임연구원



강병하(姜炳夏)
 1958년 12월 12일생, 1981년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1983 동대학원 기계공학과 석사, 1990년 Rutgers University 기계공학 박사, 현재 국민대 기계공학과 교수