

◆특집◆ 진공에 의한 저온 유지 기술과 그 응용
극저온 냉각 장치를 위한 단열 기술

김호영*, 강병하**

Thermal Isulation Technology for Cryogenic Cooling Devices

Ho-Young Kim* and Byung Ha Kang**

Key Words : Thermal insulation (단열), Cryogenic cooling (극저온 냉각), Vacuum insulation (진공 단열), Radiation heat transfer (복사 열전달), Gas conduction (기체 전도)

1. 서론

적외선 센서와 초전도 필터 어셈블리 등의 정밀 전자 소자는 열적 잡음 즉 thermal noise 를 최소화하기 위하여 영하 200°C 이하의 극저온으로 냉각시켜야 한다. 전자 소자의 극저온을 달성하고 또한 이를 유지하기 위해서는 극저온 냉동 장치와 더불어 외부로부터의 열유입을 차단하는 단열 기술이 필요하다. 극저온 단열 효율은 극저온 정상 상태에서의 열유입량을 결정하여 냉동기의 성능을 결정한다. 뿐만 아니라 극저온 장치를 상온에서 운전온도까지 냉각시키는데 필요한 쿨다운(cool-down) 시간을 결정하는 중요한 요소이다. 이러한 기술은 관련 산업 분야에서뿐만 아니라 우리 일상에서도 보온병이나 아이스박스 등에 응용되어 생활의 편리함을 제공하고 있기도 하다.

극저온 단열기술은 스코틀랜드 출생의 화학자이자 물리학자인 제임스 듀어(1842-1923)에 의하여 본격적으로 시작되었다고 할 수 있다. 그가 1800년대 후반에 은박막을 입힌 플라스크를 이용하여

진공 단열 기술을 발명한 이후, 한 세기 이상 극저온 단열에 대한 기술 개발이 꾸준히 이루어지고 있다. 본 글에서는 현재까지 개발되어온 극저온 진공단열 기술에 대하여 간단히 소개하고자 한다. 그리고 실제 연구예로서 적외선 열화상 장비 냉각에 쓰이는 극저온 챔버의 단열 성능 해석 방법을 제시한다.

2. 극저온 단열 기술 현황

2.1 진공 단열 (Vacuum insulation)

극저온 용기의 외부로부터 극저온 소자로 유입되는 열은 용기 내부 기체를 통한 전도 및 대류, 소자 지지대를 통한 고체 전도, 그리고 복사를 통하여 전달된다. 진공 단열 방법은 극저온 용기 안을 진공으로 만들어 기체를 통한 전도 및 대류를 차단한 기술이다. 따라서 이 방법에서는 고체 전도와 복사가 지배적인 열전달 기구이므로 이들을 최소화하는 것이 중요하다.

2.1.1 고체 전도와 복사 열전달

먼저 고체 열전도를 살펴 보기 위하여, 온도(T)에 따른 열전도 계수의 변화를 고려한 일차원 열전도 방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q_{sc} = \frac{A}{L} \int_{T_c}^{T_h} k dT \quad (1)$$

* 한국과학기술연구원 열유동제어연구센터

** 국민대학교 기계자동차공학부

Tel. 02-958-5673, Fax. 02-958-5689

Email hoyoung@kist.re.kr

MEMS 기술을 이용한 냉각 기술 및 마이크로 열/유동현상에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

여기서 Q_{sc} 는 지지대를 통한 열전도량, k 는 지지대의 열전도계수, A 는 지지대의 단면적, T_h 는 외부와 연결된 지지대의 온도, T_c 는 극저온 소자와 연결된 지지대의 온도, 그리고 L 은 지지대의 길이를 뜻한다. 식 (1)에서 볼 수 있듯이 지지대를 통한 열전도를 최소화하기 위해서는 낮은 열전도계수를 가진 물질을 선택하고 단면적을 줄이면서 되도록 긴 형상을 가지도록 하여야 한다. 그러나 지지대의 재질을 결정할 때는 열적인 성질 뿐만 아니라 인장강도, 탄성계수, 열팽창계수와 같은 기계적인 특성을 모두 고려하여 한다. 유리나 유리섬유, 테프론, mylar, 나일론 등의 비금속 물질이 지지대로서 뛰어난 성질을 가진다.

한편 복사 열전달량은 다음과 같이 추정할 수 있다. 극저온 용기의 내벽을 표면 1 이라 하고 내부 재질면을 표면 2 라고 할 때, 이 두 표면의 열복사파가 방향과 파장에 의존하지 않는 확산 회색면(diffusive gray surface)이라고 가정한다. 이때 복사 열전달량 Q_{rad} 은

$$Q_{rad} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{R_{rad}} \quad (2)$$

과 같이 표시된다¹. 여기서 σ 는 Stefan-Boltzman 상수이고 복사 저항 R_{rad} 은 다음과 같다.

$$R_{rad} = \frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_2 F_{21}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2} \quad (3)$$

ϵ 은 방사율(emissivity), A 는 표면적을 나타내고, F_{21} 은 형상계수(shape factor)로서 표면 2 에서 나온 에너지 중 표면 1 에 도달하는 에너지의 비율로서 정의된다. 식 (2)에서 보듯이, Q_{rad} 은 온도의 네제곱의 차에 비례하기 때문에 상온의 외부에서 극저온의 내부면까지 유입되는 복사 열전달량은 상당히 크다. 이를 최소화하기 위해서는 방사율이 낮은 표면을 사용하는 것이 필요하다. 구리, 은, 금, 알루미늄 등의 금속이, 매끄러운 표면 상태에서 상온에서는 0.02~0.03, 77K 에서는 0.008~0.018 의 낮은 방사율을 가지므로 복사열 유입을 줄일 수 있는 좋은 재료이다.

2.1.2 잔류 희박 기체 열전달

극저온 용기 내부의 기압이 낮아지면 고체 내에 있던 기체 분자들이 방출되는데 이를 아웃개싱(outgassing)이라고 한다. 방출된 기체 분자의 일부는 고체 표면에 물리적으로 흡착(adsorption)되거나 화학적으로 결합하여 남아있게 된다. 잔류 기체를 최소화하기 위하여 진공 작업을 할 때 가열하는 방법이 효과적이다. 극저온 장치의 운전 중에 아웃개싱된 기체 분자들은 진공도를 떨어뜨려 열유입을 증가시키는 문제를 일으킨다. 기체의 전도열 전달은 연속체 가정을 만족하는 범위에서는 압력에 무관하지만, 극저온 단열에 요구되는 진공도에서는 분자의 평균자유거리(mean free path)가 길어져서 연속체 가정을 쓸 수 없다. 이러한 희박 기체의 열전달은 압력에 대체적으로 비례하기 때문에 높은 진공도를 유지하는 것이 중요하다. 흔히 낮은 압력에서 기체를 흡수하는 게터(getter)를 사용하여 진공도를 유지한다. 게터 물질로는 바륨과 같은 알칼리계 금속, 그리고 티타늄, 지르코늄과 같은 전이 금속 등이 쓰인다.

희박기체의 열전달은 식 (4)와 같이 정의되는 누센수 (Knudsen number)에 따라 네가지 영역으로 나누어 해석할 수 있다.

$$Kn = \frac{\lambda}{l} \quad (4)$$

여기서 λ 는 분자의 평균자유거리이고 l 은 두 고체면 사이의 거리이다. $Kn > 10$ 의 경우 자유 분자 영역 (free molecule regime), $10 > Kn > 0.1$ 의 경우 천이 영역, $0.1 > Kn > 0.01$ 의 경우 미끌림(slip) 영역으로 나누어 지고 $Kn < 0.01$ 부터 연속체 영역에 속한다. 자유 분자 전도 영역에서 동심 원통면 사이의 열전달량 Q_{fm} 은

$$Q_{fm} = A_i \left[\frac{1}{\alpha_i} + \left(\frac{r_i}{r_o} \right) \left(\frac{1}{\alpha_o} - 1 \right) \right]^{-1} \times \frac{P(C_v + \hat{R}/2)}{(2\pi \hat{M} \hat{R} T_g)^{1/2}} (T_i - T_o) \quad (5)$$

와 같이 표시되어진다². 여기서 A_i 는 내측 원통의 표면적, α 는 수용계수(accommodation coefficient), r 은 반지름, P 는 압력, C_v 는 정압 비열, \hat{R} 은 일 반기체상수, \hat{M} 은 기체의 분자량, 그리고 T_g 는

기체 온도를 뜻한다. 수용계수 α 는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \frac{E_i - E_r}{E_i - E_w} \quad (6)$$

여기서 E_i 는 표면에 입사하는 기체 분자의 에너지, E_r 은 표면에서 반사되는 기체 분자의 에너지, 그리고 E_w 는 만약 기체 분자가 표면 온도와 평형을 이루었다면 가질 수 있는 에너지를 의미한다. 수용계수는 기체와 표면의 조성과 온도에 따라 달라지는데, 공기의 경우 대략적으로 1 에 가까우며 헬륨과 수소의 수용계수는 0.3~0.5 정도이다.

천이 및 미끌림 영역에서는 다음과 같은 내삽 관계식을 사용하여 열전달량 Q_i 를 추정할 수 있다².

$$Q_i = Q_{fm} \left[1 + \left(\frac{Q_{fm}}{Q_c} \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

여기서 Q_c 는 연속체 영역의 열전달량으로서 다음과 같이 구해진다.

$$Q_c = \frac{2\pi L}{\ln(r_o/r_i)} k_g (T_i - T_o) \quad (8)$$

L 은 원통의 길이, k_g 는 기체의 열전도도를 나타낸다.

Fig. 1 은 위의 관계식을 이용하여 구한 희박 공기의 열전달계수를 압력의 함수로 도시한 것이다. 이 때 공기는 300K 와 77K 의 동심 원통면 사이에 있으며, 원통의 길이 48 mm, 내측 원통의 지름 9 mm, 외측 원통의 지름 25 mm 로 가정하였다. 이와 같은 조건에서는 4×10^{-4} Torr 이하의 압력에서 자유 분자 전도가 일어나고, 통상 1 Torr 이상에서는 연속체 가정을 쓸 수 있다고 알려져 있다!

2.2 기타 단열 방식

2.2.1 다층 단열 (Multilayer insulation)

다층 단열 방식은 진공 단열 방식에서 여전히 유입되는 복사열전달을, 복사 쉴드(radiation shield) 를 이용하여 차단하는 방법이다. 복사 쉴드는 무엇보다 방사율이 낮아야 하므로 알루미늄이나 구리의 박막 또는 코팅이 많이 쓰인다. 복사 쉴드의 수가 늘어날수록 복사 열전달은 줄어들게 되므로 다층 구조를 쓰게 된다. 모든 표면의 방사율이 같

다고 가정하면 N 개의 복사 쉴드를 두었을 때의 복사 열전달이 복사 쉴드를 두지 않았을 때에 비하여 $(N+1)$ 배 낮아진다³. 복사 쉴드 사이의 공간에는 낮은 열전도도를 가진 물질을 넣어서 열전도를 줄여야 한다. 공간을 채우는 물질로는 유리 종이 나 섬유, 실크 스크린을 쓰며, 때로는 복사 쉴드를 구기거나 요철처리하여 접촉점을 최소화시키기도 한다. 한편 지나치게 많은 쉴드를 넣으면 고체 사이의 압력이 커져 오히려 열전도를 증가시키게 되므로 적정 수의 쉴드를 사용하여야 한다.

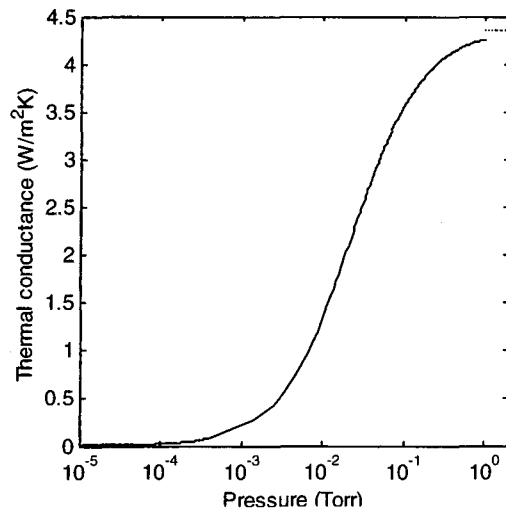


Fig. 1 The thermal conductance of the gaseous conduction depending on the gas pressure

Table 1 Heat transfer through 1 inch of typical cryogenic insulations⁴ ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)

Boundary temperature(K)	High vacuum ($\epsilon = 0.02$)	Multilayer (0.1 g/cm ³)	Evacuated powder (0.07 g/cm ³)
300 and 76	910	70	260
300 and 20	920	55	220
300 and 4	920	47	170

2.2.2 진공 분말 단열 (Evacuated porous insulation)

단열시켜야 할 공간을 진공으로 만드는 대신, 분말로 채우면, 분말을 통한 유효 열전도도가 기체의 전도도 정도로 낮아지고 복사 열전달 또한

줄어든다. 여기서 기체 압력을 낮추어 분자의 평균자유거리가 빈공간 사이의 간격에 가깝게 증가하면 유효 열전도도 또한 상당히 감소한다. 여기에 쓰이는 분말 재료로는 다공성의 실리카(silica), 펄라이트(perlite), 마이카(mica) 등이 있다. 만약 외부 온도가 300K 이고 극저온 소자가 77K 정도에서 작동한다면 복사열전달이 분말을 통한 전도보다 더 많기 때문에 분말 단열이 진공 단열 보다 좋은 단열 성능을 보인다. 그러나 외부 조건이 77K 이고 최종 극저온 조건이 20K 인 장치에서는 복사보다 분말 열전도가 더 크기 때문에 진공 단열이 더 바람직하다.

2.2.3 단열 성능 비교

위에서 열거한 단열 방법들에 의한 두 평판사이의 열전달률을 Table 1 에서 비교하였다⁴. 실제 응용 시에는 열전달률 뿐만 아니라 각 단열 방법에 필요한 비용을 함께 고려하여 기술적 그리고 경제적으로 최적의 단열 방법을 선택하여야 한다.

3. 적외선센서 극저온 용기의 진공 단열 해석

3.1 연구필요성 및 대상

적외선 센서를 이용하는 야간 투시경이나 감시, 조준 망원경 등은 현대전에 있어서 필수 장비로 되어있다. 적외선 센서란 물체에서 방사되는 파장 0.75 μm 이상의 복사선을 검출하여 식별하는 소자로서 기계, 구조 및 건물의 이상검지를 위한 열화상진단, 의학분야에서의 신경기구분석, 에너지분야의 화염, 연소가스의 온도분포 계측 등에 활용되고 있다. 그러나 적외선 센서는 액체질소 온도이하의 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, 70 K 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 냉동부 자체를 최소화하는 것이 매우 중요하다. 실제로 사용하는 적외선 센서 챔버의 개략도가 Fig. 2 에 나타나있다. 기본적으로 극저온 챔버는 진공용

기(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 열유입을 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 진류도입선 및 극저온 챔버를 설계·제작하여야 한다.

본 연구에서 해석한 챔버는 스틸링 냉동기에 의해 냉각되도록 설계되어 있다. 즉 유리보어의 안쪽에 cold finger 를 넣고 그 끝인 cold finger 가 센서의 열을 흡수한다. 적외선 센서의 작동온도는 매우 낮기 때문에 챔버 외부로부터의 열유입을 최소화하는 것이 매우 중요하며 과도 열전달 특성의 해석을 수행하였다.

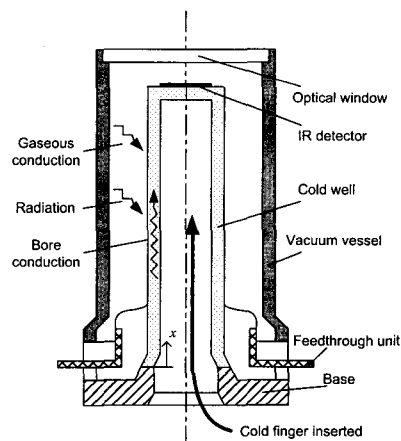


Fig. 2 A schematic diagram of a typical cryochamber and the mechanism of heat transfer

3.2 해석 모델링

외부의 열이 챔버의 가장 차가운 지점으로 전달되는 센서 어셈블리에서 일어나는 각종 열전달 양태를 Fig. 2에 표시하였다. 열은 얇은 보어를 따라 상부의 저온지역까지 전도되며, 보어의 외부벽과 진공용기의 내부벽에서 복사열전달이 일어난다. 진공용기내부를 진공으로 만들어도 남아있는 잔여 가스로 인하여 압력에 따른 열전달이 일어난다. 그러나 용기내부의 압력이 낮고 형상학적 축방향의 길이가 상대적으로 더 크기 때문에 자연대류의 영향을 무시할 수 있다. 이런 열전달 형태 중에서 외부에서 유리보어를 통하여 전달되는 전도열과 진공의 공간을 통하여 전달되는 복사열이 가장 중요한 열유입 형태라고 할 수 있다. 또한 센서 어셈블리를 오래 작동시키면 챔버내 표면의 아웃가싱(outgassing)으로 인하여 진공도가 떨어짐이 잘 알려져 있고, 이러한 희박 기체가 열 유입에 기여할 수 있다. 해석의 대상이 되는 센서 어셈블리는 원통형의 비교적 간단한 형태를 가지고, 또한 열전도의 통로가 되는 보어의 두께가 극히 얇아서 전도 현상을 일차원으로 가정 할 수 있다. 따라서 반경방향의 온도구배는 축방향의 온도구배에 비교하여 무시할 수 있다. 보어의 내부의 온도분포가 보어 벽의 온도분포와 동일하다고 가정하여 보어 내부로의 열전달을 무시하였다. 금속바닥과 유리 보어사이의 접촉열저항은, 유리가 바닥에 녹아서 붙어있기 때문에 무시할 수 있다. 금속바닥의 온도는 외기온도와 같다고 가정하였다. 유리보어의 끝에 있는 탐지기는 에폭시에 의해 고정되어져서 센서와 유리 보어상부의 온도는 거의 같다. 유리 보어 상부의 내부는 액체질소(77K)로 냉각이 된다.

3.2.1 정상상태 열해석

정상상태에서 센서의 온도는 77 K로 유지되어진다. cold well 의 온도분포에 대한 fin equation 을 다음과 같이 세울 수 있다.

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0 \quad (9)$$

여기서 θ 는 cold well 온도 T 와 cold well 의 바닥 온도 T_b 와의 차이이다. 또 m^2 은 $m^2 = \pi d_b h / k A_c$ 로 나타내며, 여기서 d_b 와 A_c 는 각각 cold well 의 외부 직경과 단면적을 나타낸다.

금속바닥(stainless steel)과 유리 보어 사이의 접촉 열저항은 유리가 바닥에 녹아서 붙어있기 때문에 무시할 수 있다. 그리고 센서와 유리 보어 상부의 온도는 거의 같다. 따라서 유리 보어 양쪽에서의 온도가 식 (9)의 경계조건이 된다.

앞선 경계조건을 대입하고 식 (9)를 풀면 다음 식을 얻게 된다

$$T = T_\infty - (T_\infty - T_d) \frac{\sinh mx}{\sinh mL} \quad (10)$$

여기서, T_d 는 센서 온도(77 K)이고, T_∞ 는 외부온도, L 은 cold well 의 길이이다. 정상 냉각부하 Q_L 은 전도 열유속과 센서에서의 열발생의 합으로 결정되어진다.

$$Q_L = -k A_c m (T_d - T_\infty) \frac{\cosh mL}{\sinh mL} + Q_{bias} \quad (11)$$

m 값을 계산하기 위해서는 h 값이 필요하며, cold wall 표면에서의 열전달은 기체에 의한 전도와 진공용기 벽으로부터의 복사에 의한 것으로 구성된다. 기체 전도와 복사 열전달은 위의 2.1 에서 제시한 방법에 따른다⁵.

3.2.2 과도상태 열해석

정상상태 냉각부하 뿐만 아니라 적외선 센서가 얼마나 빨리 운전 온도로 냉각되는지를 결정하는 과도 열반응이 중요하다. 탐지기가 상온에서 77 K 로 떨어지는데 걸리는 시간을 쿨다운 시간(cool-down time)으로 나타내는데 이것은 센서의 냉각시스템의 과도 성능을 측정하는 기본적인 값이다. 1 차원 비정상전도와 표면에서의 열유속을 이용해서 cold well 에서의 에너지 보존식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{m^2}{\rho c} (T - T_\infty) \quad (12)$$

여기서 t 는 시간을 의미하고, α , ρ , c 는 각각 유리 보어의 열확산 계수, 밀도, 열용량을 나타낸다. Cold well 과 센서가 초기 상태에서 T_∞ 이고, cold tip 에서 냉동기가 작동하면서 냉각이 시작되는 경우를 생각해 보자. 이때 바닥에서의 온도는 계속 T_∞ 를 유지한다.

반대편 끝에서의 경계조건은 복잡한데 왜냐하면 cold well 끝부분의 열용량을 고려해야 하기 때문이다. 또한 냉동기의 냉각용량은 끝부분 온도에 대한 함수이다. 따라서 끝부분에서의 열제거율은 그 부분의 온도에 의존한다. 끝 부분에서의 온도에 대한 냉각용량에 대한 데이터는 냉동방식에 따라 달라지는데 이 연구에서는 극저온 냉동기의 냉각 용량이 끝부분에서의 온도에 대해서 선형적인 함수라고 가정한다. 따라서 과도 냉각을 Q_c 는 다음과 같다.

$$Q_c = aT(t, x=L) + b \quad (13)$$

여기서 a 와 b 는 특정 극저온 냉동 방식에 의해서 정해진다. 본 연구에서는 $a=0.039$ W/K 와 $b=-2$ W 로 한다. 이 값은 입력 에너지가 35 W 일 때, 77 K 에서 카르노 효율의 8.3%에 해당하는 COP 를 가지고 1 W 의 냉각요량을 가지는 극저온 냉동기의 성능에 기초하고 있다. 식 (12)를 풀기 위해서 수치해석적인 방법을 이용했다.

3.3 해석 결과

3.3.1 정상상태 열전달 해석 결과

Fig. 3 은 cold well 의 표면에서 기체에 의한 전도($h > 0$)가 있을 때와 그 영향이 없는 경우($h = 0$)에 대한 정상상태에서의 온도 분포를 나타낸다. $h = 0$ 일 경우 온도는 선형분포를 나타낸다. 반면에 $h > 0$ 경우 표면에서의 열유속이 온도 분포를 상승시키고 $x=L$ 에서 온도 구배가 증가한다. 표면 열유속의 영향을 나타내기 위하여 다음과 같은 무차원 열유속을 정의한다.

$$Q_L^* = \frac{Q_L}{-kA_c(T_d - T_\infty)/L} \quad (14)$$

즉 Q_L^* 는 순수 보어 전도에 비해 기체 전도와 복사 에 의하여 많은 열유속이 증가하였는지를 보여주는 지표이며, 이를 Fig. 4 에 도시하였다.

3.3.2 과도상태 열전달 해석 결과

위에 기술된 것처럼 수치해석방법을 이용해서 과도 상태의 적외선 센서 극저온 챔버의 열적 반응을 조사했다. 유리 보어가 길고 cold well 의 한쪽 끝에서 냉각 작용이 이루어지기 때문에 그 끝

부분의 주변에는 기울기가 큰 온도 구배가 존재한다. 따라서 이 부분에는 cold well 의 다른 영역보다 좀더 조밀한 격자를 이용하였다.

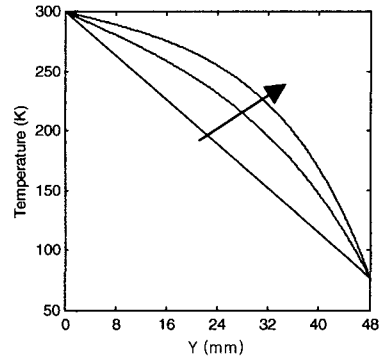


Fig. 3 Steady temperature profile in the cold well. Along the arrow, $h=0, 1.42$ and 3 W/m²K

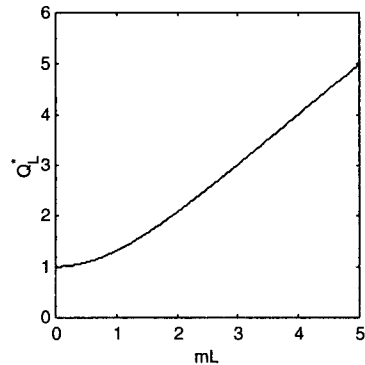


Fig. 4 Nondimensional cooling load vs mL

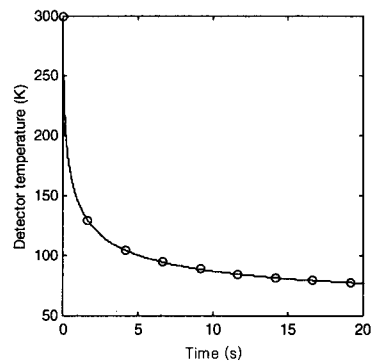


Fig. 5 Verification of computational accuracy

본 연구에서 구한 수치해의 타당성을 입증하기 위해서 이미 그 해석해가 알려져 있는 비슷한

문제의 수치해를 구해서 해석해와 비교했다. 이를 위해서 반무한체가 $y=0$ 에서 $Q_c = aT + b$ 의 비율로 냉각된다고 생각하자. 이 경우는 균일한 단면을 가지고 표면 열유속이 없을 경우의 cold well 에서의 열응답을 해석한 것으로 볼 수 있다. 흥미를 가지는 시간 간격에서의 열침투 깊이가 cold well 의 길이 보다 작기 때문에 반무한체라는 가정이 이용된다. Fig. 5 는 해석적인 해와 수치적으로 구한 해를 비교한 것이며 이것은 수치적인 해의 정확성을 입증해준다. 이러한 계산방법을 이용해서 과도 상태의 극저온 챔버의 냉각에 대한 다양한 변수에 대한 영향을 조사했다.

Fig. 6 (a)는 시간에 따른 cold well 에서의 온도 분포를 보여준다. 센서의 온도가 77 K 에서 300 K 로 내려가는 영역이 관심을 두어야 할 시간 영역이고, 이 시간영역에서는 온도분포가 끝부분(cold tip)에서 15 mm 이내 존재한다. Fig. 6 (b)는 시간에 따른 센서의 온도분포 강하를 보여준다. 이때 27.85 초 후에 77 K 에 도달한다. 냉각초기 단계에는 높은 냉각용량 때문에 온도가 급격히 하강하지만 시간이 지나면서 센서부분의 온도가 내려가면서 온도하강율이 줄어든다. 쿨다운 시간은 가스압력(a), 보어 전도계수(b), 센서의 열용량(c), 대기온도(d)에 따라서 달라지는 양상을 보여준다. 수치 해석 결과에 대한 보다 자세한 토의는 참고문헌⁵에 나와있다.

4. 결론

본 글에서는 정밀 전자 소자들을 극저온으로 냉동시키는 데 필요불가결한 극저온 단열 기술에 대하여 간단히 알아보았다. 역사가 가장 오래되고 기본적인 진공 단열 기술로 시작하여, 공간에 고형의 물질을 삽입하는 다층 단열 기술과 분말 단열 기술에 대하여 토의하였다. 실제 응용시에는 요구되는 열적 성능과 경제적 제한 조건을 고려하여 가장 적합한 단열 방법을 선정하도록 하여야 한다.

또한 극저온 단열 용기의 실제 열해석 예로서 적외선 센서의 극저온 용기에 대한 정상 및 과도 열전달 해석에 대하여 간단히 기술하였다. 정상 상태의 경우는 많은 경우 해석적인 해를 구할 수 있지만, 시간에 따라 온도가 변하는 과도 상태의 경우는 수치해석적인 방법이 요구된다. 열해석에서

일반적으로 쓰이는 유한차분법이 극저온 단열 용기의 열해석에도 유용하게 쓰일 수 있음을 보였다.

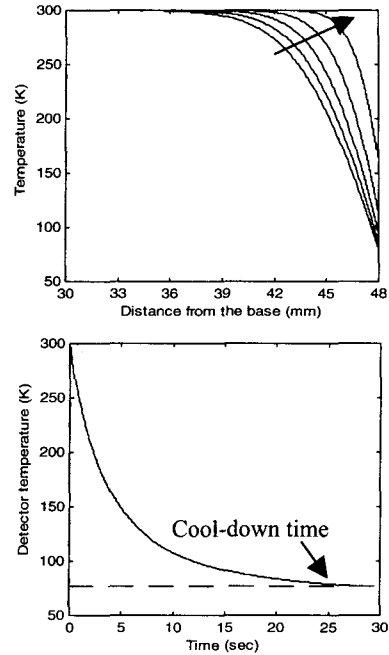


Fig. 6 Transient temperature profile in the cold well (a), and the response of the detector temperature with time (b). In (a), along the arrow, the time increases as $t=4.15, 9.15, 14.15, 19.15$ and 24.15 s. The horizontal line in (b) indicates 77K. The gas pressure $P=10^{-4}$ Torr is assumed

참고문헌

1. Mills, A. F., Heat Transfer, Irwin, Concord (MA), 1992.
2. Springer, G. S., "Heat Transfer in Rarefied Gases," Advanced Heat Transfer, Vol. 7, pp. 163-218, 1970.
3. Incropera, F. P and De Witt, D. P., Introduction to Heat Transfer, 2nd Ed., Wiley, New York, 1990.
4. Flynn, T. M., Cryogenic Engineering, Marcel-Dekker, New York, 1997.
5. Kim, H.-Y., Kang, B. H., and Lee, D.-Y., "A parametric study on the cooling characteristics of an infrared detector cryochamber," Cryogenics, Vol. 40, pp. 779-788, 2000.