

극저온 시스템의 복사열드의 열전달 해석

Heat Transfer Analysis of the Radiation Shield in Cryogenic Systems

정은수*, 박희찬**, 양형석***, 장호명*

Eun Soo Jeong*, Hee Chan Park**, Hyung-Suk Yang***, Ho-Myung Chang*

Abstract: A numerical model to obtain the temperature distribution in a radiation shield of cryogenic systems was proposed. Conformal mapping was used to transform the eccentric physical region of the upper plate to the concentric numerical region. The effects of the thickness of the radiation shield, the emissivities of the vacuum chamber and the radiation shield, and the eccentricity between the centers of the upper plate and the contact area with a cryocooler on the maximum temperature difference in a radiation shield were shown.

Key Words: radiation shield, heat transfer model, temperature, conformal mapping

열드와 직접 접촉하여 냉각한다. [3] 증기냉각이나 액체질소냉각방식에서는 복사열드에 고르게 부착된 파이프 내부를 증기나 액체질소가 순환하므로 비교적 균일한 온도분포를 얻을 수 있다. 그러나, 냉동기로 냉각되는 복사열드의 경우에는 복사열드의 일부분만이 냉동기와 접촉하므로 균일한 온도분포를 얻기 위해서는 복사열드의 두께를 적절하게 선정하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 복사열드의 열전달 해석모델을 제시하여 복사열드의 두께, 복사열드와 진공용기의 방사율(emissivity), 복사열드 상판(upper plate)과 냉동기 접합부의 편심도 등이 온도분포에 미치는 영향을 알아보았다. 이 해석모델을 이용하면 원하는 온도분포를 얻기 위한 복사열드의 두께를 선정할 수 있다. 또한, 본 연구의 해석모델은 증기에 의하여 냉각되는 저온용기의 목(neck)과의 열적 접촉에 의하여 냉각되는 복사열드의 경우[4]에도 적용할 수 있다.

1. 서 론

극저온 액체를 저장하거나 극저온 환경을 만드는 극저온 시스템에서 진공이 잘 유지될 경우 대류에 의한 열유입과 잔류가스에 의한 전도열유입은 매우 작다. 그러므로, 극저온 시스템의 효율적인 운전을 위해서는 기계적 지지대를 통한 전도열유입과 복사에 의한 열유입을 줄이는 것이 중요하다. 열전도도가 낮은 재료를 사용하거나 길이를 길게 하면 기계적 지지대를 통한 열유입을 매우 작게 할 수 있다. 복사열유입을 억제하기 위해서는 고온 표면과 저온 표면 사이에 복사열드(radiation shield)를 설치하는데, 복사열드를 냉각하면 극저온으로의 복사열유입을 크게 줄일 수 있다. [1,2]

복사열드를 냉각하는 방법은 증기냉각, 액체질소냉각, 냉동기에 의한 냉각으로 나눌 수 있다. 증기냉각 방식은 액체헬륨이나 액체수소 등의 저장용기나 액체헬륨 등의 증발을 통하여 저온을 유지하는 액체냉각시스템에서 사용되는 방식으로, 증발된 기체가 외부로 배출되기 전에 복사열드에 부착된 파이프의 내부를 흐르며 복사열드를 냉각시킨다. [2] 액체질소냉각방식은 비교적 가격이 저렴한 액체질소를 복사열드에 부착된 파이프의 내부로 순환시켜 복사열드를 냉각하는 방식이다. [1] 냉동기를 이용하여 저온을 얻는 냉동기냉각 시스템에서는 보통 2단 냉동기의 1단 저온부가 복사

2. 해석 모델

Fig. 1은 복사열드의 대략적인 모양을 보여준다. 복사열드의 외부에 있는 진공용기의 내면에서 진공을 통하여 복사열드로 복사열이 유입된다. 이 복사열들은 전도에 의하여 복사열드 상판과 냉동기의 접합부로 전달되고, 냉동기를 통하여 외부로 방출된다. 복사열은 절대온도의 4승에 비례하므로 복사열드의 내부로 전달되는 복사열은 진공용기에서 유입되는 복사열에 비하여 매우 작으므로 무시할 수 있다. 또한, 복사열드의 상판에는 전류도입선(current lead), 기계적 지지대, 그리고 계측용 전선이 통과하기 위한 구멍이 있는 경우도 있으나, 구멍의 크기가 대부분 작으므로 무시하였다.

2.1. 열전도방정식

직교좌표계의 열전도방정식은 다음과 같다.

$$kt \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \ddot{q}_{rad} = 0 \quad (1)$$

여기서 k 는 열전도도, t 는 복사열드의 두께, T 는 온도이다. \ddot{q}_{rad} 은 복사에 의한 열유속을 나타내는데 다음과 같이 표현된다. [5]

$$\ddot{q}_{rad} = \frac{\sigma(T_o^4 - T^4)}{(1 - \epsilon_o)/\epsilon_o + 1/F_s + (1 - \epsilon_i)/\epsilon_i} \quad (2)$$

* 정 회 원 : 홍익대학교 기계공학과

** 학생회원 : 홍익대학교 대학원 석사과정

*** 정 회 원 : 홍익대학교 과학기술연구소

원고접수 : 2002년 03월 19일

심사완료 : 2002년 05월 17일

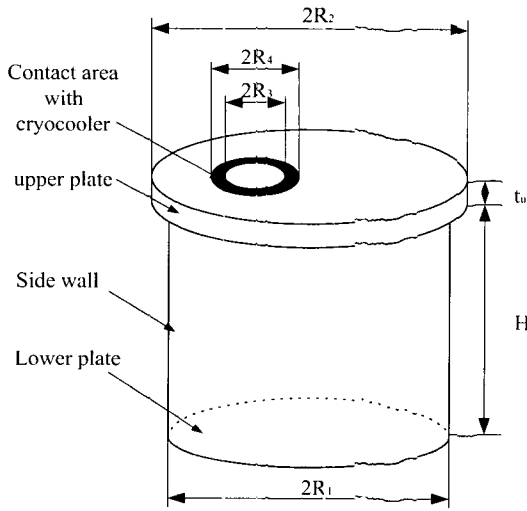


그림 1. 복사열도의 구조

Fig. 1. Schematic diagram of a radiation shield

σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, F_v 는 형상계수, T_o 는 진공용기의 온도이다. ϵ_o 와 ϵ_s 는 진공용기와 복사열도의 방사율을 나타낸다. 복사열도의 측판은 원통모양이나 지름에 비하여 두께가 매우 얇으므로 식 (1)을 적용할 수 있다.

원통좌표계의 열전도방정식은 다음과 같다.[5]

$$kt \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right] + \ddot{q}_{rad} = 0 \quad (3)$$

상판과 측판(side wall) 접합부의 접촉에 의한 열유속은 다음과 같이 표현된다.[5]

$$\ddot{q}_{ic} = \frac{\Delta T}{R_{ic}} \quad (4)$$

여기서 ΔT 는 접하고 있는 면과 면 사이의 온도차이고 R_{ic} 는 열접촉저항(thermal contact resistance)이다.

2.2. 등각사상(Conformal Mapping)

복사열도의 측판과 하판(lower plate)에 각각 직교좌표계와 원통좌표계의 열전도방정식(식 (1)과 식 (3))을 적용하여 온도분포를 구할 수 있다. 그러나, 상판에서 냉동기 접합부는 일반적으로 편심되어 있으므로 식 (3)를 적용하기는 곤란하다. 이러한 문제의 해를 구하기 위해서는 수치적으로 격자를 생성(grid generation)하여 물리평면을 계산평면으로 좌표변환하는 방법이 많이 사용되고 있으나[6], 기하학적 형상이 바뀌면 격자생성을 다시 해야 하고 계산이 복잡해지는 단점이 있다.

Fig. 2(a)는 복사열도 상판의 냉동기 접합부의 가장 바깥 쪽과 상판과 측판의 접합부의 가장 안쪽 사이의 영역을 나타낸다. 이 편심된 영역을 다음과 같은 복소함수(complex function)를 사용하여 사상(mapping)하면 Fig. 2(b)의 동심원 사이의 영역으로 변환할 수 있다.

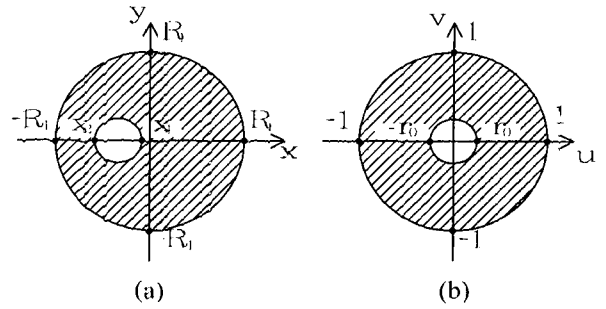


그림 2. 식(5)에 의한 등각사상

Fig. 2. Conformal mapping by Equation (5)

$$w = f(z) = \frac{R_1 b - z}{bz - R_1} \quad (5)$$

여기서 $z = x + iy$ 이고 $w = u + iv$ 이다. b 와 r_0 는 다음과 같다.

$$b = \frac{R_1^2 + x_1 x_2 - \sqrt{(R_1^2 - x_1^2)(R_1^2 - x_2^2)}}{R_1(x_1 + x_2)} \quad (6)$$

$$r_0 = \frac{R_1^2 - x_1 x_2 - \sqrt{(R_1^2 - x_1^2)(R_1^2 - x_2^2)}}{R_1(x_1 - x_2)} \quad (7)$$

상판의 중심과 냉동기 접합부의 중심이 같을 경우에는 $f(z) = z/R_1$, $r_0 = x_1/R_1$ 이 된다.

식 (5)를 이용하여 직교좌표계의 열전도방정식 (1)을 변환하면 다음과 같이 표현된다.[7]

$$kt |f'(z)|^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial v^2} \right) + \ddot{q}_{rad} = 0 \quad (8)$$

w -평면에서 z -평면으로 역변환하는 복소함수를 $z = F(w)$ 라 하면 $f(z) = dF/dw$ 의 관계가 성립하므로 [7] 식 (8)은 다음과 같이 표현된다.

$$kt \left(\frac{\partial^2 T}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial v^2} \right) + \left| \frac{dF}{dw} \right|^2 \ddot{q}_{rad} = 0 \quad (9)$$

3. 수치해석 방법

Fig. 1에서 분수 있는 것과 같이 복사열도의 온도 분포는 상판의 중심과 냉동기 접합부의 중심을 잇는 선에 관하여 대칭이므로 반쪽의 온도분포만 구한다. 상판을 계산평면으로 사상하면 Fig. 2(b)와 같이 동심원 사이의 영역으로 변환되므로 식 (9)를 원통좌표계로 변환하여 온도분포를 구할 수 있다. Fig. 3은 상판에 대한 계산평면의 격자와 이 격자들에 대응하는 물리평면의 격자를 보여준다.

복사열유속 \ddot{q}_{rad} 은 다음과 같이 선형화하여 계산용이하게 하였다.

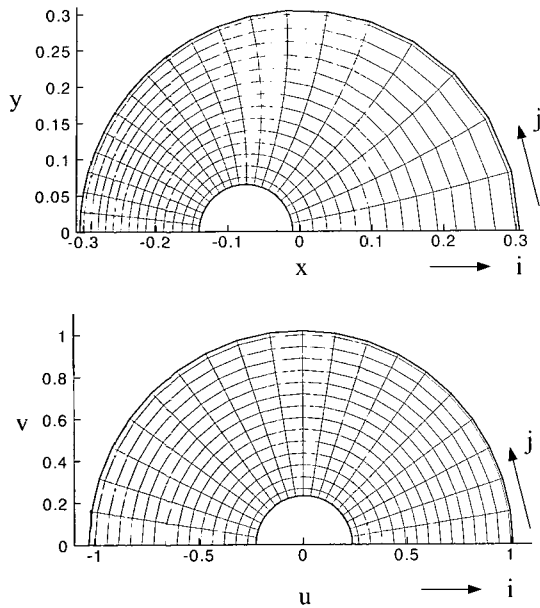


그림 3. 상판의 물리평면과 계산평면
 Fig. 3. Physical plane and numerical plane of upper plate

$$\ddot{q}_{rad} = h_r(T_o - T) \quad (10)$$

$$h_r = \frac{\sigma(T_o^2 + T^2)(T_o + T)}{(1 - \epsilon_o)/\epsilon_o + 1/F_s + (1 - \epsilon_i)/\epsilon_i} \quad (11)$$

복사열전달계수 h_r 은 각 격자의 온도를 새로 구할 때마다 다시 계산하였고, 3중대각행렬해법(Tri-Diagonal Matrix Algorithm)을 이용한 선순법(line-by-line method)을 사용하여 온도를 구하였다.[6]

4. 결과 및 토의

본 연구의 계산에 사용된 기준조건은 $R_1=0.3$ m, $R_2=0.305$ m, $R_3=0.065$ m, $R_4=0.075$ m, 측면의 높이 $H=0.5$ m 상판의 두께 $t_u=0.006$ m, 측면과 하판의 두께 $t_s=t_L=0.002$ m, 진공용기 내면의 온도 $T_o=300$ K, 냉동기 접합부의 온도 80K, 진공용기의 방사율 $\epsilon_o=0.2$, 복사설드의 방사율 $\epsilon_i=0.02$, 형상계수 $F_s=1.0$ 이다. 복사설드의 재질은 알루미늄으로 열전도도 $k=222$ W/m-K이다. 상판과 측면 사이의 열접촉저항은 $R_{lc}=5 \times 10^{-4}$ m²K/W을 사용하였는데, 이것은 접촉압력이 100 kPa인 알루미늄 판 사이의 진공계면에서의 값이다.[5] 상판의 중심과 냉동기 접합부의 중심 사이의 거리 $d=0.075$ m이다. 상판과 하판의 반경방향 그리고 측면의 길이 방향으로 각각 50개의 격자를 사용하였고, 원주 방향으로 50개의 격자를 사용하였다.

복사설드의 재질을 구리로 하면 알루미늄보다

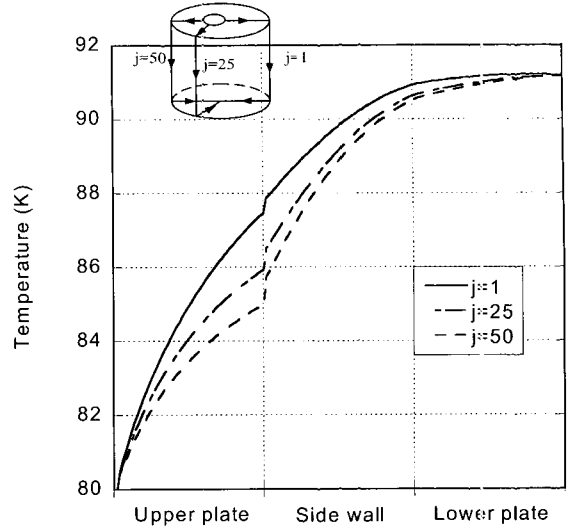


그림 4. 복사설드의 온도분포
 Fig. 4. Temperature distribution in a radiation shield

열전도도가 크므로 (100K에서 약 1.6배[5]) 복사설드의 두께를 줄일 수 있다. 그러나, 구리의 밀도는 알루미늄 밀도의 3배 이상이므로[5] 복사설드의 무게는 증가한다. 본 연구에서는 복사설드를 경량화하기 위하여 알루미늄을 사용하였다. 알루미늄의 열전도도는 온도의 함수이나, 복사설드의 온도 변화는 일반적으로 크지 않으므로 90K에서의 값을 사용하였다.[1] 본 연구에서 사용한 복사설드의 온도는 80-110K 사이의 값을 갖는데, 이 온도 범위에서 알루미늄의 열전도도는 약 5% 변화한다.

Fig. 4는 원주방향 격자 j 가 1, 25, 50일 때의 온도분포를 보여준다. $j=1$ 과 50은 각각 x -축의 양의 방향과 이루는 각도 θ 가 0°와 180°인 선들을 나타내고, $j=25$ 는 θ 가 대략 120°인 선들을 나타낸다. Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 θ 가 커질수록 냉동기 접합부와 상판의 바깥쪽 사이의 거리가 짧아지므로 j 가 커질수록 상판과 측면, 그리고 하판의 온도가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 상판과 측면 사이에서 온도가 갑자기 증가하는 것은 상판과 측면 사이의 열접촉 저항에 의한 것이다. 이후에 나오는 그림들의 결과는 모두 온도가 가장 높은 $j=1$ 일 때의 결과를 나타낸다.

Fig. 5는 복사설드의 방사율 ϵ_i 가 온도분포에 미치는 영향을 보여준다. ϵ_i 가 0.01에서 0.06으로 증가하면 복사설드의 최대온도차가 6K에서 29K로 상승하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 복사설드의 단위면적당 표면복사저항 $(1 - \epsilon_i)/\epsilon_i$ 이 진공용기와 복사설드 사이의 열저항 중 가장 크므로 ϵ_i 가 복사설드로 유입되는 열전달율과 온도분포에 큰 영향을 미치기 때문이다. 따라서, 복사설드로 유입되는 복사열전달을 줄이기 위해서는 복사설드를 표면처리하거나 복사설드의 외부에 MLI(Multilayer Insulation)를 부착하여 복사설드의 방사율을 줄이는 것이 효과적이다.

진공용기의 방사율 ϵ_o 가 온도분포에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. ϵ_o 가 증가할수록 복사설드

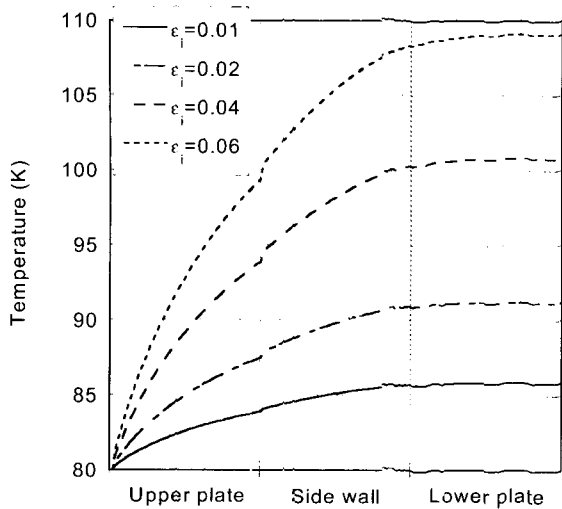


그림 5. 복사실드의 방사율이 온도에 미치는 영향
Fig. 5. Effect of emissivity of radiation shield on temperature

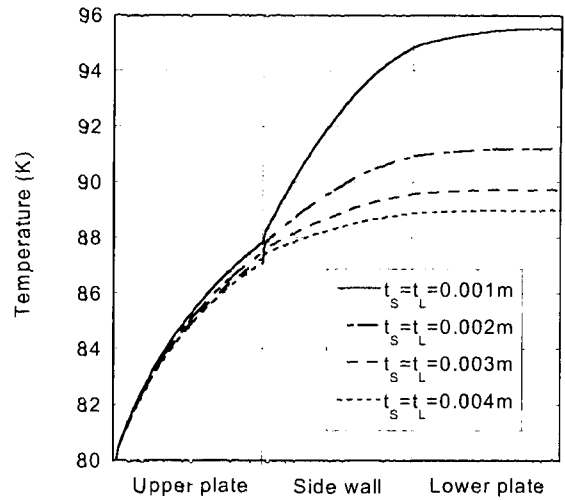


그림 7. 측판과 하판의 두께가 온도에 미치는 영향
Fig. 7. Effect of thickness of side wall and lower plate on temperature

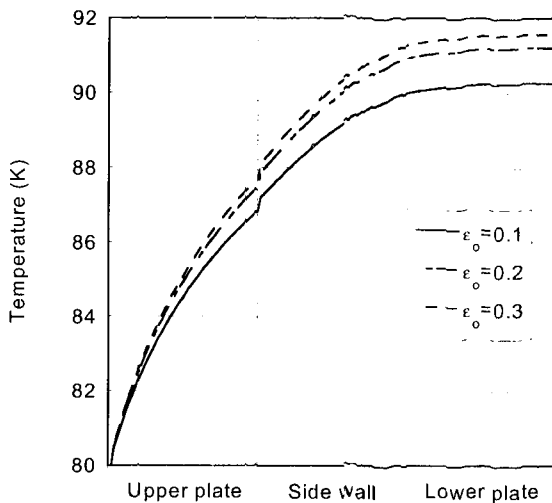


그림 6. 진공용기의 방사율이 온도에 미치는 영향
Fig. 6. Effect of emissivity of vacuum chamber on temperature

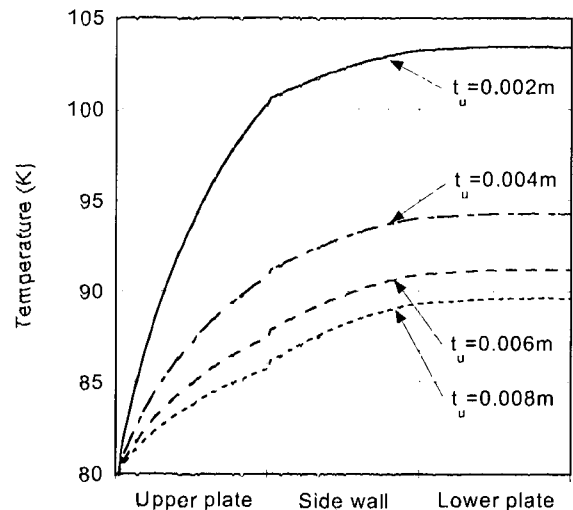


그림 8. 상판의 두께가 온도에 미치는 영향
Fig. 8. Effect of thickness of upper wall on temperature

의 최고온도는 상승하나, 복사실드의 방사율 ϵ_i 에 비하면 ϵ_o 가 복사실드의 온도에 미치는 영향은 작은 것을 알 수 있다.

측판과 하판의 두께가 온도분포에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 다른 조건들이 같을 경우 복사실드로 유입되는 복사열전달의 크기는 같으므로 하판과 측판에서 상판으로 전달되어야 하는 열전달율은 같다. 따라서, 두께가 얇아질수록 온도구배가 커져야 하므로 최고온도가 상승하는 것을 볼 수 있다. 측판의 온도구배가 하판보다 큰 이유는 측판은 하판이 받은 복사열과 측판이 받은 복사열을 모두 상판으로 전달해야 하기 때문이다.

Fig. 8은 상판의 두께가 복사실드의 온도분포에 미치는 영향을 보여준다. 상판은 하판과 측판이 받은 복사열뿐만 아니라 상판 자체가 받은 복사열도 냉동기

로 전달해야 하므로 전도되어야 할 열전달율이 가장 크고, 또 냉동기 접합부로 갈수록 열전달 면적이 작아 지므로 상판의 두께가 측판과 하판의 두께와 같을 경우 온도구배가 가장 커진다. 그러므로, 복사실드의 최대온도차를 작게 하기 위해서는 상판의 두께를 측판과 하판의 두께보다 크게 하여야 한다.

복사실드의 두께가 증가할수록 복사실드의 최대온도차는 감소한다. 그러나, Fig. 7과 8에 사용된 상판, 측판, 하판 두께의 범위에서 복사실드를 냉각하는데 필요한 냉각용량은 약 12 W로 거의 일정하고, 두께가 증가하면 냉각용량은 약간 증가한다. 그 이유는 식 (2)에서 알 수 있는 바와 같이 복사에 의한 열유속은 절대온도의 4승의 차이에 비례하기 때문이다. 진공용기의 온도는 300K이고 복사실드의 온도는 80K 부근이므

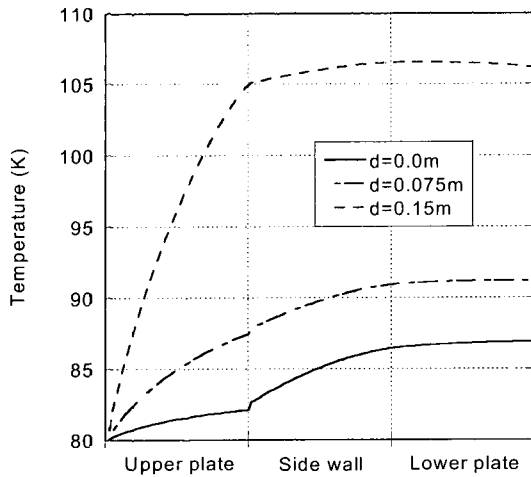


그림 9. 냉동기 접합부의 편심이 온도에 미치는 영향
 Fig. 9. Effect of eccentricity of contact area with a cryocooler on temperature

로, 복사열의 온도는 복사열로 유입되는 복사에 의한 열전달에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나, 복사열의 온도는 복사열 내부에 있는 마그네티로 유입되는 복사열전달에 큰 영향을 미칠 수 있다. 마그네티의 온도가 20K라고 가정하였을 때, 복사열의 온도가 80K인 경우의 마그네티로의 복사열유입과 100K인 경우의 복사열유입의 비는 $(80^4 - 20^4) / (100^4 - 20^4) = 0.41$ 이 되므로 복사열의 두께를 크게 하여 최고온도를 낮게 하는 것이 유리하다. 그러나, 복사열의 두께가 증가하면 열용량이 증가하므로 초기냉각(cooldown) 시간이 길어지는 문제가 있다.

냉동기 접합부의 위치가 온도분포에 미치는 영향을 Fig. 9에 보였다. $d=0$ 은 냉동기 접합부의 중심이 상판의 중심과 일치한다는 것을 의미하고, $d=0.15$ m는 냉동기 접합부의 중심이 상판의 중심에서 0.15 m 떨어져 있다는 것을 나타낸다. d 가 증가할수록 냉동기 접합부와 상판의 가장자리 사이의 최대거리가 증가하므로 열전달경로가 길어져 온도가 크게 상승하는 것을 볼 수 있다. 그러므로, 복사열의 최대온도차를 줄이기 위해서는 가능한한 냉동기 접합부가 상판의 중심에 가까이 위치하는 것이 바람직하다.

4. 결 론

본 연구에서는 냉동기로 냉각되는 복사열의 온도 분포를 구할 수 있는 열전달 해석모델을 제시하였다. 이 모델에서는 냉동기 접합부가 편심되어 있는 상판의 수치적인 격자생성을 용이하게 하기 위하여 복소평면의 등각사상을 이용하였다. 이 해석모델을 이용하면 원하는 온도분포를 얻기 위한 복사열의 두께를 선정할 수 있다.

복사열로 유입되는 복사열을 줄이기 위해서는 복사열의 방사율을 작게 하는 것이 가장 효과적이다. 복사열의 상판은 하판과 측판으로 유입된 복사열과 상판 자체가 받는 복사열을 모두 전도에 의하여 냉동기로 전달해야 하고, 또 냉동기 접합부로 갈수록 열전달 면적이 작아지므로 상판의 두께를 하판과 측판에 비하여 크게 하는 것이 바람직하다. 또한, 균일한 온도 분포를 얻기 위해서는 냉동기 접합부가 상판의 중심에

가까이 위치하도록 하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업의 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] R.B. Scott, Cryogenic Engineering, Met-Chem Research Inc., pp. 215-216, 1963
- [2] R.F. Barron, Cryogenic Systems, Oxford University Press, pp. 400-402, 1985
- [3] 장호명, 박정수, 김성래, 김형진, 진홍범, 이'봉근, "전도냉각형 저온용기에서 중간냉각의 최적화", 한국초전도저온공학회 학술대회 논문집, pp. 155-158, 2001
- [4] V.V. Eremenko, N.I. Makedonskaya, P.G. Makedonskaya, V.A. Sirenko, "Computer-aided design of nitrogen-free helium cryostats", Cryogenics, Vol. 41, pp. 549-555, 2001
- [5] 이택식, 이재현, 이준식 공역, 열전달, 희중당, 1993
- [6] 명현국 역, 수치유체역학, 한미, 1994
- [7] F.B. Hildebrand, Advanced Calculus for Application, 2nd ed., Prentice-Hall, Inc., pp. 628-634, 1976

저 자 소 개



정은수 (鄭恩洙)

1959년 2월 5일 생. 1981년 서울대 기계공학과 졸업. 1983년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사). 1991년 미국 M.I.T. 기계공학과 졸업(공학박사). 현재 홍익대학교 기계공학과 부교수.



박희완 (朴喜濠)

1974년 3월 13일 생. 1999년 홍익대 기계공학과 졸업. 현재 동대학원 기계공학과 석사과정.



양형석 (梁炯哲)

1969년 5월 8일생. 1994년 홍익대학교 기계공학과 학사. 1998년 Tsukuba 대학교 이공학연구과 공학석사. 2001년 Tsukuba 대학교 공학연구과 공학박사. 2001년 ~ 현재 홍익대학교 부설 과학기술연구소 연구원, 한국기초과학지원연구원 위촉연구원.



장호명 (張鎬明)

1960년 9월 21일생. 1983년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1984년 University of Michigan 기계공학과 졸업(공학석사). 1988년 M.I.T 기계공학과 졸업(공학박사). 1990년 ~ 현재 홍익대학교 기계공학과 교수.