

<논 문>

돌출 열원을 갖는 3차원 밀폐 공간내에서의 자연대류-복사 복합 열전달에 대한 실험적 및 수치적 연구

백창인* · 이관수** · 김우승**

(1996년 3월 15일 접수)

An Experimental and Numerical Study on Natural Convection-Radiation Conjugate Heat Transfer in a Three-Dimensional Enclosure having a Protruding Heat Source

Chang-In Baek, Kwan-Soo Lee and Woo-Seung Kim

Key Words : Electronic Device (전자장비), Natural Convection (자연대류), Surface Radiation (표면복사), Discrete Ordinates Method (구분종좌표법)

Abstract

An experimental and numerical study on the three-dimensional natural convection-radiation conjugate heat transfer in the enclosure with heat generating chip has been performed. A 3-dimensional simulation model is developed by considering heat transfer phenomena by conduction-convection and radiation. Radiative transfer was analyzed with the discrete ordinates method. Experiments are conducted in order to validate the numerical model. Comparisons with the experimental data show that good agreement is obtained when the radiation effect is considered. The effects of the thermal conductivity of the substrate and power level on heat transfer are investigated. It is shown that radiation is the dominant heat transfer mode and the conductivity of the substrate has important effects on the heat transfer in the enclosure.

기 호 설 명

d	: 칩의 높이 (m)	k_s	: 기판의 열전도율 ($Wm^{-1}K^{-1}$)
g	: 중력 가속도 (ms^{-2})	L_x	: 밀폐 공간의 x-방향 길이 (m)
h_c	: 칩의 두께 (m)	L_y	: 밀폐 공간의 y-방향 길이 (m)
H_c	: 칩의 무차원 두께 (h_c/d)	L_z	: 밀폐 공간의 z-방향 길이 (m)
h_s	: 기판의 두께 (m)	l	: 칩의 폭 (m)
I	: 복사강도	Q	: 열입력 (W)
I^*	: 무차원 복사강도	Q_c	: 무차원 대류 열전달량
k	: 열전도율 ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Q_r	: 무차원 복사 열전달량
k_c	: 칩의 열전도율 ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Q_T	: 무차원 총열전달량, 무차원 열유속
k_f	: 유체의 열전도율 ($Wm^{-1}K^{-1}$)	P	: 무차원 압력
		Pl	: Planck수, $(k_f/d)/[4\sigma(Q/k_f d)^3]$
		Pr	: Prandtl수, (ν/α)
		Ra	: Rayleigh수, $g\beta Qd^2/avk_f$

*회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

**회원, 한양대학교 기계공학과

- R_c : 유체의 열전도율에 대한 칩의 열전도율의 비(k_c/k_f)
- R_s : 유체의 열전도율에 대한 기관의 열전도율의 비(k_s/k_f)
- T : 온도
- T_c : 냉각벽면 표면온도
- U, V, W : 무차원 속도성분
- X, Y, Z : 무차원 좌표계
- Z_c : 칩의 무차원 폭(l/d)

그리스문자

- α : 열확산 계수 (m^2s^{-1})
- β : 열팽창 계수 (K^{-1})
- γ : 유한 차분 계수
- ϵ : 방사율
- ν : 동점성 계수 (m^2s^{-1})
- ρ : 유체의 밀도 (kgm^{-3})
- ξ, μ, η : 방향 코사인
- x : 흡수 계수(m^{-1})
- σ : Stefan-Boltzmann 상수
- τ : 광학두께 (x_d)
- ϕ : 무차원 온도($\frac{T-T_c}{Q/k_d}$)

하첨자

- b : 흑체
- c : 칩(chip)
- f : 유체(fluid)
- max : 최대값
- o : 기준
- s : 기관(substrate)
- x : x 방향(x-direction)
- y : y 방향(y-direction)
- z : z 방향(z-direction)

1. 서 론

전자장비의 냉각에서 자연대류 방식은 강제대류나 액침냉각 등에 비하여 열제거용량이 작기 때문에, 설계단계에서부터 배제되는 경우가 종종 있다. 그러나 자연대류는 신뢰도, 저비용, 유지의 간편성 및 경제성 등의 이점과 소음, 진동, 전자기적 간섭 등의 문제점이 없기 때문에, 전자장비의 열적

설계에서 항상 가장 먼저 고려되어야 하는 냉각방식 중 하나이다.

자연대류 냉각방식을 선택할 경우 종종 복사가 중요한 열전달 모드로 작용하는 경우가 많다. 이 경우에는 복사를 포함한 모든 열전달 모드를 고려하여 주어진 문제를 해석하여야만 정확한 열적예측이 가능하다. 지금까지 전자장비의 자연대류 냉각에 대한 연구는 많이 수행되어 왔지만, 임의적으로 돌출되어 있는 칩 등에 의한 기하학적 복잡성과 엄청난 계산시간 등으로 인하여 복사의 영향은 수치해석에서 무시되는 경우가 많았다.^(1~3) 그러나 최근 들어서 몇몇 연구자들에 의하여 전자장비의 열적해석에서 복사열전달 영향의 중요성이 지적되고,^(4,5) 복잡한 기하학적 형상을 갖는 공간 내에서의 복사 열전달 해석방법에 대한 연구들이 수행되면서,^(6,7) 전자장비의 열적해석에 모든 열전달 모드를 고려할 수치 연구들이 진행되고 있다. Smith 등⁽⁸⁾은 PCB 채널로 밀폐구조를 이루는 경우에, 전도-대류-복사의 복합열전달 문제를 해석하여, 전자장비 냉각에서 복사열전달의 중요성을 강조하였다. 이 때 복사 열전달의 해석은 RIM(Radiosity/Irradiation Method)을 사용하였다. Beckermann 등⁽⁹⁾은 균일한 발열칩이 부착된 PCB들이 개방된 캐비닛을 이루고 있을 때의 복합 열전달을 해석하였는데, 각 표면들 사이의 복사열전달은 구분종좌표법을 이용하여 해석하였다. 이관수 등⁽¹⁰⁾은 일정한 열을 방출하는 돌출된 칩을 갖는 2차원 전자 장비내에서의 전도-자연대류-표면복사 복합 열전달을 구분종좌표법을 이용하여 해석하여, 칩으로부터의 열방출의 약 70% 정도가 복사에 의하여 이루어진다는 것을 밝혔다.

기존의 문헌들에서 살펴보면, 대류와 복사 복합 열전달에 대한 수치해석은 거의 2차원 문제에 국한되어 있고, 특히 자연대류와 복사의 3차원 복합 열전달 문제에서 열적 경계조건이 열입력이나 열유속 조건으로 주어진 경우는 거의 전무한 실정이다.

일반적으로 발열칩이 작은 크기의 입방형 또는 직육면체로 이루어져 있고, 주어진 열입력과 기하학적 조건하에서 최대 칩온도를 얻는 것이 전자장비 열적해석의 주된 목적이다. 이를 감안하면, 열입력 경계조건을 갖는 3차원 전도-대류-복사의 복합 열전달에 대한 연구가 반드시 필요함에도 불구하고, 지금까지 이에 대한 수치적 및 실험적 연구들이 수행된 바 없었다.

따라서 본 연구에서는 구분종좌표법을 이용하여 3차원 전도-대류-복사의 복합 열전달을 해석하는 모델을 개발하고, 이를 일정한 열입력을 갖는 3차원 전자장비의 열적해석에 적용하여 수치해석을 수행하고, 이에 대한 타당성을 실험을 통하여 검증하는 것을 목적으로 한다.

2. 이론적 해석

2.1 해석 모델

본 연구에서는 해석을 위한 모델로서, Fig. 1과 같이 크기가 $L_x \times L_y \times L_z$ 인 밀폐구조의 케이스 안에 일정한 열을 발생하는 칩이 수직 기판 위에 붙어있는 경우를 고려한다. 칩은 두께 h_c 인 기판 위에 돌출하여 부착되어 있고, 기판과 마주보는 면은 T_c 로 유지되어 있으며, 그 외의 다른 모든 벽면은 단열되어 있다. 자세한 치수는 Table 1에 나타나 있다.

2.2 지배방정식

실제 물리현상을 기술하는 지배방정식을 다음과 같은 가정하에 단순화시켰다.

- ① 3차원, 정상 상태, 비압축성 층류 유동이다.
- ② 점성 소산은 무시한다.
- ③ 모든 물성치들은 부력항을 제외하고는 일정하고, Boussinesq 근사를 만족한다.
- ④ 밀폐 공간내에 있는 매질은 투과성이고, 각

Table 1 The geometry units (mm)

L_x	L_y	L_z	l	d	h_c	h_s
114	190	190	38	38	6	3

벽면과 발열체는 모든 방향으로 균일한 방사 및 반사를 하는 비투과 산란 방사체이다.

- ⑤ 모든 벽면의 방사율은 동일하다.

위의 가정들에 기초한 무차원 지배방정식은 다음과 같다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (1)$$

- X-방향 운동량방정식

$$\begin{aligned} U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + W \frac{\partial U}{\partial Z} \\ = -\frac{\partial P}{\partial X} + (Pr/Ra)^{1/2} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right. \\ \left. + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

- Y-방향 운동량방정식

$$\begin{aligned} U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z} \\ = -\frac{\partial P}{\partial Y} + (Pr/Ra)^{1/2} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right. \\ \left. + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right) + \phi \end{aligned} \quad (3)$$

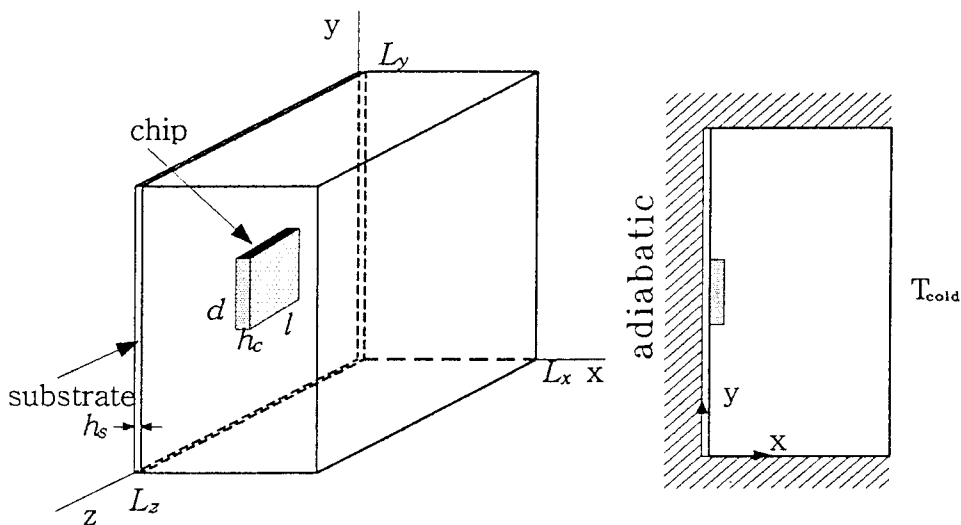


Fig. 1 Schematic diagram of the physical system

● Z-방향 운동량방정식

$$U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} + W \frac{\partial W}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial X} + (Pr/Ra)^{1/2} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right) \quad (4)$$

● 에너지 방정식

(유체) :

$$U \frac{\partial \phi}{\partial X} + V \frac{\partial \phi}{\partial Y} + W \frac{\partial \phi}{\partial Z} = \frac{1}{Pr/Ra} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Z^2} \right) - \frac{(1/RaPr)^{1/2}}{Pl} \nabla \cdot Q_r \quad (5)$$

(칩) :

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Z^2} \right) + 1/(HcZcRc) = 0 \quad (6)$$

(기관) :

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Z^2} \right) = 0 \quad (7)$$

여기서 사용된 무차원 변수들은 다음과 같다.

$$X = x/d, \quad Y = y/d, \quad Z = z/d, \quad U = u/U_0$$

$$V = v/U_0, \quad W = w/U_0, \quad P = p/\rho U_0^2, \quad \phi = \frac{T - T_c}{Q/k_r d}$$

$$\phi_0 = \frac{T_c}{Q/k_r d}, \quad Hc = \frac{h_c}{d}$$

$$Zc = \frac{l}{d}, \quad Ra = g\beta Q d^2 / \alpha \nu k_r$$

$$U_0 = (g\beta Q/k_r)^{1/2}, \quad Rc = k_c/k_r, \quad Rs = k_s/k_r$$

$$Pl = \frac{(k_r/d)}{4\sigma(Q/k_r d)^3}, \quad Q_r = \frac{q_r}{4\sigma(Q/k_r d)^4}$$

식 (5)의 우변의 마지막 항은 복사 열유속 벡터의 발산항으로서, 이것은 복사 전달 방정식을 풀어서 구할 수 있다. 여기서의 매질이 복사에 관하여 투과성인 공기이고, 칩과 기관은 비투과성인 고체이기 때문에, 복사 열유속은 오직 고체와 유체의 경계면에서만 존재하게 된다. 따라서 이 항은 고체와 유체의 경계면에 접한 검사체적에 대하여만 고려하여 주면 된다.⁽⁶⁾

위에서 논의한 무차원 지배방정식에 대한 경계 조건은 물리적 조건으로부터 다음과 같이 주어진다.

1) 모든 벽면과 발열체에서,

$$U = V = W = 0$$

2) Y=0와 L_y/d에서,

$$Q_r \cdot \vec{j} = \left(-\nabla\phi + \frac{1}{Pl} Q_r \right) \cdot \vec{j} = 0$$

3) Z=0와 L_z/d에서,

$$Q_r \cdot \vec{k} = \left(-\nabla\phi + \frac{1}{Pl} Q_r \right) \cdot \vec{k} = 0$$

4) X=0에서, $\frac{\partial \phi}{\partial X} = 0$

5) X=L_x/d에서, $\phi = 0$

2.3 복사 열전달 해석

3차원 직각 좌표계에 대한 무차원 복사 전달방정식은 다음과 같다

$$\xi \frac{\partial I^*}{\partial X} + \mu \frac{\partial I^*}{\partial Y} + \eta \frac{\partial I^*}{\partial Z} = -\tau I^* + \frac{\tau}{4\pi} B \quad (8)$$

여기서, I*는 무차원 복사강도이고, τ는 광학두께, B는 무차원 방사력으로서 각각 다음과 같이 정의된다.

$$I^* = \frac{I}{4\sigma(Q/k_r d)^4}, \quad \tau = x d, \quad B = (\phi + \phi_0)^4 \quad (9)$$

구분종좌표법을 이용하여 복사전달방정식 (8)을 유한한 수의 종좌표에 대하여 일련의 구분화된 식으로 대치하고, 적분항을 각 종방향에 대하여 구적법을 이용하여 합의 항으로 나타내면 다음과 같은 구분 종좌표 방정식이 된다.

$$\xi_i \frac{\partial I_i}{\partial x} + \mu_i \frac{\partial I_i}{\partial y} + \eta_i \frac{\partial I_i}{\partial z} = -x I_i + x I_b \quad (10)$$

식 (10)의 유한 차분식은 Fig. 2의 검사체적에 대해 적용함으로써 유도된다. 즉 양변에 각각 ΔxΔyΔz를 곱하고 검사체적의 경계면에 대해서 적분하면 유한차분식은 다음과 같다.

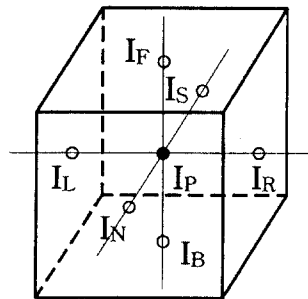


Fig. 2 Radiative intensities on a control volume

$$\xi_i A_x (I_i^r - I_i^{fr}) + \mu_i A_y (I_i^r - I_i^{fr}) + \eta_i A_z (I_i^r - I_i^{fr}) + \Delta V_p \kappa I_i^p = V_p \kappa I_b^p \quad (11)$$

여기서, $A_x = \Delta y \Delta z$, $A_y = \Delta x \Delta z$, $A_z = \Delta x \Delta y$, $\Delta V_p = \Delta x \Delta y \Delta z$ 이다. r , f 및 n 경계면의 표면에서 나가는 강도는 다음과 같이 근사화된다.

$$I_i^r = \frac{1}{\gamma} [I_i^p - (1 - \gamma) I_i^{fr}]$$

$$I_i^p = \frac{|\xi_i| A_x I_i^{fr} + |\mu_i| A_y I_i^{fr} + |\eta_i| A_z I_i^{fr} + \gamma \kappa I_b^p \Delta V_p}{|\xi_i| A_x + |\mu_i| A_y + |\eta_i| A_z + \gamma \kappa \Delta V_p} \quad (12)$$

위 식에서 투과성 매질영역의 검사체적에 대해서는 κ 를 0으로, 고체 매질영역의 검사체적에 대해서는 κ 를 매우 큰 값으로 두면 된다.

이산화 방정식 (12)를 3차원 공간에서 계산하기 위하여는 ξ_i , μ_i , η_i 가 음의 값인지 또는 양의 값인지에 따라 8가지의 계산 진행 방향에 따라 순차적으로 각각의 각도구역들에 대한 복사강도값들을 반복 계산하면 된다.

식 (12)에 대한 경계 조건으로서, 어떠한 고체 표면에서 임의의 종방향 i 로의 복사강도는 다음과 같이 주어진다.

$$I_i = \epsilon I_b + \frac{(1 - \epsilon)}{\pi} \sum_j \omega_j \Psi_j I_j \quad (13)$$

여기서, ω 는 각도구역에 대한 가중치이고, Ψ 는 표면의 수직방향과 입사되는 복사강도 방향 사이의 여현이고, 하첨자 j 는 매질로부터 표면으로 들어가는 방향을 나타낸다.

2.3 수치해석 절차

무차원 지배방정식 (1)~(7)은 유한체적법을 이용하여 이산화시켰고, 무차원 복사전달방정식 (8)은 구분중좌표법을 이용하여 해석하였다. 구분중좌표법의 수식화에는 전체 입체각을 적당한 차수의 방향 여현과 가중치를 선택함으로써 이산화시킬 수 있다. 입체각에 걸친 적분을 포함하는 양들은 각 종방향에 대하여 구적법을 이용한 합으로 계산되어진다. 이 연구에서는 Fiveland⁽¹¹⁾가 제안한 S-4를 사용하였다.

서로 연관된 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식 및 복사전달방정식을 풀기 위하여 다음과 같은 절차로 해석하였다.

1) 초기 속도장 및 온도장을 가정한다.

$$I_i^f = \frac{1}{\gamma} [I_i^p - (1 - \gamma) I_i^{fr}]$$

$$I_i^n = \frac{1}{\gamma} [I_i^p - (1 - \gamma) I_i^{fr}]$$

여기서, γ 는 유한차분 가중계수로서, 보통 0.5~1 사이의 값을 사용한다.

I_i^r , I_i^f 및 I_i^n 에 대해서 각각 차분법을 적용하여, I_i^p 에 대하여 정리하면 다음과 같이 된다.

2) 주어진 온도장을 이용하여 복사전달방정식을 풀어 복사강도를 구하고, 경계에서의 복사 열유속을 구하여 에너지방정식에서의 생성항과 경계에서의 온도값을 수정한다.

3) 식 (1)~(7)을 풀어 새로운 속도장과 온도장을 구한다.

4) 구하고자 하는 물리적 변수가 수렴할 때까지 과정 2), 3)을 반복한다.

본 연구에서 사용된 격자계는 $24 \times 23 \times 23$ 의 비균일 격자계이며, 수렴조건으로는 각 변수들의 상대변화가 0.005%내에 들 때를 수렴한 것으로 간주하였다.

3. 실험

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 3과 같다. 실험장치는 크게 기판(substrate), 칩(chip), 단열 벽 및 평판 열교환기로 구성된 시험부, 칩에 일정한 전압을 공급하는 전원 공급장치, 그리고 열전대를 통해 각 부분의 온도를 기록하는 데이터 처리장치로 구성되어 있다.

시험부는 정육면체 형태의 케이스를 제작한 후 열교환기와 단열 벽을 설치하고, 열교환기와 기판 사이의 거리는 임의로 조절할 수 있도록 제작하였다. 전원은 직류전원 공급장치(Yokokawa Co., Model 7651)를 이용하여 실험조건에 맞는 전류를 적절히 변화시켜 공급하였다. 시험부 각 부분의 온도는 시험부에서 외부로 유도된 열전대를 데이터 기록계에 연결하여 측정하였으며, 측정 온도는 데이터 기록계로부터 PC로 연결되어 매 12초 간격으로 저장된다. 기판과 칩을 모사하기 위해서 $190 \times 190 \times 3$ mm의 아크릴 판 위에 구리판을 칩의 형태

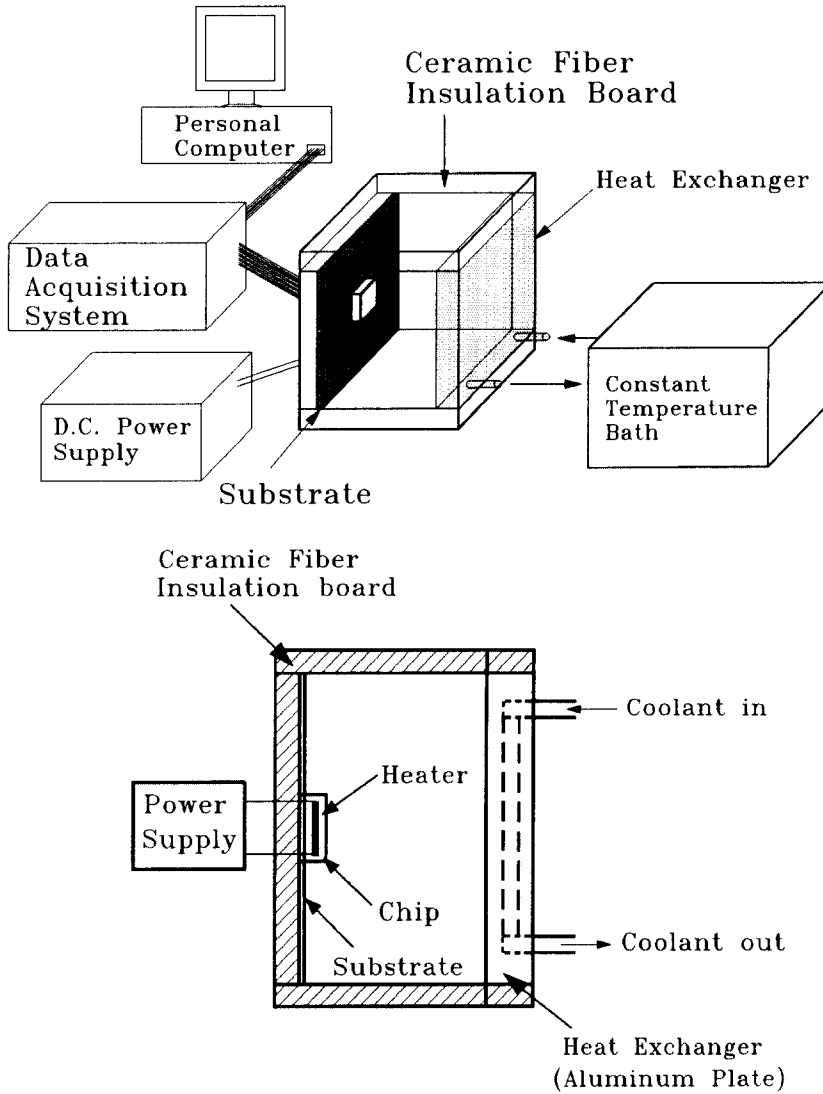


Fig. 3 Schematic sketch of the experimental arrangement

로 제작하여 Fig. 4와 같이 설치하였다. Fig. 5는 본 실험에서 제작된 칩을 상세하게 그린 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 $38 \times 38 \times 3\text{mm}$ 의 구리판 두 개를 사용하여 구리판 사이에 히터의 자리면을 가공한 다음, 저항이 155Ω 이고, 가로 \times 세로 \times 높이가 $25 \times 25 \times 0.025\text{mm}$ 인 유연성 히터(flexible heater)를 구리판 사이에 삽입하여 발열체를 제작하였다. 히터의 리드선은 구리판의 가장자리 한 단면으로 지름 1mm의 구멍을 내어 외부로 빼낸 후 직류전원 공급장치에 연결하였다. 구리판 사이와

리드선의 틈은 내열 고전도성 본드를 사용하여 완전히 밀폐시켰으며, 기관과 벽면 사이, 벽면과 벽면 사이에는 실리콘을 발라 완전히 밀폐되도록 하였다. 기관과 마주보는 벽은 일정온도를 유지시키기 위해 알루미늄으로 제작된 판형 열교환기를 설치하였고, 일정 온도의 물을 항온조를 통해 공급되도록 하였다. 기관 후면 및 주위 외벽은 20mm 두께의 세라믹 섬유 단열판을 사용하여 단열시켰다. 또한 기관, 열교환기, 칩 등을 포함한 모든 내부 벽면들은 흑체로 근사하기 위하여 그을음을 코

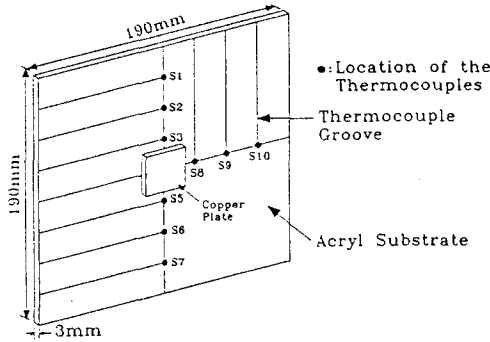


Fig. 4 Locations of the copper plate and thermocouples in a substrate

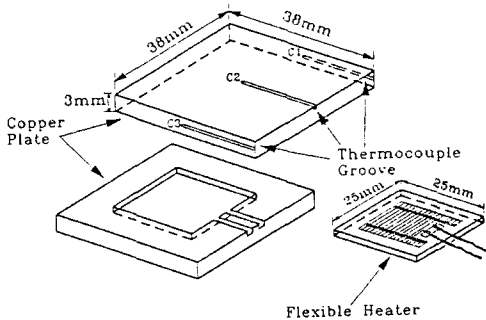


Fig. 5 Details of the heating elements

팅시켰다. 본 실험에서는 지름 0.01mm짜리 T형 열전대를 사용하여 각부의 온도를 측정하였다. 발열체 표면온도를 측정하기 위하여 발열체의 앞면에 한 개, 상하면에 각각 한 개씩의 열전대를 부착하였으며, 기관으로 전도된 열을 측정하기 위하여 Fig. 4에서 보는 바와 같이, 기관의 중심부에서 일정한 간격으로 10개의 열전대를 설치하였다. 이러한 열전대는 기관 표면에서 0.3mm의 홈을 파서 밖으로 빼내어 열전대의 전도에 의한 열손실을 최소화시켰고, 지름 1mm의 구멍을 내어 외부로 빼낸 후 데이터 기록계에 연결하였다. 열전대와 인출구멍 사이의 틈은 열손실을 막기 위하여 에폭시로 충진하였다. 기관과 마주보는 열교환기의 입·출구는 RTD를 연결하여 물의 온도가 일정 온도로 유지되는지를 측정하였다. 본 실험에서 사용된 구리판, 아크릴판 및 세라믹 섬유단열판의 열전도율은 Table 2에 나타내었다.

밀폐공간 내부의 온도는 히터에 전압을 공급하기 전에 열교환기의 온도를 20℃의 일정온도로 유지시

Table 2 Thermal conductivities of the materials at 300K

Material	k (W/m · K)
Copper	398
Acryl	0.198
Ceramic fiber board	0.054

켜서 밀폐공간 내부의 온도를 측정하였다. 2~4시간이 경과하게 되면 밀폐공간 내부의 온도변화가 거의 없게 되는데, 이때 히터에 전류를 공급하여 시간의 경과에 따른 구리판 및 기관의 온도변화를 관측하여, 칩의 시간당 온도변화가 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이내일 때를 정상상태로 간주하여 각부의 온도를 측정하였다. 기본적인 측정에 대한 불확실도는, 온도에 대하여는 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이고 공급열량에 대하여는 $\pm 0.01\%$ 이다.

4. 결과 및 고찰

개발된 프로그램의 검증을 위하여, 칩으로의 열 입력이 2W~4W일 경우에 대하여 계산을 수행하여 실험 결과와 비교하였다. 이때 사용된 기하학적 조건과 물성치들은 실험에서와 동일한 조건을 사용하였다. 즉, 모든 벽면의 방사율은 1로 주었고, 기관과 칩의 열전도율은 각각 아크릴과 동판의 열전도율을 주었다. 계산에 필요한 공기의 물성치들은 325K의 값들을 사용하였고, 이와 같은 조건하에서 무차원 지배방정식에 필요한 무차원 변수들의 값은 Table 3과 같다.

전자 장비의 냉각은 시스템내의 최대 온도를 허용 제한 온도 이하로 유지시키는 것과 칩에서의 열 전달을 향상시키는 것이 주목적이므로, 주어진 열 입력, 칩 및 기관의 물성치 및 기하학적 조건에 따른 최대 온도를 예측하고 또한 전자 장비내에서의 열전달 메커니즘에 대한 정확한 이해가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 각 인자의 변화에 따른 시스템내 최대 온도와 칩 및 기관에서의 열방출 비율, 총 열방출량에 대한 복사 열방출량의 비등을 조사하였다.

칩과 기관 표면에서의 열전달은 대류에 의한 열전달과 복사에 의한 열전달로 구분되고, 무차원 열전달량은 각각 다음과 같이 정의된다.

Table 3 Dimensionless variables for baseline conditions(Q=3W)

Symbol	Description	Value
Ra	Rayleigh number	9.85×10^6
Pr	Prandtl number	0.7
ϕ_o	Dimensionless reference temperature	0.104
Pl	Planck number	1.45×10^{-4}
Rs	Ratio of substrate thermal conductivity to fluid thermal conductivity	7
Rc	Ratio of chip thermal conductivity to fluid thermal conductivity	15000

- 대류에 의한 무차원 열전달량(Q_c)

$$Q_c = \sum_i -\frac{\partial \phi}{\partial n_i} \Delta A_i$$

- 복사에 의한 무차원 열전달량(Q_R)

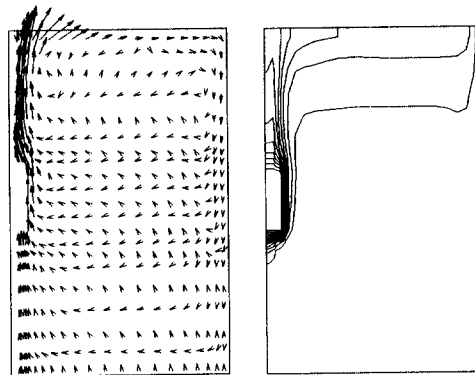
$$Q_R = \sum_i \frac{1}{Pl} Q_{Ri} \Delta A_i$$

- 총 무차원 열전달량(Q_T)

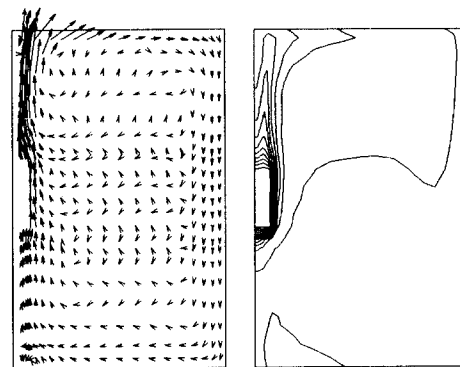
$$Q_T = Q_c + Q_R$$

Fig. 6은 칩에 열입력이 3W 주어졌을 경우에, $z=95\text{mm}$ 에서 기판 및 칩의 표면에서의 측정온도를 수치해석 결과와 비교한 것이다. 이때 수치해석은 복사를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 대하여 각각 해석하고 비교한 것이다. 그림에서 살펴보

면, 복사를 고려하지 않은 경우는 칩의 최대 온도 상승이 약 84.6°C 이고, 복사를 고려한 경우는 약 66.8°C 로 나타났다. 이것은 실험치가 약 64.8°C 로 나타난 것과 비교할 때, 복사를 고려하지 않았을



(a) Without radiation



(b) With radiation

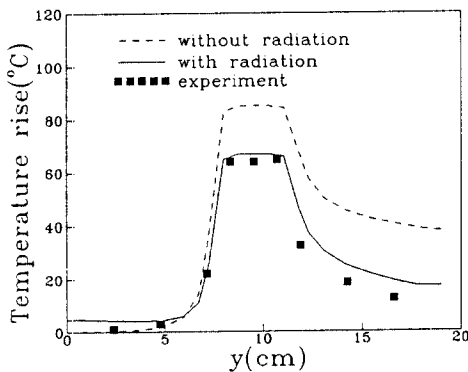


Fig. 6 Comparison of measured and predicted local substrate temperature along y-direction at $Q=3\text{W}$

Fig. 7 U-V velocity vectors and isotherms for the X-Y plane at $Z=2.5(Q=3\text{W})$

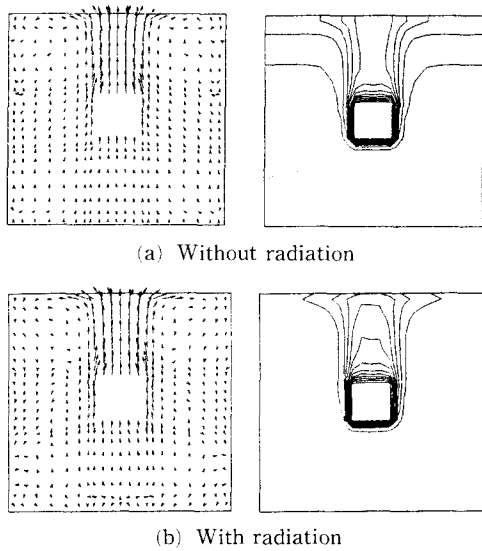


Fig. 8 V-W velocity vectors and isotherms for the Y-Z plane at X=0.1(Q=3W)

경우는 약 30%, 고려하였을 경우는 약 3%의 오차를 보이고 있어 복사를 고려한 경우 훨씬 실험치에 근접한 결과를 보이고 있다. 전자장비의 열적 해석에서 복사를 무시하고 대류만을 가정하여 해석하는 경우가 많은데, 본 연구의 결과로부터 알 수 있듯이 모든 열전달 모드를 포함하여 해석하여야만 정확한 결과를 얻을 수 있다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 7과 8은 열입력이 3W일 때, 복사를 고려하지 않았을 때와 고려하였을 경우의, 각각 Z=2.55일 때의 X-Y 단면과, X=0.1일 때의 Y-Z 단면에서의 속도장과 온도장을 나타낸 것이다. 복사를 고려하지 않은 경우, 단면의 상부에 약간 온도 성층을 이루고 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 기관의 열전도율이 거의 단열에 가까운 정도로 낮기 때문에 단면 하부의 공기는 가열되지 못하여 밀폐 공간내에서 유체가 잘 순환되지 못하고 더운 공기가 상부에만 위치하고 있는 것을 볼 수 있다.

복사를 고려한 경우는 이러한 온도 성층이 사라지고, 상하의 단열벽 근처에서의 온도 구배가 매우

급하게 변하는 것을 볼 수 있다. 이것은 대류만을 고려한 경우에는 온도구배가 0이 되어야 하지만, 복사가 고려되는 경우에는 작은 Planck수와 복사 열유속의 영향으로 온도구배가 심해졌다. Table 4에 기관과 칩의 앞면을 통한 무차원 열전달률을 나타내었다. 복사를 고려한 경우 칩의 앞면을 통한 열방출이 전체 열방출의 약 61%를 차지하였고, 기관을 통하여는 약 16.5%, 그 외 칩의 측면(옆면, 아랫면, 윗면)을 통하여 약 22.5%의 열방출이 이루어지는 것으로 나타났다. 기관에서는 복사에 의한 열전달이 거의 대부분을 차지하고 있고, 대류에 의한 열전달은 오히려 음의 값을 가지고 있는 것으로 나타났다. 이것은 기관의 열전도율이 매우 낮아서 칩에서 발생한 열이 기관을 통해 효과적으로 전파되지 못하고, 또한 칩에서 가까운 쪽을 제외하고는 유동의 강도가 매우 약하기 때문이다. 칩의 앞면을 통해서만 대류에 의한 열전달이 약 60%, 복사에 의한 열전달이 약 40%인 것으로 나타났다. 전체적으로는 복사에 의한 열전달이 약 60%인 것으로 나타나, 복사가 밀폐형 전자장비의 냉각에 있어서 가장 지배적인 열전달 모드인 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 칩으로의 열입력의 변화에 따른 시스템 내 최대 온도 상승의 변화를 나타낸 것이다. 복사를 고려하지 않은 경우는 대체로 40%에서 28%까지 실험치보다 높게 예측하였으나, 고려한 경우는 최대 오차가 10% 이내로 거의 정확하게 예측하는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 칩에 열입력이 3W 주어졌을 때, 기관의 열전도율(R_s)의 변화에 따른 최대 온도 상승의 변화를 나타낸 것이다. R_s 를 7에서 1000까지 증가시켰을 때는 최대 온도 상승이 66.8°C에서 22°C까지 급격히 감소하였다. 그러나 R_s 가 1000 이상이 되면 최대 온도의 감소폭이 완만해지는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 기관은 예폭시 수지, 구리 또는 세라믹 박판 등의 조합으로 구성되어 그 유효 열전도율은 0.2~0.6Wm⁻¹°C⁻¹ 정도이다. 그러나 이러한 기관의 유효 열전도율은 그 재질의 성

Table 4 Dimensionless maximum temperature and dimensionless heat transfer rate for 3W

ϕ_{max}	Substrate		Chip front		Total	
	Q_R	Q_T	Q_R	Q_T	Q_R	Q_T
0.026	0.233	0.17	0.25	0.63	0.597	1.03

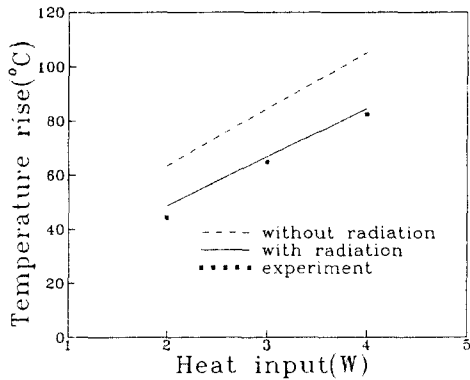


Fig. 9 Measured and predicted maximum temperature rise for different power levels

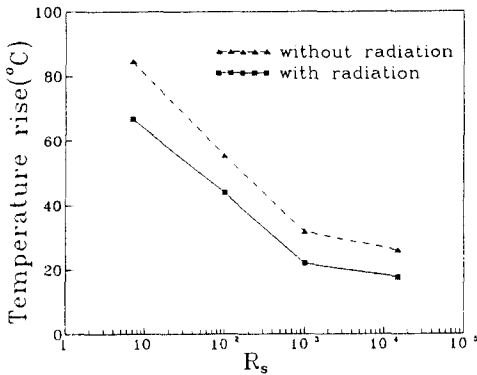


Fig. 10 Predicted maximum temperature rise for different substrate conductivity ratio ($Q=3W$)

분을 조절하여 손쉽게 바꿀 수 있는 점을 감안하면, 기관의 열전도율은 전자장비의 냉각에 매우 효과적인 역할을 하는 것을 알 수 있다. R_s 가 7일 때는 전체 열전달 중에서 복사가 57%를 차지하였으나, R_s 가 1000이 되면 복사가 전체의 74%를 차지하게 된다. 특히 R_s 가 증가함에 따라 기관을 통한 열전달량이 크게 증가하여, R_s 가 1000일 경우 전체 열전달량의 약 86%가 기관을 통하여 방출된다. 이 중에서도 복사의 열전달량이 급격히 증가하여, 기관을 통한 복사열전달량은 전체 열전달량의 약 70%에 달한다. 복사를 고려하지 않은 경우도, 기관의 열전도율의 변화에 대한 최대 온도 상승의 변화 경향은 복사를 고려하였을 경우와 유사한 것으로 나타났다. 그러나 복사를 고려하지 않게 되면, 기관의 열전도율이 낮은 영역에서는 약 26%, 높은 영역에서는 약 45% 까지 온도상승을 크게 예측하여 기관의 열전도율이 커질수록 그 오차는 커

지는 것으로 나타났다. 즉, 복사의 영향에 관계 없이 기관의 열전도율이 증가하면 전자장비의 냉각에 미치는 효과가 상당히 좋지만, 같은 열전도율의 기관이라도 복사의 영향에 의하여 최대 온도상승에서 약 20~40%의 차이를 보인다. 따라서 전자장비에서 칩의 온도를 낮추는데는, 기관의 열전도율을 높이는 것이 효율적이지만, 기관의 재질을 바꾸기 힘들 경우에는 기관에 복사 코팅 등을 하여 벽면의 방사율을 높여주면, 시스템내 최대 온도를 허용제한 온도이하로 유지시키는데 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

5. 결 론

3차원 전자 장비에서의 자연대류-표면복사 복합 열전달을 수치적으로 해석하고, 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다. 본 연구에서 고려된 조건하에서, 기관의 열전도율비가 7인 경우 실험치와 최대 온도 상승치를 비교하여 볼 때, 복사를 고려하여 수치계산한 결과가 2~10%, 고려하지 않은 경우 28~40%의 오차를 보여, 밀폐형 자연대류 냉각 방식의 전자 장비의 열적 해석에서 복사의 영향을 무시할 수 없음을 알 수 있었다. 기관의 열전도율은 전자장비의 냉각에 큰 영향을 미쳤는데, 기관의 열전도율비(R_s)를 7에서 1000으로 증가시켰을 때, 시스템내의 온도 상승은 약 67% 정도 감소하였고, 특히 기관을 통한 복사열전달이 전체 열전달의 70%를 차지하여, 기관의 열전도율이 클수록 복사의 영향도 커졌다. 벽면 방사율은 기관의 열전도율과 함께 전자 장비의 냉각에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 1993년도 한국과학재단의 목적기초(특정) 연구과제(과제번호: 93-0600-02-02-3) 지원의 연구비에 의하여 수행되었으며, 동 재단의 관계 제위께 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

(1) Afrid, M. and Zebib, A., 1991, "Three Dimensional Laminar and Turbulent Natural Convection Cooling of Heated Blocks," *Numer. Heat*

- Transfer*, part A, Vol. 19, pp. 405~424.
- (2) Kang, B. H. and Jaluria, Y., 1990, "Natural Convection Heat Transfer Characteristics of a Protruding Thermal Source Located on Horizontal and Vertical Surfaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 33, No. 6, pp. 1347~1357.
- (3) Abib, A. H. and Jaluria, Y., 1988, "Natural Simulation of the Buoyancy-Induced Flow in a Partially Open Enclosure," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 14, pp. 235~258.
- (4) Lee, S. and Yovanovich, M. M., 1989, "Conjugate Heat Transfer from a Vertical Plate with Discrete Heat Sources Under Natural Convection," *ASME J. Electronic Packaging*, Vol. 111, pp. 261~267.
- (5) Hawkins, L. E. and Nelson, D. J., 1992, "A Design Methodology for Vertical Channel Flow and Heat Transfer," *Proc. of 1992 IEEE Inter Society Conference on Thermal Phenomena*, pp. 15~22.
- (6) Sanchez, A. and Smith, T. F., 1992, "Surface Radiation Exchange for Two-Dimensional Rectangular Enclosure Using Discrete-Ordinates Method," *J. Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 465~472.
- (7) Beckermann, C. and Smith, T. F., 1993, "Incorporation of Internal Surface Radiant Exchange in the Finite-Volume Method," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 23, pp. 127~133.
- (8) Smith, T. F., Beckermann, C. and Weber, S. W., 1991, "Combined Conduction, Natural Convection, and Radiation Heat Transfer in an Electronic Chassis," *ASME J. Electronic Packaging*, Vol. 113, pp. 382~391.
- (9) Beckermann, C., Smith, T. F. and Pospichal, B., 1994, "Use of a Two-Dimensional Simulation Model in the Thermal Analysis of a Multi-Board Electronic Module," *J. Electronic Packaging*, Vol. 116, pp. 126~133.
- (10) 이관수, 백창인, 김우승, 1995, "전도와 복사를 고려한 전자장비의 자연대류 냉각에 관한 연구", *공기조화·냉동공학 논문집*, 제7권, 제2호, pp. 266~275
- (11) Fivland, W. A., 1984, "Discrete-Ordinate Solutions of the Radiative Transport Equation for Rectangular Enclosures," *J. of Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 699~706.