

전도와 복사를 고려한 전자 장비의 자연대류 냉각에 관한 연구

A Study on the Natural Convection Cooling of Electronic Device Considering Conduction and Radiation

이 관 수*, 백 창 인**, 김 우 승*
K.S.Lee, C.I.Baek, W.S.Kim

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

Abstract

A numerical investigation on the conduction-natural convection-surface radiation conjugate heat transfer in the enclosure having substrate and chips has been performed. A 2-dimensional simulation model is developed by considering heat transfer by conduction, convection and radiation. The solutions to the equation of radiative transfer are obtained by the discrete ordinates method using S-4 quadrature. The effects of Rayleigh number and the substrate-fluid thermal conductivity ratio on the cooling of chip are analyzed. The result shows that radiation is the dominant heat transfer mode in the enclosure.

기호설명

a : 이산화 방정식의 계수
b : 칩의 폭
B : 무차원 방사력
d : 칩의 높이
D : 밀폐 공간의 높이
f : 보간 계수
I : 복사 강도
k : 열전도 계수
Nu : Nusselt 수, hd/k_f
P : 압력
P1 : Planck 수, $(k/d)/[4\sigma(Q/k_f)^3]$

Pr : Prandtl 수
Q : 단위 길이당 열입력 [W/m]
 q_r : 복사 열유속
 Q_r : 무차원 복사 열유속
 Q_T : 무차원 총 열유속
 R_c : 칩의 열전도계수비, k_c/k_f
 R_s : 기판의 열전도계수비, k_s/k_f
Ra : Rayleigh 수, $g\beta Qd^3/\alpha\nu k_f$
S : 생성항
t : 기판의 두께
T : 온도
U : x-방향 무차원 속도 성분
V : y-방향 무차원 속도 성분
W : 밀폐 공간의 폭
X : 무차원 x-좌표
Y : 무차원 y-좌표

* 정회원, 한양대학교 기계공학과

** 한양대학교 대학원 기계공학과

그리스문자

α	: 열확산계수
β	: 체적팽창계수
δ	: 증분
μ, η	: 방향코사인
x	: 흡수계수
ν	: 동점성계수
ρ	: 밀도
σ	: Stefan-Boltzmann 상수
τ	: 광학두께, x_d
ϕ	: 무차원 온도

하 첨 자

b	: 흑체
c	: 칩, 차가운 벽
f	: 유체
o	: 기준
s	: 기관

1. 서 론

반도체 분야의 고밀도 집적 기술의 발달과 더불어, 반도체 칩(chip)의 단위 체적당 열발생율은 급격히 증가하여 전자 장비에서의 열적 문제는 전자 기술의 발전과 함께 해결해야 하는 필수 과제가 되고 있다.

전자 장비의 냉각 방법에는 여러가지가 있으나, 공기를 이용한 자연대류나 강제대류 냉각 방식이 가장 많이 이용되고 있다. 공기를 이용한 자연대류 냉각방식은 공기의 낮은 열전도 계수 및 Prandtl 수의 영향으로 강제대류나 액침냉각(immersion cooling)에 비해 열제거 용량이 많이 떨어지지만, 그 특유의 신뢰도, 간편성 및 경제성 등으로 인하여 비교적 작은 열입력을 갖는 전자 장비의 냉각에서는 매우 유용하다.

과거에는 밀폐공간내에서 기관에 돌출 부착된 발열 소자의 전도-대류-복사의 복합 열전달 문제에 대한 수치적 연구는 그 기하학적 복잡성과 수치 계산의 어려움으로 인하여 활발치 못했고, 순수 전도

문제로 가정하여 풀거나, 전도와 실험으로부터 구한 열전달계수를 알고 있는 경우의 복합 열전달 문제를 취급하는 경우가 많았다. 특히 복사를 고려하는 경우에는 돌출된 칩으로 인한 기하학적 복잡성으로 인하여 복사 형태계수(view factor)를 구하기가 매우 힘들기 때문에 이와 관련된 수치 계산은 최근에 들어서야 비로소 부분적으로 이루어지고 있는 상태이다. 그러나, 최근에는 PCB의 열 및 유동 해석에 모든 열전달 모드를 포함시킴으로써, 보다 정확한 유동장 및 온도장을 구하려는 경향을 보이고 있다.

Jaluria⁽¹⁾는 수직 단열벽에 임의로 열원이 분포되어 있는 경우를 고려하였는데, 열원은 균일한 열 유속으로 가정하여 해석하였다. Afrid와 Zebib⁽²⁾는 수직 단열벽에 한개 및 세개의 돌출 열원이 부착되어 있는 경우에 대하여 연구하였는데, 공기에서의 자연대류와 돌출 열원에서의 전도를 포함하여 수치해석하였다. 한개의 열원인 경우 최대 온도는 열생성율에 따라 선형적으로 변함을 밝혔다. Kang과 Jaluria⁽³⁾는 수평 평판과 수직 평판에 대하여 발열체가 있을 때, Grashof수, 발열량의 크기에 따른 자연대류 열전달 특성을 실험적으로 연구하였다. Shakerin⁽⁴⁾은 밀폐 공간에서 한쪽의 수직벽에 돌출된 발열체가 부착되어 있을 때, 발열체가 열전달에 미치는 영향을 실험 및 수치적 방법으로 조사하였다. Abib와 Jaluria⁽⁵⁾는 부분적으로 개방되어 있는 밀폐 공간내에서의 부력으로 야기된 유동에 대해서 연구하였는데, 전자 부품들의 냉각은 밀폐공간의 개방 정도가 증가함에 따라 계속적으로 향상되었다. Smith 등⁽⁶⁾은 PCB 채널로 밀폐 구조를 이루는 경우에, 전도 대류 복사의 복합 열전달 문제를 해석하여, 전자 장비 냉각에서 복사 열전달의 중요성을 강조하였다. 이때 복사 열전달의 해석은 RIM(Radiosity/ Irradiation Method)을 사용하였다. Sanchez와 Smith⁽⁷⁾는 투과성 매질이 채워진 밀폐 공간내에 돌출물이 존재하는 경우, 각 표면들 사이의 복사 열전달을 구분종좌표법(Discrete Ordinates Method, DOM)을 이용하여 해석하였다. Yücel 등⁽⁸⁾은 사각형 밀폐구조내에서의 자연대류-복사 복합 열전달을 DOM을 사용하여 해석하여, 복사가 중요한 열전달 모드이고, 또한 DOM이 기존의 열 유동 해석 알고리즘과 잘 어

올릴 수 있는 방법이라고 주장하였다.

Smith 등⁽⁶⁾에서의 연구 결과에서 보는 바와 같이, 전자 장비의 냉각에서 복사 열전달은 매우 중요한 역할을 차지하고 있다. 그러나, 전자 장비 내부와 같이 발열 칩 등으로 인하여 기하학적 형상이 복잡한 경우에는 복사 형태계수를 구하기가 매우 힘들기 때문에 기존의 RIM으로는 해석하기가 매우 힘든 형편이다. 따라서 본 연구에서는 Sanchez와 Smith⁽⁷⁾가 제안한 바와 같이 투과성 매질이 채워진 공간내에 돌출물들이 임의로 배치되어 있을 때의 복사 열전달을 DOM을 이용하여 해석하는 프로그램을 개발하고, 이를 기존의 열·유동 해석 프로그램에 적용하여 전도-자연대류-표면복사 복합 열전달을 해석하는 프로그램을 개발하였다. 또한 기존의 연구들에서는 발열 블록의 온도를 등온으로 가정하여 해석하였는데, 이는 일반적으로 전자장비 냉각문제가 열입력(W)이 주어지고 전자장비내의 최대 온도를 얻는 것이 주된 목적인 점을 감안하면 바람직하지 않은 가정이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 칩에 일정한 발열량이 주어지는 경우에 대하여 무차원 지배방정식을 수식화하고 해석을 수행하였다.

2. 수학적 모델

2.1 지배 방정식

본 연구에서는 칩이 3개 부착된 기판이 밀폐 공간의 한쪽 벽을 이루고 있는 경우를 가정하여 전도-자연대류-표면복사의 복합 열전달 해석을 하였다. 해석을 위한 모델은 Fig.1과 같이 사각 밀폐공간 내의 한쪽 수직 기판위에 각각 단위 길이당 일정한 열 Q[W/m]를 발열하는 칩이 3개 부착되어 있고, 상하벽은 단열되어 있으며, 마주 보는 수직 벽은 저온(T_c)으로 유지되고 있다.

실제 물리 현상을 기술하는 지배방정식을 다음과 같은 가정하에 단순화시켰다.

- (1) 2차원 정상상태, 비압축성 층류 유동이다.
- (2) 점성 소산은 무시한다.
- (3) 모든 물성치들은 부력항을 제외하고는 일정하고, Boussinesq 근사를 만족한다.
- (4) 매질은 투과적이고, 각 벽면과 발열체는 모

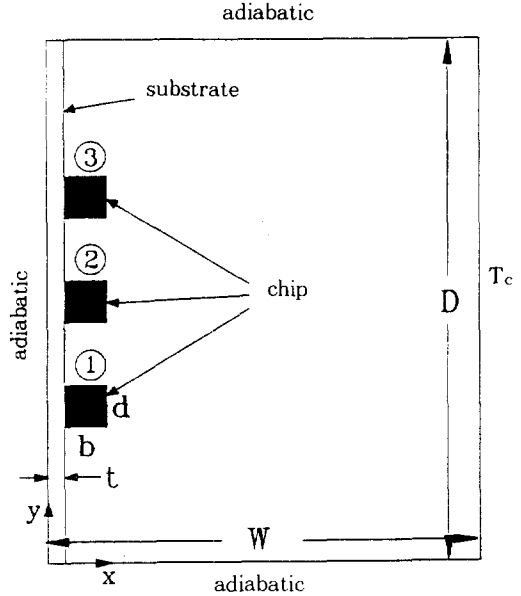


Fig.1 Schematic diagram of the physical system

든 방향으로 균일한 방사 및 반사를 하는 비투과 경계이다.

- (5) 모든 벽면의 방사율은 동일하다.
- (6) 모든 칩에서는 일정한 열이 발생된다.

위의 가정하에 무차원 지배방정식은 다음과 같다.

유체 영역 :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \tag{1}$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + (Pr/Ra)^{1/2} \nabla^2 U \tag{2}$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} + (Pr/Ra)^{1/2} \nabla^2 V + \phi \tag{3}$$

$$U \frac{\partial \phi}{\partial X} + V \frac{\partial \phi}{\partial Y} = (1/RaPr)^{1/2} \nabla^2 \phi - \frac{(1/RaPr)^{1/2}}{Pr} \nabla \cdot Q_r \tag{4}$$

고체영역(칩) :

$$U \frac{\partial \phi}{\partial X} + V \frac{\partial \phi}{\partial Y} = (1/RaPr)^{1/2} R_c \nabla^2 \phi + (1/RaPr)^{1/2} (d/b) \quad (5)$$

고체 영역(기관) :

$$U \frac{\partial \phi}{\partial X} + V \frac{\partial \phi}{\partial Y} = (1/RaPr)^{1/2} R_s \nabla^2 \phi \quad (6)$$

여기서, 사용된 무차원수는 다음과 같다.

$$X = x/d, Y = y/d, U = u/U_0, V = v/U_0,$$

$$P = p/\rho U_0^2, \phi = \frac{T - T_c}{Q/kt}, \phi_0 = \frac{T_c}{Q/kt}$$

$$Pl = \frac{(kt/d)}{4\sigma(Q/kt)^3}, Qr = \frac{qr}{4\sigma(Q/kt)^4},$$

$$Ra = g\beta Q d^3 / \alpha \nu kt, U_0 = (g\beta Q d / kt)^{1/2},$$

$$Rc = kc/kt, Rs = ks/kt$$

식 (2)와 (3)의 운동량 방정식에서 고체 영역에 대해서는 확산계수를 아주 크게 둠으로써 속도까지의 0으로 유지되기 때문에, 고체 영역의 에너지 방정식 (5)와 (6)은 순수 전도 문제로 된다.

온도 변화에 따른 밀도의 변화를 고려하여 주기 위하여 다음과 같은 Boussinesq 근사를 사용한다.

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_c)] \quad (7)$$

식(4)의 우변의 마지막 항은 복사 열유속 벡터의 발산항으로서, 이것은 복사 전달 방정식(Radiative Transfer Equation, RTE)을 풀어서 구할 수 있다. 여기서는 매질이 복사에 대하여 투과성인 공기이고, 칩과 기관은 비투과성(opaque)인 고체영역이라고 가정하였기 때문에, 복사 열유속은 오직 고체와 유체의 경계면에서만 존재하게 된다. 따라

서, 이 항은 고체와 유체의 경계면에 접한 검사체에 대하여만 고려하여 주면 된다.

2.2. 복사 열전달 해석

흡수 및 방사하는 매질에 대한 복사 강도의 복사 전달방정식은 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{\partial I}{\partial \xi} = -\kappa I + \kappa I_b \quad (8)$$

여기서 ξ 는 복사 강도가 전파되는 방향을, I 는 복사 강도를 나타내고, κ 는 매질의 흡수 계수, I_b 는 흑체 복사 강도를 나타낸다. 식 (8)을 2차원 직각 좌표계에 대하여 무차원 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\mu \frac{\partial I^*}{\partial X} + \eta \frac{\partial I^*}{\partial Y} = -\tau I^* + \frac{\tau}{4\pi} B \quad (9)$$

여기서 I^* 는 무차원 복사 강도이고, B 는 무차원 방사력으로서 각각 다음과 같이 정의된다.

$$I^* = \frac{I}{4\sigma(Q/kt)^4}, B = (\phi + \phi_0)^4 \quad (10)$$

여기서, ϕ_0 는 무차원 기준 온도로서, 다음과 같이 정의된다.

$$\phi_0 = \frac{T_c}{Q/kt} \quad (11)$$

식 (9)에서 투과성 매질 영역의 검사체에 대해서는 흡수계수를 0으로, 고체 매질 영역의 검사체에 대해서는 흡수계수를 매우 큰 값으로 주면 된다.

고체와 유체사이의 경계면에서 Patankar가 제안한 조화평균을 사용하면, 경계면 주위에 과도한 격자를 밀집시키지 않아도 물리적으로 타당한 결과를 얻을 수 있으므로, 대부분의 수치해석에서 이 방법을 사용하고 있다. 그러나, 이 방법을 표면복사 열유속과 함께 사용하기 위하여서는 Beckermann등⁽⁹⁾이 제안한 것과 같은 특별한 처리가 필요

하다. 즉, Fig.2에서와 같이 정상상태, 1차원 전도와 복사에 대하여 비투과 매질인 검사체적 P가 접촉면 e를 통해 투과 매질인 검사체적 E로 정미 복사열유속 q_r 을 방출하는 경우를 고려하면, 접촉면 e에 대한 에너지 평형식은 다음과 같다.

$$\frac{k_P}{(\delta x)_{e-}} (T_P - T_e) + \frac{k_E}{(\delta x)_{e+}} (T_E - T_e) - q_r = 0 \quad (12)$$

여기서, k_P 와 k_E 는 각각 검사체적 P와 E의 열전도 계수이고, T는 온도를 나타낸다. 식(12)를 T_e 에 정리하면 다음과 같다.

$$T_e = \frac{[k_P/(\delta x)_{e-}]T_P + [k_E/(\delta x)_{e+}]T_E - q_r}{[k_P/(\delta x)_{e-}] + [k_E/(\delta x)_{e+}]} \quad (13)$$

또한 검사체적 P에 대한 에너지 평형은 아래와 같다.

$$\frac{k_P}{(\delta x)_{e-}} (T_e - T_P) + \frac{k_w}{(\delta x)_w} (T_w - T_P) = 0 \quad (14)$$

검사체적의 오른쪽 면의 열유속에 대한 표현은 T_E 보다는 T_e 에 근거를 두는 것이 타당하므로, 접촉면 w에서의 열전도 계수 k_w 는 조화 평균 공식으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$k_w = \left(\frac{f_w}{k_w} + \frac{1-f_w}{k_P} \right)^{-1} \quad (15)$$

여기서 $f_w = (\delta x)_{w-} / (\delta x)_w$ 이다. 식 (13)의 T_e 를 식 (14)에 대입하고 식 (15)를 이용하여 쓰면 다음과 같다.

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + S_{r,P} \Delta x_P \quad (16)$$

여기서,

$$U = V = 0$$

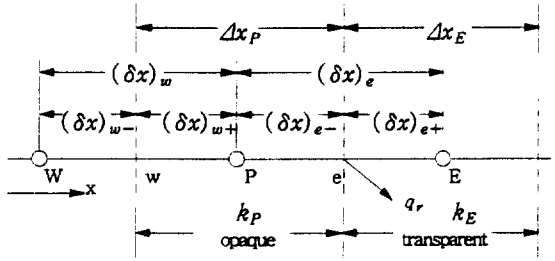


Fig.2 Control volumes and interfaces

$$a_E = \frac{k_E}{(\delta x)_e}, \quad a_W = \frac{k_W}{(\delta x)_w}, \quad a_P = a_E + a_W \quad (17)$$

그리고 복사에 의한 생성항은 다음과 같다.

$$S_{r,P} = -\frac{q_r}{\Delta x_P} \cdot$$

$$\frac{1}{[(\delta x)_{e-}/k_P]([k_P/(\delta x)_{e-}] + [k_E/(\delta x)_{e+}])} \quad (18)$$

$$S_{r,E} = -\frac{q_r}{\Delta x_E} \cdot$$

$$\frac{1}{[(\delta x)_{e+}/k_E]([k_P/(\delta x)_{e-}] + [k_E/(\delta x)_{e+}])} \quad (19)$$

위와 같이 접촉면의 열전도 계수에 대한 조화 평균 공식을 사용하면, 위의 식(18)과 (19)에서 알 수 있듯이 복사 생성항에 영향을 주게된다. Patankar의 검사체적 방법은 복사 생성항을 고려하지 않고 이산화 방정식의 각 계수들을 계산하므로, 위의 절차는 기존의 유한체적법을 이용한 컴퓨터 코드에서 표면 복사열유속의 변화를 보정하는데 유용하게 사용될 수있다.

경계조건

위에서 논의한 무차원 지배방정식에 대한 경계 조건은 물리적 조건으로부터 다음과 같다.

- 1) 모든 벽면과 발열체에서,

2) $Y=0$ 과 D/d 에서,

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

3) $X=0$ 에서,

$$\frac{\partial\phi}{\partial x} = 0$$

4) $X=B/d$ 에서,

$$\phi = 0$$

3. 수치해석 절차 및 검증

무차원 지배방정식(1)~(6)은 유한체적법을 이용하여 이산화시켰다. 무차원 복사전달방정식(9)는 구분종좌표법(DOM)을 이용하여 해석하였다. 구분종좌표법의 수치화에는 전체 입체각을 적당한 차수의 방향 여현과 가중치(weighting factor)를 선택함으로써 이산화시킬 수 있다. 입체각에 걸친 적분을 포함하는 양들은 각 종방향에 대하여 구적법을 이용한 합으로 계산되어 진다. 이 연구에서는 S-4를 사용하였다. 구분종좌표법의 해석에 대한 자세한 절차는 Sanchez등⁽⁷⁾의 논문에 잘 설명되어 있다. 복사전달방정식의 유한 차분식을 구하기 위하여 유도된 이산화 방법은 SIMPLER 알고리즘에서와 같은 검사 체적을 사용하기 때문에, 기존의 유동장 해석 프로그램과 잘 어울려 사용될 수 있다.

서로 연관된 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식 및 복사전달방정식을 풀기 위하여 다음과 같이 해석하였다.

(1) 초기 속도장 및 온도장을 가정한다.

(2) 주어진 온도장을 이용하여 복사전달방정식을 풀어 복사 강도를 구하고, 복사 열유속 벡터의 발산항과 경계에서의 복사 열유속을 구한다.

(3) 식(1)~(6)를 풀어 새로운 속도장과 온도장을 구한다.

(4) 수렴할 때 까지 과정(2), (3)을 반복한다.

Wroblewski 등⁽¹⁰⁾은 전도와 자연 대류가 복합된 열전달 문제의 수치 해석에는 단순한 온도 경계 조건이 주어진 열전달 문제, 즉 불력이 등온 조건으

로 주어진 경우에 비하여 해의 수렴에 상당히 많은 반복 계산이 요구된다고 보고한 바 있다. 본 연구에서도 전도-자연대류-표면복사의 모든 열전달 모드를 고려하여 풀기때문에 해의 수렴에 약 5,000~20,000번 정도의 상당히 많은 반복 계산이 소요되었다. 본 연구에서 고려된 격자계는 31×51 의 비균일 격자계이며, 수렴 조건으로는 각 변수들의 상대변화가 0.005%내에 들고, 최대 온도값의 상대 변화가 그 값의 0.00001배 이내에 들때를 수렴한 것으로 간주하였다.

개발된 자연대류-복사 복합 열전달 해석 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 Yücel 등⁽⁸⁾의 해석 결과와 비교하였다. Yücel 등은 사각 밀폐공간 내 돌출된 발열체가 없는 경우에 흡수, 방사 및 산란하는 매질이 채워져 있는 자연대류-복사의 복합 열전달 문제를 해석하였다. 이 연구에서는 산란이 없고, Ra수가 5×10^6 , Planck수가 0.02 및 광학 두께(τ)가 1.0인 경우에 대하여 해석하여 비교하였다. Fig.3은 $Y=0.5$ 인 단면에서의 속도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 Yücel 등의 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

4. 결과 및 고찰

돌출된 발열체를 가진 밀폐 공간내에서의 2차원 전도-자연대류-표면복사의 복합 열전달 문제를 해석하기 위하여, Fig.1에서와 같이 밀폐 공간의 한쪽 벽에 일정한 열을 방출하는 칩이 세 개 부착되어 있는 경우에 대하여 수치 해석하였다. 기본 계산 모델로서 $Ra=1 \times 10^5$, $Pl=0.01$, $\phi_0=0.06$, $Rc=1000$, $R_s=10$, $\epsilon=1$ 이고, 기하학적으로 조건으로는 $t/d=0.01$, $b/d=1$, $D/d=9.25$, $W/d=5.01$ 로 두고 계산하여 각각의 유동 형태와 등온선의 분포를 조사하였다. 또한 복사가 고려되지 않은 경우, Rayleigh수 및 기관의 열전도계수비(R_s)의 변화에 따른 밀폐 공간내의 열 유동특성을 조사하였다. 전자 장비의 냉각은 시스템내의 최대 온도를 허용 제한 온도이하로 유지하는 것이 목적이므로, 주어진 열입력 및 기하학적 조건에 따른 최대 온도의 크기를 예측하는 것이 주된 과제이다. 따라서, 본 연구에서는 각 인자의 변화에 따른 시스템

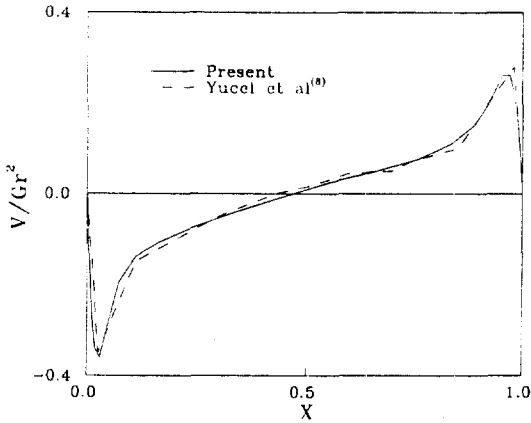


Fig.3 Comparison of the velocity profiles at Y = 0.5

내의 무차원 최대 온도와 평균 Nusselt수의 변화를 조사하여 열전달에 미치는 영향을 조사하였다. 평균 Nusselt수는 다음과 같이 정의한다.

$$Nu = \frac{hd}{k_f}$$

여기서, h는 열전달계수이고, d는 칩의 높이이다. 열전달계수 h는 다음과 같이 정의한다.

$$h = \frac{Q}{A_b(T_{CHIP} - T_c)} = \frac{Q}{(2b + d)(T_{CHIP} - T_c)}$$

칩의 온도 T_{CHIP} 은 칩의 표면온도로서, 칩의 열전도계수가 매우 크므로 칩의 평균온도로 가정하였다.

Fig.4와 Fig.5는 각각 복사를 고려하지 않았을 때와 복사를 고려하였을 때의 Rayleigh 수의 변화에 따른 유선과 등온선을 나타낸 것이다. 복사를 고려하지 않은 경우, 유선은 Rayleigh수의 증가에 따라 심하게 왜곡되어지며 내부에서는 몇개의 셀(cell)로 나뉘어지고, 등온선은 내부영역에서 거의 열적 성층을 이루고 있는 것을 볼 수 있다. 복사를 고려한 경우에는, 전체 유동장은 복사를 고려하지 않은 경우보다는 유선의 모양이 완만해졌지만, Rayleigh수가 큰 영역에서는 왜곡이 심한 편이다.

매질이 복사 참여 기체일 경우, 기체 복사가 고려되므로 보통 유선이나 온도장의 형태가 크게 변하게 되는 데, 본 연구에서는 매질이 복사 비참여 기체인 공기이기 때문에 표면복사만 일어나므로, 복사의 고려가 유동장이나 온도장의 형태에 큰 변화를 주지 못하였다. Fig.6과 Fig.7은 Rayleigh 수의 변화에 따른 무차원 최대 온도값과 평균 Nusselt수를 나타낸 것이다. Rayleigh수가 증가함에 따라 무차원 최대 온도는 감소하는 경향을 보였는데, 복사를 고려하지 않은 경우가 복사를 고려한 경우에 비하여 그 감소폭이 더 큰 것으로 나타났다. 또한 복사를 고려한 경우, 복사를 고려하지 않았을 경우보다 최대 온도값은 약 65~70% 정도 낮아졌으며, 이에 따라 평균 Nusselt수는 약 2.3~2.9배 증가하였다. 즉, 칩에서의 열방출은 대류에 의하여 약 30~40%, 복사에 의하여 60~70% 정도 이루어지므로, 전자 장비 냉각에 있어서, 모든 열전달 모드를 고려하여야 하는 중요성을 알 수 있다. Table 1과 Table 2는 각각 복사를 고려하지 않은 경우와 복사를 고려한 경우의 각 칩에서의 표면 온도와 평균 Nusselt 수를 나타낸 것이다. 고려된 모든 경우에 있어서, 최대 온도는 맨 윗쪽에 위치한 칩에서 발생하였다. 위치에 따른 칩간의 온도 차이는 복사를 고려하지 않은 경우 약 30% 정도의 차이를 보였으며, 복사를 고려한 경우는 약 10% 정도의 차이를 나타내었다. 즉, 자연 대류만을 고려한 경우에는 유동에 의하여 칩이 냉각되므로 유동에 따라 칩의 냉각 정도가 결정되지만, 복사가 고려되면 유동에 관계없이 기하학적 요인이 많은 영향을 미치게되므로 온도차이가 작아지게 된다. 또한 Rayleigh수가 커짐에 따라 칩간의 온도차이는 약간 더 커지는 것으로 나타났다. 즉 이것은 칩의 열입력이 커질수록 칩간의 온도차이는 커진다는 것을 의미한다.

Fig.8과 Fig.9는 기관의 열전도 계수비(R_r)를 변화시켰을 때의 무차원 최대온도 및 평균 Nusselt 수의 변화를 나타낸 것이다. 무차원 최대 온도는 R_r 가 증가함에 따라 점점 큰 폭으로 감소하여, R_r 가 1에서 1000으로 증가할 때 약 19%의 온도 감소가 나타났고, 평균 Nusselt수는 약 23% 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, R_r 가 증가하여도 칩간의 온도 차이는 약 11~13%로 약간 더 증

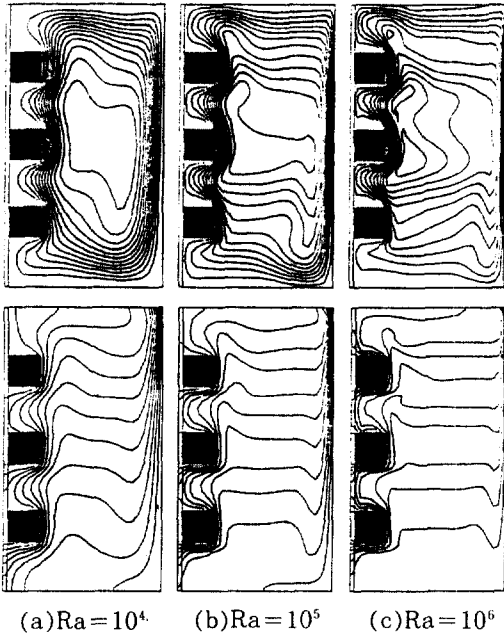


Fig.4 Streamlines and isotherms without radiation for

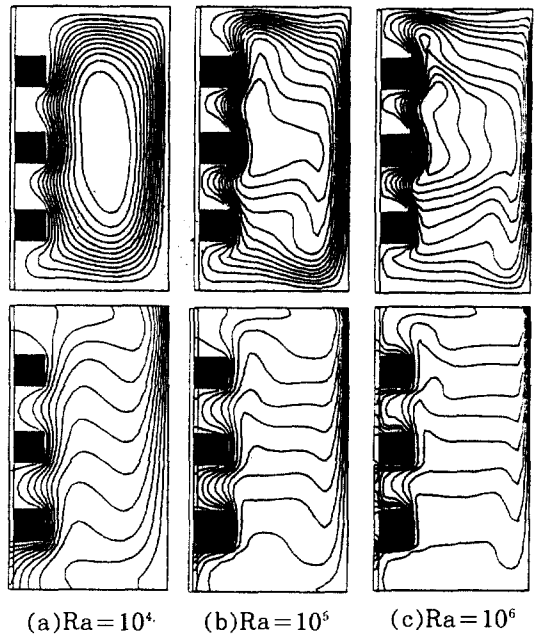


Fig.5 Streamlines and isotherms with radiation for

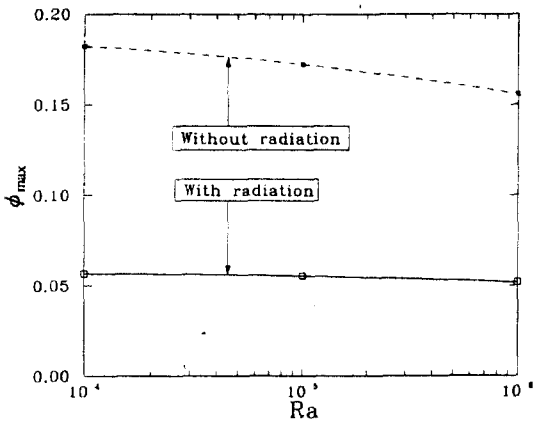


Fig.6 Effect of Rayleigh number on maximum chip temperature

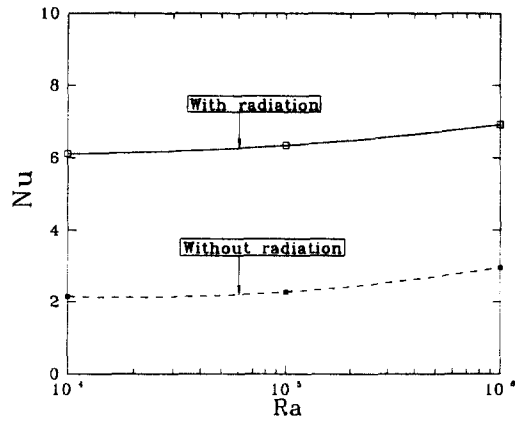


Fig.7 Effect of Rayleigh number on average Nusselt number

가하는 것으로 나타났다. 이것은 기판의 열전도계수가 커짐에 따라 칩간의 온도 차이값은 작아졌지만, 전체적인 온도값의 감소로 상대적인 온도차는 오히려 작아진 것이다. 이와 같이 기판의 열전도계수가 커짐에 따라 칩의 냉각 성능이 향상되는 것은 기판의 높은 열전도계수에 의해 칩에서 발생된 열

을 칩과 기판 전체 표면에서 공기로의 대류와 차가운 벽으로의 표면복사에 의해 방출하기 때문이다. 즉, 자연대류와 표면복사에 의해 칩을 냉각할 때, 기판의 열전도계수는 칩의 냉각 성능에 중요한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Table 1 Dimensionless temperature and Nusselt number of each chip without radiation

Ra	Dimensionless Temperature			Nu		
	Chip 1	Chip 2	Chip 3	Chip 1	Chip 2	Chip 3
10 ⁴	0.126	0.158	0.182	2.65	2.12	1.83
10 ⁵	0.119	0.149	0.172	2.80	2.23	1.93
10 ⁶	0.101	0.129	0.156	3.30	2.59	2.14

Table 2 Dimensionless temperature and Nusselt number of each chip with radiation

Ra	Dimensionless Temperature			Nu		
	Chip 1	Chip 2	Chip 3	Chip 1	Chip 2	Chip 3
10 ⁴	0.0517	0.0552	0.0567	6.44	6.04	5.88
10 ⁵	0.0490	0.0533	0.0554	6.80	6.25	6.01
10 ⁶	0.0442	0.0486	0.0518	7.54	6.85	6.43

Table 3 Effect of R_s on dimensionless temperature and Nusselt number of each chip

Ra	Dimensionless Temperature			Nu		
	Chip 1	Chip 2	Chip 3	Chip 1	Chip 2	Chip 3
1	0.0495	0.0534	0.0557	6.74	6.24	5.99
10	0.0490	0.0533	0.0554	6.80	6.25	6.01
100	0.0467	0.0515	0.0532	7.13	6.47	6.265
1000	0.0392	0.0439	0.0452	8.49	7.60	7.37

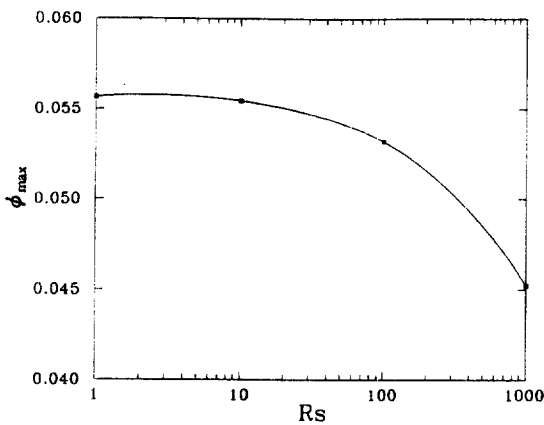


Fig.8 Effect of the substrate-fluid conductivity ratio on dimensionless maximum temperature

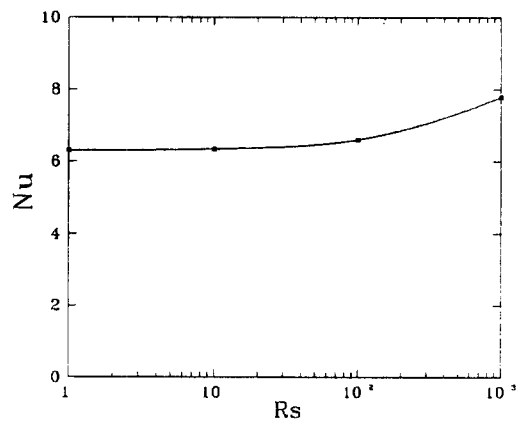


Fig.9 Effect of the substrate-fluid conductivity ratio on average Nusselt number

5. 결 론

도출된 칩을 가진 밀폐 공간내에서의 2차원 전도-자연대류-표면복사 복합 열전달 문제를 수치적으로 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 구분종좌표법을 이용하여 일정한 발열량을 갖는 칩이 기판에 부착되어 있는 밀폐 공간내에서의 전도-자연대류-표면복사 복합 열전달을 해석하는 프로그램을 개발하고, 그 타당성을 검증하였다.
- 2) 고려된 기하학적 조건에서, 칩으로부터의 열전달은 자연대류에 의해 약 30~40%, 복사에 의해 60~70% 정도 이루어져, 전자 장비 냉각 문제에서 복사가 지배적인 열전달 모드인 것으로 나타났다.
- 3) 기판의 열전도계수비가 1에서 1000으로 증가함에 따라, 칩의 냉각성능은 약 20% 정도 향상되었으며, 칩간의 온도차이도 작아졌다.
- 4) 본 연구에서 고려된 모든 경우에 있어서 칩의 온도는 맨 위쪽이 가장 높고 아래쪽의 칩일수록 온도가 낮아서, 윗쪽에 위치한 칩일수록 냉각이 불리하다.
- 5) 칩간의 온도차이는 Rayleigh수가 클수록, 기판의 열전도계수비가 작을 수록 큰 것으로 나타났다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. Jaluria, Y., 1985, "Interaction of Natural Convection Wakes Arising from Thermal Sources on a Vertical Surface", ASME J. Heat Transfer, 107, pp.883-892.
2. Afrid, M. and Zebib, A., 1989, "Natural Convection Air Cooling of Heated Components Mounted on a Vertical Wall", Numer.Heat Transfer, A15, pp.243-259
3. 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
4. Shakerin, S., Bohn, M. and Loehrke, R. I., 1986, "Natural Convection in an Enclosure with Discrete Roughness Elements on a Vertical Heated Wall", Proc. Eighth Intl. Heat Transfer Conf., San Francisco, U.S. A., pp. 1519-1525
5. 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
6. Smith, T. F., Beckermann, C. and Weber, S. W., 1991, "Combined Conduction, Natural Convection, and Radiation Heat Transfer in an Electronic Chassis", J. Electronic Packaging, vol.113, pp. 382-391
7. 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
8. Yücel, A., Acharya, S., and William, M.L., 1989, "Natural Convection and Radiation in a Square Enclosure", Numerical Heat Transfer, vol.15, pp. 261-278
9. 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
10. Wroblewski, D.E.and Joshi,Y., 1994, "Liquid Immersion Cooling of a Substrate Mounted Protrusion in a Three-Dimensional Enclosure : The Effects of Geometry and Boundary Conditions", J.Heat Transfer, vol.116, pp.112-119