

〈論 文〉

복사열과 부분열림이 자연대류에 미치는 영향에 관한 연구

노승균* · 김광선** · 이재효***

(1994년 12월 7일 접수)

Natural Convection Coupled with Thermal Radiation within Partially Open Enclosure

S. K. Noh, K. S. Kim and J. H. Lee

Key Words: Natural Convection(자연대류), Thermal Radiation(복사), Spherical Harmonics Approximation(구조화근사법), Enclosure(밀폐공간), Partial Openings(부분열림)

Abstract

The unsteady numerical simulations have been presented for the laminar natural convection in a partially open compartment. Computations were performed within the domain of the compartment in order to show the thermal radiation and the partially opening effects on the flow fields and heat transfer characteristics. The results were shown for different Planck numbers(0.05~5) and opening ratios(0.25~0.75) being fixed with $Ra=10^5$ and $Pr=0.71$. Considering the flow which is buoyancy driven from the heated wall, and the buoyancy is not much affected by the further outside region from the opening, the numerical computations have been performed without an outer region by the particular boundary treatments on the flow velocity and temperature at the different partial openings. The confined numerical domain reduced the CPU time and the memory of computer. P-1 approximation of radiative transfer equation was employed with Marshak type boundary conditions along with the pseudo-black body approximation at the partial openings. The numerical results clearly show that the natural convective flow and heat transfer are much affected by increase of thermal radiation particularly from the initial state. When thermal radiation is not much affecting the flow($PL \leq 1$), it was found that thermal radiation effects are almost negligible.

기 호 설 명

A_o : 열림률(opening ratio)

B : 무차원 방사력

C_p : 정압 비열

g : 중력 가속도

H : 수직 공간의 높이

H_D : 열린부분 높이

I : 무차원 복사강도

I_o : 무차원 입사력

I'_o : 유차원 입사력

k : 열전도도

k_a : 흡수계수

L : 수직공간의 넓이

Nu : Nusselt수

p : 유차원 압력

P : 무차원 압력

PL : Plank수

*건국대학교 대학원 기계공학과

**한국기술교육대학 기계공학과

***정회원, 건국대학교 기계공학과

Pr	: Prandtl수
q_r	: 유차원 복사 열유속
Q_R	: 무차원 복사 열유속
$Q_{R,x}$: 무차원 복사 열유속의 X 성분
$Q_{R,y}$: 무차원 복사 열유속의 Y 성분
Ra	: Rayleigh수
t	: 무차원 시간
T	: 유차원 온도
u	: 유차원 x -방향속도
U	: 무차원 x -방향속도
v	: 유차원 y -방향속도
V	: 무차원 y -방향속도
x	: 유차원 수평좌표
X	: 무차원 수평좌표
y	: 유차원 수직좌표
Y	: 무차원 수직좌표
α	: 열확산계수
ε	: 방사율
Θ	: 무차원 온도
Θ_0	: 무차원 기준온도
ρ	: 밀도
ν	: 동점성계수
σ	: Stefan-Boltzmann 상수
τ	: 광학두께

위첨자

'	: 유차원
-	: 평균치

아래첨자

H	: Hot
i, j	: x, y 에 대한 tensor
w	: 벽면
∞	: 저온부 및 상온

1. 서 론

일부가 열린공간 내에서의 자연대류에 관한 연구는 밀폐된 공간 내에서의 자연대류에 관한 연구와 함께 최근에 와서 활발히 진행되고 있는 연구 분야이다. 이에 대한 연구는 특히 자연대류를 이용한 냉각, 실내의 화재, 열사이폰, 비행기의 제동 시스템 등의 응용에 매우 유용한 부분이다. 특히 이에 대한 비정상상태의 해석은 초기상태에서 부력으로

인한 유동의 발생과 열전달이 시간이 지남에 따라 정상상태로 변화가는 과정을 알아볼 수 있으며, 특히 실내 화재의 경우에는 초기의 유동 및 열전달의 변화과정이 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 최근의 일부가 열린공간 내에서의 자연 대류에 관한 연구는 대부분 복사가 배제된 상태에서의 자연대류 해석이 대부분이며, 이로 인해 복사 열전달이 포함된 해석은 고온으로 유지되는 공간 내에서는 그 영향력이 더욱 커지므로, 실제 현상에 상당히 근접할 수 있는 해석 방법이다.

사각형 밀폐공간 내에서 좌우벽이 고온과 저온으로 유지되고 상·하 단열된 상태에서의 층류 정상상태에서의 유동 및 열전달에 대한 연구는 Davis⁽¹⁾와 Scheuerer 등⁽²⁾에 의해 매우 정확한 수치해가 얻어졌다. 여기에 복사를 고려한 연구는 Viskanta 등⁽³⁾에 의해 4각 밀폐공간내의 복사가 포함된 비정상 층류 자연대류에 관한 연구가 수행되었는데, 여기서 공간내의 표면과 매질이 매우 급격한 온도 상승을 보이며, 유동 또한 복사가 없을 때와는 다른 형태를 가진다는 것을 연구하였다. 이때 벽면의 복사 열유속 평형방정식에는 형상함수를 사용하였다. 또한 Beghein 등⁽⁴⁾은 사각 밀폐공간내의 산란효과에 중점을 두어 P-1 근사를 이용하여 SIMPLER기법을 이용하여 해석하였으며, 단열벽에서의 방사율을 0으로 처리하였다. 또한 난류 자연 대류에 관한 연구로 $k-\varepsilon$ 난류모델을 이용하여 비회색(non-gray) 기체가 채워진 사각 밀폐 공간 내에서 P-1 근사를 이용하여 표면복사와 가스복사 그리고 복사가 없을 때의 유동 및 열전달 특성을 고려한 연구가 수행되었다.⁽⁵⁾

일부가 열린공간 내에서의 자연대류에 관한 연구도 매우 활발히 진행되고 있는데, 이들 연구들은 열린부분의 경계조건의 처리가 매우 중요한 수치해석적 의미를 갖고 있다. Chan 등⁽⁶⁾은 수직벽이 고온으로 유지되고 상·하벽은 단열된 2차원 정사각형 열린공간 내에서의 수치해석을 속도-압력방법(primitive formulation)을 이용하여 열린공간의 외부영역까지 수치해석영역에 포함시켜 정상상태로 해석하였다. 이와 같이 열린부분에서 외부로 확장된 경계를 갖는 것은 사각 공간내의 유동 및 열전달에 대해 열린부분으로부터 먼 영역의 영향을 최소화하기 위한 방법이나, 이는 수치해석적으로 많은 계산 수행 시간을 필요로 하게 된다. 최근의 연구에서는 수치영역을 사각 공간내로 제한하여 열린

부분에 바로 경계조건을 주는 방법이 수행되고 있다. 이런 경계를 갖는 연구는 Abib 등⁽⁷⁾이 수직벽의 1/4이 가열되고 상하 및 일부가 단힌 벽이 단열된 종횡비가 2인 직사각형 2차원 층류 자연대류에 대해 유선-와도 방법을 이용하여 비정상 상태로 해석하였으며, Nieuwstadt 등⁽⁸⁾도 종횡비가 1인 직사각형의 공간내에 수직벽이 고온이고 상·하벽이 단열이며, 나머지 수직면이 완전히 열린 공간에 대해서 ADI와 SOR방법을 이용하여 Gr수와 Pr수를 변화시키며 비정상상태로 해석하였으나 복사의 영향은 무시하였다. Bejan 등⁽⁹⁾은 한쪽벽은 고온이며 아래와 또 하나의 벽은 단열되고 위가 열린공간 내에서의 순수 자연대류에 관한 연구와 표면복사가 포함된 공간 내에서의 정상상태의 자연 대류에 관해 연구로써 매질 내에서의 복사는 고려하지 않았다.

본 연구에서는 일부가 열린 2차원 공간 내에서의 흡수 및 방사하는 회기체에 대한 복사가 고려된 유동장 및 열전달을 해석하기 위하여, P-1 근사법을 이용하였으며, 복사에 대한 산란효과는 무시하였고, Patankar에 의한 SIMPLER기법⁽¹⁰⁾을 이용하여 비정상상태로 수치영역을 사각공간내로 제한하여 열린부분에 바로 경계를 주어 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서는 초기상태에서 정상상태로 가는 과정의 복사의 영향과 열린 공간의 영향을 알아보는데 그 연구 목적이 있으며, 따라서 Ra수는 10⁵로 하고 Pr수는 공기에 대한 0.71을 사용하였다. 복사에 대한 변수로는 방사율을 모든 경계에서 1로 고정시키고, Planck수를 변화시켜 진도에 대한 복사의 영향을 파악하였으며, 또한 열린 공간의 크기의 영향을 조사하였다. 또한 모든 연구는 복사가 없는 경우와의 비교를 통하여 복사로 인한 변화를 알아보았다.

2. 이론해석

2.1 모델의 선정

본 연구에서 고찰하고자 하는 2차원 공간의 형상과 좌표는 Fig. 1에 나타내었다. 관심 공간의 물리적 형상은 높이가 H이고 폭이 L인 종횡비가 1인 직사각형으로 되어 있고, 좌측벽은 고온 T_H로 유지되고 있으며, 상부벽과 하부벽은 단열되어 있다. 우측부분은 단힌 벽과 열린공간으로 되어 있고, 단힌 벽의 경우는 단열되어 있다. 여기서 열린부분의

길이 H₀는 가변적으로, 본 연구에서는 열린 정도를 나타내기 위해 다음 식(1)과 같이 무차원 변수 열림을 A₀를 정의하였으며, 또한 Fig. 1에서의 A 점은 온도를 비정상상태에서의 온도변화를 알아보기 위한 온도 측정점이다.

$$A_0 = \frac{H_0}{H} \quad (1)$$

2.2 지배방정식

본 연구의 관심영역 공간내의 유동장 및 온도장을 지배하는 완전한 형태의 방정식을 다음과 같은 가정과 조건으로부터 단순화하였다.

본 연구의 물리적 모델은 유체유동과 열전달현상에 대해 2차원적으로 가정하였으며, 유체는 비압축성 Newtonian 유체이며, 층류 및 비정상상태이다. 복사에 대해서는 흡수 및 방사하는 회기체로 구성되어 있고, 매질의 복사 산란효과는 무시하였다. 또한 모든 벽은 흑체벽이며, 복사에 대해 비투과(opaque)적이다.

이와 같은 가정과 조건에 의하여 단순화된 지배방정식은 무차원 형태로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (2)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \\ = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \left(\frac{Pr}{Ra}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}\right) + \Theta \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + U \frac{\partial \Theta}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta}{\partial Y}$$

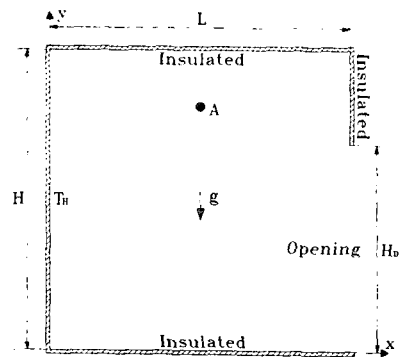


Fig. 1 Schematic diagram of physical system

$$= \frac{1}{(RaPr)^{1/2}} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} \right) - \frac{\Theta_o}{(RaPr)^{1/2} PL} \left(\frac{\partial Q_{R,X}}{\partial X} + \frac{\partial Q_{R,Y}}{\partial Y} \right) \quad (5)$$

여기서, 운동량방정식 (4)의 부력항은 Boussinesq 근사를 적용하였으며, 에너지방정식 (5)에 포함되어 있는 복사 열유속 $Q_{R,X}$ 와 $Q_{R,Y}$ 는 P-1 근사에 의한 복사 열전달방정식의 해로부터 얻어진다.

위의 가정에 따라 복사 열전달방정식에 구조화 근사를 도입하여, 무차원 P-1 근사 복사 열전달방정식을 표현하면,

$$\frac{\partial^2 I_o}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial Y^2} = 3\tau^2 (I_o - B) \quad (6)$$

여기서, B 는 방사력으로 다음과 같다.

$$B = \left(1 + \frac{\Theta}{\Theta_o} \right)^4 \quad (7)$$

무차원 복사 열유속 Q_R 을 무차원 복사 입사력 I_o 로 나타내면,

$$\frac{\partial I_o}{\partial X} = -3\tau Q_{R,X} \quad (8)$$

$$\frac{\partial I_o}{\partial Y} = -3\tau Q_{R,Y} \quad (9)$$

이고, 이것은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial Q_{R,X}}{\partial X} + \frac{\partial Q_{R,Y}}{\partial Y} = -\frac{1}{3\tau} \nabla^2 I_o \quad (10)$$

본 연구에서 사용한 무차원 변수는 다음과 같이 정의 된다.

$$(X, Y) = \frac{(x, y)}{H}$$

$$(U, V) = \frac{(u, v)}{(\alpha/H)(RaPr)^{1/2}}$$

$$t = \frac{\alpha(RaPr)^{1/2}}{H^2} t'$$

$$P = \left(\frac{H^2}{\rho \alpha^2} \right) \left(\frac{\rho + \rho g y}{RaPr} \right)$$

$$\Theta = \frac{(T - T_o)}{(T_H - T_o)}$$

$$T_o = \frac{(T_H + T_o)}{2}$$

$$\Theta_o = \frac{T_o}{(T_H - T_o)}$$

$$I_o = \frac{I'_o}{4\sigma T_o^4}$$

$$Q_R = \frac{q_R}{4\sigma T_o^4}$$

$$\tau = k\alpha H$$

$$PL = \frac{k}{H} \frac{1}{4\sigma T_o^3}$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_H - T_o)H^3}{\alpha\nu}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (11)$$

2.3 초기 및 경계조건

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 수치해석 영역의 초기 및 경계 조건을 나타내고 있다. 온도 경계조건은 왼쪽의 수직벽의 고온경계와 오른쪽의 일부 닫힌 벽과 수평 벽은 단열되어 있다. 열린부분에서는 유동이 외부에서 유입되면 외부온도를 경계로 하고, 유동이 외부로 나갈 때는 X-방향의 온도 구배를 일정하게 주었다. 이것은 Chan과 Tien⁽⁶⁾에 의한 연구와 같은 것으로, $X=1$ 인 경계면을 지나 는 유동이 대류가 지배적이라는 가정에 의한 것이다. 속도 경계조건의 경우도 이와 유사하며, 열린 부분에서의 V 속도를 0으로 하고 이 가정으로부터 열린부분에서의 압력 경계조건 $P=0(\text{const.})$ 를 얻을 수 있다. 그러나 SIMPLER 알고리즘에서는 특정 압력값을 경계조건으로 주기가 어렵게 되어 있다. 따라서 Bejan 등⁽⁹⁾의 연구에서 제시한 연속방정식을 이용하여 이 문제를 해결하였다. 이것은 Bejan 등⁽⁹⁾의 연구에서 그 정확성과 물리적 타당성이 입증되었다.

$$t=0, V=U=I_o=0 \quad \Theta=-0.5 \quad (12)$$

$$t>0 \quad \Theta_H=0.5 \text{ at } X=0, 0 \leq Y \leq 1 \quad (13)$$

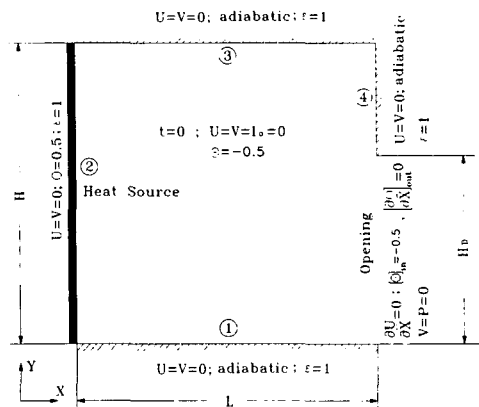


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

$$\frac{\partial \theta}{\partial X_i} + \frac{1}{3PL\tau} \frac{\partial I_o}{\partial X_i} = 0 \text{ at } \begin{cases} Y=0, 0 \leq X \leq 1 \\ Y=1, 0 \leq X \leq 1 \\ X=1, \frac{H_D}{H} \leq Y \leq 1 \end{cases} \quad (14)$$

여기서, $i=1, 2$ 로 각각 X, Y 를 나타낸다.

$$\begin{aligned} (\theta)_{in} &= -0.5; \left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)_{out} \\ &= 0 \text{ at } X=1, 0 \leq Y \leq \frac{H_D}{H} \end{aligned} \quad (15)$$

$$U = V = 0 \text{ at the wall} \quad (16)$$

$$V = P = 0; \frac{\partial U}{\partial X} = 0 \text{ at } X=1, 0 \leq Y \leq \frac{H_D}{H} \quad (17)$$

복사에 대해서는 모든 벽을 흑체로 가정하여 방사율 ϵ_w 는 1로 고정하였으며, 열림부분에서는 외기 온도를 갖는 가상 흑체벽(pseudo-black wall)으로 가정하였다. 이에 대한 경계조건으로 저차의 P-N 근사에서 많이 사용되는 Marshak의 경계조건⁽¹¹⁾을 사용하였다.

무차원 형태의 Marshak의 경계조건을 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial I_o}{\partial n_i} = \pm 3\tau \lambda_i (I_o - B) \quad (18)$$

여기서,

$$\lambda_i = \frac{\epsilon_i}{2(2 - \epsilon_i)} \quad (19)$$

이고, 여기서, i 는 각각의 벽의 표면(Fig. 2)을 나타내며, n_i 는 벽에서 수직좌표를 나타낸다. 또 (+)는 $X=0$ 또는 $Y=0$ 에서 가지며, (-)는 $X=1$ 또는 $Y=1$ 에서 갖는다.

2.4 열전달

열전달은 고온벽으로부터 저온부로

확산(diffusion), 대류(transport) 그리고 복사(radiation)에 의해 일어난다. 그러므로 어느 특정 위치에서의 열플럭스(local heat flux)는 다음과 같이 유차원으로 표시할 수 있으며,

$$q'(x, y) = -k \frac{\partial T}{\partial x} + \rho C_p u (T - T_o) + q'_{r,x} \quad (20)$$

이에, Nusselt수를 정의하면

$$Nu = \frac{Q(x)}{Q_{\text{pure conduction}}} = \frac{Q(x)}{\lambda \Delta T / L} \quad (21)$$

이다. 따라서 다음과 같은 평균 Nusselt 수를 정의할 수 있다.

$$\overline{Nu}(X) = \int_0^1 \left(-\frac{\partial \theta}{\partial X} + U(\theta - \theta_o) - \frac{1}{3PL\tau} \frac{\partial I_o}{\partial X} \right) dy \quad (22)$$

3. 수치해석

본 연구에서는 속도-압력방범으로 Patankar에 의한 SIMPLER기법을 적용하여, 제어체적 공식화에 의한 엇갈린 격자에 의해 이산화하였으며, 지배방정식의 대류항을 이산화하는데 있어서는 상류도식을 사용하였다. 비균일 격자를 사용하여 경계면 근처에서 급격한 변화에 따른 부정확성을 줄이면서 수렴조건에 도달하도록 하였으며, 40×40 을 기준으로 하였다. 비정상 해석에서 사용된 초기 시간간격은 0.02로 시작하여 정상상태로 갈수록 수치해석의 안정화로 인하여 5까지 증가하였다. 또한 에너지방정식은 압력항이 없으며, 복사 열전달방정식에 대해서는 대류항이 없는 것으로 고려되어졌다.

다음은 각 시간단계에서의 수렴조건을 나타내며,

$$\text{Max} 1 \frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\phi^{n+1}} \Big|_{t+\Delta t} < 10^{-3} \quad (23)$$

정상상태를 위한 수렴조건은 다음과 같다.

$$\text{Max} 1 \frac{\phi_{t+\Delta t} - \phi_t}{\phi_{t+\Delta t}} \Big|_{t+\Delta t} < 10^{-4} \quad (24)$$

4. 결과 및 고찰

본 연구의 수치적 검증은 위하여, 2차원 층류 자연대류에 대해 Chan과 Tien⁽⁶⁾에 의한 결과와 본 연구의 열림부분에서 바로 경계를 주어 계산한 결과의 평균 Nu수의 값을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다($Ra=10^2 \sim 10^9, Pr=1$). 전도의 영향이 큰 Ra수가 10^4 보다 작은 경우에는 유체가 유입되는 부분에서 고려한 대류가 지배적인 경계조건을 택함으로써 벽에서의 열전달이 커져서 큰 Nu값을 보이고 있으며, Ra수가 10^4 보다 커짐에 따라 대류 영향이 커져서 거의 일치된 값을 보이고 있다.

복사를 고려한 경우의 수치 검증은 위하여 Yücel 등⁽¹²⁾에 의해 구분중좌법(S4)을 이용하여 수행된

밀폐공간내의 복사가 있는 자연대류와 같은 모델과 물리적 인자를 가지고 본 연구의 P-1 근사법을 이용하여 해석한 결과와의 비교를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4는 $X=0.5$ 와 $Y=0.5$ 에서의

U, V 속도를 비교한 결과인데, 거의 일치된 속도 분포를 보이고 있으며, Fig. 5의 등온선 및 유선의 결과도 본 연구의 결과가 유동의 크기가 조금 작게 예측되었으나 대체로 유사한 결과를 보여, 본 연구

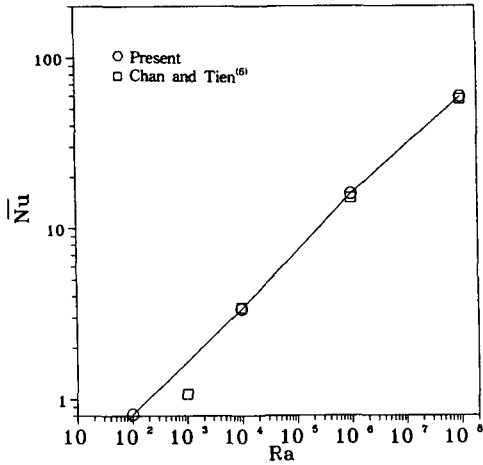


Fig. 3 Average Nusselt number ($A_0=1$)

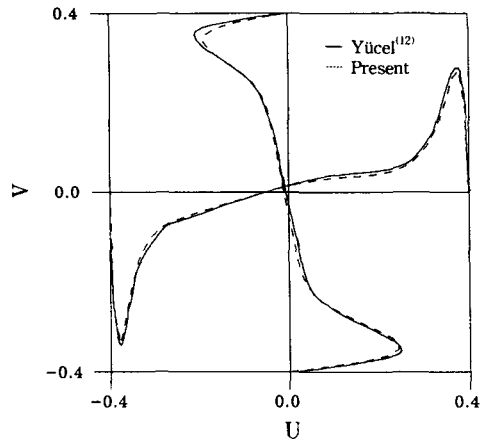
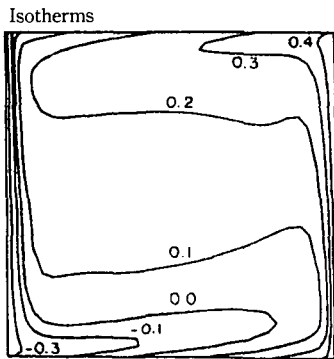
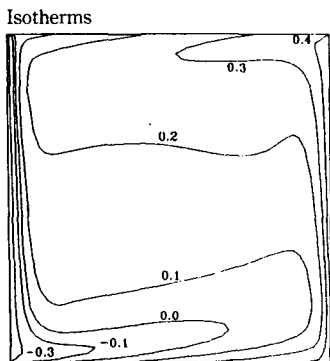
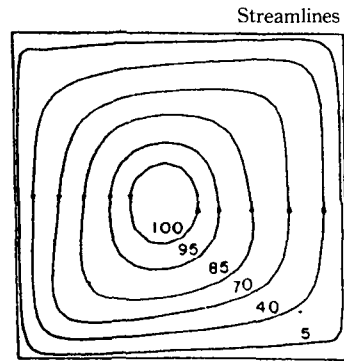


Fig. 4 The velocity profiles of an enclosure at $X=0.5$ $Y=0.5$ ($Ra=5 \times 10^6$, $PL=0.05$, $\tau=1$)



(a) Yücel et al



(b) Present

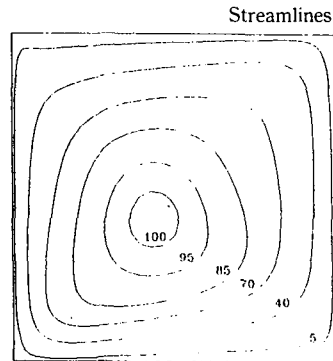


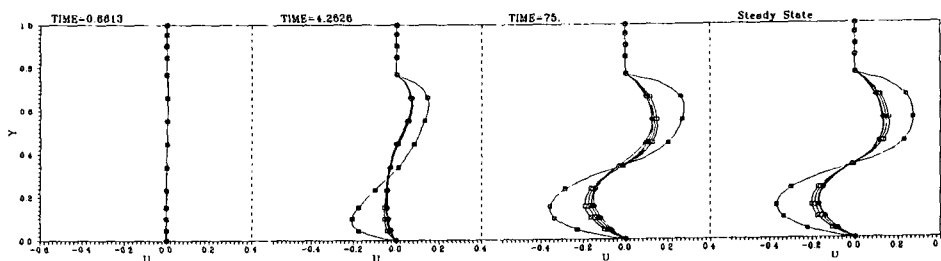
Fig. 5 Isothermas and streamlines for radiating fluid ($Ra=5 \times 10^6$, $PL=0.05$, $\tau=1$)

의 계산결과와 타당성을 확인할 수 있었다.

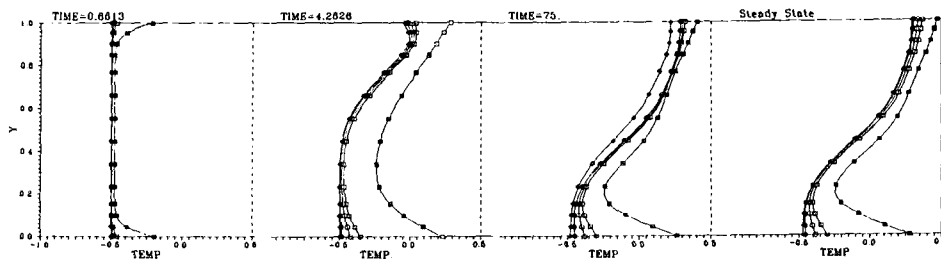
Fig. 6은 A_0 가 0.75일 때의 출구에서의 U 속도 분포와 $X=0.5$ 일때의 수직온도 분포의 시간에 따른 변화 과정을 PL 수에 따라 나타낸 것이다. 속도 분포의 경우 복사의 영향이 큰 경우일수록 상대적으로 큰 속도분포를 보이고 있으며, 복사의 영향이 작은 경우($PL \geq 1$)에는 복사가 없는 경우와 거의 유사한 속도를 보이고 있다. 온도분포의 경우는 복

사를 고려했을 경우가 초기에 벽근처에서 급격한 온도 상승을 보이고 있으며, 전체적으로 높은 온도 분포를 보이며 정상상태로 가고 있으며 복사의 영향이 작은 경우에는 그 영향을 무시할 수 있을 만큼 복사를 무시한 경우와 유사한 값을 보이고 있다.

Fig. 7는 $X=0.5$, $Y=0.5$ 에서의 정상 상태에서 의 속도 분포를 A_0 에 따라 나타낸 것으로 속도 분



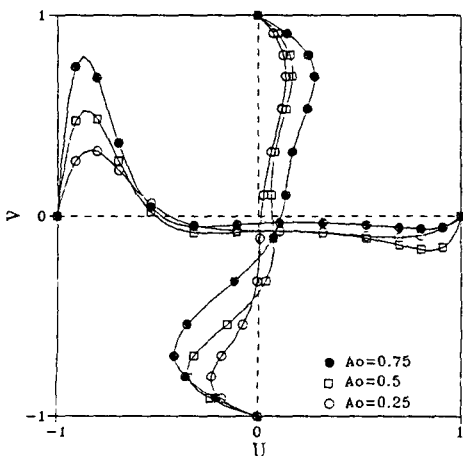
(a) Velocity profiles at $X=1$



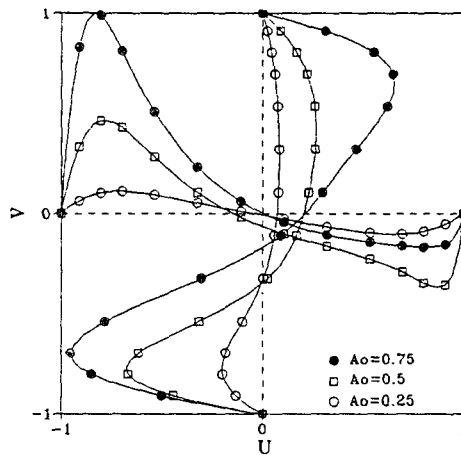
(b) Temperature profiles at $X=0.5$

Fig. 6 The velocity profiles at $X=1$ and temperature profiles at $X=0.5$ ($A_0=0.75$)

(■ $PL=0.05$; □ $PL=0.5$; ○ $PL=1$; ● $PL=5$; # No Radiation)



(a) No radiation



(b) With radiation

Fig. 7 The velocity profiles at $X=0.5$ and $Y=0.5$ ($PL=0.05$)

포 값을 (-1~1)로 하여 나타낸 것이다. U -속도 분포는 A_0 가 클수록 크게 나타났으며, V -속도 분포의 경우에는 +방향의 속도가 A_0 가 커짐에 따라 커지고 있음을 보이고 있다. -방향의 V -속도 분포는 복사가 있을 경우 A_0 가 작을 경우에는 +방향의 V -속도 분포와 대칭의 형상을 보이거나 A_0 가 커짐에 따라 +방향의 속도에 비해 현저히 작은 속도 분포를 보이고 있다. 복사를 배제한 V -속도의 경우, +속도에 비해 -속도가 작게 나타나고 있다. 복사가 고려된 경우, 내부 유동의 크기가 열복사로 인한 부력의 증가로 커짐을 보이고 있다.

Fig. 8는 PL 수에 따른 A 점 (Fig. 1; $x=0.5L$, $y=0.83H$)에서의 시간에 따른 온도변화를 나타낸 것으로, PL 수가 작을수록 복사의 영향은 커져서 온도가 높게 나타나고 있으며, 초기상태에 급격한 온도 상승을 보이고 있다. 이것은 위쪽벽에 가까운 점으로 대류 영향이 반영된 것이다.

Fig. 9는 $PL=0.05$ 의 경우로써 평균 Nu 수는 복사를 고려한 경우가 그렇지 않은 경우보다 열전달이 크고, 또 A_0 가 클수록 Nu 값이 가속화되어 20%에서 120%까지 증가하였다. 이것은 열린 부분의 증가가 복사와 연계되어 열전달의 상승작용에 더욱 기여한 것으로 판단된다.

본 연구에서 수행한 결과의 정상상태에서의 평균 Nu 수를 Fig. 10에 나타내었고, $PL=0.05$ 의 경우에는 열전달율이 Fig. 9에서와 같이 20%에서 120%까지 증가되고 있음을 알 수 있다. 즉, A_0 가 클수록, 복사의 영향이 커질수록 열전달이 활발히 일어남을 나타내고 있다. 그림에서 $PL=5$ 인 경우와 복사를 고려하지 않은 경우의 Nu 수는 거의 구별하기 어려운 상태다.

5. 결 론

본 연구는 일부가 열린공간에서의 층류 자연대류에 대해 복사를 고려하였으며 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 비균일 격자와 일정치 않은 시간간격을 도입하여 수치해석을 진행하였다. 수치영역의 일부가 열려 있을 때 복사의 영향에 따른 유동 및 열전달 특성을 파악하기 위해 Ra 수를 10^5 로 고정하고 ($Pr=0.71$) PL 수 (0.05~5)와 A_0 (0.25~0.75)를 변화시키며 결과를 얻었다. 열린부분의 경계를 바로 그 부분에서 처리하여 CPU 시간을 줄임과 동시에 컴퓨터 기억용량도 줄일 수 있었다. 복사에

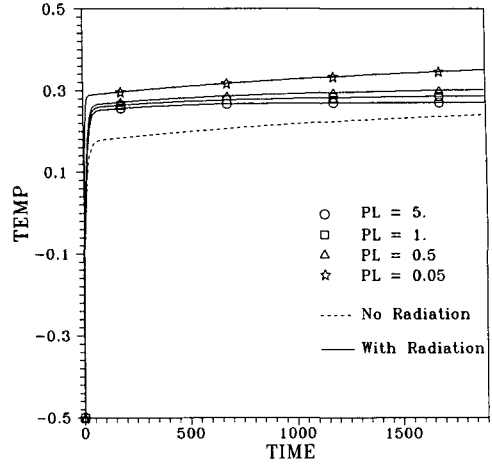


Fig. 8 Temperature at the location A ($A_0=0.5$)

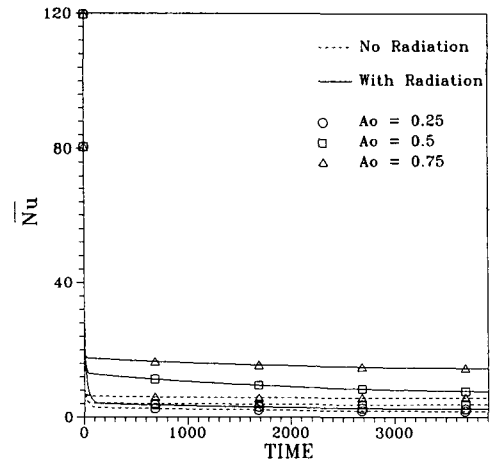


Fig. 9 Average Nusselt number ($PL=0.05$)

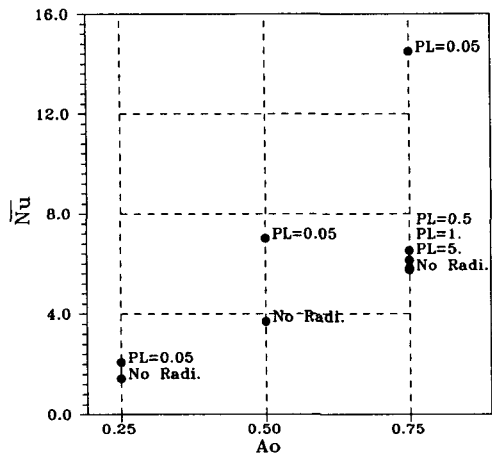


Fig. 10 Average Nusselt number for all cases

대한 고려로 P-1 근사법을 이용하여 해석하여 비교적 정확한 해를 얻을 수 있었으며, 열린 부분의 복사 경계 처리를 위하여서는 가상 흑체로 가정하여 해석하였다.

지금까지의 결과로부터 복사영향이 자연대류의 유동 및 열전달에 $PL=0.05$ 의 경우 복사를 고려치 않은 경우 보다 20%에서 120%까지 증가되었으며, $PL=0.5$ 인 경우 30% 정도 증가하고, $PL=1$ 이 되면 10% 이내로 증가폭이 감소하여 $PL=5$ 인 경우에는 거의 구분하기가 어려웠다. 열린부분의 증가 또한 복사와 연계되어 열전달의 상승작용에 더욱 기여하고 있다.

참고문헌

- (1) De Vahl Davis, G., 1983, "Natural Convection of Air in a Square Cavity : A Benchmark Numerical Solution," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 3, pp. 249~264.
- (2) Hortmann, M., Peri, M. and Cheurerer, G., 1990, "Finite Volume Multigrid Prediction of Laminar Natural Convection : Benchmark Solutions," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 11, pp.189~207.
- (3) Larson, D. W. and Viskanta, R., 1976, "Transient Combined Laminar Free Convection and Radiation in a Rectangular Enclosure," *J. Fluid Mech. Part 1*, Vol. 78, pp. 65~85.
- (4) Draoui, A., Allard, F. and Beghein, C., 1991, "Numerical Analysis of Heat Transfer by Natural Convection and Radiation in Participating Fluids Enclosed in Square Cavities," *Numer. Heat Transfer, Part A*, Vol. 20, pp. 253~261.
- (5) Fusegi, T. and Farouk, B., 1989, "Laminar and Turbulent Natural Convection-Radiation Interactions in a Square Enclosure Filled with a Nongray Gas," *Numer. Heat Transfer, Part A*, Vol. 15, pp. 303~322.
- (6) Chan, Y. L. and Tien, C. L., 1985, "A Numerical Study of Two-Dimensional Natural Convection in Square Open Cavities," *Numer. Heat Transfer*, Vol. 8, pp. 65~80.
- (7) Abib, A. H. and Jaluria, Y., 1988, "Numerical Simulation of The Buoyancy-Induced Flow in a Partially Open Enclosure," *Numer. Heat Transfer*, Vol. 14, pp. 235~254.
- (8) Angirasa, D., Pourqui, M. J. B. M. and Nieuwstadt, F. T. M., 1992, "Numerical Study of Transient and Steady Laminar Bouyancy-Driven Flows and Heat Transfer in a Square Open Cavity," *Numer. Heat Transfer, Part A*, Vol. 22, pp. 223~239.
- (9) Lage, J. L., Lim, J. S. and Bejan, A., 1992, "Natural Convection with Radiation in a Cavity with Open Top End," *J. Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 479~486.
- (10) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill Book Company.
- (11) Fengshan Liu, Jim Swithenbank and Eric, S. Garbett, 1992, "The Boundary Condition of the PN-Approximation Used to Solve the Radiative Transfer Equation," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No. 8, pp. 2043~2052.
- (12) Cel, A. Y., Acharya, S. and Williams, M. L., 1989, "Natural Convection and Radiation in a Square Enclosure," *Numer. Heat Transfer, Part A*, Vol. 15, pp. 261~278.