

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol.18, No.1, 1998

## 밑면이 가열되고 다양한 격판을 가진 실내공간에서의 혼합대류 열전달

이 철 재

동명전문대학 건축설비과

### The Study of Mixed Convection in a Room with Heated Bottom Surface and various Partitions

C. J. Lee

DONG-MYUNG COLL

#### 요 약

밑면이 가열되고 다양한 격판을 가진 실내공간에서의 혼합대류 열전달을 유한체적법을 사용하여 연구하였다. 본 연구에서 사용된 변수는  $50 < Re < 2000$ ,  $1460 < Gr < 11585$  그리고 격판의 수와 길이 이다. 연구 결과 변수들에 따른 유동 패턴과 등온선의 결과를 제시하였다. 실내의 대류 유동은 격판의 수 그리고 길이가 증가하면서 현저히 감소되었으며 평균 Nusselt수는  $\overline{Nu} = \overline{Nu}_n \cdot (1 + c (Re/Gr^{1/2})^d)$ 로 나타낼 수 있다. 여기서  $\overline{Nu}_n$ 는 순수 자연대류를 나타낸다.

## Abstract

The study of mixed convection in a room with heated bottom surface and various partitions has been numerically investigated using a finite volume method. The parameters studied here are,  $50 < Re < 2000$ ,  $1460 < Gr < 11585$  and the partition numbers and lengths. The results of the flow patterns and isotherms have been represented for various parameters. The room air convection decreases apparently as the number of partition increases. The mean Nusselt number can be expressed as  $\overline{Nu} = \overline{Nu}_n \cdot (1 + c (Re/Gr^{1/2})^d)$ , where  $\overline{Nu}_n$  corresponds to pure natural convection.

## NOMENCLATURE

- U : 무차원 수평방향속도
- V : 무차원 수직방향속도
- X : 무차원 수평방향좌표
- Y : 무차원 수직방향좌표

## GREEK SYMBOL

- $\theta$  : 무차원 온도

## SUBSCRIPTS

- c : 외부면
- h : 가열면
- MAX : 최대치
- $\infty$  : 주위유체

## SUPERSCRIPT

- : 평균

## 1. 서론

실내환경을 제어하는데는 무엇보다도 실내 공기의 유동패턴을 연구하는 것이 필요하며 이에 대한 많은 연구들이 다양하게 진행되고

있다. 이미 국제적으로는 실내공기의 질적제어의 중요성이 크게 부각되고 있으며 1996년 일본에서 개최된 IAQ '96국제학술회의에서는 600여편의 논문이 발표될 정도로 실내공기의 질적 측면에 대한 국제적인 관심이 고조되고 있다. 특히 실내공간의 일부를 차단하는 격판이 설치된 경우는 건축 구조물의 특성에 따라 다양하게 응용될 수 있으며 이러한 경우에는 실내 공기의 유동특성이 변화할 수 있기 때문에 세심한 고려가 되어야 한다. 이와 관련된 연구들은 실내공기의 유동형태를 예측하거나 모델링실험을 수행한 것<sup>(1,2)</sup>과 오염물질의 측정 또는 거동을 추적하는 것<sup>(3,4)</sup> 또는 오염물질별로 그의 생성과 거동에 대한 연구 결과들도 찾을 수 있다.

본 연구는 바닥면이 가열되는 실내공간내에 설치된 격판이 실내공간의 공기 유동과 열전달에 미치는 영향을 연구하기 위한 것으로서 사각공간내에 공간일부를 차폐하는 단열 격판이 존재하는 경우에 대하여 왼쪽면 하부로 부터 공기가 유입하고 오른쪽 상부로 유출하는 경우에 대하여 혼합대류 열전달 특성을 격판의 길이, Reynolds수 그리고 Grashof수

등을 변수로 하여 수치해석적으로 연구하였다.

## 2. 수치해석

연구대상인 실내 공간의 기하학적 형상은 Fig. 1과 같다. 입구에서는 일정한 온도와 속도를 가진 공기가 유입되며 오른쪽 상부로 유출한다. 공기는 정상상태, 비압축성으로 가정한 2차원 층류유동이며 수치해석을 위한 무차원수는 다음과 같다

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad U = \frac{u}{U_\infty},$$

$$V = \frac{v}{U_\infty}, \quad P = \frac{p}{\rho U_\infty^2}, \quad \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c},$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\rho - \rho_c}{T - T_c}, \quad Gr = \frac{g\beta(T_h - T_c)b^3}{\nu^2},$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}, \quad Re = \frac{\rho L U_\infty}{\mu}$$

위의 무차원수를 이용한 지배방정식은 다음과 같다.,

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

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \nabla^2 U \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \nabla^2 V + \frac{Gr}{Re^2} \theta \quad (3)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Pr Re} \nabla^2 \theta \quad (4)$$

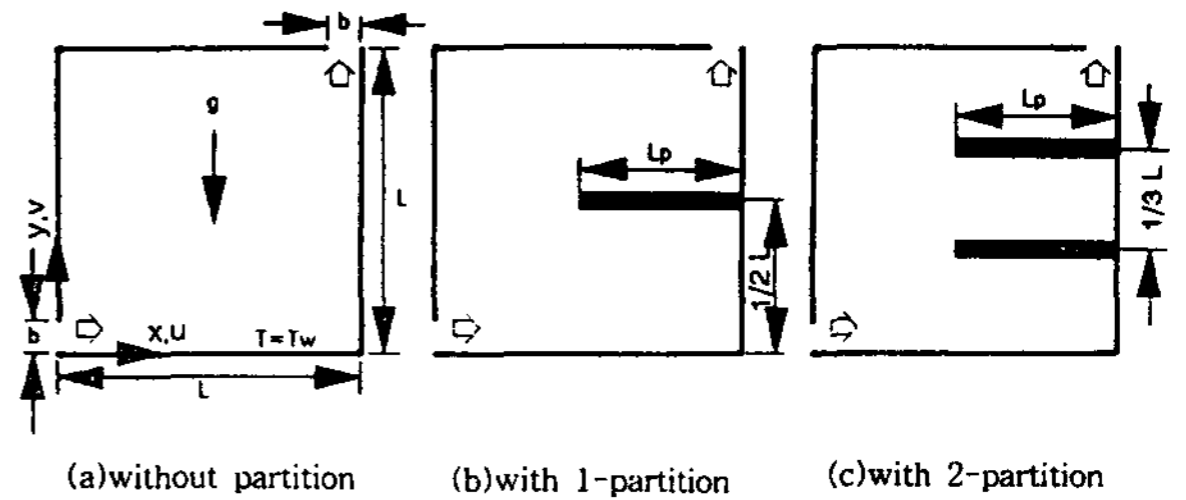


Fig.1 Schematic diagram of the geometries investigated

경계조건은 다음과 같다.

$$\text{유입부: } U=1, \quad V=0, \quad \theta=0$$

$$\text{유출부: } V=1, \quad U=0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$$

$$\text{단열면과 격판: } \frac{\partial \theta}{\partial n} = 0$$

$$\text{바닥가열면: } \theta=1$$

수치해석은 유한체적법(finite volume method)을 사용하였으며 대류항의 계산은 Hybrid scheme을 이용 하였다. 격자계는 40 × 40으로 엇물린 격자계(staggered grid system)를 압력항의 계산은 simple 알고리즘을 사용하였다. 수치해석을 수행하기 위하여 지배방정식과 경계조건을 유한차분식으로 유도 후 S.O.R기법을 사용하여 수치해석하였다. 또한 수렴조건은 다음과 같다.

$$MAX |(Q^M - Q^{M-1})/Q^M| \leq 10^{-5} \quad (5)$$

여기서 Q는 유동함수 또는 온도를 나타내며 M은 반복회수를 나타낸다. 얻어진 결과로부터 Nusselt수는 다음과 같이 구하였다.

1) 국소 Nusselt수

$$Nu = \frac{hL}{k} = - \frac{\partial \Phi}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \quad (6)$$

2) 평균 Nusselt수

$$\overline{Nu} = \frac{1}{L} \int Nu \cdot dx \quad (7)$$

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 격판이 없는 경우의 속도벡터와 등온선 분포를 나타낸 것이다. 유동은 벽면을 따라 흐르며 공간 내부에 재순환류가 크게 나타남을 볼 수 있다. 등온선은 유입구에서는 유입 유체와 가열면과의 큰 온도차로 인하여 조밀하게 나타나며 X가 증가함에 따라 간격이 점점 넓어져 열전달이 둔화 됨을 알 수 있다.

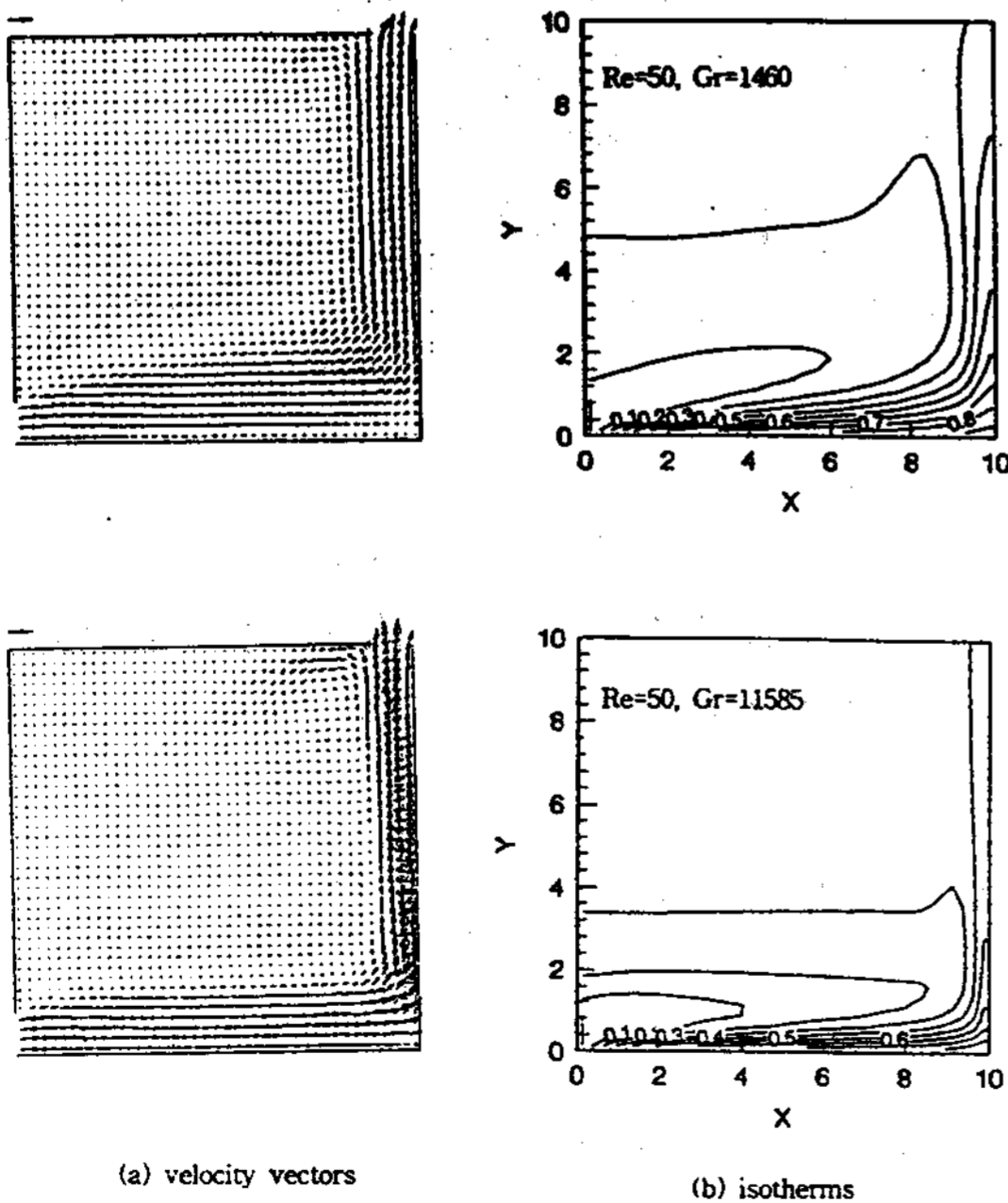


Fig. 2 Velocity vectors and isotherms for without partition.

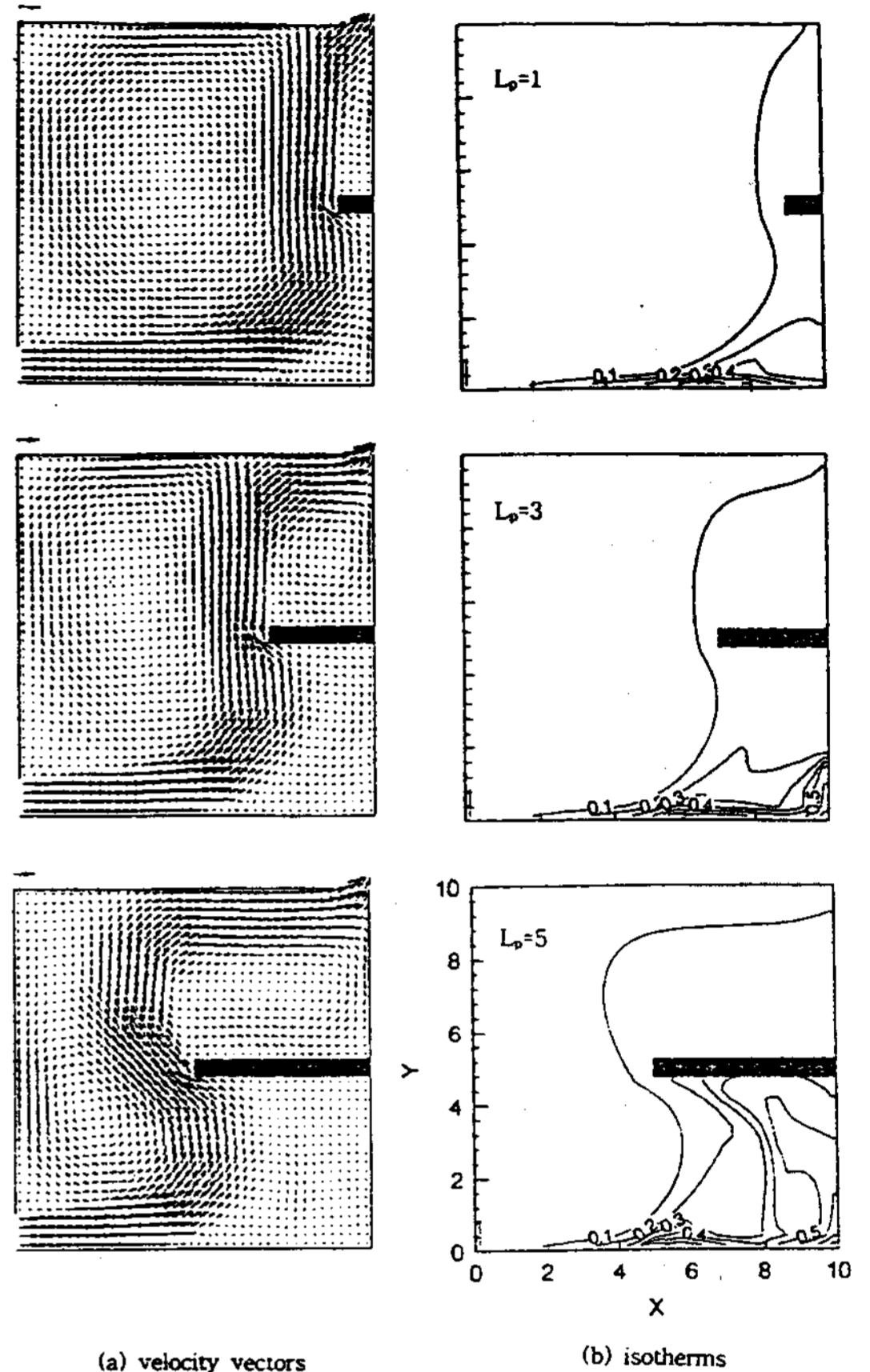


Fig. 3 Velocity vectors and isotherms for 1-partition at Gr=6481 Re=400

Fig. 3은 격판이 1개인 경우 격판의 길이에 따른 속도벡터와 등온선분포를 나타낸 것이다.  $L_p=1$ 인 경우에는 격판의 길이가 짧으므로 인하여 격판이 유동형태에는 영향을 크게 미치지 못하나 격판의 길이가 길어짐에 따라 격판 끝부분에서 유동 촉진과 격판에 대한 저항이 증가되고 있음을 알 수 있다. 등온선은 격판의 길이가 증가함에 따라 격판 밑부분의 재순환류 영향으로  $L_p=5$ 인 경우  $X=8$ 에서 오히려 열전달 촉진 현상이 나타났다.

Fig. 4는 격판이 2개인 경우 격판의 길이에 따른 속도벡터와 등온선의 분포를 나타낸다.

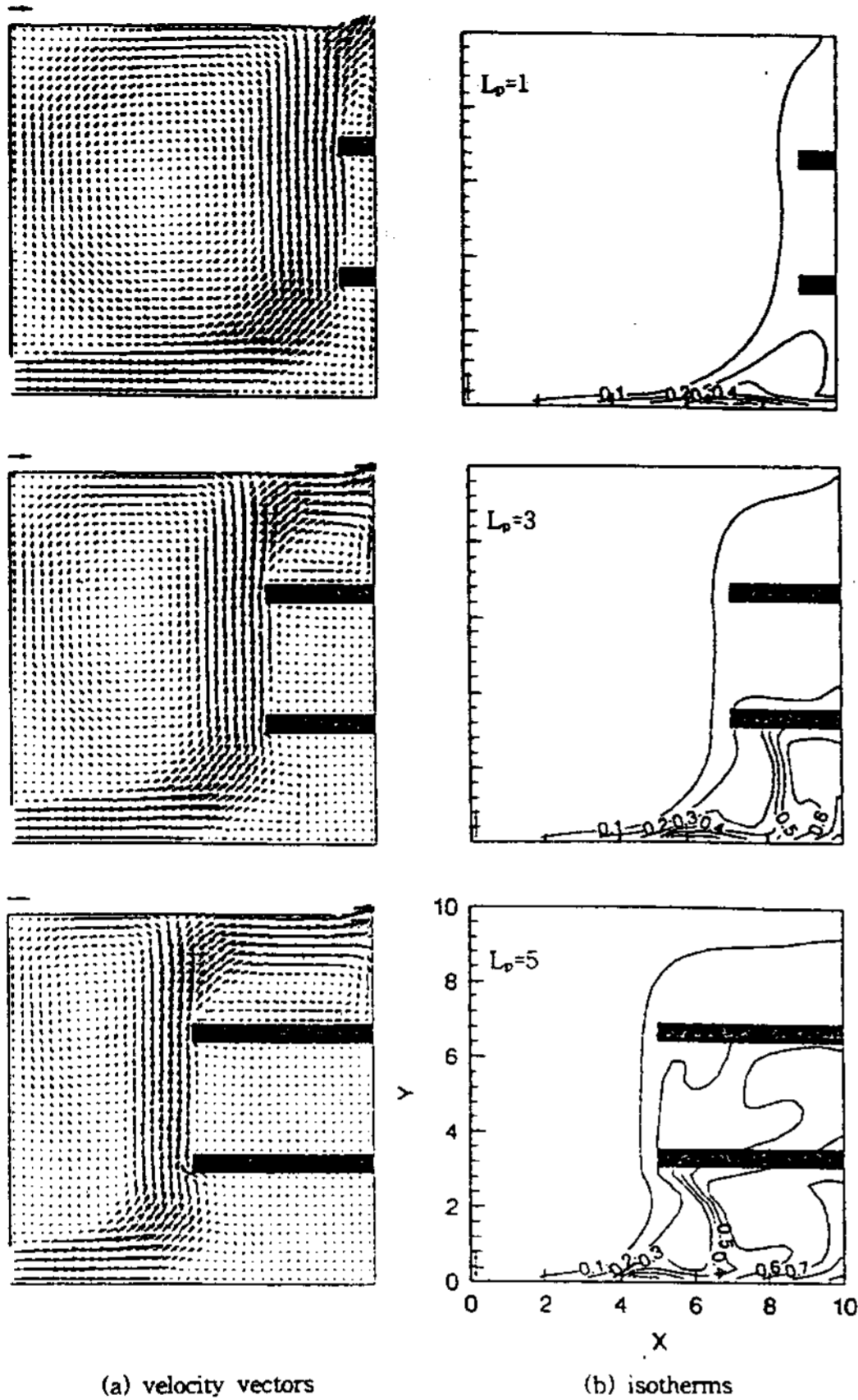


Fig. 4 Velocity vectors and isotherms for 2-partition at Gr=6481 and Re=400.

$L_p=1$ 인 경우 격판이 1개일때와 마찬가지로 격판의 길이가 짧으므로 인하여 유동형태에는 거의 영향을 미치지 못함을 알수 있다. 격판의 길이가 길어짐에 따라 격판의 끝부분의 유동이 촉진되나 1개의 격판인 경우와는 달리 유동방향의 전환은 일어나지않고 있다. 재순환류는 왼쪽 상부로 이동하고 오른쪽은 상부 격판 위에서는 길이 증가와 함께 재순환류가 확장되며 하부격판 아래에서는 재순환류가 분리되는 현상이 나타났다.

Fig. 5와 Fig. 6은  $X=0.5$  즉 실내공간의 수직 중간 부분에서의 온도와 속도분포를 격판

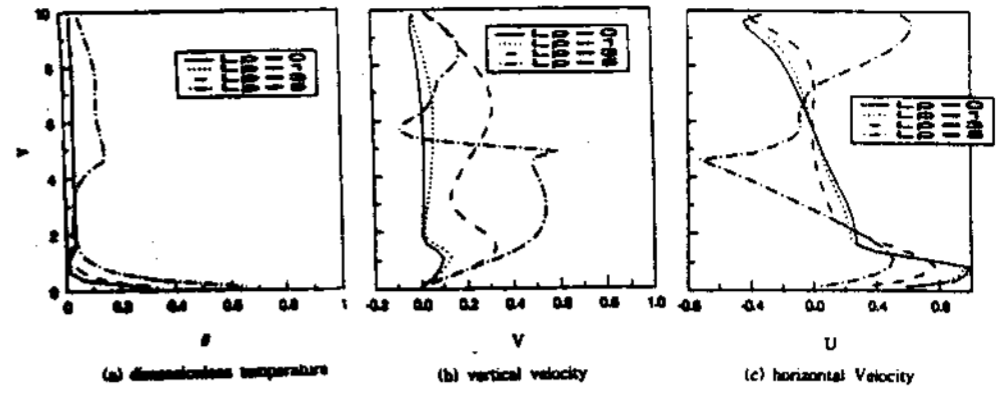


Fig. 5 Dimensionless temperature, vertical velocity and horizontal velocity versus vertical distance for various partition lengths at 1-partition, Gr=6841, Re=400, X=0.5

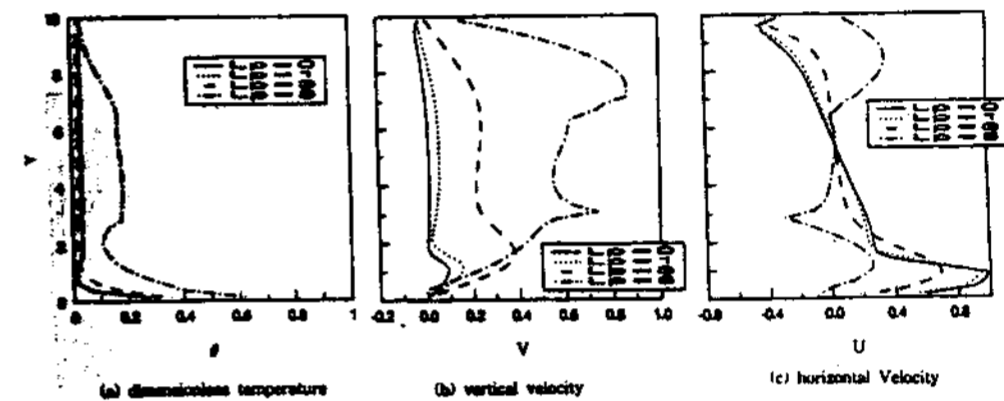
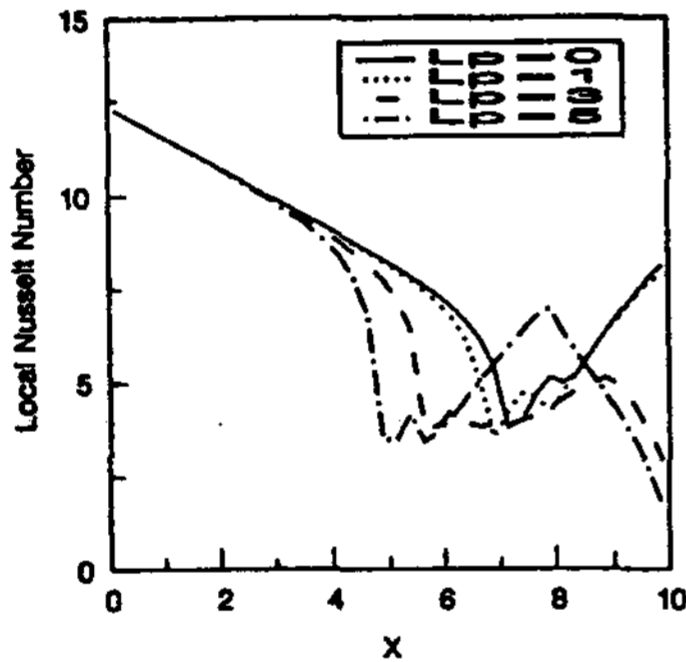


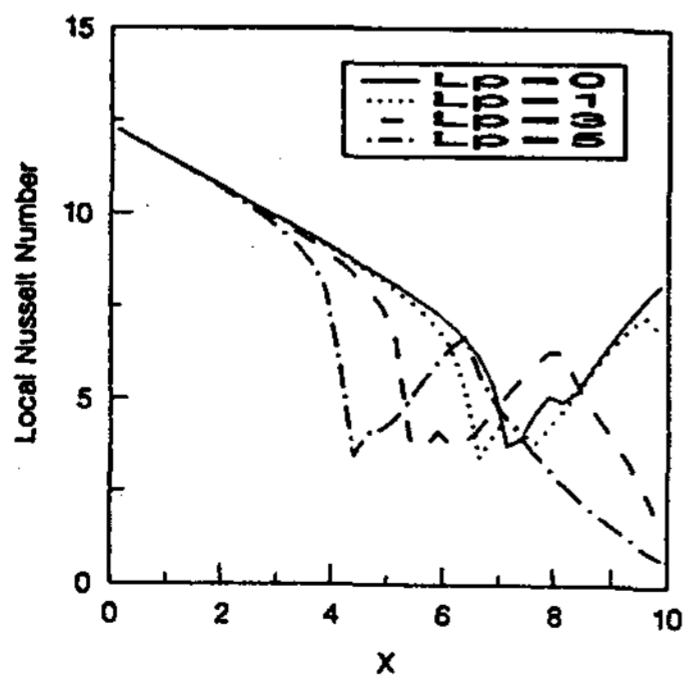
Fig. 6 Dimensionless temperature, vertical velocity and horizontal velocity versus vertical distance for various partition lengths at 2-partition, Gr=6841, Re=400, X=0.5

이 1개인 경우와 2개인 경우를 각각 나타내었다.  $L_p=1$ 인 경우는 격판의 길이나 격판의 수가 온도와 속도에 미치는 영향이 미소함을 알수 있다. 그러나  $L_p=3$ 과  $L_p=5$ 인 경우에는 그 영향을 찾을 수 있다. 온도분포의 경우  $L_p=0$ ,  $L_p=1$ ,  $L_p=3$ 인 경우에는 거의 유사한 온도분포를 나타내며  $L_p=5$ 인 경우에는 2개의 격판의 경우가 높은 온도 분포를 보인다. 이는 격판이 두 개인 경우에는 격판 사이에서의 공기 유동이 억제 됨으로 인하여 높은 온도를 보여준 결과이다. 수직 속도분포는 1개의 격판의 경우 격판의 위치를 기준하여 위와 아랫부분의 속도분포가 다르게 나타난다. 이는 아랫부분에서는 격판의 길이가 길어질수록 부력의 상승효과를 가져와 공기의 유동속도를 빠르게

하지만 윗부분에서는  $L_p=5$ 인 경우 Fig. 3에서 보듯이 격판으로 인한 유동방향의 전환 때문에  $L_p=3$ 보다 상대적으로 낮은 속도분포를 보여준다. 그러나 2개의 격판의 경우에는 일반적으로 격판의 길이가 길어짐에 따라 높은 속도분포를 보여주고 있으며 1개의 격판의 경우보다 최고 속도분포가 높게 나타난다. 이는 격판이 두 개인 경우가 end effect가 더욱 크게 나타나서 유동이 촉진된 결과이다. 수평방향속도는  $L_p=3$ 까지는 격판의 영향이 거의 나타나지 않으나  $L_p=5$ 인 경우 격판이 1개 일 때는 수직방향의 중간부분에서 최고 속도가 나타나나 격판이 2개 일 때는 격판과 격판의 사이에서 속도가 낮게 그리고 최고속도는 상부격판 윗부분 즉 출구 부근에서 나타났다.



(a) 1-partition



(b) 2-partitions

Fig. 7 Local Nusselt number horizontal distance for various partition lengths at  $Gr=6841$ , and  $Re=400$ .

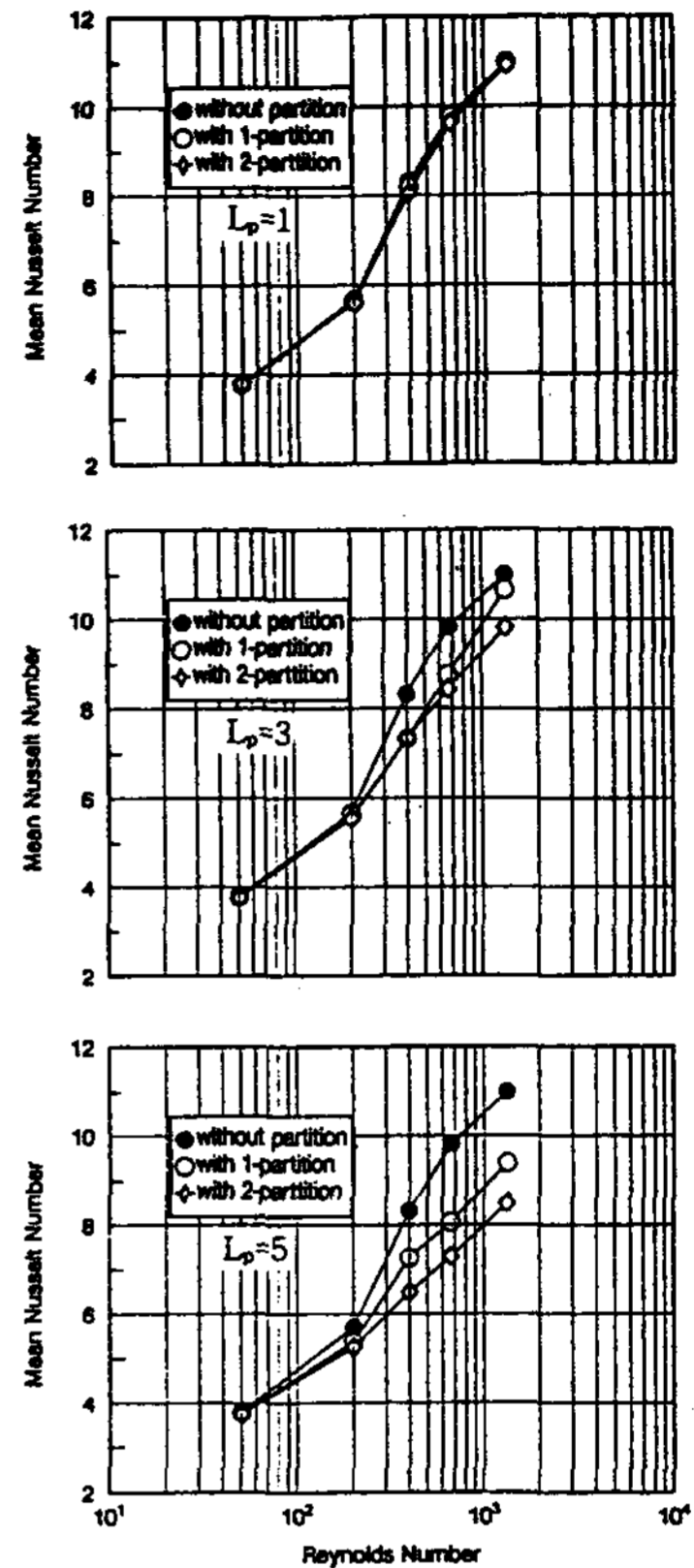
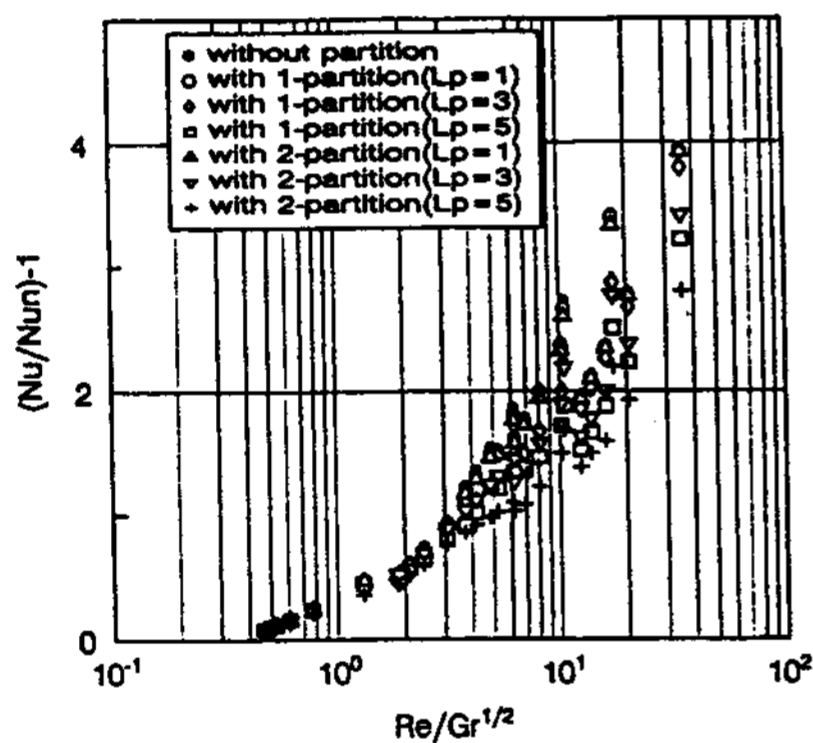


Fig. 8 Mean Nusselt number versus Reynolds number for various partition lengths at  $Gr=6841$

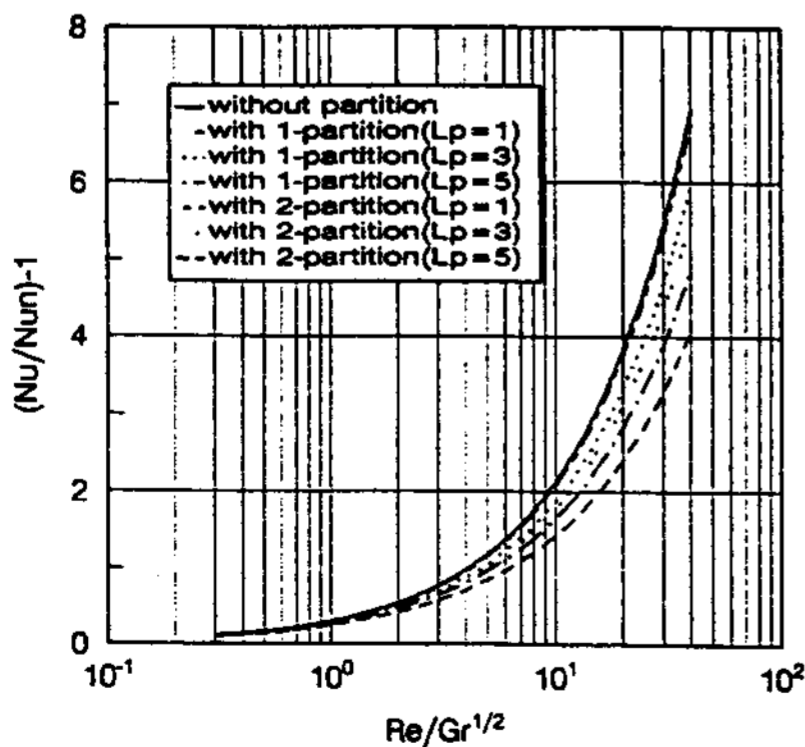
Fig. 7은 1개의 격판과 2개의 격판인 각각의 경우 격판길이에 대한 국소 Nusselt수의 분포이다. 일반적으로 격판이 없는 경우가 열전달이 활발하여 높은 Nusselt수 값의 분포를 보이고 있으나 1개의 격판인 경우는  $L_p=5$ 의  $6.4 < X < 8.3$ 구간에서 격판이 없는 경우보다 높은 Nusselt수 값을 보여 이 부분에서 열전달이 상대적으로 활발함을 알 수 있다. 그리고 2개의 격판이 있는 경우에는 이러한 열전달 촉진 현상이  $L_p=3$ 의  $6.4 < X < 8.3$  구간과  $L_p=5$ 의  $6.4 < X < 8.3$  구간에서 각각 나타났다.

Fig.8은 Reynolds수 에 대한 격판의 수와 길이에 대한 평균Nusselt수의 분포를 나타낸 것이다.  $L_p=1$ 인 경우는 격판의 수에 상관 없

이 거의 유사한 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며,  $L_p=3$ 인 경우는  $Re < 2 \times 10^2$ 에서는 유사한 값을  $Re > 2 \times 10^2$ 에서는 2개의 격판이 가장 낮게 격판이 없는 경우가 가장 높게 분포되었다. 특히  $L_p=5$ 인 경우는 격판이 없는 경우와 차가 크게 나타남을 알 수 있다. 즉 평균 Nusselt수는 Reynolds수의 증가에 따라 증가 하였고 낮은 Reynolds수에서는 격판의 영향이 거의 나타나지 않았으나 Reynolds수가 증가할 경우 평균 Nusselt수가 Reynolds수의 증가에 따라 높게 그리고 그 편차는 낮은 Reynolds수에 비하여 크게 나타나 빠른 유속에서의 격판저항이 열전달에 영향을 크게 미치고 있음을 알 수 있다.



(a) numerical result



(b) equation result

Fig. 9 Global Nusselt number versus  $Re/Gr^{1/2}$ , for various partition numbers and lengths.

Fig.9는 본 연구의 전체 영역에서 Penot. F.가 제안한 순수자연 대류와의 관계를 정립한 제안식을 이용하기 위한것<sup>(7)</sup>으로서(a)는 수치 해석 결과이며 (b)는 아래식의 결과이다.

$$\overline{Nu} = \overline{Nu}_n \cdot (1 + c (Re/Gr^{1/2})^d)$$

여기서  $\overline{Nu}_n = 0.39 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/4}$ 이며 각 상수 값은 표1과 같다.

Table 1. Constant values on the equation (8)

partition number	partition length	c	d
0	0	0.30	0.85
1	1	0.29	0.86
	3	0.27	0.83
	5	0.27	0.78
2	1	0.29	0.85
	3	0.27	0.82
	5	0.25	0.76

#### 4. 결론

- (1) 온도분포는  $L_p=3$ 까지는 거의 유사하게 나타났으나  $L_p=5$ 의 경우에는 격판과 격판 사이에서 공기 유동의 억제로 높은 온도분포를 나타내었다.
- (2) 수직속도분포는 격판이 1개인 경우 격판의 하부에서는 격판이 길어질수록 속도가 빨라지나 상부에서는 격판으로 인한 유동 방향의 전환으로  $L_p=5$ 가  $L_p=3$ 보다 속도가 느리게 나타났으며 격판이 2개인 경우 격판의 길이가 길어짐에 따라 속도 분포가 높

게 나타났다.

- (3) 수평속도분포는  $L_p=3$ 까지는 유사한 경향을 나타내고 있으나  $L_p=5$ 인 경우 격판이 1개 일때는 격판을 중심으로하여 속도분포가 대칭으로 나타났으며 격판이 2개 일때에는 격판과 격판의 사이에서 가장 낮게 상부격판의 윗 부분에서 가장빠르게 나타났다.
- (4) 국소 Nusselt수가  $6.4 < X < 8.3$ 의 구간에서 1개의 격판인 경우는  $L_p=5$  그리고 2개의 격판인 경우는  $L_p=3$ 에서 격판이 없는 경우보다 높은 Nusselt수 분포를 나타내어 이부분에서의 격판의 수가 열전달에 영향을 미치고 있음이 나타났다.
- (5) 평균 Nusselt수는 Reynolds수의 증가에 따라 증가 하였고 낮은 Reynolds수에서는 격판의 영향이 거의 나타나지 않았으나 Reynolds수가 증가 할 수록 평균 Nusselt수의 증가폭이 현저하여 빠른 유속에서 격판의 영향이 더욱 현저함을 알 수 있다.
- (6) 평균 Nusselt수는 Penot. F.가 제안한 순수자 연대류의 Nusselt수와의 관계식을 이용하여 다음의 식으로 나타낼 수 있었다.

$$\overline{Nu} = \overline{Nu}_n \cdot (1 + c (Re/Gr^{1/2})^d)$$

## 후 기

본 연구는 1997년도 동명전문대학 학술연구비에 의하여 수행하였습니다. 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Han. H. Kuehn. T. H. Ramsey. J. W. Liang. H. and Elayed. K. 1991, "Turbulent Modeling of Air flow Patterns and Ventilation Effectiveness in a Half Scale Office Building", Proceedings 12th AIVC Conference, Vol.13. pp.1-8
- (2) Elayed. K. Kuehn. T. H. Ramsey. J. W. and Xu. J. 1992, "Numerical Simulation of Airflow and Contaminant Transport in an Office Building", Proceedings 38th Annual Technical Meeting Tennessee, Vol. 1, pp54-57.
- (3) Xu. J. Liang. H. and Kuehn. T. H. 1994, "Comparison of Numerical Predictions and Experimental Measurements of Ventilation in a Room", Proceedings Roomvent '94 Vol.2, pp213-227.
- (4) Joffe. M.A. 1996. "Chemical Filtration of an Application Primer", ASHRE Journal February. pp.42-49.
- (5) Kuehn. T. H. Yang. C. H. and Kulp. R. N. 1996. "Effects of Fan Cycling on the Performance of Particular Air Filters Used for IAQ Control", Proceeding Indoor Air Japan, pp.1-8
- (6) 이상철, 박진철, 이연구, 1996, "공동주택의 실내공기환경 개선에 관한 연구", 공기조화냉동공학 논문집 제8권 제3호, pp.397-412
- (7) Penot. F. and Pavlovic. M. 1986. "Heat Transfer Analysis of Mixed Convection in a Heated Cavity", Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference, San Francisco, U.S.A. pp.1419-1424.



---

# The Study of Mixed Convection in a Room with Heated Bottom Surface and various Partitions

C. J. Lee

DONG-MYUNG COLL

## Abstract

The study of mixed convection in a room with heated bottom surface and various partitions has been numerically investigated using a finite volume method. The parameters studied here are,  $50 < Re < 2000$ ,  $1460 < Gr < 11585$  and the partition numbers and lengths. The results of the flow patterns and isotherms have been represented for various parameters. The room air convection decreases apparently as the number of partition increases. The mean Nusselt number can be expressed as  $\overline{Nu} = \overline{Nu}_n \cdot (1 + c (Re/Gr^{1/2})^d)$ , where  $\overline{Nu}_n$  corresponds to pure natural convection.