

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol.18, No.2, 1998

## 직사각형 전도성 장애물을 갖는 밀폐공간내에서의 자연대류

추홍록\* · 김병하\*\* · 김현우\*\*\* · 장충선\*\*\*\*

\* 대구보건전문대학 산업안전과      \*\* 경일대 기계공학부  
\*\*\* 안동공업전문대학 기계과      \*\*\*\* 경북대학교 대학원

## Natural Convection Heat Transfer with a Rectangular Obstruction in a square Enclosure

H. L. CHOO\*, B.H. KIM\*\*, H. W. KIM\*\*\*, C.S. JANG\*\*\*\*

\* *Taegu-Health coll*      \*\* *Kyung-Il Univ*  
\*\*\* *Andong-Technical coll*      \*\*\*\* *Kyung-Pook National Univ Graduate*

### 요약

자연대류에서 정사각형 밀폐공간의 중앙에 고립된 전도성 장애물이 들어 있을 때 열전도도의 효과를 수치해석적으로 연구하였다.  $Pr=0.17$ ,  $Ra=1.0 \times 10^4$ ,  $1.0 \times 10^5$ ,  $1.0 \times 10^6$ , 유체와 전도체의 열전도율비인  $K^*=1.0, 6.6, 34.0$  그리고 전도성 장애물의 비  $\xi=0.5, 1.0, 2.0$ 에서 수치연구를 수행하였다. 그 결과들은 유선, 등온선 그리고 Nusselt수로 나타내었다.  $Ra$  and  $K^*$  값이 일정한 상태에서 평균 Nusselt수가 증가함에 따라  $\xi$ 가 증가하였다.  $\xi=1.0$ (장애물의 형상비)일 경우 Rayleigh수에 관계없이  $K^*$ (장애물의 열전도율비)가 증가할수록 평균 Nusselt수는 감소한다. 장애물의 크기와 열전도율비가 동일할 때 대류열전달 효과는  $\xi=0.5$ 인 경우보다  $\xi=2.0$ 일 때 더 향상되었다.

## ABSTRACT

The effect of the thermal conductivity of a centered, square, heat-conducting body on natural convection in a square enclosure was examined numerically. Numerical simulations was carried out for  $Pr=0.17$ ,  $Ra=1.0 \times 10^4$ ,  $1.0 \times 10^5$ ,  $1.0 \times 10^6$ ,  $K^*=1.0$ , 6.6, 34.0 and  $\zeta=0.5$ , 1.0, 2.0. The results were reported in terms of streamlines, isotherms, Nusselt number. As the results, the mean Nusselt number increases with the increasing of  $\zeta$  at a constant  $Ra$  and  $K^*$ . In the case of  $\zeta=1.0$ (obstruction shape ratio), the mean Nusselt numbers were decreased as increasing of  $K^*$ ( obstruction thermal conductivity ratio) with regardless of the Rayleigh number. When the constant obstruction size and thermal conductivity ratio, convective heat transfer effect was more enhanced at  $\zeta=2.0$  than  $\zeta=0.5$ .

## 1. 서론

밀폐공간내에서 일어나는 자연대류 열전달 현상은 태양열 집열판, 연료탱크, 원자로의 핵 반응로, 초전도 자성체의 냉각 및 건물이나 방의 효율적인 열설계, 화재시의 안전대책등 공업적으로 그 응용성이 매우 광범위하고 다양하게 생활주변에서 흔히 볼 수 있다.

이러한 밀폐공간내에 경계층 유동이 존재할 경우, 이 경계층 흐름은 일반적으로 외부 유동에서의 경계층 유동과는 달리 코어영역(Core region)에서의 흐름과 서로 밀접한 관계가 있다.

밀폐공간내에서의 자연대류에 관한 초기의 연구는 주로 수평원판이나 큰 종횡비의 직각 밀폐공간<sup>1,2,3)</sup>에 대하여 이루어져 왔다.

Rayleigh수가 충분히 커서 밀폐공간내에 경계층 흐름이 존재하는 경우에 대해서  $Fu^4$ 등은 Rayleigh수가  $10^4$ 과  $10^6$ , Prandtl수가 0.71 일 때 사각형 밀폐공간내에 좌측벽이 고온이고, 우측벽이 저온인 밀폐공간의 상부 단열면에 고정되어 하부 단열면을 향하여 매달려 있는 단열 차폐벽이 존재하는 경우 밀폐공간내

의 유동현상과 열전달을 연구하였다.

Nansteel<sup>5)</sup>등은 종횡비가 1/2인 사각 밀폐공간에서의 상부벽에 매달린 차폐벽의 열전달량 및 유동구조에의 영향을 보고하였다. 한편, 내부의 유동 장애물이 외부벽과 완전히 분리된 경우 즉, 밀폐공간 내에 고립된 장애물이 있는 경우에 대하여는 House<sup>6)</sup>등이 정사각 밀폐공간의 중앙에 고립된 전도성 장애물이 있을 때 Rayleigh수, 장애물의 열전도비 및 크기가 변하는 경우, 이에 따른 열전달 및 유동특성을 수치해석적으로 구명하였다.

## 2. 이론 해석

본 연구에 사용된 직사각형 밀폐공간의 기하학적 형상과 좌표계는 Fig. 1과 같다.

여기서 밀폐공간의 벽면은 한 변의 길이가 L인 정사각형이고, 밀폐공간의 왼쪽 수직벽면은 고온면, 오른쪽 수직 벽면은 저온면으로서 각각 등온면이다. 상하 수평 벽면은 단열면으로 구성되어 있다.

밀폐공간 내에서의 유동은 층류이고, 중력

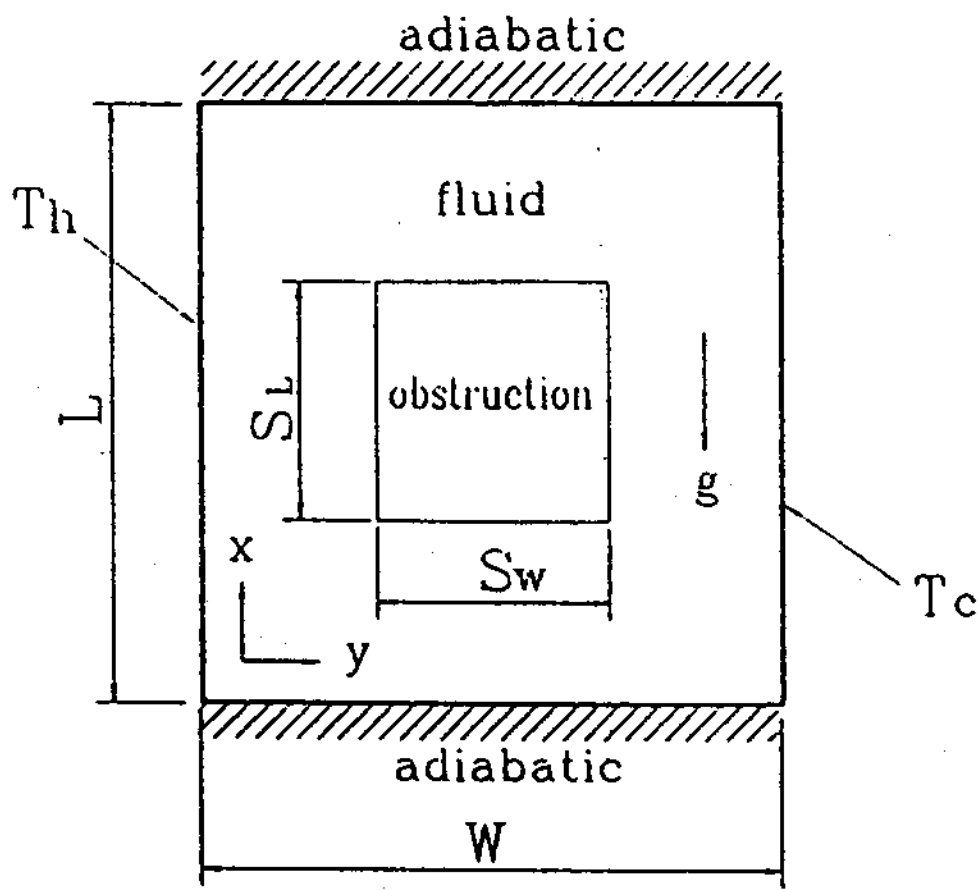


Fig. 1 Schematic of enclosure with centered obstruction

가속도는 등온벽면에 평행하게 작용한다. 복사의 효과는 무시하였으며, 부력항의 밀도 변화를 제외하고 유체의 물성치는 일정한 것으로 단정하였으며, Boussinesq 근사를 적용한다.

2.1. 지배방정식

본 연구에서는 지배방정식을 무차원화 하기 위하여 다음과 같은 무차원변수 및 파라미터들을 정의하였다.

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{x}{L}, & Y &= \frac{y}{L}, \\
 U &= \frac{uL}{\alpha}, & V &= \frac{vL}{\alpha} \\
 P &= \frac{pL^2}{\rho\alpha^2}, & Pr &= \frac{\nu}{\alpha}, & \alpha &= \frac{\kappa}{\rho C_p}, \\
 \theta &= \frac{T - T_c}{T_h - T_c}
 \end{aligned}$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_h - T_c)L^3}{\nu\alpha}, \quad K^* = \frac{k_s}{k}$$

$$Nu = \frac{hL}{k}, \quad \zeta = \frac{S_w}{S_L}$$

여기서 Ra, K\*, Nu 및 ζ는 각각 Rayleigh 수, 공기의 열전도율 K에 대한 장애물의 열전도율 Ks의 비, 평균 Nusselt수 및 전도성 장애물의 비를 나타낸다.

앞의 무차원 변수들을 도입하여 무차원화한 지배방정식은 다음과 같다.

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

운동량방정식:

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + Pr \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} + Pr \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + RaPr\theta \quad (3)$$

에너지방정식 :

Fluid

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

Solid

$$K^* \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) = 0 \quad (5)$$

무차원 에너지방정식중 식 (4)는 밀폐공간 내에 있는 유체에 적용되고, 식 (5)는 중앙에 위치한 고체 장애물에 적용되는 식이다.

### 2.2. 경계조건

밀폐공간의 벽면과 밀폐공간내의 장애물에 적용되는 경계조건은 다음과 같다.

$$X = 0, X = 1: U = V = 0 \quad \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0$$

$$Y = 0: U = V = 0 \quad \theta = 1$$

$$Y = 1: U = V = 0 \quad \theta = 0$$

$$\text{Solid: } U = V = 0, \frac{\partial \theta}{\partial X} = K^* \frac{\partial \theta_s}{\partial X}$$

$$U = V = 0, \frac{\partial \theta}{\partial Y} = K^* \frac{\partial \theta_s}{\partial Y}$$

여기서 Solid는 고체 장애물에 적용되는 경계조건을 나타낸다.

### 2.3. 수치계산

본 연구에서 사용한 수치계산방법은 F.D.M.으로서 Patanker<sup>7)</sup>가 개발한 Simple 알고리즘을 사용하여 계산하였다. 수치계산 과정 중 고체 장애물의 영역에서는 Prandtl수를  $10^{30}$ 으로 두어 이 영역에서 속도는 "0"에 접근하도록 하였다. 또한 에너지방정식에서 확산계수는 1이고 장애물에서는  $K^*$ 로 바뀌게 된다. 이와 같이 유체와 고체에 적용되는 에너지방정식을 조합함으로써 유체와 고체 벽면의 경계조건에 의하여 나타나는 결합조건이 자연스럽게 만족된다. 이 계산 알고리즘은 모든 검사면을 가로지르는 플럭스들의 연속성을 보장한다. 본 수치계산에 사용된 절점수는  $32 \times 32$ 로서 적절한 절점수를 선택하여 계산하였다.

수렴조건은 계산스텝 사이의 오차가 식 (6)과 같이  $10^{-3}$ 이하로 만족되고 좌우측면에서의 열플럭스 차이가 0.05% 이내가 될 때까지 반

복 계산하였고, 여기서  $\phi$ 는 각 변수로서 U, V 및  $\theta$ 를 나타내고, N은 반복회수이다.

$$\text{Max} \left| \frac{\phi^N - \phi^{N-1}}{\phi^N} \right| < 10^{-3} \quad (6)$$

본 계산에 사용된 계산기는 Sun Sparc Workstation이고 하나의 파라미터에 대한 계산에 소요된 시간은 약 3시간 정도이다.

밀폐공간내에서 에너지 보존법칙에 의하여 고온벽과 저온벽에서의 평균 Nusselt수는 같아야 한다. 따라서 본 계산에서는 고온 벽면과 저온 벽면에 대하여 식 (7)과 같이 평균 Nusselt수를 정의하여 사용하였다.

$$Nu_m = \pm \int_0^1 \frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0,1} dX \quad (7)$$

### 2.4 계산 범위

본 연구에서 고려된 작동유체는 열전도율이 0.02373 W/mK인 일반 공기이고, 장애물의 형상비  $\zeta$ 를 0.5, 1.0 및 2.0으로 변화시켰으며, 유체와 고체 장애물의 열전도율비  $K^*$ 는 1.0, 6.6 및 34.0, Rayleigh수는  $10^4$ ,  $10^5$  및  $10^6$ 으로 각각 변화시켰다. 장애물의 상대적 크기는 Fig. 2의 ②와 ③과 같이 변화(일점쇄선 및 점선으로 표시) 시켰으며, 장애물의 X, Y 좌표 위치는 Table 1.과 같다.

Table 1 Coordinate of obstruction in the enclosure

position Axis	Position 2 ( $\zeta = 0.5$ )	Position 1 ( $\zeta = 1.0$ )	Position 3 ( $\zeta = 2.0$ )
X	0.1	0.3	0.3
Y	0.3	0.3	0.1

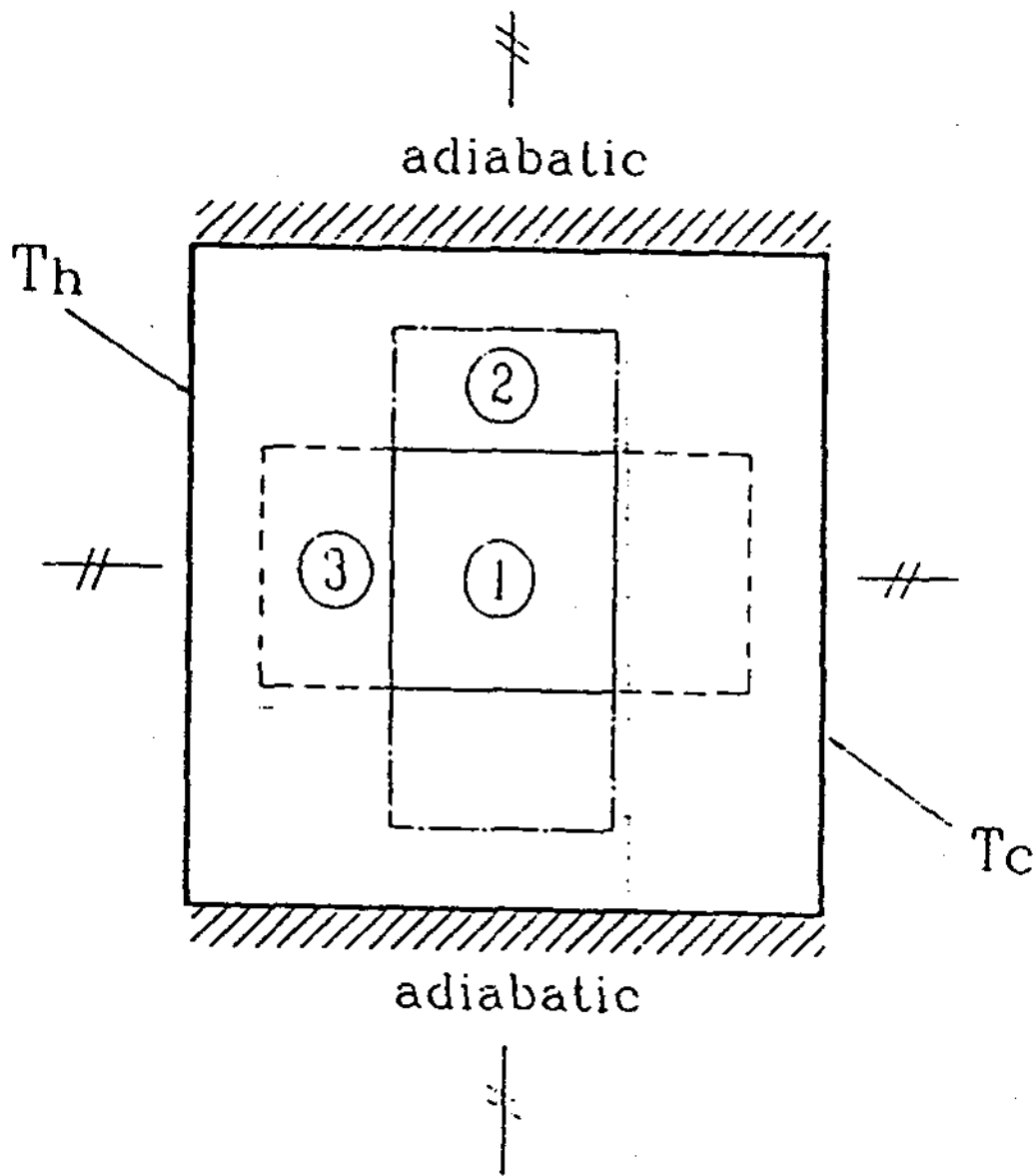


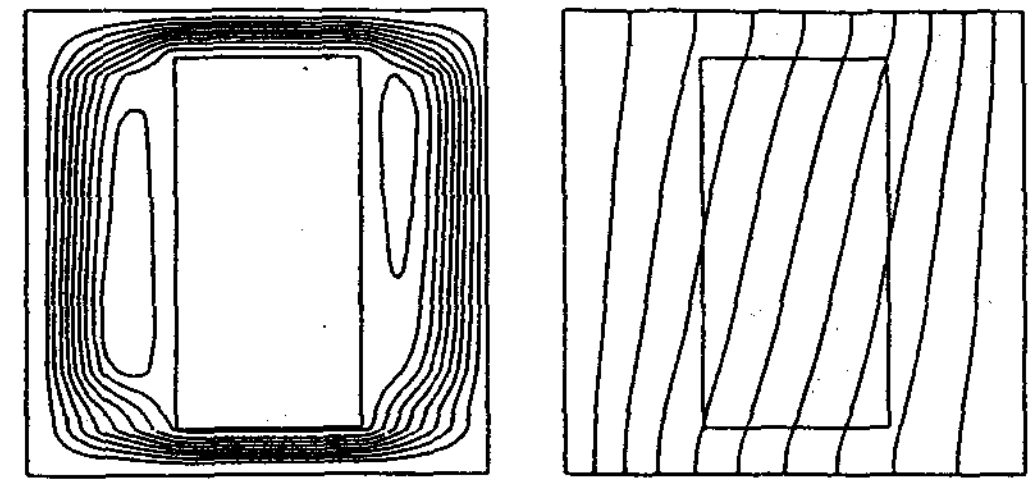
Fig. 2 Positions of the obstruction in the enclosure

### 3. 결과 및 고찰

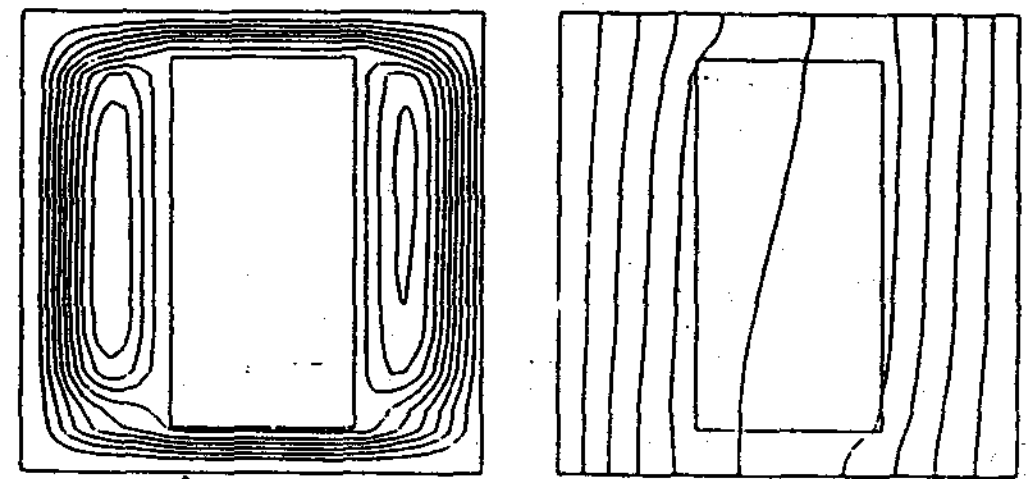
#### 3.1. 유동형태 및 등온선 분포

Fig. 3은 Rayleigh수  $Ra=10^4$ , 장애물의 형상비  $\zeta=0.5$ , 장애물의 열전도율비  $K^*=1.0, 6.6$  및  $34.0$ 까지 변화되는 경우의 유선과 등온선 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 좌측은 밀폐공간내의 유선 분포, 우측은 등온선 분포를 각각 나타낸다.

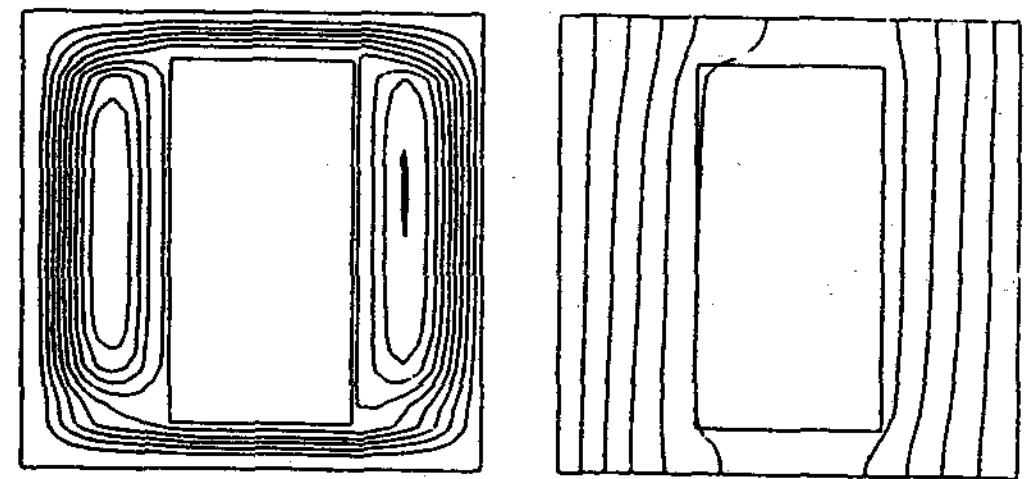
Fig. 3(a)의  $K^*=1.0$ 인 경우 유선분포에서 유동은 좌측 고온벽면 부근에서 상승하여 상부 단열면을 따라 거의 수평으로 좌측에서 우측으로 이동하여 밀폐공간의 우측 저온벽면 주위에서 하강하며, 하부 단열면을 따라서 우측에서 좌측으로 수평으로 이동하여 다시 고온벽면을 따라 상승하는 큰 Cell 모양을 형성하면서 등온벽면을 따라 장애물의 외부로 시계



(a)  $K^*=1.0$



(b)  $K^*=6.6$



(c)  $K^*=34.0$

Fig. 3 Streamlines and isotherms in the enclosure for  $Ra=10^4$ ,  $\zeta=0.5$  and (a)  $K^*=1.0$ , (b)  $K^*=6.6$  (C)  $K^*=34.0$

방향으로 회전하는 엔드영역(벽면유동영역)을 형성한다. 이는 좌측 고온벽면 부근의 공기가 고온벽면으로부터 가열되어 가벼워져서 고온벽면을 따라 고온벽면의 상단부까지 상승하고, 상단부에서는 상부 단열면을 따라 관성력에 의하여 거의 수평으로 이동하기 때문이다.

장애물의 좌측 부근에는 전도성 장애물에 의해 밀폐공간내를 회전하는 2차 유동이 일어

나고 있다. 이 유동은 벽면유동영역의 유동과 섞이지 않고 완전히 분리되어 벽면유동영역의 안쪽에 형성된다. 이 유동영역을 코어유동영역이라 하고, 이는 고온벽면에 의해 가열된 고온의 유체가 상부 단열면을 따라 저온 벽면 쪽으로 수평이동 할 때 장애물 부근을 지나고 고온의 유체가 장애물에 의해 냉각되어 하강하기 때문이다.

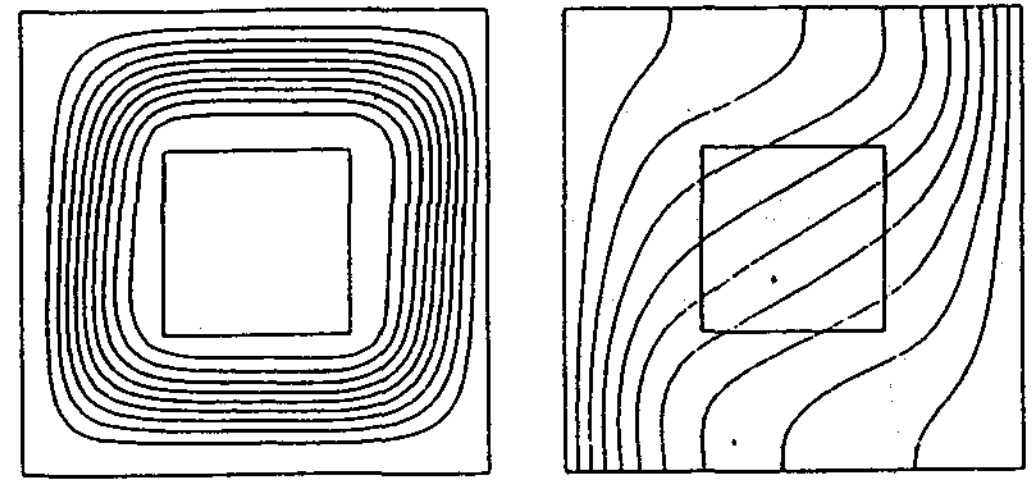
Fig. 3(b)의  $K^*=6.6$ 일 때의 유선분포는 Fig. 3(a)과 유사한 형태로서 유선이 등온벽면 쪽으로 더욱 접근한 형태이고, 장애물 좌우측 부근에서 2차유동이 더욱 활발히 일어나고 있다. 등온선 분포에서는 장애물내에서의 등온선이 넓게 분포하여 장애물 내의 온도변화가 작다. 이는 장애물의 존재로 인해 장애물의 상부와 하부통로로 유동하는 고온과 저온의 유체사이에서 장애물이 절연체로 작용하기 때문이다.

Fig. 3(c)의  $K^*=34.0$ 으로 커진 경우 유선이 등온 벽면쪽으로 더욱 접근하고 장애물 부근에 코어영역의 범위가 더 활발히 형성된다. 또한 등온벽면에서의 등온선 간격이 더욱 조밀하다.

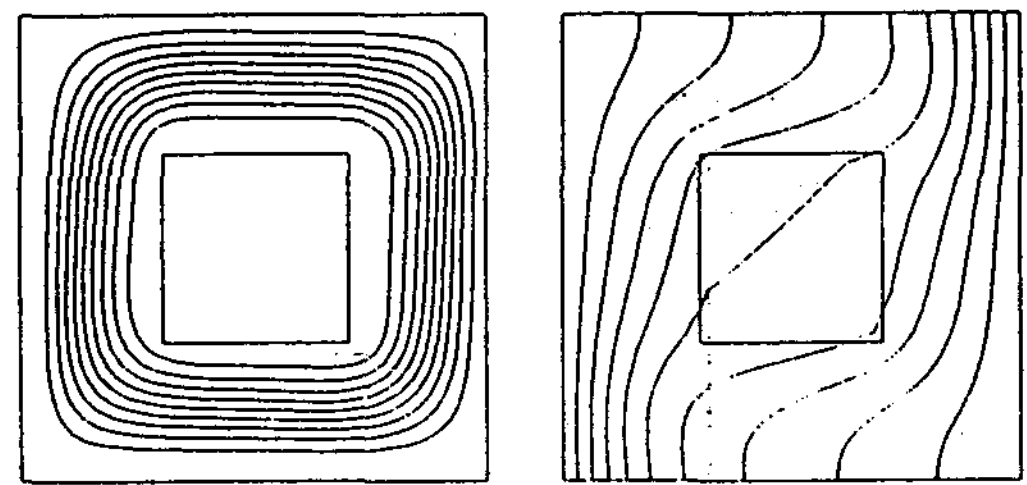
이상과 같이  $Ra=10^4$ 이고  $\zeta=0.5$ 로 일정할 때  $K^*$ 값이 증가할수록 장애물내의 등온선이 넓게 분포하며, 등온벽면 근처에서는 등온선 간격이 더욱 작아져  $K^*$ 가 증가할수록 열전달이 더욱 활발해짐을 알 수 있다.

Fig. 4는  $Ra=10^4$ ,  $\zeta=1.0$ ,  $K^*=1.0, 6.6$  및  $34.0$ 으로 변화되는 경우의 유선과 등온선 분포를 나타낸 그림이다.

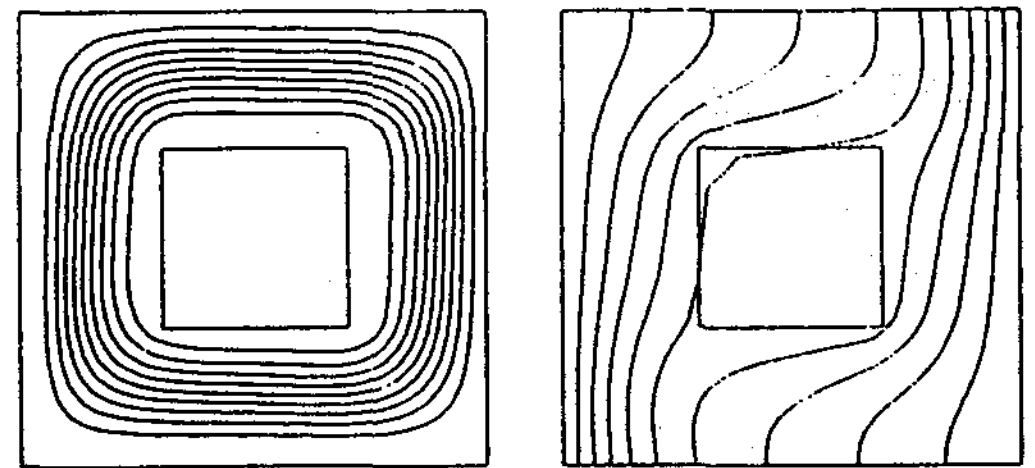
Fig. 4(a)의  $K^*=1.0$ 인 경우 유선분포에서 고온 벽면 부근에서 가열된 유체가 비교적 장애물의 영향을 적게 받아 거의 냉각되지 않은 상태로 저온 벽면 가까이에 접근한 후 냉각되



(a)  $K^*=1.0$



(b)  $K^*=6.6$



(c)  $K^*=34.0$

Fig. 4 Streamlines and isotherms in the enclosure for  $Ra=10^4$ ,  $\zeta=1.0$  and (a)  $K^*=1.0$ , (b)  $K^*=6.6$  (C)  $K^*=34.0$

는 형태이다. 따라서 Fig. 3(a)의  $\zeta=0.5$ 인 경우보다 큰 운동량을 가지게 되어 장애물에서 멀리 떨어진 약간 기울어진 유동형태를 나타낸다. 등온선 분포에서는 밀폐벽면의 좌측 하부에서 유체가 집중적으로 가열되고, 장애물의 상부쪽에서 급격한 온도변화를 보이고 있다. 또한 장애물의 상부를 수평으로 흐르는 유체가 저온 벽면 근처에 접근하여 집중적으

로 냉각되기 때문에 대각선 형태의 등온선 분포를 나타낸다. 결국 장애물내부에서의 열전도는 장애물의 좌측 상부 모서리부분에서 장애물의 우측 하부로 이루어진다.

Fig. 4(b)의  $K^*=6.6$ 인 경우 유선분포에서 유동이  $K^*=1.0$ 일 때보다 장애물에 더욱 더 근접되어 있다. 이는 장애물의 열전도도가 커져서 장애물의 상부에서 하부쪽으로 많은 양의 열이 전달되어 상부통로의 고온 유체는 수평 유동중에 많이 냉각되고, 하부통로의 냉각된 유체는 빨리 가열되기 때문이다. 등온선 분포에서는 등온선이 장애물을 기준으로 좌우측으로 분리되어 나타난다. 이는 장애물의 열전도율비  $K^*$ 가 커서 장애물의 상하가 비슷한 온도로 유지되기 때문이다. 등온면에서의 등온선 분포를 살펴보면 좌, 우측벽에서 균일하게 가열, 냉각된다. Fig. 4(a)의  $K^*=1.0$ 인 경우 보다는 등온선 간격이 커져서 열전달이 미약해질 것으로 생각된다.

Fig. 4(c)는  $K^*=34.0$ 인 경우로서 유선분포는 Fig.4(b)의 경우와 유사하다. 등온선 분포는 Fig. 4(b)일 때보다 장애물내에서 넓게 분포하고, 벽면부근에서의 등온선 간격이 더욱 커져  $K^*=6.6$ 일 때보다 열전달이 미약할 것으로 예측된다.

이상과 같이  $Ra=10^4$ ,  $\zeta=1.0$ 으로 일정할 때  $K^*$ 값이 증가할수록 등온면 근처에서 등온선 간격이 증가하여  $K^*$ 가 증가할수록 열전달이 더욱 미약해짐을 알 수 있다.

Fig. 5는  $Ra=10^4$ ,  $\zeta=2.0$ ,  $K^*=1.0, 6.6$  및  $34.0$ 으로 변화되는 경우의 유선과 등온선 분포를 나타낸 그림이다.

Fig. 5(a)의  $K^*=1.0$ 일 때 유선분포에서 유선이 장애물과 등온면과의 사이에 아주 조밀하게 분포되어 있다. 또한 장애물의 상하부에서 2

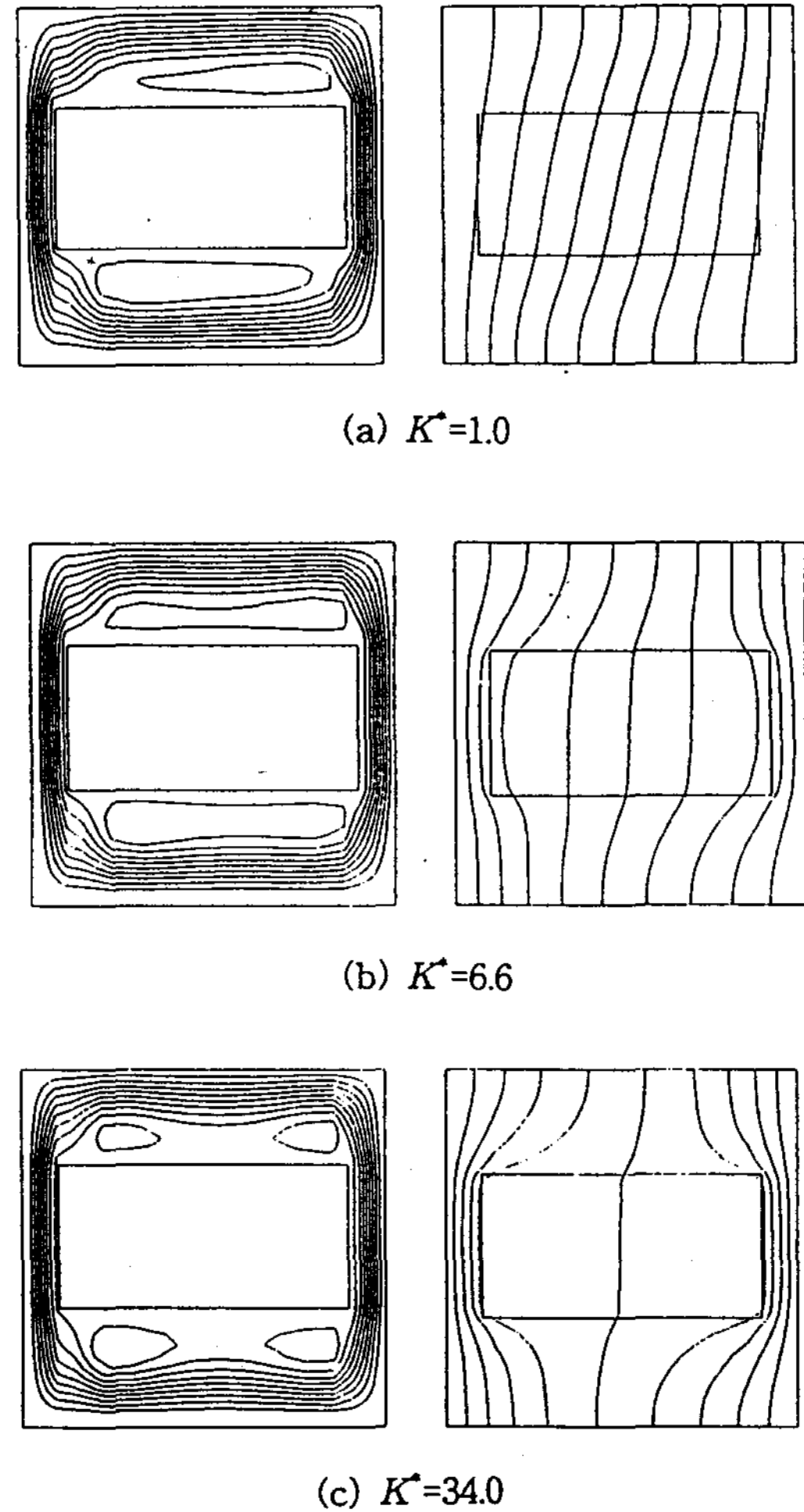


Fig. 5 Streamlines and isotherms in the enclosure for  $Ra=10^4$ ,  $\zeta=2.0$  and (a)  $K^*=1.0$ , (b)  $K^*=6.6$  (c)  $K^*=34.0$

차유동이 나타난다. 등온선 분포에서는 등온선이 좌우 벽면쪽으로 그 간격이 비교적 크다.

Fig. 5(b)는  $K^*=6.6$ 인 경우로서 유선분포가  $K^*=1.0$ 인 경우와 유사하지만, 2차 유동이 더욱 발달해 있다. 좌우측 벽면쪽으로 등온선 간격이 Fig. 5(a)의 경우보다 더욱 작아져 열전달이 활발할 것으로 예측된다.

Fig. 5(c)는  $K^*=34.0$ 로 증가한 경우로서 장



애물의 좌우측 상부와 하부쪽에서 4개의 작은 2차유동이 나타나고, 등온벽면에서의 등온선 간격이 더욱 작게 나타난다.

이상과 같이  $Ra=10^4$ ,  $\zeta=2.0$ 으로 일정할 때  $K^*$ 값이 증가할수록 등온벽면 근처에서 등온선 간격이 작아져  $K^*$ 가 증가할수록 열전달이 더욱 활발해짐을 알 수 있다.

Fig. 6은  $Ra=10^5$ ,  $\zeta=0.5$ ,  $K^*=1.0, 6.6$  및  $34.0$ 으로 변화되는 경우 유선과 등온선 분포를 나타낸 그림이다.

Fig. 6(a)는 장애물의 열전도율비  $K^*=1.0$ 인 경우 유선은  $Ra=10^4$ 인 Fig. 3(a)일 때보다 등온벽면에서의 유선간격이 조밀하여 대류유동이 활발하고 약간 오른쪽으로 기울어진 유동 형태를 보이고 있다. 그리고 코어영역인 장애물의 왼쪽 하부와 오른쪽 상부에서 활발한 2차유동이 일어나고 있다.

등온선 분포는 Fig. 3(a)일 때와 달리 장애물내에서는 대각선 형태로 분포되고, 등온선 간격은 좌우 벽면하부와 우측벽면 상부에서 조밀하게 분포되어 있어 이 부분에서 집중적인 가열과 냉각작용이 일어난다.

Fig. (b)와 (c)의  $K^*=6.616$  및  $34.3435$ 로 증가할수록 유선분포에서 2차 유동이 더욱 활발해지고, 벽면근처에서의 등온선 간격이 넓어지고 있다. 또한  $Ra=10^4$ 인 Fig. 3(b),(c)일 때보다 장애물 내부와 등온벽면에서의 온도구배가 더욱 크다.

이상과 같이  $Ra=10^5$ ,  $\zeta=0.5$ 로 일정할 때  $K^*$ 값이 증가할수록 등온벽면 근처에서 등온선 간격이 커져  $K^*$ 가 증가할수록 열전달이 미약해짐을 알 수 있다. 또한 동일한 조건 (Fig.3 참조)에서 Rayleigh수가 증가할수록 열전달이 활발해짐을 알 수 있다.

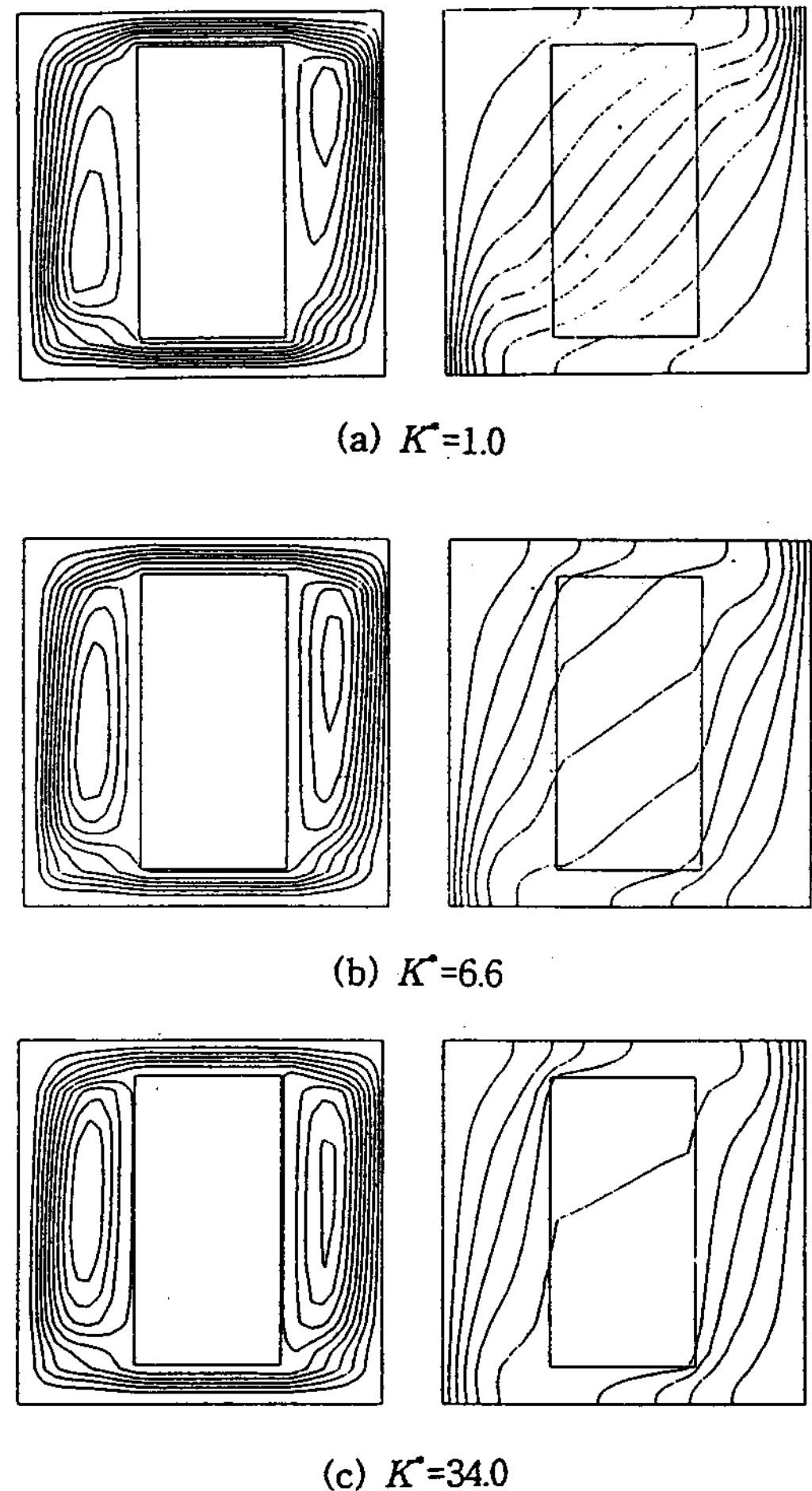
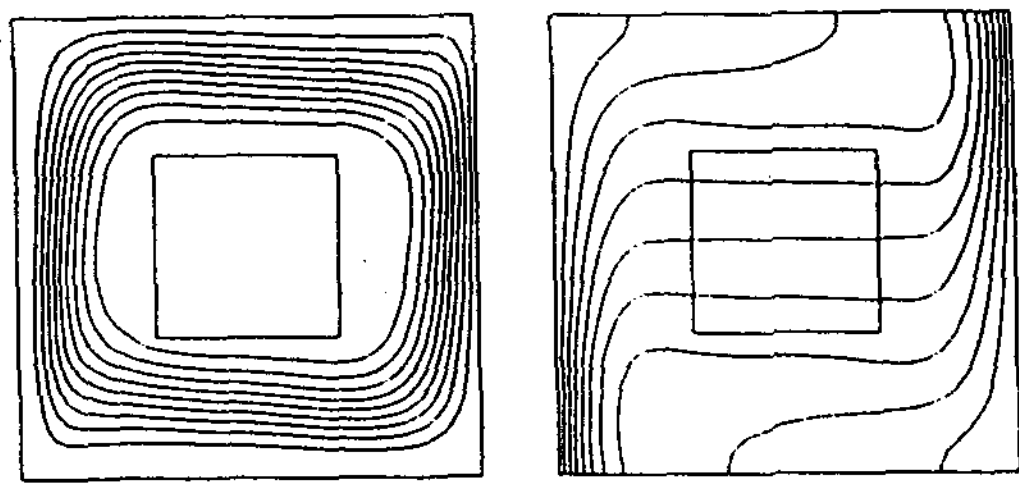
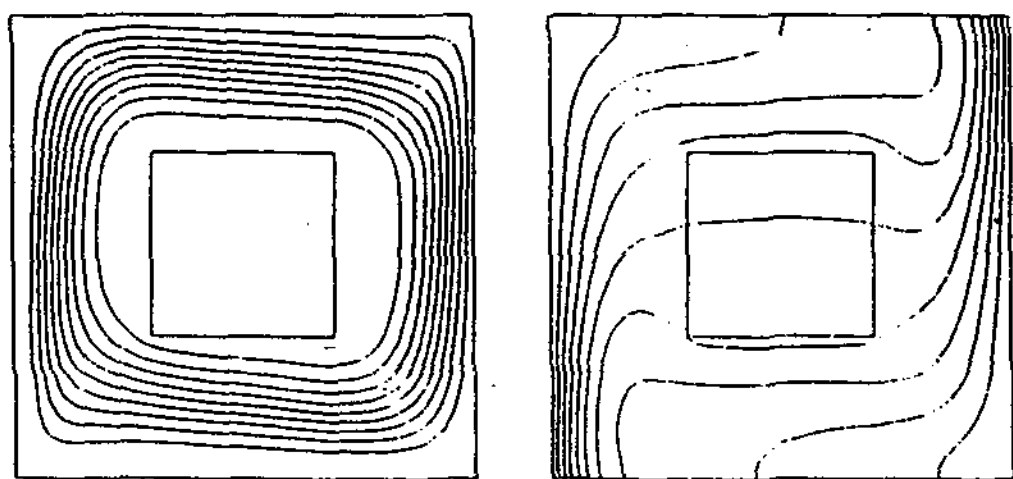


Fig. 6 Streamlines and isotherms in the enclosure for  $Ra=10^5$ ,  $\zeta=0.5$  and (a)  $K^*=1.0$ , (b)  $K^*=6.6$  (C)  $K^*=34.0$

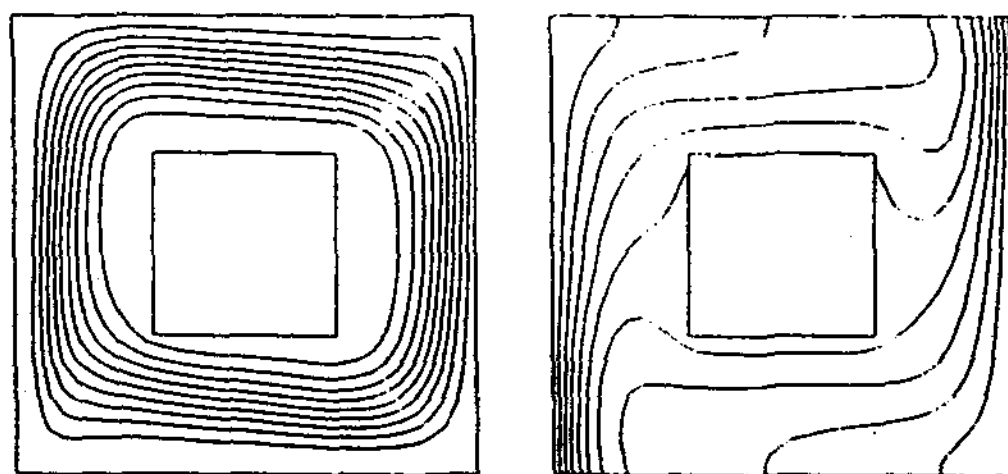




(a)  $K^*=1.0$



(b)  $K^*=6.6$

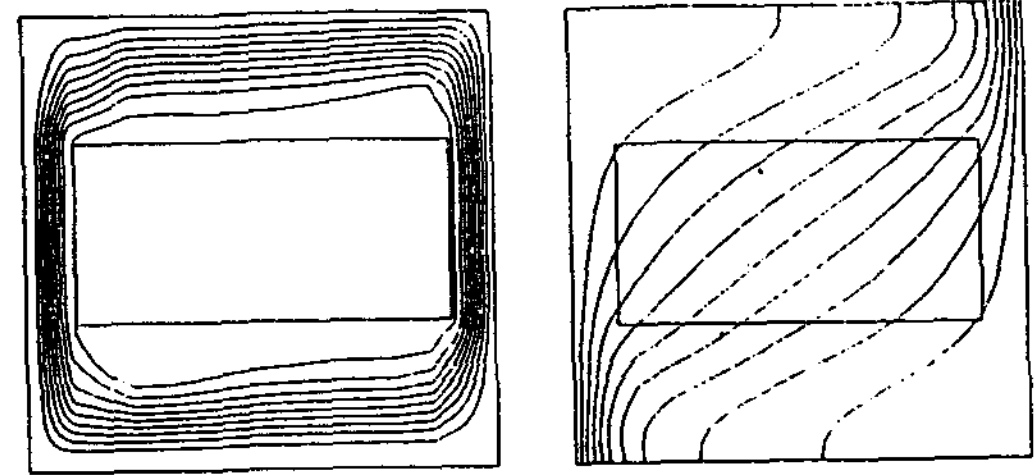


(c)  $K^*=34.0$

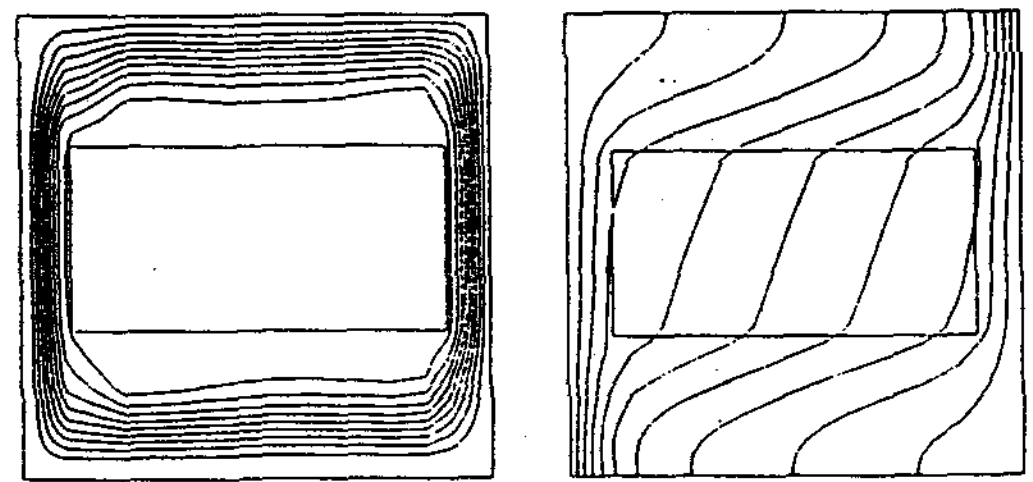
Fig. 7 Streamlines and isotherms in the enclosure for  $Ra=10^5$ ,  $\zeta=1.0$  and (a)  $K^*=1.0$ , (b)  $K^*=6.6$  (C)  $K^*=34.0$

Fig. 7은  $Ra=10^5$ ,  $\zeta=1.0$ ,  $K^*=1.0$ , 6.6 및 34.0으로 변화되는 경우 유선과 등온선 분포를 나타낸 그림이다.

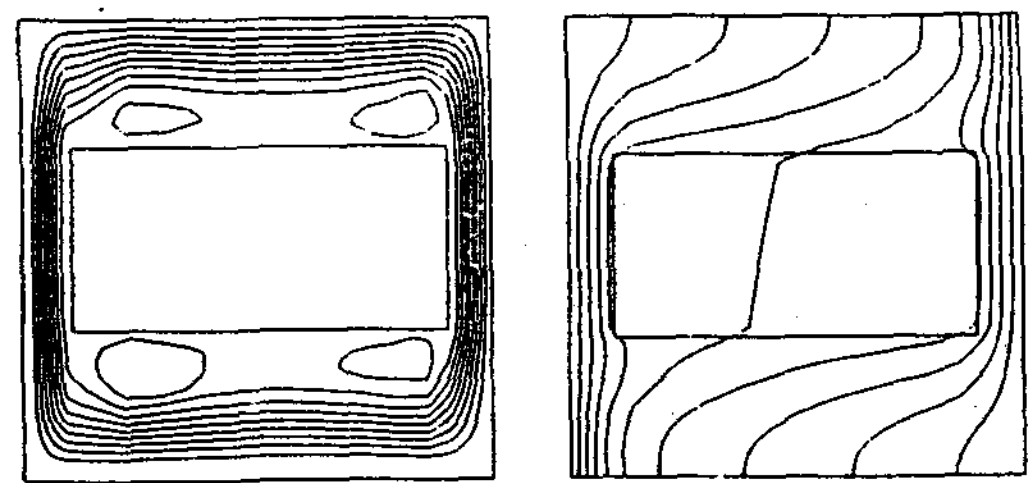
Fig. 7(a)는  $K^*=1.0$ 인 경우로서 유선분포에서 장애물의 왼쪽 윗부분과 오른쪽 아래부분에 위치한 유선이 Fig. 6(a)의 경우보다 장애물에서 멀어지고 마름모꼴로 기울어져 있다.



(a)  $K^*=1.0$



(b)  $K^*=6.6$



(c)  $K^*=34.0$

Fig. 8 Streamlines and isotherms in the enclosure for  $Ra=10^5$ ,  $\zeta=2.0$  and (a)  $K^*=1.0$ , (b)  $K^*=6.6$  (C)  $K^*=34.0$

이는 유체가 장애물의 영향을 거의 받지 않고 고온 벽면으로 접근하면서 90°각도의 모서리를 유동할 때 큰 운동량을 가지기 때문이다. 등온선분포에서 장애물내에서의 등온선이 거의 수평형태이다. 따라서 장애물내의 전도에 의한 열전달은 장애물의 상부에서 하부방향으로 이루어진다.

Fig. 7(b)와 (c)는  $K^*=6.6$  및  $34.0$ 으로 증가한 경우 유선과 등온선 분포로서  $K^*$ 가 증가함에 따라 유체의 운동량이 더욱 작아져 유선이 장애물 가까이에 형성된다. 등온선 분포는 하부통로내를 흐르는 저온의 유체는 밀폐공간의 고온 벽면에 의하여 가열되는 것보다 장애물에 의하여 가열되는 양이 커진다. 따라서 저온 등온벽으로 전달되는 열량이 상대적으로 작아지기 때문에 밀폐공간의 고온벽과 저온벽 사이의 대류에 의한 열전달량은 감소하게 된다.

이상과 같이  $Ra=10^5$ 이고  $\zeta=1.0$ 으로 일정할 때  $K^*$ 값이 증가할수록 열전달이 미약해짐을 알 수 있다.

Fig. 8은  $Ra=10^5$ ,  $\zeta=2.0$ ,  $K^*=1.0, 6.6$  및  $34.0$ 으로 변화되는 경우의 유선과 등온선 분포를 나타낸 그림이다.

Fig. 8(a)의  $K^*=1.0$ 인 경우 유선분포에서 Fig. 5(a)의 경우보다 큰 운동량을 가지게 되어 장애물에서는 약간 떨어져 기울어진 유동 형태를 보이고 있다. 이는 고온 벽면부근에서 가열된 유체가 장애물의 영향을 적게 받아 거의 냉각되지 않은 상태로 이동하여 저온 벽면 가까이에 접근한 후 냉각되기 때문이다. 등온선 분포에서 밀폐벽면의 좌측 하부와 우측 상부에서 온도구배가 크고, 장애물의 상하부에서 급격한 온도 변화를 보이고 있다. 또한 장애물 상부를 흐르는 공기는 저온벽면에 접근하여 집중적으로 냉각되기 때문에 대각선 형태의 등온선 분포를 보이고 있다. 장애물내로의 전도열전달은 장애물의 좌측 상부 모서리 부분에서 우측 하부로 이루어진다.

Fig. 8(b)는  $K^*=6.6$ 인 경우로서 유선분포에서 유선이  $K^*=1.0$ 일 때 보다 장애물에 조금 떨어져 분포하고 있고, 장애물을 통해서 전달되는 열량이 상대적으로 많아지기 때문에 장

애물의 상부에서 하부로 전열량이 증가하여 상부 통로의 고온유체는 비교적 빨리 냉각되고, 장애물 하부통로의 유체는 상대적으로 빨리 가열된다. 등온선 분포에서 등온선 간격이 등온벽면에 더욱 조밀하게 분포되어  $K^*=1.0$ 일 때보다 열전달이 활발할 것으로 생각된다.

Fig. 8(c)는  $K^*=34.0$ 으로 증가한 경우로서 유선분포에서 유선이 장애물에서 더욱 멀리 떨어져 분포하고 있고, 장애물의 모서리부분에서 2차유동이 일어나고 있다. 등온선 분포에서는 등온선이 장애물을 기준으로 좌우측으로 분리되어 나타난다. 이는 장애물의 열전도율이 크기 때문에 장애물의 좌우측 온도가 거의 동일하게 유지되기 때문이다. 또한 등온선이  $K^*=6.6$ 일 때보다 좌우측 벽면으로 더욱 조밀하게 분포하는 것으로 보아 열전달이 더욱 활발해질것으로 생각된다.

이상과 같이  $Ra=10^5$ ,  $\zeta=2.0$ 으로 일정할 때  $K^*$ 값이 증가할수록 열전달이 활발해질것으로 생각된다.

$Ra=10^6$ 인 경우에 대한 유선 및 등온선 분포는 그림으로 제시되지 않았지만  $\zeta$ 값에 관계 없이 장애물의 좌우측에 시계방향의 2차 유동인 코어영역이 형성되고, 2차 유동은  $K^*$ 가 증가할수록 장애물의 영향으로 인해 더욱 활발해졌다. 또한  $K^*$ 가 증가할수록 등온벽면에서의 등온선 간격이 커져서 열전달이 미약해질것으로 생각된다.

### 3.3 평균 Nusselt수

Fig. 9는  $\zeta=0.5, 1.0$  및  $2.0$ 인 경우 Rayleigh수 변화에 따른 평균 Nusselt수의 분포를 나타낸 그림이다.

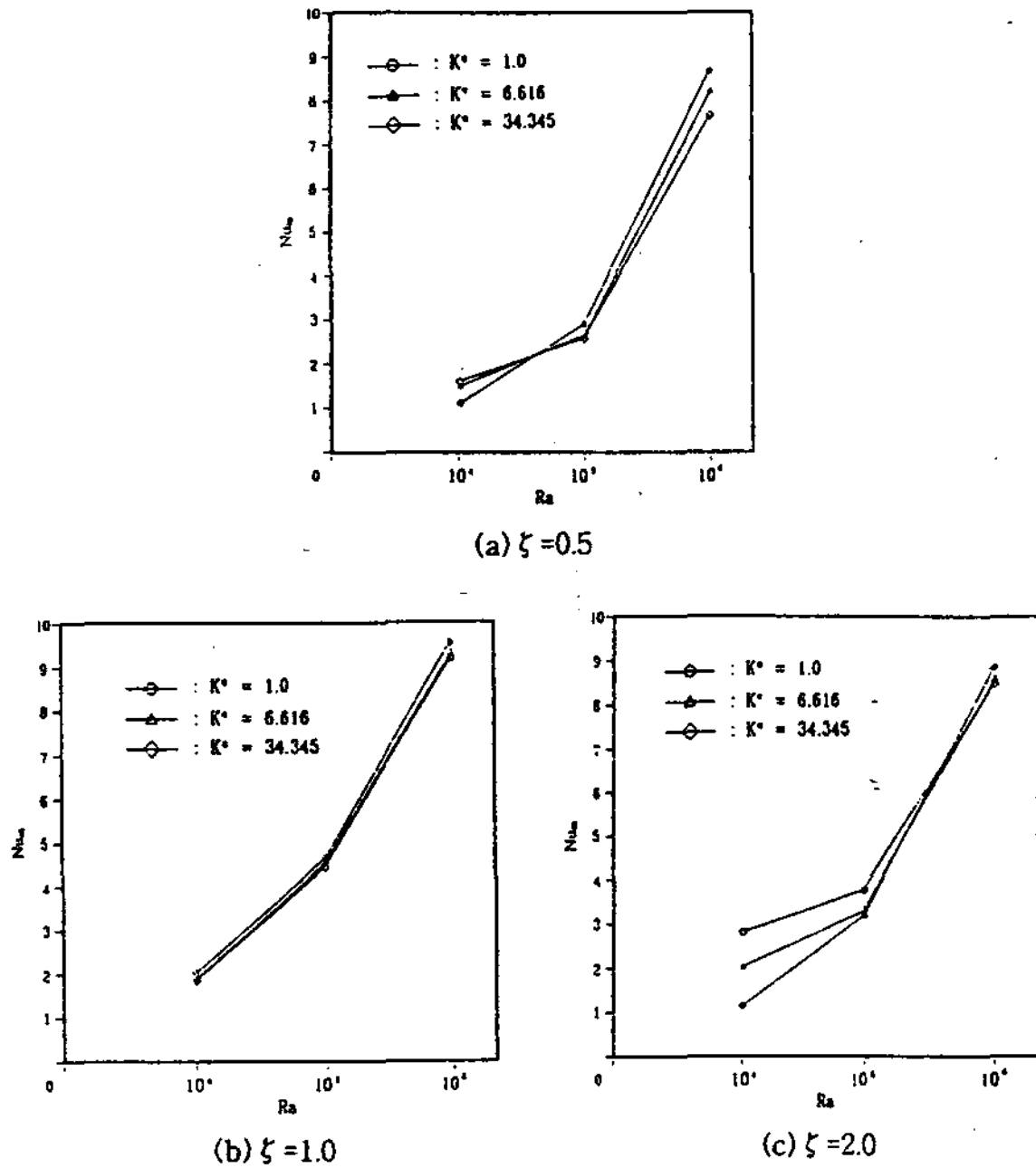


Fig. 9 Variations of mean Nusselt numbers with Rayleigh numbers for (a)  $\zeta = 0.5$ , (b)  $\zeta = 1.0$  (c)  $\zeta = 2.0$

Fig.9 (a)에서  $Ra=10^4$  및  $10^6$ 일 때는 등온선 분포에서 예측된 바와 같이  $K^*$ 가 증가할수록 평균 Nusselt수가 증가한다. 그러나  $Ra=10^5$ 에서는  $K^*$ 가 증가할수록 평균 Nusselt수는 감소한다.

Fig. 9(b)는  $\zeta=1.0$ 인 경우로서 Fig. 9(a)의 경우와 비교할 때 전 Rayleigh수 범위에 대하여 평균 Nusselt수가 크다. 또한  $K^*$ 의 값이 작을수록 평균 Nusselt수가 커진다. 이러한 성향은 Rayleigh수의 증가에 따라 일정한 성향으로 나타난다.

Fig. 9(c)는  $\zeta=2.0$ 인 경우로서  $Ra=10^4$  및  $10^5$ 일 때는  $K^*$ 가 증가할수록 평균 Nusselt수가 증가한다. 그러나  $Ra=10^6$ 에서는  $K^*$ 가 증가할수록 평균 Nusselt수는 감소한다. 또한 Fig. 9(a),(b)에 비해서  $K^*$ 에 따른 평균 Nusselt수

의 변화가 더욱 크다.

이상의 장애물의 형상비에 따른 평균 Nusselt수의 변화성향이 등온선 분포에서의 성향과 잘 일치한다.

Fig. 10은  $Ra=10^4, 10^5$  및  $10^6$ 인 경우  $\zeta$ 에 따른 평균 Nusselt수의 분포를 나타낸 그림이다.

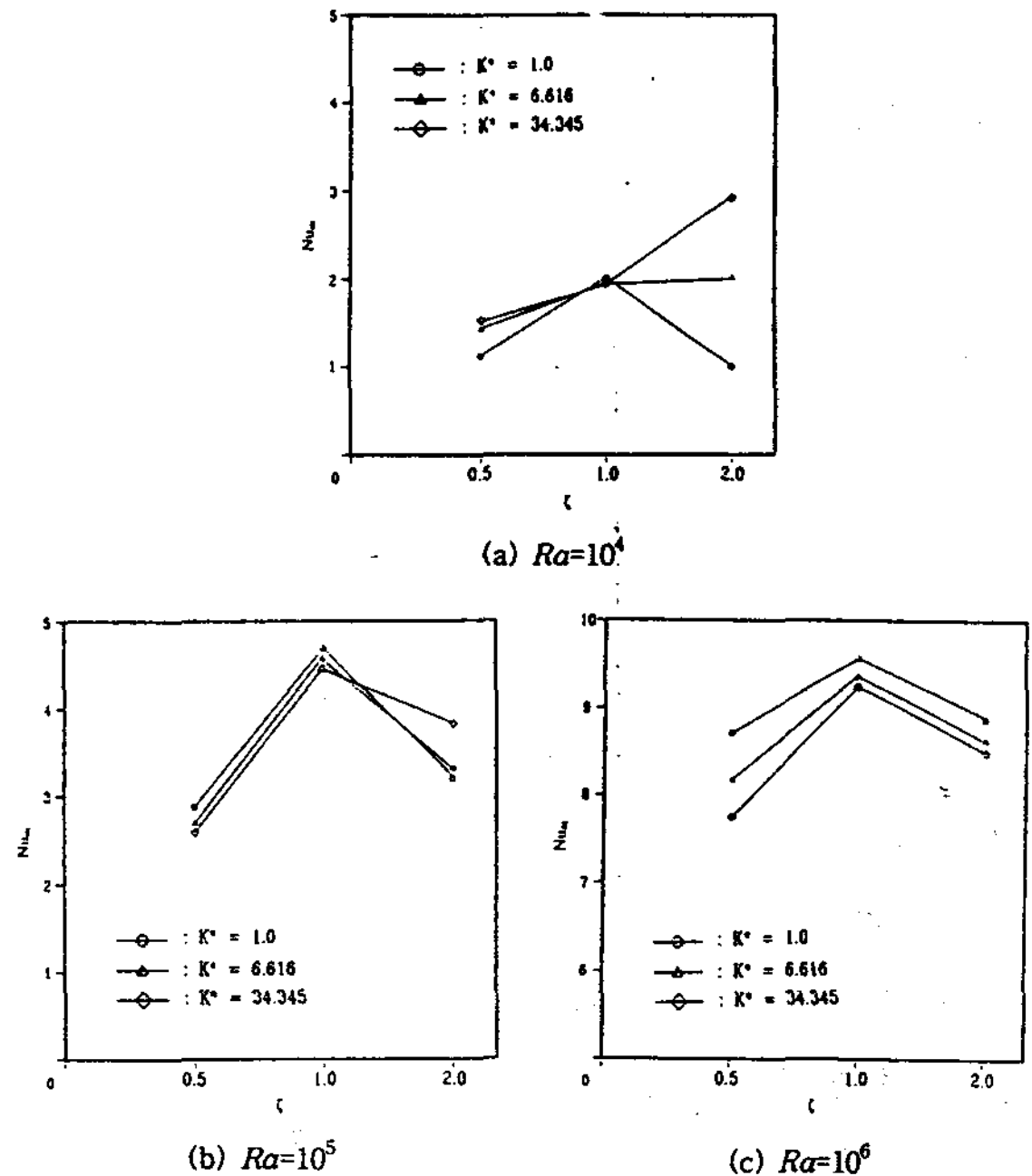


Fig. 10 Variations of mean Nusselt numbers with aspect ratio of obstruction,  $\zeta$  for (a)  $Ra=10^4$  (b)  $Ra=10^5$  (c)  $Ra=10^6$

Fig. 10(a)에서  $K^*=6.6$ 일 때  $K^*$ 의 변화에 따른 평균 Nusselt수의 변화가  $K^*=1.0, 34.0$ 일 때에 비교해 거의 변화가 없다. 또한  $K^*=34.0$ 인 경우  $K^*$ 의 변화에 따른 평균 Nusselt수의 변화가 가장 크다.  $K^*=1.0$ 이고  $\zeta=2.0$ 일 경우 평균 Nusselt수가 가장 작다.

Fig. 10(b)에서  $\zeta$ 가 증가함에 따라 평균 Nusselt수는 증가하다가 감소한다.

Fig. 10(c)에서  $K^*$ 에 따른 평균 Nusselt수

의 변화가 가장 크다. 또한  $K^*=1.0$ 일 때 평균 Nusselt수는 가장 큰 값을 나타낸다.

이상과 같이 Rayleigh수가 증가할수록 장애물의 열전도율비  $K^*$ 가 열전달에 미치는 영향은 커진다. 단, 장애물의 형상비  $\zeta=0.5$ 일 때  $K^*$ 가 열전달특성에 미치는 영향이 가장 작다.

#### 4. 결론

밀폐공간내부에 고립된 직사각형 전도성 장애물이 들어있을 때 Rayleigh수가  $10^4$ ,  $10^5$  및  $10^6$ 이고, 공기의 열전도율에 대한 전도성 장애물의 열전도율의 비  $K^*$ 가 1.0, 6.6 및 34.0, 전도성 장애물의 형상비  $\zeta$ 가 0.5, 1.0 및 2.0으로 변화할 때 자연대류특성을 수치해석적으로 구명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유동의 일반적 형태는 엔드영역에서 장애물 주위를 크게 회전하는 Cell형태의 1차유동과 코어영역에서 형성되는 Cell형태의 2차유동형태이다.
2. 장애물의 형상비  $\zeta=1.0$ 일 경우 Rayleigh수에 관계없이 장애물의 열전도율비  $K^*$ 가 증가할수록 평균 Nusselt수는 감소한다.
3. 장애물의 형상비  $\zeta=0.5$ 일 경우 Rayleigh수가  $10^4$ 일 때 장애물의 열전도율비  $K^*$ 가 증가할수록 평균 Nusselt수가 증가하지만, Rayleigh수가  $10^5$  및  $10^6$ 일 때는 감소한다.
4. 장애물의 형상비  $\zeta$ 가 2.0일 경우 Rayleigh수가  $10^4$  및  $10^5$ 에서는 장애물의 열전도율비  $K^*$ 가 증가할수록 평균 Nusselt수는 증가한다. 반면, Rayleigh수가  $10^6$ 에서는 감소한다.
5. 장애물의 크기와 열전도율비가 동일할 때 대류열전달 효과는  $\zeta=0.5$ 인 경우보다  $\zeta$

=2.0일 때 더 향상되었다.

#### 기 호 설 명

- Cp : 정압비열, kJ/kg K
- h : 열전달 계수, W/m<sup>2</sup>K
- k : 유체의 열전도율, W/mK
- ks : 전도체의 열전도율, W/mK
- K\* : 유체와 전도체의 열전도율비, ks/k
- L : 밀폐공간의 특성길이, mm
- Nu : Nusselt수
- Num: 평균 Nusselt수
- p : 압력, Pa
- P : 무차원 압력
- Pr : Prandtl수
- Ra : Rayleigh수
- SL : 전도체의 크기
- T : 온도, K
- u : x방향의 속도성분, mm/s
- U : x방향의 무차원 속도
- v : y방향의 속도성분, mm/s
- V : y방향의 무차원 속도
- W : 전도체의 특성길이, mm
- X : x방향의 무차원 좌표
- Y : y방향의 무차원 좌표
- x,y: 직교좌표계

#### 그 리 스 문 자

- $\alpha$  : 열확산율,  $k/\rho C_p$
- $\beta$  : 열팽창 계수, 1/K
- $\theta$  : 무차원 온도
- $\mu$  : 점성계수, kg/m s
- $\nu$  : 동점성 계수,  $\mu/\rho$
- $\rho$  : 밀도, kg/m<sup>3</sup>

$\zeta$ : 장애물 형상비,  $S_w/SL$

하 첨 자

c : 저온벽

h : 고온벽

s : 전도체

## 참 고 문 헌

- (1) S. Ostrach, "Advances in Heat Transfer", Vol. 8, Academic Press, New York, pp. 161~226, 1972.
- (2) Elsherbiny, S. M., Raithby, G. D., and Hollandss, K. G. T., "Heat Transfer by Natural Convection Across Vertical and Inclined Airlayers", Journal of Heat Transfer, ASME, Vol. 104, pp. 96~102, 1982.
- (3) Tabarrok. B. and Lin, R. C., "Finite Element an Analysis of Free Convection Flows", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 20, pp. 945~952, 1977.
- (4) Fu, W. S., Perng, J. C., and Shieh, W. J., "Transient Laminar Natural Convection in an Enclosure Partitioned by an Adiabatic Baffle," Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 16, pp. 325~350, 1989.
- (5) M. W. Nansteel and R. Grief, "Natural Convection in Undivided and Partially Divided Rectangular Enclosures", Trans. ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 103, pp. 623~ 629, 1981.
- (6) J. M. House, C. Beckermann and T. F. Smith, "Effect of a Centered Conducting Body on Natural Convection Heat Transfer in an Enclosure", Numerical Heat Transfer, Part A. Vol. 18, pp. 213~ 225, 1990.

# Natural Convection Heat Transfer with a Rectangular Obstruction in a square Enclosure

H. L. CHOO\*, B.H. KIM\*\*, H. W. KIM\*\*\*, C.S. JANG\*\*\*\*

\* Taegu-Health coll

\*\* Kyung-Il Univ

\*\*\* Andong-Technical coll

\*\*\*\* Kyung-Pook National Univ Graduate

## ABSTRACT

The effect of the thermal conductivity of a centered, square, heat-conducting body on natural convection in a square enclosure was examined numerically. Numerical simulations was carried out for  $Pr=0.17$ ,  $Ra=1.0 \times 10^4$ ,  $1.0 \times 10^5$ ,  $1.0 \times 10^6$ ,  $K^*=1.0$ , 6.6, 34.0 and  $\zeta=0.5$ , 1.0, 2.0. The results were reported in terms of streamlines, isotherms, Nusselt number. As the results, the mean Nusselt number increases with the increasing of  $\zeta$  at a constant  $Ra$  and  $K^*$ . In the case of  $\zeta=1.0$ (obstruction shape ratio), the mean Nusselt numbers were decreased as increasing of  $K^*$ ( obstruction thermal conductivity ratio) with regardless of the Rayleigh number. When the constant obstruction size and thermal conductivity ratio, convective heat transfer effect was more enhanced at  $\zeta=2.0$  than  $\zeta=0.5$ .