

# 격판을 가진 밀폐공간내의 자연대류 열전달에 공간 및 격판의 경사가 미치는 영향 Effects of Inclination of Enclosure and Partition on Natural Convective Heat Transfer in a Partitioned Enclosure

정 인 기\*, 송 동 주\*, 김 점 수\*\*  
I. K. Chung, D. J. Song, J. S. Kim

**Key words** : Inclination Angle(경사각), Natural Convection(자연대류), Enclosure(밀폐공간), Partition(격판), Numerical Analysis(수치해석), Heat Transfer Rate(열전달율)

### Abstract

The effects of the inclination of enclosure and partition on natural convective flow and heat transfer were investigated numerically. The enclosure was composed of the lower hot and the upper cold horizontal walls and the adiabatic vertical walls, and a partition was positioned perpendicularly at the mid-height of one vertical insulated wall. The governing equations are solved by using the finite element method with Galerkin method. The computations were performed with the variations of the partition length and Rayleigh number based on the temperature difference between two horizontal walls and the enclosure height with water( $Pr=4.95$ ). The effects of the inclination angle of enclosure and partition on the heat transfer within an enclosure were also studied. As the results, the increase of the inclination angle of enclosure rapidly raised the heat transfer rate, while the inclination angle for the maximum Nusselt number was retarded with the increase of the partition length and the decrease of the heat transfer rate became larger in proportion to the increase of the partition length. The Nusselt number obtained by the inclination of partition was smaller than that of the inclination of enclosure. However, the difference of the heat transfer rates was considerably decreased at the longer partition lengths and the trends for the variation of the average Nusselt number were more similar with that of the inclination of enclosure. The upward oriented partition increases the convective heat transfer distinctly in contrast to that of the inclination of enclosure as the partition length increases.

### 기 호 설 명

$b$  : 격판의 두께  
 $g$  : 중력가속도

$H$  : 밀폐공간의 높이(특성길이)  
 $L$  : 격판의 길이  
 $Nu$  : 국소 Nusselt수  
 $\overline{Nu}$  : 평균 Nusselt수  
 $\overline{Nu}_t$  : 진동유동의 발생시 진동주기동안의 평균 Nusselt수

\* 영남대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 현대중공업(주) 선박해양연구소

- $p$  : 압력
- $P$  : 무차원 압력
- $Pr$  : Prandtl수
- $Ra$  : Rayleigh수
- $S$  : 하부벽에서 격판중심까지의 거리
- $t$  : 시간
- $T$  : 온도
- $u$  : 수평방향의 속도
- $U$  : 무차원 수평방향의 속도
- $v$  : 수직방향의 속도
- $V$  : 무차원 수직방향의 속도
- $W$  : 밀폐공간의 폭
- $x, y$  : 직교좌표
- $X, Y$  : 무차원 직교좌표
- $\alpha$  : 열확산계수
- $\beta$  : 열팽창계수
- $\theta$  : 무차원 온도
- $\nu$  : 유체의 동점성계수
- $\rho$  : 유체의 밀도
- $\tau$  : 무차원 시간
- $\phi$  : 경사각

하 첨 자

- $c$  : 냉각벽
- $f$  : 유체
- $h$  : 가열벽
- $p$  : 격판

1. 서 론

격판을 갖는 밀폐공간내에서 일어나는 자연대류 열전달 현상은 공학적인 중요성 때문에 많은 관심을 받아 왔다. 이러한 격판을 가진 밀폐공간내에서 일어나는 자연대류 유동과 열전달은 건축공간내의 에너지 이동현상, 축열조 및 태양열 집열기등의 설계, 전자장치의 냉각문제등 공학의 각 분야에서 나타나는 복잡한 물리적 현상을 이해하기 위하여 광범위한 연구대상이 되어 왔으며, 지금까지 실험적 또는 수치적으로 수 많은 연구가 수행되어 왔다. 1969년에 Emery<sup>1)</sup>가 원자로의 냉각장치를 모델로 4각 밀폐공간의 중앙에 하나의 수직격판이 있는

경우에 대하여 실험적으로 연구한 이후, Nansteel과 Greif<sup>2)</sup>는 밀폐공간내의 상부벽에 하나의 수직격판이 있는 경우에 대하여 흐름의 가시화실험을 통하여 다각적인 연구를 수행하였으며, Winters<sup>3)</sup>는 밀면에 수직으로 부착된 격판의 열전도성이 밀폐공간내의 자연대류 유동과 열전달에 미치는 영향을 수치적으로 연구하였다. Bajorek과 Lloyd<sup>4)</sup>는 상하 단열벽에 각각 수직격판이 부착된 4각 밀폐공간내의 열전달 현상을 간섭계를 이용하여 실험적으로 연구하였으며, Lin과 Bejan<sup>5)</sup>은 격판에 의해 부분적으로 분리된 4각 밀폐공간내의 자연대류 열전달에 대하여 이론해석과 실험을 동시에 수행하였다. Zimmerman과 Acharya<sup>6)</sup>는 상하벽과 격판이 열전도성을 가지는 4각 밀폐공간에 대한 연구를 수치해석으로 수행하여 기존의 실험적 연구결과와 비교하였다. 또 Shaw<sup>7)</sup>은 상하 단열벽에 수직으로 부착된 격판의 길이와 위치변화가 밀폐공간내의 유동과 열전달에 미치는 영향을 수치해석으로 연구한 바 있고, Fu<sup>8)</sup>은 상하벽이 단열된 정사각형 밀폐공간내의 상부벽에 수직격판이 존재하는 경우에 Rayleigh수와 격판 위치의 변화가 자연대류 유동과 열전달에 미치는 영향을 유한요소법을 이용하여 수치적으로 연구하였다. Kelker와 Patankar<sup>9)</sup>는 4각 밀폐공간내의 중앙 및 상하벽에 수직격판이 존재하는 두가지 형태의 모델에 대한 연구를 수치적으로 수행하여 격판의 열전도율과 격판사이의 틈새폭이 공간내의 유동과 열전달에 미치는 영향을 검토하였다. 그리고 Acharya와 Jetli<sup>10)</sup>는 양쪽벽이 가열 및 냉각되는 경우 바닥면에 부착된 격판의 위치와 높이변화가 공간내의 자연대류 열전달과 유동에 미치는 영향을 수치적으로 연구하였다. 이외에도 많은 연구가 수행되어 왔으나, 이들 연구는 모두 4각 밀폐공간의 상하벽이 단열이고 측벽이 가열 및 냉각되는 밀폐공간내에 수직으로 격판이 존재하는 경우에 대한 것들이었다.

양쪽 수직벽이 단열이고 밑면이 고온, 윗면이 저온으로 유지되는 정4각형 밀폐공간내의 한쪽 측벽의 중앙에 수평격판이 부착된 경우에 상하공간에서 발생한 자연대류 유동이 일정한 주기로 흐름방향이 격판선단에서 상하로 교차하는 진동유동(oscillatory flow)이 발생하는 것을 가시화실험을 통하여 관찰한 바 있고<sup>11)</sup>, 이러한 진동현상에 의한

열전달 현상을 규명해보기 위하여 가시화실험 대상과 같은 모델을 가지고 수치적으로 연구한 바 있다.<sup>14)</sup> 또 밀폐공간의 수직 가열면에 격판이 수평 또는 경사지게 부착된 경우의 열전달 현상을 실험적으로 연구하여 공간의 단열된 상하면에 격판이 수직으로 부착된 경우의 열전달 현상과 비교한 것이 있다.<sup>15)</sup>

따라서 본 연구에서는 수평격판이 밀폐공간내 한쪽 단열벽의 중간높이에 부착되어 있을 때 밀폐공간의 경사와 격판의 경사에 의해서 생기는 공간내의 자연대류 유동과 열전달 현상을 수치적으로 고찰하였다. 본 연구를 위하여 Fig.1에 나타낸 모델을 가지고 지배방정식을 Galerkin Method를 사용한 2차원 유한요소법으로 수치해석하였는데<sup>16)</sup>, 내부유체는 Prandtl수가 4.95인 물로 가정하였고, Rayleigh수와 공간폭에 대한 격판길이비(L/W)의 변화 및 공간과 격판의 경사각변화에 따른 공간내 자연대류 유동과 등온선분포를 조사하고 두 경우에 대한 열전달율을 비교하여 보았다.

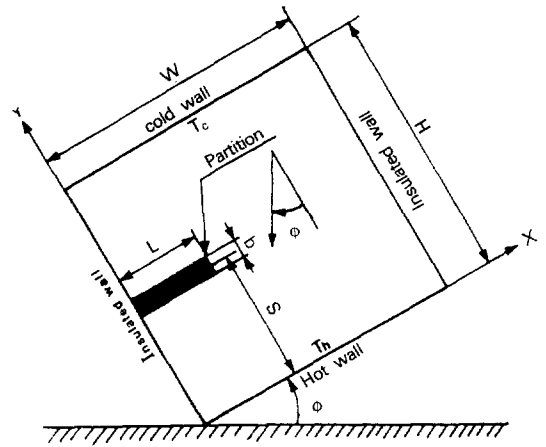


Fig.1 Schematic diagram of enclosure geometries

에너지방정식

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Pr} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \tag{4}$$

식 (1)~(4)의 무차원화된 지배방정식을 구하기 위하여 사용된 무차원수는 다음과 같이 정의하였다.

$$X = x/H, Y = y/H, U = uH/\alpha, V = vH/\alpha$$

$$\tau = \nu/H^2, P = (p + \rho g(x \sin \phi + y \cos \phi)) / (\rho \nu^2/H^2)$$

$$\theta = (T - T_c) / (T_h - T_c), Ra = g\beta(T_h - T_c)H^3/\alpha\nu,$$

$$Pr = \nu/\alpha \tag{5}$$

위의 지배방정식을 풀기 위하여 무차원화된 초기 조건과 경계조건은 다음과 같다.

초기조건 :  $\tau = 0$ 일 때 벽을 포함한 내부공간에서

$$U = V = 0, \theta = 0 \tag{6}$$

경계조건 :  $\tau > 0$ 에서

$$\text{양측벽, } X=0 \text{과 } X=W \text{에서 } U=V=0, \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 \tag{7}$$

2. 이론 해석

Fig.1과 같은 모델을 해석하기 위하여 밀폐공간내의 유체는 비압축성, 뉴우튼 유체이고, 고체와 유체의 물성치는 일정하며, 흐름은 2차원 유동으로 가정하였으며, 온도에 대한 밀도의 변화는 Boussinesq 근사를 적용하여 계산하였다. 이상의 가정을 도입하여 무차원화시킨 2차원 비정상상태의 지배방정식은 다음과 같이 주어진다.

연속방정식

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

운동량방정식

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{Ra}{Pr} \theta \sin \phi + \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{Ra}{Pr} \theta \cos \phi + \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \tag{3}$$

밑면,  $Y=0$ 에서  $U=V=0, \theta=1$  (8)

윗면,  $Y=H$ 에서  $U=V=0, \theta=0$  (9)

단열된 격판의 표면에서  $U=V=0,$   
 $\partial\theta/\partial X=\partial\theta/\partial Y=0$  (10)

식 (1)~(4)의 각 식에 대하여 Galerkin법을 이용한 유한요소방정식은 가중함수(weighting functions)로서 임의함수  $\delta U, \delta V, \delta\theta$  그리고  $\delta P$ 를 도입하여, 이것을 각 식에 곱하여 요소내에서 적분을 행하였다.

밀폐공간의 경사각변화에 따른 영향을 수치해석으로 규명하기 위하여 계산영역은 사각형요소를 사용하여 2차 다항식의 형상함수(shape functions)  $M_a, a=1\sim 8,$  1차의 다항식의 형상함수(shape functions)  $N_a, a=1\sim 4$ 로 표시하였다. 이것을 사용하여 유한요소소에서 변수들은 다음과 같이 나타내었다.

$$U = \sum_{a=1}^8 M_a U_a \quad V = \sum_{a=1}^8 M_a V_a$$

$$\theta = \sum_{a=1}^8 M_a \theta_a \quad P = \sum_{a=1}^4 N_a P_a \quad (11)$$

한편 격판이 경사에 의한 영향을 연구하기 위하여 식 (2)와 (3)의 운동량방정식은 공간의 경사에 의해서 나타나게 되는 경사각  $\phi$ 가 0이 되는 지배방정식을 사용하였기 때문에 식 (2)의 오른쪽 두번째 항은 사라지게 되어 공간이 수평으로 놓인 상태로 운동량방정식이 주어지게 된다. 그래서 밀폐공간내 해석영역의 자연대류 유동과 열전달은 격판의 경사에 의해서만 영향을 받게 된다. 격판의 경사에 의해서 격판상하부에 생기게 되는 삼각형영역의 해석을 원활히 하기 위하여 격판의 경사각변화에 대한 연구에서는 계산영역을 삼각형요소를 사용하였다. 따라서 2차 다항식의 형상함수  $M_a, a=1\sim 6,$  1차 다항식의 형상함수  $N_a, a=1\sim 3$ 으로 표시하였다. 그래서 격판의 경사를 위한 해석의 유한요소에서 변수들은 다음과 같이 주어졌다.

$$U = \sum_{a=1}^6 M_a U_a \quad V = \sum_{a=1}^6 M_a V_a$$

$$\theta = \sum_{a=1}^6 M_a \theta_a \quad P = \sum_{a=1}^3 N_a P_a \quad (12)$$

각 변수들을 요소를 위한 적분법에 대입하고 정리하여 비정상문제 해석을 위한 시간적분식을 구하였다.

### 3. 계산방법

본 계산을 위하여 사용된 격자배열은  $33 \times 33$ 으로 분할하였으며, 유동과 온도의 변화가 심한 격판부근과 벽면근처에서는 조밀하게 배열시켰다. 시간증분에 따른 반복계산으로 얻어지는 비정상상태의 해는 시간증분에 의한 계산과정에서 얻어지는 유동함수와 온도에 대한 계산값의 최대오차가  $10^{-3}$  이하인 경우를 수렴한 것으로 판정하였다. 한편 공간내에서 유동의 진동현상이 초래되는 경우는 반복적인 형태로 나타나는 유동함수 값의 최대오차가 0.01 이하인 경우를 수렴한 것으로 하였다. 또한 수치계산으로 얻어진 온도값을 사용하여 다음식과 같이 정의되는 고온면과 저온면의 국소 Nusselt수와 평균 Nusselt수를 계산하였다.

$$Nu_h = -\frac{\partial\theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \quad (13)$$

$$Nu_c = -\frac{\partial\theta}{\partial Y} \Big|_{Y=H} \quad (14)$$

$$\bar{Nu} = \frac{1}{W} \int_0^W Nu \Big|_{Y=0,H} dX \quad (15)$$

한편 정상상태에서 공간내 자연대류 유동이 진동현상을 일으킬 때는 유동의 진동주기 동안에 평균 Nusselt수를 다음과 같이 정의하여 얻었다.

$$\bar{Nu}_t = \frac{1}{(\tau_2 - \tau_1)} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \bar{Nu} d\tau \quad (16)$$

식 (16)에서 사용된  $\tau_1$ 과  $\tau_2$ 는 계산에 고려되는

시작과 끝의 무차원 시간을 나타낸다.

4.결과 및 고찰

밀면이 고온, 윗면이 저온으로 유지되고 양쪽 수직벽이 단열인 정사각형 밀폐공간내의 한쪽 측벽에 수평격판이 부착되어 있는 경우 이 격판에 의해서 정상상태의 자연대류 유동이 격판선단을 따라 상하로 방향이 교차하는 진동현상의 특성에 대해서 이미 실험적 및 수치적으로 규명한 바 있다.

13-14)

본 연구에서는 이러한 격판이 공간내의 중간높이에 부착되어 있을 때 밀폐공간이 경사되는 경우와 부착된 격판이 경사되는 경우에 대한 자연대류 유동과 열전달 특성을 검토하였다. 해석을 위하여 사용된 지배방정식은 평균 Nusselt수와 무차원 유동함수의 분포를 시간경과에 따라 나타낸 이전의 연구<sup>14)</sup>에서와 같이 무차원 시간을 고려한 비정상상태의 지배방정식을 사용하였지만 자연대류 유동의 진동현상이 초래되는 경우에도 앞에서 정의한 바와 같은 정상상태의 값을 가지고 결과를 나타내었다.

수치해석에 사용된 밀폐공간은 종횡비(W/H)가 1인 정사각형 단면이고 격판의 두께는 공간의 높이에 대한 비(b/H)인 0.1로 주어졌지만 격판의 경사에 대한 연구에서는 격판두께가 격판이 부착된 한쪽 단열벽에서 0.1로 일정하게 유지될 수 있으나 격판의 경사각변화에 따라 공간내의 격판두께는 달라질 수 있다. 그러나 격판두께의 변화는 이미 검토된 바와 같이 유동과 열전달에 거의 영향이 없고 다만 격판두께의 상당한 증가에 따라 유동공간의 축소에 의한 효과가 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다.<sup>14)</sup> 따라서 본 연구에서는 격판의 경사각변화에 의해서 초래되는 격판두께의 변화에 의한 영향은 무시하였다. 내부유체는 양 등온벽의 온도차에 관계없이 내부의 물의 평균온도를 35°C로 유지시킨 가시화실험<sup>15)</sup>의 경우와 같이 Prandtl수가 4.95(물)인 경우에 대하여 해석을 수행하였으며, 2차원유동으로 가정하였다. 결과로 도시되어 있는 밀폐공간 및 격판의 경사각이 0°일 때 나타낸 평균 Nusselt수는 공간내에서 자연대류 유동이 진동현상을 초래하는 경우로 이때 주어졌  $\overline{Nu}_s$ 는 정상상

태에서 진동유동의 한 주기동안에 얻어지는 열전달율을 시작과 끝의 무차원 시간에 대해서 평균하여 도시한 것이다.

4.1 밀폐공간의 경사

Fig.2와 Fig.3은 각각  $Ra=10^7$ ,  $L=0.3W$ 에 대해서 공간의 경사각을 변화시키면서 얻은 자연대류 유동과 등온선분포를 나타낸 것이다. 경사각이 낮은  $\phi=10^\circ$ 에서는 전공간에 걸쳐 주순환유동이 발생하고 격판하부에 재순환유동이 생기는 안정된 유동형태를 나타내고 있으며, 경사각의 증가에 의해서 격판하부의 재순환유동은 다세포유동으로 분리되며 약해졌다. 경사각이 점차 증가하여  $\phi=30^\circ$ 부근이 되면 주순환유동이 공간의 전역으로 확장되고 안정된 단세포유동으로 발달되어 흐름은 활발해지고 강도가 커졌다. 그러나 경사각을 계속 증가시키면 공간내 유동의 강도는 오히려 약해지는 경향을 보이고 여러 개의 유동중심을 가진 형태로 발전되었다. 또한 등온선분포를 나타낸 Fig.3에서 보는 것처럼 등온선은 공간을 경사시킴에 따라 층을 이루며 안정된 형태로 발전되었다.

Fig.4는  $Ra=10^6$ ,  $L=0.4W$ 일 때 공간의 경사에 의해서 얻어진 하부 고온면에서의 국소 Nusselt수를

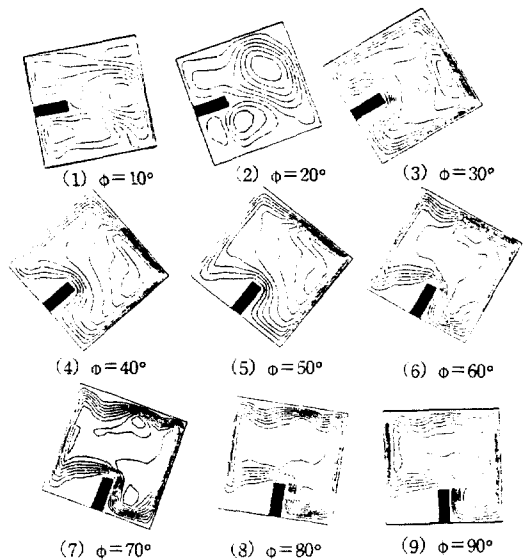


Fig.2 Streamlines of various inclination angles in a square enclosure,  $Ra=10^7$ ,  $L=0.3W$

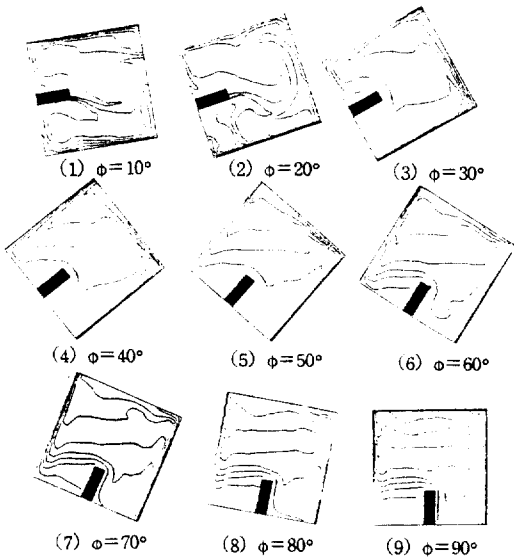


Fig.3 Isotherms of various inclination angles in a square enclosure,  $Ra=10^7$ ,  $L=0.3W$

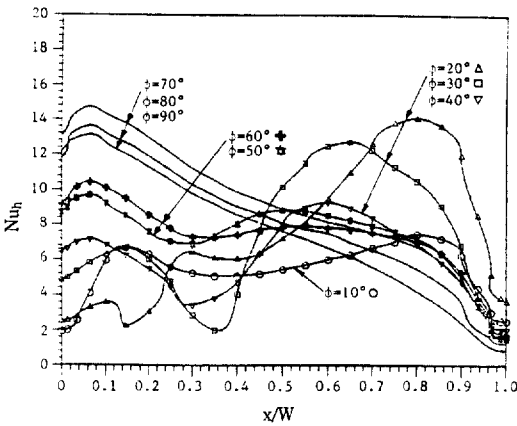


Fig.4 Effects of inclination angles of enclosure on local Nusselt number over the bottom hot wall,  $Ra=10^6$ ,  $L=0.4W$

보여주고 있다.  $\phi=40^\circ$ 이하의 비교적 낮은 경사각에서는 국소 Nusselt수의 극대점이 격판이 없는 넓은 공간에서 나타났으나,  $\phi=50^\circ$ 이상의 큰 경사각에서는 격판하부의 공간에서 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이것은 경사각이 낮을 때는 격판의 영향으로 유동이 격판이 없는 공간에서 활발히 일어나는 반면, 격판하부에서는 흐름의 정체에 의해 열전달이 억제되기 때문이다. 한편 공간의 경사각이  $50^\circ$ 이

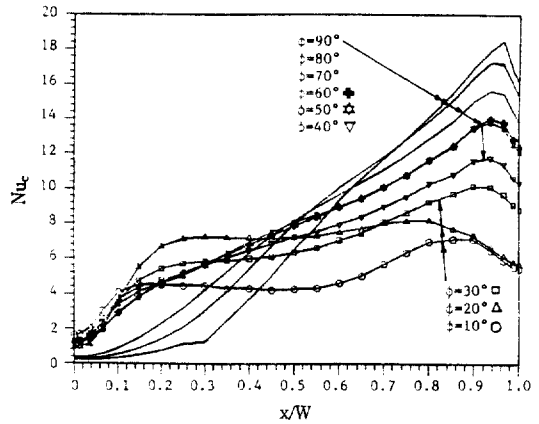


Fig.5 Effects of inclination angles of enclosure on local Nusselt number over the upper cold wall,  $Ra=10^6$ ,  $L=0.4W$

상으로 커지게 되면 격판선단을 따라 흐르는 하강유동과 고온벽을 따라 상승하는 경계층유동으로 흐름이 변환되어 고온벽에서는 격판이 부착된 단 열벽쪽으로 경계층흐름이 시작되어 이 부근에서 활발한 열전달이 일어나게 된다.

Fig.5는  $Ra=10^6$ ,  $L=0.4W$ 에서 공간의 경사에 따른 상부 저온면의 국소 Nusselt수를 나타내고 있는데, 저온면에서는 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 국소 Nusselt수의 극대점은 격판이 존재하지 않는 공간 영역에서 모두 발생되고 있다. 또한 공간의 경사각이 커질수록 국소 Nusselt수의 극대점이 나타나는 위치가 우측벽으로 이동하여 경계층유동으로 흐름이 발달해가는 것을 알 수 있다.

Fig.6은  $Ra=10^7$ 에서 격판길이가 공간의 경사각 변화가 공간의 평균 Nusselt수에 미치는 영향을 보여주는 그림이다. 격판의 길이가 증가할수록 평균 Nusselt수는 감소하는 것을 알 수 있고, 공간을 경사시키면 낮은 경사각에서는 열전달율의 감소가 나타났다. 그러나 더 큰 경사에 의해서 평균 Nusselt수의 급격한 증가가 일어나는 경사각의 범위를 볼 수 있는데 이것은 공간내 유동의 변화가 초래되기 때문으로 사료된다. 격판의 길이가 증가할수록 평균 Nusselt수의 최대값이 얻어지는 공간의 경사각은 지연되는 것을 볼 수 있다. 유동분포의 결과가 그림으로 도시되지는 않았지만 격판이 길어지면 다세포유동에서 단세포유동으로 변환하는 경사각

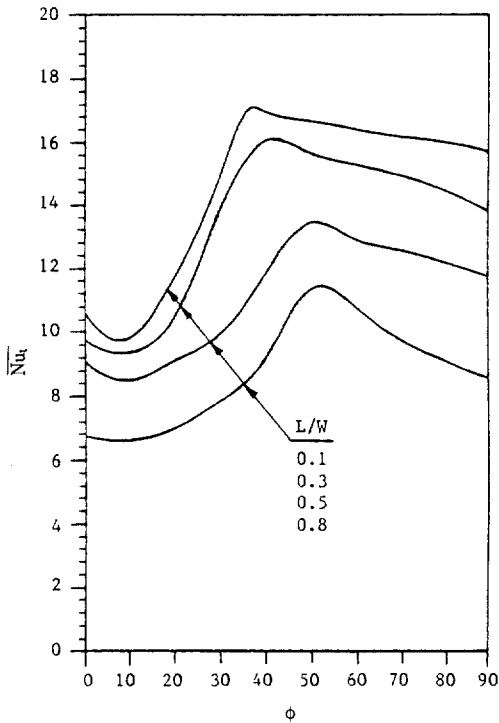


Fig.6 Average Nusselt number as a function of inclination angle for various partition lengths,  $Ra = 10^7$

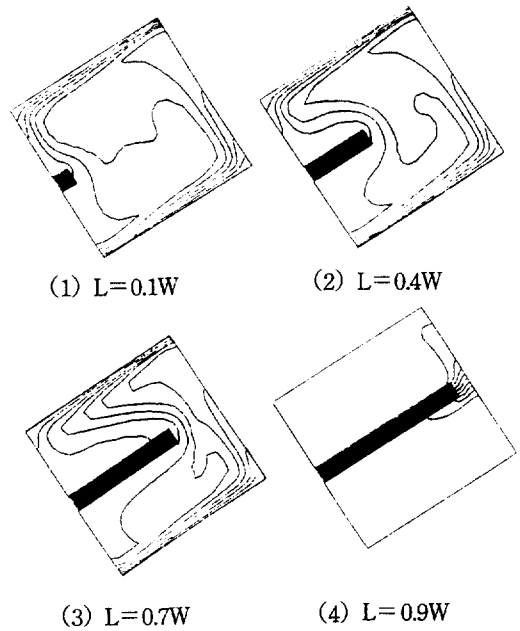


Fig.8 Isotherms of various partition lengths in a square enclosure,  $Ra = 10^6$ ,  $\phi = 30^\circ$

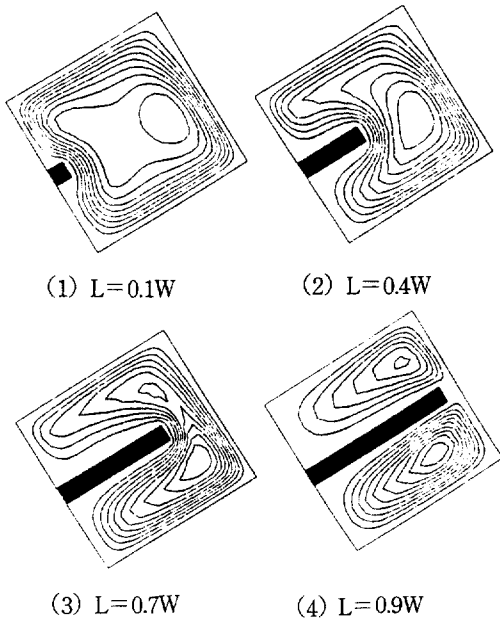


Fig.7 Streamlines of various partition lengths in a square enclosure,  $Ra = 10^6$ ,  $\phi = 30^\circ$

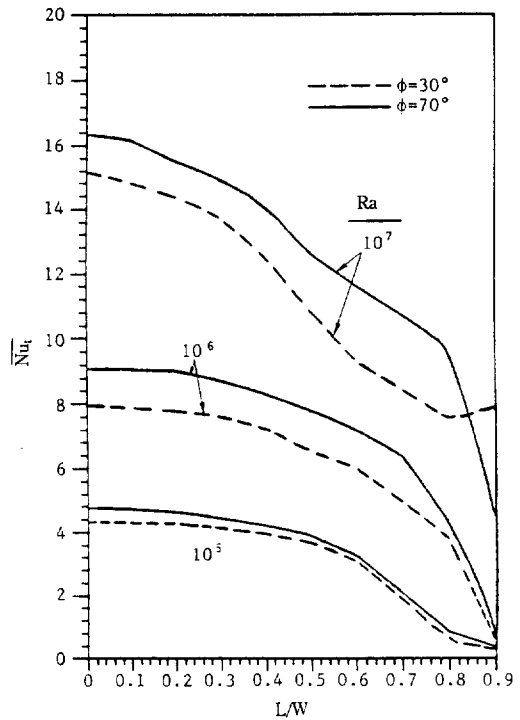


Fig.9 Average Nusselt number as a function of partition length for various Rayleigh numbers



이 지연되는 현상에 기인한 것으로 사료된다. 공간의 경사각변화에 의해서 평균 Nusselt수의 최대값이 나타난 후에도 공간을 더욱 경사시키면 열전달은 감소하게 되는데 격판의 길이가 길어질수록 현상이 현저하였다. 이것은 격판에 의해서 유동이 억제되어 흐름이 약해져서 일어난 현상으로 사료된다.

Fig.7은  $Ra=10^6$ ,  $\phi=30^\circ$ 일 때 격판길이의 변화에 따른 자연대류 유동분포를 나타낸 그림인데, 유동에 대한 격판길이의 변화가 잘 도시되어 있다. 격판의 길이가 아주 짧을 때는 격판이 없는 경우에서와 같이 공간전체에 걸쳐 활발한 흐름이 일어나고 있으며, 격판길이의 증가와 함께 유동은 격판 상하부공간으로 확장된 후 격판길이가 아주 긴  $L=0.9W$ 에서 상하로 분리된 2세포유동으로 변환되었다.

또 Fig.8에는 자연대류 유동에 상응하는 등온선 분포를 보여주고 있는데 격판의 길이가 증가할수록 격판선단부로 등온선분포가 집중되는 현상을 보이게 되는데, 특히 격판길이가 상당히 길어져서 공간내 유동분포가 상하로 분리되어 나타나는  $L=0.9W$ 의 경우에는 격판의 선단과 단열벽사이의 유동이 정체되는 좁은 공간으로 열교환이 일어나게 되어 등온선이 격판선단부에 더욱 밀집되며 급격한 온도변화를 나타내는 것을 볼 수 있다.

Fig.9는 공간의 경사각  $\phi=30^\circ, 70^\circ$ 에 대해서 평균 Nusselt수의 변화를 격판길이에 따라 도시한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 격판길이의 증가에 따라 열전달율의 감소는 현저하게 나타나는 것을 알 수 있는데, Rayleigh수가 커질수록 격판길이의 증가에 대해서 평균 Nusselt수는 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 격판의 길이가 상당히 증가한 경우에는 감소폭이 매우 크게 나타났다. 그림에 주어진  $\phi=30^\circ$ 의 경우 격판의 길이가 상당히 긴  $L=0.9W$ 에서는  $Ra=10^7$ 으로 Rayleigh수가 증가하게 되면 평균 Nusselt수가 다른 경우와 달리  $L=0.8W$ 에 비해서 증가하게 되는데, 이것은 공간의 경사에 의해서 바닥 가열벽에서는 흐름이 경계층유동으로 발전하게 되고 아울러 Fig.4에서 볼 수 있는 바와 같이 공간내 다른 경사각의 경우와 다르게 이 경사각 부근에서는 가열벽의 국소 Nusselt수에 대한 극대값이 우측 단열벽 근처에 나타나게 되어 이 영역에서의 활발한 유동이 격판상부의 공간으로

빠르게 분출되어 일어나는 현상으로 사료되지만 여기에 대해서는 더 자세한 연구가 필요한 것으로 생각된다.

#### 4.2 격판의 경사

밀폐공간의 경사에 의해서 공간내 자연대류 유동의 진동현상이 사라지고 일정한 유동형태를 보이며 안정된 흐름을 발전되는 것을 확인한 바 있는데, 여기에서는 공간내 자연대류 유동과 열전달 현상을 한쪽 단열벽의 중간높이에 설치되는 수평 격판을 공간의 상하로 경사시킨 격판의 경사각과 길이변화를 가지고 고찰하여 보았으며 아울러 밀폐공간의 경사에 의한 열전달 특성과 비교하여 보았다.

격판의 경사에 의한 영향을 연구하기 위하여 본 절의 수치해석을 위한 공간내 해석영역은 이미 언급한 바와 같이 삼각형 격자계를 사용하여 해석하였다.

Fig.10과 Fig.11은  $Ra=10^7$ ,  $L=0.5W$ 일 때 공간의 중간높이에 부착된 격판의 경사각변화에 의해 얻어진 자연대류 유동 및 등온선분포를 보여주고 있다. 격판의 길이가 다소 긴  $L=0.5W$ 에서는 경사각이 커질수록 격판 상하부의 좁아진 공간에서 유동의 발생이 어려워져서 경사각이 상당히 커진  $\phi=-60^\circ$  및  $60^\circ$ 에서는 격판의 길이가 비교적 짧을 때 초래되는 작은 다세포유동의 발생과는 달리 유동분포가 거의 나타나지 않고 있다. 또한 전반적으로 공간내 흐름이 격판의 경사에 의해서 복잡한 유동형태를 보이게 되며 공간의 상하로 격판의 경사가 커질수록 유동은 불안정해지지만 주순환유동이 발생하는 공간이 넓어져서 유동의 강도는 커지는 현상을 확인할 수 있었다. 등온선분포를 나타낸 Fig.11에서 볼 수 있는 바와 같이 격판의 경사에 의해서 공간내 온도분포는 상당히 복잡해지고 경사가 커질수록 벽면에서 조밀한 분포를 나타내었다. 그림에 나타낸 경사각  $\phi$ 의 -값은 격판이 밀폐공간의 아래방향으로 경사진 경우를 +값은 윗방향으로 경사진 것을 의미한다.

Fig.12는  $Ra=10^6$ ,  $L=0.3W$ 에서 밀폐공간내에 설치된 격판의 경사각변화에 따라 하부 가열벽에서 얻어진 국소 Nusselt수를 격판의 경사각에 따라 도시한 그림이다. 격판의 경사각  $\phi$ 가 -인 영역에



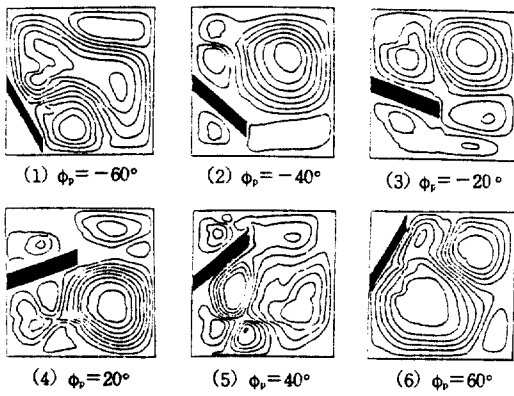


Fig.10 Streamlines of various inclination angles of partition in a square enclosure,  $Ra=10^7$ ,  $L=0.5W$

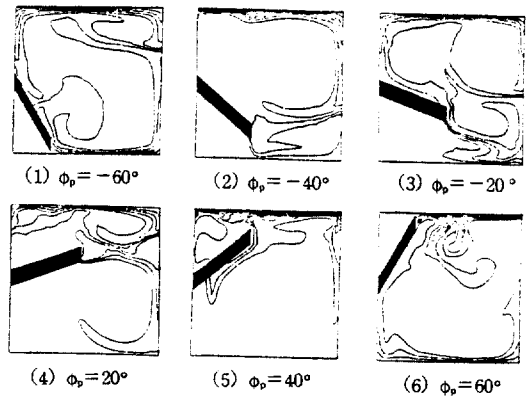


Fig.11 Isotherms of various inclination angles of partition in a square enclosure,  $Ra=10^7$ ,  $L=0.5W$

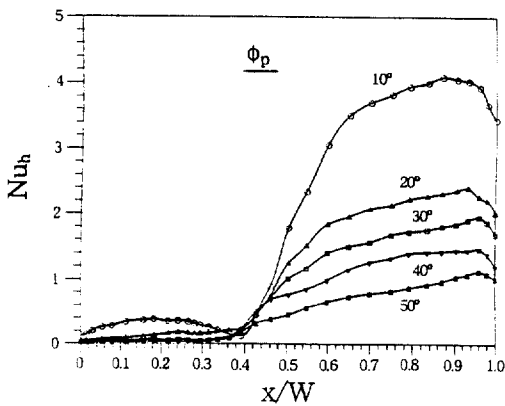
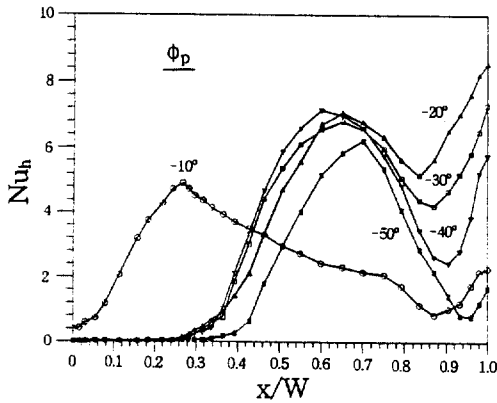


Fig.12 Effects of inclination angles of partition on local Nusselt number over the bottom hot wall,  $Ra=10^5$ ,  $L=0.3W$

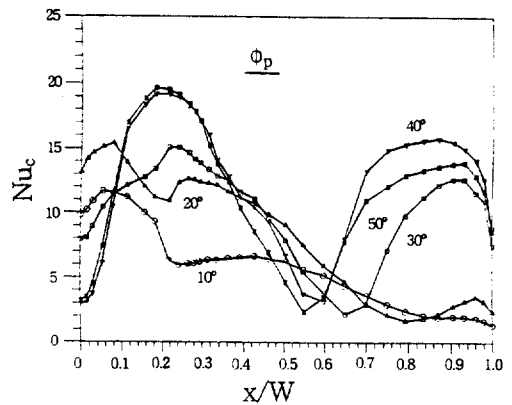
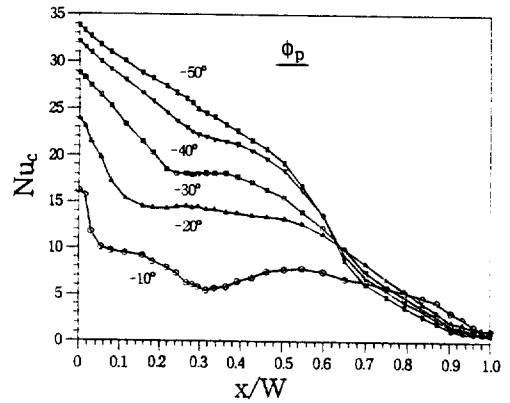


Fig.13 Effects of inclination angles of partition on local Nusselt number over the upper cold wall,  $Ra=10^5$ ,  $L=0.3W$

서는 경사각이 커지면 국소 Nusselt수가 상승한 후 경사각의 증가와 더불어 공간내 격판이 없는 우측벽 근처의 열전달율을 계속 감소하는 경향을 보였다. 경사각이 +인 영역에서는 격판의 경사각 증가와 함께 국소 Nusselt수는 계속 감소하는 현상을 볼 수 있다.

한편 Fig.13에 도시한 격판의 경사각변화에 따른 상부 냉각벽의 국소 Nusselt수는 격판의 경사각  $\phi_p$ 가 -인 영역에서 경사각의 증가와 함께 국소 Nusselt수의 증가를 나타내고 있다. 이것은 격판의 경사각이 커짐에 따라 유동의 공간이 커져서 냉각벽으로부터 열전달이 활발하게 일어날 수 있기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다. 또 격판의 경사각이 +로 주어진 영역에서는 벽면에서의 국소 Nusselt수의 분포가 복잡한 형태를 보이게 되거나 경사각이 증가함에 따라 국소 Nusselt수도 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig.14는  $L=0.3W$ 일 때 격판의 경사각변화에 따른 공간내 등온벽의 평균 Nusselt수를 도시한 그림인데, 경사각  $\phi_p$ 가 -인 영역에서 더 높은 열전달율을 보이고 있으며 Rayleigh가 증가할수록 격판의 경사각이 낮은 영역에서는 평균 Nusselt수의 감소가 나타났다. 그러나 경사각을 더 증가시키면 열전달율의 급격한 증가가 초래되는 것을 볼 수 있다. 격판의 경사에 의해서 초래되는 평균 Nusselt수의 최대값이 나타나는 경사각  $\phi_p$ 는 Rayleigh수가 커질수록 작아지는 것을 볼 수 있다. 또 격판의 경사에 의해서 얻어지는 평균 Nusselt수의 분포는 공간의 경사각변화에 의해서 얻어진 경향과 유사한 것을 확인할 수 있었다.

따라서 Fig.15에서  $Ra=10^7$ 일 때 격판의 경사에 의해서 얻어진 평균 Nusselt수를 밀폐공간의 경사각변화에 의한 등온벽의 평균 Nusselt수와 비교하여 보았다. Fig.15(a)에 주어진  $L=0.3W$ 에서는 공간의 경사에 의해서 얻어진 평균 Nusselt수의 분포가 격판의 경사에 의해서 얻은 열전달율에 비해 상당히 높게 주어지는 것을 볼 수 있으며 경사각이 증가할수록 완만한 평균 Nusselt수의 감소를 나타내고 있다. 격판의 길이가  $0.5W$ 로 증가한 Fig.15(b)에서는  $\phi_p$ 의 값이 +인 영역에서 다소 높은 열전달율을 보이고 있으며 격판의 경사와 공간의 경사에 의해서 얻어진 평균 Nusselt수의 차이는 상당히 감소하였고

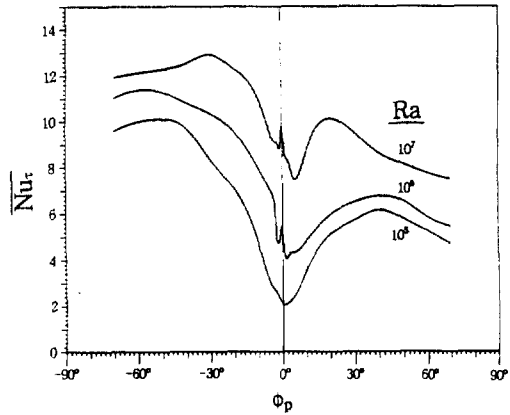


Fig.14 Average Nusselt number as a function of inclination angle of partition for various Rayleigh number,  $L=0.3W$

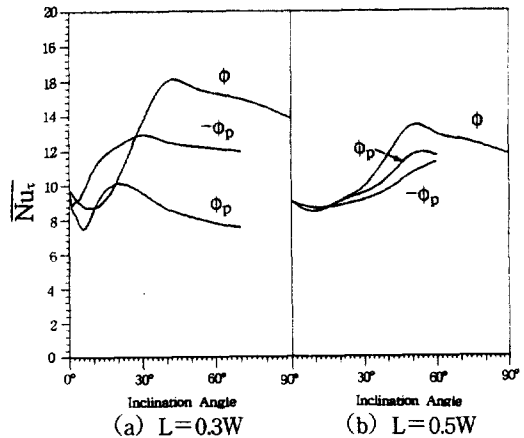


Fig.15 Comparison of the average Nusselt number between inclination of partition and inclination of enclosure,  $Ra=10^7$

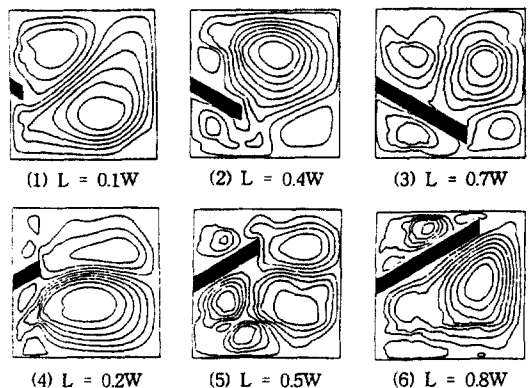


Fig.16 Streamlines of various partition lengths in a square enclosure,  $Ra=10^7$ ,  $\phi_p = -30^\circ$  and  $30^\circ$

격판이 짧은  $L=0.3W$ 의 경우에서 보다 두 경우는 더 유사한 경향을 가진 평균 Nusselt수의 분포를 보이고 있다.

Fig.16은  $Ra=10^7$ 일 때 격판의 경사각  $\phi_p$ 가 각각  $-30^\circ$  및  $30^\circ$ 에서 격판길이의 변화에 따른 자연대류 유동분포를 보여주고 있는데, 격판의 길이가 아주 짧은  $L=0.1W$ 에서는 그림에 도시하지 않았지만 자연대류 유동이 진동현상을 초래하는 것을 확인할 수 있었는데, 이것은 격판의 경사각이 비교적 작고 격판의 길이가 짧을 때 격판에 의한 유동억제효과가 낮아져서 격판이 수평일 때와 같이 공간내 유동의 진동현상이 초래되는 것으로 사료되며 격판의 길이가 짧은 경우에도 경사각이 더욱 커지게 되면 진동현상은 사라지게 되고 복잡한 유동형태로 변천되는 것을 알았다. 또한 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 격판의 길이가 증가할수록 공간내 자연대류 유동은 다세포유동으로 발전하며 복잡하고 불안정한 유동형태를 보이게 된다.

Fig.17은 자연대류 유동에 상응하는 공간내 등은 선분포를 보여주고 있는데 격판의 길이가 증가할수록 격판선단부근에서 조밀한 등온선을 보이며 복잡한 형태를 나타내고 있다.

Fig.18은 격판의 경사각  $\phi_p = -30^\circ$ 와  $30^\circ$ 에 대해서 평균 Nusselt수의 분포를 격판길이와 Rayleigh수의 변화에 따라 도시한 그림이다. 격판의 경사각이  $-30^\circ$ 일 때는 격판길이의 증가에 따라 평균 Nusselt수는 상당히 큰 폭으로 감소하고 있으며 격판의 길이가 짧은 경우보다 다소 증가한 경우가 격판길이의 증가에 대한 평균 Nusselt수의 감소를 현저하게 나타내는 것을 볼 수 있었다. 또한 그림에서 점선으로 도시한 공간의 경사각  $\phi = 30^\circ$ 인 경우에 대해서 격판길이의 증가에 따라 나타난 평균 Nusselt수와 비교하여 보면 전반적인 경향은 유사하나 Rayleigh수가 낮은  $Ra=10^5$ 에서는 격판의 경사에 의해서 얻어진 열전달율이 더 크게 주어지고 Rayleigh수가 증가한  $Ra=10^7$ 에서는 공간의 경사에 의해서 얻어진 평균 Nusselt수가 더 큰 값을 보여주고 있다. 한편 격판의 경사각  $\phi_p = 30^\circ$ 에 대한 격판길이의 변화에 따른 평균 Nusselt수의 변화에서는 격판의 경사각이  $30^\circ$ 일 때는 그림에 함께 나타낸  $\phi_p = -30^\circ$ 의 경우와는 다르게 격판길이의 증가에 의해 평균 Nusselt수는 전체적으로 완만하게 상승

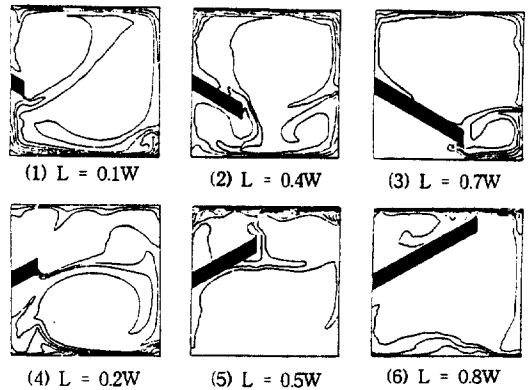


Fig.17 Isotherms of various partition lengths in a square enclosure,  $Ra=10^7$ ,  $\phi_p = -30^\circ$  and  $30^\circ$

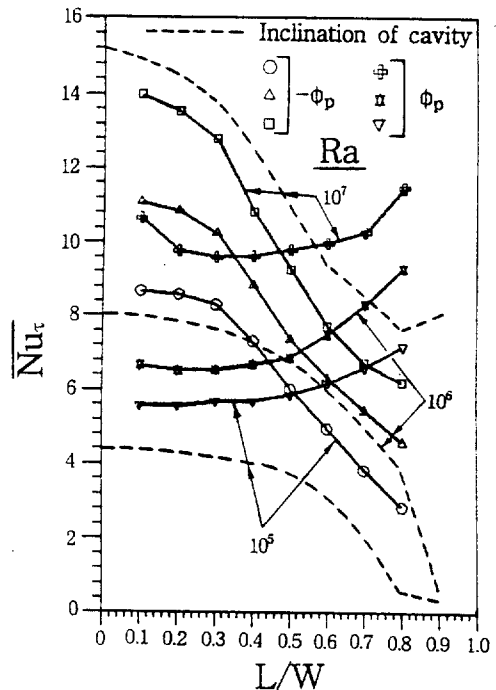


Fig.18 Average Nusselt number as a function of partition length for various Rayleigh number,  $\phi_p = -30^\circ$  and  $30^\circ$

하는 현상을 볼 수 있다. 이것은 Fig.16에서 도시한 바와 같이 공간의 자연대류 유동이 격판의 길이가 짧을 때 공간내에서 층을 이루며 분리된 유동형태에서 격판길이의 증가와 함께 주순환유동이 발생하는 공간에서 단일의 큰 유동분포로 발전하게 되어 유동강도가 증가하여 공간내에서 활발한 열

전달이 일어나는 현상때문으로 사료된다. 따라서 이러한 현상은 공간의 경사에 의해서 얻어진 격판길이의 증가에 따른 평균 Nusselt수의 분포와는 다른 형태를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

밀면이 고온, 윗면이 저온이고 양측벽이 단열인 정사각형 밀폐공간내에서 한쪽 측벽의 중간높이에 수평격판이 부착되어 있을 때 밀폐공간의 경사와 부착되는 격판의 경사가 공간내부의 자연대류 유동과 열전달 현상에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 고찰한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 밀폐공간의 경사각이 커지면 공간내 흐름은 다세포유동에서 단세포유동으로 전이되어 열전달율은 급격히 상승하게 되나, 격판의 길이가 증가할수록 평균 Nusselt수의 최대값이 얻어지는 공간의 경사각은 지연된다.

2) 공간의 경사각이 일정하게 유지될 때 평균 Nusselt수는 격판길이가 증가할수록 감소하며 격판의 길이가 길어질수록 감소폭은 상당히 커졌다.

3) 격판의 경사각이 커질수록 공간내 유동은 더 불안정해지지만 주순환유동이 일어나는 공간이 커지게 되어 흐름강도는 증가하였다.

4) 격판의 경사에 의한 평균 Nusselt수는 공간을 경사시켜서 얻은 경우에 비해 전반적으로 낮은 값을 나타내고 있으나, 격판의 길이가 커질수록 두 값의 차이는 감소하게 되며 상당히 유사한 경향의 열전달을 변화를 나타내었다.

5) 격판이 공간의 상부로 경사진 경우에는 격판 길이가 커질수록 평균 Nusselt수가 증가하게 되어 공간을 경사시킬 때 얻어지는 평균 Nusselt수의 감소와는 다른 형태를 나타내었다.

### 참 고 문 헌

1. Emery, A.F., 1969, "Expoloratory Studies of Free Convection Heat Transfer through an Enclosed Vertical Liquid Layer with a Vertical Baffle", ASME J.Heat Transfer, Vol.91, pp.163-165.
2. Nansteel, M.W and Greif, R., 1981, "Natural Convection in Undivied and Partially Divided Recta-

- ngular Enclosure", ASME J. Heat Transfer, Vol. 103, pp.623-629.
3. Nansteel, M.W. and Greif, R., 1983, "Natural Convection Heat Transfer in Complex Enclosures at Large Prandtl Number", ASME J. Heat Transfer, Vol.105, pp.912-915.
4. Nansteel, M.W. and Greif, R., 1984, "An Investigation of Natural Convection in Enclosures with Two-and Three-Dimensional Partitions", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.27, No.4, pp.561-571.
5. Winters, K.H., 1982, "The Effect of Conducting Divisions on the Natural Convection of Air in a Rectangular Cavity with Heated Side Walls", ASME Paper, 82-HT-69
6. Bajorek, S.M. and Lloyd, J.R., 1982, "Experimental Investigation of Natural Convection in Partitioned Enclosures", ASME J. Heat Transfer, Vol.104, pp. 527-532.
7. Lin, N.N. and Bejan, A., 1983, "Natural Convection in a Partially Divided Enclosure", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.26, No.12, pp.1867-1878.
8. Zimmerman, E. and Acharya, S., 1987, "Free Convection Heat Transfer in a Partially Divided Vertical Enclosures with Conducting End Walls", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.30, No.2, pp.319-331.
9. Shaw, H.J., Chen, C.K. and Cleaver, J.W., 1987, "Cubic Spline Numerical Solution for Two-Dimensional Natural Convection in a Partially Divided Enclosure", Numerical Heat Transfer, Vol.12, pp. 439-455.
10. Fu, W.S., Perng, J.C, and Shieh, W.J., 1989, "Transient Laminar Natural Convection in an Enclosure Partitioned by an Adiabatic Baffle", Numerical Heat Transfer, Part A, Vol.16, pp.325-350.
11. Kelkar, K.M. and Patankar, S.V., 1990, "Numerical Prediction of Natural Convection in Square Partitioned Enclosures", Numerical Heat Transfer, Part A, Vol.17, No.3, pp.269-285.
12. Acharya, S. and Jetli, R., 1990, "Heat Transfer Due to Buoyancy in a Partially Divided Square Box", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.33, No.5, pp.931-942.

13. 정인기, 김중엽, 이효조, 1991, “밀면가열 사각 밀폐공간내에서 격판에 의한 자연대류의 진동”, 영남대 공업기술연구소 연구보고 제19권, 제1호, pp.55-62.
14. 정인기, 김점수, 송동주, 1993, “수평격판을 갖는 정사각형 밀폐공간내에서 자연대류 유동 및 열전달”, 대한기계학회논문집, 제17권, 제9호, pp.2304-2314.
15. 林村照夫, 部谷尚道, 竹内正紀, 1985, “仕切板あもつ密閉容器内の自然對流熱傳達”, 日本機械學會論文集(B編), 51卷, 462號, pp.681-687.
16. 矢川元基, 1983, “流れと熱傳導の有限要素法入門”, 東京, 培風館.