

〈논 문〉

회전하는 환형용기내의 옆면 가열에 의한 이중확산대류에 관한 수치해석

강신형* · 이교승** · 이진호***

(1996년 10월 30일 접수)

Numerical Study of Double Diffusive Convection due to Lateral Heating in a Rotating Annulus

Shin-Hyung Kang, Kyoseung Lee and Jinho Lee

Key Words : Double-Diffusive Convection(이중확산대류), Rotation(회전) Stratification of Concentration(농도성층화), Lateral Heating(옆면가열), Multi-Layer Flow Structure(층형구조)

Abstract

Numerical investigations were conducted to study the convective phenomena of an initially stably stratified salt water solution with lateral heating in a uniformly rotating annulus. The method of investigation is the finite difference analysis of the basic conservation equation for an axisymmetric, unsteady, double-diffusive convection and calculation is made for $Ra_r = 2 \times 10^5$ and $Ta = 10^7 \sim 2.5 \times 10^8$. Formation of layered flow structure, merging process of layers, the corresponding temperature and concentration distributions, Nu variation with time are examined. Numerical results show that in each layer, the temperature profile looks 'S'-shaped and the concentration profile is uniform due to the convective mixing. At the interface between adjacent layers, the temperature changes smoothly but the concentration changes rapidly. As the effect of the rotation increases, the generation of rolls at hot wall, the formation and merging of layers are delayed. The average Nu shows the trend of conduction heat transfer as the effect of the rotation increases.

기호설명

Ar : 종횡비 = $H/(r_o - r_i)$
 C : 농도
 C_o : 기준 농도 = C_1
 ΔC : 농도차 = $(C_k - C_1)$

D : 농도 확산 계수
 E_k : Ekman 수 = $\nu/2\Omega H^2$
 g : 중력가속도
 H : 밀폐용기 높이
 Le : Lewis 수 = α/D
 Nu : Nusselt 수
 p : 압력
 Pr : Prandtl 수
 r : 반경방향좌표
 r^* : $= (r' - r'_i)/(r'_o - r'_i)$

* 건양대학교 기계공학과

** 회원, 연세대학교 기계공학과 대학원

*** 회원, 연세대학교 기계공학과

r_i	: 내경
r_o	: 외경
Ra_η	: 유효 Rayleigh 수 = $g\beta\Delta T\eta^3/\alpha\nu$
Ros	: 농도 Rossby 수 = $g\bar{\beta}\Delta C/4\Omega^2 H$
Ror	: 열적 Rossby 수 = $g\beta\Delta T/4\Omega^2 H$
T	: 온도
T_a	: Taylor 수 = $4\Omega^2 H^4/\nu^2$
T_o	: 기준 온도 = T_1
ΔT	: 온도차 = $(T_h - T_1)$
t	: 시간
u	: 반경방향속도
v	: 방위각방향속도
w	: 축방향속도
z	: 축방향좌표
β	: 열팽창계수
$\bar{\beta}$: 농도팽창계수
η	: 대표길이 = $\beta\Delta T/\phi_o$
ν	: 동점성계수
ϕ_o	: 초기농도구배
Ω	: 회전속도

상첨자

' : 무차원값

하첨자

h : 최대값

l : 최소값

1. 서 론

열전달과 물질전달이 함께 존재하여, 서로 다른 두 개의 확산요소가 동시에 작용하므로 발생하는 대류현상을 이중확산대류(double-diffusive convection)라고 한다. 이중확산대류에 관한 초기 연구는 해수에서의 특이한 유동과 깊이 관련되어 있었으며, 최근에 이르러 여러 공학적 응용분야에서 많은 연구자들의 연구대상이 되고 있다.^(1~4)

이중확산대류는 Ostrach⁽⁵⁾가 언급한 바와 같이 온도와 농도구배가 작용하는 방향에 따라 여러 가지 유형으로 분류할 수 있다. 이러한 유형중 농도 성층화된 유체를 옆면에서 가열하는 유형에 관한 경우는 Chen 등,⁽⁶⁾ Lee 등,^(7,8) Lee 등,⁽⁹⁾ Bergman 등,⁽¹⁰⁾ Jeevaraj 등,⁽¹¹⁾ Kamakura 등,⁽¹²⁾ 등에 의해 연

구되었으며, 아랫면에서 가열하는 유형에 관한 경우는 Lee 등,⁽¹³⁾ Jiang 등,⁽¹⁴⁾ 강신형 등⁽¹⁵⁾에 의해 많은 연구가 이루어졌다. 또한, 이의 대표적 응용분야로써 이중용고(binary solidification)와 반도체의 재료와 관련된 결정성장에서의 이중확산에 관한 연구^(2~4)도 있다. 회전하는 로에서의 금속의 용융 및 용고, Czochralski 방법 및 Floating Zone 방법과 같은 결정성장 등에서 회전은 매우 중요한 요인으로 작용하므로 이에 대한 고려가 필요하다. 그러나 대부분의 연구들은 회전을 고려하지 않은 이중확산 혹은 회전하는 밀폐용기 내에서의 단일확산 대류에 관한 연구로, 회전과 이중확산 대류에 의한 전달현상에 관한 연구는 아직 미흡한 실정에 있다.

이중확산에서 중요한 물리적 현상 중의 하나는 층흐름구조(layered flow structure)의 형성과 이의 성장 및 발달과정 그리고 이에 수반되는 온도 및 농도분포의 변화이다. Chen 등⁽⁶⁾은 안정하게 성층화된 유체 내에 가해지는 온도와 농도 구배의 상관관계에 따른 대표길이와 이를 특성 길이로 한 Rayleigh 수를 제시하였고, Lee 등^(7,8)은 수직벽면에서 삼투막을 이용한 방법을 시도한 실험과 수치해석을 통해 온도 및 농도구배가 수평방향일 때 용기내 흐름구조가 네 가지 흐름영역으로 나누어짐을 보였다. Lee 등⁽⁹⁾은 또한 수치해석을 통해 유동의 형성과정을 보다 자세히 설명하였다. Bergman 등⁽¹⁰⁾은 농도가 안정하게 성층화된 용기 내에서 옆면이 가열된 경우, 부유물을 이용한 가시화 실험을 통해 인접한 층이 합쳐지는 과정을 자세하게 밝혔으며, Jeevaraj 등⁽¹¹⁾은 벽면에서 발생된 셀의 성장속도에 관한 관계식을 제시하였다. Barcion 등⁽¹⁶⁾은 안정하게 성층화된 유체내에서의 회전의 영향을 연구하여 성층화된 유체에서는 Ekman층이 약해져 그 영향이 감소함을 밝혔다. Schmitt 등⁽¹⁷⁾은 두 층으로 이루어진 유체내의 salt finger현상을 연구하여 회전이 강해질수록 층의 두께가 두꺼워짐을 보였다. Kerr 등⁽¹⁸⁾은 회전의 영향을 고려하여 온도와 농도에 의해 성층화된 유체에 대해 선형 안정성에 관하여 연구하였다. Sung 등⁽¹⁹⁾은 회전하는 성층화된 유체의 옆면 가열의 경우에 대한 수치해석에서 부력비에 대해 성층화 인자와 Le 수의 영향을 연구하였다. 또한, 강신형 등^(20,21)은 환형용기내의 농도 성층화된 유체의 옆면이 가열된 경우에 대한 회전계 및 비회전계에서의 실험 및 수치 연구를 통하여 유동 및 열특성에 대한 회전의 영향을

밝혔다.

본 연구에서는 회전하는 환형밀폐공간내에서 농도가 중력방향으로 안정하게 성층화된 유체를 옆면에서 가열하는 경우에 발생하는 유동현상 즉, 이중확산과 회전의 복합적인 작용에 의해 발생하는 유동현상을 수치적으로 연구하였다. 수치해석 결과로써, 온도구배와 농도구배에 의한 이중확산 유동과 회전에 관련된 무차원수의 변화에 따른 열전달 특성, 유동형태 그리고 온도 및 농도분포를 구하여 관련 실험결과와 비교·고찰하였다.

2. 이론

본 연구에서는 SIMPLER 기법을 이용하여 모든 계산을 수행하였으며, 기하학적 형상 및 경계조건은 Fig. 1과 같다. 해를 구하는 과정에서 하향이완계수(under-relaxation factor)를 사용하였으며, 이완계수는 속도장의 경우 0.77, 온도, 농도 및 압력보정식의 경우는 0.99로 하였다. 해석영역의 격자점은 51×85 로 취하였고, 시간은 $\Delta t' = 1.25 \times 10^{-5}$ 를 취해 $t' = 0.2$ 까지 계산하였다. 해석 영역은 $Ar = 2.0$, $Pr = 7$, $Le = 100$, $Ra_\eta = 2 \times 10^5$, $Ta = 10^7 \sim 2.5 \times 10^8$ 그리고 $0 \leq t' \leq 0.2$ 로, 시간에 따른 Nu 수, 유동형태, 온도분포, 농도분포 및 속도분포를 조사하였다.

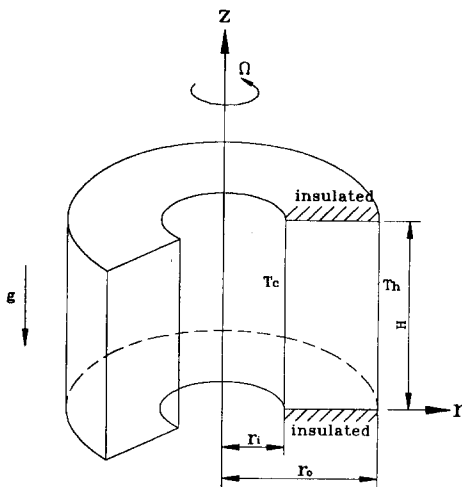


Fig. 1 Schematic diagram of the system

2.1 기본방정식

좌표계는 z축을 중심축으로하여 Ω 의 속도로 회전하는 회전좌표계를 사용하였다. 회전계에서 비정상, 축대칭 2차원 이중확산유동의 기본방정식을 무차원화하기 위하여 무차원 변수 및 무차원수를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} r' &= \frac{r}{H}, \quad z' = \frac{z}{H}, \quad u' = \frac{u}{2\Omega H}, \quad v' = \frac{v}{2\Omega H}, \\ w' &= \frac{w}{2\Omega H}, \\ t' &= 2\Omega t, \quad p' = \frac{1}{4\rho\Omega^2 H^2} p, \quad T' = \frac{T - T_0}{\Delta T}, \\ C' &= \frac{C - C_0}{\Delta C}, \quad \rho' = \frac{\rho}{\rho_r} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} R_{or} &= \frac{\beta g \Delta T}{4\Omega^2 H}, \quad R_{os} = \frac{\bar{\beta} g \Delta C}{4\Omega^2 H}, \quad Ek = \frac{\nu}{2\Omega H^2}, \\ Ta &= \frac{4\Omega^2 H^4}{\nu^2} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, α , β , $\bar{\beta}$, ν , g 는 각각 열확산계수, 열팽창계수, 농도팽창계수, 동점성계수, 중력가속도를 나타낸다. 위에서 정의한 무차원 변수 및 무차원수를 사용하여 기본방정식을 무차원화하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t'} = -\frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} (\rho' r' u') - \frac{\partial}{\partial z'} (\rho' w') \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u'}{\partial t'} &= -\frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} (r' u'^2) - \frac{\partial}{\partial z'} (u' w') - \frac{\partial p'}{\partial r'} \\ &+ \left(1 + \frac{v'}{r'}\right) v' + Ek \left(\nabla^2 u' - \frac{u'}{r'^2}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v'}{\partial t'} &= -\frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} (r' u' v') - \frac{\partial}{\partial z'} (v' w') \\ &- \left(1 + \frac{v'}{r'}\right) u' + Ek \left(\nabla^2 v' - \frac{v'}{r'^2}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w'}{\partial t'} &= -\frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} (r' u' w') - \frac{\partial}{\partial z'} (w'^2) - \frac{\partial p'}{\partial z'} \\ &+ (R_{or} \cdot T' - R_{os} \cdot C') + Ek \nabla^2 w' \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T'}{\partial t'} &= -\frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} (r' u' T') - \frac{\partial}{\partial z'} (w' T') \\ &+ \frac{Ek}{Pr} \nabla^2 T' \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C'}{\partial t'} &= -\frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} (r' u' C') - \frac{\partial}{\partial z'} (w' C') \\ &+ \frac{Ek}{Pr Le} \nabla^2 C' \end{aligned} \quad (8)$$

2.2 초기조건 및 경계조건

초기조건으로 전 영역을 통하여 저온벽면과 같은

온도를 갖는 온도분포와 수직방향으로 안정하게 성층화된 농도분포를 갖는다. 모든 벽면에서 점착조건과 농도 불침투조건인 경계조건을 갖는다. 또한 온도경계조건은 상 하벽면은 단열되었고, 내측 벽면에서는 저온, 외측벽면에서는 고온을 유지한다. 초기 및 경계조건을 앞에서 정의한 무차원변수를 이용하여 무차원화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{초기조건: } T' &= 0, \quad \frac{\partial C'}{\partial z'} = \frac{\Delta C}{H}, \quad u' = v' = w' \\ &= 0 \text{ at } t' = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{경계조건: } \frac{\partial T'}{\partial z'} &= \frac{\partial C'}{\partial z'} = 0, \quad u' = v' = w' = 0 \text{ at} \\ z' &= 0, 1 \\ T' &= 0, \quad \frac{\partial C'}{\partial r'} = 0, \quad u' = v' = w' = 0 \\ \text{at } r' &= 0.1875 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} T' &= 1, \quad \frac{\partial C'}{\partial r'} = 0, \quad u' = v' = w' = 0 \\ \text{at } r' &= 0.6875 \end{aligned}$$

3. 수치해석 결과 및 고찰

본 수치해석은 환형밀폐용기 내에서 농도가 중력 방향으로 안정하게 성층화된 유체에 수평방향으로 온도구배가 가해지는 경우에 발생하는 이중확산유동에 대한 연구로, 시간에 따른 Nu 수, 유동형태, 온도분포, 농도분포 및 속도분포를 조사하였다. 이때 회전의 영향을 고려한 경우에는 Ta 수에 따라 무차원 기준값이 달라지므로 모든 무차원값은 강신형 등⁽²¹⁾에서와 같이 회전이 없는 경우의 무차원값으로 환산하여 결과를 나타내었으며, 본 연구자가 발표한 비회전계의 수치연구⁽²¹⁾와 비교, 고찰하였

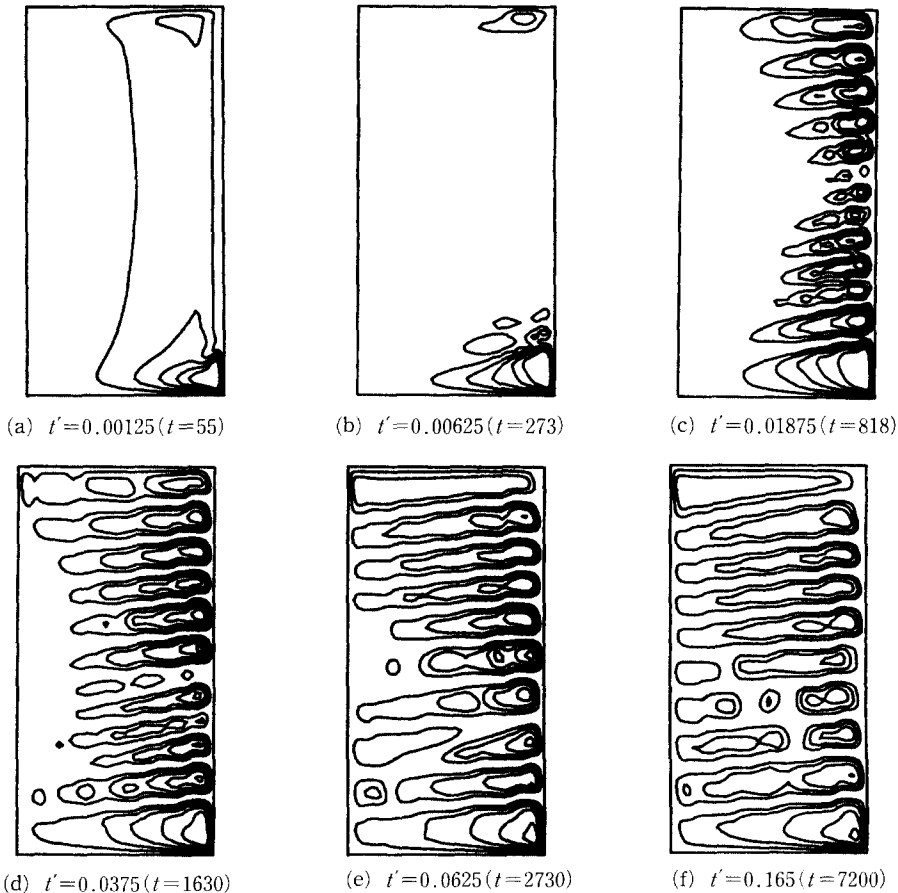


Fig. 2 Evolution of stream functions with time; $Ra_0 = 2.0 \times 10^5$, $Ta = 5 \times 10^7$ Values for stream functions are, from boundary to interior, 2, 4, 6, 8, 10

다.

Fig. 2~Fig. 5에 $Ra_\eta = 2 \times 10^5$, $Ta = 5 \times 10^7$ 일 때의 유동장, 온도장 및 각 벽면에서의 국소 Nu수를 각각 나타내고 있다. 회전계에서는 비회전계와 비교하여 유동현상에는 차이가 있으나 롤이 생성되는 메커니즘, 용기내의 층형구조, 유동층내의 온도 및 농도분포 등은 정성적으로 크게 변하지 않는다.

Fig. 2(b)는 $t' = 0.00625$ 인 경우로 고온벽면의 가열에 의해 아랫면과 윗면 근처에서 롤이 발생하여 성장해 간다. 그러나 회전의 영향이 있는 경우에는 비회전의 경우보다 같은 시간에 발생한 롤의 개수가 줄어들고, 롤의 성장속도 역시 감소해 있음을 알 수 있다.⁽²¹⁾ 회전의 영향이 있는 경우의 초기 롤발생 메커니즘을 살펴보면, 초기 고온벽면으로부터 벽면 근처의 유체로 열이 전달되어 유체의 밀도가 감소함에 따라 유체는 위로 상승한다. 상승하는

유체는 초기의 농도를 유지하면서 온도와 농도에 의한 밀도가 주위의 밀도와 평형을 이루면 유체는 더 이상 상승하지 못하고 벽으로부터 수직방향인 반경방향으로 선회하여 저온 벽면 쪽으로 이동하게 된다. 이 때까지는 비회전의 경우와 같은 메커니즘을 겪게 된다. 그러나 회전의 영향으로 저온 벽면 쪽으로 향하는 유체는 회전반경이 작아지므로 작은 동량의 보존에 의해 방위각 방향속도가 증가하게 된다. 이때 방위각방향으로 속도 증가에 의해 원심력이 발생하고 이에 따라 유체는 반경 바깥방향, 즉 고온벽 방향으로의 반경방향 속도를 유발시켜 결국 반경방향 속도가 감소하게 된다. 다시 말해 회전에 의한 코리올리 힘의 발생으로 반경방향 속도는 감소하게 된다. 저온 벽면 쪽으로 약하게 움직이던 유체는 주위의 찬 유체로의 열전달에 의해 점차 냉각되므로 점점 하강하게 되어 결국 다시 고

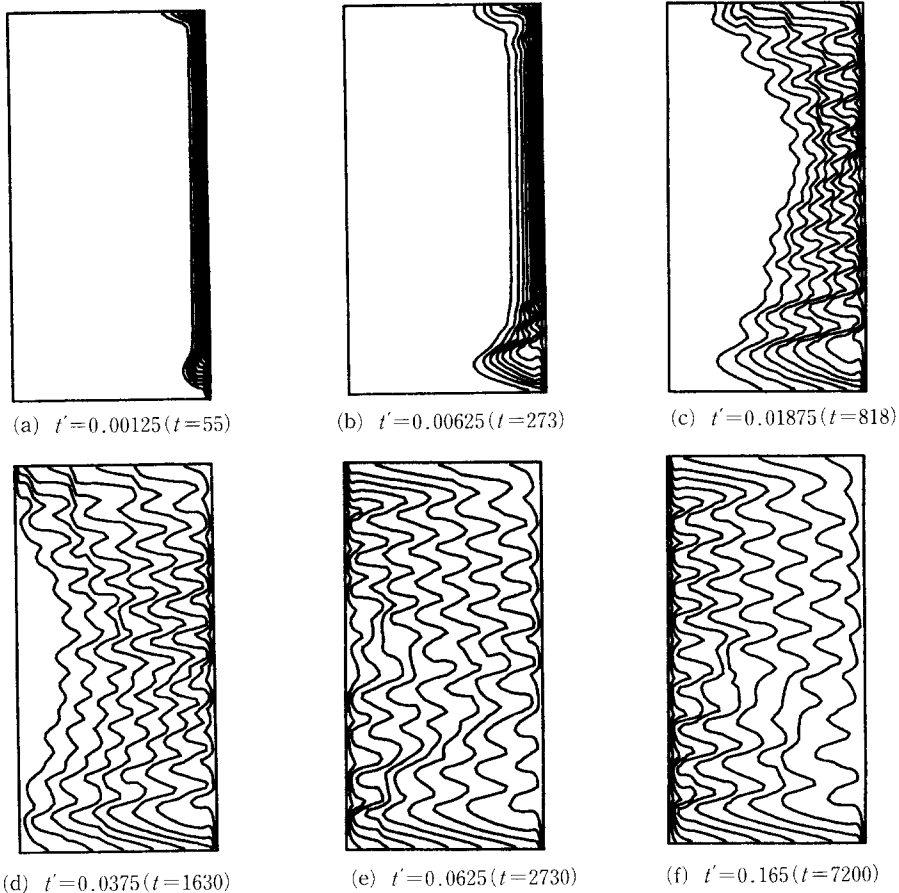


Fig. 3 Evolution of isotherms with time ; $Ra_\eta = 2.0 \times 10^5$, $Ta = 5 \times 10^7$ Values for isotherms are, from left to right, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9

온 벽면 쪽으로 이동하게 된다. 이와 같이 회전의 영향하에서는 비회전의 경우보다 물의 발생이 억제되며, 물의 성장속도가 현저히 느려지게 된다. 이때의 온도장을 살펴보면(Fig. 3(b)), 비회전의 경우에서와 마찬가지로 상부와 하부 벽면에서의 물의 발생에 의한 대류효과의 영향을 나타내고 있으나, 물의 발생 및 성장 속도가 느려짐에 따라 비회전에 비해 대류에 의한 열전달이 용기내부로 많이 전달되지 않았음을 알 수 있으며, 고온벽면의 중간부분에서는 전도에 의해 열이 전달되고 있음을 알 수 있다.

$t'=0.01875$ 인 경우 Fig. 2(c)에 나타난 바와 같이 고온벽면 전체에서 물이 발생함을 볼 수 있다. 비회전의 경우와 비교해 볼 때, 회전에 의해 물의 발생이 억제됨을 알 수 있다. 이때 대표길이와 실제 층의 성장 높이의 비는 $h/\eta=0.68$ 정도로 비회

전의 경우와 비슷하게 나타난다.⁽²¹⁾ 이때의 온도장을 살펴보면 Fig. 3(c)에서와 같이 고온벽면 전체에서 대류에 의한 온도분포를 나타내고 있으며 아직 층이 저온벽면까지 성장하지 못하고 있음을 알 수 있다. 국소 Nu 수를 살펴보면(Fig. 5(c)) 대류강도가 약해짐에 따라 비회전의 경우보다 고온벽면에서 국소 Nu 수가 줄어들고, 층의 유동이 약해지므로 유동층이 저온벽면에 도달하는 시간이 지연되어 저온벽면에서는 아직 열전달 현상이 나타나지 않아 국소 Nu 수는 0이 된다.

Fig. 2(d)는 $t=0.0375$ 일 때로 고온벽면 하부와 상부에서 생성된 층이 저온벽면까지 성장했을 경우의 유동장을 나타낸다. 층과 층 사이의 경계면은 비회전의 경우와 마찬가지로 고온벽면 쪽에서 저온벽면 쪽으로 갈수록 아래쪽으로 기울어지는데, 회전의 영향이 있는 경우에는 유동속도가 크게 감소

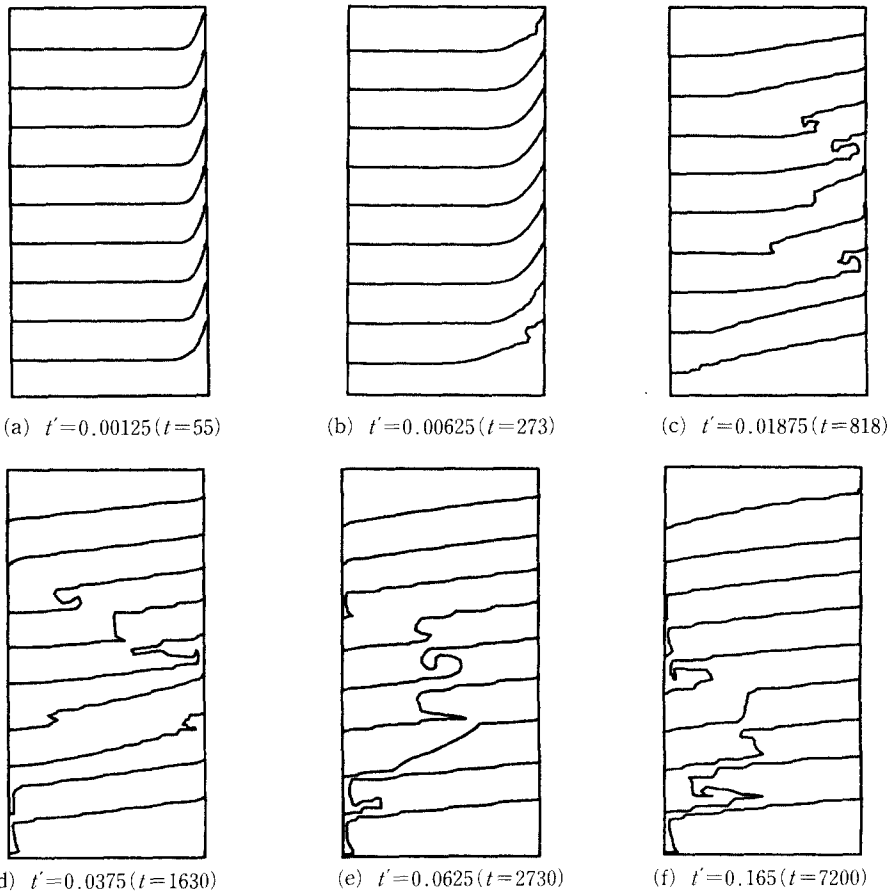


Fig. 4 Evolution of iso-concentration lines with time; $Ra_p=2.0 \times 10^5$, $Ta=5 \times 10^7$ Values for iso-concentration lines are, from top to bottom, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9

하므로 고온 벽에서 저온 벽으로 이동하는 동안 이와 접하고 있는 상부 층의 저온부와 전열시간이 길어지므로 비회전의 경우보다는 많은 양의 열을 빼앗겨 경계면이 저온벽 쪽으로 갈수록 점점 더 하강하게 된다. 또한, 온도장을 살펴보면 비회전의 경우 등온선이 수평적인 분포를 보이는 반면, 회전의 경우에는 Fig. 3(d)에서와 같이 등온선이 아래 방향으로 기울어지게 나타나고 간격이 넓게 나타나므로, 비회전의 경우보다 대류의 영향이 작아지고 전도에 의한 영향이 보다 강해짐을 알 수 있다. 국소 Nu 수의 경우(Fig. 5(d)) 비회전의 경우와 마찬가지로 고온벽면에서 발생한 층이 저온벽면에 도달함

에 따라 저온벽면 상부와 하부에서 국소 Nu수의 변화가 나타나며, 저온벽면의 상부와 고온벽면의 하부에서 각 벽면의 최대 국소 Nu 수가 나타난다.

Fig. 2(e)를 살펴보면, 회전의 경우에도 비회전과 비슷한 메커니즘에 의해 층이 합쳐지는 과정을 겪음을 유동장, 온도장(Fig. 3(e)) 및 농도장(Fig. 4(e))에서 확인할 수 있다. 그러나 회전의 경우 층이 합쳐지는 과정 중 Fig. 2(f)에서와 같이 비회전의 경우에는 나타나지 않았던 유동 형태가 나타난다. 즉, 비회전의 경우 농도차가 작은 두 개의 층이 각각 저온벽면과 고온벽면을 점유한 후 강한 층 내부의 유동에 의해 두 층이 합쳐지나, 회전의 영

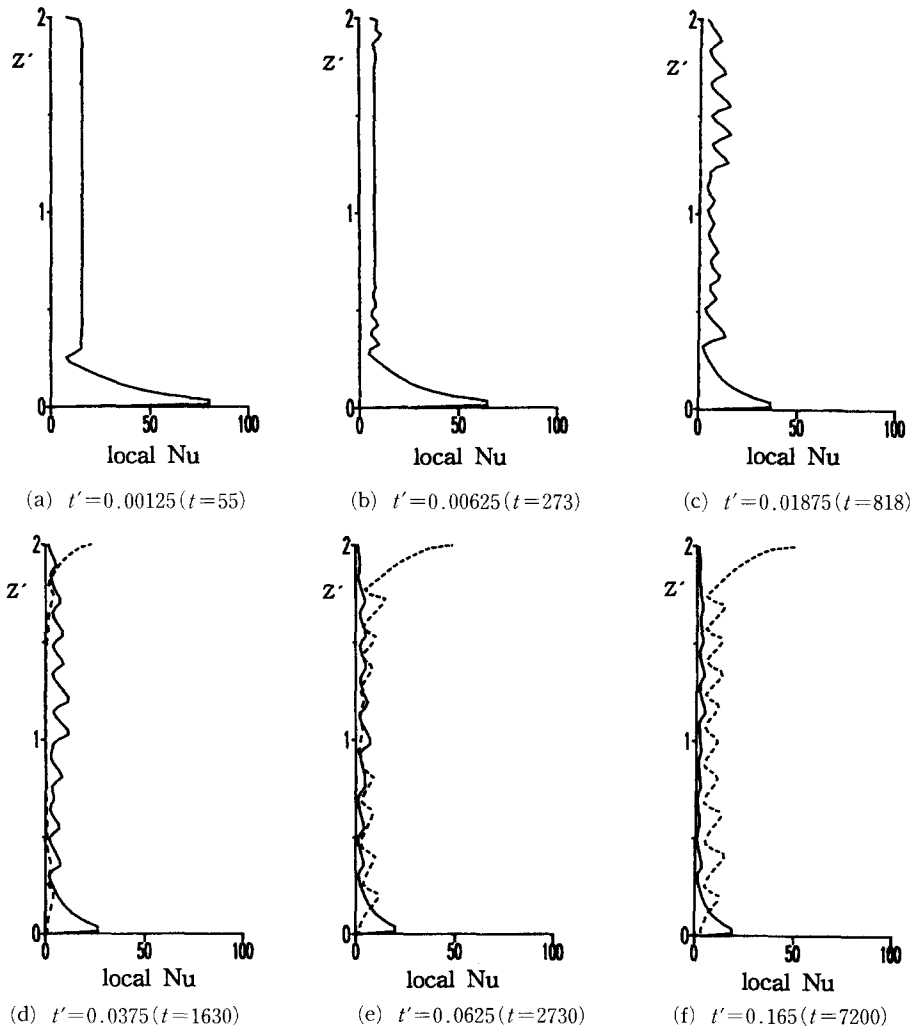


Fig. 5 Vertical distribution of local Nusselt number at cold and hot wall ; $Ra_{\eta} = 2.0 \times 10^5$, $Ta = 5 \times 10^7$ (— : hot wall, - - - : cold wall)

향이 있는 경우에는 각 층의 유동이 작으므로 서로 합쳐지지 못하고 농도가 서로 다른 층이 수평적으로 두개가 형성된다. 또한 Fig. 4(f)에서 이 층들은 서로 농도가 다른 것을 알 수 있다. 이와 같이 형성된 두 개의 층은 오랜 시간에 걸친 농도의 확산에 의해 두개의 층의 농도가 같아질 때 합쳐질 것으로 예상된다. $t'=0.0165$ 보다 큰 경우에는 강신형 등⁽²⁾의 실험적 연구에서와 같이 시간이 흐름에 따라 셀이 합쳐지는 과정을 계속하여 결국 단일 셀 형태가 될 것으로 예상된다.

Fig. 6~Fig. 9는 $r^*=0.25, 0.5, 0.75$ 에서의 온도, 농도, 반경방향 속도, 방위각 방향속도의 수직

분포를 각각 나타낸 그림이다. 회전의 영향으로 인해 롤의 발생이 억제되고 층으로의 성장속도가 감소함에 따라 Fig. 6(b), (c)와 같이 내부의 수직 온도분포의 변화는 비회전의 경우보다 늦게 일어나며 $t=0.01875$ 인 경우에도 $r^*=0.25$ 지점의 중간 부분에서는 아직 온도변화가 나타나지 않는다. 유동층 내부의 온도분포는 Fig. 6(d), (e), (f)에서와 같이 비회전의 경우와 마찬가지로 각 층에서 온도가 주기적으로 상승 하강하는 역'S'자 형태로 나타난다^(20,21). 각 층에서 저온 벽면 쪽으로 갈수록 최고온도와 최저온도값이 나타나는 위치가 점점 낮아지므로 각 층이 저온벽면으로 갈수록 아래로 경

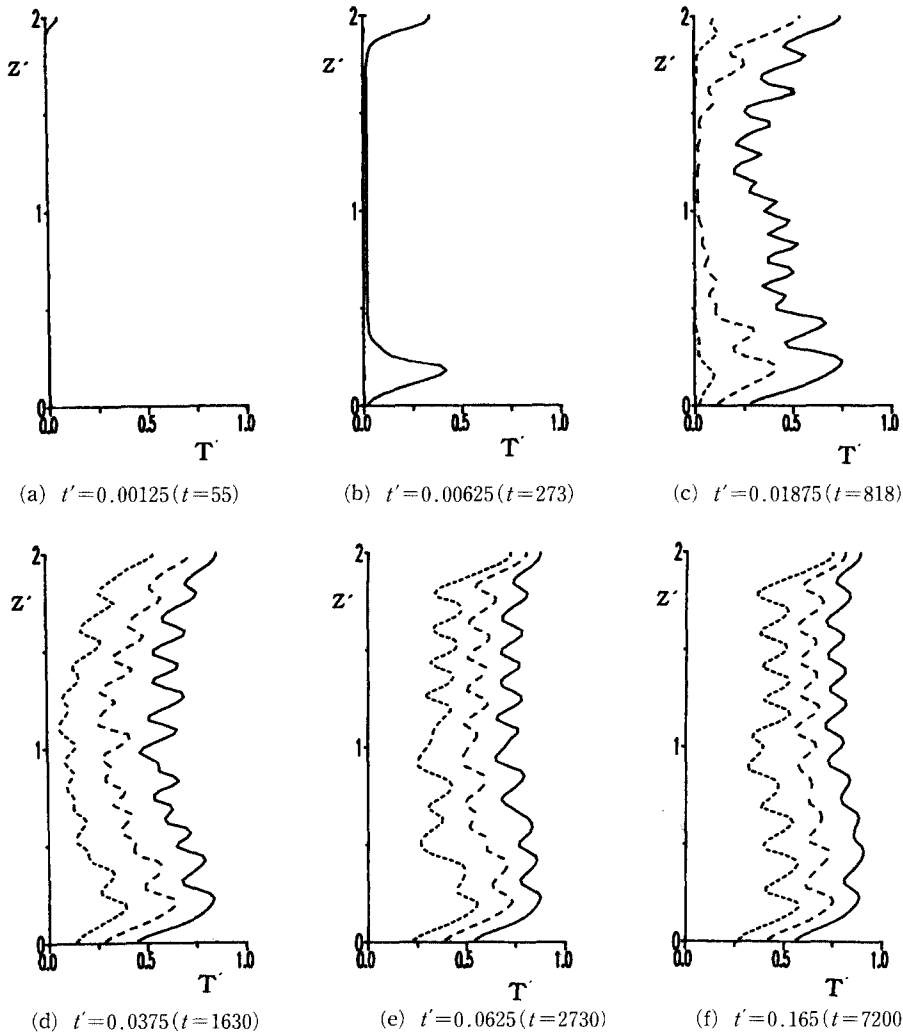


Fig. 6 Vertical distribution of temperature with time; $Ra_v=2.0 \times 10^5$, $Ta=5 \times 10^7$ (— : $r^*=0.25$, - - - : $r^*=0.5$, — : $r^*=0.75$)

사짐을 알 수 있다. 또한 비회전의 경우보다 각 층 내부에서의 수직방향으로 최고온도와 최저온도의 차이가 작게 나타나며, 수평방향으로 각 지점의 온도차가 크게 나타나므로 회전의 영향으로 인해 대류의 강도가 약해지고 전도의 영향이 커졌음을 알 수 있다.

수직 농도분포를 살펴보면, 수직 온도분포와 마찬가지로 회전의 영향으로 인해 물의 발생이 억제되고 층으로의 성장속도가 늦어짐을 알 수 있다 (Fig. 7(b), (c)). $t'=0.01875$ 인 경우 고온벽면에서 물이 발생되면 저온 벽면 쪽으로 성장하여 13개의 층이 형성됨을 알 수 있다. 층 내부의 농도는 비회

전의 경우와 마찬가지로 대류유동에 의해 균일한 값을 가지며 인접면 사이의 경계면에서는 농도는 급격히 변함을 알 수 있다. Fig. 7(f)에서는 전술한 바와 같이 비회전의 경우에 비해 저온 벽면 쪽으로 갈수록 층의 높이가 점점 낮아져 층이 고온 벽면 쪽에서 저온 벽면 쪽으로 기울어져 있음을 확인할 수 있다.⁽²¹⁾

반경 방향속도의 수직분포를 살펴보면 Fig. 8과 같이 층 내부의 속도분포 등 전체적인 경향은 비회전의 경우와 비슷하게 나타나지만 전술한 바와 같이 회전에 의해 유동의 세기가 약해진다. Fig. 9는 회전의 영향으로 인해 비회전의 경우에는 나타나지

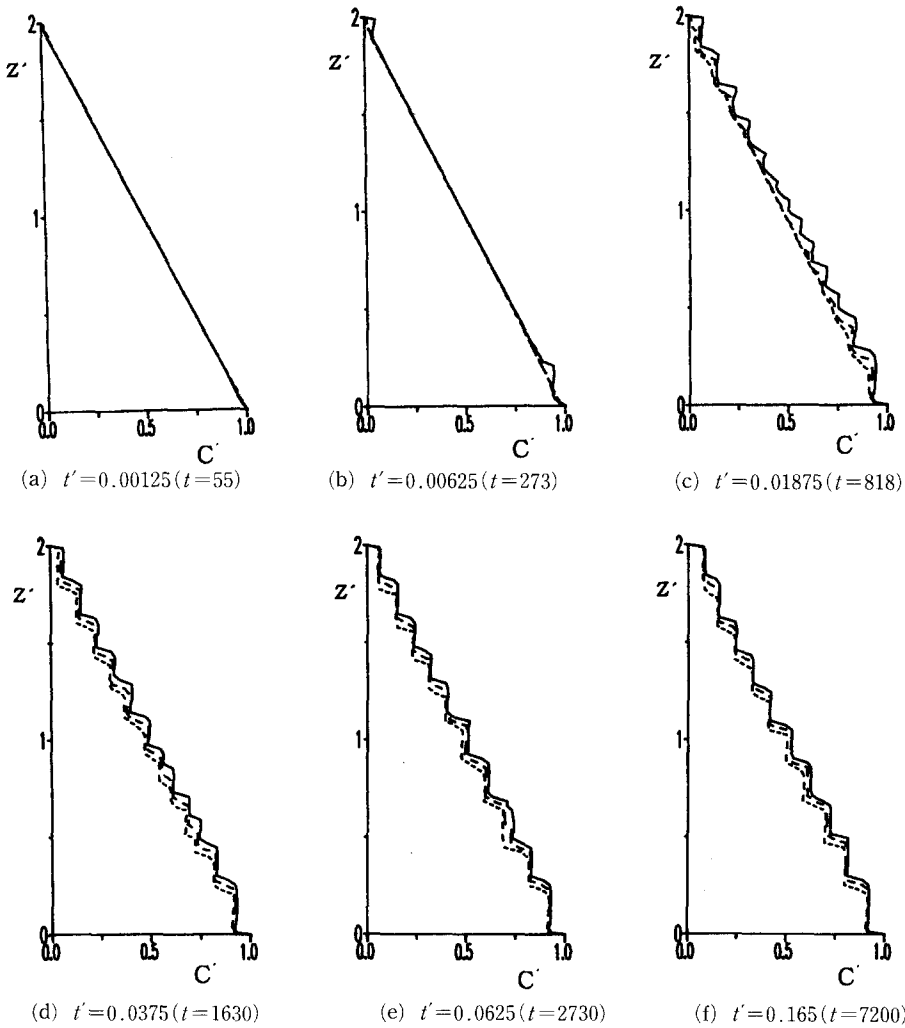


Fig. 7 Vertical distribution of concentration with time; $Ra_p=2.0 \times 10^6$, $Ta=5 \times 10^7$ (----- : $r^*=0.25$, : $r^*=0.5$, ——— : $r^*=0.75$)

않는 방위각 방향속도를 나타내고 있다. 반경 방향 속도가 발생함에 따라 Fig. 9(b)에서와 같이 방위각 속도가 발생함을 알 수 있다. 이때 방위각 방향 속도는 앞에서 설명한 바와 같이 반경 안쪽의 흐름이 나타나는 층의 상부에서는 그 속도가 증가하고, 반경 바깥쪽의 흐름이 나타나는 층의 하부에서는 감소한다. Fig. 9(c), (d)를 살펴보면 층 발생 초기 용기의 상부와 하부에서 생긴 층의 영향으로 용기의 하부에서는 대체로 양의 속도를 상부에서는 음의 속도를 갖게 되고, 각 층 내부에서는 층 상부의 저온 벽면 쪽을 향한 반경방향 속도에 의해 방위각 방향 속도는 증가하고 층 하부의 고온 벽면 쪽을 향한 반경방향 속도에 의해 방위각방향 속도가 감

소하여 모든 층 내부에서는 반경 방향속도와 같이 한번의 변곡점을 갖게 된다.

Fig. 10과 Fig. 11은 각각 $Ta=10^7$, $Ta=2.5 \times 10^8$ 일 때의 시간에 따른 유동장의 변화를 나타낸 그림이다. 앞에서 설명한 바와 같이 회전이 강해질수록 룰이 발생하는 시간이 지연되며, 층이 고온 벽면 쪽에서 저온 벽면 쪽으로 갈수록 아래로 더욱 기울어짐을 알 수 있다. 또한 초기 층의 성장높이는 초기 농도의 수직 성층화정도와 고온벽면에서의 가열에 의한 밀도 변화에 의해 결정되나 회전이 빨라져 회전의 영향이 강해질수록 중간층이 형성되는 시간이 지연됨에 따라 중간영역의 층들이 상부와 하부에서의 층보다 얇게 되므로 층의 대표길이를 정하

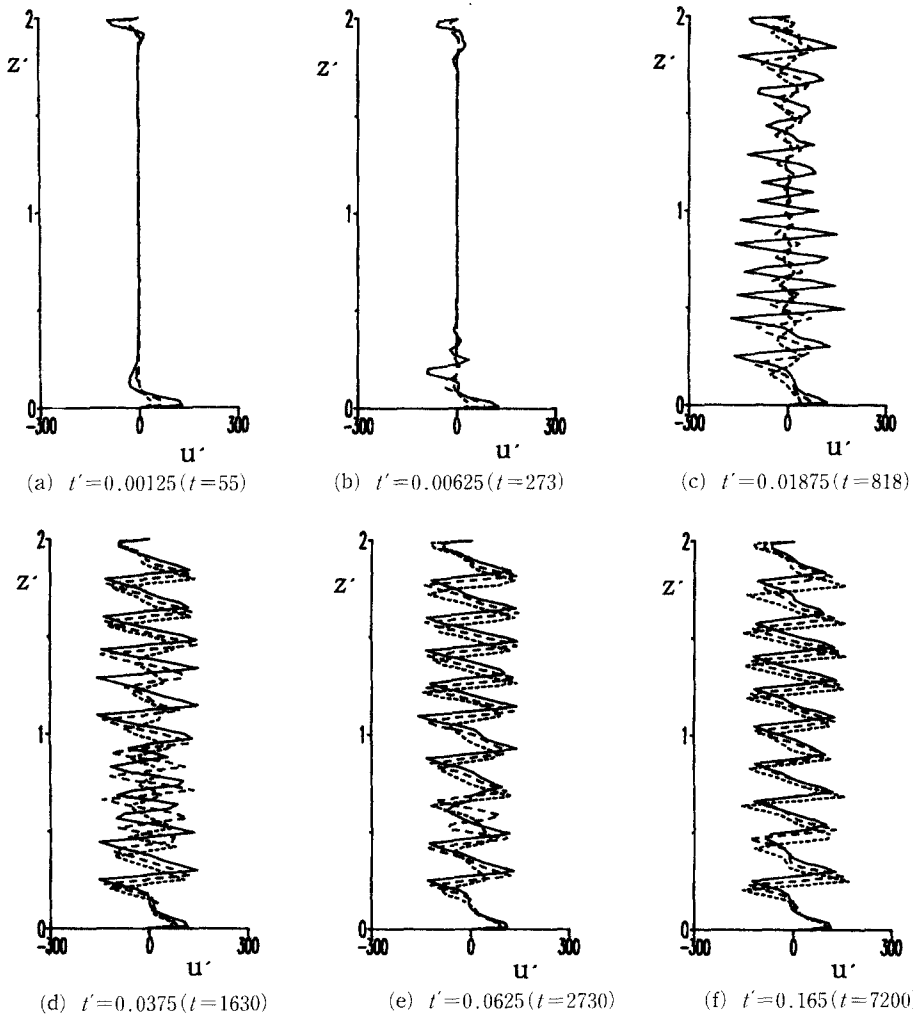


Fig. 8 Vertical distribution of radial velocity; $Ra_\nu=2.0 \times 10^5$, $Ta=5 \times 10^7$ (..... : $r^*=0.25$, : $r^*=0.5$, — : $r^*=0.75$)

는 것은 어려우나, 대략 $h/\eta=0.6\sim 0.75$ 의 범위에 있다. Fig. 11(d)에서와 같이 $Ta=2.5\times 10^8$ 인 경우에는 $Ta=5\times 10^7$ 인 경우와는 달리 층이 혼합되는 과정을 거치지 않아도 각 층들이 수평으로 여러 개로 나뉘어지는데, 이는 회전의 영향이 강해짐에 따라 회전에 의한 코리올리 힘의 발생으로 물의 유동이 점점 약해져 수평으로의 성장률이 점점 더 감소하게 되어 층은 고온벽 부근에서 오랜 시간 머물게 된다. 시간이 지남에 따라 층 우측에서 좌측의 수평방향으로 전도에 의해 열이 전달되고 이러한 열의 전달에 의해 다시 그 옆으로 물이 발생하여 수평적으로 여러 개의 셀이 존재하게 된다. 이렇게

형성된 수평적인 셀 들은 셀과 셀 사이의 농도구배가 작아지면 합쳐질 것으로 예상된다.

Fig. 12에는 $Ra\eta=2\times 10^5$ 일 때 Ta 수의 변화에 따라 고온벽면과 저온벽면에서의 평균 Nu 수의 변화를 무차원 시간에 대해 각각 나타내었다. Fig. 12(a)에서와 같이 고온벽면에서의 평균 Nu 수를 살펴보면 회전이 없는 경우에는, 초기에 밀폐용기 내로의 열전달이 주로 전도에 의해 이루어지므로 평균 Nu 수값이 급격히 감소하게 되며 이는 Lee 등⁽⁶⁾의 연구와 일치한다. 그러나 $t=0.0025$ 일 때 고온벽면에서 물이 발생하게 되어 벽면에서 약간 떨어져 있던 찬 유체가 벽면과 접촉함에 따라 벽면

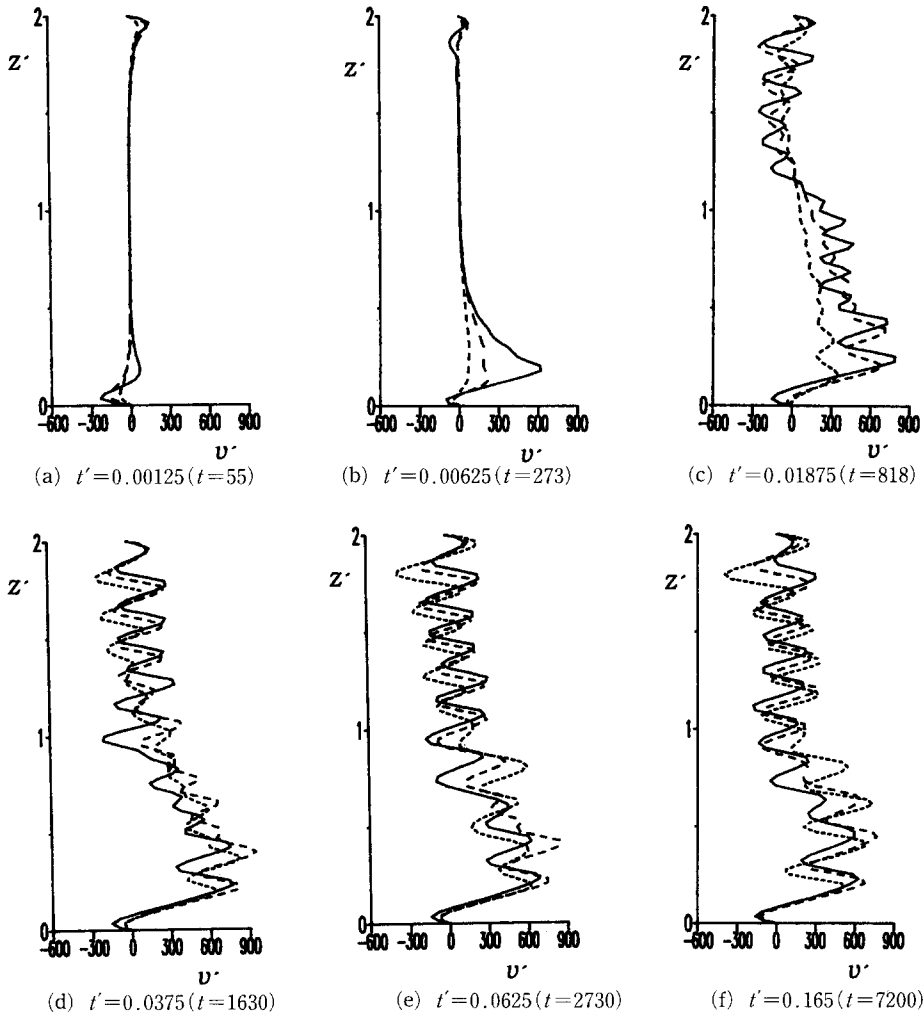


Fig. 9 Vertical of azimuthal velocity ; $Ra\eta=2.0\times 10^5$, $Ta=5\times 10^7$ (----- : $r^*=0.25$, - · - · - : $r^*=0.5$, — : $r^*=0.75$)

에서의 열전달량이 증가해 평균 Nu 수는 증가하게 된다. 시간이 지나며 물이 성장하게 되어 평균 Nu 수는 점차 증가하다가 층이 고온벽면 전역에서 완전히 형성된 이후부터는 단일확산 자연대류와 마찬가지로 벽면에서의 평균 Nu 수는 감소하게 되어 평균 Nu 수의 값이 약 13.4 정도 근처에서 약간의 요동을 하며 일정한 값을 유지한다. 이때 평균 Nu 수의 요동은 주로 층이 합쳐지는 메커니즘에 의해 일어나게 되는데, 유동장과 온도장의 비교, 고찰을 통해 대체로 층이 합쳐지기 시작하는 시점에 평균 Nu 수는 증가하고, 층이 합쳐진 시점에 평균 Nu 수는 감소함을 알 수 있다. 이에 비해 $Ta=107$ 인 경우에는 회전의 영향으로 인해 고온벽면에서의 물의 형성이 억제되므로 $t=0.01$ 일 때까지 전도에 의한 특성이 나타나고, 이후 비회전의 경우와 마찬가지로 벽면에서 물이 발생함에 따라 대류의 영향으

로 평균 Nu 수는 증가하다 감소하게 되며, 고온벽면에서의 층이 완전히 형성되면 이후부터는 평균 Nu 수는 약 6 정도로 일정하게 유지된다. Ta 수가 증가함에 따라 유동층 내부의 유동의 세기가 약해져 평균 Nu 수의 시간에 따른 변화는 점점 전도의 특성을 띠게 된다.

Fig. 12(b)에서와 같이 저온벽면의 경우, 초기에 고온벽면에서 발생한 하부의 유동층이 저온벽면에 영향을 미치지 전까지는 저온벽면에서의 열전달은 없다. 유동층이 저온벽면에 도달하는 순간부터 평균 Nu 수는 증가하게 된다. 이러한 증가는 고온벽에서 발생한 유동층이 저온벽면 전역에 영향을 미칠 때까지 증가하여 $Ta=0$ 인 경우 평균 Nu 수는 약 48.9 정도의 값을 유지하게 된다. 회전이 있는 경우에는 Ta 수가 증가함에 따라 대류유동의 세기가 약해져 층으로의 성장속도가 감소하므로 저온벽

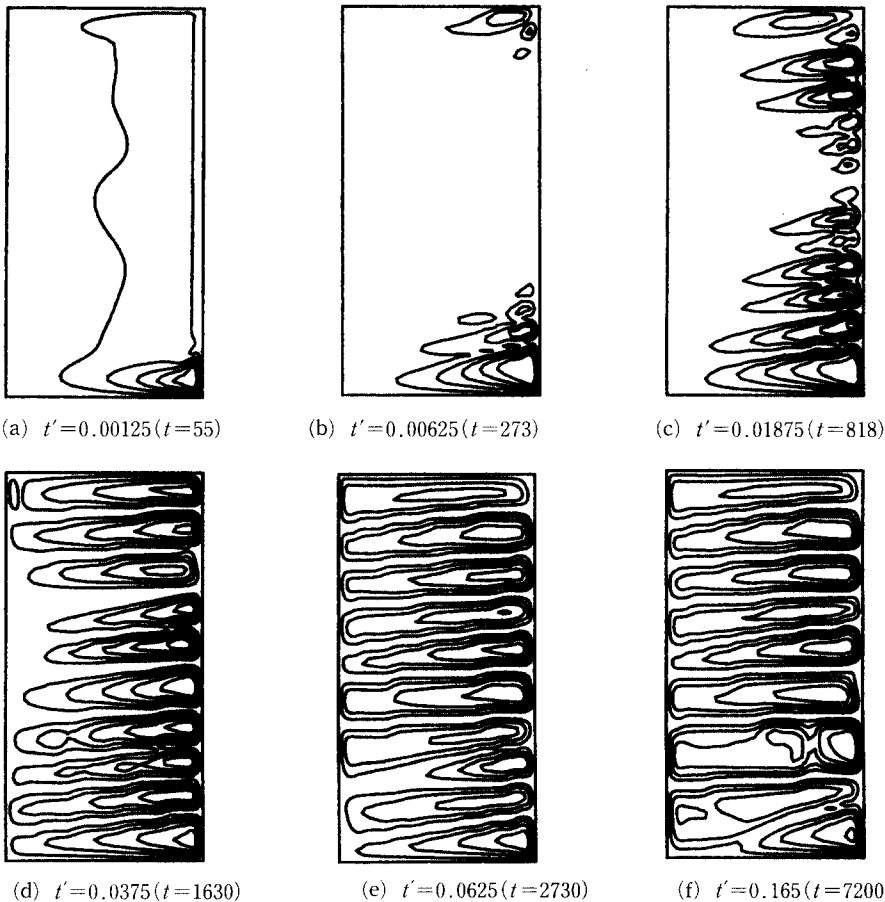
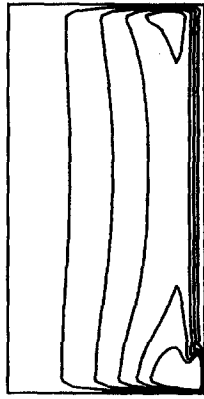
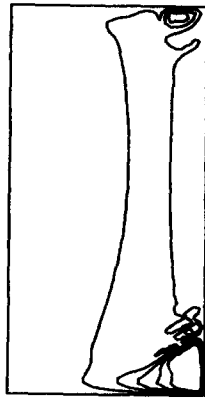


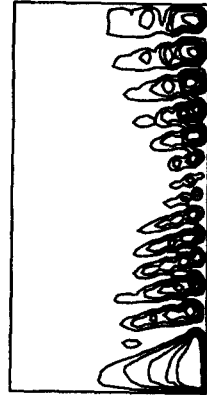
Fig. 10 Evolution of stream functions with time; $Ra_v=2.0 \times 10^5$, $Ta=10^7$ Values for stream functions are, from boundary to interior, 2, 5, 8, 1, 14



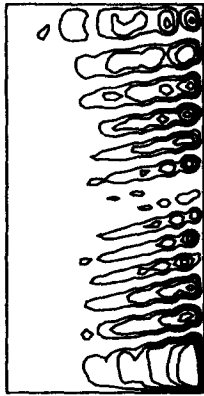
(a) $t' = 0.00125 (t = 55)$



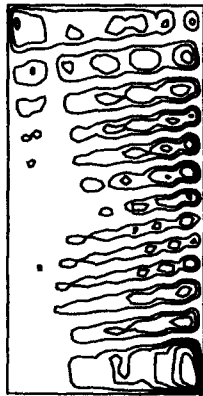
(b) $t' = 0.00625 (t = 273)$



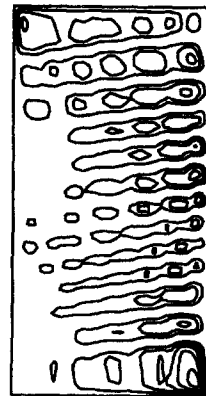
(c) $t' = 0.01875 (t = 818)$



(d) $t' = 0.0375 (t = 1630)$

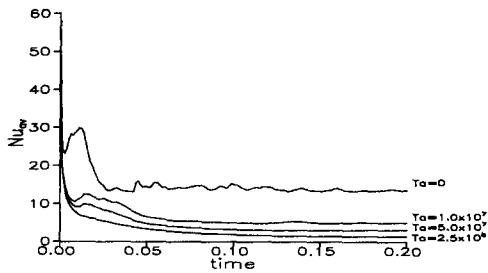


(e) $t' = 0.0625 (t = 2730)$

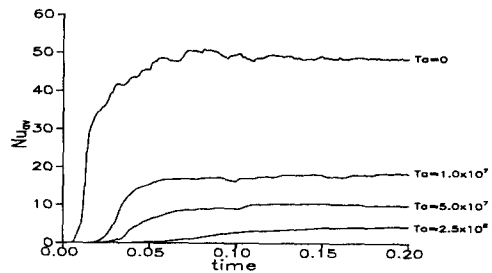


(f) $t' = 0.165 (t = 7200)$

Fig. 11 Evolution of stream functions with time; $Ra_\eta = 2.0 \times 10^5$, $Ta = 5 \times 10^8$. Values for stream functions are, from boundary to interior, 1, 2, 3, 4, 5



(a) Hot wall



(b) Cold wall

Fig. 12 Average Nusselt number with time for $Ra_\eta = 2.0 \times 10^5$

면에서 열전달이 일어나는 시간은 Ta 수가 증가함에 따라 점점 늦어지며, 고온벽면에서와 마찬가지로 평균 Nu 수는 점점 감소함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 회전하는 환형밀폐용기내에서 농도가 중력방향으로 안정하게 성층화된 유체에 열전달이

에 의해 수평방향으로 온도구배가 가해지는 경우 발생하는 이중확산유동에 대한 수치적 연구로, 회전속도와 관련된 무차원 변수 Ta 수의 변화를 변화시켜가며, 시간에 따른 Nu 수, 밀폐용기내의 유동형태, 유동 형성과정 그리고 그에 따른 온도분포, 농도분포 속도분포의 특성을 조사한 것이다. 본 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

회전계와 비회전계를 비교하여 유동현상에는 차이가 있으나 물이 생성되는 메커니즘, 용기내의 층형구조, 유동층내의 온도 및 농도분포 등은 정성적으로 크게 변하지 않는다. 회전의 영향이 증가할수록 회전에 의한 코리올리 힘의 발생으로 반경방향의 유동의 세기가 약해져 벽면에서의 물의 발생, 층으로의 성장 및 층이 합쳐지는 과정은 점점 억제된다. 비회전계나 회전계의 두 경우 모두 셀형태의 유동층내부의 온도는 역 'S'자 형태로 안정된 성층화 분포를 나타내며, 농도는 일정하게 된다. 또한 인접한 층 사이의 경계면에서 온도는 완만하게 변화하지만 농도는 급격한 변화를 나타낸다. 평균 Nu 수의 시간에 따른 변화는 회전의 영향이 증가함에 따라 유동층 내부의 유동의 세기가 약해져 점점 전도의 특성을 띄게 된다.

참고문헌

- (1) Huppert, H. E. and Turner, J. S., 1980, "Ice Blocks Melting into a Salinity Gradient", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 100, pp. 367~384.
- (2) Langlois, W. E., 1977, "Digital Simulation of Czochralski Bulk Flow in a Parameter Range Appropriate for Liquid Semiconductors," *Journal of Crystal Growth*, Vol. 42, pp. 386~399.
- (3) Ostrach, S., 1983, "Fluid Mechanics in Crystal Growth - The 1982 Freeman Scholar Lecture," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 105, pp. 5~20.
- (4) Bergman, T. L., Munoz, D. R., Incropera F. P., and Vistanka, R., 1986, "Measurement of Salinity Distributions in Salt-Stratified, Double Diffusive System by Optical Deflectometer," *Review of Scientific Instrument*, Vol. 57, pp. 2538~2543.
- (5) Ostrach, S., 1980, "Natural Convection with Combined Driving Forces", *PhysicoChem. Hydrodyn.*, Vol. 1, pp. 233~247.
- (6) Chen, C. F., Briggs D. G., and Wirtz, R. A., 1971, "Stability of Thermal Convection in a Salinity Gradient due to Lateral Heating", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 14, pp. 57~65.
- (7) Lee, J., Hyun M. T., and J. H. Moh, 1990, "Numerical Experiments on Natural Convection in a Stably Stratified Fluid due to Side-Wall Heating," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 18, pp. 343~355.
- (8) Lee, J., Hyun M. T., and Kang, Y. S., 1990, "Confined Natural Convection due to Lateral Heating in a Stably Stratified Solution", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, No. 5, pp. 869~875.
- (9) Lee J. W., and Hyun, J. M., 1991, "Time-Dependent Double Diffusion in a Stably Stratified Fluid under Lateral Heating," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, No. 9, pp. 2409~2421.
- (10) Bergman T. L., and Ungan, A., 1988, "A Note on Lateral Heating in a Double-Diffusive System," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 194, pp. 175~186.
- (11) Jeevaraj Charles G., and Imberger, Jorg, 1991, "Experimental Study of Double-Diffusive Instability in Sidewall Heating," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 222, pp. 565~586.
- (12) Kamakura K., and Ozoe, H. 1993, "Numerical Analysis of Transient Formation and Degradation Process of Multilayered Roll Cells with Double-Diffusive Natural Convection in an Enclosure," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 23, pp. 61~77.
- (13) Lee J., and Hyun, M. T., 1988, "Experiments on thermosolutal convection in a shallow rectangular enclosure," *Experimental Thermal Fluid Science*, Vol. 1, pp. 259~265.
- (14) Jiang, H. D., Ostrach S., and Y. Kamotani, 1991, "Unsteady Thermosolutal Transport Phenomena Due to Opposed Buoyancy Forces in Shallow Enclosures," *J. Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 135~140.
- (15) 강신형, 이태홍, 전창덕, 이진호, 1995, "회

- 전하는 원통형밀폐용기내의 아랫면 가열에 의한 이중확산대류에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제19권, 제7호, pp. 1731~1740.
- (16) Barcion V., and Pedlosky, J., 1967, "On the Steady Motions Produced by a Stable Stratification in a Rapidly Rotating Fluid," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 29, Part 4, pp. 673~690.
- (17) Schmitt R. W., and Cambert, R. B., 1979, "The Effects of Rotation on Salt Fingers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 162, pp. 23~33.
- (18) Hyun, J. M., Fowles W. W., and Warn-Var-nas, A., 1982, "Numerical Solutions for the Spin-Up a Stratified Fluid," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 117, pp. 71~90.
- (19) Sung, H. J., Cho W. K., and Hyun, J. M., 1993, "Double Diffusive Convection in a Rotating Annulus with Horizontal Temperature and Vertical Solutal Gradient," *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 3773~3782.
- (20) 강신형, 전창덕, 이태홍, 이진호, 1995, "환형용기내 성층화된 유체의 회전 효과에 따른 이중확산대류에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제19권, 제7호, pp. 1709~1719
- (21) 강신형, 전창덕, 이진호, 1995, "환형밀폐용기내의 성층화된 유체의 열면가열에 의한 이중확산대류에 관한 수치해석," 대한기계학회논문집, 제19권, 제7호, pp. 1720~1730