

<論 文>

밀폐용기내 성층화된 유체의 자연대류에 관한 수치적 연구

현명택* · 이진호** · 모정하***

(1989년 8월 2일 접수)

Numerical Analysis of Natural Convection in a Confined Stratified Fluid

M.T. Hyun, J. Lee and J.H. Moh

Key Words: Double-Diffusive Convection(이중확산 유동), Combined Buoyancy(복합 부력), Flow Pattern(유동 형태), Layered Flow(층을 이룬 유동), Buoyancy Ratio(부력 비), Interface(인접면), Layer(층), Cell(셀), Roll(롤)

Abstract

Numerical experiments have been conducted to study natural convection of a stably stratified salt-water solution due to lateral heating in a square rectangular enclosure. The method of investigation employed is the finite difference simulation of the basic conservation equations for a laminar, unsteady double-diffusive convection and calculation is made for $1.0 \times 10^5 \leq Ra_T \leq 1.0 \times 10^6$ and $0 \leq N \leq 15$. Four distinct flow regimes are observed depending on the relative magnitude of solutal stratification to thermal buoyancy, N ; unicell flow regime for $N=1$, fully-developed flow regime for $N=3$, layered flow regime with the stagnant core for $N=5$, and stagnant flow regime for $N=7$. Formation of layered flow structure with time and the corresponding temperature and concentration distributions are examined. Due to the double-diffusive nature of heat and salt, interesting temperature and concentration profiles are obtained in each flow regime.

기 호 설 명

Ar : 종횡비 ($= H/L$)

C : 무차원 농도

C_0 : 대표농도 [wt%]

ΔC : 양단의 농도차 [wt%]

D : 소금의 확산률 [m^2/s]

g : 중력가속도 [m/s^2]

H : 밀폐용기의 높이 [m]

L : 밀폐용기의 폭 [m]

Le : Lewis수 ($= \alpha/D$)

N : 부력비 ($= \bar{\beta} \Delta C / \beta \Delta T$)

Nu : 국소 Nusselt 수

\overline{Nu} : 평균 Nusselt 수

p : 무차원 압력

Pr : Prandtl 수 ($= \nu/\alpha$)

Ras : 농도차에 의한 Rayleigh 수 ($= Ra_T \times N$)

Ra_T : 온도차에 의한 Rayleigh 수 ($= g\beta\Delta TH^3/\nu\alpha$)

T : 무차원 온도

T_0 : 대표온도 [$^{\circ}C$]

ΔT : 양단의 온도차 [$^{\circ}C$]

t : 무차원 시간

u : 수평방향 무차원 속도

v : 수직방향 무차원 속도

x : 수평방향 무차원 좌표

y : 수직방향 무차원 좌표

α : 열확산 계수 [m^2/s]

β : 온도차에 의한 체적팽창계수 [$^{\circ}C^{-1}$]

*정회원, 제주대학교 공과대학 기관공학과

**정회원, 연세대학교 공과대학 기계공학과

***정회원, 연세대학교 대학원

β : 농도차에 의한 체적팽창계수[wt%⁻¹]

ν : 동점성 계수[m²/s]

1. 서 론

이중확산유동(double-diffusive convection)은 열-소금 확산계 혹은 소금-설탕 확산계와 같이 확산율이 다른 두 부력인자들의 복합부력에 의한 유동을 의미한다. 이중확산유동은 해수유동, 지하내의 맨틀유동, 태양연못, 액체가스저장 그리고 주조, 응고, 결정성장과 같은 재료가공 분야 등과 밀접하게 관련되어 지난 20여년 동안 많은 연구가 진행되고 있다⁽¹⁾. 특히 최근 첨단 산업의 발달로 말미암아 보다 고순도의 결정이 필요해짐에 따라 이에 대한 연구는 보다 활발해지고 있다⁽²⁾.

이중확산유동은 중력장과 두 부력인자의 상호 작용방향에 따라 여러 가지 대류양상이 존재하며⁽¹⁻³⁾, 초기의 연구는 해양에서의 특이한 온도 및 농도분포를 초래하는 "salt-finger" 현상이나 "salt fountain" 현상이 나타나는 불안정한 유형(unstable mode)을 규명하는데 국한되었으며 이에 대해서는 Turner⁽⁴⁾에 의해 잘 정리, 소개되어 있다. 1970년대에 이르러 성층화된 용액에 수평방향으로 온도구배가 가해질 때의 유동현상에 관한 연구⁽⁵⁻⁷⁾가 수행되어 층을 이룬 유동형태가 나타남이 밝혀졌고, 아주 최근 수평방향으로 온도 및 농도 구배가 가해질 때 밀폐용기내의 유동형태에 관한 연구가 발표되었다⁽⁸⁻¹⁰⁾.

성층화된 용액에 수평방향으로 온도구배가 가해질 때 발생하는 자연대류에 관한 문제는 층을 이룬 유동형태의 메카니즘을 밝힐 수 있다는 점 때문에 많은 연구자들의 관심의 대상이 되어 왔다. Thorpe등⁽⁶⁾은 선형 지배방정식에서 유동이 유발되는 임계조건에 관한 식을 제시하였고 이를 실험을 통해 대체로 일치함을 보였으며 수직평판에서의 유동이 여러 개의 층을 이룬 유동으로 나타남을 처음 밝혔다. 이에 대한 보다 자세한 연구는 Chen등⁽⁶⁾, Wirtz등⁽⁷⁾에 의해 시도되었는데 고온벽에서 발생한 물이 저온벽으로 진행되어 결국 셀형태의 유동(cellular motion)이 형성되고 시간이 경과하면서 밀폐용기의 수평벽면에서 형성된 셀은 그 아래 혹은 위의 셀과 합쳐지면서 전체적으로 셀의 갯수가 감소함을 밝혔다. 최근 Lee등⁽¹¹⁾의 실험에서는 성층화된 농도와 온도차에 의한 부력의 비에 따라 4

가지 유동형태가 존재하였다. 또한 이에 대한 수치 해석의 결과 밀폐된 공간에서는 밀폐용기의 수평벽면에서 물이, 밀폐되지 않은 공간에서는 고온벽면 전체에서 물이 형성됨이 밝혀졌고⁽⁷⁾, 셀내의 운동에너지는 물이 합쳐질 때까지 계속 증가함을 보였다⁽¹²⁾. 한편 Wirtz⁽¹³⁾는 2개의 층만이 존재하는 조건일 때 용액의 성층화는 열전달을 방해하는 요인이 된다는 사실을 밝혔다.

성층화된 용액내의 자연대류에 관한 지금까지의 연구는 주로 층이 형성되는 초기 과정에 주안점을 두었기 때문에 부력비에 따라 나타나는 여러 가지 유동형태와 그에 따른 온도 및 농도분포에 관해서는 전혀 연구되지 않은 실정이다. 따라서 본 논문에서는 성층화된 용액에 수평방향으로 온도구배가해지는 경우에 있어서 두 부력인자의 상대적 크기에 따라 나타나는 유동형태와 그에 따른 온도, 농도분포 및 열전달특성을 수치적으로 연구하고자 한다.

2. 이론 해석

본 연구의 해석 영역은 Fig. 1과 같다. 유동은 x, y 평면의 2차원이며 수평, 수직방향 속도는 u, v 이고 밀폐용기의 폭은 L 높이는 H 이다. 수직벽면은 등온이며, 불침투벽인 반면 수평벽면은 단열이고 등농도이다. 밀폐용기내의 유체는 소금물로 초기온도는 양단 벽면의 평균온도이고 초기에 선형적으로 성층화되어 있다. 기본방정식에서 부력항을 제외한 모든 항에서의 물성치가 일정하다고 가정하고 식 (1)과 같은 무차원 변수를 도입하면(여기서

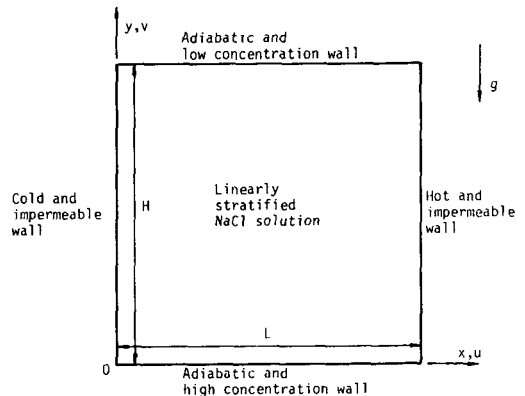


Fig. 1 Schematic of the problem concerned

좌변의 변수가 무차원량이다.)

$$\begin{aligned} x &= \frac{x'}{H}, \quad y = \frac{y'}{H}, \quad u = \frac{H}{\alpha} u', \\ v &= \frac{H}{\alpha} v', \quad t = \frac{\alpha}{H^2} t', \quad p = \frac{1}{\rho} \left(\frac{H}{\alpha} \right)^2 p', \\ T &= \frac{T' - T'_0}{\Delta T}, \quad C = \frac{C' - C'_0}{\Delta C} \end{aligned} \quad (1)$$

2차원, 층류, 비정상 상태의 이중확산유동의 무차원 기본방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial x} \\ + Pr \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial y} + Pr \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ + Ra_T \cdot Pr (T - N \cdot C) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{Le} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

여기서 식 (2)는 연속방정식이고, 식 (3)과 (4)는 Boussinesq Approximation이 적용된 x, y 운동량 방정식이다. 식 (5)와 (6)은 각각 에너지 보존식과 물질 보존식이다. 위 식에서 N 은 온도차에 의한 부력에 대한 성층화된 농도에 의한 부력의 비율 나타내며 Ra_T 는 밀폐용기의 높이를 대표길이로 하는 온도차에 의한 Rayleigh수, Pr 와 Le 는 각각 유체의 Prandtl수와 Lewis수를 나타낸다.

초기 상태의 유체는 등온이며, 선형적으로 성층화되어 있기 때문에 초기조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u(0, x, y) = v(0, x, y) = 0 \\ T(0, x, y) = 0.5 \\ C(0, x, y) = 1 - y \end{aligned} \quad (7)$$

또한 경계조건은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} u \left(t, \frac{0}{1/Ar}, y \right) = 0, \quad u \left(t, x, \frac{0}{1} \right) = 0 \\ v \left(t, \frac{0}{1/Ar}, y \right) = 0, \quad v \left(t, x, \frac{0}{1} \right) = 0 \\ T \left(t, \frac{0}{1/Ar}, y \right) = \frac{0}{1}, \quad C \left(t, x, \frac{0}{1} \right) = \frac{1}{0} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0,1} = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0,1/Ar} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 Ar 은 중형비로 본 연구에서는 1이다. 경계면에서는 점착조건(no-slip condition)이 적용되며

수직벽면($x=0, 1/Ar$)은 등온이며 불침투성벽이고 수평벽면($y=0, 1$)에서는 단열이며, 등농도조건이 적용된다.

차분화 방정식은 식 (2)~(5)를 시간에 대해서는 음함수 방법(implicit method)으로 공간에 대해서는 한 검사체적에 대해 적분하여 얻었으며 압력, 온도, 농도장에 대한 해는 주 격자점(main grid point)에서, 속도장에 대한 해는 이동된 격자점(staggered grid point)에서 해를 구하였다. 검사면에서의 유속은 Power-Law Scheme을 이용하였고 SIMPLE Algorithm⁽¹⁴⁾을 사용하여 계산하였다. 수치해석에서의 격자수는 41×41 , 무차원 시간 증분은 0.0025이며 운동량 방정식의 이완계수는 0.4~0.6, 압력보정식은 0.5~0.7 그리고 온도, 농도장의 경우 0.8~0.9로 취하였다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

본 수치해석은 열-소금 확산계($Le=100, Pr=7.0$)에 대한 연구로 해석영역은 $Ar=1.0, 1.0 \times 10^5 \leq Ra_T \leq 1.0 \times 10^6, 0 \leq N \leq 15$ 그리고 $0 \leq t \leq 0.2$ 이다. 수치해석으로부터 유동형태는 부력비에 따라 Lee등⁽¹¹⁾의 실험에서와 마찬가지로 4가지로 나타났다. Figs. 2~5는 $Ra_T=1.0 \times 10^6$ 일 때 각 부력비($N=1, 3, 5, 7$)에 대한 시간에 따른 유동함수(벽면에서의 값을 0으로 함), 등온 및 등농도선을 나타낸 것이다. 기하학적 형태 및 경계조건으로 밀폐용기내의 유동함수, 온도장 및 농도장은 밀폐용기의 중심을 기준으로 모두 점대칭으로 나타남을 알 수 있다.

부력비가 1인 경우(Fig. 2) 유동함수를 살펴보면 처음에는 2개의 셀이 형성되나 시간이 경과하면서 밀폐용기내로 열전달이 충분히 일어나 부력이 증가하게 되면 결국 단일셀로 나타난다. 이때 Fig. 2(c)에서 알 수 있듯이 정상상태에 도달해감에 따라 온도변화는 주로 수직 열경계층내에서만 일어나며 코어(core)영역의 수평방향으로는 거의 변화가 없고 수직방향으로 안정되게 성층화되어 온도차만에 의한 자연대류⁽¹⁵⁾에서와 유사하게 분포된다. 농도는 처음 2개의 셀이 존재할 때는 각 셀 내부에서 균일하게 분포하고 인접면에서 급격하게 변하지만 단일셀이 형성되면서 용기내부 전역에서 0.5로 균일하게 분포하여 농도변화는 수평 물질경계층에서만 나타난다.

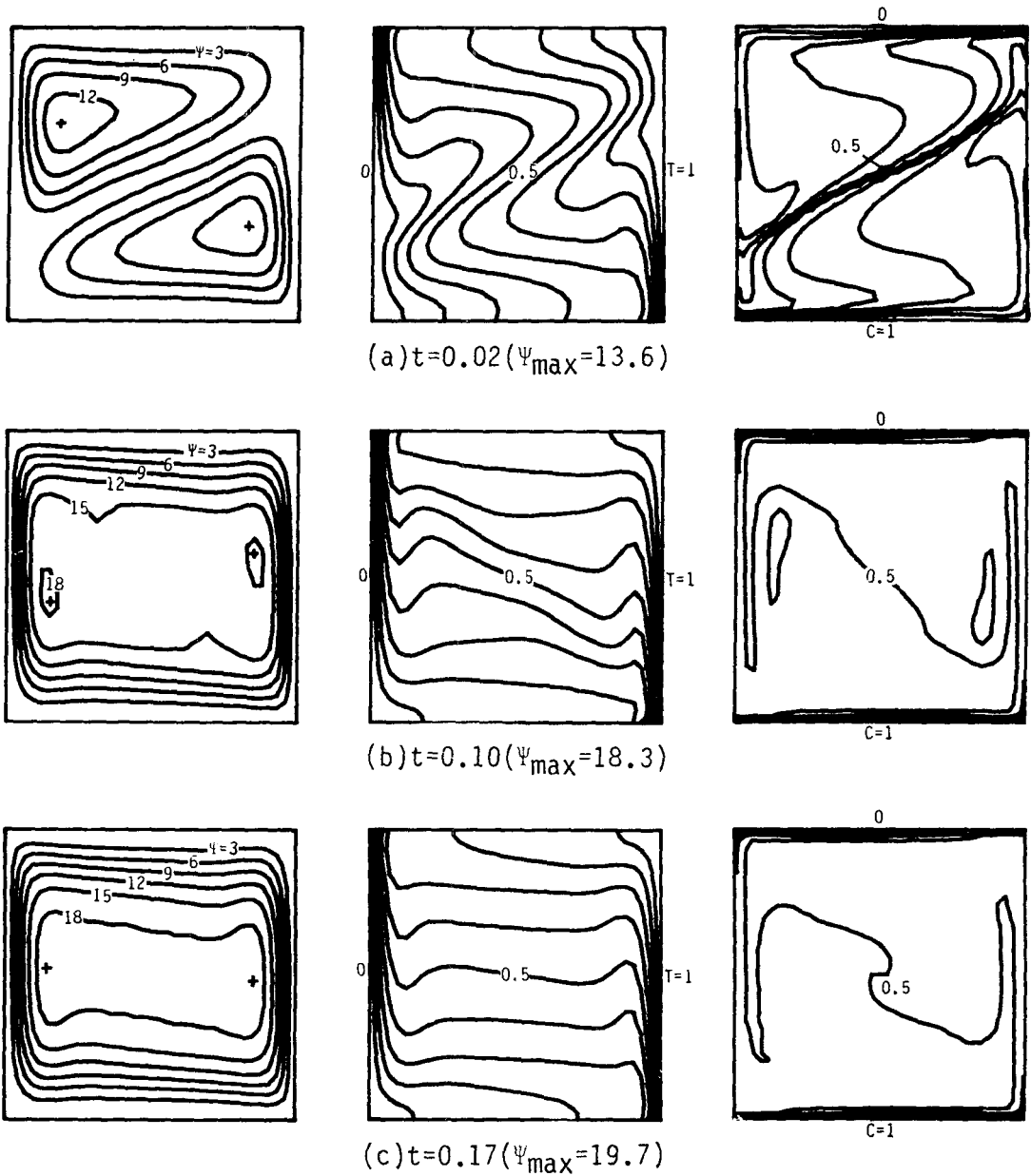


Fig. 2 Stream function, temperature and concentration isocontour maps for $Ra_T=1.0 \times 10^6$ and $N=1$

부력비가 3인 경우(Fig. 3) 유동함수를 살펴보면 초기에는 밀폐용기 양단 부근에서 2개의 셀이 형성되고 시간이 지남에 따라 밀폐용기 내부로 성장하여 2개의 층을 이룬 유동형태가 된다. 이와 같은 현상은 층을 이룬 셀 형태의 유동이 발생하는 경우 공통적으로 관찰되었고 온도차에 의한 부력이 작아 지거나 농도차에 의한 부력이 증가하여 부력비가

증가하면 셀 형성 시간이 지연되고 형성되는 층이 밀폐용기의 위, 아래면에 인접하는 경향을 보인다. 또한 셀 사이의 인접면은 실험⁽¹¹⁾에서와 마찬가지로 저온벽으로 갈수록 냉각효과 때문에 아래로 경사진다(Fig. 3과 4). 온도분포는 Fig. 3(a)의 경우 거의 전도에 의한 특성을 보이지만 시간이 경과함에 따라 Fig. 3(b)와 3(c)에서처럼 대류에 의한 특성

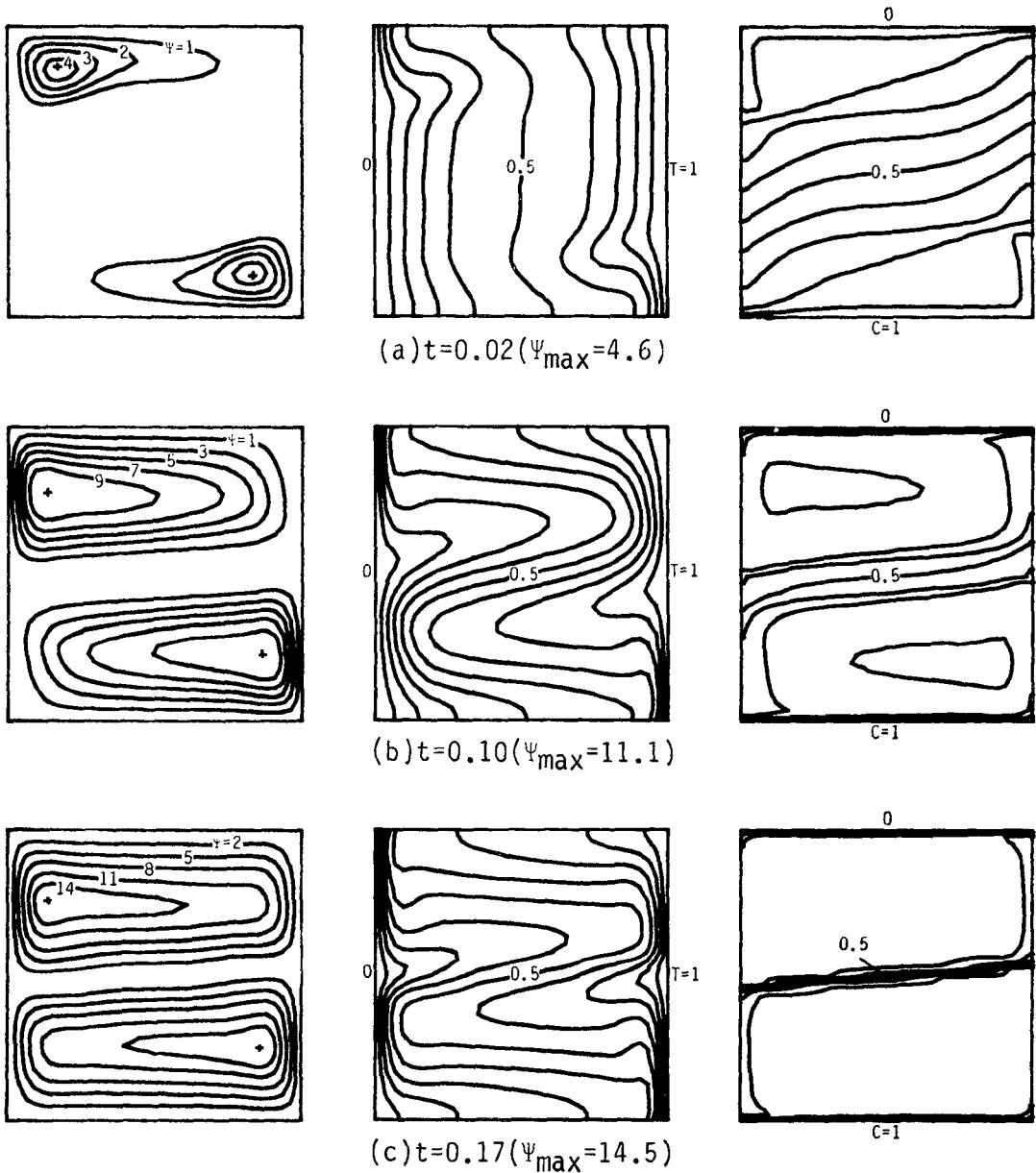


Fig. 3 Stream function, temperature and concentration isocontour maps for $Ra_T=1.0 \times 10^6$ and $N=3$

이 각 셀 내부에서 나타난다. 농도는 유동속도가 빠른 위, 아래층에서는 균일하게 분포하지만 유동속도가 느린 가운데 층에서는 처음에는 성층화되었다가 유동속도가 빠른 층이 성장해옴에 따라 균일한 분포로 바뀐다(Fig. 3(c)). 인접면에서 온도, 농도변화는 등농도선이 등온도선보다 훨씬 밀집되어 인접면에서의 변화가 더 급격함을 알 수 있다. 이

는 온도와 소금의 확산율($Le \cong 100$)의 차에 따른 현상으로 확산율이 상대적으로 큰 온도의 경우 충분한 확산이 이루어지지만 확산이 느린 소금의 경우 빠른 셀 유동으로 인접면을 통한 확산이 충분치 못하기 때문이다.

부력비가 5인 경우(Fig. 4)에는 Fig. 3의 경우와 유동의 생성과정은 유사하지만 이 경우 유동함수

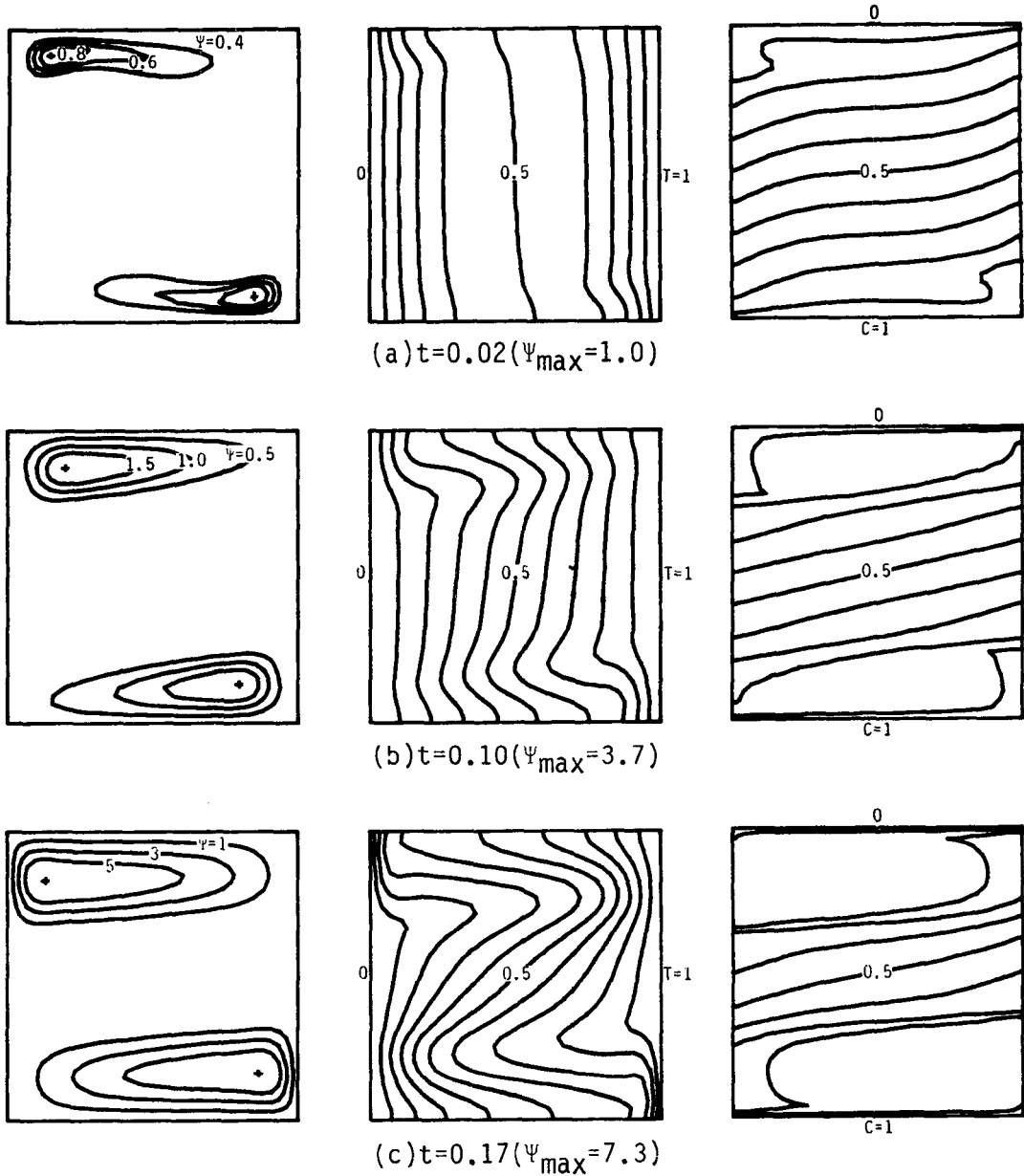


Fig. 4 Stream function, temperature and concentration isocontour maps for $Ra_T=1.0 \times 10^6$ and $N=5$

값이 $N=3$ 일 때보다 아주 작으며 또한 밀폐용기의 위, 아랫면에서 발생한 셀이 용기내부까지 성장하지 못하여 유동층 사이에 유동합수가 아주 작은 정체층이 존재한다. 이때 Fig. 4(c)에서 알 수 있듯이 온도분포는 위, 아래의 셀에서는 대류현상이, 가운데 경계층에서는 아래의 유동층에서 위의 유동층으로 그리고 두 수직 경계면 사이의 전도에 의한

열전달현상이 일어난다. 한편 농도는 초기에는 성층화되었다가 유동층이 성장하면서 각 유동층 내부에서는 거의 균일한 분포를 갖지만 가운데의 정체층에서는 성층화된 상태가 그대로 유지됨을 알 수 있다.

Fig. 5에서와 같이 농도차에 의한 부력이 더 증가한 경우 ($N=7$)에도 전술한 바와 같이 2개의

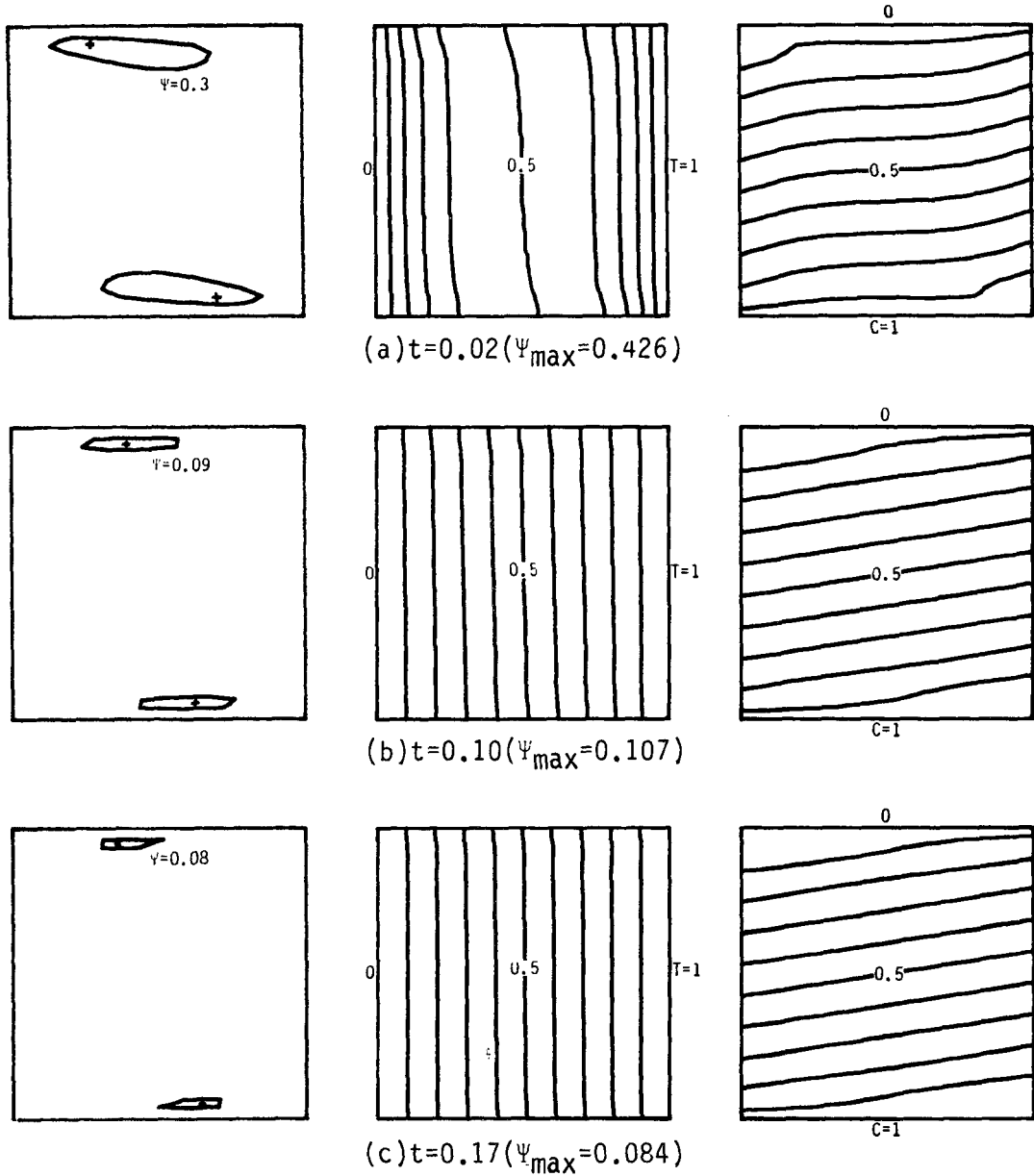


Fig. 5 Stream function, temperature and concentration isocontour maps for $Ra_T=1.0 \times 10^6$ and $N=7$

셀이 형성되며 훨씬 더 밀폐용기벽 쪽으로 밀착된다. 이 경우 Fig. 2~4에서와 달리 시간이 경과함에 따라 유동함수 값이 작아져 유동이 점점 위축됨을 알 수 있다. 이때 온도분포는 전 시간에 걸쳐 전도현상만이 나타나고 농도는 초기에 성층화된 값이 그대로 유지되어 선형적으로 성층화된다.

$Ra_T=1.0 \times 10^6$ 그리고 $t=0.15$ 일 때 각 부력비

에 따른 밀폐용기 중앙부에서의 x 방향 속도분포를 Fig. 6에 나타내었다. 수평방향 속도분포를 통해 $N=1$ 인 경우 단일셀이 나타나고, $N=3$ 인 경우 충분히 발달한 2개의 셀이 존재하지만 $N=5$ 인 경우 유동이 매우 느린 정체층이 잘 발달된 셀 사이에 존재함을 알 수 있고 $N=7$ 의 경우 거의 유동이 발생하지 않음을 알 수 있다.

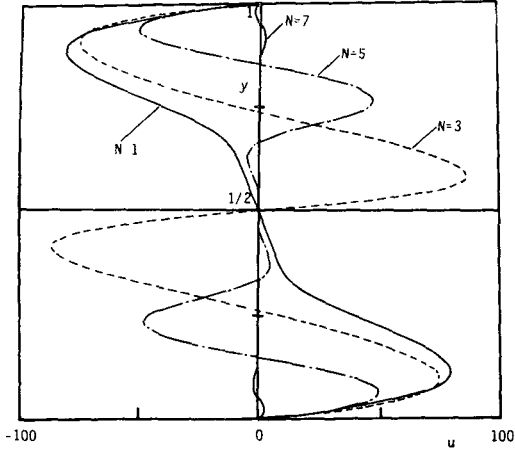


Fig. 6 Dimensionless horizontal velocity profiles at $x=0.5$ for $Ra_T=1.0 \times 10^6$ and $t=0.15$

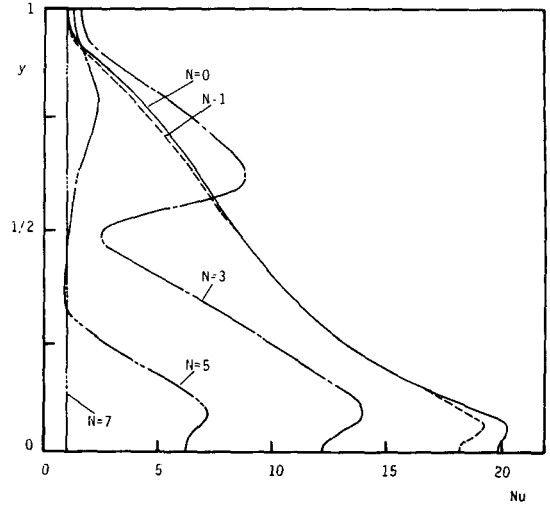


Fig. 8 Local Nusselt number for $Ra_T=1.0 \times 10^6$ and $t=0.15$

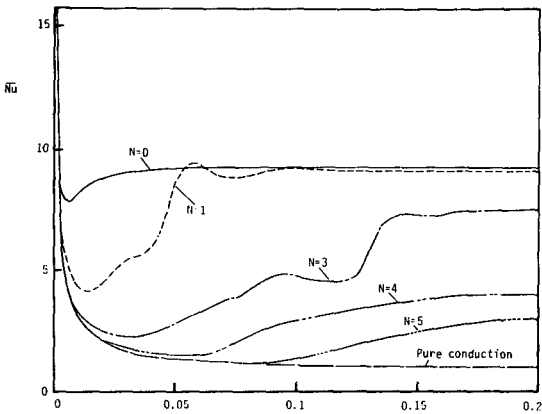


Fig. 7 Transient average Nusselt number for $Ra_T=1.0 \times 10^6$ and $N=0-5$

Fig. 7은 $Ra_T=1.0 \times 10^6$ 일 때 부력비에 따른 각 시간에서의 평균 Nusselt수이다. 기대했던 대로 성층화된 용액내의 자연대류에서의 \overline{Nu} 은 온도차만에 의한 자연대류와 순수 전도 사이에 존재함을 알 수 있다. 이중확산유동의 경우에도 순수 자연대류 ($N=0$)와 마찬가지로 초기에는 밀폐용기내로의 열전달 주로 전도에 의해 이루어지기 때문에 \overline{Nu} 가 급격히 감소하다가 시간이 경과하여 유체내로 열전달이 충분히 이루어짐에 따라 온도차에 의한 밀도변화로 밀폐용기에 유동이 유발되는 대류효과 때문에 \overline{Nu} 는 완만히 증가하기 시작함을 알 수 있다. Fig. 7에서 보듯이 부력비가 증가할수록 대류

효과는 지연되어 나타나고 Nu 도 감소하여 $N \geq 7$ 인 경우 Nu 는 전도의 경우와 비슷한 값을 갖음을 알 수 있다. 또한 부력비가 증가할수록 대류효과가 지연되기 때문에 부력비가 클수록 정상상태에 도달하는 시간이 증가하며 본 연구의 범위에서는 $t=0.2$ 인 경우 모두 정상상태에 도달하였다.

Fig. 8은 $Ra_T=1.0 \times 10^6$ 이고 $t=0.15$ 일 때 부력비에 따른 고온벽면에서의 국소 Nu 를 나타낸 것이다. 단일셀이 나타내는 경우 ($N=1$)에는 순수 온도차만에 의한 자연대류와 비슷한 Nu 분포를 보이고 최대 Nu 는 밀폐용기 밀면 근처에서 나타나며, $N=7$ 인 경우에는 전 영역에서 전도에 의한 Nu 와 유사하게 분포된다. $N=3$ 과 5에서처럼 유동이 여러 개의 셀로 나타나는 경우에는 인접면과 정체층에서 Nu 가 크게 감소하며 각 셀에서의 최대 Nu 는 그 셀의 하부에서 나타난다.

4. 결 론

본 논문은 정방형 밀폐용기내에서 성층화된 유체의 수평 온도차에 의한 이중확산유동에 관한 수치 해석으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) $Ra_T=1.0 \times 10^6$ 인 경우 $N=1$ 일 때 단일셀유동, $N=3$ 일 때 층을 이룬 유동, $N=5$ 일 때 정체층이 존재하는 층을 이룬 유동 그리고 $N=7$ 일 때 정체상태의 4가지 유동형태가 나타났다.

(2) 유동층내에서 온도는 온도차만에 의한 자연대류($N=0$)와 비슷하게 분포하고 농도는 균일한 반면 정체층내에서는 전도에 의해 열전달이 일어나며 농도는 성층화된다.

(3) 인접면에서 온도는 그 변화가 작지만 농도는 극심하게 변한다.

(4) 평균 Nusselt수는 순수 자연대류와 전도 사이에 존재하고 부력비가 증가할수록 온도차에 의한 대류효과는 지연되어 나타나며 평균 Nusselt수는 감소한다.

參 考 文 獻

- (1) Ostrach, S., 1980, "Natural Convection with Combined Driving Forces", *Physico-Chemical Hydrodynamics*, Vol. 1, pp. 233~247.
- (2) Ostrach, S., 1983, "Fluid Mechanics in Crystal Growth The 1982 Freeman Scholar Lecture", *J. Fluids Engineering*, Vol. 105, pp. 5~20.
- (3) Turner, J.S. and Stommel, H., 1964, "A New Case of Convection in the Presence of Combined Vertical Salinity and Temperature Gradient", *Proc. National Academy of Sciences*, Vol. 52, pp. 49~53.
- (4) Turner, J.S., 1979, "Buoyancy Effects in Fluids", Cambridge University Press, Cambridge.
- (5) Thorpe, S.A., Hutt, P.K. and Soulsby, R., 1969, "The Effect of Horizontal Gradients on Thermohaline Convection", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 38, pp. 375~400.
- (6) Chen, C.F., Briggs, D.G. and Wirtz, R.A., 1971, "Stability of Thermal Convection in a Salinity Gradient Due to Lateral Heating", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 14, pp. 57~65.
- (7) Wirtz, R.A., Briggs, D.G. and Chen, C.F., 1972, "Physical and Numerical Experiments on Layered Convection in a Density Stratified Fluid", *Geophysical Fluid Dynamics*, Vol. 3, pp. 265~288.
- (8) Kamotani, Y., Wang, L.W., Ostrach, S. and Jiang, H.D., 1985, "Experimental Study of Natural Convection in Shallow Enclosures with Horizontal Temperature and Concentration Gradients", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, pp. 165~173.
- (9) Lee, J. and Hyun, M.T., 1988, "Experiments on Thermosolutal Convection in a Shallow Rectangular Enclosure", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 1, pp. 259~265.
- (10) Lee, J., Hyun, M.T. and Kim, K.W., 1988, "Natural Convection in Confined Fluids with Combined Horizontal Temperature and Concentration Gradients", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 1969~1977.
- (11) Lee, J., Hyun, M.T. and Kang, Y.S., 1988, "Experiments on Confined Thermosolutal Convection", *Heat Transfer on the Second International Symposium*, Vol. 1, pp. 694~701.
- (12) Wirtz, R.A. and Liu, L.H., 1975, "Numerical Experiments on the Onset of Layered Convection in a Narrow Slot Containing a Stably Stratified Fluid", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 1299~1305.
- (13) Wirtz, R.A., 1977, "The Effect of Solute Layering on Lateral Heat Transfer in an Enclosure", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 20, pp. 841~846.
- (14) Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw Hill, New York.
- (15) Bejan, A., Al-Homoud, A.A. and Imberger, J., 1981, "Experimental Study of High Rayleigh Number Convection in a Horizontal Cavity with Different End Temperatures", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 109, pp. 283~299.