

◎ 論 文

사각형 용기내의 비정상 이중확산유동에 관한 실험적 연구

홍 남 호* · 김 창 수** · 현 명 태***

(1994년 2월 1일 접수)

Experimental Study on Unsteady Double-Diffusive Convection in a Rectangle

Nam-Ho Hong* · Chang-Su Kim** · Myung-Taek Hyun***

Key Words : Natural Convection(자연대류), Double-Diffusive Convection(이중확산유동), Flow Pattern(유동형태), Unicell(단일셀), Layered Flow(층을 이룬 유동), Interface(인접면), Buoyancy Ratio(부력비)

Abstract

Double-diffusive convection induced by simultaneously-imposed lateral temperature and concentration gradients in a rectangular enclosure with aspect ratio, 2.0, has been studied experimentally for adiabatic and isothermal horizontal boundary conditions. Visual observations show two distinct flow structures depending on the buoyancy ratio. The unicell flow structure is observed for a lower buoyancy ratio while the layered flow structure appears for a higher buoyancy ratio. There exists an unstable flow regime between two buoyancy ratios.

기호설명

AR : 종횡비(=H/L)

ΔC : 양단의 농도차[wt%]

D : 물질확산계수[m²/s]

g : 중력가속도[m/s²]

H : 밀폐용기의 높이[m]

L : 밀폐용기의 폭[m]

Le : Lewis 수(α/D)

N : 부력비(= $\beta_s \Delta C / \beta_T \Delta T$)

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

Ra_T : 온도차에 의한 Rayleigh 수(= $g \beta_T \Delta T H^3 / \nu \alpha$)

ΔT : 양단의 온도차 [°C]

* 서귀고등학교 교사

** 한국전력 전남지사

*** 정회원, 제주대학교 기계공학과

- α : 열확산계수 [m^2/s]
 β_s : 농도차에 의한 체적팽창계수 [$wt\%^{-1}$]
 β_T : 온도차에 의한 체적팽창계수 [$^{\circ}C^{-1}$]
 ν : 동점성계수 [m^2/s]

1. 서 론

이중확산유동은 열-소금 확산계 혹은 소금-설탕 확산계와 같이 확산율이 다른 두 부력인자들의 상호작용에 의한 유동현상을 의미한다. 이중확산유동은 해양학, 지구물리학 및 천체물리학 등의 분야에서 관찰되고 태양연못, 액체가스저장, 건조과정 그리고 구조, 응고, 결정성장과 같은 재료 가공 분야등과 밀접하게 관련되기 때문에 지난 20여 년간 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 최근 첨단 산업의 발달로 말미암아 고순도 결정체의 제조를 위한 기술개발이 절실해짐에 따라 이에 대한 연구는 보다 활발해지고 있다.^{1,2)}

이중확산유동은 어느 한 부력인자만에 의한 자연대류와 달리 두 부력인자가 공존하기 때문에 이들의 상호작용 방향에 따라 여러가지 유형으로 나눌 수 있으며 확산율의 차이 때문에 뜻밖의 현상이 많이 관찰되고 있다.^{3,4)} 성층화된 영역에 수평방향으로 온도구배를 가해주는 유형에 대한 고전적 연구로는 Thorpe 등⁵⁾, Chen 등⁶⁾과 Wirtz^{7,8)} 등을 들 수 있으며, 이들은 이중확산유동의 경우 순수 자연대류와 달리 여러 개의 셀이 공존하는 층을 이룬 유동형태를 갖게됨을 밝혔다. 최근 Lee 등^{9,10)}은 성층화된 온도와 농도차에 의한 부력비에 따라 4가지 유동형태가 존재함을 밝혔고 Bergman 등¹¹⁾은 층의 파괴과정에 대해 보고하였다.

수평 방향으로 온도 및 농도구배가 가해지는 경우에 대한 연구는 Wang¹²⁾에 의해 처음 시도된 이래 Kamotani 등¹³⁾과 Lee 등¹⁴⁾에 의해 연구되어 왔다. 특히 Lee 등¹⁴⁾은 Ra_T 와 Ra_S 의 상관관계에 의한 단일셀 및 여러 개의 유동형태를 찾아내었고 Jiang 등²⁾도 부력비에 따른 유동형태 및 진동현상을 보고하였다.

본 연구에서는 온도 및 농도차가 중력과 수직으로 작용하는 경우에 있어서 수평경계면이 단열 및 등온조건을 갖는 경우에 대해 웨도우그래프

(Shadowgraph) 방법을 사용하여 유동층의 생성 및 인접면의 변형과정을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험부위의 개략도는 Fig. 1(a)와 같다. 실험장치는 측정부위인 직각 밀폐용기와 수직벽면에 등은 및 등농도를 유지시켜 주기 위한 2개의 보조용기로 구성된다. 이때 직각 밀폐용기는 높이 60mm, 폭 30mm, 길이 120mm로 종횡비(Aspect Ratio)가 2.0이 되도록 하였다.

전체 실험용기는 두께 10mm인 아크릴 판으로 제작하였고 직각 밀폐용기의 경우 실험조건에 맞도록 경계조건을 유지시키기 위해 단열 수평경계면의 경우 열전도율이 낮은 베이클라이트 판(두께 10mm)을 사용한 반면, 등은 수평면의 경우에는 알루미늄 판에 홈을 내어 일정 온도의 물을 항온조로부터 공급함으로써 상·하벽 등온의 밀폐용기를 제작하였다. 또한 열손실을 최소화하기 위해 두께 30mm인 스티로폴로 외부와 단열시켰다. 수직벽면의 경우 등은 및 등농도 조건을 동시에 만족시키기 위해 밀폐용기와 보조용기 사이에 삼투막을 설치하였고 그 사이에서의 누수를 방지하기 위해 고무판을 보조용기에 붙이고 길이 30cm인 4개의 볼트를 이용하여 두 보조용기의 양단벽을 통해 체결하였다.

밀폐용기 내의 온도는 지름 1.0mm인 스테인레스 관 속에 열전대를 넣은 프루브(Probe)를 만들어 밀폐용기 윗벽에서 집어 넣어 필요한 위치에서 온도를 측정하였고, 농도는 밀폐용기 뒷면의 중앙부에 수직방향으로 5mm 간격으로 뚫어 놓은 구멍을 통해 주사바늘로 미량의 용액을 채취하여 굴절율을 측정함으로써 농도를 조사하였다.

모든 실험의 시험유체로는 증류수와 소금물을 사용하였다. 실험이 시작되기 전에 양단 농도차의 1/2이 되는 소금물을 밀폐용기 내에 미리 주입시켜 각 수직벽면에서의 삼투압을 같게하여 양단 수직벽을 통하여 밀폐용기로 유·출입되는 물의 양을 같도록 하는 한편, 실험조건에 맞춘 온도와 농도의 소금물과 순수한 물을 항온조로부터 양 보조용기에 계속 순환시켜 온도와 농도구배를 수

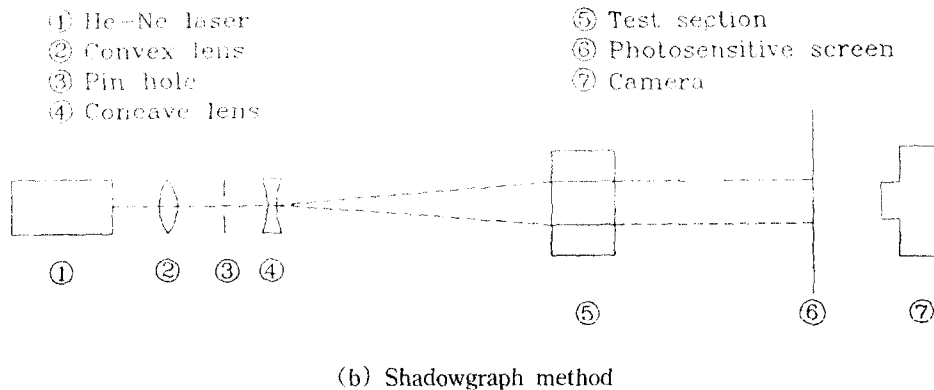
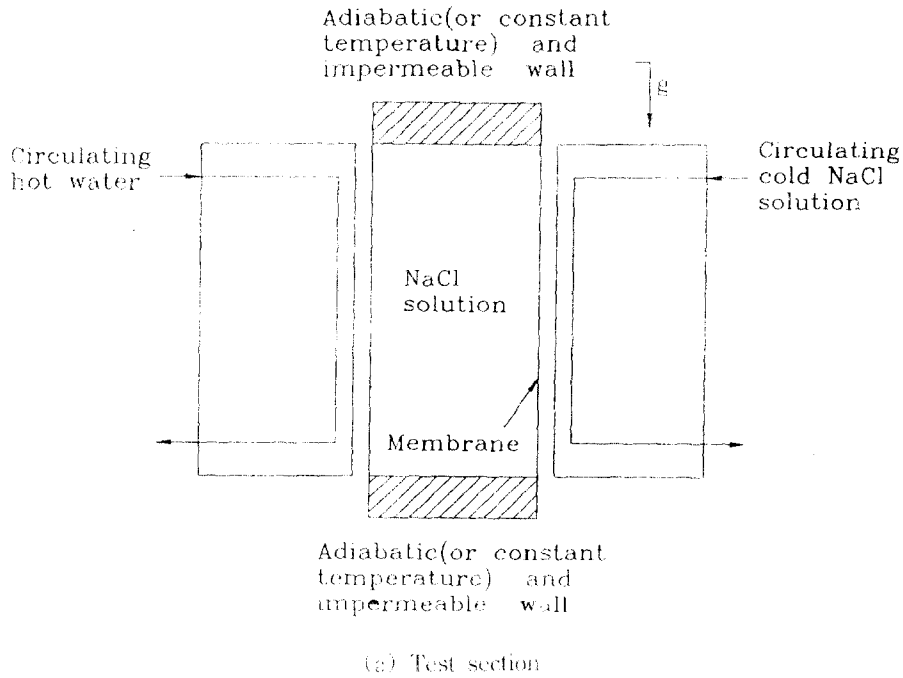


Fig. 1 Schematic diagram of test section and shadowgraph method

평방향으로 동시에 가해 주었다. 이때 시험용기의 오른쪽 보조용기에는 저온이며 고농도인 소금물을 공급하는 반면 왼쪽 보조용기에는 고온인 증류수를 공급하여 온도 및 농도구배에 의한 자연 대류의 순환방향이 모두 시계방향이 되도록 하였다(Fig. 1(a)).

가시화방법으로는 유동형태가 계속 변하기 때문에 일반적으로 사용하는 다이(Dye) 주입법은

부적합하여 Fig. 1(b)와 같은 섀도우그래프 방법을 이용하였다. 30mW의 He-Ne 레이저에서 나오는 광선을 볼록렌즈를 이용하여 초점을 모은 다음 그 초점 거리에 핀홀(Pin Hole)을 설치하여 주변 노이즈를 제거한 후 오목렌즈를 이용하여 광선을 확대시키고, 이를 시험용기에 비추어 스크린에 투영된 영상을 사진기로 촬영하였다.

본 실험의 실험영역은 $AR=2.0$, $Ra_T=1.0 \times$

$10^7 \sim 5.9 \times 10^7$, $Ra_s = 2.4 \times 10^8 \sim 3.0 \times 10^8$ 이고 $N=5$. $0 \sim 24.2$ 이며 본 실험에서 준정상상태에 이르기까지는 약 4시간이 소요되었다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험은 온도와 농도구배가 수평방향으로 작용하는 경우에 대한 이중확산유동으로 Fig. 1(a)에서 보듯이 상·하부벽 모두 단열인 경우(CASE 1), 상부벽은 등온이고 하부벽은 단열인 경우(CASE 2) 그리고 상·하부벽 모두 등온(CASE 3)인 경우에 대해 조사하였다. 이때 수평 등온조건인 경우 고온벽과 저온벽의 평균온도로 수평벽면의 온도를 유지시켰다.

준정상상태에서의 밀폐용기 내의 전체유동은 온도 및 농도구배의 상관 관계에 따라 단일셀 유동형태(Unicell Flow Pattern, Fig. 2)와 여러 개의 셀 유동형태(Multi-Layered Flow Pattern, Fig. 3)의 2종류로 나타났다. 본 실험의 경우 온도 및 농도차에 의한 자연대류 유동이 같은 방향(시계방향)으로 회전하기 때문에 두 부력이 서로 상승각을 일으켜 밀폐용기 내에는 항상 단일셀 유동형태가 존재하리라 예상된다는 점에서 여러 개의 셀 형태의 유동은 뜻밖의 현상이었다. 이와

같은 2가지 유동형태는 기존연구^{13,14)}에서도 보고된 바 있는데 상부벽 등온인 CASE 2와 상·하부벽 등온인 CASE 3에서도 수평 단열조건인 CASE 1과 다름없이 관찰되었다.

Fig. 2에는 각 CASE에 따른 단일셀 유동형태의 사진을 제시하였다. 이러한 유동형태는 비교적 부력비가 작은 경우($N=5.0$)에 관찰되며, 온도차에 의한 부력이 농도차에 의한 부력보다 상대적으로 크기 때문에 그 유동속도는 매우 빠르다. CASE 2와 3의 경우 수평벽면 근처에 거의 정체된 듯이 보이는 작은 유동이 형성되기는 하나 밀폐용기 내부로 성장하지는 못한다.

그러나 부력비가 큰 경우($N=24.2$)에는 Fig. 3에서와 같이 밀폐용기 내에서는 층을 이룬 유동형태가 나타나 복잡한 유동형태를 보이고 있다. 본 실험범위에서는 CASE 1~3 모두 4개의 셀이 형성되고 있다. 이러한 2가지 유동형태의 형성과정을 Fig. 4와 5에 제시하였다.

Fig. 4는 CASE 2의 경우에 있어서 단일셀 형성 과정을 보여주고 있다. 부력비가 작은 경우($N=5.0$) 온도차에 의한 부력이 지배적이므로 전체유동은 처음부터 준정상상태에 이를 때까지 단일셀 유동으로 나타남을 Fig. 4(a)~(d)에서 알 수 있다. 그러나 CASE 2와 CASE 3의 경우 수평등온

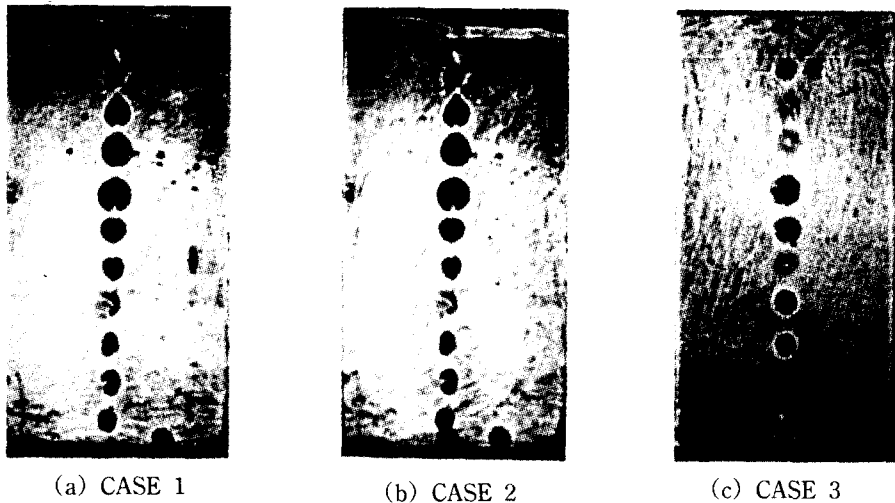


Fig. 2 View of unicell flow pattern at quasisteady state ; $Ra_T = 5.9 \times 10^7$, $N=5.0$

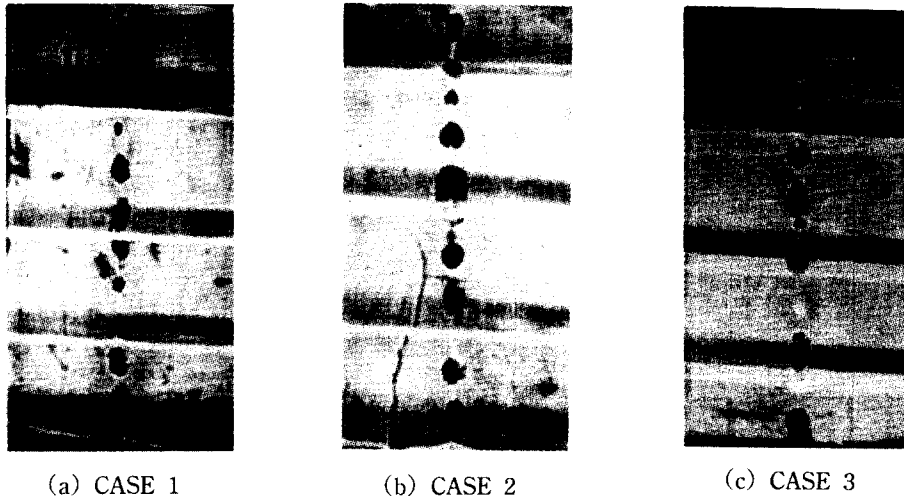


Fig. 3 View of multi-layered flow pattern at quasi-steady state ; $Ra_T=5.9 \times 10^7$, $N=5.0$

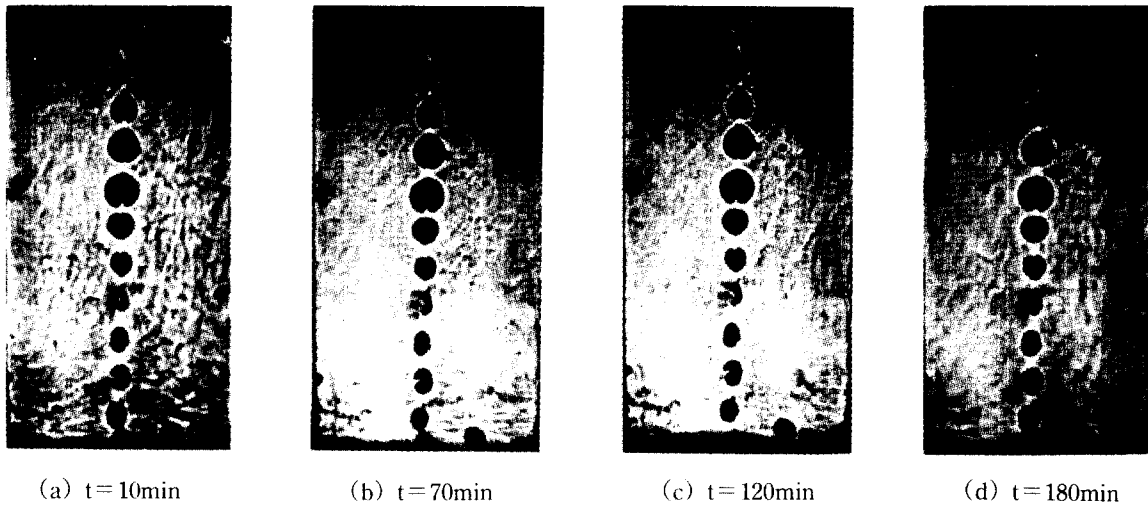


Fig. 4 View of layer formation with time for CASE 2 ; $Ra_T=5.9 \times 10^7$, $N=5.0$

조건 때문에 수평경계면 근처에 인접면이 형성되기는 하나 시간이 경과하여도 내부셀의 부력 때문에 성장하지는 못하여 단일셀 유동으로 나타난다(Fig. 4). 그러나 종횡비가 낮아 수평벽면의 영향이 증대되는 경우에는 등온 수평경계면 효과가 나타나 밀폐용기 위 벽면 근처에 새로운 유동층이 형성될 것으로 생각된다.

Fig. 5에는 CASE 3의 경우에 있어서 여러 개의 층을 이룬 형태의 유동 형성과정을 제시하였다. 초기에는(Fig. 5(a)) 확산율이 큰 온도차에 의한 단일셀 유동이 관찰되나 Fig. 5(b)에서처럼 시간이 경과하면서 농도차에 의한 유동에 의해 밀폐용기 위·아래면에서 소금이 성층화되면서 밀폐용기 위·아래경계면에서 새로운 유동층이 형성

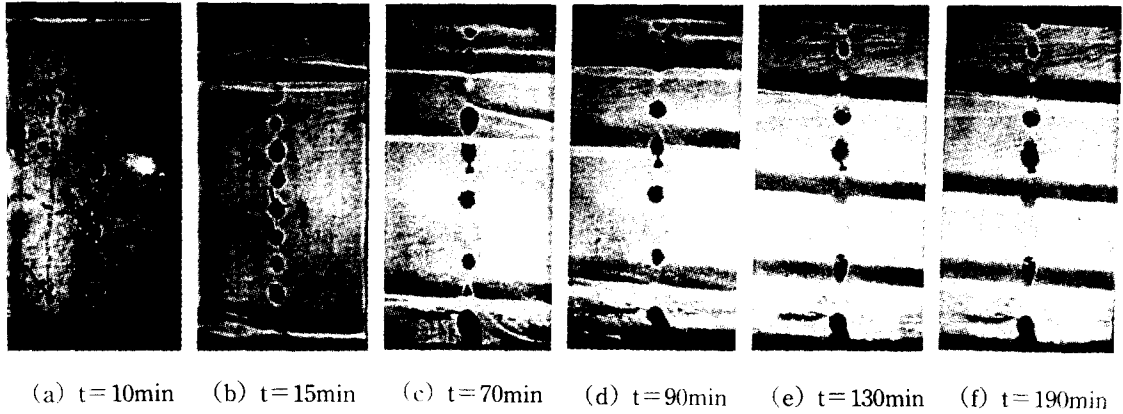


Fig. 5 View of layer formation with time for CASE 3 ; $Ra_T = 1.0 \times 10^7$, $N = 24.2$

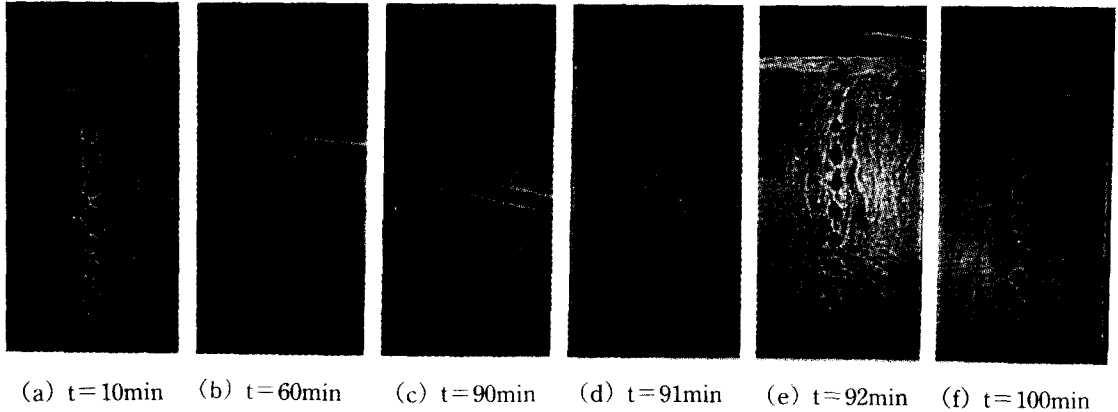


Fig. 6 View of layer formation with time for CASE 1 ; $Ra_T = 2.9 \times 10^7$, $N = 9.2$

된다. 새로 형성된 대류층은 차차 두꺼워지며 일정한 크기까지 성장한 후 밀폐용기 벽면에서 분리되며, 이후 벽면에서는 다시 새로운 셀이 형성되기 시작한다(Fig. 5(c)와 (d)). 여러 개의 층을 이룬 유동의 경우 계속해서 이런 형태로 층이 형성되는데 그 후 각 셀의 크기는 두 부력인자의 상관 관계에 따라 적당한 크기로 성장 혹은 축소되면서 준정상상태에 이른다. 이와 같은 경향은 수평경계면 조건이 다른 CASE 1과 CASE 2에서도 관찰되어 본 실험영역에서는 수평경계면의 변화에 따른 유동형태의 형성 과정상 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 또한 새로운 대류층은 밀폐

용기 하부벽면보다 상부벽면에서 훨씬 활발하게 진행된다.

Fig. 6은 CASE 1의 경우로 $Ra_T = 2.9 \times 10^7$, $Ra_S = 2.7 \times 10^8$ ($N = 9.2$)인 조건에서 시간에 따른 유동형태의 변화과정을 제시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 초기에 밀폐용기 윗면에서 셀이 형성되어 밀폐용기 내부로 성장(Fig. 6(a)와 (b))하다가 $t = 90$ min(Fig. 6(c))에 이르러 인접면의 기울기가 커지더니 파괴되어 위·아래 셀이 하나로 합쳐진다(Fig. 6(d)와 (e)). 그 후 밀폐용기 윗벽면에서 형성된 대류층이 다시 성장해가며(Fig. 6(e)와 (f)) 다시 파괴되는 과정을 반복하였다. 이러한

생성, 성장, 파괴의 과정이 되풀이 되는 현상은 $N=9.2$ 인 CASE 2와 CASE 3에서도 관찰되어 단일셀과 여러 개의 층을 이룬 유동사이에서 셀의 생성과 파괴가 반복되는 영역이 있음을 확인할 수 있었다.

이와 같은 현상은 셀의 형성과정에서 밀폐용기 윗면에서 먼저 셀이 형성되는 것과 마찬가지로 윗벽에서 생성된 제2의 셀이 내부로 성장하면서 그 셀의 두께가 커짐에 따라 온도차에 의한 부력도 증가하여 모멘텀이 증가하게 되고, 또한 시간이 경과함에 따라 인접면에서 위·아래 셀간의 열 및 물질확산이 충분히 이루어져 두 셀간의 밀

도차가 감소하므로 생기는 현상으로 사료된다.

Fig. 7에는 단일셀 유동이 나타날 때, Fig. 8에는 여러 개의 셀 유동일 때 밀폐용기 중앙에서의 수직방향 온도 및 농도분포를 각각 도시하였다 (CASE 1). 이때 온도는 시간에 따른 분포를 조사하였고 농도는 준정상상태에서의 분포를 조사하였다.

단일셀 유동이 나타나는 경우(Fig. 7) 온도분포는 온도차만에 의한 자연대류와 마찬가지로 열경계층을 제외한 전 영역에서 거의 선형적으로 성층화되어 복합부력에 의한 효과를 전혀 관찰할 수 없다. 이때 농도는 빠른 유동에 의하여 밀폐

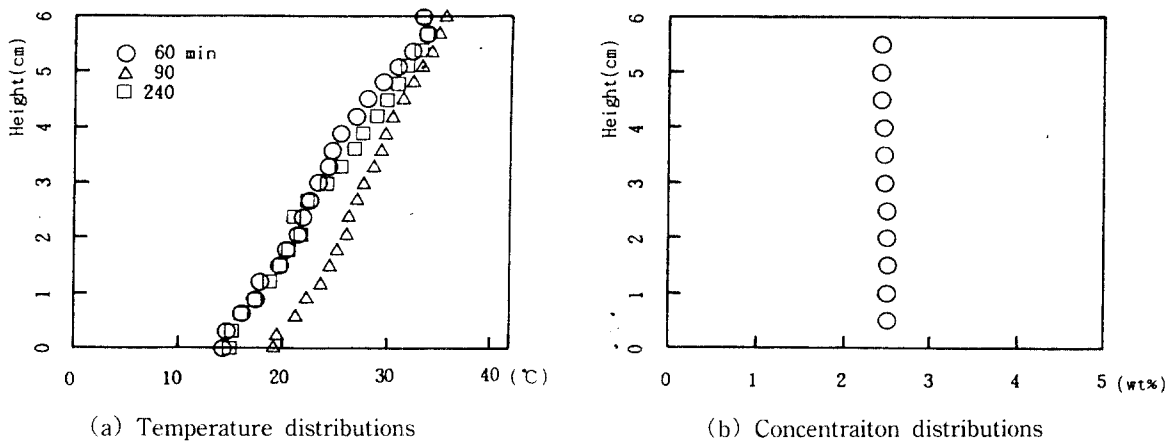


Fig. 7 Vertical temperature and concentration profiles at mid-section for CASE 1 ; $Ra_T = 5.9 \times 10^7$, $N = 5.0$

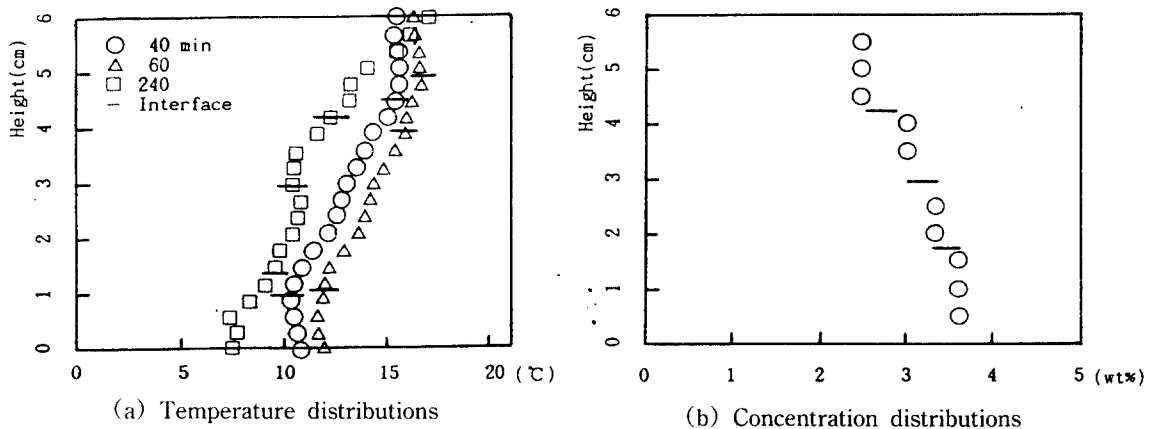


Fig. 8 Vertical temperature and concentration profiles at mid-section for CASE 1 ; $Ra_T = 1.0 \times 10^7$, $N = 24.2$

용기 전역에서 균일하게 분포하고 있다.

Fig. 8과 같이 여러 개의 층이 생성되는 경우 시간에 따라 셀의 갯수가 변하는데 $t=40\text{min}$ 에서 3개의 층이 형성되었다가 $t=60\text{min}$ 에 이르러 새로운 셀이 밀폐용기의 상부벽에서 생성되어 셀이 4개가 되고 그 후 각 셀의 두께가 조금씩 달라지면서 준정상상태에 이른다. 이때 각 셀 내부에서의 온도분포는 대류에 의한 열전달이 되고 있음을 알 수 있다. 농도의 경우 각 셀 내부에서는 균일하게 분포되어 각 셀의 유동 속도가 꽤 빠름을 알 수 있다. 또한 셀 사이의 인접면에서 살펴보면 온도는 큰 변화가 없지만 농도는 급격히 변하고 있다. 이런 현상은 열과 소금의 확산율의 차 ($Le=100$) 때문에 생기는 현상으로 확산율이 큰 온도는 인접층으로 충분히 확산되지만 확산율이 작은 농도는 인접층끼리 확산이 충분히 일어나지 않기 때문에 인접면에서 급격한 변화를 보인다.

4. 결 론

본 논문은 종횡비가 2.0인 직각 밀폐용기 내에 수평방향으로 온도 및 농도구배가 가해지는 이중 확산유동에 관한 연구로 수평경계면의 조건을 단열 및 등온인 경우에 대해 유동형태를 조사하고 그에 따른 온도 및 농도분포를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 실험영역에서 수평경계면 조건의 변화에 따른 유동형태의 차이는 없다. 그러나 수평경계면이 등온인 경우 단일셀 유동에서 전도 열전달에 의해 상부벽면 근처에 작은 정체층이 존재한다.
2. 유동형태는 부력비가 작은 경우에는 단일셀 유동이, 큰 경우에는 여러 개의 층을 이룬 유동이 생성되며, 두 유동현상 사이에 셀이 생성되어 성장하다가 파괴되는 과정을 반복하는 영역이 존재한다.
3. 셀 내부에서의 온도분포는 대류에 의한 효과를 보이며 농도는 균일하게 분포한다. 인접면에서는 확산율의 차이 때문에 온도는 큰 변화가 없는 반면 농도는 크게 변한다.

후 기

이 논문은 1992년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모(지방대학육성)과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) Pimputkar, S. M. and Ostrach, S., "Convective Effects in Crystals Growth from Melt", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 55, pp. 614-646, 1981.
- 2) Jiang, H. D., Ostrach, S. and Kamotani, Y., "Unsteady Thermosolutal Transport Phenomena Due to Opposed Buoyancy Forces in Shallow Enclosures", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 135-140, 1991.
- 3) Turner, J. S., *Buoyancy Effects in Fluids*, Cambridge University Press, Cambridge, 1974.
- 4) Ostrach, S., "Natural Convection with Combined Driving Forces", *Physico-Chemical Hydrodynamics*, Vol. 1, pp. 233-247, 1980.
- 5) Thorpe, S. A., Hutt, P. K. and Soulsby, R., "The Effect of Horizontal Gradients on Thermohaline Convection", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 38, pp. 375-400, 1969.
- 6) Chen, C. F., Briggs, D. G. and Wirtz, R. A., "Stability of Thermal Convection in a Salinity Gradient Due to Lateral Heating", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 14, pp. 57-65, 1971.
- 7) Wirtz, R. A., Briggs, D. G. and Chen, C. F., "Physical and Numerical Experiments on Layered Convection in a Density Stratified Fluid", *Geophysical Fluid Dynamics*, Vol. 3, pp. 265-288, 1972.
- 8) Wirtz, R. A., "The Effect of Solute Layering on Lateral Heat Transfer in an Enclosure", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 20, pp. 1299-1305, 1977.

- 9) Lee, J., Hyun, M. T. and Kang, Y. S., "Confined Natural Convection Due to Lateral Heating in a Stably Stratified Solution", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, pp. 869-875, 1990.
- 10) Lee, J., Hyun, M. T. and Moh, J. H., "Numerical Heat Transfer in a Stably Stratified Solution Due to Side-Wall Heating", *Numerical Heat Transfer*, Vol. 18, pp. 343-355, 1990.
- 11) Bergman, T. L. and Ungun, A., "A Note on Lateral Heating in a Double-Diffusive System", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 194, pp. 175-186, 1988.
- 12) Wang, L. W., "Experimental Study of Natural Convection in a Shallow Horizontal Cavity with Different End Temperatures and Concentrations", Ph. D. Thesis, Dept. of Mech. and Aerospace Engrg., Case Western Reserve Univ., Cleveland, Ohio, 1982.
- 13) Kamotani, Y., Wang, L. W., Ostrach, S. and Jiang, H. D., "Experimental Study of Natural Convection in a Shallow Enclosure with Horizontal Temperature and Concentration Gradients", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, pp. 165-173, 1985.
- 14) Lee, J., Hyun, M. T. and Kim, K. W., "Natural Convection in Confined Fluids with the Combined Horizontal Temperature and Concentration Gradients", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 1969-1977, 1988.