

성층화된 밀폐용기내의 수평방향 온도구배에 의한 자연대류에 관한 실험적 연구

고장권*, 현명택*

Experimental Study on Natural Convection Due to Horizontal Temperature Gradients in a Stably Stratified Enclosure

Koh Jang-gwun*, Hyun Myung-taek*

ABSTRACT

Experimental investigations have been conducted to study natural convection of a stably stratified salt-water solution due to lateral heating in a rectangular enclosure of aspect ratio, 3.0. Depending on the buoyancy ratio, N , which represents the relative magnitude of solutal stratification to thermal buoyancy, four distinct flow regimes are observed. Formation and growth of the four layered flow structures is visually observed and described, with the corresponding temperature and concentration distributions in each layer.

기호설명

Ar aspect ratio, H/L
 ΔC concentration difference (wt%)
 D Diffusivity of salt (m^2s^{-1})
 g acceleration due to gravity (ms^{-2})
 H height of the enclosure (m)
 L width of the enclosure (m)
 Le Lewis number, α/D
 N buoyancy ratio, $\beta\Delta C/\beta\Delta T$
 Pr Prandtl number, ν/α
 Ra_s solutal Rayleigh number, $g\beta\Delta CH^3/\nu\alpha$

Ra_t thermal Rayleigh number, $g\beta\Delta TH^3/\nu\alpha$
 Sc Schmidt number, ν/D
 ΔT temperature difference ($^{\circ}C$)
 X horizontal coordinate (m)
 Y vertical coordinate (m)

Greek symbols

α thermal diffusivity (m^2s^{-1})
 β thermal expansion coefficient ($^{\circ}C^{-1}$)
 β solutal expansion coefficient (wt% $^{-1}$)
 ν kinematic viscosity (m^2s^{-1})

* 기관공학과

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, 지각내의 맨틀유동, 태양연못, 액체가스저장 그리고 주소, 응고, 결정성장과 같은 재료가공 분야 등과 밀접하게 관련되어 지난 20여년 동안 많은 연구가 진행되고 있다¹⁾. 특히 최근 첨단 산업의 발달로 말미암아 보다 고순도의 결정이 필요해짐에 따라 이에 대한 연구는 더욱 활발해지고 있다²⁾.

이중확산유동은 중력장과 두 부력인자의 상호 작용방향에 따라 여러가지 대류양상이 존재하며³⁾ 초기의 연구는 해양에서의 특이한 온도 및 농도 분포를 초래하는 "salt-finger" 현상이나 "salt fountain" 현상이 나타나는 불안정한 유형(unstable mode)을 규명하는데 국한되었으며 이에 대해서는 Turner⁴⁾에 의해 잘 정리, 소개되어 있다. 1970년대에 이르러 성층화된 용액에 수평방향으로 온도구배가 가해질 때의 유동현상에 관한 연구⁵⁻⁷⁾가 수행되어 층을 이룬 유동형태가 나타남이 밝혀졌고, 아주 최근 수평방향으로 온도 및 농도 구배가 가해질 때 밀폐용기내의 유동형태에 관한 연구가 발표되었다.¹⁰⁻¹²⁾

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. Thorpe등⁵⁾은 선형 지배방정식에서 유동이 유발되는 임계조건에 관한 식을 제시하였고 이를 실험을 통해 대체로 일치함

을 보였으며 수직평판에서의 유동이 여러 개의 층을 이룬 유동으로 나타남을 처음 밝혔다. 이에 대한 보다 자세한 연구는 Chen등⁶⁾, Wirtz등⁷⁾에 의해 시도되어 Thorpe등⁵⁾과 마찬가지로 층을 이룬 유동 형태를 관찰하였으며, 임계 Rayleigh수 이하에서는 상·하 수평경계면에서부터 롤(roll)이 발생하여 내부로 성장되는 반면 임계 Rayleigh수 이상에서는 고온벽면 전체에서 롤이 동시에 생성되어 셀 형태의 유동(cellular motion)으로 발전함을 관찰하였다. 또한 시간이 경과하면서 밀폐용기의 수직벽면에서 형성된 셀을 그 아래 혹은 위의 셀과 합쳐지면서 전체적으로 셀의 갯수가 감소함을 밝혔다.

성층화된 용액내의 자연에 관한 지금까지의 연구는 주로 층이 형성되는 메카니즘을 밝히는데 주안점을 두었고 일단 유동이 유발되면 수평경계면에서의 농도경계조건을 만족시켜 주지 못하였기 때문에 부력비에 따라 나타나는 여러가지 유동형태와 그에 따른 온도 및 농도분포에 관해서는 전혀 연구되지 않는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 중평비가 3.0인 밀폐용기내에 성층화된 소금물의 수평경계면에 삼투막을 설치하여 수직방향으로 일정농도를 유지시켜 주는 한편 수평방향으로 온도구배를 가해주었을 때 두 부력인자의 상대적 크기, 즉 부력비에 따라 나타나는 유동형태와 그에 따른 온도 및 농도분포를 실험적으로 관찰, 조사하였다.

실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치의 개략도는 그림 1과 같다. 실험장치는 직각밀폐용기와 그

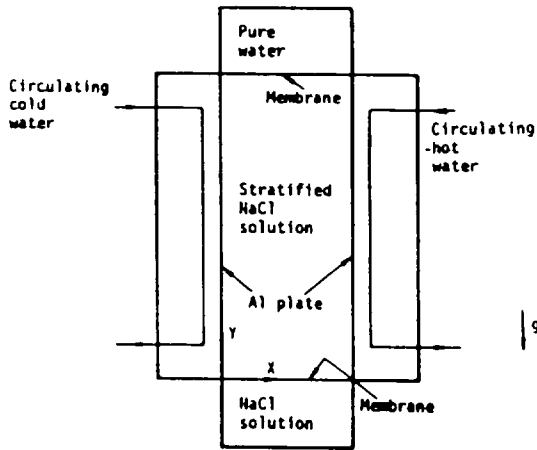


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

상하에 연결된 2개의 수조 그리고 좌우에 설치된 2개의 보조용기로 나뉘면 수평경계면에는 삼투막을, 수직경계면에는 열전도율이 좋고 녹이 잘 안 생기는 알루미늄판(두께 2mm)을 각각 설치하였다. 이때 상하 수조에는 일정한 농도의 용액이 주입되고 보조용기에는 다른 온도의 물이 순환되기 때문에 수직방향 온도구배와 수평방향 온도구배가 밀폐용기에 가해지게 된다. 수평경계면에서의 경계조건은 단열이며 등농도여야 하나 삼투막을 사용하기 때문에 이 조건들을 동시에 만족시켜 줄 수 없어서 윗 수조에는 순수한 물을 아랫수조에는 수평경계면에서의 농도와 같은 농도의 용액을 넣어 수평경계면에서의 등농도조건만 만족되도록 하였다. 직각밀폐용기의 크기는 폭 40mm, 높이 120mm 그리고 깊이 100mm로 $Ar=3.0$ 이다.

각 실험용기는 두께 10mm인 아크릴판으로

제작하였고 외부로의 열손실을 최소화하기 위하여 30mm 두께의 스티로폴로 단열시켰다. 또한 각 보조용기에 유, 출입되는 유량은 밸브로 조절하였으며 보조용기의 입, 출구에 열전대(copper-constantan)을 설치하여 유, 출입되는 용액의 온도를 조사하였으며 고, 저온 벽면에서의 온도가 균일하게 유지되는가를 살펴보기 위해 각 등온벽(수직벽)에 5개씩의 열전대를 설치하였다.

모든 실험의 시험유체로는 증류수와 소금물을 사용하였으며 실험을 신속하게 실행하기 위해 수평방향으로 온도구배를 가해주기 전에 먼저 밀폐용기내의 용액을 성층화시켰다. 성층화 방법으로는 Oster¹²⁾을 이용하였으며 보다 성형적으로 성층화 된 조건에서 실험하기 위하여 용액을 주입한 후 2~3시간 경과후 온도구배를 가해주었다(그림 2).

밀폐용기내의 온도분포는 $X/L=1/2$ 의 위치에서 열전대 이송장치를 이용하여 연속적으로 측정하였다. 모든 온도 데이터는 증폭시켜 펜기록계(Yokogawa Electric Works)를 이용하여 기록하였다. 또한 농도는 온도 측정부위와 같은 위치에서 수직방향으로 5mm간격으로 뚫은 구멍을 통해 미량의 소금물을 추출한 다음 그 소금물의 굴절율을 굴절율측정기(Attago, Abbe Refractometer Type 1)로 조사하여 미리 표준용액을 기초로 하여 만든 기준표와 비교함으로써 소금물의 농도를 산출하였다. 이러한 온도와 농도분포를 일정한 시간간격으로 측정하여 유동형태를 관찰하여 밀폐용기내에서의 이중확산유동에 의한 시간에 따른 변화 및 정상상태(steady state)에서의 유동형태와 온도, 농도분포를 조사하였다. 이때 온도와 농도를 반복하여 측정한 결과 온도는 $\pm 3\%$.

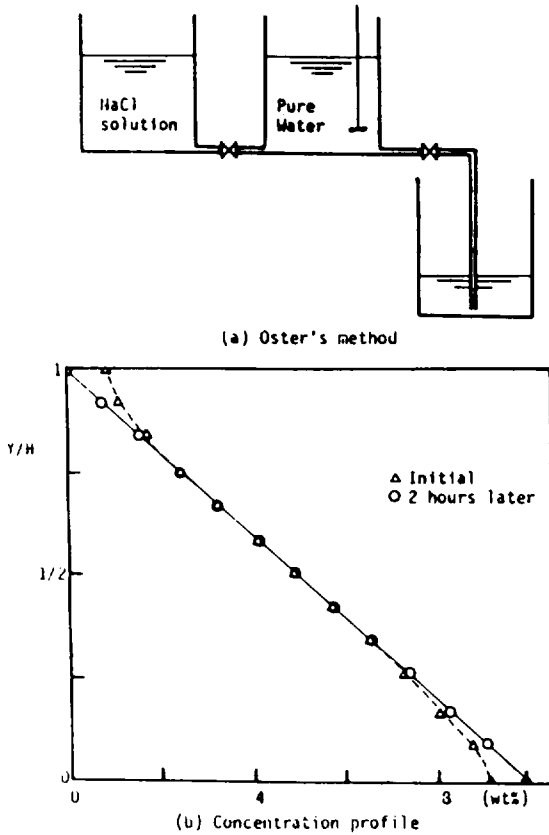


Fig. 2 Oster's method and the corresponding concentration profile at $X/L=1/2$

농도는 $\pm 5\%$ 의 실험오차를 보였다. 밀폐용기 내의 유동현상을 가시화(visualization)하기 위해 밀폐용기내의 소금물의 평균 농도와 같은 농도의 소금물에 붉은 물감을 조금 섞어서 단든 다이(dye)를 주사기로 밀폐용기내에 주입한 후 카메라 및 비디오 카메라로 촬영하여 유동형태와 그 변화를 관찰하였다.

본 연구의 실험영역은 $Ar=3.0$, $Pr=4.5-6.5$, $Sc=454-650$, $Ra_s=9.21 \times 10^7-1.01 \times 10^8$

($\Delta T=2.5-15.7C$), $Ra_s=4.17 \times 10^8-1.37 \times 10^{10}$ ($\Delta C=5-15wt\%$) 그리고 $N=7.1-98.1$ 이며 무차원수의 계산에 필요한 물성치(property)들은 양단의 온도 및 농도의 평균값에 대한 값으로 참고문헌¹⁴에서 계산하였다.

실험결과 및 고찰

본 실험에 있어서 유동형태는 초기 농도구배와 수평방향의 온도구배에 따라 4가지로 나타났으며 그림 3에 대표적인 유동형태를 제시하였다. 그림 3(a)에서와 같이 온도차에 의한 부력이 매우 작을 때(부력비가 아주 클때, $N > 55$)에는 아무런 유동이 일어나지 않으며(stagnant flow regime, I), 온도 차에 의한 부력이 조금 증가하면($40 < N < 55$) 밀폐용기의 수평경계면 근처에서만 층을 이룬 유동형태로 나타나고(그림 3(b), successively formed layer flow regime, II), 더 큰 온도구배에 의한 조건($10 < N < 40$)에서는 그림 3(c)에서와 같이 밀폐용기 전역에서 층을 이룬 유동형태가 나타났다(simultaneously formed layer flow regime, III), 그러나 온도구배가 더 증가하여 온도차에 의한 부력이 아주 큰 경우(부력비가 아주 작은 경우, $N < 10$)에는 그림 3(d)에서 처럼 전체유동은 단일셀로 나타났다(unicell flow regime, IV). 각 유동형태의 생성과정은 그림 4에 스케치하였다.

Ra_s 와 Ra_c 에 따른 각 유동형태의 영역을 도시하면 그림 5와 같다. 일정한 Ra_s 값에 대해 Ra_c 의 값이 증가할수록(온도구배가 증가할수록) 유동형태가 영역 I에서 온도차만에 의한 단일셀 영역(영역 IV)으로 바뀐다. 이와 같은 4가지 유동형태는 이전의 연구자들의 결과

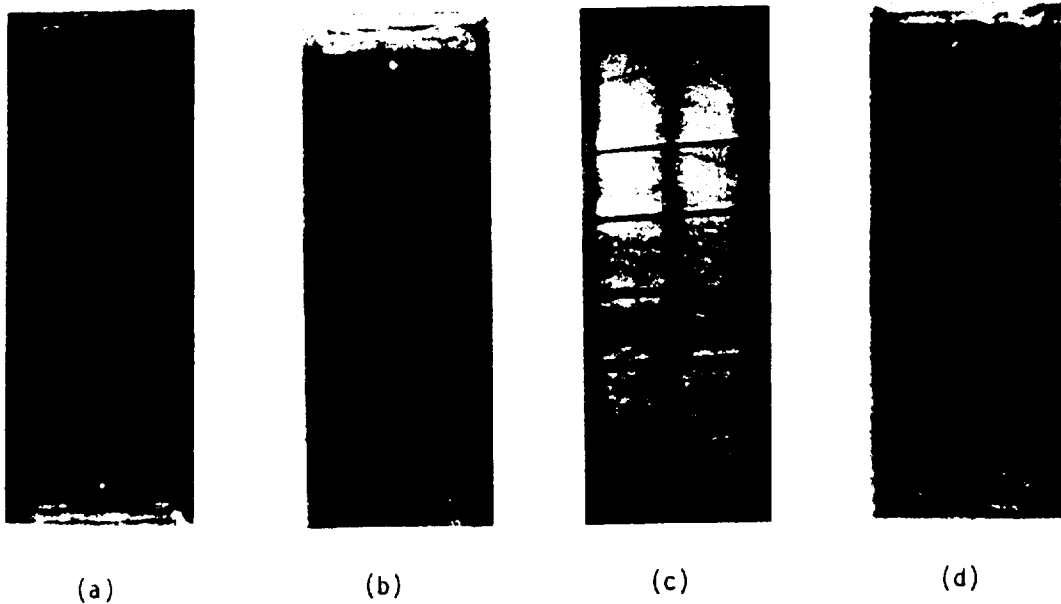


Fig. 3 Typical flow patterns in the enclosure :

- (a) Solutal effect dominant: $Ra_r = 1.43 \times 10^8$, $Ra_s = 8.43 \times 10^9$ ($N = 58.9$),
- (b) Both effects comparable: $Ra_r = 9.21 \times 10^7$, $Ra_s = 4.61 \times 10^9$ ($N = 50.1$),
- (c) Both effects comparable: $Ra_r = 1.65 \times 10^8$, $Ra_s = 4.17 \times 10^9$ ($N = 25.2$),
- (d) Thermal effect dominant: $Ra_r = 7.08 \times 10^8$, $Ra_s = 5.08 \times 10^9$ ($N = 7.2$)

보다 광범위한 것으로 Chen등⁶⁾과 Wirtz등⁷⁾은 영역 II와 III에 대해서만 언급하였다. 그러나 그들의 실험범위는 $35 < N < 110$ 로 본 실험($7.1 < N < 98.1$)보다 큰 부력비에 대하여 실험하였기 때문에 부력비가 작은 경우에까지 실험영역을 확장하면 영역 IV인 단일셀 유동이 관찰되리라 생각되지만 충분한 실험범위(부력비가 큰 경우)에서도 영역 I이 나타나지 않은 것은 본 실험과 수평 경계조건이 다르기 때문인 것으로 보인다. 그들은 수평경계면에서의 경계조건이 불침투조건으로 밀폐용기 수평경계면 근처에서 소금이 비선형적으로 성층화되기

때문에 아주 작은 온도차에서도 경계면 근처에서 유동이 발생하지만 본 실험에서는 거의 선형적으로 성층화되기 때문에(그림 2) 어느 정도 큰 온도차($N < 55$)가 가해져야 유동이 일어난다.

정상상태에 다다랐을때 유동형태에 따른 $X/L = 1/2$ 에서의 수직방향 온도 및 농도분포는 그림 6-9에 나타내었다. 온도에 의한 부력이 아주 작은 경우(영역 I) 밀폐용기에는 아무런 유동이 일어나지 않는데 이때 온도는 수직방향으로 일정하여 열전달이 고온벽에서 저온벽으로 전도에 의해 이루어지며 농도는 초기

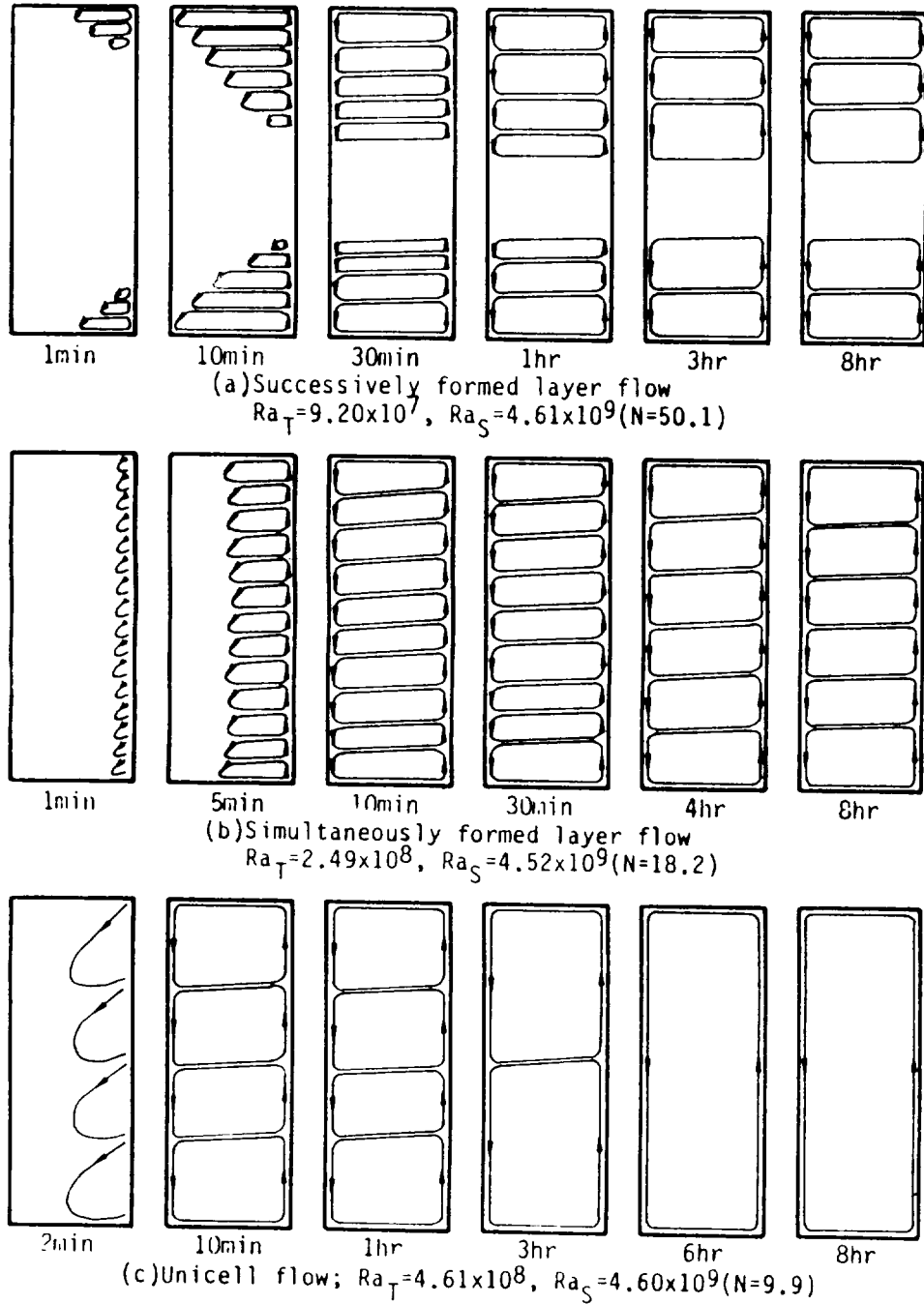


Fig. 4 Formation of various flow structures with time

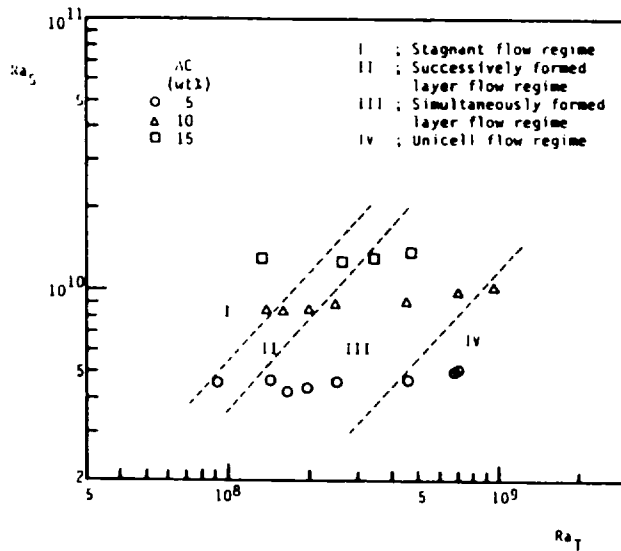


Fig. 5 Flow regimes depending on thermal and solutal Rayleigh numbers

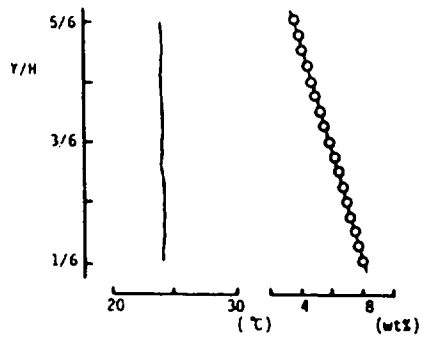


Fig. 6 Vertical temperature and concentration profiles at $X/L=1/2$ for stagnant flow regime: $Ra_T=1.43 \times 10^6$, $Ra_S=8.43 \times 10^9$ ($N=58.9$)

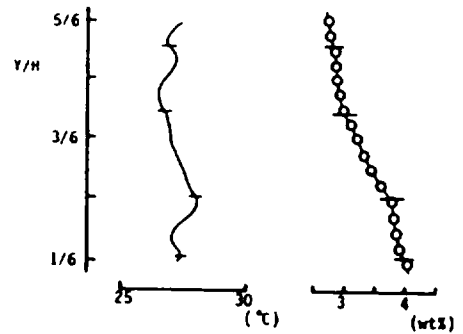


Fig. 7 Vertical temperature and concentration profiles at $X/L=1/2$ for successively formed layer flow regime: $Ra_T=9.20 \times 10^7$, $Ra_S=4.61 \times 10^9$ ($N=50.1$)

의 값 그대로 유지됨을 그림 6에서 알 수 있다. 수평방향 온도구배가 조금 증가하면(영역 II) 그림 4(a)에서 보듯이 밀폐용기의 위, 아래면에서 롤(Roll)이 생성되어 저온벽으로 성장해가면서 롤이 합쳐지고 결국 층을 이룬 유동형태(layered flow pattern)가 되며 층은 밀폐용기 위, 아래면에서 부터 먼저 발달한다. 그러나 이 경우 층의 발달은 수평경계면 근처에 국한되기 때문에 밀폐용기 중앙부에는 층을 이룬 유동형태가 존재하지 않는다. 이때 유동층 내부에서의 온도분포는 대류효과에 의한 영향이 나타나며 농도는 조금 성층화 된다(그림 7). 정체층에서의 열전달은 수직양단과, 아래의 유동층에서 위의 유동층으로 전도에 의해 이루어져 정체층내에서의 온도차에 의한 밀도분포는 불안정하다. 그러나 농도는 그림 7에서 알 수 있듯이 이 영역에서 안정되게 성층화되어 결국 전체적인 밀도분포는 안정하여 정체층에서는 거의 유동을 관찰할 수 없다. 수평방향 온도구배가 더 증가하면(영역 III), 그림 4(b)에서 처럼 고온벽 전역에서 롤이 생성되어 롤 형태의 유동은 저온벽으로 진

행하면서 서로 합쳐지고 결국 비슷한 두께를 갖는 층을 이룬 유동형태가 된다. 이때 Chen 등¹⁾과 Wirtz등²⁾이 제시한 대표 길이는 롤이 형성되는 초기 단계에서 실제 롤의 두께와 대체로 일치하였다. 그러나 저온벽으로 성장하면 롤은 시간이 경과하면서 서로 합쳐지기 때문에 그들이 제시한 대표길이와 달라질 뿐 아니라 부력비가 작은 경우에는 초기에 생성된 롤의 두께도 대표 길이와 불일치 하였다. 부력비가 작은 경우에는 처음에 큰 롤이 형성되며 이들은 합쳐지기 전에 빠른 순간 저온벽까지 성장하여 그대로 층을 이루었다. 본 실험에서는 부력비가 30보다 큰 경우에만 Chen 등¹⁾이 제시한 대표길이와 초기의 롤의 두께가 대체로 일치하였다. 이러한 유동영역에서의 온도 및 농도분포는 그림 8에서 알 수 있듯이 온도의 경우 각 셀 내부에서 역 'S'자 모양으로 분포하여 셀마다 거의 비슷한 형태로 나타나며 농도는 각 셀 내부에서 균일하게 분포된다. 본 실험에서 고온벽이 밀폐용기의 오른쪽에 위치하기 때문에 각 셀의 유동방향은 반시계방향으로 회전하며 셀 사이의 인접면은 저

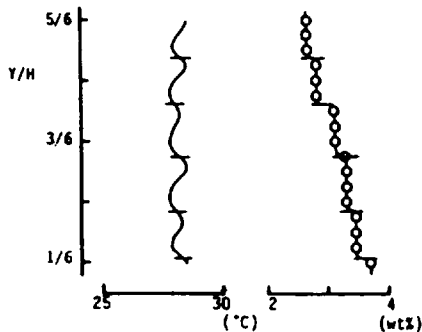


Fig. 8 Vertical temperature and concentration profiles at $X/L=1/2$ for simultaneously formed layer flow regime: $Ra_r=1.42 \times 10^8$, $Ra_s=4.67 \times 10^9$ ($N=32, 9$)

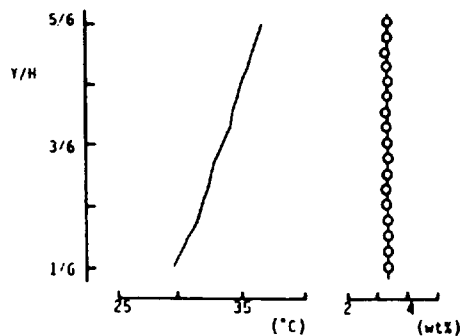


Fig. 9 Vertical temperature and concentration profiles at $X/L=1/2$ for unicell flow regime: $Ra_r=7.08 \times 10^8$, $Ra_s=5.08 \times 10^9$ ($N=7, 2$)

온벽으로 갈수록 밀도가 증가하기 때문에 저온벽으로 접근할수록 조금씩 아래로 경사지며 흐른다. 또한 인접면에서 확산이 빠른 온도는 셀의 유동속도에 관계없이 큰 변화가 없지만(그림 7과 8) 확산이 느린 농도(소금물의 경우 $Le=100$)는 그림 7에서와 같이 유동속도가 느린 셀 사이에서는 완만하게 변하는 반면 속도가 빠른 셀 사이에서는 급격히 변함을 알 수 있다(그림 8).

온도구배가 아주 큰 경우(영역Ⅳ)에는 그림 4(c)에서와 같이 몇 개의 큰 롤이 발생하지만 인접면이 불안정하여 서로 합쳐지기 때문에 밀폐용기에는 아주 빠른 단일셀이 나타난다. 이 경우 온도는 온도차에 의한 자연대류와 마찬가지로^{14, 15)} 코어(core) 영역에서 성층화되며 농도는 밀폐용기 전역에서 균일하게 나타남을 그림 9에서 알 수 있다.

결 론

중횡비가 3.0인 직각 밀폐용기내에 중력방

향으로 안정되게 성층화된 소금물에 수평방향으로 온도구배가 가해지는 이중확산유동에 대해 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유동형태는 부력비가 증가함에 따라 단일셀 유동형태, 용기내부 전체가 층으로 구성된 유동형태, 중심부에 정체층이 존재하는 층을 이룬 유동형태 그리고 전혀 유동이 없는 형태의 4가지로 나타난다.

(2) 유동층내에서의 온도는 역 "S"자 모양으로 분포하고 농도는 균일하게 나타나는 반면 정체층의 경우 온도는 전도에 의해 수직적으로 분포되며 농도는 성층화 된다.

(3) 정체층의 인접면에서는 온도와 농도는 별다른 변화가 없지만 셀 형태의 유동층의 인접면에서는 온도의 경우 거의 변화가 없지만 농도는 확산율이 온도보다 매우 작기 때문에 크게 변한다.

참 고 문 헌

- 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," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 105, 5~20.
- 3) Turner, J.S. and H., Stommel, 1964, "A New Case of Convection in the Presence of Combined Vertical Salinity and Temperature Gradient," *Proceedings of National Academy of Sciences*, Vol. 52, 49~53.
- 4) Turner, J.S., 1979, *Buoyancy Effects in Fluids*, Cambridge University Press, Cambridge.
- 5) Thorpe, S.A., P.K. Hutt and R. Soulsby, 1969, "The Effect of Horizontal Gradients on Thermohaline Convection," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 38, 375~400.

- 6) Chen, C.F., D.G. Briggs and R.A. Wirtz, 1971, "Stability of Thermal Convection in a Salinity Gradient Due to Lateral Heating," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 14, 57~65.
- 7) Wirtz, R.A., D.G. Briggs and C.F. Chen, 1972, "Physical and Numerical Experiments on Layered Convection in a Density Stratified Fluid," *Geophysical Fluid Dynamics*, Vol. 3, pp. 265~288.
- 8) Lee, J., M.T. Hyun and Y.S. Kang, 1988, "Experiments on Confined Thermosolutal Convection," *Heat Transfer on the Second International Symposium*, Vol. 1, 694~710.
- 9) 현명택, 이진호, 모정하, 1989, "밀폐용기 내 성층화된 유체의 자연대류에 관한 수치해석," *대한기계학회 논문집*, Vol. 13, 1321~1329.
- 10) Kamotani, Y., L.W., Wang, S. Ostrach and H.D., Jiang, 1985, "Experimental Study of Natural Convection in Shallow Enclosures with Horizontal Temperature and Concentration Gradients," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, 165~173.
- 11) Lee, J. and M.T., Hyun, 1988, "Experiments on Thermosolutal Convection in a Shallow Rectangular Enclosure," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 1, 259~265.
- 12) Lee, J., M.T. Hyun. and K.W., Kim, 1988, "Natural Convection in Confined Fluids with Combined Horizontal Temperature and Concentration Gradients," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, 1969~1977.
- 13) Oster, G., 1965, "Density Gradients," *Scientific America*, Vol. 213, 70~76.
- 14) Kaufmann, W.H., 1960, *Sodium Chloride*, Reinhold, New York.
- 15) Bejan, A., A.A. Al-Homoud and J., Imberger, 1981, "Experimental Study of High Rayleigh Number Convection in a Horizontal Cavity with Different End Temperatures," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 109, 283~299.
- 16) Yin, S.H., T.Y Wung and K. Chen, 1978, "Natural Convection in an Air Layer Enclosure within Rectangular Cavities," *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 21, 307~315.