

<論 文>

회전하는 원통형밀폐용기내의 아랫면가열에 의한 이중확산대류에 관한 실험적 연구

강신형* · 이태홍** · 전창덕** · 이진호***

(1994년 9월 9일 접수)

Double-Diffusive Convection Due to Heating from Below in a Rotating Cylindrical Cavity

Shin-Hyung Kang, Tae-Hong Lee, Chang-Duk Jeon and Jinho Lee

Key Words: Double-Diffusive Convection(이중확산대류), Rotating Cylindrical Cavity(회전원통용기), Heating-From-Below(아랫면가열), Effective Rayleigh Number(Ra_{η} 수), Taylor Number(Ta 수)

Abstract

Experimental investigations have been made to study the double-diffusive nature of convection of an initially stratified salt-water solution due to heating from below in a rotating cylindrical cavity. The objective is to examine the flow phenomena and the heat transfer characteristics according to the changes in temperature gradient, concentration gradient and rotating velocity of cavity. Thermal and solutal boundary conditions at side wall are adiabatic and impermeable, respectively. The top and bottom plate are maintained each at constant temperature and concentration. The cavity is put into a state of solid body rotation. Like the stationary case, the types of initially-formed flow pattern are classified into three regimes depending on the effective Rayleigh number and Taylor number; stagnant flow regime, single mixed-layer flow regime and successively formed multi-mixed layer flow regime. At the same effective Rayleigh number, the number of initially-formed mixed layer and its growth rate decrease as the effect of rotation increases. The temperature and concentration profiles are both uniform in each layer due to convective mixing in the layered-flow regime, but look both linear in stagnant flow regime and single mixed-layer flow regime. At the interface between adjacent layers, the temperature changes smoothly but the concentration changes rapidly.

기 호 설 명

ΔC : 농도차, {wt%}

Ra_s : 동도 Ra 수 = $g\bar{\beta}\Delta CH^3/\nu$

Ra_T : 열적 Ra 수 = $g\beta\Delta TH^3/\alpha\nu$

Ra_{η} : 유효 Ra 수 = $g\bar{\beta}\Delta T\eta^3/\alpha\nu$

Ta : $Ta = 4\Omega^2 H^4/\nu^2$

ΔT : 온도차, {°C}

t : 시간, {s}

η : 대표길이 = $-\beta\Delta T/\bar{\beta}(dC/dz)_0$, {m}

Ω : 각속도, {rpm}

*건양대학교 기계공학과

**연세대학교 대학원 기계공학과

***정회원, 연세대학교 기계공학과

1. 서 론

자연현상과 공학분야의 전달현상과 관련된 대부분 연구는 대부분 온도나 농도 등 한가지 부력인자에 의한 불균일한 밀도분포에 의해서 생기는 단일 확산유동으로 고려하여 연구되어져 왔다. 그러나 극지방의 해수유동, 대기의 순환 등 해양학, 지질학 등의 자연과학분야와 태양연못(solar pond), 액체가스저장, 결정성장 등^(1~6)과 같은 많은 공학적 응용분야의 전달현상문제에서는 확산율이 다른 여러가지 부력인자에 의해 밀도가 영향을 받고 있기 때문에 최근 들어 부력인자를 두 가지 이상으로 확대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이와 같이 확산율이 서로 다른 두 부력인자가 동시에 작용하여 일어나는 대류현상을 이중확산대류(double-diffusive convection)라 하며, 단일확산대류에서는 볼 수 없는 salt finger나 층형구조(layered flow structure)와 같은 특이한 유동현상이 일어나게 된다.

본 연구는 이중확산과 관련된 여러가지 현상중 아랫면가열에 관한 것으로, 이 경우 농도가 성층화된 유체의 아랫면을 가열함으로 발생하는 국부적인 밀도의 불안정에 의해 국부적인 대류혼합이 일어나며, 그 결과로 혼합층이 형성되어 경계면을 사이에 두고 정체층과 혼합층으로 나누어지는 층형 구조가 된다. 이 때 층사이의 경계면은 불규칙하게 요동하며, 시간이 지남에 따라 정체층영역은 축소되며 혼합층영역은 확대된다. 관련연구를 살펴보면, Stommel 등⁽⁷⁾에 의해 이러한 유동이 처음 관찰되었고, Stern⁽⁸⁾은 두 부력인자의 확산율이 다르기 때문에 생기는 현상임을 밝혔다. Turner⁽⁹⁾는 아랫면에서 가해지는 열량과 혼합층 두께와의 관계를 제시하였고, Takao 등⁽¹⁰⁾은 일정한 부력비 이상에서는 확산되는 열유속과 물질유속의 비가 일정해짐을 밝혔다. Bergman 등⁽³⁾은 농도를 성층화시킨 유체의 하부에서 열유속을 주어 시간에 따른 혼합층 높이를 측정하였다. Fernando⁽⁴⁾는 혼합층의 성장이 온도의 불안정에 의한 불규칙한 난류와(turbulent eddy)에 의해 이루어짐을 밝혔고, Tanny 등⁽¹¹⁾은 혼합층의 높이를 측정하고 웨도우그래프방법을 이용하여 혼합층의 성장과정을 가시화하였다. 최근 태양연못과 관련된 일차원 형상에 대한 이론적 연구에서는 열유속과 혼합층 성장높이의 상관관

계 등 실험결과와 좋은 일치율을 보이고 있다.

전술한 바와 같이 자연현상과 공학분야의 전달현상과 관련되어 이중확산대류에 관한 많은 연구들이 수행되었으나, 기존 연구들의 대부분은 회전의 영향을 고려하지 않고 비회전계에서의 유동현상만을 연구하였다. 그러나 지구의 대기와 해양의 유동, 회전하는 로에서의 금속의 용융 및 응고, Czochralski방법과 같은 결정성장 등 많은 자연계의 유동장 해석과 공학적 응용에 있어서 회전은 매우 중요한 요인으로 작용한다.⁽¹²⁾ 따라서 회전의 영향이 주어진 회전계에서의 이중확산대류에 관한 연구는 매우 중요한 공학적 가치를 가지고 있다. 회전의 영향을 고려한 연구로, Veronis⁽¹³⁾는 자유경계 사이에서 회전하는 유체의 Bénard 대류에 대한 이론적 연구를 하여 Taylor수와 Rayleigh수에 따라 선형방정식에 대한 안정화조건을 제시하였고, Taylor수가 증가함에 따라 유동이 발생하는 임계 Rayleigh수가 증가함을 보였다. 또한 Rossby⁽¹⁴⁾는 회전과 비회전계에서 Prandtl수에 따른 Bénard대류에 대한 연구를 하여 Prandtl수가 큰 유체의 경우 회전의 영향이 커질수록 벽면에서의 열전달계수가 작아짐을 밝혔다. Schmitt 등⁽¹⁵⁾은 두 층으로 이루어진 유체내의 salt finger현상을 연구하여 회전이 강해질수록 층의 두께가 두꺼워짐을 보였다. 위에서 언급한 바와 같이 대부분의 연구들은 회전하는 밀폐용기내에서 온도 혹은 농도의 한 가지 확산요소에 의해 유동이 발생하는 단일확산 대류에 관한 연구로, 회전과 이중확산대류가 복합적으로 작용하는 경우에 대한 연구는 매우 미흡한 실정에 있다. 본 연구는 회전과 이중확산의 상호작용에 의한 유동현상 및 물질적, 열적 특성을 밝히려는 시도의 일부로써 회전하고 있는 원통형밀폐용기내에 농도가 중력방향으로 안정하게 성층화된 유체를 아랫면에서 가열하는 경우에 발생하는 즉, 이중확산과 회전의 복합적인 작용에 의해 발생하는 유동현상에 관하여 온도구배, 농도구배 그리고 회전력을 변화시켜가며 이에 관련된 무차원수의 변화에 따른 열전달 특성, 유동형태 그리고 온도 및 농도분포의 특성을 실험적으로 조사하였으며 비회전계에 대한 연구와 비교, 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서의 실험장치는 크게 주실험장치와 이

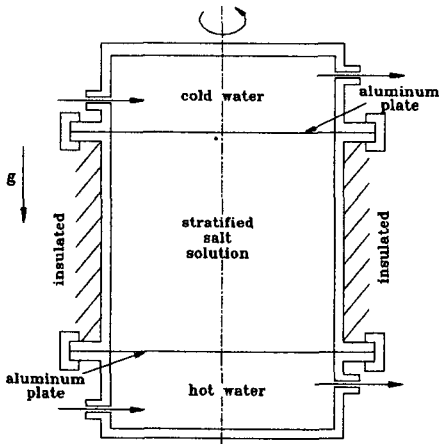


Fig. 1 Schematic diagram of the cylindrical test section

에 회전을 가하기 위한 보조장치로 구성되어 있다. 주실험장치의 기하학적 단면은 Fig. 1과 같으며, 관찰부위인 수직 원통형밀폐용기와 용기의 벽면에서 일정한 온도를 유지시키기 위한 두 개의 수조로 구성된다. 윗면과 아랫면이 등온벽면이므로 밀폐용기의 상부와 하부에 수조를 설치하였고, 이에 일정 온도의 증류수를 순환시켜 등온을 유지하도록 하였다. 수조와 밀폐용기 사이에는 알루미늄판을 설치하여 위, 아랫면에서 등온조건을 만족시켜 주었다. 원통형밀폐용기는 지름 100 mm, 높이 100 mm로 이루어져 있고, 상·하 보조용기와 함께 두께 10 mm의 투명 아크릴을 사용하여 가시화가 가능하게 하였다.

보조장치는 회전을 주기 위한 구동부와 주실험장치 및 각종 측정장치를 올려놓기 위한 원판으로 구성되어 있다. 회전하는 원판위에 주실험장치, 두 개의 항온조와 순환펌프, 컴퓨터, 스테핑모터를 이용한 열전대 이송장치, A/D 변환기 등을 올려놓았다. 원판을 회전시키기 위한 구동부는 모터, V 벨트, 감속기, 타이밍벨트와 인버터로 구성되며, 인버터를 사용하여 원판의 회전속도를 최소 3 rpm에서 최대 60 rpm까지 회전할 수 있도록 제어하였다. 회전하는 원판 위의 항온조, 컴퓨터와 열전대 이송장치에 필요 전원은 파워 슬립링(power slip ring)에 의해 공급하였으며 파워 슬립링에서 발생하는 노이즈를 없애기 위해 각각에 노이즈 필터를 설치하였다.

밀폐용기내의 온도측정과 벽면에서의 등온조건을 검사할 위해 밀폐용기의 중심위치와 위, 아랫면에

각각 열전대를 설치하였다. 밀폐용기의 내부에 설치한 열전대는 스테핑모터를 이용하여 상·하로 자동이송시켜 회전중 내부의 온도분포를 측정하였다. 농도측정을 위해 밀폐용기에 10 mm간격으로 지름 1.5 mm의 구멍을 수직방향으로 뚫고 실리콘 접착제로 봉한 후, 미량의 소금물을 직접 추출하여 굴절율측정기를 이용하여 굴절율을 측정하고, 표준용액으로 만든 기준표와 비교함으로써 농도를 산출하였다. 밀폐용기내에서의 유동현상을 가시화하기 위해 섀도우그래프(shadowgraph)방법을 사용하였다. 헬륨-네온 레이저에서 나오는 광선을 spatial filter assembly를 이용하여 광선중에 있는 노이즈를 제거하고, 이 광선을 밀폐용기에 비추어 스크린에 투영된 영상을 사진기로 촬영하여 시간에 따른 변화를 관찰하였다.

시험유체로 증류수와 소금물을 사용하였다. 하부 수조에 초기온도의 증류수를 순환시키고, 회전원판을 원하는 회전속도로 회전시키면서 밀폐용기내의 용액을 성층화시켰다. 용액의 성층화는 성층화시켜 주고자 하는 농도구배값을 일정 농도차로 나누어 (본 연구에서는 30단계) 각각의 농도를 갖는 용액을 밀폐용기내에 같은 높이로 주입하여 확산에 의해 선형적인 농도분포를 갖게 하는 층계적 방법을 사용하였다. 그 후 상부수조를 용기에 클램프로 체결하고 초기온도의 증류수를 순환시켰다. 회전중에 성층화시키는 이유는 정지상태에서 성층화를 시키고 회전시키면 회전가속(spin-up)현상에 의해 성층화된 용액이 섞이기 때문이고, 확산에 의해 용기내의 용액이 선형적인 농도분포를 갖게 되는데는 약 2시간 정도의 시간이 걸렸다. 밀폐용기내의 유체의 농도분포가 선형적으로 된 후 하부수조에 고온의 증류수를 순환시키며 시간에 따른 온도 및 농도의 측정과 섀도우그래프방법을 이용한 가시화를 통해 밀폐용기내의 유동을 관찰하여 회전과 이중확산의 복합적인 작용에 의한 밀폐용기 내에서의 유동현상 및 열전달 특성을 조사, 관찰하였다. 본 연구의 실험영역은 $\Delta T=5.0\sim 21.1(^{\circ}\text{C})$, $\Delta C=2\sim 8(\text{wt}\%)$, $\Omega=0\sim 30(\text{rpm})$ 이고, 이에 해당하는 무차원수의 범위는 $Ra_r=1.48\times 10^8\sim 7.27\times 10^8$, $Ra_r=1.05\times 10^4\sim 6.19\times 10^7$, $Ta=0\sim 1.82\times 10^8$ 이다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험은 회전계에서 농도가 중력방향으로 안정

하계 성층화된 유체의 아랫면가열에 의해 수직방향으로 온도구배가 가해지는 경우에 관한 연구로, 회전속도에 관련된 Ta 수와 온도와 농도구배에 관련된 Ra_η 수의 변화에 따른 밀폐용기내의 유동형태, 온도분포 및 농도분포를 조사한 것이다. 본 실험에서는 용기내부 유체가 완전히 선형적으로 성층화된 후 실험을 시작할 때의 시험유체는 일정한 각속도로 회전하는 고체회전(solid body rotation)상태에 있게 하였다.

회전계에서의 밀폐용기내의 혼합층의 성장에 따른 전체유동형태(global flow pattern)는 이미 연구된 비회전계⁽¹⁶⁾와 마찬가지로 온도와 농도구배의 상관관계를 나타내는 Ra_η 수에 따라 정체흐름영역(stagnant flow regime), 단일혼합층흐름영역(single mixed layer flow regime) 그리고 여러개의 혼합층 9.1×10^6 , $Ta=1.82 \times 10^8$ 일 때 $1.99 \times 10^6 < Ra_\eta < 2.97 \times 10^7$ 에서 단일층흐름영역이 나타난다. 즉, 회전의 영향이 증가할수록 보다 높은 Ra_η 영역까지 단일혼합층흐름영역이 나타남을 알 수 있으며, 회전의 영향이 혼합층내의 유동을 약화시키고 혼합층의 생성을 억제시킴을 알 수 있다.

아랫면에서의 온도차가 더욱 커져서 여러개의 혼합층이 발생하는 경우는 단일혼합층흐름영역과 같은 메카니즘에 의해 첫번째 층이 발생하고 성장하게 되며, 전술한 바와 같이 정체층 하부에서의 정체층과 혼합층사이의 온도차가 여전히 커 정체층 하부에서 열경계층이 형성되나 회전에 의해 두 번째 층의 형성이 억제되므로 회전의 영향이 강해질수록 보다 높은 Ra_η 수에서 여러 개의 혼합층흐름영역이 나타난다. 이는 Fig. 2에서 역시 관찰이 가능하다. 즉, $Ta=0$ 인 경우 $Ra_\eta > 1.22 \times 10^6$, $Ta=2.02 \times 10^7$ 일 때 $Ra_\eta > 1.32 \times 10^6$, $Ta=8.07 \times 10^7$ 일

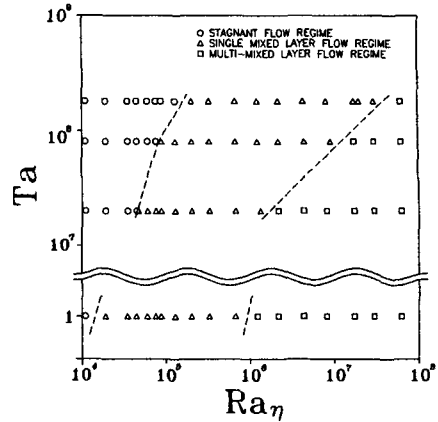


Fig. 2 Flow patterns depending on effective Rayleigh number and Taylor number

흐름영역(successively formed multi-mixed layer flow regime)의 세 가지 흐름영역으로 구분할 수 있다. 그러나 비회전계와는 달리 회전의 영향이 주어지기 때문에 나타나는 현상에는 차이가 있으며, 회전속도의 변화(Ta 수의 변화)에 따라서도 두드러진 변화를 보이고 있다. 이러한 차이는 크게 혼합층의 개수, 성장속도, 혼합층 성장에 대한 Ra_η 수의 범위, 층사이의 경계면 형상으로 나타난다.

초기 농도구배에 비해 온도구배가 작은 정체흐름영역의 경우, 비회전계와 같이 온도구배와 농도구배의 상관관계에 따라 유동의 발생이 결정된다. 그러나 회전의 영향이 주어지는 경우 회전으로 인해 유동의 발생이 억제되므로 비회전계보다 높은 온도구배(즉, 보다 높은 Ra_η)에서 유동이 발생한다. Fig. 2는 Ta 수의 변화에 따른 혼합층 성장 유동형태에 대한 Ra_η 수의 범위를 표시한 그림으로, 비회전 즉, $Ta=0$ 일 경우 $Ra_\eta < 1.05 \times 10^6$, $Ta=2.02$

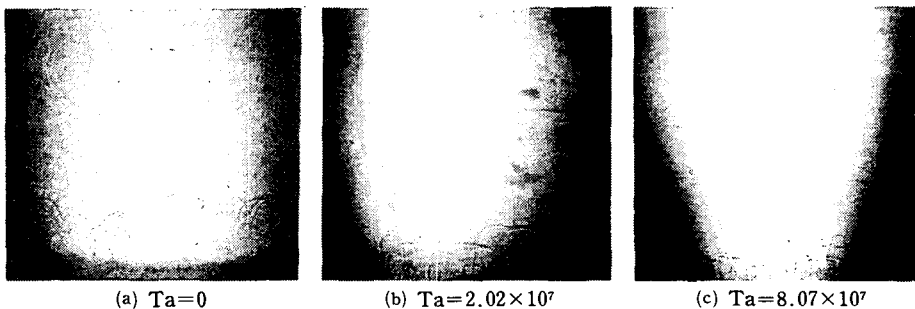


Fig. 3 Shape of interface with Taylor number at $t=7\text{min}$; $Ra_\eta=8.14 \times 10^6$

$\times 10^7$ 일 때는 $Ra_\eta < 4.45 \times 10^4$, $Ta = 8.07 \times 10^7$ 일 때는 $Ra_\eta < 6.73 \times 10^4$, $Ta = 1.82 \times 10^8$ 일 때는 $Ra_\eta < 1.30 \times 10^6$ 에서 정체흐름영역이 나타났다. 즉, 회전의 영향이 강해질수록 보다 큰 Ra_η 수에서 유동이 발생함을 알 수 있으며, 회전의 영향은 유동발생을 억제시킨다는 것을 확인할 수 있다. 회전의 영향이 주어진 단일혼합층흐름영역의 경우, 비회전의 경우와 마찬가지로 아랫면에서 가해지는 온도차에 의한 부력에 의해 불규칙한 유동이 발생하여 대류혼합층이 형성된다. 그러나 Fig. 3에서 나타난 바와 같이 초기 혼합층내의 유동은 회전의 영향을 받아 축방향으로 평행한 형태로 나타나며 그 모양 역시 비회전의 경우에 비해 규칙적으로 나타나며, 혼합층내에서 유동이 억제됨에 따라 비회전의 경우보다 혼합층 내부에서의 유동의 세기가 약해지게 된다. 이에 따라 회전의 경우에는 정체층과 혼합층 사이의 경계면의 굴곡도 비회전의 경우보다 규칙적으로 나타나며, 혼합층 내부의 유동이 약해짐에 따라 경계면의 요동 역시 약해져 혼합층의 성장은 느려진다. 회전의 영향이 강해질수록 이와 같은 경향은 더욱 강하게 나타난다. 이와 같은 결과에서 회

전에 의해 혼합층이 성장하는 속도는 작아지지만 그 성장 메카니즘은 비회전과 같음을 알 수 있다. 단일혼합층흐름영역에 대한 Ra_η 수의 경계를 Fig. 2에서 살펴보면 비회전의 경우 $1.91 \times 10^4 < Ra_\eta < 6.66 \times 10^5$, $Ta = 2.02 \times 10^7$ 일 때 $4.66 \times 10^4 < Ra_\eta < 1.22 \times 10^6$, $Ta = 8.07 \times 10^7$ 일 때 $7.51 \times 10^4 < Ra_\eta < 1.73 \times 10^7$, $Ta = 1.82 \times 10^8$ 일 때 $Ra_\eta > 6.19 \times 10^7$ 에서 여러 개의 혼합층흐름영역이 나타난다. Figs. 4~6은 $Ra_\eta = 1.99 \times 10^7$ 일 때 Ta 수의 변화에 따른 혼합층 형성을 속도우그래프방법을 이용하여 시간에 따라 가지화한 사진으로, $t = 40$ 분일 때 $Ta = 2.02 \times 10^7$ 인 경우에는 세 개의 층이, $Ta = 8.07 \times 10^7$ 인 경우에는 두 개의 층이 $Ta = 1.82 \times 10^8$ 인 경우에는 한 개의 혼합층이 나타난다. $Ta = 2.02 \times 10^7$ 일 경우에는 Fig. 4에서와 같이 초기 세 개의 혼합층이 형성되어 시간이 지남에 따라 $t = 60$ 분에 두 개, $t = 220$ 분에 한 개의 혼합층으로 합쳐지며 성장하는 것을 관찰할 수 있다. 경계면의 형상을 살펴보면, 맨 아래 경계면의 요동이 가장 심하게 나타나며 위로 올라갈수록 요동이 점점 약해짐을 알 수 있고, 이때의 혼합층 성장은 경계면에

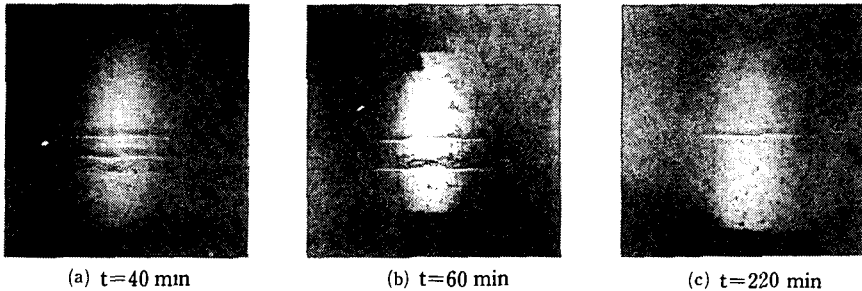


Fig. 4 Shadowgraphs of layer formation at rotating cavity ; $Ra_\eta = 1.99 \times 10^7$, $Ta = 2.02 \times 10^7$ (successively multi-mixed layer flow regime)

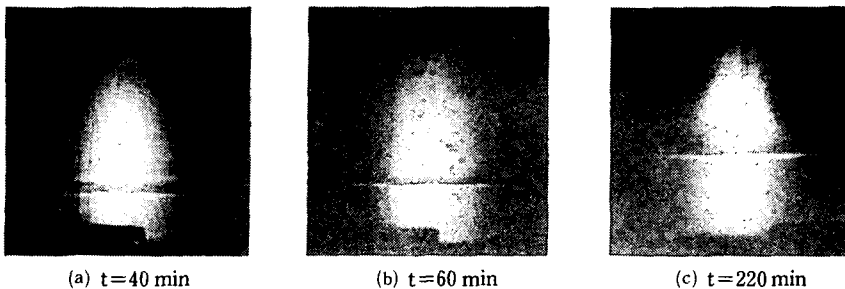


Fig. 5 Shadowgraphs of layer formation at rotating cavity ; $Ra_\eta = 1.99 \times 10^7$, $Ta = 8.07 \times 10^7$ (successively multi-mixed layer flow regime)

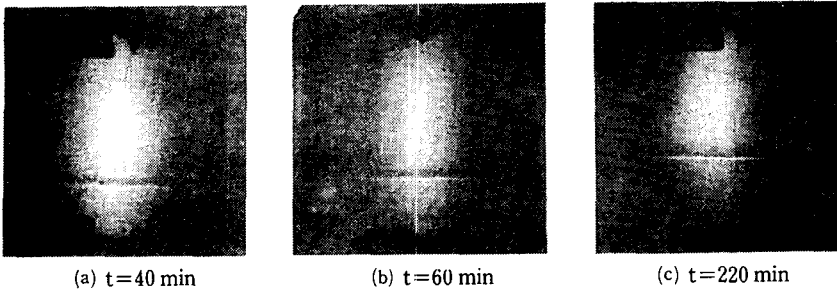
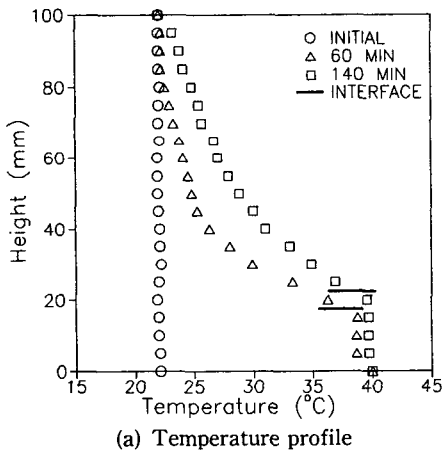


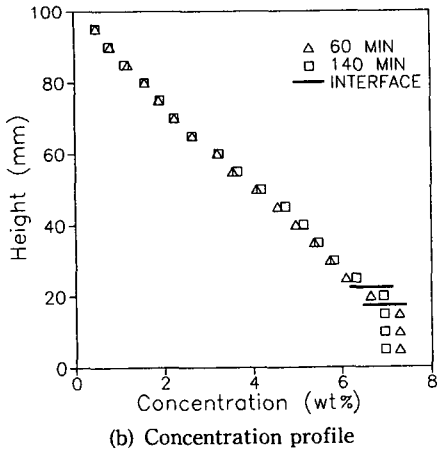
Fig. 6 Shadowgraphs of layer formation at rotating cavity ; $Ra_7=1.99 \times 10^7$, $Ta=1.82 \times 10^8$ (single mixed layer flow regime)

서의 불규칙한 요동에 의한 메카니즘이 주류를 이루게 된다. 시간이 지남에 따라 요동은 점점 약해져 $t=220$ 분의 경우 평평한 모양의 경계면을 가지며 혼합층의 성장은 경계면에서의 농도확산에 의한

경계면의 밀도 불안정에 의해 일어난다. 회전의 영향이 강해져 $Ta=8.07 \times 10^7$ 인 경우에는 Fig. 5에서와 같이 초기 두 개의 혼합층이 발생하고 시간이 지남에 따라 $t=60$ 분에는 두 개의 혼합층이 합쳐져

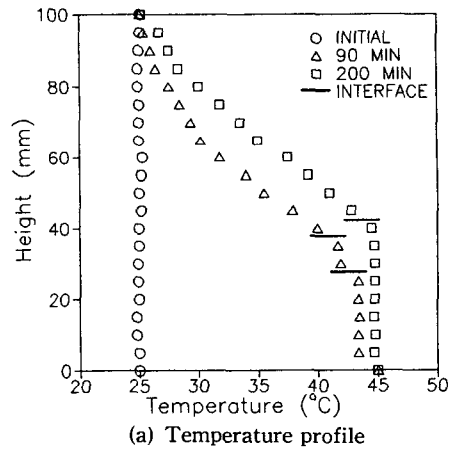


(a) Temperature profile

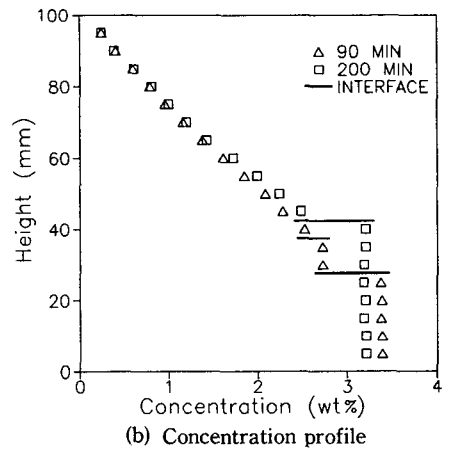


(b) Concentration profile

Fig. 7 Vertical temperature and concentration profiles at the core ; $Ra_7=6.66 \times 10^5$, $Ta=2.02 \times 10^7$



(a) Temperature profile



(b) Concentration profile

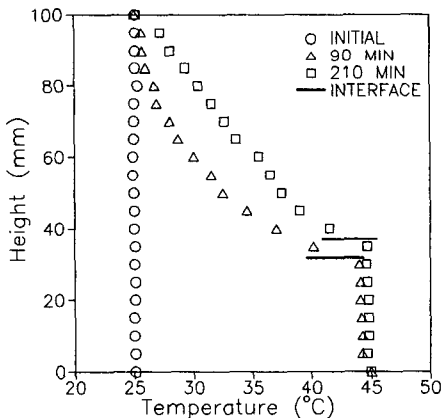
Fig. 8 Vertical temperature and concentration profiles at the core ; $Ra_7=9.10 \times 10^6$, $Ta=2.02 \times 10^7$

한 개의 혼합층을 이루게 된다. 이 경우 역시 초기의 경계면은 심한 요동을 하지만 시간이 지남에 따라 점점 완만해짐을 알 수 있다. 또한 경계면의 불규칙한 요동이 혼합층의 성장을 주도하는 초기에는 혼합층의 성장속도가 빠르나, 경계면에서의 요동이 약해짐에 따라 혼합층의 성장은 주로 농도확산에 의해 이루어지므로 성장속도가 느려짐을 알 수 있다. $Ta=1.82 \times 10^8$ 인 경우에는 Fig. 6에서와 같이 단일 혼합층만이 나타난다. 같은 시간대의 Ta 수 변화에 대해 살펴보면, $t=40$ 분일 때 회전의 영향이 증가함에 따라 경계층의 요동이 작아지고 규칙적인 굴곡을 갖음을 알 수 있다. 또한 $t=220$ 분에서 혼합층 성장높이는 $Ta=2.02 \times 10^7$ 인 경우 46 cm, $Ta=8.07 \times 10^7$ 인 경우 44 cm, $Ta=1.82 \times 10^8$

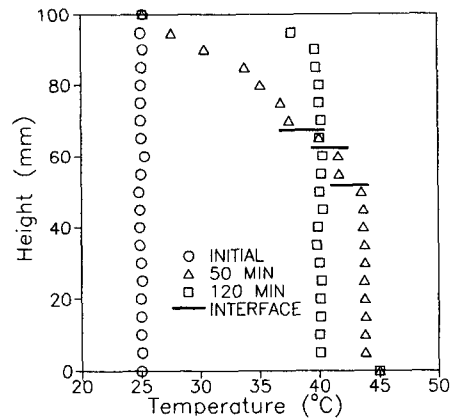
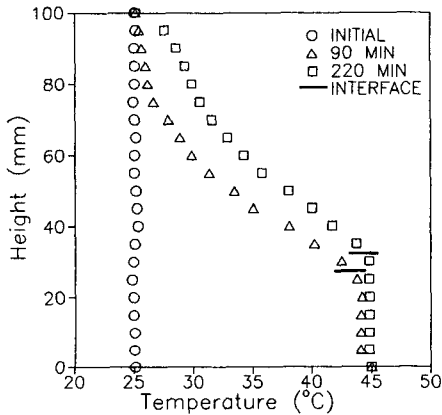
인 경우 42 cm 정도 성장해 있음을 알 수 있다. 따라서 회전의 영향이 강해질수록 여러 개의 혼합층흐름영역에서 단일혼합층흐름영역으로 바뀌어가고, 성장속도 역시 감소함을 확인할 수 있다.

회전하는 밀폐용기내에서의 온도 및 농도분포는 혼합층의 성장에 따라 뚜렷한 특징을 갖는다. Fig. 7~12는 각각 회전하는 밀폐용기내의 중심부분에서 수직방향에 따른 온도 및 농도분포를 나타낸다. 농도측정은 유체의 추출에 의해 행하여지므로 회전속도가 클 경우에는 이의 추출이 불가능하여 농도는 $Ta=2.02 \times 10^7$ 인 경우까지 측정하였다.

Fig. 7은 $Ra_n=6.66 \times 10^5$ 인 경우로 단일혼합층이 형성될 때의 온도 및 농도분포를 나타낸다. 비회전의 경우와 마찬가지로 혼합층내의 온도와 농도는



(a) Temperature profile

(a) $Ta=8.07 \times 10^7$ 

(b) Concentration profile

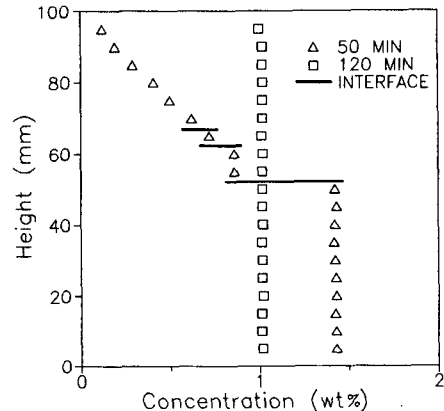
(b) $Ta=1.82 \times 10^8$

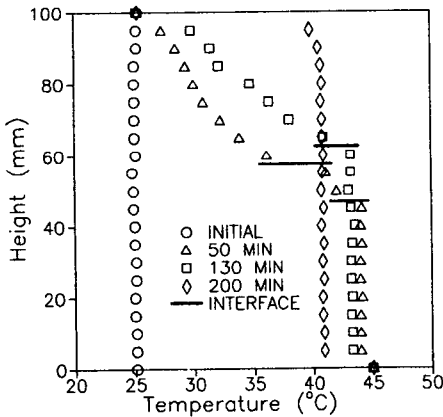
Fig. 9 Vertical temperature profiles at the core; $Ra_n=9.10 \times 10^6$

Fig. 10 Vertical temperature and concentration profiles at the core: $Ra_n=6.19 \times 10^7$, $Ta=2.02 \times 10^8$

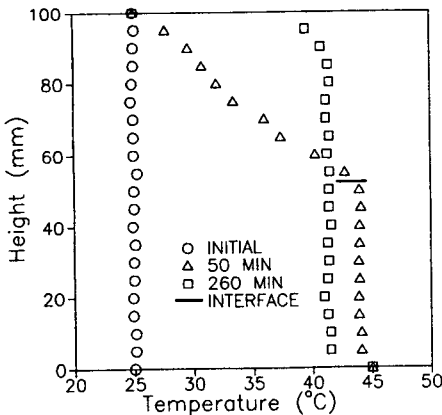
대류혼합에 의해 균일해지며, 정체층에서의 온도는 불안정하게 상승화되고 농도는 초기의 안정된 성분화분포를 계속 유지하게 된다. 또한 경계면에서의 농도는 급격히 변하는 반면, 상대적으로 확산율이 큰 온도의 경우에는 변화가 작음을 알 수 있다. 또한 회전의 영향이 커질수록(즉, Ta 수가 커질수록) 혼합층의 성장높이가 줄어들음을 확인할 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9는 $Ra_\eta=9.10 \times 10^6$ 에서의 회전수의 변화에 따라 단일혼합층과 여러 개의 혼합층이 나타나는 경우의 온도 및 농도분포를 나타낸 것이다. 회전의 영향이 작은 $Ta=2.02 \times 10^7$ 인 경우에는 두 개의 혼합층이, 상대적으로 영향이 큰 $Ta=8.07 \times 10^7$, 1.82×10^8 인 경우에는 전술한 바와 같이 회전에 의해 두 번째 층의 발생이 억제되어 단일혼합층을 이루고 있다. 이 경우 역시 각 혼합층 내에서의

온도와 농도는 균일하고 정체층에서는 선형적으로 분포됨을 관찰할 수 있다. Fig. 10과 11은 $Ra_\eta=6.19 \times 10^7$ 인 경우의 온도 및 농도분포를 나타낸다. 전술한 정체층과 혼합층에서의 온도 및 농도의 특성으로부터 $Ta=2.02 \times 10^7$ 일 때는 세 개의 혼합층이, $Ta=8.07 \times 10^7$ 일 때는 두 개, $Ta=1.92 \times 10^8$ 일 때는 단일혼합층이 나타남을 확인할 수 있다. 이 경우에서도 역시 회전의 영향에 의해 층의 갯수가 감소되며 층의 성장속도의 역시 늦어짐을 알 수 있다. 이상에서와 같이 회전의 영향이 주어지면 층이 갯수와 성장속도의 감소를 가져오나, 혼합층 및 정체층에서의 농도 및 온도분포는 비회전과 같은 경향을 나타낸다.

Fig. 12는 단일혼합층흐름영역에서 시간의 진행에 따른 혼합층의 성장높이를 나타내고 있다. 각

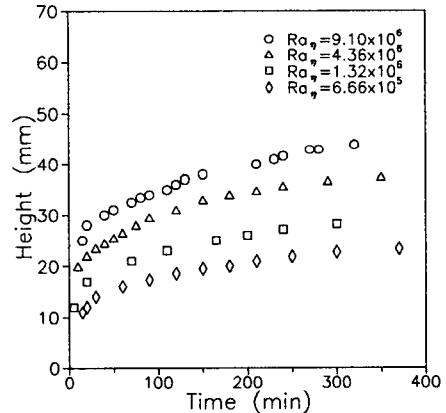


(a) $Ta=8.07 \times 10^7$

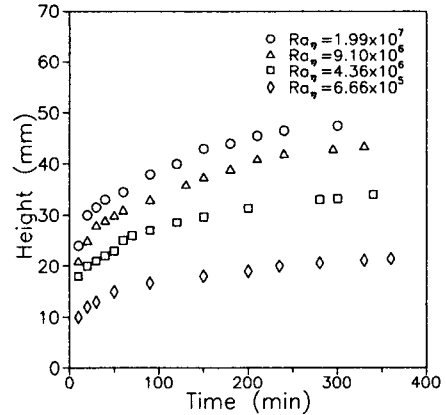


(b) $Ta=1.82 \times 10^8$

Fig. 11 Vertical concentration profiles at the core ; $Ra_\eta=6.19 \times 10^7$



(a) $Ra_\eta=8.07 \times 10^7$



(b) $Ra_\eta=1.82 \times 10^8$

Fig. 12 Height of single mixed layer with Rayleigh number

Ta 수에서 Ra_η 수가 커질수록 즉, 초기 농도구배에 비해 아랫면에서의 온도구배가 커질수록 혼합층의 성장높이가 증가함을 알 수 있고, 이는 온도분포, 농도분포 및 유동가시화에서도 확인할 수 있다. 또한 초기 혼합층의 높이는 Ta 수 및 Ra_η 수에 따라 약간의 변화는 있지만 대개 10분에서 20분 사이에 급격히 성장하고, 그 이후부터는 점점 완만한 성장을 보인다. 다시 말해 초기에는 경계면에서의 불규칙한 요동에 의해 혼합층의 성장이 빠르게 진행되나 에너지가 점점 줄어들어 따라 성장이 늦어지고, 오랜 시간이 흐른 후에는 경계면을 통한 농도의 확산에 의해 층이 성장하므로 성장속도가 상당히 느려짐을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 속도우그래프방법을 이용한 가시화에서도 확인이 가능하다. Fig. 13은 $Ra_\eta=6.66 \times 10^5$, 4.36×10^6 일 때의 Ta

수의 변화에 따른 단일혼합층의 성장높이를 나타낸다. 그림에서 보듯이 회전의 영향이 증가함에 따라 즉, Ta 수가 증가함에 따라 혼합층의 성장높이가 감소함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 회전하는 원통형밀폐용기 내에서 농도가 증력방향으로 안정하게 성층화된 유체에, 아랫면가열에 의해 수직방향으로 온도구배가 가해지는 경우에 발생하는 유동현상에 대해 실험적으로 연구하여, 온도와 농도구배 및 회전속도의 변화에 따른 밀폐용기내의 유동형태, 유동형성과정 그리고 그에 따른 온도분포 및 농도분포의 특성을 조사하였다. 본 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

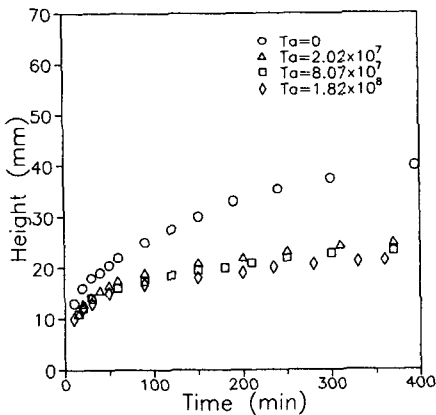
회전계에서도 비회전계와 마찬가지로 Ra_η 수와 Ta 수의 변화에 따라 유동형태의 영역은 정 흐름영역, 단일혼합층흐름영역 그리고 여러 개의 혼합층흐름영역의 세 가지 흐름영역으로 나눌 수 있으며, Ra_η 가 감소하거나 Ta 수가 증가함에 따라 유동형태는 여러 개의 혼합층흐름영역에서 단일혼합층흐름영역으로 또는 단일혼합층흐름영역에서 정체흐름영역으로 변화한다. 각 층내부에서의 온도 및 농도분포를 살펴보면 혼합층내에서는 대류혼합에 의해 온도와 농도가 균일해지고, 정체층에서의 온도와 농도는 확산에 의해 선형적인 성층화 분포를 나타낸다. 또한 인접한 층사이의 경계면에서 온도는 완만하게 변화하지만 농도는 급격한 변화를 나타낸다. 또한 같은 Ra_η 수에서 회전의 영향이 증가할수록(Ta 수가 증가할수록) 유동의 발생이 억제되어 초기에 형성되는 혼합층의 개수는 감소하며, 혼합층 내부에서 유동의 세기가 약해져 층의 성장속도 역시 감소한다.

후 기

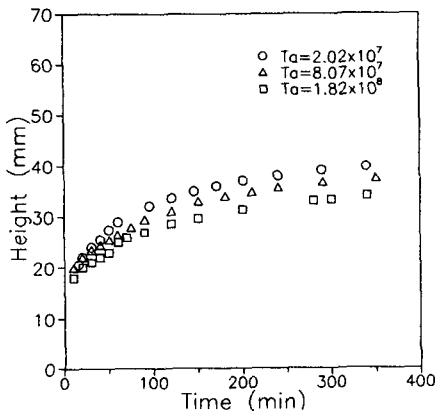
본 연구는 1993년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Huppert, H. E. and Turner, J. S., 1980, "Ice Blocks Melting into a Salinity Gradient," *Jour.*



(a) $Ra_\eta=6.66 \times 10^5$



(b) $Ra_\eta=4.36 \times 10^6$

Fig. 13 Height of single mixed layer with Taylor number

- nal of Fluid Mechanics*, Vol. 100, pp. 367~384.
- (2) Lugt, H. J., 1983, *Vortex Flow in Nature and Technology*, John Wiley & Sons.
- (3) Bergman, T. L., Incropera, F. P. and Vistanka, R., 1986, "Correlation of Mixed Layer Growth in a Double-Diffusive, Salt-Stratified System Heated from Below," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 108, pp. 206~211.
- (4) Harindra, J. S. Fernando, 1987, "The Formation of a Layered Structure When a Stable Salinity Gradient is Heated from Below," *Journal of Fluids Mechanics*, Vol. 182, pp. 525~541.
- (5) Chattergee, N. and Geist, J. M., 1972, "The Effects of Stratification on Boil-Off Rates in LNG Tanks," *Pipeline and Gas Journal*, Vol. 199, pp. 40~60.
- (6) Ostrach, S., 1983, "Fluid Mechanics in Crystal Growth-The 1982 Freeman Scholar Lecture," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 105, pp. 5~20.
- (7) Stommel, H., Arons, A. B. and Blanchard, D., 1956, "An Oceanographical Curiosity : The Perpetual Salt Foundation," *Deep-Sea Research*, Vol. 3, pp. 152~153.
- (8) Stern, M. E., 1960, "The 'Salt Fountain' and Thermohaline Convection," *Tellus*, Vol. 12, pp. 172~175.
- (9) Turner, J. S., 1968, "The Behaviour of a Stable Salinity Gradient Heated from Below," *Journal of Fluids Mechanics*, Part 1, Vol. 33, pp. 183~200.
- (10) Takao, S. and Nurusawa, V., 1980, "An Experimental Study of Heat and Mass Transfer across a Diffusive Interface," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 1283~1285.
- (11) Tanny, J., Kerpel, J. and Tsinober, A., 1989, "On the Layered Structure in a Stable Solute Gradient Heated from Below," *Experiments in Fluids*, Vol. 8, pp. 161~164.
- (12) Allen, J. S., 1973, "Upwelling of a Stratified Fluid in a Rotating Annulus: Steady State. Part 2. Numerical Solutions," *Journal of Fluid Mechanics*, Part 2, Vol. 59, pp. 337~368.
- (13) Veronis, G., 1968, "Large-Amplitude Bénard Convection in a Rotating Fluid," *Journal of Fluid Mechanics*, Part 1, Vol. 31, pp. 113~139.
- (14) Rossby, H. T., 1969, "A Study of Bénard Convection With and Without Rotation," *Journal of Fluid Mechanics*, Part 2, Vol. 36, pp. 309~335.
- (15) Schmitt, R. W. and Cambert, R. B., 1979, "The Effects of Rotation on Salt Fingers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 162, pp. 23~33.
- (16) 강신형, 김무현, 이진호, 1994, "농도 성층화된 유체의 아랫면가열에 의한 이중확산대류에 관한 연구," 대한기체학회논문집, 제18권, 제12호, pp. 3297~3304.