

〈論 文〉

환형용기내 성층화된 유체의 회전효과에 따른 이중확산대류에 관한 실험적 연구

강신형* · 전창덕** · 이태홍** · 이진호***

(1994년 9월 9일 접수)

Double Diffusive Convection of a Stratified Fluid in a Rotating Annulus Due to Lateral Heating

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

Key Words : Double-Diffusive Convection(이중확산대류), Rotating Annulus(회전 환형용기), Lateral Heating(옆면가열), Multi-Layered Flow Structure(층형유동구조), Effective Rayleigh Number (Ra_η 수), Taylor Number (Ta 수)

Abstract

The primary objective of the paper is to obtain the basic information of the natural convection of a stratified fluid with various parametric conditions related to rotating speed, temperature and concentration gradient. For the purpose of it, experiments are performed in a stably stratified salt-water solution with lateral heating in a stationary or rotating annulus. The experiment covers the ranges of $Ar=2$, $Le=100$, $Ra_n=2 \times 10^5$ and $Ta=0, 10^5 \sim 2.5 \times 10^8$. Many interesting flow phenomena are observed and rotation effects are examined. Particularly as Taylor number increases (rotation increases) at a given Ra_η , the generation of rolls at hot wall is inhibited and the formation and merging process of layers are delayed.

————— 기 호 설 명 —————

<p>ΔC : 농도차, {wt%}</p> <p>g : 중력가속도, {m/s²}</p> <p>H : 용기높이, {m}</p> <p>r : 반경방향 좌표, {m}</p> <p>Ra_s : 농도 Ra수 = $g\bar{\beta}\Delta CH^3/\nu\alpha$</p> <p>$Ra_T$: 열적 Ra수 = $g\beta\Delta TH^3/\nu\alpha$</p> <p>$Ra_\eta$: 유효 Ra수 = $g\beta\Delta T\eta^3/\nu\alpha$</p> <p>$t$: 시간, {s}</p> <p>ΔT : 온도차, {°C}</p> <p>Ta : Ta수 = $4\Omega^2 H^4/\nu^2$</p>	<p>z : 축방향좌표, {m}</p> <p>α : 열확산계수, {m²/s}</p> <p>β : 열팽창계수, {1/°C}</p> <p>$\bar{\beta}$: 농도확산계수, {1/wt%}</p> <p>η : 대표길이 = $-\beta\Delta T/\bar{\beta}(dC/dz)_0$, {m}</p> <p>$\nu$: 동점성계수, {m²/s}</p> <p>Ω : 각속도</p>
---	--

1. 서 론

일정한 압력하에서 유체의 밀도차는 주로 온도차와 농도차에 의해 생기며, 유체의 밀도가 온도 혹은 농도와 같은 단일확산요소로 인해 결정될 때의

*건양대학교 기계공학과

**연세대학교 대학원 기계공학과

***정회원, 연세대학교 기계공학과

자연대류현상에 비해 확산율이 다른 두 가지 부력 인자에 의한 자연대류에서는 단일확산문제에서는 볼 수 없는 층형흐름구조(layered-flow structure) 등과 같은 특이한 현상이 발생하게 된다. 이와 같이 확산율이 서로 다른 두 부력인자가 작용하여 일어나는 대류를 이중확산대류(double-diffusive convection)라 한다.

본 연구는 농도가 안정하게 성층화된 용액에 수평방향으로 온도구배가 가해지는 경우인 옆면 가열(lateral heating)에 관련된 연구이다. 이에 관련된 연구로 Thorpe 등⁽¹⁾은 수직평판에서의 유동이 여러 개의 층을 이룬 유동형태로 나타남을 처음 밝혔다. Chen 등⁽²⁾은 가해지는 온도와 농도구배의 상관관계에 따른 대표길이 η 와 이를 특성길이로 한 Rayleigh 수(Ra_η 수)를 제시하고, 이에 따라 아임계(subcritical)영역과 초임계(supercritical)영역의 두 가지 흐름영역으로 나누어 연구하였으며, Wirtz 등⁽³⁾은 고온벽에서 발생한 롤(roll)이 저온벽으로 진행하여 결국 셀형태의 유동이 형성되며 시간이 경과하면서 셀의 개수가 줄어듦을 관찰하였다.

Lee 등^(4,5)은 수직벽면에서 등농도조건을 만족시키기 위해 삼투막을 이용한 방법을 처음으로 시도한 실험과 수치해석을 통해 Chen 등⁽²⁾의 연구보다 넓은 변수범위에 대해, 부력비에 따라 네 가지 흐름영역으로 나누어 연구하여 좋은 결과를 얻었다. 또한 Bergman 등⁽⁶⁾은 부유물을 이용한 가시화를 통해 인접한 층이 합쳐지는 과정을 밝혔다.

최근 자연현상과 공학적 응용의 전달현상과 관련하여 이중확산대류에 관한 연구들이 수행되고 있으나, 기존 연구들의 대부분은 회전의 영향이 없는 상황하에서 밀폐공간내의 유동현상을 연구하였다. 그러나 자전하는 지구의 대기과 해양, 회전하는 로안에서의 용융 및 응고, Czochralski방법 등과 같은 결정성장 등에 있어서 회전은 매우 중요하게 작용한다. 회전의 영향을 고려한 연구로, Barcion 등⁽⁷⁾은 안정하게 성층화된 유체내에서의 회전의 영향을 연구하여 성층화된 유체에서는 Ekman층이 약해져 그 영향이 감소함을 밝혔다. Veronis⁽⁸⁾은 자유경계 사이에서 회전하는 유체의 Bénard 대류에 대한 이론적 연구를 하여 Taylor수와 Rayleigh 수에 따라 선형방정식에 대한 안정화조건을 제시하였다. 또한 Hyun 등⁽⁹⁾은 회전의 영향이 있을 경우 내부(core)영역에서는 방위각 방향의 속도 구배와 수평방향의 밀도구배가 서로 균형을 유지하고 있음

을 밝혔다. 선술한 바와 같이 회전이 유동에 큰 영향을 미침에도 불구하고 대부분의 연구들은 회전하는 밀폐용기내에서 온도 혹은 농도의 한 가지 확산 요소에 의한 단일확산대류에 관한 연구나 비회전계에서의 이중확산유동에 관한 연구로, 회전과 이중확산대류를 동시에 고려한 연구는 아직 미흡하다. 이와 같은 문제인식에 기반하여 본 연구에서는 회전과 이중확산의 복합 영향에 대한 분석을 시도하고자 한다.

본 연구는 비회전계와 회전계에서 농도가 중력방향으로 안정하게 성층화된 유체를 옆면에서 가열하는 경우에 발생하는 유동현상 즉, 이중확산과 회전의 복합적인 작용에 의해 발생하는 유동현상에 관하여 환형밀폐공간을 기하학적 모형으로 설정하여 회전속도에 관련된 Ta 수와 온도와 농도구배에 관련된 Ra_η 수의 변화에 따른 밀폐용기내의 유동형태와 온도 및 농도분포의 특성을 실험적으로 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구의 실험장치는 주실험장치와 이에 회전력을 주기 위한 보조장치로 구성된다. 주실험장치는 유동을 관찰하기 위한 수직 환형밀폐용기와 용기의 벽면에서 등온을 유지하기 위한 두 개의 수조로 이루어지며, Fig. 1에 개략도를 나타내었다. 수직벽면이 등온벽면이므로 두 개의 수조를 각각 밀폐용기의 수직벽면의 안과 밖에 설치하였다. 따라서 주실험장치의 구성은 크게 세 개의 원통으로 이루어지며, 안쪽 원통과 가운데 원통사이의 관찰영역으로 시험유체가 채워지고, 안쪽 원통내부는 저온의

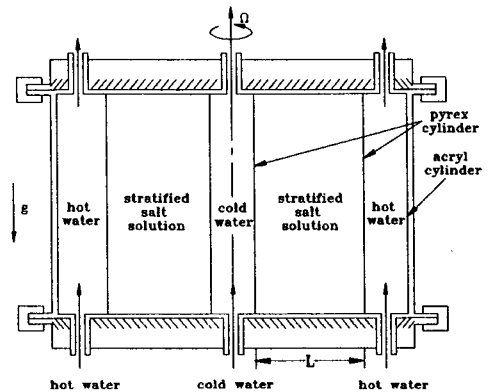


Fig. 1 Schematic diagram of the annular test section

증류수를, 가운데 원통과 바깥 원통사이에는 고온의 증류수를 순환시켜 관찰영역의 수직벽면에서 등온을 유지하였다.

관찰영역을 둘러싸고 있는 안쪽 원통(저온측)과 가운데 원통(고온측)은 관찰영역의 수직벽면으로 온도가 일정하게 유지되어야 하며 동시에 가시화가 가능하여야 한다. 벽면의 재질로 알루미늄을 사용했을 경우 열전도율은 좋으나 가시화가 불가능하므로, 본 실험에서는 이보다 열전도율은 떨어지나 가시화가 가능한 파이렉스유리를 사용하였다. 안쪽 원통은 바깥지름 30 mm, 두께 1.2 mm, 높이 80 mm인 파이렉스유리를 사용하였고, 가운데 원통은 안지름 110 mm, 두께 3.0 mm, 높이 80 mm의 파이렉스유리를 사용하였으며, 바깥쪽 원통은 열전도율이 좋을 필요가 없고 가시화만 가능하면 되므로 가공이 편리하고 깨질 위험이 없는 아크릴을 사용하였다. 환형밀폐용기의 위아래 수평벽면은 단열조건을 만족시켜주기 위해 두께 35 mm의 아크릴 원판을 사용하였다.

보조장치는 회전력을 주기 위한 구동부와 주실험장치, 항온조와 순환펌프, 컴퓨터, 열전대 이송장치, A/D 변환기 등을 올려놓은 원판으로 구성되어 있다. 원판을 회전시키기 위한 구동부는 모터, V벨트, 감속기, 타이밍 벨트와 인버터(inverter)로 구성되며, 인버터를 사용하여 최소 3 rpm에서 최대 60 rpm까지 원판의 회전속도를 제어하였다. 회전하는 원판 위에 필요한 전원은 파워 슬립링(power slip ring)에 의해 공급했다.

모든 실험의 시험유체로는 증류수와 소금물을 사용하였다. 내·외측수조에 초기온도의 증류수를 순환시키고, 회전원판을 원하는 회전속도로 회전시키면서 밀폐용기내의 용액을 성층화시켰다. 농도의 성층화는 상하의 농도차를 여러 단계(30단계)로 나누어 각각의 농도를 갖는 용액을 밀폐용기에 주입하여 확산에 의해 선형적인 농도 분포를 갖게하는 층계적 방법을 사용하였다. 회전중에 성층화시키는 이유는 정지상태에서 성층화를 시키고 회전시키면 회전가속(spin-up)현상에 의해 성층화된 용액이 섞이기 때문이다. 밀폐용기내의 유체의 농도가 선형적으로 분포된 후 외측수조에 고온의 증류수를 순환시키면서 밀폐용기내의 온도 및 농도분포를 측정하고 유동현상을 관찰하였다.

밀폐용기의 온도 측정을 위해 $L/4$, $L/2$, $3L/4$ 지점에 설치한 열전대를 상·하로 자동적으로 이송

하게 하여 회전중 내부의 온도분포를 5 mm 간격으로 측정하였다. 또한 농도측정을 위해 밀폐용기에 7.3 mm 간격으로 뚫은 구멍을 통해 추출용 주사바늘로 미량의 소금물을 추출하여 굴절율측정기를 이용하여 굴절율을 측정하고, 표준용액을 기초로 하여 만든 기준포와 비교함으로써 농도를 산출하였다. 셀이 형성되는 초기 단계에서는 짧은 시간내에 유동형태가 변하며 층의 두께가 얇으므로 밀폐용기내의 온도와 농도의 측정이 불가능하였다. 따라서 본 실험에서는 비교적 층모양이 안정되게 형성된 이후부터 온도와 농도를 측정하였다. 밀폐용기내의 유동형태를 관찰하기 위해 웨도우그래프방법을 이용하여 가시화하였다. 온도와 농도분포를 일정한 시간간격으로 측정하고 가시화를 통해 관찰된 유동형태와 함께 밀폐용기내에서의 이중확산과 회전에 의한 유동현상 및 열전달 특성을 조사, 분석하였다

본 연구의 실험영역은 $\Delta T=1.0\sim 11.9(^{\circ}\text{C})$, $\Delta C=5\sim 6(\text{wt}\%)$, $\Omega=0\sim 10(\text{rpm})$ 이며, 이에 따른 무차원수 영역은 $Ra_T=1.51\times 10^7\sim 1.89\times 10^8$, $Ra_S=1.40\times 10^9\sim 1.60\times 10^9$, $Ra_N=1.57\times 10^2\sim 3.09\times 10^5$, $Ta=0\sim 1.20\times 10^7$ 이다.

3. 실험결과 및 고찰

직각밀폐용기내의 옆면가열에 관한 연구는 기존 연구자들에 의해 많은 결과가 제시되었다.^(2,5) 본 연구에서는 환형밀폐용기내에서 Chen 등⁽²⁾이 제시한 Ra_N 수의 변화에 따라 Lee 등⁽⁵⁾의 연구에서 제시한 네 가지 흐름영역에 대해서 연구하였고, 특히 층이 여러개 존재하는 흐름영역에 대해서 자세히 연구하였다.

3.1 비회전계

환형밀폐용기에서의 유동형태의 영역은 직각밀폐용기에서와 마찬가지로 Ra_N 수에 따라 크게 네 가지 흐름영역 형태 즉, 정체흐름영역(stagnant flow regime), 부분층흐름영역(partly-formed layer flow regime), 전층흐름영역(fully-formed layer flow regime), 단일셀흐름영역(unicell flow regime)로 나타나며 Fig. 2에 각 흐름영역에 대한 대표적인 유동형태를 제시하였다. 이와 같은 대표적인 네 가지 흐름영역의 구분은 Lee 등⁽⁵⁾의 직각밀폐용기내의 유동형태와 정성적으로 유사하다.

각 영역에서의 유동특성을 살펴보면, Fig. 2(a)에

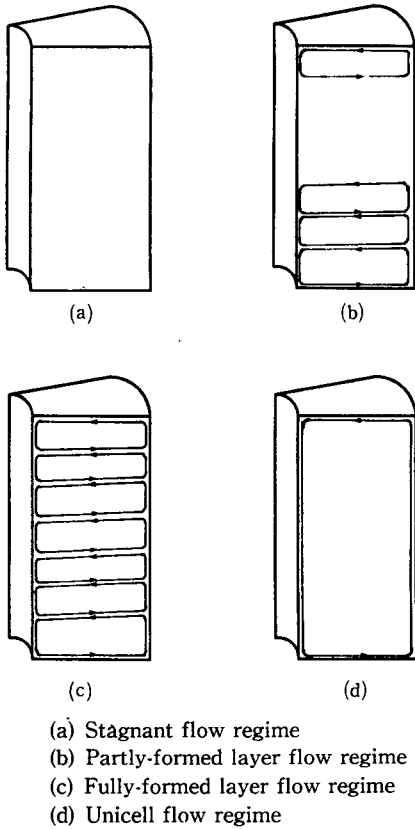


Fig. 2 Global flow patterns in the annulus for side-wall-heating

서와 같이 초기의 농도 성층화에 비해 수평 온도차가 작아 Ra_η 수가 작은 경우는 고온벽면에서 발생한 온도차에 의한 부력이 안정된 농도에 의한 성층력을 이기지 못해 아무런 유동이 발생하지 않는다. 수직평판에서의 온도차만에 의한 자연대류는 아주 작은 온도차에서도 발생하는 경우와 비교할 때 안정된 농도분포에 의한 유동억제력을 잘 보여주고 있으며, 온도차만에 의한 자연대류의 경우보다 수직벽면에서 더 높은 온도구배가 가해져야 유동이 발생하게 됨을 알 수 있다.

Fig. 2(b)는 부분층흐름영역을 나타낸 그림으로 수직경계면에서의 온도차가 커져 Ra_η 수가 증가하면 상·하 수평벽면 근처에서만 층이 나타나고 밀폐용기의 중간부분에서는 정체층이 그대로 존재하는 유동형태가 된다. 이 때 층이 형성되는 메카니즘을 살펴보면, 수직벽면이 가열됨에 따라 벽과 접해있는 유체의 온도상승에 따라 같은 높이의 내부 유체와의 온도차이에 의한 밀도차로 인해 부력이 발생

하여 유체는 위로 상승하게 된다. 유체의 밀도는 주로 농도와 온도에 의해 결정되는데, 소금물 농도의 확산은 온도의 확산보다 굉장히 느리므로 상승한 유체의 농도의 변화는 무시할 수 있을 정도로 작다. 따라서 상승한 유체의 밀도가 주위 유체의 밀도와 같아지는 지점에서 더 이상 상승하지 못하고 용기내부로 선회하여 롤(roll)을 형성한다. 시간이 경과함에 따라 롤은 수평방향으로 점점 커져 반대편 등온벽까지 성장하여 셀(cell)형태의 유동층을 형성한다. 시간이 경과함에 따라 이와 같이 형성된 층과 층사이의 얇은 농도 경계면에서의 농도확산을 통하여 인접한 층간의 농도차가 감소하게 되면 두 층이 합해져서 보다 큰 층을 이룬다.

Fig. 2(c)는 전층흐름영역의 대표적인 흐름형태로, 수직경계면에서의 온도차가 부분층흐름영역에서의 온도차보다 더 커져 Ra_η 가 더욱 증가하면 롤이 고온벽면의 상·하부에서부터 순차적으로 발생되어 밀폐용기의 전역에서 층을 이룬 유동형태가 된다. 이 때의 층형성 메카니즘은 부분층흐름영역에서의 메카니즘과 같다.

Fig. 2(d)에서와 같이 온도구배가 더욱 증가하여 전층흐름영역보다 Ra_η 가 더 큰 경우에는 농도분포에 의한 성층력의 영향은 무시되고 온도차만에 의한 단일확산 자연대류와 마찬가지로 전체유동은 단일셀형태로 나타난다. 이러한 Ra_η 수에 따른 네 가지 흐름영역은 기존의 직각밀폐용기내의 실험결과^(2,4,5)와 정성적으로 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 3는 용기 전체에 층이 나타나는 흐름영역인 전층흐름영역에서 대표적으로 $Ra_\eta=2.01 \times 10^5$ 일 때의 시간에 따른 유동형태의 변화를 웨도우그래프 방법을 이용하여 가시화한 것이다. 실험시작후 10분일 때 밀폐용기의 아래 윗벽면 근처에서부터 순차적으로 층이 형성되어 용기 전역에서 13개의 층이 발생하고 시간이 지남에 따라 인접한 층이 합쳐지는 과정을 통하여, 2시간일 때 5개의 층으로 그리고 7시간, 17시간일 때 각각 3개, 2개의 층으로 층의 개수가 줄어든다. 전술한 바와 같이 초기 고온 수직벽면의 상부와 하부에서 롤이 발생되고, 이 롤이 저온벽으로 성장해감과 동시에 그 아래 혹은 위에서 몇 개의 롤이 연속적으로 발생되며, 저온벽쪽으로 성장하면서 순차적으로 셀형태의 유동층을 형성하게 된다. 또한 Ra_η 수가 낮을수록 초기 안정된 농도구배에 비해 가열면에서의 온도구배가 작으므로, 온도차에 의한 가열벽면 인접 유체의 상

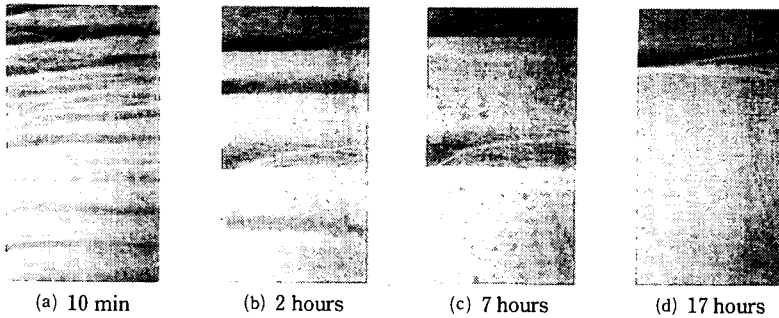


Fig. 3 Shadowgraphs of layer formation with time; $Ra_\eta=2.01 \times 10^5$, $Ta=0$

층높이가 작아지게 되어 층의 성장높이가 작아지게 된다. 이에 따라 초기 셀의 개수는 Ra_η 수가 작을수록 더 많이 나타난다. 형성된 층들이 모두 같은 방향으로(반시계 방향으로) 회전함에 따라 모든 층의 상부는 이와 접하고 있는 상부층의 저온부와, 하부는 이에 접한 하부층의 고온부와 접하게 된다. 이에 따라 저온벽에서 고온벽으로 흐르는 층사이의 경계면은 고온벽쪽으로 갈수록 상부층의 고온유체와 접하게 되므로 점점 가열되어 밀도가 증가하기 때문에 저온벽에서 고온벽으로 갈수록 위로 조금씩 경사지게 된다. 셀유동층이 모두 형성되고 나면 시간이 지남에 따라 전술한 바와 같이 인접한 셀유동층끼리 서로 합쳐지는 현상이 나타난다. 셀유동층의 합쳐지는 과정은 밀폐용기내의 전 영역에서 인접한 셀유동층 중 비교적 두께가 얇은 층에서 나타난다.

층이 서로 합쳐지는 과정을 계속하여 오랜시간(13시간)이 경과한 후 밀폐용기내에는 두 개의 층이 나타났다. 두 층의 두께가 크고 농도차 또한 크므로, 이 두 개의 층이 느린 속도의 농도확산에 의해 합쳐질 수 있을 정도의 농도차가 되기까지는 매우 오랜 시간이 걸려 실험 시작후 24시간이 지나서도 층과 층 사이의 인접면은 약간 위 혹은 아래로 이동된 상태가 된다. 초기 물의 형성과 층으로의 성장은 주로 온도차에 의한 자연대류에 의해 주도되고, 층이 합쳐지는 과정은 주로 매우 느린 속도의 농도확산에 의해 주도되므로 층이 형성되는 시간에 비해 층이 합쳐지는 시간은 상당히 길어지게 되고 정상상태에 이르는 시간은 무척 길어지게 된다. 아주 긴 시간이 지난 후의 밀폐용기내의 유동형태는 관찰할 수 없었지만, 시간에 따른 유동 경향을 미루어 보아 최종상태는 단일셀형태가 될 것

으로 예상된다. 또한 Ra_η 수가 작을수록 온도차에 의한 자연대류의 강도가 작아져 전체적으로 과정이 느리게 진행되므로 단일셀로 이르는 시간도 그만큼 지연된다.

3.2 회전계

본 실험에서는 회전에 의한 영향을 관찰하기 위하여 전층흐름영역에서 회전이 없는 경우와 동일한 Ra_η 수에서의 회전실험을 통해 시간에 따른 유동형태의 변화를 관찰, 비교하였다.

Fig. 4는 층을 이룬 유동형태로서 $Ra_\eta=2.01 \times 10^5$ 에서, $Ta=3.01 \times 10^6$ 일 때의 시간에 따른 유동현상을 웨도우그래프방법에 의해 가시화한 것이다. 동일 Ra_η 수에서의 회전이 없는 경우(Fig. 3)와 비교해 보면, 회전이 있는 경우에 물의 생성, 유동층으로의 성장 및 층과 층이 합쳐지는 과정은 회전이 없는 경우와 같은 메카니즘으로 진행된다. 그러나 초기 물의 발생과 층의 형성 등 전과정을 통하여 코리올리효과에 의한 반경방향속도의 현저한 감소로 셀 내부유동의 세기가 약화됨에 따라 과정의 진행이 지연된다. 다시 말해, 초기에 발생된 물의 성장높이는 회전의 영향에는 관계없이 온도차에 의한 부력과 초기농도차에 의한 성층력의 비에 의해 결정되기 때문에 물의 성장 높이는 비회전의 경우와 같게 되나, 회전에 의해 반경방향으로의 속도가 감소하므로 물의 발생 및 성장이 억제된다.

시간의 경과에 따른 층 개수의 변화를 살펴보면, Fig. 3에서와 같이 비회전의 경우 2시간 경과후 5개의 층이, 7시간 경과후 3개의 층이, 17시간 경과후 2개의 층이 형성된 반면 $Ta=3.01 \times 10^6$ 인 경우에는 각각 8, 5, 3개의 층이 형성되어 있으므로 회전의 영향으로 인해 층의 성장과정이 지연됨을 알

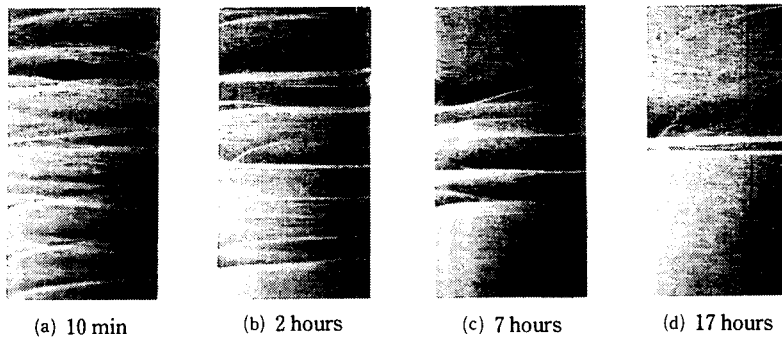


Fig. 4 Shadowgraphs of layer formation with time; $Ra_7=2.01 \times 10^5$, $Ta=3.01 \times 10^6$

수 있다. 층사이의 경계면 역시 층내부의 반경방향 속도의 감소로 인해, 고온벽(저온벽)에서 저온벽(고온벽)으로 흐르는 층상부(하부)의 유체가 이와 접하고 있는 상부층(하부층)의 저온부(고온부)와 접촉하는 시간이 길어지게 되므로 비회전의 경우보다 더욱 냉각(가열)된다. 이에 따라 층사이의 경계면은 고온벽쪽으로 더욱 올라가고 저온벽쪽으로 더욱 내려가게 되어 경계면의 기울기는 더욱 경사지게 된다. 이러한 경향은 회전의 영향이 강해질수록 더욱 뚜렷이 나타난다.

Fig. 4(a)에서 좌측 저온벽쪽 경계면의 끝부분이 두 개로 나누어지게 나타나는데 이는 셀형태의 유동층이 완전히 발달되지 않아 층의 형태가 이 부분에서 테이퍼형태를 갖기 때문이며, 이에 따라 아직 저온벽면쪽에서 완전한 형태의 셀 유동층이 형성되지 않았음을 확인할 수 있다. 이를 Fig. 3(a)와 비교해보면, 회전이 없는 경우 10분경 층이 완전히 형성된 반면, 회전의 경우 아직 저온벽면쪽에서 층이 완전히 형성되지 않았으므로, 이에 따라 회전에 의해 셀형태의 유동층내의 유동의 세기가 약해져

층의 형성과정이 억제됨을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 회전의 영향이 강해진 $Ta=1.20 \times 10^7$ 일 때 시간의 변화에 따른 유동현상을 가시화한 것으로, $Ta=3.01 \times 10^6$ 인 경우와 비교해 보면 회전의 영향이 강해짐에 따라 전술한 효과가 더 강해짐을 알 수 있다. 좀 더 구체적으로 살펴보면, 실험 시작 후 10분이 경과 했을 때, 회전의 영향이 강해짐에 따라 코리올리효과가 강해지고, 이에 따라 층내부의 유동의 세기가 더욱 약해져 유동층의 테이퍼진 형태가 저온벽면으로부터 더 멀어짐을 즉, 셀 형성과정이 억제됨을 알 수 있다. 층사이의 경계면 역시 회전의 영향이 강해짐에 따라 경계면의 기울기가 더욱 경사지게 나타난다. 또한 회전이 없는 경우에는 Fig. 3(d)에서와 같이 17시간 경과 후 이미 셀 사이의 경계면이 하나로 형성되어 위쪽으로 조금 이동된 상태인데, $Ta=3.01 \times 10^6$ 경우에는 Fig. 4(d)와 같이 층이 세 개에서 두 개로 합쳐지려 하고 있고, 회전속도가 더 증가한 $Ta=1.20 \times 10^7$ 인 경우에는 Fig. 5(d)와 같이 아직도 여러개의 층 형태를 취하고 있다. 같은 회전수에서 Ra_7 수의 변

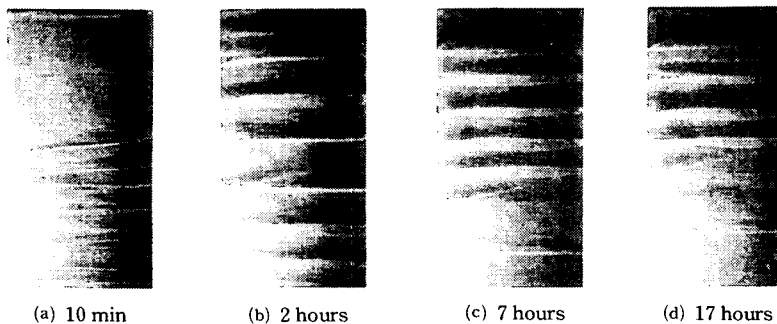


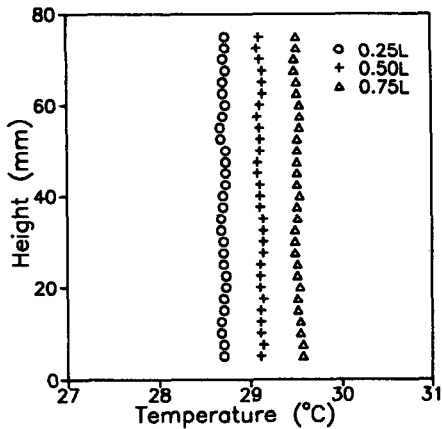
Fig. 5 Shadowgraphs of layer formation with time; $Ra_7=2.01 \times 10^5$, $Ta=1.20 \times 10^7$

화에 따른 유동현상을 살펴보면, 회전이 없는 경우와 마찬가지로 Ra_T 수가 커짐에 따라 초기 농도의 안정화에 비해 온도차에 의한 부력의 효과가 커지므로 고온벽면 근처에서 발생하는 유동의 세기가 커져 초기에 발생하는 물의 개수가 감소하며 유동층으로의 성장 및 층이 합쳐지는 속도 등 모든 과정이 빠르게 진행된다. 또한 오랜 시간이 경과하면 회전의 영향이 있는 경우에도 역시 농도확산에 의하여 모든 셀형태의 유동층이 합쳐져 단일셀형태가 될 것으로 예상된다.

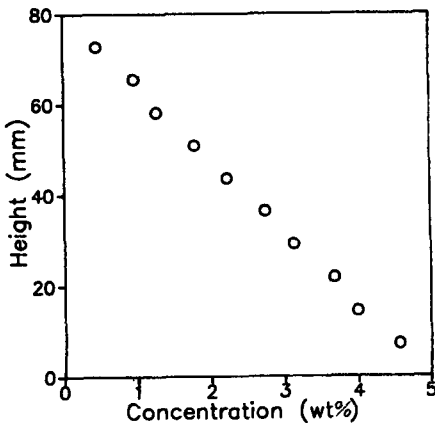
3.3 온도 및 농도분포

밀폐용기내에서의 온도 및 농도분포는 각 흐름영역에 따라 뚜렷이 구분되며, 기존의 직각밀폐용기내의 실험결과^(2,5)와 정성적으로 일치하는 경향을

보인다. Fig. 6은 비회전계에 대한 정체흐름영역에서의 온도 및 농도분포를 나타낸 것으로 밀폐용기내에 양 벽면의 온도차가 작아 아무런 유동이 일어나지 않으므로 온도는 수직방향으로의 변화가 없이 수평방향(반경방향)으로만 변화하여 가열벽면과 평행한 온도분포를 보인다. 이로써 열전달은 고온벽면에서 저온벽면으로 전도에 의하여 이루어짐을 알 수 있다. 또한 농도는 초기 안정된 성층화분포를 그대로 유지한다. 정체층과 셀형태의 유동층이 존재하는 흐름영역인 부분층흐름영역에서는 Fig. 7과 같이 유동층 내부에서의 온도분포는 대류유동에 의하여 역'S'자 비슷한 모양으로 나타나고 농도분포는 균일하다. 정체층에서의 온도분포는 정체층의 윗부분은 상부층의 저온면과 접하고 아랫부분은 하부층의 고온면과 접하므로 아래쪽의 온도가 윗쪽보

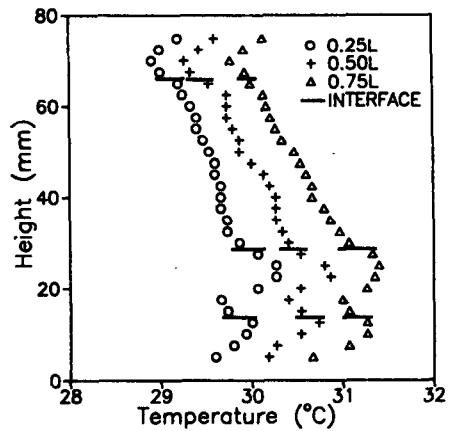


(a) Temperature profile

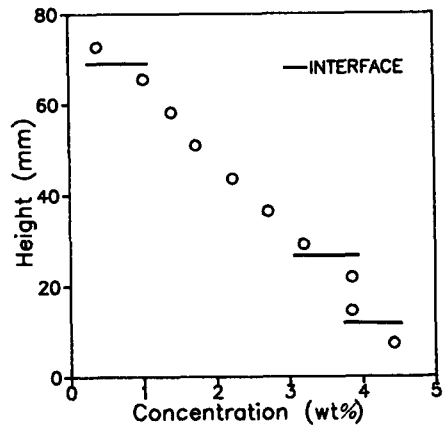


(b) Concentration profile

Fig. 6 Vertical temperature and concentration profiles at $t=10$ hours; $Ra_T=2.53 \times 10^2$, $Ta=0$



(a) Temperature profile



(b) Concentration profile

Fig. 7 Vertical temperature and concentration profiles at $t=10$ hours; $Ra_T=4.14 \times 10^3$, $Ta=0$

다 높은 불안정한 형태를 나타내며, 선형적인 온도 분포로 미루어 보아 열전달은 전도에 의하여 이루어짐을 알 수 있다. 이는 정체층에서의 농도분포가 이 영역에서 안정하게 성층화되어 결국 전체적인 밀도분포가 안정하여 정체층내에서 유동이 거의 없기 때문이다.

Figs. 8~13은 전층 흐름영역인 경우로서 $Ra_n = 2.01 \times 10^5$ 일 때, 회전이 없는 경우와 $Ta = 3.01 \times 10^6$ 및 $Ta = 1.20 \times 10^7$ 인 경우의 $r/L = 0.25, 0.5, 0.75$ 에서의 온도 및 농도의 수직분포를 시간에 따라 각각 나타내고 있다. 먼저 수직 온도분포를 살펴보면, 회전이 없는 경우와 회전이 있는 경우 모두 각 층에서의 온도분포는 온도차만에 의한 단일확산 자연대류와 마찬가지로 역'S'자 비슷한

형태로 나타나며, 온도의 확산율은 크므로 층과 층 사이의 경계면에서는 비교적 완만한 변화를 보인다. 밀폐용기내의 $r/L = 0.25, 0.5, 0.75$ 인 세 지점으로 나누어 수직방향으로 측정한 온도분포에서, 저온벽면에 가까운 $r/L = 0.25$ 지점에서의 수직방향 온도분포는 고온벽면에 가까운 $r/L = 0.75$ 지점의 수직방향 온도분포보다 낮은 값들을 가지며, 중심부인 $r/L = 0.5$ 지점의 수직방향 온도분포는 그 평균에 근사한 값들을 가짐을 알 수 있다. 또한 층두께가 두꺼울수록 셀내의 역'S'자 형태의 수직방향 온도변화가 더욱 커지게 된다. 회전에 따른 층내부에서의 수직 온도분포의 변화를 살펴보면(Fig. 8(a), Fig. 10(a), Fig. 12(a)), 회전의 영향이 커질수록 각 층내부에서 수평방향으로 각 지점의 온도

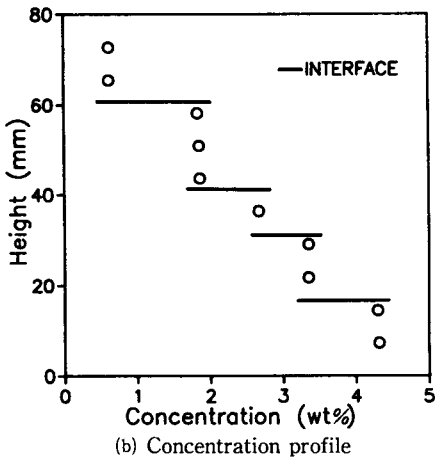
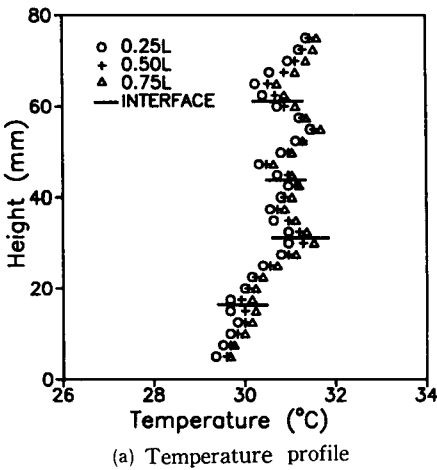


Fig. 8 Vertical temperature and concentration profile at $t=5$ hours; $Ra_n = 2.01 \times 10^5$, $Ta = 0$

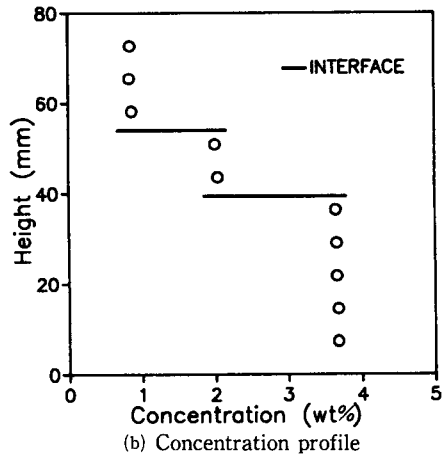
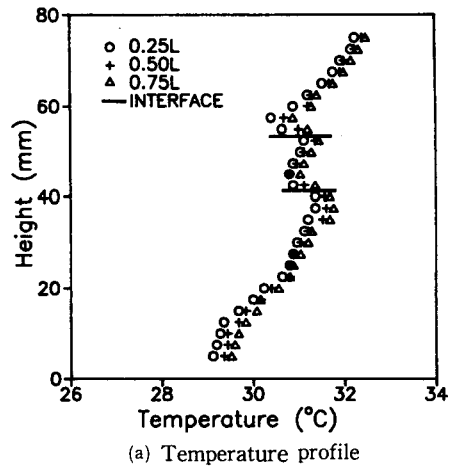


Fig. 9 Vertical temperature and concentration profiles at $t=10$ hours; $Ra_n = 2.01 \times 10^5$, $Ta = 0$

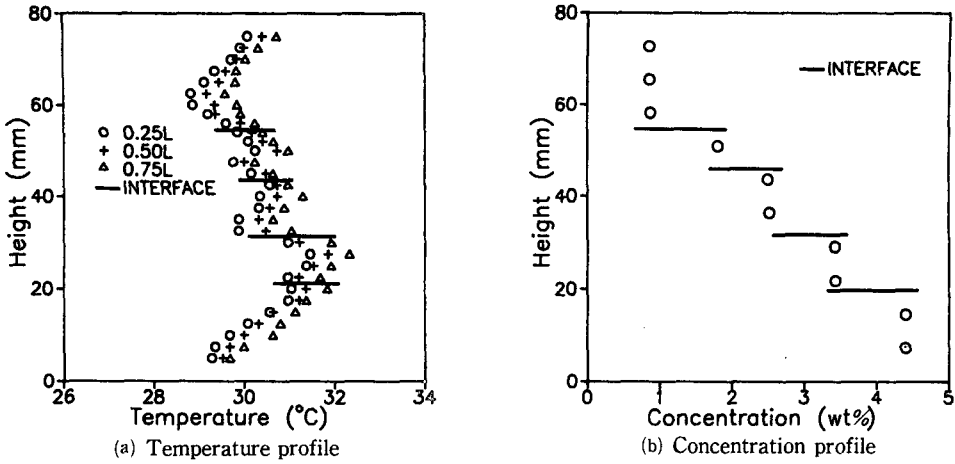


Fig. 10 Vertical temperature and concentration profiles at $t=5$ hours; $Ra_r=2.01 \times 10^5$, $Ta=3.01 \times 10^6$

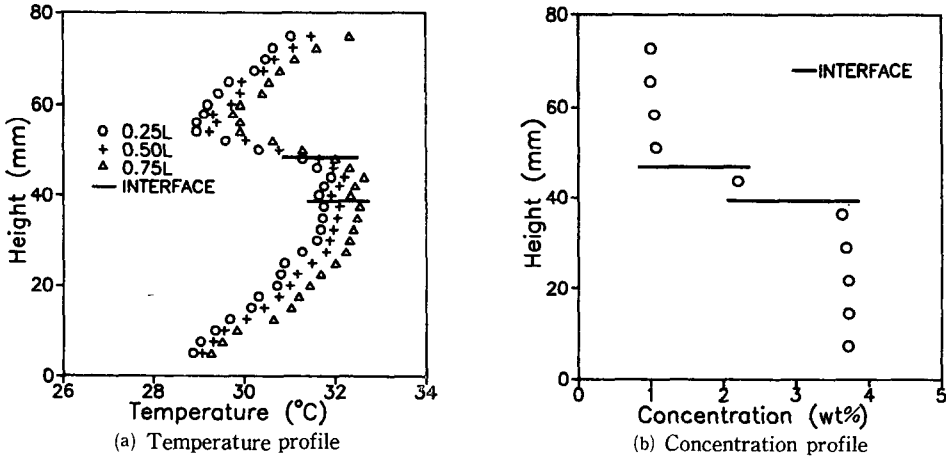


Fig. 11 Vertical temperature and concentration profiles at $t=15$ hours; $Ra_r=2.01 \times 10^5$, $Ta=3.01 \times 10^6$

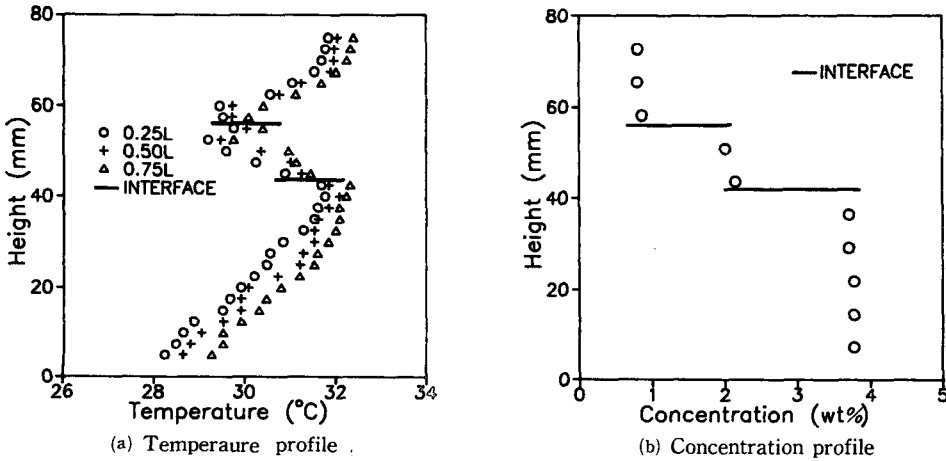
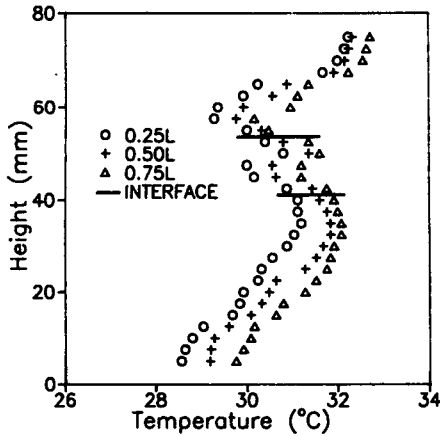
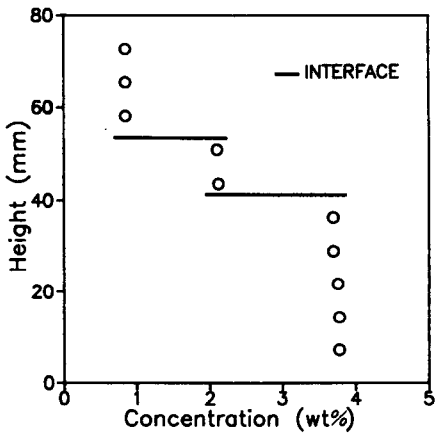


Fig. 12 Vertical temperature and concentration profiles at $t=13$ hours; $Ra_r=2.01 \times 10^5$, $Ta=1.20 \times 10^7$



(a) Temperature profile



(b) Concentration profile

Fig. 13 Vertical temperature and concentration profiles at $t=20$ hours; $Ra_\eta=2.01 \times 10^5$, $Ta=1.20 \times 10^7$

차가 크게 나타남을 알 수 있다. 이에 따라 회전의 영향이 강해질수록 대류의 영향이 약해지고 전도의 영향이 강해짐을 알 수 있다.

수직 농도분포를 살펴보면, 회전이 없는 경우와 회전이 있는 경우 모두 각 층에서의 농도는 대류에 의한 혼합으로 균일하게 됨을 알 수 있으며, 용기 하부에서 상부로 갈수록 각 층에서의 농도는 낮아짐을 알 수 있다. 또한 농도의 확산속도는 온도의 확산속도보다 굉장히 느리므로 층사이의 경계면에서는 급격한 변화를 보인다. Figs. 8~13에서와 같이 시간이 경과하여 층의 개수가 줄어드는 모든 경우에는 혼합된 층내의 농도분포가 합쳐지기 전의 두 층의 농도값의 평균값에 근사하게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 환형밀폐용기내에서 농도가 중력 방향으로 안정하게 성층화된 유체에 수평방향으로 온도구배가 가해지는 경우에 발생하는 유동현상에 대해 회전영향을 고려하여 실험적으로 연구한 결과, 다음의 결론을 얻었다.

비회전계에서 환형밀폐용기내의 유동형태영역은 직각 밀폐용기에서와 마찬가지로 Ra_η 수에 따라 크게 정체흐름영역, 부분층흐름영역, 전층흐름영역, 단일셀흐름영역의 네 가지 흐름영역 형태로 나타난다. 초기 롤의 형성과 층으로의 성장은 주로 온도차에 의한 자연대류에 의해 주도되고, 층이 합쳐지는 과정은 주로 매우 느린 속도의 농도확산에 의해 주도 된다. Ra_η 수가 작을수록 온도차에 의한 자연대류의 강도가 작아져 전체적으로 과정이 느리게 진행되므로 단일셀로 이르는 시간도 그만큼 지연된다. 회전계에서 회전의 영향이 증가할수록 반경방향의 유동의 세기가 약해져 벽면에서의 롤의 발생, 층으로의 성장 및 층이 합쳐지는 과정은 점점 억제되며, 층사이의 경계면의 기울기는 더욱 경사지게 된다. 또한 비회전계나 회전계의 두 경우 모두 셀형태의 유동층 내부의 온도는 역'S'자 비슷한 형태로 안정된 성층화 분포를 나타내며 농도는 일정하게 된다. 인접한 층사이의 경계면에서 온도는 완만하게 변화하지만 농도는 급격한 변화를 나타낸다.

후 기

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

참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Lee, J., Hyun, M. T. and Moh, J. H., 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Veronis, G., 1968, "Large-Amplitude Benard Convection in a Rotating Fluid," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 31, Part 1, pp. 113~139.
- (9) Hyun, J. M., Fowles, W. W. and Warn-Varnas, A., 1982, "Numerical Solutions for the Spin-Up a Stratified Fluid," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 117, pp. 71~90.