大韓機械學會論文集 第18卷 第12號, pp. 3297~3304, 1994

〈論 文〉

농도 성층화된 유체의 아랫면 가열에 의한 이중확산대류에 관한 연구

강신형* · 김무현** · 이진호***

(1994년 6월 22일 접수)

Double-Diffusive Convection in a Salt-Stratified Fluid Heated from Below

Shin-Hyung Kang, Moo-Hyun Kim and Jinho Lee

Key Words: Double-Diffusive Convection(이중확산대류), Stratification Of Concentration(농도 성층화), Heated From Below(아랫면 가열), Mixed-Layer(혼합층), Effective Rayleigh Number(유효 Ra수)

Abstract

Experimental investigation have been made to study the double-diffusive nature of convection of an initially stratified salt-water solution heated from below in a cylindrical cavity. The objective is to examine the process of mixed-layer formation, the flow phenomena, the heat transfer characterstics, and temperature and concentration distribution according to the changes in the effective Rayleigh number based on the reference height which represents the relation of temperature and concentration gradient. The types of initially formed flow pattern are categorized in three regimes depending on the effective Rayleigh number ; stragnant flow regime, single mixed-layer flow regime and successively formed multiple mixed-layer flow regime. The temperature and concentration profiles are both uniform in each layer due to convective mixing in the layered flow regime, but both linear in stagnant flow regime and single mixed-layer flow regime. At the interface betwen adjacent layers, the temperature changes smoothly but the concentration changes rapidly. The layers expand by diffusion of concentration throughthe interface along with its random fluctuation.

기 호 설 명

ΔC : 농도차, {wt%}
H : 수조높이 {m}
Ra_S : 농도차 기준 Rayleigh수$=g\bar{\beta}\Delta CH^3/\alpha\nu$
Ra_T : 온도차 기준 Rayleigh수$=g\bar{\beta}\Delta CH^3/\alpha\nu$
Ra_η : 유효 Rayleigh수$=g\bar{\beta}\Delta CH^3/\alpha\nu$
ΔT : 온도차 {℃}
t : 시간{s}
z : 축방향좌표{m}
β : 농도차에 의한 체적팽창계수, {1/wt%}
β : 열팽창계수{1/℃}
η : 대표길이$=-\beta\Delta T/\bar{\beta}(dC/dz)_o$,{m}

*정회원, 건양대학교 기계공학과
**정회원, 울산대학교 기계공학과
***정회원, 연세대학교 기계공학과

1. 서 론

이중확산대류(double-diffusive convection)는 온

도나 농도 등 확산율이 서로 다른 두 부력인자가 동시에 작용하여 일어나는 대류현상으로, 그중 하나만이 부력인자로 작용하는 단일확산대류에서는 볼 수 없는 층형구조(layered flow structure)등의 특이한 현상이 발생하여 그 현상을 이해하기 어렵다. 초기의 이중확산대류에 관한 연구는 그 적용분야가 주로 해수의 유동이나 기상변동과 같은 지구과학분야였고, 직접적인 공학분야에 대한 응용이 적었기 때문에 다른 분야에 비해 발전속도가 느렸다. 그러나 최근에 이르러 이의 응용분야가 확대됨에 따라 대기의 순환, 바닷물의 유동, 태양 연못, 주조나 응고, 결정성장[1~7]등과 같은 많은 자연현상 및 공학분야의 전달현상과 관련하여 활발한 연구가 진행되고 있다.

이중확산대류에 관한 연구는 주로 온도와 농도의 두 가지 부력인자에 대하여 이루어지며, 중력방향에 대한 온도와 농도 등 각 부력인자에 따른 밀도구배의 작용방향에 따라 불안정한 유형과 일반적인 유형으로 나눌 수 있다. 불안정한 유형은 온도와 농도구배가 중력과 같은 방향으로 작용하는 경우로,

이 중 salt finger, 아랫면 가열(heated from below)에 관한 연구는 해수의 유동 및 태양 연못 등과 관련되어 많은 연구자들의 주요 연구과제가 되어 왔다.[2~5] 또한 일반적 유형은 온도구배나 농도구배 중 적어도 한 개의 부력인자의 구배가 중력의 작용방향에 대하여 수직으로 가해지는 경우로, 이에 관한 연구는 주로 농도가 안정하게 성층화된 용액에 수평방향으로 온도구배가 가해지는 경우인 옆면 가열(lateral heating)에 대해 진행되었다.[7~10]

최근에 대두되고 있는 에너지위기에 따른 새로운 에너지 활용방법의 한 형태로서 태양의 복사에너지를 축열하기 위한 태양 연못에 연구와 관련하여 아랫면 가열에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 태양 연못은 이중확산대류 중 아랫면 가열의 대표적인 예로서, 연못내 소금물의 농도 및 바닥에서의 태양복사 열에 의한 복합적인 유동현상에 의해 태양복사열을 축열하는 시스템으로 축열량 및 축열효율은 축열과정에 나타나는 이중확산에 의한 유동에 의해 결정되어 진다. 따라서 태양 연못에서 보다 효율적으로 축열을 얻기 위해서는 무엇보다도 온도구배와 농도구배의 상호작용에 의한 유동현상 및 열적 특성에 대한 정확한 이해가 우선되어야 한다.

농도가 중력방향으로 안정하게 성층화된 유체를 아랫면에서 가열하는 경우는 아랫면 가열로 인한 밀도의 국부적인 불안정에 의해 국부적인 대류혼합을 일으키며, 그 결과로 혼합층이 형성되어 경계면을 두고 정체층과 혼합층으로 나누어지는 층형 구조를 갖는다. 이에 관련된 연구로 Turner[11]는 아랫면에서 가해지는 열량과 혼합층 두께와의 관계를 제시하였고, 혼합층의 성장은 경계면에서의 열계층이 깨지며 일어난다고 설명하였다. Huppert[12]는 열유속이 큰 경우에 먼저 형성된 혼합층 위에 이차 혼합층이 생김을 관찰하였으며, Lewis 등[3]은 태양 연못에 대한 실험적 연구로써 하부에서 열유속이 가해지고 상부에서 냉각되어 일어나는 혼합층의 성장을 간섭계로 가시화하였다. Fernando[4]는 Turner[11]와는 달리 혼합층의 성장이 온도의 불안정에 의한 불규칙한 난류와(turbulent eddy)에 의해 이루어짐을 밝혔고, Tanny 등[13]은 혼합층 높이의 측정과 쉐도우그래프방법을 이용한 혼합층의 성장과정을 가시화하였다. 이러한 유형의 안정성에 관한 연구는 Veronis[14]에 의해 기본방정식이 선형인 경우에 대한 연구가 진행되어 왔으나, 실험결과와는 많은 차이를 보이고 있다.

본 연구에서는 자연계의 유동장 해석과 공학적 응용을 위해 필수적으로 확보해야할 이중확산의 복합영향에 대한 분석을 시도하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 농도가 중력방향으로 안정하게 성층화된 유체를 아랫면에서 가열하는 경우에 발생하는 유동현상 즉, 온도구배와 농도구배가 동시에 작용하여 일어나는 이중확산대류에 관하여 연구하였다. 이 때 유동공간으로 수직 원통형 밀폐용기를 사용하였으며, 온도구배와 농도구배의 변화에 따른 유동형태, 온도분포 및 농도분포를 실험적으로 조사하여 열전달 및 유동특성, 그리고 유동형성의 메카니즘에 관하여 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같이 관찰부위인 원통형 밀폐용기와 용기의 벽면을 일정한 온도로 유지시키기 위한 두개의 수조로 이루어져 있다. 윗면과 아랫면이 등온조건이므로 두개의 수조를 각각 밀폐용기의 상부와 하부에 설치하였다. 각 수조와 밀폐용기사이에는 열전도율이 높은 알루미늄판을 설치하여 등온조건을 만족시켜 주었다. 원통형 밀폐용기는 지름 100 mm, 높이 100

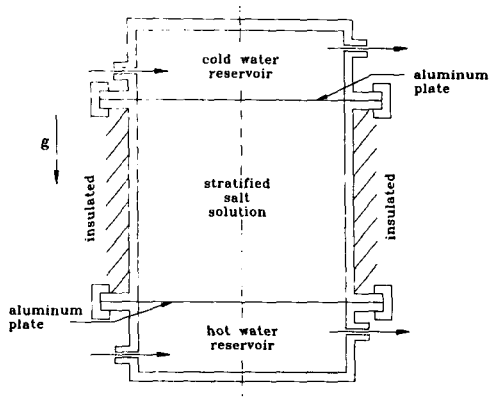


Fig. 1 Schematic diagram of the cylindrical test section

mm로 이루어져 있고, 상·하수조와 함께 두께 10 mm의 투명 아크릴을 사용하여 가시화가 가능하게 하였다. 실험중 원통벽면을 통한 열손실을 최소화하기 위해 두께 20 mm의 스티로폴로 단열시켰다.

모든 실험의 시험유체로는 증류수와 소금물을 사용하였다. 먼저 하부수조에 초기온도의 증류수를 순환시키고, 밀폐용기내의 용액을 성층화시켰다. 농도의 성층화를 위해 성층화하는 소금물을 30단계의 농도차로 나누어 각각의 농도를 갖는 용액을 밀폐용기에 주입하여 선형적인 농도 분포를 갖게 하는 층계적 방법(step method)을 사용하였다. 용기에 용액을 주입하는 과정중 용액이 떨어지는 힘에 의해 농도의 성층화가 깨지는 것을 방지하기 위해 용액 위에 비닐을 띄워 사용하였다. 그 후 상부수조를 용기에 클램프로 체결하고 초기온도의 증류수를 순환시켰다. 확산에 의해 용기내의 용액이 선형적인 농도분포를 갖게 되는데는 약 2시간 정도의 시간이 걸렸다. 밀폐용기내의 유체의 농도분포가 선형적으로 된 후, 상부수조에 고온의 증류수를 순환시키면서 밀폐용기내의 유동현상을 관찰하였다.

밀폐용기내의 온도측정을 위해 지름 1.2 mm의 스테인레스관 속에 열전대(T-type)를 넣은 프로브(probe)를 제작하여, 용기의 벽면에 뚫은 지름 1.5 mm의 구멍을 통해 밀폐용기의 중심위치에 설치하고 실리콘 접착제로 봉하였다. 또한 등온벽면에 열전대를 설치하여 실험중 등온조건을 만족하는지를 조사하였다. 밀폐용기의 내부에 설치한 열전대는 컴퓨터가 제어하는 스테핑으로 모터로써 상·하로 자동적으로 이송하게 하여 실험중 내부의 온도분포를 5 mm간격으로 측정하였다. 이 때 온도의 측정은 ±3%의 실험오차를 보였다.

농도측정을 위해 가는 백금선을 사용하여 농도측정을 프루브를 제작하였으나 사용회수가 증가함에 따라 프루브의 저항이 증가하여 같은 농도에서 전류량이 달라지기 때문에 농도측정 프로브는 한 지점에선의 농도를 측정하는데 부적합하였다. 따라서 본 실험에서는 밀폐용기에 10 mm간격으로 지름 1.5 mm의 구멍을 수직방향으로 뚫고 실리콘 접착제로 봉한 후, 추출용 주사바늘로 미량의 소금물을 추출하여 굴절률측정기(refractometer)를 이용하여 굴절률을 측정하고, 표준용액을 기초로 하여 만든 기준표와 비교함으로써 농도를 산출하였으며, 반복하여 측정한 결과 ±5%의 실험오차를 보였다.

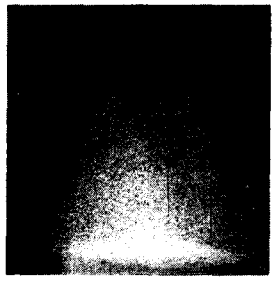
밀폐용기내에서의 유동형태는 쉐도우그래프(shadowgraph)방법을 이용하여 가시화하였다. 헬륨-네온 레이저에서 나오는 광선을 spatial filter assembly를 이용하여 광선중에 있는 노이즈를 제거하였고, 이 광선을 밀폐용기에 비추어 스크린에 투영된 영상을 사진기로 촬영하여 시간에 따른 변화를 관찰하였다. 가시화과정중 실험용기 자체가 렌즈 역할을 하므로 스크린을 환형 밀폐용기의 곡률과 비슷한 곡률을 갖도록 만들어 가시화의 정확성을 높였다.

본 연구에서의 실험영역은 $\Delta T=5.0-21.1(℃)$, $\Delta C=2-8(wt\%)$, $Ra_T=1.48\times10^8-7.27\times10^8$, $Ra_S=1.10\times10^9-4.47\times10^9$, $Ra_\eta=1.05\times10^4-6.19\times10^7$이며, 무차원수의 계산에 필요한 물성치들은 양단의 온도 및 초기 성층화 농도의 평균값을 기준으로 하여 계산하였다.

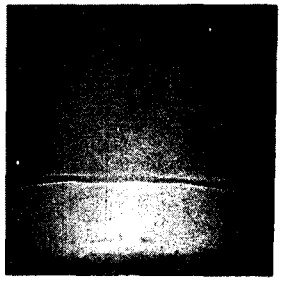
3. 결과 및 고찰

밀폐용기내의 혼합층의 성장에 따른 전체 유동형태(global flow pattern)는 Chen 등[8]이 제시한 가해지는 온도와 농도구배의 상관관계에 따른 대표길이 η를 특성길이로 한 Rayleigh수 즉, 온도와 농도구배의 상관관계를 나타내는 Ra_η수에 따라 정체흐름영역(stagnant flow regime), 단일혼합층 흐름영역(single mixed layer flow regime) 그리고 여러개의 혼합층 흐름영역(successively formed multiple mixed-layer flow regime)의 세 가지 흐름영역으로 나눌 수 있다. Fig. 2는 Ra_η에 따른 대표적인 유동형태를 나타내고 있다.

각 흐름영역에서의 유동형태를 살펴보면, 안정한



(a) $Ra_\eta=1.05\times10^4(Ra_T=1.56\times10^8, Ra_S=3.84\times10^9)$



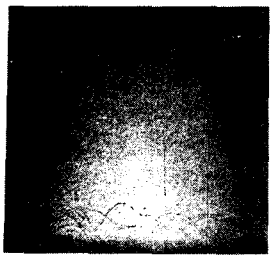
(b) $Ra_\eta=6.66\times10^5(Ra_T=4.94\times10^8, Ra_S=4.47\times10^9)$

(c) $Ra_\eta=8.14\times10^6(Ra_T=7.27\times10^8, Ra_S=3.25\times10^9)$

Fig. 2 Global flow patterns(t=60 min). (a) Stagnant flow regime, (b) Single mixed-layer flow regime, (c) Successively formed multiple mixed-layer flow regime.

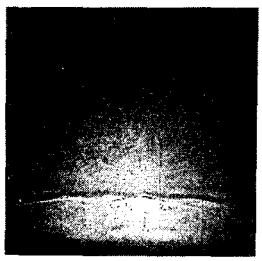
농도성층화에 의한 농도구배가 아랫면 가열에 의한 온도차에 비해 커 Ra_η수가 작은 정체 흐름영역의 경우에는 ($Ra_\eta<1.05\times10^4$), Fig. 2(a)에서와 같이 온도차에 의한 부력이 안정하게 성층화된 농도구배에 의한 억제력을 이기지 못하여 유동이 발생하지 않는다. 이 경우 아랫면 가열로 발생하는 온도차만에 의한 Bénard대류 현상과 비교해 볼 때, Bénard대류의 경우는 유체의 점성력와 온도차에 의한 부력의 상호관계에 의해 유동의 발생이 결정되지만, 본 실험에서는 점성력외에 안정된 농도에 의한 성층력이 또한 유동의 발생을 억제시키므로 Bénard대류보다는 높은 온도차에서 유동이 발생하게 된다.

Fig. 2(b)는 단일혼합층 흐름영역으로($1.91\times10^4<Ra_\eta<6.66\times10^5$), 아랫면에서 온도구배가 증가하여 온도차에 의한 부력이 커지면 하부에서부터 안정이 깨져 유동이 발생하게 된다. 이로 인해 용기내부는 아랫면 근처의 대류 혼합층과 상부의 정체층으로 구분되며, 이 두 층은 얇고 불규칙한 굴곡모양을 갖는 농도 경계면에 의해 나뉘게 된다. 이와 같은 대류혼합층은 다음과 같은 두 가지 메카니즘에 의하여 성장하게 된다. (Fig. 3) 먼저, 가열에 의해 아랫면의 온도가 상승하면 아랫면근처에서 발생된 열경계층이 불안정해지며 불규칙한 유동이 발생한다. 이러한 유동에 의해 상부의 정체층과 하부의 혼합층 사이의 경계면은 심한 굴곡의 모양을 갖게 되며 불규칙하게 요동하게 된다. 경계면의 불규칙한 요동은 상부 정체층의 미소량의 유체를 휘말아 끌어들여 혼합층과 섞이게 하며 또한 정체층 하부와 혼합층 상부의 경계에서의 농도차이를 작게 만들어 경계면에 접한 정체층 유체들 혼합층과 섞이게 된다. 이러한 과정을 통해 혼합층은 점점 확대되고 정체층은 점점 축소되며, 두 층사이의 경계면은 상부로 상승하게 된다. 시간이 지남에 따라 온도차의 감소로 인해 혼합층내의 유동의 세기가 감소되어 경계면의 굴곡이 점차 완만해진다. 이에 따라 경계면의 형상은 거의 평평해지며 이 때 두층 사이의 경계면의 요동 역시 거의 사라지게 되며,



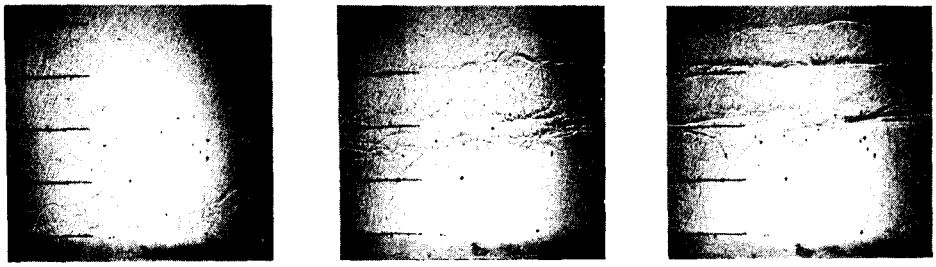
(a) t=15 min

(b) t=40 min



(c) t=80 min

Fig. 3 Shadowgraphs showing the growth of bottom mixed-layer; $Ra_\eta=7.51\times10^4(Ra_T=2.09\times10^8, Ra_S=2.94\times10^9)$



(a) t=10min (b) t=30min (c) t=80min

Fig. 4 Shadowgraphs showing the growth of multiple mixed-layer; $Ra_\eta = 8.14\times10^6$ ($Ra_T = 7.27\times10^8$, $Ra_S = 3.25\times10^9$)

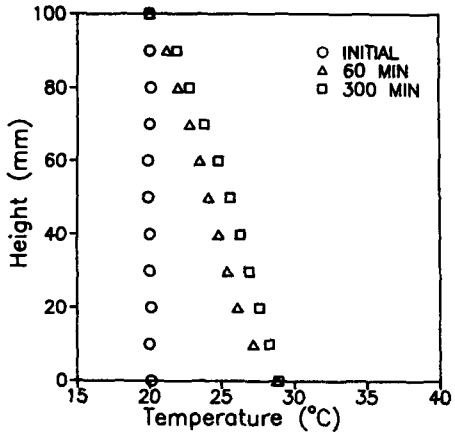
시간이 지나면 이와 같은 과정이 계속되어 결국 모든 영역이 혼합층으로 바뀌게 된다.

Fig. 2(c)는 여러개의 혼합층 흐름영역을 나타낸 그림으로, 주어진 초기의 농도 구배에 대해 단일층 흐름영역보다 더 큰 온도구배가 아랫면에 가해지면 ($Ra_\eta > 1.22\times10^6$), 여러개의 층이 하부에서부터 차례로 발생된다.

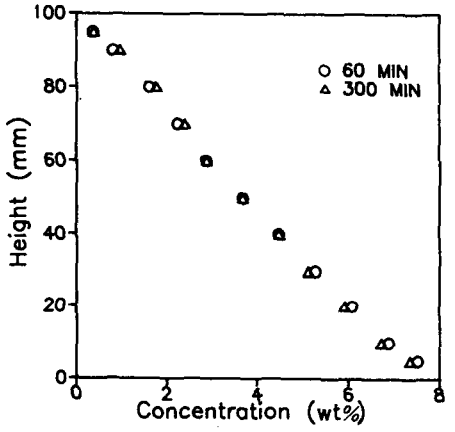
Fig. 4는 여러개의 혼합층 흐름영역에서의 층의 성장과정을 가시화 촬영한 것 중 대표적인 것을 나타낸 것으로, 초기 아랫면 가열에 의해 발생되는 첫번째 혼합층은 단일혼합층의 생성 및 성장과 같은 메카니즘으로 형성된다. 그러나 정체층과 혼합층사이의 온도차가 여전히 크므로 전도에 의한 정체층 하부에서의 열경계층의 형성이 첫번째 혼합층에서 발생한 불규칙한 유동에 의한 혼합층의 상승보다 빠르므로, 단일혼합층의 생성과 같은 메카니즘으로 정체층 하부에서 또 다른 불규칙한 유동이 발생하여 두번째 혼합층이 형성된다. 시간이 지남에 따라 이 혼합층들은 성장하게 되며, 첫번째 혼합층보다 상대적으로 작은 온도차에 의한 두 번째 혼합층은 상대적으로 더욱 빨리 에너지를 잃게 되어 결국 하부에서 더 빠른 속도로 상승하는 층과 합쳐지게 된다. 초기 아랫면에서의 온도차이가 커질 수록 더 많은 개수의 층이 나타나고, 이때 세번째 층의 발생과 합쳐지는 메카니즘은 앞에서 설명한 과정과 같다. 본 실험에서는 혼합층이 네개까지 발생하는 것을 관찰하였다.

Fig. 5~Fig. 7은 밀폐용기 중심위치에서의 수직방향에 따른 온도 및 농도분포를 나타내고 있다. Fig. 5는 정체 흐름영역의 경우로 용기내에 유동이 발생하지 않으므로, 하부면의 가열에 의한 아랫면과 내부 유체와의 온도차에 의해 열에너지는 전도에 의해 수직방향으로 확산되어 온도는 하부에서 상부까지 불안정하게 성층화된 분포를 갖는다. 농도분포는 초기의 안정한 선형적인 분포가 시간의 흐름과 관계없이 같은 분포를 유지하게 된다. 즉, 온도구배에 의한 부력이 농도구배에 의한 부력보다 작아 유동이 발생하지 않으므로 농도의 변화는 없지만, 온도는 전도에 의해 상부로 확산되어 나감을 알 수 있다.

Fig. 6은 단일혼합층 흐름영역에서의 시간에 따른 온도 및 농도의 수직분포를 나타낸 것이다. 상부의 정체 층내에서는 정체 흐름영역에서와 마찬가지로 온도는 경계면을 통한 전도에 의해 선형적인 경계면에서의 농도에 의한 경계면의 요동 역시 거의 사라지게 되며, 경계면에서 농도에 의한 부력과 온도에 의한 부력은 거의 같게 된다. 또한 경계면에서의 농도변화는 느린 확산율때문에 급격한 변화를 보이지만, 온도의 확산율은 농도(소금물)의 확산율보다 100배정도 크므로 경계층에서 완만한 변화를 보인다. 이러한 과정을 겪은 후 평평하게 된 경계면에서는 위에서 설명한 첫번째 메카니즘과 다른 다음과 같은 메카니즘에 의해 혼합층이 성장하게 된다. 시간이 지남에 따라 농도의 확산에 의해 경계면의 밀도는 점점 감소하게 되며, 경계면의 밀도 불안정에 의해 혼합층은 서서히 상승하게 된다. 위에서 언급한 바와 같이 혼합층내의 불규칙한 유동에 의한 혼합층의 상승은 경계면의 불규칙한 요동과 정체층을 휘말아 끌어들이는 과정을 통해 일어나므로 성장이 빠르고 경계면의 굴곡이 나타나지만, 경계면의 밀도 불안정에 의한 성장은 느린 농도 확산율의 지배를 받으므로 성장이 느리며 경계면은 비교적 평평한 모양을 갖는다. 이러한 혼합층의 성장속도는 Ra_η수가 클수록 더 빨라진다. 오랜

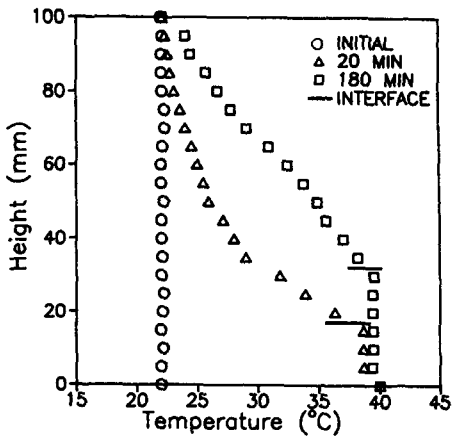


(a) Temperature profile

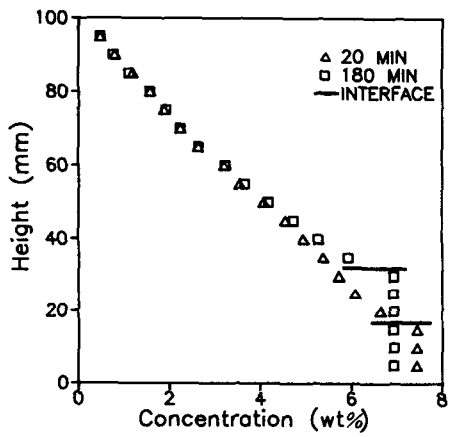


(b) Concentration profile

Fig. 5 Vertical temperature and concentration profiles at the core; $Ra_\eta = 1.05 \times 10^4$ ($Ra_T = 1.56 \times 10^8$, $Ra_S = 3.84 \times 10^9$)



(a) Temperature profile



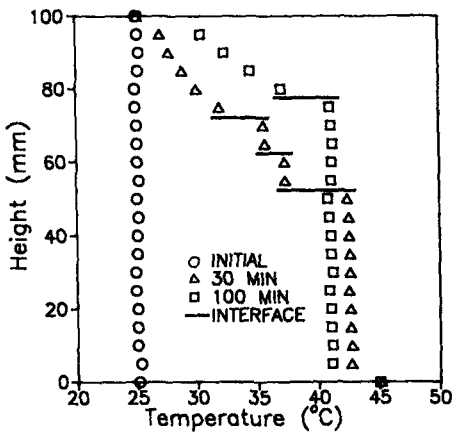
(b) Concentration profile

Fig. 6 Vertical temperature and concentration profiles at the core; $Ra_\eta = 6.66 \times 10^5$ ($Ra_T = 4.94 \times 10^8$, $Ra_S = 4.47 \times 10^9$)

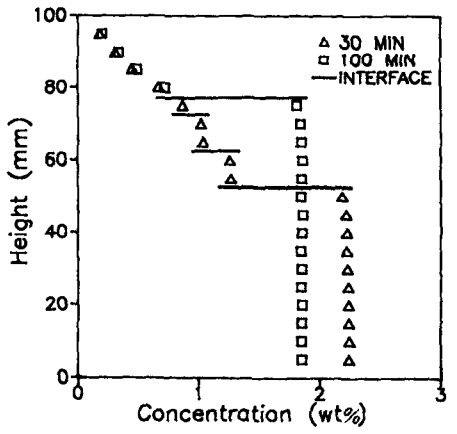
분포를 보이고, 농도의 경우 안정하게 성층화된 초기 농도분포를 유지하고 있다. 그러나 혼합층내에서는 불규칙 유동에 의한 혼합으로 온도는 가열면과 비슷한 온도로, 농도는 혼합층이 성장한 높이에서의 초기 농도와 아랫면에서의 초기 농도의 중간값 정도의 농도로 균일한 값을 갖는다. 혼합층과 정체층사이의 경계면에서는 온도의 경우 확산율이 크므로 경계면을 통한 온도차는 크지 않지만, 농도의 경우는 확산율이 낮으므로 경계면에서 급격히 변화된다. 이러한 온도 및 농도 분포는 Lewis 등[3]의 연구와 잘 일치하고 있다.

Fig. 7은 여러개의 혼합층이 생기는 경우에 대한 수직 온도 및 농도분포를 나타낸다. 이 경우 초기에 세개의 혼합층과 한개의 정체층이 나타남을 알 수 있다. 온도분포를 살펴보면 Fig. 7(a)에서와 같이 각 혼합층내의 온도는 대류유동에 의한 혼합으로 균일하며, 하부에서 상부로 올라갈수록 각 혼합층의 온도는 낮아짐을 알 수 있다. 또한 정체층내의 온도는 단일혼합층 흐름영역의 경우와 마찬가지로 전도에 의한 선형적인 분포를 보인다. 세개의 혼합층은 시간이 지남에 따라 합쳐져 실험 시작 후 100분일 때 한개의 혼합층으로 되며 온도는 30분일 때 보다 조금 낮게 유지됨을 알 수 있다. 농도분포의 경우도 혼합층내에서는 균일하고 정체층에서는 선형적인 분포를 가지며, 하부에서 상부로 갈수록 각 층에서의 농도가 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 단일혼합층 흐름영역에서 시간의 진행에 따른 혼합층의 성장높이를 나타내고 있다. Ra_η 수가 커질수록, 즉 초기의 농도구배에 비해 아랫면에서의 온도구배가 커질수록 혼합층의 성장높이가 증가함을 알 수 있고, 이는 온도, 농도분포 및 유동가시화에서도 확인할 수 있다. 또한 초기 혼합층의 높이는 Ra_η수에 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 줄어듦에 따라 성장이 늦어지고 오랜 시간이 흐른 후에는 경계면을 통한 농도의 확산에 의해 층이 성장하므로 성장속도가 상당히 느려짐을 알 수 있다.



(a) Temperature profile



(b) Concentration profile

Fig. 7 Vertical temperature and concentration profiles at the core; $Ra_\eta=1.99\times10^7$ ($Ra_T=5.92\times10^8$, $Ra_S=1.84\times10^9$)

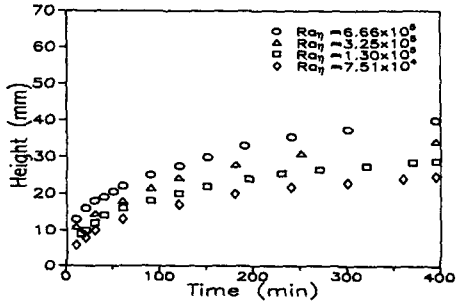


Fig. 8 Height of single mixed-layer depending on Rayleigh number

4. 결 론

본 연구는 중력방향으로 안정하게 성층화된 유체의 아랫면 가열을 통해 수직방향으로 온도구배가 가해지는 경우에 발생하는 이중확산대류에 관한 실험적 연구로, 온도와 농도구배에 관련된 Ra_η수의 변화에 따른 밀폐용기내의 유동형태, 유동형성 과정 그리고 그에 따른 온도분포 및 농도분포를 조사한 것이다. 본 연구의 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

Ra_η수의 변화에 따라 유동형태의 영역은 정체 흐름영역, 단일혼합층 흐름영역 그리고 여러개의 혼합층 흐름영역의 세 가지 흐름영역으로 나눌 수 있으며, Ra_η가 감소함에 따라 유동형태는 여러개의 혼합층 흐름영역에서 단일혼합층 흐름영역으로 또는 단일혼합층 흐름영역에서 정체 흐름영역으로 변화한다. 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. 초기 혼합층의 성장은 경계면에서의 불규칙한 요동에 의해 이루어지므로 빠르게 진행되나, 경계면에서의 요동이 약화된 후에는 경계면을 통한 농도의 확산에 의해 층이 성장하므로 성장속도가 느려진다.

참고문헌

(1) Lugt, H. J., 1983, *Vortex Flow in Nature and Technology*, John Wiely & Sons.

(2) Gregg, M. C. and Cox, C. S., 1972, "The Vertical Macrostructure of Temperature and Salin-

ity," *Deep-Sea Research*, Vol. 19, pp. 355~376.

(3) Lewis, W. T., Incropera F. P., and Viskanta R., 1982, "Interferometeric Study of Mixing Layer Development in Laboratory Simulation of Solar Pond Conditions," *Solar Energy*, Vol. 28, No. 5, pp. 389~401.

(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. 25~541.

(5) Bergman, T. L., Incropera, F. P. and R. Viskanta, 1986, "Correlation of Mixed Layer Growth in a Double-Diffusive, Salt-Stratifed System Heated from Below," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 108, pp. 206~211.

(6) Carlburg, T., 1984, "The Effect of Convection upon Off-Eutectic Composite Growth of AL-Cu Alloys." *Journal of Crystal Growth*, Vol. 66, pp. 106~120.

(7) Ostrach, S., 1983, "Fluid Mechanics in Crystal Growth-The 1982 Freeman Scholar Lecture" *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 105, pp. 5~20.

(8) Chen, C. F., Briggs, D. G., and Wirtz, R. A., 1971, "Stability of Ther-mal Convection in a Salinity Gradient due to Lateral Heating," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 14, pp. 57~65.

(9) Lee, J., Hyun, M. T. and Kang, Y. S. 1990, "Confined Natural Convection due to Lateral Heating in a Strably Statified Solution," *Interna-tional Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 3, No. 5, pp. 869~875.

(10) Lee, J. W. and Hyun, J. M., 1991, "Timedependent Double Diffusion in a Stably stratified Fluid under Lateral Heating," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, No. 9, pp. 2409~2421.

(11) Turner, J. S. 1968, "The Behavior of a Stable Salinity Gradient Heated from Below," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 33, Part, 1, pp. 183~200.

(12) Huppert, H. E., 1971, "On the Stability of a Series of Double-Diffusive Layers," *Deep-Sea Reserch*, Vol. 18, pp. 1005~1021.

(13) Tanny, J., Kerpel, J. and Tsinober, A., 1989, "On the Layered Sructure in a Stable Solute Gradient Heated from Below," *Experiments in Fluids*, Vol. 8, pp. 161~164.

(14) Veronis, G., 1965, "On Finite Amplitude Instability in Thermohaline Convection," *Jonral of Marine Research*, Vol. 23, pp. 1~17.