
碩士學位論文

사각형 용기내의 비정상 이중확산
유동에 관한 실험적 연구

濟州大學校 大學院
機 械 工 學 科



1995年 6月

사각형 용기내의 비정상 이중확산
유동에 관한 실험적 연구

指導教授 玄明澤

洪南湖

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1995年 6月

洪南湖의 工學 碩士學位 論文을 認准함

 제주대학교 중앙도서관
審查委員長 전 기 리
委 員 許 鐘 振
委 員 김명익

濟州大學校 大學院

1995年 6月

Experimental Study on Unsteady Double -Diffusive Convection in a Rectangle

Nam-Ho Hong

(Supervised by professor Myung-Taek Hyun)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1995. 6.

목 차

NOMENCLATURE	2
SUMMARY	2
I. 서 론	4
II. 실험	11
1. 실험장치	11
2. 실험방법	13
III. 실험결과 및 고찰	18
1. 유동형태	18
2. 유동형태의 형성과정	20
3. 인접면의 파괴현상	22
4. 온도 및 농도분포	23
III. 결 론	41
V. 참고문헌	42

NOMENCLATURE

Ar	: aspect ratio = H/L
C_h	: concentration of the high concentration wall, [wt%]
C_l	: concentration of the low concentration wall, [wt%]
ΔC	: concentration difference = $C_h - C_l$, [wt%]
D	: diffusion conductance or diffusivity of salt, [m^2/s]
g	: acceleration due to gravity, [m^2/s]
H	: height of the enclosure, [m]
L	: width of the enclosure, [m]
Le	: Lewis number = a/D
N	: buoyancy ratio = $\bar{\beta}\Delta C / \beta\Delta T$
Ra_S	: solutal Rayleigh number = $g \bar{\beta}\Delta CH^3 / \nu a$
Ra_T	: thermal Rayleigh number = $g \beta\Delta TH^3 / \nu a$
T_c	: temperature of the cold wall, [$^{\circ}C$]
T_h	: temperature of the hot wall, [$^{\circ}C$]
ΔT	: temperature difference = $T_h - T_c$, [$^{\circ}C$]
x	: horizontal coordinate, [m]
y	: vertical coordinate, [m]

GREEK SYMBOLS

α	: thermal diffusivity, [m^2/s]
β	: thermal expansion coefficient, [$^{\circ}C^{-1}$]
$\bar{\beta}$: solutal expansion coefficient, [wt% $^{-1}$]
ν	: kinematic viscosity, [m^2/s]
ρ	: density, [kg/m^3]

SUMMARY

Double-diffusive convection due to simultaneously imposed lateral thermal and solutal gradients in a rectangular enclosure of aspect ratio 2.0 has been studied experimentally for the use of adiabatic and isothermal horizontal boundary conditions. Isothermal horizontal walls are kept with the mean value of hot and cold wall temperatures.

Visual observation shows two distinct flow structures depending on the buoyancy ratio. The unicell flow structure is observed for lower buoyancy ratio while layered flow structure appears for higher buoyancy ratio. There exists unstable flow regime between two buoyancy ratios. These flow patterns are observed irrelevant of the horizontal boundary conditions in this experimental ranges.

With the layered flow structure, the characteristic reverse S-shaped temperature field is discernible. And the step-like concentration distribution is conspicuous. The character of the individual layer is akin to a purely thermal convection in a mini-cavity of low aspect ratios.

Due to the double-diffusive phenomena, the temperature varies smoothly at the interface of each layer but the concentration varies rapidly. The interface of the layers is characterized by a stable but rapidly-varying density distribution.

1. 서 론

자연대류는 중력장과 같은 체력장(Body Force Field) 내에서 유체 내의 밀도차로 인한 부력의 효과로 일어나는 유동현상을 말한다. 유체 내의 밀도차는 주로 온도 또는 농도구배에 의해 생기며 온도와 농도구배가 함께 작용하여 일어나는 부력을 복합부력(Combined Buoyancy)이라 한다. 이 복합부력의 작용에 의한 유동은 Stommel 등(1956)에 의해서 처음으로 소개된 후 새로운 유체역학의 한 분야로 발전하게 되었다. 초기에는 해양학 분야에서 해수의 특이한 온도 및 농도분포에 의한 유동현상이 관찰되어 복합부력에 대한 연구가 이루어졌기 때문에 복합부력에 의한 자연대류를 “Thermohaline Convection” 또는 “Thermosolutal Convection”이라고 불려졌으나, 그 후 이와 관련된 효과가 해양학외 다른 분야에서도 광범위하게 발견됨에 따라 일반적인 의미로 “Double-Diffusive Convection”이라 한다(Turner, 1973).

이중확산유동(Double-Diffusive Convection)은 열-소금 확산계 혹은 소금-설탕 확산계와 같이 확산율이 다른 두 부력인자들의 복합부력에 의한 유동으로 자연현상 및 과학기술 분야의 전달과정과 밀접한 관계가 있어 최근 20여 년 간 많은 연구가 진행되고 있다. 이와 관련된 자연현상으로는 온도 및 농도분포에 따른 바닷물의 유동, 빙하의 응고와 용융에 의한 극지방에서의 해수 유동, 지각 내의 맨틀 유동 등 해양학, 화학, 지질학, 지구물리학 및 천체물리학 등의 분야에서 관찰되며, 과학기술 면에서는 태양의 복사열을 축적하

는 태양 연못, 건조 과정, 액체 가스 저장, 내연기관에서의 연소과정 그리고 주조, 용고, 결정 성장과 같은 재료 가공 분야에서 그 예를 찾아볼 수 있다. 특히 최근 첨단산업의 발달로 말미암아 고순도 결정체의 제조를 위한 기술개발이 절실해짐에 따라 이에 대한 연구는 보다 활발해지고 있다.

온도차만에 의한 자연대류의 경우 중력과 밀도구배의 방향에 따라 2가지 유형으로 나눌 수 있다(Ostrach, 1964). 밀도구배가 중력 방향과 수직으로 작용하는 경우에는 아주 작은 밀도변화에도 유동이 발생하지만(Conventional Mode), 밀도구배가 중력 방향과 반대 방향으로 가해질 때에는 온도차에 의한 밀도구배가 유체 내의 점성력을 상쇄할 임계값을 가질 때에 비로소 유동이 일어난다(Unstable Mode).

복합부력에 의한 자연대류의 경우도 각 부력인자에 따른 밀도구배의 방향에 따라 일반 자연대류와 마찬가지로 크게 2가지 유형으로 나눌 수 있지만 그 중 하나만이 유체의 운동력으로 작용하는 일반 자연대류보다 훨씬 복잡하여 그 현상을 이해하기 어렵다. 복합부력에 의한 Unstable Mode는 온도 및 농도구배, 그리고 그에 따른 밀도구배의 방향에 따라 Table 1과 같이 4가지 경우로 나눌 수 있다(Turner and Stommel, 1964). 여기서 각 화살표는 그 값이 증가하는 방향을 표시한다. Table 1에서 A의 경우는 밀도분포가 중력과 같은 방향으로 증가하므로 안정되어 유동이 전혀 일어나지 않으며, B-b, C-b 및 D의 경우는 중력과 반대 방향으로 증가하기 때문에 온도차만에 의한 대류(Benard Convection)와 마찬가지로 임계조건에 도달하게 되면 유동이 발생한

다. 또한 B-a와 C-a는 밀도가 정적으로 안정된 분포를 갖기 때문에 유동이 일어나지 않을 것 같지만 실제로는 유동이 발생한다.

Table 1. Cases of unstable mode in double-diffusive convection

g	CASE	T	C	ρ	Remarks
↓	A	↑	↓	↓	stable
	B-a	↑	↑	↓	salt finger
	-b	↑	↑	↑	unstable
	C-a	↓	↓	↓	oscillatory
	-b	↓	↓	↑	instability unstable
D	↓	↑	↑	unstable	

이와 같은 현상은 두 부력인자(온도와 농도)의 확산율이 다르기 때문에 (소금물의 경우 $Le=100$, 설탕물의 경우 $Le=300$) 나타나는 현상으로 복합부력에 의한 자연대류에 관한 연구의 시초가 되었다. B-a의 경우처럼 확산율이 큰 요소가 밀도분포를 안정하게 하고 확산율이 작은 요소가 불안정하게 될 때 일어나는 유동을 "Salt-Finger"라 하고, 그 반대의 경우(C-a)를 "Diffusive Type Convection"이라 한다. 이런 유동 현상은 Stommel 등(1956)이 처음 관찰하였고, Stern(1960)은 두 부력인자의 확산율이 다르기 때문에 생기는 현상을 밝혔다. 성층화된 소금물의 아랫면에서 열유속이 가해지는 경우(C-a) 층(Layer)이 형성되는데(Turner and Stommel, 1964) 이때 가해지는 열량과

층의 두께와의 관계에 대해서는 Turner(1965)가 제시하였고, 여러 개의 층이 형성되는 경우에 대해서는 Huppert(1971)가 연구하였다. 이론적 연구로는 B-a의 경우는 Stern(1960)이, C-a의 경우는 Veronis(1965), Bains 등(1969)이 연구를 하였지만 기본 방정식과 경계조건이 실험조건과 다르기 때문에 아직 실험결과와의 비교는 이루어지지 않고 있다. 그러나 최근 태양연못(C-a)과 관련된 1차원 현상에 대한 이론 연구에서는 실험과 좋은 일치를 보이고 있다(Bergman et al., 1986). B-a 및 C-a의 경우에 대한 일련의 연구는 해양학, 지구물리학, 천체물리학 등에서 관찰되던 예상 밖의 유동현상을 적절히 설명해 줄 수 있었으며, 이에 대한 연구는 Turner(1973)의 논문에 잘 정리되어 있다.

복합부력에 의한 자연 대류에서 밀도구배가 중력 방향에 수직으로 가해지는 전형적인 유형(Conventional Mode)은 온도와 농도구배의 방향에 따라 Table 2와 같이 4가지 경우로 나눌 수 있다(Ostrach, 1980).

Table 2. Cases of conventional mode in double-diffusive convection

g	CASE I	CASE II	CASE III	CASE IV
\downarrow	$\rightarrow T$ $\leftarrow C$	$\rightarrow T$ $\rightarrow C$	$\rightarrow T$ $\downarrow C$	$\rightarrow T$ $\uparrow C$

Table 2에서 CASE I의 경우는 온도와 농도구배에 의한 밀도구배가 같은 방향으로 증가하기 때문에 대류는 더 활발히 일어나나, CASE II에서는 두 부력

인자에 의한 밀도구배가 반대 방향으로 증가하기 때문에 밀도변화는 서로 상쇄되어 유동이 둔화된다. CASE III에서는 농도가 증력 방향으로 성층화되어 있기 때문에 온도구배에 의한 유동은 일어나기 어려운 반면, CASE IV에서는 농도구배가 불안정하여 온도 및 농도구배에 의한 밀도변화는 상승효과를 가져와 유동이 아주 쉽게 발생한다.

CASE I, II에 대한 연구는 최근 Wang(1980)이 황산구리 용액을 사용한 전기 분해 방법을 이용하여 수평 방향으로 온도 및 농도구배를 가해 줌으로써 처음 시도되었고 Kamotani 등(1985)은 같은 실험장치를 이용하여 보다 정밀한 실험을 하였다. 이들은 온도구배를 먼저 가해주어 온도가 정상 상태에 도달한 후 농도구배를 가해 주었는데 실험 결과 밀폐용기 벽을 따라 흐르는 물질 경계층 흐름과 CASE에 관계없이 항상 3개의 층을 이룬 셀을 관찰하였다. 또한 부력비가 작은 경우에는 단일셀 형태의 유동이 관찰되고 어떤 조건에서는 전극 근처에서 2차 유동이 발생하였다. 또한 Lee 등(1988a, 1988b)은 삼투막의 특성을 이용하여 이에 대한 실험을 행하여 온도차에 의한 유동의 방향과 관계없이 농도차만에 의한 물질경계층을 관찰하였고 Ra_T 와 Ra_S 의 상관 관계에 의한 단일셀 및 여러개의 셀 형태의 유동영역을 찾아 내었으며 셀 내부에서의 온도 및 농도분포의 특성을 밝혔다.

CASE III에 대한 연구는 Thorpe 등(1969)에 의해 처음으로 이루어졌는데 그들은 선형 지배 방정식에서 유동이 유발되는 임계조건에 관한 식을 제시하였고 이들 실험을 통해 잘 일치함을 보였으며 수직평판에서의 유동은 여러 개

의 층을 이론 유동으로 나타남을 밝혔다. 안정조건식은 그 후 Hart(1972)에 의해 실험에 보다 근접한 이론식이 제시되었고, Wirtz 등(1976)은 셀들 사이의 인접면을 통해 열과 소금이 확산되는 양을 실험적으로 조사하였다. 또한 Hart(1973), Chen(1974) 등은 수치해석으로 셀이 형성되는 임계온도차에 대한 이론적인 해석을 하였다. CASE III에 대한 보다 자세한 연구는 Chen 등(1971), Wirtz(1972) 등에 의해 시도되었는데 그 결과 고온벽에서 발생한 물이 저온벽으로 성장해가면서 결국 셀 형태의 유동이 형성되고 시간이 경과하면서 밀폐용기의 수평벽면에 형성된 셀은 그 아래 혹은 위의 셀과 합쳐지면서 전체적으로 셀의 개수가 줄어들음을 관찰하였으며 셀 유동의 대표길이를 가정하여 실제 측정된 셀의 높이와 70~97% 정도 일치함을 보였다. 또한 Wirtz(1977)는 수치해석을 통해 성층화된 용질이 미치는 주된 영향은 열전달을 방해하는 것이고 각 층에서의 온도분포는 순수 자연대류와 같이 평행유동과 비슷하게 분포됨을 밝혔다. 최근 Lee 등(1990a, 1990b)의 연구에서는 부력비에 따라 4가지 유동형태가 존재하고 각 유동형태에 따라 온도 및 농도 분포 상의 특성이 달라진다는 사실을 밝혔다.

이중확산유동의 경우 어느 한 부력인자에 의한 자연대류와 달리 두 부력인자가 연관되어 있고 그들의 상관 관계에 따라 유동형태가 달라질 뿐 아니라 온도와 농도 경계조건을 동시에 만족시켜야 하는 문제점 등으로 아직까지 그 현상이 제대로 규명되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 온도 및 농도차에 의한 부력이 증력과 수직으로 작용(Conventional Mode)할 때에 있어서 수평

경계면이 단열인 경우 뿐 아니라 등온조건을 갖는 경우에 대하여 연구하고자 한다. 또한 유동형태의 가시화에 있어서는 쉐도우그래프 방법(Shadowgraph Method)(Holman, 1984)을 사용하여 이중확산유동에 의한 사각형 용기 내의 유동층 생성 및 인접면의 변형과정을 살펴 보고자 하며 그에 따른 온도 및 농도 분포를 조사하고자 한다.



II. 실험

이중확산유동에 대한 실험을 행하는데 있어서 무엇보다도 어려운 문제는 농도 경계면에서 등농도조건을 만족시키는 것으로 지금까지는 주로 전기화학적 전기분해법(Mizushima, 1971)을 많이 이용하였다. 즉, 전압과 전류량을 조절하여 한계전류에 이르게 하면 양극에서 일정량씩 녹은 양이온이 전부 음극에 붙기 때문에 음극에서의 양이온의 농도가 0이 되어 양단에서의 양이온의 농도가 일정하게 된다. 그러나 이 방법은 전기분해가 진행될수록 양이온의 부착으로 음극면의 면적이 증가하기 때문에 전류밀도는 감소하고 그 결과 한계전류에서 벗어나 양단에서의 농도는 시간에 따라 변하게 되어 일정한 농도구배를 계속 유지시켜 줄 수 없다. 따라서 본 실험에서는 저농도의 용액에서 고농도의 용액으로 용매를 전달시키는 특성을 지니는 삼투막을 이용하여 시험용기 내에 농도구배를 가해 주었다. 여러 가지 삼투막에 대해 실험한 결과 셀룰로오스 아세테이트 유형의 삼투막(Cellulose Acetate Type Membrane)이 본 연구에 가장 적합하여 이를 사용하였다.

1. 실험 장치

본 연구에 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험장치는 시험부 위인 직각 밀폐용기와 용기의 수직벽면에 등은 및 등농도를 가해 주기 위한 2

개의 보조용기로 구성된다. 이때 직각 밀폐용기는 높이 60mm, 폭 30mm, 깊이 120mm로 중형비가 2.0이 되도록 제작하였다.

전체 실험용기는 두께 10mm인 아크릴 판으로 제작하였고 직각 밀폐용기의 경우 실험조건에 맞게 경계조건을 유지하기 위하여 단열 수평경계면의 경우 열전도율이 낮은 베이클라이트 판(두께 10mm)을 사용한 반면, 등은 수평면의 경우에는 알루미늄 판에 홈을 내어 일정 온도의 물을 항온조로부터 공급함으로써 상벽 등온과 상·하벽 등온의 밀폐용기를 제작하였다. 또한 실험장치로부터 외부로의 열손실을 최소화하기 위하여 두께 30mm인 스티로폴로 단열시켰다. 수직벽면의 경우 등은 및 등농도 조건을 동시에 만족시키기 위해 전술한 바와 같이 밀폐용기와 보조용기 사이에 삼투막을 설치하였다. 또한 실험장치와 보조용기 사이의 누수를 방지하기 위해 탄력이 있는 고무판을 보조용기에 붙이고 길이 30cm인 4개의 볼트를 이용하여 두 보조용기의 양단벽을 통해 체결하였다.



밀폐용기 내의 온도 측정방법은 지름 1.0mm인 스테인레스 관 속에 열전대(K-type)를 넣은 프루브를 만들어 밀폐용기 윗벽에 뚫은 직경 1.5mm의 구멍을 통해 밀폐용기로 집어 넣어 필요한 위치에서 온도 측정기를 이용하여 온도를 측정하였다. 또한 각 보조용기의 입·출구에 열전대를 설치하여 유·출입되는 용액의 온도를 조사할 수 있도록 하였다. 농도를 측정하기 위해 가는 백금선(0.3mm)을 사용하여 농도 측정 프루브(Point Electroconductivity Probe)(Khang and Fitzgerald, 1975)를 제작하였으나 사용하면 할수록 프루

브의 저항이 증가하여 같은 농도에서의 전류량이 달라지기 때문에 농도 측정 프루브는 일반적으로 알려진 바와 달리 한 지점에서의 농도를 측정하는데 부적합하였다. 따라서 본 실험에서는 밀폐용기 뒷면의 중앙부에 수직방향으로 5mm 간격으로 구멍(1mm)을 뚫고 주사바늘(외경 0.5mm)로 미량의 소금물을 추출하여 굴절율을 측정함으로써 밀폐용기 내의 농도를 조사하였다.

2. 실험 방법

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 유출입되는 물의 양을 같도록 하는 한편, 실험조건에 맞춘 온도와 농도의 소금물과 순수한 물을 항온조로부터 양 보조용기에 계속 순환시켜 수평방향으로의 온도 및 농도구배를 동시에 가해 주었다. 이때 시험용기의 오른쪽 보조용기에는 저온이며 고농도인 소금물을 공급하는 반면 왼쪽 보조용기에는 고온이며 농도가 0인 증류수를 공급하여 온도차에 의한 자연대류와 농도구배에 의한 자연대류의 순환방향이 모두 시계방향으로 발생하도록 실험조건을 택하였다(Fig. 2).

밀폐용기 내의 온도분포는 프루브를 이용하여 시험용기의 $x/L=0.5$ 의 위치에서 수직방향으로 3mm 간격으로 측정하였다. 농도는 온도 측정부위와 같은 위치에서 수직방향으로 5mm 간격으로 뚫은 구멍을 통해 미량의 소금물을 추

출한 다음 그 소금물의 굴절율을 굴절율측정기(Attago, Abbe Refractometer)로 조사하여 미리 표준용액을 기초로 하여 만든 기준표와 비교함으로써 소금물의 농도를 산출하였다. 이러한 온도와 농도분포를 일정한 시간 간격으로 측정하고 유동형태를 관찰하여 밀폐용기 내에서의 이중확산 흐름에 의한 시간에 따른 변화 및 준정상상태(Quasi-Steady State)에서의 유동형태와 온도, 농도분포를 조사하였다. 이때 온도와 농도를 반복하여 측정한 결과 온도는 $\pm 3\%$, 농도는 $\pm 5\%$ 의 실험오차를 보였으며 본 실험영역에서 준정상상태에 이르기까지는 약 4시간이 소요되었다. 밀폐용기 내의 유동현상을 가시화하기 위해 여러 가지 가시화 방법을 시도하였다. 그 결과 일반적으로 사용하는 다이 주입법은 유동현상을 촬영하는 동안 주변으로 확산이 일어나 유동현상을 관찰하는데 부적합하여 Fig. 3과 같은 웨도우그래프 방법(Holman, 1984)을 이용하였다. 30mW의 He-Ne레이저에서 나오는 광선을 볼록렌즈를 이용하여 초점을 모은 다음 그 초점 거리에 핀홀을 설치하여 주변 노이즈를 제거한 후 오목렌즈를 이용하여 이 광선을 확대시켜 실험영역에 비추어 스크린에 투영된 영상을 사진기로 촬영하여 시간에 따른 변화를 관찰하였다. 이때 주위를 어둡게 하여 명암의 차이를 크게 하였다.

본 실험의 실험영역은 $Ar=2.0$, $Ra_r=1.0 \times 10^7 \sim 5.9 \times 10^7$, $Ra_s=2.4 \times 10^8 \sim 3.0 \times 10^8$ 이고 $N=5.0 \sim 24.2$ 이다. 무차원수의 계산에 필요한 물성치는 양단의 온도 및 농도의 평균값에 대한 값이다.

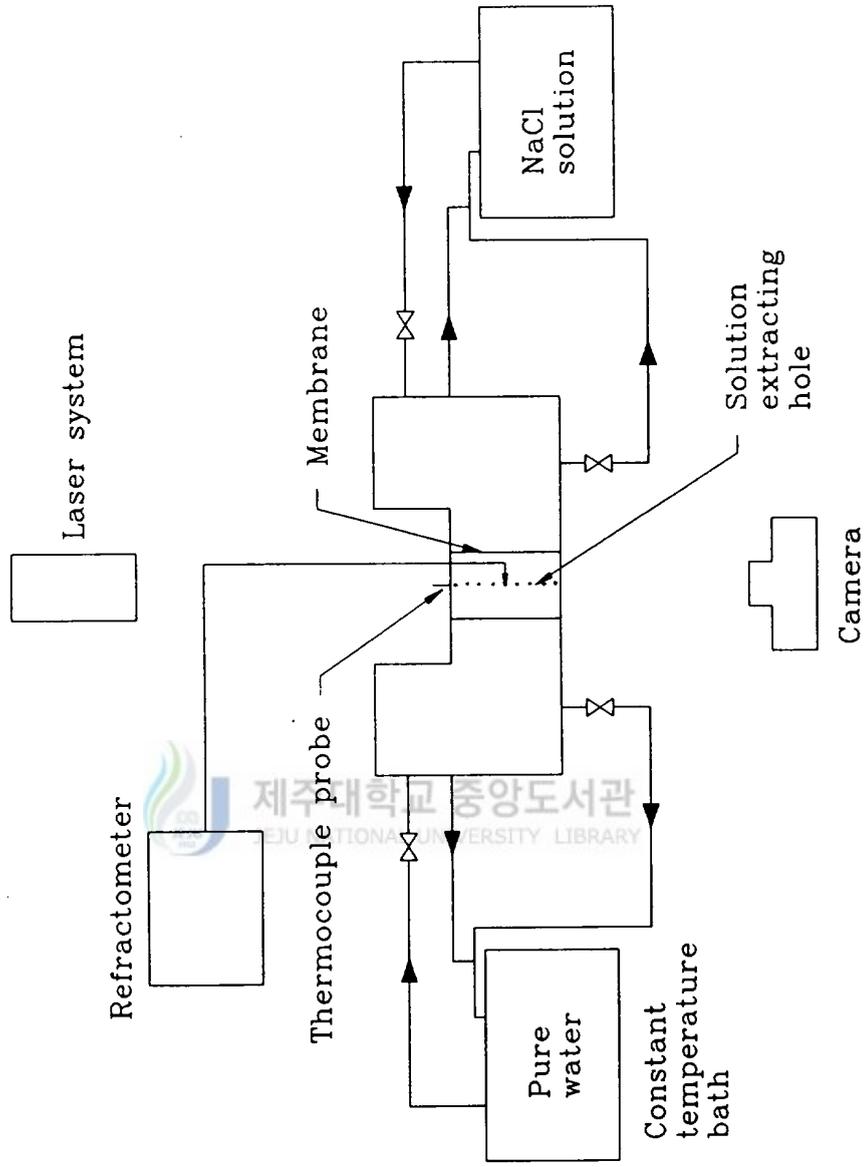


Fig. 1 View of the total experimental apparatus

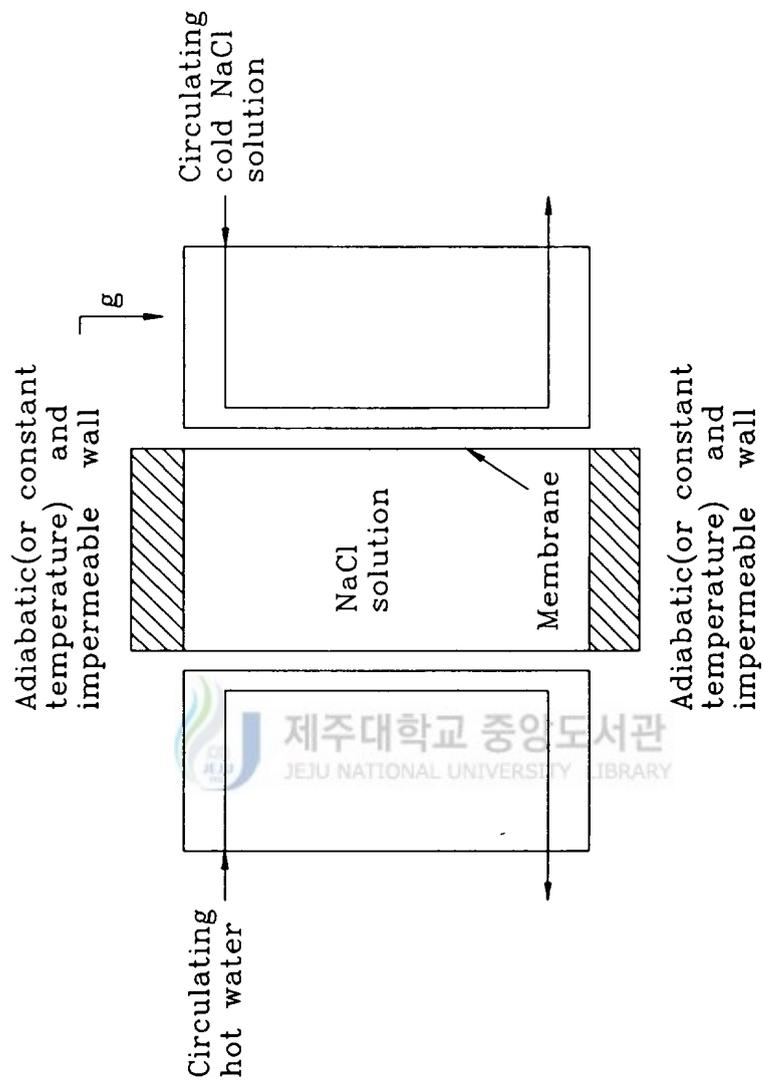
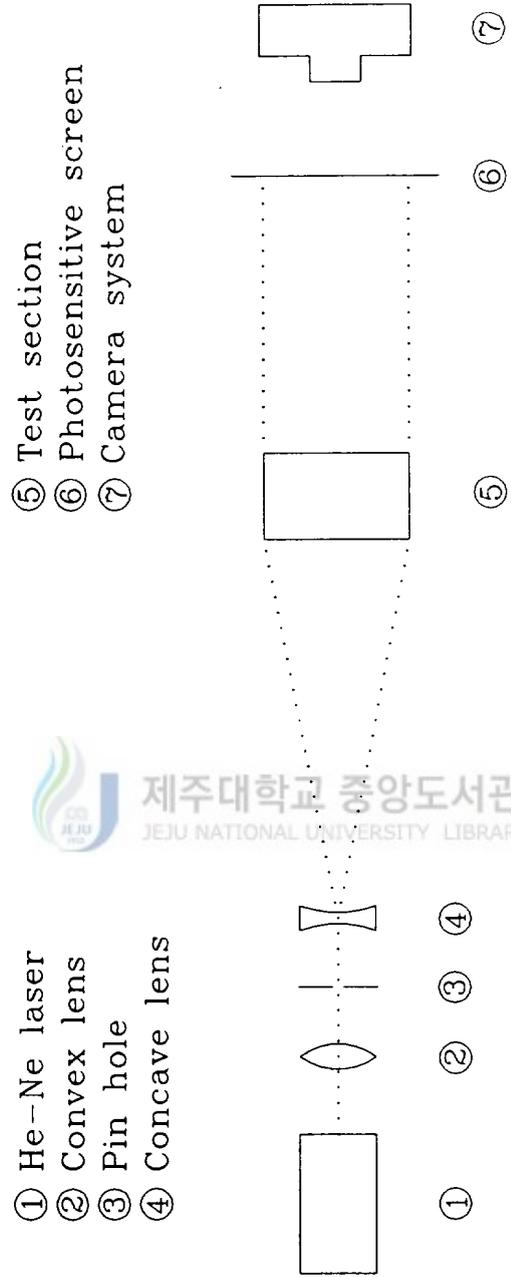


Fig. 2 Schematic diagram of test section



- ⑤ Test section
- ⑥ Photosensitive screen
- ⑦ Camera system

- ① He-Ne laser
- ② Convex lens
- ③ Pin hole
- ④ Concave lens

Fig. 3 Schematic diagram of shadowgraph method

III. 실험 결과 및 고찰

본 실험은 이중확산유동의 전형적인 유형에 관한 실험으로 온도 및 농도구배가 모두 중력과 수직방향으로 작용된다. 또한 실험용기의 왼쪽 보조용기에는 고온이며 농도가 0인 증류수가, 오른쪽 보조용기에는 저온이며 고농도인 소금물이 공급되어 두 부력인자에 의한 유동이 모두 시계방향으로 나타나도록 하였다. 이때 수평벽면의 경계조건은 Fig. 2에서 보듯이 상·하 모두 단열인 경우(CASE 1), 상벽은 등온이고 하벽은 단열인 경우(CASE 2) 그리고 상·하벽 모두 등온(CASE 3)인 3가지 경우에 대해 실험하여 본 실험영역에서 수평경계면 조건이 유동에 미치는 영향도 살펴보았다. 이때 수평등온벽면의 온도는 고온벽과 저온벽 온도의 평균값으로 유지되도록 하였다.

1. 유 동 형 태



수평방향으로의 온도 및 농도구배에 의한 이중확산유동에 있어서 준정상상태에서의 밀폐용기 내의 전체유동은 온도 및 농도구배의 상관 관계, 즉 부력비에 따라 단일셀 유동형태(Fig. 4)와 여러 개의 셀 유동형태(Fig. 5)의 2종류로 나타났다. 특히 온도 및 농도차에 의한 자연대류 유동이 같은 방향(시계방향)으로 회전하기 때문에 두 부력이 서로 상승작용을 일으켜 밀폐용기 내에는 항상 단일셀 유동형태가 존재하리라 예상된다는 점에서 여러 개의 셀 형태의 유동은

뜻밖의 현상이었다. 이와 같은 2가지 유동형태는 기존연구(Lee 등 1988a와 1988b)에서도 보고된 바 있는데 상벽등온인 CASE 2와 상·하벽 등온인 CASE 3에서도 수평 단일조건인 CASE 1과 다름없이 관찰되었다.

각 CASE에 따른 단일셀 유동형태의 사진 촬영을 Fig. 4에 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 Fig. 4(b)와 (c)에서 보듯이 밀폐용기 상부 벽 근처에 거의 정체된 듯이 보이는 작은 유동이 형성되기는 하나 밀폐용기 내부의 빠른 셀 유동으로 밀폐용기 내부로 성장하지는 못한다.

그러나 부력비가 큰 경우($N=24.2$)에는 Fig. 5에서와 같이 밀폐용기 내에서는 층을 이룬 유동형태가 나타나 복잡한 유동형태를 보이고 있다. 본 실험범 위에서는 CASE 1~3 모두 4개의 셀이 형성되고 있다. 이러한 셀의 개수는 전적으로 부력비에 의존하여 부력비가 클수록 많아지고, 작을수록 그 개수는 감소하여 최종적으로 단일셀 유동형태가 된다. 이때 각 셀 내에서의 유동방향은 고온 벽(저농도 벽)이 왼쪽에 저온 벽(고농도 벽)이 오른쪽에 위치하므로 모두 시계방향으로 회전한다. 따라서 인접면에서는 인접면 위·아래에서의 유동방향이 다르기 때문에 인접면을 경계로 큰 밀도차가 생겨 웨도우그래프 방법에 의해 촬영이 가능하였다. 이들 유동형태의 형성과정은 3.2절에서 설명하도록 한다.

2. 유동형태의 형성과정

CASE 1~3의 각 CASE에 대한 시간에 따른 단일셀 형성과정을 Fig. 6~8에 제시하였다. 온도차에 의한 부력이 농도차에 의한 부력보다 아주 큰 경우 ($N=5.0$) 온도차에 의한 부력이 지배적이므로 전체유동은 처음부터 준정상상태에 이를 때까지 단일셀 형태의 유동으로 나타남은 각 그림의 (a)~(d)에서 알 수 있다. 그러나 CASE 2와 CASE 3의 경우 밀폐용기 윗면의 온도가 양 수직벽면의 평균온도로 고온벽에서부터 형성된 유동의 온도보다 낮기 때문에 벽으로의 전도효과에 의해 밀폐용기 윗면 근처의 용액의 밀도가 증가하여 벽면 근처에 인접면이 형성되기는 하나 시간이 경과하여도 내부의 셀의 부력이 크기 때문에 밀폐용기 내부로 성장하지 못하고 CASE 1의 경우와 마찬가지로 밀폐용기 내에는 단일셀 유동만이 관찰되었다. 그러나 중횡비가 낮아 수평벽면의 효과가 증대되는 경우에 있어서는 등온인 수평경계면 효과가 나타나 밀폐용기 위 벽면 근처에 새로운 유동층이 뚜렷하게 형성되리라 예견된다.

농도차에 의한 부력이 증가하는 경우($N=24.2$, Fig. 9~11)에는 Fig. 5에서 보듯이 준정상상태에서의 유동형태는 층을 이룬 형태가 관찰된다. CASE 1인 Fig. 9에서 살펴 보면 초기(Fig. 9(a))에는 확산율이 큰 온도차에 의한 단일셀 유동이 관찰되나 Fig. 9(b)에서처럼 시간이 경과하면서 농도차에 의한 유동에 의해 밀폐용기 위·아래면에서 소금이 성층화되면서 밀폐용기 위·아래 경계면에서 새로운 유동층이 형성된다. 수평경계면에 형성된 새로운 대류층

은 차차 두꺼워지고 일정한 크기까지 성장하고 난 후 밀폐용기 벽면에서 분리되며, 이후 벽면에서는 다시 새로운 셀이 형성되기 시작한다(Fig. 9(d)). 이와 같은 경향은 수평경계면 조건이 다른 CASE 2(Fig. 10)와 CASE 3(Fig. 11)에서도 관찰되어 본 실험영역에서는 수평경계면의 변화에 따른 유동형태의 형성 과정상 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 또한 새로운 대류층의 생성은 밀폐용기 상벽면에서가 하벽면에서보다 훨씬 활발하게 진행되고 있음을 Fig. 9~11에서 알 수 있다. 여러 개의 층을 이룬 유동인 경우 계속해서 이런 형태로 층이 형성되는데 그 후 각 셀의 크기는 두 부력인자의 상관 관계에 따라 적당한 크기로 성장 혹은 축소되면서 준정상상태에 이른다. Kamotani 등(1985)은 CASE 1의 실험에서 층을 이룬 유동형태는 온도차에 의한 부력으로 흐르는 유동과 물질경계층 흐름과의 점성마찰에 의해 물질경계층 내의 유체가 용기 내부로 유입되기 때문에 생기는 국부적 밀도차이에 기인한다고 설명하였다. 본 실험에서는 자세한 측정과 흐름의 가시화를 통해 셀 형성 현상을 아래와 같이 설명할 수 있었다. 즉, 실험이 시작되었을 때 저농도벽(고농도벽)의 물질경계층 부근에서 가벼워진(무거워진) 유체는 상승하여(하강하여) 밀폐용기의 윗면(아랫면)에 오랫동안 축적되어 밀폐용기의 중앙부와 농도차로 인한 확산이 일어나게 되어 밀폐용기의 위·아래면에서 성층화된다. 시간이 지남에 따라 층이 두꺼워지고 온도차에 의한 유동이 생기거나 충분히 성장하기까지는 그 유동속도가 아주 느리기 때문에 계속해서 인접면을 통해 확산이 일어나면서 성층화된 영역의 두께가 커지면서 셀이 성장해

간다. 밀폐용기 위·아래면 부근에서 성층화된 영역이 충분히 성장하여 그 곳에서의 온도에 의한 부력과 균형을 이루게 되면 밀폐용기의 수평벽면과 분리되고 다시 같은 메카니즘에 의해 밀폐용기 수평벽면에서는 새로운 층이 생성되기 시작한다. 이런 현상은 성층화된 용액에 수평방향으로 온도구배가 가해진 경우에 대한 Thorpe 등(1969)의 해석과 유사하다. 그들의 실험에서는 밀폐용기 전역에 성층화시켰기 때문에 일시에 층이 형성되는 반면 여기서는 위·아래면에서 순차적으로 층이 형성되는 점이 다를 뿐이다.

여러 개의 유동층 나타나는 경우 각 셀의 유동방향은 온도구배의 방향에 좌우되어 고온벽에서 저온벽으로 회전(본 실험에서는 시계방향임)하였고 셀들 사이에 인접면은 저온벽(고온벽)으로 갈수록 찬(뜨거운) 용액과 접하게 되므로 점점 냉각(가열)되어 밀도가 증가(감소)하기 때문에 고온벽(저온벽)에서 저온벽(고온벽)으로 갈수록 아래로(위로) 경사짐을 Fig. 9~11의 인접면 형상에서 알 수 있다.



3. 인접면의 파괴현상

3.2절에서 설명한 바와 같이 이중확산유동의 가장 큰 특성은 부력비에 따라 단일셀 혹은 층을 이룬 유동형태가 나타나는 것이다. 층을 이룬 유동형태는 부력비가 비교적 큰 경우 관찰되나 부력비가 작은 경우에는 온도차에 의한 부력의 효과가 증대되므로 밀폐용기 내에는 아무런 인접면이 없는 단일셀 유동이 형성된다. 그러나 본 실험에서는 단일셀과 여러 개의 층을 이룬 유동

사이의 부력비에서 인접면이 생성되어 성장하다가 파괴되고 다시 성장해가는 현상을 관찰할 수 있었다. Fig. 12는 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. 12(a)와 (b))하다가 $t=90\text{min}$ (Fig. 12(c))에 이르러 그 기울기가 커지더니 파괴되어 위·아래 셀이 하나로 합쳐진다(Fig. 12(d)). 그 후 밀폐용기 윗벽면에서 형성된 대류층이 다시 성장해가며(Fig. 12(e)와 (f)) 다시 파괴되는 과정을 반복하였다. 이러한 생성, 성장, 파괴의 과정의 되풀이 현상은 $N=9.2$ 인 CASE 2와 CASE 3에서도 관찰되어 단일셀과 여러 개의 층을 이룬 유동사이에 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 그 모멘트가 증가하게 되고, 또한 시간이 경과함에 따라 인접면에서 위·아래 셀간의 열 및 물질확산이 충분히 이루어져 두 셀간의 밀도차가 감소하므로 생기는 현상으로 사료된다.

4. 온도 및 농도분포

밀폐용기 내에서의 온도 및 농도분포는 복합부력에 의해 다소 복잡한 형태

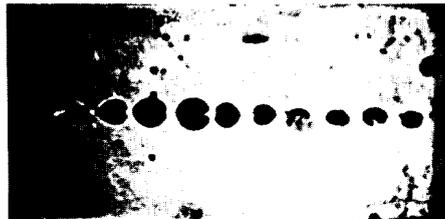
로 나타나지만 각 경우에 따라서 뚜렷한 특징을 갖는다. Fig. 13~15는 단일 셀 유동이 나타날 때, Fig. 16~18은 여러 개의 셀 유동일 때 $x/L=0.5$ 인 지점에서 각 CASE에 대한 수직 방향 온도 및 농도분포를 각각 도시한 것이다.

단일셀 유동이 나타나는 CASE 1의 경우(Fig. 13) 온도분포는 온도차만에 의한 자연대류와 마찬가지로 열경계층을 제외한 전 코어(Core) 영역에서 거의 선형적으로 성층화되어 복합부력에 의한 효과를 전혀 관찰할 수 없다. 이 때 농도는 빠른 유동에 의해 밀폐용기 전역에서 휘저어 주는 효과를 발휘하여 균일하게 분포함을 알 수 있다. 그러나 CASE 2(Fig. 14)와 CASE 3(Fig. 15)의 경우는 상부벽 등은 또는 상·하벽 등은인 수평 경계조건이므로 CASE 2의 경우 상부벽 근처에서 온도가 급격히 변하고 CASE 3의 경우 상·하부벽에서 급히 변화하고 있다. 또한 유동형태에서 언급한 바와 같이 수평경계면 조건으로 인한 작은 층의 형성으로 상 수평경계면 근처에서는 전도에 의한 열 전달을 확인할 수 있다. 그러나 농도는 측정방법상 수평경계면 근처에서의 변화를 확인할 수 없었다.

온도차만에 의한 단일셀의 경우보다 양단에서의 온도차가 작아지거나 농도차가 커지면 Fig. 16~18에서처럼 전체유동은 몇 개의 셀로 나타난다. 밀폐용기내에 나타나는 셀의 개수는 부력비가 증가할수록 많아진다. 또한 여러 개의 층을 이룬 유동형태에서 셀의 유동속도는 각기 다르며 일반적으로 밀폐용기 내부에 존재하는 셀의 속도가 빠른 반면 위·아래면에 존재하는 셀은 유동속도가 느렸다. 내부셀은 각 셀마다 온도에 의한 부력을 고르게 받아 유동

속도가 빠르고 비슷한 반면 밀폐용기 위·아래면에 생기는 셀은 온도에 의한 부력을 충분히 받지 못할 뿐 아니라 용기의 벽면과 접성 마찰력이 작용하기 때문에 유동속도가 느린 것으로 생각된다. Fig. 16(a)에서 살펴보면 $t=40\text{min}$ 에서 3개의 층이 형성되었다가 $t=60\text{min}$ 에 이르러 새로운 층이 밀폐용기의 상부벽에서 생성되어 층이 4개가 되고 그 후 각 층의 두께가 조금씩 달라지면서 준정상상태에 이르는 것을 확인할 수 있다. 이때 각 셀 내부에서의 온도분포는 대류에 의한 열전달 효과를 알 수 있다. 농도의 경우 각 셀 내부에서 균일하게 분포하여 각 셀의 유동 속도가 꽤 빠름을 알 수 있다. 이러한 경향은 CASE 2(Fig. 17(a))와 CASE 3(Fig. 18(a))에서도 똑같이 관찰할 수 있다. 그러나 이 경우에 있어서 등온벽면 가까이 존재하는 셀인 경우 대류보다는 전도 현상에 의한 열전달 현상을 확인할 수 있다.

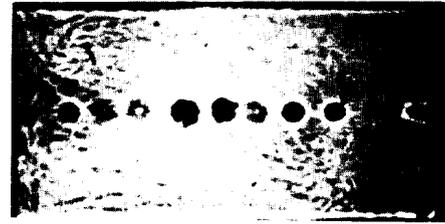
Fig. 16~18에서 고찰해 보면 셀 사이의 인접면에서 온도와 농도변화는 온도의 경우 인접면에서 큰 변화가 없지만 농도는 급격하게 변하고 있다. 이런 현상은 열과 소금의 확산률의 차($Le=100$) 때문에 생기는 현상으로 확산률이 큰 온도는 인접층으로 충분히 확산되지만 확산률이 작은 농도는 인접층끼리의 확산이 충분히 일어나지 않기 때문에 인접면에서 급격한 변화를 보인다.



(a) CASE 1



(b) CASE 2



(c) CASE 3

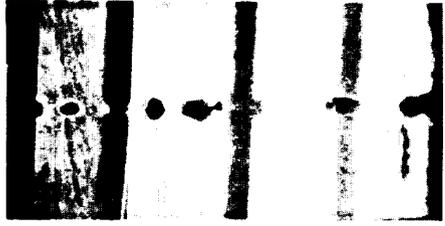
Fig. 4 View of unicell flow pattern at quasi-steady state ; $Ray=5.9 \times 10^7$, $N=5.0$



(a) CASE 1



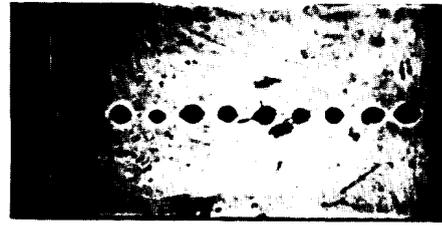
(b) CASE 2



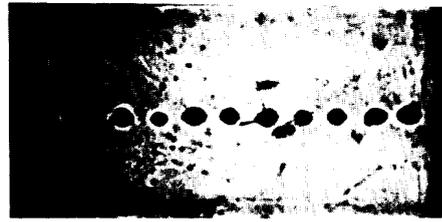
(c) CASE 3

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

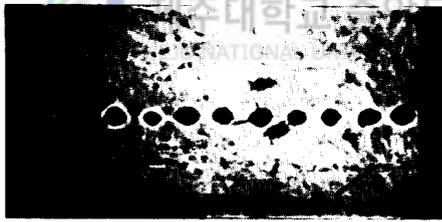
Fig. 5 View of multi-layered flow pattern at quasi-steady state : $Re_T=1.0 \times 10^7$, $N=24.2$



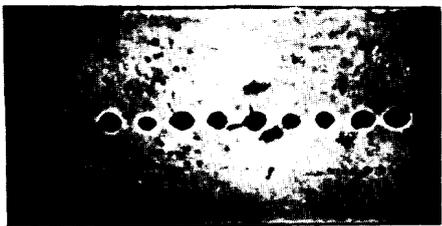
(a) $t=10\text{min}$



(b) $t=45\text{min}$

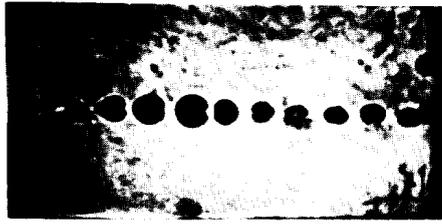


(c) $t=150\text{min}$

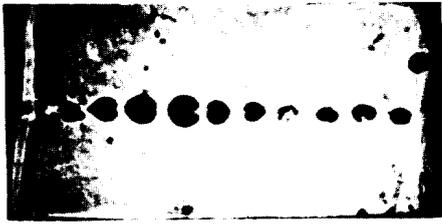


(d) $t=180\text{min}$

Fig. 6 View of layer formation with time for CASE 1 : $Ra_1=5.9 \times 10^7$, $N=5.0$



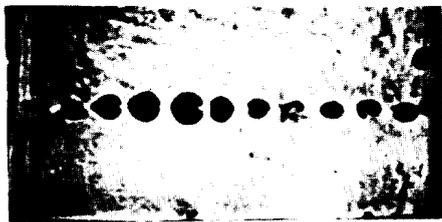
(a) $t=10\text{min}$



(c) $t=120\text{min}$

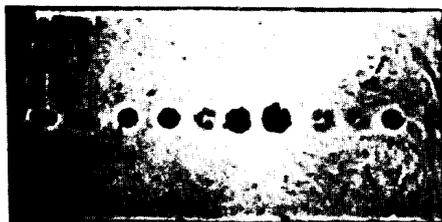


(b) $t=70\text{min}$

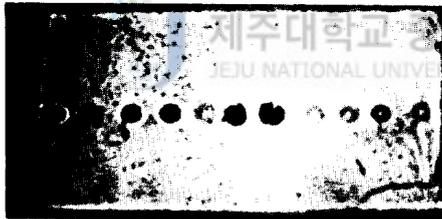


(d) $t=180\text{min}$

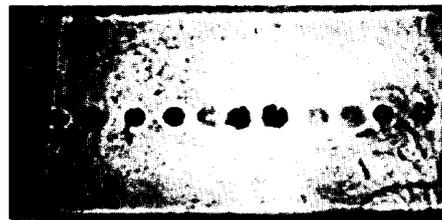
Fig. 7 View of layer formation with time for CASE 2 : $Ra_r=5.9 \times 10^7$, $N=5.0$



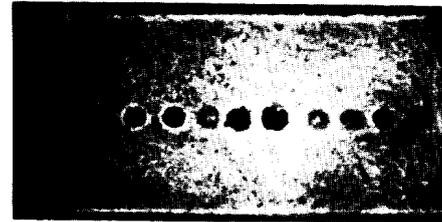
(a) $t=10\text{min}$



(b) $t=60\text{min}$



(c) $t=120\text{min}$



(d) $t=180\text{min}$

Fig. 8 View of layer formation with time for CASE 3 : $R_{\text{ay}}=5.9 \times 10^7$, $N=5.0$



(a) t=5min (b) t=15min (c) t=40min (d) t=90min (e) t=150min (f) t=220min

Fig. 9 View of layer formation with time for CASE 1 : $Ra_r=1.0 \times 10^7$, $N=24.2$

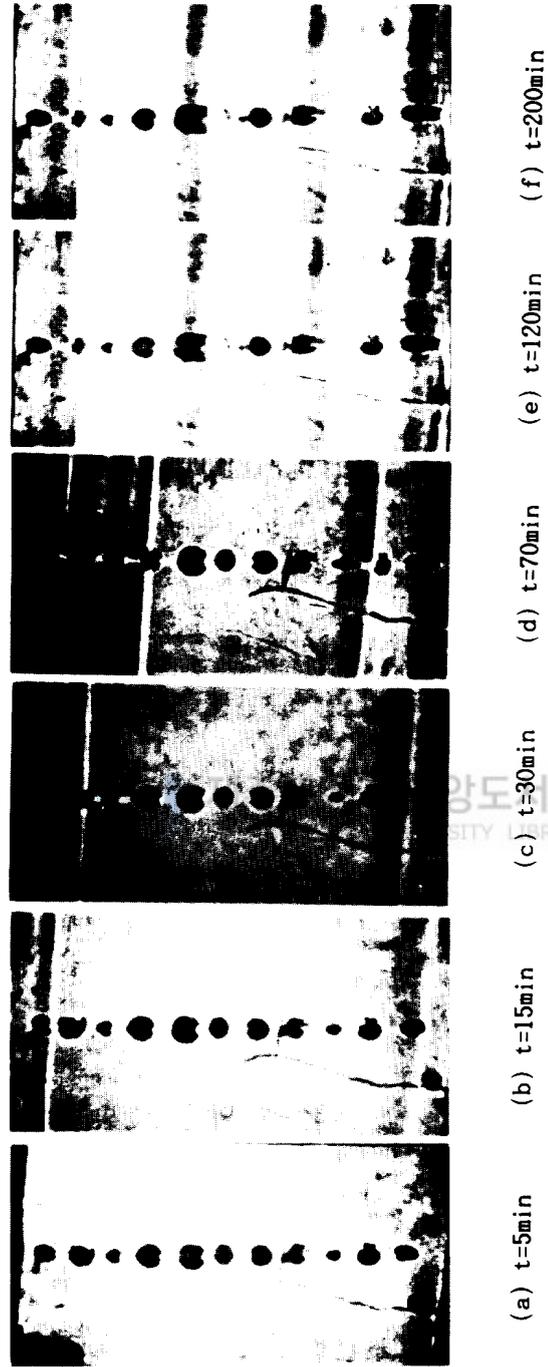


Fig. 10 View of layer formation with time for CASE 2 : $Ray=1.0 \times 10^7$, $N=24.2$

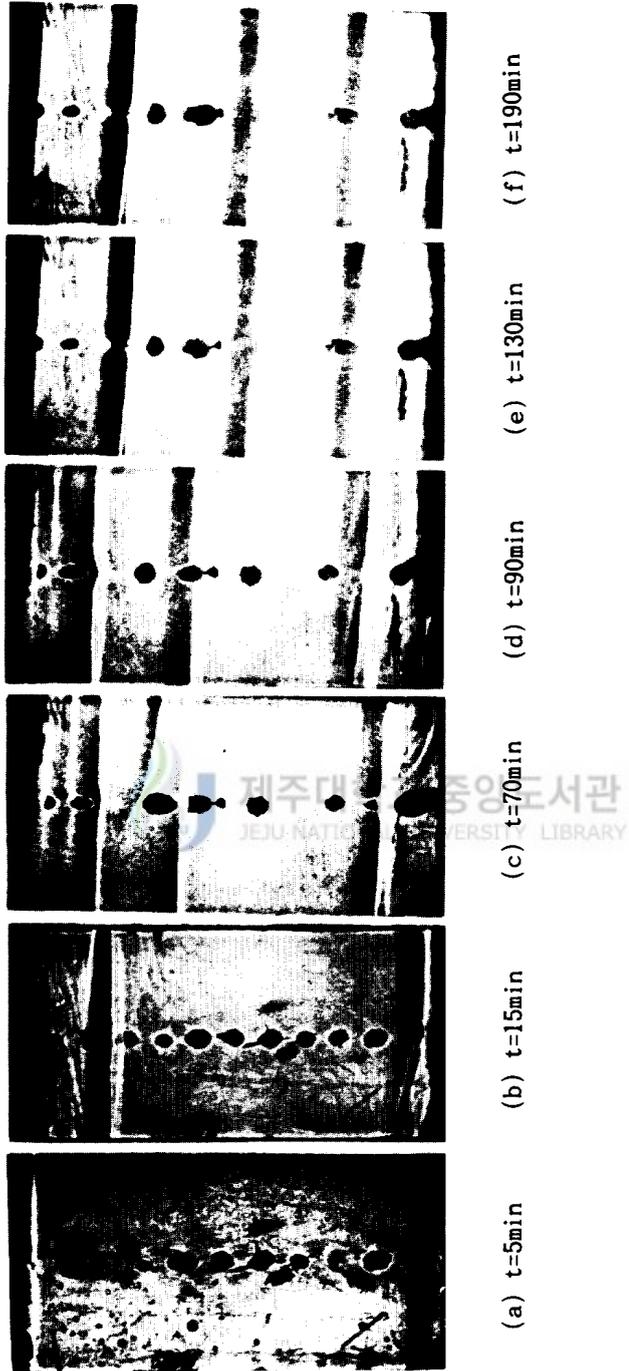


Fig. 11 View of layer formation with time for CASE 3 : $Ray=1.0 \times 10^7$, $N=24.2$

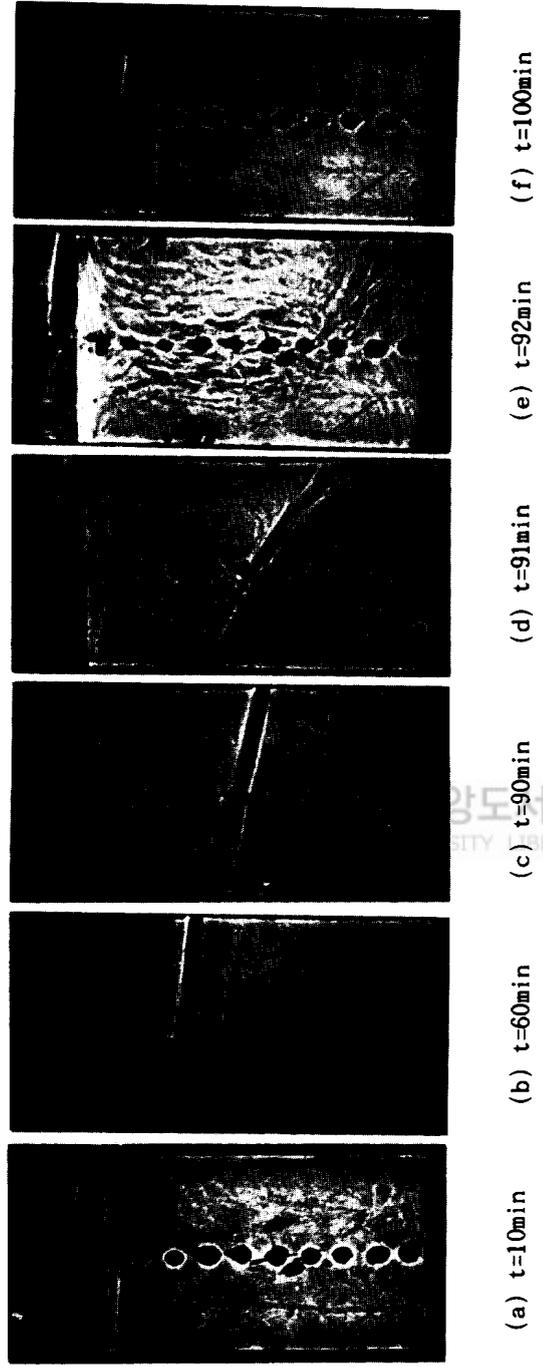
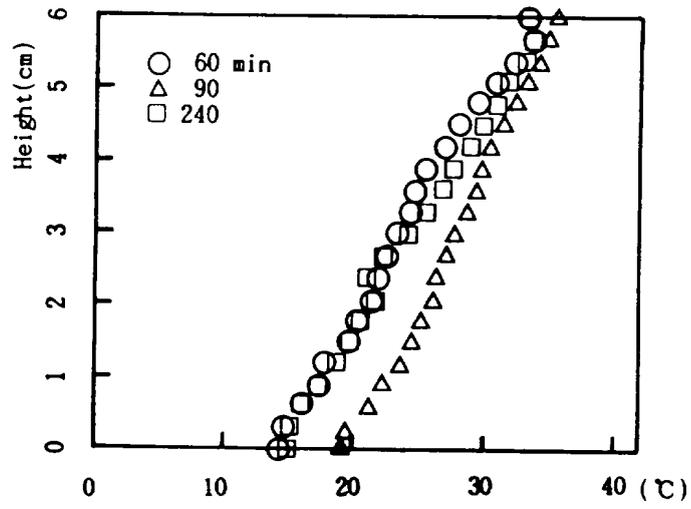
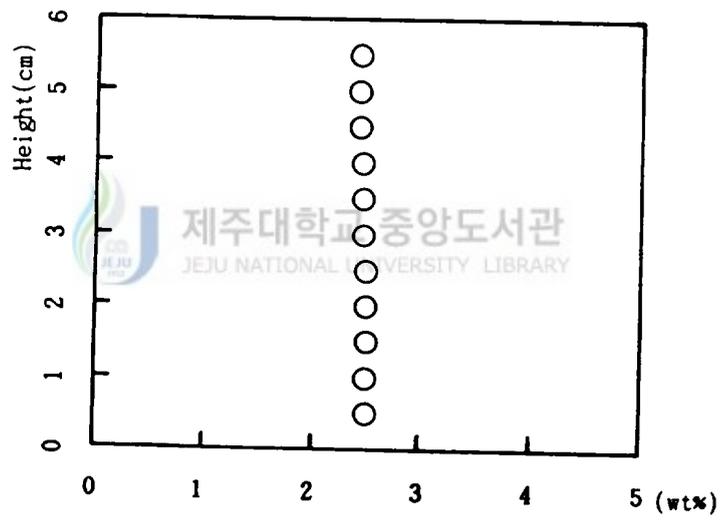


Fig. 12 View of layer formation with time for CASE 1 : $Ra_1=2.9 \times 10^7$, $N=9.2$



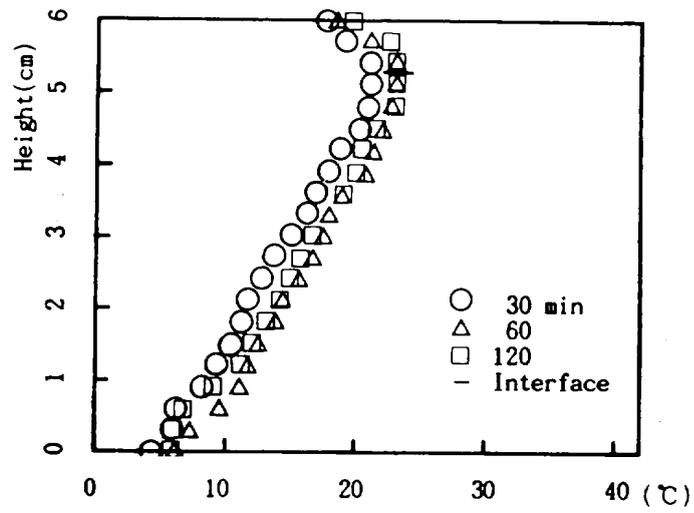
(a) Temperature distributions



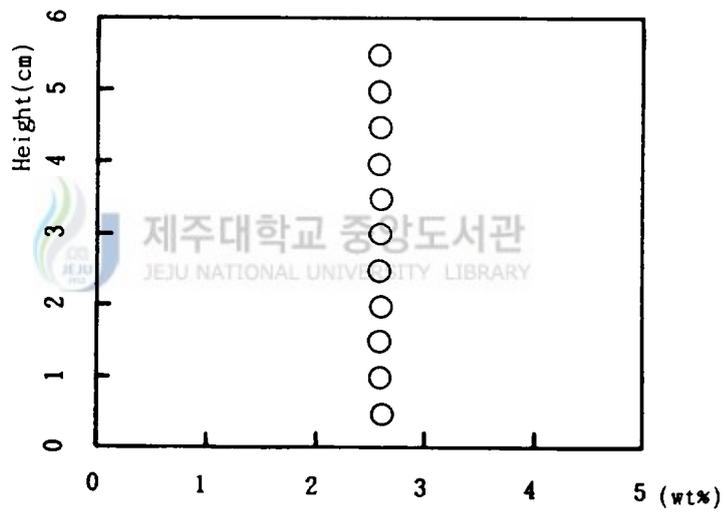
(b) Concentration distributions

Fig. 13 Vertical temperature and concentration profiles at mid-section

for CASE 1 : $Ra_T=5.9 \times 10^7$, $N=5.0$

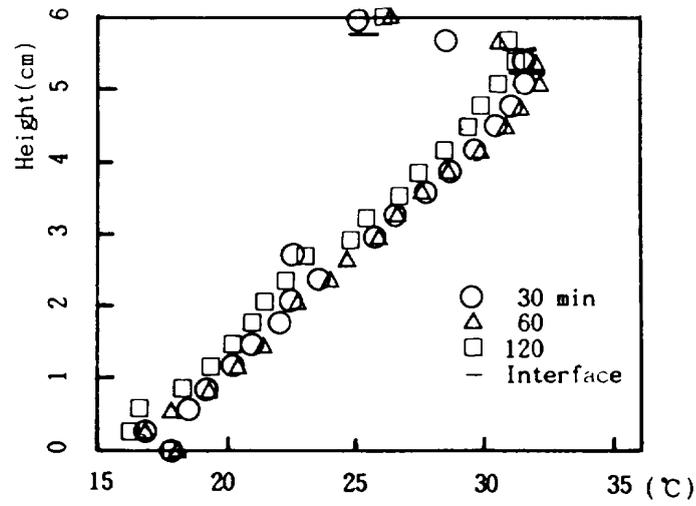


(a) Temperature distributions

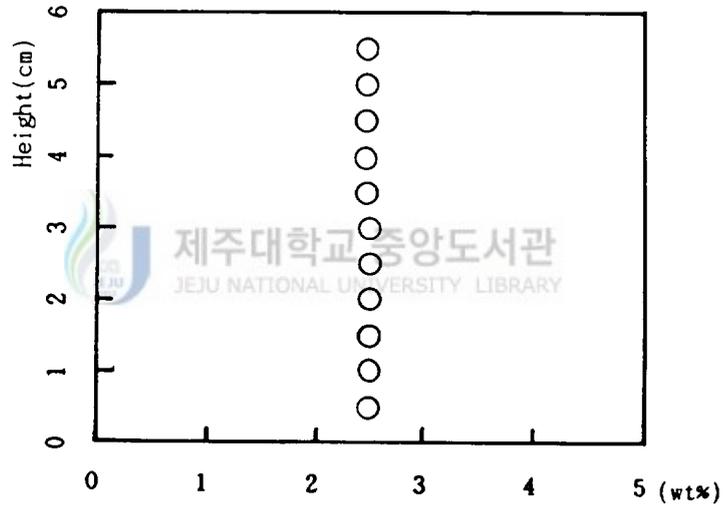


(b) Concentration distributions

Fig. 14 Vertical temperature and concentration profiles at mid-section
for CASE 2 : $Ra_T=5.9 \times 10^7$, $N=5.0$



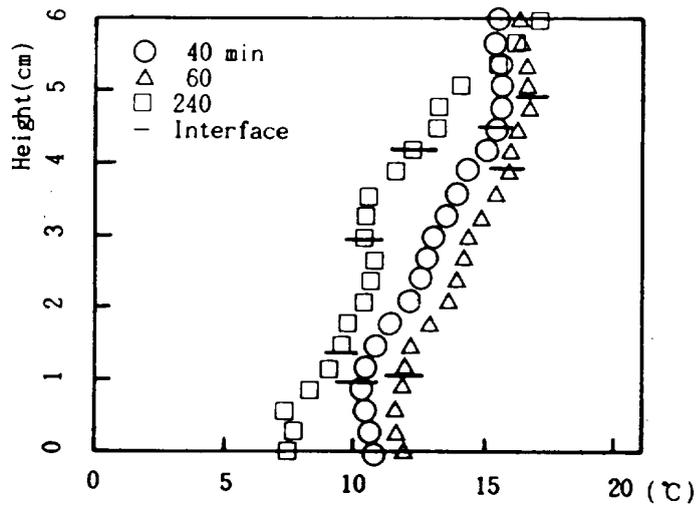
(a) Temperature distributions



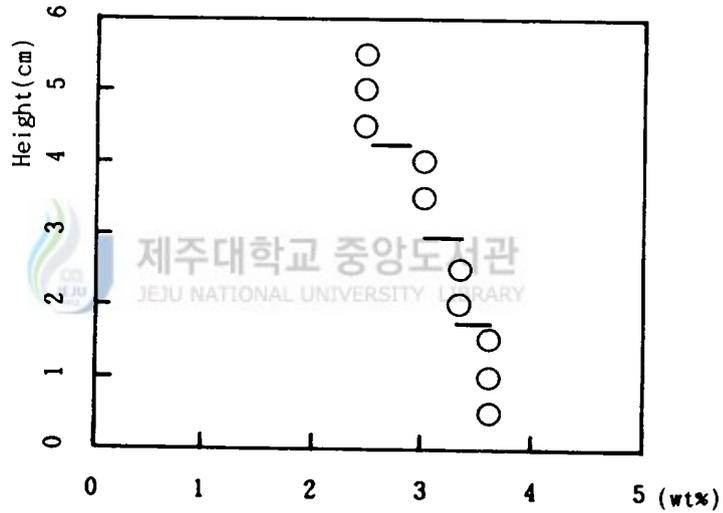
(b) Concentration distributions

Fig. 15 Vertical temperature and concentration profiles at mid-section

for CASE 3 : $Ra_T=5.9 \times 10^7$, $N=5.0$



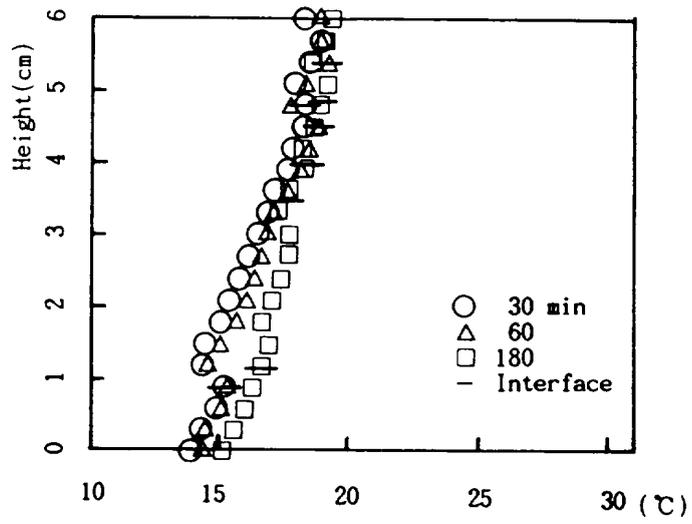
(a) Temperature distributions



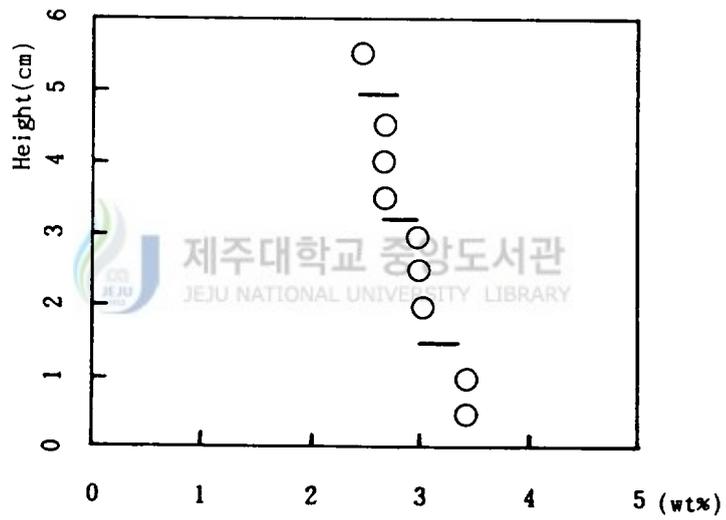
(b) Concentration distributions

Fig. 16 Vertical temperature and concentration profiles at mid-section

for CASE 1 : $Ra_T = 1.0 \times 10^7$, $N = 24.2$

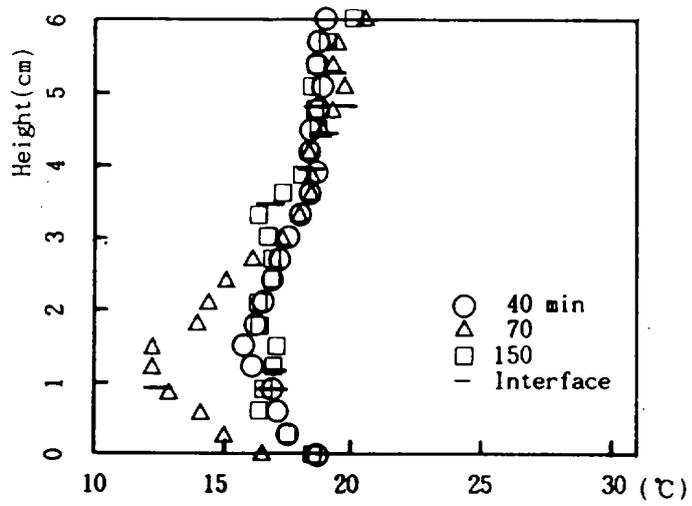


(a) Temperature distributions

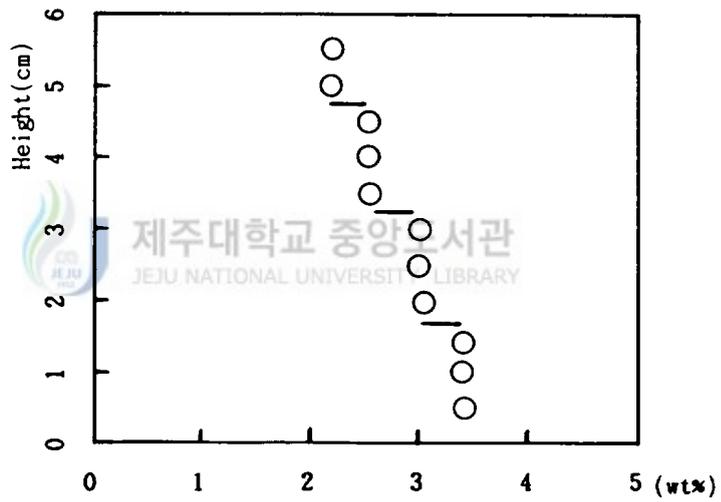


(b) Concentration distributions

Fig. 17 Vertical temperature and concentration profiles at mid-section for CASE 2 : $Ra_T=1.0 \times 10^7$, $N=24.2$



(a) Temperature distributions



(b) Concentration distributions

Fig. 18 Vertical temperature and concentration profiles at mid-section

for CASE 3 : $Ra_T=1.0 \times 10^7$, $N=24.2$

IV. 결 론

본 논문은 종횡비가 2.0인 직각 밀폐용기 내에 수평방향으로 온도 및 농도 구배가 가해지는 이중확산유동에 관한 연구로 수평경계면이 단열(CASE 1), 상부 수평경계면 등은 및 하부단열(CASE 2) 그리고 상·하 수평경계면 등은 (CASE 3)인 경우(등온 수평면의 경우 등온면의 온도가 수직 고온벽과 저온벽 온도의 평균으로 유지시켜 줌)에 대해 유동형태를 조사하고 그에 따른 온도 및 농도분포를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 실험영역에서 수평경계면 조건의 차이에 따른 유동형태의 변화는 없다. 그러나 수직방향 온도분포에서 수평경계면이 등온인 경우 전도에 의한 열전달을 확인할 수 있고 이로 인해 단일셀 유동의 경우 상부 수평벽면 근처에 작은 정체층이 존재한다.
2. 유동형태는 부력비가 작은 경우 단일셀 유동이 큰 경우에는 여러 개의 층을 이룬 유동이 생성되며, 두 유동현상 사이에 셀이 생성되어 성장하다가 파괴되는 과정을 반복하는 영역이 존재한다.
3. 셀 내부에서의 수직 방향 온도분포는 대류효과에 의해 역 'S'자와 유사한 모양으로 분포하고 농도는 균일하게 분포한다.
4. 확산율의 차이 때문에 인접면에서 온도는 큰 변화가 없는 반면 농도는 크게 변한다.

V. 참고 문헌

- Bains, P. G. and A. E. Gill, 1969. "On Thermohaline Convection with Linear Gradients", J. Fluid Mech., Vol. 3, pp.289-306.
- Bergman, T. L., F. P. Incropera and R. Viskanta, 1986. "Correlation of Mixed Layer Growth in a Double-Diffusive, Salt-Stratified System Heated from Below", J. of Heat Transfer, Vol. 108, pp.317-322.
- Chen, C. F., D. G. Briggs and R. A. Wirtz, 1971. "Stability of Thermal Convection in a Salinity Gradient Due to Lateral Heating", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 14, pp.57-65.
- Chen, C. F. 1974. " Onset of Cellular Convection in a Salinity Gradient Due to a Lateral Temperature Gradients", J. Fluid Mech., Vol. 63, pp.563-576.
- Hart, J. E. 1972. "On Sideways Diffusive Instability", J. Fluid Mech., Vol. 40, pp.279-288.
- Hart, J. E. 1973. "Finite Amplitude Sideways Diffusive Convection" J. Fluid Mech., Vol. 59, pp.47-64.
- Holman, J. P. 1984. "Experimental Methods for Engineers", 4th Edition, McGraw-Hill, pp.261-262.

- Huppert, H. E. 1971. "On the Stability of a Series of Double-Diffusive Layers", Deep-sea Res., Vol. 18, pp.1005-1021.
- Kamotani, Y., L. W. Wang, S. Ostrach and H. D. Jiang, 1985. Experimental Study of Natural Convection in a Shallow Enclosures with Horizontal Temperature and Concentration Gradients", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, pp.165-173.
- Khang S. J. and T. J. Fitzgerald, 1975. "A New Probe and Circuit for Measurement Electrolyte Conductivity", Ind. Engineering Chem., Fundamentals, Vol. 14, pp.208-213.
- Lee, J., M. T. Hyun and K. W. Kim, 1988a. "Natural Convection in Confined Fluids with the Combined Horizontal Temperature and Concentration Gradients", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, pp. 1969-1977.
- Lee J. and M. T. Hyun, 1988b. "Experiments on Thermosolutal Convection in a Shallow Rectangular Enclosure", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 1, pp.259-265.
- Lee, J., M. T. Hyun and J. H. Moh, 1990a. "Numerical Analysis of Natural Convection in Confined Stratified Fluid", Numerical Heat Transfer, Vol. 18, pp.343-355.
- Lee, J., M. T. Hyun and Y. S. Kang, 1990b. "Confined Natural



- Convection Due to Lateral Heating in a Stably Stratified Solution", *Int. J. Heat Mass Transfer.*, Vol. 33, pp.869-875.
- Mizushima, T. 1971. "The Electrochemical Method in Transport Phenomena, in *Advances in Heat Transfer*", Vol. 7, pp.87-161, Academic Press, New York.
- Ostrach, S. 1964. *Laminar Flows with Body Forces in Theory of Laminar Flows. High-Speed Aerodynamics and Jet Propulsion*, (edited by F. K. Moore) Chap. 4, Vol. 4, Princeton Univ. Press, NJ.
- Ostrach, S. 1980. "Natural Convection with Combined Driving Forces", *PhysicoChemical Hydrodynamics*, Vol. 1, pp.233-247.
- Stern, M. E. 1960. "The 'Salt Fountain' and Thermohaline Convection" *Tellus*, Vol. 12, pp.172-175.
- Stommel, H. A., B. Arons and D. Blanchard, 1956. "An Oceanographical Curiosity: the Perpetual Salt Foundation", *Deep-Sea Res.*, Vol. 3, pp.152-153.
- Thorpe, S. A., P. K. Hutt and R. Soulsby, 1969. "The Effect of Horizontal Gradients on Thermohaline Convection", *J. Fluid Mech.*, Vol. 38, pp.375-400.
- Turner J. S. and H. Stommel, 1964. "A New Case of Convection in the Presence of Combined Vertical Salinity and Temperature Gradient", *Proc. Natn. Acad. Sci.*, Vol. 52, pp.49-53.

- Turner, J. S. 1965. "The Coupled Turbulent Transports of Salt and Heat across a Sharp Density Interface", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 8, pp.759-767.
- Turner, J. S. 1973. *Buoyancy Effects in Fluids*, Cambridge Univ. Press, pp.251-287.
- Veronis, G. 1965. "On Finite Amplitude Instability in Thermohaline Convection", *J. Mar. Res.*, Vol. 23, pp.1-17.
- Wang, L. W. 1982. "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.
- Wirtz, R. A., D. G. Briggs and C. F. Chen, 1972. "Physical and Numerical Experiments on Layered Convection in a Density Stratified Fluid", *Geophys. Fluid Dynamics*, Vol. 3, pp.265-288.
- Wirtz R. A. and C. S. Reddy, 1976. "Heat and Mass Transport across Diffusive Interfaces Bounded by Turbulent Convecting Regions", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 19, pp.471-478.
- Wirtz, R. A. 1977. "The Effect of Solute Layering on Lateral Heat Transfer in an Enclosure", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 20, pp.841-846.