

비정상 자연대류에 의한 온도성층화의 동특성에 관한 연구[†]

Dynamic Characteristics of Thermal Stratification Build - up
by Unsteady Natural Convection

강 보 선*, 이 준 식**, 이 택 식**, 노 승 탁**
B.S.Kang, J. S. Lee, T. S. Lee, S. T. Ro

ABSTRACT

Dynamic characteristics of thermally-forced stratification process in a square enclosure with a linear temperature profile at the side walls have been investigated through flow visualization experiment and numerical analysis. The experiment was performed on air with the Rayleigh numbers of order 10^5 . A particle tracer method is used for the flow visualization and to obtain a sudden linear temperature profile at the side walls copper blocks which already have a linear temperature profile are come into contact with the thin copper plates of the test section. Immediately a meridional circulation is developed and heat transfer takes place from the wall to the interior region by circulation of fluid and finally a thermal stratification is achieved. In the numerical study, QUICK scheme for convective terms, SIMPLE algorithm for pressure correction, and the implicit method for the time marching are adopted for the integration of conservation equations. Comparison of flow visualization and numerical results shows that the developing flow patterns are very similar in dynamic nature even though there is a time lag due to the inevitable time delay in setting up a linear temperature profile. For high Rayleigh numbers, the oscillatory motion is likely to take place and stratified region is extended. However, initial temperature adjustment process is much slower than that for low Rayleigh numbers.

기 호 설 명

<로마문자>

A : 형상비

g : 중력 가속도 (m/s^2)

H : 4 각밀폐공간의 높이 (m)

h : 유체의 열전달 계수 (W/m^2K)

k : 유체의 열전도율 (W/mK)

Nu : Nusselt 수, Hh/k

P : 무차원 압력

Pr : Prandtl 수, ν/α

[†] 이 논문은 1986년도 문교부지원 학술진흥재단의 자유공모과제 학술진흥조성비에 의하여 연구되었음

* 한국과학기술원 기계공학부

** 경희원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

- p : 압력 (Pa)
- Ra : Rayleigh 수, $g\beta\Delta TH^3/\alpha\nu$
- T : 유체 온도 ($^{\circ}\text{C}$)
- ΔT : 기준온도와의 온도차 ($^{\circ}\text{C}$)
- t : 시간
- U, V : 무차원 속도 성분
- u, v : x, y 방향 유체속도 성분 (m/s)
- W : 4 각밀폐공간의 폭 (m)
- X, Y : 가로, 세로의 무차원 좌표
- x, y : 가로, 세로의 좌표 (m)
- 〈회람문자〉
- α : 열확산 계수 (m^2/s)
- β : 유체의 체적팽창 계수 ($1/\text{K}$)
- Θ : 무차원 온도
- μ : 점성 계수 (Kg/ms)
- ν : 동점성계수 (m^2/s)
- ρ : 유체의 밀도 (Kg/m^3)
- τ : 무차원 시간
- 〈하첨자〉
- c : 저온
- h : 고온
- o : 기준값

1. 서론

태양열을 이용한 냉난방시스템에서, 시간대의 부하에 따른 공급조절을 위한 축열에 있어서 축열조의 동적 성층화과정에 대한 기본적인 유동 및 열전달에 대한 이해가 필요하다. 축열조내에서의 유동은 자연대류에 의해 형성되며 성층화과정은 비정상상태의 고찰에 의해 분석될 수 있다.

복잡한 기하학적 구조에서는 주요 파라미터의 변화에 따른 기본적인 자연대류 유동 및 열전달 특성을 쉽게 도출해 낼 수 없으므로 가장 간단한 기하학적 형태인 직사각형 밀폐공간에서의 자연대류에 대한 연구가 많이 수행되어 왔다. 그러나 비정상 자연대류에서의 유동 및 열전달의 시간적 동특성은 아직도 잘 이해되지 못하고 있으며, 완전단열, 순간적 온도상승 등 실험에서의 어려움과 시간적 변화를 정확히 모사할 수 있는 수치해법의 결여

로 인하여 상반된 연구결과가 제시되어 논란이 되기도 한다. Patterson 과 Imberger¹⁾는 스케일해석을 통하여 $Ra > Pr^4 A^{-4}$ 인 조건에서 유체가 진동하면서 정상상태에 도달한다고 발표하였으나 Yewell²⁾ 등은 대단히 작은 종횡비에 대한 실험을 통하여, 진동현상이 없이 점진적으로 정상상태에 도달하는 결과를 얻었으며, Ivey³⁾는 물에 대하여 불규칙적인 진동현상이 감쇄되면서 정상상태에 이른다고 발표를 하였다.

밀폐공간내에서의 온도성층화에 관한 문제도, 내부자연대류 문제로서 이론적, 수치해석적 연구가 많이 이루어지고 있다. Veronis⁴⁾에 의하여 회전 유체와 성층화 유체 사이의 유사성이 밝혀진 이후로, 회전 유체의 스핀업 (spin-up) 현상에 해당하는 히트업 (heat-up) 현상에 대한 연구가 시작되었다. Sakurai 와 Matsuda⁵⁾는 한 성층화상태에서 다른 성층화상태로 변화해가는 과정을 선형으로 가정하여 이론적인 해석을 하였으며, Jischke 와 Dotty⁶⁾는 이를 임의의 온도분포와 기하학적 형상으로 확장시켰다. 하지만 이들의 연구는 성층화과정에 대한 정성적인 자료는 제공해 주고 있지만, 수치해석적이나 실험적 연구를 통한 정량적인 분석은 행해지지 않았다. 이에 대한 수치해석적 연구가 Hyun⁷⁾에 의해 행해져, 유동이 지수함수적으로 감쇄하는 것이 아니라, 진동현상이 존재하면서 감쇄해나감을 보여 주었다. 그는 계속해서 초기에 등온으로 있는 경우의 성층화 과정을 연구하였으며, Prandtl수의 변화에 따른 영향도 고찰하여, Prandtl 수가 낮을 경우 진동현상이 더욱 심함을 보여주었다.⁸⁾

온도성층화 과정에 대한 실험적 연구는 지금까지 보고된 바가 없다. 하지만 실험실에서는, 성층화 유체가 필요로 할 경우, 상하에 온도차를 주어 오랜 시간 둬으로써 사용하였다. 오랜 시간이 흐른 뒤에는 정지상태의 성층화된 유체를 얻을 수 있지만, 초기에는 Pr 수, Ra 수 및 경계조건에 따라 유동의 형성과정이 각각 다르게 된다. 따라서 성층화 초기상태의 유동의 특성에 대하여 실험적

으로 규명하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 4각 밀폐공간내에서의 온도 성층화 과정에 대한 실험적 연구를 시도하였다. 특히 비정상상태 자연대류의 실험으로서 는 많은 어려움이 있었던 공기를 실험유체로 선택하였다. 이전까지의 온도성층화 연구의 대상은, 윗면이 T_h 가 되고 아랫면이 T_c 가 될 경우의 성층화 과정이었으나, 본 논문에서는 상하면은 단열이고 양 수직면이 선형온도분포를 갖게 될 때의 온도성층화 과정에 대하여 연구하였다. 한편 수치해석을 통하여 실험결과와 비교하여 보고, Ra 수의 영향, 진동현상의 존재유무 등을 조사하였다.

2. 가시화실험

실험모델은 상하 단열면을 가지고 좌우면

Table 1. Experimental condition

	공기 온도 (°C)	T_h (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)	H (m)	Ra
경우A	17.2	20.2	14.2	3	0.08	1.93×10^5
경우B	15.7	19.7	11.7	4	0.12	6.53×10^5

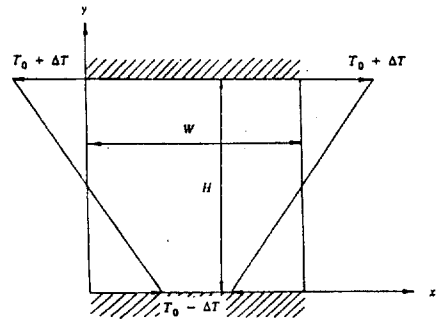


Fig. 1 Configuration of problem

이 선형 온도분포를 갖는 2차원 정 4각밀폐 공간이다. 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 내부의 유체는 공기이며 시험체적의 크기를 다르게 하여 Ra 수를 바꾸었다. Table 1에 각 경우에 대한 실험조건을 나타내었다.

2.1 실험장치

유동장의 가시화 실험장치는, 시험체적과 그 부수장치, 입자공급장치, 조명장치, 촬영장치 등으로 구성되어 있다.

시험체적과 그 부수장치를 Fig. 2에 나타내었다.

시험체적은 상하 단열면과 두께 2mm의 얇은 동판으로 구성된다. 단열면은 두께 5cm의

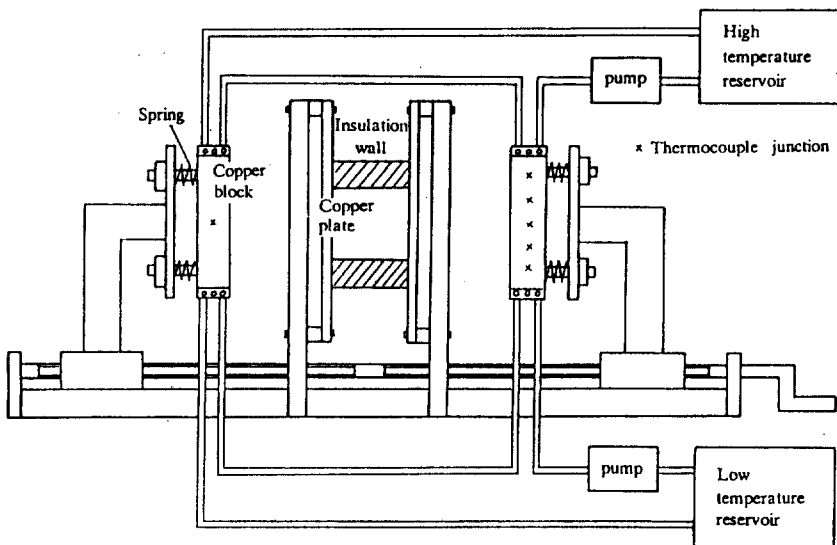


Fig. 2 Schematic diagram of test section

polystyrene foam ($k = 0.02 \text{ W/m}^\circ\text{C}$)을 사용하였다. 이 단열재의 공기에 대한 열전도율은 1.25이기 때문에 효과적인 공기에 대한 단열은 될 수 없으나 이 이상의 단열재를 구할 수는 없기 때문에 이를 사용하였다. 좌우면의 온도를 순간적으로 선형온도분포로 만들어 주기 위하여 $24 \times 5 \times 35 \text{ cm}$ 인 구리덩어리를 이용한다. 즉 구리덩어리 윗면에 고온항온조로부터 고온의 물을, 아랫면에 저온항온조로부터 저온의 물을 계속 공급하면, 구리덩어리는 일정시간이 경과한 후에는 선형온도분포를 갖게 된다. 동판과 구리덩어리의 온도 변화를 측정하기 위하여, 좌측 구리덩어리 가운데와 우측 구리덩어리 밑면부터 4cm의 간격으로 5개, 그리고 좌우 양동판에 2개씩의 열전대를 부착시켜 다채널기록계로 기록하였다. Fig. 3은 우측 구리덩어리 다섯 위치에서 측정한 온도를 보여주고 있는데, 거의 선형온도분포를 갖게 됨을 확인할 수 있다.

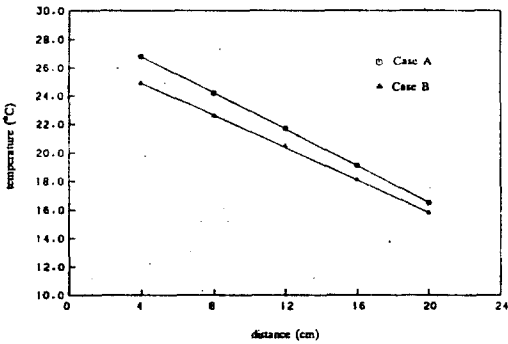


Fig. 3 Temperature distribution in copper block

구리덩어리와 동판이 접촉할 때의 접촉을 좋게 하기 위해서, 강한 스프링을 이용하였고 접촉면이 완전히 접촉되도록 4개의 너트로 조절하였다. 또한 접촉저항을 줄이기 위해서, 열전도성이 좋은 열전도성 그리스(Toshiba silicon YG 6260)를 양면에 얇게 발라 최대한 잘 접촉하도록 하였다. 구리덩어리가 동판에 접촉한 이후 동판 온도의 시간에 따른 반응을 Fig. 4에 나타내었다.

바라는 온도에 도달하기까지 약 20초, 63

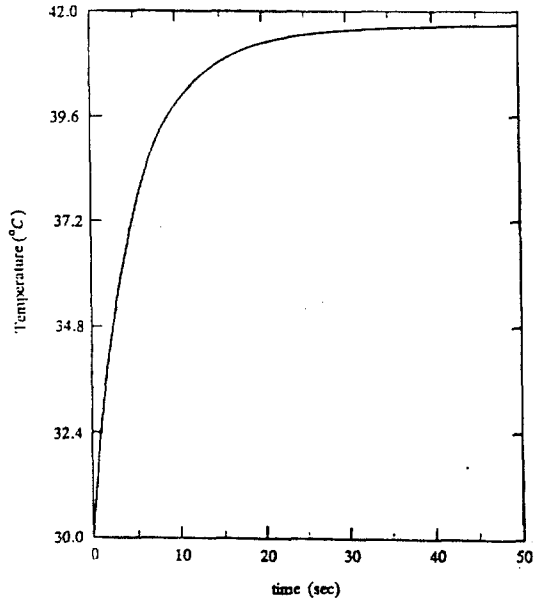


Fig. 4 Time response of copper plate temperature

°에 이를 때까지 약 5초 정도가 걸리며, 승온속도는 4초까지는 $1.6 \text{ }^\circ\text{C/sec}$, 그 이후부터는 $0.2 \sim 0.5 \text{ }^\circ\text{C/sec}$ 가 된다. 이상적인 계단형 응답은 아니기 때문에 앞으로도 이의 개선을 위해서 많은 노력이 필요할 것이다.

입자공급장치와 조명장치, 촬영장치를 Fig. 5에 나타내었다.

추적입자는 스테아린산 아연(zinc stearate, $\text{Zn}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$, 밀도 1147 kg/m^3 , 직경 $2 \sim 6 \text{ }\mu\text{m}$)으로서, 밀폐된 덕트의 밀부분에서 송풍기로 분말을 부유시키면서 강한 압축공기를 불어주게 되면, 시험체적의 뒷부분으로 관을 통하여 공급되게 된다. 조명장치는 광원으로 수은등(100 W)을 사용하였고, 볼록렌즈로 빛을 모은 다음 원통형 렌즈를 이용하여 슬릿 광을 만든다. 슬릿 광은 위 단열면의 좁게 뚫린 틈을 통하여 시험체적으로 들어가게 된다. 강한 빛에서 나오는 적외선에 의해 시험체적내 공기의 온도가 변하게 되면, 실험을 시작하기 전에 유동이 생기므로 적외선필터(infrared filter)를 사용하여 그 효과를 줄였다. 가시화된 유동장을 시험체적의 앞에서 카메라로 촬영하였다. 카메

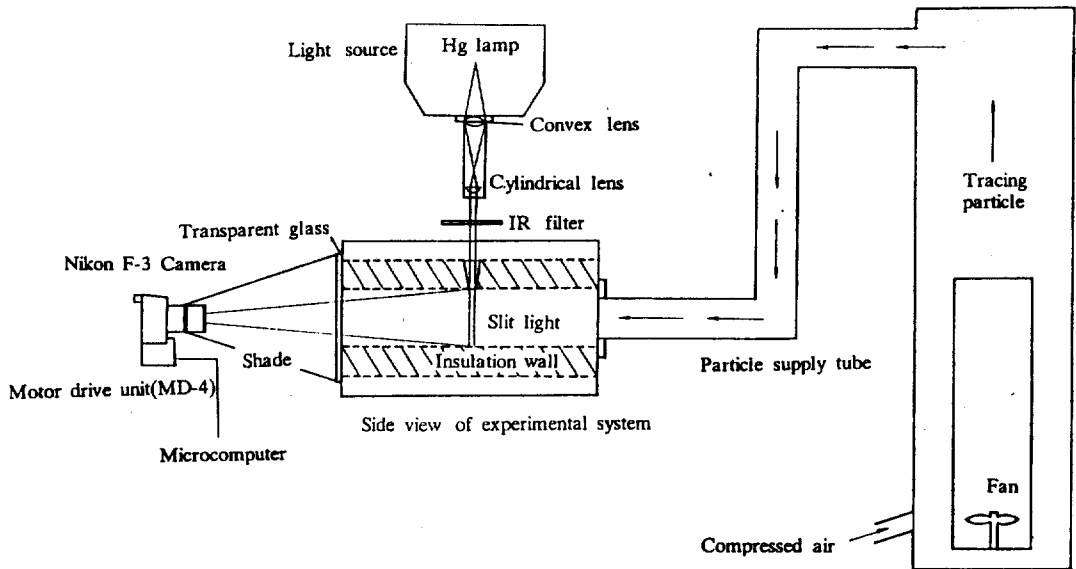


Fig. 5 Schematic diagram of flow visualization system

라는 마이크로 컴퓨터에서 보내지는 신호에 의해 작동되는 자동 셔터장치를 이용하였다. 보내는 신호 간격을 조절하는 프로그램에 의해 원하는 시간 간격으로 사진을 찍을 수 있다. 외부 빛을 철저히 차단하기 위하여 시험체적과 사진기를 검은 천 (velvet) 으로 연결시켰고, 시험체적의 모든 면도 검은 천 또는 검은 색 무광택도료를 칠하였다.

2.2 실험방법

우선 고온항온조와 저온항온조의 물의 온도를, 공기온도를 중심으로 ΔT 만큼 높고, ΔT 만큼 낮게 조절한다. 물의 온도가 설정된 온도로 유지가 되면, 펌프를 작동시켜 좌우 구리덩어리에 물을 순환시킨다. 구리덩어리가 정상상태가 되면 입자를 시험체적내에 송입시킨다. 강한 공기압으로 송입시키기 때문에 상당히 높은 밀도를 유지할 수 있게 된다. 입자를 송입한 후 앞·뒷면을 유리로 완전 밀폐시키면 2~3분 후에 입자는 정지하게 된다. 입자가 정지한 후 광원으로부터 빛을 보내고, 좌우 구리덩어리를 이동시키는 축의 핸들을 돌려 동관에 접촉시킴과 동시에, 이미 프로그램되어 있는 마이크로 컴퓨터를 작동시켜, 카메라가 원하는 시간간격으로 시험체

적내의 유동현상을 찍게 된다. 카메라의 조리개는 최대로 열고, 셔터속도는 0.5 초로 하여 입자의 궤적이 필름에 나타나도록 하였다. 촬영시간 간격은 유동의 초기상태에서는 0.8 초, 10 초 이후는 2~3 초 간격으로 하였고 1분 정도까지 촬영하였다.

2.3 실험결과 및 검토

Fig. 6은 경우 A ($Ra = 1.93 \times 10^5$)에 대하여 시간의 흐름에 따라 유동장이 형성되어 나가는 과정을 보여준다.

벽면에 가까운 위치에서의 유체는 벽면으로부터의 열전달에 의해, 같은 높이의 중심에 있는 유체보다 온도가 더 높아지고 따라서 부력을 받게 되어 위로 향하게 된다. 조금 더 높아진 위치에서는 벽면이 선형온도분포를 갖고 있기 때문에 열전달량이 더 많아져, 부력에 의해서 생긴 위로 향하는 속도는 더욱더 증가된다. 윗면에 도달한 유체는 관성에 의하여 윗면을 따라 중심부분으로 움직이고 상대편 쪽에서 다가온 유체와 만나 아래로 향하게 된다. 한편 벽면에 형성된 경계층을 따라 유체의 유출이 계속 일어나고 있으므로 이를 채워주기 위하여 중심부분의 유체가 벽면 쪽으로 빨아들여지고 위에서 내려오는 유체

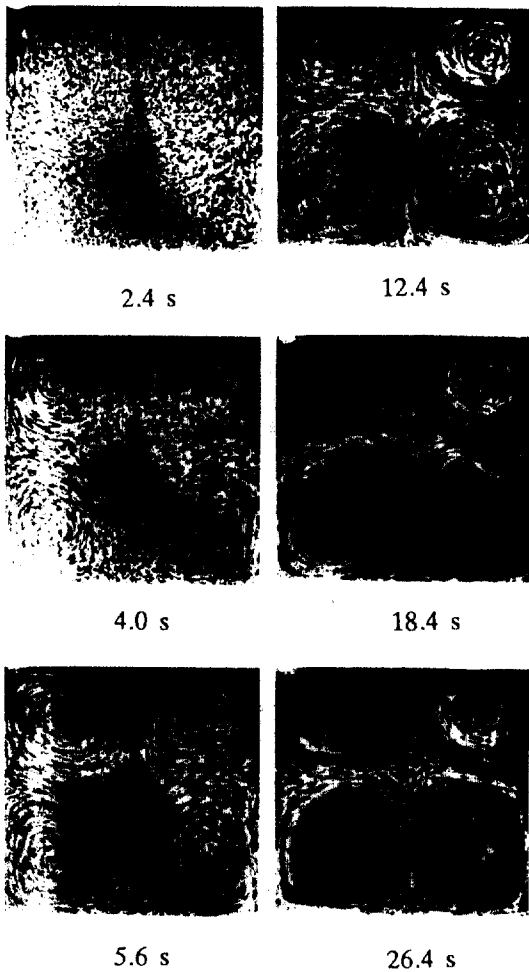


Fig. 6 Unsteady flow patterns for case A

가 또 이를 채워준다. 이렇게 해서 유체는 벽면을 따라 위로 올라가고 윗면을 따라 중심부분으로 움직이다가, 중심부분에서 다시 내려오고 다시 중심에서 벽쪽으로 흘러가는 순환을 하게 된다. 이렇게 순환하는 유체는 수직벽을 움직이면서 전달받은 열을 중심부분에 전달시켜, 중심부분의 온도를 점차적으로 올려주게 된다. 이러한 경선 순환(meridional circulation)에 의해 용기내 유체의 온도가 성층화되어가는 과정을 히트업(heat-up)이라고 한다. 초기에는 유체와 벽면의 온도차가 모서리에서 제일 심하기 때문에, 모서리에서 순환하는 조그만 셀(cell)이 형성된다. $t=2.4$ 초의 사진에서 이 조그만 셀들이

보이고 있다. 수직벽을 따라 흐르는 속도가 점점 커지게 되면, 셀도 점점 커져서 이랫면을 따라 중심까지 흐르다가 위로 향하게 된다. 본 연구에서 가시화 패턴을 비교한 결과 8초가 지나면 유동은 1/4 평면을 가득 채우게 되고, 그 이후부터는 아주 느린 속도로 속도가 감소해 나간다. 8 초 이후에 상하대칭이 잘 맞지않는 이유는, 동판의 온도가 중심부분의 공기 온도를 중심으로 ΔT 씩 정확히 유지가 되지 못했기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7은 경우 B ($Ra = 6.53 \times 10^5$)에 대한 결과이다.

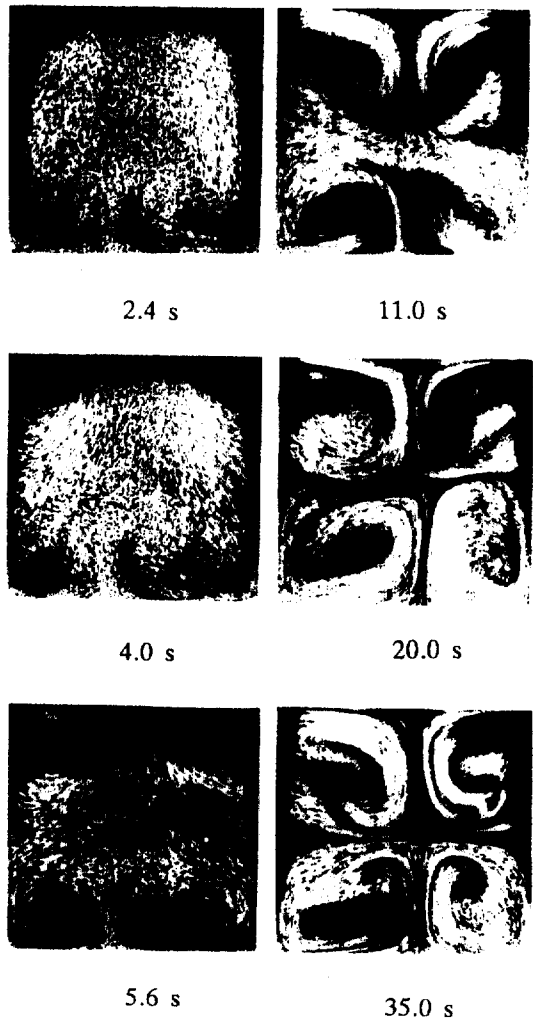


Fig. 7 Unsteady flow patterns for case B

경우A와 경우B를 비교해 보면, 경우A가 B보다는 빠르게 유동이 형성됨을 알 수 있다. A의 경우에 2.4초 정도에 구석의 조그만 셀들을 볼 수 있었는데, B의 경우에는 3.2초가 되어야 볼 수 있다. Hyun⁸⁾은 온도성층화 과정의 초기에는 유동이 완전히 확립될 때까지 경계면으로부터의 열확산이 지배적이며, 강한 순환이 형성된 이후부터는 이 순환에 의한 대류에 의해 성층화가 이루어지고, 속도가 떨어지는 말기에는 다시 열확산이 지배적인 요인이 됨을 에너지방정식의 각 항들을 시간에 따라 비교해 봄으로써 보여 주었다. Ra 수는 열확산에 의한 영향에 부력의 영향을 나타내는 수이므로, Ra 수가 낮게 되면 부력에 의한 영향보다 열확산에 의한 영향이 커지게 된다. 따라서 열확산이 지배적인 유동의 초기에는, Ra 수가 낮을수록 온도장이 빨리 형성되고 따라서 유동현상도 빨리 진행이 된다. 한편 경우B가 경우A보다는 속도가 더 빠름을 알 수 있다. 사진 결과는 0.5초동안 입자들의 움직임이 나타나게 되는데, B의 경우가 A경우보다 유선이 연속적으로 이어져 있음을 알 수 있다. 이는 Ra 수가 높을수록 부력에 의한 영향이 커지므로, 부력에 의해 야기되는 순환속도가 더 커지게 된다는 것으로부터도 알 수 있다.

3. 수치해석

해석모델은 높이가 H이고, 폭은 W인 정 4각 밀폐공간이다. 상하면은 단열이고 좌우면은 y=H에서 T=T₀+ΔT=T_h, y=0에서 T=T₀-ΔT=T_c인 선형온도분포를 유지한다. 수치해석은 두 가지의 실험한 경우 A(Ra = 1.93 × 10⁵), B(Ra = 6.53 × 10⁵)와 이보다 높은 Ra = 7.54 × 10⁵인 경우에 대하여 행하였다.

3.1 지배방정식

Boussinesq 근사를 도입하고 지배방정식을 무차원화하면 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + \text{Pr} \nabla^2 U$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} + \text{Pr} \nabla^2 V + \text{Ra} \cdot \text{Pr} \Theta$$

에너지 방정식

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \nabla^2 \Theta$$

여기에 사용된 무차원변수는 다음과 같다.

$$U = \frac{uH}{\alpha}, \quad V = \frac{vH}{\alpha}, \quad P = \frac{\rho H^2}{\rho_0 \alpha^2}$$

$$\tau = \frac{\alpha t}{H^2}, \quad X = \frac{x}{H}, \quad Y = \frac{y}{H}$$

$$\Theta = \frac{T - T_0}{T_h - T_0}, \quad \text{Ra} = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu}, \quad \text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}$$

무차원 초기조건 및 경계조건은 다음과 같다.

초기조건 : U=V=0, Θ=0

경계조건 : a) 상하면 U=V=0, $\frac{\partial \Theta}{\partial Y}=0$

b) 좌우면 U=V=0

$$\Theta(0, Y) = \Theta(1, Y) = 2Y - 1$$

3.2 수치해석

확산항에 대하여는 중심차분근사(central difference approximation)를 사용하였으며, 대류항에 대하여는 법선방향 곡률항과 접선방향 곡률항을 동시에 고려한 2차원 QUICK 방법을 사용하였고, 유한차분방정식의 각 계수가 항상 양이 되도록 변형시켜

안정성을 높인 Pollard⁹⁾의 방법을 선택하였다. 유동장을 계산하기 위하여 SIMPLE(Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation)을 적용하였고, 유한차분화된 각 방정식들을 TDMA(Tri-Diagonal Matrix Algorithm)를 이용하여 계산하였다.¹⁰⁾

3.3 수치해석 결과 및 검토

Fig. 8은 경우 A에 대해서 유선과 등온선을 나타낸 것이다.

초기에는 벽으로부터의 전도에 의해 온도장과 유동이 형성된다. 따라서 벽을 따라 내려온 유체고, 아랫면에 도달하여 오른쪽으로 향하면서, 아랫면을 따라 수평으로 흐르지 못하고, 곧장 45°의 각도로 중심으로 향하게 된다. 그러나 벽을 따라 내려오는 유체의 속도가 점점 커지면서, 중심으로 향하는 각도는 점점 낮아져 3초 정도에는 거의 수평으로 흐

르게 된다. 따라서 아랫면을 흐르는 강한 유동에 의해 온도장 선단이 아랫면을 따라 진행해 나가는 모습을 볼 수 있다. 왼쪽에 치우쳐 있던 유동도 온도장이 오른쪽으로 진행해 감에 따라, 점점 오른쪽으로 이동하여 약 5초가 지나면 전 평면을 가득 채우게 된다. 중심부분이 점점 성층화 되기 시작하면, 유동은 다시 밀리로 조금씩 밀리게 된다. 정상상태에 가까와지면 상부에서는 수직벽면 근처에서만 온도구배가 존재할 뿐 중심부분은 성층화가 이루어진다. 하부에서는 아랫면의 단열 조건 때문에 온도가 성층화는 이루지 못하고 수직벽면과의 온도구배가 심해진다. 즉 고온에 해당하는 $y=0.5$ 위의 벽에서 공급되는 열량이, $y=0.5$ 아래의 벽을 통해 손실되는 열평형이 이루어지면, 하부에서는 더 이상 온도선단이 진행하지 못하고 온도성층화도 이루지 못한다. 온도성층화가 이루어진 중심부에서는 유동이 더이상 생기지 않아, 순환하는

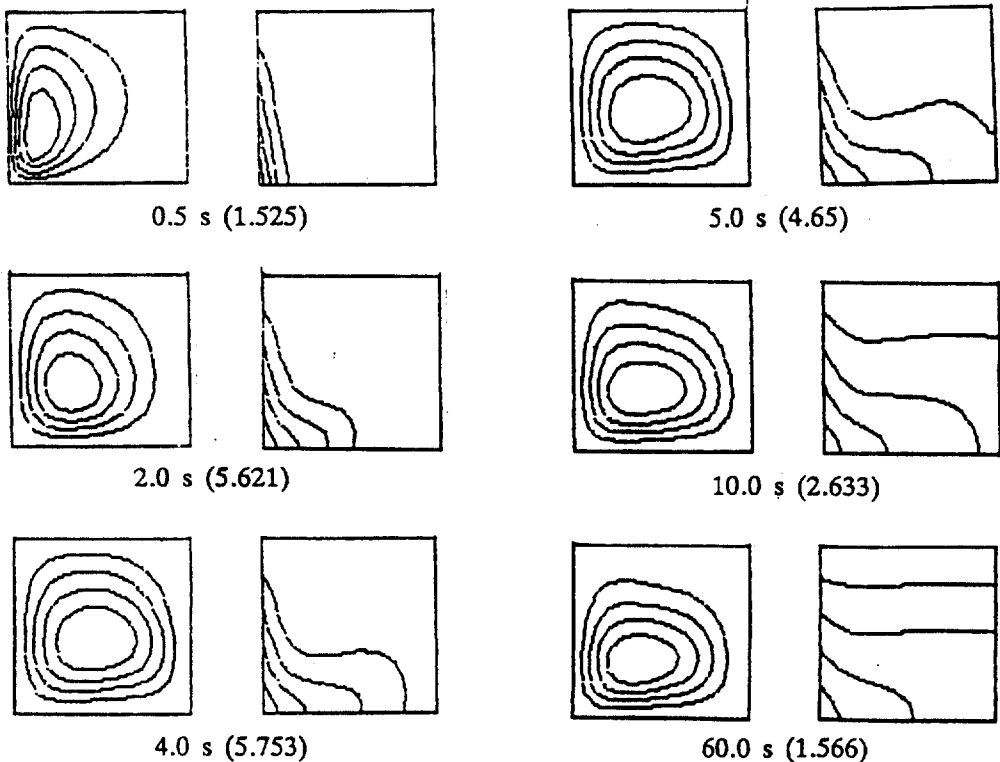


Fig. 8 Streamlines(left) and isotherms(right) for case A

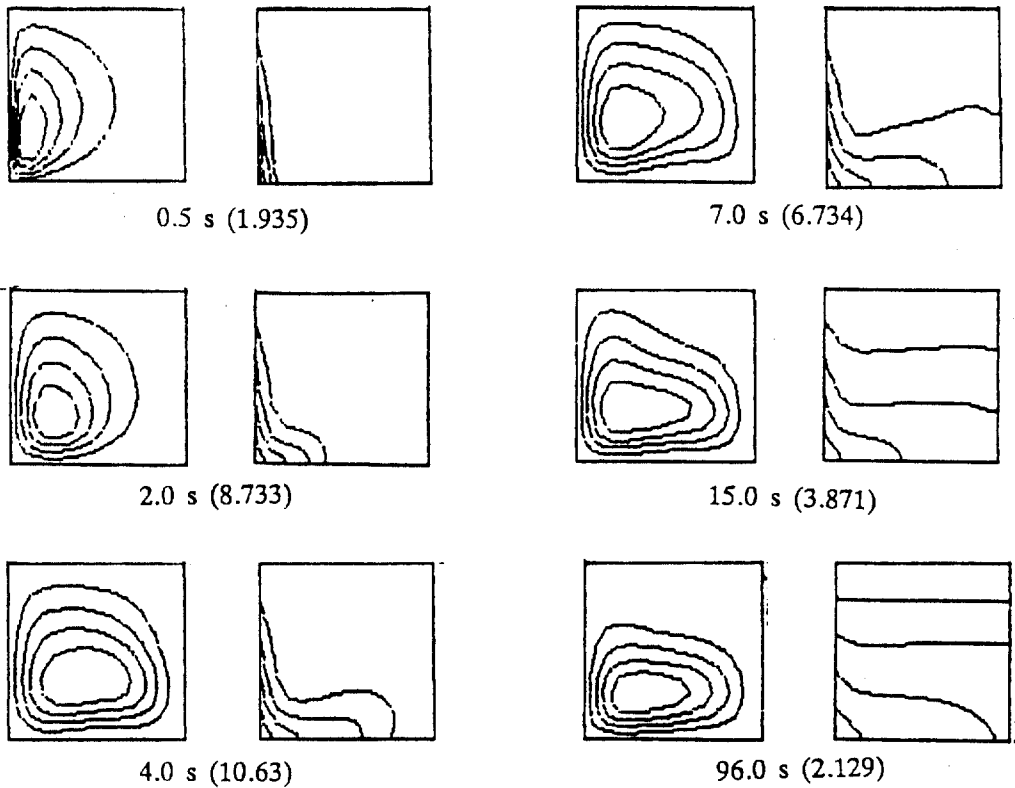


Fig. 9 Streamlines (left) and isotherms(right) for case B

유동의 형상은 중심에서 밑으로 밀린 모습이 나타나고 있다.

Fig. 9는 경우B에 대한 결과이다.

차원해석에 의하면 수직벽 주위의 자연대류에서 열경계층의 두께는 $O(Ra^{-1/4}h)$ 이다. 따라서 Ra 수가 커질수록 열경계층의 두께는 얇아지게 된다. 계산결과에서도 경우A와 비교해 열경계층의 두께가 더 작아졌음을 볼 수 있다. 유동은 5 초까지는 경우 A와 거의 변화가 없다. 하지만 10 초부터는 다른 모습을 보여주고 있다. 즉 A 경우에는 중심을 따라 올라온 유체가 거의 2/3지점에서 다시 수직벽을 향하여 방향이 바뀌었다. 그런데 B의 경우에는 1/2지점에서 방향이 대각선 방향으로 바뀔 수 있다. 이때의 온도장을 보면, 경우 A에서는 온도성층화가 많이 이루어져 온도구배가 그리 심하지 않지만, B의 경우에는 아직도 온도구배가 심함을 알 수 있

다. 따라서 수직벽을 흐르는 속도는 B가 더 빠르게 되고, 수직 경계층으로의 질량보충이 빨리 이루어져야 한다. 이를 만족시켜 주기 위하여 유체는 중심까지 올라가지 못하고 1/2 지점에서 방향이 꺾인다고 생각할 수 있다. 하지만 성층화가 거의 이루어지면 역시 수평 방향으로 수직벽을 향하여 움직이게 된다. 초기에는 Ra 수가 낮을수록 성층화가 빨리 이루어졌지만, 정상상태에서 성층화가 이루어진 정도를 비교하면, Ra 수가 높을수록 중심부분의 성층화가 많이 이루어졌음을 알 수 있다. 이는 Ra 수가 높을수록 부력에 의한 영향이 강해지고, 부력에 의해 야기되는 경선 순환에 의해 중심부분의 온도성층화를 더욱 잘 이룰 수 있기 때문이다. 경우 A와 비교해 볼 때 중심부분에서 온도구배가 더 완만하며 하부에서도 $\theta = -0.6$ 등온선이 꽤 많이 진행해 나갔음을 알 수 있다. 따라서 경우A보다 유

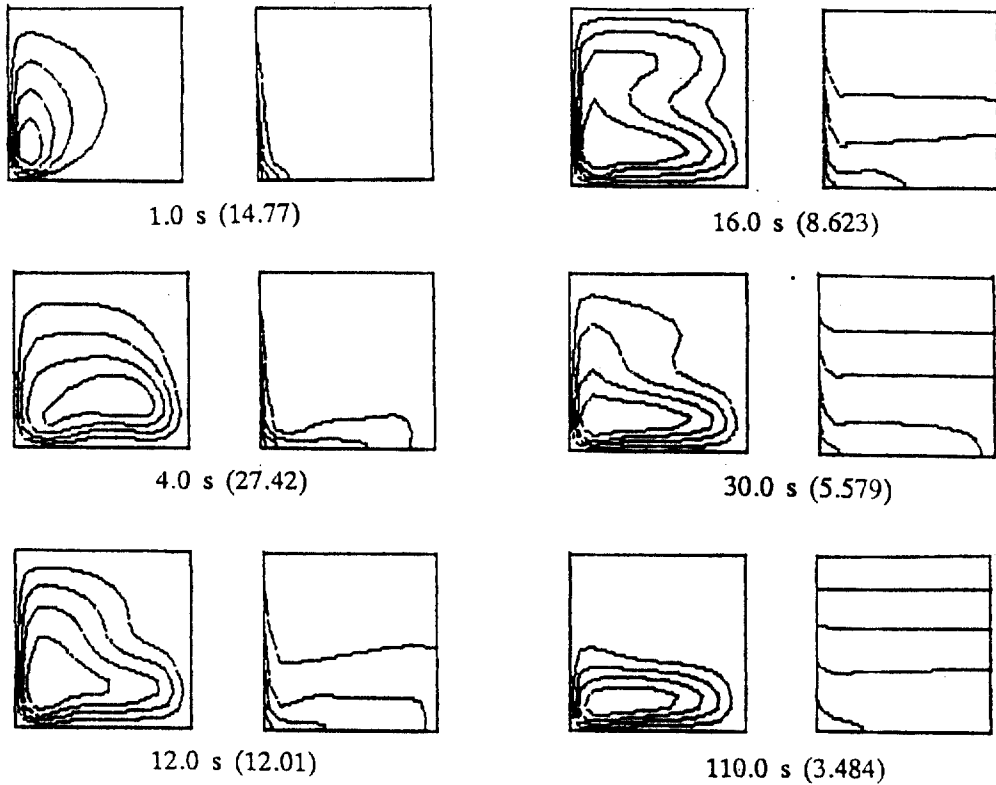


Fig. 10 Streamlines(left) and isotherms(right) for case C

동은 더욱 밑으로 밀리게 되어, 중심부분은 거의 정지상태가 되고 하부에서만 경선순환이 계속 존재하게 된다.

Fig. 10은 경우 C에 대한 결과이다.

경우 A, B보다는 Ra 수가 높기 때문에 특이한 현상이 많이 나타나고 있다. Ra 수가 높기 때문에 확산에 의한 영향이 아주 적게 된다. 따라서 초기상태에서는 왼쪽 벽으로부터의 열확산이 크지 않아 거의 경선순환에 의해 전달되어져 오는 열에 의해서만 온도장이 형성되어 진다. 이러한 현상은 $t = 6.75$ 초의 온도장 그림이 잘 보여주고 있다. 좌측 하부에서 밑으로 들어가고 중심에서 수평을 이루다가, 오른쪽 끝에서는 경선순환에 의해서 위로 올라간 모양을 하고 있다. 즉 Ra 수가 높아질수록 왼쪽은 내려가고 오른쪽은 올라가는 모습이 두드러지게 되는데, 이는 Ra 수가 높을수록 확산은 많이 되지 못하고 경선순환은

강해지는데 그 이유가 있다. 이러한 온도장은 아랫면을 따라 오고 있는 유동에 부력을 제공해 주어, 유체가 오른쪽까지 오기 전에 부력에 의하여 위로 향하게 된다. 따라서 유동은 좌측으로 점점 밀리게 되고, 우측 상부에서는 반대방향으로 회전하는 아주 작은 속도의 셀이 생긴다. 하지만 좌측 하부의 온도가 점점 올라가고 오른쪽도 평행이 되기 시작하면, 유체는 아랫면을 따라 흐르던 관성에 의해 오른쪽 끝까지 도달하여 위로 향하게 된다. 이후부터는 대류에 의한 영향이 강해져 온도성층화가 급격히 이루어지게 된다. 정상 상태에서는 중심부분은 완전한 성층화를 이루고 온도기울기도 거의 없게 된다. 유동도 거의 하부에서만 존재하게 된다.

Fig. 11은 $\theta = -0.2$ 인 등온선의 시간에 따른 진행과정을 각 경우마다 보여주고 있다. Ra 수가 낮을수록 벽에서의 확산이 많이 일

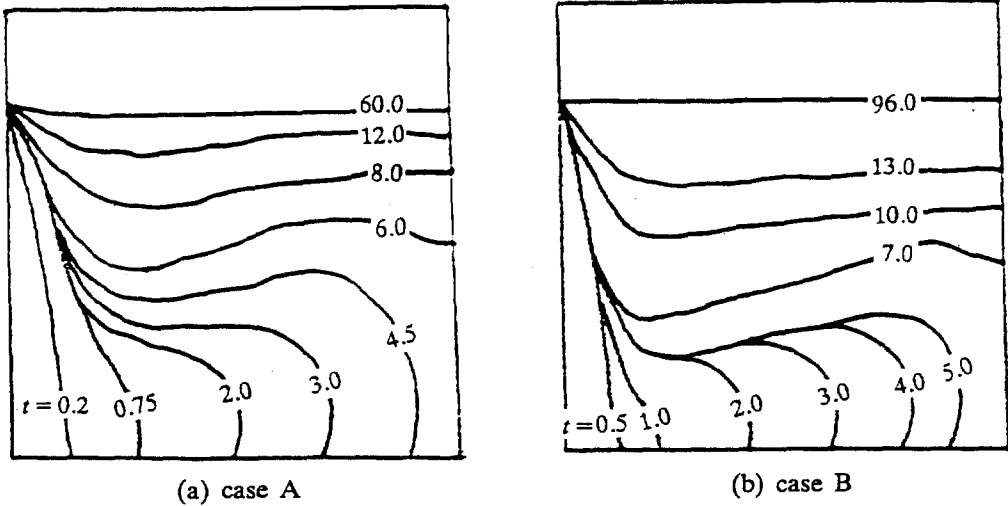


Fig. 11 Time history of isotherm front

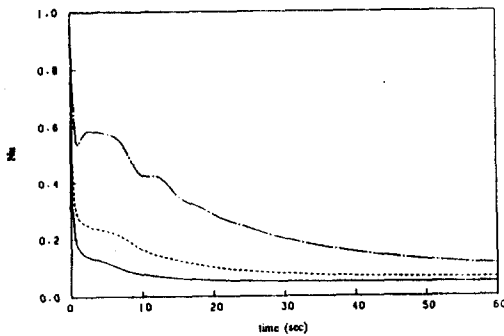


Fig. 12 Time history of Nusselt number
(— case A, --- case B, -·- case C)

어나 열경계층의 두께로 두껍고 온도장도 빨리 형성돼 나감을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 왼쪽 벽 $y = 0.8$ 에서의 Nu 수의 시간에 따른 변화를 보여준 것이다.

경우 A, B는 급격히 감소한 다음 완만히 정상상태의 값으로 접근하고 있다. 하지만 경우 C에서는 두 곳에서의 진동현상이 나타나고 있다. 따라서 경우 C에서는 벽면으로부터의 열유속의 진동을 예측할 수 있고, 이는 속도의 진동현상을 야기시킴을 알 수 있다.

Fig. 13 ~ 15는 좌측하단 1/4번의 아홉 점에서의 u , v , θ 를 시간에 따라 보여준 것이다.

속도의 경우, 경우 A는 최대값에 이른 후

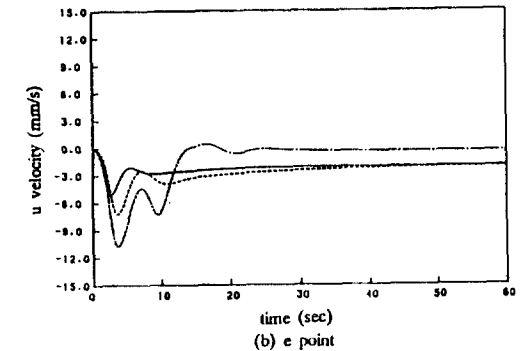
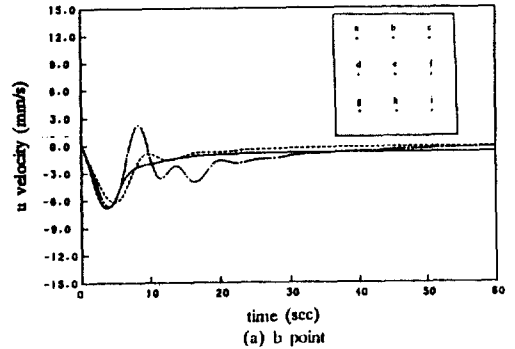


Fig. 13 Time history of u velocity
(— case A, --- case B, -·- case C)

정상상태의 값으로 아무런 진동없이 접근한 반면, 경우 B는 약간의 진동현상이 나타나고, 경우 C에서는 뚜렷한 진동현상을 발견할 수 있

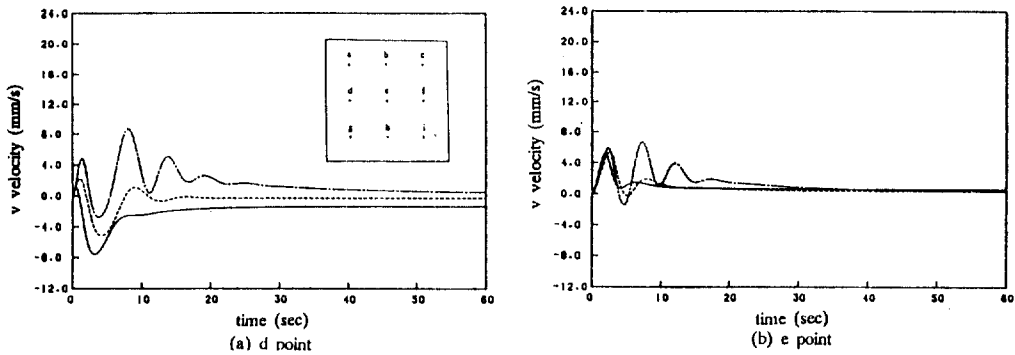


Fig. 14 Time history of v velocity (— case A, ---- case B, - - - case C)

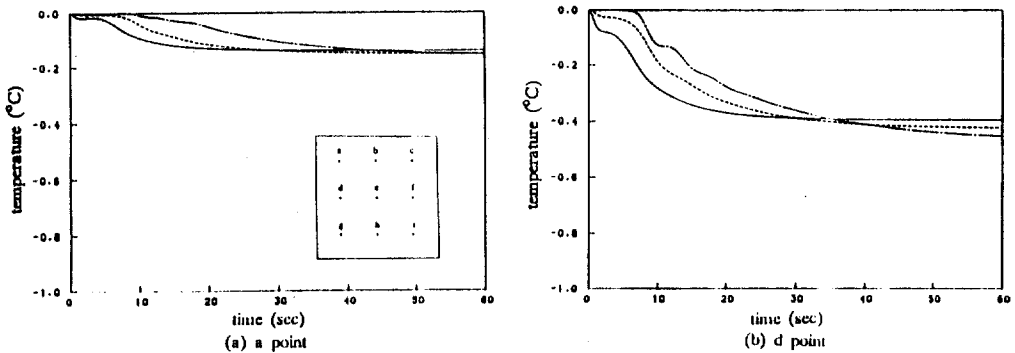


Fig. 15 Time history of temperature (— case A, ---- case B, - - - case C)

다. 이러한 진동현상은 Hyun⁸⁾의 연구에서도 발견되었다. 온도의 경우에는 경우 A,B에서는 거의 진동 현상이 없고, 경우C에서만 약간의 진동현상을 보여준다.

4. 실험결과 및 수치해석 결과의 비교

유동장의 가시화 실험결과와 수치해석 결과를, 정량적으로 비교 검토하기는 어려운 점이 있다. 하지만 시간에 따른 유동의 형성과정은 계산결과와 비교할 수가 있다.

경우 A에서 $t = 2.4$ 초의 실험결과는 수치해석 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 하지만 그 이전 시간에서의 수치해석 결과의 모습을 실험결과에서는 찾아보기가 힘들다. 그 이유로서는 초기상태에서는 유동이 강하지 못하기 때문에, 설사 추적 입자가 조금씩 움직였다 하여도, 0.5 초의 노출시간을 준 필름상에는 정지해 있는 것처럼 나타날 수도 있기

때문이다. 초기에 유동변화가 심하기 때문에 노출시간을 많이 준다는 것도 문제가 있어, 설정한 노출시간으로 찾아낼 수 없는 느린 유동의 가시화에는 한계가 있음을 알 수 있다.

전반적으로 실험결과가 계산결과보다 유동장의 형성이 늦어지는 경향을 보여주고 있다. 그 이유로서는 동판의 온도가 이상적으로 계단형으로 올라가지 못하고 지수함수적으로 증가하여, 원하는 온도에 이를 때까지 10여초간의 시간지연이 발생하기 때문이라 생각된다. 자연대류의 실험에 있어서는 이 문제의 개선이 앞으로도 주요 관건이 될 것이다. 한편 상하면을 이루고 있는 단열재가 완전한 단열을 이루고 있지 못하기 때문에, 유체가 상하 단열면을 따라 흐르면서, 수직벽을 흐르면서 얻었던 열을 중심 부분으로 전달시키지 못하고 부분적으로나마 단열면으로 잃어버리는 이유도 있을 수 있다. 따라서 공기에 대한 실험에 있어서 단열의 경계조건을 이룬다

는 것은 무척 어렵다고 볼 수 있다. 정상 상태에서의 결과를 비교하여 보면, 수치해석 결과에 의해서는 중심부분은 유동이 거의 존재하지 않으며 이러한 현상은 Ra 수가 커질 수록 그러한 영역이 커짐을 보여주고 있다. 하지만 가시화 실험에서는 오랜 시간이 흘러도 중심부분의 유동이 없어지지 않고, 1/4 평면을 가득 채운 채 계속 순환하는 모습을 보여주고 있다. 이 이유도 수치해석 결과에서는 중심부분이 성층화를 이루어 중심부의 유동이 없어졌지만, 실험에서는 불완전한 상하 단열면으로 인하여, 중심부분의 온도성층화가 완전히 이루어지지 못한 결과라 생각된다.

5. 결론

수직면이 선형온도분포를 갖는 정 4 각 밀폐공간내에서의 온도성층화 과정을, 추적입자를 사용하여 유동장을 가시화 하였고, Ra 수의 변화에 따른 영향을 수치해석적으로 연구 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Ra 수가 낮을수록 열확산의 영향이 커져, 초기상태에 온도성층화 과정은 빨리 진행되지만, 대류에 의한 영향은 적어져 정상상태에서도 온도성층화를 완전히 이루지는 못한다.

2. Ra 수가 높을수록 정상상태에서 중심부분의 온도성층화가 잘 이루어져, 중심부분에는 유동이 존재하지 않고 상하면의 근처에서만 약간 경선순환이 존재하게 된다.

3. Ra 수가 낮을 경우 속도의 진동현상은 심하지 않지만, 높을 경우에는 심한 진동현상이 나타났다.

후 기

이 연구는 문교부 자유공모과제 학술연구 조성비의 지원을 받아 수행중인 '태양열에 의한 냉방 및 난방시스템의 성능 향상' 연구의 일부로 이루어진 것이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Patterson, J. & Imberger, J., Unsteady Natural Convection in a Rectangular Cavity, *J. Fluid Mech.*, Vol.100, part a, pp.65-86, 1980.
2. Yewell, R., Poulikakos, D., & Bejan, A., Transient Natural Convection Experiments in Shallow Enclosures, *J. Heat Transfer*, Vol.104, pp.533-538, 1982.
3. Ivey, G.N., Experiments on Transient Natural Convection in a Cavity, *J. Fluid Mech.*, Vol.144, pp.389-401, 1984.
4. Veronis, G., The Analogy between Rotating and Stratified Fluids, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.2, pp.37-66, 1970.
5. Sakurai, T. & Matsuda, T., A Temperature Adjustment Process in a Boussinesq Fluid via a Buoyancy-Induced Meridional Circulation, *J. Fluid Mech.*, Vol.54, part 3, pp.417-421, 1972.
6. Jischke, M.C. & Doty, R.T., Linearized Buoyant Motion in a Closed Container, *J. Fluid Mech.*, Vol.71, part 4, pp.729-754, 1975.
7. Hyun, J.M., Transient Process of Thermally Stratifying an Initially Homogenous Fluid in an Enclosure, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.27, no.10, pp.1936-1938, 1984.
8. Hyun, J.M., Transient Buoyant Convection of a Contained Fluid Driven by the Changes in the Boundary Temperatures, *J. Appl. Mech.*, Vol.52, pp.193-198, 1985.
9. Pollard, A. & Siu, A.L.W., The Calculation of Some Laminar Flows Using Various Discretization Schemes, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.35, pp.293-313, 1982.
10. 강보선, 비정상 자연대류에 의한 온도성층화의 동특성에 관한 연구, 서울대학교 대학원, 석사학위논문, 1988.