

〈논 문〉

색상 포착 기법과 수치 계산을 이용한 3차원 밀폐 공간 내의 자연 대류 연구

이기백* · 김태영** · 양장식***

(1997년 5월 2일 접수)

The Natural Convection in a Three Dimensional Enclosure Using Color Capturing Technique and Computation

Ki-Baik Lee, Tae-Young Kim and Jang-Sik Yang

Key Words : Color Capturing Technique(색상 포착 기법), Thermochromic Liquid Crystal(액정), Three Dimensional Enclosure(3차원 밀폐 공간), Periodic Convection(주기 대류 유동)

Abstract

The natural convection of a horizontal layer heated from below in a three-dimensional rectangular enclosure was dealt with both numerically and experimentally. The aspect ratios are 1:2:3.5 and Boussinesq fluid is water with the Prandtl number of 5.0. This experimental study showed how to measure the variation of temperature field in a 3-D rectangular enclosure with small aspect ratios by using TLC(Thermochromic Liquid Crystal) and color capturing technique. The experimental temperature field had periodic characteristics of 75 sec at $Ra=2.37 \times 10^5$. But the numerical convection flow had periodic characteristics of 79 sec at the same Rayleigh number. In three dimensional computation it was found that the convection roll structure bifurcated from four rolls to two rolls as the Rayleigh number is increased.

기 호 설 명

<p>A_x : x 방향 (L/H)에서의 형상비</p> <p>A_z : z 방향 (W/H)에서의 형상비</p> <p>H : 밀폐 공간의 높이</p> <p>L : 밀폐 공간의 x 방향의 길이</p> <p>W : 밀폐 공간의 z 방향의 길이</p> <p>T_h : 가열벽 온도 $^{\circ}C$</p> <p>T_c : 냉각벽 온도 $^{\circ}C$</p> <p>ΔT : $T_h - T_c$</p>	<p>N : 롤(roll) 개수</p> <p>Nu : 국부 Nusselt 수</p> <p>\overline{Nu} : 평균 Nusselt 수</p> <p>Pr : Prandtl 수 $= \frac{\nu}{\alpha}$</p> <p>Ra : Rayleigh 수 $= \frac{g\beta\Delta TH^3}{\nu\alpha}$</p> <p>$\vec{U}$: 무차원 속도 벡터</p> <p>u^*, v^*, w^* : x, y, z 방향의 무차원 속도</p> <p>x^*, y^*, z^* : x, y, z 방향의 무차원 좌표</p> <p>f^* : 무차원 주파수 $= fH^2/\alpha$</p> <p>τ_{cat} : 주기 $= H^2/f^*\alpha$</p> <p>α : 열확산율 m^2/s</p>
---	--

*회원, 부산대학교 공과대학 기계공학과 및 기계기술연구소

**부산대학교 대학원 기계공학과

***회원, 부산대학교 기계기술연구소

- β : 체적 팽창 계수 $1/T$
- ν : 동점성 계수 m^2/s
- ρ : 유체 밀도 kg/m^3

1. 서 론

한정된 밀폐 공간 내에서의 부력에 의한 자연 대류 연구 중 수평 공간 내 자연 대류에 관한 연구는 아래에서 가열되고 위에서 냉각되는 두 개의 등온 벽 사이의 수평 유동 경계층을 다룬다. 이러한 밀폐 공간 내의 자연 대류는 가열벽과 냉각벽의 온도차(Ra수), 밀폐 공간의 형상비, 유체 매질의 Pr수 그리고 수직벽의 경계 조건 등의 영향으로 다양한 대류 유동 현상이 일어난다. 예를 들어 Ra수가 임계 Ra수보다 적을 때는 밀폐 공간 내에 어떠한 유동이 생기지 않으며 이때 열전달도 전도(Conduction)에 의한다. 그러나 이 임계 Ra수를 넘으면 유동이 열적으로 불안정해지면서 롤(Roll) 형태의 대류 유동이 일어나는데, Ra수가 더 증가하면 이 대류 유동은 밀폐 공간 내에서 완전히 난류가 되기 까지 일련의 유동 분기 현상이 생긴다.

특히 작은 형상비를 가진 3차원 밀폐 공간에서의 대류 유동은 수직벽의 영향을 무시할 수가 없다. 두가지 특별한 경우, 즉 무한 수평 확장을 가진 공간에서의 유동과 한 방향의 속도 성분이 매우 작은 공간에서의 유동(Hele Shaw Cell Flow)은 수직벽의 영향을 무시할 수 있으나 작은 형상비의 3차원 밀폐 공간에서는 수직벽의 영향을 반드시 고려해 주어야 한다.⁽¹⁾

Farhadieh 등⁽²⁾은 2차원 자연 대류를 홀로그래픽 간섭계로 실험하여 Ra수와 Nu수와의 관계를 규명하였다. Gollub과 Benson⁽³⁾은 작은 형상비에서 낮은 Pr수의 유체가 Ra수의 증가에 따라 2차원 정상 대류 유동(Steady Convection)에서 3차원 난류 대류 유동(Turbulent Convection)으로 가는 전이 과정들이 다양함을 제시하였다. Kessler⁽⁴⁾는 수직벽의 경계 조건이 Bénard convection에 미치는 영향을 규명하고, 3차원 수치 계산의 필요성을 제시하였다. 최근 Mukutmoni와 Yang^(4,5)은 Gollub과 Benson의 실험과 동일한 조건에서 3차원 수치 연구를 통해 진동 대류 유동(Oscillatory Convection)을 연구하였다.

밀폐 공간 내 자연 대류의 온도장은 주로 홀로그래픽 간섭계로 측정하는 것이 주류를 이루어 왔다.

최근 칼라 영상 처리 기술의 발달로 액정을 이용한 색상 포착 기법이 개발되면서 표면 온도장뿐만 아니라 밀폐 공간 내 온도장과 유동장을 실시간에 대하여 측정할 수 있게 되었다.⁽⁶⁻¹⁰⁾ Kimura 등,⁽¹¹⁾ Ozawa 등,⁽¹²⁾ 윤정환 등⁽¹³⁾ 그리고 이상준 등⁽¹⁴⁾은 이러한 기법으로 자연 대류의 온도장 및 유동장을 측정하였으나 2차원 밀폐 공간 내의 자연 대류 연구에 국한되었다.

3차원 밀폐 공간에서의 자연 대류 유동은 2차원 모델로는 만족하게 설명될 수가 없기 때문에 최근 수치적 연구에서는 3차원 자연 대류 연구가 활발해지고 있다.

본 연구에서는 작은 형상비(H/H : W/H : L/H = 1 : 2 : 3.5, Fig. 3참조)를 가진 밀폐된 3차원 수평 공간 내의 자연 대류 유동을 이해하기 위해 실시간에 따른 온도장 측정에 색상 포착 기법을 적용하고, 3차원 수치 계산을 통해 대류 유동 분기 현상을 해석하고자 한다.

2. 실험적 연구 방법

2.1 색상 포착 기법

액정은 온도에 따라 무색, 빨강, 노랑, 초록, 파랑, 무색의 순으로 연속적으로 색상을 나타내는 특성을 갖고 있기 때문에 유동 가시화 및 열전달 실험에 많이 적용되고 있다.

Camci 등⁽⁶⁾과 Dabri 등⁽⁷⁾은 비디오 카메라나 CCD로 촬영한 영상으로 열전달 특성을 해석할 수 있는 색상 포착 기법을 제안하였다. 또한 캡슐화된 액정으로 내부 공간 내의 온도장 및 유동장의 측정이 보다 용이하게 되었다.

Fig. 1은 본 실험에서 이용된 칼라 영상 처리 시

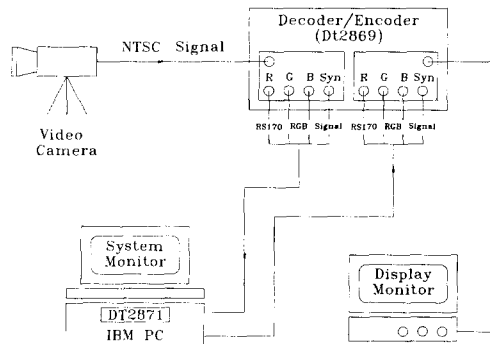


Fig. 1 The color image processing system

스텝(Color image processing system)이다. 비디오 카메라로부터 발생하는 NTSC(National Television System Committee) 신호는 비디오 디코더/엔코더(Data Translation : DT2869)에 의해 R, G, B의 영상 데이터로 분리되어 프레임 그래버(Data Translation : DT2871) 내의 3개의 A/D 변환기(8비트)를 거쳐 RGB/HSI 변환기에 전달되어지고 RGB/HSI 변환기에서 변환된 색상, 채도, 명도값이 512×512×8 비트의 비디오 메모리를 갖는 프레임 버퍼(frame buffer)에 저장된다. 또한 HSI/RGB 변환기를 거쳐 변환된 R, G, B 신호는 3개의 D/A 변환기(8비트)를 거쳐 비디오 디코더/엔코더를 통해 비디오 카메라로 촬영된 칼라 영상이 디스플레이 모니터에 나타난다.

2.2 실험 장치

시험 체적은 상, 하부면을 두께, 가로, 세로의 크기가 5×50×100 mm인 동판으로 하고, 좌우면과 관찰 정면은 투명도가 높은 15 mm 두께의 아크릴로 제작하여 각 면을 에폭시로 틈새가 없도록 잘 부착하였다. 상, 하부면을 이루는 동판에 직경 0.2 mm인 엔드밀로 깊이 3 mm, 길이 25 mm의 홈을 10 mm 간격으로 7개를 내어 각 홈에 열전대(Thermocouple, T-type)를 내부면에서 2 mm가 되는 위치에 심었으며, 홈의 비어 있는 공간에 열액 모시(Thermoally Inc. : Thermalbond-4964)로 열이 잘 전달되도록 채웠다. 시험 유체와 접하는 상, 하부면을 이루는 동판들은 표면 복사에 의한 열전달을 피하기 위해 사포로 잘 닦았다.

가열판을 만들기 위해 두께, 가로, 세로의 크기가 3×50×100 mm인 동판에 전열선이 내장되어 있는 35×35 mm의 세라믹 히터(50Ω, 100 W) 2개를 열에폭시로 부착하였다. 직류 전원 장치(DC power supply)에서 전류와 전압을 조절하므로써 동판을 가열하였다. 냉각부를 만들기 위해 3×50×100 mm의 동판을 냉각판으로 하고, 나머지 다섯면은 15 mm 아크릴로 높이, 가로, 세로의 크기가 40×40×70 mm인 블록을 만들었다. 이 냉각부 내로 항온조(Neslab)에서 조절한 일정한 온도의 증류수를 순환시켰다. 가열판의 온도 변화율은 30분 동안에 0.03°C/min이고 냉각판의 온도 변화율은 0.02°C/min였다.

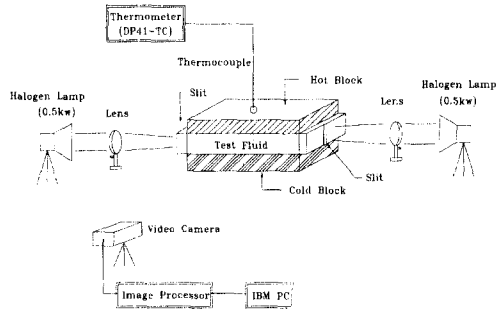


Fig. 2 Schematic diagram of calibration

2.3 실험 방법

밀폐 공간 내의 자연 대류 온도장을 측정하기 전에 액정을 보정하는 실험을 수행하였다. 온도에 따라 변하는 액정의 색상값을 비디오 카메라로 촬영하기 위해 Fig. 2와 같이 장치를 구성하였다.

액정 보정 실험시 색상에 해당하는 밀폐 공간의 내부 온도를 측정하기 위한 열전대를 수직 방향으로 이송시킬 수 있도록 동판인 가열판과 시험 체적 상부면의 중앙에 0.7 mm의 구멍을 뚫었다. 가열판과 시험 체적 상부면 사이에는 접촉 저항을 줄이기 위해 Thermalcote(Thermally Inc.)로 접촉하였고, 냉각판과 시험 체적 하부면 사이에도 Thermalcote로 접촉하였다. 이렇게 만든 시험 체적 내에 증류수와 액정(Hallcrest : R35C5W)을 질량비 0.47 %로 혼합하여 주입하였다. 이와 같이 제작된 액정 보정용 시험 체적을 이용하여 다음과 같은 조건하에서 온도 변화에 따른 액정의 색상 변화를 보정하였다. 시험 체적에서 수직 방향으로 1 m에 비디오 카메라를 설치하였고, 비디오 카메라와 90°각도의 시험 체적 좌우에는 복사에 의한 영향을 최소화하기 위해 1m 위치에 조명(0.5kW Halogen Lamp)을 각각 설치하였다. 조명에서 나온 광원은 볼록 렌즈를 통해 평행광이 된 후 슬릿(Slit)을 통과하여 밀폐 공간 내부로 보내지게 된다. 슬릿은 슬릿폭을 3 mm로 한 15×30×50 mm의 아크릴로 검은 페인트로 칠하여 슬릿광 외에 불필요한 광원은 차단하였다. 약 1시간 후 시험 체적 내에 수직 방향으로 일정한 온도 구배가 생긴다. 이 때 열전대를 상부에서부터 아래로 이송시키면서 가열된 액정의 색상 변화를 비디오 카메라로 촬영하였고 촬영된 영상 데이터는 Fig. 1의 칼라 영상 처리 장치로 처리하였다. 액정 보정에 이용된 온도 지시계(Omega : DT41-TC)의 분해능은 0.01°C 이

고 정확도는 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이다.

액정 보정 실험을 수행한 후 본 자연 대류 실험을 수행하였다. 액정은 광원의 입사각과 거리 그리고 촬영 거리에 따라 색상이 다르게 나타나므로 액정 보정 실험과 동일한 조건에서 실험을 실시해야만 한다. 액정 보정 실험과는 반대로 상부를 저온면으로 하부를 고온면으로 바꾸었다. 충분한 시간이 지난 후 시험 체적 내에 대류 유동이 형성되면서 색상이 변한다. 이 때 자연 대류에 의한 액정의 색상 변화를 비디오 카메라로 촬영하고, 촬영된 비디오 영상을 칼라 영상 처리 장치를 이용해 액정의 세가지 정보인 색상(Hue), 채도(Saturation), 명도(Intensity) 중 색상(Hue)의 정보를 획득하였다.

액정 보정 실험에서 구한 색상(Hue)과 온도의 관계식으로 자연 대류 실험에서 획득한 색상 정보를 실제 온도로 변환하였다. 이 모든 실험은 광원 이외의 모든 광을 차단한 암실에서 수행하였다.

3. 수치적 연구 방법

Fig. 3은 수치 해석을 위한 3차원 밀폐 공간의 계산 모델을 나타낸 것이다. 좌우 벽면은 단열로 가정하고, 아랫면과 윗면은 등온적으로 각각 가열벽과 냉각벽이다. 형상비는 실험적 연구에서 사용한 형상비와 동일하게 높이, 세로, 가로의 비가 1 : 2 : 3.5가 되도록 하였다. 유체를 비압축성으로 가정하였고, 유동은 온도 변화에 따른 밀도 변화로 생성되는 부력항에 Boussinesq 근사 조건을 적용하였다. Pr수가 5.0이고, Ra수는 1.0×10^4 에서 2.37×10^5 의 범위로 증가 단위는 10000으로 수치 계산을 하였다.

3.1 지배 방정식

지배 방정식을 무차원화하기 위하여 다음과 같은 무차원 변수들을 도입하였다.

$$\begin{aligned} t^* &= ta/H^2, \quad x^* = x/H, \quad y^* = y/H, \quad z^* = z/H \\ u^* &= uH/\alpha, \quad v^* = vH/\alpha, \quad w^* = wH/\alpha \\ p^* &= \frac{\rho H^2}{\alpha^2}, \quad \theta^* = \frac{T - T_m}{T_h - T_c}, \quad T_m = (T_h + T_c)/2 \\ Ra &= \frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu}, \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha} \end{aligned}$$

여기서 u, v, w 는 각각 속도이며 T 는 온도, p 는 압력, g 는 중력 가속도, ν 와 α 는 각각 유체의 동

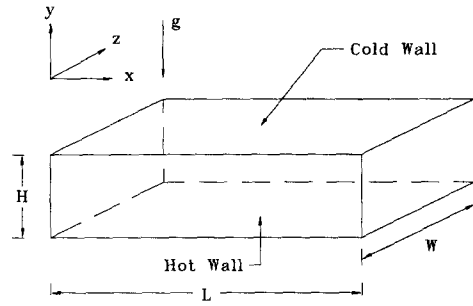


Fig. 3 Geometry of enclosure

점성 계수 및 열확산율이다.

이 무차원 변수들을 이용하여 구한 무차원 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u^*}{\partial t^*} + \nabla \cdot (u^* \vec{U}) = -\frac{\partial p^*}{\partial x^*} + Pr \nabla^2 v^* \quad (2)$$

$$\frac{\partial v^*}{\partial t^*} + \nabla \cdot (v^* \vec{U}) = -\frac{\partial p^*}{\partial y^*} + Pr \nabla^2 v^* + Ra Pr \theta^* \quad (3)$$

$$\frac{\partial w^*}{\partial t^*} + \nabla \cdot (w^* \vec{U}) = \frac{\partial p^*}{\partial z^*} + Pr \nabla^2 w^* \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial t^*} + \nabla \cdot (\theta^* \vec{U}) = \nabla^2 \theta^* \quad (5)$$

다음은 경계 조건을 무차원화한 것이다.

$$x^* = 0, A_x : 0 \leq z^* \leq A_z, 0 \leq y^* \leq 1,$$

$$u^* = v^* = w^* = 0, \frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} = 0$$

$$z^* = 0, A_z : 0 \leq x^* \leq A_x, 0 \leq y^* \leq 1, u^* = v^* = w^* = 0, \frac{\partial \theta^*}{\partial z^*} = 0$$

$$y^* = 0 : 0 \leq x^* \leq A_x, 0 \leq z^* \leq A_z, u^* = v^* = w^* = 0, \theta^* = 1$$

$$y^* = 1 : 0 \leq x^* \leq A_x, 0 \leq z^* \leq A_z, u^* = v^* = w^* = 0, \theta^* = 0$$

여기서 $A_x = L/H$, $A_z = W/H$ 이다.

3.2 격자 생성과 수렴 조건

지배 방정식은 유한체적법(Finite Volume Method)⁽¹⁵⁾을 기초로 한 $20 \times 20 \times 20$ 의 균일하고 3차원적으로 엇갈린 격자(Staggered grid)를 만들어 계산하였다. 대류항은 Power law scheme을 사용하였고, 압력항은 SIMPLE 알고리즘으로 계산하였다. 또한 이산화된 방정식은 선순법(Line by Line Method)으로 반복 계산하였고, 반복 계산 과정에서 안정된 해의 수렴을 얻기 위해서 하향 완화 계수(Under-relaxation Factor)를 사용하였으며 수

도와 입력에 있어서는 0.6, 온도에 대해서 0.8로 정하였다.

수렴 조건은 각 변수들에 대해 전체 제어 체적에서 잔차(residual)들의 합의 절대값이 다음과 같을 때 수렴한 것으로 간주하였다.

$$\sum |R^k| < 10^{-3} \quad (6)$$

정상 상태의 해를 구할 때는 내부 반복 계산 과정에서 반복 계산수를 10번으로 제한하였는데 이는 최적의 계산 시간을 제공하였다. 그리고 정상 상태의 좀 더 정확한 판정으로 가열벽과 냉각벽의 평균 Nu수의 차가 0.1 %이내에 드는 것으로 하였다. 이론적으로 벽이 단열이기 때문에 가열벽과 냉각벽의 평균 Nu수는 같아야 한다.

평균 Nu수는 다음과 같이 구하였다.

$$\overline{Nu} = \frac{1}{A} \iint Nu \cdot dx^* dz^* \quad (7)$$

여기서 국소 Nu수는 다음과 같다.

$$Nu = \left. \frac{\partial \theta^*}{\partial y^*} \right|_{y^*=0} \quad (8)$$

A는 가열벽의 단면적을 나타낸다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 액정 보정 결과

Fig. 4는 세번에 걸쳐 각각 다른 시간대에 수행한 액정 보정 실험의 결과로 그림에서 알 수 있듯이 세가지 경우 모두 온도와 액정의 색상 변화가 거의 동일한 분포를 나타내고 있다. 액정의 색상 변화에 따른 온도의 보정곡선식은 다음과 같이 구해졌다.

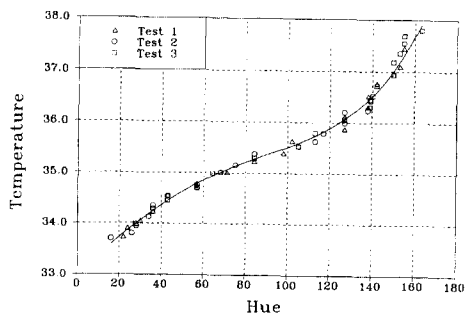


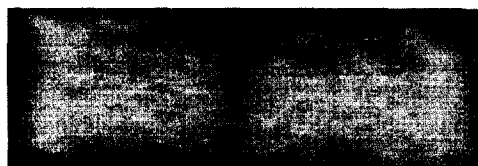
Fig. 4 Local hue versus temperature relation and the repeatability of the hue-capturing process

$$T = 33.0037 + 3.68064e-2 * Hue + 2.21016e-5 * Hue^2$$

$$- 2.9799e-6 * Hue^3 + 1.58936e-8 * Hue^4 \quad (9)$$

4.2 밀폐 공간 내 온도장 변화

높이, 세로, 가로가 20×40×70 mm로 형상비가 1:2:3.5인 사각형 밀폐 공간 내의 자연 대류에



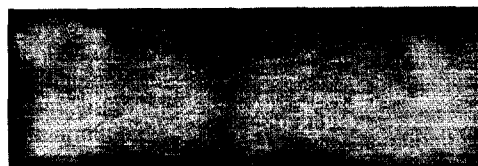
(a) t=0 sec



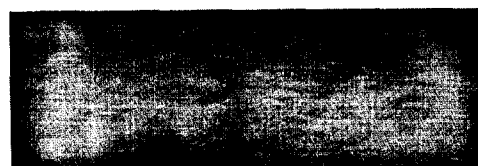
(b) t=15 sec



(c) t=25 sec



(d) t=45 sec



(e) t=60 sec

Fig. 5 The temperature distribution of rectangular enclosure at x-y plane (z/H=1.0)

의한 온도장 변화를 액정을 이용한 색상 포착 기법으로 실시간에 따라 관찰하였다. 이 때 Ra 수는 2.37×10^5 이고 Pr 수는 5.0이다.

Fig. 5는 $z/H=1.0$ 위치에서 시간에 따라 관측한 온도장 가시화 사진들이다.

아래 가열벽에서 가열된 유체가 부력에 의해 중앙에서 상승하기 시작하여 위 냉각벽에 이르러 냉각되면서 좌우 수직벽 방향으로 이동하고 벽 부근에서 하강하였다. 이 하강한 유체는 아래의 가열벽에서 가열되어 다시 상승하여 전체적으로 짧은 면에 나란하고 방향이 반대인 두 개의 대류 롤 유동을 하였다. 그리고 좌우 수직벽 근처에는 2차 와동(Second Vortices)이 형성되었는데 이것은 위 냉각벽에서 냉각된 유체가 벽 부근에서 하강하다가 수직 벽의 진도로 가열되어 다시 상승하는 2차 와동이 생성된 것이다. 수직벽에서의 2차 와동의 발생은 수직벽을 따라 형성된 열적 불안정성이 원인으로 알려져 있다.⁽³⁾

이런 대칭 구조의 대류 유동이 계속 유지되는 것이 아니라 시간이 지나면서 깨어져 좌우로 움직이는 시간에 의존적인 대류 유동이 나타났다. Fig. 5에서 보면, 아랫벽과 중앙에서 높은 온도 색상이 나타나고, 위벽과 좌우 수직벽쪽으로 낮은 온도 색상이 나타나고 있다. 그리고 좌우 벽 구석에서 높은 온도 색상이 관찰되는데 이것은 수직 벽의 2차 와동으로 인한 것이다. 이러한 대류 유동은 시간 변화에 따라 2차 와동의 발달에 따른 주기적인 온도 변화 특성이 나타났다.

Fig. 6은 색상 보정 실험에서 구한 색상 보정곡선식을 이용하여 측정한 온도값 중 z/H 가 1.0이고 y/H 가 0.701인 위치에서의 온도를 X 축 방향에 따른 온도 분포를 나타낸 것이다. 초기에는 가열된 유체의 부력으로 중앙에서 높은 온도 범위가 나타나고, 좌우로는 냉각된 유체의 하강으로 낮은 온도 범위가 2개 나타났다. 좌우 수직벽 가까이에서 높은 온도가 나타나는 것은 2차 와동의 발달로 인한 것이다. 15초째에는 오른쪽 벽에서 2차 와동이 상대적으로 작아지면서 높은 온도 범위가 소멸하여 오른쪽 벽은 전반적으로 낮은 온도가 나타났다. 왼쪽의 2차 와동은 여전히 발달된 상태로 높은 온도를 유지하였다. 25초째에는 작아졌던 오른쪽 벽의 2차 와동이 다시 발달하였고, 45초째에는 15초의 경우와는 달리 반대쪽인 왼쪽 벽의 2차 와동이 작아지면서 낮은 온도 범위가 사라졌다. 60초에 이르

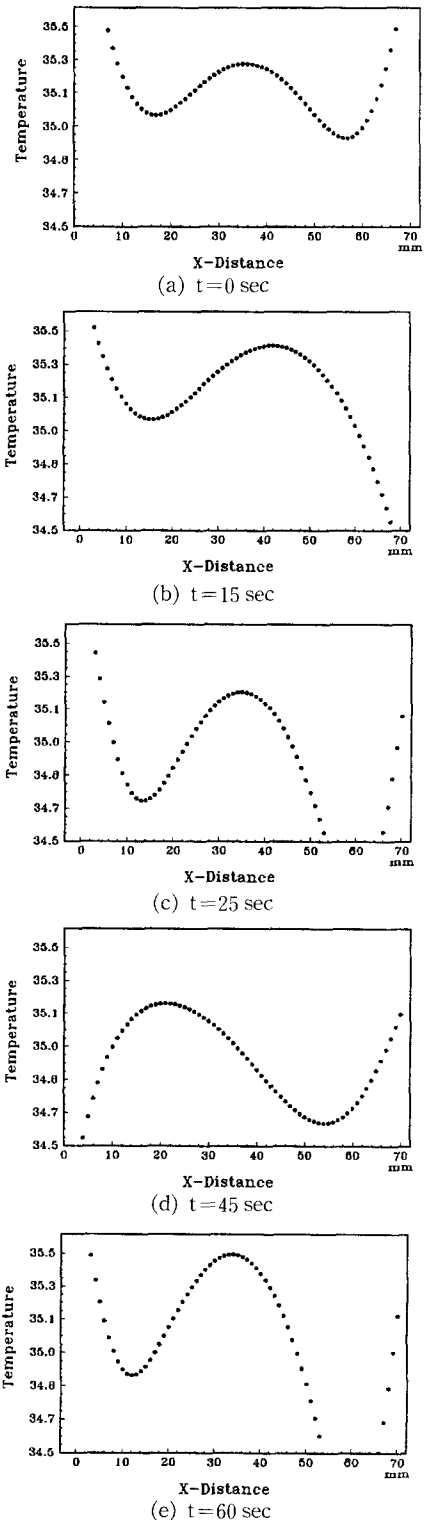


Fig. 6 Variation of temperature profile ($y/H=0.701$)

면 작아졌던 왼쪽 벽의 2차 와동이 다시 발달하여 내부에 2개의 낮은 온도 범위가 나타났다. 이와 같은 대류 유동이 75초를 주기로 주기적인 유동을 하였다.

Gollub과 Benson⁽³⁾에 의하면 작은 형상비를 가진 밀폐 공간 내 대류 유동은 Ra수의 증가에 따라 정상 대류 유동(Stationary Convection)에서 주기 대류 유동(Periodic Convection), 준주기 대류 유동(Quasi Periodic Convection) 그리고 난류 대류 유동으로 천이하는 과정이 형상비와 Pr수에 따라 다양하다고 하였다. 본 실험에서는 Ra수가 2.37×10^5 에서 주기 대류 유동이 관찰되었다.

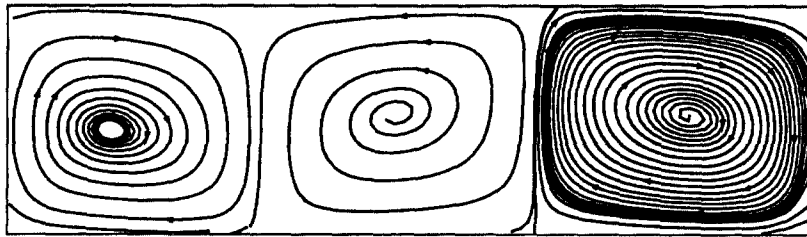
5. 수치 결과 및 고찰

5.1 프로그램 유효성 검증

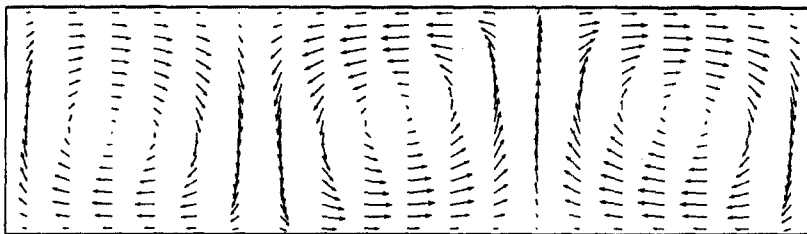
본 수치 프로그램이 타당성을 가지는지 검증할 필요가 있다. 프로그램의 검증은 위해 두 가지 방법을 사용하였다. 첫 번째 방법으로 공기에 대한 대류 유동 가시화 실험을 수행하여 가시화 결과와 본 수치 프로그램에 의한 수치 결과를 비교하였다. 이 때 형상비는 1 : 2 : 3.5이고 Pr수는 0.71, Ra수는 1.0×10^4 이다. Fig. 7은 공기에 대한 레이저 유동 가시화 실험 결과와 수치 계산 결과를 비교한 것이다. 3개의 대류 볼 유동을 가진 유동 가시화 실험 결과와 동일한 조건에서의 수치 결과가 정성



(a) Laser light sheet visulation



(b) Numerical streamlines

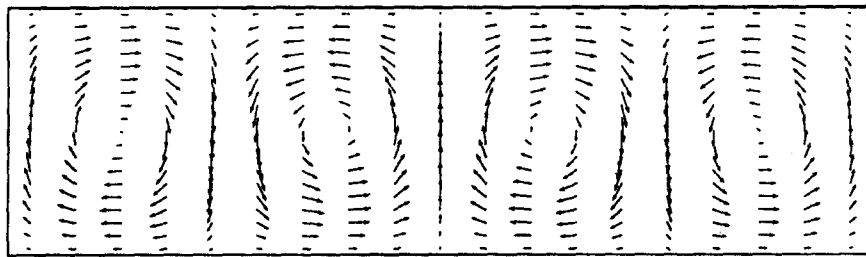


(d) Numerical velocity vectors

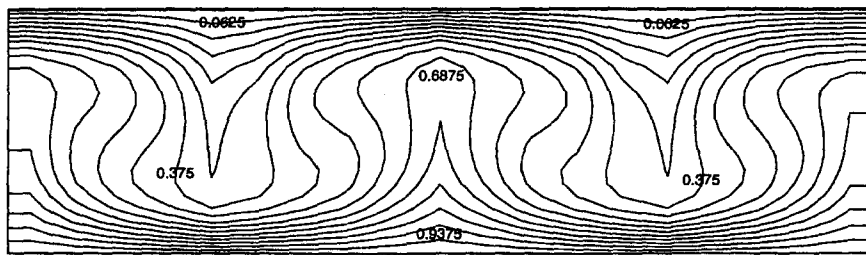
Fig. 7 Comparison with laser light sheet visulation and numerical simulation at x-y plane, $z/H = 1.0$ ($Ra = 1.0 \times 10^4$, $Pr = 0.71$, Air)

Table 1 Comparison between numerical Nusselt numbers of Mukutmoni and Yang⁽⁶⁾ and numerical Nusselt numbers of Present work ($A_x=3.5$, $A_z=2.1$, $Ra=2.0 \times 10^4$, $Pr=2.5$)

Grid size	Mukutmoni and Yang ⁽⁶⁾			Present Work	Percentage difference
	$20 \times 20 \times 20$	$40 \times 40 \times 40$	$80 \times 80 \times 80$		
\bar{Nu}	2.646	2.586	2.571	2.721	2.83
U_{max}	42.75	42.97	43.01	45.29	5.94
V_{max}	46.67	51.05	51.95	53.36	14.33
W_{max}	7.81	8.13	8.18	7.35	5.89



(a) Velocity vectors



(b) Isotherms

Fig. 8 $Ra=1.0 \times 10^4$ and $Pr=5.0$ at x-y plane ($z/H=1.0$)

적으로 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

두 번째 방법으로 Mukutmoni와 Yang⁽⁶⁾의 수치 결과와 비교하였다. 그들은 Gollub과 Benson⁽³⁾의 실험과 동일한 형상비에서 수치 계산을 하였는데 본 수치 연구에서도 프로그램의 검증에 위해 이들과 동일한 형상비 1:2.1:3.5에서 평균 Nu수를 구하였다.

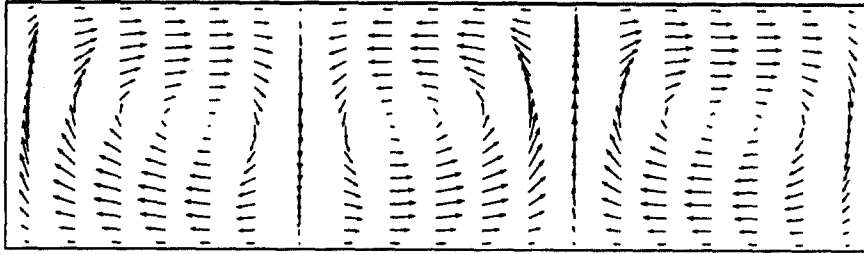
Table 1은 Ra 수가 2.0×10^4 이고 Pr 수가 2.5로 방향이 반대이고 서로 대칭인 두 개의 롤을 갖는 대류 유동이 정상 유동 상태에 도달했을 때 Mukutmoni와 Yang의 수치 결과와 본 연구의 수치 결과를 비교한 것이다. 그들이 최적의 격자수라

고 판단한 격자 크기인 $20 \times 20 \times 20$ 에서의 평균 Nu수와 본 수치 계산의 평균 Nu수와 비교한 결과 오차는 2.83%였다. 최고 속도값의 오차는 최대 14.33%내였다.

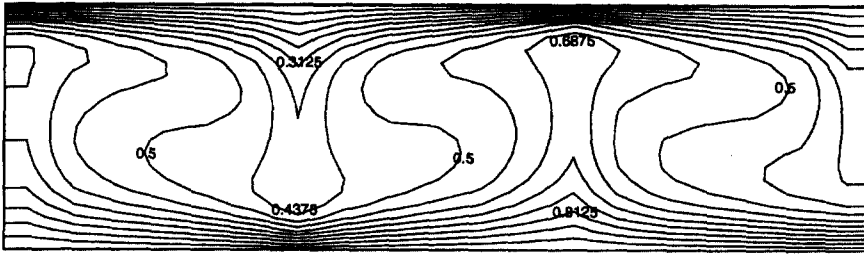
Mukutmoni와 Yang⁽⁶⁾은 가열벽과 냉각벽의 평균 Nu수의 차가 0.5%이내이면 정상 상태에 도달한 것으로 간주한 반면 본 수치 계산에서는 가열벽과 냉각벽에서의 평균 Nu수의 차가 0.1%이내에 들었을 때 정상 상태에 도달한 것으로 간주하였다.

5.2 대류 롤 유동 손실 현상

Fig. 8, Fig. 9 그리고 Fig. 10은 $z/H=1.0$ 에서

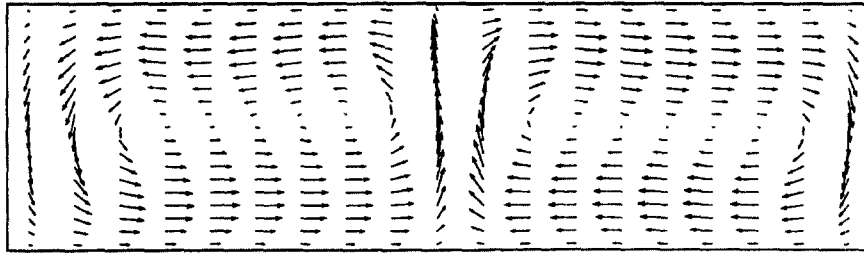


(a) Velocity vectors

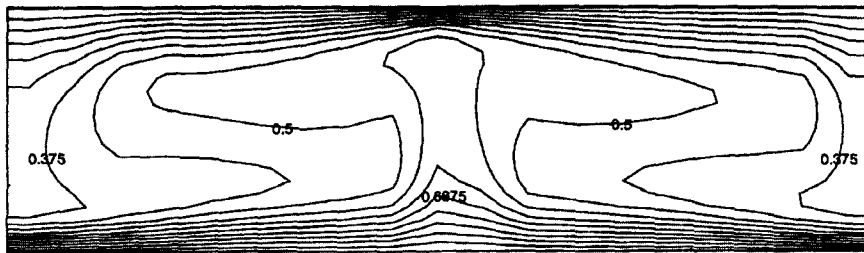


(b) Isotherms

Fig. 9 $Ra=4.0 \times 10^4$ and $Pr=5.0$ at x-y plane ($z/H=1.0$)



(a) Velocity vectors



(b) Isotherms

Fig. 10 $Ra=7.0 \times 10^4$ and $Pr=5.0$ at x-y plane ($z/H=1.0$)

Pr가 5.0이고 Ra수가 각각 1.0×10^4 , 4.0×10^4 , 7.0×10^4 일 때 밀폐 공간 내 자연 대류 유동의 속

도 벡터와 온도장을 나타낸 것이다.

Fig. 8을 보면, Ra수가 1.0×10^4 인 경우로 4개의

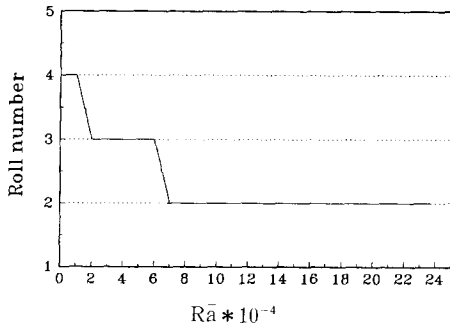


Fig. 11 Variation of the number of rolls

대류 롤 유동을 가지고 서로 방향이 반대이고 대칭적인 유동을 하고 있다. 이러한 4개의 롤 유동은 Ra 수가 2.0×10^4 에서 한 개의 롤이 손실되어 3개의 롤 유동으로 변화했다. Fig. 9는 Ra 수가 4.0×10^4 일 때 3개의 대류 롤 유동의 속도 벡터와 온도장을 나타낸 것이다. 유동 방향이 서로 반대인 3개의 롤 유동은 Ra 수가 2.0×10^4 에서 6.0×10^4 까지 유지되다가 Ra 수가 7.0×10^4 에서 다시 한 개의 롤 손실을 가져와 2개의 대류 롤 유동으로 변화했다. Fig. 10은 Ra 수가 7.0×10^4 일 때로 중앙을 기준으로 서로 반대 방향이고 대칭적인 2개의 대류 롤 유동을 볼 수 있다. 이러한 2개의 롤 유동은 수치 계산 범위인 2.37×10^6 까지 유지되었다.

Fig. 11은 Ra 수에 따른 대류 롤 수의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 11을 보면, Ra 수의 증가에 따라 대류 롤 수가 4개에서 3개 그리고 2개로 손실되고 있다. 이러한 Ra 수의 증가에 따른 대류 롤의 손실 현상은 많은 연구자들이 연구하여 관찰하여 왔다.

Kircharitz 등⁽¹⁶⁾은 형상비가 1:2:4에서 실험 유체를 공기와 물로 사용하여 이러한 롤 손실 현상을 관찰하였다. 물에 대한 자연 대류 실험에서 Ra 수가 증가할수록 롤의 수가 4개에서 3개, 2개로 손실되었다. Oertel⁽¹⁷⁾도 형상비 1:4:10으로 실험 유체 N_2 에 대해서 Ra 수가 증가함에 따라 롤이 9개에서 8개, 7개로 줄어드는 것을 관찰하였다.

Yang⁽¹⁸⁾에 의하면 Ra 수의 증가에 따른 대류 롤의 손실 현상은 아직 명확히 밝혀지지 않았지만 여러 가지 복합적인 원인들이 있을 것이라고만 가정하였다. 그 원인들 중 유동의 불안정성 문제, 밀폐된 벽면 문제, 대류 롤과 공간 형상 사이의 불일치, 수직벽의 영향 등이 대류 롤 손실의 원인인 것으로 가정하였다.

본 수치 결과와는 형상비가 다르고 Pr 수가 다르

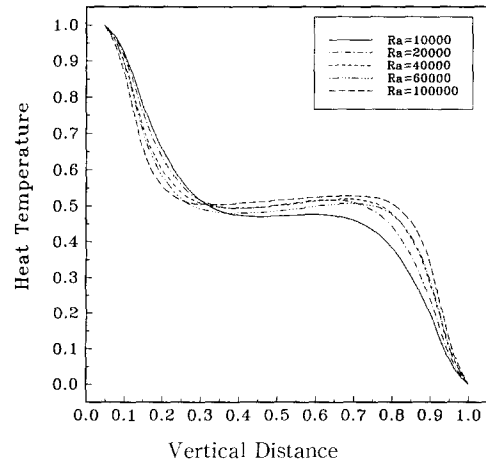


Fig. 12 Horizontally averaged temperature profile

지만 3차원 밀폐 공간 내에서 Ra 수 증가에 따른 대류 롤 유동의 손실 현상이 유사하게 나타났다.

5.3 열 경계층 및 평균 Nu 수

Fig. 12는 수평적으로 평균한 수직 온도 분포를 Ra 수의 증가에 따라 나타낸 것이다. 경계층 근처에서 기울기가 음(negative)의 값을 가지는데 이것은 가열벽과 냉각벽의 경계층 근처에서는 전도가 지배적이라는 것을 의미한다. 그리고 Ra 수가 증가할수록 경계층 근처의 기울기는 좀 더 큰 음의 값이 되는데 이것은 Ra 수가 증가할수록 열 경계층 두께는 작아지고, 경계층 근처에서 전도의 영향은 줄어드는 반면 대류에 의한 열전달이 커지고 있음을 나타낸다. 밀폐 공간 내부는 대류가 지배적인데 Ra 수가 2.0×10^4 이상부터는 내부의 기울기가 양(positive)의 값이 된다. 무차원 수직 높이가 높을수록 낮은 온도가 되어야 함에도 불구하고 높은 온도가 되어 양의 기울기를 갖는 것은 내부 영역에서 온도 역전 현상이 일어나고 있음을 알 수 있다. Ra 수가 증가할수록 내부의 기울기가 좀 더 큰 양의 값을 갖는 것은 대류가 강할수록 온도 역전 현상이 두드러진다는 것을 의미한다.

Fig. 13은 Ra 수의 증가에 따른 가열벽에서의 평균 Nu 수 분포를 나타낸 것이다. Ra 수가 증가할수록 평균 Nu 수가 증가하는 경향을 보였다. 이것은 가열벽과 냉각벽 사이의 온도차가 클수록 대류 속도도 또한 커져 전도보다는 대류에 의한 열전달이 더 지배적이기 때문인 것으로 사료된다.

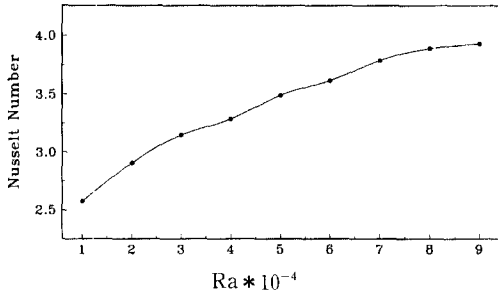
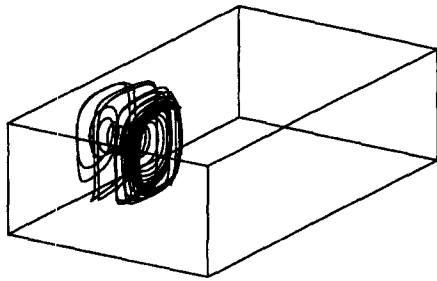
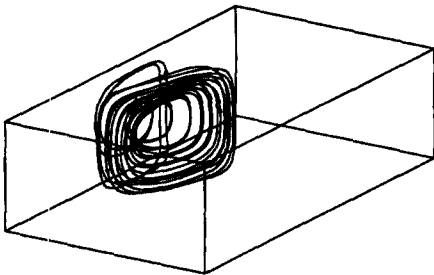


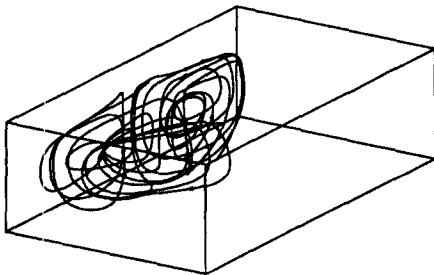
Fig. 13 The averaged nusselt number as a function of the Rayleigh number at the hot wall



(a) $Ra=1.0 \times 10^4$



(b) $Ra=4.0 \times 10^4$



(c) $Ra=7.0 \times 10^4$

Fig. 14 Streamlines of convection flow

5.4 3차원 대류 유동

작은 형상비를 가진 밀폐된 공간에서 Ra수가 어느 한계값을 넘으면 대류 유동 및 온도장이 정적 상태 (Stationary State)에서 3차원 주기적인 대류 유동을 한다고 알려져 있다.⁽³⁻⁵⁾ 이 3차원 유동은 밀폐 공간의 형상에 크게 영향을 받는데 두 가지 특별한 경우에는 무시할 수 있다. 무한 수평 확장을 가진 공간에서의 대류 유동과 한 방향의 속도 성분이 매우 작은 공간에서의 대류 유동 (Hele Shaw cell flow)이 그 경우이다. 그러나 작은 형상비를 가진 3차원 형상에서는 반드시 수직벽을 고려해 주어야 한다. Fig. 14는 $Pr=5.0$ 이고 Ra수가 1.0×10^4 , 4.0×10^4 , 7.0×10^4 인 경우 각각 3차원 공간에서의 유선을 나타낸 것이다. 공간적으로 강한 나선형 유동을 하고 있음을 알 수 있는데 이것은 2차원 수치 계산에서는 확인할 수 없는 결과이다. $Ra=1.0 \times 10^4$ 인 경우 짧은 축에 나란한 방향으로 벽 근처에서 집중하는 나선 구조를 이루고 있는 반면, $Ra=4.0 \times 10^4$ 인 경우에는 유선이 짧은 축에 대해 공간적으로 더 이상 나란한 방향이 아니다. 그리고 $Ra=7.0 \times 10^4$ 일 때는 유선이 공간적으로 좀 더 복잡한 나선 구조를 이룬다. 이것으로 Ra수가 증가함에 따라 밀폐 공간 내 대류 유동이 2차원 유동에서 3차원 유동으로 천이함을 알 수 있는데 Muktumoni와 Yang⁽⁴⁾의 수치 결과와도 유사하였다.

5.5 밀폐 공간 내 대류 유동의 주기성

Fig. 15(a), (b)는 실험과 동일한 $Pr=5.0$, $Ra=2.37 \times 10^5$ 에서 수치 계산하여 무차원 시간에 대한 국부 속도와 무차원 주파수에 대한 파워스펙트럼 (power spectra)의 크기를 나타낸 것이다. 국부 속도는 격자 위치가 (6, 6, 6)에서의 무차원 u 속도를 나타낸 것이고, 이 u 속도에 대한 파워스펙트럼은 FFT (Fast Fourier Transform)로 계산되었다. Fig. 15(b)에서 보면, 주 주파수 (Main Frequency)인 f^* 가 나타나기 전에 부차적인 조화 주파수 (Subharmonic Frequency)인 $f^*/2$ 가 나타나는 주기 대류 유동 현상이 나타났다. Gollub과 Benson⁽⁹⁾은 $Pr=2.5$ 인 경우 $Ra=2.9 \times 10^4$ 에서 주기 유동이 시작하여 $Ra=3.67 \times 10^4$ 에서 부차적인 조화 주파수가 나타나다가 $Ra=4.53 \times 10^4$ 에서 다시 부차적인 조화 주파수가 나타남을 관찰하였다. 또한 Kessler⁽¹⁾에 의하면, $Pr=0.71$ 인 경우 3차원 수치 계산한

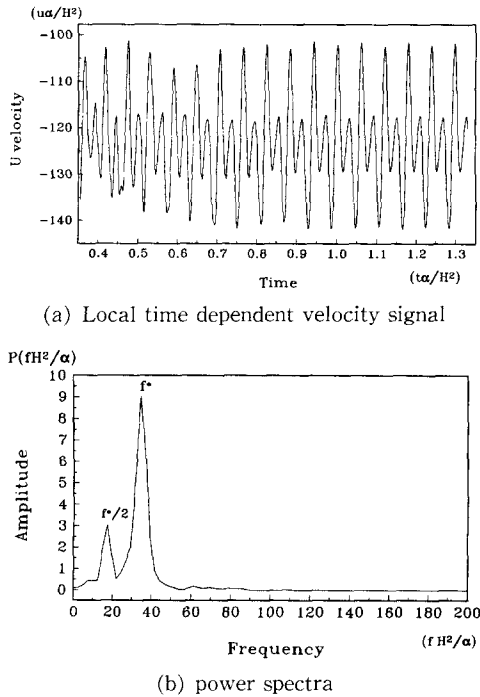


Fig. 15 Local time dependent velocity signal and power spectra ($Pr=5.0$, $Ra=2.37 \times 10^5$)

결과 $Ra=3.9 \times 10^4$ 에서 부차적인 조화 주파수가 나타났다. 주기 대류 유동의 부차적인 조화 주파수가 나타나는 Ra 수가 각각 다른 것은 밀폐 공간의 형상비와 유체의 Pr 수의 영향 때문인 것으로 알려져 있다.⁽³⁾

본 연구의 수치 계산에서는 $Ra=2.37 \times 10^5$ 에서 3차원 밀폐 공간 내 주기 대류 유동의 주기 ($H^2/f^* \alpha$)가 $\tau_{cal}=79$ sec였다. 그러나 동일한 $Ra=2.37 \times 10^5$ 에서 색상 포착 기법을 이용한 실험 결과에서의 주기는 $\tau_{exp}=75$ sec였다.

6. 결 론

색상 포착 기법을 이용한 비접촉 온도장 측정 방법을 작은 형상비 (1 : 2 : 3.5)를 가진 3차원 밀폐 공간 내의 자연 대류 유동에 적용하였다. Pr 수가 5.0이고 Ra 수가 2.37×10^5 에서 밀폐 공간 내 대류 유동은 중앙을 기준으로 좌우 대칭적이고 방향이 반대인 대류 롤 유동을 하였고 좌우 수직벽 근처에서 2차 와동이 형성되었다. 실시간에 따른 온도장 변화를 측정된 결과 약 75초를 주기로 하는 주기적

인 온도 특성이 나타났다.

실험과 동일한 형상비를 갖고, Pr 가 5.0이고, Ra 수가 각각 1.0×10^4 , 4.0×10^4 , 7.0×10^4 일 때의 3차원 밀폐 공간 내 자연 대류를 수치적으로 시뮬레이션한 결과 Ra 수의 증가에 따라 대류 롤 유동이 처음 4개에서 3개 그리고 2개로 손실되는 현상이 나타났다. 이러한 대류 롤 유동은 공간적으로 강한 나선 구조를 형성하였는데 Ra 수가 증가할수록 복잡한 3차원 대류 유동으로 발달하였다. 또한 Ra 수가 증가함에 따라 즉 가열벽과 냉각벽의 온도차가 클수록 가열벽에서의 평균 Nu 수가 증가하는 경향을 보였다.

실험과 동일한 $Pr=5.0$, $Ra=2.37 \times 10^5$ 에서 계산한 결과 약 79초의 주기적인 대류 유동 특성이 나타났다.

후 기

“이 논문은 1996년도 부산대학교 학술연구조성비를 지원받아 수행된 연구임”

참고문헌

- (1) Kessler, R., 1987, “Nonlinear transition in three-dimensional convection,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 174, pp. 357~379.
- (2) Farhadieh, R. and Tankin, R. S., 1974, “Interferometric study of two-dimensional Bénard convection cells,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 66, part4, pp. 739~752.
- (3) Gollub, J. P. and Benson, S. V., 1980, “Many Routes to Turbulent Convection,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 100, part3, pp. 449~470.
- (4) Mukutmoni, D. and Yang, K. T., 1991, “Flow Transition in a Three-Dimensional Rectangular Enclosure Heated From Below,” *ASME/JAME Thermal Engineering Proceedings.*, Vol. 1, pp. 77~82.
- (5) Mukutmoni, D. and Yang, K. T., 1993, “Rayleigh-Bénard Convection in a Small Aspect Ratio Enclosure : Part I - Bifurcation to Oscillatory Convection,” *Transactions of the ASME.*, Vol. 115, pp. 360~366.
- (6) Camci, C., Kim, K., Hippensteele, S. A and

- Poinsatte, P. E., 1993, "Evaluation of a Hue Capturing Based Transient Liquid Crystal Method for High-Resolution Mapping of Convective Heat Transfer on Curved Surfaces," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 311~318.
- (7) Dabiri, D. and Gharib, M., 1991, "Digital Particle Image Thermometry : The Method and Implementation," *Experiments in Fluids*, Vol. 11, pp. 77~86.
- (8) Simonich, J. C. and Moffat, R. J., 1984, "Liquid Crystal Visualization of Surface Heat Transfer on a Concavely Curved Turbulent Boundary Layer," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 106, pp. 619~627.
- (9) Kim, K., 1991, "A New Hue-Capturing Technique for the Quantitative Interpretation of Liquid Crystal Image Used in Convective Heat Transfer Studies," Ph. D. Dissertation, Pennsylvania State University.
- (10) 양장식, 나종문, 이기백, 1995, "선형 터빈케스케이드 끝벽의 열전달 특성에 관한 연구," *대한기계학회논문집*, 제19권 제9호, pp. 2386~2398.
- (11) Kimura, I., Takamori, T., Ozawa, M., Takenaka, N. and Manabe, Y., 1989, "Quantitative Thermal Flow Visualization Using Color Image Processing (Application to A Natural Convection Visualized by Liquid Crystals)," *ASME FED.*, Vol. 85, pp. 213~222.
- (12) Osawa, M., Muller, U., Kimura, I. and Takamori, T., 1992, "Flow and Temperature of Natural Convection in a Hele-Shaw Cell Using a Thermo-sensitive Liquid-Crystal Tracer," *Esp. in Fluid.*, Vol. 12, pp. 213~222.
- (13) 윤정환, 도덕희, 이상준, 1996, "TLC와 컬러 화상처리를 이용한 Hele-Shaw Cell 내부 대류 온도장 측정," *대한기계학회논문집(B)*, 제20권 제3호, pp. 1114~1122.
- (14) 이상준, 백승조, 윤정환, 도덕희, 1996, "화상처리기법을 이용한 온도장 및 속도장 동시 측정기법 개발," *대한기계학회*, 96년도 춘계학술대회 논문집(B), pp. 653~658.
- (15) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere., Washington, DC.
- (16) Kirchartz, K. R. and Oertel JR. H., 1988, "Three-Dimensional Thermal Cellular Convection in Rectangular Boxes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 192, pp. 249~286.
- (17) Oetel, H. Jr., 1980, "Three-Dimensional Convection Within Rectangular Boxes," in : *Natural Convection in Enclosures*, K. E. Torrence and I. Catton, eds., ASME HTD-Vol. 8, pp. 11~16.
- (18) Yang, K. T., 1988, "Transitions and Bifurcations in Laminar Buoyant Flows in Confined Enclosures," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 1191~1204.