

Bénard 대류가 형성된 사각공동내의 상단 평판에서 기포의 성장이 열전달에 미치는 영향

엄용균[†] · 권승혜^{**} · 권기한^{**}

The Effect of Heat Transfer from the Bubble Growing on the Bénard Convection Flow in a Square Cavity

Yong-Kyoon Eom, Seung-Hye Kwon and Gi-Han Kwon

Key Words: Thermo-Sensitive Liquid-Crystal(열감응 액정), Thermocapillary Convection(열 모세관 유동), Image Processing(영상처리)

Abstract

Flow motion and variation of thermal field around a bubble which attached at the upper cooled solid wall in a Bénard convection flow is studied experimentally using thermo-sensitive liquid-crystal tracers and image processing for flow visualization and analysis. The air is injected gradually by 0.1ml to make the bubble. As the growing of the bubble in a Bénard convection flow, the variation of temperature field and surface tension along the bubble, which in turn cause to change the thermal field patterns and the flow direction and patterns. 6 cells flow pattern is transformed into diverse flow pattern.

At the large size of a bubble, it's only conduction mechanism under the region of the bubble because of low Ra number 1137, but the convection flow both sides of the bubble leads to another convection flow in the bubble influence area which has been remained stable stagnation.

1. 서론

이상유체(two-phase)의 존재로 형성되는 자유표면 부근에서의 열 유동에 관한 연구가 실험적·수치적으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 이들 연구의 주된 관심사는 미세 중력장 하에서 열 모세관 현상이 열전달과 유체유동에 미치는 영향에 대한 것이었다.^(1~3) 이러한 현상은 지상이나 우주 공간에서 화학공정, 재료공정 및 유체조절 등에 주요한 변수가 되기 때문이다. 이들 연구 모델 가운데 사각공동 시편에서 이루어진 연구들은 밀폐 사각공동시편(closed square cavity)의 상단이 가열되어 온도분포가 수직 방향으로 성층화된 구조에서 상단 가열 면에 기포가 형성될 때 기포

주위의 온도차에 의한 표면 장력의 불균형과 그로 인한 열 모세관 현상에 관한 열전달 현상의 구멍이었다. 한편 엄, 권⁽⁸⁾은 Bénard 대류 열전달 구조에서 냉각 상단 표면에 기포가 주입되었을 때 일정크기의 기포에서 Bénard 대류의 온도분포가 상·하 역전구조로 변화하며 유동방향 또한 역전되는 현상이 일어난다는 연구결과를 제시한바 있었다. 기존의 연구결과가 전도 열전달 기구에서 기포와 모세관 현상의 영향에 대한 구멍이었다면, 엄, 권⁽⁸⁾의 연구 결과는 대류 열전달 기구에 대한 기포와 열모세관 현상의 영향에 대한 구멍이었다. Bénard 대류는 Rayleigh 값(이하, Ra로 표기)이 1708보다 큰 영역에서 발생하며, Ra 값이 1708보다 작은 영역에서는 전도에 의한 열전달 현상만이 발생한다. 따라서 Ra 값이 1708 부근에서의 대류 열전달 기구는 미세한 외부조건 변화에도 열전달 기구와 유동기구에 큰 변화를 초래할 수 있다.

[†] 책임저자, 회원, 안동대학교 기계공학과

E-mail : ykeom@andong.ac.kr

TEL : (054)820-5496 FAX : (054)823-5495

* 안동대학교 기계공학과 대학원

본 연구는 Bénard 대류가 발생하는 사각 공동 내에서 시편의 상단에 기포가 성장할 때 기포 성장에 따른 열전달 현상구명과 유동거동을 구명하고자 한다. 이러한 현상을 구명하기 위하여 열감응 액정을 이용한 비 접촉 측정방법으로 온도장과 유동장을 가시화하고, 영상처리 기법으로 전 온도장에 대한 정량적인 값을 제시하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

실험장치는 업,켄⁽⁸⁾이 적용한 구조와 같으며, 크게 밀폐 사각공동시편, 광원과 광학시스템, 3C CD camera와 PC, 항온조, 및 항온실로 구성되어 있으며 그 개략도는 Fig. 1과 같다.

밀폐 사각공동시편은 Fig. 2와 같이 수직 4면을 두께 5mm인 Plexiglas로 내부-79mm×10mm×15mm (폭×깊이×높이)와 외부-99mm×30mm×15mm로 구성하고 외부와 내부사이에 5mm 공간을 둔 2중 구조로 하였다. 시편의 크기는 Bénard 대류를 형성시키기 위한 한계 Rayleigh 수에 근거하여 제작되었다. 시편의 상·하단은 알루미늄으로 제작되었으며 수직 4면과 결합하여 밀폐 사각공동 형태로 된다. 상·하 알루미늄판 중 상단은 등온냉각($T=20.7^{\circ}\text{C}$), 하단은 등온가열($T=22.7^{\circ}\text{C}$) 조건으로 실험과정 동안 2개의 항온조(LAUDA-RE220)에 의해 일정한 온도로 유지된다. 상단 알루미늄판에는 경계부분의 온도측정을 위해 2개의 보정된 서머커플($\text{dia}=0.3\text{mm}$, T-type)을 설치하고 유체주입을 위한 2개의 구멍과 기포를 만들기 위한 1개의 구멍을 만들었다. 기포를 만들기 위해서 공기 주입을 위한 마이크로미터가 부착된 가

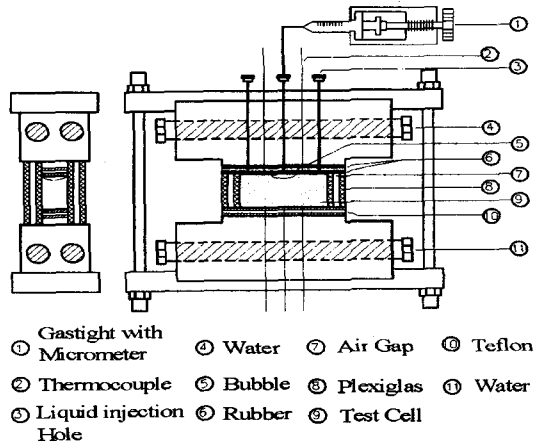


Fig. 2 Schematic of exp. specimen

스 주사기를 부착하였다. 하단 알루미늄 평판에는 보정된 3개의 서머커플을 설치하였다.

밀폐 사각공동 내부의 실험 매체는 100cst의 Silicon-oil이 사용하였고, 그 물리적 특성은 Table 1과 같다. Silicon-oil내의 온도장과 유동장의 가시화입자는 캡슐형 열감응 액정 입자(Encapsulated Thermo-Sensitive Liquid-Crystal)를 사용하였으며, 사용제품은 직경이 약 $20\mu\text{m}$ 인 분말형태의 "RM-2123(Japan Capsular Products Inc)"으로 밀도는 약 $998\text{kg}/\text{m}^3$ 이며 반응시간은 0.23msec 정도이다. 열감응 액정 입자의 Silicon-oil내 투입량은 온도장이나 유동장에 영향을 주지 않는 범위로 알려진 Silicon-oil 무게의 0.1%를 투입하였다.^(4,5) 사용된 열감응 액정 입자에 가시광원이 조사되면 액정입자들은 온도 따라 각기 다른 R·G·B color를 반사하며, 빨간색에서 시작되어 온도가 증가할수록 파란색으로 변한다. 온도반응 범위는 $\Delta T=2.5\text{K}$ 이며 그 밖의 범위에서는 어떤 색도 표현하지 않는다. 시편중앙에 조사된 1.5mm 두께의 얇은 수직 광은 1000W Xenon lamp에서 나오는 백색광원이 1개의 Spherical lens와 2개의 Cylindrical lens, 그리고 2개의 조리개를 거치면서 만들어진 것이다. 광원 중 복사 효과를 고려하여 400nm 이하의 자외선 영역대 파장을 제거하기 위한 UV-filter를 사용하였다. 열감응 액정 입자들이 제공하는 R·G·B color 정보를 영상처리기법으로 온도장 해석과 입자의 궤적에 의한 유동장 해석을 동시에 하기 위하여 두 대의 3CCD RGB camera(Sony, DXC

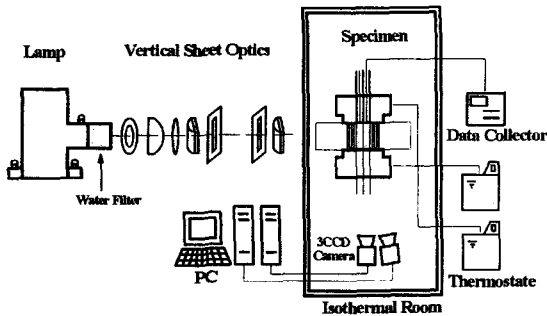


Fig. 1 Experimental setup for the visualization of temperature and flow field

Table 1 Fluid properties of the test liquid silicon oil 100cst (Daw Corning) at 25°C

Kinematic viscosity ν	$1\text{cm}^2/\text{s}$
Thermal diffusivity α	$2.8586 \times 10^{-3}\text{cm}^2/\text{s}$
Density ρ	$964\text{kg}/\text{m}^3$
Volume expansion β	$96 \times 10^{-5}\text{C}^{-1}$
Surface Tension σ	$20.9 \times 10^{-5}\text{N}/\text{cm}$

9000)를 1.5m 떨어진 곳에 설치하였다. 온도 해석을 위한 Camera는 노출시간을 0.5초로 Test cell과 90도의 각도로 설치하고, 유동장 촬영을 위한 카메라는 노출시간을 8초로 하여 약간 경사지게 설치하였다.

3. 실험 과정

가시화 측정 실험은 외부의 영향을 최소화하기 위해 Fig. 1과 같이 항온실 내에서 이루어지며 실험 과정동안 항온실의 오차는 0.5°C 범위 내에 유지되도록 하였다.

실험은 상·하 시편 결합 후 Silicon-oil과 열감응 액정 입자를 혼합하여 밀폐 사각공동에 주입한다. 상·하단 알루미늄 평판은 순환형 항온조를 통하여 하단은 22.7°C, 상단은 20.7°C의 등온면으로 설정한다. 온도 설정은 상·하부 경계부분에 설치된 서머커플을 통하여 온도계측기(Beamex TC 305)로 관측하고 실험과정 동안 실시간 저장된다. 광학시스템에서 만들어진 얇은 수직 광은 시편의 중앙에 조사하고 유동이 정상상태에 도달하면 2대의 3CCD RGB camera로 영상을 잡아 PC에 저장한다. 첫 단계 실험이 끝나면 이어서 정상상태의 유동조건에서 시편의 상단부분에 기포를 주입하기 위해 마이크로 미터가 부착된 가스주사기로 공기를 투입한다. 기포주입과 동시에 촬영이 이루어지며, 특정크기의 기포에서 실험이 끝나면 기포의 크기를 성장시키면서 각각의 상태에 대한 실험을 진행하였다.

4. 온도 보정과 영상처리

R·G·B 영상 값을 온도 값으로 표현하는 영상

처리 방법은 R·G·B 값을 Hue 값으로 전환한 후 온도 값과 연계하는 방법^(4~6)과 R·G·B 값으로부터 신경회로망 이론을 이용한 보정 방법⁽⁷⁾이 있으나, 본 실험실에서는 일반적으로 이용되고 있는 전자의 방법을 사용하였다. 온도보정 실험을 하기 위하여 시편의 상·하단 평판을 본 실험조건과는 반대로 상단 22.7°C와 하단 20.7°C로 설정한다. 이상의 조건은 유체의 유동이 전혀 없는 성층화된 온도장을 형성하므로 온도에 따른 R·G·B 영상을 정확하게 명확하게 잡을 수 있다. R·G·B 영상을 잡을 때 시편의 상부 구멍으로 수직 이송장치에 부착된 열전대(T-type, dia 0.13mm)를 이용하여 상부에서 하부로 1mm 간격으로 수직 이송하면서 온도를 측정하고, 동시에 각 지점에서 온도를 측정할 때 R·G·B 영상을 잡아서 열전대 위치와 동일한 지점을 중심으로 한 25×3 픽셀의 R·G·B 평균값을 Hue값으로 변환한 후 이 값을 측정된 온도 값과 일치시킨다.

$$H = \cos^{-1} \left[\frac{\frac{1}{2}(R-G) + (R-B)}{\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right] \quad (1)$$

식 (1)은 R·G·B 값을 Hue 값으로 변환한 식을 나타낸 것이다. 이때 G가 B보다 크면, H=360-H가 된다. 본 실험에서는 360으로 나눈 0~1의 값으로 온도와 색상 분포를 조합하였으며, 이들 결과의 상관관계식은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} T &= 20.6 + 10.5H + 35.6H^2 \quad (0.01 \leq H < 0.068) \\ T &= 21.44 + 0.57H + 1.54H^2 \quad (0.068 \leq H < 0.68) \end{aligned} \quad (2)$$

5. 결과 및 고찰

Fig. 3은 밀폐사각 공동내에서 상·하단 평판의 온도가 20.7°C와 22.7°C이고, Ra = 2221인 조건에서 안정된 Bénard 대류가 형성된 상태를 가시화하고 영상처리 한 결과를 제시한 것이다. Fig. 3(a)는 온도에 따라 색깔을 나타내는 T·L·C 입자에 실제 영상사진을 제시한 것이며, Fig. 3(b)는 실제 영상으로부터 영상처리(image processing)를 한 결과를 제시한 것이다. Fig. 3(b)의

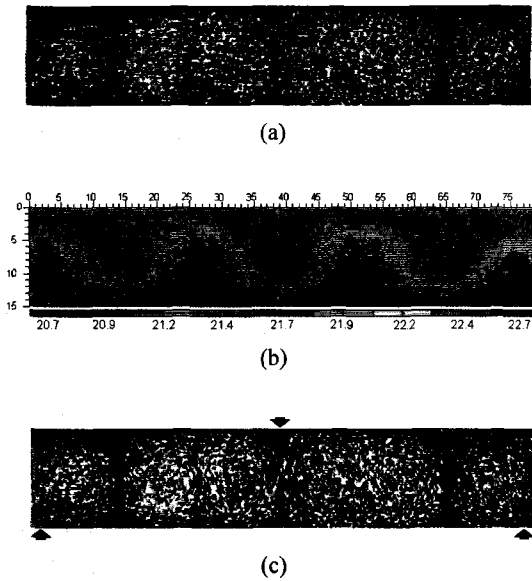


Fig. 3 Flow field in state of Bénard convection;
 $Ra=2221$, $Pr = 350$, $\Delta T=2K$, $\nu=100cst$
 (a) Original temperature field image, exp.0.5sec
 (b) Result of image processing
 (c) Original flow field image, exp.8sec

상단과 좌측의 수치는 사각공동시편의 크기(mm)를 나타내며, 하단의 색깔 기둥(color bar)과 수치는 색깔에 따른 온도($^{\circ}C$)값을 나타낸다. Fig. 3(c)은 카메라 셔터의 노출시간을 8초로 하여 유동계적을 가시화 한 것이다. 사진의 바깥 부분 3개의

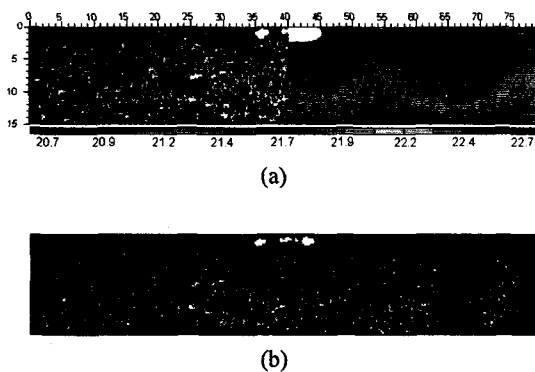


Fig. 4 No flow region, a bubble size $r=5.05mm$
 (a) Left : Original temperature field image
 exp.0.5sec
 Right : Result of image processing
 (b) Original flow field image, exp.8sec

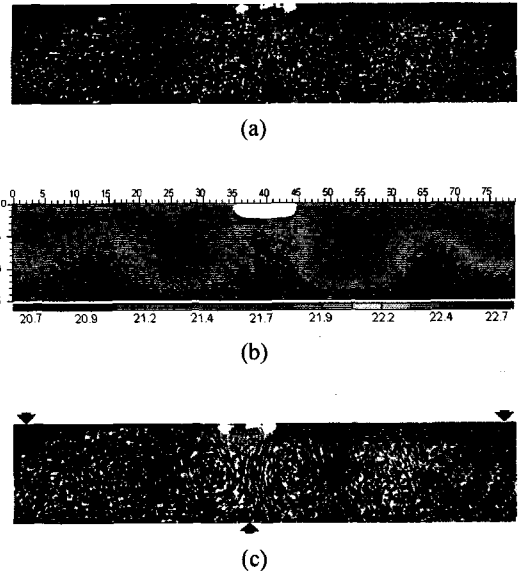


Fig. 5 Steady state for the reversed state a bubble size $r=5.05mm$
 (a) (b) (c) : explain same as Fig. 3

화살표는 유동방향을 나타낸다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 온도분포, 영상처리 그리고 유동형태의 가시화 결과는 시편중앙을 중심으로 좌·우 대칭 구조에 6개의 cell로 구성되어 있다. 이상의 결과는 이와 같은 조건에서는 전형적이고 안정된 Bénard 대류 기구가 형성된다는 것을 나타내고 있다. 이상과 같은 Bénard 대류 기구가 형성된 상태에서 기포 성장에 따른 영향을 구명하기 위해 기포의 주입은 0.1ml씩 단계적으로 주입하여 많은 결과를 얻었으나 본 논문에서는 실험 결과

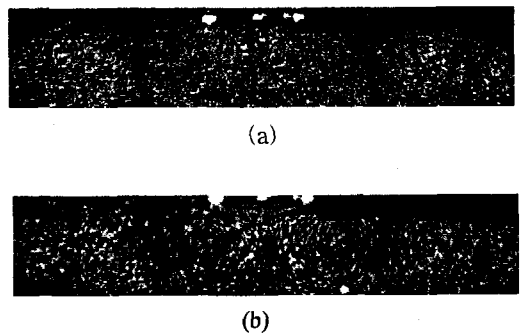


Fig. 6 In a case of a bubble size $r=8.46mm$
 (a) Original temperature field image, exp.0.5sec
 (b) Original flow field image, exp.8sec

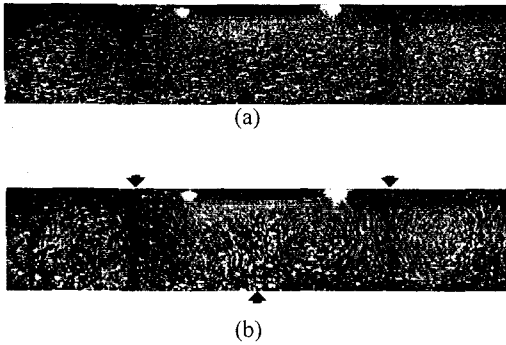


Fig. 7 In a case of a bubble size $r=13.1\text{mm}$
 (a) (b) : explain same as Fig. 6

중 기포의 성장에 따른 특징적인 형태를 나타내는 유동을 선별 제시하였다.

Fig. 4~5는 0.2ml의 기포를 주입한 이후의 결과를 제시한 것이다. Fig. 4는 기포 주입 후 5분 후의 결과이며, Fig. 5(a)의 좌측 부분은 실제 영상 사진이며, 우측 부분은 동일한 영상을 영상 처리한 결과이다. 설명문에서 r 은 기포중앙에서 수평방향의 접선 반경단을 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이 시간이 경과할수록 기포 아랫부분으로 하강하는 유동속도는 서서히 감소하여 유동은 정지상태가 된다. 기포 주입 60분 후인 Fig. 5에서는 정지된 영역에서 초기 유동과는 방향이

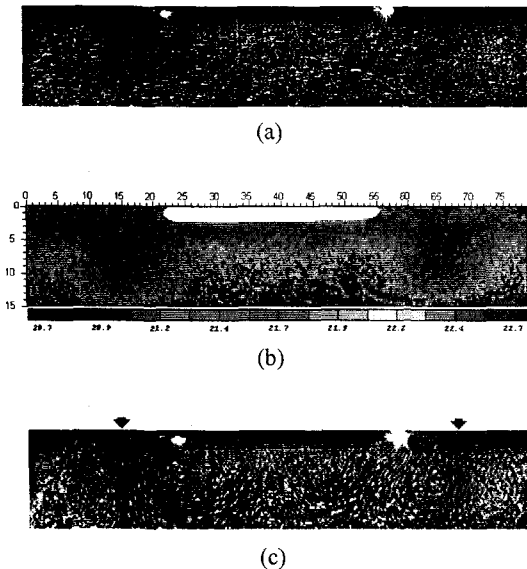


Fig. 8 In a case of a bubble size $r=18.7\text{mm}$
 (a) (b) (c) : explain same as Fig. 3

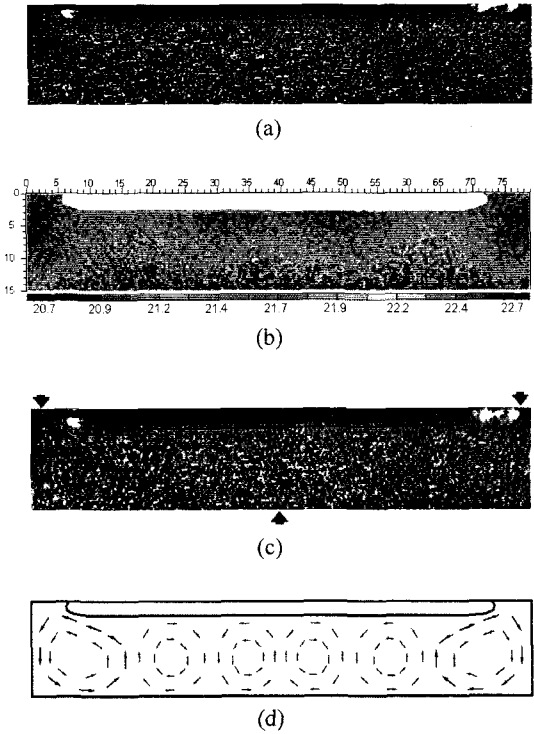


Fig. 9 In a case of a bubble size $r=33.7\text{mm}$
 (a) (b) (c) : explain same as Fig. 3
 (d) Redrawing flow pattern from the image (c)

반대인 상승유동이 발생하여 역전유동 형태로 된다. 이러한 현상은 엄, 권⁽⁸⁾의 연구결과에서 구명된 바 있다. Fig. 6은 0.4ml의 기포 주입 후 사진으로 좌·우 끝단의 유동이 파괴되기 시작하며 Fig. 7의 0.7ml 주입이후에는 기포 아랫부분과 좌·우 끝단에서 상승하는 4개의 cell 구조로 변한다. 즉 6cell의 구조에서 4cell 구조로 감소, 변화하였다. 이는 계속되는 기포의 성장이 기포의 양 끝단을 좌·우 벽면 방향으로 이동시킴으로서 기포 아래 상승구간을 확장시키고, 그 결과로 좌·우 양단의 cell이 파괴되며, 상부 냉각단면으로부터의 열전달 차단으로 인하여 1.0ml 주입 후인 Fig. 8과 같이 상·하 온도구배가 작아진 유체의 정체구간이 형성된다. 또 기포 양단에 존재하는 급격한 온도구배는 전체유동장의 회전에 원동력이 되고 있으며 기포의 성장으로 인해 시편 중앙으로부터 좌·우로 멀어지면서 중앙에는 정체구간이 형성된다. 이런 정체구간은 영상처리 된 Fig. 8(b)에서 명확히 볼 수 있으며 기포의 아랫면과 하단 가열 면과의 거리는 약 12mm 정도로 $Ra=1$

137이다. 본 실험과 같은 사각 밀폐공간에서 자연대류가 발생하기 위해서는 $Ra=1708$ 이상이 되어야한다. 즉, Ra 수가 1708 이하인 경우 열전달은 유동이 없는 순수한 전도(conduction)에 의해서만 일어난다. 따라서 기포 하단 영역의 정지 상태는 이론과 일치한다. Fig. 9는 1.8ml의 기포 주입 이후 영상으로 초기에는 2개의 cell이 양단에서 존재하며 기포 아랫부분은 정체된 유동을 보인 후 Fig. 9의 (d)에서 보는 바와 같이 기포 아랫부분에서 미세한 4개의 cell 다시 형성된다. 즉 초기에 형성되었던 6cell 유동구조로 돌아감을 볼 수 있으며, 이 구간은 $Ra=1708$ 이하로 유동이 정지된 순수 전도구간이나, 양단의 2개 cell 유동으로 인한 점성효과와 연속 법칙을 만족하기 위해 안정된 전도구간이 파괴됨을 알 수 있다. 또 기포 하단의 순수 전도구간에서 2cell이 아닌 4개의 cell이 형성됨은 본 실험에서 사용된 사각공동의 크기에서 가장 안정된 Bénard 대류의 형태는 6cell 구조임을 알 수 있다. 위의 분석을 바탕으로 Fig. 8의 유동에서 기포 아랫면의 정체구간을 다시 분석하면, 4cell 구조에서 6cell 구조로 변하기 위한 과도기 구간임을 알 수 있다. 즉 5cell은 좌우 대칭을 유지할 수 없으며 6cell은 정체구간의 간격이 좁아 형성될 수 없으므로 과도기적인 정체된 구간을 형성한다.

6. 결 론

상단 냉각·하단 가열로 형성된 Bénard 대류가 일어나는 밀폐 사각공동에서 상단 평판 표면의 중앙에 기포를 주입·성장시킬 때 발생하는 열전달 현상을 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 기포의 존재는 열 모세관 유동과 복합되어 Bénard 대류 구조에 큰 영향을 주어 온도분포와 대류방향의 반전을 유발한다.

(2) 기포의 성장은 유동형태가 변하면서 각 구간마다의 천이 영역이 존재하며, 기포 성장에 따라 Bénard cell의 수가 감소된다.

(3) 자연대류에서 한계 $Ra=1708$ 이하는 순수 전도 구간이나 기포 주위에 존재하는 대류구조는 순수전도영역에서 대류현상을 유발한다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Chun, Ch-H. and Wuest, W., 1979, "Experiments on the Transition from the Steady to the Oscillatory Marangoni Convection of a Floating Zone under Reduced Gravity Effect," *Acta Astronautica*, Vol. 6, pp. 1073~1082.
- (2) Wozniak, G., Wozniak, K. and Bergelt, H., 1996, "On the Influence of Buoyancy on the Surface Tension Driven Flow Around a Bubble on a Heated Wall," *Experiments in Fluids*, Vol. 21, pp. 181~186.
- (3) Kassemi, M. and Rashidnia, N., 1997, "Steady and Oscillatory Flows Generated by a Bubble in 1-G and Low-G Environment," *35th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, 6~10 Reno, NV.
- (4) Ozawa, M., Müller, U., Kimura, I. and Takamori, T., 1992, "Flow and Temperature Measurement of Natural Convection in a Hele-Shaw Cell Using a Thermo-Sensitive Liquid-Crystal Tracer," *Exp. in Fluids*, Vol. 12, pp. 213~222..
- (5) Dabiri, D. and Gharib, M., 1996, "The Effects of Forced Boundary Conditions on Flow Within a Cubic Cavity Using Digital Partial Image Thermometry and Velocimetry(DPITV)," *Exp. Thermal and Fluid Science*, Vol. 13, pp. 349~363.
- (6) Baughn, J. W., Anderson, M. R., Mayhew, J. E. and Wolf, J. D., 1999, "Hysteresis of Thermochromic Liquid Crystal Temperature Measurement Based on Hue," *J. Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 1067~1072.
- (7) Ozawa, M., Shinoki, M., Kimura, I. and Umekawa, H., 1997, *可視化 情報*, Vol. 17, No. 64, pp. 41~45.
- (8) 엄용균, 권기한, 2001, "열감응 액정을 이용한 사각공동내의 상단 냉각 평판에 형성된 기포주위의 열전달 현상 구명", 대한 기계학회 춘계학술대회 논문집 D, pp. 509~515.