

낮은 Rayleigh값의 Bénard Convection 유동장에 주입된 기포의 영향에 관한 연구

엄 용 균* · 권 기 한*

(2001년 6월 25일 접수, 2001년 10월 8일 심사완료)

The Effect of a Bubble in Bénard Convection at Low Rayleigh Number

Yong-Kyoon Eom and Gi-Han Kwon

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

Abstract

In an enclosed square cavity occurred Bénard convection, the flow phenomena in the surrounding of the bubble attached at the upper cooled solid wall were studied by using a thermo-sensitive liquid-crystal tracer and image processing techniques. This method offers the advantage of measuring the entire flow field in a selected plane within the fluid at a given instant of time in contrast to point by point method like T/C. Quantitative data of the temperature were obtained by applying a colour-image-processing to the visualized image. As the growing in a bubble, in a bubble size appears the flow phenomena which the direction of flow is reversed in the entire temperature and flow field. The observed phenomena are described with regard to the thermocapillary convection.

1. 서론

수평 가열평판에 반 구체의 기포가 주입된 후 발생하는 열 모세관 유동에 대한 연구가 60년대 후반부터 수치해석과 실험적으로 이루어졌다. 이들 연구는 대류 열전달 기구가 비등 열전달 기구에 미치는 영향에 대한 명확한 구명에 관한 것이었다.^(1~4) 최근 수평가열평판에 부착되어 있는 기포 근처에서의 열 모세관 유동의 주된 관심사는 미세 중력(micro-gravity)의 작용에 관한 것으로 우주공간이나 우주선에서 화학공학, 재료과학 및 유체조절에 관한 문제였다.^(5~8) 이들 열 모세관 유동현상 연구는 대류 열전달 현상이 전혀 일어나지 않는 구조인 가열 상단평판과 냉각 하단평

판 사이에 액체가 채워져 있는 밀폐 사각공동(square cavity) 시편에서 가열 상단평판의 표면에 기포가 주입된 후 발생하는 유동현상에 관한 것이었다. 그러나 지금까지 밀폐 사각공동에서 냉각되는 상단 수평평판의 표면에 기포가 주입된 후 발생하는 열전달 현상에 관한 연구는 없었다. 이러한 밀폐 사각공동 구조에서는 하단 평판이 가열되고 상단 평판이 냉각되는 경우로, 상·하단의 온도 차이가 적을 경우 Bénard 대류라는 열전달 현상이 나타난다. Bénard 대류는 열전달 매체가 유체일 때 열전달 기구가 전도에서 대류로 전환되는 시발점에서 나타나는 열전달 현상으로 주위의 미세한 변화에도 민감하게 변화할 수 있는 열전달 구조이다.

본 연구는 이러한 Bénard 대류가 일어나는 밀폐 사각공동에서 상단 수평냉각평면의 표면에 기포가 주입된 후 기포가 밀폐 사각공동내의 온도장과 유동장에 미치는 영향을 가시화 실험으로서 구명하고자 한다.

* 책임저자, 회원, 안동대학교 기계공학과
E-mail : ykeom@andong.ac.kr
TEL : (054)820-5496 FAX : (054)823-5495
* 안동대학교 대학원 기계공학과

2. 실험 장치 및 방법

가시화 실험은 미묘한 열전달 구조를 구명하기 위해서 온도 측정시 유동장에 영향을 미치지 않으면서 전 온도장을 가시화 할 수 있고, 특히 기포 근접 부근의 온도장을 효과적으로 측정하기 위하여 열감응 액정을 이용한 비접촉 측정 방법과 영상처리기법을 적용하였다.

실험장치의 구조는 크게 밀폐 사각공동시편, 광원과 광학 시스템, 3CCD camera와 PC, 항온조, 및 항온실로 구성되어 있으며 그 개략도는 Fig. 1 과 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. 이러한 구조는 가시화 영상을 촬영할 때 빛의 굴절현상을 보정하고 단열을 강화하기 위해서이다. 시편의 크기는 Bénard-cell을 형성시키기 위한 한계 Rayleigh 수에 근거하여 제작되었으며, 본 실험에서 Rayleigh 수는 2221이다. 시편의 상· 하단은 알루미늄으로 제작되었으며 수직 4면과 결합하여 밀폐 사각공동형태로 된다. 알루미늄에서 수직 4벽면으로의 열전달 차단을 위해 Plexiglas와 알루미늄 사이에는 두 장의 실리콘 고무판과 테프론판을 삽입하였다.

상· 하 알루미늄판 중 상단은 등온 냉각($T=20.7^{\circ}\text{C}$), 하단은 등온가열($T=22.7^{\circ}\text{C}$) 조건으로 실험 과정 동안 2개의 항온조(LAUDA-RE220)에 의해 일정한 온도로 유지된다. 상단 알루미늄평판에는 경계부분의 온도측정을 위해 2개의 보정된 열전대($\text{dia}=0.3\text{mm}$, T-type)를 설치하고, 유체주입을 위한 2개의 구멍과 기포를 만들기 위한 1개의 구멍을 만들었다. 기포를 만들기 위해서 공기 주입을 위한 마이크로미터가 부착된 가스 주사기를 부착하였다. 하단 알루미늄평판의 온도측정을 위하여 보정된 3개의 열전대를 설치하였다.

밀폐 사각공동 내부의 실험 매체는 100cst의 Silicon-oil을 사용하였고, 그 물리적 특성은 Table 1과 같다. Silicon-oil내의 온도장과 유동장의 가시화 입자는 캡슐형 열감응 액정(Encapsulated Thermo-sensitive Liquid-Crystal)을 사용하였으며, 사용

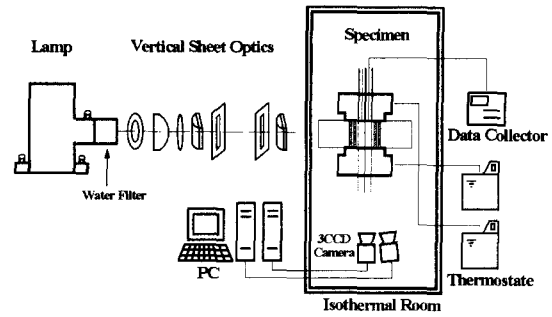


Fig. 1 Experimental setup for the visualization of temperature and flow field

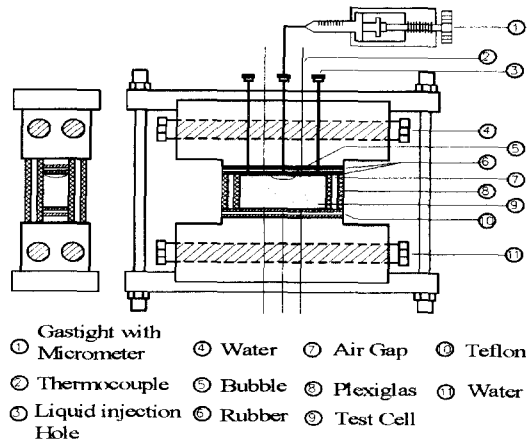


Fig. 2 Schematic of exp. specimen

제품은 직경이 약 $20\mu\text{m}$ 인 분말형태의 "RM 2123(Japan Capsular Products Inc)"으로 밀도는 약 998kg/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.⁽⁹⁻¹⁰⁾ 사용된 열감응 액정 입자에 가시광원이 조사되면 액정입자들은 온도 따라 각기 다른 RGB color를 반사하며, 빨간색에서 시작되어 온도가 증가할수록 파란색 쪽으로 변한다. 온도반응 범위는 $\Delta T \approx 2.5\text{K}$ 이며, 그 밖의 범위에서는 어떤 색도 표현하지 않는다. 시편중앙에 조사된 1.5mm 두께의 얇은 수직 광은 1000W Xenon lamp에서 나오는 백색광원이 1개의 Spherical lens와 2개 Cylindrical lens, 그리고 2개의 조리개를 거치면서 만들어진

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	$20.9 \times 10^{-5}\text{N}/\text{cm}$

다. 광원 중 열감응 액정의 손상을 초래하는 400 nm 이하의 자외선 영역대 파장을 제거하기 위하여 UV-filter를 사용하였다. 열감응 액정 입자들이 제공하는 RGB color 정보를 영상처리기법으로 온도장 해석과 입자의 궤적에 의한 유동장을 동시에 해석하기 위하여 두 대의 3CCD RGB camera (Sony, DXC 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. 각각의 데이터는 Frame grabber가 설치된 PC에 저장된다.

3. 실험 과정

가시화 측정 실험은 외부의 영향을 최소화하기 위해 Fig. 1과 같이 항온실에서 이루어지며 실험 동안 항온실의 오차는 0.5°C 범위 내에 유지 되도록 하였다.

실험은 상·하 시편 결합 후 Silicon oil과 열감응 액정 입자를 혼합하여 밀폐 사각공동에 주입한다. 상·하단 알루미늄 평판을 순환형 항온조에 의해 하단은 22.7°C 등온면, 상단은 20.7°C 등온면으로 설정한다. 온도 설정은 상·하부 경계부분에 설치된 열전대를 통하여 온도계측기(Beamex TC 305)로 관측하고 실험과정동안 실시간 저장한다. 광학시스템에서 만들어진 얇은 수직 광을 시편 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. 공기 주입시 이중 기포나 유동형태에 영향이 미치지 않게 마이크로미터를

조심스럽게 작동해야 한다. 기포주입과 동시에 촬영이 이루어지며, 특정크기의 기포에서 실험이 끝나면 기포의 크기를 성장시키면서 각각의 상태에 대한 실험을 진행하였다. 기포의 크기는 0.1 ml~0.5ml 사이로 6단계로 실험을 하였다.

4. 온도 보정과 영상처리

RGB 영상 값을 온도 값으로 표현하는 영상처리 방법은 RGB 값을 Hue 값으로 전환한 후 온도 값과 연계하는 방법^(9~10)과 RGB 값으로부터 신경회로망 이론을 이용한 보정 방법⁽¹²⁾이 있으나, 본 실험실에서는 일반적으로 이용되고 있는 전자의 방법을 사용하였다. 온도 보정은 모든 실험준비가 완료된 상태에서 본 실험이 진행되기 앞서 실시한다. 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 RGB 영상을 정확하고 명확하게 잡을 수 있다. RGB 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 RGB영상을 잡아서 열전대 위치와 동일한 지점을 중심으로 한 25×3 픽셀의 RGB 평균값을 Hue값으로 변환한 후 이 값을 측정된 온도값과 일치시킨다.

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

$$T = 20.6 + 10.5H + 35.6H^2 \quad (0.01 \leq H < 0.068)$$

$$T = 21.44 + 0.57H + 1.54H^2 \quad (0.068 \leq H < 0.68) \quad (2)$$

식 (1)은 RGB 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, Fig. 3은 상기의 결과에서 얻어진 Hue 값과 측정온도의 과를 도시 한 것이며 이들 결과의 상관관계식은 식 (2)와 같다.

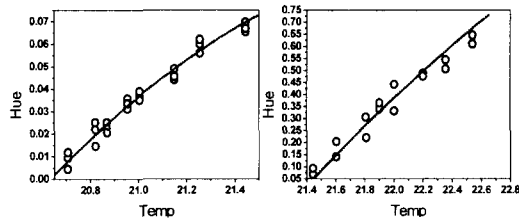


Fig. 3 Relationship between hue and temp

5. 결과 및 고찰

Fig. 4는 기포를 주입하지 않은 상태에서 실험한 결과이다. Fig. 4(a)는 열감응 액정 입자가 나타내는 온도분포 영상사진이며, Fig. 4(b)는 (a)를 영상처리한 결과를 제시한 것이다.(모든 영상 사진은 컬러사진이지만, 인쇄상의 문제로 흑백으로 제시된 것임) 그림 상단과 좌측단의 수치는 사각 공동 시편의 크기(mm)를 나타낸 것이며, 하단의 수치는 색깔에 따른 온도(°C)값을 나타낸 것이다. 온도 분포의 성향은 전형적인 Bénard 대류가 형성 될 수 있는 구조이며, 이를 유동형태에서 보면 확연하게 나타난다. Fig. 4(c)는 노출시간을 8초로하고 Fig. 4(a)와 동시에 잡은 유동체적을 나타내는 사진이다. Fig. 4(d)는 영상사진을 트레이싱 용지에 옮기면서 실험과정에서 관찰된 유동방향과 형태를 도시한 것이다. 제시된 결과에서 볼 수 있듯이 전형적인 Bénard 대류 유동 형태로 사각 셀 모양의 6개 유동이 형성되고 있다. 유동형태는 시편중앙의 중심선을 기준(Fig. 4(d)의 상단 중앙에 표시된 화살표 부분)으로 하여 상단표면 좌·우에서 유입되는 유체들이 합쳐져서 중심선을 따라 수직으로 하강하고, 하강하던 유체는 시편의 하단에 도착하여 좌·우로 분리되어 각각 이동하는 동안 가열된 하단평면으로부터 열전달을 받아 상향으로 올라간다. 이렇게 상승하던 유체가 상단에 도달하면 앞서 하강하는 유체의 연속법칙을 만족하기 위한 방향으로 좌·우 이동이 이루어지며, 동시에 이 과정에서 냉각된 상단으로부터 열전달을 받아 다시 하강하여 유동형태는 순환 셀 모양을 형성하게 된다.

Fig. 5는 0.1ml의 공기를 주입하여 기포가 상단

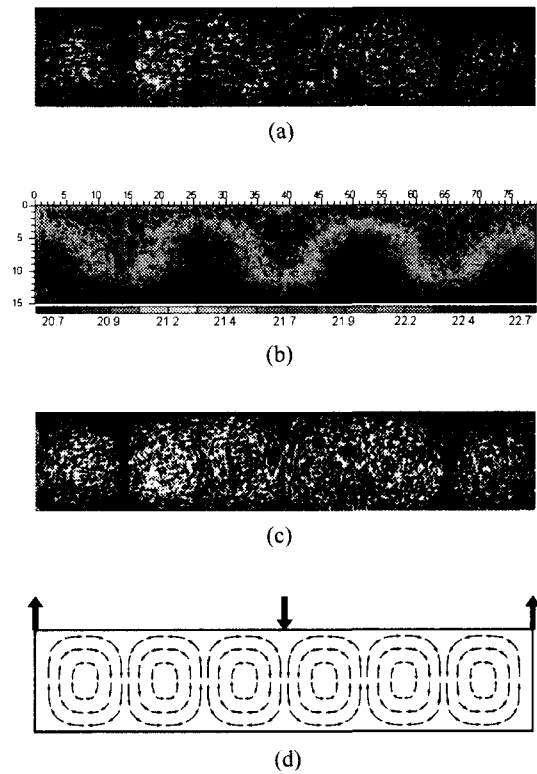


Fig. 4 Flow field in state of Bénard convection; Ra=2221, Pr =350, ΔT=2K, ν =100cst
 (a) Original temperature field image, exp.0.5sec
 (b) Result of image processing
 (c) Original flow field image, exp.8sec
 (d) Redrawing flow pattern from the image (c)

냉각표면에 주입된 후의 결과이다. Fig. 5(a)는 두 개의 결과를 결합한 사진이다. 좌측은 열감응 액정에서 발산된 온도에 따른 색깔변화의 실제영상이며 왼쪽은 영상처리 결과를 각각 제시한 것이다. Fig. 5(b)는 Fig. 4(c)와 같이 노출 시간을 8초로 하여 유동체적을 잡은 사진이다. Fig. 5의 설명문에서 r은 기포중앙에서 수평방향의 접선 반경만을 나타낸다. 시편중앙을 중심으로 온도장과 유동장은 좌우 대칭이므로 이후 모든 결과는 Fig. 5와 같은 방식으로 제시한다. 앞서 제시한 바와 같이 좌·우에서 유입한 유체가 서로 합쳐져서 수직하강 유동을 형성하는 곳이다. 기포는 좌·우 유입부분의 정 중앙에 위치한다. Fig. 5에서 보면 기포의 냉각면의 차단으로 온도 분포가 미

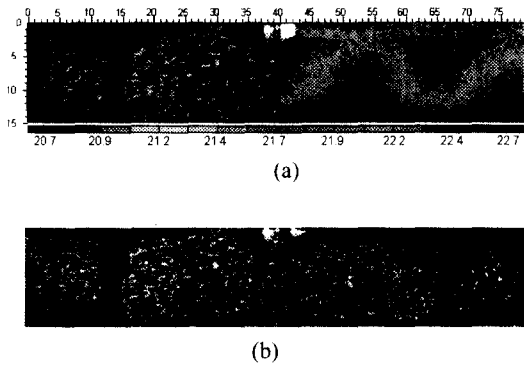


Fig. 5 In case of inserting a bubble size $r=3.26\text{mm}$; (a) Left : original temperature field image, Right : result of image processing, (b) Original flow field image, exp.8sec

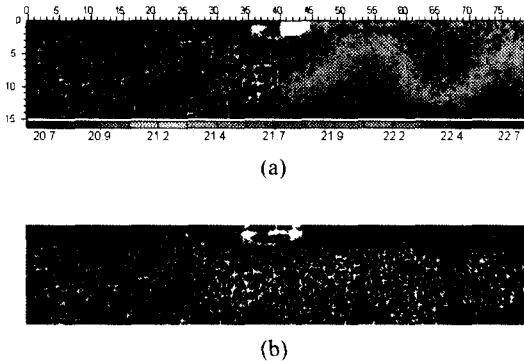


Fig. 6 In case of a bubble size $r=5.05\text{mm}$; (a), (b) explain same as Fig. 5

약하게 변했음을 볼 수 있으나 유동형태에서는 기포가 주입되지 않은 Fig. 4의 경우와 같은 유동형태로 기포의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 이러한 구조는 시간이 지나도 변함이 없었다.

Fig. 6은 공기를 0.2ml 주입된 후의 결과이다. 제시된 사진은 기포가 주입되고 5분 후의 사진이며, Fig. 6의 (a) 와(b)의 결과를 보면 Fig. 5의 결과와 비교하여 기포주위의 온도 구배와 유동 속도가 작아지고, Fig. 6(b)에서 볼 수 있듯이 밀폐 사각공동내 전유동장의 유동속도가 현저히 감소했음을 볼 수 있다.

이러한 현상은 기포 주입 이후 기포의 낮은 열전달률로 인하여 상부 알루미늄평판과 내부 유체

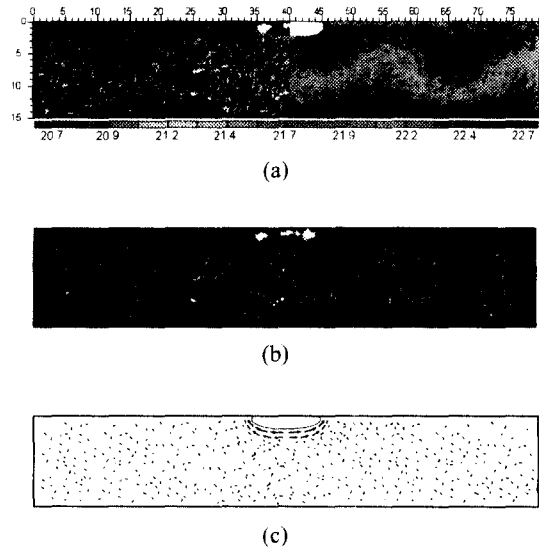


Fig. 7 No flow region, a bubble size $r=5.05\text{mm}$; (a), (b) : explain same as Fig. 5, (c) Redrawing flow pattern from the image (b)

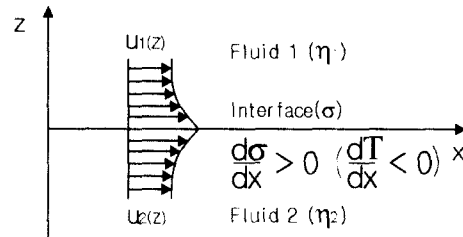


Fig. 8 Mechanism of thermocapillary flow around a bubble under a heated horizontal wall

간의 열전달을 저하시키면서 기포 주위의 유체온도가 기포주입 전의 온도보다 상승하게 된다. 이상의 결과로 기포면과 시편 하단 가열면 사이의 온도 구배가 감소되면서 기포 아래 유체의 유동을 감소시키게 된다. 이러한 유동감소가 전 유동장의 유동을 감소시키는 주원인이 된다.

Fig. 7은 Fig. 6의 상태에서 계속되는 실험으로 공기주입 20분 후의 결과를 제시한 것이다. Fig. 7(a)와 Fig. 6(a)의 온도장을 비교해보면 기포 아래영역에서의 온도분포는 Fig. 6(a)보다 Fig. 7(a)에서 상승했음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 시간이 경과하면서 기포에 의한 상단 냉각면의 열전달 차단 효과와 함께 시편하단 가열면의 영향

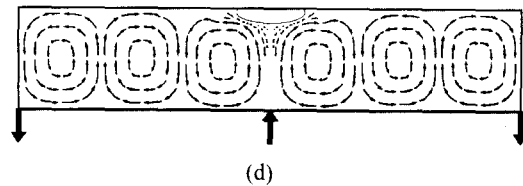
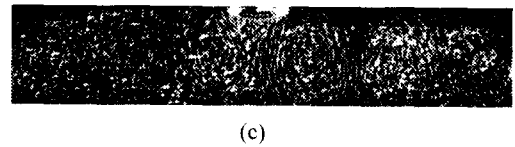
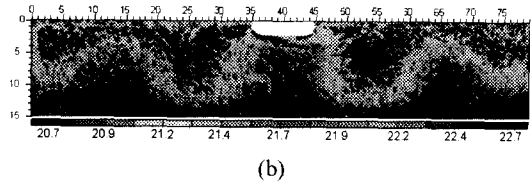
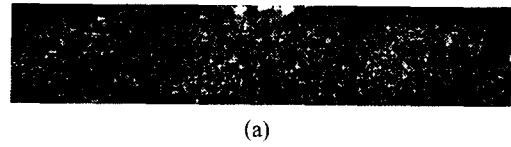
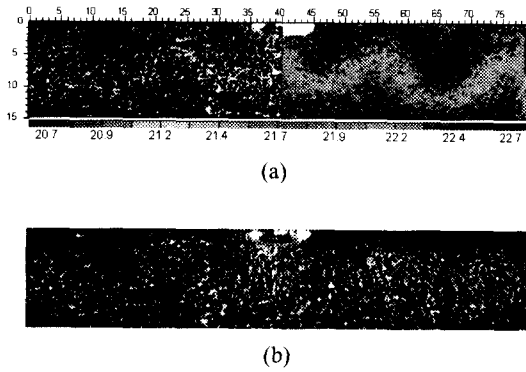


Fig. 9 Start region for reverse flow & temp. field, a bubble size $r=5.05\text{mm}$; (a), (b) : explain same as Fig. 5

을 받아 기포 아래영역의 온도는 상승하기 때문이다. 이러한 결과로 기포 아래영역에서의 온도구배는 적어지게 되고 결국 부력에 의한 유동을 감소시키게 된다. Fig. 7(b)의 영상사진을 보면 유동장이 정지된 상태이다. Fig. 7(a)의 영상사진과 영상처리 결과에서 보듯이 온도분포와 온도구배 측면에서 볼 때는 자연대류가 지속해서 일어날 수 있는 구조지만 유동장은 정지상태에 있다. 앞서 논의 된 바와 같이 부력에 의한 유동요인은 감소하고, 일정 크기의 기포는 하강하는 유체의 유입을 방해하는 존재가 되며, 유동을 방해는 점성효과 등에 의해 평형을 이루어 기포 아래 영역은 유동이 정지 될 수 있다. 실제 기포 아래영역에서의 Ra 수를 계산해보면 $Ra=1137$ 정도이나(기포 밑 표면에서 하단 가열면까지의 거리는 12mm 정도이고 기포면의 온도는 20.7°C), 본 실험과 조건이 같은 사각밀폐공간에서 자연대류가 발생하기 위해서는 $Ra=1708$ 이상이 되어야 한다. 즉 Ra 수가 1708 이하인 경우 열전달은 유동 없는 순수한 전도(conduction)에 의해서만 일어난다. 따라서 Fig. 7의 기포 아래영역에서의 정지 상태는 기존의 분석과 잘 일치하고 있다.

이상과 같이 상단에 주입된 일정 크기의 기포가 Bénard 대류를 정지 상태에 이르게 하는 것을 구명할 수 있었다.

이러한 정지된 유동장에서도 도식된 Fig. 7(c)와 같이 기포 표면에서는 실험초기에 발생했던 유동방향과는 반대방향이라 할 수 있는 좌·우측 밖으로 향하는 미세한 유동이 일어나고 있음을

Fig. 10 Steady state for the reversed state a bubble size $r=5.05\text{mm}$; (a), (b), (c) : explain same as Fig. 5, (d) Redrawing flow pattern from the image(c)

실험 중에 육안으로 관찰할 수 있었다. 이와 같은 유동현상은 기·액체의 계면에서 발생하는 열모세관현상에 의한 운동기구로 이미 기존의 연구결과⁽⁵⁻⁸⁾에서 밝혀진 바와 같이 Fig. 8과 같은 물리적 기구로 표현될 수 있는 현상이라 할 수 있다.

Fig. 9는 35분 후의 영상으로 Fig. 9(a),(b)와 Fig. 4(a),(b)를 비교하여 시편의 상·하로 sine 파형 온도분포가 cosine 파형의 역전구조로 변해가고 있으며, Fig. 9(b)의 유동형태도 전 유동장의 상승부분은 하강부분으로, 하강부분은 상승부분으로 역전의 구조로 변해 감을 볼 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 7에서 관찰된 바와 같이 기포 인접 영역에서 열 모세관 현상에 의한 유동이 지속되면서 기포 아래에 있는 정체된 유체를 끌어올리고 이 구동력에 의해서 역전의 부력이 형성되며, 이러



Fig. 11 Original flow field image, exp.8sec, a bubble size $r=10.2\text{mm}$

한 부력이 평형상태에 있는 유동정지상태를 역전의 유동형태로 변화시키기 때문이다. 또한 이러한 유동의 역전구조는 온도장을 변화시켜 온도장도 역전구조로 만든다.

열 모세관 현상에 의한 구동력이 유동장을 형성한다는 연구결과는 기존의 연구결과들과 일치하는 현상이지만, 열 모세관현상의 구동력에 의해 원래의 유동장을 역전시키거나 온도장을 역전시킨다는 연구결과는 제시된 바가 없었다. 이러한 역전 현상은 시간이 지나면 완전 역전구조에서 정상상태로 유지된다.

Fig. 10은 60분 후의 사진으로 완전 역전이 이루어진 후 안정화된 정상상태를 제시한 것이다. Fig. 4와 비교해 보면 온도분포의 모형이 시편의 수평 중앙을 중심으로 상·하로 완전 역전되어 있으며, 유동 형태도 Fig. 4와 똑같이 6개의 셀 형태지만 중앙을 중심으로 하강하던 유동이 상승으로 변화였고, 전체 셀의 유동방향도 역전되어 시편 좌·우 끝 수직 벽면에서는 상승하던 유체가 하강으로 전환 이동하고 있다. 이러한 유동방향은 기포가 성장하여도 변하지 않지만 유동형태는 기포가 성장하면서 많은 변화가 있음을 알 수 있었다.

Fig. 11은 0.5ml의 공기 주입 후에 영상 사진으로 밀폐 사각공동내의 유동형태는 4개의 셀 형태로 변해 있음을 볼 수 있다. 이상과 같이 기포가 성장함에 따라 유동은 다양한 형태로 변화하며 이에 대한 연구결과는 다음에 발표하기로 한다.

6. 결론

열감응 액정을 이용한 비접촉 측정 방법과 영상처리기법을 적용하여 Bénard 대류가 일어나는 밀폐 사각공동에서 상단냉각 평판의 표면에 중앙에 기포를 성장시킬 때 발생하는 열전달 현상을 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 상단표면에 일정 크기의 기포가 주입될 때

시간이 경과함에 따라 Bénard 대류가 소멸되고 유동장이 정지되는 구간이 존재한다.

(2) 이 정체구간에서 기포주위에서는 열 모세관 현상이 발생하여 정체된 유체를 다시 유동시키는 구동력이 된다.

(3) 열 모세관 현상에 의한 구동력은 유동장을 기포가 주입되기 전과 유동방향이 반대인 역전된 구조로 만들고 온도장도 상·하 분포를 역전구조로 만든다.

후 기

이 연구는 LG 연암문화재단의 교수해외파견 연구 사업 의해 수행되었으며 이에 감사드리며, 연구에 도움을 주신 미국 뉴욕 주립대 V.Prasad 교수와 일본 관서대 M.Ozawa교수께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) McGrew, J. L., Bamford, F. L. and Rehm, T. R., 1966, "Marangoni Flow : An Additional Mechanism in Boiling Heat Transfer," *Science*, Vol. 153, pp. 1106~1107.
- (2) Gaddis, E. S., 1968, "The Thermal Equilibrium of a Vapour Bubble on a Heated Solid Surface," Ph. D., Thesis Manchester University, UK.
- (3) Kao, Y.S. and Kenning, D. B. R., 1972, "Thermocapillary Flow Near a Hemispherical Bubble on a Heated Wall," *J. Fluid Mech*, Vol. 53, pp. 715~735.
- (4) Huplik, V. and Raithby, G. D., 1972, "Surface Tension Effects in Boiling from a Downward-Facing Surface," *J. Heat Transfer*, Vol. 94, pp. 403~409.
- (5) 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.
- (6) Raake, D., Siekmann, J. and Chun, Ch-H., 1989, "Temperature and Velocity Fields due to Surface Tension Driven Flow," *Exp. Fluids*, Vol. 7, pp. 164~172.

- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Dabiri, D. and Gharib, M., 1996, "The Effects of Forced Boundary Conditions on Flow Within a Cubic Cavity Using Digital Partical Image Thermometry and Velocimetry(DPITV)," *Exp. Thermal and Fluid Science*, Vol. 13, pp. 349~363.
- (11) 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.
- (12) Ozawa, M., Shinoki, M., Kimura, I. and Umekawa, H., 1997, 可視化情報, Vol. 17, No. 64, pp. 41~45.