

< 논문 >

## 수평 사각밀폐공간내의 전도열전달 기구에서 열모세관효과

유재봉\* · 안도원\* · 유주식\*\* · 엄용균†  
 (2005년 5월 17일 접수, 2005년 10월 19일 심사완료)

### The Thermocapillary Effect on Pure Conduction Mechanism in a Closed Square Cavity

Jae-Bong Yu, Do-Won An, Joo-Sik Yoo and Yong-Kyoon Eom

**Key Words:** Thermocapillary Effect(열모세관효과), Thermo-sensitive Liquid-crystal(열감응액정), Image Processing Technique(영상처리기법), Vortex(와류)

#### Abstract

In a closed square cavity filled with a liquid, a cooling horizontal upper wall and a heating lower wall, the flow isn't generated under the ground-based condition when Rayleigh number is lower than 1700. In this mechanism,  $Ra=1534$ , Temperature and velocity fields near an air-bubble in silicon-oil under a cooled upper wall were investigated. Temperature and velocity fields is visualized using the thermo-sensitive liquid-crystal and light sheet visualization technique. The quantitative analysis for the temperature and the flow fields were carried out by applying the image processing technique to the original data. The symmetry shape of two vortexes near an air bubble was observed. As the bubble size increased, the size of vortex and the magnitude of velocity increased. In spite of elapsed time, a pair of vortexes was the unique and steady-state flow in a square cavity and wasn't induced to the other flow in the surround region.

기호설명

$Bo$	:	Bond 수, $\frac{Ra}{Ma} = \frac{g\beta \partial T/\partial z \delta^3/\nu\alpha}{Ma}$
$Ma$	:	Marangoni 수, $r_h^2 \left  \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right  \left  \frac{\partial T}{\partial z} \right  / \mu\alpha$
$Pr$	:	Prandtl 수, $\frac{\nu}{\alpha}$
$Ra$	:	Rayleigh 수, $\frac{g \cdot \beta \cdot (T_H - T_L) \cdot \delta^3}{\alpha \cdot \nu}$
$Re$	:	Reynolds 수, $\rho U_r \frac{r_h}{\mu}$

$U_r$	:	특성속도, m/s
$h$	:	대류열전달 계수, $w/m^2 \cdot K$
$k$	:	열전도계수, $w/m \cdot K$
$r_h$	:	기포의 수평반경, mm
$r_z$	:	기포의 수직반경, mm
$z$	:	저온 평면 하향 수직방향
$\alpha$	:	열확산계수, $m^2/s$
$\beta$	:	체적열팽창계수, $K^{-1}$
$\delta$	:	평판사이의 거리, m
$\mu$	:	점성계수, $N \cdot s/m^2$
$\nu$	:	동 점성계수, $m^2/s$
$\rho$	:	밀도, $kg/m^3$
$\sigma$	:	표면장력, N/m

† 책임저자, 회원, 안동대학교 기계공학부  
 E-mail : ykeom@andong.ac.kr  
 TEL : (054)820-5496 FAX : (054)820-6127

\* 회원, 안동대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 안동대학교, 기계교육과

하첨자

$H$	:	고온부
$L$	:	저온부
$W$	:	벽면

## 1. 서론

온도구배로 인해 발생하는 유체유동은 열과 물질수송에 관련되어 공학적으로 매우 중요하다. 이 온도구배는 유체내부의 밀도를 변화시키고 중력으로 인한 부력유동을 야기 시킨다. 또한 하나의 시스템에 이상(two-phase)의 유체가 공존하는 경우 두 유체사이에는 불연속 경계면이 형성된다. 이때 온도구배가 발생하게 되면 불연속 경계면에서 국소 표면장력(surface tension)의 변화가 야기되고 불연속 경계면 주위의 유체입자를 이동시킨다. 이 경우 점성력에 의해 밀도가 낮은 유체가 밀도가 높은 유체 쪽으로 이동하게 되며 이러한 유동을 열모세관 유동(Thermocapillary Flow)이라 한다.

최근 우주 공간에서의 공학적 제 현상에 대한 연구가 진행되면서 열모세관 유동현상이 새롭게 주목받고 있다. 이들 연구의 관심사는 우주공간에서의 재료가공이나 열적제어문제 등이다.<sup>(1-5)</sup> 이러한 유동현상은 지상에서도 생체 시스템과 마이크로시스템에서의 유동과 열적 제어문제에서 나타날 수 있다. Raake 등<sup>(2,3)</sup>은 상단 수평가열평판에 기포가 형성될 때 경계면 주위에서 발생하는 열모세관 유동을 실험하였다. 그들의 실험에 따르면 경계면 주위에서 표면장력의 불균형으로 열모세관 유동이 발생하며, 그로 인해 유동 하단에는 2차 부력유동이 형성됨을 밝혔다. 이후 Wozniak 등<sup>(4)</sup>은 열모세관 유동의 명확한 구명을 위하여 중력장과 미세 중력장(micro-gravity)에서 각각 실험을 수행하였다. 그들은 상단수평가열평판에 기포가 형성될 때, 중력장내에서는 열모세관 유동과 온도구배로 야기되는 밀도차에 의한 부력유동이 동시에 형성되지만 미세 중력장에서 유동을 지배하는 것은 열모세관 현상임을 밝혔다. 한편 Kassemi 등<sup>(5)</sup>은 Wozniak의 실험 결과를 토대로 다양한 조건의 열모세관 유동을 수치 해석하였다. P. Arlabosse 등<sup>(6)</sup>은  $1 \leq Ma \leq 600$ ,  $100 \leq Pr \leq 1000$ ,  $Ra=0, 0.68, 1.38$  범위에서 기포 주위의 열모세관 현상에 대한 이론해석을 수행하여 각 무차원 수가 유동형태에 미치는 영향을 고찰한 바 있다. 그 결과  $Ra=0.68$   $Pr=250$ ,  $Ma < 250$ 일 때 한 쌍의 와류만 형성되며  $Ma > 250$ 에서는 1차 와류유동으로 인하여 유발되는 2차 와류유동이 발생하며,  $Ma=600$ ,  $Ra=0.68$  일 때  $Ma < 500$

에서 2차, 3차 와류유동이 발생하지만  $Ma > 500$ 일 경우 한 쌍의 와류만 형성됨을 구명하였다.

이상의 모든 연구는 유체의 초기 상태가 정적인 상태, 즉 가열상단평판과 냉각하단평판 사이에 액체가 채워져 있는 밀폐사각공동(closed square cavity)에 형성되는 전도기구(conduction mechanism)에서 가열상단평판의 표면에 기포가 순간적으로 형성될 경우 발생하는 유동현상의 구명에 관한 것이었다.

Eom과 Kwon<sup>(7)</sup>은 중력장하에서 밀폐사각공동내의 하단 평판이 가열되고 상단평판이 냉각되는 조건일 때 발생하는 Bénard 대류 유동장에서 냉각 상단평판에 기포를 주입·성장시킬 때, 기포가 밀폐사각 공동내의 온도장과 유동장에 미치는 영향을 구명한 바 있다.

그러나 중력장하에서 상단평판이 냉각되고 하단평판이 가열되는 조건일 때 자연대류가 형성되지 않는 전도열전달 기구에서 상단평판에 기포가 형성될 때 발생하는 열유동현상을 구명한 연구는 제시된 바 없다.

따라서 본 연구는 냉각된 상단평판에 크기가 다른 기포가 형성될 때 발생하는 열전달 기구 및 유동현상을 열감응(Thermo-sensitive Liquid-crystal : T.L.C)입자와 영상처리 기법을 이용한 실험으로서 구명하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 사각공동내의 열전달기구

열전달 매체가 유체이고 사각 공동의 상단 평판이 냉각되고 하단 평판이 가열될 경우 중력장내의 밀폐 사각 공동 내에서 유동이 형성되는 기점은 식 (1)에 제시된 레일리 수(Rayleigh number)에 의해 판정된다.

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_H - T_L) \cdot \delta^3}{\alpha \cdot \nu} \quad (1)$$

즉,  $Ra < 1708$  보다 적을 경우 전도열전달 기구가 발생하는 영역이고,  $Ra > 1708$  일 경우는 베나드 대류(Bénard convection)가 형성된다.

### 2.2 열모세관유동의 지배 무차원 수

열모세관 유동은 표면장력의 변화로부터 야기

된다. Fig. 1 와 같이 이상유체(two-phase)가 공존하는 경우 밀도가 큰 유체의 분자에 의하여 작용되는 인력은 밀도가 작은 유체의 분자에 의하여 작용되는 인력보다 크다. 따라서 경계면 근방의 액체분자는 밀도가 큰 액체 쪽으로 불 평형 인력을 받게 되어 액체 내에 퍼텐셜이 생성된다. 이 퍼텐셜에너지는 온도, 화학조성 그리고 전위의 함수로서 이들 중 어떤 하나의 구배 또는 그들의 조합이 표면장력의 변화를 이끄는 요인들로서, 그 유동기구에는 Fig. 1과 같다. 이러한 결과에 의해 발생하는 유동을 열모세관 유동이라 한다<sup>(2)</sup>.

중력장내에서는 Fig. 1과 같은 시스템에서 발생하는 열모세관 유동의 유동방향은 부력의 방향과 반대방향일 것이다. 이러한 기체-액체 시스템에서는  $\mu_g \ll \mu_l$ 과  $\alpha_g \ll \alpha_l$ 이 명백하므로 유동문제의 물리적 기술을 지배방정식으로부터 유도되는 무차원 변수를 액체에만 적용하는 것으로 간략하게 공식화 할 수 있다.<sup>(2,3)</sup>

중력장에서의 열모세관 유동에 관한 특성 속도  $U_r$ 은 유체표면에서의 접선력의 균형으로부터 얻어지며, 식 (2)와 같다.

$$U_r = \frac{r_h}{\mu} \left| \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right| \left| \frac{\partial T}{\partial z} \right| \quad (2)$$

열모세관 유동의 지배무차원수는 무차원 운동량방정식과 에너지보존 방정식으로부터 얻어지는  $Ma$  수(Marangoni number)와  $Bo$  수(Dynamic Bond number)에 의해 기술되며, 아래의 식 (3), (4)와 같다.

$$Ma = Re \cdot Pr = \frac{r_h^2 \left| \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right| \left| \frac{\partial T}{\partial z} \right|}{\mu \alpha} = U_r \frac{r_h}{\alpha} \quad (3)$$

$$Bo = \frac{Ra}{Ma} = \frac{g \beta |\partial T / \partial z| \delta^3 / \nu \alpha}{Ma} \quad (4)$$

$Ma$  수는 전도 열전달과 열모세관 대류에 대한 비로써 정의되며,  $Bo$  수는 표면력의 부력에 대한 비로 정의된다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치

밀폐 사각공동내에 기포의 형성으로 인해 발생하는 열모세관 현상 구명을 위해서는 실험 영역의 전 온도장과 전 유동장의 변화를 관찰하는 것을 필요로 하며 기포주위에서의 온도와 유속 측정은 기존의 접촉식 측정방법으로는 불가능하다. 따라서 본 실험에서는 실험 영역의 전 온도장과 전 유동장의 변화를 동시에 관찰할 수 있고 온도와 유속을 비접촉식으로 측정할 수 있는 TLC를 이용한 가시화 방법과 영상처리기법(Image Processing Technique, IPT)을 통해 제 현상을 구명하고자 한다.

Fig. 2는 실험장치의 개략도로서 실험장치의 구조는 크게 사각공동, 상·하 알루미늄 판, 공기 주입장치, 항온조, 광원과 광학시스템, 디지털카메라와 PC 그리고 항온실로 구성된다.

Fig. 3은 측정부의 개략도로서 사각공동과 상·하 알루미늄 판 그리고 공기 주입장치와 열전대의 위치를 자세히 도식화한 것이다. 사각공동은 내부에 실리콘오일을 채우는 공간으로 Fig. 3의 ⑦, ⑧, ⑨와 같이 수직 4면을 두께 5mm인 Plexiglas로 내부-79mm×30mm×10mm(길이×폭×높이)와 외부-99mm×50mm×10mm로 구성하고, 외부와 내부 사이에 5mm 공간을 둔 2중 구조로 하였다. 이중 구조는 가시화 영상 촬영에서 빛의 굴절현상을 보정하고 단열을 강화하기 위해서이다.

등온조건을 만들기 위한 상·하 평판은 알루미늄으로 제작되었으며, ⑫와 같이 사각공동의 수직 4면과 결합하여 밀폐 사각공동형태로 된다. 상·하 단 알루미늄과 Plexiglass 간의 열전달을 차단하기 위해 테프론판을 삽입하였으며 수밀을 위한 두

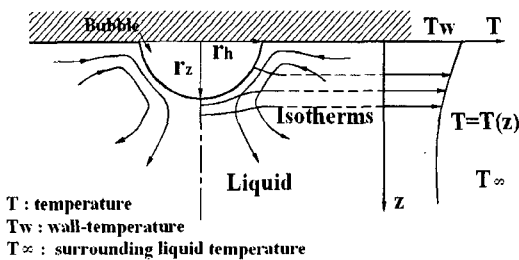


Fig. 1 Mechanism of thermocapillary flow around a bubble ( $T_\infty < T_w$ )

장의 실리콘 고무판을 삽입하였다. 상단알루미늄 평판에는 유체주입을 위한 2개의 구멍과 기포를 주입하기 위한 1개의 구멍을 만들었으며, 기포 주입을 위하여 마이크로미터 가스주사기 부착하였고, 보다 정밀한 주입을 위하여 감속기어가 부착된 제어 직류모터를 장착하였다.

상단 알루미늄평판의 표면온도를 측정하기 위해 2개의 보정된 열전대( $\phi=0.3\text{mm}$ , T-type)를 설치하고, 하단 알루미늄평판에는 보정된 3개의 열전대를 설치하였다. 이때 보다 정밀한 온도 측정을 위하여 ⑭에 나타낸바와 같이 잘게 쪼갠 얼음이 공존하는 0°C의 항온조에 T/C 냉 접점을 설치하여 측정하였으며 오차범위는 0.2°C이다. Fig. 2의 항온조는 상하 알루미늄 판의 등온조건을 설정하기 위한 것으로 2대의 항온조(LAUDA-RE220)가 사용되었다.

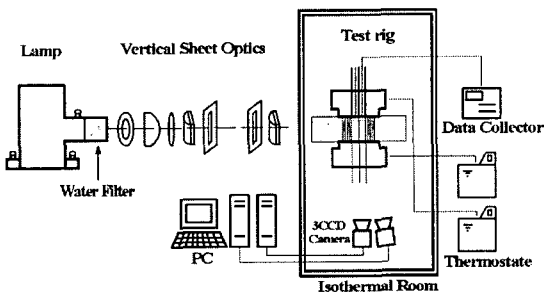
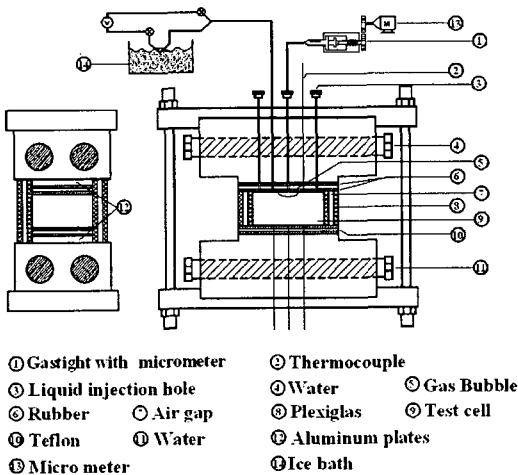


Fig. 2 Experimental setup



- ① Gaslight with micrometer
- ② Thermocouple
- ③ Liquid injection hole
- ④ Water
- ⑤ Gas Bubble
- ⑥ Rubber
- ⑦ Air gap
- ⑧ Plexiglas
- ⑨ Test cell
- ⑩ Teflon
- ⑪ Water
- ⑫ Aluminum plates
- ⑬ Micro meter
- ⑭ Ice bath

Fig. 3 Schematic view of the test rig

항온실 내부(Isothermal room)의 설정온도는 상하 알루미늄평판에 설정된 온도의 평균값인 20.7°C로 조절하였으며 오차범위는 0.5°C이다.

밀폐 사각공동 내부의 실험 매체는 100 cent-stokes의 실리콘오일을 사용하였으며 20°C에서의 상세한 물성치를 생산회사의 자료와 물성값 계산식을 적용하여<sup>(8)</sup> Table 1에 정리하였다.

가시화입자는 캡슐형 열 감응액정입자를 사용하였으며, 구체적인 특성 값들은 Table 2에 요약하였다. 열 감응 액정 입자의 실리콘오일 내 투입량은 온도장이나 유동장에 영향을 주지 않는 범위로 알려진 실리콘오일 질량의 0.1%를 투입하였다.<sup>(9-11)</sup> 사용된 열 감응 액정 입자에 가시화를 위한 백색광이 조사되면, 액정입자들은 온도에 따라 각기 다른 RGB color를 반사하며, red에서 시작되어 온도가 증가할수록 blue쪽으로 변한다. 온도반응 범위는  $\Delta T \approx 2.5\text{K}$ 이며 그 밖의 범위에서는 어떤 색도 표현하지 않는다. 1000W Xenon Lamp는 가시화를 위한 백색광을 발광시키기 위한 장치로서, 발광된 백색광원은 1개의 spherical lens와 2개의 cylindrical lens 그리고 2개의 조리개를 거치면서 실험에 필요한 1.5mm 두께의 얇은 평면 빔으로 만들어진다. 광원 중 자외선은 열감응 액정을 손상시킬 우려가 있으므로 400nm 이하의 자외선영역 대 파장을 제거하기 위한 UV

Table 1 Properties of silicon oil at 20°C. Ref.(8)

Kinematic viscosity, $\nu$	$1.109 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$
Thermal diffusivity, $\alpha$	$1.1 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$
Density, $\rho$	$969.4 \text{kg}/\text{m}^3$
Volumetric thermal expansion, $\beta$	$95.46 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$
Surface tension, $\sigma$	$21.2 \times 10^{-3} \text{N}/\text{m}$
Variation of surface tension with temperature ( $\partial\sigma/\partial T$ ) <sup>(13)</sup>	$6.17 \times 10^{-5} \text{N}/\text{m K}$

Table 2 Properties of TLC

Temperature range	19.5K ~ 22K
Red start	19.5 K
Density	$998 \text{kg}/\text{m}^3$
Response time	0.23 msec
Diameter	20 $\mu\text{m}$
Resolution	$\pm 0.2 \text{K}$

filter를 사용하였다. 디지털카메라(Nikon DX1)는 열 감응 액정입자에서 반사되는 RGB color 영상을 획득하고, 획득된 영상은 PC에서 저장되어 영상처리 기법을 통한 온도장과 입자의 궤적에 의한 유동장을 동시에 해석하게 된다. 카메라 노출 시간은 20초로 하여 촬영하였다.

### 3.2 실험방법

실험과정은 크게 온도보정 실험과 본 실험으로 수행된다. 온도보정 실험은 실험준비가 완료된 후 본 실험이 수행되기 전에 이루어진다.

온도보정 실험은 열 감응액정으로부터 반사된 빛, 즉 RGB color와 이때 측정되는 온도와의 관계를 보정하는 것이 목적이다. 실험을 수행하기 위하여 사각공동과 상·하 알루미늄평판 결합 후 실리콘오일과 열 감응액정입자를 혼합하여 밀폐 사각공동에 주입한다. 상·하단 알루미늄 평판을 순환 형 항온조를 이용하여 하단은 19.7℃ 등온면, 상단은 21.7℃ 등온면으로 설정하면, 사각공동내의 혼합유체는 준 평형상태의 온도성층화가 형성된다. 성층화된 유체내부로 광학시스템에서 만들어진 1.5mm 얇은 수직평면 빔을 사각공동 중앙단면에 조사하면 TLC에 의해 성층화된 유체온도와 대응되는 Color 빛을 발산하게 된다. 이 Color 빛을 디지털카메라에 의해 RGB영상으로 잡아 PC에 저장된다. 이와 동시에 상단알루미늄 평판의 구멍을 통하여 열전대(T-type,  $\phi$ : 0.13mm)를 혼합유체내에 삽입하고 수직이송장치로 상단에서 하단으로 1mm 간격씩 이송하면서 각 지점의 온도를 측정한다. 열전대 측정지점의 온도값과 디지털카메라 영상값을 대응시키고 영상처리 기법을 통하여 온도보정을 한다.

본 실험은 온도보정 실험이후 상단을 19.7℃ 등온 면으로, 하단을 21.7℃ 등온 면으로 가열하여도 사각공동내 열전달 기구는 대류가 일어나지 않는 전도열전달 기구가 형성된다. 이는 식 (1)에 의해 본 연구조건을 산출하면  $Ra$  수 가 1534 이기 때문이다. 이러한 조건에서 상단 알루미늄평판의 표면에 기포를 형성하기 위해 마이크로미터가 부착된 가스주사기로 공기를 주입한다. 공기 주입 시 이중 기포형성이나 외부교란이 발생하지 않도록 마이크로미터를 조심스럽게 작동해야 하며 이를 위해 제어 기어직류모터를 사용하였다. 기포주입과 동시에 촬영이 이루어지며, 하나의

기포에서 실험이 완료되면, 다시 초기상태에서 다른 크기의 기포를 주입하여 각각의 상태에 대한 실험을 진행하였다. 기포의 크기는 기포의 반지름을 1.80mm부터 5.86mm까지 단계별로 증가시켜 주입하였다. 이때 기포의 형상은 거의 납작 타원형이 되며 기포의 반지름은 기포의 수평방향으로 가장 긴반지름을 택하였다. 실험의 범위는  $Pr=1008$ ,  $Ra=1534$ ,  $37.5 \leq Ma \leq 391.5$ 이다.

## 4. 영상처리와 온도보정

RGB 영상 값을 온도 값으로 표현하는 영상처리 방법은 RGB 값을 Hue 값으로 전환한 후, 온도 값과 연계하는 방법<sup>(10,11)</sup>과 RGB 값으로부터 신경회로망 이론을 이용한 보정 방법<sup>(12)</sup>이 있으나, 본 실험에서는 일반적으로 이용되고 있는 전자의 방법을 사용하였다. 온도보정 영상처리는 표본이미지를 획득한 후, Fortran언어를 사용하여 영상처리 알고리즘을 작성한다. 이러한 과정은 look-up table을 구성하기 위함이다. 이는 하나의 pixel이 가지는 특정 색에 대응되는 온도 값을 결정하기 위한 과정이며, 획득된 RGB영상은 식 (5)의 영상처리 알고리즘을 통해 Hue값으로 변환된 후 열전대를 통해 얻어진 온도 값과 일치시켜 look-up table을 구성한다. Fig. 4는 상기의 결과에서 얻어진 Hue값, H와 측정온도의 결과값, T의 관계를 도식한 것이며 이들 결과의 상관관계식은 식 (6)과 같다. 식 (6)은 온도 보정 실험의 최종 결과이며, 이러한 과정은 본 실험에서 획득된 790×100 pixels image의 전체 온도장 영상처리에 사용된다.

$$H = \cos^{-1} \left[ \frac{\frac{1}{2}(R-G) + (R-B)}{\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right] \quad (5)$$

$$T = 15.25213 - 1.58796H + 0.04131H^2 \quad (6)$$

디지털카메라를 통해 획득된 RGB 영상은 약간의 Noise를 포함할 수 있다. 이러한 잡음들의 제거를 위한 필터링 방법으로 median filter와 mean filter를 적용하였다.

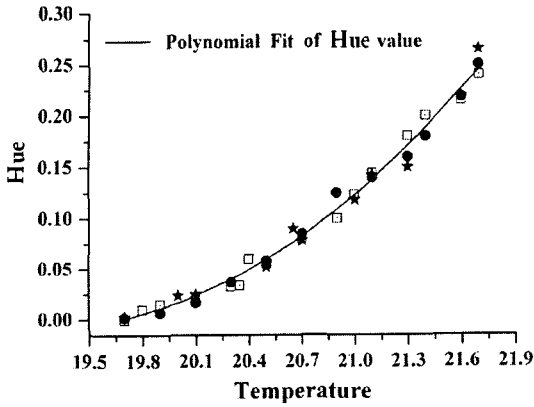


Fig. 4 Relationship between Hue and temperature

5. 결과 및 고찰

Fig. 5는 상단온도  $T_L = 19.7^\circ C$ , 하단온도  $T_H = 21.7^\circ C$ 일 때 기포를 주입하지 않은 상태에서 사각공동 내부에 형성된 유동장과 온도장을 나타낸 결과 사진이다. 사진의 노출시간은 20초이다. Fig. 5(a)는 실험 1분후 초기사진이며, Fig. 5(b)는 20분경과 후 사진이다. 사진에 제시된 바와 같이 시간이 지나도 유동은 발생하지 않고 준정상상태가 유지됨을 볼 수 있다. 보이는 바와 같이 온도분포의 성향은 유동 발생 없이 전도에 의해서만 열전달이 일어나는 준 정상상태의 성층 온도장을 형성한다.

Fig. 5(c)는 Fig. 5(b)를 영상 처리한 결과를 제시한 것이다. 그림 상단과 좌측단의 수치는 밀폐 사각공동의 크기(mm)를 나타낸 것이며, 하단의 수치는 색깔에 따른 온도( $^\circ C$ )값을 나타낸 것이다. 상단의  $19.7^\circ C$  영역을 붉은색으로 시작하여 하단으로 내려가면서 색깔이 변화하면서 하단 영역  $21.7^\circ C$ 에서는 청색을 나타내고 있다. 제시된 결과에서 볼 수 있듯이 실리콘 오일로 채워진 사각공동내의 상태는 시간이 지나도 온도장은 전형적인 성층구조로 전도에 의해서만 열전달이 발생함을 볼 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5의 조건에서 상단냉각표면에 반지름( $r_h$ ) 1.80(mm) 기포가 형성되었을 때의 결과이다. 기포의 형상은 유체내부에 작용하는 정압으로 인해 타원형에 가까우며 반경( $r_h$ )은 앞서

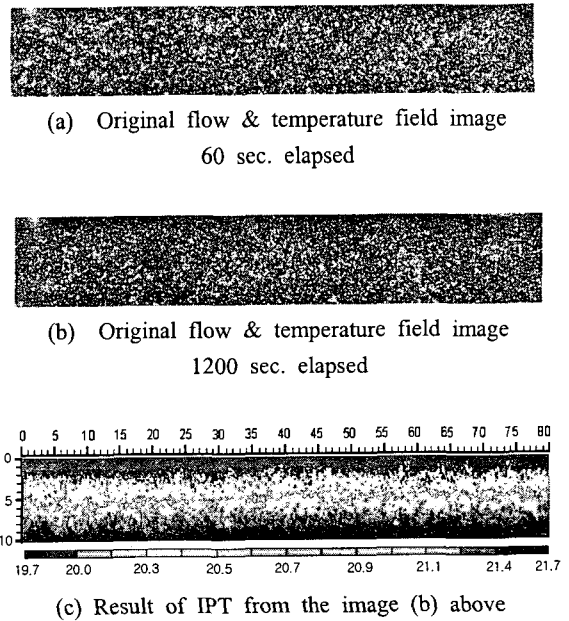
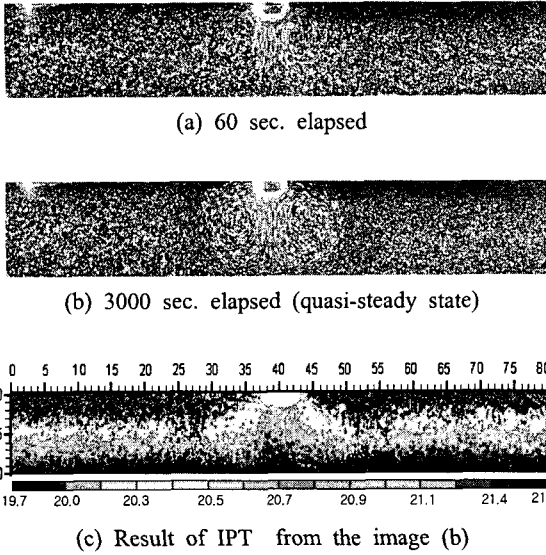


Fig. 5 Quasi-steady state temperature and flow fields( $Pr=1008, Ra=1534, \Delta T=2K$ )

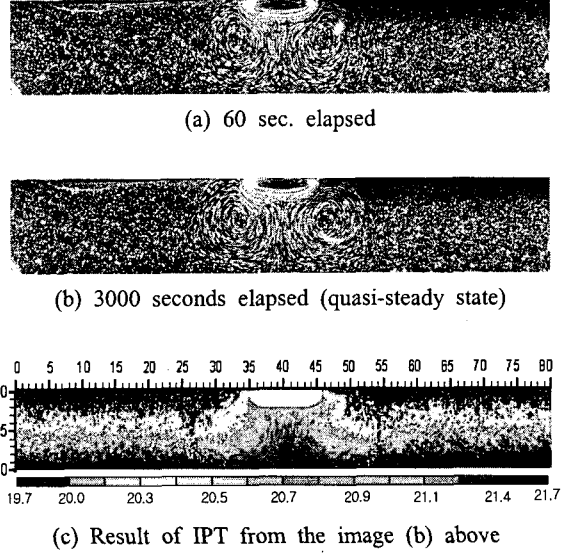
제시된 바와 같이 기포의 가로방향의 반지름을 의미한다. 이때 기포는 상단평판 정 가운데에 주입되어 진다. Fig. 6(a)는 기포 주입 후 1분이 경과한 가시화 사진이며, Fig. 6(b)는 기포 주입 후 50분이 경과한 가시화 사진이다. 사진 노출시간이 20초이므로 시편중앙에 형성된 와류의 유동계측은 20초 동안 열감응액정이 이동한 거리가 된다. 가시화 사진의 Fig. 6(a)는 발생된 와류유동이 성장하고 있는 과정의 사진으로서 유동영역이 작고 미약하다. 50분의 시간이 경과한 후의 결과인 Fig. 6(b)의 사진에서는 와류유동이 준 정상상태에 도달하게 되며, 와류유동의 영역은 Fig. 6(a)와 비교했을 때 보다 크고 명확해진 것을 알 수 있다. 이와 같은 와류유동은 Fig. 1에 제기된 바와 같이 기포표면에서 발생하는 열모세관현상에 의해 형성 된다. 본 실험은 Fig. 1에 제시된 상단과 하단표면의 온도조건과 정반대이므로 기포중앙을 중심으로 우측영역에서 표면장력에 의한 유체의 유동은 우·상향방향으로 이동하게 되고 이로 인해 점성력과 부력 그리고 연속법칙의 상호작용에 의해 기포를 중심으로 와류유동이 형성 된다. 따라서 와류의 유동방향은 우측와류는 반시계방향이고 좌측와류는 시계방향이 된다. 이와 같이 준



**Fig. 6** Original flow & temperature field images, a Result of IPT (c), at  $r_h = 1.8\text{mm}$ ,  $r_z = 1.57\text{mm}$   $Pr=1008$ ,  $Ra=1534$ ,  $Ma=37.5$

정상상태에 도달한 와류유동은 약 2시간이 경과해도 주위 유동장에 2차 와류유동의 발생은 없었고 한 쌍의 와류유동만이 존재하는 것을 관찰할 수 있었다. Fig. 6(c)는 와류유동이 준 정상상태에 도달했을 때의 사진 Fig. 6(b)를 영상처리한 결과로서, 기포 형성 후 발생한 한 쌍의 와류유동으로 인한 온도장의 변화를 정성적으로 잘 나타내주고 있다. 기포의 가운데 아래쪽에서 뜨거운 영역의 유체가 위쪽으로 유입되고 있으며, 기포 좌·우측의 상단 부근에서 차가운 영역의 유체가 아래쪽으로 유입되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 7은 주입된 기포의 반지름이 3.68mm인 경우의 결과이다. 주입된 기포의 크기가 Fig. 6의 것 보다 커짐으로 인해 경계면의 영역이 확장되고 표면장력의 변화 영역이 더욱 커진다. 그 결과 Fig. 6의 1.8mm인 경우보다 각 시간대에서 유동속도도 증가하고 한 쌍의 와류유동은 그 영역이 더욱 커지고 유동형태 또한 더욱 명확해진 것을 알 수 있다. 여기서도 60 sec 경우 보다 3000sec 인 경우 유동형태가 명확해진 것을 알 수 있다. 또한 1800 sec에서 3000sec까지 실험이 진행되는 동안 유동형태는 일정하였으며 Fig. 7(b)와 같이 제2의 와류는 형성되지 않았다. Fig.

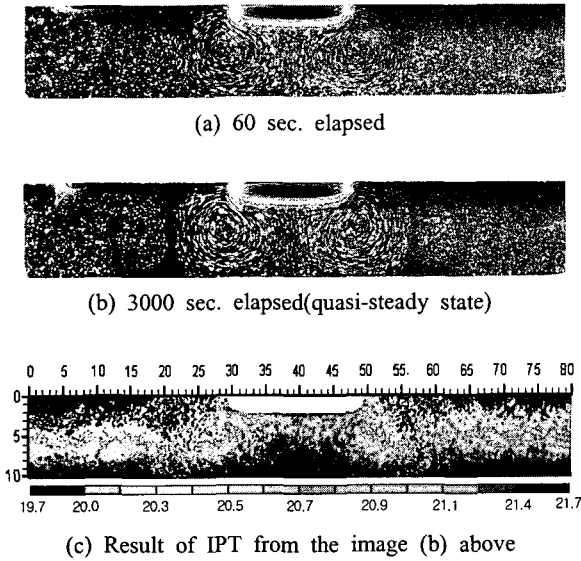


**Fig. 7** Original flow & temperature field images and a result of IPT, at  $r_h = 3.68\text{mm}$ ,  $r_z = 1.93\text{mm}$   $Pr=1008$ ,  $Ra=1534$ ,  $Ma=156.55$

7(c)는 영상처리 결과를 나타낸 것이다. 기포중앙 아래영역에서 하단으로부터 상승하는 더운 유체가 기포표면까지 도달하고 양 와류의 좌·우측 영역의 하단 쪽으로 차가운 유체가 도달하는 것을 볼 수 있다.

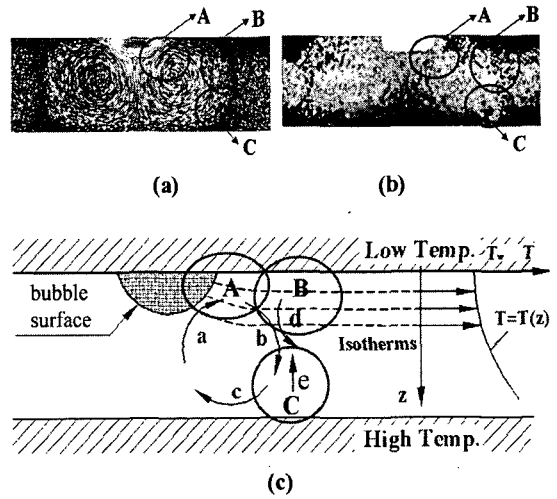
Fig. 8은 주입된 기포의 반지름이 5.82mm인 경우의 결과이다. Fig. 7에서 주입된 3.68mm인 경우보다 큰 기포가 형성됨으로 인해 와류유동의 영역이 더욱 커진 것을 볼 수 있다. 기포의 형상이 세로보다 가로 축으로 커진 결과, 두 와류기구는 좌·우측으로 이동하고 기포중앙 및 아래영역의 유동은 미약해진다. 하지만 여기서도 시간이 지나도 제2의 와류는 형성되지 않았다. Fig. 8(c)의 영상처리결과를 보면 기포중앙의 아래영역의 온도장은 단일청색영역으로 나타나며 이는 온도구배가 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 따라서 이 영역은 유동이 발생할 수 없다.

Figs. 6, 7, 8의 그림에서 보는 바와 같이 기포의 주입으로 한 쌍의 와류유동이 발생하였으며, 시간이 경과함에 따라 유동은 준 정상상태에 도달하였다. 이 후 상당한 시간이 경과하여도 주위 유동장에 제2의 와류유동은 형성되지 않았다. 기존의 연구자들<sup>(1-3)</sup>은 중력장(1g)에서는 1차 와류유동에 의한 2차 와류가 형성되는 결과를 제시



**Fig. 8** Original flow & temperature field images and a result IPT, at  $r_h = 5.82m$ ,  $r_z = 2.36mm$   $Pr=1008$ ,  $Ra=1534$ ,  $Ma = 391.5$

하였지만 P. Arlabosse등<sup>(6)</sup>은  $1 \leq Ma \leq 600$ ,  $100 \leq Pr \leq 1000$ ,  $Ra=0, 0.68, 1.38$  영역의 수치해석결과에서  $Ra$  수와  $Pr$  수가 일정( $Ra=0.68$ ,  $Pr=250$ ) 할 때  $Ma$  수가 적은 영역( $Ma < 250$ )에서, 또한  $Ma$  수가 커더라도( $Ma=600$ )  $Pr$ 수가 큰 범위( $Pr > 500$ )에서는 각각 한 쌍의 와류만 형성됨을 밝힌 바 있다. 그러나  $Ma$  수가 적고,  $Pr$  수가 큰 영역에서  $Ra$  수 변화에 따른 유동구조는 제시하지 않았다. 본 연구의 결과는  $Pr=1008$ ,  $Ra=1534$ ,  $37.5 \leq Ma \leq 391.5$  일 때 이다. 이는 P. Arlabosse 등의 연구결과에서 제시된  $Ma$  수가 적고  $Pr$  수가 큰 영역에서의 일반적 경향(1차 와류만 존재)과 일치 하지만  $Ra$  수는 1534로 큰 영역 이므로 P. Arlabosse등이 제시하지 못한 영역이다. 따라서 이러한 연구결과를 더욱 자세히 고찰하기 위하여 가시화 사진과 유동기구 개략도를 Fig. 9에 제시하였다. 유동의 시발은 Fig. 9의 A 영역에서 시작된다. A 영역은 온도구배로 계면에서의 표면장력 구배가 발생하고 이로 인하여 유동은 계면을 따라 밀도가 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 즉, 좌측에서 우측으로 유동이 발생하며, 이어서 부력이 존재하는 a영역에서 연속법칙에 따라 유동이 발생



**Fig. 9** Physical Mechanism of Experimental result  
(a) Visualization. (b) Result of IPT (c) Schematic diagram for flow mechanism

하여 더운 유체가 상단으로 유입 된다[Fig. 9(b)]. 이로 인하여 A 영역의 온도구배가 더욱 커지면서 열모세관 현상에 의한 구동력이 커지게 되고 연속법칙을 만족하기 위한 유동 a, b, c로 이어지는 와류유동이 형성된다. 보편적으로 이러한 유동기구에서는 b, c 유동으로 인한 마찰력과 점성력에 의하여 d와 같은 하향유동의 시발로 제2의 유동이 발생한다. 그러나 본 연구 결과에서는 오직 한 쌍의 와류만 존재 하였다. 이와 같은 현상은 b와 c로 이어지는 하향 유동체의 온도가 주위 온도보다 낮고[Fig. 9(b)의 C], 이로 인하여 b, c 와류유동의 바깥 영역은 상대적으로 더욱 강한 상향부력(C의 e)이 형성된다. 이러한 상향 부력이 b, c 유동으로 인한 하향 마찰력 및 점성력과 평형을 이루면서 제2의 와류는 형성되지 않는 것으로 사료된다.

Fig. 10은 영상처리를 통해 기포 크기에 대한 특징지점의 유동속도를 측정하기 위하여 유동장에서 새롭게 설정한 좌표계를 도시한 것이다. 설정방법은 기포 우측 끝단을 y축으로 정의하고 시편 상단으로부터 1mm 아래의 평행선을 x축으로 하는 좌표를 기준좌표로 설정하였다. 기준좌표의 원점과 와류유동의 중심을 잇는 선을  $y_1$  축으로 설정하고  $y_1$  축에 수직인 축을  $x_1$  축으로 하여 제



2의 기준좌표로 정의하였다. 이와 같이 제 2의 좌표를 설정하는 이유는, 각 기포에 따른 유동속도를 측정 비교 할 때 기포표면의 영향을 기준으로 하기 위해서이다. 제시된 각 기포에 대한 유동속도의 측정 지점은 제2기준 좌표의 원점으로부터  $y_1$ 축 방향으로 1mm 아래의 영역, P,  $\{50 \times 150(\text{pixel})\}$ 에 위치하는 TLC 입자의 유동체적을 계산한 것이다. 유동계산은 촬영된 이미지들을 오버랩하여 일정지점에 있는 입자체적을 pixel로 계산하였다. 1 pixel은 약 0.000847mm이다.

Fig. 11는 Fig. 10에서 설명한 방법으로 유속을 계산하여 그 결과를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 11에 나타낸 바와 같이 기포의 크기에 따라서 다소 차이는 있지만 실험을 수행한 모든 기포에 대하여 기포 주입 후 약 5분간에 걸쳐 급격한 속도변화가 발생하고, 그 후 5분에서 25분 사이의 약 20분간에 걸쳐 속도변화가 서서히 사라지면서 준 정상상태에 도달하게 된다. 그 후 유동속도는 거의 변화가 없는 평형상태를 이루게 됨

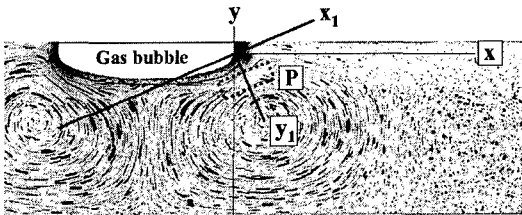


Fig. 10 New Coordinate for velocity calculation

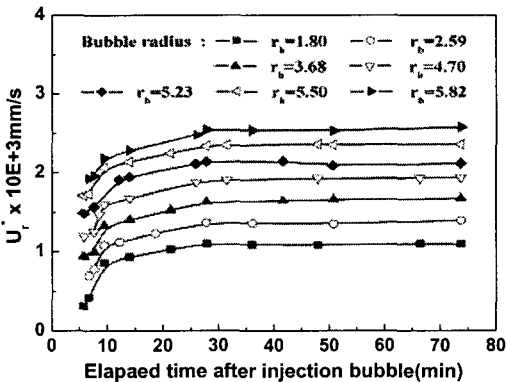


Fig. 11 Velocity of flow field under different bubble radiuses with time. at  $y_1=1$  (mm)

을 그래프를 통해 알 수 있다. 또한 주입된 기포의 반지름이 증가함에 따라 유동속도 또한 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 앞서 제시된 바와 같이 기포의 크기와는 상관없이 일정시간이 경과되면 한 쌍의 와류유동이 준 정상상태에 도달하게 되며, 이 후 주위 유동장에 제2의 와류유동이 되지 않음을 정량적으로 증명할 수 있는 결과라 할 수 있다.

Table 3은 각 기포에 대한 무차원 그룹을 계산한 결과를 제시한 것이다.  $U_r$  값,  $Ma$  수 및  $Bo$  수는 앞에서 제시한 Table 1의 물성치를 적용하여 식 (2), (3), 그리고 (4)에서 각각 구한 것이다.  $U_r^*$  값은  $y_1=1$  (mm)에서 측정한 유속값으로 Fig. 11의 결과에서 25분 후 정상상태의 값들을 제시한 것이며  $Ma^*$  수 및  $Bo^*$  수는  $Ma$  및  $Bo$  수의  $U_r$  값 대신  $U_r^*$  값을 적용한 값이다.

Fig. 12는 Table 3의  $U_r$ ,  $U_r^*$ 을 도식한 것이며  $U_r^{**}$ 는  $U_r^*$ 에 실험기포의 반경비,  $r_h/r_s$ , 를 곱한 값이다. Fig. 12에서 보이듯이 이론값과 실측값이 차이를 나타내고 있다. 이는 이론값은 표면의 속도이고 실험치는 기포로부터 1mm 떨어진 곳에서 유속이므로 이론값보다 적은 값이 된다. 또한 기포 반경의 증가에 따른 유속의 구배는 이론계산 결과가 실험결과보다 크다. 이는 이론계산식에서 기포 형상을 정원으로 가정한 반면 실제실험에서는 유체내부에 작용하는 정압으로 인해 Fig. 6, 7 및 8과 같이 기포의 형상이 타원형으로 형성됨으로서 수평반지름( $r_h$ )이 커질수록 이론값의 수직반지름( $r_s$ )은 수평반지름과 동일하게 커지지만 실험의 기포 수직반지름( $r_h$ )은 아주 적게 커지기

Table 3 Dimensionless groups related to bubble radius, at  $y_1=1$ (mm)

$r_h$ (mm)	$U_r$	$U_r^*$	$Ma$	$Ma^*$	$Bo$	$Bo^*$
1.80	0.00229	0.00115	37.5	18.8	40.9	81.6
2.59	0.00329	0.00149	77.5	34.4	19.8	44.6
3.68	0.00468	0.00189	165.5	63.2	9.8	24.3
4.70	0.00598	0.00213	255.5	91.0	6.0	16.9
5.23	0.00666	0.00231	316.6	109.8	4.8	14.0
5.50	0.00700	0.00242	350.0	115.1	4.4	13.3
5.82	0.00740	0.00252	391.5	119.8	3.9	12.8

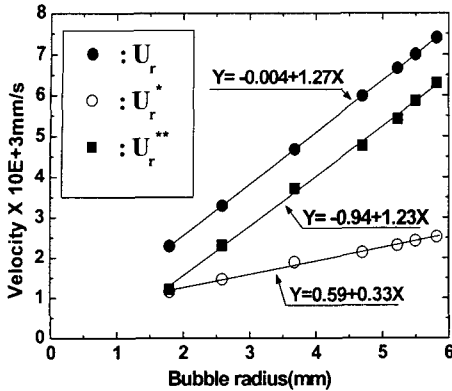


Fig. 12 Relationship between bubble radius and velocity

때문이다. 이러한 결과를 유속계산식 (2)에 적용하면  $\left| \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right| \left| \frac{\partial T}{\partial z} \right|$  값이 실험조건에서는 이론조건보다 적어지고, 유속값도  $r_h$ 가 증가할수록 적게 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 물리적 경향은 실험에서 나타나는 타원형 효과를 보정하기 위하여  $U_r^*$ 에 실험기포의 반경비( $r_h/r_z$ )를 곱한  $U_r^{**}$  값의 그래프 구배와  $U_r$  값의 그래프 구배가 거의 일치하고 있는 결과에서도 입증된다.

Fig. 13는 Table 3의 무차원 그룹  $Ma$  수  $Ma^*$  수 및  $Bo$  수  $Bo^*$  수를 도시한 것이다. 그림에서 나타난바와 같이  $Ma$  수 및  $Ma^*$  수는 기포의 크기가 커짐에 따라 커지고 있으나  $Ma$  수에 비해  $Ma^*$  수의 증대는 감소하고 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 실험에서 기포형상의 타원형으로 형성됨으로써 나타나는 결과이다.

$Bo$  수 및  $Bo^*$  수는 기포의 크기가 증가함에 따라 감소하고 있다. 이는  $Ra$  수가 일정한 상태에서  $Ma$  수 및  $Ma^*$  수가 증가하면  $Bo$  수 및  $Bo^*$  수는 감소하게 된다. 이러한 결과는 기포 주입으로 발생된 와류유동의 구동력은 부력에 의한 것보다 열모세관현상에 의한 것이 지배적임을 보여주는 것이다.

### 6. 결론

본 연구는 유체로 채워진 밀폐사각공동 내에

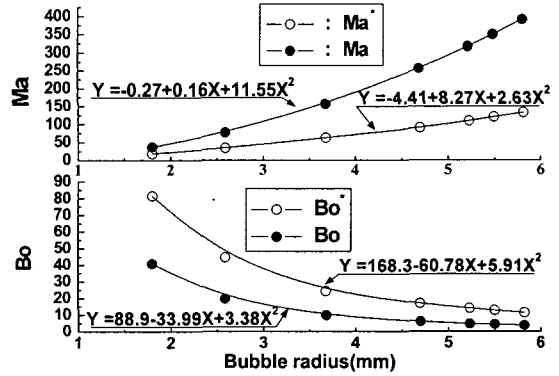


Fig. 13 Relationship between bubble radius and dimensionless group

안정된 성층온도구조로 인하여 전도 열전달 기구가 형성될 때, 크기가 다른 기포를 각각 주입할 때 발생하는 유동장과 온도장의 변화를 실험으로써 구명하였다.  $Ra$  수가 1534인 조건에서 열 감응액정을 이용한 비 접촉 측정방법과 영상처리 기법을 적용하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기포의 주입으로 인한 표면장력의 변화는 유동이 없는 성층화된 온도장내에 와류유동을 유발시킨다.
- (2) 각 기포에 대한 온도차의 온도값과 유동장의 유동속도 값을 TLC를 이용한 가시화방법과 영상처리 기법으로 계산하여 제시하였다.
- (3) 기포의 크기에 따른 유동속도에 대한 이론계산 결과 값과 실험에 의해 얻어진 결과 값은 많은 차이를 나타내었다.
- (4)  $Pr=1008$ ,  $Ra=1534$ ,  $37.5 \leq Ma \leq 391.5$  범위에서는 열 모세관 현상에 의해 발생된 와류유동은 기포의 크기에 상관없이 한 쌍의 일정한 크기로 유지되며, 주위에 제2의 와류유동은 형성되지 않는다.

### 후 기

본 논문은 2003년 안동대학교 정책연구과제 사업의 일환으로 수행되었으며 관계기관에 감사 를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Chun, Ch-H. and Wuest, W., 1989, "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) Raake, D., Siekmann, J. and Chun, Ch-H., 1989, "Temperature and Velocity Fields due to Surface Tension Driven Flow," *Experiments in Fluids*, Vol. 7, pp. 1714~172.
- (3) Raake, D. and Hansmann, G., 1991, "Oscillating Convection Modes in The Surroundings of an Air Bubble Under a Horizontal Heated Wall," *Experiments in Fluids*, Vol. 11, pp. 359~367.
- (4) 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.
- (5) Kassemi, M. and Rashidnia, N., 1997, "Steady and Oscillatory Flows Generat-Ed by a Bubble in 1-G and Low-Gravity Environments," 35th *Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*(AIAA 97-0924), Reno. NV.
- (6) Arlabosse, P., Lock, N., Medale, M. and Jaeger, M., 1999, "Numerical Investigation of Thermo-capillary Flow Around a Bubble," *Physics of Fluids*, Vol. 11, No. 1, pp. 18~29.
- (7) Eom, Y. K. and Kwon, G. H., 2001, "The Effect of Heat Transfer from the Bubble Growing in The Benard Convection Flow in a Square Cavity," *Proceedings of the KSME 2001 Fall Annual Meeting*, Vol. B, pp. 211~216.
- (8) Shin Etsu Chemical Co., Ltd., "Silicone Fluid KF96 Performance Test Results."
- (9) Ostrach, S., 1982, "Low-Gravity Fluid Flows," *Ann. Rev. Fluid Mech*, Vol. 14, pp. 313~345.
- (10) 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," *Experiments in Fluids*, Vol. 12, pp. 213~222.
- (11) Dabiri, D. and Gharib, D., 1996, "The Effects of Forced Boundary Conditions on Flow Within a Cubic Cavity Using Digital Particle Image Thermometry and Velocimetry(Dpiv)," *Exp. Thermal and Fluid Science*, Vol. 13, pp. 349~363.
- (12) Ozawa, M., Shinoki, M., Kimura, I. and Umekawa, H., 1997, "3-D Temperature Measurement of Natural Convection by Image Processing Technique," *The Visualization Society of Japan*, Vol. 17, No. 64, pp. 41~45.
- (13) Hiroki, K., E. Yuri., Solomentsev., Scott A. Guelcher., Paul J. Sides. and John L. Anderson., 2000, "Thermocapillary Flow and Aggregation of Bubbles on a Solid Wall," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 232, pp. 111~120.
- (14) Baughn, J. W., Anderson, M. R., Mayhew, J. E. and Wolf, J. D., 1999, "Hysteresis of Thermochromic Liquid Crystal Temperature Measurement Based on Hue," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 1067~1072.