

## TLC 비접촉 온도측정과 중력장에서 열모세관 현상 구명

엄용균(안동대 기계공학부), 유재봉\*(안동대 대학원 기계공학과)

### A Measurement of Temperature by TLC without Contact and A Study of Thermocapillary Flow under Ground-based Conditions

Yong-Kyoon Eom (Mechanical Eng. Dept., ANU), Jae-Bong You\* (Graduate school Mechanical Eng., ANU)

#### ABSTRACT

In a closed square cavity filled with a liquid, a cooled the upper horizontal wall and a heated the lower horizontal wall, the flow isn't generated under the ground-based condition when Rayleigh number is lower than 1700. In such case the flow phenomena near an air bubble under a cooled horizontal wall were investigated. The temperature and the flow fields were studied by using the Thermo-sensitive Liquid-Crystal and the image processing. The qualitative analysis for the temperature and the flow fields were carried out by applying the image processing technique to the original data. Injecting bubble at the center point of upper cooled wall, the symmetry shape of two vortexes near an air bubble was observed. The bubble size increased, the size of velocity and the magnitude of velocity increased. In spite of elapsed time, a pair of two vortexes was the unique and steady-state flow in a square cavity and wasn't induce to the other flow in the surround region.

**Key Words** : Air bubble (기포), Image processing (영상처리), Ground-based condition (중력장)  
Thermocapillary Flow (열 모세관 유동), Thermo-Sensitive Liquid-Crystal (열감응 액정)

#### 1. 서론

액체와 접촉하고 있는 벽면에 gas 또는 기포(air bubble)의 존재로 인하여 발생하는 열모세관 현상(Thermocapillary phenomena)은 지상이나 우주공간에서의 재료공정, 화학공정, 산업공정에서 발생하는 열과 물질전달에서 중요한 공학적 문제로 대두되고 있다. 이러한 열모세관 유동에 대한 근래의 연구는 크게 중력장(ground-based condition)에서의 연구<sup>1,2</sup>와 미세중력장(micro-gravity condition)에서의 연구<sup>3-5</sup>로 대별될 수 있다.

이들 연구그룹의 공통모형은 가열상단 평판과 냉각하단평판 사이에 액체로 채워져 있는 밀폐사각공동(square cavity)시스템, 즉 대류현상이 일어나지 않는 구조에서 가열 상단평판 표면에 기포가 존재할 때 발생하는 유동현상 구명이었다.

최근의 주된 관심사는 이러한 시스템에 미세중력장의 작용에 관한 것이었고, 중력장하에서 연구 결과<sup>1,2</sup>는 유동장의 다중 vortex 의 형성과 유동의

진동 형태에 관한 것이었다.

한편, 최근 Eom 과 Kwon<sup>6</sup>은 중력장에서 Bénard 대류가 형성된 밀폐 사각공동 시편에서 상단 냉각 평판에 기포를 주입하여 열모세관 현상이 Bénard 대류에 미치는 영향을 구명한 바 있다. 이 연구는 대류가 형성된 열전달 구조에서도 열 모세관 현상이 대류열전달 구조를 크게 변화시킨다는 결과를 제시 하였다.

일반적으로 사각공동시편 내에서 Rayleigh 수가 1700 이하인 경우 중력장하에서는 하단 평판이 가열되고 상단 평판이 냉각되는 구조이더라도 대류가 형성되지 않고 전도(Nu=1)에 의해서만 열전달이 이루어진다. 그러나 Raleigh 수가 1700 이상인 경우는 대류열전달이 형성되어, Bénard 대류라는 유동현상이 나타난다.

본 연구는 중력장하에서 하단이 가열되는 조건이지만 대류가 형성되지 않는 낮은 Rayleigh 수를 갖는 조건에서 상단냉각표면에 기포가 주입될 때 사각공동 내에서의 유동현상을 구명 하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 이론적 배경

Thermocapillary convection 은 표면장력의 영역 변화로부터 야기되어진다. A 와 B 라는 두 유체의 수직방향과 접선방향의 계면에서 힘의 평형은 Fig.1 에 보여지는 바와 같다.

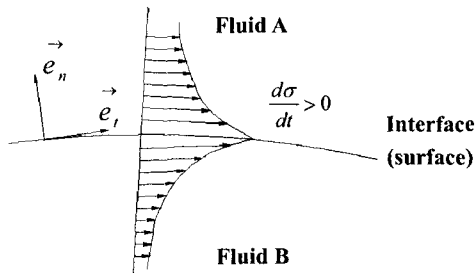


Fig. 1 Mechanism of thermocapillary convection

2 상의 유체가 공존하는 경우 밀도가 큰 유체의 분자에 의하여 작용되는 인력은 밀도가 작은 유체의 분자에 의하여 작용되는 인력보다 크다. 따라서, 경계면 근방의 액체분자는 밀도가 큰 액체쪽으로 불평형 인력을 받게되어 액체내에 퍼텐셜이 생성되고, 이 퍼텐셜에너지는 어떤 하나의 구배로인하여 경계면에 장력을 발생시킨다. 이러한 것들이 표면장력의 변화를 이끄는 요인들로서 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 표면장력은 온도의 함수로서 절대온도가 증가하면 선형적으로 감소한다.

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial\sigma}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial\sigma}{\partial \rho_e} \frac{\partial \rho_e}{\partial t} \quad \text{-----(1)}$$

표면장력 뿐만 아니라 점성력 또한 온도에 큰 영향을 받는 함수로서 이러한 열모세관 유동에 대한 물리적 문제는 Re 수, Pr 수, Mg 수에 의해 특성 지어진다<sup>1</sup>.

### 2.2 실험방법

실험방법은 미묘한 열전달 구조를 구명하고, 특히 기포 근접 부근의 온도장을 효과적으로 측정하기 위하여 온도측정 시 유동장에 영향을 미치지 않고 전 온도장을 가시화 할 수 있는 열감응 액정 (T.L.C)을 이용한 비접촉 측정 방법과 영상처리 기법을 적용하였다. 실험장치의 구조는 크게 밀폐 사각공동시편, 광원과 광학 시스템, Canon DIX Digital Camera 와 PC, 항온조 및 항온실로 구성되어 있으

며 그 개략도는 Fig. 2 와 같다.

밀폐 사각공동 시편은 Fig. 3 과 같이 수직 4 면을 두께 3 mm 인 Plexiglas 로 내부 - 79 mm×10 mm×10 mm(폭×깊이×높이)와 외부 - 97 mm×28 mm×10 mm 로 구성하고 외부와 내부 사이에 3 mm 공간을 둔 2 층 구조로 하였다. 이러한 구조는 가시화 영상을 촬영할 때 빛의 굴절현상을 보정하고 단열을 강화하기 위해서이다. 시편의 크기는 자연대류가 발생하지 않는 Rayleigh 수에 근거하여 제작되었으며, 본 실험에서 Rayleigh 수는 658 이다.

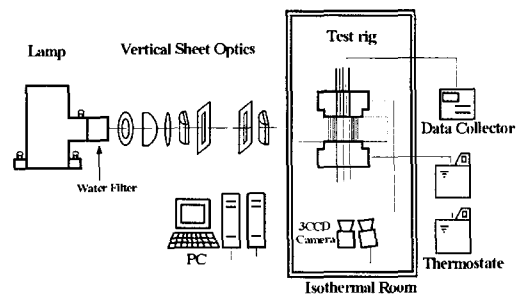


Fig. 2 Experimental setup for the visualization of temperature and flow field

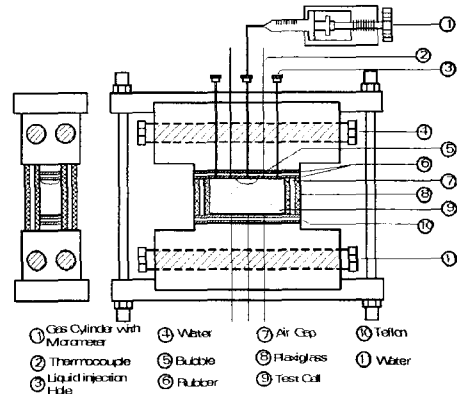


Fig. 3 Schematic of experiment specimen

상. 하 알루미늄판 중 상단은 19.7℃로 등온냉각, 하단은 21.7℃로 등온가열 조건으로 하였으며, 밀폐 사각공동 내부의 실험 매체는 100cst 의 Silicon Oil 을 사용하였다. Silicon Oil 내의 온도장과 유동장의 가시화를 위해 사용된 입자는 캡슐형 열감응 액정 (Encapsulated Thermo sensitive Liquid Crystal)을 사용하였으며, 밀도는 약 998kg/s 이고 반응시간은 약 0.23 msec 이다. 사용된 열감응 액정 입자는 측면에서 조사되는 얇은 백색광에 의해 온도에 따라 각기 다른 RGB color 를 만나하며, 빨간색에서 시작되어 온도가 증가할수록 파란색

쪽으로 변한다. 온도반응 범위는  $\Delta T \approx 2.5K$  이며, 그 밖의 범위에서는 어떤 색도 표현하지 않는다.

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

Kinematic viscosity	$1 \times 10^{-4} m^2/s$
Thermal diffusivity	$2.8586 \times 10^{-7} m^2/s$
Density	$964 kg/m^3$
Volumetric thermal expansion	$96 \times 10^{-5} K^{-1}$
Surface tension	$20.9 \times 10^{-3} N/m$

위의 Table 1은 본 실험에서 사용한 Silicon oil의 물리적 특성을 나타낸다.

열감응 액정 입자들이 제공하는 RGB color 정보를 영상처리방법으로 온도장 해석과 입자의 궤적에 의한 유동장을 동시에 해석하기 위하여 Nikon D1X digital Camera를 15cm 떨어진곳에 설치하였다. 카메라는 Test cell과 90도의 각도로 설치하고 노출시간을 20초로 하여 촬영하였으며 각각의 데이터는 Frame grabber가 설치된 PC에 저장된다.

### 2.2.1 온도 보정과 영상처리

RGB 영상 값을 온도 값으로 표현하는 영상처리 방법은 RGB 값을 Hue 값으로 전환한 후 온도 값과 연계하는 방법<sup>7-8</sup>과, RGB 값으로부터 신경 회로망 이론을 이용한 보정방법<sup>9</sup>이 있다. 본 실험에서는 일반적으로 이용되고 있는 전자의 방법을 이용하였다. 온도 보정 실험을 하기 위하여 시편의 상·하단을 본 실험조건과는 반대로 상단 21.7°C와 하단 19.7°C로 설정한다. RGB 영상을 얻을 때 시편 상부에 설치된 구멍으로 수직 이송장치에 부착된 열전대(T-type, dia 0.13 mm)를 상부에서 하부로 1mm 간격으로 수직 이송하면서 온도를 측정한다. 이와 동시에 각 지점에서 RGB 영상을 얻어 열전대 위치와 동일한 지점을 중심으로 25×3 픽셀의 RGB 평균값을 Hue 값으로 변환한 후 이 값을 측정된 온도값과 일치시킨다.

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

$$T = 19.5 + 10.5 // + 35.6 //^2 \quad (0.01 \leq // < 0.068)$$

$$T = 20.41 + 0.57 // + 1.54 //^2 \quad (0.068 \leq // < 0.68) \quad (3)$$

식(2)는 RGB 값을 Hue 값으로 변환한 식을 나타낸 것이며, 식(3)은 식(2)의 결과를 이용한 Hue 값과 온도의 상관관계식을 나타낸다.

### 2.3 결과 및 고찰

Fig. 4는 기포를 주입하지 않은 상태에서 카메라의 노출 시간을 20초 (exp. 20sec)로 촬영한 결과이다. Fig. 4(a)는 열감응 액정 입자가 나타내는 실제 영상 사진이며, Fig. 4의 (b)는 (a)를 영상 처리한 결과를 제시한 것이다. 그림 상단과 좌측단의 수치는 사각공동시편의 실제크기(mm)를 나타낸 것이며, 하단의 수치는 색깔에 따른 온도값(°C)을 나타낸 것이다. Fig. 4는 중력장내의 밀폐된 사각 공동 내에서 상단이 차가운 평판이고 하단이 뜨거운 평판인 조건에서도 어떠한 유동도 발생하지 않는 안정된 상태를 보여주고 있다.

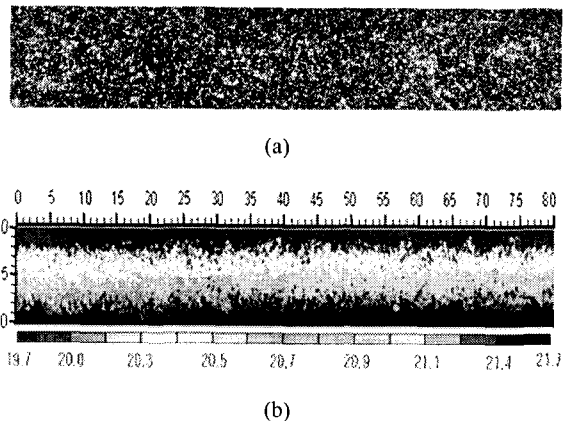


Fig. 4 Temperature and flow fields in steady state without a flow

$$Ra = 658, Pr = 350, \Delta T = 2K, \nu = 100cst$$

(a) Original temperature field image, exp. 20sec

(b) Result of image processing

Fig. 5, 6, 7은 상단 차가운 평판에 각각 다른 크기의 기포를 주입하고 25분 경과한 후의 사진들이다. 사각공동내의 정적상태에서 기포하단에 기포를 대칭축으로 하여 한 쌍의 와류유동(vortex flow)이 형성되고 있다. 온도장도 기포를 벗어난 곳에서는 Fig. 4(b)와 동일한 상태이지만 기포주위에서 많은 변화를 보여주고 있다. 이러한 온도장과 유동장 변화의 주요 원인은 기포가 주입됨으로서 기포와 액체 사이에 계면이 생성되고, 그 계면을 따라 온도차이에 의한 표면장력의 구배가 형성되어 유동을 유발시키기 때문이다. 즉 시편 상단쪽이 온도가 낮기 때문에 표면장력에 의한 유동은 시편 상단쪽으로 기포의 계면을 따라 이동하며, 기포

중앙을 중심으로 대칭 형태이다. 이러한 구동력에 의하여 시편하단(기포아래) 영역의 더운 액체를 끌어올리고 연속법칙을 만족 하기 위한 와류유동이 형성된다. 유동이 형성되고 나면 부력은 이미 형성된 유동에 가속력으로 작용한다. 이러한 시스템에서 기포의 크기는 표면장력의 영역변화에 영향을 미친다.

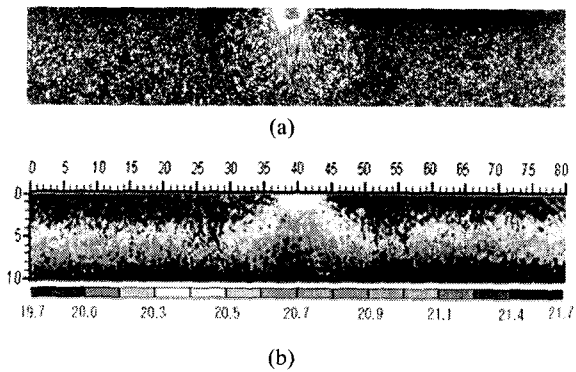


Fig. 5 In case of bubble size  $V = 94\text{mm}^3$ , exp. 20sec

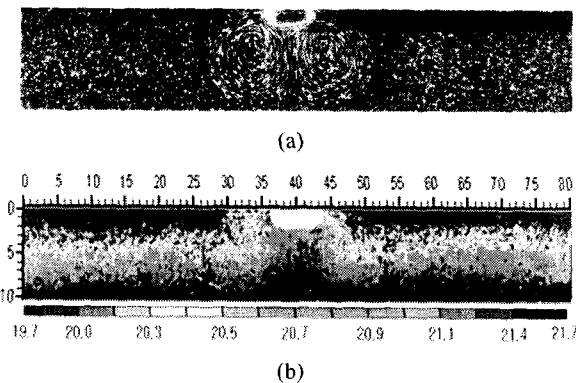


Fig. 6 In case of bubble size  $V = 188\text{mm}^3$ , exp. 20sec

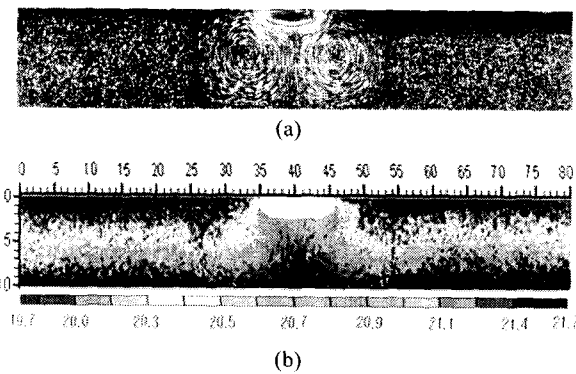


Fig. 7 In case of bubble size  $V = 376\text{mm}^3$ , exp. 20sec

Fig. 5, 6, 7 에서 보여지는바와 같이 기포의 크기가 클수록 유동장 영역이 커지고, 유동영역에 있는 유동 궤적의 크기를 각각 비교해보면 속도 역시 빨라 진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8(a)는 Fig. 7 과 동일조건으로 실험시작 2 시간 후 그 결과를 제시한 것이다. 사진에 나타난 바와 같이 시간이 지나도 좌·우 대칭의 한 쌍의 vortex 유동은 또 다른 유동을 유발시키지 않고 Fig.7 과 동일한 크기로 유지되고 있다. 이러한 결과는 기존의 연구결과<sup>1,2</sup>에서 제시된 유동형태와 다른 형태를 나타내고 있다.

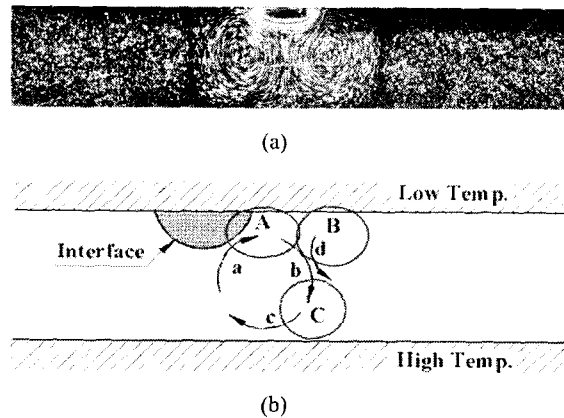


Fig. 8 In case of bubble size  $376\text{mm}^3$ , exp. 20sec, after 120 minutes from starting experiment

- (a) Original image of visualization
- (b) Schematic diagram of flow mechanism

위와 같은 결과는 다음과 같은 요인으로 설명할 수 있다. Fig. 8(b)에서 A 영역은 열모세관 현상에 의해 Fig. 8(b)의 a 와 같이 더운 유체가 유입된다. 이로 인해 A 영역의 온도구배가 더욱 커짐에 따라 A 지역 계면에서의 표면장력 구배도 커진다. 따라서 열 모세관 현상에 의한 구동력도 커지게 되고 연속법칙을 만족하기 위한 유동 b, c 로 이어지는 vortex 유동형태가 형성된다.

B 영역도 온도성층 구조가 윗부분이 낮은 온도이고 아랫부분이 높은 온도이기 때문에 위로 상승하고자 하는 부력이 존재한다. 또한 vortex a, b, c 에 의한 열전달로 인하여 초기보다 B 영역의 온도 구배가 커지면서 B 영역의 인력이 커지고, 이들 부력과 인력 두 상승 힘과 b 유동에 의한 점성력 그리고 마찰력이 평형을 이루어 유동은 형성되지 않는다. C 영역에서도 vortex a, b, c 로 인하여 낮은 온도의 유체가 하강하면서 C 영역의 부력항이 초기보다 커진다. 따라서 vortex a, b, c 의 점성력에 의한 유동 유발력과 C 영역의 부력항 그리고 마찰

력이 평형을 이루게 됨으로써 더 이상의 유동은 형성 되지 않는 것이다.

Fig. 9 는 크기가 다른 3 개의 기포를 주입했을 때 시간경과에 따른 특정지역에서의 평균속도 계산 결과를 제시한 것이다.

평균속도는 vortex 의 중심에서 가장자리까지 높이가 70pixel 의 일정범위 내에서 뚜렷하게 표현되는 열감응 액정 입자의 이동거리를 노출시간으로 나누어 계산하였다.

Fig. 9 에 나타난 바와 같이 기포의 크기가 클 수록 속도는 커지며, 일정 시간이 지나면 기포의 크기에 상관없이 각각의 기포에서 평균속도의 값이 일정하게 됨을 볼 수 있다. 이러한 결과는 일정시간 후 유동장이 정상상태에 도달함을 알 수 있다. 즉 앞서 제시된 가시화 사진에서 일정시간 후 또 다른 유동을 유발시키지 않고 한 쌍의 와류 유동만 형성된다는 사실과 일치한다.

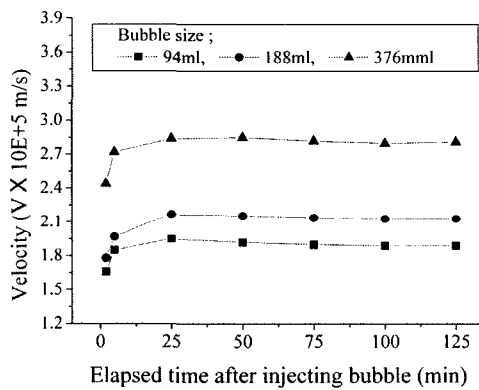


Fig. 9 Velocity of flow field under different bubble size with time

### 3. 결론

중력장 내에서 상단 평판이 냉각되는 조건에서도 유동의 발생이 없는 성층화 된 온도장내에 기포를 주입했을 때 발생하는 열전달 현상을 열감응 액정을 이용한 비접촉 측정 방법과 영상처리기법을 적용하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기포의 주입으로 인한 표면장력의 발생은 유동이 없는 성층화 된 온도장내에 유동을 형성시킨다.

(2) 기포의 크기는 표면장력 영역변화에 영향을 미치고 이것은 유동장의 크기와 속도에 영향을 미친다.

(3) 낮은 Rayleigh 수(658)의 밀폐 사각공동구조

에서 열 모세관 유동에 의해 발생된 와류유동은 기포의 크기에 상관없이 한쌍의 일정 크기로 유지되며, 주위에 또 다른 유동을 유발시키지 못한다.

### 후 기

이 연구는 2002 년도 안동대학교 학술연구조성비와 BK21 사업비 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다..

### 참고문헌

1. Ch.-H. Chun., "Temperature and velocity fields due to surface tension driven flow" Experiments in Fluids 7. pp. 164-172, 1989.
2. D. Raake, G. Hansmann., "Oscillating convection modes in the surroundings of an air bubble under a horizontal heated wall" Experiments in Fluids 11, pp. 359-367, 1991.
3. Wozniak, G., Wozniak, K. and Bergelt, H., "On the Influence of Buoyancy on the Surface Tension Driven Flow Around a Bubble on a Heated wall" Experiment in Fluids, Vol. 21, pp. 181-186, 1996
4. Chun, Ch-H. and Wuest, W., "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, 1979
5. Kassemi, M. and Rashidnia, N., "Steady and Oscillatory Flows Generated by a Bubble in 1-G and Low-G Environment" 35th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, pp. 6-10 Reno. NV., 1997
6. Yong-Kyoon Eom, Gi-Han Kwon, "The Effect of Heat Transfer from the Bubble Growing in the Bénard Convection Flow in a Square Cavity" Proceedings of the KSME 2001 Fall Annual Meeting, Vol. B, pp. 211-216, 2001.
7. Ozawa, M., Muller, U., Kimura, I. and Takamori, T., "Flow and Temperature Measurement of Natural Convection in a Hele-Shaw Cell Using a Thermo-sensitive Liquid-Crystal Tracer" Experiment In Fluids, Vol. 12, pp. 213-222, 1992.
8. Dabiri, D. and Gharib, M., "The Effects of Forced Boundary Conditions on Flow Within a Cubic Cavity Using Digital Partical Image Thermometry and Velocimetry(DPITV)" Experiment Thermal and Fluid Science, Vol. 121, pp.1067-1072, 1996.
9. Ozawa, M., Shinoki, M., Kimura, I. and Umekawa, H., "Information of Visualization" Vol. 17, No. 64, pp. 41-45, 1997