

감온액정을 이용한 기포유동의 온도장 해석에 관한 연구

배 대 석*

(2003년 3월 3일 접수, 2003년 9월 3일 심사완료)

A Study on the Analysis of Temperature Field of Bubbly Flow Using Thermo-sensitive Liquid Crystals

Dae Seok Bae

Key Words: Liquid Crystals(액정), Neural-Network(신경망), Bubbly Flow(기포유동), Particle Image Thermometry(입자영상온도계), Temperature Field(온도장)

Abstract

Particle Image Thermometry(PIT) with liquid crystal tracers is used for visualizing and analysis of the bubbly flow in a vertical temperature gradient. Quantitative data of the temperature were obtained by applying the color-image processing to a visualized image, and neural-network was applied to the color-to-temperature calibration. This paper describes the method, and presents the transient mixing temperature patterns of the bubbly flow.

1. 서 론

기호설명

D	: 깊이 (mm)
H	: 높이 (mm)
Q	: 유량 (ml/min)
T_b	: 혼합평균온도(°C)
T_c	: 보정온도 (°C)
T_m	: 측정온도 (°C)
t	: 시간 (sec)
u	: 가중치 합
W	: 폭 (mm)
w_i	: 가중치
x_i	: 뉴런의 입력값
X,Y	: 높이, 폭방향의 좌표계
y	: 출력값
θ	: 역치

기포유동은 액체의 균일혼합, 산소공급, 그리고 호수의 결빙을 방지할 목적으로 실제로 많이 사용되어지고 있는 방법이며, Taylor(1955)⁽¹⁾에 의해 연구된 이래로 지금까지 많은 연구가 수행되어져 왔다.^(2~4) 유동은 열유동과 같이 밀도 차에 의한 부력에 의해 야기되지만, 세 가지 점에서 서로 상이하다. 첫째로 기포는 상승함에 따라 체적팽창에 의해 부력이 증가하고, 둘째로 기포는 주위유체보다 빠르게 상승하며, 셋째로 기포는 온도구배가 있는 유체 내에서 열유동과 달리 표면까지 상승한다. 지금까지 기포유동에 관한 연구는 주로 유체가 등온이라는 가정 하에 이루어져 왔다. 그러나 기포유동이 호수의 정화를 위하여 사용되거나, 용융액체의 균일한 혼합을 위하여 사용되어질 때 층상화된 온도의 영향이 고려되어야 한다. 이러한 온도구배가 있는 유체 내에서의 기포유동에 관한 연구는 지금까지 미흡하였고 단지, 몇몇의 학자에 의해 연구가 수행되어져 왔다.^(6~9) McDougall⁽¹⁰⁾은 층상화된 유체 내에서 기포흐름에 의해 상승하는 유체는 같은 밀

* 회원, 부경대학교 기계공학부
E-mail : dsbae@pknu.ac.kr
TEL : (051)620-1616 FAX : (051)620-1531

도를 가진 영역까지만 상승한 후 수평방향으로 유동하는 것을 실험적으로 보였고, 이 실험결과를 근거로 이중플룸모델(double-plume model)을 제시하였다. Hussain과 Narang⁽¹¹⁾는 Hussain과 Siegel⁽⁹⁾의 연구결과를 확대하여 수직유동과 온도계산을 위한 수학적 모델을 제시하였으며, Asaeda와 Imberger⁽¹²⁾는 여러 조건하에서 층상화된 유체내의 기포흐름의 거동을 실험적으로 연구하여 세 가지 유동형태를 제시하였다. 하지만, 이들의 연구는 주로 정상 기포유동에서 층상화된 온도의 영향을 받고 있는 유동장만을 가시화하였을 뿐이다. 최근 컴퓨터와 화상처리기술의 비약적인 발전으로 액정을 이용한 온도장가시화 기법이 활발히 연구되고 있다.^(13~16) 따라서 본 연구에서는 감온액정(Thermo-sensitive Liquid Crystals)을 사용하여 비정상 기포유동의 온도장을 가시화하고, 최근 새로운 기법으로 활발히 연구되고 있는 Neural-Network를 색-온도변환에 적용하여, 온도장을 정량적으로 측정할 수 있는 기법을 개발하고 비정상 기포유동의 온도장을 정량적으로 가시화하고 해석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같으며, 사각 캐비티, 두 개의 항온조, 두 개의 광원, 두 개의 물필터, 기포발생기, 가스탱크, 디지털 온도계, 유량계, 압력 조절기, 디지털 비디오카메라, 그리고 컴퓨터로 구성되어 있다. 시험부분인 사각 캐비티의 상부와 하부는 두께가 23 mm인 두 개의 수평동판으로 되어있으며, 4개의 수직 벽 부분은 가시화를 위하여 두께10mm인 아크릴 평판으로 만들어졌다. 크기는 200mm×100mm×12mm (W×H×D)이다. 수직온도구배 내에서의 기포유동을 조사하기 위하여, 유체의 온도는 두 개의 상, 하부 수평동판에 의하여 수직으로 층상화 되어진다. 상부동판으로 가열된 물이 흐르고, 하부동판으로 냉각된 물이 흘러 상, 하부의 평판을 일정 온도를 유지시키고, 두 동판의 온도차에 의하여 유체 내에는 순수 전도에 의해 수직으로 층상화된 온도구배가 형성된다. 순환수의 온도는 두 개의 항온조에 의해 조절되며, 동판표면의 온도는 k-type 열전대를 이용하여 측정하였다. 상부동판의 중앙에 직경 2mm의 구멍을 뚫어 캐

비티 내의 유체온도를 측정하였다. 하부동판에는 중앙(X/L=0.5)에 깊이(D=12mm)방향으로 3개의 구멍을 3mm간격으로 뚫고 기포발생기와 아크릴튜브로 연결된 직경 0.2mm 길이 80mm의 동관을 삽입하여 캐비티의 하부로부터 기포가 동시에 발생하게 하였다. 작동유체는 온도변화에 따른 Liquid crystals의 선명한 색변화를 얻기 위하여 실리콘 오일을 사용하였으며, Liquid crystals은 RM2830(Japan Capsular Products Inc)을 사용하였다. 온도장의 이미지는 좌, 우의 백색광을 조사하여 3CCD디지털 비디오카메라로 기록되었다.

또한 백색광원으로부터 나오는 열을 차단하기 위하여 물필터를 사용하여 백색광원으로부터의 열이 유동장의 유동과 온도에 미치는 영향을 최소화 하였다. 액정의 질량농도는 0.1%이다. 액정이 반사하는 빛의 색깔은 온도가 증가함에 따라 빨강에서 파랑으로 변하고, 그 색깔변화는 광원과 카메라 사이의 각도에 크게 영향을 받는다. 따라서 본 실험에서는 각 변화에 의한 오차를 없애기 위하여 모든 실험 장치를 실험기간동안 고정

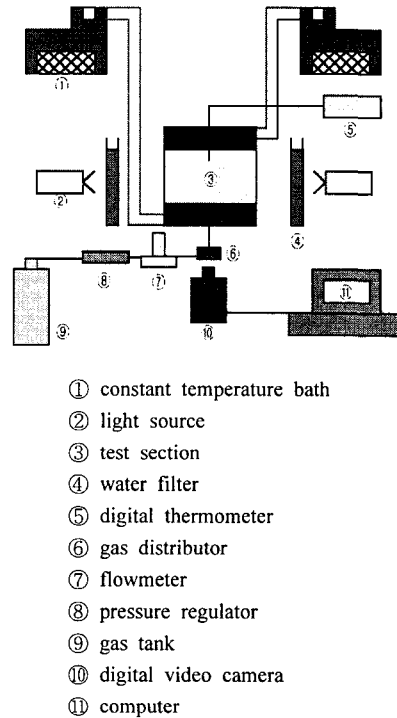


Fig. 1 A schematic diagram of experimental apparatus

하였다. 또한, 액정의 색변화는 수 밀리초(ms) 내에 이루어지므로 액정은 유체 내의 비정상 열유동 현상을 고찰하기에 매우 적절한 입자이다. 본 실험에서 사용한 액정은 실리콘 오일용 감온액정인 RM2830(Japan capsular products INC.)를 사용하였고, 작동유체로는 실리콘 오일 Sin-Etsu Silicon Oil KF-96-100cSt를 사용하였다. 실험은 다음의 순서로 행하여 졌다. 우선 사각 캐비티 내의 사용된 실리콘 오일을 제거하고 물과 비누로 깨끗이 세정한 후 새로운 실리콘 오일로 채운 뒤 항온조로 상, 하부의 온도를 조절하여 자연대류가 캐비티 내에서 충분히 발달하였을 때 액정을 넣어 액정이 캐비티 내의 전 영역에 골고루 섞이게 하였다. 항온조를 사용하여 상,하부의 동판의 온도를 요구되어지는 온도로 재설정하여 수시간 후 수직온도구배가 캐비티 내에 형성된 후 기포 발생기를 이용하여 기포가 하부에서 발생하도록 하였으며, 형성되는 캐비티 내의 비정상 온도분포 이미지를 3CCD비디오카메라로 촬영하여 저장하였다.

3. 색-온도 보정

열유동의 정량적 가시화를 위하여 액정이 사용되어졌고, 액정의 온도변화에 따른 색변화의 관계는 보정에 의하여 결정되어진다. Fig. 2는 보정 실험의 결과인 열전대를 이용하여 측정된 온도 T_m 과 r, g, b 사이의 관계를 보여주며, 그 관계가 강한 비선형적임을 나타내고 있다. 이 비선형성 때문에 색-온도변환을 위한 방정식을 만드는 것이 대단히 어렵다. 본 연구에서는 색-온도 사이의 관계를 정립하기 위하여 Neural-Network를 사용하였다. 이 방법은 Kimura 등⁽¹⁷⁾에 의하여 처음으로 제안되었다.

Fig. 3은 3층 구조 Neural-Network를 나타내며, 색의 r, g, b값이 입력되어 온도 T_c 가 구해진다.

Fig. 4는 각 층을 구성하는 Neuron모형을 나타내고 있다. 이 Neuron은 앞 층의 Neuron으로부터 입력 값의 가중치 합을 구해, 시그모이드 함수(sigmoid function)를 사용하여 출력 값을 결정한다. 입력 값의 가중치 합을 구하는 식은 식 (1)과 같으며, 출력은 식 (2)로 구해지고 이 식을 시그모이드 함수(sigmoid function)라고 부른다.

$$u = \sum_{i=1}^n w_i x_i + \theta \tag{1}$$

$$y = f(u) = \frac{1}{1 + \exp(-u)} \tag{2}$$

여기서 x_i 는 뉴런의 입력 값이고, w_i 는 가중치, 그리고 θ 는 역치를 나타낸다. Neural-Network의 학습은 입력 r,g,b에 의한 출력 T_c 가 열전대에 의해 측정된 온도 T_m 과 일치하도록 수행되어진다.

따라서 Neural-Network의 학습은 식 (3)의 오차함수 E가 최소가 되도록 하는 가중치 w_i 와 역치 θ 를 구하는 것이라고 할 수 있다.

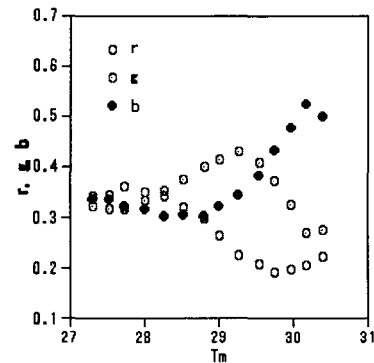


Fig. 2 Relation between r,g,b and temperature T_m

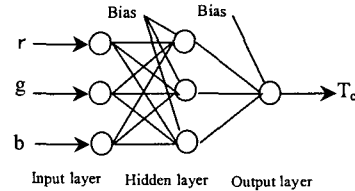


Fig. 3 Neuron Model

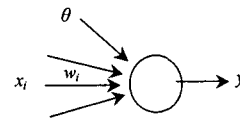


Fig. 4 Neural network structure

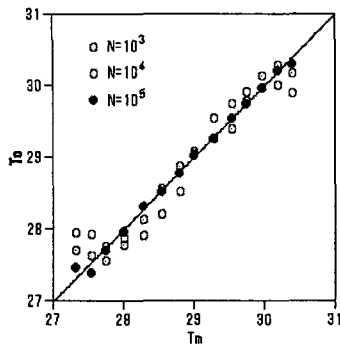


Fig. 5 Results of neural network calibration

$$E = \frac{1}{2} \sum (T_c - T_m)^2 \quad (3)$$

Fig. 5는 Neural-Network의 학습 후 출력 T_c 와 열전대에 의해 측정된 온도 T_m 과의 관계를 나타내며, 반복회수 100,000후 T_c 와 T_m 의 값이 서로 잘 일치함을 보여준다. 따라서 이상의 결과로부터 Neural-Network는 색-온도변환에 매우 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

4. 결과 및 고찰

액정을 사용하여 수직온도구배가 있는 유체 내에서의 기포유동을 가시화 하였다. 상부와 하부 표면의 온도차는 3.0°C ($30.4-27.4^{\circ}\text{C}$)이다.

Fig. 6의 (a)는 유체 내에 형성된 수직온도구배의 원 화상을 나타낸다. 이 상태에서 유동은 전혀 없으며, 온도경계층은 오로지 순수전도에 의해서만 이루어진다. (b)는 Neural-Network를 사용한 색-온도변환을 액정의 원 화상에 적용한 결과를 24비트 전색으로 나타낸 것이다. 액정의 원 화상에서의 색은 온도가 증가함에 따라 갈색에서 청색으로 변화되었다. 즉 갈색은 낮은 온도를 나타내고 청색은 높은 온도를 나타내고 있으나, 색-온도변환후의 온도표시는 액정의 온도변환에 따른 색변화의 결과와는 반대로 일반적인 표시법으로 나타내었다. 즉 적색은 높은 온도를 표시하고 청색은 낮은 온도를 표시한다. 실험은 사각 캐비티의 바닥으로부터 갑작스런 가스의 분출로부터 시작하여 캐비티 내의 온도분포가 거의 정상상태에 도달할 때까지 계속하였다.

Fig. 7은 시간변화에 따른 사각 캐비티 내의 온

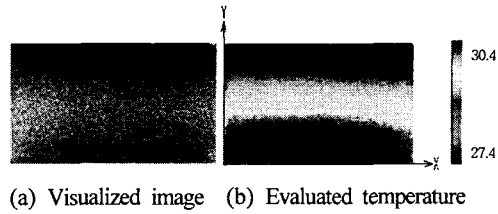
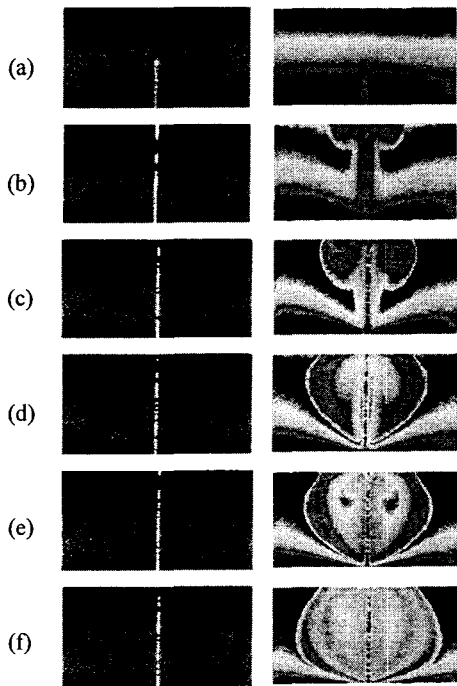


Fig. 6 Visualized image of liquid crystal tracers and evaluated temperature distribution

도분포 패턴을 정량적으로 가시화한 결과를 나타낸다. 각 그림의 왼쪽은 수직온도구배가 있는 유체내의 기포유동을 액정으로 가시화한 원 화상이고 오른쪽은 색-온도보정 결과에 의한 사각 캐비티 내의 온도분포를 나타낸다. 본 그림은 기포유동이 어떻게 증상화된 온도장을 파괴하고 캐비티 내의 유체온도가 혼합평균온도로 되어지는지를 보여준다.

혼합평균온도를 형성하는 과정은 다음과 같다. 기포발생기에서 생성되어 바닥으로부터 상승하는 기포는[Fig. 7(a)] 바닥표면 가까이에 있는 갈색유체(낮은 온도)를 상승시키면서 중심선주위에 갈색 버섯모양을 대칭적으로 형성하면서[Fig. 7(b)] 녹색유체(중간온도)를 상부로 상승시켜 갈색 버섯모양 안에 녹색 버섯모양을 형성한다[Fig. 7(c)]. 이어서 청색유체(높은 온도)를 상승시켜 녹색 버섯모양 안에 청색 버섯모양을 형성한 후[Fig. 7(d)] 순환유동으로 외부 경계를 형성하는 갈색유체는 순환하면서 재상승하여 중심선 주위에 또 하나의 갈색 버섯모양을 형성한다[Fig. 7(e)]. 이러한 기포에 의하여 야기된 기포대류 과정을 반복하면서 다른 온도를 가진 유체는 혼합되고, 온도가 다른 유체경계에서 전도 열전달이 일어나[Fig. 7(f)] 결과적으로 유체의 온도는 혼합평균온도에 도달되는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 8은 유량 $Q=10\text{ml/min}$ 일 때 수직방향의 중간 면($Y/H=0.5$)에서의 시간에 따른 온도분포를 나타낸다. 그림에서 보는바와 같이 전체적으로 바닥면의 중간($X/L=0.5$)에서 발생하는 기포를 중심으로 좌우 대칭 유동의 결과인 좌우 대칭적 온도분포를 잘 나타내며, $t=0 \text{ sec}$ 일 때의 상태는 밀폐공간의 초기 상태로 유동이 전혀 없고, 순수전도에 의해서만 열전달이 일어나서 온도가 수직으로 증상화 되어 거의 일정한 온도분포를 나타



(a) Visualized image (b) Evaluated temperature

Fig. 7 Temperature patterns at six different instants; t=(a) 0.5sec., (b) 5.0, (c) 10.0, (d) 20.0, (e) 30.0 (f) 60.0

내지만 좌측 수직 벽에서의 온도가 약간 높은 것은 광원에서의 복사열전달 때문이다. 바닥 면으로부터 기포가 발생하면 기포유동에 의해 수직으로 층상화된 온도구배는 파괴되며 시간이 증가함에 따라 양 수직 벽 부근의 높은 온도를 가지는 경계층은 얇아지고 수직 벽의 중간 면에서의 온도분포가 다시 일정온도에 접근함을 알 수 있다. 이는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 기포유동에 의한 주위 유체의 대류와 전도열전달의 결과이다.

Fig. 9는 기포 발생 후 시간 t=180초 일 때 유량의 변화에 따른 액정의 원화상과 색-온도보정 결과를 나타낸다. 어느 정도 시간이 경과한 후의 속도경계층 내의 유동은 거의 정상상태에 도달하고 유체의 색은 그린색을 나타내어 거의 혼합평균온도에 접근하는 것을 알 수 있고, 유량이 증가함에 따라 유동이 없는 영역(dead flow region)은 감소하고 속도경계층이 캐비티 내 전 영역에

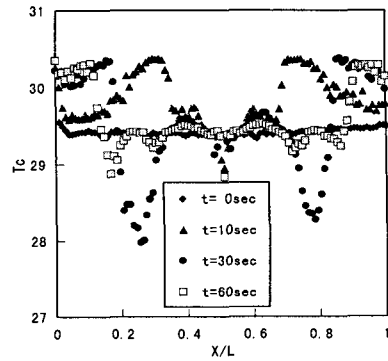
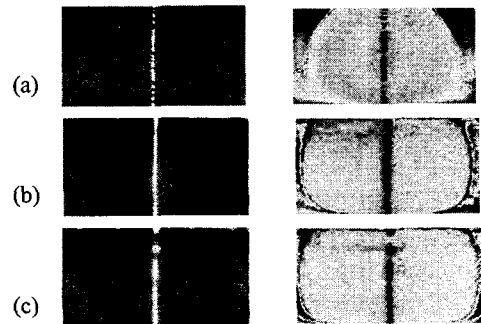


Fig. 8 Temperature distributions at the vertical midplane (Y/H=0.5) for various instants, Q=10ml/min



(a) Visualized image (b) Evaluated temperature

Fig. 9 The effect of flowrate at t=180sec; Q=(a)10ml/min, (b)50, (c)100

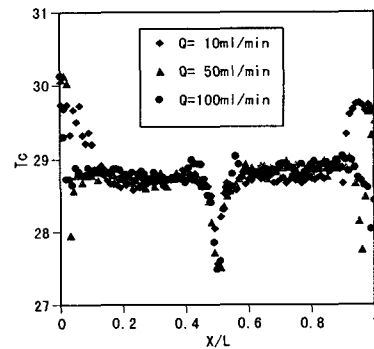


Fig. 10 Temperature distributions at the vertical midplane(Y/H=0.5) for various flowrates, t=180sec

발달하여 캐비티 내의 전 유체의 온도가 거의 혼합평균온도가 되어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 기포 발생 후 시간 $t=180$ 초일 때 수직방향의 중간면($Y/H=0.5$)에서의 유량에 따른 온도분포를 정량적으로 나타낸다. 유량이 증가함에 따라 양 수직 벽면가까이에 형성되어 있는 수직 온도 구배영역은 점점 감소되어, 기포가 발생하여 상승하는 중심부근($X/L=0.5$)을 제외한 영역의 온도가 혼합평균온도($T_b=28.9^\circ\text{C}$)에 접근하는 것을 알 수 있고, 충분한 시간이 경과하여 완전한 정상상태가 되면 기포가 발생하여 상승하는 중심부근($X/L=0.5$)을 포함한 전 캐비티 내의 온도가 혼합평균온도로 되어지는 것을 쉽게 예측할 수 있다.

5 결론

감온액정을 이용한 열유동장의 온도를 정량적으로 가시화하는 측정기법을 개발하여 수직으로 층상화된 온도구배가 있는 유체내의 기포유동에 적용하였다. 일반적인 점계측 방법과는 달리 이 방법은 임의 순간에 전유동장의 온도를 동시에 측정 가능하여 비정상 기포유동의 온도장을 측정하는 데 매우 효과적인 방법임을 알 수 있었다.

본 연구에서 개발한 신경망(Neural-Network)를 이용한 색-온도 보정기법을 층상화된 온도장에 적용한 결과 액정의 온도에 따른 색변화 결과와 잘 일치하였다. 따라서 본 실험방법은 여러 형태의 비정상 열유동 현상을 해석하는 데 적용되어질 수 있으며, 색-온도변환에 의해 계산된 정량적 데이터는 수치해석의 타당성을 입증하는 데 매우 유용하게 사용되어질 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) Taylor, G.I., 1955, "The Action of a Surface Current Used as a Breakwater," *Proc. Roy. Soc.*, A231, pp. 466~478.
- (2) Bulson, P.S., 1968, "The Theory and Design of Bubble Breakwaters," *Proc. 11th Conf. Coastal Eng., London*, Vol. 2, pp. 995~1015.
- (3) Baines, W.D., 1961, "The Principles of Operation of Bubbling Systems," *Proc. Symp. Air Bubbling, National Research Council, Canada*, pp. 12~22.

- (4) Jones, W.T., 1972, "Air Barriers as Oil-Spill Containment Devices," *J. Soc. Pet. Eng.*, pp. 126~142.
- (5) Hussain, N. A. and Siegel, R., 1976, "Liquid Jet Pumped by Rising Gas Bubbles," *ASME J. Fluid Eng.*, Vol. 98, No. 1, pp. 49~57.
- (6) Milgram, J.H., 1983, "Mean Flow in Round Bubble Plumes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 133, pp. 345~376.
- (7) Andreopoulos, J., Praturi, A. and Rodi, W., 1986, "Experiments on Vertical Plane Buoyant Jets in Shallow Water," *J. Fluid Mech.*, Vol. 168, pp. 305~336.
- (8) Fannelop, T.K., Hirschberg, S. and Kuffer, J., 1991, "Surface Current and Recirculating Cells Generated by Bubble Curtains and Jets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 229, pp. 629~657.
- (9) Schladow, S.G., 1992, "Bubble Plume Dynamics in a Stratified Medium and the Implications for Water Quality Amelioration in Lakes," *Water Resources Res.*, Vol. 28, pp. 313~321.
- (10) McDougall, T.J., 1978, "Bubble Plumes in Stratified Environment," *J. Fluid Mech.*, Vol. 85, pp. 655~672.
- (11) Hussain, N.A., and Narang, B.S., 1984, "Simplified Analysis of Air-Bubble Plumes in Moderately Stratified Environments," *Trans. ASME J. Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 543~551.
- (12) Asaeda, T. and Imberger, J., 1993, "Structure of Bubble Plumes in Linearly Stratified Environments," *J. Fluid Mech.*, Vol. 249, pp. 35~57.
- (13) Dabiri, D. and Gharib, M., 1991, "Digital Particle Image Thermometry: The Method and Implementation," *Experiments in Fluids*, Vol. 11, pp. 77~86.
- (14) Ozawa, M., Muller, 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 Tracers," *Exp. Fluids*, Vol. 12, pp. 213~222.
- (15) Jong-Hwan Yoon, Deog-Hee Doh and Sang-Joon Lee, 1996, "Temperature Field Measurement of

- Convective Flow in a Hele-Shaw Cell with TLC and Color Image Processing," *Trans. of the KSME B*, Vol. 20, No. 3, pp. 1114~1122.
- (16) Kowalewski, T.A. and Cybulski, M., Rebow, M., 1998, "Particle Image Velocimetry and Thermometry in Freezing Water" *8th International Symposium on Visualization*, pp. 24.1~24.8.
- (17) Kimura, I., Hyodo, T. and Ozawa, M., 1998, "Temperature and Velocity Measurement of a 3-D Thermal Flow Field Using Thermo-Sensitive Liquid Crystals," *J. Visualization*, Vol. 1, No. 2, pp. 145~152.