

# 감온액정을 이용한 층류유동의 속도장에 관한 실험적 연구 An Experimental Study on Laminar Flow Velocity by Using Thermo-sensitive Liquid Crystal

장 태 현\*  
Tae-Hyun Chang\*

< Abstract >

An experimental investigation was performed to study the characteristics of laminar water flow in a horizontal circular tube by using liquid crystal. A simultaneous measurement technique has been employed to measure the velocity field in a two-dimensional cross section of fluid flow. This study found the velocity distributions for  $Re = 1,594 \sim 2,510$  along longitudinal sections and the results appear to be physically reasonable. To determine some characteristics of the laminar flow, 2D PIV technique is employed for velocity measurement by using liquid crystal in water. The experimental rig was manufactured from an acrylic tube. The test tube diameter of 25mm, and a length of 1200mm. The used algorithm is the gray level cross-correlation method by using Kimura et al. in 1986.

*Key Words : Particle Image Velocimetry, Thermo-sensitive liquid crystal, hue, Hele-Shaw Cell*

## 1. 서 론

유동의 속도분포에 대한 측정방법으로 초창기에 피토 튜브를 주로 사용하였고, 이것을 변형한 3공 피토 튜브 및 5공 피토 튜브 등을 사용하여 층류유동과 난류유동의 측정에 이용하였다. 1950년대부터 난류유동의 측정에 열선풍속계(Hot wire Anemometry)를 사용하기 시작하였고, 열선풍속계의 경우는 프로브(probe)이 고가이고 취급에 어려움이 많았다.

또한, 피토 튜브나 열선풍속계는 측정부분을 유동장내에 설치해야하는 어려움과 유동에 대한 프롱(Prong)의 간섭을 배제할 수 없었다.

2000년대부터 레이저를 이용한 LDV(Laser Doppler Velocimetry) 기법을 도입하였지만 이 역시 사용상 어려움과 장비의 고가 및 측정부위가 점 측정에 국한되었다.

2000년대 말부터 전자산업의 발달과 더불어 레이저, CCD카메라 및 입자를 이용한 입자영상추적법(PIV, Particle Image Velocimetry)

\* 정회원, 경남대학교 기계자동화공학부, 교수, 工博

E-mail : changtae@kyungnam.ac.kr



을 사용하기 시작하였다.

층류유동은 자연대류 유동에 비하여 상대적으로 큰 운동량, 열 및 물질 전달을 수반하고 있으나, 시간에 따라 변하는 유동의 불규칙성으로 인하여 정확한 해석에는 어려움이 많았다. 이와 같은 복잡한 유동구조를 정확하게 해석하기 위하여 유동의 속도를 측정하는 것이 필요하다. 층류유동의 경우 속도장과 온도장이 유기적인 관계를 가지고 있으므로 속도장 뿐만 아니라 온도장의 정보를 동시에 측정할 수 있다면, 열전달 및 운동량을 정확하게 해석할 수 있을 것이다.

최근, 감온성 액정(TLC, Thermo-sensitive liquid crystal)을 이용하여 온도장을 측정하는 기술이 개발되어, Kimur<sup>1)</sup>, Doh<sup>2)</sup> 그리고 Lee<sup>3)</sup> 등은 이 기법을 사용하여 열유체유동에서 온도 및 속도장 해석에 활용하였다.

또한, Dabiri 와 Gharib<sup>4)</sup>은 hue 값을 켈리브레이션의 변수로 사용하는 것을 제안하였다. hue 켈리브레이션 기술은 Kobayashi<sup>5)</sup>, Ozawa<sup>6)</sup> 그리고 Nozaki<sup>7)</sup> 등에 의해 온도장 해석에 적용하였고, 다른 연구방법으로 Kimura<sup>2)</sup>와 Fujisawa<sup>8)</sup> 등은 R, G, B와 H, S, I를 신경망의 입력 값으로 사용하여 온도를 계산하였다.

국내에서 이 분야의 연구로는 부광석 등<sup>9)</sup>은 액정시트를 사용하여 원형제트가 충돌하는 표면에서 온도분포를 측정하였고, 윤정환 등<sup>10)</sup>은 자동차내의 실내 환기 유동에서 온도 및 속도장을 연구하였고, 문지섭<sup>11)</sup>은 Hele-Shaw Cell 내의 온도 및 속도장을 감온 액정을 이용하여 연구하였다.

이와 같은 연구들은 대부분이 액정 시트를 이용하거나, 자연대류 열전달 상태에서 온도와 속도장에 관한 연구들이었다.

본 연구에서는 TLC와 컬러화상 처리 기법을 이용하여 수평원통관내에서 강제대류 열전달 상태에서 층류유동의 속도를 측정하고, 기존 연구의 결과와 비교 연구하고자 한다.

## 2. 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치이다. 백색광원(Stroboscope, 60W) 2대와 광원이송프롭(probe) 및 PIV 드라이버 1대, CCD 카메라 1대와 이미지 그래버가 사용되었다.

실험장치의 테스트 튜브는 내경 25 mm, 길이 1200 mm의 아크릴 튜브를 사용하였고, 백색광의 굴절을 막기 위하여 테스트 튜브외부에 10 mm의 아크릴제품을 사용하여 수조(140 mm<sup>B</sup> × 200 mm<sup>H</sup> × 1200 mm<sup>L</sup>)를 설치하였다. 순환수는 증류수를 사용하였고, D사가 개발한 항온조 1대를 사용하였다. 사용된 액정은 온도 범위가 35.0°C ~ 40.0°C인, Hallcrest, Inc. 사의 제품을 사용하였고, 온도장의 계측용으로 Y 사의 30 채널 온도기록계와 k 형 열전대를 계측하고자 하는 위치에 설치하였다. 감온 액정의 사용상 손실을 줄이기 위하여 테스트 튜브를 폐회로를 구성하고, 순환 펌프를 이용하여 항온조에 다시 되돌아갈 수 있도록 제작하였다.

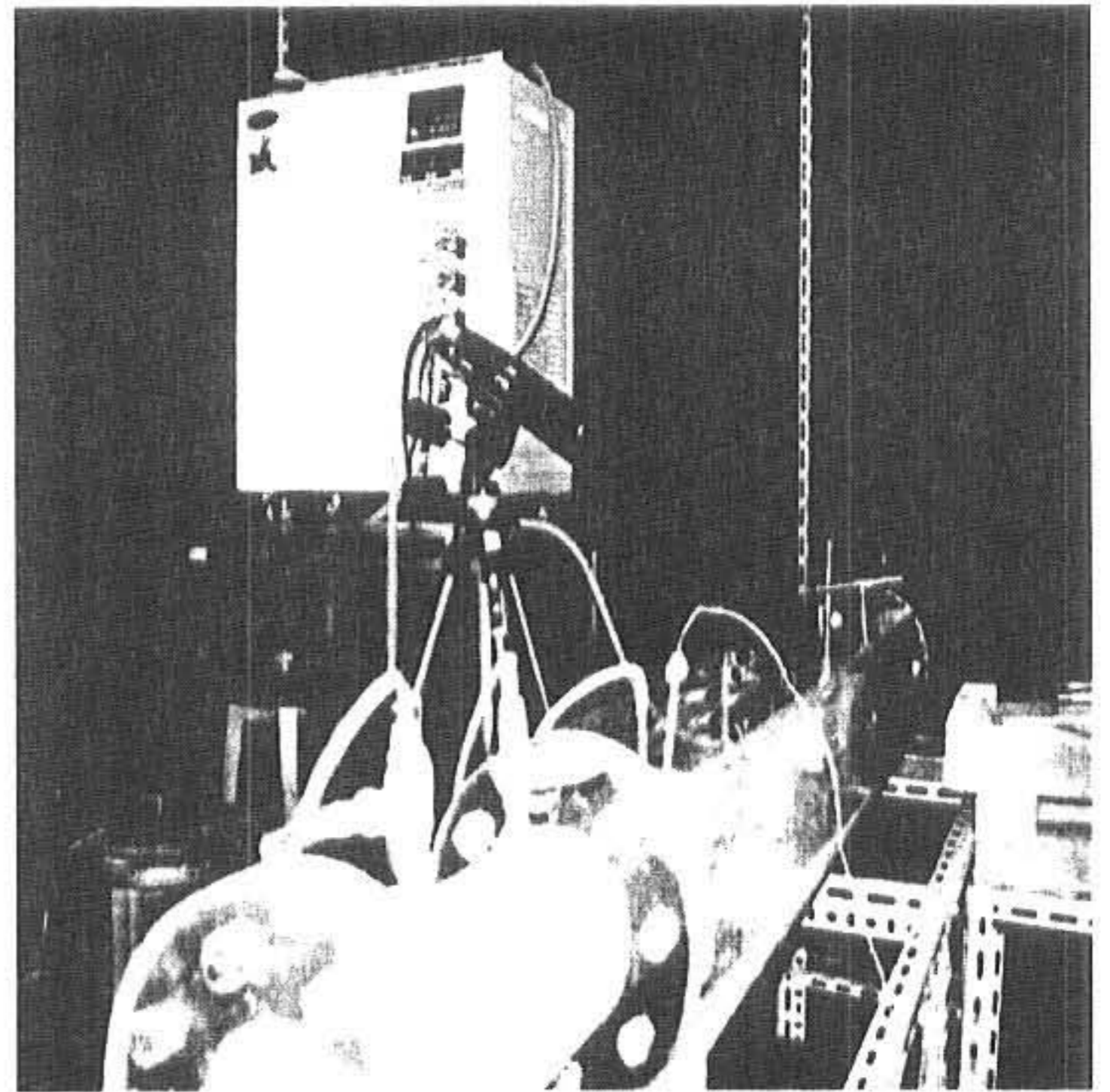


Fig. 1 Photograph of the Experiment Rig

## 3. 실험방법

### 3.1 속도 계측

유체 유동장의 속도분포는 한 점에서 입자가 통과한 거리 및 시간과 방향을 알면 구할 수 있다. 측정하고자 하는 유체 영역에서 유동입자의 이동거리에 관한 정보를 CCD 카메라를 이용하여 화상데이터로 컴퓨터 내에 저장하여 화상처리기법을 이용하여 액정의 입자의 변위를 계산하였다. 사용된 알고리즘은 Kimura 및 Utami등<sup>12)13)</sup>이 사용한 계수 값이 최대인 좌표 값들을 백터의 종점으로 두는 식



(1)과 같은 개조치 상호상관기법을 사용하였다

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \dots\dots (1)$$

식 (1)의  $C_{fg}$ 는 상관계수를  $f_i$ ,  $g_i$ 는 상관영역내의 각 픽셀(pixel)의 개조치를 의미하며 “ $\bar{\quad}$ ”는 평균을 뜻한다.

입자의 변위를 구하는 알고리즘은 속도벡터의 추출에 이용되는 개별입자의 중심을 이용하여 입자속도 벡터를 구하는 방법(Particle Tracking Velocimetry, PTV)과 입자군의 분포에 대한 상관 관계로부터 대표 속도를 구하는 PIV(Particle Image Velocimetry)로 구분될 수 있다.

본 연구에서 사용된 방법은 2차원 PIV 기법을 사용하였다. 실험에 사용된 백색광원을 레이저광 대신으로 사용하였다. 광원의 이동을 용이하게 하기 위해 광케이블로 빛을 이동시킬 수 있는 프롭을 사용하였다

온도 계측을 위하여 먼저 사용된 액정(Hallcrest, R35C5W)을 실험하고자하는 각각의 온도(35℃~40℃)에 대한 캘리브레이션 작업을 수행하였다. 액정의 온도 변화에 대한 보정용으로 0.5 mm K 형 열전대를 사용하였다. 또한, 정확한 온도장의 온도분포를 얻기 위하여 국부적인 휘도(Y)와 색상(H) 정보를 사용하였다. Fig. 2에서와 같은 신경망의 입력 값으로서 식(2)와 식(3)으로 나타내는 휘도 값과 색상 값을 사용하였다.

$$Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B \dots\dots(2)$$

$$H = \cos^{-1} \left\{ \frac{0.5 [(R-G) + (R-B)]}{[(R-G)^2 + (R-G)(G-B)]^{1/2}} \right\}$$

$$B \leq G$$

$$H = 2\pi - \cos^{-1} \left\{ \frac{0.5 [(R-G) + (R-B)]}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{1/2}} \right\}$$

$$B) G \dots\dots(3)$$

- Color information on the grids of 35×35
  - 50000 times of learning
  - To minimize the error
- $$\rightarrow E_k = \frac{1}{2} \sum_k (t_k - z_k)^2$$

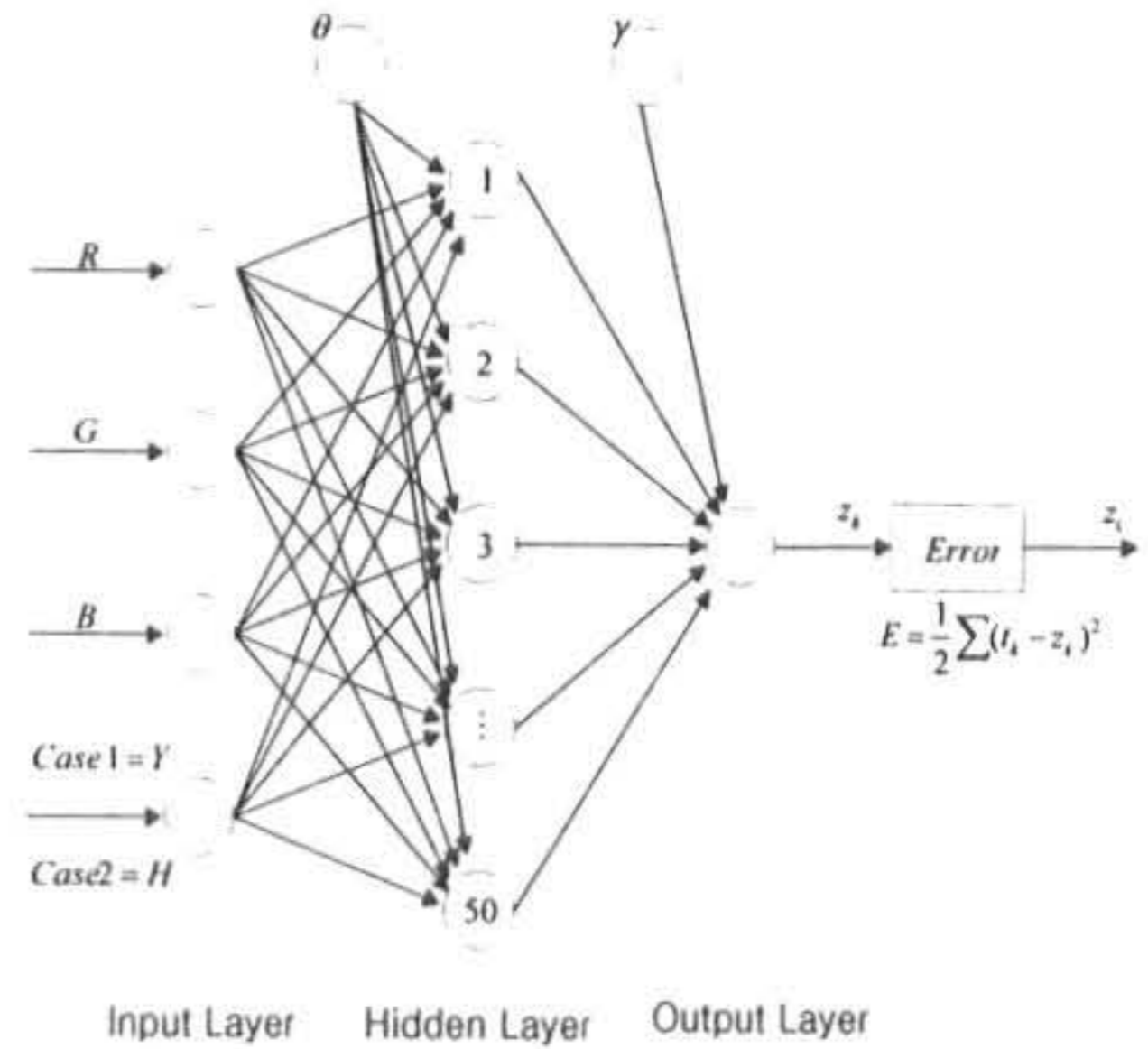


Fig. 2 Used Neural Network



Fig.3 Calibration image at 36.6℃

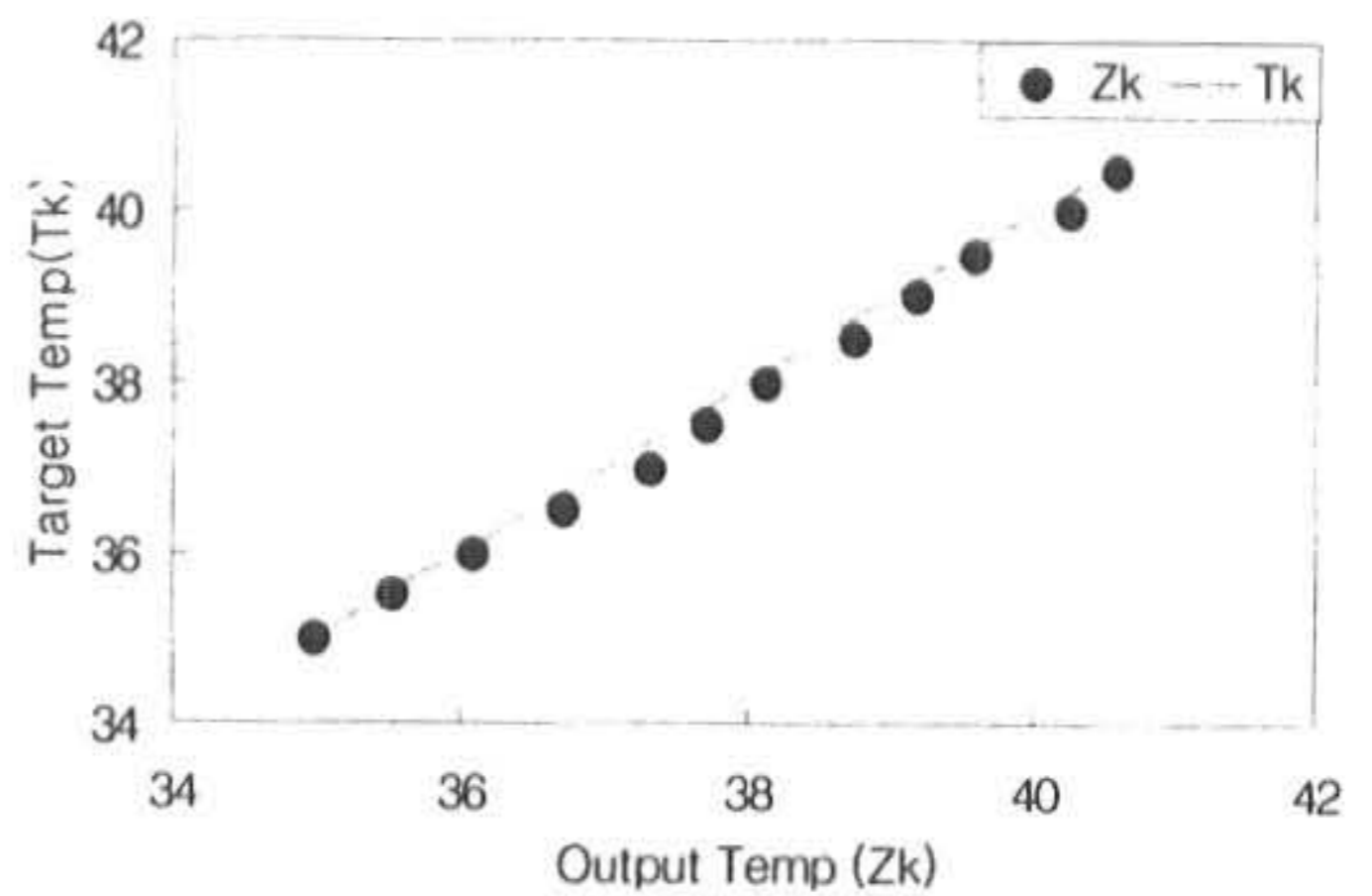


Fig. 4 Calibration Curve for Liquid Crystal

Fig. 3은 액정의 캘리브레이션 이미지를 나타

낸다. 34.5°C에서 적색(Red)이 시작되었고, 36.6°C에서 녹색(Green)이 나타나고, 청색(Blue)은 37.5°C에서 시작되었다.

Fig. 4는 이들 값들로부터 구한 보정곡선이다.

#### 4. 실험결과 고찰

Fig. 5는 위의 그림과 보정곡선을 이용하여 온도 40°C에서 구한 온도분포이다. Fig. 6, 7, 8, 9, 10 그리고 11은 테스트튜브  $X/D = 40$ 에서 레이놀즈 수 1,594, 2,140, 2,250, 2,360 그리고 2,510에서 순간속도를 각각 나타내고 있다.

Fig.6은  $Re=1,594$ 에서 에러 벡터를 포함한 순간속도이고, Fig. 7은 같은 레이놀즈 수에서 에러를 제거한 순간 속도벡터이다. 에러벡터를 제거한 Fig. 7이 관벽 근처를 제외하고는 균일한 유동을 보이고 있다.

Fig. 8, 9는  $Re= 2,140$  과  $Re = 2,250$ 에서 순간속도벡터의 분포이고, Fig.10과 Fig.11은  $Re=2,360$ 과  $Re=2,510$ 에서의 속도벡터로 난류 유동의 성질을 보이고 있다.

이들 결과로부터 층류 유동에서는 유동이 테스트 튜브를 따라 균일한 분포를 보이나, 레이놀즈 수가 증가할수록 관 중심부에서는 난동이 증가하는 현상을 감지할 수 있다. 특히,  $Re=2,360$ 과  $Re=2,510$ 에서는 강한 난동현상을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 지금까지 발표된 연구결과와 정성적으로 부합되는 것으로 생각된다.

Fig. 12는 Fig. 8의 순간속도 벡터로부터 구한 평균속도 벡터이다. 순간속도에 비하여 아주 균일한 속도벡터를 나타내고 있다.

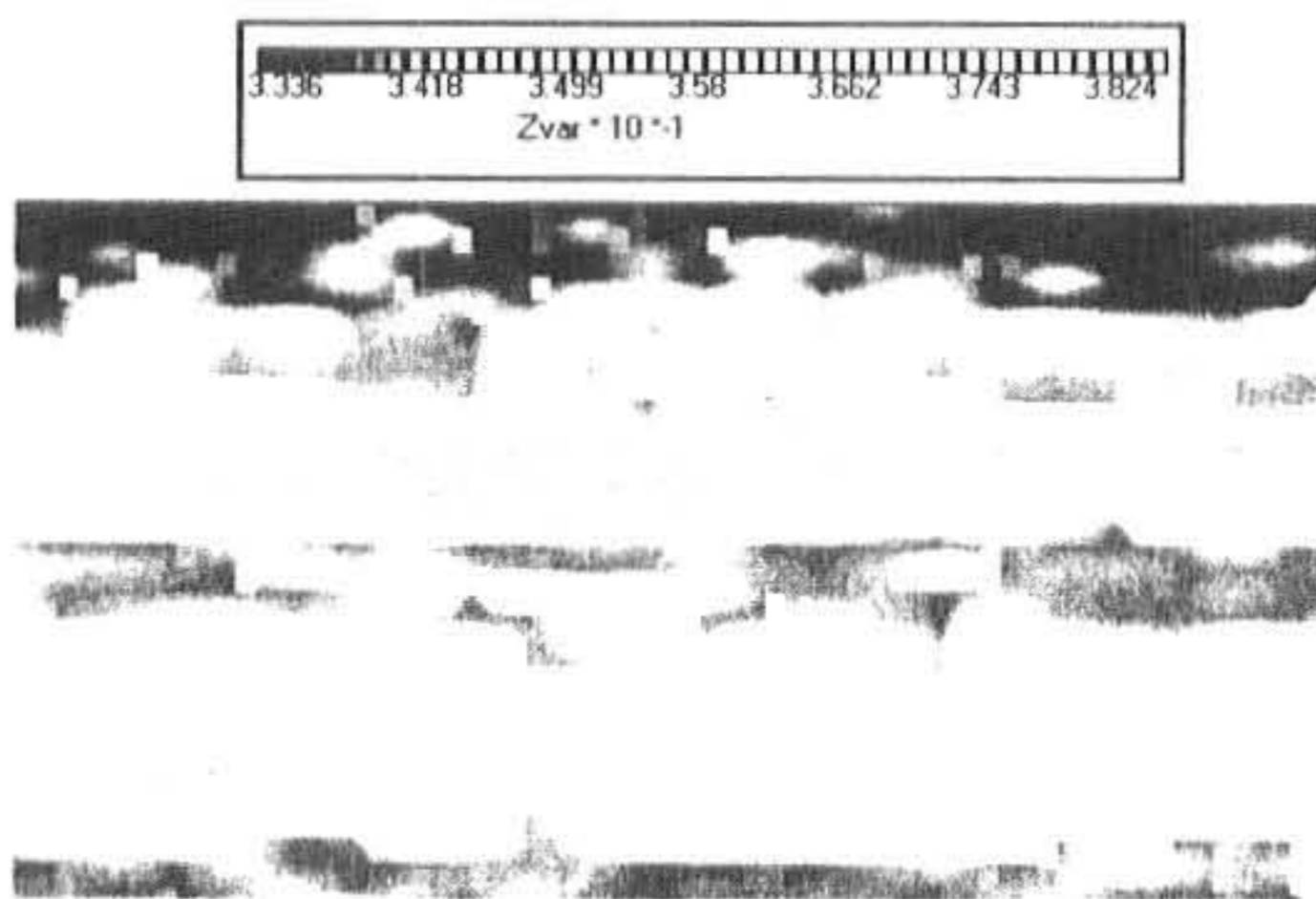


Fig. 5 Contour of Temperature Profiles at 40.0°C



Fig. 6 Instantaneous Velocity Vector Distribution with Errors along the Test Tube for  $Re = 1,594$

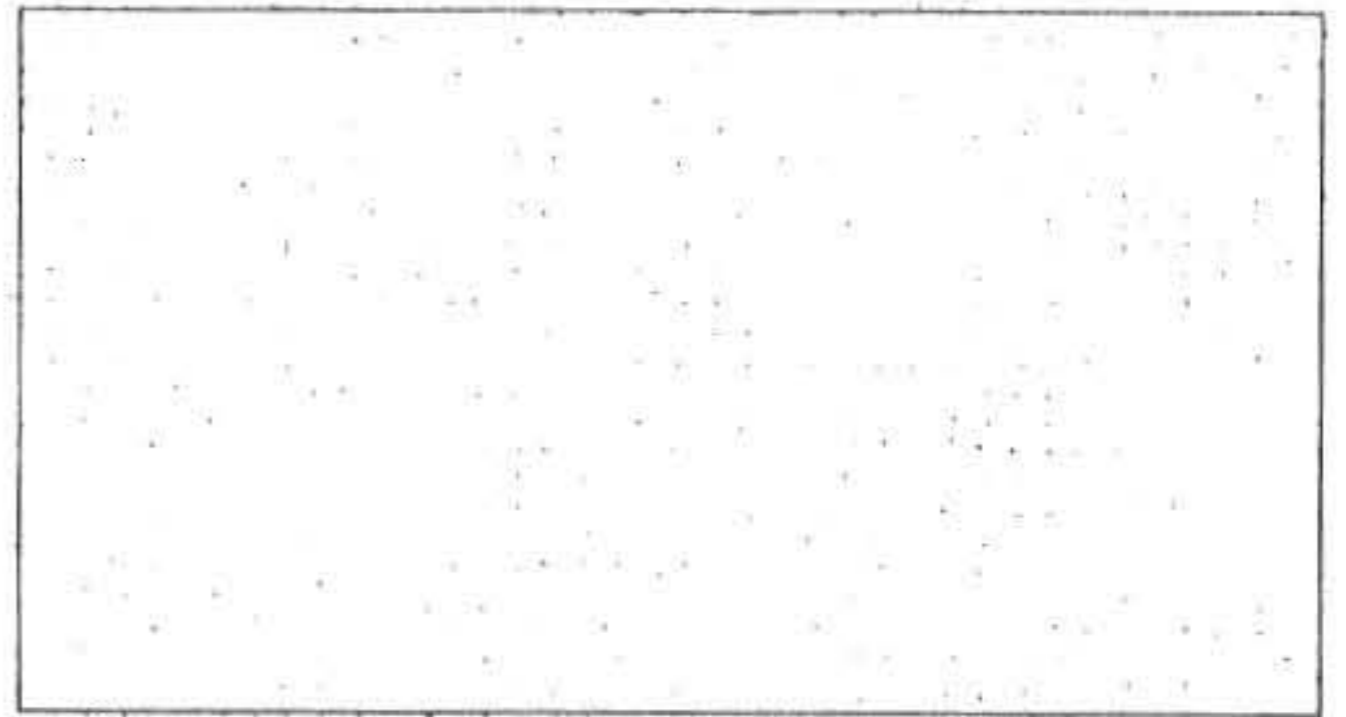


Fig. 7 Instantaneous Velocity Vector Distributions along the Test Tube for  $Re = 1,594$  after Removing Errors.

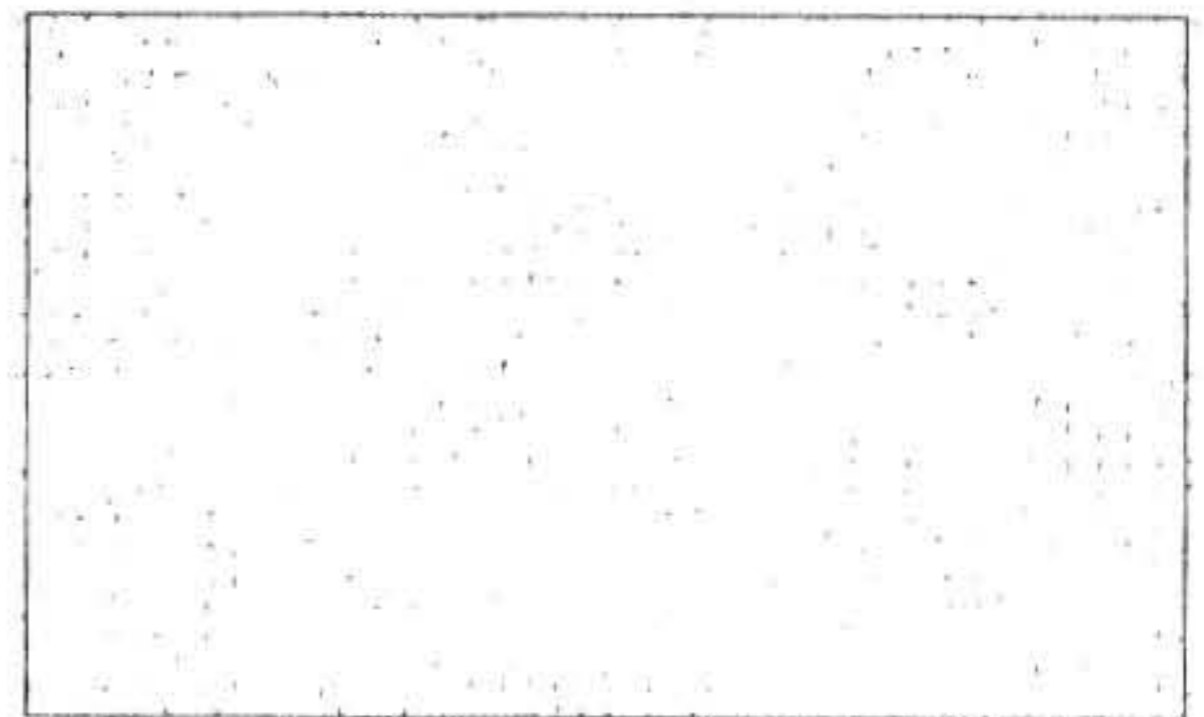


Fig.8 Instantaneous Velocity Vector Distributions along the Test Tube for  $Re = 2,140$  after Removing Errors.



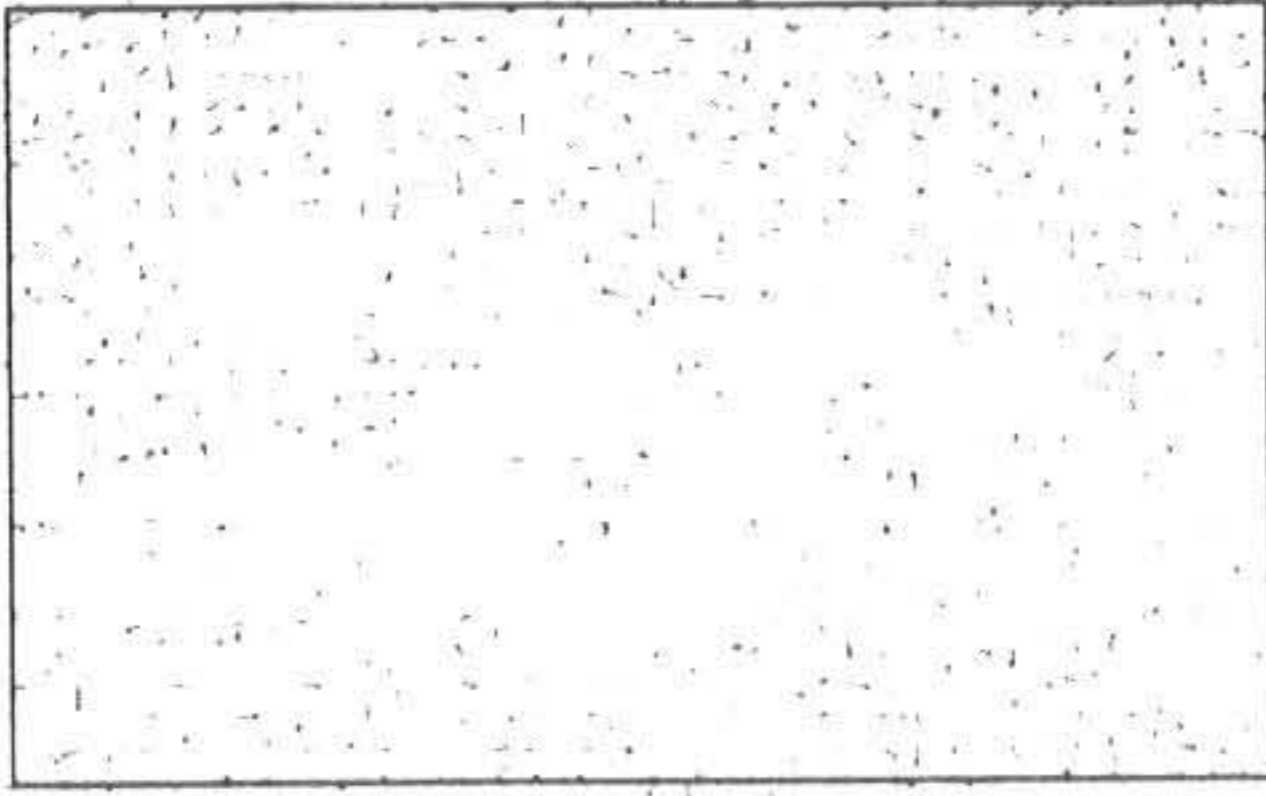


Fig. 9 Instantaneous Velocity Vector Distributions along the Test Tube for  $Re = 2,250$  after Removing Errors.

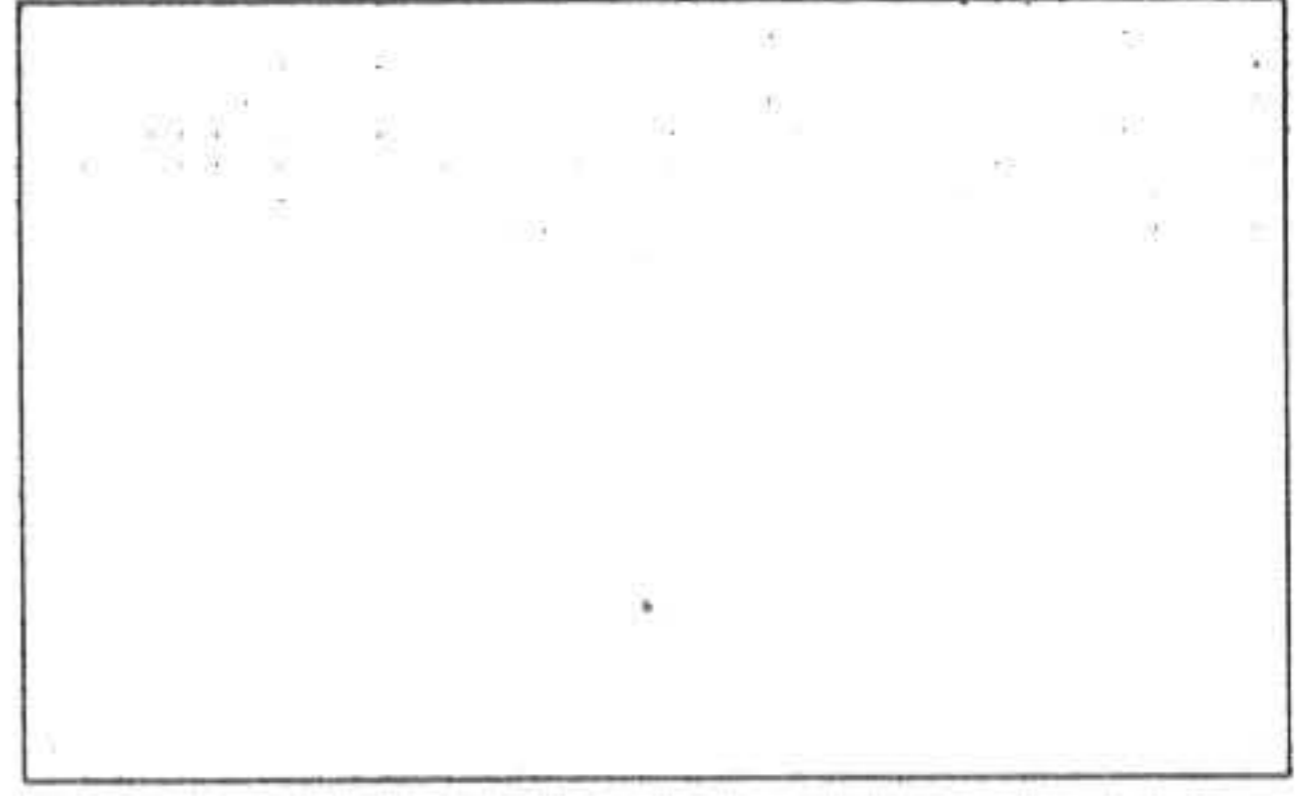


Fig.12 Mean Velocity Vector Distributions along the Test Tube for  $Re = 2,140$  after Removing Errors.



Fig. 10 Instantaneous Velocity Vector Distributions along the Test Tube for  $Re = 2,360$  after Removing Errors.

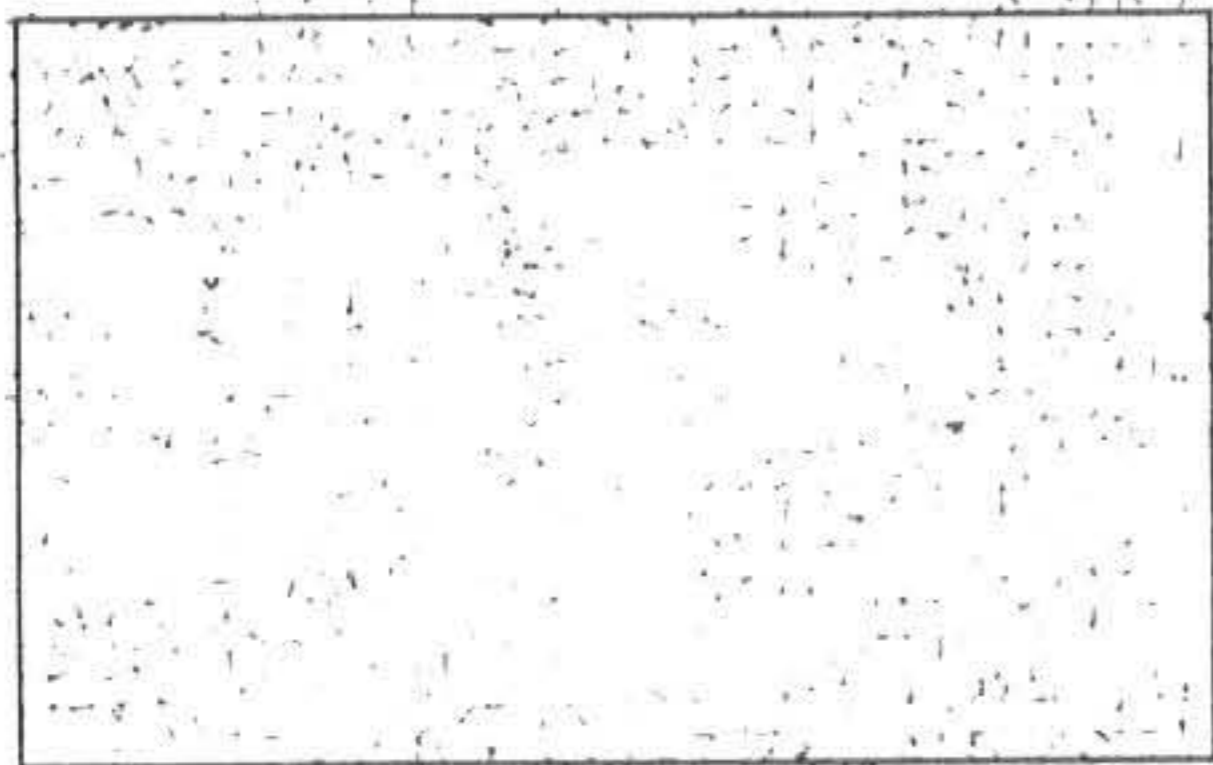


Fig. 11 Instantaneous Velocity Vector Distributions along the Test Tube for  $Re = 2,510$  after Removing Errors.

### 5. 결 론

감온 액정을 사용하여 수평 원통 관 내에서 층류유동의 속도 분포를 측정하고 아래와 같은 결론을 얻었다.

층류 유동에서는 유동이 테스트 튜브를 따라 균일한 속도분포를 보이나, 레이놀즈 수가 증가할수록 관 중심부에서는 난동이 증가하는 현상을 나타내었다. 특히,  $Re=2,360$ 과  $Re=2,510$ 에서는 아주 강한 난동현상을 나타내고 있다.

순간속도 벡터로부터 구한 평균속도 벡터는 순간속도에 비하여 아주 균일한 속도벡터를 나타내었다. 이 들 결과는 지금까지 발표된 연구결과와 정성적으로 잘부합되는 것으로 생각된다.

### 후 기

본 연구는 경남대학교 2003학년도 학술논문 게재 연구비로 이루어졌습니다.

### 참고문헌

- 1). Kimura, R., Visualization of temperature fields of water by liquid crystals. In Preprint of 2nd symposium on Flow Visualization in Japan, pp.99-102, (1974).
- 2). Doh, D. H., Kobayashi, T., Saga, T. and Segawa S., A New Consideration for Measureing for Measuring Temperature and Velocity; Particle Imaging Theremometry and Velocimetry,

Proc. 3rd JSME-KSME Fluid Engineering Conference, pp. 154-159, (1994).

3). Lee, S. J., J. H. Yoon and Doh D. H., " Simultaneous Velocity and temperature measurement of thermo-fluid flows by using Particle Imageing Technique," KSME(B), Vol. 20, No.10 pp. 3334-3343.

4). Dabiri, D. and Gharib, M., Digital Particle Image Thermometry: The Method Implementation, Experiments in Fluids, Vol.11, pp.77-86, (1991).

5). Kobayashi, T., Saga, T. and Doh, D., A Three-Dimensional Simultaneous Scalar and Vector Tracking Method. Proc. Intl. Workshop on PIV. Fukui, Japan, 33-43, (1995).

6). 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, Exp. Fluid, Vol.12, 213-222 (1992).

7). Nozaki, T., Mochizuki, T., Kaji, N. and Mori, Y. H., Application of Liquid-Crystal Thermometry to Drop Temperature Measurements, Exp. Fluids, Vol.18. 137-144 (1995).

8). Fujisawa, N., Adrian, R. J., " Three dimensional temperature measurement in turbulent thermal convection by extended range scanning liquid crystal themometry, J. of Visualization, Vol. 1, No.4, pp.355-364, (1986).

9) 부광석, 이대회, 정제훈, " 액정면에 형성된 등온선의 가시화와 정량화를 위한 영상처리에 관한 연구", 인제대논총, pp. 369-385, (1999).

10). 윤정환, 컬러 화상처리를 이용한 온도장 측정기법의 개발과 응용, 포항공과대학교 대학원 석사학위논문 (1997).

11). 문지섭, 디지털 컬러 화상처리에 의한 열 유동의 온도장 속도장 동시측정기법 개발에 관한 연구, 한국해양대학교 대학원 석사학위 논문, (2001).

12). Kimura, I., Takamori, T., and T., " Image Processing Instrumentation of flow by using Correlation technique, Flow Visualization, Vol.6, No.22, pp.105-108. (1986).

13). Utami, T., Blackwelder, R., " A Cross correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization", Experiments in Fluids, Vol.10, pp.213~223, (1991).

---

(2003년 8월26일 접수, 2004년 2월20일 채택)