

감온액정을 이용한 층류유동의 온도장에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Laminar Flow Temperature 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 temperature field in a two-dimensional cross section of fluid flow. This study found the temperature distribution for $Re = 900 \sim 1,500$ 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 temperature measurement and liquid crystal is used for heat transfer experiments in water. The experimental rig was manufactured from an acryle 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 : Thermo-sensitive liquid crystal, hue, Hele-Shaw Cell

1. 서 론

감온 액정은 1888년 오스트리아의 식물학자 Fredrich Reinitzer에 의하여 처음 발견된 물질로, 분자구조가 액체에서 고체로 변하는 과정에서 고체의 결정구조와 액체의 등방성의 중간상태가 존재하며, 이 과정에서 액정은 액체의 기체적 성질(표면장력 및 유동성)과 고체 결정체의 광학정성질을 모두 가진다¹⁾.

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 위하여는 유동의 속도를 측정하는 것이 필요하다. 층류유동의 경우 속도장과 온도장이 유기적인 관계를 가지고 있으므로 속도장뿐만 아니라 온도장의 정보를 동시에 측정할 수 있다면, 열전달 및 운동량을 정확하게 해

* 정회원, 경남대학교 기계자동화공학부 교수, 工博

E-mail : changtae@kyungnam.ac.kr

석할 수 있을 것이다.

최근, 감온성 액정(TLC, Thermo-sensitive liquid crystal)을 이용하여 온도장을 측정하는 기술이 개발되어, Kimura²⁾, Doh³⁾ 그리고 Lee⁴⁾ 등은 이 기법을 사용하여 열유체 유동에서 온도 및 속도장 해석에 활용하였다.

또한, Dabiri 와 Gharib⁵⁾은 hue 값을 켈리브레이션의 변수로 사용하는 것을 제안하였다. hue 켈리브레이션 기술은 Kobayashi⁶⁾, Ozawa⁷⁾ 그리고 Nozaki⁸⁾ 등에 의해 온도장 해석에 적용하였고, 다른 연구방법으로 Kimura²⁾와 Fujisawa⁹⁾ 등은 R, G, B와 H. S. I를 신경망의 입력 값을 이용하여 온도를 계산하였다.

국내에서 이 분야의 연구로는 윤정환¹⁰⁾은 자동차내의 실내 환기 유동에서 온도 및 속도장을 연구하였고, 문지섭¹¹⁾, 등은 Hele-Shaw Cell내의 온도 및 속도 장을 감온 액정을 사용하여 연구하였다.

이와 같은 연구들은 대부분이 자연 대류 열전달 상태에서 온도와 속도 장에 관한 연구들이고, 관내유동의 온도 및 속도분포에 관한 연구는 드물다.

본 연구에서는 TLC와 켈리 화상처리 기법을 이용하여 수평원통관내에서 강제대류 열전달 상태에서 층류 유동의 온도를 측정하고, 기존 연구 결과와 비교 연구하고자한다.

2. 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치이다. 백색광원(Stroboscope, 60w)은 S사의 제품으로 2대를 사용하였으며, 최대출력용 60W이고, 광원이송 probe를 이용하였다. 액정의 입자추적용으로 G사의 모델(1877)의 PIV(Particle Image Velocimetry) Driver 1대, CCD 카메라 1대와 이미지 그래버가 사용되었다. 실험장치의 테스트 튜브는 내경 25mm, 길이 1200mm의 아크릴 튜브를 사용하였고, 백색광의 굴절을 막기 위하여 테스트 튜브 외부에 10mm의 아크릴제품을 사용하여 수조(140mm^B × 200mm^H × 1200mm^L)를 설치하였다. 순환수는 증류수를 사용하였고, 항온 조는 D사가 개발한 제품으로 온도 조절범위가 -30℃~90℃로 그 오차는 ±0.1℃이다. 온도계측용 액정은 그 사용온도

범위가 35.0℃ ~ 40.0℃인, Hallcrest, Inc. 사의 제품을 사용하였으며, 온도장의 계측용으로 Y 사의 30 채널 온도기록계와 k 형 열전대를 계측하고자 하는 위치에 설치하였다.

감온 액정의 사용상 손실을 줄이기 위하여 테스트튜브를 폐회로로 구성하고, 항온조에 내장된 순환 펌프(출력 90W)를 이용하여 항온조에 다시 되돌아갈 수 있도록 제작하였다. CCD 카메라를 통하여 이미지 그래버에 입력된 데이터는 호스트 컴퓨터에 연결하여 처리하였다.

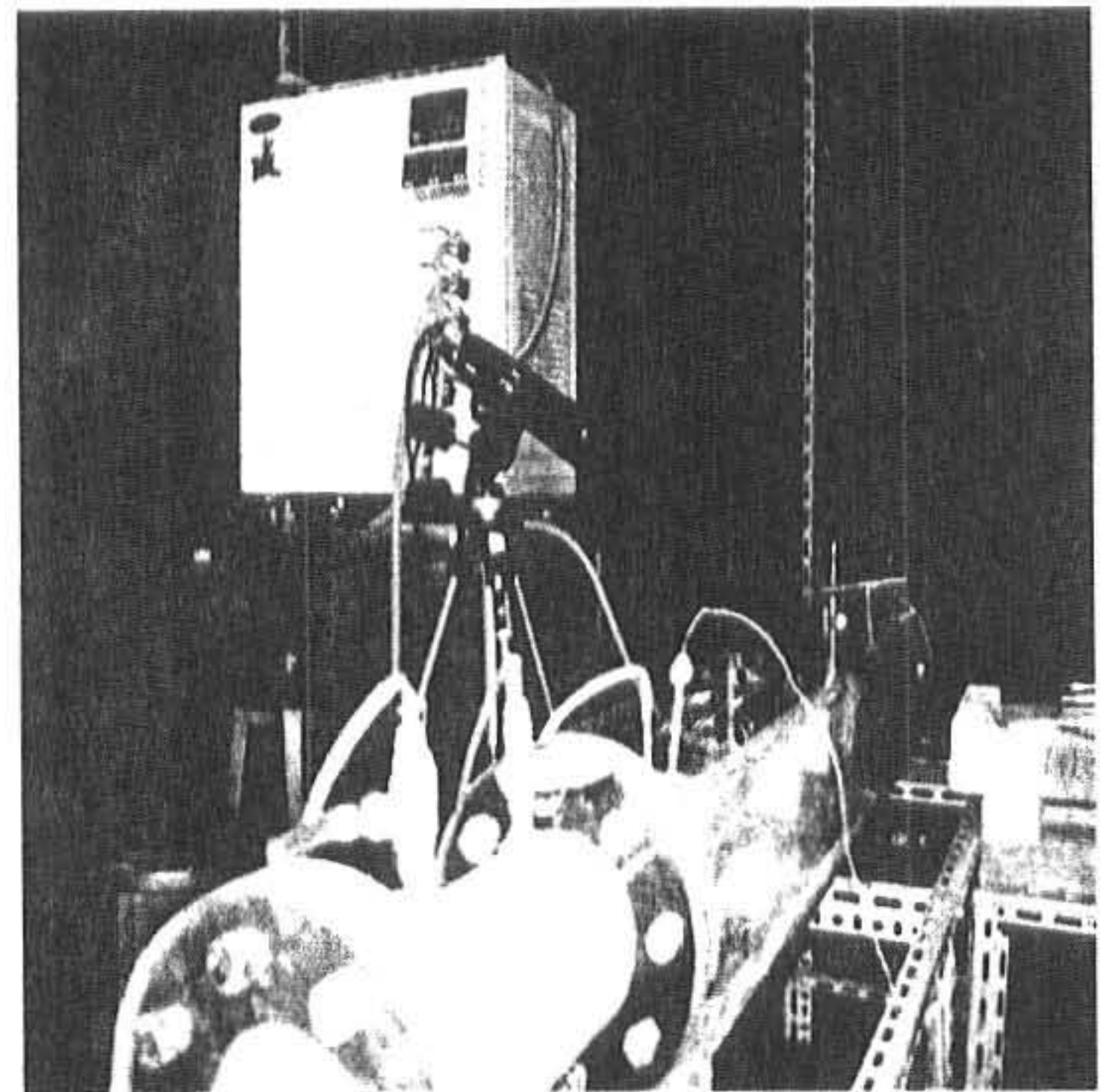


Fig. 1 Photograph of the Experiment Rig

3. 실험방법

3.1 온도장 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 입자의 변위를 계산하였다.

사용된 알고리즘은 Kimura 및 Utami¹²⁾¹³⁾이 사용한 계수 값이 최대인 좌표 값들을 벡터의 종점으로 두는 개조치 상호상관기법을 사용하였다.

입자의 변위를 구하는 알고리즘은 속도벡터의 추출에 이용되는 개별입자의 중심을 이용

하여 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 레이저광의 대신으로 사용하였고, 광원의 이동을 용이하게 하기 위해 광케이블로 빛을 이동시킬 수 있는 프로브를 사용하였다

온도 계측을 위하여 먼저 사용된 액정을 실험하고자하는 각각의 온도(33°C ~ 40°C)에 대한 켈리브레이션 작업을 수행하였다. 액정의 온도 변화에 대한 보정용으로 0.5mm 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(1)과 식(2)으로 나타내는 휘도 값과 색상 값을 사용하였다.

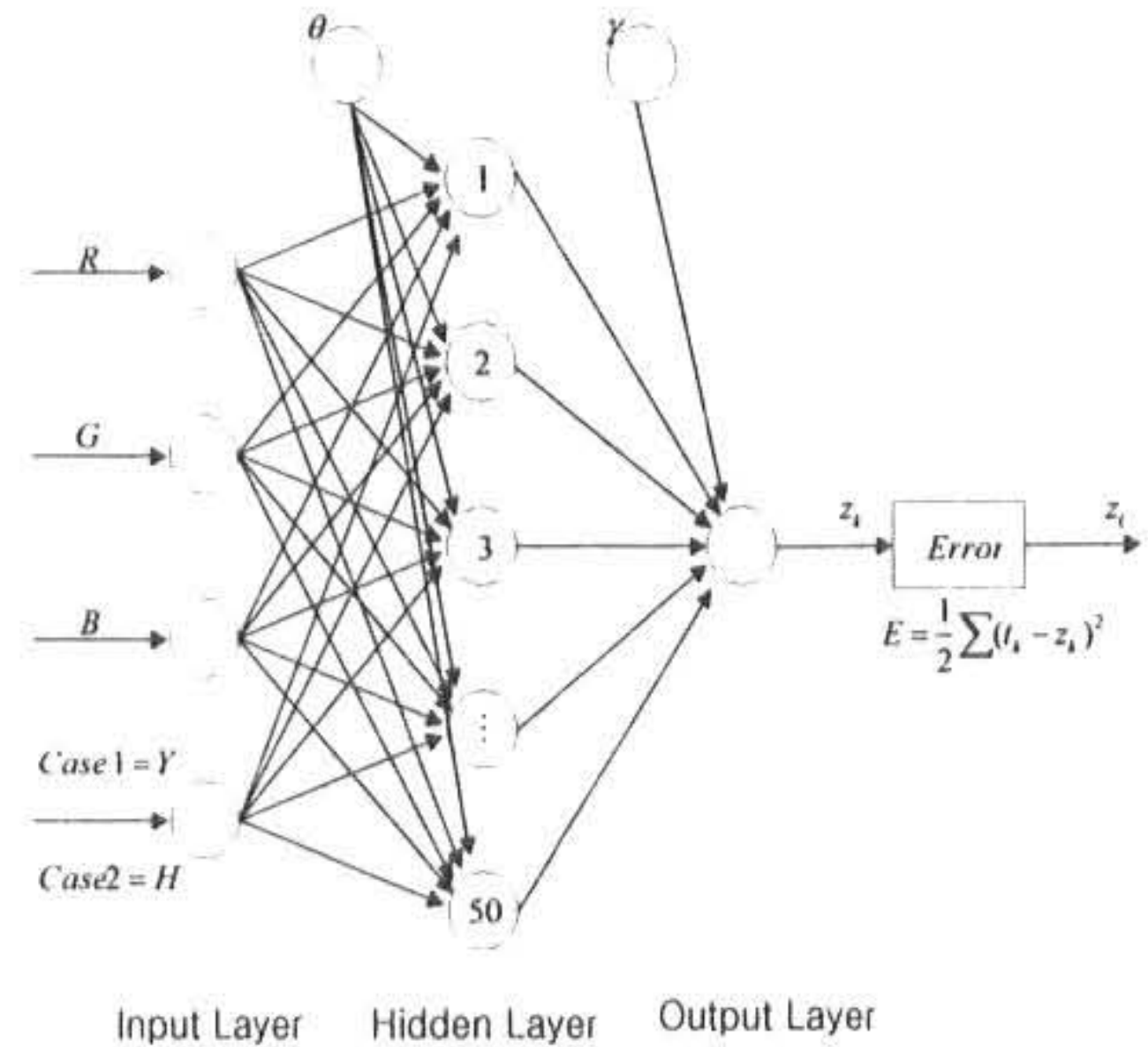


Fig. 2 Used Neural Network

$$Y=0.3R+0.59G+0.11B \quad \dots\dots\dots(1)$$

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

$$B \leq G$$

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

$$B > G \quad \dots\dots\dots(2)$$

- Color information on the grids of 35×35
- 50000 times of learning
- To minimize the error

$$\rightarrow E_k = \frac{1}{2} \sum_k (t_k - z_k)^2$$

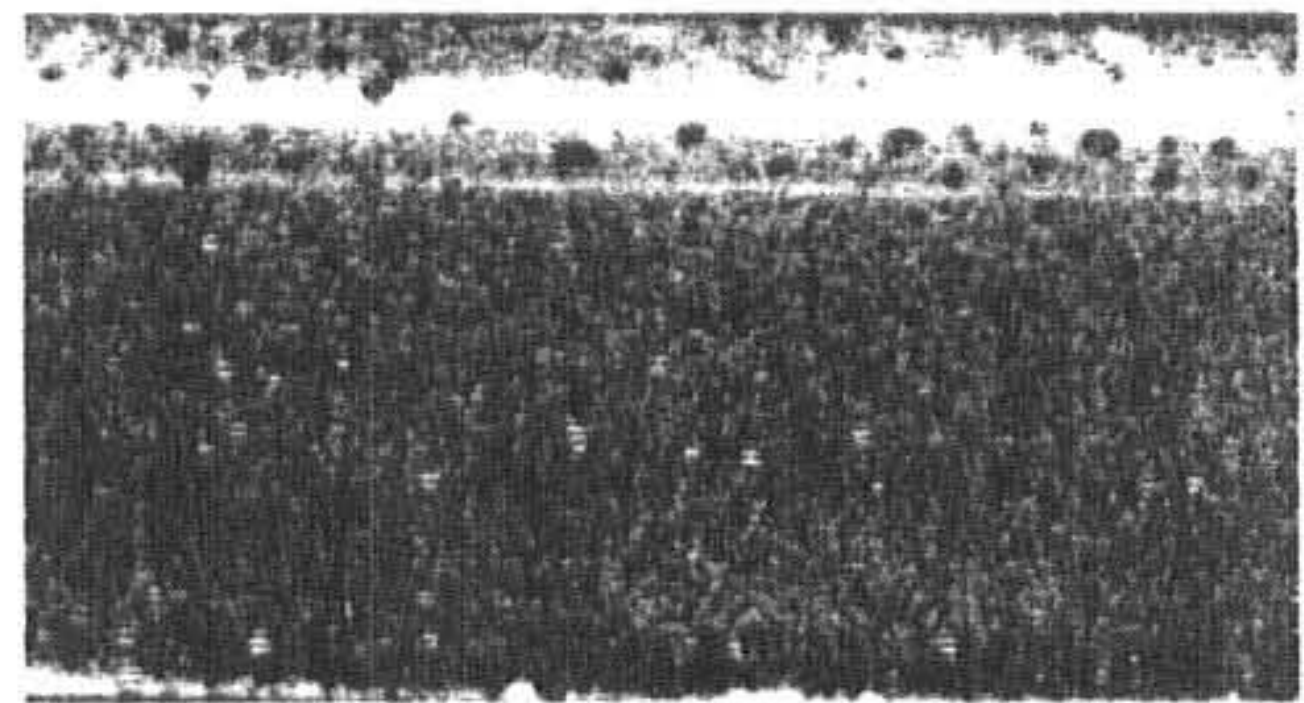


Fig. 3 Calibration image at 34.5°C



Fig. 4 Calibration image at 36.6°C

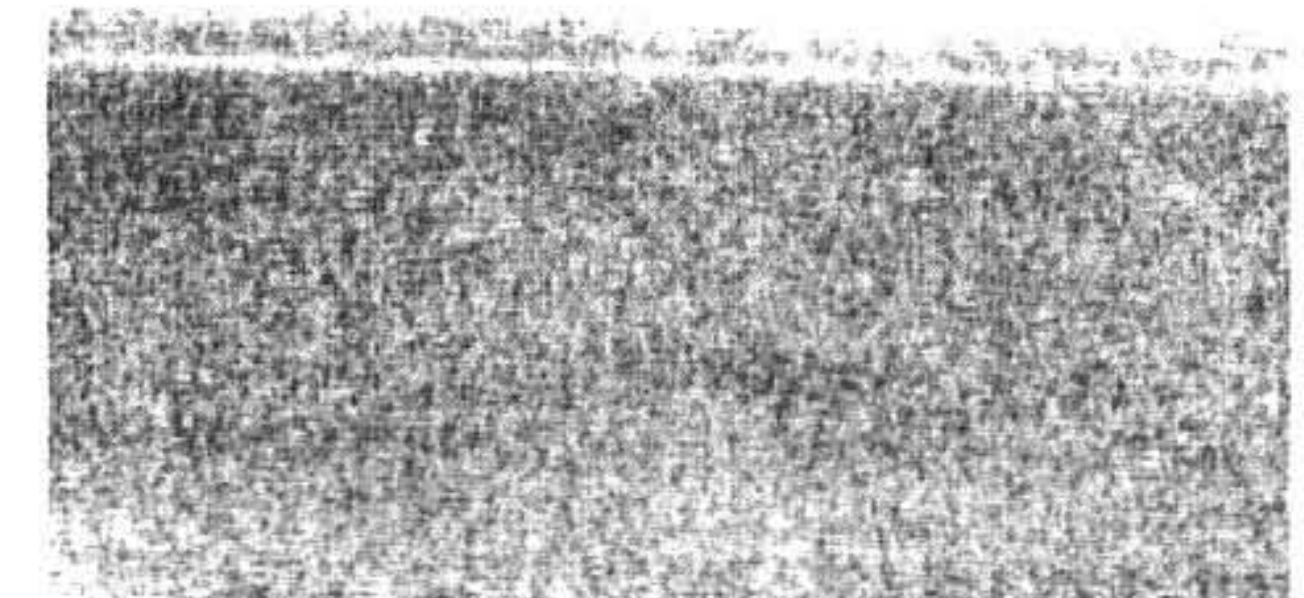


Fig. 5 Calibration image at 37.5°C

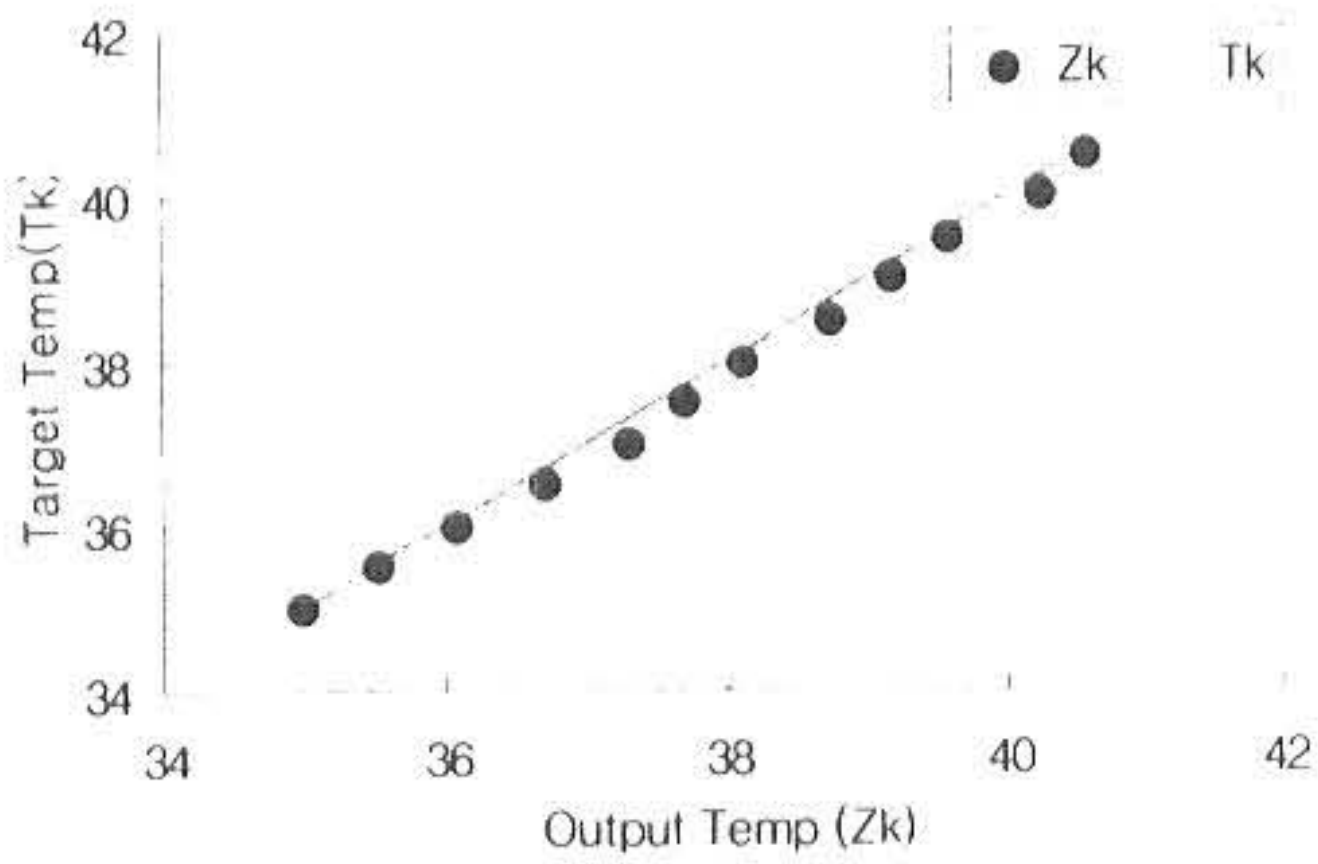


Fig. 6 Calibration Curve for Liquid Crystal

Fig. 3~ Fig.5는 액정의 켈리브레이션 이미지를 나낸다. 34.5°C에서 Red가 시작되고 있다. 그리고, 36.6°C에서 Green이 나타나고 청색(Blue)은 37.5°C에서 시작되었다. Fig. 6은 이들 값들로부터 구한 감온 액정의 보정곡선이다.

4. 실험결과 고찰

Fig. 7, 8, 9, 10, 11 그리고 13은 테스트 튜브 $X/D = 40$ 에서 주어진 온도에 대한 온도 분포를 각각 나타내고 있다. Fig. 7의 경우 테스트 튜브 입구온도 34.0°C에서 얻은 결과이다. 테스트 튜브 중심에서 액정의 색깔은 붉은 색을 나타나기 시작하고 있다. Fig. 8은 35.5°C에서 온도분포이고, 관의 중심 부근에서 붉고, 노란 색이 점차 증가하고 있고, 관 벽에서는 최소 값을 나타내고 있다.

Fig. 9, Fig. 10 그리고 Fig.13은 액정의 온도 36.0°C, 37.5°C 그리고 40.0°C에서 온도 분포를 각각 나타내고 있다.

관 중심부에서는 최고온도를 나타내고, 관벽 근처에서는 최저온도를 보여주고 있다.

이 결과는 지금까지 발표된 수평 관에서 열전달 결과인, 내부 유체가 등온인 경우 관벽 근처에서 최소 값을 나타내고 관중 심에서 최대 값을 나타내는 연구 결과와 잘 부합되는 것으로 생각된다.

또한, 액정의 제조회사의 시험 결과를 보면 액정이 34.5°C부터 적색(red)을 나타내고 36°C부터 녹색(green)을 나타내다 37.5°C부터 청색(blue)을 나타내는 것으로 보고하였다. 이 시험 결과와도 부합되고 있다.

그러나 Fig. 11과 Fig. 12는 지금까지 발표된 연구 결과와는 다소 차이가나는 현상을 보여주고 있다. 즉, 테스트 튜브의 바닥 근처에서 저온영역을 나타내내고, 튜브의 상부에서 최고온도를 나타내고 있다. 이 결과는 카메라의 영상을 잡는 위치의 차이로 인한 결과인 것으로 생각된다.

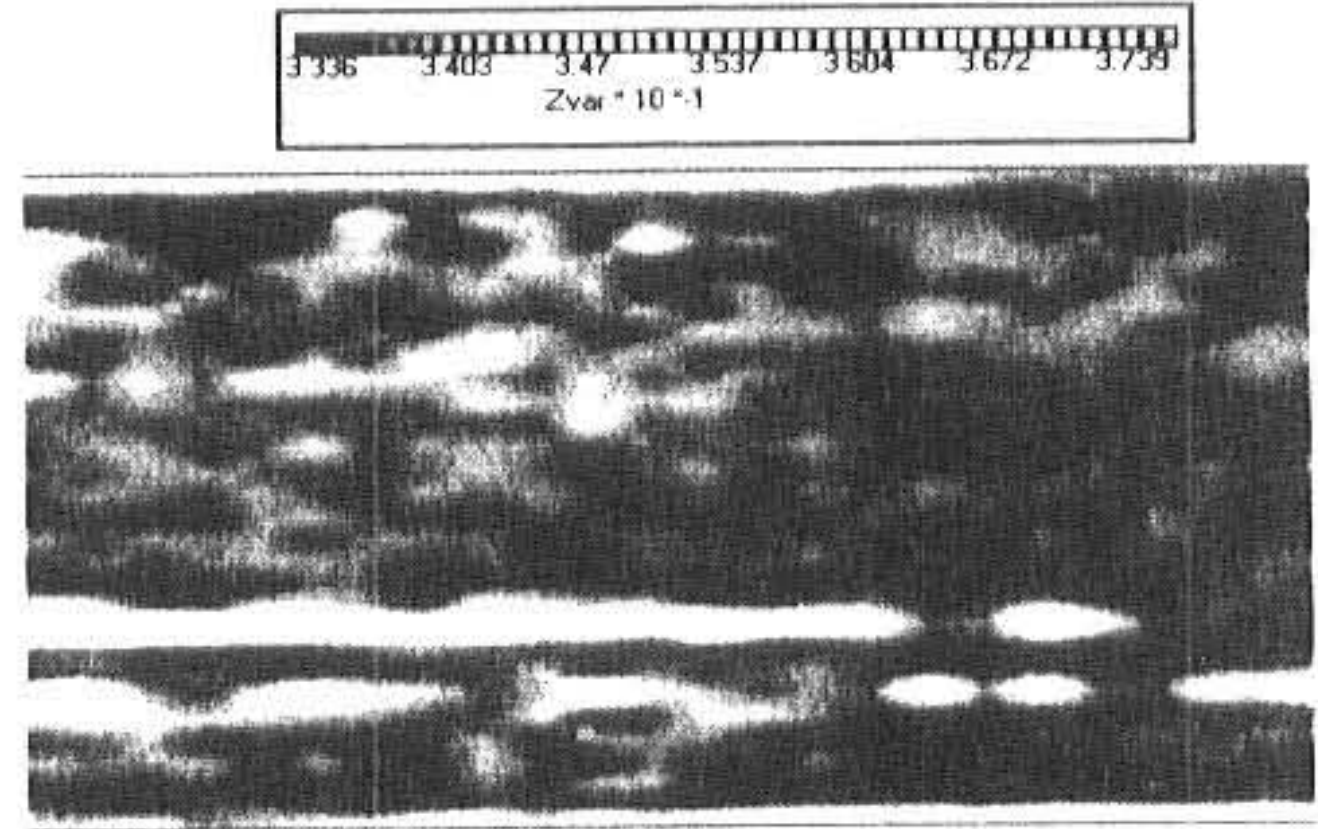


Fig. 7 Contour of Temperature Profiles at 34.0°C

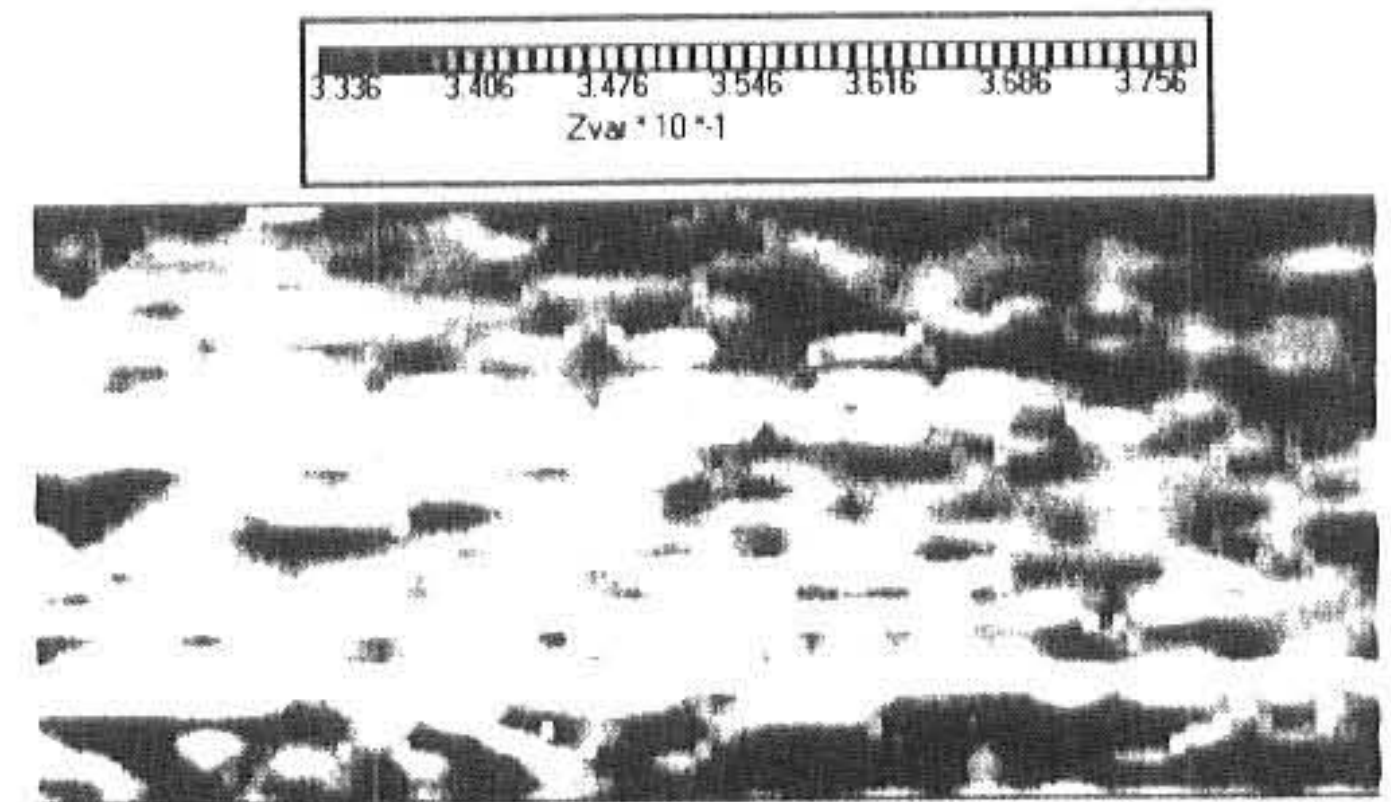


Fig. 8 Contour of Temperature Profiles at 35.5°C

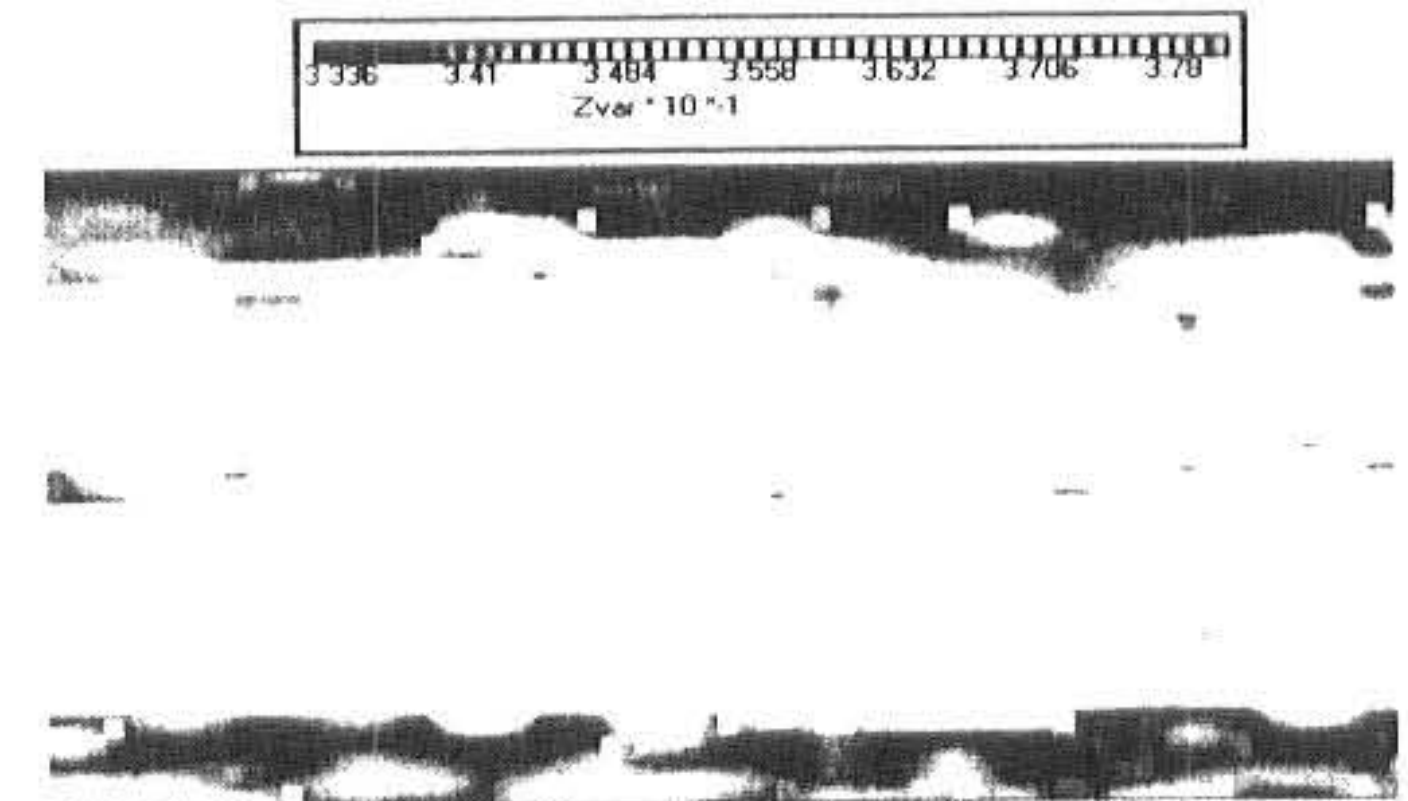


Fig.9 Contour of Temperature Profiles at 36.0°C

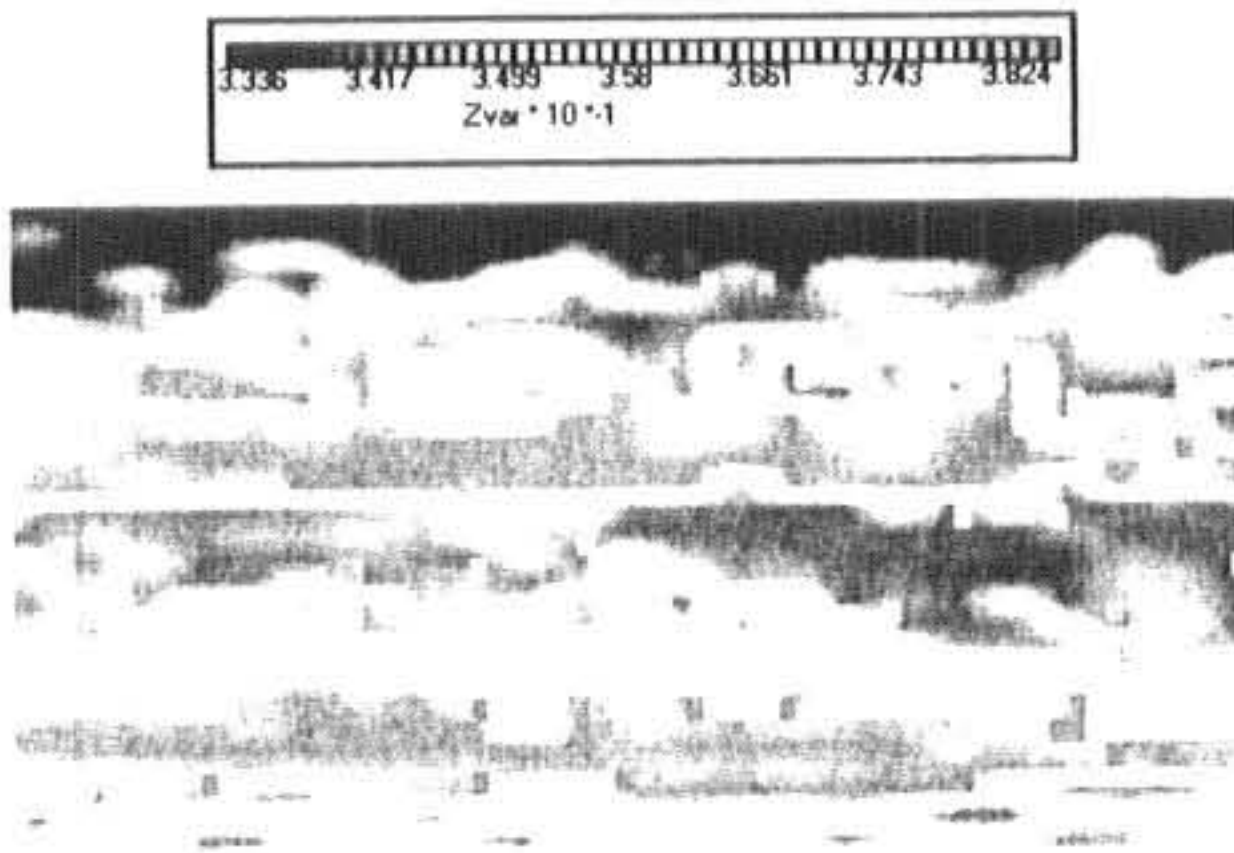


Fig.10 Contour of Temperature Profiles at 37.5°C

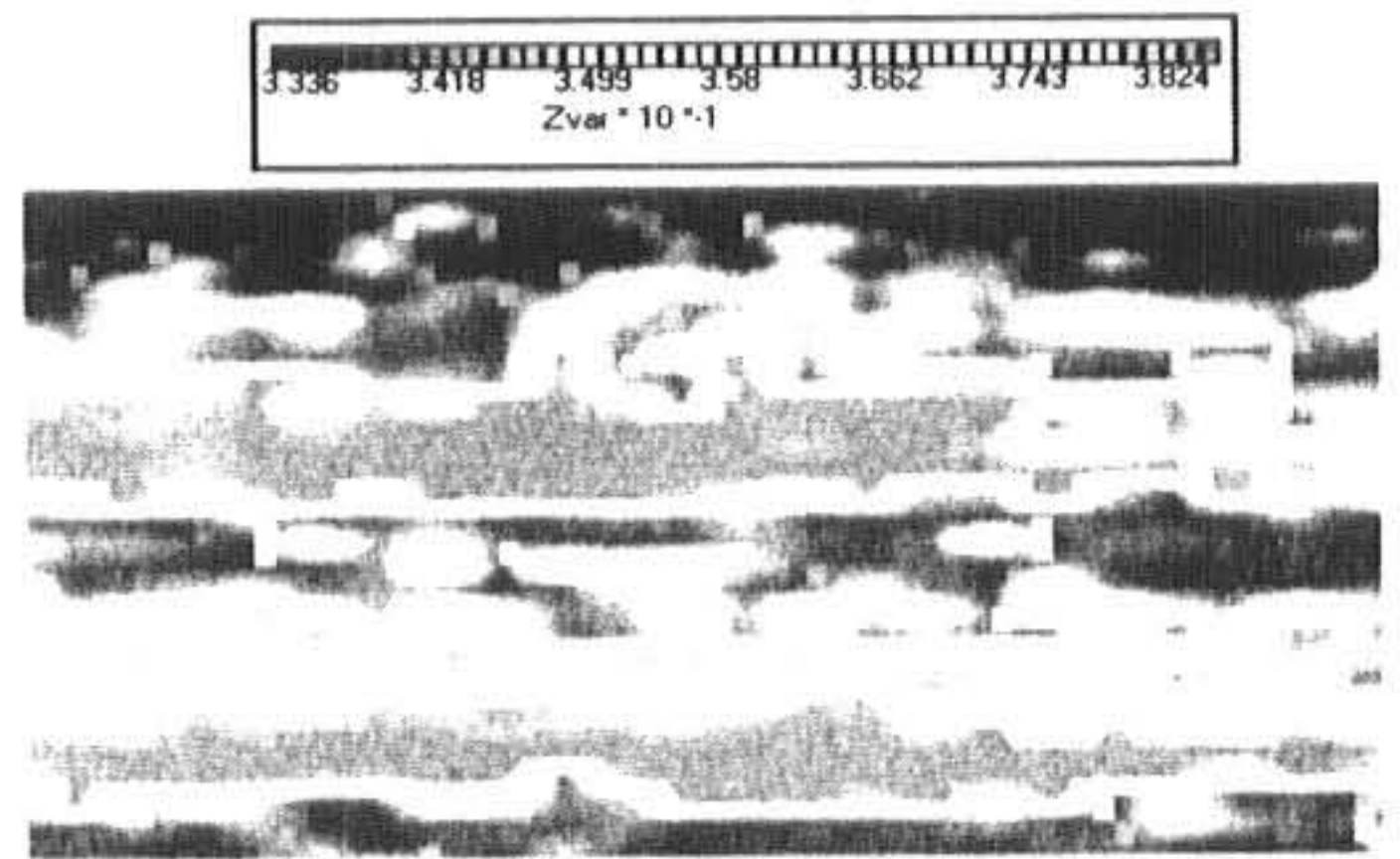


Fig.13 Contour of Temperature Profiles at 40.0°C

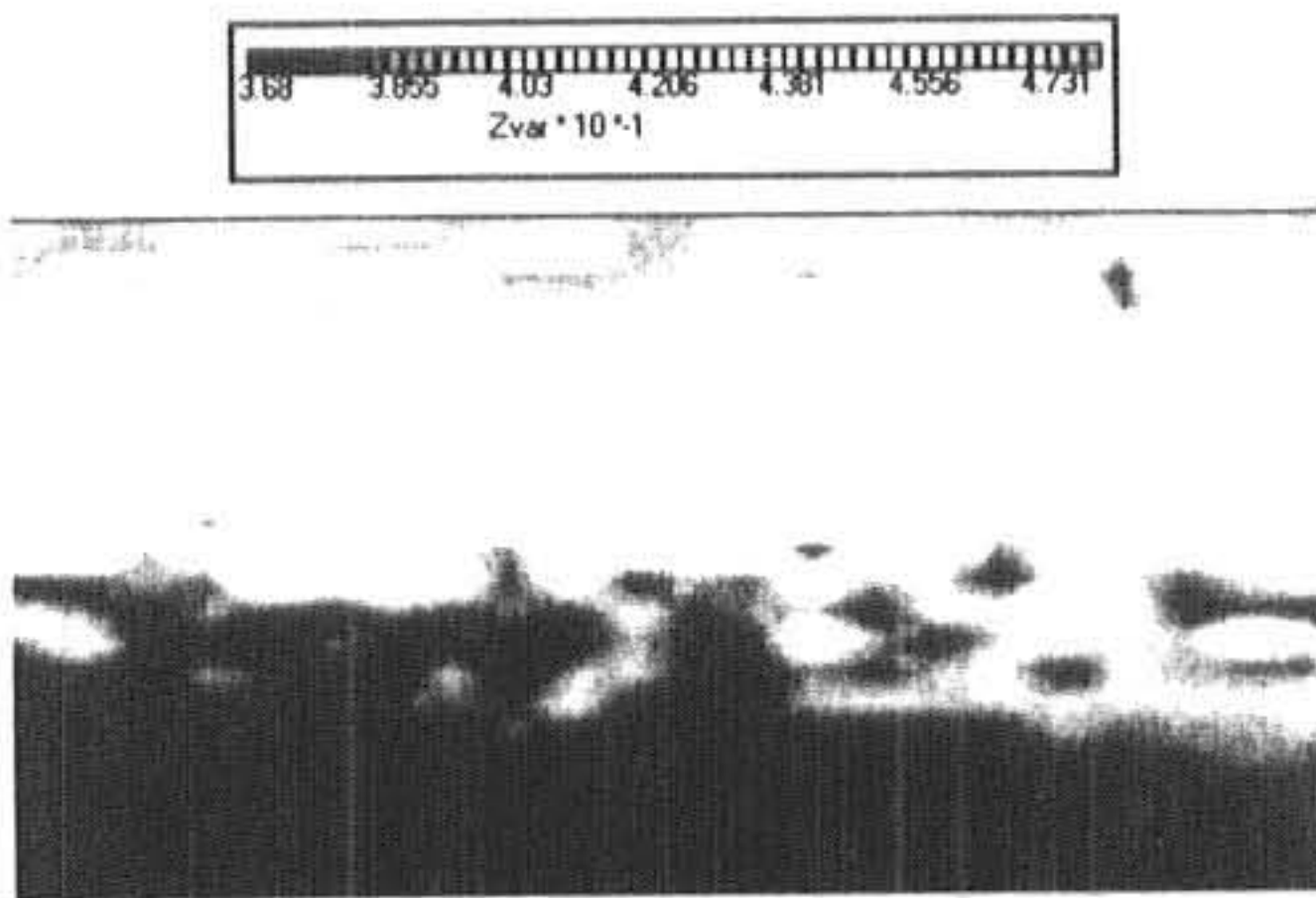


Fig.11 Contour of Temperature Profiles at 38.0°C

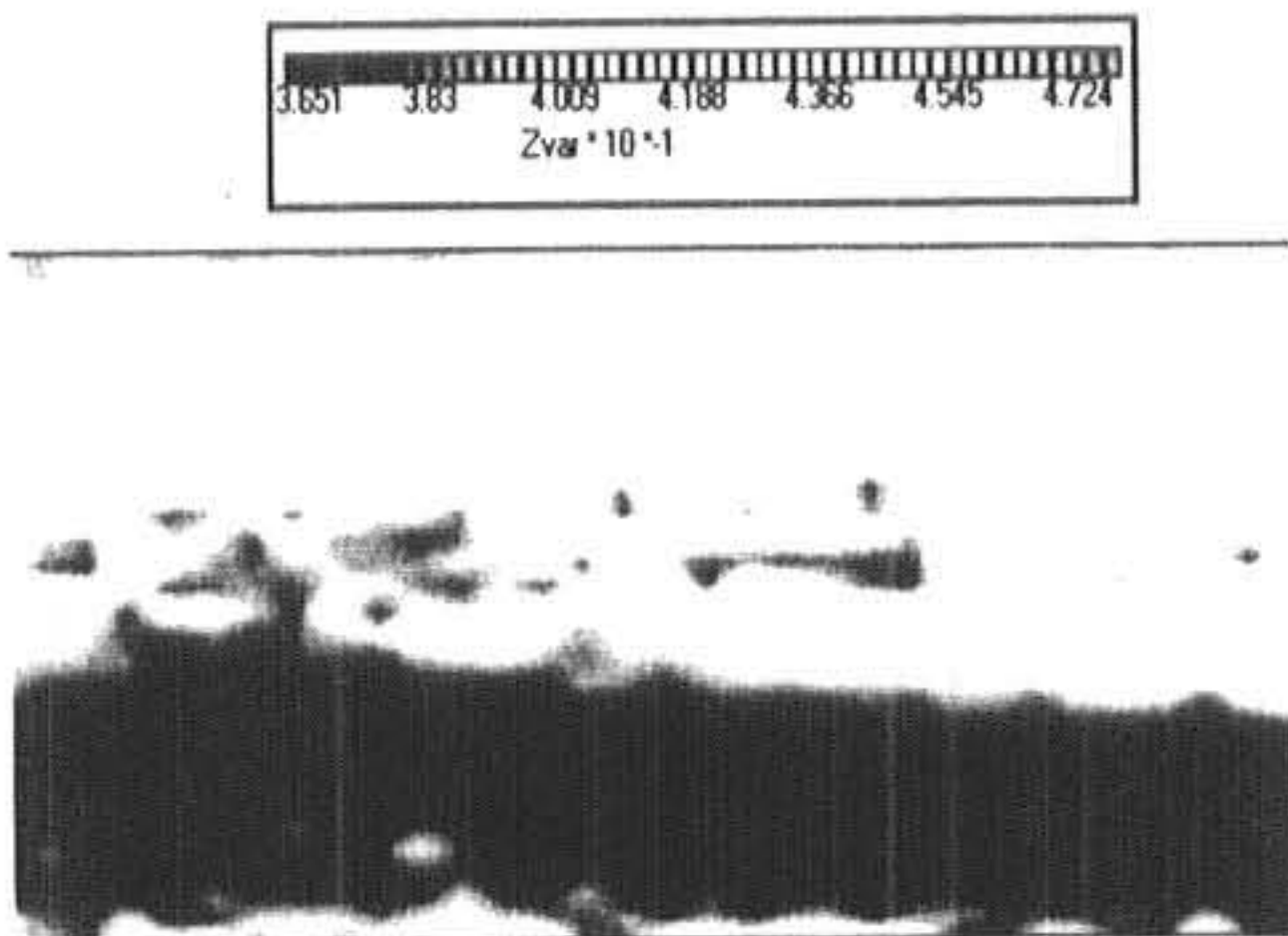


Fig.12 Contour of Temperature Profiles at 39.0°C

5. 결 론

감온 액정을 사용하여 수평 원통관에서 층류 유동의 온도 분포를 측정하고자 본 연구를 시작하였다.

관 중심부에서는 최고온도를 나타내고, 관 벽 근처에서는 최저온도를 나타내었다. 이 결과는 지금까지 발표된 수평 관에서 열전달 결과인, 내부유체가 등온인 경우 관 벽 근처에서 최소 값을 나타내고 관중 심에서 최대 값을 나타내는 연구결과와 잘 부합되는 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 경남대학교 2003학년도 학술논문 게재 연구비로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- 1) 부광석, 이대희, 정제훈, "액정면에 형성된 등온선의 가시화와 정량화를 위한 영상처리에 관한 연구", 인제대논총, pp.369-385, 1999.
- 2) 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.
- 3) Doh, D. H., Kobayashi, T., Saga, T. and Segawa S., A New Consideration for Measuring for Measuring Temperature and Velocity ; Particle Imaging Thermometry

- and Velocimetry, Proc. 3rd JSME-KSME Fluid Engineering Conference, pp.154-159, 1994.
- 4) 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.
- 5). Dabiri, D. and Gharib, M., Digital Particle Image Thermometry: The Method Implementation, Experiments in Fluids, Vol.11, pp.77-86, 1991.
- 6). Kobayashi. T., Saga, T. and Doh, D., A Three-Dimensional Simultaneous Scalar and Vector Tracking Method. Proc. Intl. Workshop on PIV. Fukui, Japan, pp.33-43, 1995.
- 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, Exp. Fluid, Vol.12, pp.213-222 1992.
- 8). Nozaki, T., Mochizuki, T., Kaji, N. and Mori, Y. H., Application of Liquid-Crystal Thermometry to Drop Temperature Measurements, Exp.Fluids, Vol.18. pp.137-144 1995.
- 9). 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.
- 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 석사학위논문, 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 8월11일 접수, 2003년 11월20일 채택)