

수평원통 관에서 감온액정을 이용한 난류유동의 온도 및 속도장에 관한 실험적 연구

장 태 현[†] · 도 덕 희^{*}

(원고접수일 : 2003년 8월 30일, 심사완료일 : 2003년 11월 7일)

An Experimental Study on Temperature and Velocity Fields of the Turbulent Flows Horizontal Cylindrical Tube by Using Thermo-sensitive Liquid Crystal

Tae-Hyun Chang[†] · Deog-Hee Doh^{*}

Key words : Thermo-sensitive liquid crystal(감온액정), Neural-Network(뉴럴네트워크),
Bulk Temperature(체적온도), Teaching temperature(학습온도)

Abstract

An experimental investigation was performed to study the characteristics of turbulent water flow in a horizontal circular tube by using liquid crystal. To determine some characteristics of the turbulent flow, 2D PIV technique is employed for velocity measurement and liquid crystal is used for heat transfer experiments in water. Temperature visualization was made quantitatively by calibrating the color of the liquid crystal versus temperature using various approaches (TLC technique: Thermochromic Liquid Crystal), and a neural-network algorithm was applied to the color-to-temperature calibration.

This study should the temperature and time-mean velocity distribution for $Re = 2,436$, $2,500$ and $2,724$ along longitudinal sections and the results appear to be physically reasonable.

Nomenclature

A : surface area of the test tube or cross-sectional area of the test tube	h : heat transfer coefficient
C_p : specific heat at constant pressure	\bar{h}_y : local convection heat transfer coefficient
D : inner diameter of the test tube	k : thermal conductivity
E_k : runnig errors	\dot{m} : mass flow rate
	Nu : Nusselt number
	Nu_{DB} : Nusselt number for fully developed flow

[†] 책임저자(경남대학교 기계자동차공학부) E-mail:changtae@kyungnam.ac.kr, T : 055)249-2613

^{*} 한국해양대학교 기계정보공학부

- Q : heat flux or flow rate
 R : inner radius of the test tube
 r : local radius of the test tube
 Re : Reynolds number
 T : temperature of fluid
 T_b : bulk temperature
 T_k : teaching temperature
 T_w : wall temperature
 ΔT_m : logarithmic mean temperature difference
 u : axial velocity
 u_m : mean axial velocity
 X : axial length
 X/D : non-dimensional length.
 y : radial distance from the tube wall.
 z_k : neural-network result temperature

1. 서 론

난류유동은 층류유동에 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 난류유동의 순간속도를 측정하는 것이 필요하다. 난류유동의 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, Kimura⁽¹⁾, Doh⁽²⁾ 그리고 Lee 등⁽³⁾은 이 기법을 사용하여 열유체 유동에서 온도 및 속도장 해석에 활용하였다.

또한, Dabiri 등⁽⁴⁾은 Hue 값을 캘리브레이션의 변수로 사용하는 것을 제안하였다. Hue 캘리브레이션 기술은 Kobayashi 등⁽⁵⁾, Ozawa 등⁽⁶⁾ 그리고 Nozaki 등⁽⁷⁾에 의해 온도장 해석에 적용하였고, 다른 연구 방법으로 Kimura 등⁽¹⁾과 Fujisawa 등⁽⁸⁾은 R, G, B와 H, S, I를 신경망

의 입력 값으로 사용하여 온도를 계산하였다.

강제대류에 관한 연구로 Wiezbowski 등⁽⁹⁾은 핀 튜브형 열 교환기 모델을 이용하여 대류열전달 계수와 Nusselt 수를 구하였다.

국내에서 이 분야의 연구로는 윤정환⁽¹⁰⁾은 자동차내의 실내 환기 유동에서 온도 및 속도장을 연구하였고, 이두열⁽¹¹⁾, 정문수⁽¹²⁾, 문지섭⁽¹³⁾ 그리고 배대석 등⁽¹⁴⁾은 Hele-Shaw Cell 내의 온도 및 속도장을 감온 액정을 이용하여 연구하였고, 홍철현 등⁽¹⁵⁾은 과도 액정기법을 이용하여 공기의 평균 열전달 계수를 구하였다.

이와 같은 연구들은 대부분이 자연 대류열전달 상태에서 온도와 속도장에 관한 연구들이었다.

본 연구에서는 TLC와 컬러화상처리 기법을 이용하여 수평원통관내에서 강제대류 열전달 상태에서 온도 및 속도분포를 구하고 Nusselt 수를 계산하여 기존 연구결과와 비교 연구하고자 한다.

2. 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치와 백색광 및 계측장치의 구성도 이고, Fig. 2는 실험장치의 사진이다. 광원으로는 S사의 모델 DSX-240Bc의 백색광원(Stroboscope, 60W) 2대와 광원이 송 프롭(Probe) 및 PIV 드라이버 1대, CCD 카

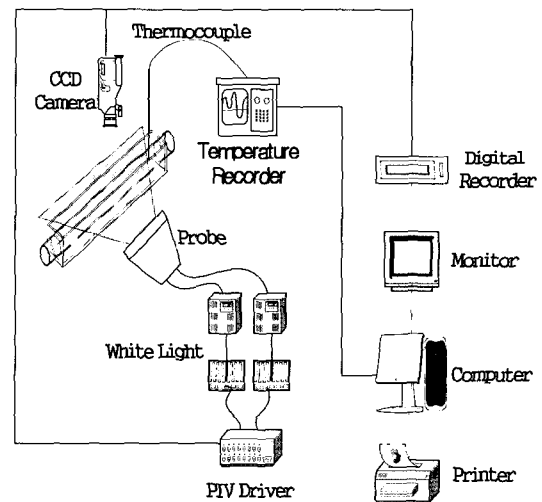


Fig. 1 Schematic diagram of experimental rig.

메라 1대와 이미지 그래버가 사용되었다. 실험장치의 테스트 튜브는 내경 25mm, 길이 1200mm의 아크릴 튜브를 사용하였고, 백색광의 굴절을 막기 위하여 테스트 튜브 외부에 수조(120mm^b×200mm^b×1300mm^l)를 설치하였다.

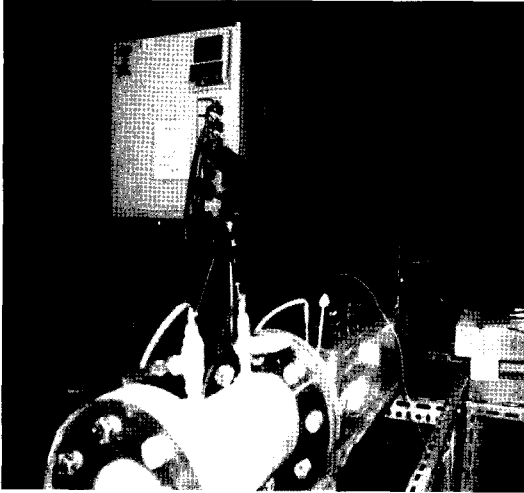


Fig. 2 Photograph of the experimental rig.

순환수는 증류수를 사용하였고, D사가 개발한 항온조 1대를 사용하였다. 사용된 액정은 Hallcrest, Inc. 사의 제품을 사용하였다. 온도장의 계측용으로 Y 사의 30 채널 온도기록계와 k-형 열전대를 계측하고자 하는 위치에 설치하였다. 테스트 튜브의 벽면온도를 일정하게 유지시키기 위하여 테스트 튜브 외부에 설치한 수조에 수도수를 주입하여 액정의 유동과는 역방향으로 흐르도록 제작하였다.

3. 실험방법

3.1 온도장 계측

온도 계측을 위하여 먼저 사용된 액정을 실험하고자 하는 각각의 온도(33℃~45℃)에 대한 캘리브레이션 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)의 정보를 사용하

였다. Fig 3에서와 같은 신경망의 입력 값으로서 식(1)과 식(2)로 나타내는 휘도 값과 색상 값을 사용하였다.

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

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

$$B \leq G$$

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

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

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

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

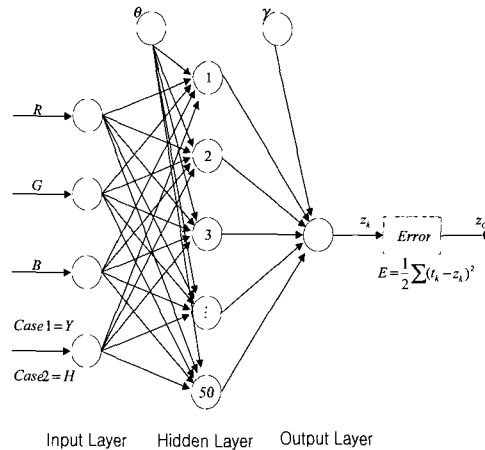


Fig. 3 Used neural network.

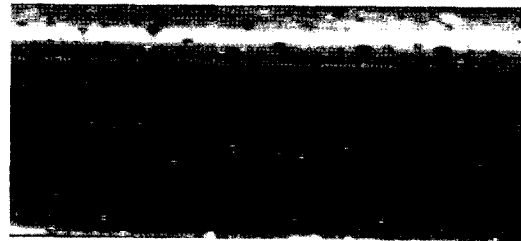


Fig. 4 Calibration image at 34.5℃.

Fig. 4~ Fig. 6은 액정의 캘리브레이션 이미지를 나낸다. 34.5℃에서 적색(red)이 시작되었고,

36.6°C에서 녹색(green)이 나타나고 청색(blue)은 37.5°C에서 시작되었다.



Fig. 5 Calibration image at 36.6°C.

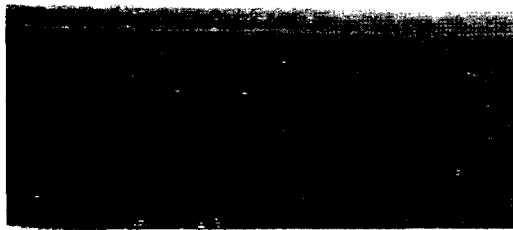


Fig. 6 Calibration image at 37.5°C.

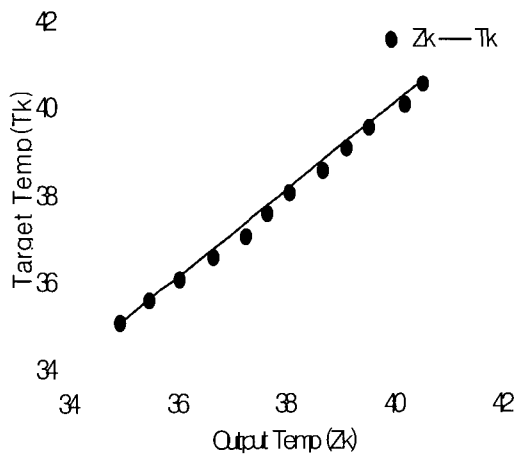


Fig. 7 Calibration curve for liquid crystal.

Fig. 7은 이들 값들로부터 구한 액정-온도 보정 곡선을 보인다. 이 곡선을 이용하여 액정이 함유된 열유동장의 온도를 측정할 수 있다.

3.2 속도장 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 등⁽¹⁶⁾ 및 Utami 등⁽¹⁷⁾이 사용한 계수 값이 최대인 좌표 값들을 벡터의 중점으로 두는 식(3)과 같은 개조치 상호상관기법을 사용하였다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (3)$$

식 (3)의 C_{fg} 는 상관계수를 f_i , g_i 는 상관영역내의 각 픽셀(Pixel)의 계조치를 의미하며 “-”는 평균을 뜻한다.

본 연구에 사용된 소프트웨어는 T회사의 Tinker's를 이용하였다.

4. 실험결과 고찰

4.1 온도분포

Fig. 8~Fig. 14는 테스트 튜브 X/D = 40에서 온도 분포를 각각 나타내고 있다. Fig. 8의 경우 테스트튜브 입구온도 34.5°C서 얻은 결과이다.

측정영역 내에서 액정의 색깔은 붉은색으로부터 파란색까지 나타내고 있는 것으로보아 이 영역에서의 온도범위는 액정의 발색온도 범위(34.5°C~40°C)와 일치하고 있으므로 판단된다.

지금까지 발표된 수평 원통관에서 대한 연구성과^(18, 19, 20)에 의하면 열전달량은 등온 벽면에서 유체가 냉각되는 경우 내부 유체는 관 벽 근처에서 최소 값을 나타내고 관중 심에서 최대 값을 나타내게 되는데, Fig. 8에서 Fig. 14의 결과에서볼 수 있듯이 관의 입구온도를 34.5°C~40°C사이에서 증가시킬수록 관 중심부쪽으로 온도분포가 뚜렷한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 관입구온도가 상승할수록 관 중심부에서 관 외부보다 열전달이 상승한 것으로 볼 수 있으므로 본 연구에서의 결과가 타당한 결과를 보이고 있음을 알

수 있었다.

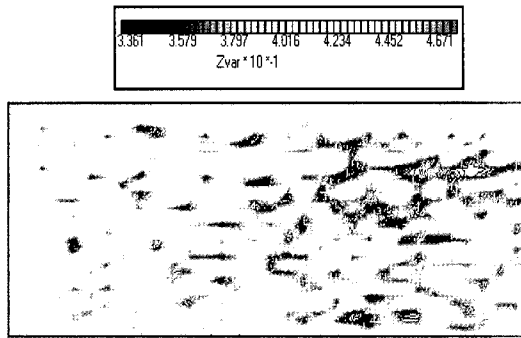


Fig. 8 Mean temperature distribution along the test tube using R. G. B at 34.5°C.

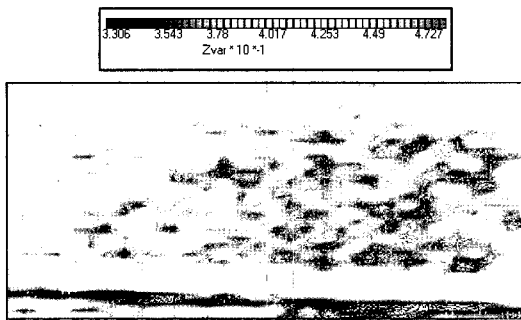


Fig. 9 Mean temperature distribution along the test tube using R. G. B at 35.0°C.

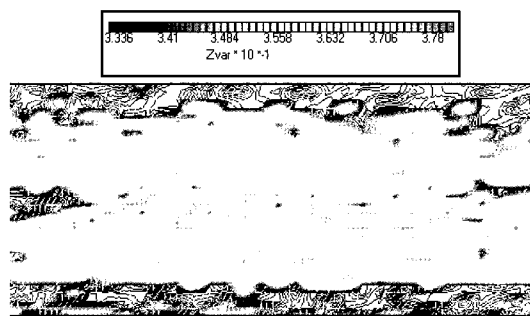


Fig. 10 Mean temperature distribution along the test tube using R. G. B at 36.0°C.

한편, Fig. 9의 튜브바닥근처의 저온부 형성과, Fig. 11, Fig. 12의 튜브바닥근처의 고온영역이 나타나는 것을 볼 수 있는데 이는 실험상의 광학

적인 오차 및 액정의 입자가 테스트 튜브를 따라 이동하면서 튜브의 끝부분에서 바닥에 쌓이는 현상에 의하여 발생된 측정오차에 기인한 것으로 생각된다. 차기 실험에서는 항온조의 펌프용량을 증가시키고 테스트 튜브 내면서 쌓인 액정을 제거시키는 장치를 설치하고자한다.

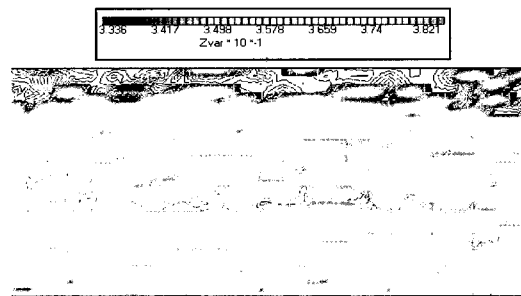


Fig. 11 Mean temperature distribution along the test tube using R. G. B. at 36.5°C.

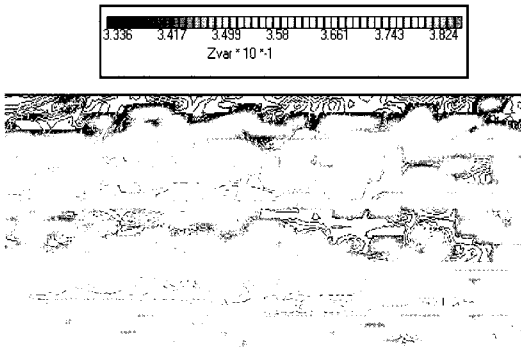


Fig. 12 Mean temperature distribution along the test tube using R. G. B. at 37.5°C.

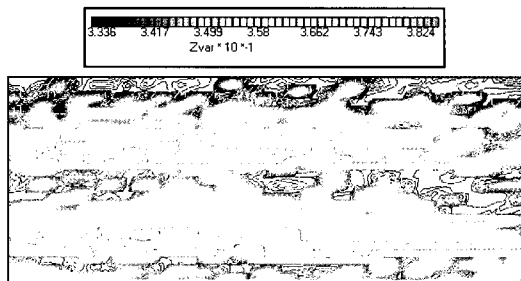


Fig. 13 Mean temperature distribution along the test tube using R. G. B. at 39.0°C.

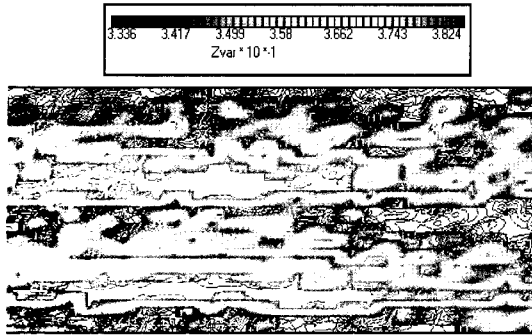


Fig. 14 Mean temperature distribution along the test tube using R. G. B. at 40.0°C.

4.2 속도분포

Fig. 16은 $Re=2,436$, $X/D=40$ 에서 순간 속도 벡터의 분포를 나타낸다. 이 결과로부터 에러 벡터를 제거한 것을 Fig. 17에 나타내었다. Fig. 18과

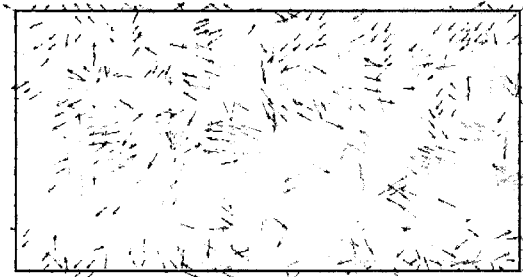


Fig. 15 Instantaneous velocity vector distribution with error vectors along the test tube for $Re = 2,436$.

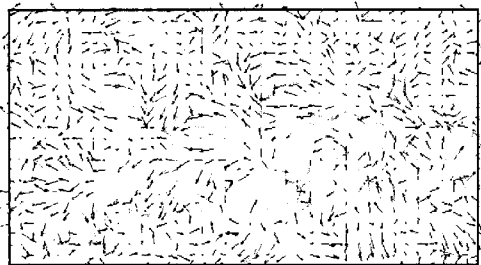


Fig. 16 Instantaneous velocity vector distribution along the test tube for $Re = 2,436$ after removing error vectors.

Fig. 19는 $Re=2,500$ 과 $Re = 2,724$ 에서 에러 벡터를 제거한 순간속도 벡터를 각각 나타낸다. 레이놀즈수가 증가할수록 튜브 중심부에 나타나 보이는 난동현상이 점점 관 전체로 확대해 감을 알 수 있다. 이는 앞 절의 결과인 입구온도가 증가 할수록 관의 중심부에서 열전달율이 상승하게 되는 사실을 고려해 볼 때, 레이놀즈수가 증가함에 따라 대류열전달량의 상승을 의미한다고 볼 수 있다.



Fig. 17 Instantaneous velocity vector distribution along the test tube for $Re = 2,500$ after removing error vectors.



Fig. 18 Instantaneous velocity vector distribution along the test tube for $Re = 2,724$ after removing error vectors.

Fig. 20은 Fig. 18의 순간속도로부터 구한 평균속도 벡터를 나타낸다. 순간 속도장과는 달리 테스트 튜브를 따라 균일한 속도분포를 나타내고 있음을 보인다. 이 속도벡터분포를 이용하여 다음절에 소개될 Nusselt 수를 구하였다.

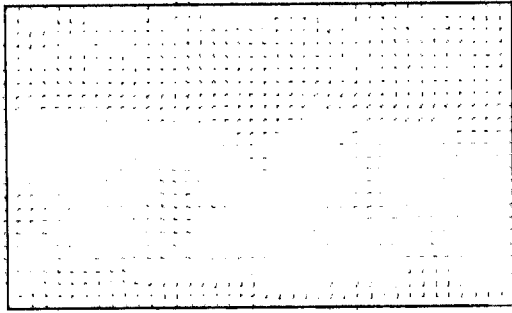


Fig. 19 Mean velocity vector distribution along the test tube for $Re = 2,500$ after removing error vectors.

4.3 Nusselt 수 분포

본 실험은 일정한 벽 표면 온도에서 관내의 유동이 테스트 튜브 입구에서부터 일정온도상태에서 테스트 튜브를 따라가면서 냉각되는 열전달 현상으로 체적온도, 대류열전달 계수 및 Nusselt 수는 식(4) ~ 식(8) 등으로 나타낼 수 있다.

유체의 체적온도는 국소 온도(Local Flow Temperature) 및 국소 속도로부터 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_b = \frac{2}{u_m R^2} \int_0^R u(r) T(r) r dr \quad (4)$$

등온유체의 열 플럭스(Heat Flux)는 체적평균 온도(Bulk Temperature)와 로그 평균온도로부터 식(5), 식(6) 및 식(7)로 나타낼 수 있다.

$$dQ = \dot{m} C_p (T_{b,0} - T_{b,i}) \quad (5)$$

$$dQ = h A \Delta T_m \quad (6)$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_w - T_{b,0}) - (T_w - T_{b,i})}{\ln[(T_w - T_{b,0}) / (T_w - T_{b,i})]} \quad (7)$$

식(6)의 대류 열전달 계수로부터 Nusselt 수는 식(8)과 같이 계산할 수 있다

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (8)$$

Fig. 20은 온도분포로부터 구한 Nu 수를 Re

= 2,436, 2500, 그리고 2724에서 Dittus & Boelter 식의 결과와 비교하였다.

감온 액정으로부터 구한 Nu 수가 Dittus & Boelter 식으로 구한 Nu 값 보다 10% ~ 28% 정도 낮게 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

즉, 난류영역에 가까울수록 Dittus & Boelter 식의 결과에 접근하나, 층류 영역에서는 크게 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

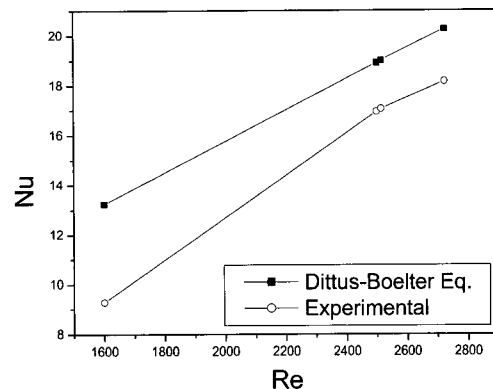


Fig. 20 Comparisons of Nu number with that of Dittus equation.

이러한 현상은 실험 과정 중에 발생된 기포와 액정입자가 테스트 튜브의 바닥에 정체하므로써 캘리브레이션 실험에 영향을 준 결과로 생각된다.

5. 결 론

감온 액정을 사용하여 수평 원통 관에서 난류유동의 온도 및 속도 분포를 동시 측정하고자 본 연구를 시작하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 온도분포는 관 벽 근처에서 최소 값을 나타내고 관중심에서 최대 값을 나타내었다. 관의 입구온도를 $34.5^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 사이에서 증가시킬수록 관 중심부쪽으로 온도분포가 뚜렷한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 관 입구온도가 상승할수록 관 중심부에서 관 외부보다 열전달율이 상승함을 의미하며 이는 기존의 수평 원통관에서의 연구성과와 부합되는 결과이다.

- 2) 감온 액정으로부터 구한 Nu 수가 Dittus & Boelter 식으로 구한 Nu 값 보다 10% ~ 28% 정도 낮게 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

즉, 난류영역에 가까울수록 Dittus & Boelter 식의 결과에 접근하나, 층류 영역에서는 크게 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

이 현상은 실험 과정 중에 발생된 기포와 액정입자가 테스트 튜브의 바닥에 정체함으로써 캘리브레이션 실험에 영향을 준 결과로 생각된다.

- 3) 레이놀즈수가 증가할수록 튜브 중심부에 나타나 보이는 난동현상이 점점 관 전체로 확대해 감을 알 수 있었으며, 이는 입구온도가 증가할수록 관의 중심부에서 열전달율이 상승하게 되는 온도장 측정의 결과와 종합하여 고려하면, 레이놀즈수가 증가함에 따라 관 중심부에서 대류열전달률이 상승하게 됨을 의미한다.

후 기

본 연구는 경남대학교 2003학년도 학술논문 게재 연구비로 이루어졌습니다.

Reference

- [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 Measuring for Measuring Temperature and Velocity", Particle Imaging Thermometry and Velocimetry, Proc. 3rd JSME-KSME Fluid Engineering Conference, pp.154~159, 1994.
- [3] Lee, S. J., Yoon J. H. 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. 3334~334, 1996.
- [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, pp.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, pp.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, pp. 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] Wiezbowski, M. and Stasiek, J., "Liquid Crystal Technique Application for Heat Transfer Investigation in a Fin-Tube Heat Exchanger Element", J. of Visualization, Vol.5, No.2, pp. 161~167, 2002.
- [10] 윤정환, "컬러 화상처리에 이용한 온도장 측정법 개발과 응용", 포항공과대학교 대학원 석사학위논문, 1997.
- [11] 이두열, "자연대류유동에 대한 수치 및 새삼 단계추적 방법을 이용한 PIV 알고리즘에 의

- 한 실험적 연구”, 건국대학교대학원 석사학위 논문, 1999년.
- [12] 정문수, “PIV 계측에 의한 상부가 열린 사각 공간에서의 자연대류에 관한 연구”, 부경대학교대학원 석사학위논문, 2001.
- [13] 문지섭, “디지털 컬러 화상처리에 의한 열유동의 온도장 속도장 동시측정기법 개발에 관한 연구”, 한국해양대학교 대학원 석사학위논문 2001.
- [14] 배대석, 김지만, 권오봉, 이도형, 이원원, 김남식, “감온액정을 이용한 Rayleigh-Bernard 대류의 정량적 가시화에 관한 연구” 한국박용기관학회지 Vol. 27, No.3 pp. 395~404, 2003.
- [15] 홍철현, 정준화, 양정식, 이기백, “과도 액정 기법을 이용한 열전달계수 측정법에 관한 실험적 연구”, 한국박용기관학회지 Vol. 27, No.5 pp. 581~589, 2003.
- [16] 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.
- [17] Utami, T., Blackwelder, R., “ A cross correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization”, Experiments in Fluids, Vol.10, pp.213~223, 1991.
- [18] Louis C. Burmeister, “Convection Heat Transfer”, John Wiley & Sons, Inc. pp. 207~267, 1983.
- [19] Adrian Bejan, “Convection Heat Transfer”, John Wiley & Sons, Inc. pp. 115~142, 1995.
- [20] R. Byron Bird Warren, E. Stewart Edwin and N. Lightfoot, “Transport Phenomena”, John Wiley & Sons, Inc. pp. 375~387, 1960.

저 자 소 개



장태현 (張泰鉉)

1942년 2월생, 1969년 동아대학교 기계공학과 졸업. 1971년 동아대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1991년 12월 University of Wales(Swansea, U.K.) 대학원 기계공학과 졸업(Ph.D), 2001년 5월 제6차 ASV'6(Asian Symposium on Visualization) 조직위원장 역임, 현재 경남대학교 기계자동화공학부 교수



도덕희 (都德熙)

1962년 10월생, 1985년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1988년 동 대학원 기관학과 졸업(석사), 1989~1990년 국립부산수산대 대학원 기관학과 박사과정, 1995년 일본 동경대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1995년 3월~9월 포항공대 첨단유체공학연구원

센터 위촉연구원, 1995년~현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수, 당학회 회원