

액정을 이용한 3차원 사각채널 내 혼합대류의 정량적 가시화 Quantitative Visualization of Mixed Convection in 3-D Rectangular Channels Using TLC Tracers

박일용* · 김정수** · 배대석***†

Ri-Long Piao*, Jeong-Soo Kim** and Dae-Seok Bae***†

(Received 12 August 2016, Revision received 31 October 2016, Accepted 31 October 2016)

Abstract: Experiment is carried out to investigate the mixed convective flow in three-dimensional horizontal rectangular channels filled with high viscous fluid. The particle image velocimetry(PIV) with thermo-sensitive liquid crystal tracers is used for visualizing and analysis. Quantitative data of temperature and velocity are obtained by applying the color-image processing to a visualized image, and neural network is applied to the color-to-temperature calibration. In this study, the fluid used is silicon oil($Pr=909$), the aspect ratio(channel width to height) is 4 and Reynolds number is 2×10^{-2} . From the present study, we can visualize the quantitative temperature and velocity of mixed convective flow in three-dimensional horizontal rectangular channels simultaneously.

Key Words : Mixed convection, PIV(Particle Image Velocimetry), TLC(Thermo-sensitive Liquid Crystal), Neural-network, 3-D Rectangular channel.

1. 서 론

복잡한 유동형태를 나타내는 혼합대류의 유동 특성을 파악하는 것은 기계장치 설계에 있어 매우 중요하다. 따라서 정확한 해석을 위해 혼합대류유동의 온도장과 속도장을 정량적으로 가시화할 필요가 있다. 특히 사각채널 내의 혼합대류는 태양열 집열기의 에너지 수송, 밀집형 열교환기 및 화학기상증착 등 많은 공학적 응용분야에 적용되어지므로 이에 대한 연구는 지금까지 꾸준히 진행되어 왔다.¹⁻⁴⁾ 그러나 이들 연구의 대부분은

컴퓨터를 이용한 수치적 연구이고, 실험적으로 연구된 경우도 정성적인 가시화와 점 계측법에 의한 국소적인 정보획득에 국한되었다. 최근 들어, 컴퓨터 하드웨어, 광학적 영상처리 기기, 가시화 기술의 비약적인 발전과 더불어 감온액정을 이용하여 정량적으로 전 유동장의 속도와 온도를 동시에 계측할 수 있는 방법이 제안되고 있다. 감온액정은 온도에 따라 색이 변화하는 광학적인 특성을 가지고 있으므로 색과 온도 사이의 상관식을 구하여 색-온도 변환에 의한 정량적인 온도정보를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 액정입자를

*** 배대석(교신저자) : 부경대학교 기계공학과

E-mail : dsbae@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6138

*박일용 : 포스코 플랜텍 기술연구소

**김정수 : 부경대학교 기계공학과

***† Dae-Seok Bae(corresponding author) : Department of mechanical engineering, Pukyong National University.

E-mail : dsbae@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6138

*Li-Long Piao : Posco Plantec.

**Jeong-Soo Kim : Department of mechanical engineering, Pukyong National University.

추적입자로 사용하여 유동장의 속도도 정량적으로 계측할 수 있다. 이런 계측방법은 측정 온도 범위가 감온액정의 발색범위라는 제한이 있지만, 점 계측인 열전대나 국소유속계 등과는 달리 온도장과 속도장의 동시 계측이 가능하며, 복잡한 형상의 온도, 순시속도 그리고 과도현상의 측정에 적합하다. 또한 유체에 현탁되는 감온액정의 입자가 아주 미소하여 유동장에 주는 영향을 거의 무시할 수 있는 등의 이점이 있어 더욱 주목되고 있으며, 최근 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁵⁻¹⁰⁾

Ozawa 등⁵⁾은 감온액정을 사용하여 Hele-Shaw Cell 내부 자연대류의 유동장과 온도장을 동시에 정량적으로 가시화하는 실험을 성공적으로 수행하였다. Yoon 등⁶⁾은 감온액정과 컬러화상처리기법을 비정상 열유동의 순간적인 온도 측정에 사용함으로써 Hele-Shaw Cell 내부유동의 온도장 변화를 해석하였고, Lee 등⁷⁾은 2-frame PTV 속도추적법과 컬러화상처리 시스템을 이용하여 속도장 및 온도장 측정기법을 Hele-Shaw cell 내 자연대류에 적용하여 시간에 따른 대류 유동의 속도장과 온도장 변화를 동시에 측정하였으며, 기존의 광학적인 가시화 결과와 정성적으로 잘 일치하는 결과를 얻었다. Kimura 등⁸⁾은 회전계 자연대류에 적용하여 온도장과 속도장을 계측하고 3차원 실험기법의 필요성을 제시하였다. 또한 Bae 등⁹⁻¹⁰⁾은 비정상 기포유동 및 케비티 내 비정상 혼합대류의 온도장과 속도장을 감온액정을 이용하여 전 유동장의 온도와 속도를 동시에 가시화 하였으며, 그 결과를 수치해석결과와 비교하여 정성적으로 서로 잘 일치함을 보여줬다.

이상과 같이 감온액정을 이용하여 전 유동장의 속도와 온도를 동시에 계측한 실험적 연구는 다수 있으나 대부분은 자연대류에 대한 것이고, 2차원 유동에 국한되었다. 따라서 본 연구에서는 3차원 수평 시각채널 내 혼합대류에 감온액정을 추적입자로 사용하여 온도장과 속도장을 동시에 정량적으로 가시화하는 방법을 확립하고, 그 적용가능성을 검토하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같다. 실험장치는 실험부(test section), 두 개의 항온조, 두 개의 light source, 오일 탱크, 펌프, Pulse dampener, 디지털 온도계, 두 개의 디지털 비디오 카메라, 그리고 컴퓨터로 구성되어 있다.

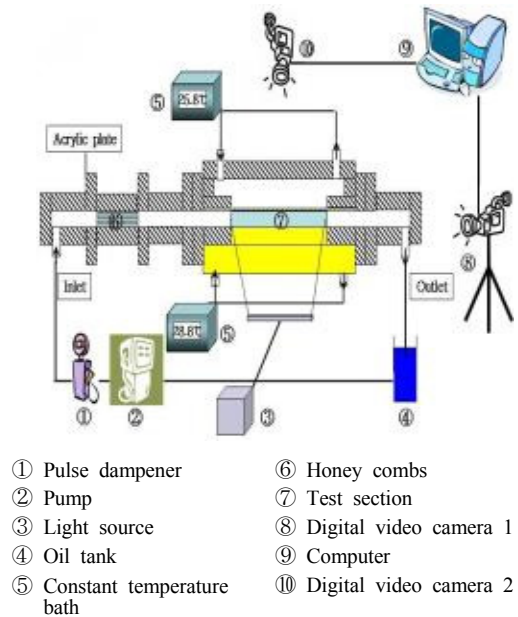


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

실험부는 동일한 길이 $L=140$ mm와 높이 $H=15$ mm를 갖고, 폭 $W=60$ mm인 $AR=4$ 의 종횡비를 갖는 직사각 모형을 제작하였다. 실험부는 가시화를 위하여 투명한 아크릴로 제작하였다. 실험부 하부는 일정한 온도를 유지하기 위하여 전열이 잘되는 동판으로 제작하였으며 내부에는 순환수의 이동통로를 만들어 등온의 순환수를 항온조에 부착된 펌프로 순환시켜 실험부의 하부면을 가열시켰다. 상부는 가시화를 위하여 아크릴 평판으로 제작하였고 내부는 역시 순환수의 이동통로를 만들어 등온의 순환수를 항온조의 펌프로 순환시켜 실험부 상부를 냉각시켰으며, 냉각면은 전열을 위

하여 두께가 1.5 mm인 아크릴 평판으로 제작하였고, 나머지 모든 부분은 두께가 15 mm 아크릴 평판으로 제작하였다. 실험부의 상부와 하부의 온도는 각각 28.8°C와 25.8°C를 유지하도록 하여 작동 유체의 Rayleigh수가 10^4 이상이 되도록 하였다. 온도 측정은 오차 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 를 가진 testo 735를 사용하였고, 항온조의 오차는 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이었다. 또한 작동유체를 연속적으로 공급하기 위해 펌프 앞쪽에 pulse dampener를 설치하였으며, 균일유동을 위해 실험부 입구에 honey combs를 설치하였다. 광원은 모두 실험부의 앞쪽에 설치되어 있으며 검정색 종이로 만들어진 2 mm 슬릿(slit)을 통하여 조사시켰다. 영상의 촬영은 슬릿 광에 대해 수직방향으로 2 m 떨어진 위치에 설치된 3CCD 디지털 비디오 카메라에 의해 이루어졌다.

작동유체는 온도변화에 따른 액정의 선명한 색 변화를 얻기 위하여 실리콘 오일(Sin-Etsu Silicon Oil KF-96-100cSt)을 사용하였다. 감온액은 RM2830 (Japan Capsular Products Inc)을 사용하였으며, 액정의 질량농도는 0.1%이다. 액정이 반사하는 빛의 색깔은 온도가 증가함에 따라 빨강에서 파랑으로 변하며, 그 색깔변화는 광원과 카메라 사이의 각도에 크게 영향을 받는다. 따라서 본 실험에서는 각 변화에 의한 오차를 없애기 위하여 모든 실험 장치를 실험기간 동안 고정하였다.

2.2 속도장 계측

PIV 방법¹¹⁾에서는 레이저 펄스광에 의해 산란된 입자영상을 카메라로 취득한 후, 하나의 유동화상을 여러 개의 미소 조사구간으로 나누고, 미소 조사구간 내 입자들의 상관함수를 계산하여 가장 큰 상관계수를 갖는 위치를 구하고 이 변위를 시간간격 Δt 로 나누어 줌으로써 그 조사구간의 대표속도를 구하게 된다. 초기에는 조사구간 내 산란입자영상의 계조치(gray level) 분포에 대한 Fourier 변환이나 광학적 방법으로 상관계수를 계산하였으나, 최근에는 순간 입자화상을 디지털화한 후, 상호상관(cross-correlation)방식으로 상관계수를 직접 계산하여 속도를 구하기도 한다.

본 연구에서는 일정시간 간격을 가진 두 개의

추적 입자화상을 소 영역으로 분할해서, 각각의 영역에 있어서의 농도패턴 상호상관계수를 계산하여 그 최대치의 공간위치로부터 추적 입자군의 이동거리 및 방향을 구하여 속도벡터를 계산하는 계조치상호상관법¹²⁾으로 속도벡터분포를 계측하였다.

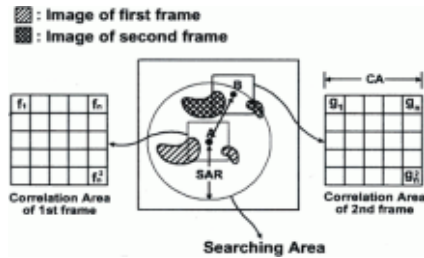


Fig. 2 Diagram of the cross correlation method

Fig. 2는 2프레임의 영상데이터를 이용한 계조치상호상관법의 원리를 설명한다. 미소시간동안 유동장의 입자영상의 계조패턴은 크게 변하지 않는다고 가정하면 제1프레임에서의 상관영역 내의 계조치 분포와 미소시간 후의 제2프레임에서의 계조치 분포는 유사한 특성을 나타낸다. 따라서 제1프레임의 임의의 위치를 중심으로 하여 제2프레임상의 같은 크기를 갖는 영역과의 계조치에 대하여 상호상관 계수 값을 구하여 비교하면 그 중 가장 큰 값을 동일입자의 이동위치로 간주할 수 있게 된다. 컴퓨터상에서 이와 같은 조작을 빠른 속도로 행할 수 있으면 가상의 중심입자(속도 벡터의 시점)에 대하여 벡터의 중점을 용이하게 구할 수 있게 된다. 연속된 두 프레임간의 상호상관계수는 식 (1)로 구해진다.

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

여기서 f_i, g_i 는 상관영역내의 각 픽셀의 계조치를 나타내고 \bar{f}_i, \bar{g}_i 는 연속화상에 대한 시간평균을 나타낸다. 일반적으로 PIV계측 시 대상 유체의 유동

속도에 따라 카메라가 결정되고, 속도장 해석을 위한 영상의 대상 프레임(frame)도 결정된다. 본 연구에서는 초당 30프레임을 갖는 컬러 디지털 카메라의 영상에서 2초당 1프레임을 추출하여 속도를 계측하였다.

2.3 온도장 계측

열 유동의 정량적 가시화를 위하여 액정이 사용되어졌고, 액정의 온도변화에 따른 색변화의 관계는 보정에 의해 결정되어진다. Fig. 3은 보정실험의 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. 따라서 본 연구에서는 색-온도 사이의 관계를 정립하기 위하여 뉴럴 네트워크를 사용하였다. 이 방법은 Kimura 등⁸⁾에 의해 처음으로 제안되었다.

Fig. 4는 3계층인 뉴럴 네트워크(Neural- Network) 구조를 나타낸다. 좌측에서 다중입력, 즉 r, g, b 값이 입력되어지고, 우측에서 입력 값에 대한 온도 T_o 가 구해진다. 좌측의 입력 층(Input layer)은 하나의 온도에 대해 r, g, b 세 값을 갖기 때문에 세 유닛(Unit)으로 구성되고, 입력 데이터는 자격화(T)를

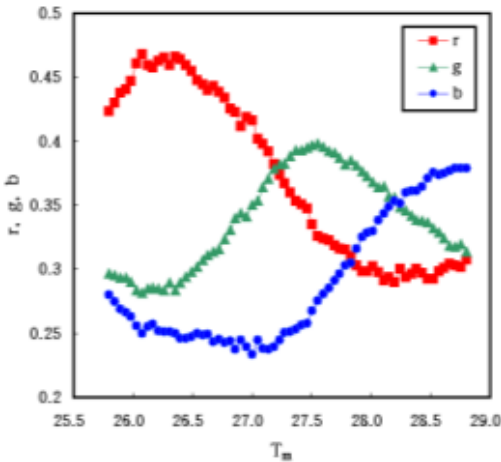


Fig. 3 Relation between r, g, b values and measured temperature

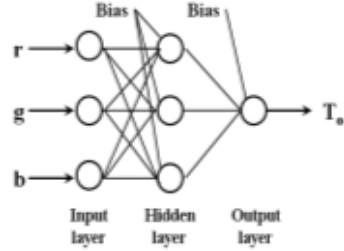


Fig. 4 Neural network structure



Fig. 5 Neuron model

이용하여, 그 값이 0부터 1 사이가 되는 규격화된 값(r, g, b)을 이용한다. 중간층(Hidden layer)은 유닛 수를 늘리면 계산 시간이 증가되고, 줄이면 중간층의 존재의미가 저하한다. 본 연구에서는 경험적으로 3유닛으로 한다. 출력 층(Output layer)은 온도의 상태로 유닛 수는 1이다. 뉴럴 네트워크는 반복학습에 의해서 원하는 지식을 습득하는 것인데, 본 연구에서는 학습 오차가 원하는 수준으로 감소할 때까지 결합함중과 바이어스(Bias)를 조정하는 방식인 오차역전법(Back-propagation method)을 사용하였다.

Fig. 5는 각 층을 구성하는 유닛인 뉴런(Neuron) 모델을 나타내고 있다. 이 뉴런은 앞 층의 뉴런으로부터 입력된 값의 가중치 합을 계산한 후, 시그모이드 함수(sigmoid function)를 사용하여 출력 값을 결정한다. 입력 값의 가중치 합을 구하는 식은 식 (2)와 같으며, 출력은 식 (3)으로 구해지고, 이 식을 시그모이드 함수(sigmoid function)라고 부른다.

$$X = \sum_{i=1}^n X_i W_i + \sigma \quad (2)$$

$$M = f(X) = \frac{1}{1 + \exp(-X)} \quad (3)$$

여기서 X_i 는 뉴런의 입력 값이고, W_i 는 가중

치, 그리고 σ 는 역치를 나타낸다. 뉴럴 네트워크의 학습은 입력 r, g, b 에 의한 출력 T_o 가 열전대에 의해 측정된 온도 T_m 와 일치하도록 수행되어진다. 따라서 뉴럴 네트워크의 학습은 식 (4)의 오차함수 E 가 최소가 되도록 하는 가중치 W_i 와 역치 σ 를 구하는 것이라고 할 수 있다.

$$E = \frac{1}{2} \sum (T_o - T_m)^2 \quad (4)$$

Fig. 6은 열전대로 측정된 온도 T_m 와 뉴럴 네트워크의 출력 온도 T_o 사이의 관계에 미치는 반복횟수의 영향을 나타낸다. 그림으로부터 학습 횟수가 증가하면 더욱 좋은 결과를 유출하여, 반복횟수가 3×10^5 인 경우 T_m 와 T_o 가 가장 잘 일치하다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 뉴럴 네트워크가 색-온도변화에 매우 유용하게 사용될 수 있음을 확인할 수 있었고, 그 결과를 색-온도 교정 자료로 사용하였다.

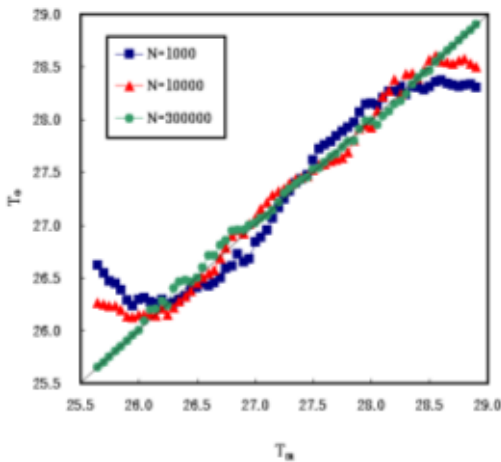


Fig. 6 Relation between neural network output temperature and measured temperature

3. 결과 및 고찰

상부가 냉각되고 하부가 가열되는 두 개의 등온 벽으로 구성된 사각채널 내에서의 혼합대류

유동특성을 고찰하기 위하여 Reynolds수 $Re=0-9.6 \times 10^{-2}$, 종횡비 $AR=4$, $Pr=909$, $Ra=10^4$, 경사각 $\theta=0^\circ$ 일 때 감온액정을 이용한 속도장과 온도장의 동시 측정 시스템으로 속도와 온도를 측정하였다.

Fig. 7은 수직온도구배가 형성된 보정실험의 가시화 영상이다. 상부와 하부표면의 온도차는 3.0°C 이다. Fig. 7의 (a)는 유체 내에 형성된 수직온도구배의 촬영영상이며, 유동은 전혀 없으며, 온도경계층은 오로지 순수한 전도에 의해서만 이루어진다. (b)는 뉴럴 네트워크를 사용한 색-온도 변환을 감온액정의 촬영영상에 적용한 결과로 24bit 전색으로 나타낸 것이다. 감온액정의 촬영영상에서의 색은 온도가 증가함에 따라 적색에서 청색으로 변화되었다. 적색은 낮은 온도를 나타내고 청색은 높은 온도를 나타내고 있으나, 색-온도 변환후의 온도표시는 액정의 온도변화에 따른 색변화의 결과와는 반대로 일반적인 표시법으로 나타내었다. 즉 적색은 높은 온도, 청색은 낮은 온도를 표시한다.

Fig. 8은 $AR=4$, $Pr=909$, $Ra=10^4$, $\theta=0^\circ$ 그리고 Reynolds수가 $Re=2 \times 10^{-3}$ 일 때 채널 내 $Y=0.5$ 인 위치에서의 X-Z 평면에서 형성되는 유동장과 온도장의 실험결과를 보여준다. (a)는 감온액정을 촬영한 원 이미지이며, 촬영된 영상에서의 파랑 색은

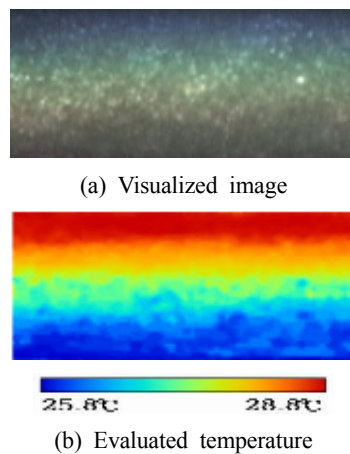


Fig. 7 Visualized image of liquid crystal tracers and evaluated temperature distribution

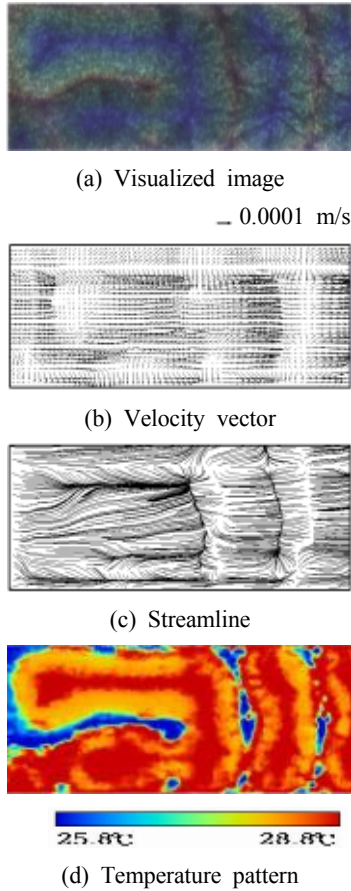


Fig. 8 Experimental results at $AR=4$, $Ra=10^4$, $Re=2 \times 10^{-3}$ and $Y=0.5$

높은 온도를 나타내고 녹색은 상하부의 평균온도를 나타내며 빨강 색은 낮은 온도를 나타낸다. (b)와 (c)는 각각 촬영된 영상에 계조치상호상관법을 적용하여 나타낸 속도벡터와 유동의 유선이다. (d)는 촬영한 영상에 뉴럴 네트워크를 적용한 색-온도 변환에 의해 표시된 온도분포이다. 이 경우, 입구 실험부의 왼쪽 면으로부터 유량별 일정유속의 유체가 유입되어 정지된 유체 내 상·하의 온도차에 의해 발생한 자연대류 유동에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 즉 입구 영역에서는 입구 유속의 영향으로 $Re=0$ 인 경우에 나타난 횡방향 롤인 Bénard cell들은 사라지고 종방향 롤 유동이 나타나고, 입구 유속의 영향이 점차적으로 작아지는 하류방향에서는 입구 유속에 의해 야기되는 강제

대류의 영향이 미흡하여 부력에 의한 자연대류의 횡방향 롤 유동인 Bénard cell을 유지하는 것을 볼 수 있다. 따라서 전체유동장의 형태는 강제대류의 종방향 롤과 자연대류의 횡방향 롤이 혼재하는 혼합대류 유동형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 속도장은 PIV법에 의한 속도 벡터로, 온도장은 뉴럴 네트워크의 색-온도보정기법에 의한 색으로 표시하여 사각채널 내의 혼합대류 유동의 속도와 온도를 동시에 정량적으로 나타낼 수 있었다.

4. 결 론

혼합대류의 속도장과 온도장을 동시에 정량적으로 가시화하기 위해 속도를 측정하는 PIV법의 추적입자로 감온액정(Thermo-sensitive Liquid Crystal)을 사용하였다. 특히 온도장의 정량적 가시화를 위해 액정의 온도변화에 따른 색변화의 관계를 뉴럴 네트워크(Neural-network)를 사용한 온도보정실험을 통해 온도를 색으로 나타내 정량적으로 가시화할 수 있었다. 그리고 이 결과를 $AR=4$, $Pr=909$, $Ra=10^4$, 그리고 $Re=2 \times 10^{-3}$ 일 때 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 두 개의 등온 벽으로 구성된 수평사각채널 내의 유동에 적용하였다. 그 결과, 수평사각채널 내의 유동은 자연대류에 의해 나타나는 횡방향 롤인 Bénard cell과 강제대류에 의해 나타나는 종방향 롤이 함께 나타나는 전형적인 혼합대류 유동을 가시화할 수 있었으며, 속도는 속도 벡터로 온도는 색으로 표시하여 혼합대류의 속도장과 온도장을 동시에 정량적으로 나타낼 수 있었다.

후 기

“이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음”

References

1. T. A. Nace, J. Ouazzani, A. D. Daubin and F.

- Rosenberger, 1992, "Mixed Convection in a Horizontal Rectangular Channel Experimental and Numerical Velocity Distributions", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No. 6, pp. 1481-1494.
2. S. S. Chen and A. S. Lavine, 1996, "Laminar, Buoyancy Induced Flow Structures in a Bottom heated, Aspect Ratio 2 Duct with Throughflow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, No. 1, pp. 1-11.
 3. T. F. Lin, 2003, "Buoyancy Driven Vortex Flow and Thermal Structures in a Very Low Reynolds Number Mixed Convective Gas Flow Through a Horizontal Channel", *Int. J. of Heat and Fluid Flow* 24, pp. 299-309.
 4. R. L. Piao, J. S. Kim and D. S. Bae, 2014, "Three-Dimensional Numerical Study on the Vortex Flow in a Horizontal Channels with High Viscous Fluid", *J. of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 79-86.
 5. M. Ozawa, U. Muller, I. Kimura and T. Takamori, 1992, "Flow and Temperature Measurement of Natural Convection in a Hele-Shaw Cell Using a Thermo-sensitive Liquid-crystal Tracer", *Exp. in Fluids* 12, pp. 213-222.
 6. J. H. Yoon, D. H. Doh and S. J. 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.
 7. S. J. Lee, S. J. Baek, J. H. Yoon and D. H. Doh, 1996, "Simultaneous Velocity and Temperature Measurement of Thermo-Fluid Flows by Using Particle Imaging Technique", *Trans. of the KSME B*, Vol. 20, No. 10, pp. 3334-3343.
 8. I. Kimura, T. Hyodo and M. Ozawa, 1998, "Temperature and Velocity Measurement of a 3-D Thermal Flow Field using Thermo-sensitive Liquid Crystals", *J. of Visualization*, Vol. 1, No. 2, pp. 145-152.
 9. D. S. Bae, 2003, "A Study on the Analysis of Temperature Field of Bubbly Flow Using Thermo-sensitive Liquid crystals", *Trans. of the KSME B*, Vol. 27, No. 11, pp. 1572-1578.
 10. D. S. Bae, L. J. Cai and E. P. Kim, 2009, "An Experimental Investigation of Unsteady Mixed Convection in a Horizontal Channel with Cavity Using Thermo-Sensitive Liquid Crystals", *J. of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 33, No. 7, pp. 987-993.
 11. R. J. Adrian, 1991, "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 421-485.
 12. T. Utami and R. F. Blackwelder, 1991, "A Cross-correlation Technique for Velocity Field Extraction from Particulate Visualization", *Exp. in Fluids* 10, pp. 213-223.