

감온액정을 이용한 Rayleigh-Bernard 대류의 정량적 가시화에 관한 연구

배대석[†] · 김진만* · 권오봉** · 이도형** · 이연원** · 김남식**
(원고접수일 : 2003년 2월 26일, 심사완료일 : 2003년 3월 20일)

A Study on the Quantitative Visualization of Rayleigh-Bernard Convection Using Thermochromic Liquid Crystal

Dae-Seok Bae[†] · Jin-Man Kim* · Oh-Boong Kwon** · Do-Hyung Lee** · Yeon-Won Lee** · Nam-Shik Kim**

Key words : Thermochromic Liquid Crystal(감온액정), PIV(입자영상유속계), Neural-Network
(뉴럴네트워크)

Abstract

Quantitative data of the temperature and velocity were obtained simultaneously by using liquid crystal tracer. PIV(Particle Image Velocimety) based on a grey-level cross-correlation method was used for visualizing and analysis of the flow field. The temperature gradient was obtained by applying the color-image processing to a visualized image, and a neural-network algorithm was applied to the color-to-temperature calibration. This simultaneous measurement was applied to the Rayleigh-Bernard convection. This paper describes the method, and presents the quantitative visualization of Rayleigh-Bernard convection and the effect of aspect ratio and viscosity. Also, the experimental results were compared with the numerical results.

1. 서 론

밀폐공간에서의 자연대류에 의한 열전달은 공학적인 응용분야가 많을 뿐 아니라, 여러 가지 흥미 있는 현상을 보여준다. 벽사이, 동심 원통이나 구의 환형(annulus), 그리고 평판 태양열 집열관 등에서와 같은 밀폐공간 내에서의 자연대류는 열

과 유동의 복잡한 전열현상으로 우리 주위에서 쉽게 찾아 볼 수 있다. 따라서 이들에 대한 연구는 실험적, 해석적, 수치적으로 다양하게 연구되어져 왔다^{1)~12)}. 특히, 하부가 가열되고 상부가 냉각되는 밀폐공간내에서 발생하는 Rayleigh-Bernard 대류에 대한 연구는 두 등온벽의 온도차, 밀폐 공간의 형상비, 유체 매질의 Pr수, 수직벽의 경계조

[†] 책임저자(부경대학교 기계공학부) E-mail : dsbae@pknu.ac.kr, T : 051)620-1616

* 부경대학교 대학원

** 부경대학교 기계공학부

건 및 기울기 등의 영향에 대해 다양하게 고찰되었다^{5)~7)}.

그러나, 이러한 연구의 대부분은 수치해석이나 정성적인 정보획득을 위한 실험에 국한되었다. 최근, PIV(Particle Image Velocimetry)^{13),14)} 계측법의 개발로 유동장에 대한 정량적 정보획득이 가능해 졌고, 온도장의 경우도 감온액정(Liquid Crystal)^{18)~20)}을 전열면에 부착하여 전열표면에 대한 가시화와 정량적 정보를 획득할 수 있게 되었다^{15)~17)}. 그러나, 유동장에서 속도와 온도의 동시 측정에 대한 연구는 현재까지 상대적으로 미흡하다.

최근들어 컴퓨터 하드웨어와 광학적 영상처리기 및 가시화 기술의 발달과 더불어 감온액정(Liquid Crystal) 추적자를 이용한 유동의 가시화 실험이 개발되어, 속도·온도장의 정량적 동시 계측이 가능하게 되었다. 감온액정을 이용하면 온도를 시각적으로 판별하기 쉬운 색으로 변환시킬 수 있기 때문에, 열유동현상에 있어 색에 의한 온도장을 가시화 할 수 있고, 감온액정 입자의 이동을 추적하여 유동장의 가시화가 가능하다. 게다가 컬러이미지 처리법을 사용하여 온도와 속도를 정량적으로 평가할 수 있는 신기술이 도입되어 더욱 정밀한 연구가 가능하게 되었다. Ozawa²¹⁾은 감온액정을 이용하여 Hele-Shaw cell의 자연대류 유동과 온도를 정량적으로 가시화 하였으며, Anmen²²⁾은 Hele-Shaw cell내에 Through-Flow를 주어 그 영향을 고려하였다. Bae²³⁾은 기포유동에 대한 속도장·온도장을 정량적으로 제시하였다.

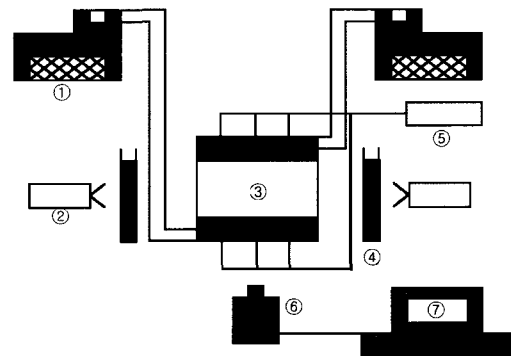
본 연구에서는 감온액정을 이용한 온도장과 속도장의 동시계측 시스템을 개발하여 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 밀폐공간에 발생하는 Rayleigh-Bernard 대류에 적용하였다. 촬영된 감온액정의 가시화 영상에 컬러화상처리 기술을 이용하여 온도장과 속도장의 동시계측을 시도하였으며, 속도벡터 분포계측에서는 계조치 상호 상관법(Grey-level cross-correlation)을, 온도장 계측에는 뉴럴네트워크(Neural-network)에 의한 색/온도 교정 알고리즘을 이용하였다. 또한, 형

상비 및 점성이 Rayleigh-Bernard 대류에 미치는 영향을 고찰하였고, 실험결과를 수치해석결과와 비교 검토하였다.

2. 실험 및 방법

2.1 실험장치

실험장치는 Fig.1과 같이 실험부(Test section), 항온순환장치 2대, 할로겐 램프 2대, 디지털 온도계, 3CCD 디지털 비디오 카메라 그리고 컴퓨터로 구성되었다. 실험부는 동일한 폭(140mm)과 깊이(10mm)를 갖고, 높이는 각각 10mm, 20mm, 30mm인 낮은 형상비를 갖는 3종류의 직사각 밀폐모형으로 제작되었다. 또한, 영상획득을 위해 투명아크릴로 제작된 실험부는 전열면인 동판과 수직으로 조립되었다. 반사광에 의한 해상도의 손실을 막기 위해 영상획득 부분을 제외한 실험부의 촬영전면에 검정색 종이를 부착하였고, 영상획득 부분 뒷면에도 감온액정의 발색을 보다 잘 촬영하기 위해 검정색 종이를 부착하였다. 광원인 할로겐 램프는 실험부의 좌·우에 검정색 종이를



- ① constant temperature bath
- ② light source
- ③ test section
- ④ water filter
- ⑤ digital thermometer
- ⑥ digital video camera
- ⑦ computer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

만들어진 2mm 슬릿(Slit)을 통하여 조사되었다.

영상획득은 슬릿광에 대해 수직방향으로 2m 위치에 설치된 컬러디지털카메라에 의해 이루어졌다. 외기에 의한 열영향을 감소시키기 위해 별도의 차단벽과, 할로겐 램프 전방에 Water-Filter도 설치하였다. 실험부의 구조는 Fig.2와 같으며, 상·하부 동판에는 열전대가 각각 3부분에 설치되었고, 디지털 온도계를 통해 그 온도가 측정되었다.

작동 유체로는 Shin-Etsu Silicon Oil KF-96-100cst, 50cst, 10cst(Shin-Etsu Chemical Co., Ltd)를 이용하였고, 액정에는 RM2830(Japan capsular products Inc.)을 사용하여 실리콘오일의 점성에 영향을 미치지 않도록 중량비 약 0.1%로 혼합하였다.

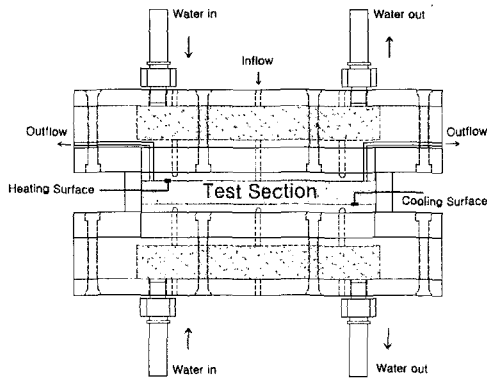


Fig. 2 Test section setup.

2.3 실험 방법

먼저, 실험부에 실리콘 오일을 주입하고, 항온순환장치를 작동시켜 Rayleigh-Bernard 대류를 발생시킨다. 전 영역에 걸쳐 대류가 충분히 발달되었을 때, 상부동판의 유입관(Inflow)을 통해 감온액정 현탁액을 주사기로 주입한다. 이는 감온액정이 실험부의 관찰창에 부착하거나, 침전을 방지하기 위한 것이다. 주입된 감온액정이 충분히 교반되면, 상하면의 온도를 같게 하여 대류가 완전히 제거되는 열평형상태로 만든다. 이후, 상부를 가열하고 하부를 냉각하여 색/온도변환을 위한 교정실험을 실시하였다. 이 교정실험에 앞서, 감온액정의 발광 온도영역 파악을 위한 교정실험을 실시

하였으며, 색/온도변환을 위한 교정실험은 파악된 발광영역 내에서 실시하였다. 교정실험은 실리콘 오일의 유동이 전혀 없는 열전도 상태가 되었을 때, 상부 동판의 유입관으로 열전대를 삽입하여 감온액정의 다양한 발색에 대한 온도정보를 파악하는 것이다. 교정실험 이후 다시 열평형상태로 전환하고, 그 다음 하부면을 가열하고 상부면을 냉각시켜 실험부내에 Rayleigh-Bernard 대류를 발생시킨다. 대류가 정상상태가 되었을 때 3CCD 컬러 디지털 카메라로 촬영을 진행한다. 특히, 교정실험에서 유지된 카메라와 실험부에 대한 할로겐 램프의 입사각은 일정하게 유지할 필요가 있다¹⁹⁾. 이는 감온액정이 촬영각도에 따라 다양한 색으로 판별되기 때문으로, 실험동안 철저한 주의가 요구되었다. 또한, 실내온도의 영향을 최소화하기 위해 실내온도도 실험부의 평균온도(27°C±0.5°C)로 유지하였다. 본 연구에서는 이러한 실험방법을 통해 교정실험과 Rayleigh-Bernard 대류 실험을 실시하였으며, 촬영한 영상으로 속도·온도계측을 실시하였다.

3. 속도장·온도장의 계측

3.1 속도장의 계측

입자를 사용한 추적가시화 영상에서 속도벡터 분포의 정량적 측정에는 다양한 연구와 그 유용성이 입증되어 있는 상태이다. 본 연구에서 사용된 계조치 상호상관법(Grey-level cross-correlation method)의 입자추적 알고리즘은 복수의 추적입자가 만든 소영역의 농도패턴으로써 처리된다. 따라서, 화상은 농도의 정보를 포함하고 있을 필요가 있다. 그러나, 본 실험에서는 전부 컬러영상으로 되어 있기 때문에 농도뿐만 아니라 색상의 정보까지 포함하고 있어 계조치 상호 상관법을 그대로 적용할 수 없다. 따라서, 상호상관계수의 계산에는 RGB표색계를 YIQ표색계의 1속성인 휘도신호로 변환하여 화상데이터로 이용한다. 본 연구에서는 상용프로그램인 Thinkers eyes (TNTech co.Ltd)를 사용하여 휘도신호로 변환하고 속도장을 계측하였다.

3.2 온도장의 측정

가. RGB표색계와 온도

화상처리 시스템에서는 1장의 컬러 화상이 Image Process에 의해, RGB표색계의 3속성인 (R, G, B)의 화상 데이터로 색분해되어, 계산기에 입력된다. 계산기에 입력되어진 화상데이터는 1화소당 R, G, B 3개의 농도치 정보가 있고, 이러한 색정보 (R, G, B)는 다음의 식(1), (2), (3)를 사용하여 규격화 시켰다.

$$r = \frac{R}{R + G + B} \quad (1)$$

$$g = \frac{G}{R + G + B} \quad (2)$$

$$b = \frac{B}{R + G + B} \quad (3)$$

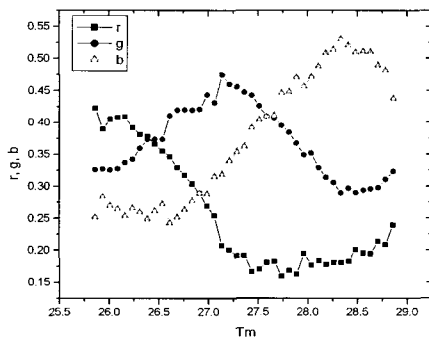


Fig. 3 Relation between R, G, B and temperature T_m .

규격화된 r, g, b 값은 뉴럴 네트워크 학습 데이터(R, G, B와 온도의 관계)의 작성을 위해 사용되어진다. 본 실험에서는 열전대 측정점의 온도와 함께 그 좌표 주변 75화소(X방향 25화소×Y방향 3화소)의 평균치 r, g, b 값을 사용하였다. Fig.3은 이 값을 나타낸 것이다.

액정 발색 범위를 벗어난 온도영역은 화상이 무채색으로 나타나기 때문에 R, G, B 각각의 고유 값을 갖지 않는다. 감온액정의 발색온도 영역을 미리 파악한 것은 이 무채색부분의 데이터가 학습

에 부적절하기 때문이다. 본 연구에서 뉴럴네트워크 학습에 사용되어 지는 온도 교정 데이터는 25.8°C ~ 28.8°C 의 값으로 R, G, B 각각 특색 있는 값을 갖는 영역이다.

나. 뉴럴 네트워크(Neural-Network)

Fig. 4는 계층이 3층인 계층구조 뉴럴 네트워크를 나타내며, 색의 r, g, b값이 입력되어 온도 T_c 가 구해진다. Fig.5는 각 층을 구성하는 Neuron 모델을 나타내고 있다. 이 Neuron은 앞 층의 Neuron으로부터 입력값의 가중치 합을 구해, 시그모이드 함수(Sigmoid function)를 사용하여 출력값을 결정한다. 입력값의 가중치 합을 구하는 식은 식(4)와 같으며, 출력은 식(5)으로 구해지고 이 식을 시그모이드 함수(Sigmoid function)라고 부른다.

$$u = \sum_{i=1}^n w_i x_i + \theta \quad (4)$$

$$y = f(u) = \frac{1}{1 + \exp(-u)} \quad (5)$$

x_i 는 neuron의 입력값이고, 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(6)의 오차함수 E가 최소가 되도록 하는 가중치 x_i 와 역치 θ 를 구하는 것이라고 할 수 있다.

$$E = \frac{1}{2} \sum (T_c - T_m)^2 \quad (6)$$

Fig.6은 Neural-Network의 학습 후 출력 T_c 와 열전대에 의해 측정된 온도 T_m 과의 관계를 나타낸다. 학습결과는 반복회수가 3×10^5 인 경우 T_m 과 T_c 가 가장 잘 일치하여, 본 연구에서는 이 결과를 색-온도 교정 자료로 사용하였으며, 본 결과로부터 Neural-Network가 색/온도변환에 매우 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

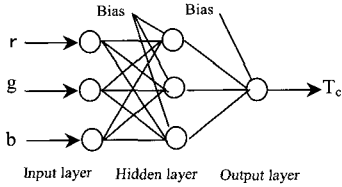


Fig. 4 Neural network structure.

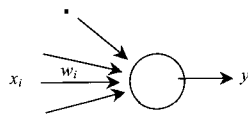


Fig. 5 Neuron model.

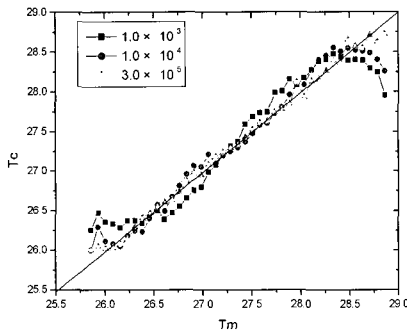


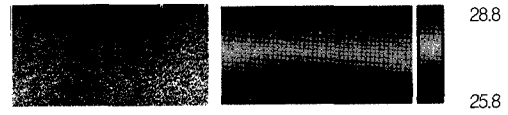
Fig. 6 Results of neural network calibration.

4. 실험 결과

4.1 실험결과 및 고찰

Fig.7은 수직온도구배가 형성된 교정실험의 가시화 영상이다. 상부와 하부표면의 온도차는 3.0℃(25.8℃~28.8℃)이다. Fig.7(a)는 유체 내에 형성된 수직온도구배의 촬영영상이며, 유체의 유동이 없고 순수한 전도에 의해서만 열전달이 이루어진다. (b)는 뉴럴 네트워크를 사용한 색/온도 변환을 액정의 촬영영상에 적용한 결과로 24bit 전색으로 나타낸 것이다. 액정의 촬영영상에서 색은 온도가 증가함에 따라 적색(Red)에서 청색(Blue)으로 변화되었다. 적색은 낮은 온도를 나타내고 청색은 높은 온도를 나타내고 있으나, 색/온도변환후의 온도표시는 액정의 온도변환에 따른

색변화의 결과와는 반대로 일반적인 표시법으로 나타내었다.



(a) Visualized image (b) Evaluated temperature

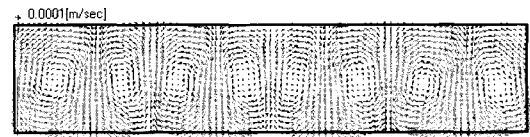
Fig. 7 Visualized image of liquid crystal tracers and evaluated temperature distribution.



(a) Visualized image



(b) Evaluated temperature



(c) Velocity vector



(d) Streamline

Fig. 8 Experimental result at $H/L=3/14$, $\Delta T=3^\circ\text{C}$ and 100cSt.

Fig.8은 100cSt 실리콘 오일을 사용하여 형상비 $H/L=3/14$, 온도차 $\Delta T=3^\circ\text{C}$ 인 경우의 Rayleigh-Bernard 대류의 실험결과이다. (a)는 감온액정을 촬영한 영상이며, (b)는 촬영영상에 색/온도 변환한 온도분포이다. 온도분포는 촬영영상에 오버랩(Overlap)시켜 촬영영상과의 비교가 쉽도록 나타내었다. (c)는 속도장을 속도벡터로 나타낸 것이고, (d)는 계측된 유동의 유적선이다. 이 경우, Rayleigh-Bernard 대류는 8개의 셀(cell)

유동과 좌우대칭 구조를 갖는다. 각 셀은 인접한 셀유동과 상호작용하며, 그로 인해 전열면에 수평인 셀의 유속에 비해 상승 또는 하강하는 부분의 유속이 크다. Fig.9, Fig.10은 형상비가 $H/L=2/14$, $H/L=1/14$ 인 경우의 실험결과이며, 온도차 3°C , 작동유체 100cSt 실리콘 오일인 경우이다.

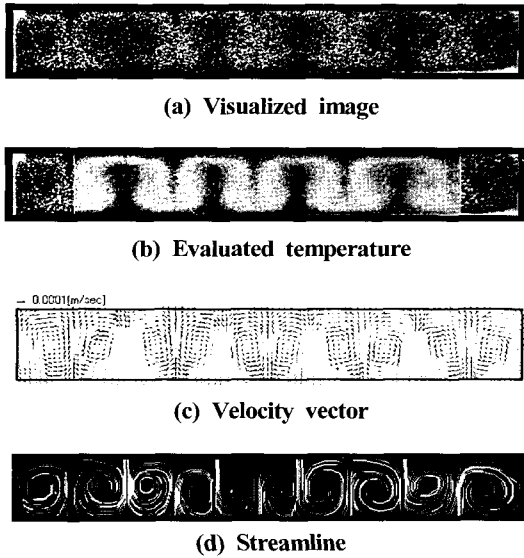


Fig. 9 Experimental result at $H/L=2/14$, $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$ and 100cSt.

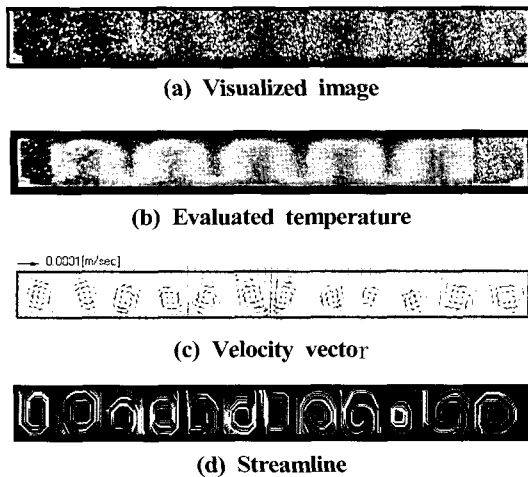


Fig. 10 Experimental result at $H/L=3/14$, $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$ and 100cSt.

형상비가 $H/L=3/14$ 는 8개, $H/L=2/14$ 는 10개, $H/L=1/14$ 는 12개로 형상비가 감소함에 따라 셀수는 증가하였다. 이러한 형상비의 감소 따른 이러한 형상비의 감소 따른 셀수의 증가는 수의 증가는 Kirchartz.K. R등⁽⁶⁾, Jen. T. C등⁽¹⁰⁾이 제시한 형상비의 영향과 동일하다. Fig.11은 각 형상비에서 $(H/2)$ 높이의 속도분포로, 형상비에 따른 유속의 변화를 나타내었다. 유속은 폭(L)의 방향으로 Sine곡선과 같은 파동형태를 띄며, 형상비에 따라 진폭의 차이가 나타난다. 형상비가 큰 $H/L=3/14$ 인 경우, 속도가 모두 높게 나타난다.

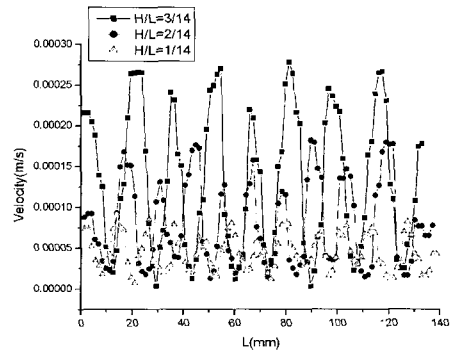


Fig. 11 Comparison of velocity at each aspect ratio.

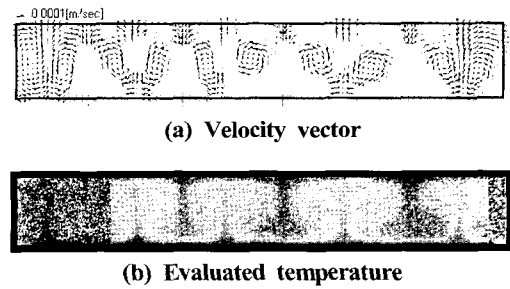


Fig. 12 Experimental result at $H/L=2/14$, $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$ and 50cSt.

Fig.12와 Fig.13은 형상비 $H/L=2/14$ 에 50cSt와 10cSt 실리콘 오일을 사용하여 온도차 3°C 인 Rayleigh-Bernard 대류의 속도장과 온도장의 계측 결과이다. 점성의 감소에 따른 셀수의 감소가 관찰된다. 100cSt의 경우 10개, 50cSt의 경우 10개, 10cSt의 경우 8개의 셀유동이 관찰되며, 점성이 감소함에 따라 셀수가 감소된다. 점성

에 감소에 의한 셀수의 감소는 Georgiadis, J.G 등⁽⁵⁾, Kirchartz, K.R 등⁽⁶⁾이 제시한 Pr수 감소에 따른 셀수의 감소와 유사하다.

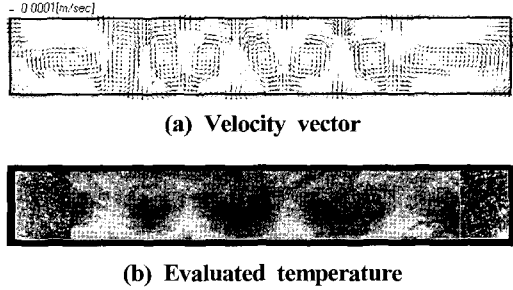


Fig. 13 Experimental result at $H/L=2/14$, $\Delta T=3^\circ\text{C}$ and 10cSt.

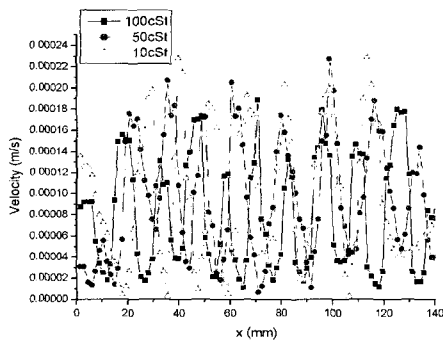


Fig. 14 Comparison of velocity at each viscosity.

Fig.14는 각 점성에서의 유속을 나타낸 그래프로, 형상비 $H/L=2/14$ 에서 10mm높이에서의 유속이며, 점성이 낮을수록 유속이 높게 나타난다. 100cSt와 50cSt의 열확산율과 열전도율은 그 값이 유사하고, 10cSt의 경우는 차이가 크다. 점성에 따른 온도분포에서 100cSt와 50cSt의 경우 유사한 물성치에도 불구하고 점성이 낮아질수록 열전달이 빠른 것을 확인할 수 있는데, 이는 Pr수 감소의 영향인 것으로 고려된다. 즉, 유사한 열확산율과 열전도율이지만, 점성이 낮을수록 유속이 크게 나타나기 때문에 빠른 열전달이 이루어지는 것이다. 10cSt의 경우는 열확산율이 낮지만 그보다 점성의 감소로 인한 유동의 증가로 열전달이 촉진되어 전유동장에서의 온도분포가 100cSt와 50cSt의 경우보다 더 고르게 확산되어 평균온도에 도달하는 것을 Fig.13(b)에서 확인할 수 있다.

4.2 수치해석 결과 비교

수치해석계산은 형상비와 점성의 영향을 고려한 실험과 동일한 조건으로 하여 실시하였다. Fig.15는 형상비 $H/L=2/14$ 일 때 100cSt 실리콘오일을 사용한 경우의 실험결과와 수치해석계산 결과와의 비교를 나타낸다. 본 그림에서 보는 바와 같이 Rayleigh-Bernard 대류의 온도장과 속도장의 수치해석결과는 실험결과와 잘 일치하였다.

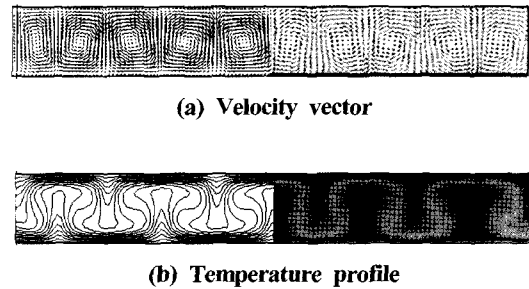


Fig. 15 Numerical result at $H/L=2/14$, $\Delta T=3^\circ\text{C}$ and 100cSt.

5. 결론

감온액정 입자를 이용한 가시화 영상에 계조치상호 상관법을 통하여 속도장을, 뉴럴 네트워크에 의한 색/온도교정 알고리즘을 이용한 온도장의 동시계측시스템을 개발하여 Rayleigh-Bernard 대류에 적용하였다. 형상비와 점성의 변화가 Rayleigh-Bernard 대류에 미치는 영향을 검토하였고, 수치해석 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 개발한 온도장과 속도장의 동시계측 시스템을 Rayleigh-Bernard 대류에 적용하여 온도장, 속도장을 동시에 정량적으로 가시화할 수 있었다.

2) Rayleigh-Bernard 대류에서 형상비(H/L)가 증가하면 셀수가 감소하고 전 영역에 걸쳐 속도가 증가하였다.

3) Rayleigh-Bernard 대류에서 점성이 감소하면 셀수가 감소하였고, 전 영역에 걸쳐 유속이 증가하여, 열전달을 촉진하였다.

4) 본 실험방법에 의한 연구결과는 수치해석결과와 잘 일치하였다.

참고문헌

- [1] Symons.J.G and Peck.M.K, "Natural Convection Heat Transfer Through Inclined Longitudinal slots", Transaction of the ASME, Vol.106, pp.824~829, 1984.
- [2] Mukutmoni.D and Yang.K.T, "Rayleigh-Bernard Convection in small Aspect Ratio Enclosure; PartII - Bifurcation to Chaos", J. Heat Transfer, Vol.115, pp.367~376, 1993.
- [3] Michael.Y.C and Yang.K.T, "Three-Dimensional Mach-Zehnder Interferometric Tomography of the Rayleigh-Bernard Problem", Transactions of the ASME, Vol.114, pp.622~629, 1992.
- [4] Symons.J.G, "Experimental Investigation of Natural Convection in partially Divided Enclosures", Transactions of the ASME, Vol.108, pp.554~559, 1986.
- [5] Georgiadis.J.G and Catton.I, "Prandtl Number Effect on Bernard Convection in porous Media", Transactions of ASME, Vol.108, pp.284~290, 1986.
- [6] Kirchartz.K.R and Oertel.H, "Three-dimensional thermal cellular convection in rectangular boxes", J. Fluid Mech, Vol.192, pp.249~286, 1988.
- [7] Yang.K.T and Lloyd.J.R, "Variable Property Effects in Laminar Natural Convection in a Square Enclosure", J. Heat Transfer, Vol.107, pp.133~138, 1985.
- [8] Mukutmoni.D and Yang.K.T, "Rayleigh-Bernard Convection in a Small Aspect Ratio Enclosure:Part I -Bifurcation to Oscillatory Convection", Transactions of the ASME, Vol.115, pp.360~366, 1993.
- [9] Yang.K.T, "Transitions and Bifurcations in Laminar Buoyant Flows in Confined Enclosures", J. Heat Transfer, Vol.110, pp.1191~1204, 1988.
- [10] Jen.T.C and Lavine.A.S, "Laminar Heat Transfer and Fluid Flow in the Entrance Region of a rotating Duct With Rectangular Cross Section : The Effect of Aspect Ratio", Transactions of the ASME, Vol.114, pp.574~581, 1992.
- [11] Azevedo.L.F.A and Sparrow.E.M, "Natural Convection in Open-Ended Inclined Channels", J. Heat Transfer, Vol.107, pp.893~901, 1985.
- [12] 강신형, 김진권, 이준식, "사다리꼴 밀폐공간 내에서 자연대류의 이중해에 관한 연구", 대한기계학회논문집 제17권 제2호, pp.458~466, 1993.
- [13] 이영호, "PIV에서의 동시다점계측의 원리 및 적용", 대한기계학회 '96년도 열 및 유체공학 부문 학술강연 논문집, pp.30~44, 1996.
- [14] 조원호, 배대석, 김남식, "입자영상해석에 의한 자연대류 유동에 관한 연구", 한국동력기계공학회지 제4권 제2호, pp.11~16, 2000.
- [15] 오승목, 이상준, "Liquid Crystal을 이용한 원형충돌분류의 전열특성 연구", 대한기계학회논문집 제16권 제8호, pp.1566~1574, 1992.
- [16] 안준, 정인성, 이준식, "반대방향의 방향각을 갖는 2열 분사구조의 막냉각 특성 : 배열의 영향", 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp.211~216, 1999.
- [17] 김영근, 김동건, 윤순현, "충동제트의 초기난류강도 변화에 따른 유동 및 열전달 특성", 대한기계학회 추계학술대회논문집B, pp.598~603, 1998.
- [18] Camci.C. and Kim.K., "Evaluation of a Hue Capturing Based Transient Liquid Crystal Method for High-Resolution Mapping of Convection Heat Transfer on Curved Surfaces", J.

of Heat Transfer, Vol.115, pp.311~318, 1993.

[19] 김예용, 김귀순, "액정을 이용한 열전달 측정 방법에서의 측정 오차를 줄이기 위한 연구", 한국항공우주학회지 제23권 제4호, pp.74~82, 1995.

[20] 김예용, 김귀순, 정규하, "Lumped Capacitance 방법을 이용한 환-관 열교환기의 정량적 국소 열전달 해석을 위한 실험적 연구", 대한기계학회논문집(B) 제25권 제2호, pp.205~215, 2001.

[21] 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", Experiments in Fluids, Vol.12, pp.213~222, 1992.

[22] Anmen.R., Shinoki.M. and Ozawa.M., "Mixed Convection in a Rectangular Slender Channel", 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, pp.199~204, 2000.

[23] D.S.Bae, Y.Murai, J.M.Kim, M.ozawa and I.Kimura, "Bubbly flow in a vertical temperature gradient", 6th Asian Symposium on Visualization, pp.342~344, 2001.

[24] 이기백, 김태영, 양장식, "색상포착기법과 수치계산을 이용한 3차원 밀폐공간 내의 자연대류 연구", 대한기계학회논문집(B), 제21권 제12호, pp.1595~1607, 1997.

[25] Kimura.I, Hyodo.T and Ozawa.M, "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, 1998.

[26] Lee.D.H, Chung.J.H, Won.S.Y, Kim.Y.T and Boo.K.S, "A New Liquid Crystal Color Calibration Technique Using Neural Networks and Median

Filtering", KSME, Vol.14, pp.113~120, 2000.

[27] 한국과학기술연구원(김형근 등) "차세대 디지털 동영상 기술개발", 과학기술처, 1997.

[28] 구기준 편, "화상정보처리" 기문사, 1998.

후 기

본 연구는 2000년도 부경대학교 발전기금에 의하여 지원되었고, 일부는 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

저 자 소 개



배대석 (裵大錫)
 1955년 2월생, 1980년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1984년 동아대학교 대학원 졸업(석사), 1991년 동 대학원 졸업(박사), 1994년 University of Minnesota (post doctor), 1999년 일본 후쿠이대학(교한교수), 현재 부경대학교 기계공학부 교수, 당학회 중신회원



김진만 (金鎭萬)
 1975년 8월생, 2000년 부경대학교 기계공학부 졸업(공학사), 2003년 부경대학교 대학원 졸업(공학석사)



권오봉 (權五鵬)
 1958년 1월생, 1980년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1982년 서울대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1992년 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 기계공학과 졸업(박사), 현재 부경대학교 기계공학부 교수



이도형 (李度衡)
 1954년 8월생, 1980년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1982년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1989년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1983. 4-현재 부경대학교 기계공학부 냉동공조·에너지시스템전공 교수.


이연원 (李蓮源)

1958년 8월생, 1981년 경북대학교 기계공학과졸업. 1983년 경북대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1993년 일본 동경대학 대학원 기계공학과 졸업 (박사). 1984년-1986년 현, POSCO E&C 설계팀장. 1997년 7월-8월 일본 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1993년-현재 부경대학교 기계공학부 부교수, 당학회 종신회원


김남식 (金南植)

1972년 부산대학교 기계공학과 졸업. 1981년 부산대학교 대학원 졸업(석사) 1993년 부산대학교 대학원 졸업(박사) 현재 부경대학교 공과대학 기계공학부 교수