

PIV를 이용한 평행평판 내의 혼합대류의 정량적 가시화

배 대 석* · 박 일 용*

(원고접수일 : 2003년 9월 15일, 심사완료일 : 2004년 1월 6일)

A Quantitative Visualization of Mixed Convection in Parallel Plates Using PIV

Dae-Seok Bae* · Ri-Long Piao*

Abstract : The PIV(Particle Image Velocimetry) with liquid crystal tracers is used for visualizing and analysis of the mixed convection in the parallel plates with the upper part cooled and the lower part heated. It is found that the flow pattern of mixed convection in the parallel plates can be classified into three patterns which was affected by Reynolds number. Also, the periodic nature is confirmed, and visualized in experiment.

Key words : Mixed Convection(혼합대류), Natural Convection(자연대류), Liquid Crystal(액정), PIV(입자영상유속계)

1. 서 론

기계공학을 비롯하여 많은 공학 분야에서 열 유체의 거동을 정확히 파악하는 것은 기기, 시스템 설계에서 아주 중요하다. 따라서 열교환기, 원자로, 전기기기 등의 설계와 제작을 위해서는 열 유체의 유동에 관한 고찰이 반드시 필요하다. 열 유체의 거동을 해석하는 방법의 하나로써 감온액정이 이용되고 있으며 최근 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾. 감온액정은 온도에 의하여 색깔이 변화하므로 색과 온도사이의 상관식을 구하여 색/온도 변환에 의한 정량적인 온도정보를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 액정입자를 추적 입자

로 사용하여 유동장의 속도를 정량적으로 계측할 수 있다. 이 계측방법은 측정온도범위가 감온액정의 발색범위라는 제한이 있지만 점계측인 열전대나 국소유속계 등과는 달리 온도장, 속도장 동시 계측이 가능하며, 복잡한 형상의 온도측정, 순시 속도측정, 과도현상의 측정에 적합하고 또한 유체에 현탁되는 감온액정의 입자가 아주 미소하여 유동장에 주는 영향을 거의 무시할 수 있는 등의 이점이 있어 더욱 주목되고 있다. 또한 최근에 컴퓨터 하드웨어, 광학적 영상처리기기, 가시화기술의 발달과 더불어 감온액정 추적자를 이용한 열 유동장의 정량적 가시화가 가능하게 되어 정량적으로 속도장 또는 온도장 전체의 정보를 동시에 계측할

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

* 부경대학교 대학원 기계공학부, E-mail : prlong@hotmail.com

필요가 있는 실험에 감온액정을 이용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. Kimura, Ozawa 등⁽²⁾은 감온액정을 이용하여 Hele-Shaw cell 내 자연대류 유동장과 온도장을 정량적으로 가시화하였고 Anmen 등⁽³⁾은 Hele-Shaw cell 내에 강제대류를 작용시켜 그 영향을 고려하였고 Bae 등⁽⁴⁾은 기포유동에 대한 속도장과 온도장을 정량적으로 제시하였다.

본 연구에서는 감온액정을 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 평행판 내에서 발생하는 혼합대류의 가시화에 적용시켜 우선 PIV^{(8)~(9)}를 이용하여 속도장을 정량적으로 가시화하고 입구유속이 유동형태의 변화에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험

2.1 실험 장치

Fig. 1은 실험 장치를 나타낸다. 실험장치는 실험부(Test section), 두 개의 항온조, 두 개의 광원, 두 개의 물 필터, 탱크, 펌프, 온도제어기, 3CCD 디지털카메라, 디지털 온도계 그리고 컴퓨터로 구성되어 있다. Fig. 2는 실험부를 나타낸다. 실험부는 영상획득을 위해 두께가 15mm인 투명한 아크릴로 제작되었고 전열면인 동판과 수직으로 조립되었으며 너비는 140mm, 깊이는 10mm, 높이는 15mm인 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 직사각 모형을 제작되었고 반사광에 의한 해상도의 손실을 막기 위해 영상획득 부분을 제외한 실험부의 촬영전면에 검정색 종이를 부착하였다. 또한 입구에서의 동일한 유동을 위해 실험부 양쪽에 Honey comb를 설치하였다. 상, 하부 냉각면과 가열면은 각각 두께가 15mm인 동판으로 구성되었고 전열면인 동판내부에는 순환수의 이동통로를 만들어 등온의 순환수를 순환시켰다. 실험부내에 들어가는 작동유체의 온도는 실험부 좌측에 설치한 온도제어장치에 의해 억제되고 보존된다. 조명은 백색광원인 할로젠 램프로 실험부의 좌·우에 검정색 종이로 만들어진 2mm 슬릿(Slit)을 통하여 조사되었고 실험시 조명에 의한 복사열전달을 최소화하기 위해 물 필터를 사용하

였다. 영상획득은 슬릿 광에 대해 수직방향으로 2m 위치에 설치된 컬러디지털카메라에 의해 이루어졌다. 실내온도의 영향을 감소시키기 위해 별도의 차단벽을 설치하였으며 실내온도를 실험부 상하면의 평균온도로 설정하여 실험하였다.

2.2 실험 방법

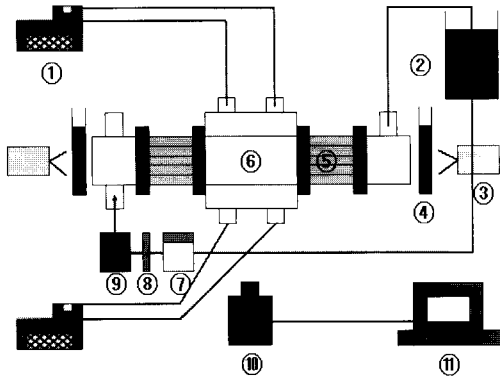
작동 유체로는 Shin-Etsu Silicon Oil KF-96-100cst(Shin-Etsu Chemical Co., Ltd)를 이용하였으며 온도가 25℃일 때의 물성치를 Table 1에서 나타낸다.

Table 1 Properties of silicon oil at 25℃

Silicon oil [viscosity, v]		100cst
Density	ρ [kg/m ³]	963.1
Specific heat	C_p [J/kg.K]	1507
Thermal conductivity	λ [W/m.K]	0.16
Expansion coefficient	β [K ⁻¹]	$9.5 \cdot 10^{-4}$
Thermal diffusivity	α [m ² /s]	$1.1 \cdot 10^{-7}$
Pr number	Pr	909.1

액정에는 RM2830(Janpan capsular products INC.)를 사용하여 실리콘오일의 점성에 영향을 미치지 않도록 중량비 약 0.1%로 현탁하였다.

먼저, 실험부내에 실리콘 오일과 액정의 혼합액을 주입하고 상부를 냉각, 하부를 가열한다. 혼합액은 펌프(Stepdos pump)에 의해 실험부내에서 아주 천천히 혼합한다. 입자들이 실험부내의 모든 영역에서 완전히 혼합된 후 펌프를 정지하고 상하면의 온도를 같게 하여 대류가 완전히 제거되는 열평형상태로 만든다. 이때 감온액정은 실험부의 전 영역에 대하여 동일한 색을 발산한다. 다음 다시 하부를 가열하고 상부를 냉각한다. 실험부내에 자연대류가 충분히 발달하여 정상상태가 된 후 펌프로 유체를 실험부내로 유동시킨다. 혼합대류가 완전히 형성된 후 유동현상을 디지털 비디오 카메라로 촬영하였다. 본 실험에서 실험부내에 흘러들어가는 유체의 온도는 상부와 하부의 평균온도이다.



- ① constant temperature bath
- ② tank
- ③ halogen light
- ④ water filter
- ⑤ honey combs
- ⑥ test section
- ⑦ stepdos pump
- ⑧ pulse dampener
- ⑨ temperature regulator
- ⑩ digital video camera
- ⑪ computer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

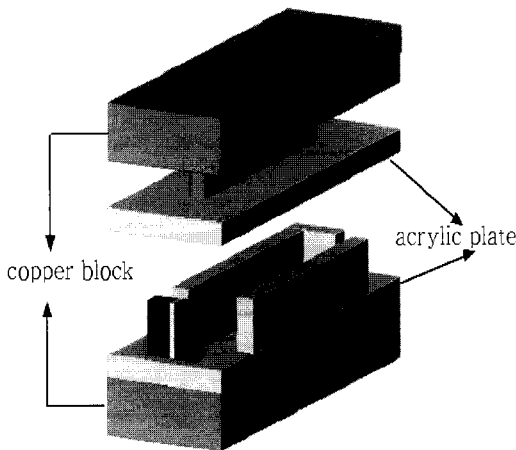


Fig. 2 Schematic diagram of test section

3. 속도장의 계측

본 연구에서는 일정시간 간격을 가진 두 개의 추적 입자화상을 소 영역으로 분할해서, 각각의 영역에 있어서의 농도패턴 상호상관계수를 계산해

서 그 최대치의 공간위치로부터 추적 입자군의 이동거리 및 방향을 구해 속도벡터를 계산하는 계조치 상호 상관법⁹⁾으로 속도벡터분포를 계측하였다. 사용한 계조치 상호 상관법의 입자추적 알고리즘은 복수의 추적 입자가 만든 소영역의 농도패턴으로써 처리되기에 화상은 농도의 정보를 함유할 필요가 있다. 그러나, 본 실험에서 얻은 화상은 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 화상데이터를 이용한다. 본 연구에서는 상용프로그램인 Thinkers eyes를 사용하여 휘도신호로 변환하고 속도장 계측을 진행하였다.

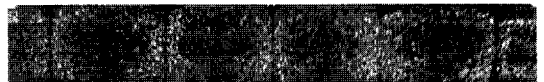
4. 결과 및 고찰

4.1 자연대류

Fig. 3은 100cSt 실리콘 오일을 사용하여 형상비 $H/L=15/140$, 온도차 ΔT 는 각각 1.2°C , 3°C , 8°C 인 자연대류의 실험결과이다. 온도차가 상대적으로 작을 때 즉 Rayleigh수가 상대적으로 작을 때 축과 평행인 10개의 불안정한 셀을 관측할 수 있고(Fig. 3a) 온도차가 증가하면 즉 Rayleigh수가 증가하면 10개의 안정한 셀을 관측할 수 있다(Fig. 3b). 또 온도차가 더욱 증가하면 10개의 안정한 셀과 우측에서 작은 한 개의 셀을 관측할



(a) $\Delta T=1.2^\circ\text{C}$, $Ra=170$



(b) $\Delta T=3^\circ\text{C}$, $Ra=349$



(c) $\Delta T=8^\circ\text{C}$, $Ra=931$

Fig. 3 Photos of natural convection pattern

수 있다(Fig. 3c). 이런 현상은 밀폐된 가는 평행 평판 내에서 나타나는 전형적인 유동형태로 본 연구에서도 확인되었다.

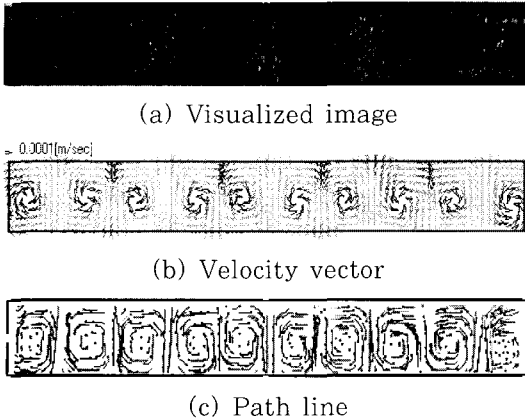


Fig. 4 Experimental results at $H/L=15/140$, $\Delta T=3^\circ\text{C}$ and 100cSt

Fig. 4는 자연대류의 실험결과인 Fig. 3b ($\Delta T=3^\circ\text{C}$)일 때의 속도를 측정된 결과이다. (a)는 촬영한 영상이고 (b)는 계조치 상호 상관법을 적용하여 속도장을 속도벡터로 나타낸 것이며, (c)는 계측된 유동의 유적선(path line)이다. 그림에서와 같이 대류는 10개의 셀 유동과 좌우대칭 구조를 갖는다. 각 셀은 인접한 셀 유동과 상호작용하며, 그로 인해 전열면에 수평인 셀의 유속에 비해 상승 또는 하강하는 부분의 유속이 크다. 또한 각 셀의 축은 가열, 냉각면에 평행하게 배열되어 있는 것을 확인할 수 있다.

4.2 혼합대류

Fig. 5부터 Fig. 8은 유량별 혼합대류 패턴의 실험 결과를 나타낸다. 온도차는 모두 3°C (상, 하부 온도는 각각 25.8°C 와 28.8°C)이고 실험부의 왼쪽 면으로부터 유량별 일정유속의 유체가 유입되어 상하부평판의 온도차에 의해 발생한 자연대류(Fig. 3b)에 작용하였다. Fig. 5부터 Fig. 8에서의 (a)는 감온액정을 촬영한 영상이고 (b)는 촬영영상에 계조치 상호 상관법을 적용하여 속도장을 속도벡터로 나타낸 것이고 (c)는 계측된 유동의 유적선이다.

입구 평균 유속이 $1.6\text{mm}/\text{min}$ 일 때 유입된 유량은 자연대류에 의해 발생한 Rayleigh-Bernard 셀에 거의 영향을 미치지 않고 계속 자연대류 구조를 유지하는 것을 관찰할 수 있다. 즉 유동은 자연대류에 의해 지배 된다 (Fig. 5).

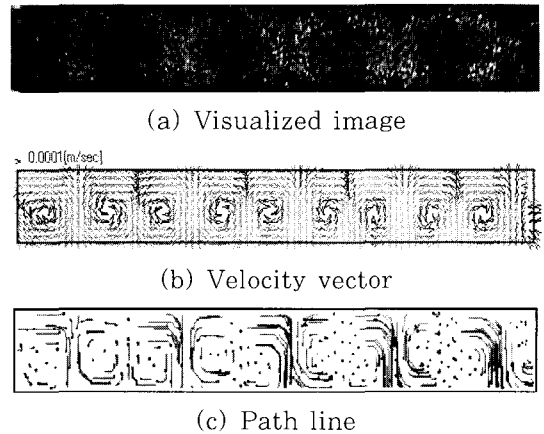


Fig. 5 Experimental results at $\Delta T=3^\circ\text{C}$, $U=1.6[\text{mm}/\text{min}]$, $Re=4.0 \times 10^{-3}$ $Ra=349$

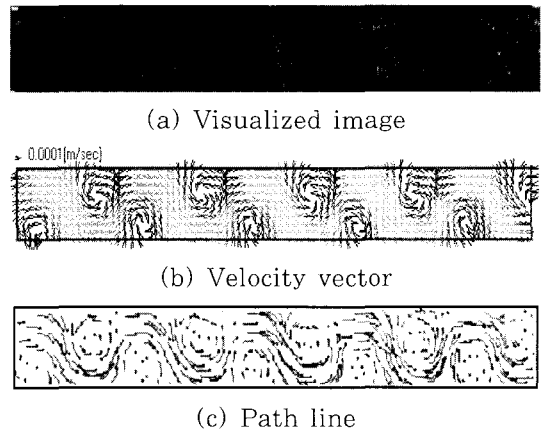


Fig. 6 Experimental results at $\Delta T=3^\circ\text{C}$, $U=5.2[\text{mm}/\text{min}]$, $Re=1.3 \times 10^{-2}$ $Ra=349$

입구의 평균 유속이 $5.2\text{mm}/\text{min}$ 일 때 입자들은 거의 중간 높이에서 상승 및 하강을 하면서 오른쪽의 다음 셀로 흘러 들어가면서 사인 곡선형태의 유동을 형성한다. 또한 입구영역의 유동은 점차적으로 성층형태를 유지하는 것을 관측할 수 있다. 이는 입구 유속이 증가하기 때문이다. 그러나 입구유속의 영향은 약하고 여전히 부력에 의한 자

연대류의 영향이 전 영역에서 나타난다(Fig. 6).

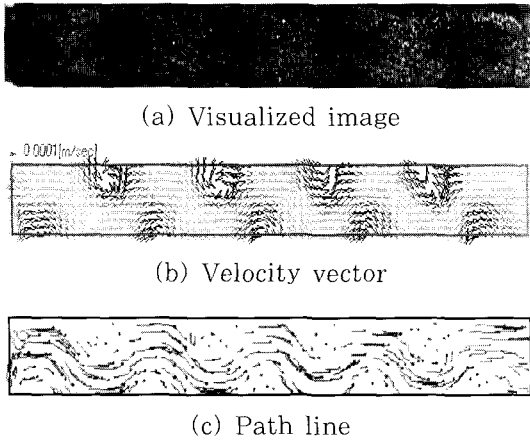


Fig. 7 Experimental results at $\Delta T=3^\circ\text{C}$, $U=7.5[\text{mm}/\text{min}]$, $Re=1.9 \times 10^2$, $Ra=349$

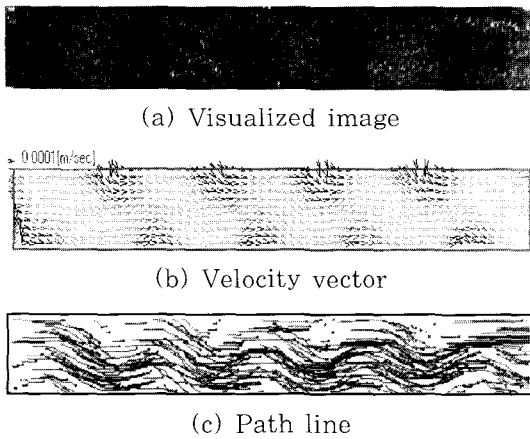


Fig. 8 Experimental results at $\Delta T=3^\circ\text{C}$, $U=11.7[\text{mm}/\text{min}]$, $Re=2.9 \times 10^2$, $Ra=349$

Fig. 7은 입구의 평균유속이 7.5mm/min일 때의 대류패턴을 보여준다. 유동패턴은 사인 곡선형으로 나타나고 실험부 내의 수직속도는 Fig. 5와 Fig. 6에 비해 작은 것이 관측되었다. 이것은 유체의 유동에 부력에 의한 자연대류의 영향은 감소하고 강제대류가 주요한 역할을 하기 때문이다. 또한 입구영역의 유동패턴은 거의 성층형태를 형성하고, 실험부의 중앙 상하면 가까이에는 여전히 자연대류의 셀 구조를 형성하는 것을 관측할 수 있다.

Fig. 8은 입구의 평균유속이 11.7mm/min일 때의 대류 패턴을 보여 준다. 입구영역의 성층은 유속이 작을 때보다 더 분명히 나타나고 강제대류의 영향이 증대됨을 알 수 있다.

본 실험의 결과로부터 평행평판 내의 혼합대류는 크게 3가지의 유동형태로 분류할 수 있음을 알 수 있다. 즉 첫 번째는 실험부 전 영역의 유동형태가 자연대류에 의한 셀 유동(Fig. 5), 두 번째는 실험부 전 영역의 유동형태가 사인 곡선형 유동(Fig. 6, Fig. 7), 그리고 세 번째는 입구영역의 유동은 성층형태이나 하류유동은 사인 곡선형 유동(Fig. 8)을 갖는 경우로 나눌 수 있다.

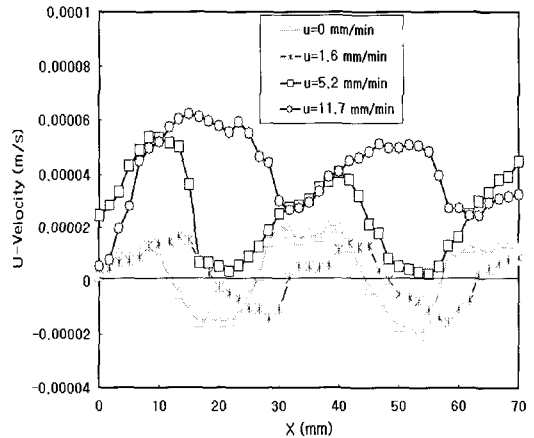


Fig. 9 Comparison of U-velocity according to inlet velocity

Fig. 9는 높이방향 중간부의 속도분포로, 유량비에 따른 X 방향 유속의 변화를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 입구유속이 0 mm/min 인 경우는 자연대류에 의해 서로 방향이 반대인 셀이 연속적으로 형성되어 x방향 속도u의 부호가 주기적으로 바뀌는 전형적인 Rayleigh-Bernard 대류의 유동형태를 보이지만 입구유속이 증가함에 따라 Rayleigh-Bernard 대류의 유동형태는 파괴되어 입구유속이 5.2 mm/min 이상에서는 u속도의 값이 전부 양의 값을 가진다. 이것은 입구유속의 증가(u 속도 증가)로 Rayleigh-Bernard 대류에 의해 형성되는 음의 값을 가지는 u속도가 입구유속에 의해 모두 양의 값으로 바뀌기 때문이

다. 그러나 전체적인 형태가 사인곡선형을 가지는 것은 여전히 상,하부면 가까이에서 발생하는 자연대류 유동의 영향 때문이다.

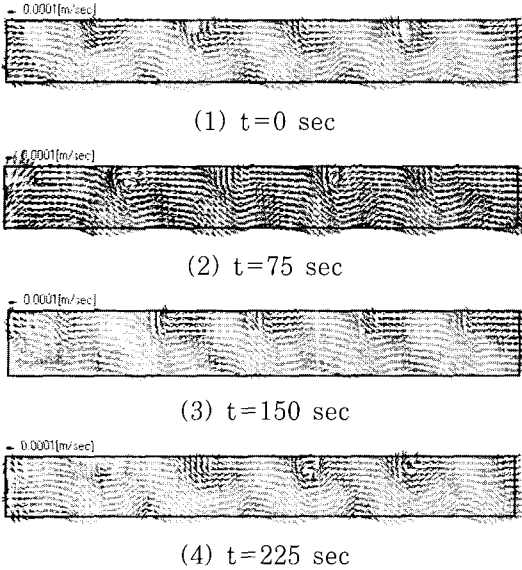


Fig. 10 Velocity vector of $U=9.0\text{mm/min}$, $\Delta T=3^\circ\text{C}$, $Re=2.3 \times 10^{-2}$ $Ra=349$

Fig. 10은 평균 입구 유속이 9.0mm/min ($Re=2.3 \times 10^{-2}$)이고 온도차는 3°C (상, 하부 표면 온도는 각각 25.8°C 와 28.8°C)이며, Ra 수는 349 일 때의 시간별 유동장의 속도 벡터를 계조치 상호 상관법을 적용하여 나타낸 것이고 Fig. 11은 동일 조건하에서의 계측된 유동의 유적선을 나타낸다. 이 경우 전 영역의 유동형태는 사인 곡선형이고 입구 영역의 성층은 시간에 따라 점차적으로 커지고 셀은 유속에 의해 오른쪽으로 이동하면서 주기가 $t=225$ 초인 주기적인 특성을 나타낸다. 이 주기적 현상은 자연대류에 의해 좌측면에서 생성된 새로운 유동을 우측으로 이동시키면서 우측 끝의 기존유동을 연속적으로 소멸시킨다. 이 주기적인 특성은 입구 유속이 작은 경우는 입구 유속이 전체 유동형태에 영향을 미치지 못하며 나타나지 않으나 입구유속이 증가하면 주기적 유동형태는 나타나지만 그 주기가 매우 길고 명확하지 않다. 그러나 입구유속이 9.0mm/min 인 경우는 주기적인 유동형태를 명확히 보이고 있다.

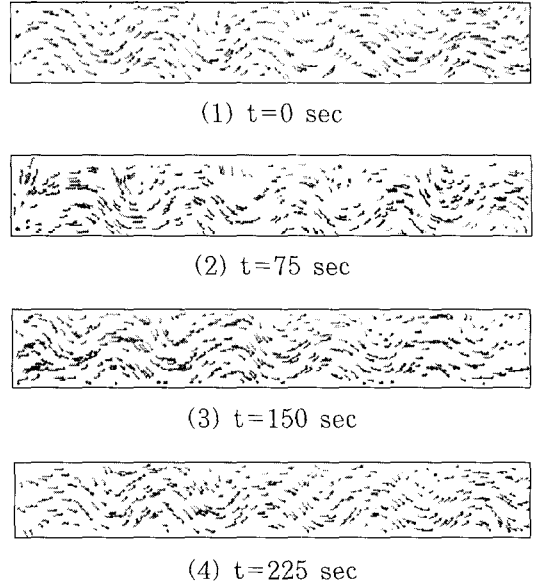


Fig. 11 Path line of $U=9.0\text{mm/min}$, $\Delta T=3^\circ\text{C}$, $Re=2.3 \times 10^{-2}$, $Ra=349$

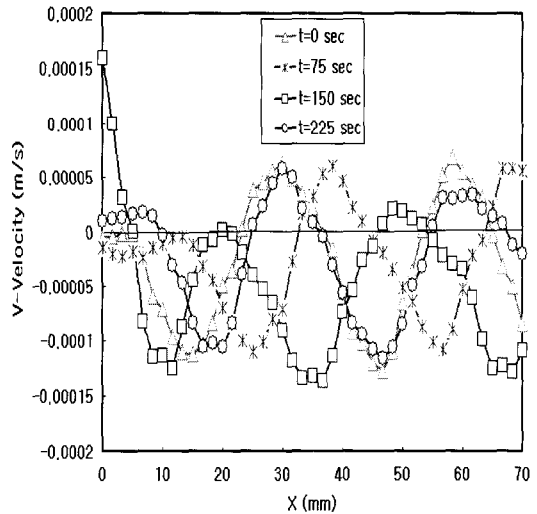


Fig. 12 Comparison of V-velocity with time interval

Fig.12는 평균 입구 유속이 9.0mm/min ($Re=2.3 \times 10^{-2}$)이고 온도차는 3°C (상, 하부 표면 온도는 각각 25.8°C 와 28.8°C)이며, Ra 수는 349 일 때 높이방향 중간부에서의 시간에 따른 Y 방향 속도분포를 나타내었다. 그림에서와 같이 입구영역에서의 Y 방향 속도는 $v \approx 0\text{m/s}$ 인 성층유동을

보여주고 나머지 사인 곡선형인 유동을 나타내는 Y 방향 속도분포는 시간이 증가함에 따라 오른쪽으로 이동하며 일정한 시간 후에는 처음 상태와 거의 일치하는 주기적인 특성을 가진다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

감온 액정을 이용하여 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 평행평판 내에서 발생하는 혼합대류를 PIV를 이용하여 $Ra=349(\Delta T=3^\circ C)$ 인 경우 입구유속에 따른 Re 수를 $0 \leq Re \leq 2.9 \times 10^{-2}$ 사이로 변화시키면서 실험적으로 연구하였다. 본 실험을 통하여 평행평판 내의 혼합대류를 정량적으로 가시화 할 수 있었고, 그 결과 평행평판 내의 혼합대류의 유동형태를 다음의 3 가지 형태로 분류할 수 있었다. a) 입구유속이 $U=1.6$ [mm/min]일 때는 자연대류가 전 영역의 유동형태에 지배적인 유동, b) 입구유속이 $U=5.2$ [mm/min]일 때는 전 영역의 유동형태가 사인 곡선형인 유동, 그리고 c) 입구유속이 $U=7.5$ [mm/min]이상 일 때는 상류인 입구유동은 성층유동이고, 하류는 사인 곡선형 유동이다. 한편 입구유속이 $U=9.0$ [mm/min.]인 경우 평행평판 내의 혼합대류에 주기가 225초인 주기적인 유동형태가 존재함을 확인하였다.

참고문헌

[1] C. Camci and K. Kim, "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

[2] M. Ozawa, U. Muller, I. Kimura and T. Takamori, "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.2-1

3~222, 1992

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

[4] 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

[5] 배대석, 김진만, 권오봉, 이도형, 이연원, 김남식, "감온액정을 이용한 Rayleigh-Bernard 대류의 정량적 가시화에 관한 연구," 한국박용기관학회지 제27권, 제3호, pp. 395~404, 2003

[6] 張曦, 翁文國, 張嘉鋒, 何世平, "液晶測溫測速技術在流體實驗中的應用", Journal of China University of Science and Technology, Vol.30, No.1 Feb. 2000

[7] 윤정환, 도덕희, 이상준, "TLC와 컬러화상처리를 이용한 Hele-Shaw Cell 내부 대류 온도장 측정", 대한기계학회논문집(B) 제20권 제3호, pp. 1114-1122, 1996

[8] 이영호, "PIV에서의 동시다점계측의 원리 및 적용," 대한기계학회 '96년도 열 및 유체공학 부문 학술강연 논문집, pp. 30~44, 1996

[9] 조원호, 배대석, 김남식, "입자영상해석에 의한 자연대류유동에 관한 연구," 한국동력기계공학회지 제4권 제2호, pp.11~16, 2000

저 자 소 개



배대석 (裴大錫)

1955년 2월생, 1980년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1991년 동아대학교 대학원 졸업(박사), 1994년 University of Minnesota(post doctor), 1999년 일본 후쿠이대학(교환교수), 현재 부경대학교 기계공학부 교수, 당학회 중신회원



박일용 (朴日龍)

1977년 7월생, 2000년 연변대학교(중국) 통용기계학과 졸업, 2003년 부경대학교 대학원 졸업(공학석사), 현재 부경대학교 대학원 박사과정