



사각 채널 내의 볼텍스 유동에 관한 실험적 연구(1) Experimental Study on Vortex Flow in a Rectangular Channel(1)

박일용* · 김정수** · 배대석***

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

(Received 29 November 2017, Revision received 28 February 2018, Accepted 28 February 2018)

Abstract: An experimental study is performed to investigate the vortex flow of mixed convection in three-dimensional horizontal rectangular channels filled with high viscous fluid. The particle image thermometry(PIT) with thermo-sensitive liquid crystal tracers is used for visualizing and analysis. This method allows simultaneous measurement of velocity and temperature fields. 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 ranges from 0 to 6.4×10^2 . From the present study, we can visualize the quantitative temperature and velocity field of mixed convective flow in three-dimensional horizontal rectangular channels simultaneously, and it is found that the mixed convective vortex flow can be classified into three flow patterns which affected by Reynolds number.

Key Words : Vortex flow, Mixed convection, PIT(Particle Image Thermometry), TLC(Thermo-sensitive Liquid Crystal), Neural network, 3-D Rectangular channel, High viscous fluid

1. 서 론

2사각 채널 내에서의 혼합대류 볼텍스 유동은 화학증착반응기, 열교환기, 태양에너지 집열기, 전자장비의 냉각 등과 같은 많은 공학적인 응용분야에서 중요한 역할을 하기 때문에 많은 연구자들에 의해 다양하게 고찰되어져 왔다. Chiu 등¹⁾은 하부가 가열되는 수평 평행 채널 내에서의 혼합

대류 열전달 특성에 대하여 작동유체를 공기로 하고 $2.71 \times 10^2 \leq Gr/Re^2 \leq 6.79 \times 10^4$ 범위 내에서 실험과 수치적 계산을 동시에 진행하여 그 결과를 고찰하였다. Maughan 등²⁾은 평행 평판 채널 내에서의 층류혼합대류 열전달에 관하여 수치 해석적 방법으로 연구하였으며, 채널 내에서의 유동이 완전 발달된 상태에서의 Nusselt 수와 2차 유동 개시점간의 상관관계를 제시하였다. Nace 등³⁾은 하

*** 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.

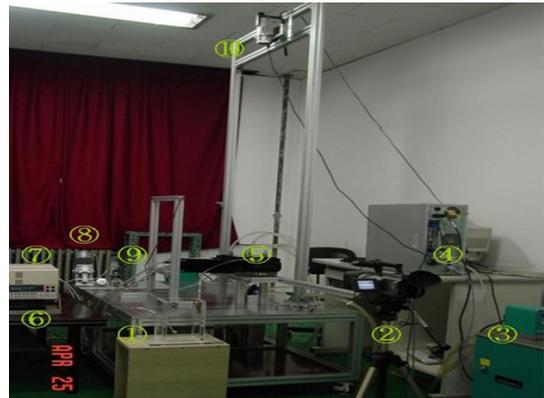
**Jeong-Soo Kim : Department of mechanical engineering, Pukyong National University.

부가 가열되고 상부가 냉각되는 사각채널 내에서 $AR=2$, $Ra=22,200$, $Re=18.75, 36, 54$ 일 때 질소 혼합대류 유동특성을 실험 및 수치 해석적으로 연구하였으며, 그 결과를 비교하여 서로 잘 일치함을 보였다. Chen 등⁴⁾은 하부에서 가열되는 수평 채널 내에서의 혼합대류 유동을 $AR=2$, $Pr=0.7$ 인 경우 Reynolds 수($1 \leq Re \leq 20$)와 Rayleigh 수($2 \times 10^3 \leq Ra \leq 4 \times 10^3$)를 변수로 하여 종 방향 및 횡 방향을 구조에 대하여 수치 해석적 방법으로 연구하였으며, 그 결과를 이전의 실험 및 수치해석 결과와 비교, 검토하였다. Chang 등⁵⁾은 하부에서 가열되는 수평 평행채널 내에서의 혼합대류 유동을 $AR=12$, $Pr=0.7$ 인 경우 Reynolds 수($20 \leq Re \leq 50$)와 Rayleigh 수($6 \times 10^3 \leq Ra \leq 3 \times 10^4$)를 변수로 하여 혼합대류 종 방향을 구조에 대하여 실험적 방법으로 연구하였다. Lin⁶⁾은 수평 사각 채널 내 부력에 의한 볼텍스 유동과 열전달 특성에 대하여 저 Reynolds수가 혼합대류 볼텍스 유동에 미치는 영향을 저 점성유체인 공기($Pr=0.7$)를 작동유체로 하여 실험적으로 연구하였고, Bac 등⁷⁾은 사각채널 내에서 Rayleigh 수가 혼합대류 볼텍스 유동에 미치는 영향을 3차원 수치 해석적 방법으로 연구하였다.

이상과 같이 사각채널 내에서의 혼합대류 유동에 관한 연구는 실험 및 수치 해석적 방법으로 많이 연구되어져 왔다. 그러나 Bac 등⁷⁾을 제외한 대부분의 연구는 저 점성유체인 공기($Pr=0.7$)나 물($Pr=6$)을 작동유체로 사용하였고, 실험의 경우도 정성적인 가시화와 점 계측법에 의한 국소적인 정보획득에 국한되었으며, 온도장과 속도장의 계측도 각각 별도로 이루어졌다. 하지만 기계공학을 비롯한 많은 공학 분야에서 열 유동을 정량적으로 해석하는 것은 기기 및 시스템 설계에 대단히 중요하고, 정확한 해석을 위해 전 유동에 걸쳐 속도와 온도의 정량적 정보가 동시에 필요하다. 최근 입자영상유속(PIV) 계측법의 개발로 속도 장에 대한 동시 다점계측의 정량적 정보획득이 가능해졌고, 온도장의 경우에도 감온액정(thermal-sensitive liquid crystal)을 추적 입자로 사용하여 온도를 가시화하고 동시에 정량적으로 계측할 수

있는 연구가 활발히 진행되어져 왔다.⁸⁻¹²⁾

따라서 본 연구에서는 3차원 수평 사각채널 내 혼합대류의 온도장과 속도장을 정량적으로 가시화할 수 있는 기법인 PIT(Particle Image Thermometry)법¹²⁾을 확립하고, Reynolds 수에 따른 고 점성유체의 혼합대류의 볼텍스 유동을 실험적으로 연구하고자 한다.



- ① Oil tank
- ② Digital video camera 1
- ③ Constant temperature bath
- ④ Computer
- ⑤ Test section
- ⑥ Digital thermometer
- ⑦ Light source
- ⑧ Pump
- ⑨ Pulse dampener
- ⑩ Digital video camera 2

Photo. 1 Photograph of the experimental apparatus

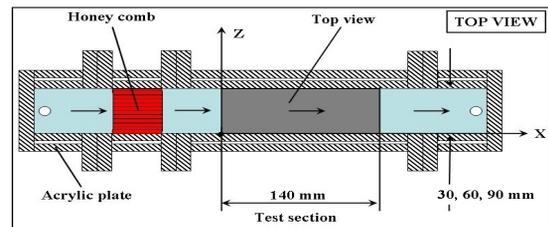


Fig. 1 Schematic diagram of test section

2. 실험

2.1 실험 장치

본 실험에서 사용된 실험 장치는 Photo 1과 같다. 사진에서 보는 바와 같이 실험 장치는 실험부(test section), 두 개의 항온조, 두 개의 light

source, 오일 탱크, 펌프, Pulse dampener, 디지털 온도계, 두 개의 디지털 비디오카메라, 그리고 컴퓨터로 구성되어 있다.

Fig. 1에 나타난 실험 부는 길이 $L=140$ mm, 높이 $H=15$ mm, 그리고 폭 $W=60$ mm로 제작되어 종횡비 $AR(W/H)=4$ 인 직사각형 모양을 가지고 있다. 실험 부는 가시화를 위하여 투명아크릴판로 제작되었고. 반사광에 의한 해상도의 손실을 막기 위해 영상획득 부분을 제외한 실험부의 촬영전면에 검정색 종이를 부착하였으며, 영상획득 부분 밑면에도 감온액정의 발색을 보다 잘 촬영하기 위해 검정색 종이를 부착하였다. 실험부의 하부는 일정한 온도를 유지하기 위하여 전열이 잘되는 동판으로 제작하였으며, 내부에는 순환수의 이동 통로를 만들어 등온의 순환수를 항온조로 순환시켜 실험부의 하부 면을 가열시켰다. 상부는 가시화를 위하여 아크릴 평판으로 제작하였고, 내부는 역시 순환수의 이동통로를 만들어 등온의 순환수를 항온조로 순환시켜 실험 부 상부를 냉각시켰으며, 냉각 면은 전열을 위하여 두께가 1.5 mm인 아크릴 평판으로 제작하였고 나머지 모든 부분은 두께가 15 mm인 아크릴 평판으로 제작하였다. 실험부의 상부와 하부의 온도는 각각 28.8°C와 25.8°C를 유지하도록 하여 작동유체의 Rayleigh수가 10^4 값이 되도록 하였다. 하부 온도는 동판 중심에서 좌·우로 50 mm간격으로 깊이 14 mm, 직경 2 mm인 구멍을 뚫고, 상부 온도는 상부 아크릴 평판 중심에서 좌우로 각각 80 mm 위치에 깊이 31 mm, 직경 2 mm인 구멍을 뚫어 오차 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 를 가진 testo 735를 사용하여 측정하였다. 그리고 일정한 온도를 유지하기 위하여 순환 항온조를 사용하였으며 순환 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 비디오카메라에 의해 이루어졌다.

작동유체는 온도변화에 따른 액정의 선명한 색 변화를 얻기 위하여 실리콘 오일(Sin-Etsu Silicon Oil KF-96-100cSt)을 사용하였다. 감온액정은 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 실험 방법 및 화상 해석

실험은 다음의 순서로 행하여졌다. 우선 사각 채널 내에 사용된 실리콘 오일을 제거하고 물과 비누로 깨끗이 세정한 후 펌프를 이용하여 새로운 실리콘 오일을 주입하였다. 그리고 항온순환장치를 작동시켜 상, 하부의 온도를 조절하여 대류를 발생시킨 후, 전 영역에 걸쳐 대류가 충분히 발달되었을 때 감온액정을 실리콘 오일과 혼합하여 액정이 실험 부 내의 전 영역에 골고루 섞이게 아주 천천히 주입하였다. 이는 감온액정이 실험부의 관찰 창에 부착하거나 침전을 방지하기 위한 것이다. 액정이 실험부 내의 전 영역에 골고루 섞이게 한 후 펌프를 정지하고 상부를 가열, 하부를 냉각하여 색/온도변환을 위한 보정실험을 실시하였다. 보정 실험 이후 다시 상부를 냉각, 하부를 가열시켜 실험부 내에 Rayleigh-Bénard 대류를 발생시켰다. 수 시간 후 대류가 정상상태에 도달하였을 때, 펌프를 이용하여 작동 유체를 요구되어지는 유속으로 실험부 내에 유입시키고, 일정한 시간이 지난 후, 혼합대류가 완전히 형성된 후, 유동현상을 디지털 비디오카메라로 촬영하여 컴퓨터에 저장하였다. 특히 보정실험에서 유지된 카메라와 실험부에 대한 광원의 입사각은 일정하게 유지할 필요가 있다. 이는 감온액정은 촬영 각도에 따라 다양한 색으로 관별되기 때문에 실험 동안 철저한 주의가 요구되었다. 본 실험에서 실험부 내에 흘러 들어가는 작동유체의 온도도 실험부 상, 하부의 평균온도로 설정하였다. 이러한 실험방법을 통해 보정실험과 혼합대류 실험을 실시

하였으며, 촬영한 영상으로 속도와 온도계측을 실시하였다. 실험을 할 때 조명에 의한 복사열전달을 최소화하기 위하여 영상을 기록할 때만 조명을 사용하였다.

디지털 비디오카메라로 촬영된 화상의 속도장의 속도벡터는 계조치상호상관법¹²⁾으로 구하였고, 온도장의 온도측정은 뉴럴-네트워크(Neural-Network)를 이용한 색-온도 보정방법¹²⁾으로 구하였다.

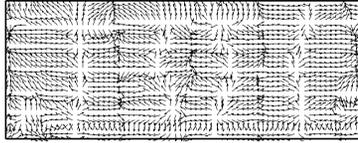
3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 상부가 냉각되고 하부가 가열되는 두 개의 등온 벽으로 구성된 사각채널 내에서 Prandtl 수 $Pr=909$, Rayleigh 수 $Ra=10^4$, 형상 비 $AR=4$ 일 때 Reynolds 수가 혼합대류 볼텍스 유동에 미치는 영향을 감온액정(TCL)을 추적 입자로 사용한 속도장과 온도장의 동시 계측기법인 PIT(Particle Image Thermometry)법을 사용하여 실험적으로 고찰하였다.

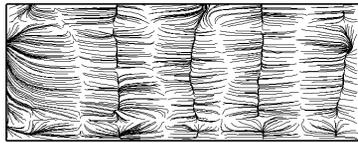
Fig. 2는 $AR=4$, $Pr=909$, $Ra=10^4$, $\theta=0^\circ$ 그리고 Reynolds 수가 $Re=0$ 일 때 채널 내 $Y=0.5$ 인 위치에서의 X-Z 평면에서 형성되는 유동장과 온도장의 실험결과를 보여준다. (a)는 감온액정을 촬영한 원 이미지이다. 그림에서 파랑 색은 높은 온도를 나타내고 녹색은 상하부의 평균온도를 나타내며 빨강 색은 낮은 온도를 나타낸다. (b)와 (c)는 각각 촬영한 영상에 계조치상호상관법을 적용하여 나타낸 속도벡터와 계측된 유동의 유선이다. (d)는 촬영한 영상에 뉴럴 네트워크를 적용하여 색/온도 변환한 온도분포를 나타낸다. 이 경우, 입구 유속이 0이므로 유동은 오로지 상하 온도차에 의한 자연대류의 영향을 받는다. 그림에서 보는 바와 같이 수치해석결과⁷⁾와 동일하게 방향이 서로 반대인 정지되어 있는 횡 방향 롤들이 연속적으로 형성되는 횡 방향 롤 유동을 나타낸다. Fig. 3은 Reynolds 수 $Re=2 \times 10^3$ 인 경우의 실험결과를 보여준다.¹²⁾ 실험부의 왼쪽 면으로 일정한 유속으로 유입된 유체는 상하부평판의 온도차에 의해 발생한 자연대류에 영향을 미쳤다. 입구 영역에서는 입구 유속의 영향으로 $Re=0$ 인 경우에 나타난 횡



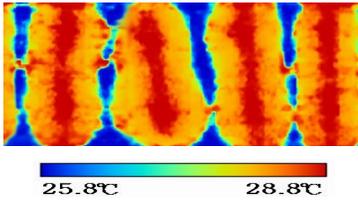
(a) Visualized image



(b) Velocity vector



(c) Streamline



(d) Temperature pattern

Fig. 2 Experimental results at $AR=4$, $Re=0$ and $Y=0.5$

방향 롤들은 사라지고 다른 형태의 롤인 종 방향 롤 유동을 나타내고, 입구 유속의 영향이 점차적으로 작아지는 하류방향에서는 유속이 자연대류에 의해 발생한 Rayleigh-Bénard 셀 유동에 영향을 미치지 못하여 계속 자연대류에 의한 횡 방향 롤 유동을 유지하여 전체유동은 종 방향과 횡 방향 롤이 혼재하는 혼합 롤 유동형태를 형성하였다. Fig. 4는 Reynolds 수가 증가하여 $Re=4 \times 10^3$ 인 경우의 실험결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 입구 유속에 의한 강제대류의 영향이 상하 온도차에 의해 발생하는 자연대류의 영향보다 크게 작용하기 때문에 채널 내 전 영역에 걸쳐 횡 방향롤은 완전히 사라지고 하류방향으로 가면서 오직 평행인 종 방향 롤 유동을 형성하였다. Fig. 5는 Reynolds 수가 더욱 증가하여 $Re=3.2 \times 10^2$ 인 경

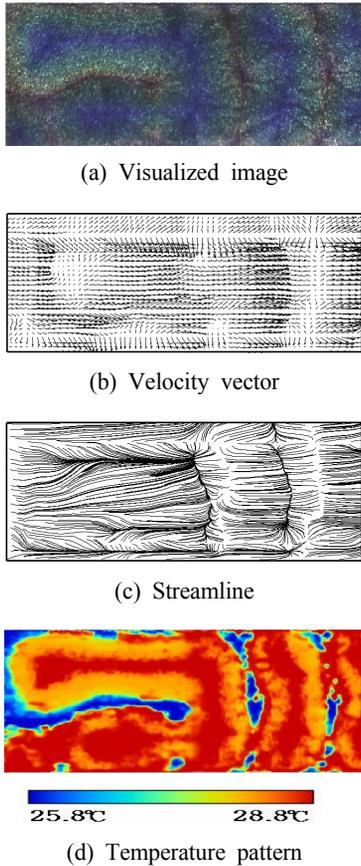


Fig. 3 Experimental results at $AR=4$, $Re=2 \times 10^{-3}$ and $Y=0.5$

우의 실험결과이다. 입구 영역에서는 입구 유속에 의한 강제대류의 영향이 자연대류의 영향보다 훨씬 크게 작용하기 때문에 어떠한 롤도 형성되지 않았지만, 하류 방향에서는 여전히 상하온도차에 의한 자연대류의 영향을 받아 유체의 흐름방향과 평행인 중 방향 롤 유동을 형성하였다. 이상의 결과로부터 Reynolds 수 $Re > 3.2 \times 10^{-2}$ 영역에서는 채널 내의 유동은 완전히 입구 유속에 의한 강제대류의 지배를 받기때문에 혼합대류에 의한 볼텍스 유동인 롤은 형성되지 않음을 쉽게 예측할 수 있다. 이로부터 사각채널 내에서 고 점성유체의 혼합대류 볼텍스 유동은 Reynolds 수가 증가함에 따라 횡 방향 롤 유동, 혼합 롤 유동 그리고 중 방향 롤 유동의 순서로 변화됨을 알 수 있다. 그리

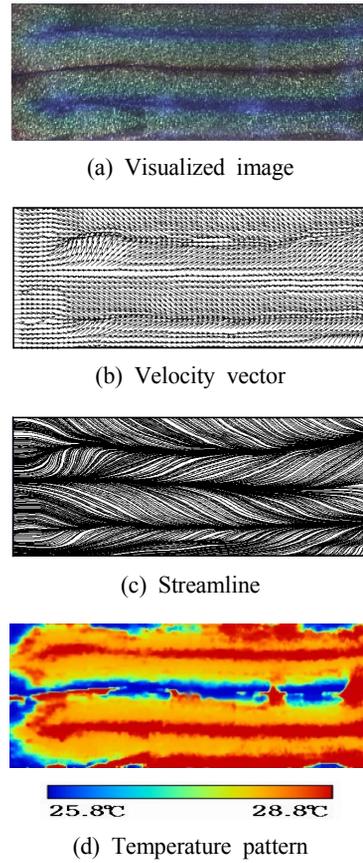


Fig. 4 Experimental results at $AR=4$, $Re=4 \times 10^{-3}$ and $Y=0.5$

고 이 실험 결과는 앞서 연구된 수치해석 결과⁷⁾와 정성적으로 잘 일치함을 확인할 수 있었다. Fig. 6 은 $AR=4$, $Pr=909$, $\theta=0^\circ$, $Ra=10^4$ 일 때 Reynolds 수의 증가에 따른 채널 중심에서의 U방향 속도분포이다. Reynolds 수가 $Re=0$ 인 경우, 서로 방향이 반대인 횡 방향 롤이 연속적으로 형성되어 주 유동방향 U 속도의 부호가 주기적으로 변하는 전형적인 Rayleigh-Bénard 대류의 유동 형태를 보여 속도분포는 사인곡선형태를 나타내지만, 입구 유속이 증가함에 따라 Rayleigh-Bénard 대류의 유동 형태는 파괴되어 U 속도의 값이 전부 양의 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 입구유속의 증가로 인해 Rayleigh-Bénard 대류에 의해 형성되는 음의 값을 가지는 U 속도는 입구 유속에 의해 모두 양

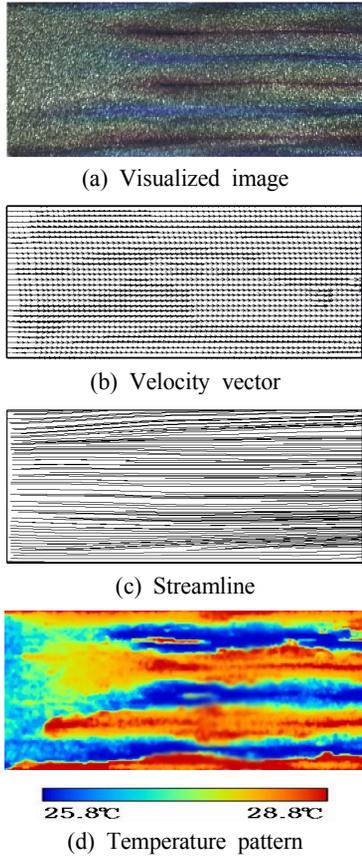


Fig. 5 Experimental results at AR=4, $Re=3.2 \times 10^{-3}$ and $Y=0.5$

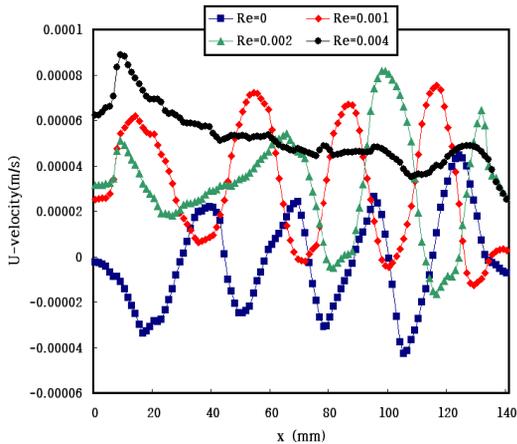


Fig. 6 U-velocity distributions for various Reynolds number at AR=4, $Pr=909$, $\theta=0^\circ$ and $Ra=10^{-4}$ and $Y=0.5$

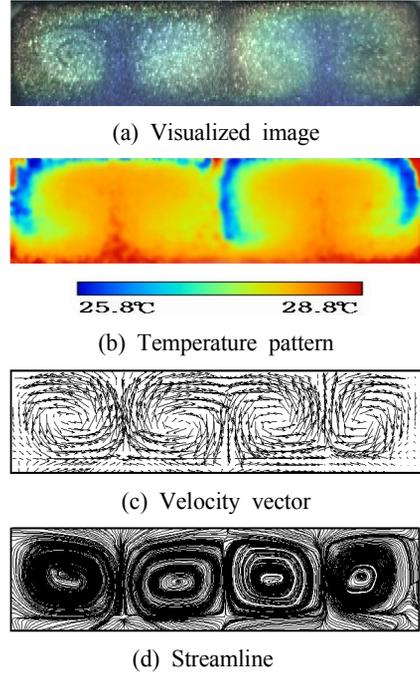


Fig. 7 Experimental results at AR=4, $Re=4 \times 10^{-3}$ and $Y=0.94$

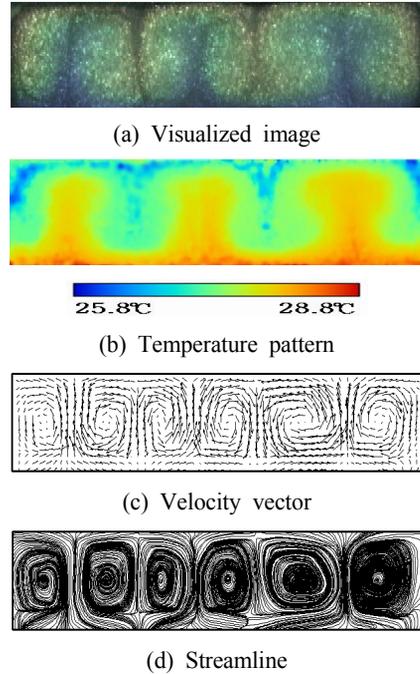


Fig. 8 Experimental results at AR=4, $Re=3.2 \times 10^{-3}$ and $X=0.94$

의 값으로 바뀌기 때문이다. 한편 $Re=10^3$ 와 $Re=2 \times 10^3$ 인 경우에 서서히 감소하는 사인곡선을 가지는 것은 저속에 의한 횡 방향 자연대류 유동의 영향이 존재하기 때문이다. 그러나 Reynolds 수가 더욱 증가하여 $Re=4 \times 10^3$ 인 경우에는 유동장 내에서의 유동의 형태가 종 방향 롤 유동으로 변형되기 때문에 U 방향 속도분포는 사인곡선 형태를 나타내지 않음을 알 수 있다. Fig. 7에서 Fig. 9까지는 Prandtl 수 $Pr=909$, Rayleigh 수 $Ra=10^4$, 형상 비 $AR=4$ 일 때 채널 내에서 종 방향 롤 유동이 존재하는 경우 Reynolds 수의 증가에 따라 출구영역에서 형성되는 혼합대류 롤 유동을 $X=0.94$ 인 위치에서의 Y-Z 평면에 나타낸 것이다. 밑면은 가열 면이고, 윗면은 냉각 면이다. $Re=4 \times 10^3$ 인 경우 4개의 좌우 대칭인 롤 유동을 갖고, 개개의 롤 중앙부는 정체되어 상당히 작은 유속을 가지며, 롤 유동의 축이 된다. Reynolds 수가 증가하여 $Re=3.2 \times 10^2$ 인 경우 롤의 수는 $Re=4 \times 10^3$ 인 경우보다 두 개가 증가한 6개를 형성하였지만, Reynolds

수가 더욱 증가하여 $Re=6.4 \times 10^2$ 인 경우에는 더 이상 롤 수의 증가는 없었다. 따라서 이상의 결과로부터 형상 비 $AR=4$ 인 경우에 형성되는 최대 종 방향 롤의 수는 6개인 것으로 고찰되며, 아울러 이러한 롤의 개수는 형상비와 Rayleigh 수에 크게 영향을 받는 것으로 예측되어 형상비와 Rayleigh 수가 종 방향 롤의 수에 미치는 영향을 지속적으로 검토할 필요가 있다.

4. 결 론

상부가 냉각되고 하부가 가열되는 두 개의 등온 벽으로 구성된 채널 내에서 Prandtl 수 $Pr=909$, Rayleigh 수 $Ra=10^4$, 형상 비 $AR=4$ 일 때 저 Reynolds 수가 고 점성유체의 혼합대류에 미치는 영향을 감온액정을 추적 입자로 사용한 PIT (Particle Image Thermometry)법을 사용하여 실험적으로 고찰한 결과는 다음과 같다.

- 1) 감온액정을 유동입자로 한 PIT법으로 Reynolds수가 사각채널 내 혼합대류 볼텍스 유동에 미치는 영향을 정량적으로 가시화 할 수 있었다.
- 2) 가시화된 실험결과로부터 사각 채널 내 혼합대류 볼텍스 유동은 크게 횡 방향 롤 유동, 종 방향 롤 유동, 그리고 횡 방향 롤과 종 방향 롤이 혼재하는 혼합 롤 유동인 3가지 유동형태로 분류할 수 있었으며, 앞서 발표된 동일한 조건에서의 수치해석 연구논문 결과⁷⁾의 타당성을 본 실험을 통하여 확인할 수 있었다.
- 3) 형상 비 $AR=4$ 인 경우에 형성되는 최대 종 방향 롤의 수는 6개이고, 이 롤의 개수는 형상비와 Rayleigh 수에 크게 영향을 받는 것으로 예측되어 형상 비와 Rayleigh 수가 종 방향 롤의 수에 미치는 영향에 대한 지속적인 실험적 연구가 필요하다.

References

1. K. C. Chiu and F. Rosenberger, 1987, "Mixed convection between horizontal plates-L, Entrance effects", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, No.

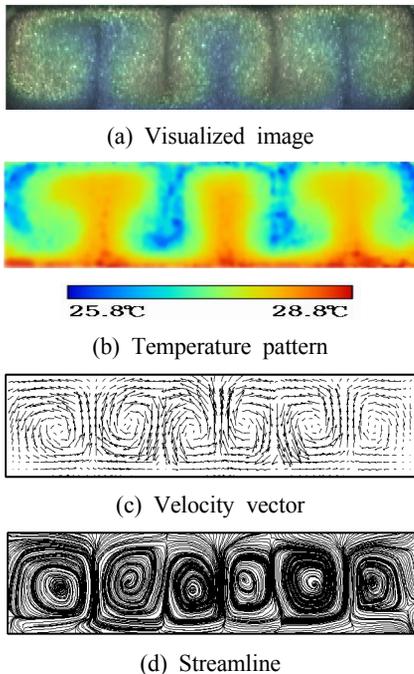


Fig. 9 Experimental results at $AR=4, Re=6.4 \times 10^2$ and $X=0.94$

- 8, pp. 1645-1654.
2. J. R. Maughan and F. P. Incropera, 1990, "Regions of Heat Transfer Enhancement for Laminar Mixed Convection in a Parallel Plate Channel", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 33, No. 3, pp. 555-570.
 3. 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.
 4. S. S. Chen and A. S. Lavine, 1996, "Laminar, Buoyancy Induced Flow Structures in a Bottom Heated, Aspect Ratio 2 Duct with Through Flow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, No. 1, pp. 1-11.
 5. M. Y. Chang, C. H. Yu and T. F. Lin, 1996, "Changes of Longitudinal Vortex Roll Structure in a Mixed Convective Air Flow Through a Horizontal Plane Channel: an Experimental Study", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 2, pp. 347-363
 6. 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", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol 24, Issue 3, pp. 299-309.
 7. R. L. Piao, J. S. Kim and D. S. Bae, 2014, "Three-dimensional numerical study on the vorticity flow in a horizontal channels with high viscous fluid", *Journal of Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 79-86.
 8. 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", *Experiments in Fluids* 12, pp. 213-222.
 9. 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", *Transaction of the KSME B*, Vol. 20, No.3, pp. 1114-1122.
 10. I. Kimura, T. Hyodo and M. Ozawa, 1998, "Temperature and Velocity Measurement of a 3-D Thermal Flow Field using Thermo-sensitive Liquid Crystals", *Journal of Visualization*, Vol. 1, No. 2, pp. 145-152.
 11. D. S. Bae, 2003, "A Study on the Analysis of Temperature Field of Bubbly Flow Using Thermo-sensitive Liquid crystals", *Transactions of the KSME B*, Vol. 27, No. 11, pp. 1572-1578.
 12. R. L. Piao, J. S. Kim and D. S. Bae, 2016, "Quantitative Visualization of Mixed Convection in 3-D Rectangular Channels Using TLC Tracers", *J. of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 33, No. 7, pp. 987-993.