

사각 채널 내의 볼텍스 유동에 관한 실험적 연구(2) Experimental Study on Vortex Flow in a Rectangular Channel (2)

박일용*† · 김정수** · 배대석***

Il-Yong Park*† , Jeong-Soo Kim** and Dae-Seok Bae***

(Received 21 August 2019, Revision received 23 January 2020, Accepted 28 January 2020)

Abstract: Mixed convective vortex flow in the 3-D horizontal rectangular channel filled with high viscous fluid is investigated for various aspect ratio experimentally. The particle image velocimetry technique with thermo-sensitive liquid crystal tracers (PIT) is used for visualizing and analysis. This method allows simultaneous measurement of velocity and temperature. 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 working fluid is silicon oil (Pr = 909), the aspect ratio (channel width to height) is varied from 2 to 6 at constant Reynolds number ($Re = 4 \times 10^{-3}$). From the present study, the temperature and velocity of mixed convective vortex flow can be visualized simultaneously, and it is found that the longitudinal roll number in the channel is increased with increasing aspect ratio, and the experimental results agree well with numerical results.

Key Words : Vortex flow, PIT(Particle Image Thermometry), Neural network, 3-D Rectangular channel, Aspect ratio

1. 서 론

기계공학장비 중 열·유체장치의 설계 또는 성능 해석을 위해 가장 우선적으로 필요한 것은 열·유체장치의 속도장과 온도장을 정확히 파악하는 것이다. 그 이유는 유동현상을 지배하는 N-S방정식의 구성에서 나타나듯이 3차원적인 유체입자의

궤적을 기술하는데 있어서 속도, 가속도, 변위에 관한 기초적인 물리량의 파악이 우선적으로 필요하기 때문이다. 1980년대 중반까지, 실험에 의한 해석 방법은 주로 피토판유속계, 열선유속계 및 레이저도플러유속계를 사용한 점계측법으로 이루어져 왔다. 이러한 속도측정법은 신뢰성과 정밀도 면에서 우수한 성능이 입증되었으나, 유동현상의

*† 박일용(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-5665-3225) : 연구원, 포스코 플랜텍 기술연구소
E-mail : prlong2001@poscoplantec.co.kr, Tel : 061-798-3197
**김정수(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-7665-9202) : 교수, 부경대학교 기계공학과
***배대석(ORCID:http://orcid.org/0000-0003-2557-0272) : 교수, 부경대학교 기계공학과

*† Il-Yong Park(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-5665-3225) : Sr. Mnager, Posco Plantec Research & Development Center. E-mail : prlong2001@poscoplantec.co.kr, Tel : 061-798-3197
**Jeong-Soo Kim(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-7665-9202) : Professor, Department of mechanical engineering, Pukyong National University.
***Dae-Seok Bae(ORCID:http://orcid.org/0000-0003-2557-0272) : Professor, Department of mechanical engineering, Pukyong National University.

기본특성인 비정상의 순시 다점계측이 원리적으로 불가능하였다. 최근 입자영상유속계(PIV)계측법의 개발로 속도장의 순시 다점계측이 가능해졌고, 또한 온도장의 경우도 감온액정을 추적 입자로 사용하여 유동장의 속도와 온도를 동시에 계측하는 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻⁴⁾

특히 사각 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.⁵⁻¹¹⁾

그러나 이들 연구의 대부분은 저 점성유체인 공기($Pr=0.7$)나 물($Pr=6$)을 작동유체로 사용하였고, 실험방법도 점 계측법에 의한 국소적 정보획득에 국한되었으며, 온도장과 속도장의 계측도 각각 별도로 이루어졌다.

최근 Piao 등¹²⁾은 감온액정을 이용하여 열·유체 유동장의 속도와 온도를 동시에 계측할 수 있는 PIT(Particle Image Thermometry)법을 개발하였다. 이 동시 계측법인 PIT법에서는 속도분포 계측을 위해서는 계조치상호상관법(gray-level cross-correlation)을, 온도분포 계측을 위해서는 neural-network에 의한 색/온도 교정 알고리즘을 사용하였다.

따라서 본 연구에서는 동시계측법인 PIT법을 사용하여, 상부가 냉각되고 하부가 가열된 3차원 수평 사각채널 내 고 점성유체의 혼합대류 볼텍스 유동에 사각채널의 형상비가 미치는 영향을 실험적으로 연구하고, 그 실험결과를 앞서 연구된 수치해석 결과와 비교하여 그 결과의 타당성을 확인하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험 장치

본 실험에서 사용된 실험 장치는 Fig. 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 실험 장치는 실험 부(test section), 항온조, 광원, 오일 탱크, 펌프, 맥동 완충기, 디지털 온도계, 디지털 비디오카메라, 그리고 컴퓨터로 구성되어 있다.

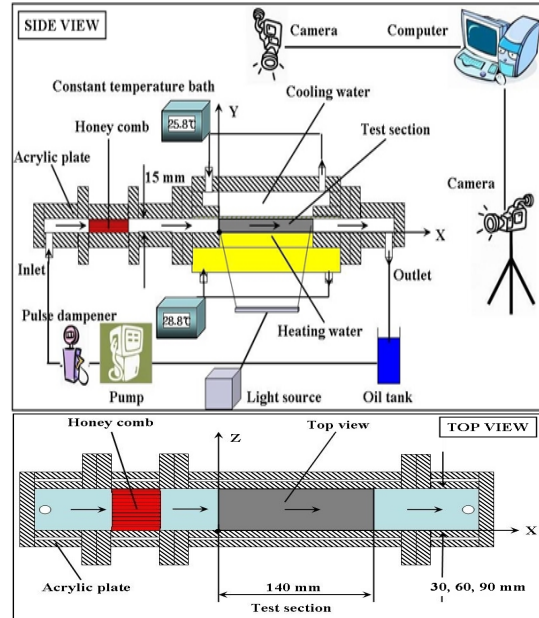


Fig. 1 Schematic diagram of test section

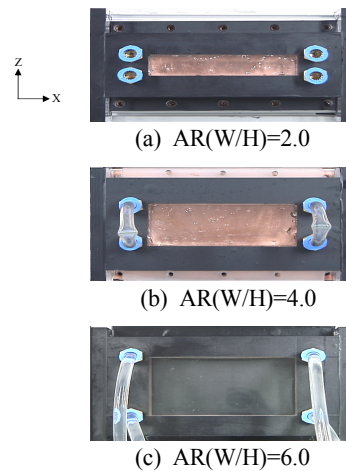


Fig. 2 Photography of test section for various aspect ratio

Fig. 2에 나타낸 실험부분은 길이 $L=140$ mm, 높이 $H=15$ mm, 그리고 형상비 $AR(W/H)$ 에 따라 폭 $W=30, 60, 90$ mm로 제작되어 $AR(W/H)=2.0, 4.0, 6.0$ 인 직사각형 모양을 가지고 있다. 실험부분의 가시화를 위하여 투명아크릴판으로 제작되었고, 반사광에 의한 해상도의 손실을 막기 위해 영상획득 부분을 제외한 실험부의 촬영전면에 검정

색 종이를 부착하였으며, 영상획득 부분 밑면에도 검은액정의 발색을 보다 잘 촬영하기 위해 검정색 종이를 부착하였다. 실험부분의 하부는 일정한 온도를 유지하기 위하여 전열이 잘되는 동판으로 제작하였으며, 내부에는 순환수의 이동통로를 만들어 등온의 순환수를 항온조로 순환시켜 실험부분의 하부 면을 가열시켰다. 상부는 가시화를 위하여 아크릴 평판으로 제작하였고, 내부는 역시 순환수의 이동통로를 만들어 등온의 순환수를 항온조로 순환시켜 실험부분의 상부를 냉각시켰다. 냉각 면은 전열을 위하여 두께가 1.5 mm인 아크릴 평판으로 제작하였고, 나머지 모든 부분은 두께가 15 mm인 아크릴 평판으로 제작하였다. 실험부분의 상부와 하부의 온도는 각각 28.8°C와 25.8°C를 유지하도록 하여 작동유체의 Rayleigh수가 104값이 되도록 하였다. 하부 온도는 동판 중심에서 좌우로 50 mm 간격으로 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 실험부분의 입구에 honey combs를 설치하였다. 광원은 모두 실험부분의 앞쪽에 설치되어 있으며 검정색 종이를 만들어진 2 mm 슬릿(slot)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. 검은액정은 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 위하

여 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 검은액정을 실리콘 오일과 혼합하여 액정이 실험부분 내의 전 영역에 골고루 섞이게 아주 천천히 주입하였다. 이는 검은액정이 실험부분의 관찰 창에 부착하거나 침전을 방지하기 위한 것이다. 액정이 실험부분 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 실험부분 내에 Rayleigh-Bernard 대류를 발생시켰다. 수 시간 후 대류가 정상상태에 도달하였을 때, 펌프를 이용하여 작동 유체를 요구되어지는 유속으로 실험부내에 유입시키고, 일정한 시간이 지난 후, 혼합대류가 완전히 형성된 후, 유동현상을 디지털 비디오카메라로 촬영하여 컴퓨터에 저장하였다. 특히 보정실험에서 유지된 카메라와 실험부분에 대한 광원의 입사각은 일정하게 유지할 필요가 있다. 이는 검은액정은 촬영 각도에 따라 다양한 색으로 판별되기 때문에 실험동안 철저한 주의가 요구되었다. 본 실험에서, 실험부분 내에 흘러 들어가는 작동유체의 온도는 실험부분의 상, 하부의 평균온도로 설정하였다. 이러한 실험방법을 통해 보정실험과 혼합대류 실험을 실시하였으며, 촬영한영상으로 속도와 온도 계측을 실시하였다. 실험을할 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 $Pr(\nu/\alpha)=909$, $Ra(g\beta\Delta TH^3/\alpha\nu)=104$ 일 때 형상비(AR)가 혼합대류 볼텍스 유동에 미치는 영향을 속도와 온도의 동시 계측기법인 PIT(Particle Image Thermometry)법을 사용하여 실험적으로 고찰하였다. Fig. 3은 $AR=2$, $\Theta=0^\circ$ 그리고 Reynolds 수가 $Re=0$ 일 때 채널 내 $Y(y/H)=0.5$ 인 위치에서의 X-Z 평면에서 형성되는 유동장과 온도장의 실험결과를 보여준다. (a)는 감온액정을 촬영한 원 이미지이다.

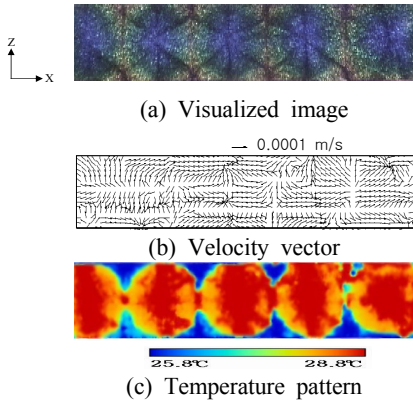


Fig. 3 Experimental results at $AR=2$, $Re=0$ and $Y=0.5$

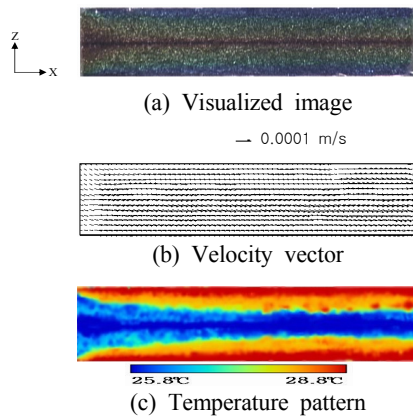


Fig. 4 Experimental results at $AR=2$, $Re=4\times 10^{-3}$ and $Y=0.5$

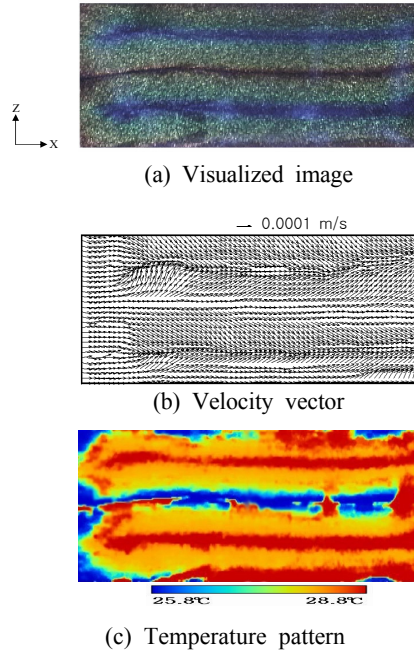


Fig. 5 Experimental results at $AR=4$, $Re=4\times 10^{-3}$ and $Y=0.5$

그림에서 파랑 색은 높은 온도를 나타내고 녹색은 상하부의 평균온도를 나타내며 빨강 색은 낮은 온도를 나타낸다. (b)는 촬영한 영상에 계조치 상호상관법을 적용하여 나타낸 속도벡터이고, (c)는 촬영한 영상에 뉴럴 네트워크를 적용하여 색/온도 변환한 온도분포를 나타낸다. 색/온도 변환 후의 온도분포에서는 원 이미지와는 반대로 빨강은 높은 온도를 파랑은 낮은 온도를 나타낸다. Fig. 3의 경우, 정지된 유체($Re=0$)이므로 유동은 오로지 상하 온도차에 의한 자연대류의 영향을 받는다. 따라서 그림에서 보는 바와 같이 Rayleigh-Bernard 셀 유동인 롤들이 연속적으로 형성되는 횡 방향 롤 유동을 나타낸다. Fig. 4는 $AR=2$, $Re=4\times 10^{-3}$ 인 경우의 실험결과를 보여 준다. 그림에서 보는 바와 같이 유동장은 채널 내 전 영역에 걸쳐 $Re=0$ 일 때의 횡 방향 롤은 완전히 사라지고 유체의 흐름방향에 따른 종 방향 유동이 형성됨을 보여준다. 이는 실험부의 왼쪽 면으로부터 일정한 유속으로 유입된 유체의 흐름방향 성분의 유속에 의한 강제대류의 영향이 정지된 유

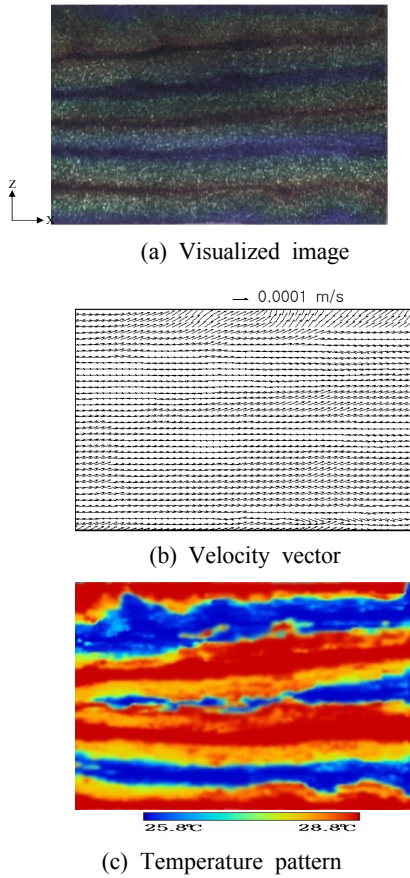


Fig. 6 Experimental results at AR=6, $Re=4 \times 10^{-3}$ and $Y=0.5$

체 내의 상하 온도차에 의해서만 발생하는 자연 대류의 영향보다 크게 작용하기 때문이다. 또한 온도장은 폭(W)의 중심부근에서 좌우로 대칭되는 온도분포를 보여준다. 이로부터 Y-Z 평면에는 대칭되는 2개의 유동이 형성됨을 알 수 있다. Fig. 5는 AR=4, $Re=4 \times 10^{-3}$ 인 경우의 수평사각 채널 내의 유동 및 온도 분포실험 결과를 나타낸다. 형상비가 증가하여 AR=4인 경우에는 대칭되는 4개의 종방향 유동이 형성됨을 알 수 있고 이러한 경향은 AR=6인 경우의 실험결과인 Fig. 6에서도 그대로 나타난다. 형상비가 증가하여 AR=6인 경우에는 대칭되는 6개의 유동이 형성됨을 알 수 있다. 따라서 이들 결과로부터 형상비가 증가하면 종방향 유동이 증가함을 알 수 있다. 이러한 종방향

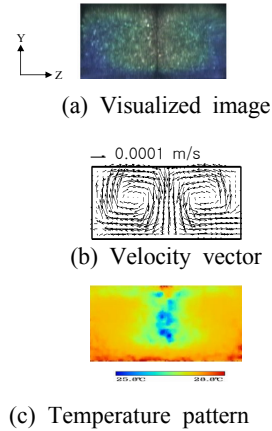


Fig. 7 Experimental results at AR=2, $Re=4 \times 10^{-3}$ and $X=0.94$

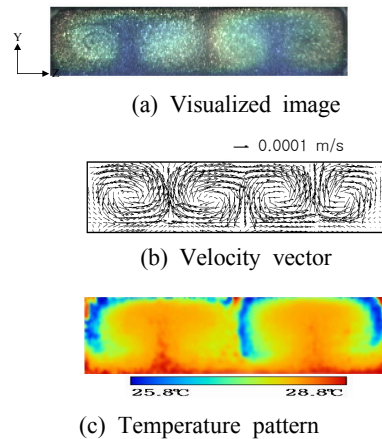


Fig. 8 Experimental results at AR=4, $Re=4 \times 10^{-3}$ and $X=0.94$

유동의 형태는 Z-Y 평면에서 살펴보면 더 더 뚜렷이 알 수 있다. Fig. 7은 AR=2, $\theta=0^\circ$ 그리고 $Re=4 \times 10^{-3}$ 일 때 채널 내 $X(x/L)=0.94$ 인 위치에서의 Z-Y 평면에서 형성되는 유동장과 온도장의 실험결과를 보여준다. 밑면은 가열면이고, 윗면은 냉각면이다. AR=2인 경우 유체의 유동은 하부면에서 가열된 유체가 Z축의 좌우벽면을 따라 상승하고 상부면에서 냉각된 유체가 Z축의 중심부위에서 하강하면서 순환하는 2개의 좌우 대칭인 롤 유동을 갖고, 유동이 정체되는 롤 중앙부는 롤 유동의 중심축이 된다. 또한 온도분포도 유체의 롤

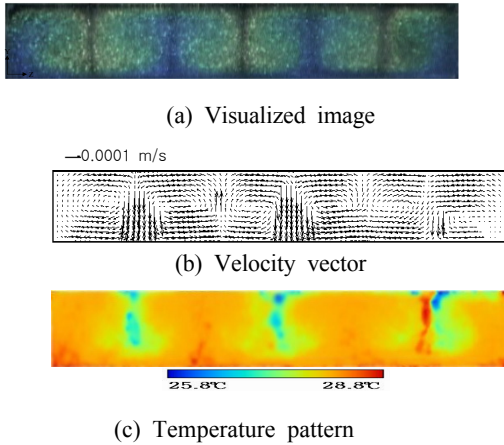


Fig. 9 Experimental results at AR=6, $Re=4 \times 10^{-3}$ and $X=0.94$

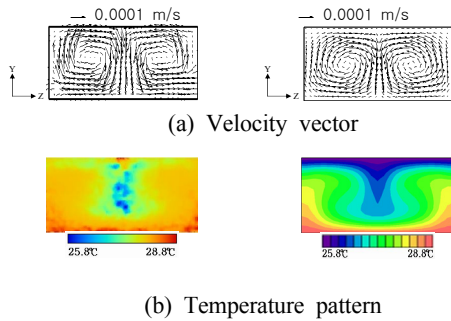


Fig. 10 Comparison of experimental and numerical results at AR=2, $Re=4 \times 10^{-3}$ and $X=0.94$

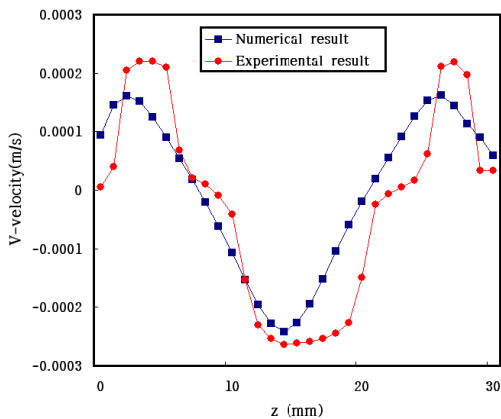


Fig. 11 Experimental and numerical vertical velocity profiles at AR=2, $Re=4 \times 10^{-3}$ and $Y=0.5$

유동에 따라 서로 온도가 다른 유체간의 혼합 및 열전달에 의해 좌우 대칭인 버섯모양의 온도분포를 가지게 된다.

Fig. 8은 $AR=4$, $\theta=0^\circ$ 그리고 $Re=4 \times 10^{-3}$ 일 때 채널 내 $X=0.94$ 인 위치에서의 Z-Y 평면에서 형성되는 유동장과 온도장의 실험결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 롤 유동의 형태는 근본적으로 $AR=2$ 인 경우와 같이 Z축의 중심부에서 좌우대칭인 롤 형태를 보이지만, 롤의 개수는 형상비 증가에 따라 비례적으로 증가하여 4개로 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 9에서 보여주는 바와 같이 $AR=6$ 인 경우에도 그대로 적용되어진다. 따라서 롤의 개수는 형상비 증가에 따라 비례적으로 증가하여 6개가 되는 것을 알 수 있다. 이러한 형상비에 따른 롤 개수 변화의 실험결과는 앞서 연구된 수치해석결과¹¹⁾와 잘 일치하였다. 또한 Fig. 10은 $AR=2$, $\theta=0^\circ$ 그리고 $Re=4 \times 10^{-3}$ 일 때 Z-Y 평면에서의 유동장과 온도장의 실험결과와 수치해석 결과¹¹⁾를 나타낸다. 왼쪽 그림은 실험결과이고 오른쪽 그림은 수치해석결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 형상비 $AR=2$ 인 경우의 실험결과를 앞서 연구된 수치해석결과와 비교해 보면, 하부 가열 면에서 가열된 유체가 Z축의 좌우벽면(Y축)을 따라 상승한 후 상부 면에서 냉각되어 Z축의 중심부에서 하강하는 유동형태의 일치를 보이고, 롤 개수 또한 2개로 일치하며, 좌우대칭인 온도분포형태도 서로 정성적으로 잘 일치하였다. 수직방향 속도분포의 실험과 수치해석결과의 정량적 비교는 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 롤이 발생하는 위치 및 크기는 약간의 차이가 있지만, 전반적으로 실험과 수치해석의 결과는 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 $AR=4$, $AR=6$ 인 경우도 앞서 연구된 수치해석 결과¹¹⁾와 서로 잘 일치하였다. 따라서 본 실험을 통해 앞서 연구된 수치해석 연구결과의 타당성을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

상부가 냉각되고 하부가 가열되는 두 개의 등

은 벽으로 구성된 채널 내에서 $Pr=909$, $Ra=104$, 그리고 $Re=4 \times 10^{-3}$ 일 때 형상비가 고 점성유체의 혼합대류 볼텍스 유동에 미치는 영향을 감온액정을 추적 입자로 사용한 PIT(Particle Image Thermometry)법을 사용하여 실험적으로 고찰한 결과는 다음과 같다.

1) 감온액정을 유동입자로 사용한 속도와 온도 동시계측법인 PIT법으로 형상비(AR)가 사각채널 내 혼합대류 볼텍스 유동에 미치는 영향을 정량적으로 가시화 할 수 있었다.

2) 가시화된 실험결과로부터 사각 채널 내 종방향 볼텍스 유동의 단면은 롤 형태이고, 그 개수는 형상비가 증가함에 따라 정비례로 증가하였으며, 온도분포는 서로 다른 온도를 가진 두 유체간의 혼합 및 열전달에 의해 좌우 대칭인 버섯모양의 온도분포를 나타내었다.

3) 정량적으로 가시화된 실험결과를 동일 조건에서의 수치해석 결과와 비교한 결과 잘 일치하였다. 따라서 그 결과로부터 수치해석 연구결과의 타당성 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음.

Author contribution

I. Y. Park; Data curation., Investigation, Writing-original draft. J. S. Kim; Supervision, Validation, Visualization. D. S. Bae; Conceptualization, Project administration, Writing-review & editing.

References

1. 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.

(<https://doi.org/10.1007/BF00187298>)

2. 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.

3. 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.

(<https://doi.org/10.1007/BF03182508>)

4. 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.

5. K. C. Chiu and F. Rosenberger, 1987, "Mixed convection between horizontal plates. Entrance effects", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, No. 8, pp. 1645-1654.

([https://doi.org/10.1016/0017-9310\(87\)90310-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(87)90310-3))

6. 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.

([https://doi.org/10.1016/0017-9310\(90\)90189-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(90)90189-2))

7. T. A. Nyce, 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.

([https://doi.org/10.1016/0017-9310\(92\)90038-T](https://doi.org/10.1016/0017-9310(92)90038-T))

8. S. S. Chen and A. S. Lavine, 1996, "Laminar, Buoyancy Induced Flow Structures in a Bottom Heated, Aspect Ration 2 Duct with Through Flow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, No. 1, pp. 1-11.

- ([https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(96\)85001-0](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(96)85001-0))
9. M. Y. Chang, C. H. Yu and T. F. Lin, 1997, "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.
- ([https://doi.org/10.1016/0017-9310\(96\)00098-1](https://doi.org/10.1016/0017-9310(96)00098-1))
10. 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.
- ([https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(03)00020-1))
11. R. L. Piao, J. S. Kim and D. S. Bae, 2015, "Three-dimensional numerical study on the vortex flow in a horizontal channels with high viscous fluid(2)", *Journal of Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 19, No. 4, pp. 36-42.
- (<https://doi.org/10.9726/kspse.2015.19.4.036>)
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 for Power System Engineering*, Vol. 20, No. 6, pp. 51-58.
- (<https://doi.org/10.9726/kspse.2016.20.6.051>)