

PIV계측에 의한 상부가 개방된 경사진 캐비티에서의 자연대류에 관한 연구

A Study on Natural Convection in an Inclined Open Cavity using PIV Measurement

조원호 · 배대석 · 권오봉 · 이도형 · 김남식

W. H. Cho, D. S. Bae, O. B. Kwon, D. H. Lee and N. S. Kim

Key Words : PIV(입자영상유속계), Gray level cross correlation(계조치상호상관법), Natural convection(자연대류), Inclined cavity(경사진 캐비티)

Abstract : Two dimensional natural convection in an inclined open cavity with bottom heated, two side insulated and the top open was investigated using PIV(Particle Image Velocimetry) measurement. Experimental results are presented for Prandtl number, Pr 6.62, cavity aspect ratio, A 1.0, Rayleigh number from 1.294×10^6 to 3.8841×10^6 , and inclination angles, α 0, 30 and 60 deg to the horizontal. It was found that the fluid rises along both side walls in the boundary layer region at α 0 deg, and the inclination of the cavity induced flow entrainment. The experimental results are in good agreement with the numerical results.

1. 서 론

자연 대류는 유체내의 온도기울기에 기인한 밀도변화에 의하여 일어나는 현상으로 강제적으로 유체를 유동시키는 것이 불가능하거나 허용되지 않을 때 중요하게 다루어지는 열전달 방법이다. 전자기판이나 부품의 냉각, 증기 라디에이터로부터 실내공기로의 열전달 그리고 냉동유닛의 코일로부터 주위공기로의 열소산 등 그 응용범위가 매우 넓다. 따라서 자연대류 열전달과 관련된 여러 가지 기하학적 형상에 대해 많은 연구가 행하여져 왔다¹⁾. 특히 상부가 개방된 캐비티에서의 자연대류에 관한 연구는 오래 전부터 실험적 또는 수치해석적 방법으로 많이 이루어져 왔다. Chu등²⁾은 히터의 크기와 위치, 형상비 그리고 경계조건이 2차원 채널에서의 자연대류에 미치는 영향에 대해서 연구하였고, Showole와 Tarasuk³⁾은 개방된 캐비티에서 경사각, 형상비 그리고 Rayleigh수의 영향에 대해서 연구하였다. 또 Zhang등⁴⁾은 저 Grashof수 범

위에서 히터의 위치변화에 따른 자연대류의 열전달 특성을 연구하였다. 그러나 이들 연구의 대부분은 컴퓨터를 이용한 수치해석에 의해 수행되었으며, 실험이 병행된 경우도 전체적인 유동형태만을 알 수 있는 정성적인 유동가시화에 국한되었다. 왜냐하면 자연대류는 강제대류에 비하여 유속이 매우 작아서 열선 유속계나 피토판으로는 유동자체를 교란시키지 않으면서 측정하기가 곤란하고, LDV와 같은 계측방법으로는 비접촉식이기는 하지만 전체유동장의 정량적인 유동정보를 동시에 얻는다는 것은 힘들기 때문이다. 최근 전체 유동장의 정보를 정량적으로 가시화 하는 계측법(PIV)이 개발되었다^{5~16)}. PIV(Particle Image Velocimetry)는 정성적인 가시화기법에 디지털 영상처리기술(Digital Image Processing Techniques)을 적용한 정량적 유동가시화 기법으로 컴퓨터와 영상처리기기 및 가시화 기술의 발달과 더불어 빠른 속도로 발전되고 있다. 이 기법은 유동장에 추적입자를 분포시켜 유동장을 가시화 한 후 측정시간(ΔT)동안 움직인 추적입자의 변위 정보를 영상입력 장치인 CCD카메라를 이용하여 저장장치인 VCR에 저장하고 그 다음 디지털 영상처리 기법에 의해 변위

접수일 : 2001년 3월 23일
조원호 : 부경대학교 대학원
배대석, 권오봉, 이도형, 김남식 : 부경대학교 기계공학부

(s)를 구하여 전체 유동장에서의 속도벡터를 구하는 기법이다. PIV를 이용하여 자연대류 유동장을 정량적으로 가시화 하려는 연구는 최근 많이 이루어졌다^{17,18)}. 그러나 이 연구들은 추적입자나 실험하고자 하는 Grashof수 범위 등의 문제 때문에 작동유체를 주로 글리세린 수용액을 사용하였다. 본 연구에서는 작동유체로 증류수를 사용하고 계조치상조상관법의 입자 추적 알고리즘을 사용하여 상부가 개방된 캐비티에서의 자연대류 유동장을 정량적으로 가시화 하였고 그 실험결과를 수치해석 결과와 비교하였다. 또한 Ra 수와 경사각의 변화가 자연대류에 미치는 영향도 함께 검토하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 실험장치는 유동 계측영역인 상부가 개방된 캐비티 부분과 캐비티의 상부에 연결되어 작동유체를 담고 있는 수조 부분으로 구성되었다. 수조의 크기는 300mm×270mm×170mm로 두께 10mm의 아크릴로 제작되었고, 작동유체의 유출입이 가능하도록 캐비티 상부 면적만큼 수조 바닥 면에도 개방되어 있다. 수조 속에는 등온의 작동유체가 있어 캐비티 상부의 냉각면을 유지시킨다. Fig. 1은 본 실험에서 사용된 상부가 개방된 캐비티의 개략도와 좌표계이다. 수평의 바닥은 등온의 가열면이고, 상부는 수조속의 작동유체와 접하는 접속면이며, 수직의 두 벽은 단열되어 있다.

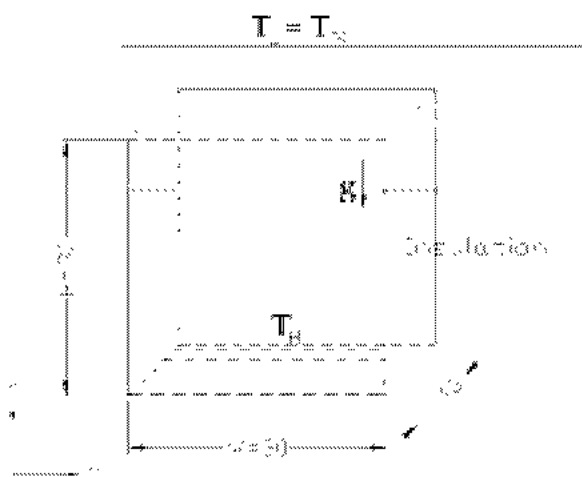
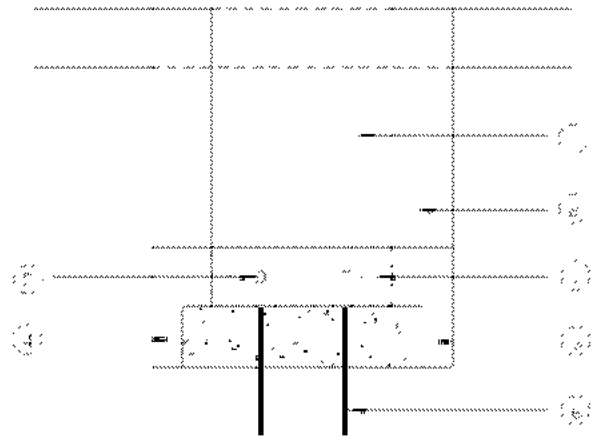


Fig. 1 A Schematic diagram of open cavity

Fig. 2는 캐비티의 구성을 나타낸다. 캐비티는 두께 10mm의 아크릴로 제작되었으며 크기는 30mm×30mm×10mm(L×H×W)이다. 수평바닥면은 히

터가 설치되어 T_H 의 조건으로 유지되는 가열면이고 상부면은 냉각온도 T_∞ 의 작동유체가 저장된 수조와 접하여 자연대류에 의한 유체의 유입과 유출이 있는 접속면이다. 가열면은 베이크라이트(50mm×15mm×30mm)를 가공하여 구리로 된 히터(30mm×10mm×10mm)를 넣은 후 히터 뒷면에 세라믹 단열재를 덮고 실리콘으로 마감하였다. 온도측정을 위해 베이크라이트 옆면에 내경1mm의 구멍을 뚫고 열전대를 삽입하였다. 작동유체가 채워져 있는 수조에도 열전대를 설치하였다.



- ① Copper plate
- ② Acrylic plate
- ③ Bakelite
- ④ Adiabatic material
- ⑤ Thermocouple probe
- ⑥ Electronic power
- ⑦ Water

Fig. 2 A Schematic diagram of test section

선명한 원시영상 획득을 위해 수조 및 캐비티를 아크릴 판으로 제작하였다. CCD카메라로 계측영역을 촬영할 때 추적입자의 선명도를 높이기 위하여 캐비티 뒷면에 검은색 종이(30mm×30mm)를 붙였다. 실험 조건은 Table.1과 같으며 매 실험에 대하여 유동장이 충분히 형성될 수 있도록 충분한 시간이 경과 된 후 측정을 실시하였다.

Table 1 Experimental Condition

Heating Wall Temp.	23°C, 26°C, 29°C
Cooling Wall Temp.	20°C
Rayleigh number	1.294×10 ⁶ (ΔT-3°C) 2.589×10 ⁶ (ΔT-6°C) 3.884×10 ⁶ (ΔT-9°C)
Angle of inclination	α=0° α=30° α=60°
Aspect ratio	1
Prandtl number	6.62

2.2 실험방법

Fig. 3은 본 실험에서의 PIV시스템을 나타낸다. 광원으로는 500mW의 Ar Ion 레이저를 사용하였으며 Cylindrical lens를 이용하여 두께가 약 1.2mm인 시트라이트를 만들어 캐비티에 조사하였다. 시트라이트로 조사된 2차원 유동장을 CCD카메라(SSC M370, Sony)로 촬영하여, 영상저장장치인 VCR(AG 7350, Panasonic)에 저장한 후 입력영상을 다시 재생시켜 이미지 보드로 보낸다. 이미지 보드는 영상신호(아날로그 신호)를 샘플 당 정의된 비트로 디지털화 하여 PC가 처리할 수 있는 신호로 바꾸어 주고 산술, 논리연산 및 영상처리조작을 행하여 정보를 분석할 수 있도록 하는 하드웨어이다. 본 실험에서는 DT보드(DT3155, 640 x 480 픽셀, B & W)를 사용하였다. 추적입자는 계측영역의 유동장을 가시화 하여 준다. PIV계측 원리는 유동장에 투입된 입자의 미소 시간간격(ΔT)동안 이동한 미소 직선거리 및 방향을 계측하여 속도벡터를 구하는 것이다. 곧 PIV에서의 속도계측이란 유체의 속도 대신 입자의 속도를 구하는 것이다. 그러므로 적절한 입자의 선정이 중요하다. 일반적으로 입자는 추종성과 가시성이 높아야 하고, 산란특성과 유해성, 부착성 등도 고려되어야 한다. 본 실험에서의 입자는 75 ~ 150 μm High Porous Polymer를 사용하여 유체흐름에 최소영향을 주고 또한 추종성 확보를 위해 그리고 중립부유를 위해 유체에 넣고 장 시간 지난 후 자중에 의해 침강이나 부상이 되지않고 남아있는 입자들만을 선별하여 사용하였다. 유동장의 촬영은 CCD 카메라를 이용하였으며, Camera Adapter를 통해 VCR에 저장된 영상은 이미지 보드를 거쳐 변환된 후 PC에서 계조치 상호상관법의 추적알고리즘으로 처리되었으며, 본 연구에서는 PIV해석 전용 소프트웨어 CACTUS2000을 사용하였다.

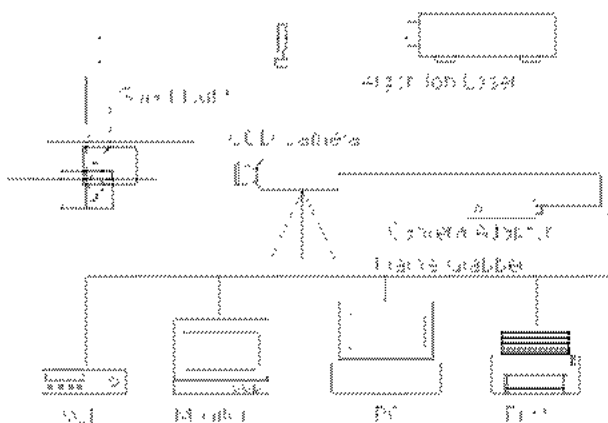


Fig. 3 A schematic diagram of the experimental setup with PIV system

3. 결과 및 고찰

3.1 실험결과 및 고찰

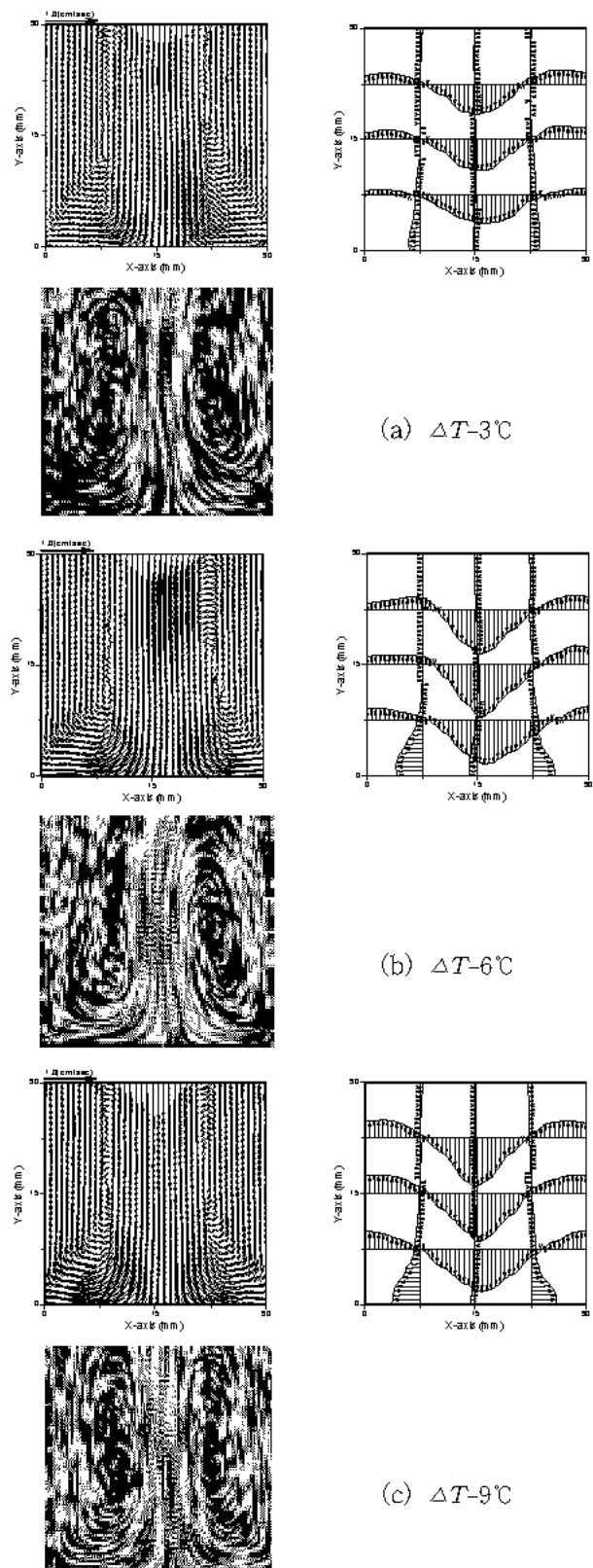


Fig. 4 Experimental velocity vector, profile and pathlines at $\alpha 0^\circ$

Fig. 4는 PIV 계측에 의한 실험 결과로서 α 0°일 때 ΔT 에 따른 평균 속도 벡터, 속도 프로파일, 그리고 유적선을 나타낸다. 수평면은 가열면이고, 개방된 상부는 냉각면이다. 이때 온도변화에 따른 Ra수는 각각 $1.294 \times 10^6 (\Delta T 3^\circ\text{C})$, $2.589 \times 10^6 (\Delta T 6^\circ\text{C})$, $3.8841 \times 10^6 (\Delta T 9^\circ\text{C})$ 이다. α 0°인 경우의 유동을 보면 캐비티의 하부 가열면에 접한 유체는 온도상승으로 인해 밀도가 작아지게 된다. 이렇게 주위 유체보다 작은 밀도를 가진 유체는 부력을 받게 되고 중력의 반대방향인 상부로 이동이 일어난다. 하부에서 상부로 유체가 이동함으로써 상부에서도 하부로 유체가 이동하게 되어 유동장이 형성된다.

캐비티내에 형성된 유동은 중심부에서 하강하여 좌우 수직벽을 따라 상승하는 형태이다. 이는 수평 가열평판이 무한유체내에 놓여 있을 때 일어나는 평판위에서의 유체유동형태와는 상반되는 형태이다. 수평가열평판의 경우 평판 중심부에서 수직플룸(vertical plume)이 형성되고 유체유동은 평판의 좌우로부터 중심 상부로 상승하는 형태를 나타내지만 바닥면이 가열되고 상부가 열린 캐비티에서의 유동은 이와는 반대로 중심부에서 유체가 하강하는 형태를 나타낸다. 이는 캐비티의 좌우수직벽의 영향인 것으로 고려된다. 중심부에서 하강하는 유체는 바닥의 가열면과 만나면서 좌우로 나누어지고, 나뉜 유동은 각각 수직벽면을 따라 다시 상승함으로써 전체적으로 중앙을 기준으로 좌우 대칭 되는 커다란 두 개의 셀 유동을 형성한다. 실험 초기단계 때는 중심부에 좌우로 불규칙적인 하강유동이 일어나지만 시간이 지나면서 안정적인 좌우 대칭의 유동장이 형성된다. 이러한 안정적인 유동장 형성은 Ra 수가 클수록 일찍 이루어지며 수직벽면과 중앙부에서의 유속 또한 빨라진다. Fig. 5와 Fig. 6은 경사각도(α)변화가 온도변화에 따른 캐비티 유동에 미치는 영향을 나타낸다. 경사각도 α 는 사각밀폐공간의 바닥과 수평바닥이 이루는 각이다. 유동속도는 Fig. 4의 경향과 마찬가지로 Ra수가 증가할수록 함께 증가하였다. α 30°인 경우는 α 0°일 때와는 다른 하나의 셀 유동형태를 나타낸다. 이는 수평으로 균형 잡혀 있던 좌우대칭의 유동이 경사각 변화에 따라 변한 것으로 유체는 왼쪽벽과 중심부로부터 캐비티내에 유입하며 오른쪽벽을 따라 유출하는 형태를 보인다. 폭 넓은 속도 경계층을 형성하면서 왼쪽 수직벽을 따라 하강하는 유동은 경사진 가열면을 만나면서 유동방향이 바뀌어 오른쪽 수직벽을 따라 빠른 유

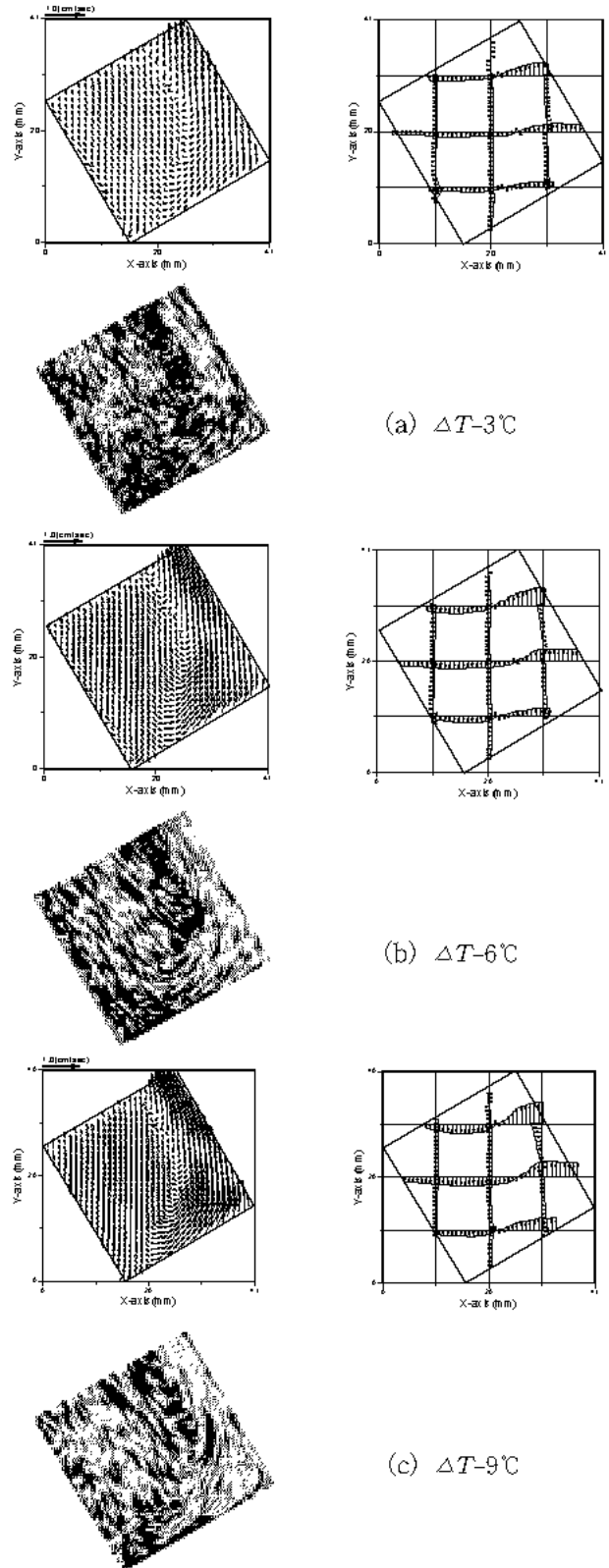


Fig. 5 Experimental velocity vector, profile and pathlines at α 30°

속으로 상승하게 된다. 유속방향이 반대로 되는 경계선을 기준으로 오른쪽 영역에는 좁은 폭의 빠른

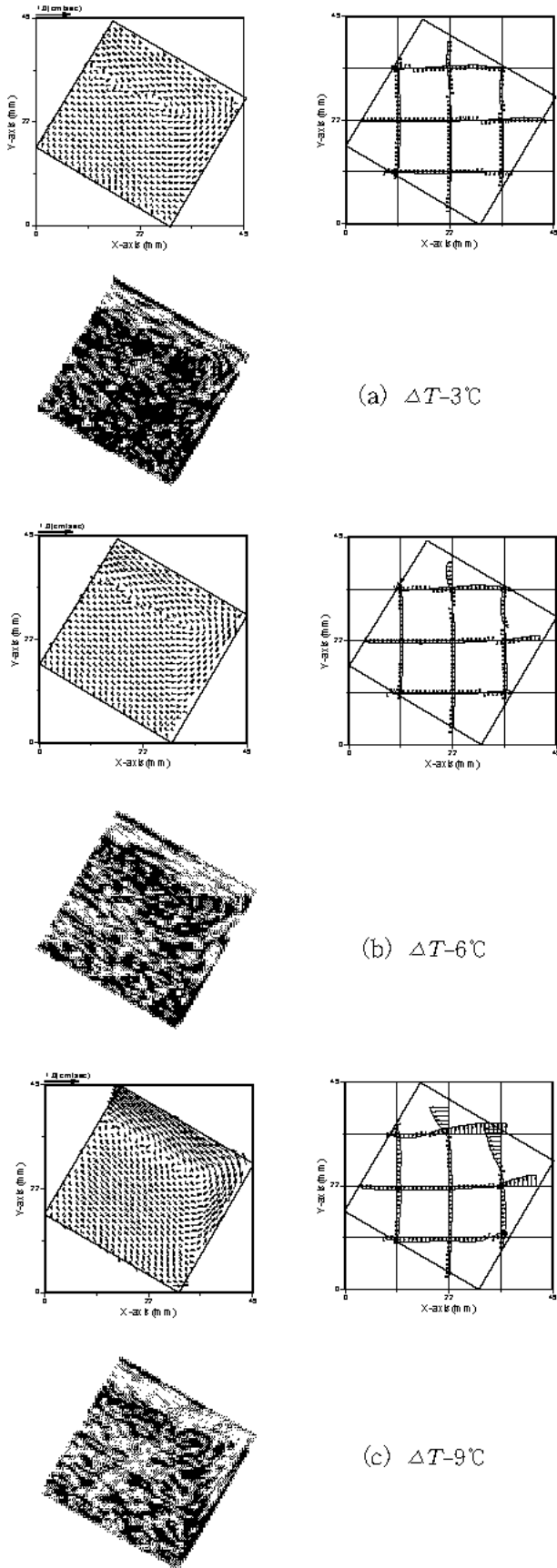


Fig. 6 Experimental velocity vector, profile and pathlines at $\alpha 60^\circ$

유속으로 상승하는 속도경계층을 형성하고, 왼쪽영역에는 넓은 폭의 느린 유속으로 하강하는 속도경계층을 형성한다. $\alpha 60^\circ$ 인 경우의 유동형태는 $\alpha 30^\circ$ 인 경우와 동일한 하나의 셀 유동이지만 모서리 부분에서의 유동방향 전환이 $\alpha 30^\circ$ 의 경우보다 급격히 이루어지는 것을 볼 수 있다. 이는 경사각이 증가함에 따라 가열면을 따른 속도가 증가하여 속도경계층이 가열면의 상부까지 잘 발달하기 때문이다. 또한 경사각 증가에 따른 가열면에서의 y방향 속도성분(v)의 증가는 바다가열면의 열전달을 촉진시킨다. 이는 단일가열평판에 미치는 경사각의 영향과 잘 일치한다. 따라서 바다면이 가열되고 상부가 열린 캐비티내에서의 유동형태는 단순가열평판에서의 유동형태와 현저한 차이를 보이나 경사각이 바다 가열면에 미치는 영향의 경향은 단순가열평판의 경우와 같음을 알 수 있다.

3.2 수치해석결과 비교

수치해석모델의 형상은 실험과 동일한 $L 0.03m$, $H 0.03m$ 이다. 경계조건은 좌우 수직벽면은 단열조건이고 상부면은 개방되어 $T_\infty 20^\circ C$ 유체에 노출되어 있다. 하부면은 가열면으로 $T 26^\circ C$ 이며 지배방정식은 다음과 같다.

· 연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

· X방향 운동량 방정식

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) - \rho g \beta \Delta T \sin \theta$$

· Y방향 운동량 방정식

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) - \rho g \beta \Delta T \cos \theta$$

· 에너지 방정식

$$k(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}) = \frac{k}{C_p} (\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2})$$

Fig. 7은 PIV에 의한 실험결과와 동일조건에서 계산된 수치해석 결과를 나타낸다. 수치해석은 상용코드인 PHOENICS 3.1을 사용하였다. 수치해석은 실험과 동일조건인 $\alpha 30^\circ$, $\Delta T 6^\circ C$ 조건하에서 계산되었으며 속도벡터 및 유선을 출력하여 비교하였다. 자연대류 유동장 전체의 유동특성은 실

험결과와 잘 일치하였고, PIV를 이용하여 자연대류 유동장을 가시화하고 정량적으로 나타낼 수 있음을 확인하였다.

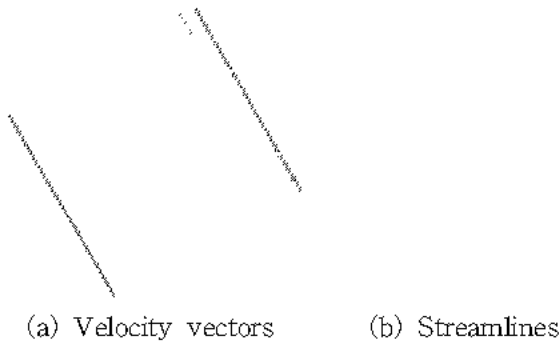


Fig. 7 Numerical velocity vectors and streamlines at $\alpha 30^\circ$, $\Delta T 6^\circ C$

4. 결 론

수평 바닥면은 가열되고, 상부는 개방되어 냉각되는 두 수직 단열벽을 가진 캐비티에서의 자연대류를 PIV측측법을 사용하여 실험적으로 연구하였다. Ra 수와 경사각의 변화가 자연대류에 미치는 영향을 검토하였고, 수치해석 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PIV측측법을 사용하여 상부가 개방된 캐비티에서의 유동장을 정량적으로 가시화 할 수 있었다.
- 2) 캐비티에서의 유동은 경사각이 $\alpha 0^\circ$ 인 경우 중심부에서 하강하고 좌우 수직벽을 따라 상승하여 좌우 대칭인 두 개의 셀 유동을 형성하였으나 경사각 α 가 0° 보다 크면 큰 한 개의 유동을 형성하였다.
- 3) 경사각과 Ra 수가 유동에 미치는 영향은 경사각과 Ra 수가 증가함에 따라 바닥 가열면을 따른 유속이 증가하였으며, 속도경계층이 잘 발달하여 바닥가열면의 열전달이 증대되었다.

참고문헌

1. B. Gebhart, Y. Jaluria, R. L. Mahajan and B. Sammakia, "Buoyancy Induced Flows and Transport", Hemisphere Pub. Co., 1988
2. H. H. S. Chu, S. W. Churchill and C. V. S. Patterson, "The Effect of Heater size, Location, Aspect ratio, and Boundary Conditions on Two dimensional, Laminar, Natural Con

- vection in Rectangular Channels", Transactions of the ASME, pp. 194 201, May 1976
3. R. A. Showole, J. D. Tarasuk, "Experimental and Numerical Studies of Natural Convection with Flow Separation in Upward Facing Inclined Open Cavities", Journal of Heat Transfer, Vol. 115, pp. 592 605, 1993
4. G. L. Zhang, T. Hanzawa and N. Sakai, "Heat Transfer by Natural Convection in Rectangular Cavities with Low Grashof Number and Various Heater Location", Journal of Chemical Engineering of Japan., Vol. 29, No.4, pp. 603 610, 1996
5. R. J. Adrian, "Particle Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 23, pp. 261~304, 1991
6. L. Hesselink, "Digital Image Processing in Flow Visualization", Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 20, pp. 421 485, 1998
7. P. Buchhave, "Particle Image Velocimetry Status and Trends", Exp. Ther. and Fluid Sci. Vol. 5, pp. 586 604, 1992
8. C. Gray, "The Evolution of Particle Image Velocimetry", Proc. of Optical Methods and Data Processing in Heat and Fluid Flow, I. Mech. E., pp.19 36, 1992
9. 이영호, "PIV에서의 동시다점측측의 원리 및 적용", 대한기계학회 96년도 열 및 유체공학부 문 학술강연 논문집, pp. 30 44, 1996
10. Sang Joon Lee, "PIV(Particle Image Velocimetry) 속도장 측정", 1999
11. 심준환, 조민태, 서상호, 유상신, "입자영상유속계를 이용한 분기형 덕트내 유동의 가시화", 대한기계학회 춘계학술대회논문집(2), pp. 641 646, 1996
12. P. E. Dimotakis, F. D. Debussy and M. M. Koochesfahani, "Particle Streak Velocity Field Measurements in at Two Dimensional Mixing Layer", Physics of Fluids, Vol. 24, pp. 995~999, 1981
13. B. Khalighi, "Study of the Intake Swirl Process in an Engine Using Flow Visualization and Particle Tracking Velocimetry" ASME FED 85, pp. 37~47, 1989
14. P. G. Simpkins and T. D. Dudderar, "Laser

- Speckle Measurement of Transient Benard Convection," J. Fluid Mech., Vol. 89, pp. 665~671, 1978
15. M. Kawahashi and K. Yamamoto, "Speckle Method Using Beam Scanning Techniques," Proceedings of The International Workshop on PIV Fukui'95, edited by T. Kobayashi and F. Yamamoto, VSJ, pp. 155~158, 1995
 16. F. Yamamoto and T. Uemura, "Fundamentals and applications of PIV," Japanese Journal of Multiphase Flow, Vol. 6, pp. 65~79, 1992
 17. W. J. Hiller, St. Koch and T. A. Kowalewski, "Onset of Natural Convection in a Cube" Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No 13, pp. 3251~3263, 1993
 18. 이상준, 백승조, 윤정환, 도덕희, "화상처리기술을 이용한 온도장 및 속도장 동시 측정기법 개발", 대한기계학회논문집(B), 제20권 제10호, pp. 3334~3343, 1996'