〈연구논문〉 한국동력기계공학회지 제4권 제2호 pp. 11~16 2000년 5월

입자영상해석에 의한 자연대류 유동에 관한 연구

A Study on Natural Convection Flows Using Particle Image Analysis

배대석 · 김남식 · 조원효

D. S. Bae, N. S. Kim and W. H. Cho

Key Words : PIV(입자영상유속계), Gray-Level Cross-Correlation(계조치상호상관법), Natural Convection(자연대류), Rectangular Enclosure(직사각 밀폐공간)

Abstract : Simultaneous quantitative measurements are made of the velocity fields for two-dimensional natural convection in a rectangular enclosure using PIV(Particle Image Velocimetry). The experiments are performed at a Prandtl number of 6.62, an aspect ratio of 1.0, Rayleigh numbers from 1.294×10^6 to 3.8841×10^6, and angles of inclination of 0°, 30° and 60° inside a 30mm×30mm×8mm cavity made of an acrylic glass 10mm, with two isothermal copper walls kept at a prescribed temperature. The experimental results agreed very well with the numerical results. It was found that the flow consisted of a large double convection cell at angle of inclination of 60°.

1. 서 론

자연대류는 강제적으로 유체를 유동시키는 것이 불가능하거나 허용되지 않을 때 중요하게 다루어지는 현상이다. 따라서 그 응용범위는 매우 넓고 여러 가지 기하학적 형상에 대하여 많은 연구가 수행되어져 왔다[1]. 특히 사각밀폐공간에서의 자연대류에 관한 연구는 지금까지 실험적 또는 수치해석적 방법으로 많이 이루어져 왔다. 그러나 이들에 대한 실험적 연구는 주로 정성적인 유동형태를 나타내는 유동가시화에 국한되었다. 왜냐하면 자연대류는 강제대류에 비하여 유속이 매우 작아서 열선유속계나 피토관과 같은 측정장비로는 유속측정이 곤란하기 때문이다. 최근에 유동장을 정량적으로 가시화 하는 기법(PIV)이 제시되고 있다[2]. PIV(Particle Imaging Velocimetry)는 정성적인 가시화기법에 영상처리기법(Image Processing Techniques)을 적용한 정량적 유동가시화기법으로 컴퓨터와 영상처리기기 및 가시화기술의 발달과 더불어 빠른 속도로 개발되고 있다. 이 기법은 유동장에 추적입자를 분포시켜 유동장을 가시화 한 후 측정시간(Δt)동안 움직인 추적입자의 변위 정보를 영상입력장치인 CCD카메라를 이용하여 저장하고 그리고 디지털 영상처리기법에 의해 변위(s)를 구하여 전체 유동장에서의 속도벡타를 동시에 계측하는 새로운 기법이다. PIV의 성능은 하드웨어 관점에서는 컴퓨터의 용량과 연산속도의 영향을 받으며 소프트웨어의 관점에서는 속도벡타를 구하는 알고리즘의 효율에 영향을 받는다. 특히 효율적인 알고리즘의 개발은 PIV연구의 중요한 부분을 차지하고 있으며 지금까지 여러 가지 알고리즘이 개발되어져 왔다[3-7]. 본 연구에서는 계조치 상호상관법(Grey Level Cross-Correlation)을 사용하여 사각밀폐공간에서의 자연대류 유동장을 정량적으로 가시화 하였다. PIV를 이용하여 자연대류 유동장을 정량적으로 가시화 하려는 노력은 최근에 이루어졌다[8-9]. 그러나 이들은 추적입자, 실험하고자 하는 Grashof수 범위 등의 문제 때문에 주로 글리세린 수용액을 작동유체로 사용하였다. 본 연구에서는 물을 사용하여 사각 밀폐공간에서의 자연대류 유동을 정량적으로 가시화 하였고 그 결과를 수치해석 결과와 비교하였다. 아울러 경사각이 자연대류 유동에 미치는 영향도 함께 검토하였다.

접수일 : 2000년 1월 20일
배대석, 김남식 : 부경대학교 기계공학부
조원효 : 부경대학교 대학원

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 사각 밀폐공간의 개략도와 좌표계는 Fig. 1과 같으며, 가열과 냉각으로 등온 조건을 유지하는 두 수직면과 단열조건으로 유지되는 두 수평면으로 이루어져 있다.

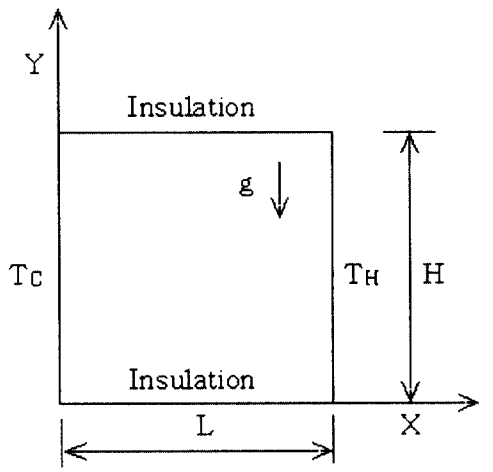
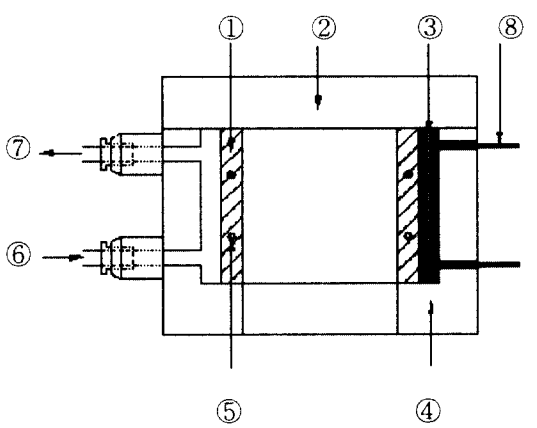


Fig. 1 Schematic diagram of enclosure

Fig. 2는 본 실험에 사용된 계측영역의 실험장치를 나타낸다. 사각 밀폐공간의 크기는 30mm×30mm×8mm (L×H×W)이고, 오른쪽 수직벽면은 히터가 설치된 가열면이고 왼쪽수직벽면은 냉각수가 흘러 일정 냉각 온도를 유지하는 냉각면이다. 두 수평면은 단열 조건이며 냉각면은 일정 온도 유지를 위하여 베이크라이트판의 속은 냉각수가 흐르도록 가공하여 공동구를 만들고 밀폐공간 내



① Copper plate
② Acrylic plate
③ Adiabatic material
④ Bakelite
⑤ Thermocouple probe
⑥ Cooling water inlet
⑦ Cooling water outlet
⑧ Electronic power

Fig. 2 Schematic diagram of test section

부쪽 면에 8mm×30mm×3mm의 구리판을 설치하여 냉각수가 베이크라이트판 공간속에서 순환 할 수 있도록 하였다.

가열면은 베이크라이트를 가공하여 구리로 된 히터를 (8mm×30mm×8mm) 끼우고 히터 뒷면에 세라믹 단열재를 덮은 다음 실리콘으로 마감을 하였다. 히터는 직류전원장치로부터 전원이 공급되도록 하였다. 가열면과 냉각면의 표면온도를 측정하여 온도를 항상 일정하게 유지하기 위하여 열전대를 가열면의 히터와 냉각면의 구리판에 내경 1mm의 구멍을 내어 설치하였다. 수평판과 전후판은 두께 10mm의 아크릴판으로 제작되었다. 후판의 바깥쪽면에는 전면에서 CCD 카메라로 촬영 시 추적입자의 선명도를 높이기 위하여 검은색 종이(30mm × 30mm)를 부착하였다. 실험 방법은 준비된 사각형 밀폐공간 실험장치를 각각의 온도변화(ΔT=3℃, ΔT=6℃, ΔT=9℃)와 각도변화(α=0°, α=30°, α=60°)에 따라 매 실험에 대하여 내부에 자연대류유동현상이 충분히 형성될 수 있도록 전원가동 후 최소 5시간 이상 경과 후 측정을 실시하였다.

2.2 실험방법

사각 밀폐공간 내 자연대류의 유동특성을 구하기 위한 입자영상 유속측정 실험 장치는 전체적으로 Fig. 3과 같다. 영상입력장치는 PIV의 속도 추출기법에 따라 결정되며 본 실험에서는 CCD 카메라(SSC-M370, Sony)를 사용하였다. 영상저장장치는 VCR(AG-7350, Panasonic)을 사용하여 영상을 저장 후 재생시켜 이미지 보드에 공급하였다. 이미지 보드는 영상신호(아날로그 신호)를 샘플 당 정의된 비트로 디지털화 하여 PC가 처리 할 수 있는 신호로 바꾸어 주고 산술, 논리연산 및 영

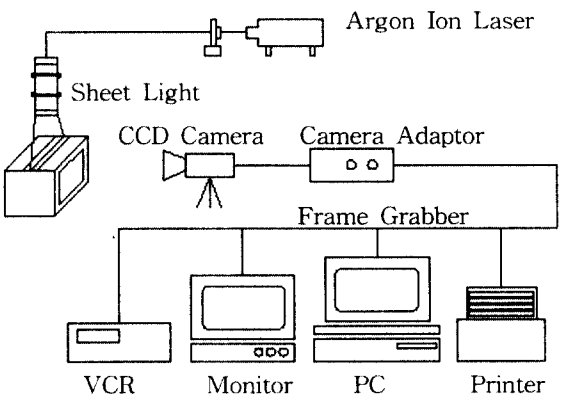


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup with PIV system

상처리조작을 행하여 정보를 분석하기 위한 하드웨어이다.

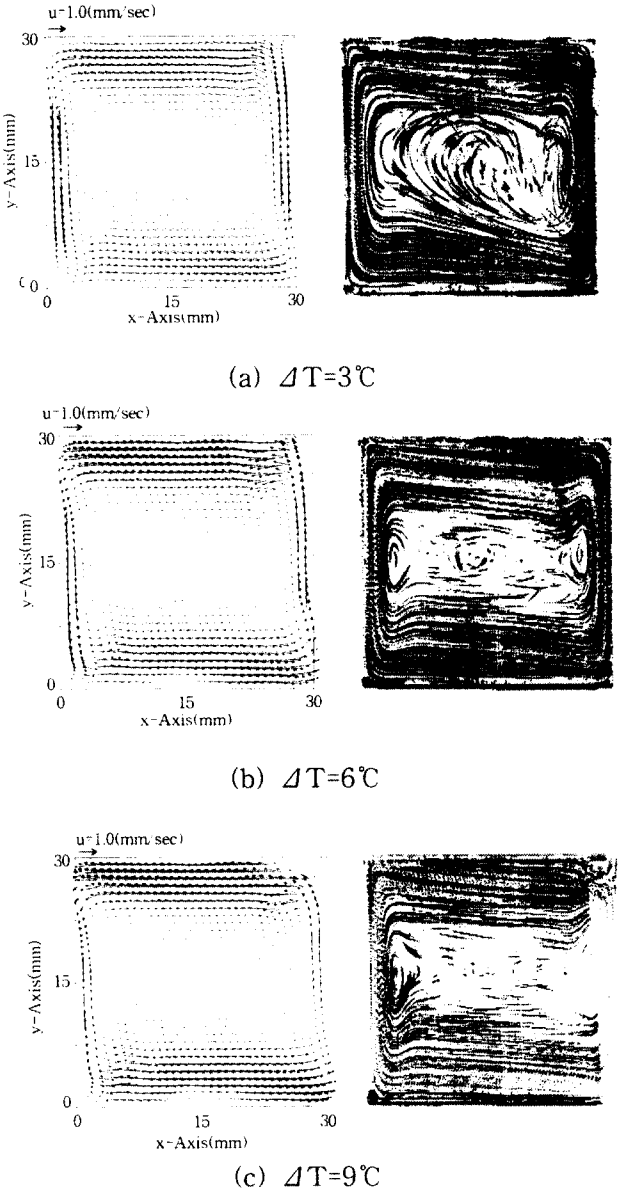
본 실험에서는 DT3155 이미지 보드를 사용하였다. 작동유체로는 물을 이용하였으며, 입자는 150~175㎛ High Porous Polymer를 사용하여 유체흐름에 최소영향을 주고 또한 추종성 확보를 위해 그리고 중립부유를 위해 유체에 넣고 장 시간 지난 후 자중에 의해 침강이나 부상이 되지않고 남아있는 입자들만을 선별하여 사용하였다. 광원으로는 500mW의 Ar-Ion 레이저를 사용하였고, 1~2mm정도의 시트라이트를 만들어 사각 밀폐공간의 위쪽에서 중앙부로 조사되도록 하였다. 유동장의 촬영은 CCD 카메라를 이용하였으며, Camera Adapter를 통해 VCR에 저장된 영상은 이미지 보드(DT3155, 640 x 480 픽셀, B & W)를 거쳐 변환된 후 PC에서 계조치 상호상관법의 추적알고리즘으로 처리되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 PIV 계측에 의한 실험 결과로서 ΔT에 따른 유적선 및 평균 속도 벡터를 나타낸다. 오른쪽 수직면이 가열면이고 왼쪽 수직면은 냉각면이며, Ra수가 1.294×10^6(ΔT=3℃), 2.589×10^6(ΔT=6℃), 3.8841×10^6(ΔT=9℃) 경우의 유동을 보이고 있다. 먼저 유동 성향을 보면 수직 가열면을 접한 유체는 가열에 의해 밀도가 작아져 부력이 발생되어 중력의 반대방향인 상부로 속도경계층을 형성하여 상승하기 시작한다. 이 수직 속도경계층은 Ra수가 커질수록 더욱 뚜렷이 나타남을 볼 수 있다. 속도가 증가된 유체는 급히 상승하다 코너부분에서 진행 방향이 바뀌며, 단열수평면에서는 온도구배가 없으므로 더 이상의 부력 증가가 없다. 그러므로 유속은 느려지며 속도 경계층도 코어방향으로 넓어진다. 다시 수직냉각면을 만나면서 밀도가 높아지게 되어 속도경계층이 좁아지면서 빠른 유속으로 하강 유동을 보인다. 전체적으로 반시계 방향의 커다란 한개의 셀 유동을 보이고 있으며, Ra수가 커질수록 속도경계층은 좁아져 빠른 유속을 보인다.

Fig. 5와 Fig. 6은 사각 밀폐공간에 경사각도(α) 변화에 따른 자연대류유동을 보여주고 있다. 경사각도 α는 사각밀폐공간의 바닥과 수평바닥이 이루는 각이다. Fig. 4의 유동형태와 함께 비교하여 보면 유동속도는 Fig. 4의 경향과 마찬가지로



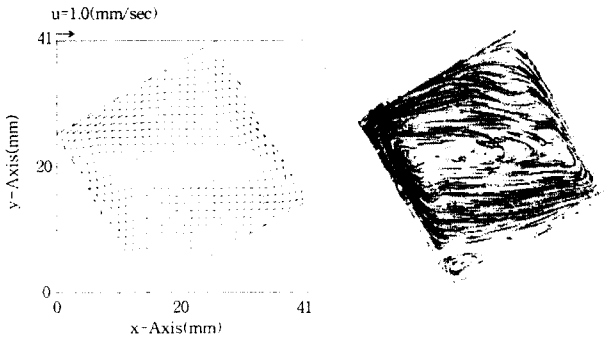
(a) ΔT=3℃

(b) ΔT=6℃

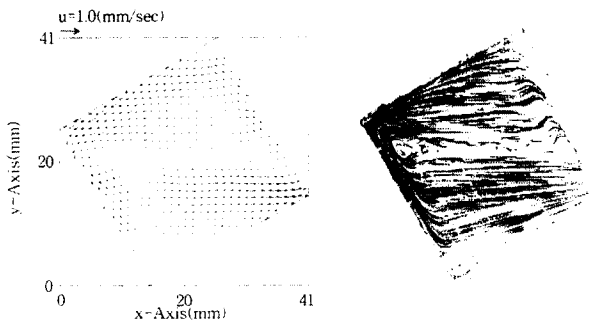
(c) ΔT=9℃

Fig. 4 Experimental velocity and pathlines at α=0°

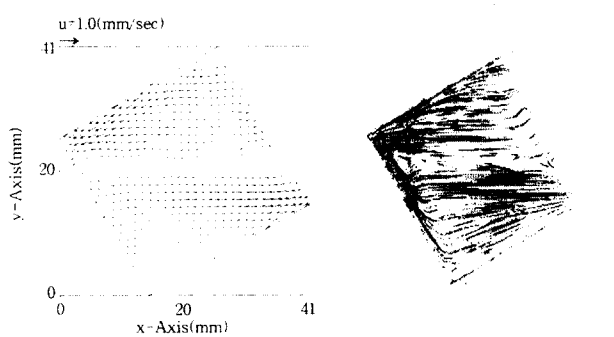
Ra수가 증가할수록 함께 증가하였다. 경사각도가 30° 일때는 0° 때처럼 불완전하지만 한개의 셀 유동을 보이고는 있다. 0° 때 상당히 컸던 코어부분의 정체지역이 30°에서는 형태만을 유지하고 있다. 오히려 밀폐공간의 수직방향으로 폭넓은 속도경계층을 이룬다. 속도경계층 폭이 넓어짐은 상당한 유속의 감소를 나타내며 이것은 또한 30° 부근 이상의 범위에서부터 두개의 셀 유동형태가 일어나려 함을 알 수 있다. 60° 인 경우 0° 인 경우와는 상당한 유동 형태의 차이를 보이는데 가장 큰 차이점은 60° 는 두개의 셀 유동인 것이다. 경사각도가 증가함에 따라 사각 밀폐공간의 수직면 투사



(a) ΔT=3℃, α=30°



(b) ΔT=6℃, α=30°

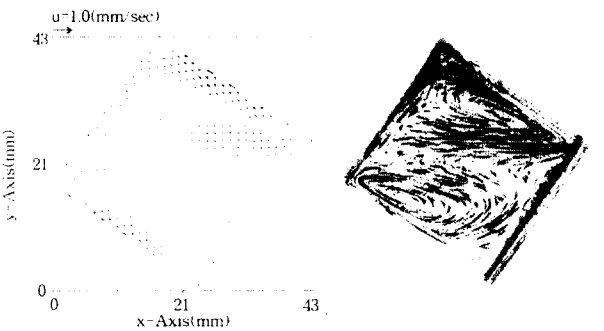


(c) ΔT=9℃, α=30°

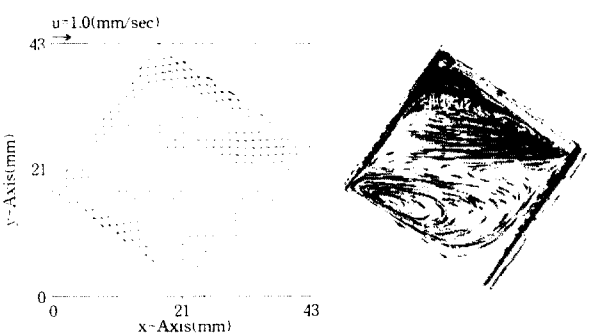
Fig. 5 Experimental velocity and pathlines at α=30°

면적이 작아지고 수평면 투사면적은 증가하게 된다. 그러므로 경사각도가 증가되면 유체가 상하로 유동하는 길이는 짧아지고 수평유동이 길어지므로 자연대류의 영향이 강하게 나타나지 못한다.

상부에서는 밀도가 낮은 유체가 내려오지 못하고 또 하부에서는 높은 밀도의 유체가 상승하지 못하고 있는데 이것은 상부의 고온 유체와 하부의 저온 유체 사이의 점성력의 차이로 인하여 부력보다 점성력이 더 크게 작용하여 이 점성력의 차이로 대류가 일어나지 못하고 경계층을 이루는 것이다. 그러므로 두개의 셀 유동이 형성되는 것이다. 이것은 온도차가 큰 곳에서 자연대류 경향도 큼을 알 수 있다. 하부의 저온부 유동은 하부의 냉각면 중 상부의 고온 유동에 가까운 곳에서 밀도 변화 즉 열전달이 잘 일어나므로 유동의 중심점을 형성하고 상부의 고온부 유동도 상부의 가열면 중에서 저온인 하부유동의 가까운 곳에서 밀도 변화를 잘 일으키며 유동 중심점을 형성한다. 이로써 점대칭이 되지 않는 것이다. 본 실험의 경우처럼 두 수직면이 가열과 냉각되는 사각 밀폐공간에서의 자연대류 유동속도는 온도변화의 영향으로 속도 경계층이 달라지며 역시 경사각도의 영향, 즉 가열면 및 냉각면의 위치에 따라 전체에 유동장이 영향을 받는 것을 알 수 있다.



(a) ΔT=6℃, α=60°



(b) ΔT=9℃, α=60°

Fig. 6 Experimental velocity vectors and pathlines at α=60°

3.2 수치해석결과 비교

수치해석모델의 형상은 실험과 동일한 X, Y방향의 폭은 L=0.03m, H=0.03m 이다. 경계조건도 왼쪽면은 냉각면으로 T=21℃, 오른쪽면은 가열면으로 T=27℃, 상하면은 단열면이다.

지배방정식은 다음과 같다.

· 연속방정식

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

· X방향 운동량 방정식

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$$

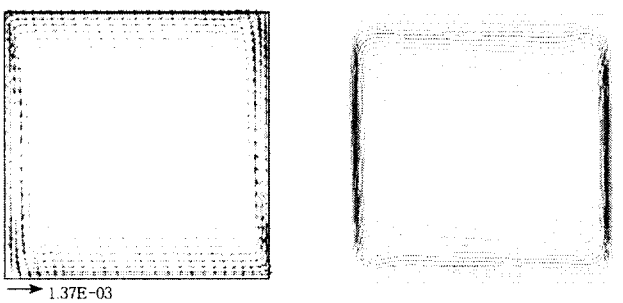
· Y방향 운동량 방정식

$$\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)+\rho g\beta\triangle T$$

· 에너지 방정식

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

Fig. 7은 본 실험에서 사용한 PIV에 의한 실험결과를 검증하기 위해서 실험과 동일조건으로 상용코드인 PHOENICS 3.1을 사용하여 계산된 수치해석 결과를 나타낸다. 실험결과는 Fig. 4의 것을 사용하였고 수치해석은 실험과 동일조건인 α=0°, ΔT=6℃ 조건하에서 계산되었으며 유선 및 벡터를 출력하여 비교하였다. 자연대류 유동장 전체의 유동특성은 실험결과와 잘 일치하였고, PIV를 이용하여 자연대류 유동장을 가시화하고 정량적으로 나타낼 수 있음을 확인하였다.



(a) Velocity Vector (b) Streamline

Fig. 7 Numerical velocity vector and streamline at α=0°, ΔT=6℃

4. 결 론

수직벽면이 가열, 냉각되는 사각 밀폐공간에서 양단의 온도차로 인해 발생하는 자연대류 유동현상을 입자영상유속(PIV)측정방법을 사용하여 실험적으로 연구하였다. Ra수와 경사각도가 자연대류 유동에 미치는 영향을 살펴보았고, 수치해석 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) PIV계측을 이용하여 사각 밀폐공간에서의 자연대류 유동을 정량적으로 가시화 할 수 있었다.
2) 수치해석 결과와 PIV 계측에 의한 유동해석결과 비교에서 유동형태가 잘 일치함을 확인하였다.
3) 가열면 및 냉각면이 수직인 사각 밀폐공간에서의 자연대류 유동에 있어서 Ra수가 증가 할수록 유체내의 속도경계층은 벽면 가까이에 형성되며 정체부분인 코어부분의 수직 폭이 커진다.
4) 경사각도의 변화가 온도변화와 함께 유동에 큰 영향을 미치며, 동일온도에서 경사각도가 커짐에 따라 유동속도는 느려지고 두개의 셀 유동형태로 바뀌었다.

참고문헌

1. Gebhart, B., Jaluria, Y., Mahajan, R.L., and Sammakia, B., "Buoyancy-Induced Flows and Transport", Hemisphere Pub. Co., 1988
2. Adrian, R. J., "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", Ann.Rev.Fluid Mech., Vol. 23, pp. 261~304, 1991
3. Dimotakis, P. E., Debussy, F. D. and Koochesfahani, M. M., "Particle streak velocity field measurements in a two-dimensional mixing layer", Physics of Fluids, Vol. 24, pp. 995~999, 1981
4. Khalighti, B., "Study of the intake swirl process in an engine using flow visualization and particle tracking velocimetry" ASME-FED-85, pp. 37~47, 1989
5. Simpkins, P. G. and Dudderar, T. D., "Laser speckle measurement of transient Benard convection," J. Fluid Mech., Vol. 89, pp. 665~671, 1978
6. Kawahashi, M. and Yamamoto, K., "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
7. Yamamoto, F. and Uemura, T., "Fundamentals and applications of PIV," Japanese Journal of Multiphase Flow, Vol. 6, pp. 65~79, 1992
8. W. J. Hiller, St. Koch and T. A. Kowalewski, "Onet of Natural Convection in a Cube" Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No 13, pp. 3251~3263, 1993
9. 이상준, 백승조, 윤정환, 도덕희, "화상처리기법을 이용한 온도장 및 속도장 동시 측정기법 개발", 대한기계학회논문집(B), 제20권 제10호, pp. 3334~3343, 1996