

[논문] 태양에너지

Solar Energy

Vol. 20, No. 4, 2000

상부채널을 갖는 사각공간에서 열유속 변화에 따른 공기대류의 속도와 온도 가시화

이 철 재*

동명대학 건축기계설비시스템과

Velocity and Temperature Visualization of Air Convection in Differently Heated Rectangular Cavity with Upper Channel

C. j. Lee*

**Department of Architectural Machine Equipment System*

Abstract

An experimental study was carried out in a cavity with upper channel and square heat surface by visualization equipment with Mach-Zehnder interferometer and laser apparatus. The visualization system consists of 2-dimensional sheet light by Argon-Ion Laser with cylindrical lens and flow picture recording system. Instant simultaneous velocity vectors at whole field were measured by 2-D PIV system(CACTUS'2000).

Obtained result showed various flow patterns. Severe unsteady flow fluctuation within the cavity are remarkable and sheared mixing layer phenomena are also found at the region where inlet flow is collided with the counter-clockwise rotating main primary vortex. Photographs of Mach-Zehnder are also compared in terms of constant heat flux.

기 호 설 명

- a : width or height of inlet flow
- B : width of cavity(mm)
- H : height of cavity(mm)
- i,j : coordinate of grid for interpolation
- L : length of cavity(mm)
- l : distance between particles
- pps : number of pictures per second
- Pr : Prandtl number, ν/α
- Re : modified Reynolds number, $v \cdot B/\nu$
- U : unit velocity (m/sec)
- u : x-axis direction velocity
- v : y-axis direction velocity
- x : distance in horizontal direction
- y : distance in vertical direction
- z : distance in spanwise direction
- Δt : time interval between image frame
- θ : rotation angle of image
- λ : wave length of laser

1. 서 론

해상에서 장기간 정체되는 해상구조물이나 운항에 필요한 선박은 고밀도 실내환경의 구축이 필수적이다. 이러한 실내의 환경특성은 외부 환경에 대한 적응성이 낮기 때문에 전체 구조물의 설계단계부터 세심히 고려해야 할 문제이다. 기관구역 및 화물구역은 용도에 따라 적정한 온도로 유지되고 있으며 벽면을 통하여 인접구역에 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 문제는 자연대류와 강제대류가 적절히 공존하는 혼합대류로의 접근이 필요하며 쾌적한 환경구축 또는 화재발생에 대비한 매연 제어 측면에서도 대단히 중요한 연구대상이다. 이 등¹⁾은 유출구의 위치가 변화하는 사각형을 대상으로 고밀도 주거환경에서 요구되

는 실내공기의 제어를 위한 실내의 공기유동 특성을 Holographic 간섭계, 스모크제너레이터 및 레이저 장치를 이용하여 실험하였으며, 여기에 수치해석의 결과와 비교한 결과를 제시하였다. 사각공간에서의 유동패턴과 전열현상의 규명^{2~3)}에 대해서는 많은 결과들이 제시되고 있으며, 이 연구에서 채택한 가시화 기법을 이용한 결과는 환기구구조의 설계와 에너지 절감측면과 관련하여 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 예측된다. 이러한 배경으로 이 연구에서는 상부채널을 갖는 사각공간^{4~5)}을 대상으로 간섭계와 유동장 가시화 기법을 적용하여 바닥면의 발열에 따른 속도장 및 온도장을 계측하였다. 대상유동은 채널흐름과 이 채널흐름에 의해서 전단응력을 공급받는 사각공간의 복합유동장이며, 공기의 유입구와 유출구를 갖는 구조이다. 유동장의 속도는 가시화 실험의 영상데이터에 대하여 2차원 PIV^{6~7)} 기법(CACTUS'2000)을 적용하여 계측하였고, 온도장은 Mach-Zehnder 간섭계⁸⁾를 이용하여 밀도 차에 따른 간섭사진으로부터 사각공간 내부의 온도분포를 프렌지로 가시화 하였다.

계측결과 사각공간의 내부에서는 상부의 구동류로부터 전단응력을 공급받아 발생한 U자 형태를 갖춘 주 와류(primary vortex)가 유동장의 내부를 재순환하였다. 또한 주 유동의 경로 중 중간 부근에서 주 유동과 재순환 흐름이 충돌하여 발생한 전단혼합영역이 관찰되었으며, 시간에 따라 내부에서 형성된 와류의 형태가 현저한 변화를 보였다.

2. 실험

그림 1(a)는 이 연구에서 사용된 실험장치이다. 대상 유동장의 입구측에 있는 채널의 전면에 스모크제너레이터를 두고 유동장은 바닥으로부터 1m 전후의 높이에 설치하였다. 스모크제너레이터

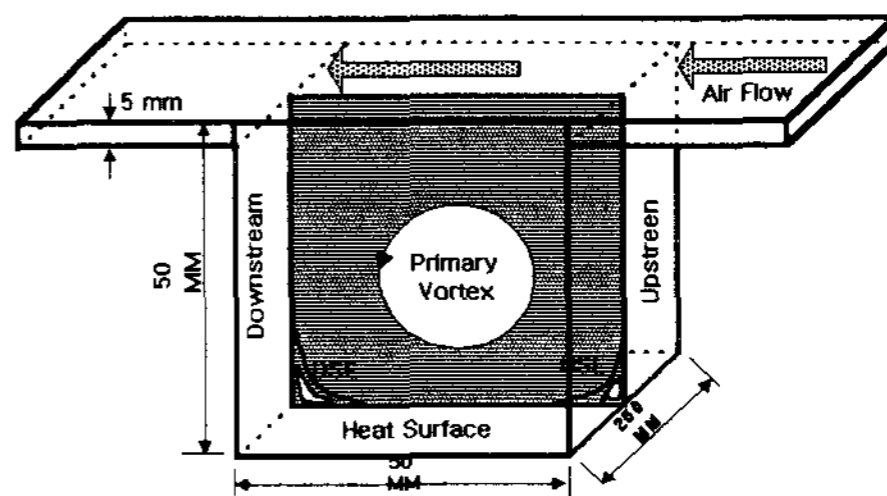
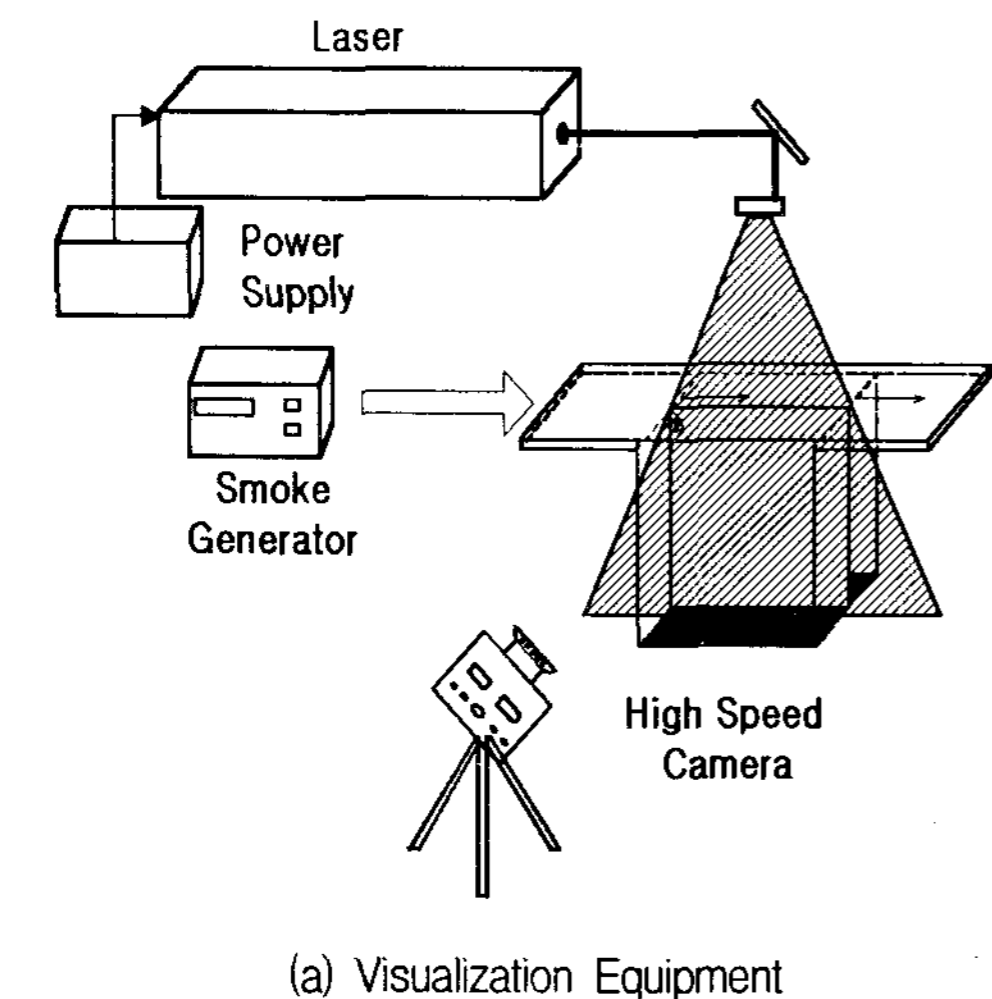


Fig. 2. Channel Cavity Dimension

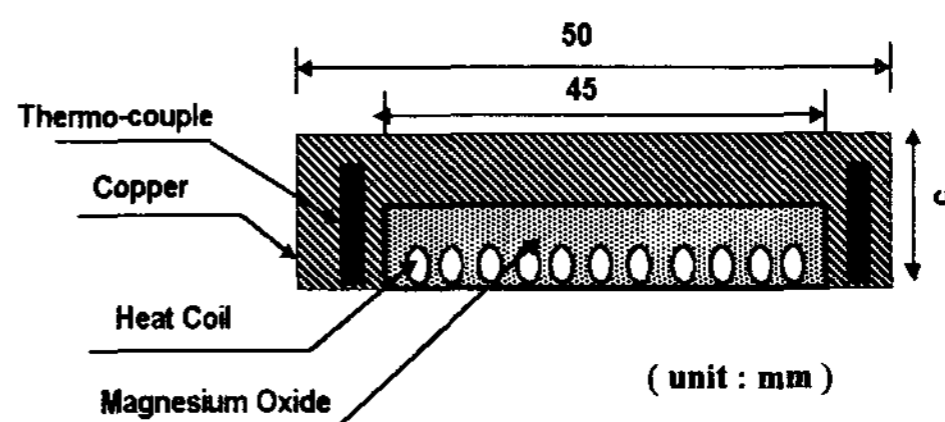
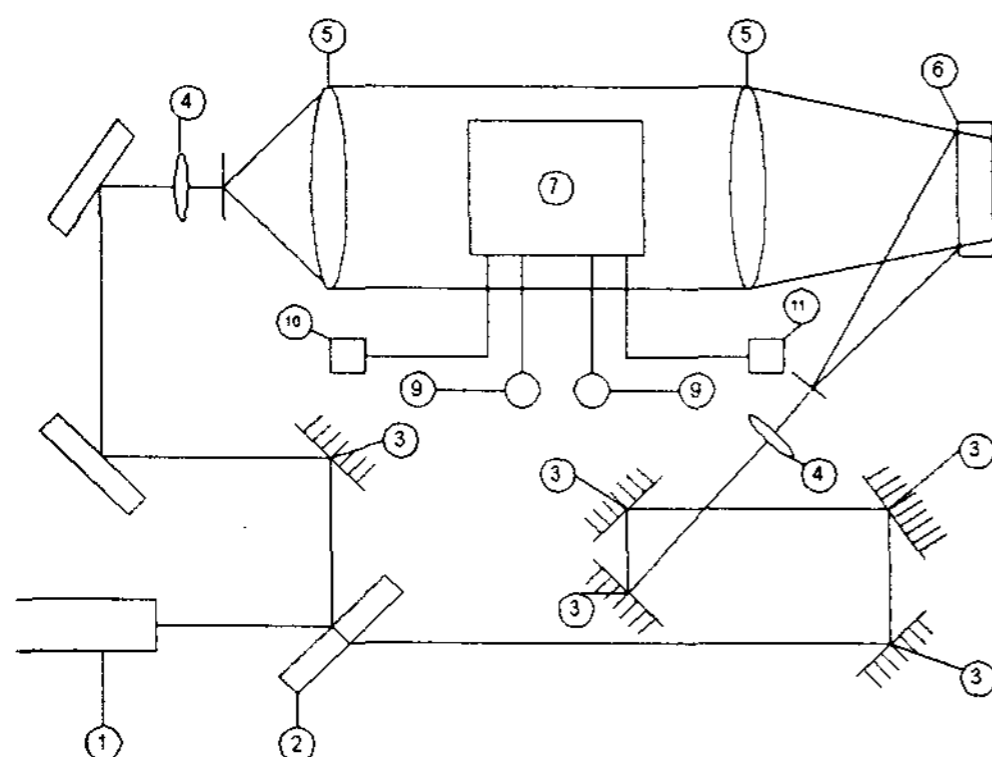


Fig. 3. Dimension of Heat Source



- 1 : Ar-Ion laser(5W)
- 2 : focusing lens
- 3 : reflecting mirror
- 4 : sheet beam device
- 5 : video synchronizer
- 6 : CCD camera
- 7 : still camera
- 8 : VTR

(b) Mach-Zehnder Interferometer

Fig. 1. Schematic Diagram of Experimental Apparatus

에서 발생된 연기는 주위공기와 함께 높이 $a = 5\text{mm}$, 길이 80mm 의 정류기를 거친 후 채널내부로 유입되어 시험부의 상부에 부착된 길이 400mm 의 소형 풍동에 의해 강제배출 된다. 이때의 공기유속은 열선유속계(Kanomax 7224, Japan)로 측정하였고 풍동에 장치된 3개의 팬의 공급전원은 직류전원장치를 이용하여 균일한 속

도를 유지하였다. 그림 2와 그림 3은 실험에 사용된 유동장($B \times H \times L : 250 \times 50 \times 50 \text{ mm}$)의 개략도와 발열체의 내부구조도 이다.

실험 대상 유동장은 바닥면에 발열체를 부착하고 하부에 베크라이트를 접착하여 단열이 되도록 하고 실험장치의 계측면은 5mm 의 유리를 부착하여 가시화에 적합하도록 하였다. 발열면은 가로와 세로가 각각 50mm 및 250mm 의 크기이며 열전도율을 고려하여 황동을 허용공차 $3/1000\text{mm}$ 이 내가 되도록 밀링으로 표면을 정밀 가공하여 사용하였다. 내부에는 니크롬선을 열원으로 하고 내부의 열전도가 원활하게 하기 위하여 열원과 황동판 사이에 열 용량이 큰 마그네슘 옥사이드(Magnesium oxide)분말을 넣은 후 양단을 실리콘으로 밀봉하였다. 또한 내부의 공기를 일정하게 배출하기 위하여 별도의 풍동을 제작하고 유동장의 좌측에 길이 225mm , 높이 100mm 의 서랍식 개폐구를 양쪽에 장착하여 개폐정도를 조절하여 유속이 0.1m/sec 로 일정한 조건에서 열유속을 각각 0.6KW/m^2 , 1.2KW/m^2 , 1.8KW/m^2 으로 변화시키면서 발열량에 따른 캐비티 내부 유동특성의

변화를 고찰하였다.

공기유동의 가시화를 위하여 수직채널의 좌측에 5W($\lambda = 514\mu\text{m}$)의 수냉식 아르곤 이온 레이저에 원통형 렌즈를 부착하고 약 1mm 전후의 두께를 갖는 2차원 시이트라이트를 유동장의 상부로부터 조사하였다. 이때 계측영역은 스펙방향의 중앙 단면($z = 125\text{ mm}$)이다. 유동장의 촬영은 고속카메라를 이용하였으며 이를 저속으로 재생하여 8mm카메라(Sony, Model: Pro 5000)에 영상을 NTSC방식으로 기록하였다.

기록된 영상은 컴퓨터에서 처리할 수 있는 디지털 영상으로 변환시켜 주는 PC용 이미지보드(Data Translation사 DT3155, 640×480 픽셀, B&W)에 의해 PIV계측의 원시영상으로 변환된다. 가시화 영상에서 유동장의 영역은 390×390 픽셀 전후이었다. 촬영시의 수평면에 대한 유동장의 회전각은 약 $\theta = -0.3^\circ$ 이며 PIV 전처리과정에서 회전 보정하였다.

속도벡터를 얻기 위한 격자 수는 $(i, j) = 40 \times 40$ 이며, 상관계수를 구하기 위한 탐색영역의 반경은 7픽셀, 상관영역의 크기는 40픽셀이다. 한가지의 순시 유동장에 대하여 처리시간은 펜티엄II 기종(CPU 200MHz)에서 약 30초 전후가 소요되었다. 시간평균의 속도벡터를 얻기 위해서는 일정 시간 간격으로 저장된 연속된 100개의 영상을 순차 일괄 처리하여 산술 평균하였다.

바닥면의 발열에 따른 온도장을 가시화 하기 위해 Mach-Zehnder간섭계를 이용하여 등온영상을 얻었다. 그리고 열전대를 각 6개소에 각 벽면과 발열면에 강력접착제와 실리콘 본드로 부착하여 벽면온도를 측정하였다. 간섭영상의 기록을 위해 광원으로는 헬륨-네온 레이저(He-Ne laser : 5mW)를 사용하였다. 레이저광은 광 확산 렌즈(beam expander lens)에 의해 확산되어 핀홀(pin hole)을 통과한 후, 볼록렌즈(convex lens)에 의해 평행 광으로 된다. 이 평행 광은 반투과 거울(half reflection mirror)에 의해 목적 광과

기준 광으로 분리되어, 목적 광은 시험부분을 통과한 후 주위 공기를 통과한 기준 광과 만나 간섭무늬를 형성한다. 무늬의 촬영은 간섭계를 수평으로 놓고 광원인 레이저 광속을 사용하여 무한 간섭 무늬가 얻어지도록 조정을 한 후 시험부분을 광축에 평행하게 위치시켰고 셔트스피드 1/2000로 하여 광축 방향에서 기록하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 상부의 구동류의 속도가 0.1m/sec, 하부 발열면의 발열량이 1.8KW/m^2 일 경우에 간격 $\Delta t = 1/30$ 초의 4프레임의 영상을 보여주고 있다. 상부의 구동류는 거의 균일하게 입구에서 출구 측으로 빠져나가며 일부는 포물선의 형태로 진행하다가 좌측벽면의 상부에 충돌하여 내부순환류에 혼합되며 이곳에서부터 타원형의 와류로서 주기적으로 발달과 소멸을 하고 있다. 시간진행에 따라 좌측상부에서 발달한 와류는 바닥면에 충돌한 뒤 전체적인 내부 순환류에 큰 영향을 주고 있으며 이로 인하여 일정한 주기를 갖는 비정상성이 나타나고 있다.

그림 5는 $Re = 300$ 의 경우에 유동장의 전체를 임의의 순간에 동시다점 계측한 전체유동장의 순시 속도벡터의 분포중 0.6KW/m^2 와 1.8KW/m^2 의 경우를 보이고 있다. 상부의 기준속도의 크기는 실제 속도 값이고 유차원의 영역에 대하여 기준 속도에 비례하여 속도벡터를 도시하였다. 하부의 발열면의 영향이 유동장의 하부에 잘 나타나 있으며 순시의 속도분포인 만큼 3차원성의 경향이 일부 나타나고 있다. 열유속의 차이에 따라 1.8KW/m^2 의 경우 위로 상승하는 속도벡터의 크기가 전반적으로 증가하고 있으며 0.6KW/m^2 에 비하여 매우 복잡한 유동특성을 보이고 있다.

그림 6은 시간 평균의 유동 특성을 알아보기 위하여 일정한 시간 간격으로 샘플링한 100회의

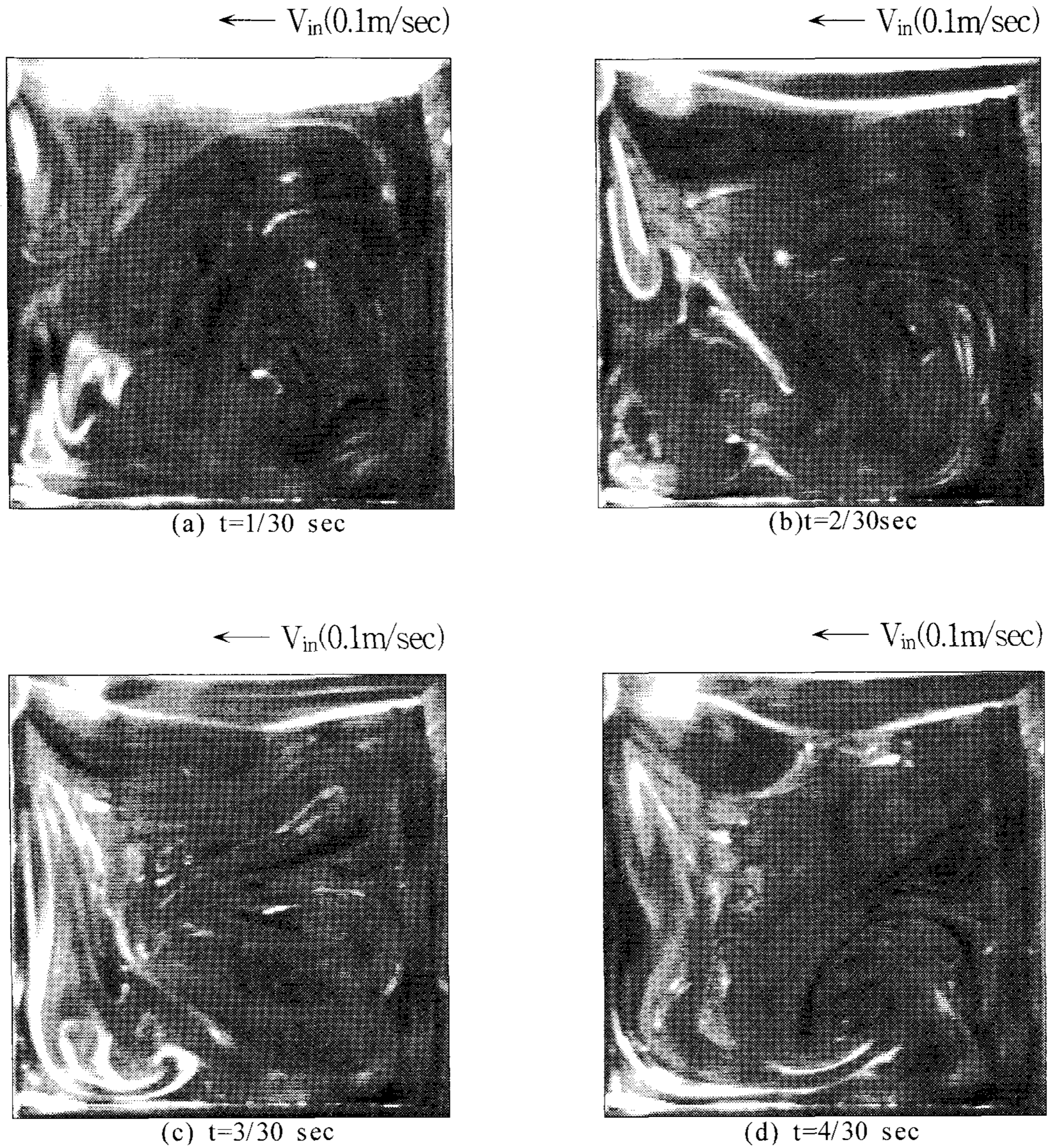
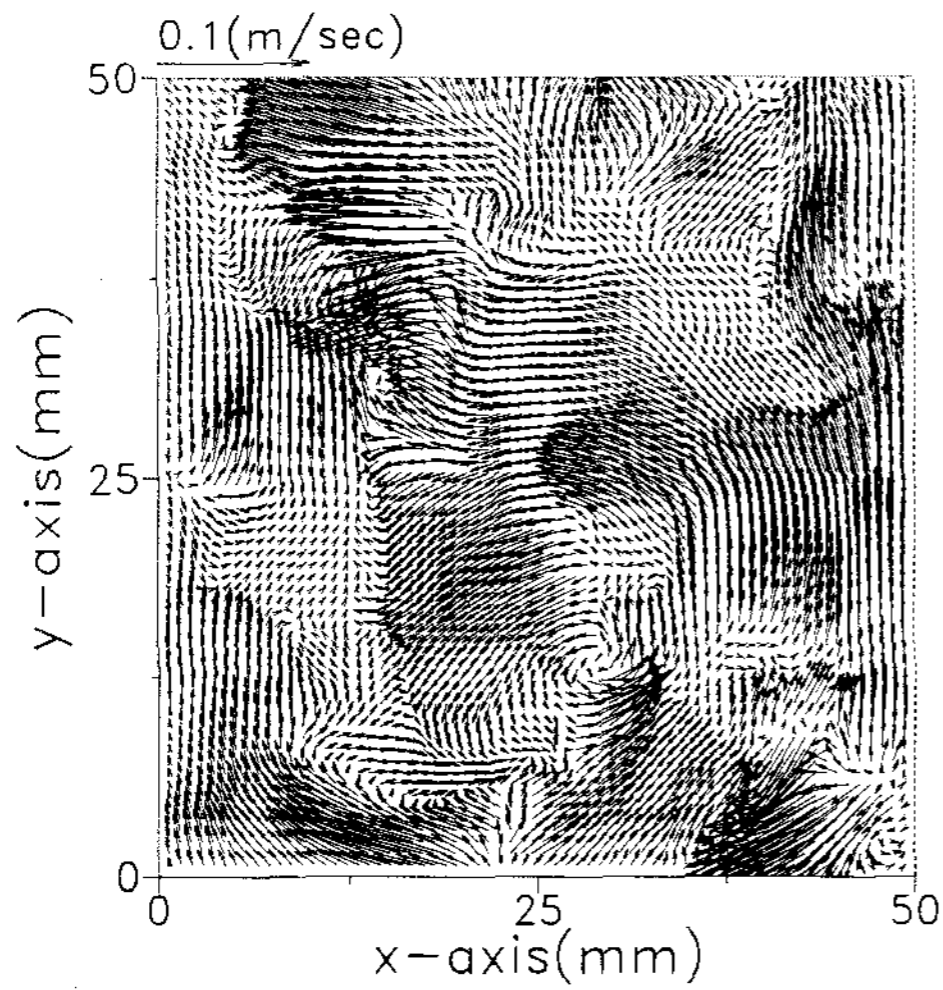


Fig. 4. Instantaneous flow image at $Re=300$, $Pr=0.71$

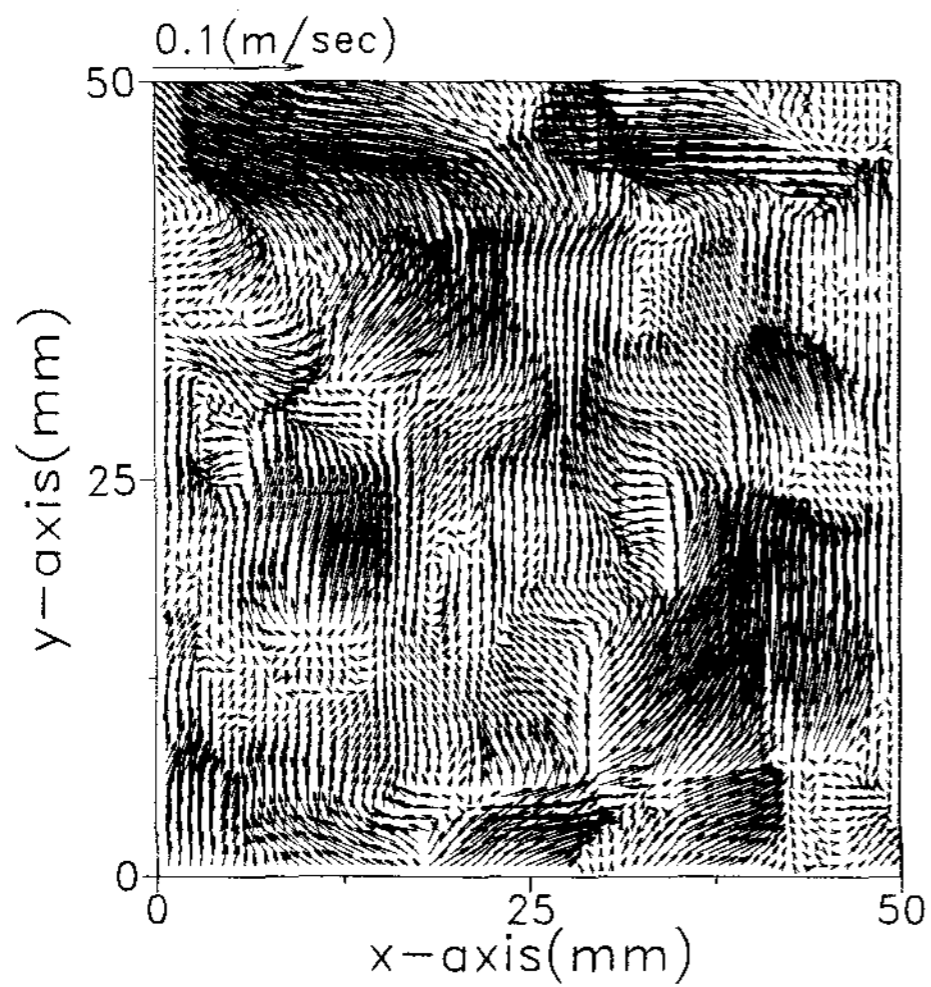
순시 속도 벡터를 산술 평균하여 나타낸 결과이다. 내부 순환류는 전체적으로 볼 때에 U자 형태의 유동패턴을 보이고 있으며 우측하부에는 주 순환류에 의한 2차와류가 발생하고 있다. 내부속도의 평균속도는 0.02m/sec 로 입구유속의 20%전후이며, 좌측상부의 속도는 0.07m/sec 에서

0.09m/sec 정도이다. 이것은 열선유속계로 측정된 상부의 평균 유입속도에 근접한 것으로 상부의 구동류의 일부가 캐비티 내부로 포물선 형태로 진행하면서 출구로 빠져나가기 때문이다.

그림 7은 캐비티의 좌측벽면의 온도를 가시화 실험시에 측정된 결과이다. 측정 점은 6mm 간격



(a) 0.6 KW/m²



(b) 1.8 KW/m²

Fig. 5. Instantaneous velocity distribution

의 7개소이며 상부로부터 벽면에 지름 1.5mm의 계측홀을 뚫고 “K”형 열전대를 고정한다.

그림에서 보면 바닥면의 열유속이 증가함에 따라 거의 균일하게 상승하며 바닥면에 근접한 면을 제외하고는 좌측벽면의 온도분포는 거의 일정하다. 이것은 주 순환류의 영향으로 좌측벽면의 경우 상부에서 하강하는 흐름의 영향으로 온도구배가 크지 않음을 나타낸다.

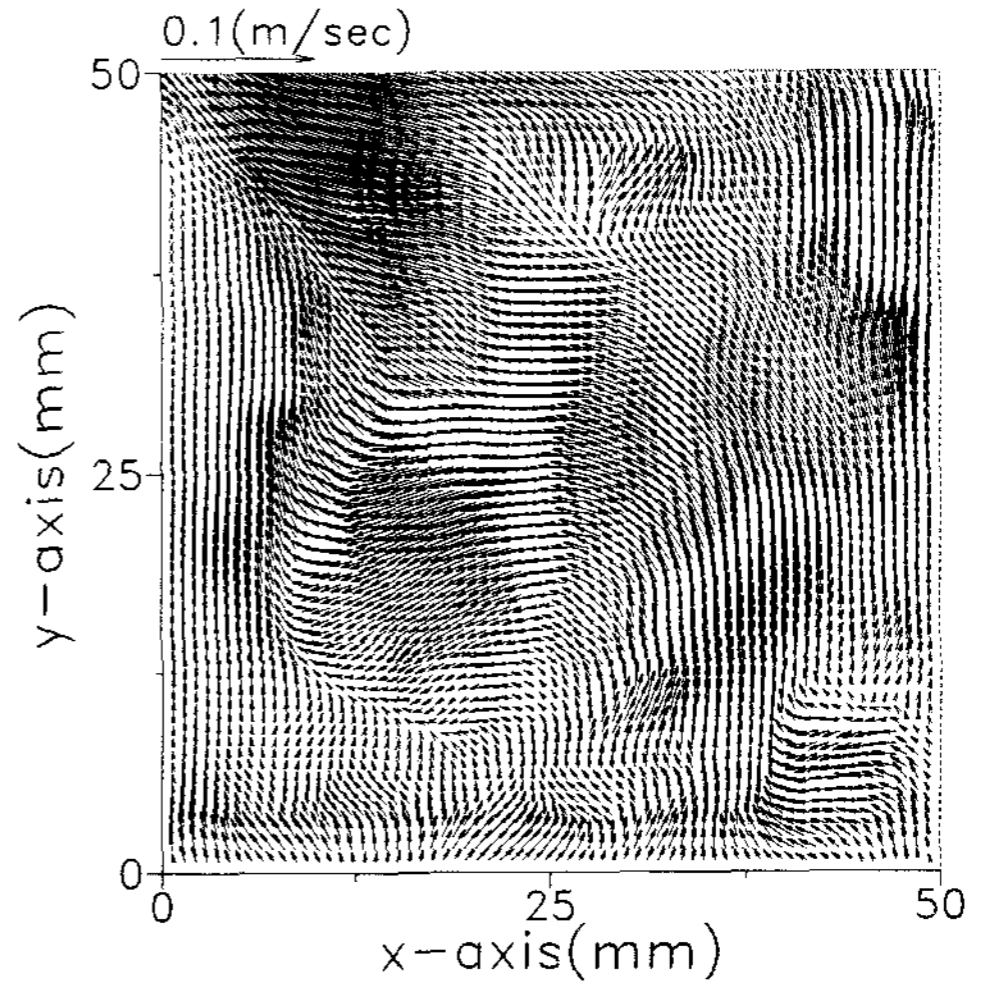


Fig. 6. Time-mean velocity distribution

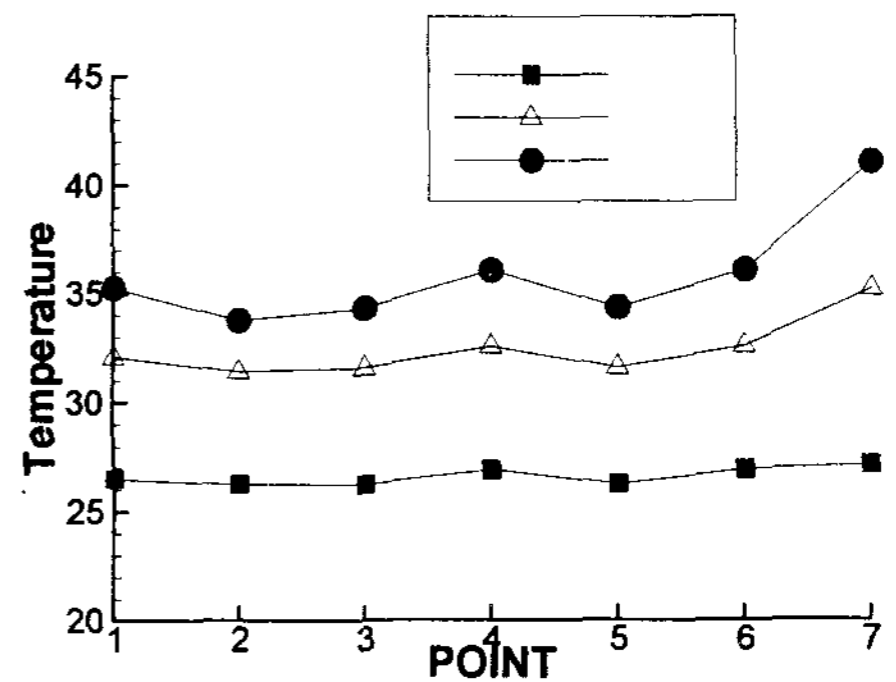


Fig. 7. Surface temperature distribution

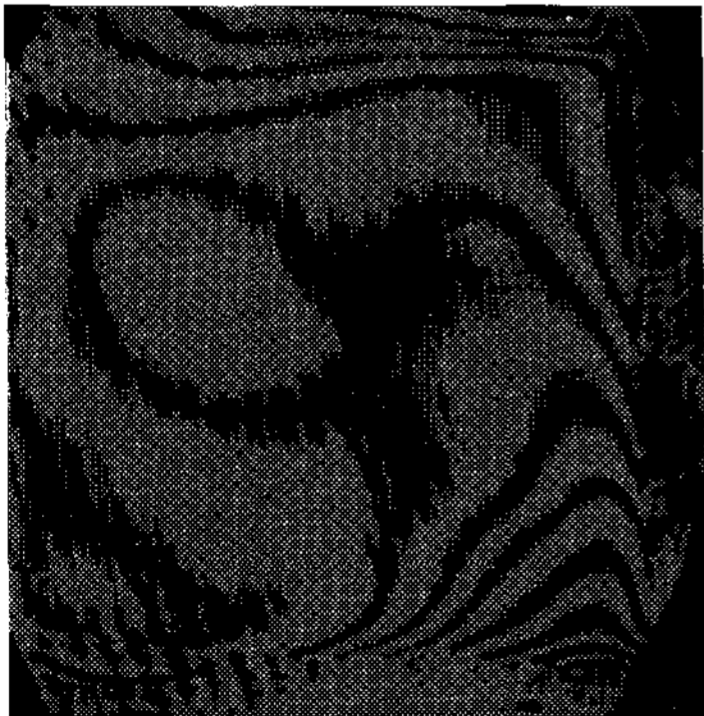
그림 8은 사각공간 내에서의 바닥의 고온 부로부터의 발열이 내부유동에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Mach-Zehnder간섭계를 사용하여 $Pr = 0.71$, $Re = 300$ 의 경우에 대하여 하부 바닥 열유속이 변화할 때의 간섭무늬를 보여주고 있다. 발열량이 증가함에 따라 우측하부 모서리의 간섭무늬의 수는 증가하고 있으며 열유속에 따른 사각공간 내부의 온도분포를 잘 보여주고 있다. 이것은 발열량의 증가에 따라 우측하부에서 가열면의 영향으로 온도구배가 커짐을 나타내고 있다. 특히 1.8KW/m²의 경우 좌측 중앙부에 치우친 셀이 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림 7에



(a) 0.6KW/m²



(b) 1.2KW/m²



(c) 1.8KW/m²

Fig. 8. Photographs of Mach-zehnder

서 1.8KW/m²의 경우 벽면의 온도분포가 비교적 큰 분포를 보이고 있으며 4번지점의 온도가 높게 나타나 있다. 이것은 등온선에 나타나 있는 바와 같이 중앙에 치우친 셀의 영향으로 추정되며, 차 후에 다양한 레이놀즈수에 따른 고찰로서 이에 관한 면밀한 검토가 필요하다.

4. 결 과

바닥면이 가열되는 사각공간 내부의 공기유동에 대하여 $Re = 300$ 에서 열유속의 변화 따른 가시화 실험을 행하고 PIV에 의해 전 유동장에 걸친 유차원의 속도를 동시에 계측하였다. 또한 내부의 발열에 따른 온도장을 가시화하기 위하여 Mach-Zehnder간섭계를 사용하여 간섭무늬를 얻었다. 그 결과 캐비티 상부에서 구동류의 흐름의 일부가 직진성을 상실하고 내부 주순환 흐름과 혼합되는 흐름특성을 보였으며 열유속이 증가함에 따라 자연대류의 영향이 크게 나타났다. 또한 구동류와 내부의 순환류가 충돌하는 영역에서 전단혼합현상이 발견되었다. 그리고 전단혼합영역에서 발생한 와류가 주순환류의 흐름방향으로 4/30초의 주기를 갖고 이동하는 비정상성을 보였다.

후 기

본 연구는 1998년도 동명대학 학술연구비에 의하여 수행하였습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이철재, 정한식, 권순석, "실내공기제어를 위한 사각공간내의 혼합대류에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제10권, 제4호, 1996, pp.109~117.
2. H. Han, T. H. Kuehn, J. W. Ramsey, H. Liang and K. Elayed, "Turbulent Modeling of Airflow Patterns and Ventilation Effectiveness in a Half Scale Office Building", Proceedings of 12th AIVC Conference, vol. 3, 1991, pp.1~8.
3. M. A. Joffe, "Chemical Filtration of Indoor

- Air an Application Primer," ASHRAE Journal, 1996, pp.42~49.
4. C. K. Aidun, N. G. Triantafillopoulos, J. D. Benson, "Global Stability of a Lid Driven Cavity with through Flow Visualization Studies", Phys. Fluids A 3 (9), 1991, pp.141~151.
 5. Y. H. Lee, C. S. Kim, D. H. Cho and J. W. Choi, "PIV Measurement of Cubic Cavity Driven 2-D Plane Poiseuille Flow", Proc. of the Third JSME-KSME Fluids Eng. Conf., 1994, pp.335~340.
 6. 최장운, 이영호, "PIV에서의 계조치 상호 상관법 개발", 대한기계학회 춘계학술대회논문집(II), 1996, pp.396~400.
 7. 최장운, 이영호, "PIV에서의 보간 방법의 적용", 대한기계학회 추계학술대회 논문집(II), 1995, pp.49~56.
 8. U. Grigull and W. Hauf, "Advances in Heat Transfer—Optical Method in Heat Transfer", Academic Press, New York, London, Vol.6, 1970, pp.134~312.