

상부채널을 갖는 사각공간에서 열유속 변화에 따른 공기대류의 속도와 온도 가시화

이철재* · 정한식** · 박찬수*** · 조대환***

Velocity and temperature Visualization of Air Convection in Differently Heated Rectangular Cavity with Upper channel

Cheoljae Lee, Hanshik Chung, Chansu Park and Daehwan Cho

Key Words: Room Air Convection(실내공기유동), Constant Heat Flux(균일 열유속), Mach-Zehnder Interferometer(마하젠더 간섭계), Unsteady Flow(비정상유동), Sheared Mixing Phenomena(전단혼합현상), Channel(채널)

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.

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

1. 서론

우리 나라에서 널리 이용되는 온수온돌은 온수를 이용하여 가열 면의 온도를 높여서 난방을 하

* 동명대학
 ** 경상대학교
 *** 목포해양대학교

는 것으로서 쾌적도가 좋은 난방방식으로 평가되고 있으나 열효율은 낮은 편에 속한다. 온돌난방 공간에서의 열 전달은 난방공간 구성면 간의 상호 간섭현상과 내부유동 패턴에 따라 그 열적 특성이 매우 복잡하다. 또한 내부의 공기온도의 구배로 인하여 생기는 밀도차이에 의해 순환하는 공기흐름에 의해 환기구조에 있어서도 많은 영향을 받는다. 따라서 온돌방에서의 열 전달 문제는 크게 두 가지의 관점에서 해석되어야 한다. 첫째는 바닥 면의 전열 효율을 증가시키기 위한 전열 촉진 분야이고, 둘째는 단열을 통하여 난방 및 냉방에 있어서 에너지 손실의 억제에 위한 측면이다. 따라서 이러한 사각공간에서의 유동패턴과 전열현상의 규명에 관한 연구^{1~3)}는 환기구조의 설계와 에너지 절감측면과 관련된 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 예측된다.

한편, 가시화의 기법은 유체유동이나 온도의 분포를 전 유동장에 걸쳐 파악할 수 있으므로 많은 연구자들의 실험적 연구에 적용하여 정성적인 해석에 이용하여 왔다. 그리고 최근에는 이러한 가시화 방법과 컴퓨터 및 광학기술을 접목하여 정량적인 결과를 얻는 계측기법이 개발되어 여러 분야에 적용되고 있다.

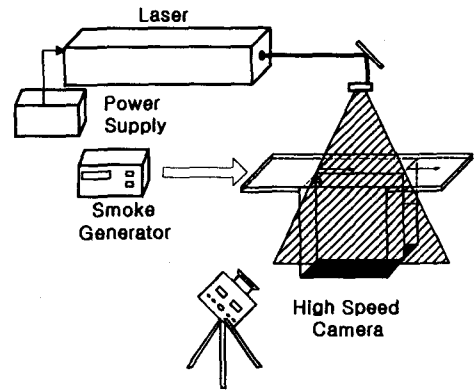
이러한 배경으로 이 연구에서는 상부채널을 갖는 사각공간^{4~5)}을 대상으로 간섭계와 유동장 가시화 기법을 적용하여 바닥 면의 발열에 따른 속도장 및 온도장을 계측하였다. 대상유동장은 채널흐름과 이 채널흐름에 의해서 전단응력을 공급받는 사각공간의 복합유동장이며, 공기의 유입구와 유출구를 갖는 구조이다.

유동장의 속도는 가시화 실험의 영상데이터에 대하여 2차원 PIV^{6~7)}기법(CACTUS2000)을 적용하여 계측하였고, 온도장은 Mach-Zehnder 간섭계⁸⁾를 이용하여 밀도 차에 따른 간섭사진으로부터 사각공간 내부의 온도분포를 프렌지로 가시화하였다.

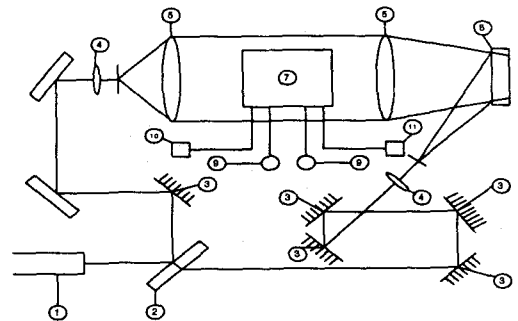
계측결과 사각공간의 내부에서는 상부의 구동류로부터 전단응력을 공급받아 발생한 U자 형태를 갖춘 주 와류(primary vortex)가 유동장의 내부를 재 순환하였다. 또한 주 유동의 경로 중 중간부근에서 주 유동과 재순환 흐름이 충돌하여 발생한 전단혼합영역이 관찰되었으며, 시간에 따라 내부에서 형성된 와류의 형태가 현저한 변화를 보였다.

2. 실험

그림 1(a)은 이 연구에서 사용된 실험장치이다. 대상 유동장은 바닥으로부터 1m 전후의 높이에 두고 스모크 제너레이터는 채널의 입구 측에 설치하였다. 여기에서 발생된 연기는 주위공기와 함께 높이 $a=5\text{mm}$, 길이 80 mm의 정류기를 거친 후 채널내부로 유입되어 시험 부의 상부에 부착된 길이 400mm의 소형 풍동에 의해 강제배출된다. 이때의 공기유속은 열선유속계(Kanomax 7224, Japan)로 측정하였고 풍동에 장비된 3개의 팬의 공급전원은 직류전원장치를 이용하여 균일한 속도를 유지하였다. 그림 2와 그림 3은 실험에 사용된 유동장(B×H×L : 250×50×50 mm)의 개략도와 발열체의 내부구조를 보이고 있다.



(a) Visualization Equipment



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

(b) Mach-Zehnder Interferometer

Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

실험 대상 유동장은 바닥면에 발열체를 부착하고 하부에 베크라이트를 접착하여 단열이 되도록 하고 실험장치의 계측 면은 5mm의 유리를 부착하여 가시화에 적합하도록 하였다. 발열 면은 가로와 세로가 각각 50mm 및 250mm의 크기이며 열전도율을 고려하여 황동을 허용공차 3/1000mm 이내가 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 100mm의 서랍식 개폐구를 양쪽에 장착하여 개폐정도를 조절하여 유속이 0.1m/sec로 일정한 조건에서 열유속을 각각 0.6KW/m², 1.2KW/m², 1.8KW/m²으로 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 1 mm 전후의 두께를 갖는 2차원 시이트라이트를 유동장의 상부로부터 조사하였다. 이때 계측영역은 스펀방향의 중앙단면($z = 125 \text{ mm}$)이다.

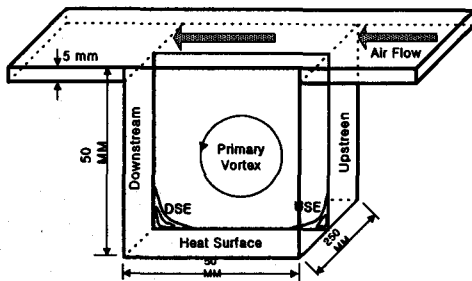


Fig. 2 Channel Cavity Dimension

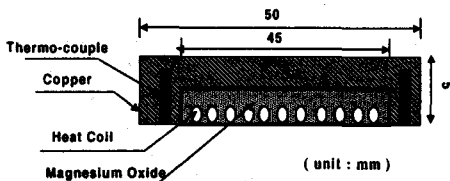


Fig. 3 Dimension of Heat Source

유동장의 촬영은 고속카메라를 이용하였으며 이를 저속으로 재생하여 8mm카메라(Sony, Model: Pro 5000)에 영상을 NTSC방식으로 기록하였다.

기록된 영상은 컴퓨터에서 처리 할 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 390×390픽셀 전후이었다. 촬영시의 수평면에 대한 유동장의 회전각은 약 $\theta=0.3$ 이며 PIV 전처리과정에서 회전 보정 하였다.

속도벡터를 얻기위한 격자 수는 $(i,j) = 40 \times 40$ 이며, 상관계수를 구하기 위한 탐색영역의 반경은 7픽셀, 상관영역의 크기는 40픽셀이다. 한가지의 순시 유동장에 대하여 처리 시간은 펜티엄II 기준(CPU 200MHz)에서 약 30초 전후가 소요되었다. 시간평균의 속도벡터를 얻기 위해서는 일정 시간간격으로 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. 레이저 광은 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 무한대 간섭무늬가 얻어지도록 조정을 한 후 시험부분을 광축에 평행하게 위치시켰고 셔터스피드 1/2000으로 하여 광축 방향에서 기록하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 상부의 구동류의 속도가 0.1m/sec, 하부 발열면의 발열량이 1.8KW/m²일 경우에 간격 $\Delta t=1/30$ 초의 4프레임의 영상을 보여주고 있다.



(a) $t=1/30$ sec



(b) $t=2/30$ sec



(c) $t=3/30$ sec



(d) $t=4/30$ sec

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

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 전체적인 내부순환류에 큰 영향을 주고 있으며 이로 인하여 일정한 주기를 갖는 비정상성을 보이고 있으며 이와 같은 현상은 발열량이 증가 할 수록 내부의 유동패턴이 복잡하며 등밀도선의 변화가 크게 나타났다. 또한 하부바닥면의 근방에서는 발열의 증가에 따라 부력의 영향에 기인한 혼합대류의 매우 복잡한 유동패턴을 보이고 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 기준속도에 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 순시 속도 벡터를 산술 평균하여 나타낸 결과이다. 내부 순환류는 전체적으로 볼 때에 U자 형태의 유동패턴을 보이고 있으며 우측하부에는 주 순환류에 의한 2차와류가 발생하고 있다.

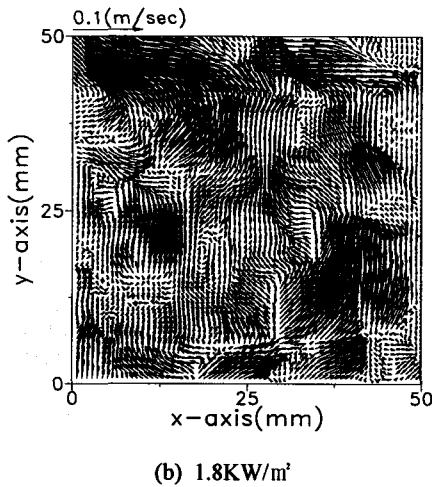
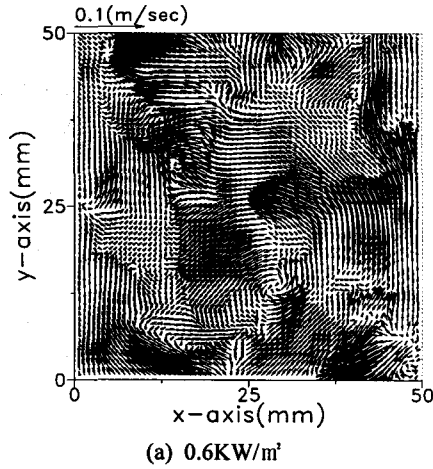


Fig.5 Instantaneous velocity distribution

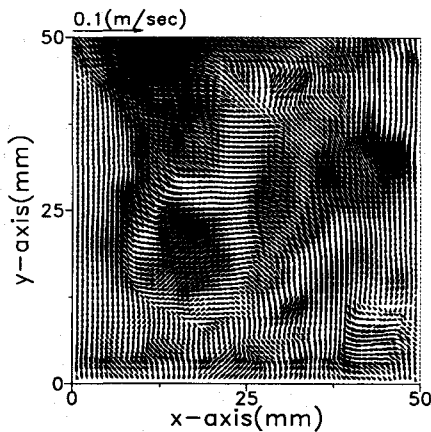


Fig.6 Time-mean velocity distribution

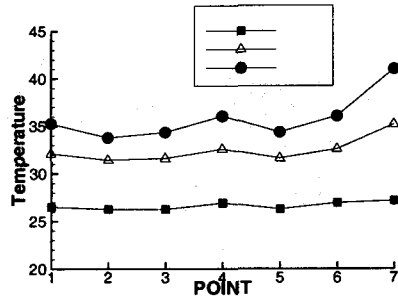


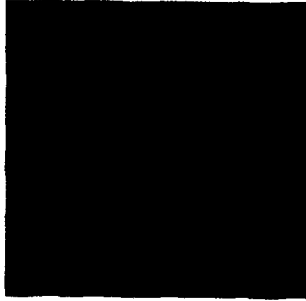
Fig.7 Surface temperature distribution

이에 관하여는 차후에 구동류의 속도변화에 따라 여러 측면의 일관된 연구가 필요하다.

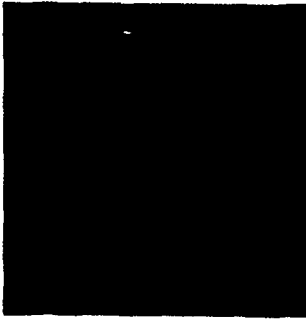
그림7은 캐비티의 좌측벽면의 온도를 가시화 실험 시에 측정한 결과이다. 계측 점은 6mm간격의 7개소이며 상부로부터 벽면에 지름 1.5mm의 계측홀을 뚫고 "K"형 열전대를 고정하였다.

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

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 있으며 이 부분에서 내부순환 특성에 의한 전체영역이 변화하기 때문이다. 바닥면의 발열에 따른 경향이 뚜렷한 층으로 보이고 있으며 상부의 중앙부에서 전단혼합현상도 잘 나타나 있다. 내부속도벡터의 평균속도는 0.02m/sec로 입구유속의 20%전후이나 좌측상부의 속도는 0.07에서 0.09m/sec전후이다. 이것은 열선유속계로 측정 한 상부의 평균 유입속도에 근접한 것으로서 상부의 구동류의 일부가 캐비티내부로 포물선 형태로 진행하면서 출구로 빠져나가기 때문이다.



(a) 0.6KW/m²



(b) 1.2KW/m²



(c) 1.8KW/m²

Fig.8 Photographs of Mach - zehnder

4. 결론

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 가시화 하기 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 발견되었으며 발열량이 증가할 수록 시간에 따른 등밀도선의 변화가 커지는 비정상성을 보였다. 이러한 현상에 대해서는 차후에 여러 가지 조건에 대한 수치해석 결과와 비교검토가 필요하다.

참고문헌

- (1) F.Penot and M.Parvolic, 1986, "Heat Transfer Analysis of Mixed Convection in a Heated Cavity", Proceeding of the 8th International Heat Transfer Conference, vol. 3, pp. 1419-1424.
- (2) H.Han, T.H.Kuehn, J.W.Ramsey, H.Liang and K.Elayed, 1991, "Turbulent Modeling of Airflow Patterns and Ventilation Effectiveness in a Half Scale Office Building", Proceedings of 12th AIVC Conference, vol. 3, pp. 1-8.
- (3) M.A.Joffe, 1996, "Chemical Filtration of Indoor Air an Application Primer," ASHRAE Journal, pp. 42-49.
- (4) C.K.Aidun, N.G.Triantafillopoulos, J.D.Benson, 1991, "Global Stability of a Lid Driven Cavity with through Flow Visualization Studies", Phys. Fluids A 3 (9), pp.141-151.
- (5) Y.H.Lee, C.S.Kim, D.H.Cho and J. W.Choi, 1994, "PIV Measurement of Cubic Cavity Driven 2-D Plane Poiseuille Flow", Proc. of the Third JSME-KSME Fluids Eng. Conf., pp.335-340.
- (6) 최장운, 이영호, 1996, "PIV에서의 계조치 상호 상관법 개발", 대한기계학회 추계학술대회논문집(II), pp.396-400
- (7) 최장운, 이영호, 1995, "PIV에서의 보간 방법의 적용", 대한기계학회 추계학술대회 논문집(II), pp.49-56
- (8) U. Grigull and W. Hauf, 1970, "Advances in Heat Transfer - Optical Method in Heat Transfer", Academic Press, New York, London, Vol.6, pp.134 ~ 312.