

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol.18, No.2, 1998

## 상부채널을 갖는 캐비티의 혼합대류 열전달에 관한 실험적연구

배석태

동명대학 기계과

### A Experimental Study on Characteristics of a Mixed Convection Heat Transfer in a Cavity with upper Channel

**Bae Suk-Tae**

*Tong-Myung college*

#### 요약

본 연구에서는 캐비티 상부에 작은 틈새를 두고 여기에 구동류를 흐르게 함으로써 캐비티 내부유동 특성을 주유동 방향에 대하여 고찰하였고 채택된 레이놀즈수에 따른 순간속도벡터와 시간평균 속도분포, 그리고 운동에너지를 구하였다. 또한 바닥면에서 공급되는 열유속의 변화에 따른 내부 유동장의 변화를 고려하여 캐비티 내부의 유동특성도 체계적으로 규명하였다. 캐비티 내부의 유동형태는 전체적으로 강제와류와 유사한 속도분포가 지배적이었다. 또한 바닥면이 가열될 경우에 열유속이 증가할수록 자연대류의 영향이 크게 나타났으며 발열량의 증가에 따른 부력의 영향이 크게 나타났다.

## ABSTRACT

In this study a channel cavity flow was performed. The channel has small size in the upper cavity region. At the gap is supplied by driven flow for Reynolds number. The experimental study was carried out in a channel cavity with square heat surface by visualization equipment with Mach-Zehnder interferometer and laser apparatus. Heat source was uniform heat flux(0.4W/cm<sup>2</sup>, 0.8W/cm<sup>2</sup>, 1.2W/cm<sup>2</sup>). When the bottom wall is heated, the tendency of natural convection flows are vigorous increasing heat flux.

## 1. 서론

전력소자에 있어서 1990년대 중반 이후 특징적인 것은 전철등의 초대형의 전력변환기를 제외하고 반도체 전력소자가 새롭게 개발되어 이용되고 있는 추세이다. 그 대표적인 경우로서 IGBT를 들수 있으며 기능이 확장된 만큼 주위의 온도가 성능에 미치는 영향이 매우 큰 단점으로 나타나고 있다. 또한 전자장비의 소형화, 집적화가 빠른 추세로 진행되고 있으므로 협소한 공간에 전력소자가 배치되고 이를 강제냉각하는 구조로 설계되고 있는 추세이다. 반도체 부품의 성능은 높은 온도에서 비교적 취약하므로 발열에 관련된 제반 문제는 기기의 신뢰성 확보 측면에서 해결되어야 할 과제이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 협소한 공간에 있는 발열부에서의 공기의 유동에 따른 유동특성과 이에 따른 영향이 평가되어야 하며 이는 공학적으로 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 이와 관련된 연구로서는 먼저 수치적 모델링<sup>(1),(2)</sup>을 통한 연구결과를 들 수 있다. 또한 이러한 구조는 채널캐비티<sup>(3),(4)</sup>와 같은 형태로 단순화 된다.

채널캐비티는 채널흐름 중의 한면에 캐비

티가 부착되어 있는 형태로서 엄밀하게 표현하면 채널흐름과 밀폐캐비티 유동이 합쳐진 복합 유동장으로 정의 할 수 있다. Lee등<sup>(5)</sup>은 래버린스 패키징을 단순화한 하나의 셀에 대하여 채널캐비티의 형태로 PIV기법을 사용하여 실험을 행하였다. 그러나 실제 작동매체인 공기를 대상으로 열전달 및 발열체 주위의 유동에 영향을 미칠수 있는 실험은 제반 계측여건의 한계로 점계측에 한정되고 있으며 전체 영역의 계측을 통한 실험적 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 이러한 점에 착안하여 작동유체를 공기로 하는 캐비티를 대상으로 유동에 따른 전열특성을 고찰하기 위하여 PIV<sup>(6),(7)</sup>에 의해 전유동장의 속도를 계측 하였고 또한 바닥면의 발열에 따른 영향을 고려하기 위하여 Mach-Zehnder 간섭계로서 등온영상을 촬영하여 그 결과 발열부의 온도증가에 따른 영향을 고찰하였다.

## 2. 실험

먼저 공기실험의 경우에는 별도의 실험장

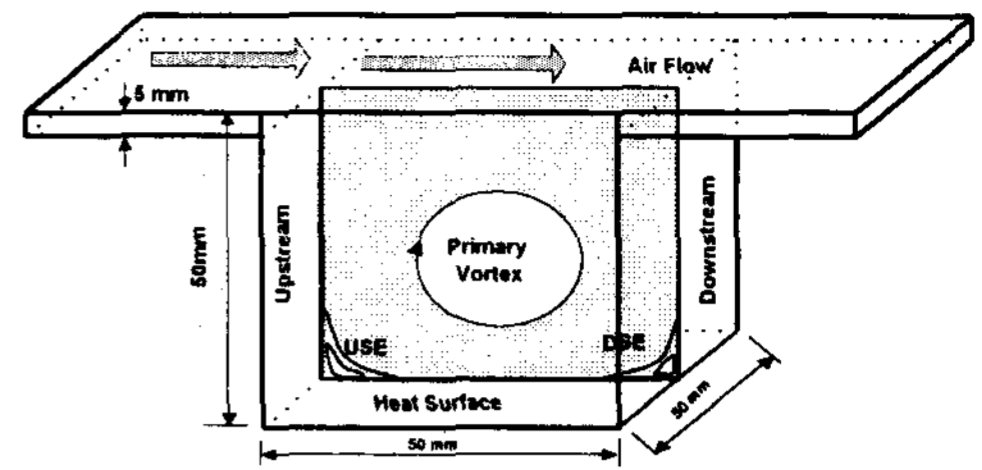
치를 제작하여 바닥으로부터 1m 전후의 높이에서 채널의 입구 측에 스모크 제너레이터를 설치하고 가시화 하였다.

입자로 사용된 연기는 주위공기와 함께 내경 5 mm, 길이 80 mm의 정류기를 거친 후 채널내부로 유입되어 시험부의 상부에 부착된 길이 400 mm의 소형 풍동에 의해 강제 배출된다. 이때의 공기유속은 열선유속계(Kanomax 7224)로 측정하였고 풍동에 부착한 팬의 공급전원은 정전압 및 정전류제어가 가능한 직류전원장치를 별도로 제작하여 사용하였다. Fig.1(a)와 Fig.1(b)는 공기실험에 사용된 유동장의 개략도와 발열체의 내부구조이다.

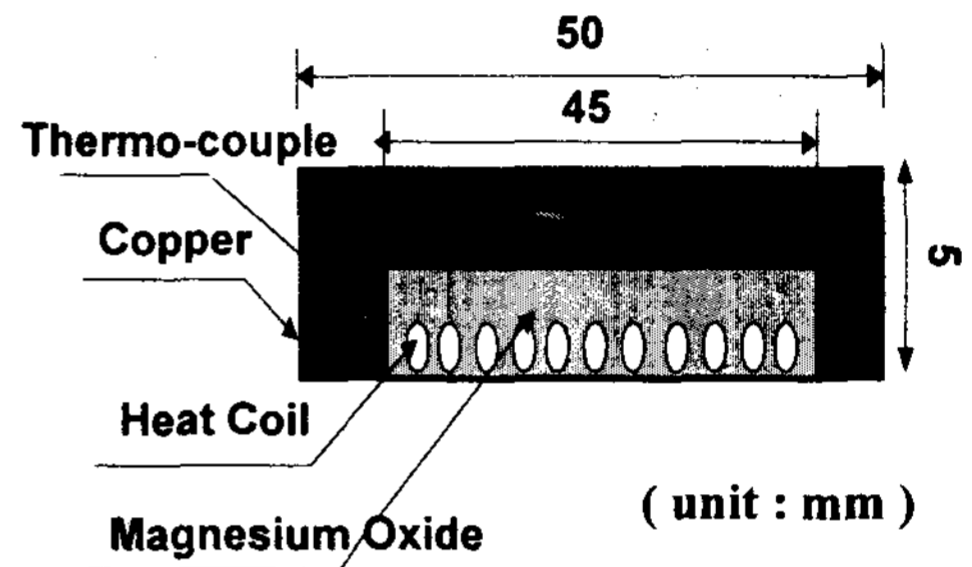
유동장의 전체 길이는 300mm이며 폭은 250mm이다. 실험 대상 유동장은 바닥면에 발열체를 부착하고 하부에 베이클라이트를 접착하여 단열이 되도록 하고 실험장치의 계측면은 5mm의 유리로서 제작하여 가시화에 적합하도록 하였다. 발열면은 가로와 세로가 각각 50mm 및 250mm의 크기이며 열전도율을 고려하여 황동을 허용공차 3/1000mm이내가 되도록 표면을 정밀 가공하여 사용하였다.

내부에는 니크롬선을 열원으로 하고 내부의 열전도를 원활하게 하기 위하여 열원체와 황동판 사이에 열 용량이 큰 마그네슘 옥사이드(Magnesium oxide)분말을 넣은 후 양단을 실리콘으로 밀봉하였다.

또한 내부의 공기를 일정하게 배출하기 위하여 별도의 풍동을 제작하여 이용하였으며 유동장의 좌측에 길이 225mm, 높이 100mm의 서랍식 개폐구를 양쪽에 장착하고 개폐정도를 조절하여 유속이 0.1m/sec로 일정한 조건에서 단위면적당 열유속을 0.4W/cm<sup>2</sup>, 0.8W/cm<sup>2</sup>, 1.2 W/cm<sup>2</sup>로 변화시키면서 내부 유동특성의 변화를 고찰하였다.



(a) Air Flow



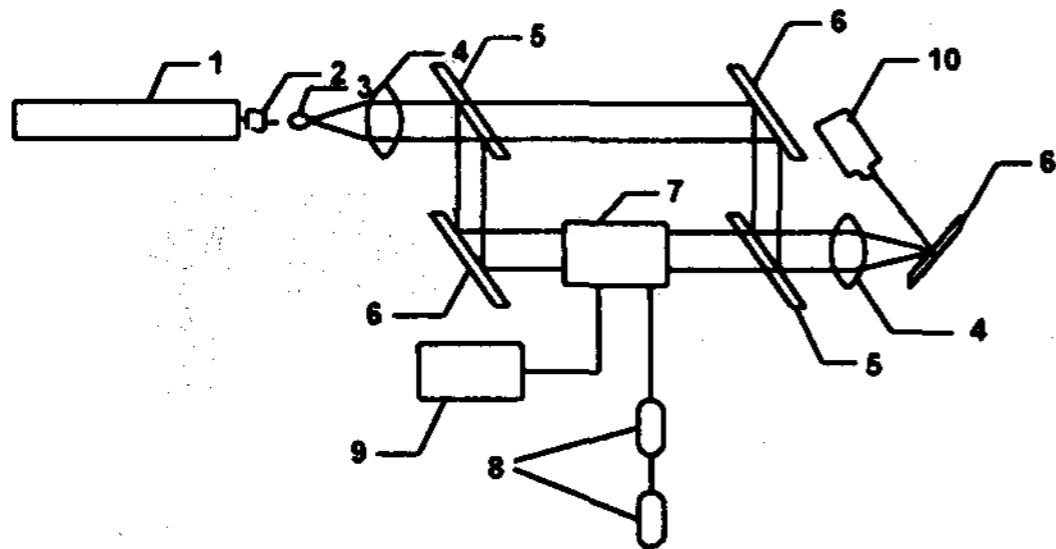
(b) Heat Source

Fig.1 Cavity Dimension

또한 Fig.2는 바닥면의 발열에 따른 영향을 고려하기 위하여 Mach-Zehnder간섭계로서 등온영상을 촬영 하였고 벽면온도 열전대는 벽면과 발열면에 각 6개를 부착하여 벽면온도를 측정하였다. 간섭영상의 기록을 위해 광원으로는 헬륨-네온 레이저(He-Ne laser : 5mW)를 사용하였다. 레이저광은 광확산렌즈 (beam expander lens)에 의해 확산되어 핀홀 (pin hole)을 통과한 후, 볼록렌즈(convex lens)에 의해 평행광으로 된다. 이 평행광은 반투과 거울(half reflection mirror)에 의해 목적광과 기준광으로 분리되어, 목적광은 시험부분을 통과한 후 다시 반투과 거울에서 주위공기를 통과한 기준광과 만나 간섭무늬를 형성한다. 무늬의 촬영은 간섭계를 수평으로 놓고 광원인 레이저 광속을 사용하여 무한대의

간섭무늬가 얻어지도록 조정한 후 시험부분을 광축에 평행하게 위치시켰고 셔터스피드 1/2000 프레임으로 하여 광축 방향에서 기록하였다.

발열체의 가열은 공급 전원량을 조절하기 위하여 직류 정전압 정전류장치에 의해 균일한 발열량을 유지하였으며 온도를 정상상태로 취하는데 요하는 시간은 30 분 전후가 소요되었다



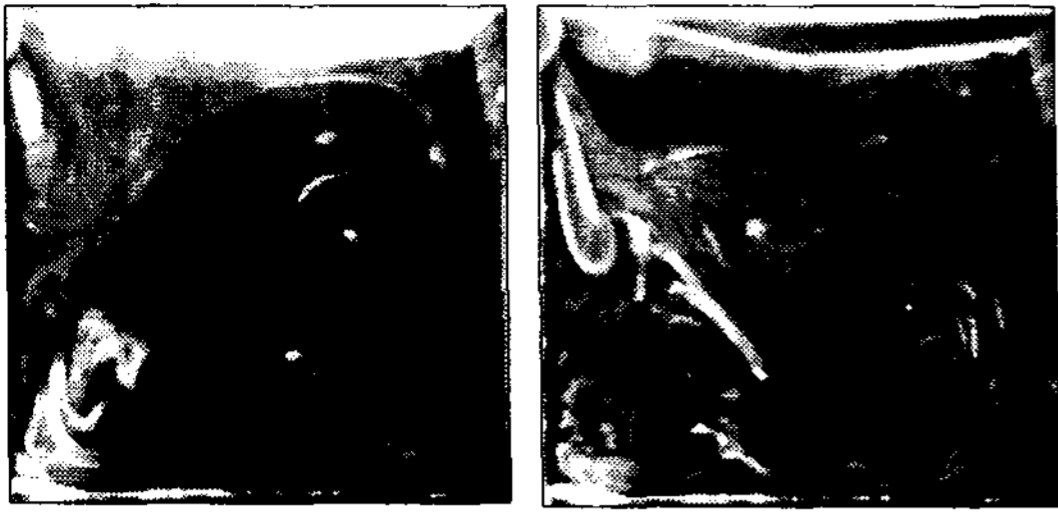
- |                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| 1: He-Ne laser            | 6: full reflection mirror |
| 2: beam expander          | 7: test apparatus         |
| 3: pin hole               | 8: voltage regulator      |
| 4: convex lens            | 9: thermometer            |
| 5: half reflection mirror | 10: long focus camera     |

Fig.2 Overall Experimental System for the Temperature Distribution Measurement

### 3. 실험결과 및 고찰

유동장의 속도는 동시다점 계측의 장점을 갖고 있는 2차원 PIV에 의해 구하였으며 이를 위한 원시영상처리는 디지털 영상처리방법에 의하였다. Fig.3은 상부의 구동류의 속도가 0.1 m/sec이며 하부 발열면의 발열량이 1.2W/cm<sup>2</sup>일 경우에 1/30 초 간격으로 4프레임의 영상을 보여주고 있다. 상부의 구동류는 거의 균일하게 입구에서 출구 측으로 빠져 나가며 일부는 포물선의 형태로 진행하다가 좌측벽면의 상부에 충돌하여 내부순환류에 혼합

되고 있다. 또한 이곳에서 부터 타원형의 와류가 주기적인 발달과 소멸을 반복하고 있다. 시간진행에 따라 좌측상부에서 발달한 와류는 전체적인 내부순환류에 큰 영향을 주고 있으며 이로 인해 일정한 주기를 갖는 비정상성이 나타나고 있다. 또한 하부바닥면의 근방에서는 발열의 증가에 따라 부력의 영향이 크게 나타난다. Fig.4는 Re=300의 경우에 유동장의 전체를 입의의 순간에 동시다점계측한 전체유동장의 순시속도벡터의 분포중 0.4 W/cm<sup>2</sup> 와 1.2 W/cm<sup>2</sup> 의 경우를 보이고 있다. 속도벡터의 격자 수는 40×40으로 하였으며 상관계수를 구하기 위한 탐색영역의 반경은 7픽셀이다. 상관영역의 크기는 40픽셀로 설정하였으며, 순간 유동장의 한프레임에 대한 처리시간은 펜티엄기종(CPU 90 MHz)에서 약 4 분이 소요되었다. 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. 발열량의 차이에 따라 1.2 W/cm<sup>2</sup> 의 경우 위로 상승하는 속도 벡터의 크기가 전반적으로 증가하고 있으며 0.4 W/cm<sup>2</sup> 에 비하여 매우 복잡한 유동특성을 보이고 있다. Fig.5는 시간 평균의 유동 특성을 알아보기 위하여 일정한 시간 간격으로 샘플링한 100회의 순간속도벡터를 산술 평균하여 나타낸 결과이다. 내부 순환류는 전체적으로 볼 때에 U자 형태의 유동패턴을 보이고 있으며 우측하부에는 주 순환류에 의한 2차 와류가 발생하고 있다. 바닥면의 발열에 따른 경향이 뚜렷한 층으로 보이고 있으며 상부의 중앙부에서 전단혼합현상도 잘 나타나 있다. 내부속도벡터의 평균 속도는 0.02 m/sec로 입구유속의 20%전후이나



(a)  $t=1/30$

(b)  $t=2/30$

좌측상부의 속도는  $0.07\text{m/s}$  에서  $0.09\text{m/s}$  전후이다. 이것은 열선유속계로 측정한 상부의 평균 유입속도에 근접한 것으로서 상부의 구동류의 일부가 캐비티내부로 포물선형태로 진행하면서 출구로 빠져나가기 때문으로 보여진다.

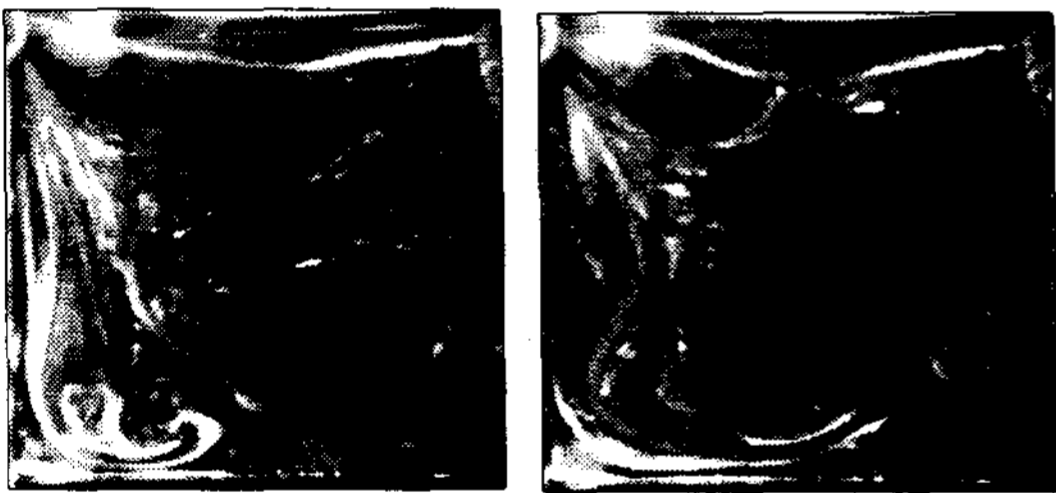
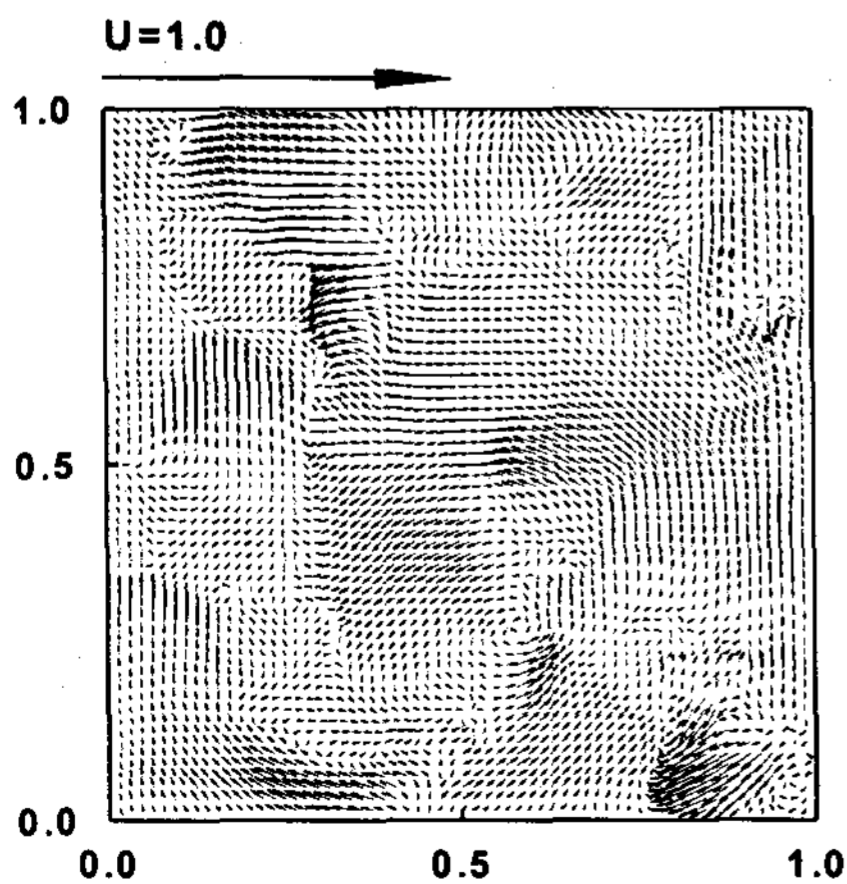
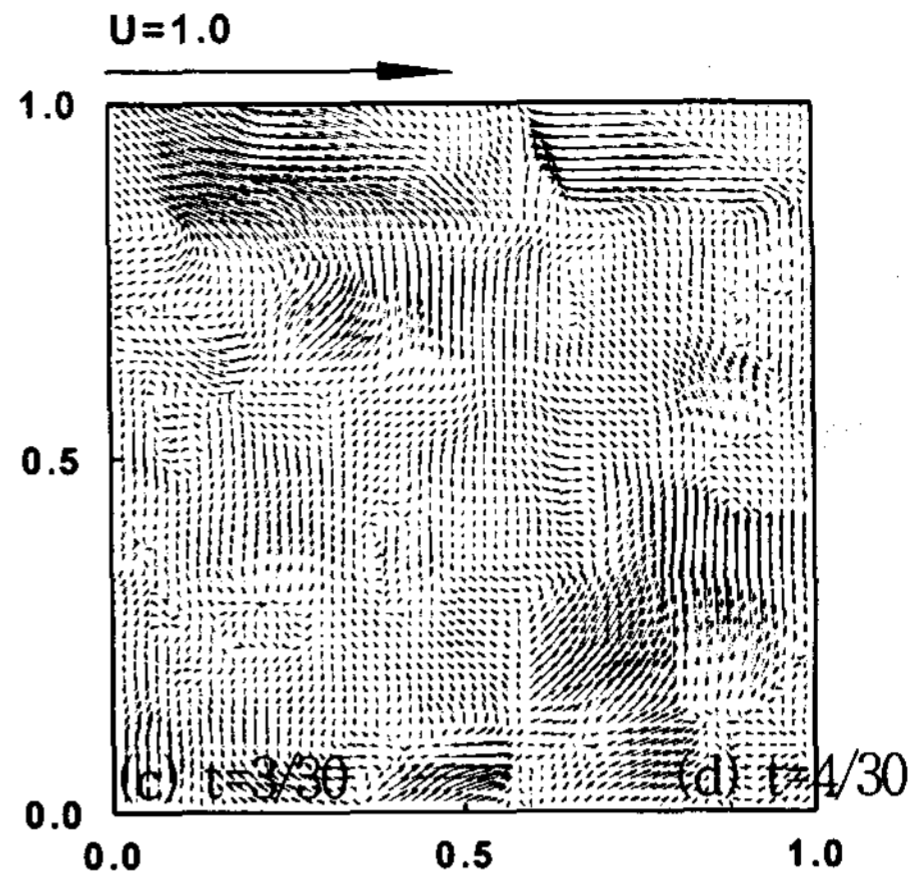


Fig.3 Instantaneous Flow Image at  $Re=300, Pr=0.71$



(a)  $0.4\text{W/cm}^2$



(b)  $1.2\text{W/cm}^2$

Fig.4 Instantaneous Velocity Distribution

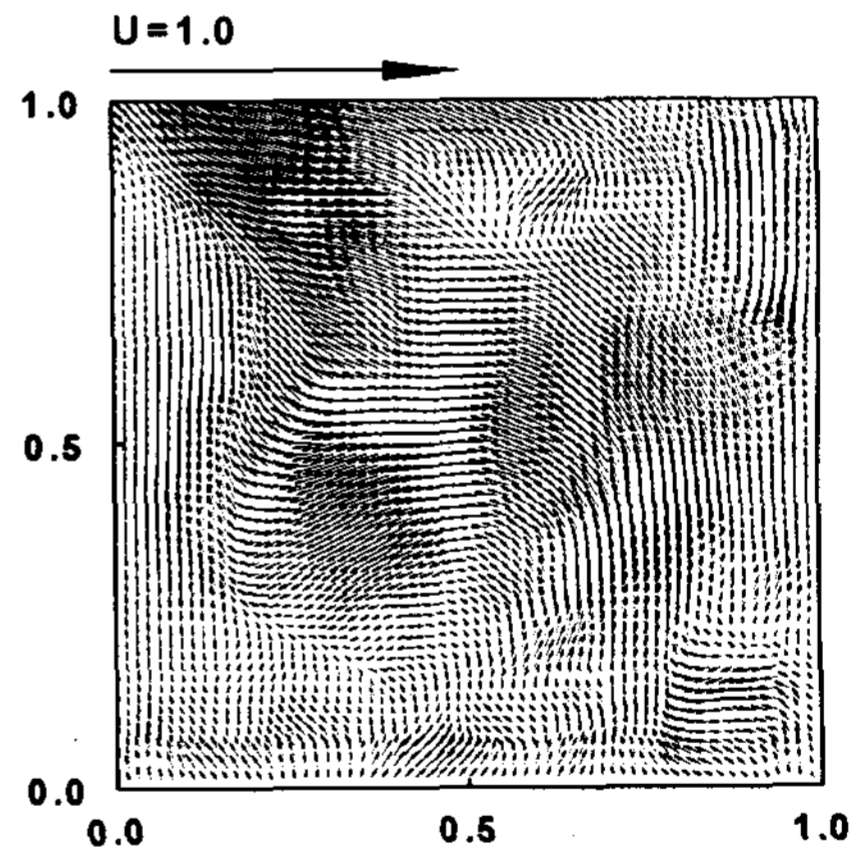


Fig.5 Time-mean Velocity Distribution

Fig.6은 시간평균의 속도벡터로부터 각 위치에서의 운동에너지를 구하여 3차원적으로 도시한 것이다. 바닥면의 균일한 발열의 영향과 내부유동에 따른 혼합대류의 특징이 잘 나타나 있으며 좌측벽면에 충돌한 구동류가 캐비티의 내부순환류와 혼합되는 영역에서 운동에너지의 분배구조를 잘 보여주고 있다. 우측상부의 굴곡이 심한

부분은 전단혼합 영역으로서 진행방향으로의 운동에너지는 많이 감소되어 있다.

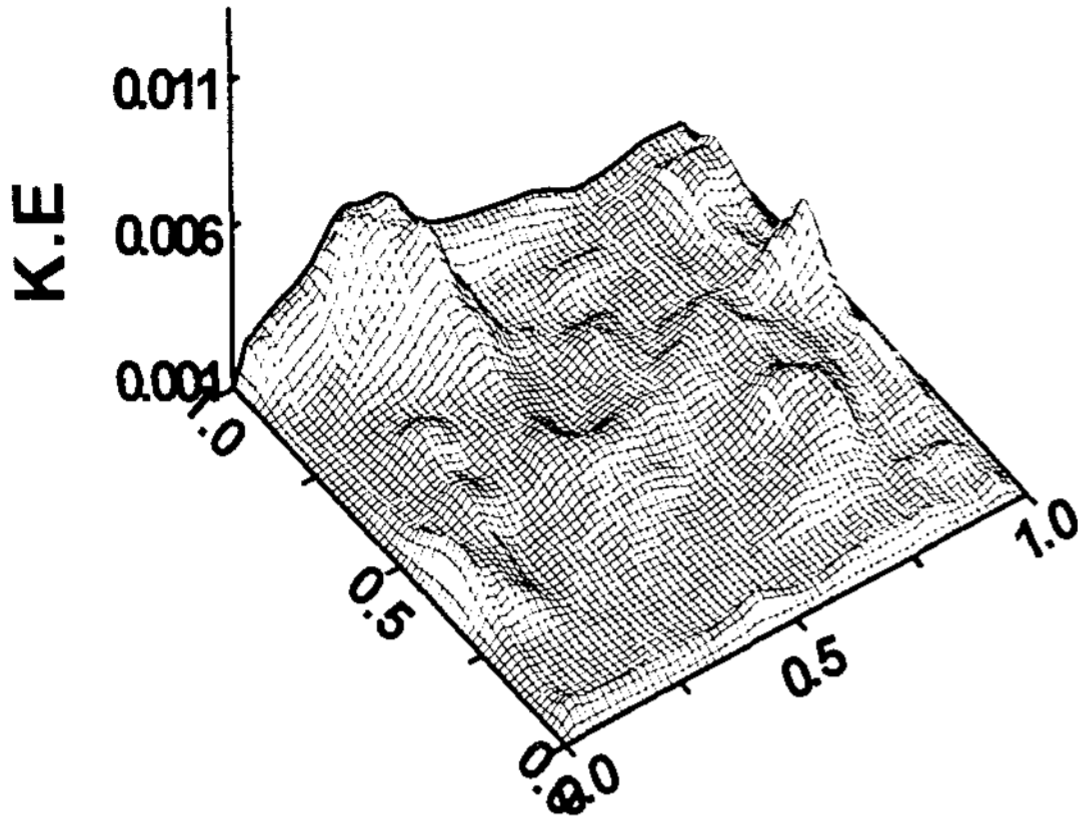


Fig.6 Time-mean Kinetic Energy Distribution

Fig.7은 바닥면의 발열에 따른 영향을 고찰하기 위하여 간섭계에 의한 캐비티의 좌측벽면의 온도를 가시화 실험시에 측정된 결과이다. 계측점의 간격은 6 mm간격의 7개소이며 상부로부터 벽면에 지름 1.5mm의 계측 홀을 뚫고 "K"형 열전대를 설치하였다. 그림에서 보면 바닥면의 발열량이 증가함에 따라 거의 균일하게 상승하며 바닥면에 근접한 면을 제외하고는 좌측벽면의 온도분포는 거의 일정함을 알 수 있다. 이것은 주순환류의 영향으로 좌측벽면의 경우 상부에서 하강하는 흐름의 영향으로 온도구배가 크지 않은 것으로 사료된다.

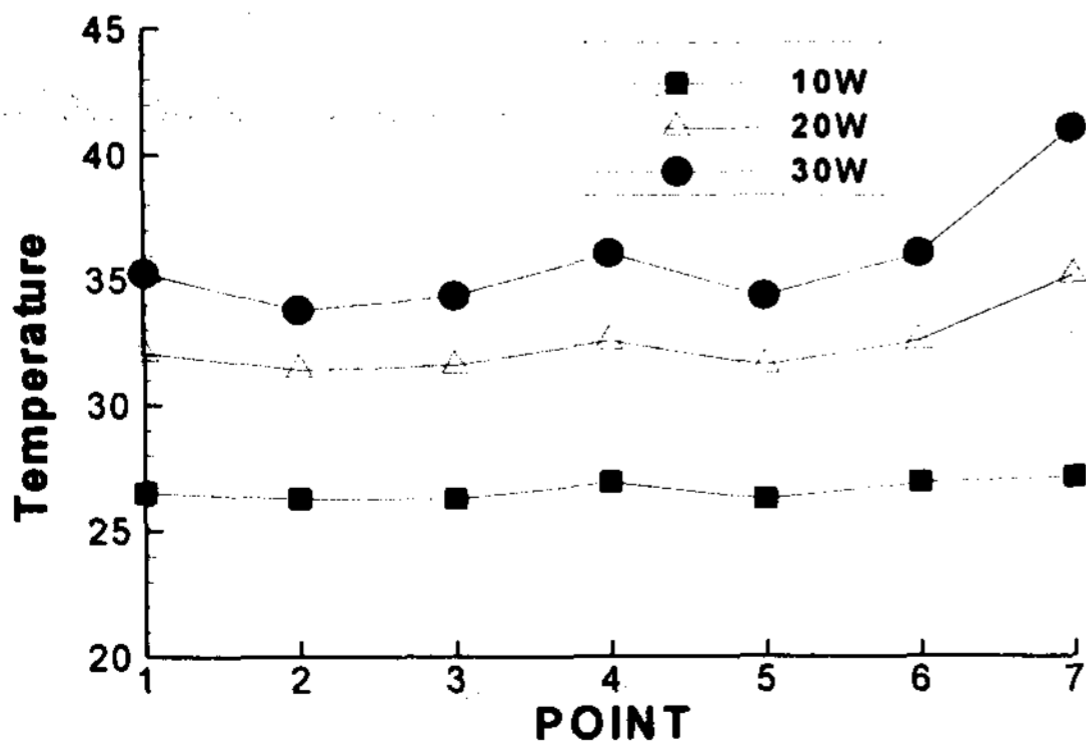
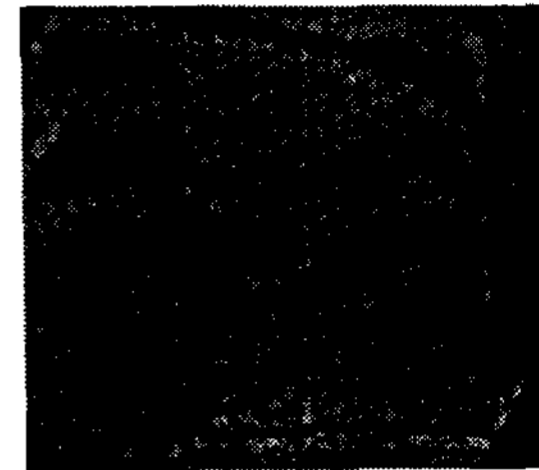
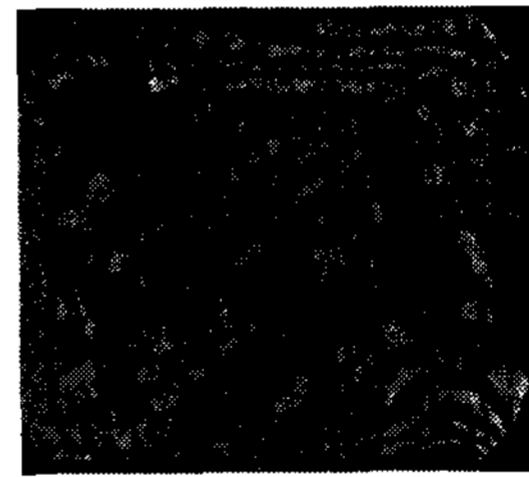


Fig.7 Surface Temperature Distribution

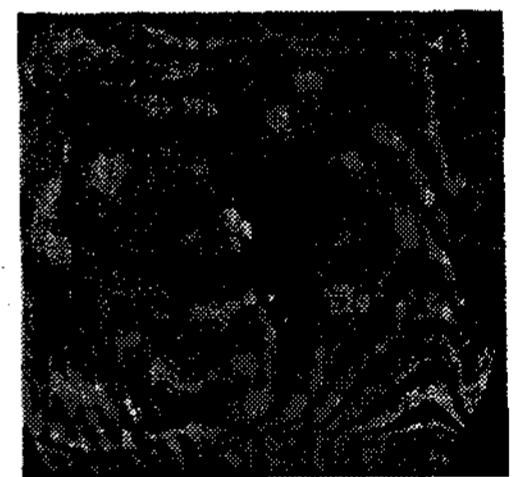
Fig.8은 사각공간 내에서의 바닥의 고온부로부터의 발열이 내부유동에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Mach-Zehnder간섭계를 사용하여  $Pr=0.71$ ,  $Re=300$ 의 경우에 대하여 하부 바닥 발열량이 변화할 때의 간섭무늬를 보여주고 있다. 발열량이 증가함에 따라 우측하부 모서리의 간섭무늬의 수는 증가하고 있으며 발열량에 따른 사각공간 내부의 온도분포를 잘 보여주고 있다.



(a) 0.4W/cm<sup>2</sup>



(b) 0.8W/cm<sup>2</sup>



(c) 1.2W/cm<sup>2</sup>

Fig.8 Photographs of Mach-Zehnder

#### 4. 자연대류영향

본 연구는 혼합대류이므로 유동의 특성을 살펴보기위해 무차원수인  $Ri$ (Richardson number)를 도입한다.  $Ri$ 는 부력에 의한 자연대류 현상을 나타내는 무차원수인  $Gr$  및 유동속도에 의한 관성력을 나타내는 무차원수인  $Re$ 의 비로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2}$$

혼합대류에서  $Ri$ 는 1이상이면 자연대류의 경향이 지배적이고  $Ri$ 가 1이하이면 강제대류가 지배적이다. 유속이  $0.4W/cm^2$ 에서  $Ri$ 는 12.4936,  $0.8W/cm^2$ 에서는 24.9872,  $1.2W/cm^2$ 에서는 37.4806이다. 이는 발열량이 증가할수록 자연대류의 영향이크게 나타나고 있음을 보여준다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 상부채널을 갖는 캐비티를 대상으로 PIV에 의해 속도를 측정하고 바닥면의 발열에 따른 영향을 고찰하기 위하여 발열량에 따른 내부의 온도분포를 간섭계를 사용하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 하부 바닥면의 열유속이 증가함에 따라 우측 하부로부터 온도구배가 커지고  $1.2W/cm^2$ 에서는 좌측 중앙부에 치우친 셀이 나타나고 있다. 이것은 구동류로 전달받은 전단응력의 대부분이 내부를 회전하는 회전에너지로 전환된 것으로 사료된다.
2. 바닥면이 가열될 경우에 채널캐비티 내부의 공기유동에 대하여  $Re=300$ 에서 발열량의 변화에 따른 PIV 실험 및 Mach-Zehnder 간섭계에 의한 간섭무늬를 얻은 결과 바닥면에서의 열유속이  $0.4W/cm^2$ ,  $0.8W/cm^2$ ,  $1.2W/cm^2$ 로 증가할수록  $Ri=12.4936$ ,  $24.9872$ ,  $37.4806$ 로 증가하여 자연대류의 영향이 크게 나타났으며 등밀도선의 변화가 커지는 현상을 보였다.
3. 시간진행에 따라 좌측상부에서 발달한 와

류는 전체적인 내부순환류에 큰 영향을 주고 있으며 이로 인해 일정한 주기를 갖는 비정상성이 나타나고 있다.

4. 구동류의 흐름 방향에 따라 입구에 인접한 좌측벽면의 온도 분포는 거의 일정한 반면 출구에 인접한 우측벽면은 발열량의 증가에 따라 부력의 영향이 크게 나타났다.

## 6. 참고문헌

1. 백창인외2인, 대한기계학회논문집, 제21권 제3호, 1997, pp.405-413
2. 박찬우외3인, 대한기계학회논문집, 제20권 제3호, 1996, pp.2277-2288
3. C.K.Aidun, G.Triantafillopoulos, J.D.Benson, "Pys. Fluids A 3 (9), 1991, pp.141-151
4. A. Huser, S. Biringen, "Calculation of Two-Dimensional Shear-Driven Cavity Flow at High Reynolds Numbers," Int., J. of Numerical Method in Fluids, Vol. 14, 1992, pp.1087-1109.
5. Y.H.Lee, C.S.Kim, D.H.Cho, J. W.Choi, Proc. of the Third JSME-KSME Fluids Eng. Conf. 1994, pp.335-340.
6. 최장운, 이영호, 대한기계학회 춘계학술대회, 논문집(II), 1995, pp.396-400.
7. 이영호, 대한기계학회지, 1996, 제36권 제12호, pp.49-56.

---

# A Experimental Study on Characteristics of a Mixed Convection Heat Transfer in a Cavity with upper Channel

**Bae Suk-Tae**

*Tong-Myung college*

## **ABSTRACT**

In this study a channel cavity flow was performed. The channel has small size in the upper cavity region. At the gap is supplied by driven flow for Reynolds number. The experimental study was carried out in a channel cavity with square heat surface by visualization equipment with Mach-Zehnder interferometer and laser apparatus. Heat source was uniform heat flux(0.4W/cm<sup>2</sup>, 0.8W/cm<sup>2</sup>, 1.2W/cm<sup>2</sup>). When the bottom wall is heated, the tendency of natural convection flows are vigorous increasing heat flux.