

# PIV計測에 의한 3次元 채널캐비티의 流動特性에 關한 研究

조 대 환<sup>1)</sup>, 이 영 호<sup>2)</sup>

## A Study on the Flow Characteristics of Three-Dimensional Channel Cavity by PIV Measurement

Dae-Hwan Cho, Young-Ho Lee

### Abstract

The present study adopted the PIV(Particle Image Velocimetry) to acquire multi point velocity data simultaneously. The system consists of an image grabber built-in a personal computer and a laser-based sheet light projector and particle identification softwares. The flow field is a channel cavity flow driven by the 2-dimensional Poiseuille flow. The identification method was two-frame grey-level cross correlation algorithm. Experiments were carried out for a channel cavity flow. Continuous shear stress is supplied by driven flow for Reynolds number( $Re$ , based on the cavity width and cavity inlet mean flow velocity :  $2.5 \times 10^3$ ,  $5 \times 10^3$ ,  $7.5 \times 10^3$  and  $10^4$ ) and three kinds of aspect ratios( $AR=1:1$ ,  $2:1$ ,  $3:1$ ). Velocity vectors are obtained by PIV and they are used as velocity components for Poisson equation for pressure. Related boundary conditions and no-slip condition at solid wall and the linear velocity extrapolation on the upper side of cavity are well examined for the present study. For calculation of pressure, resolution of grid is basically  $40 \times 40$  and 2-dimensional uniform mesh using MAC staggered grid is adopted.

The flow field within the cavity maintains a forced-vortex formation and

1) 한국해양대학교 기계공학과 박사과정

2) 한국해양대학교 이공대학 부교수

almost of the shear stress from the driving inflow is transformed into rotating flow energy. The size of the distorted forced-vortex increases with increment of Reynolds number and the migration of spanwise kinetic energy greatly affects the three-dimensional flow characteristics. The flow pattern do not differ significantly according to the aspect ratios and at the same Reynolds number, the size and position of the forced vortex maintains similar patterns. The instantaneous velocity profiles and pressure distributions show intense spatial fluctuation at the upper channel cavity. The pressure distribution result from the PIV-Poisson equation agrees well with the measured static tap-pressure at the wall.

## 1. 서론

입·출구를 갖는 공간에서 유입 및 유출흐름을 이용하여 내부유동을 제어하는 예<sup>1)-5)</sup>를 살펴 보면 실내 공조 환경이나 제지 및 필름 제조의 코팅공정, 대형계산기의 칩 냉각용 열 교환기, 기어펌프의 케이싱과 회전기어의 틈새, 그리고 전자부품 및 전자기기의 기판의 배열 등을 들 수 있다. 또한 이러한 유동장은 선박의 배관 계통이나 터보기계 등의 축밀봉에 사용되는 래버린스팩킹 등에서도 유사한 구조를 찾아볼 수 있다. 이와 같은 구조의 유동장은 입구에서 유입하여 출구측으로 흐르는 유동과 캐비티 내부흐름<sup>6)7)</sup>이 합쳐진 유동장이며 레이놀즈수가 증가할수록 유동패턴이 매우 복잡하게 된다. 3차원 채널캐비티는 이러한 유동장을 단순화 한 것이며, 캐비티의 상부 채널에 흐르는 구동류에 의해 전단응력이 내부로 전달되고 유동특성이 공간적으로 변화하게 된다. 따라서 공학적인 적용을 위해서는 구동류의 레이놀즈수 변화가 캐비티의 내부 유동에 미치는 영향과 종횡비(aspect ratio, 이하 AR)에 따른 내부 유동패턴 변화 및 장애물이 있을 경우와 내부의 발열면에 따른 영향 등이 종합적으로 파악되어야 한다. 캐비티 내부에서 발생하는 와류의 거동과 인접한 관련이 있는 벽면의 압력특성<sup>8)-10)</sup>까지 고려한 체계적인 검토가 필요하다.

본 연구에서는 채널캐비티 상부에 작은 틈새를 두고 여기에 구동류를 흐르게 함으로써 유동장에 전단응력이 공급되도록 하여 캐비티 내부유동 특성을 고찰하고자 하였다. 캐비티는 하부면의 높이를 조정될 수 있도록 하여 종횡비(1:1, 2:1, 3:1)를 각각 다르게 하고, 물과 공기를 작동유체로 하여 실험을 행하였다. 또한 바

단면이 가열되는 형태와 장애물이 있는 경우 까지를 고려함으로써 채널캐비티 내부의 유동특성을 보다 체계적으로 규명 하고자 하였다. 입·출구를 갖는 캐비티에 있어서 실제의 유동현상을 재현하기 위한 모델의 설계 및 제작이 우선적으로 중요하다. 환기구조에서 강제통풍의 경우 유동속도는 3 m/sec 전후이며 구조물의 특징에 따라 다양한 유동속도를 갖는다. 따라서 실험조건으로서 캐비티의 높이와 구동류의 단면평균유속에 의해 계산된 내·중류의 레이놀즈수( $2.5 \times 10^4$ ,  $5 \times 10^4$ ,  $7.5 \times 10^4$  그리고  $1 \times 10^5$ )를 채택하였다. 그리고 채널캐비티 내부에 장애물이 있을 경우의 영향을 파악하기 위하여 캐비티를 기하학적으로 4등분하여 좌측 하부에 각주를 두고 내부유동을 개측하였다. 또한 공기 실험에서는 바닥면이 가열되었을 경우 발열량을 다르게 하여 내부 유동 패턴을 검토하였다. 유동장의 속도는 동시 다점계측의 장점을 갖고 있는 2차원 PIV<sup>11,12)</sup>에 의해 구하였으며 이를 위한 원시 영상처리는 디지털 영상처리방법에 의하였다.

그 결과 유측면의 상부 측에서 스핀방향으로의 운동에너지의 이동이 크게 나타남으로써 3차원성이 강한 흐름이 지배적이며 상부의 구동류와 내부순환류가 순환하는 영역에서는 전단혼합 현상이 나타났다. 그리고 내부순환류는 쉘코리질 나일론의 강제와류의 형태를 보였으며 장애물이 있을 경우에는 영역별로 순환류가 다르게 나타났다. 또한 레이놀즈수가 증가할수록 전단혼합영역은 점차적으로 이동하였으며 구동류에 의해 주류방향으로 회전하는 주와류의 회전속도가 증가하였다. 또한 동일 레이놀즈수에서는 총회버기 거제도 그 영향이 캐비티의 높이를 기준으로 일정할 크기로 한정되는 결과를 보였다.

## 2. PIV 계측

그림 1과 그림 2는 PIV 실험장치의 개략도와 장치의 전경을 보이고 있다. 실험은 캐비티 하부에 설치된 소형 수조를 이용하여 작동유체를 펌프로 강제 순환시켜 행하였다.



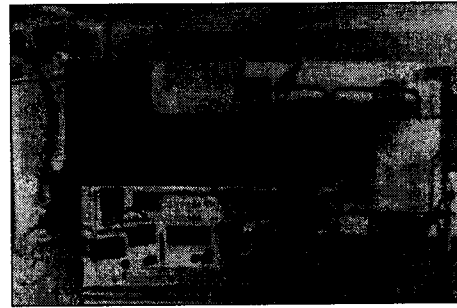
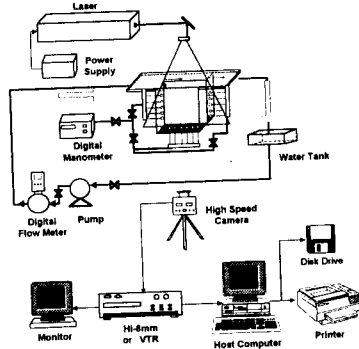


Fig.1 Schematic Diagram of  
Experimental Apparatus

Fig.2 Photo. of Experimental Apparatus

가로 700 mm, 세로 300 mm의 크기를 갖는 수조의 물이 소형 원심펌프를 통하여 출구 측에 설치된 디지털유량계를 연속적으로 통과하면서 평균유량이 측정되도록 하였다. 펌프의 최대유량은  $0.1 \text{ m}^3/\text{min}$ 이며 유량은 출구밸브를 이용하여 조절하였다. 그리고 실험장치의 입구에는 정류장치를 부착하여 입구 구간의 영향을 최소화하였다.

정압탭이 설치된 위치는 중앙단면(스팬방향의 중앙부,  $z=0.5$ )이고, 설치 간격은 15 mm이다. 좌우측 벽면과 하부면에 각각 9개가 설치되었으며, 시이트라이트가 조사되는 상부면은 중앙단면의 좌우( $z=0.47, 0.53$ )에 15 mm의 간격으로 9개를 설치하였다. 캐비티의 입구와 출구 측 채널에도 같은 간격으로 12개의 정압탭을 설치하여 벽면압력을 측정하였다. 직경 4 mm의 드릴로 벽면을 관통한후 길이 35 mm의 플라스틱 튜브를 삽입하고, 내경 4 mm의 비닐호스를 디지털 마노미터(OKANO사, Model : POP-503)까지 연결하였다. 미압계의 분해능(resolution)은 1 mmHg이며 측정범위는 0~2000 mmHg이다. 실험 시에는 유동장의 바닥면으로부터 1 m 떨어진 하부에 수평을 유지하게 고정된 다음 영점조정후 측정을 수행하였으며 미압계의 위치에 따른 수두차에 대해서 보정하는 방법을 택하였다.

대상유동장은 구동류가 흐르는 상부측과 캐비티의 내부로 구별되므로 측정된 유량에 의해 구해진 구동류의 단면평균유속과 캐비티의 폭을 기준으로 겉보기 레이놀즈수를 계산하여 측정결과를 상호 비교하였다.

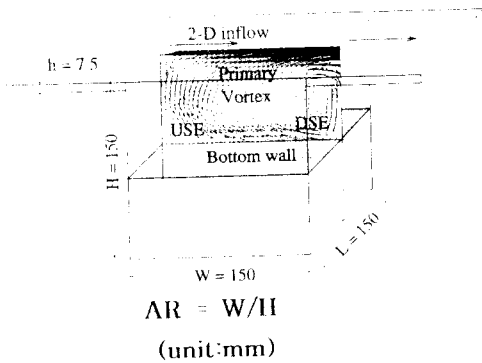


Fig.3 Cavity Dimension

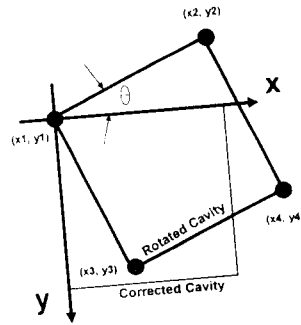


Fig.4 Rotated Angle of Cavity

그리고 이것과는 구별하여 구동류가 흐르는 평행판의 높이와 단면평균유속에 의해 계산된 레이놀즈수는 구동류의 레이놀즈수로 정의하였다. 또한 펌프의 출구 측에 디지털 유량계를 설치하여 캐비티의 유입유량을 측정하고 이를 이용하여 유동장입구의 단면평균유속을 계산하였다. 캐비티의 길보기 레이놀즈수는 유동장의 단면평균 유입속도와 캐비티의 높이로서 계산하여  $2.5 \times 10^4$ ,  $5 \times 10^4$ ,  $7 \times 10^4$  및  $1 \times 10^5$ 이다. 이때의 길보기 레이놀즈수는 캐비티 상부에 흐르는 구동류의 단면평균유속과 캐비티의 높이로 구하기 때문에 캐비티 상부에 흐르는 구동류의 유량을 측정하는 것은 중요하다.

유량측정은 디지털 유량계(ISOIL사, Model:MC108-G7)를 이용하였으며 유량계의 오차에 대한 검증은 내부의 구적이  $1040 \times 910 \times 1050$  mm인 입방형의 수조를 이용하였다. 유량계의 오차를 확인하기 위하여 임의의 시간동안 디지털 유량계에 의한 적산유량과 수조의 수위변화를 환산한 유량을 비교하는 방법을 택하였으며 그 결과  $1.7 \times 10^{-3}$  l/sec의 오차를 얻었다. 실험대상유체로서는 수소실험과 공기실험을 병행하였다. 공기실험의 경우에는 별도의 실험장치를 제작하여 바닥으로부터 1 m 전후의 높이에서 채널의 입구 측에 스모크제너레이터를 설치하고 가시화하였다. 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 3개의 팬의 공급전원은 정전압 및 정전류제어가 가능한 직류 전원장치를 별도로 제작하여 사용하였다.

그림3은 수조실험에 사용된 유동장의 상세한 규격을 보여주고 있다. 캐비티 본

체는 가로, 세로가 각각 150 mm이고 높이 200 mm의 장방형의 구조로서 캐비티의 하부면이 가변 될 수 있도록 하부에 지지대를 부착하여 고정하였고 수밀을 위하여 하부 판의 측면에 깊이 1 mm 홈을 2개소에 가공하고 여기에 고무팩킹을 삽입하였다. 폭이 "W"이고 높이가 "H"이면 종횡비는 W/H로 정의되며 폭 150 mm에 대하여 높이가 각각 50 mm, 100 mm 및 150 mm로서 선정된 종횡비는 1:1, 2:1 그리고 3:1이며 유동장의 재질은 가시화 실험이 용이하도록 두께 15 mm의 투명아크릴을 가공하여 제작하였다. 구동류의 레이놀즈수는 채택된 네 가지의 캐비티 레이놀즈수에 대하여 약 1,250, 2,500, 3,750 및 5,000이며 유입 대표속도는 각각 0.15 m/sec, 0.3 m/sec, 0.47 m/sec 및 0.63 m/sec 이다. 그리고 유동장의 입구 측에는 폭 150 mm, 높이 7.5 mm 그리고 길이가 750 mm인 유입평판을 두어 입구구간의 영향을 최소화 하고자 하였다. 캐비티의 상부에 흐르는 구동류는 내부의 유체에 일정한 전단속도를 공급하게 된다.

실험에서 사용한 고체 트레이서 입자는 직경 100  $\mu\text{m}$  전후의 Nylon12의 백색 구형입자를 이용하였다. 그리고 영상은 8mm의 캠코더를 사용하여 기록하였으며 고속의 경우 AOM을 이용한 CCD카메라와 고속도카메라를 병행하여 사용하였다. 고속도카메라(Photron사, 640x240픽셀, 흑백, 240 pps)의 경우 각 레이놀즈수 마다의 프레임 속도는 각각 60 pps( $Re=2.5 \times 10^4$ ), 120 pps ( $Re=5 \times 10^4$ ), 240 pps ( $Re=7.5 \times 10^4$  및  $10^5$ )로 선정하였다.

실험에 있어서는 먼저 측정하고자 하는 레이놀즈수에 대하여 유동장을 충분히 발달시킨 다음 입자를 유동장에 주입하여 유동장에 고루 분포시키고 캐비티의 영상을 8 mm캠코더로 비디오테이프에 기록하였다. 그리고 기록된 영상을 VTR에서 재생하여 영상신호를 컴퓨터에 내장된 이미지보오드의 외부 입력단자에 연결하고 이미지보오드를 구동하는 프로그램을 동작시키면 입력영상인 아날로그 영상 신호가 실시간으로 컴퓨터에서 처리 가능한 디지털영상신호로 바뀌어 컴퓨터의 RAM 또는 하드디스크에 순차적으로 저장된다. 이미지보오드에서 얻어진 디지털 영상을 PIV에 적용하기 위해서는 잡음제거와 회전보정등의 전처리 작업이 선행되어야 한다. 그림4는 촬영시 정확한 수평을 유지하기 어려워 발생한 오차성분을 회전보정하는 아편변환의 원리도이고, 그림5와 그림6은 가시화의 결과인 영상과 배경 영상을 보이고 있다. 잡음제거는 300개의 순간영상을 산술평균하여 얻어진 배경영상을 처리하고자 하는 영상으로부터 감산하는 방법을 채택하였다. 이를 이용하여 동일입자추적을 하게 된다.



Fig.5 Original Image

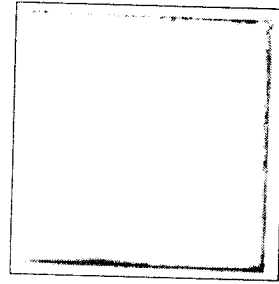


Fig.6 Background Image  
for Noise Reduction

상호상관 PIV에서는 제1프레임 상에서 속도벡터를 구하기 위한 가상격자의 중심  $(x, y)$ 의 원점을 벡터의 시점으로 하며 이 점을 중심으로 제2프레임 상에서  $M$ (또는  $N$ , 일반적으로는  $M=N$ )의 값으로 정의되는 탐색영역 반경내의 모든 픽셀의 위치  $(s, t)$ 에서  $(J \times K)$ 의 값으로 표시되는 상관영역에 대한  $\gamma(s, t)$ 의 값을 구한다. 다음으로 이 값들 중에서 최대치의 위치를 찾으면 이곳이 제2프레임에서의 벡터의 종점이 된다. 경험적으로 속도벡터를 구하기 위한 격자의 크기가  $(40 \times 40)$ 이며  $M=15$ ,  $J(=K)=45$ 로 하였을 때 Pentium(90MHz)상에서 식(2.4)<sup>16)</sup>을 이용하여 최대 CCC(cross correlation coefficient)를 구해 보면 FORTRAN의 최적화된 계산알고리즘에서 약 10분 정도가 소요된다.

$$\gamma(s, t) = \frac{\sum_x \sum_y [\bar{f}(x, y) - \bar{f}(x, y)] [w(x-s, y-t) - \bar{w}]}{\left\{ \sum_x \sum_y [\bar{f}(x, y) - \bar{f}(x, y)]^2 \sum_x \sum_y [w(x-s, y-t) - \bar{w}]^2 \right\}^{1/2}} \quad (1)$$

보통 탐색영역의 반경  $M$ 의 값은 전체 유동장의 최대속도를 고려하여 이보다 약간 큰 값을 취하며 상관영역의 크기  $J$ 는 이상치의 발생여부, 유동장의 공간해상도 등을 검토하여 경험적으로 설정한다. 이와 같은 값들의 설정은 실험초기에 측정영역의 크기 및 최대속도에 대한 사전지식을 가지고 결정하는 것이 합리적이다.

이와 같은 상호상관 PIV의 응용한 연구결과<sup>17)-20)</sup>는 지금까지 여러 유동장에 대하여 적용되고 있다.

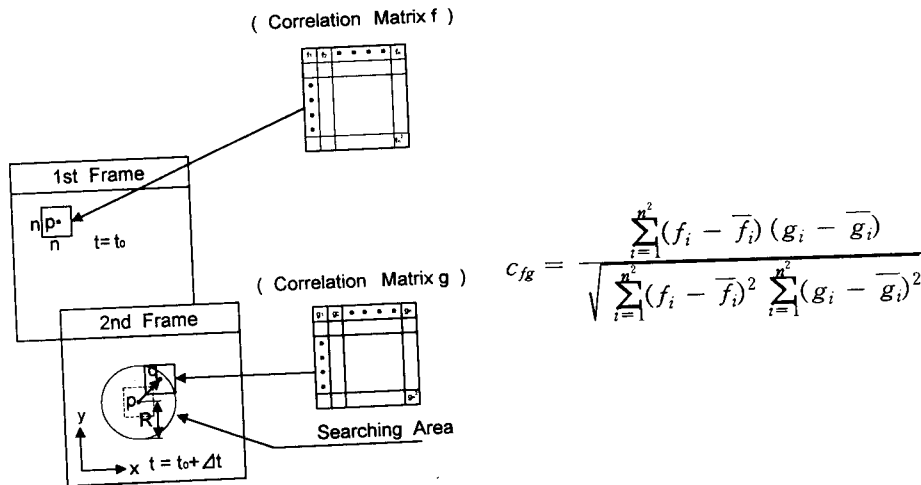


Fig.7 Principle of Grey-Level Cross Correlation Identification

그림7은 미소간격을 갖는 연속된 두 프레임의 영상을 이용하여 이들의 계조치에 대하여 상호상관계수를 이용하여 최대상관계수의 위치를 속도벡터의 종점좌표로 정하는 방법의 원리를 보여주고 있다. 단,  $(f_i, g_i)$ 는 상관영역내의 각 픽셀의 계조치를 나타낸다. 다음으로 계조치 상호상관법에서는 최대상관계수의 위치를 정수로 표시되는 픽셀값 이하의 정도로 정확하게 구하여야 한다. 즉 PIV의 다이내믹레인지 증가시키기 위해서는 이와 같은 서브픽셀 해상도문제를 해결하여야 하며 이것은 PIV의 계측성능을 크게 좌우한다. 특히 벡터의 시점과 종점간의 거리가 2-3픽셀이하인 경우에는 얻어진 벡터의 정도에 결정적인 영향을 미친다. 도심을 이용하는 경우에는 기법의 단순함이 장점으로 거론되고 있으나 오차가 증대하는 결점이 있다. 2차곡면 최소자승법은 이론적으로 가장 우수한 기법으로 평가되어 많이 채택되고 있으나 전제조건으로서 상관계수의 등고선 분포가 하나의 주봉을 중심으로 균일한 구배를 가져야 한다. 본 연구에서는 최소자승법을 이용하였다.

속도벡터의 격자수는  $50 \times 50$ 이고 상관계수를 구하기 위한 탐색영역의 반경은 7~10픽셀이다. 정방형의 상관영역의 크기는 35~50픽셀이며 하나의 순시 유동장에 대한 처리 시간은 펜티엄기종(CPU 90MHz)에서 약 2~3분이 소요되었다. 시간평균의 속도벡터를 얻기 위해서 동일 시간간격(1/3초)으로 저장된 연속된 100개의 영상을 순차 일괄 처리하여 산술 평균하였다.



### 3. 결과 및 고찰

그림8은 실험에 적용된 유동장에 대한 개략적인 유동형태를 보이고 있다. 채널 캐비티는 상부의 채널흐름과 이 채널흐름에 의해서 전단응력을 공급받는 캐비티의 복합유동장이다. 캐비티 내부에는 강제와류의 형태를 갖는 순환류가 있으며 캐비티의 상부에는 큰 속도구배에 따른 전단혼합층(sheared mixing layer)이 형성된다. 방개구동캐비티에 비해 투상적인 것은 내부의 순환류와 구동류가 혼합되는 전단혼합현상이 나타나고 있는 점이다. 또한 캐비티의 모서리 부분에서 작은 규모의 2차 와류가 나타나고 있다.

그림9에서는  $Re=2.5 \times 10^4$ 에 대한 순시의 속도벡터분포를 보이고 있다. 그림9(a)는 중형비가 1:1의 경우이며 그림9(b)와 그림9(c)는 중형비가 각각 2:1과 3:1이다. 상부의 속도는 대표속도이며 PIV 계측에 의해 얻어진 속도를 대표속도와 대표길이로 무차원화 하여 나타내었다. 중형비가 2:1과 3:1의 경우 캐비티의 크기에 따른 속도벡터를 대표길이를 대표길이로 하여 비교가 용이하도록 하였다. 캐비티의 좌측에서 유입된 구동류는 우측의 출구 층으로 이동하고 있으며 전단혼합영역은 출구 층에 근접하여 존재하고 있다. 캐비티상부에서 구동류의 일부는 다소 굴곡된 형태로 출구 층으로 진행하고 있으며, 구동류의 일부는 캐비티의 우측벽면근처에서 형성된 출구 공간 때문에 직진성을 잃어버리고 주와류의 회전 방향으로 이동하고 있다. 우측의 상부 벽면부근에서는 이와 같은 구동류의 상부부분에서 속도의

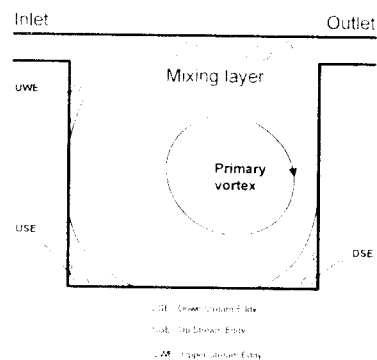


Fig.8 Schematic Definition of Channel Cavity

세기가 크게 약화된 공간분포 특징이 나타나고 있다. 이러한 현상은 앞에서 설명한 구동류의 충돌과 주 순환류의 유동혼합에 기인한 것으로 보이며 이 부분에서 주유동의 직각방향인 스핀방향으로의 운동에너지의 배분이 이루어지는 것으로 추정된다. 또한 바닥면에서 굴곡진 형태의 주 순환류의 배분이 나타나고 있다. 좌측 하부에서는 주 순환류에 의한 2차 와류가 나타나고 있으며 우측모서리에서는 스핀방향으로부터 유입된 흐름을 보이고 있다.

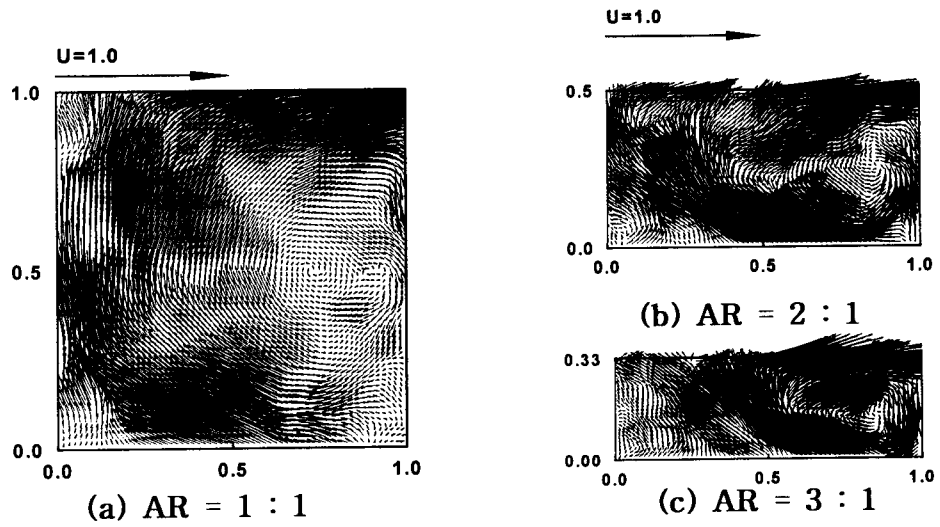


Fig.9 Instantaneous Velocity Vector Distribution at  $Re=2.5 \times 10^4$

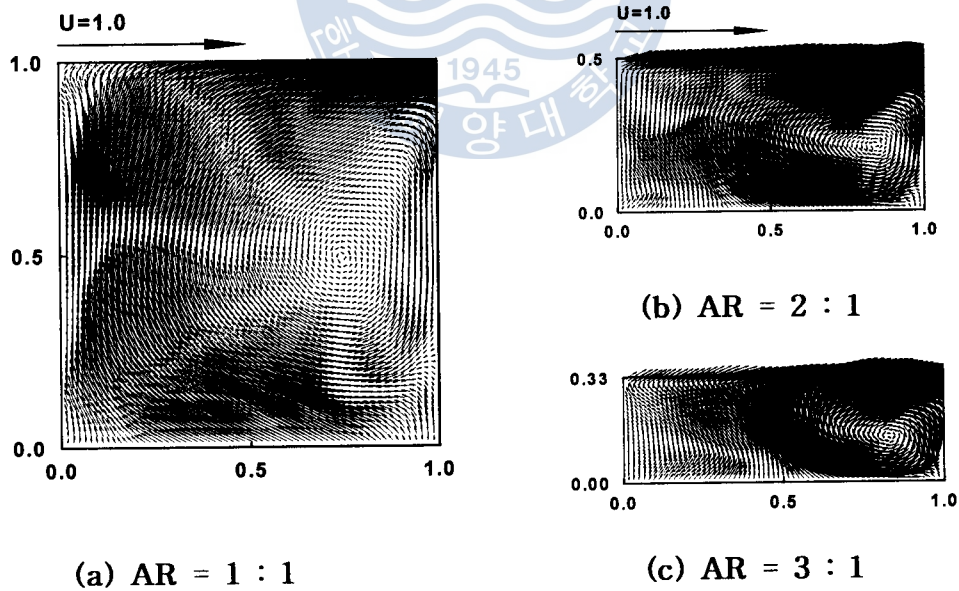


Fig.10 Time-mean Velocity Vector Distribution at  $Re=2.5 \times 10^4$

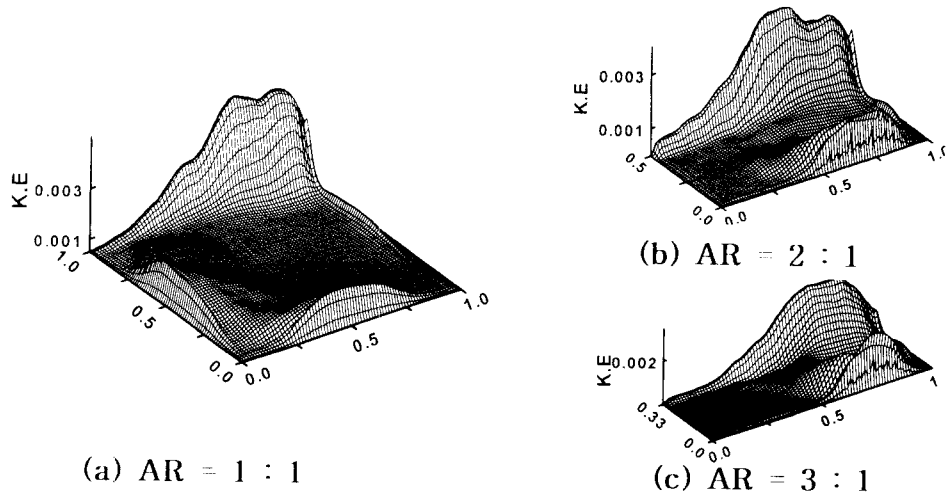


Fig.11 Distribution of Time-mean Kinetic Energy at  $Re = 2.5 \times 10^4$

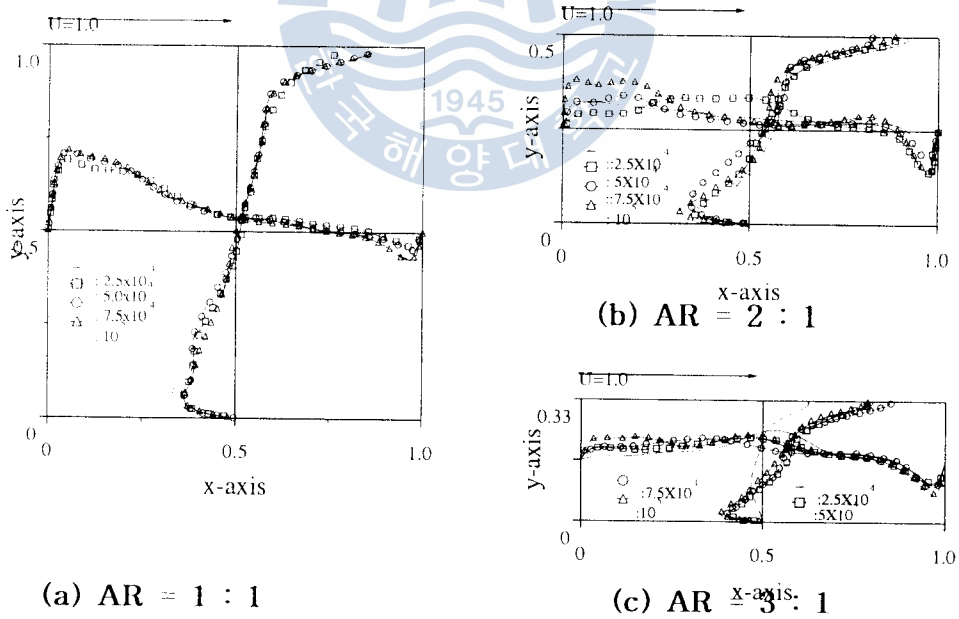


Fig.12 Time-mean Velocity Vector Profiles at Various Sections

이는 덮개 구동캐비티에서 나타나는 2차 와류 보다 큰 규모로 형성됨을 알 수 있다.

그림10은 시간 평균의 유동 특성을 알아보기 위하여 레이놀즈수  $2.5 \times 10^4$ 에 대해 기록한 영상을 연속적으로 재생하여 샘플링한 300회의 영상 중 3의 배수에 해당하는 영상을 선택하여 동일입자 추적을 행하여 얻은 순시 속도 벡터를 산술 평균한 결과이다. 그림10(a)은 종횡비 1:1에서의 경우이다. 전체적으로 순간의 속도 벡터분포와 비교하여 정연한 모습을 보이고 있으며 와류의 중심위치 등이 확연하게 나타나 있다. 계측결과는 대표속도에 의해 무차원화 하여 도시한 결과이며 좌측상부의 대표속도에 대해 내부속도벡터의 크기를 비례적으로 나타내었다. 대상유동장을 가로와 세로 축을 각각 4등분한 선상에서 수평과 수직 속도성분을 나타내었다. 상부의 전단혼합영역의 모습이 완화되고 있으며 좌측하부 모서리에서의 고차와류의 특징도 소멸되고 있다.

그림11은 순시속도벡터에서 각 위치의 운동에너지를 산술 평균하여 3차원적으로 도시한 시간평균의 운동에너지분포이다. 레이놀즈수에 따른 전체적인 캐비티 내부의 유동패턴은 가운데가 가라앉은 모습으로 유사함을 보이고 있으나 상부에 굴곡진 부분은 전단혼합 영역을 나타내고 있다. 그림 11(c)의 경우 캐비티 높이의 2배되는 부분에서 강제와류의 영향이 소멸되고 있음을 보이고 있다. 또한 그림 11(a)의 경우와 비교하면 내부의 운동에너지를 나타내는 세로축의 값이 대체로 유사하며 전체적인 분배구조를 잘 보여주고 있다. 종횡비 1:1에서 상부의 우측부근에서 굴곡진 형태를 나타내고 있다. 이 부분은 전단혼합층으로서 좌측에서 우측으로 진행되는 상부의 채널흐름과 내부를 순환하는 주와류가 충돌하는 영역이다. 이 부분에서 유동혼합으로 인한 운동에너지의 감소가 시간평균에서도 잘 나타나 있으며, 종횡비 3:1의 경우에는 우측벽면부근에서 주순환류의 영향이 보여고 있다.

그림12는 종횡비에 따른 속도분포를 보이고 있다. 시간평균의 데이터를 이용하여 수평 및 수직 속도성분을 각각 캐비티를 기하학적으로 8등분한 선상에서 채택된 네 종류의 레이놀즈수에 대하여 속도분포를 도시한 것으로 우측 상부의 기준 속도의 크기는 실제 속도의 값을 나타낸다. 세 종류의 종횡비에 따른 각 레이놀즈수의 수직 및 수평속도 성분을 겹쳐서 비교하여 보면 앞에서 언급한 강제와류의 위치와 레이놀즈수에 따른 경향이 잘 나타나 있다. 강제와류의 위치는 캐비티의 중앙단면에서 우측벽면 측으로 크게 치우쳐 있고 각부에서의 속도성분의 크기는 레이놀즈수가 증가함에 따라 거의 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 레이놀즈수가

$5 \times 10^4$ 을 넘어자면서 속도분포의 형상에서 변라점이 보다 많이 나타나고 있다. 이것은 유동장의 불안정성을 나타내는 기본적인 요소로서 난류유동을 촉진하는 특성으로 보여진다.

그림12(b)는 중형비 2:1의 경우로서 강제와류의 중심이 캐비티의 우측벽면 쪽으로 치우쳐 있고 그림12(a)에서도 유사한 경향을 보이고 있다. 강제와류의 형태는 타원형이며 좌측벽면의 주위의 유동도 내부를 순환하는 강제와류의 회전방향과 일치하고 있다. 이것은 앞에서 언급한 운동에너지의 분배 구조와 밀접한 관련이 있을 것으로 예상된다. 즉, 밀폐 캐비티의 경우에는 우측 벽면을 따라 내려오는 전단성분이 정연한 단계층을 이루면서 회전하며 이때의 전단성분은 상부 벽면과 운동에너지의 상당부분을 그대로 보유함으로써 흐름의 2차원성을 그대로 유지하는 반면 본 연구에서와 같은 개방형 캐비티에서는 전단층에서 발생한 다수의 와류가 우측벽면에 부딪치면서 에너지의 분배구조를 초래하기 때문으로 보여진다.

그림12(c)는 중형비 3:1의 경우를 보이고 있다. 캐비티 내부를 순환하는 흐름이 캐비티 내부의 일부에만 형성되고 있음을 알 수 있다. 이것은 내부의 강제와류의 크기가 구동류의 속도에 지배를 받으며 우측벽면에서 멀어질수록 세기가 약해지고 있음을 나타내고 있다. 이것은 상부의 구동류로부터 전달받은 전단에너지가 내부 분 강제와류를 형성하는 데 이용되기 때문으로 여겨진다.

시간에 관한 항이 나타나지 않는  $(\xi - \phi)$ 에서 압력에 관한 포와송방정식은 다음의 식으로 표시된다.

$$\nabla^2 p = S \tag{3.4}$$

$$S = 2 \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \tag{3.4}$$

포와송 방정식을 풀기 위해 벽면의 가상적자에서 압력 값의 정의는 MAC법에 서 제시한 대로 발산을 영으로 하는 기법을 택하고 SOR법을 사용하였으며, 여러 의 목적을 줄이기 위하여 4구역으로 나누어 각각 기하학적 중심으로부터 각각 밖으로 계산하였다. 경계조건은 원칙적으로 벽면에서는 부착조건(no-slip)을 적용하며, 구동류가 흐르는 상부의 경계에서의  $v$ 에 대해서는 슬립,  $u$ 에 대하여는 구동류의 단면 평균유속을 적용하여 인장유속조건으로 가상셀에서  $u$ 속도를 구하였다. 캐비티의 상부의 경계를 중심으로 바로 위 및 아래의 각각 하나의 셀에 대해서만 내부의 속도 값을 이용해서  $u$ 속도를 테일러의 일차식을 이용해 외삽하는 방식을

택했다.

그림13은 시간평균 속도성분을 이용하여 프와송 방정식에 적용하여 구한 시간 평균의 압력공간 분포를 3차원적으로 도시하고 있다. PIV에서 얻은 속도성분을 앞절에서 제안된 기법을 적용하여 압력분포를 구하였다. 압력분포는 속도분포나 유선도와 함께 유동장의 특성을 잘 나타낼 수 있다. 유동의 안정성 해석의 관점에서 흐름방향으로의 압력구배 및 와류의 존재에 의한 공간 압력분포의 변동특성 해석이 필요하다. 유동장의 상부에서는 캐비티의 아래에서 위로 회전하면서 접근하는 주와류와 구동류가 만나는 부분에서 압력이 다소 증가함을 보이고 있다. 여기서 구동류의 진행방향으로 감소를 보이다가 오른쪽 상부모서리에서 정지벽면에 이르면 일종의 정체점에서와 같은 급격한 압력증가현상을 나타내고 있다.

그림14는 실험에서 정압탭에서 측정한 압력과 PIV에서 얻어진 속도성분을 프와송방정식에 적용하여 계산한 압력의 상호 비교를 위하여 좌 우측 및 바닥면에 대하여 각 레이놀즈수 별로 겹쳐 도시한 것이다.

$$C_p = \frac{(P - P_{ref})}{\frac{\rho U^2}{2}} \quad (3.5)$$

$C_p$ 는 압력계수이며 유량에 의해 환산된 단면 평균유입속도와 정압탭에서 측정한 압력 성분을 이용하여 계산하였으며  $P$ 는 정압이다. 그리고  $P_{ref}$ 는 PIV-Poisson의 값과 비교하기 위하여 대기압으로 설정하였고  $U$ 는 대표속도로서 구동류의 단면평균속도이다.  $Re=5 \times 10^4$ 를 제외하고는 형태는 유사하나 각 레이놀즈수에 따라 다소의 차이를 보이고 있다.

전체적인 유동패턴은 캐비티의 중심을 기준으로 이사분면에 강제와류의 형태를 갖는 주와류가 존재하고 이는 레이놀즈수가 증가함에 따라 사사분면으로 확대되고 있으며, 또한 이사분면과 사사분면에서는 주와류에 의한 2차 와류가 발생되어 있다. 그리고 입구 구동류와 주와류가 충돌하는 영역에서 상부 구동류와 캐비티 내부의 유동이 만나는 점에서 전단 혼합영역이 나타나고 있다. 이 영역에서 발생한 와류(eddy)들은 출구 측으로 연속적으로 진행하며 일부가 우측 벽면에 부딪쳐 주와류에 혼합되고 있다.

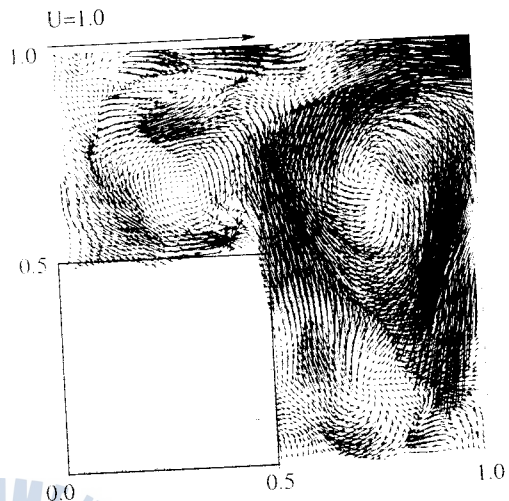
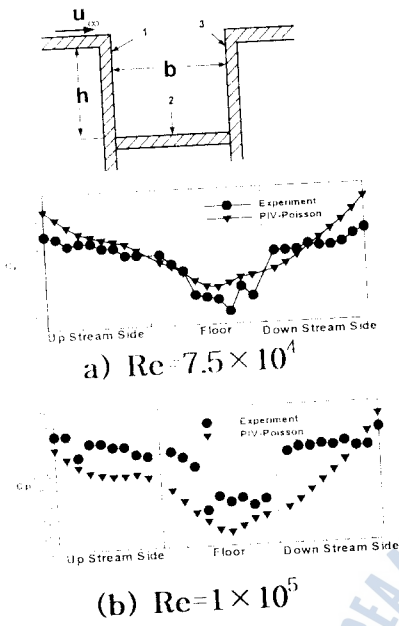


Fig.14 Comparison of Wall Pressure between PIV-Poisson and Experiment (Re=2.5x10<sup>4</sup>, 5x10<sup>4</sup>, 7.5x10<sup>4</sup>, 10<sup>5</sup>)

Fig.15 Instantaneous Velocity Distribution ( $Re=5 \times 10^4$ )

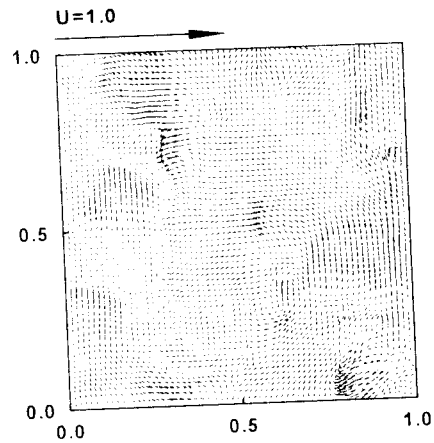
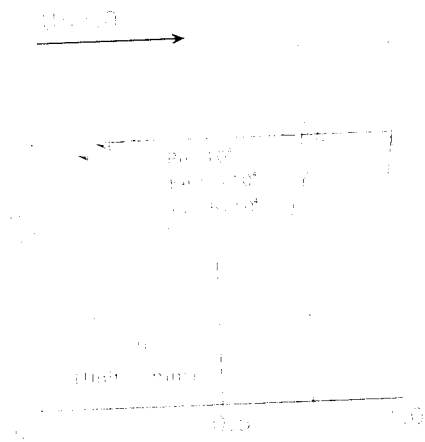


Fig.16 Velocity Profiles at Two Sections

(a) 10W

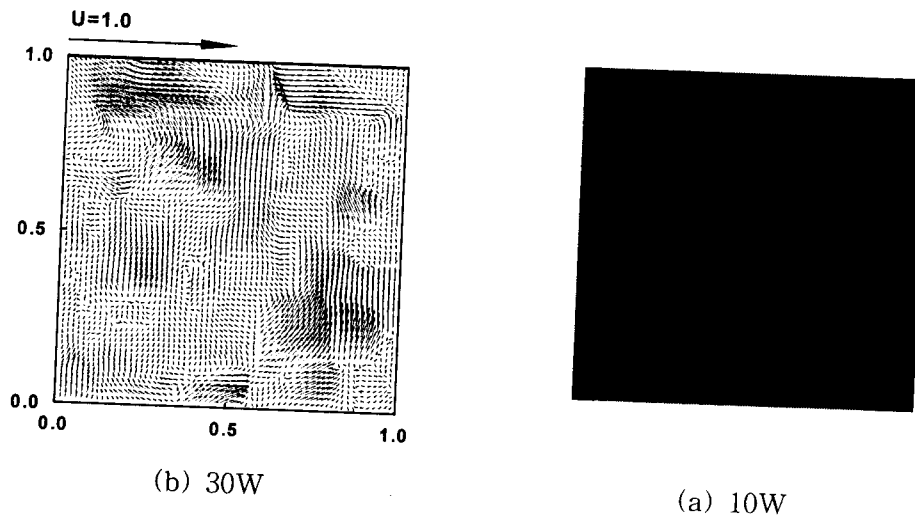


Fig.17 Instantaneous Velocity Distribution



Fig.18 Photographs of Mach-Zehnder

그림15는 이와 같은 현상을 나타내는 순간의 속도벡터이다. 이 그림에서 레이놀즈수가 증가할수록 주와류가 강제와류의 형태를 가지면서 변화하는 유동패턴을 잘 나타내고 있다. 일사분면에 국한하여 일그러진 형태의 강제와류가 존재하며 와류의 중심을 기준으로 한 속도분포는 유동장의 운동에너지가 회전에 의해 변화하는 특성을 잘 보여주고 있다. 또한 와류의 중심은 좌측방향으로 약간 치우쳐서 회전하고 있으며, 이는 캐비티의 상면에서 공급되는 주류회전방향의 전단응력이 충분하지 못하여 우측의 벽면 경계 층에서 스펀방향으로의 운동에너지분배가 있음을 나타내고 있다. 그리고 각주 상부에 세력이 약한 2차 와류가 발생하고 있으며



우측하부에도 작은 규모의 2차 와류가 발견되고 있다. 이러한 강제와류의 경향은 상부에서 공급된 전단응력은 대부분 회전 운동에너지로 바뀌고 있음을 나타내고 있다. 그리고 상부의 전단혼합층은 보다 심한 불복을 보이고 있다. 이러한 유동특성은 본 연구에서 채택한 2차원 평면 Poiseuille류에 의한 전단구동 캐비티의 독특한 특징으로 여겨진다.

그림16은 시간평균의 데이터를 이용하여 수평 및 수직 속도성분을 이사분면을 기준하여 4등분한 선상에서 표시한 결과이며, 실선중 수평선은 u속도분포를, 수직선은 v속도분포의 기준선을 보이고 있다. 상부의 대표속도의 크기는 실제 속도의 값을 나타낸다. 속도분포의 형상을 보면 번복집을 다수 갖는 매우 불규칙한 특성을 나타내고 있다. 이것은 경계층에서 나타나는 박리현상과 같이 유동장의 불안정성을 초래하는 기본적인 요인이며 결국 이와 같은 불규칙한 속도분포는 난류유동을 촉진하는 특징으로 보여진다. 난류현상을 포함한 본격적인 유동해석을 위해서는 이리 단면에 대한 속도계측과 체계적인 고찰이 필요하다.

그림3.17은  $Re=300$ 의 경우에 유동장의 전체를 임의의 순간에 동시다점계측한 전체유동장의 순시속도벡터의 분포중  $0.4 \text{ W/cm}$  와  $1.2 \text{ W/cm}$ 의 경우를 보이고 있다. 속도벡터의 격자 수는  $40 \times 40$ 으로 하였으며 상관계수를 구하기 위한 탐색영역의 반경은 7픽셀이다. 상관영역의 크기는 40픽셀로 설정하였으며, 순간 유동장의 한프레임에 대한 처리시간은 펜티엄기준(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  $1.2 \text{ W/cm}^2$ 의 경우 위로 상승하는 속도벡터의 크기가 전반적으로 증가하고 있으며  $0.4 \text{ W/cm}^2$ 에 비하여 매우 복잡한 유동특성을 보이고 있다.

바닥면의 발열에 따른 영향을 고려하기 위하여 Mach-Zehnder간섭계로서 동온영상을 촬영하였고 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 기울(half reflection mirror)에 의해 목적광과 기준광으로 분리되어, 목적광은 시험부분을 통과한 후 다시

반투과 거울에서 주위 공기를 통과한 기준광과 만나 간섭무늬를 형성한다. 무늬의 촬영은 간섭계를 수평으로 놓고 광원인 레이저 광속을 사용하여 무한대의 간섭무늬가 얻어지도록 조정을 한 후 시험부분을 광축에 평행하게 위치시켰고 셔터스피드 1/2000으로 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.

그림 18은 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.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 캐비티의 상부에 구동류가 흐르는 채널캐비티를 대상으로 PIV에 의해 속도를 측정하고 정압탭에서 압력을 측정하여 내부유동 특성을 고찰하였다. 채택한 레이놀즈수는 네 가지이며( $2.5 \times 10^4$ ,  $5 \times 10^4$ ,  $7.5 \times 10^4$  그리고  $10^5$ ) 종횡비는 1:1, 2:1 및 3:1의 3가지이다. 또한 PIV에 의해 얻어진 속도벡터를 격자보간한 다음 압력에 관한 프와송방정식에 의해 압력을 계산하고 측정결과와 비교하였으며 내부에 장애물이 있는 경우와 바닥면이 가열될 때의 유동특성을 고찰하였다.

그 결과 캐비티 내부의 유동형태는 전체적으로 강제와류와 유사한 속도분포가 지배적이며 구동류로부터 전달받은 전단응력의 대부분이 캐비티 내부를 순환하는 회전에너지로 전환되었다. 그리고 캐비티 내부의 찌그러진 타원형태를 유지하는 강제와류의 크기는 레이놀즈수의 증가에 따라 증가하였으며 스핀방향으로의 운동에너지의 이동이 크게 나타남으로서 좌측상부에서 유출되어 바닥면의 모서리측면으로 유입하는 3차원성이 강한 흐름을 보였다. 종횡비에 따른 유동패턴은 대체로 유사함을 보였으며 동일 레이놀즈수에서는 각기 다른 종횡비에서도 강제와류의 위치와 크기가 캐비티의 높이를 기준으로 무차원화 하였을 때 일정한 크기로 나타났다. 또한 PIV에 의해 얻어진 속도성분을 프와송방정식에 적용하여 구한 압력분포는 정압탭에서의 압력을 미압계로 측정한 실험결과와 유사한 결과를 나타

내었다. 장애물이 있을 경우에 채널캐비티 내부의 유동패턴은 장애물의 상부와 우측에 순환류가 약간 나타났으며 레이놀즈수의 증가에 비례하여 세기가 증가하였으며, 바닥면이 기열될 경우에 채널캐비티내부의 공기유동에 대하여  $Re=300$ 에서 발열량의 변화에 따른 PIV 실험 및 Mach-Zehnder간섭계에 의한 간섭무늬를 얻은 결과 바닥면에서의 열유속이 증가할수록 자연대류의 영향이 크게 나타났으며 등방모질의 변화가 커지는 비정상상태를 보였다.

구동유에 의한 캐비티흐름에서 TGL외류와 관련된 실험적 연구와 3차원 CFD결과와의 비교·검토연구는 다음의 연구과제로 남기기로 한다.

## 참 고 문 헌

1. R.J.Adrian, "Limiting Resolution of Particle Image Velocimetry for Turbulent Flow," Proc. Advances in Turbulence Research, POSTEC Pohang Korea, 1995, pp.1-19.
2. C.K.Aidun, N.G.Triantafillopoulos, J.D.Benson, "Global Stability of a Lid driven Cavity with Throughflow: Flow Visualization Studies," Phys. Fluids A 3 (9), 1991, pp.141-151.
3. 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.
4. Y.H. Lee, C.S.Kim, D.H.Cho, J.W.Choi, "PIV Measurement of Cubic Cavity Driven by 2 D Plane Poiseuille Flow," Proc. 3rd J/KSME Fluids Eng. Conf., JSME-KSME, 1994, pp.335-340.
5. G.Mansell, J.Walter, E.Marschall, "Liquid-Liquid Driven Cavity Flow," J. Comput. Phys. 110, 1994, pp.274-284.
6. A.K.Prasad, J.R.Koseff, "Reynolds Number and End-wall Effects on a Lid Driven Cavity Flow," Phy. Fluids A 1(2), Feb. 1989, pp.208-217.
7. J.R.Koseff, R.L.Street, "The Lid Driven Cavity Flow : A Synthesis of Qualitative and Quantitative Observations," Trans.ASME, J. of Fluids Eng. Vol.106, 1984, pp.390-398.
8. K. Imaichi, K. Ohmi, "Numerical Processing of Flow-Visualization

- Pictures-Measurement of Two-Dimensional Vortex Flow," J. Fluid Mech. Vol. 129, 1983, pp.283.-311.
9. J.Massons, J.Gavalda, F.Diaz, "Image processing of Cylinder Wake Generation," Phys. Fluids A 1(8), 1989, pp.1415-1423.
  10. 최장운, 이영호, 김춘식, "PIV에 의한 벽면압력분포의 추정," 대한기계학회 춘계학술대회논문집2, 1994, pp.346-350.
  11. R.J.Adrian, Multi-point optical Measurements of Simultaneous Vectors in Unsteady Flow-a Review, Int. J. Heat & Fluid Flow, Vol.7 No.2, 1986, pp.127-145.
  12. L.Hesselink, Digital Image Processing in Flow Visualization, Annu. Rev. Fluid Mech. Vol. 20, 1988, pp.421-485.
  13. R.J.Adrian, "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics," Annu. Rev. Fluid Mech., Vol.23, 1991, pp.261-304.
  14. P.Buchhave, "Particle Image Velocimetry - Status and Trends," Exp. Ther. and Fluid Sci. Vol. 5, 1992, pp.586-604.
  15. C.Gray, "The Evolution of Particle Image Velocimetry," Proc. of Optical Methods & Data Processing in Heat and Fluid Flow, I.Mech.E., 1992, pp.19-36.
  16. R.C.Gonzales and R.E.Woods, Digital Image Processing, Addison-Wesley Pub. 1992.
  17. 양창조, 김성동, 조대환, 이영호, "단순장애물을 갖는 입방형 채널캐비티의 PIV 계측," 대한기계학회춘계학술대회논문집, 제2권, 1997, pp.287-292.
  18. 이철재, 권순석, 정한식, 조대환, 이영호, "PIV와 간섭계를 사용한 캐비티의 공기유동에 관한 실험적연구," 공기조화·냉동공학회 춘계학술대회논문집 1997. pp802-810.
  19. 임유청, 김지근, 유환호, 김재현, 심의보, 조대환, 이영호, "산업용 축류팬 정지익에 대한 PIV계측," 대한기계학회춘계학술대회논문집, 1997, pp15-20.
  20. 김상완, 조대환, 심의보, 김춘식, 이영호, "PIV에 의한 버터플라이 밸브 유동특성에 관한 연구," 한국박용기관학회 추계학술대회논문집, 1997, pp.86-91.