

구동류를 갖는 계단 캐비티의 PIV계측

조 대 환* · 김 진 구** · 이 영 호***

(97년 10월 2일 접수)

PIV Measurement of Step Cavity with Driven Flow

Dae-Hwan Cho* · Jin-Gu Kim** · Young-Ho Lee***

Key Words : Unsteady Flow(비정상유동), High Reynolds Number(고레이놀즈수), Channel Cavity Flow(채널캐비티흐름), PIV(입자영상유속계), Image Processing(영상처리)

Abstract

An experimental study was carried out in a three-dimensional cubic cavity driven by 2-dimensional plane Poiseuille flow for three kinds of Reynolds number, 10^4 , 3×10^4 and 5×10^4 based on the cavity width and cavity inlet mean flow velocity. Instant simultaneous velocity vectors at whole field were measured by 2-D PIV system. Laser based illumination and two-frame grey-level cross correlation algorithm are adopted. Severe unsteady flow fluctuation within the cavity are remarkable at above $Re=3 \times 10^4$ Reynolds numbers and sheared mixing layer phenomena are also found at the region where inlet driving Poiseuille flow is collided with the clock-wise rotating main primary vortex at upper center area. Instant velocity profiles reveal that deformed forced vortex formation is observed throughout the separate two areas.

1. 서론

해안이나 강의 하류에는 지형적 이유나 모래 채취 등의 인위적인 영향으로 주위에 비해 깊이가 다른 공동, 즉 캐비티가 존재하며 그 내부의 유동은 상부의 흐름이 캐비티에 대해 구동류로 작용하여 전단응력을 공급하는 구조로서 구동류의 특성과 캐비티의 내부구조에 의해 유동형태가 결정된다.

해안의 준설 등의 수중작업에 있어서 이러한 캐비티 내부 유동패턴이 작업효율에 영향을 미치게 된다. 유사한 형태의 유동으로는 밀폐캐비티 유동이 있으며, 이는 경계조건이 단순하면서도 속도구배가 큰 유동특성을 갖고 있어 실험 및 수치해석에 의한 연구결과^{(1) (3)}가 많이 제시되어 있다. 그러나 일면이 개방되어 있고 전단흐름에 의해 에너지를 공급받는 형태의 캐비티에 대한 연구결과는 드문

* 목표해양대학교, 기관공학부

** 정회원, 옥천전문대, 기계학과

*** 종신회원, 한국해양대학교, 기계·냉동·자동차공학부

실정이다.

본 연구에서는 이러한 점에 착안을 하여 입방형 캐비티 상부에 작은 틈새를 두고 2차원의 평면 Poiseuille 구동류를 흐르게 함으로써 유동장에 전단응력이 공급되도록 하고 캐비티 내부의 좌측하단에 장애물로서 정사각형의 각주를 삽입하여 내부유동 특성을 고찰하고자 하였다. 채택한 레이놀즈수는 10^4 , 3×10^4 그리고 5×10^4 의 세 가지이다. 이때의 대표 길이는 캐비티의 길이(150mm)이고, 대표 속도는 캐비티입구의 단면평균유속 (8.27 cm/sec - 41.3cm/sec)을 이용하였다. 상온의 수도수를 작동 유체로 하여 펌프로써 순환시켰다. 유동장의 속도계측은 디지털 영상 처리(Digital Image Processing)에 의한 2차원 PIV^{(4) (5)} 기법으로 하였다. 계측 영역은 캐비티의 스펀방향의 중앙 단면 ($z=0.5$)이고, 동일입자 추적기법은 계조치 상호상관법이다. 계측에 따른 영상의 비디오신호는 NTSC 방식으로 저장을 하여 재현성을 확보하였고, PIV에 의해 순간 및 시간평균의 속도벡터와 장애물의 상부영역 및 우측부분에서의 속도분포를 구하였다.

유동장의 계측결과 캐비티 내부에서는 장애물의 우측영역에 타원형의 주와류(primary vortex)가 존재하며, 레이놀즈수가 증가함에 따라 강제와류의 형태를 가지면서 그 세기가 증가하였다. 캐비티의 기하학적 중심점을 기준으로 이사분면과 사사분면에 주와류의 영향으로 2차 와류가 발생하였으며, 레이놀즈수의 증가에 따라 와류의 형태가 현저한 변화를 보였다. 그리고 운동에너지의 분배구조에 따라 스펀방향으로 3차원성의 유입 또는 유출 특성이 나타났으며, 이러한 경향은 특히 장애물의 우측상부에서 두드러졌다. 또한 구동류와 주와류가 만나는 부분과 유동장의 좌측상부의 2차와류와 주와류가 만나는 부분 등에서 속도구배에 따른 전단 혼합현상이 발견되었다. .

2. 실험

그림1은 본 연구에서 채택한 실험장치의 구성을 보여 주고 있다. 본 실험에서는 캐비티 내부에 전단응력을 공급하기 위하여 유동장의 상부 입구측에 폭 150mm, 높이 7.5mm, 길이 750mm의 단면을 갖

는 평행 평판을 설치하여 2차원의 평면 Poiseuille 흐름을 공급하였고, 캐비티 입구부에는 직경 2mm, 길이 100mm의 원통형 튜브를 다발로 제작하여 유동장 입구로부터 450mm떨어진 캐비티 입구지점에 삽입하여 정류작용을 촉진 시켰다. 캐비티 본체는 두께 15mm, 가로, 세로, 높이가 각각 150mm가 되도록 제작하였다(그림2참조). 유량의 측정은 디지털유량계(Gruppo Isoil, MC108)로 하였으며, 가로, 세로 높이가 각 1m인 수조를 이용하여 교정실험을 거쳐 사용하였다. 채택한 레이놀즈수는 10^4 , 3×10^4 그리고 5×10^4 의 세 가지이다. 이때의 대표 길이는 캐비티의 높이(150mm)이고, 대표속도는 유량계에서 계측된 유량을 이용하여 계산된 캐비티입구의 단면평균유속(8.27 cm/sec, 24.8 cm/sec 및 41.3 cm/sec)으로 하였다. 실험에 사용된 작동유체는 상온의 수도수이고, 구동류의 레이놀즈수는 세 가지의 캐비티 레이놀즈수에 대하여 각각 500, 1500 및 2500전후 였다. 실험에서 밀폐순환에 따른 온도의 보정은 알코올 온도계를 30초 주기로 관찰하여 펌프출구 밸브를 미세 조정하여 보정을 행하였다. 유동장의 형성은 수조의 작동수를 펌프를 이용하여 유동장에 공급시키는 밀폐순환 방식을 택하였으며 유량계는 펌프 출구측에 설치하였다.

조명으로서 300mW의 공랭식 아르곤 이온 레이저에 원통형 렌즈를 부착하고 반사거울을 이용하여 두께 약 1mm의 시이트라이트를 계측단면에 조사하였다. 추적입자로는 Polyvinyl Chloride(Junsei Chemical Co., $100 \mu\text{m}$ 전후)를 사용하였다. 유동장은 카메라 촬영 방향과 레이저의 조사면을 제외한 캐비티 벽면을 내부에서 검은 색으로 코팅 처리를 행하여 입자의 계조치 구분을 용이하게 하였다. 유동장의 촬영은 Hi-8mm 카메라(Samsung, SV-H35)를 이용하여 영상을 NTSC 비디오표도로 저장하였다. 저장된 영상은 이미지보오드(Data Translation 사 DT3155, 640x480 픽셀, B&W)에 입력하여 원시 영상파일로 변환하였다. 이때 60Hz의 수직동기신호 보정필터(DT3155제공 소프트웨어)를 사용하여 화질을 개선하였다. 이 영상에서 유동장의 영역은 430픽셀×430픽셀이며 입자의 최대 이동거리는 각각 4.0픽셀, 11.9픽셀, 그리고 19.8픽셀 전후이다. 영상의 수평도의 유지를 위한 보정은 아핀변환에

의하였고, 고정부는 배경영상을 얻어 이를 감산하는 방법으로써 입자만의 원시영상을 얻었다.

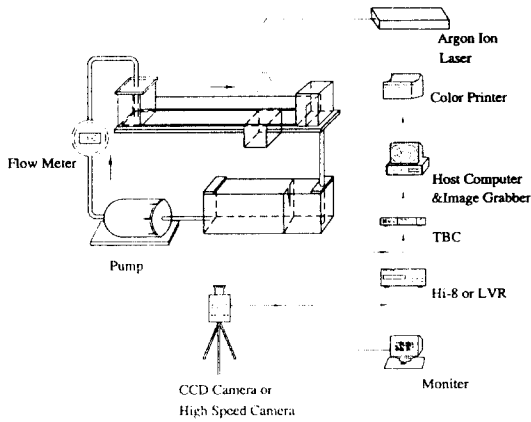


Fig. 1 Schematic Diagram of PIV System

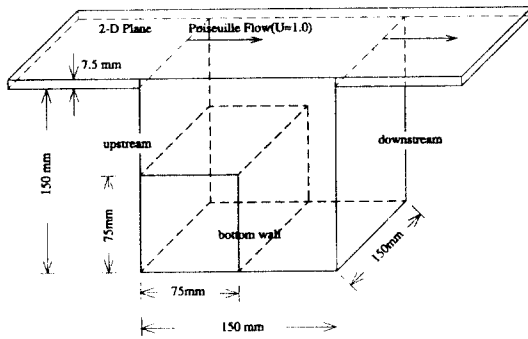


Fig. 2 Cavity Dimension

이때에 배경영상은 30프레임의 영상을 산술평균한 것이며, 속도벡터의 추출 알고리즘으로서 두 프레임의 계조치상호상관법을 채택하였다. 속도벡터의 격자수는 40 x 40으로 하였으며 상관계수를 구하기 위한 탐색영역의 반경은 탐색영역과 상관영역을 경험적으로 구하여 처리하였다. 즉, 입자의 최대이동거리를 대표속도에 의해 구하며, 원시영상을 적절한 역치를 선정해 이치화 한 후 확대하여 확인가능한 입자의 이동거리를 구하고, 이를 중합적으로 판단하여 탐색영역과 상관영역을 정하였다. 한가지의 순시 유동장에 대하여 처리 시간은 펜티엄기종(CPU 90MHz)에서 약 5분 전후이었으며 동일입자처리과정에서 얻어진 속도벡터는 80×80격

자에 재배치하였다. 이 때의 보간 방법은 최소자승법이고, 각 격자점에서 속도벡터를 3배로 확대하여 도시하였다.

그림3은 $Re=3 \times 10^4$ 에서의 순시의 유동장의 영상을 30프레임 중첩하여 윤곽선을 처리한 것으로 유동장의 위치를 가시화 영상과 일치시키는데 이용하였다.

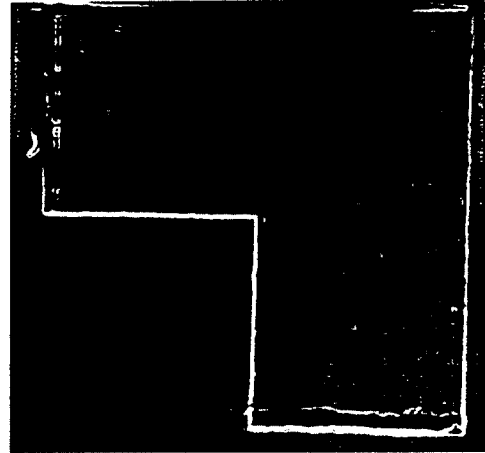


Fig. 3 30-Overlapped Flow Image ($Re=3 \times 10^4$)

3. 실험 결과 및 고찰

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

그림4, 그림5 및 그림6은 이와 같은 현상을 나타내는 어떤 순간에서의 속도벡터장이다. 이 그림에서 레이놀즈수가 증가할수록 주와류가 강제와류의 형태를 가지면서 변화하는 유동패턴을 잘 나타내고 있다.

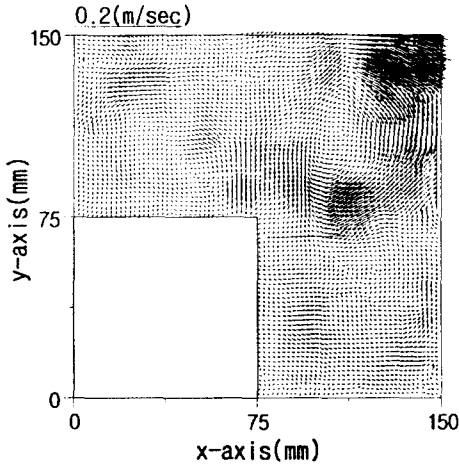


Fig. 4 Instantaneous Velocity Distribution ($Re=10^4$)

그림4는 $Re=10^4$ 의 결과로서 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 경계층에서 스펀방향으로의 운동에너지분배가 있음을 나타내고 있다. 그리고 각주 상부에 세력이 약한 2차와류가 발생하고 있으며 우측하부에도 작은 규모의 2차와류가 발견되고 있다.

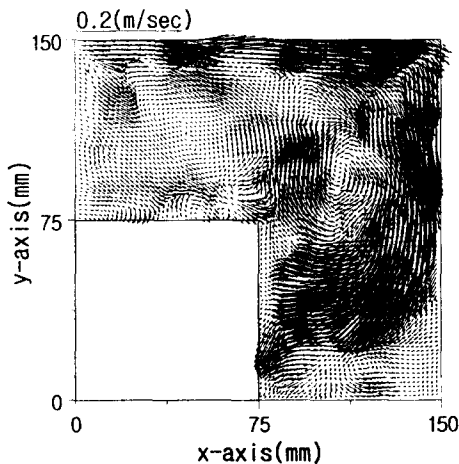


Fig. 5 Instantaneous Velocity Distribution ($Re=3 \times 10^4$)

그림5는 $Re=3 \times 10^4$ 의 결과이다. 앞의 경우보다 레이놀즈수가 3배의 경우이며 캐비티의 평균유입 속도는 8.27cm/sec에서 24.8cm/sec로 증가하였다. 전체적인 경향은 일치하나 레이놀즈수가 증가한 만큼 주와류의 크기가 증가하고 상부의 전단혼합 영역도 입구 측으로 접근하고 있음을 보여주고 있다. 와류의 중심위치는 우측벽면으로 접근하고 있으며, 이는 각주상부의 2차와류의 규모가 커지고 상부의 구동류가 빨라진 영향으로 판단된다.

그림6은 $Re=5 \times 10^4$ 의 결과이며 그림5와 거의 유사한 모습을 보여주고 있다. 이러한 강제와류의 경향은 상부에서 공급된 전단응력은 대부분 회전 운동에너지로 바뀌고 있음을 나타내고 있다. 그리고 상부의 전단혼합층은 보다 심한 굴곡을 보이고 있다. 이러한 유동특성은 본 연구에서 채택한 2차원 평면 Poiseuille류에 의한 전단구동 캐비티의 독특한 특징으로 여겨진다.

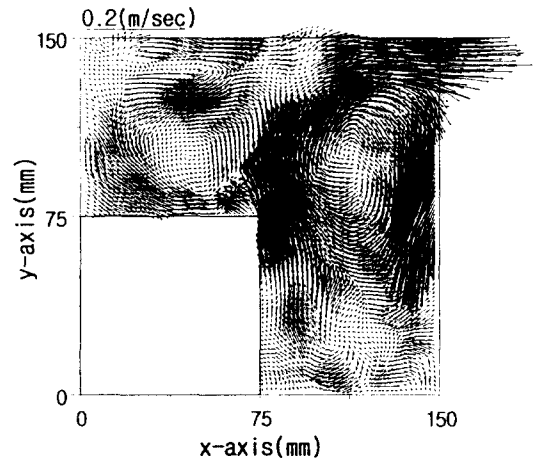


Fig. 6 Instantaneous Velocity Distribution ($Re=5 \times 10^4$)

그림7, 그림8 및 그림9는 시간 평균의 유동 특성을 알아보기 위하여 일정한 시간 간격으로 샘플링한 30회의 순시 속도 벡터를 산술 평균한 결과이다. 전체적으로 유사한 분포 특성을 보이고 있으며 레이놀즈수가 커질수록 일관된 경향을 보이고 있다. 주와류의 중심 위치는 일사분면에서 사사분면으로 이동하고 있고 각주 상부의 2차와류의 중심

위치도 캐비티의 중심쪽으로 이동하고 일그러진 타원형의 형태로 변화해 가고 있다. 그림 7에서 보였던 캐비티의 우측하부와 각주의 우측벽면에서의 에디(eddy)도 소멸되면서 주와류는 강제와류의 형태를 보이고 있다. 이 그림에서는 전단층에서의 와류의 방출 패턴은 나타나 있지 않으나 운동에너지의 배분 및 유입 현상이나 전체적으로 일그러진 주와류의 거동 현상을 나타내고 있다. 이것은 유동

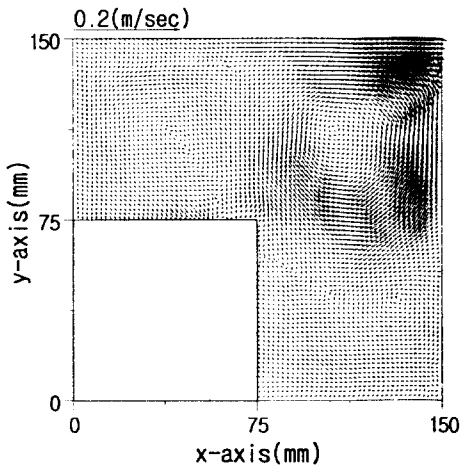


Fig. 7 Time-mean Velocity Distribution ($Re=10^4$)

장 내부에서의 운동에너지의 배분 구조와 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다. 즉, 밀폐캐비티의 경우에는 우측 벽면을 따라 내려오는 전단력이 상부 이동벽면 구동에너지의 상당 부분을 그대로 보유함으로써 흐름의 2차원성을 그대로 유지하지만 본 실험과 같은 전단구동의 입방형 캐비티에서는 전단층에서 발생한 다수의 와류가 우측 벽면에 부딪치면서 에너지의 분배 구조를 초래하기 때문으로 추정된다. 이와 같은 전단혼합층의 발생장소는 순시의 속도벡터에서 보다 잘 나타나 있으며 레이놀즈수가 클수록 입구 쪽에 근접하여 존재하고 있다. 이것은 주와류의 회전속도에 대한 구동속도의 크기가 레이놀즈수가 클수록 상대적으로 증가하여 혼합층의 와도의 크기가 커지기 때문이다. 촬영된 비디오 영상을 관찰해보면 $Re=3 \times 10^4$ 이상에서의 유동의 경향은 대체로 유사하며, 레이놀즈수가 증가 할수록 현저하게 나타나는 현상은 사사분면 하반부의 우측벽면 부근에서 주와류로부터 불규칙하게 박리되는 작은 규모의 와류이다. 이러한 와류는 박리된 후 사사분면 하부코너에서 회전방향으로 이동하고 있다 이러한 현상에 대해서는 차후에 시계열의 계측을 통한 고찰이 필요하다.

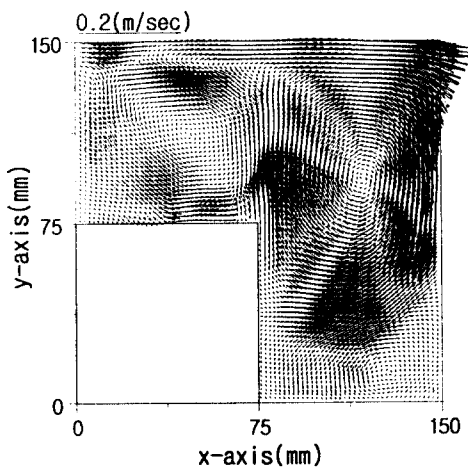


Fig. 8 Time-mean Velocity Distribution ($Re=3 \times 10^4$)

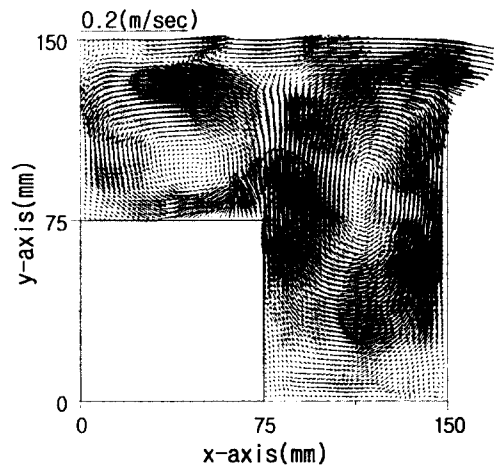


Fig. 9 Time-mean Velocity Distribution ($Re=5 \times 10^4$)

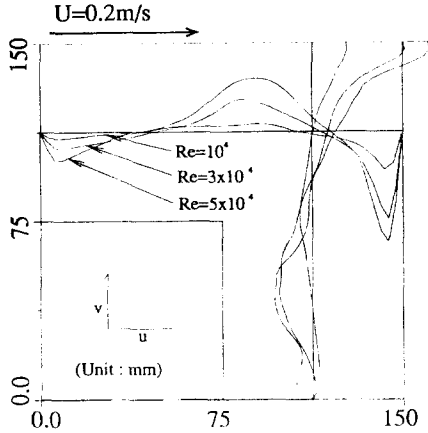


Fig. 10 Velocity Profiles at Two Sections

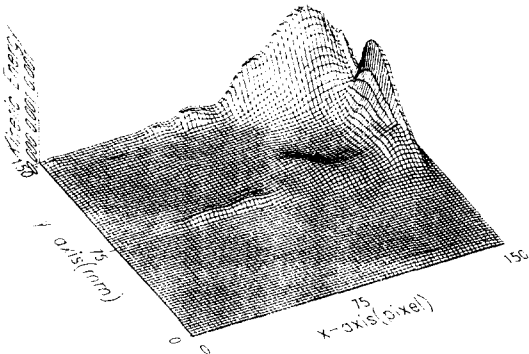


Fig. 11 Instantaneous Kinetic Energy Distribution (Re=3 x 10⁴)

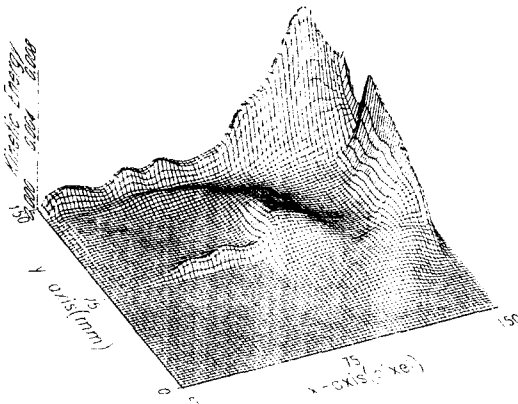


Fig. 12 Time-mean Kinetic Energy Distribution (Re=10⁴)

그림10은 시간평균의 데이터를 이용하여 수평 및 수직 속도성분을 이사분면을 기준하여 4등분한 선상에서 표시한 결과이며, 실선중 수평선은 v속도분포를, 수직선은 u속도분포의 기준선을 보이고 있다. 상부의 대표속도의 크기는 실제 속도의 값을 나타낸다. 속도분포의 형상을 보면 변곡점을 다수 갖는 매우 불규칙한 특성을 나타내고 있다. 이것은 경계층에서 나타나는 박리현상에서 처럼 유동장의 불안정성을 초래하는 기본적인 요인이며, 결국 이와 같은 불규칙한 속도분포는 난류유동을 촉진하는 특성으로 보여진다. 난류현상을 포함한 본격적인 유동해석을 위해서는 여러 단면에 대한 속도계측과 체계적인 고찰이 필요하다.

그림11은 Re=3×10⁴의 경우에 유동장의 전체를 임의의 순간에 동시다점 계측한 순시속도벡터로부터 각 위치에서의 운동에너지를 구하여 3차원적으로 도시한 것이다. 운동에너지의 전체적인 분배구조를 잘 보여주고 있다.

그림12, 그림13 및 그림14는 일정시간간격으로 계측한 30개의 순시벡터의 난류운동에너지의 공간 분포로서 Re=10⁴의 경우에는 캐비티의 출구측에 크게 국한하여 나타나고 있지만 Re=3×10⁴ 이상에서는 전체 유동장으로 확대되고 있음을 알 수 있다. 그리고 상부 2차원 평면 Poiseuille 흐름이 구동류로 작용하는 상부에 굴곡을 갖는 전단혼합영역의 위치도 레이놀즈수에 따라 입구측으로 이동해 감을 알 수 있다. Re=5×10⁴의 경우 매우 복잡한 형태의 유동특성을 보이고 있으며, 차후에 여러 단면에 거쳐 일관된 계측을 통한 연구가 필요하다

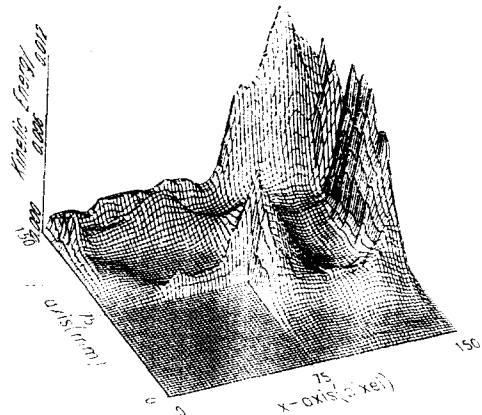


Fig. 13 Time-mean Kinetic Energy Distribution (Re=3 x 10⁴)

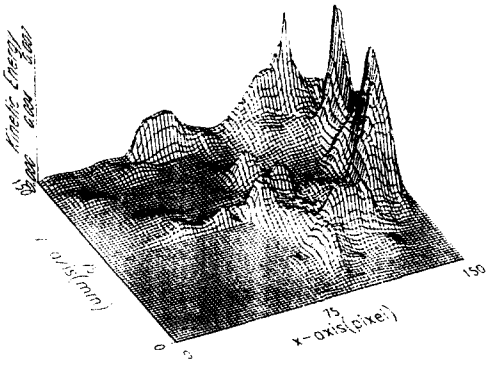


Fig. 14 Time-mean Kinetic Energy Distribution (Re=5 x 10⁴)

4. 결론

본 연구에서는 입방형 캐비티의 일면에 작은 간격을 두고 여기에 2차원의 평면 Poiseuille 구동류를 흐르게 하여 고레이놀즈수의 캐비티 내부유동 특성을 고찰하였다. 세가지의 레이놀즈수(10⁴, 3 x 10⁴, 5 x 10⁴)에 대해 2차원 PIV시스템을 이용하여 속도계측을 하였으며, 계측영역은 캐비티의 스펀방향의 중앙단면이다.

실험 결과 전체적인 유동의 경향은 크게 각주상부와 캐비티 우측영역으로 분리된 형태를 나타내었으며 레이놀즈수의 증가에 따라 강제와류의 형태를 유지하며 그세기가 증가하였다. 레이놀즈수

3 x 10⁴ 이상에서는 주와류의 모습은 캐비티의 우측부분에 국한되었으며 타원형의 형태로서 세기가 증가하였다. 또한 상부의 구동류와 내부에서 회전하는 와류가 만나는 영역에서는 전단혼합층이 관찰되었다.

5. 참고문헌

- 1) 이영호, 최장운, 구영삼, 1994, "2차원 정방형캐비티의 비정상유동특성", 대한기계학회 전산유체역학분과회 학술대회 논문집, pp.149-167.
- 2) C.K.Aidun, N.G.Triantafillopoulos, J.D.Benson, 1991, "Global Stability of a Lid Driven Cavity with through Flow Visualization Studies", Pys. Fluids A 3 (9), pp.141-151
- 3) Y.H.Lee, C.S.Kim, D.H.Cho, 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.
- 4) 최장운, 이영호, 1995, "PIV에서의 계조치 상호상관법 개발", 대한기계학회 춘계학술대회, 논문집(II), pp.396-400.
- 5) 최장운, 이영호, 1995, "PIV에서의 보간방법의 적용", 대한기계학회 추계학술대회 논문집(II), pp.49-56.