

입방형 채널 캐비티 유동의 PIV해석

조대환* · 김진구** · 이영호***

PIV Analysis of Cubic Channel Cavity Flow

D. H. Cho* · J. K. Kim** · Y. H. Lee***

Key words : Unsteady Flow(비정상유동), High Reynolds Number(고레이놀즈수), Cavity Flow(캐비티흐름), PIV(입자영상유속계), Cross Correlation Coefficient(상호상관계수), Sheared Mixing Phenomena(전단혼합작용), Wall Pressure(벽면압력)

Abstract

The unsteady flow in three-dimensional cubic cavity with narrow channel at upper region is investigated experimentally for three kinds of Reynolds number, 1×10^4 , 3×10^4 and 5×10^4 based on the cavity width and cavity inlet mean flow velocity. Instant velocity vectors are obtained simultaneously at whole field by PIV(Particle Image Velocimetry). Wall pressure distributions are estimated using Poisson equation from the velocity data.

Results of PIV reveal that severe unsteady flow fluctuation within the cavity are remarkable at all Reynolds numbers and sheared mixing layer phenomena are also found at the region where inlet driving flow is collided with the clock-wise rotating main primary vortex. Instant velocity profiles reveal that deformed forced vortex formation is observed throughout the entire region and spanwise kinetic energy migration is conspicuous.

1. 서 론

채널 흐름의 유로 중에 설치된 캐비티와 같이 전단력을 구동류에 의해 공급받는 유동은 각종 전자기기의 부품을 냉각하는 열교환기나 밀폐 공간을

환기하는 공조 계통 등에서 쉽게 볼수 있으며, 실제 회전체의 밀봉 구조 및 염료 코팅의 분배 구조에서처럼 생산 공정 등에 직접 응용되고 있다. 따라서 이러한 유동장의 유동 특성의 규명은 실용상 매우 중요한 과제이다. Aidun(1991)등¹⁾은 일면에

* 한국해양대학교 대학원 (원고접수일 : 97년 9월)

** 한국선급

*** 한국해양대학교 기계·냉동·자동차공학부

작은 량의 관통류(through flow)를 갖는 제지 공정의 코우터(coater)의 내부 유동에 대하여 가시화 실험을 행하고 캐비티 내부의 주와류(primary eddy)와 이차 모서리와류(secondary corner eddies)가 낮은 레이놀즈수 영역에서 비정상 상태로 변해 가는 유동특성을 보여주고 있다.

Kimura²⁾(1993)는 해안의 사수역(dead zone area)에서 구동류에 의한 캐비티의 실험 및 수치해석을 행하고, 주류와 사수역과의 경계면 근처에서 전단 불안정에 기인한 주기적인 와류의 발생 및 유속 변동을 보고하였다. 또한 수치 계산 결과에서 캐비티 내의 주순환 흐름과 구석진 각부의 부순환류 및 전단혼합층에서의 와류의 거동에 관한 결과를 제시하였다. 그러나 와류의 규모 및 발생 위치 등에 관하여 실험 결과와 다소 상이한 문제점을 나타내고 있다. 또한 재순환 흐름에 있어서 와류의 천이에 관하여는 Koseff 등³⁾이 입방형 밀폐 캐비티 유동장을 대상으로 일련의 실험 결과를 제시하고 있으나 최대 레이놀즈수의 범위는 10^4 에 국한되고 있다. PIV(Particle Image Velocimetry, 입자영상유속계)⁴⁾⁵⁾는 점계측의 문제점을 근본적으로 해결할 수 있는 기법으로서 유동현상에 대해 정성적인 정보의 파악이 비교적 쉬운 장점을 갖고 있는 가시화(visualization)의 결과를 디지털 영상처리기술과 접목한 새로운 계측기법으로 실용화를 위한 개발이 진행되고 있으며 많은 적용례를 보이고 있다. 그러나, 현재까지의 연구결과들은 속도벡터 자체만을 얻는데에 중점을 두고 있으며, 이를 이용한 압력분포의 획득에 관한 연구는 부족한 실정이며 물체 벽면에서의 압력은 정압공에 의한 외부삽입방식으로 주로 계측되어 왔다. 그러나, 유동현상을 지배하는 다양한 규모의 와동은 기본적으로 주변의 압력변동에 영향을 받고 있다. 예를 들면 K.Imaichi 와 J. Massons 등⁶⁾은 Navier-Stokes방정식의 차분식에 기초를 두고, 압력구배항을 공간적분하여 압력값을 구하고 있다. 그러나 이 경우에도 벽면까지의 압력분포를 구한 예는 보고되어 있지 않으며 이에 대한 공학적인 분야의 연구가 필요하다.

본 연구에서는 평면 Poiseuille류가 흐르는 길이 1100mm의 채널에서 입구 측으로부터 750mm지점에 입방형 캐비티를 설치하고, PIV를 이용한 가

시화 실험에 의하여 채널캐비티의 내부 유동 특성을 고레이놀즈의 영역까지 고찰하고자 하였다. 채택한 레이놀즈수는 10^4 , 3×10^4 그리고 5×10^4 의 세 가지이며 이때의 대표 길이는 캐비티의 높이이며 대표 속도는 캐비티입구의 단면 평균 유속 ($6.2 \text{ cm/sec} - 31.9 \text{ cm/sec}$)을 이용하였다. 유동장의 계측 영역은 캐비티의 스펜방향의 중앙 단면($z=0.5$)에 국한하여 디지털 영상 처리(digital image processing)에 의한 2차원 PIV를 이용하여 순시의 속도벡터, 시간 평균의 속도벡터 및 임의 단면에서의 속도분포 형상을 얻었고, 이를 압력에 관한 Poisson 방정식에 적용하여 압력을 구하였으며 얻어진 결과는 벽면을 포함한 전유동장의 압력분포를 잘 나타내었다. 계측 결과 캐비티 내부에서는 구동류의 주류 방향으로 회전하는 찌그러진 타원형의 강제와류(제1와류, primary vortex)가 존재하며 레이놀즈수가 증가함에 따라 이 경향이 뚜렷해짐과 동시에 모서리에서 발생하는 고차와류가 소멸하였다. 또한 중앙 단면에서는 스펜방향으로의 운동에너지의 이동이 크게 나타남으로서 3차원성이 강한 흐름이 지배적이며 입구 구동류와 주와류가 충돌하는 영역에서는 전형적인 전단혼합층의 현상이 관찰되었다.

2. 실험

그림1은 본 연구에서 채택한 실험 장치의 구성을 보여주고 있다. 실험에서 캐비티 내부에 전단유력을 공급하기 위하여 유동장의 상부 입구 측에 폭 150mm, 높이 7.5mm, 길이 750mm의 평행 평판을 아크릴로 제작, 부착하여 2차원의 평면 Poiseuille흐름을 공급하였고 입구부에는 정류판 다발을 설치하여 입구구간(entrance region)의 영향을 억제하도록 하였다.

그림2는 캐비티 유동장의 상세도를 나타내며 가로, 세로, 높이가 각각 150mm인 입방형인 두께 15mm의 투명 아크릴로 가공하였다. 채택한 레이놀즈수는 10^4 , 3×10^4 그리고 5×10^4 의 세 가지이며 이때의 대표 길이는 캐비티의 높이(150mm)이고, 대표 속도는 캐비티입구의 단면 평균 유속을 이용하였으며 유동장의 출구측에서 구동류의 유

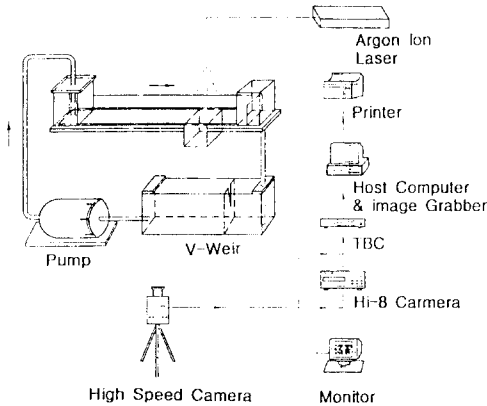


Fig.1 Schematic diagram of PIV system

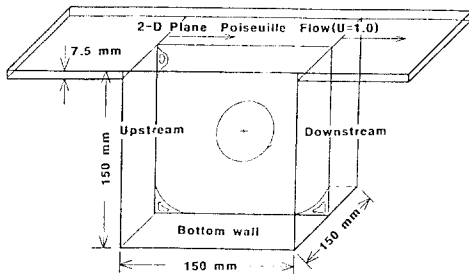


Fig.2 Cavity dimension

량을 계측하여 계산하였다. 계측은 삼각위어로 하였으며 유량계수 및 온도보정계수는 예비실험을 통하여 실험적으로 구하였고 작동유체로는 상온의 수도수를 사용하였다. 구동류의 레이놀즈수는 세 가지의 캐비티 레이놀즈수에 대하여 각각 500, 1500 및 2500 전후이며 이때의 유입 대표속도는 각각, 6.2, 19.1 및 31.9 cm/sec 전후이었다.

조명으로서 300mW의 공냉식 아르곤 이온 레이저 및 원통형 렌즈를 이용하여 두께 약 2mm의 시이트라이트를 계측단면에 조사하였다. 추적 입자로는 알루미늄 분말을 이용하였으며 카메라 촬영방향으로의 앞면을 제외한 모든 캐비티 내부 벽면은 검은 색으로 코팅 처리를 행하여 입자의 계조치 구분을 용이하게 하였다. 유동장의 촬영은 고속도 카메라(Photron사, 640×240픽셀, 흑백, 최대 240pps)를 이용하였다. 레이놀즈수별 프레임속도는 각각 30pps (Re=1=10⁴), 60pps (Re=3×10⁴), 120pps (Re=5×10⁴)로 조정하였으며 셔터 스피드는 각각 1/30초, 1/60초 그리고 1/240초로 설정하

였다. 고속도 카메라의 자체 메모리(160MB)에 저장된 연속 영상을 매초 30장의 비율로 다시 재생하여 Hi-8mm 비디오 카메라에 전송하여 영상을 NTSC방식으로 저장하였다. 이 영상은 다시 프레임 메모리 유니트(SONY, MPU100A)를 거치면서 동기신호의 보정이 행해지고 Personal Computer에 내장하여 사용할 수 있는 이미지보오드(DITECT사, 64MB, 512×512 픽셀, RGB)에서 이진 원시화일로 변환된다. 화상 데이터는 RGB신호중 G의 신호만을 사용하였고 이 파일데이터에 여러 가지의 전처리과정을 적용하여 유동장 전체의 순시속도벡터를 추출하였다.

속도벡터의 추출 알고리즘으로서 두 프레임의 연속된 비디오영상의 계조치를 이용하여 최대 상호상관계수를 탐색하는 기법⁴⁾을 이용하였다.

속도벡터의 격자 수는 40×40으로 하였으며 상관계수를 구하기 위한 탐색 영역의 반경은 10픽셀이며 상관 영역의 크기는 41×41픽셀로 하였다. 한가지의 순시 유동장에 대하여 처리 시간은 펜티엄기종(CPU 90MHz)에서 약 4분이 소요되었다. 각 프레임의 결과는 비정상외의 와류에 의한 순시 유동특성이 잘 나타나고 있으나, 본 실험이 3차원 유동장에 대한 2차원 단면의 결과이므로 3차원성이 강한 부분은 시간적 변화에 따라 속도의 심한 변동을 볼 수 있었다. 시간평균의 속도벡터를 얻기 위해서는 동일 시간간격(1/3초)으로 저장된 연속된 30개의 영상을 순차 일괄 처리하여 산술 평균하였다. PIV에 의해 얻어진 속도벡터는 압력에 관한 Poisson방정식에 적용하여 벽면을 포함한 전유동장의 압력분포를 구할 수 있다. (ψ-ξ)계를 이용한 Poisson방정식은 다음의 식으로 표기된다.

$$\nabla^2 p = S \tag{1}$$

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

소오스항을 계산하는 경우에 있어서 경계조건은 매우 중요하다. 본 연구에서는 고정벽면에서 부착조건(no-slip)을 적용하고, 캐비티 상부의 계산은 내부유동장의 속도 값을 가지고 직선외삽하는 방법을 사용하였다. Poisson 방정식을 풀기 위하여 설정한 벽면의 가상 격자에서 압력 값의 정의는

MAC법에서 제시한 대로 발산을 영으로 하는 기법을 그대로 택하였다.

3. 결과 및 고찰

Hi-8mm카메라에 기록된 유동장의 연속 화면을 관찰해 보면 입구 구동류와 주와류가 충돌하는 영역에서는 전형적인 전단혼합층(sheared mixing layer)의 현상이 나타나고 있다. 여기에서 연속적으로 발생된 작은 에디(eddy)들은 입구 구동류의 직진성을 상실하면서 일부는 출구 쪽으로 그대로 빠져나가나 나머지의 성분은 주와류의 회전 방향으로 이동하여 우측의 상부 벽면과 충돌하게 된다. 이때에 스핀방향으로의 운동에너지의 배분이 이루어지며 결과적으로 속도 벡터의 세기가 크게 약화된 공간분포 특성이 나타난다. 또한 동시에 작은 규모의 와류가 발생하여 벽면을 따라 하류로 진행하는 특징이 발견되고 있다. 또한 캐비티의 좌측 벽면 근처에서는 운동에너지의 유입이 이루어져 속도벡터의 크기가 매우 크게 증가하고 있다. 이것은 덮개구동캐비티와 같은 완전 밀폐 캐비티 유동장에서는 발견되지 않은 새로운 현상으로 구동류에 의해 전단응력을 받는 캐비티에서의 특징으로 보여진다.

그림3, 그림4 및 그림5는 이와 같은 현상을 나타내는 순시의 속도벡터이다. 이 그림에서는 전단층에서의 와류의 방출패턴은 나타나 있지 않으나 운동에너지의 배분 및 유입 현상이나 전체적으로 일그러진 주와류의 거동 현상을 잘 보여주고 있다.

세 종류의 레이놀즈수에 대한 순시 속도벡터를 관찰해 보면 주와류의 중심이 우측하부쪽으로 치우쳐 있으며 전체적으로 일그러진 강제와류의 형태를 유지하고 있다. 이것은 앞에서 언급한 운동에너지의 배분 구조와 밀접한 관련이 있을 것으로 예상된다. 즉, 밀폐캐비티의 경우⁵⁾에서는 우측 벽면을 따라 내려오는 전단성분이 정연한 경계층을 이루면서 회전하며 이때의 전단성분은 상부 벽면구동에너지의 상당부분을 그대로 보유함으로써 흐름의 2차원성을 그대로 유지하는 반면 본 연구에서와 같은 개방형 캐비티에서는 전단층에서 발생한 다수의 와류가 우측벽면에 부딪치면서 에너지

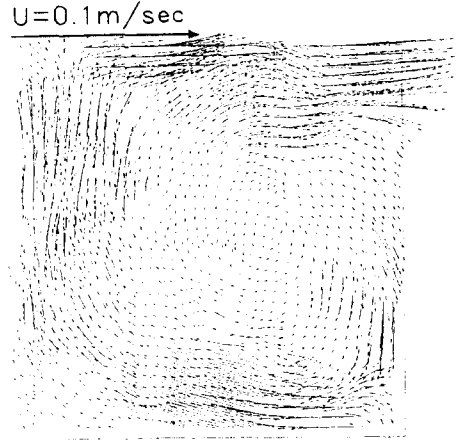


Fig.3 Instantaneous velocity distribution ($Re=10^4$)

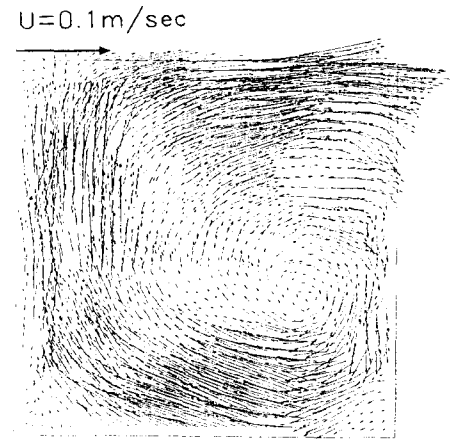


Fig.4 Instantaneous velocity distribution ($Re=3 \times 10^4$)

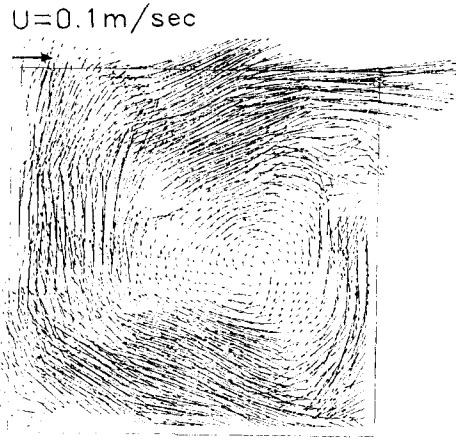


Fig.5 Instantaneous velocity distribution ($Re=5 \times 10^4$)

의 분배구조를 초래하기 때문에 보여진다. 이와 같은 전단혼합층의 발생장소는 레이놀즈수가 클수록 입구쪽에 근접하여 존재하고 있다. 이것은 주 와류의 회전속도에 대한 구동속도의 크기가 레이놀즈수가 클수록 상대적으로 증가하여 혼합층의 와도의 크기가 증가하기 때문이다.

그림6은 시간 평균의 유동 특성을 알아보기 위하여 일정한 시간 간격(1/3초)으로 샘플링한 30회의 순시 속도 벡터를 산술 평균한 결과이다. 이 그림에서는 전단층에서의 와류의 방출 패턴은 나타나 있지 않으나 운동에너지의 배분 및 유입 현상이나 전체적으로 일그러진 주와류의 거동 현상을 잘 보여주고 있다.

그림7, 그림8 그리고 그림9는 시간평균의 데이

터를 이용하여 수평 및 수직 속도성분을 각각 캐비티를 4등분한 선상에서 표시한 결과로 앞에서 언급한 운동에너지의 분배 및 유입구조가 잘 나타나 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 입체적이며 체계적인 속도계측이 필요하며 이에 관한 연구는 차후의 과제로 남긴다.

그림10은 레이놀즈수가 10⁴의 경우로서 속도 데

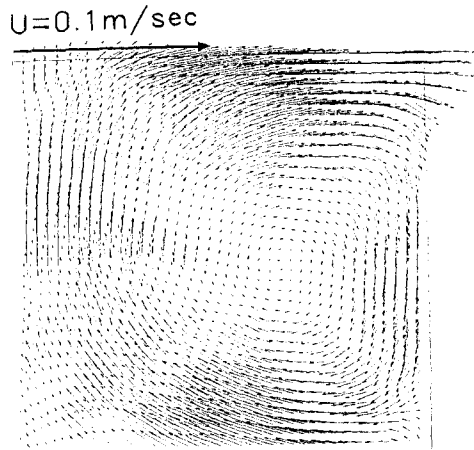


Fig.6 Time-mean velocity distribution (Re=3 x 10⁴)

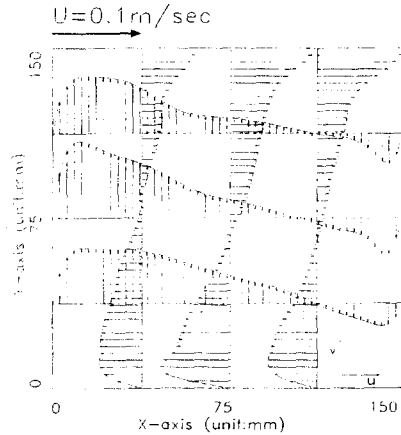


Fig.8 Velocity profiles at various sections (Re=3 x 10⁴)

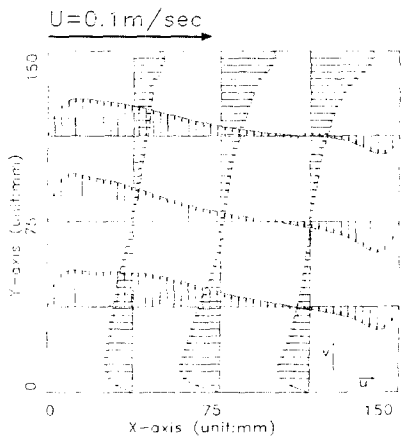


Fig.7 Velocity profiles at various sections (Re=10⁴)

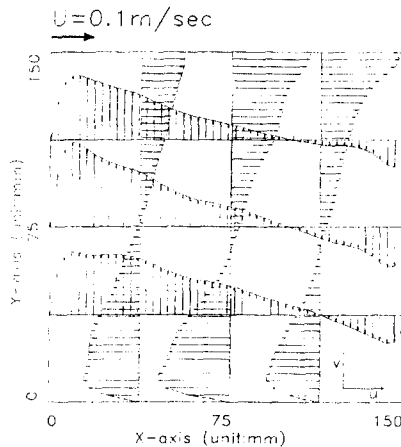


Fig.9 Velocity profiles at various sections (Re=5 x 10⁴)

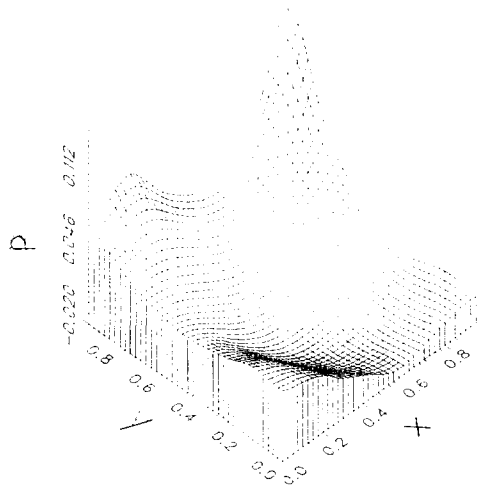


Fig.10 Pressure estimation by PIV - Poisson(Re=10⁴)

이터를 이용하여 구한 각부의 압력을 나타낸 것이다. 이는 앞에서 기술한 Poisson 방정식의 계산에 의해 얻어진 압력분포이며 전유동장의 압력을 벽면까지 포함해서 보여준다. 대상단면이 스펀방향으로 중앙 단면임을 고려하면 유동장의 우측하부의 코너부에서 나타나는 부압의 현상은 주위에서 유입되는 흐름의 현상으로 보여진다. 그림은 생략하였으나 레이놀즈수가 3×10^4 및 5×10^4 으로 증가해 갈수록 압력변동이 전체적으로 완화되었다. 이는 고레이놀즈수 일수록 와류의 비정상적인 방출과 함께 운동 에너지의 공간분배가 양성하여 유동의 혼합작용이 크게 증가하기 때문이다. 이러한 경향은 레이놀즈가 증가할수록 명확히 나타나고 있다.

그림11은 레이놀즈수가 10^4 의 경우에 있어서 벽면에서의 압력분포변동을 보이고 있다. 캐비티에서 벽면의 압력분포에 대한 주요한 특성인 벽면의 중간부분에서 점성댐핑현상에 의한 압력고개가 나타나고 있다. 이러한 경향은 3×10^4 및 5×10^4 의 결과에서도 유사한 경향을 보이고 있었다. 우측 하부에서 부압면의 영역은 구동류의 속도가 빨라질수록 캐비티 내부에 형성된 주와류가 강제와류의 성향이 강해지면서, 중앙단면을 기준으로 하부에서는 유입하는 흐름이 많아지고 증가하는 경향을 보였다. PIV는 동시다점계측의 장점을 갖고 있으

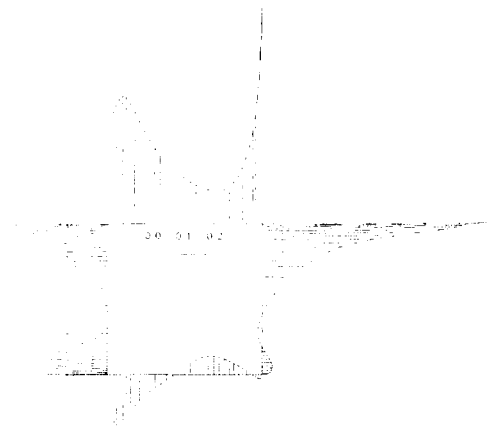


Fig.11 Wall pressure estimation by PIV-Poisson (Re=10⁴)

나 공간해상도의 영향이 크므로 차후의 실험에서는 벽면에서의 정압탭에서 계측한 결과와 엄밀한 비교검토가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 평면 Poiseuille류가 흐르는 채널에 입방형 캐비티를 설치하고, PIV를 이용한 가시화 실험에 의해 캐비티의 내부 유동특성을 고레이놀즈의 영역까지 고찰하였다. 채택한 레이놀즈수는 세 가지이며(10^4 , 3×10^4 및 5×10^4) 계측 영역은 캐비티의 스펀방향의 중앙 단면이다. 속도계측을 위해서 2차원 PIV시스템을 이용하여 순시의 속도벡터, 시간평균의 속도벡터 및 압력에 관한 Poisson 방정식을 PIV에서 구한 속도벡터에 적용하여 압력을 구하였다.

얻어진 속도벡터로부터 캐비티 내부에서는 구동류의 주류방향으로 회전하는 찌그러진 타원형의 강제와류가 존재하며 스펀방향으로의 운동 에너지의 이동이 크게 나타남으로서 3차원성이 강한 흐름이 지배적임을 알 수 있었다. 그리고 입구구동류와 주와류가 혼합되는 영역에서는 전형적인 전단혼합층의 현상이 가시화 연속 화면으로부터 관찰이 되었다.

참고문헌

1. C.K.Aidun, N.G.Triantafillopoulos, J.D.Benson, "Global Stability of a Lid Driven Cavity with through Flow Visualization Studies," Pys. Fluids A 3 (9), pp.141 - 151, 1991.
2. 木村 一郎, 細田 尙, "側岸に死水域を有する開水路流れの非定常解析," なかれ, Vol.12, pp.399 - 408, 1993.
3. A.K.Prasad, J.R.Koseff, "Reynolds Number and End-wall Effects on a Lid-Driven Cavity Flow", Phy. Fluids A 1(2), pp.208 - 217, 1989.
4. Young-Ho LEE, D.H.Doh and J.W.Choi, "A Study on Video-Fields Correlation PIV for High-Speed Flows," Proc. of the 1st Pacific Symp. on Flow Visualization and Image Processing, pp.650 - 655, 1997.
5. J.W.Choi, D.H.Doh and Young-Ho LEE, "A PIV Application to the Evaporator-Room Flow in Refrigerator," Proc. of the 4th Asian Symp. on Visualization, pp.299 - 304, 1996.
6. K. Imaichi, K. ohmi, "Numerical Processing of Flow-Visualization Pictures-Measurement of Two-Dimensional Vortex Flow," J. Fluid Mech. Vol. 129, p 283 - 311, 1983.