

구동류를 갖는 입방형 캐비티의 유동특성에 관한 연구

조대환* · 최민선* · 이영호**

A Study on the Flow Characteristics of Cubic Cavity with driven Flow

D. H. Cho · M. S. Choi · Y. H. Lee

Key words : High Reynolds Number(고레이놀즈수), Cavity Flow (캐비티 흐름), PIV(입자영상유속계), Image Processing(영상처리), Sheared Mixing Phenomena(전단혼합작용), Aspect Ratio(종횡비)

Abstract

Experiments were carried out for a cubic cavity flow. Continuous shear stress is supplied by driven flow for high Reynolds number and three kinds of aspect ratios. 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 40×40 and 2-dimensional uniform mesh using MAC staggered grid is adopted. The flow field within the cavity maintains a forced-vortex formation and almost of the shear stress from the driving inflow is transformed into rotating flow energy and the size of the distorted forced-vortex increases with increment of Reynolds number

제1장 서론

선박의 배관 계통의 설계나 운용에 있어서 밸브의 개폐, 또는 파이프라인의 개조 등에 의해 공동(Cavity)구역이 형성되게 된다. 또는 보일러나 주기의 배기 계통에 있어서 분진(Soot)축적 공간이나 선미관의 축밀봉 장치인 래버린스팩킹도 유사한 유동구조이다. 이러한 유동장은 입구에서 출구

측으로 유출되는 흐름과 캐비티 내부의 재순환흐름이 결합된 복합유동장으로 공학적인 적용을 위해서는 구동류의 레이놀즈수 변화가 캐비티의 내부 유동에 미치는 영향, 종횡비(aspect ratio, 이하 AR)에 따른 내부 유동패턴 변화 및 압력특성까지 고려한 체계적인 검토가 필요하다.

한편, 가시화실험의 결과를 이용하여 유동장 전체의 유동패턴을 임의의 순간에 정량적으로 얻을

* 정희원, 목포해양대학교 기관공학부(원고접수일 : 98년 10월)

** 정희원, 한국해양대학교 이공대학

수 있는 기법으로는 PIV(입자영상유속계 : Particle Image Velocimetry, 이하 PIV)^{4)~3)}가 있다.

Lee 등⁴⁾은 레비린스 패킹을 단순화 한 하나의 셀에 대하여 채널캐비티의 형태로 PIV기법을 사용하여 실험을 행하였다. 그 결과 상부의 Poiseuille 흐름에 의해 구동되는 캐비티유동에서는 주와류가 강제와류의 형태임을 설명하고 있다.

Aidun⁵⁾은 얇은 박막 코팅공정에 이용되는 전단 구동캐비티에 대해 실험을 행하였다. 스펠(span) 방향으로 종횡비가 1 : 1이고 변장비는 1 : 3의 캐비티를 대상으로 하였으며 내부에 물러와 함께 작은 양의 흐름이 유동장을 관통하는 경우에 대한 실험 결과 캐비티의 모서리 부근에서 나타나는 와류 특성을 고찰한 결과를 제시하였다.

최 등⁶⁾은 압력에 관한 프와송(Poisson)방정식을 이용하여 2차원 밀폐캐비티흐름을 대상으로 전 유동장에 걸친 압력분포를 얻고자 할 때의 경계조건을 검토하고 벽면을 포함한 유동장의 압력분포를 구하였다.

이 연구에서는 입방형 캐비티의 유동특성을 규명하기 위하여 PIV와 정압탐을 이용한 실험적연구를 수행하였다. 그 결과 우측벽면의 상부 측에서 스펠방향으로의 운동에너지의 이동이 크게 나타남으로써 3차원성이 강한 흐름이 지배적이며 구동류에 의해 주류방향으로 회전하는 주와류의 회전속도가 증가하는 결과를 얻었다.

2. 실험

그림1은 PIV 실험장치의 개략도이다. 실험은 캐비티 하부에 설치된 소형 수조를 이용하여 작동유체를 펌프로 강제 순환시켜 행하였다. 가로 700 mm, 세로 300 mm의 크기를 갖는 수조의 물이 소형 원심펌프를 통하여 출구 측에 설치된 디지털유량계를 연속적으로 통과하면서 평균유량이 측정된다. 펌프의 최대유량은 0.1 m³/min이며 유량은 출구밸브를 이용하여 조절하였다. 그리고 실험장치의 입구에는 정류장치를 부착하여 입구 구간의 영향을 최소화하였다. 정압탐이 설치된 위치는 중앙단면(스펠방향의 중앙부, z=0.5)이고, 설치 간격은 15 mm이다. 좌우측 벽면과 하부면에 각각 9개

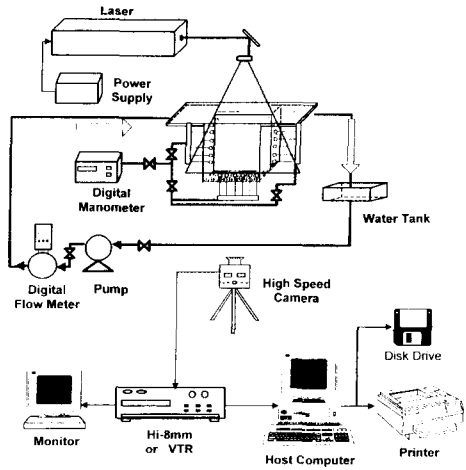


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

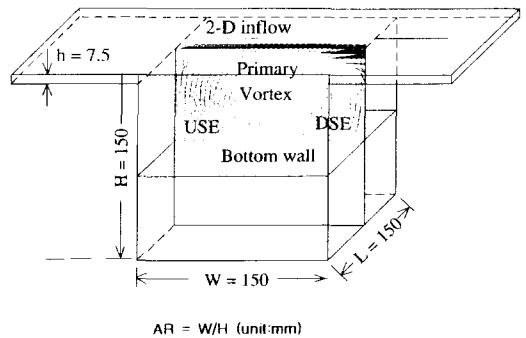


Fig. 2 Cavity Dimension

가 설치되었으며, 시트라이트가 조사되는 상부면은 중앙단면의 좌우(z=0.47, 0.53)에 15 mm의 간격으로 9개를 설치하였다. 직경 4 mm의 드릴로 벽면을 관통한 후 길이 35 mm의 플라스틱 튜브를 삽입하고, 내경 4 mm의 비닐호스를 디지털 마노메터(OKANO사, Model : POP503)까지 연결하였다. 미압계의 분해능(resolution)은 1 mmHg이며 측정범위는 0~2000 mmHg이다.

대상유동장은 구동류가 흐르는 상부측과 캐비티의 내부로 구별되므로 측정된 유량에 의해 구해진 구동류의 단면평균유속과 캐비티의 폭을 기준으로 레이놀즈수를 계산하고 이를 캐비티의 겉보기 레이놀즈수로 정의하였다. 그리고 이것과는 구별하여 구동류가 흐르는 평행평판의 높이와 단면

평균유속에 의해 계산된 레이놀즈수는 구동류의 레이놀즈수로 구별하였다.

단면평균유속은 펌프의 출구 측에 설치된 디지털 유량계에서 측정된 유입유량을 이용하여 계산하였다. 채택된 캐비티의 레이놀즈수는 2.5×10^3 , 5×10^3 , 7×10^3 및 10^4 이다. 구동류의 단면평균유속을 구하기 위한 유량은 디지털 유량계(ISOIL사, Model : MC108 - G7)를 이용하여 측정하였으며 유량계의 오차를 검증한 결과 1.7×10^{-4} l/sec으로 판독오차에 대한 유효자리수를 고려하여 무시하였다.

그림2는 실험에 사용된 유동장의 상세한 규격을 보여주고 있다. 폭이 W이고 높이가 H이면 종횡비는 W/H이다. 실험에서 선정된 W/H는 1 : 1, 2 : 1 그리고 3 : 1이며, 유동장의 재질은 가시화 실험이 용이하도록 두께 15 mm의 투명아크릴을 가공하여 제작하였다. 구동류의 레이놀즈수는 채택된 네가지의 캐비티 레이놀즈수에 대하여 1.25×10^3 , 2.5×10^3 , 3.75×10^3 및 5×10^3 이며 유입 대표속도는 각각 0.15 m/sec, 0.3 m/sec, 0.47 m/sec 및 0.63 m/sec이다. 그리고 유동장의 입구 측에는 폭 150 mm, 높이 7.5 mm 그리고 길이가 750 mm인 유입 평판을 두어 입구구간의 영향을 최소화 하고자 하였다.

가시화 실험에서 유동조건별로 유동장이 충분히 발달하면 고속카메라(Photron사, 640×480 픽셀, B&W, 240pps)에 영상을 기록하였다. 얻어진 영상은 기수필드와 우수필드의 영상으로 분해하여, 두 프레임의 연속된 영상의 시간간격이 일정해지도록 하였다. PIV에서 속도를 측정하기 위한 동일입자 추적알고리즘으로서는 계조치의 분포를 이용하여 최대 상호상관계수를 탐색하는 기법을 채택하였다. 이때 속도벡터의 격자수는 50×50 이고 상관계수를 구하기 위한 탐색영역의 반경은 7~10픽셀이다. 정방형의 상관영역의 크기는 35~50픽셀이며 하나의 순시 유동장에 대한 처리 시간은 펜티엄기종(CPU 200MHz)에서 약 1분이 소요되었다. 시간평균의 속도벡터를 얻기 위해서 동일 시간간격(1/3초)으로 저장된 연속된 100개의 영상을 순차 일괄 처리하여 산술 평균하였다.

3. 결과 및 고찰

입방형캐비티는 상부의 채널흐름과 이 채널흐름에 의해서 전단응력을 공급받는 캐비티의 복합 유동장이다. 캐비티 내부에는 강제와류의 형태를 갖는 순환류가 있으며 캐비티의 상부에는 큰 속도 구배에 따른 전단혼합층(sheared mixing layer)이 형성된다.

그림3(a)는 $Re=2.5 \times 10^3$ 에 대한 순시의 속도벡터분포를 보이고 있다. 상부의 속도는 대표속도이며 PIV계측에 의해 얻어진 속도를 대표속도와 대표길이를 무차원화 하여 나타내었다. 해석의 편의를 위하여 캐비티를 4등분하여 고찰한다. 캐비티의 좌측으로부터 유입된 구동류는 우측의 출구 측으로 다소 굴곡된 형태로 이동하고 있으며, 전단혼합영역은 출구 측에 근접하여 존재하고 있다. 일사분면과 사사분면에 걸쳐 강제와류의 형태를 갖는 주와류가 존재함을 알 수 있고 이사분면의 상부에서 시계방향으로 회전하는 주와류와 구동류가 충돌하는 현상이 나타나 있다. 그리고 삼사분면의 좌측하부에서는 주와류에 의한 이차 와류가 발생되고 있다. 이것은 상부의 구동류로부터 캐비티내부로 전달된 전단응력이 대부분 강제와류를 형성하는데 이용되기 때문이다. 일사분면의 우측상부를 관찰하여 보면, 벽면부근에서 속도의 세기가 크게 약화된 공간분포 특성이 나타나고 있다. 이것은 구동류중 출구측으로 유출되지 못한 구동류의 일부가 캐비티의 우측벽면에 충돌하여 직진성을 잃어버리기 때문이다. 이 부분의 유동은 주와류의 회전방향으로 혼합되어 이동하거나 주유동의 직각방향인 스펀방향으로 운동에너지의 배분을 초래하여 3차원적흐름을 형성하고 삼사분면의 하부측으로 유입하게된다.

그림3(c)는 $Re=7.5 \times 10^3$ 에 대한 순시의 속도벡터분포이다. 레이놀즈수가 커진만큼 와류의 중심점은 우측벽면 쪽으로 이동하고 있으며 유동장의 하부 영역에서는 중앙단면인 계측단면측으로 좌우에서 유입되는 흐름 즉, 스펀방향으로부터의 유입량이 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 우측상부의 벽면측에 접근하여 속도의 세기가 약화된 영역이 나타나고 있다. 이것은 입방형 캐비티의 중

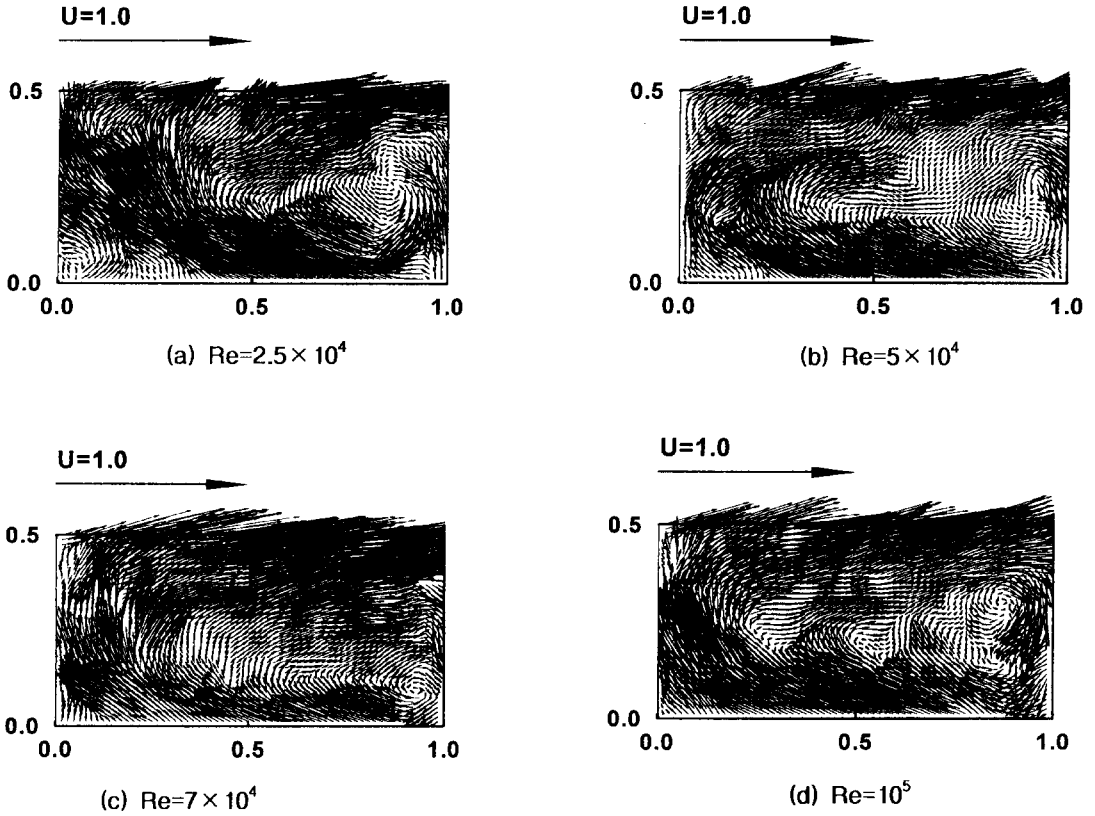


Fig. 3 Instantaneous Velocity Vector Distribution

양단면($Z=0.5$)에서 구동류의 진행방향인 우측벽면 상부에서 좌·우로 퍼져나가는 흐름이 지배적이며 이 흐름은 하부에서 유입되는 형태로 순환하고 있기 때문이다.

그림3(d)는 레이놀즈수 10^5 에 대한 순시의 속도 벡터분포이며 레이놀즈수가 증가함에 따라 전단 혼합영역이 입구 측으로 이동해 가는 경향이 관찰되었다. 이와 같은 전단혼합층의 발생장소가 레이놀즈수가 클수록 입구 쪽에 근접하는 것은 캐비티 내부의 강제와류의 회전속도에 대한 구동속도의 크기가 레이놀즈수가 클수록 상대적으로 증가하기 때문이다.

그림4는 시간 평균의 유동 특성을 알아보기 위하여 레이놀즈수 7.5×10^4 에 대해 기록된 영상을 연속적으로 재생하여 샘플링한 300회의 영상 중 3의 배수에 해당하는 영상을 선택하여 동일입자 추

적을 행하여 얻은 순시 속도 벡터를 산술 평균한 결과이다. 와류의 중심도 우측벽면에 근접해서 존재하고 있으며 상부에서의 전단혼합층의 영향이 나타나는 굴곡진 형태가 완화되어 나타나 있다.

또한 캐비티의 좌측하부 근처에서는 운동에너지의 유입이 이루어져 속도벡터의 크기가 매우 크게 증가하고 있다. 이것은 구동류의 진행방향인 우측벽면 상부에서 좌·우로 퍼져나가는 흐름이 하부에서 유입되는 형태로 순환하기 때문이며 밀폐 캐비티 유동장에서는 발견되지 않은 새로운 현상으로 보여진다.

그림5는 종횡비에 따른 속도분포를 보이고 있다. 시간평균의 데이터를 이용하여 수평 및 수직 속도성분을 각각 캐비티를 기하학적으로 8등분 한 선상에서 채택된 네 종류의 레이놀즈수에 대하여 속도분포를 도시한 것으로 우측 상부의 기준속도

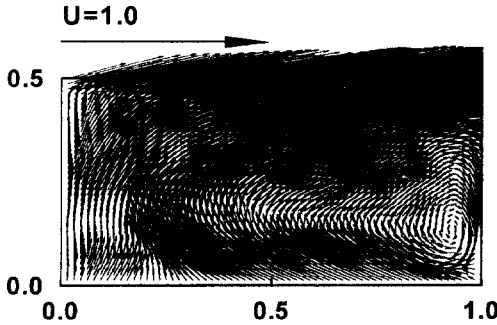
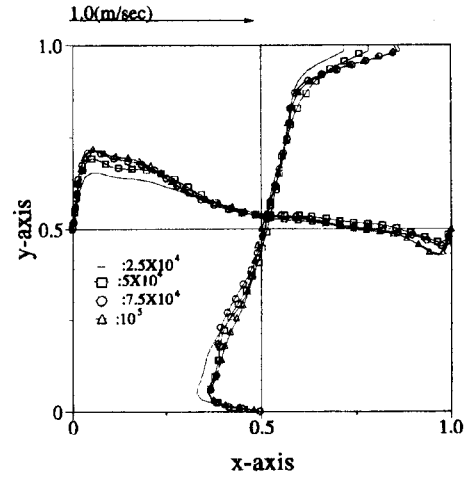


Fig. 4 Time - mean Velocity Vector Distribution at $Re=7.5 \times 10^4$ (AR=2 : 1)

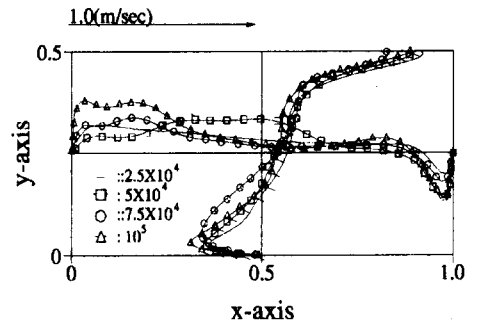
의 크기는 실제 속도의 값을 나타낸다. 세 종류의 종횡비에 따른 각 레이놀즈수의 수직 및 수평속도 성분을 겹쳐서 비교하여 보면 앞에서 언급한 강제 와류의 위치와 레이놀즈수에 따른 경향이 잘 나타나 있다.

그림5(a)에서 좌측벽면근처의 상승하는 속도가 크게 나타나고 있다. 즉, 중앙단면에서는 삼사분면에서 이사분면 측으로 상승하며 회전하는 흐름에 밀려 강제와류의 중심위치가 우측벽면 측으로 크게 치우친 타원형의 형태로 나타나게 된다. 그리고 각 부에서의 속도성분의 크기는 레이놀즈수가 증가함에 따라 거의 비례적으로 증가함을 알 수 있다.

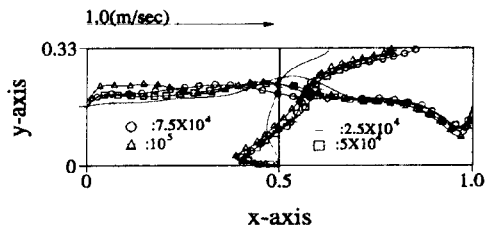
그림5(b)는 종횡비 2 : 1의 경우로서 강제와류의 중심이 캐비티의 우측벽면 측으로 치우쳐 있다. 강제와류의 형태는 타원형이며 좌측벽면의 주위의 유동도 내부를 순환하는 강제와류의 회전방향과 일치하고 있다. 이것은 앞에서 언급한 운동에너지의 분배 구조와 밀접한 관련이 있을 것으로 예상된다. 즉, 밀폐캐비티의 경우에는 우측 벽면을 따라 내려오는 전단성분이 정연한 경계층을 이루면서 회전하며 이때의 전단성분은 상부 벽면구동에너지의 상당부분을 그대로 보유함으로써 흐름의 2차원성을 그대로 유지하는 반면 본 연구에서와 같은 개방형 캐비티에서는 전단층에서 발생한 다수의 와류가 우측벽면에 부딪치면서 에너지의 분배 구조를 초래하기 때문으로 보여진다. 그림5(c)는 종횡비 3 : 1의 경우를 보이고 있다. 캐비티 내부를 순환하는 흐름이 캐비티 내부의 일부에만 형성되고 있음을 알 수 있다. 이것은 내부의 강제와류



(a) AR=1 : 1



(b) AR=2 : 1



(c) AR=3 : 1

Fig. 5 Time - mean Velocity Vector Profiles at Various Sections

의 크기가 구동류의 속도에 지배를 받으며 우측벽면에서 멀어질수록 세기가 약해지고 있음을 나타내고 있다. 이것은 상부의 구동류로부터 전달받은 전단응력이 대부분 강제와류를 형성하는 데 이용

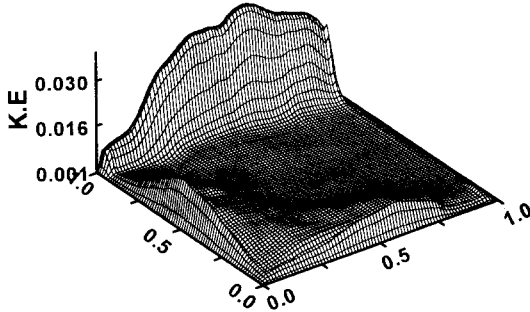


Fig. 6 Distribution of time - mean kinetic energy at $Re = 7.5 \times 10^4$

되기 때문에 여겨진다.

그림6은 순시속도벡터에서 각 위치의 운동에너지를 산술 평균하여 3차원적으로 도시한 시간평균의 운동에너지분포이다. 가운데가 가라앉은 형태를 유지하고 있으며 상부에 굴곡진 부분은 전단혼합 영역을 나타내고 있다.

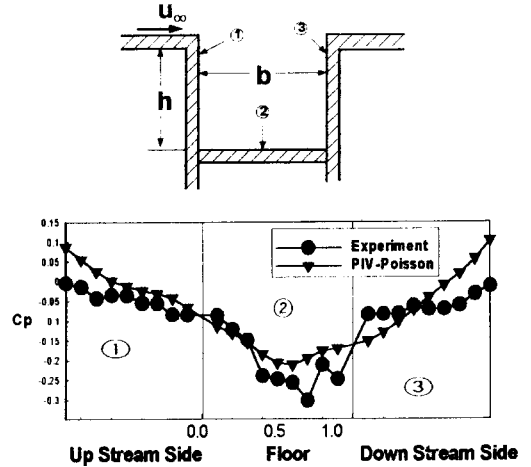
압력계산은 MAC법에서의 엇갈림격자상에서 수행하였다. 격자의 해상도는 2차원 등간격 40×40 이며, PIV계측에 의해 얻어진 전류동장의 시간평균의 속도성분에 적용하였다. 시간에 관한 항이 나타나지 않는 ($\zeta - \phi$)계에서 압력에 관한 프와송 방정식은 다음의 식으로 표시된다.

$$\nabla^2 p = S \quad (1)$$

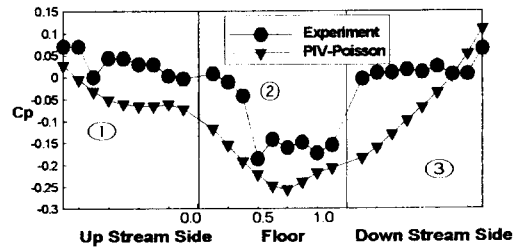
$$S = 2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (2)$$

경계조건은 원칙적으로 벽면에서는 부착조건 (no-slip)을 적용하며, 구동류가 흐르는 상부의 경계에서의 v 에 대해서는 슬립, u 에 대하여는 구동류의 단면 평균유속을 적용하여 일정유속조건으로 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.

그림7은 실험에서 정압탭에서 계측한 압력과 PIV에서 얻어진 속도성분을 프와송방정식에 적용하여 계산한 압력의 상호 비교를 위하여 좌 우측 및 바닥면에 대하여 각 레이놀즈수 별로 겹쳐 도시



a) $Re=7.5 \times 10^4$



(b) $Re=10^5$

Fig. 7 Comparison of Wall Pressure between PIV - Poisson and Experiment

한 것이다. 그림7(a)에 유동장의 개략도를 보이고 있다. 좌측벽면을 영역①, 하부 바닥면을 영역② 그리고 우측벽면을 영역③으로 나타내었다.

$$C_p = \frac{(P - P_{ref})}{\frac{\rho U^2}{2}} \quad (3)$$

C_p 는 압력계수이며 유량에 의해 환산된 단면 평균유입속도와 정압탭에서 계측된 압력 성분을 이용하여 계산하였으며 P 는 정압이다. 그리고 P_{ref} 는 PIV - Poisson의 값과 비교하기 위하여 대기압으로 설정하였고 U 는 대표속도로서 구동류의 단면 평균속도이다. 정압탭에 의한 실험결과와 PIV - Poisson의 결과가 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 실험결과에서 좌측벽면의 상부(영역①)와 하

부 바닥면의 우측(영역②)에서 불연속적인 압력이 보이고 있다. 이곳은 그림6의 운동에너지가 급격하게 변화하는 부분으로, 차후에 조밀한 정압탭의 간격으로 계측한 벽면압력에 의한 고찰이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 캐비티의 상부에 구동류가 흐르는 입방형캐비티를 대상으로 PIV에 의해 속도를 계측하고 정압탭에서 압력을 측정하여 내부유동 특성을 고찰하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

캐비티 내부의 유동형태는 전체적으로 강제와류와 유사한 속도분포가 지배적이며 구동류로부터 전달받은 전단응력의 대부분이 캐비티 내부를 순환하는 회전에너지로 전환되었다. 그리고 상부에서 구동류와 내부 순환류가 혼합되어 형성된 전단혼합영역의 영향으로 순간속도분포가 변동이 심한 현상을 보였다. 캐비티 내부에서 주와류의 크기는 레이놀즈수의 증가에 따라 증가하였으며, 스펙방향으로의 운동에너지의 이동이 크게 나타남으로써 좌측상부에서 유출되어 바닥면의 모서리 측면으로 유입하는 3차원성이 강한 흐름을 보였다. 그리고 PIV에 의해 얻어진 속도성분을 프와송 방정식에 적용하여 구한 압력분포는 정압탭에서의 압력을 미압계로 측정 한 실험결과와 유사한 결과를 나타내었다.

후 기

이 연구는 목포해양대학교 교내 학술연구비의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) R.J.Adrian, "Particle Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics," Annu. Rev. Fluid Mech., Vol.23, pp.261 - 304, 1991
- (2) C.Gray, "The Evolution of Particle Image Velocimetry," Proc. of Optical Methods & Data

Processing in Heat and Fluid Flow, I.Mech.E., pp.19 - 36, , 1992

- (3) P.Buchhave, "Particle Image Velocimetry - Status and Trends," Exp. Ther. and Fluid Sci. Vol. 5, pp.586 - 604, 1992
- (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, pp.335 - 340, 1994
- (5) R.J.Adrian, "Limiting Resolution of Particle Image Velocimetry for Turbulent Flow," Proc. Advances in Turbulence Research, POSTEC Pohang Korea, pp.1 - 19, 1995
- (6) 최장운, 이영호, 김춘식, "PIV에 의한 벽면압력분포의 추정," 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집2, pp.346 - 350, 1994

저 자 소 개



조대환(趙大煥)

1964년 2월 29일생. 1986년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1995년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1998년 동대학원 졸업(공학박사). 1급기관사. 현재 목포해양대학교 전임강사



최민선(崔民善)

1959년 1월 28일생. 1982년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1990년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1995년 동대학원 졸업(공학박사). 1991 - 현재 목포해양대학교 조교수



이영호(李英浩)

1958년 2월 24일생. 1980년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1982년 한국해양대학교 대학원 기관학과 졸업(석사). 1989년 동경대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 1982년 - 현재 한국해양대학교 이공대학 부교수