

2차원 평면 Poiseuille 흐름 구동 입방형 캐비티의 PIV계측

조 대 환¹⁾, 이 영 호²⁾

PIV Measurement of Cubic Cavity Driven by 2-D Plane Poiseuille Flow

Dae-Hwan Cho, Young-Ho Lee

Abstract

Recently, high performance personal computer has made it possible for the digital image processing methods to describe the flow fields quantitatively by PIV(Particle Image Velocimetry) which acquires multi-points velocity data simultaneously.

The image processing system consists of one commercial image board slit into a personal computer and 2-dimensional sheet light by Argon-Ion Laser with cylindrical lens and flow picture recording apparatus. Thresholding, boundary detection, calculation of gravity centers, and related techniques are scrutinized. As a particle tracking method, two-frame identification method was suggested with high performance. Interpolated velocity vectors distribution, equi-baric lines are also illustrated as examples. Correct boundary conditions for Poisson equation to estimate wall pressure were further examined.

Experiments were conducted in a three-dimensional cubic cavity driven by

1) 한국해양대학교 기계공학과 석사과정 열유체 전공
2) 한국해양대학교 기계공학과 부교수

2-dimensional plane Poiseuille flow for three kinds of Reynolds number, 7.5×10^3 , 1×10^4 and 1.25×10^4 based on the cavity width and cavity inlet flow mean velocity. The results of PIV reveal that velocity profiles similar to a forced vortex prevail within the cavity and its tendency becomes conspicuous with increasing Reynolds numbers. And also, sheared mixing phenomena occur around the cavity upper wall.

1. 서 론

컴퓨터의 하드웨어 기술이 비약적으로 발전되어 처리속도가 점점 고속화되고 대용량의 데이터 처리능력을 갖게 됨으로서 디지털 화상처리¹⁾를 이용한 계측기법이 널리 적용되고 있으며, 유체계측분야에서도 유동장을 가시화하고, 그 결과를 효과적으로 화상처리 함으로서 흐름에 관한 정량적인 정보를 얻는 방법이 LSV(Laser speckle velocimetry), PTV(Particle tracking method) 및 PIV(Particle Image Velocimetry, 이하 PIV)²⁾⁻⁴⁾ 등의 기법으로 시도되고 있다. PIV는 계측하고자 하는 유동장을 가시화가 가능하도록 투명한 자재로서 실험체를 구성하고 추종성(traceability)이 우수한 입자를 고루 분포하여 그 거동을 미소시간동안 촬영한 사진 또는 화상을 분석하는 기법으로서, 전 유동장에 걸친 시간 평균적인 정보뿐만 아니라 순시적인 유동의 특성을 구할 수 있다. 또한 기법의 특성상 유동장을 기록하므로 보존이 가능하여 재현성을 확보할 수 있고 유동장에 전혀 영향을 주지 않는 장점이 있다.

캐비티 흐름은 밀폐흐름의 대표적 유동장으로 대형계산기의 칩냉각용 열교환기, 터보기계 등의 축밀봉에 사용되는 래버린스팩킹, 제지 및 필름 제조의 코팅공정 등에서는 구동류에 의한 캐비티가 이용된다. 따라서 본 연구에서는 입방형 캐비티 상부에 2차원 평면Poiseuille구동류를 흐르게 하여 형성된 3차원 비정상유동장을 가시화하고, PIV를 이용한 계측을 통하여 캐비티내부의 유동특성을 고찰하고자 하였다. 이를 위하여 화상처리 시스템은 퍼스널컴퓨터에 내장 가능한 이미지보오드를 이용하여 구성하였고 입자추적법에 있어서는 기존의 4프레임식⁵⁾에 대하여 상관계수에 의한 2프레임⁶⁾의 동일입자추적 알고리즘을 제안하여 적용하였다. 또한, CFD에서 압력에 관한 프와송(Poisson)방정식에 PIV의 속도데이터를 이용하여

벽면을 포함한 전 유동장에 걸친 압력분포를 얻었다.

2. 가시화 실험

Fig.1과 Fig.2는 실험에 사용된 가시화실험장치의 개략도 및 유동장이다. 실험에서 채택한 3차원의 입방형 캐비티는 높이, 폭 그리고 길이가 각각 150mm이며 유동장의 상부에 폭 150mm, 높이 7.5mm, 길이 750mm의 유입 평행평판을 설치하고 캐비티의 상부에 층류를 구동류로 작용시켜 전단력을 공급하여 3차원의 비정상 유동장을 형성하였다. 입방체 캐비티는 15mm의 투명한 아크릴을 사용하여 가시화 실험에 적합하도록 하였고, 주입입자는 직경 $150\mu\text{m}$ 정도의 백색 구형입자인 나일론12를 사용하였다. 또한 캐비티 출구 측에 폭 52.9mm, 20도의 내각을 갖는 삼각위어를 설치하여 캐비티의 유출유량을 측정하였다. 가시화를 위한 유동장의 조명은 출력 300mW의 Argon-Ion 레이저에 광섬유 케이블을 연결하고 그 종단에 원통형 렌즈를 부착하여 폭 2mm, 길이 150mm의 시이트라이트를 유동장의 중앙 단면($z = 0.5$)에 주사하였다. 화상의 기록장치로서는 8mm의 캠코우더를 사용하였으며 가정용의 VTR에서 실험결과를 기록한 비디오 테이프를 재생시켜 이미지보오드의 화상입력단자에 연결, 입력장치로서 사용하였다.

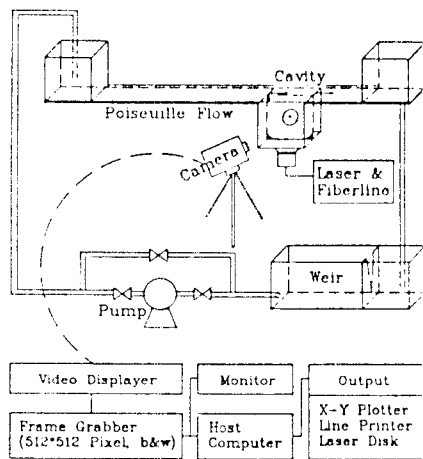


Fig.1 Schematic Diagram of PIV System

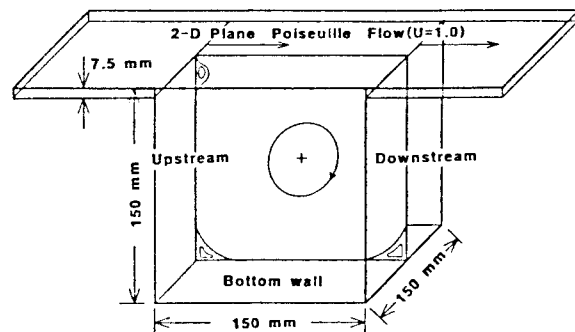


Fig.2 Cavity Dimension

가시화장비중 호스트 컴퓨터 및 화상처리장치로서는 개인용 컴퓨터(실험에서는

486DX를 사용)에 표준적인 NTSC방식의 화상처리용 이미지보드(DT2853, 512 x 480 pixel, B&W, Data Translation 사)를 내장하여 사용하였으나 하드웨어적인 제약 때문에 화상의 입력시간 Δt 는 1/15초이다.

지금까지의 캐비티 유동관련 실험은 캐비티의 상면에 무한벨트를 설치하고 벨트의 장력과 속도를 조절하여 일정한 전단응력을 캐비티 내부에 공급하는 방법⁷⁾⁻⁹⁾을 취하여 왔다. 그러나 본 실험에서는 2차원 평면 Poiseuille흐름을 캐비티상면에 통과시켜 캐비티내에 전단응력을 공급하도록 하고¹⁰⁾, 캐비티의 높이를 대표 길이, 캐비티 입구에서의 평균유입속도를 대표속도로 하여 겔보기 레이놀즈수를 계산하였으며 채택된 레이놀즈수는 7.5×10^3 , 1.0×10^4 및 1.25×10^4 의 세가지 경우로서 시간평균유입속도는 23°C에서 각각 4.70 cm/sec, 6.27 cm/sec 및 7.83 cm/sec이다.

PIV에서는 유동장에 분포된 입자의 미소시간 간격의 화상을 컴퓨터로 분석하여 속도벡터에 대한 데이터를 얻는 방법이므로 입자의 추종특성은¹¹⁾ 결과의 신뢰성에 매우 큰 영향을 미친다. 그러나 실제로 가시화기법에 사용되는 입자중 시판되는 것은 주로 Nylon12 또는 Polyethylene 등이며 비중은 물과 비교하여 대략 1.02 전후의 값을 갖는다.

3. 화 상 처 리

입력화상은 기본적으로 많은 잡음성분을 포함하고 있다 특히 유동장을 가시화하는 경우 배경화면을 제거해야 한다. 실험에서는 15개의 연속적인 화면을 1/15초의 간격으로 얻고 이를 프레임연산(감산)을 통하여 제거한다. 또한, 화상처리 고유의 기법으로서 전처리를 행하면 화질을 개선할 수 있으며, 입자 획득율도 증가시킬 수 있다. 화질개선에 이용되는 방법으로서는 계조변환, 첨예화, 평활화 등이 있다. 이러한 화질개선 뿐만 아니라 디지털 농담화상의 잡음을 보다 간단하면서도 효과적으로 처리할 수 있는 것이 역치처리이다. 즉, 입력화상의 잡음성분과 실제 화상을 구분하여 화상을 2치화 시키는 방법으로서 일정값 이하를 잡음으로 처리한다.

실험장치는 입방형의 캐비티를 사용하고 있지만 CRT에 나타나는 화상은 바깥쪽으로 약간 팽창된 형태로 나타나며, 화상을 기록할 때에 정확히 수평을 유지할

수 없으므로 전체적으로 약간 회전된 상태가 된다. DT2853 이미지보오드는 이 화상을 별도의 보정없이 디지털화상으로 변환하고 PIV에서는 픽셀좌표를 기준으로 처리를 하므로 반드시 이러한 에러성분을 보정해야 한다. 이러한 회전보정을 위한 변환처리를 아핀변환이라 하며 입력화상의 회전상태를 조사하여 보정한다.

4. PIV 계측 및 입자추적

유동장에 분포된 입자의 속도벡터를 얻는 방법은 입자가 일정거리를 통과하기 위하여 요하는 시간을 측정하거나, 일정시간 내의 트레이서 입자의 이동거리를 계측하여야 한다. PIV에 있어서는 한 입자의 시간에 따른 위치를 측정한다. 즉, 유동장을 가시화하고, 얻어진 화상을 처리하여 미소시간간격 동안에 이동한 다수의 입자의 이동변위를 자동적으로 추적함으로써 속도벡터를 구한다. 2프레임방식에 의한 입자추적에는 지금까지 몇 가지의 방법이 제안되어 있으며, 어느 경우에도 입자의 분포특성에 대한 상관계수를 구하여 동일입자를 판별하는 기법을 택하고 있다. Fig.3은 이 방법을 개념적으로 보여주고 있다. 제 1프레임에 존재하는 입자가 이동할 수 있는 최대거리의 중심을 제 2프레임에 설정한다. 각각의 중심을 중앙으로 하여 상관값의 계산영역을 다시 설정한다. 입자의 중심점이 위치하는 픽셀은 1의 값을, 존재하지 않는 픽셀은 0의 값을 부여한다. 같은 크기를 갖는 계산영역에 있어서 대응되는 양쪽의 상관값을 곱하면, 각각의 배열에서 1의 값을 갖는 경우에만 (1 x 1) 1의 상관값을 갖게 된다.

$$C = \sum_{m=1}^{21} p_m \times q_m \quad (4.2)$$

이와 같은 조작을 상관영역전체에 걸쳐 행하여 식(4.2)을 평가함수로 이 값이 최대가 되는 입자위치를 동일입자의 이동위치로 결정한다. 다음으로, 부적합한 상관값에 의한 이상치(outlier)를 통계적인 방법 또는 대화형의 화면처리로 제거하여 유효한 동일입자만을 남긴다. 통계적인 에러처리의 판별식은 예를 들면, 이동거리와 각도에 의한 판별식을 들 수 있다. 즉, 판별대상입자를 중심으로 하여 주변의 가장 가까운 4개의 입자를 채택하여 대상입자 자신을 포함한 5개의 입자의

이동거리평균을 구한다. 대상입자가 이 평균이동거리보다 2-4배 정도 이상으로 크면 에러로 처리한다. 각도도 같은 방법을 적용해서 평균각도와 대상입자의 절대각도차가 40-60도 보다 크면 에러로 처리한다. 이 경우에 제2프레임으로의 최대이동거리, 상관값 계산영역 등은 유동조건에 따라 최적 값을 부여할 수 있다.

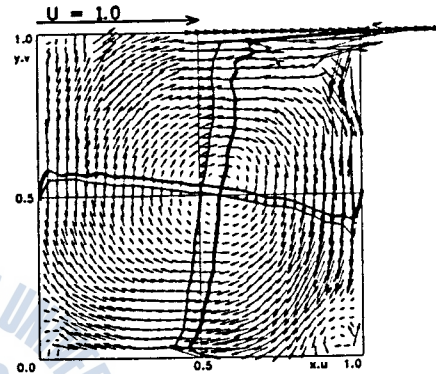
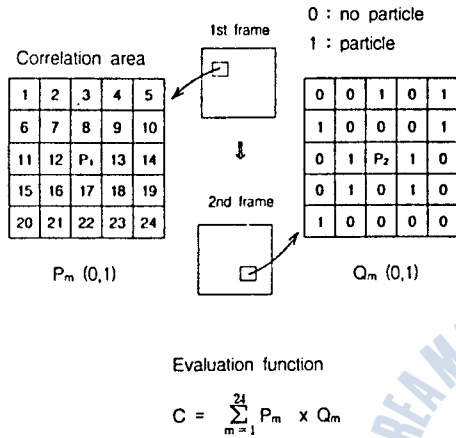


Fig.3 Two-Frame Identification

Fig.4 Velocity Distribution (Re=7.5 x 10³)

다음으로, 부적합한 상관값에 의한 이상치를 통계적인 기법 또는 대화형의 화면 처리로 제거하여 유효한 동일입자만을 남긴다. 이 결과 2프레임의 경우가 4프레임 방식에 비하여 최종유효 입자수가 20~30%정도 증가되었으며, 속도구배가 큰 영역에서도 정상적인 속도벡터를 얻을수 있었다. 따라서 2프레임법은 고속의 흐름에서 입자획득율 면에서 우수함을 알 수가 있었다.

5. 계측 결과의 고찰

5.1 속도계측 결과의 고찰

시간평균의 유동특성을 알아보기 위하여 일정한 시간간격으로 샘플링된 순시속도벡터를 한 단면당 1,800개 전후가 될 때까지 중첩하였다.

Fig.4은 Re=7.5 x 10³의 결과이다. 등간격의 격자(34 x 34)상에 보간된 속도벡터를 보면 유동장 전체에 걸쳐 일그러진 강제와 형태의 제1와가 존재하며 우측하단

구석에는 작은 규모의 2차와가 발생하고 있다. 이는 지금까지의 벨트구동에 의한 캐비티흐름연구에서와 마찬가지로 벽면존재로 인한 점성댐핑효과에 의해 압력과 원심력의 균형이 무너짐으로서 상류 측의 강한 전단속도가 약화되어 압력고개 (pressure hill)를 넘어서지 못하기 때문으로 보여진다. 중앙단면에서의 실선중 굵은 선은 주류에 의해 형성된 제1와(primary vortex)의 중심을 원점으로 한 u 및 v 의 속도분포를 보이고 있다. 특히, 와의 중심을 기준으로 한 속도분포는 유동장의 운동에너지가 회전에 의해 변화하는 특성을 잘 보여주고 있다. 제1와의 중심위치는 좌측하단을 원점으로 한 무차원좌표로서 $x=0.564$, $y=0.529$ 의 값이다. 즉, 유동장은 우측 상방향으로 약간 치우쳐서 회전하고 있으며, 이는 캐비티 상면에서 공급되는 주류회전방향의 전단응력이 충분하지 못하여 우측의 벽면 경계 층에서 스핀방향으로의 운동에너지분배가 상대적으로 큼을 나타내고 있다. 그 결과, 하부 및 좌측 그리고 상부 측에서의 속도분포도 평탄한 모양을 나타내고 있다. 한가지 특징적인 것은 상부의 속도분포가 골곡이 심한 모습을 보이는 점이다. 단, 그림에서는 곡선근사에 의해 부드러운 분포를 보이고 있다. 이것은 상부에서 공급되는 2차원의 평면 Poiseuille흐름과 보다 저속으로 회전하는 주와(渦)와의 접촉에 의해서 발생된 전단혼합층(sheared mixing layer)의 영향으로 보여진다. 또한, 캐비티 상부에 흐르는 구동류의 출구에서 아래측의 속도분포가 부적합하게 표현되고 있으나, 이는 계측시 유효입자수의 부족에 따른 보간오차 때문일 수도 있으나, 유동장 고유의 특성으로 보아지며 차후에 보다 면밀한 검토를 필요로 한다.

Fig.5는 $Re=1.0 \times 10^4$ 의 결과이다. 앞의 경우보다 레이놀즈수가 2,500만큼 높은 경우이며 캐비티의 평균유입속도는 4.7 cm/sec에서 6.27 cm/sec로 증가하였다. 제1와의 중심위치는 약간 가상중심점($x=0.5$, $y=0.5$)에 접근하고 있으며 중앙단면에서의 속도분포를 보면 전반적으로 $Re=7.5 \times 10^3$ 의 경우와 비교해서 보다 큰 값을 보이고 있다. 이것은 상부에서 공급되는 전단응력이 충분하여 강제와의 형성을 보다 용이하게 함을 나타내고 있다.

Fig.6은 $Re=1.25 \times 10^4$ 의 결과이다. 제1와의 중심위치는 가상중심점에 거의 근접하고 있으며 우측하단에서는 2차와의 발달이 미약하다. 또한, 중앙단면에서의 속도분포도 거의 강제와의 형태를 유지하고 있다. 즉 스핀방향으로의 운동에너지의 분배가 상대적으로 미약하며, 상부에서 공급된 전단응력은 순수하게 회전 운동에너지로 바뀌고 있음을 나타내고 있다. 그러나 상부에서는 여전히 전단혼합층의 영향이 남아 있으며 이는 본 연구에서 채택한 2차원 평면 Poiseuille류 구동의 특

특한 특징으로 여겨진다.

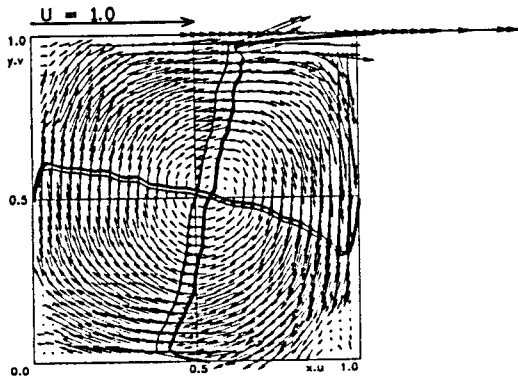


Fig.5 Velocity Distribution ($Re=1.0 \times 10^4$)

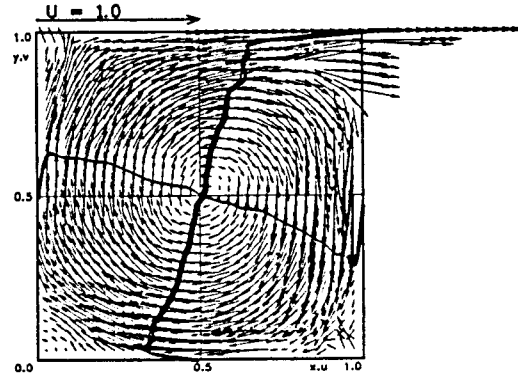


Fig.6 Velocity Distribution ($Re=1.25 \times 10^4$)

Fig.7은 캐비티의 와의 중심을 기준으로 세 레이놀즈수에 대하여 함께 도시한 결과로 $Z=0.5$ 단면을 대상으로 한 것이며, Poiseuille류 구동에 의한 경우에는 TGL(Taylor Görtler Like)와의 특징인 스펀방향으로의 운동에너지 배분구조가⁸⁾ 레이놀즈수가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다.

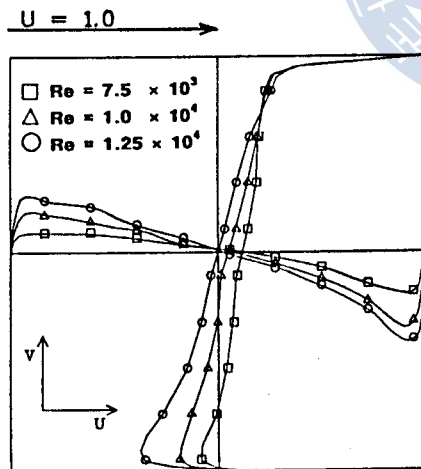


Fig.7 Comparison of Velocity Profiles
at Vortex Center

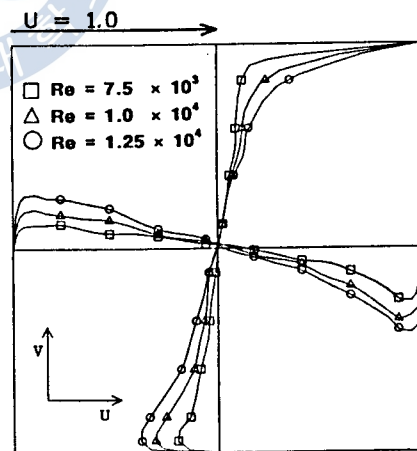


Fig.8 Comparison of Velocity Profiles
at Geometric Center

이것은 지금까지의 벨트구동흐름의 경우와는 다른 결과이다. 본 실험에서 레이놀즈수의 계산을 단면평균속도를 이용한 점, 또는 벨트구동의 경우에는 보이지 않

있던 전단혼합영역(sheared mixing region) 이 새롭게 나타난 점 등을 고려하더라도 레이놀즈수의 증감에 따른 TGL와의 영향이 서로 다른 경향¹²⁾, 즉, 레이놀즈수가 증가할 수록 강제와의 형태를 유지하며 이 결과는 밀폐흐름에 있어서 층류구동류에 의해 발생하는 내부흐름의 한 특징으로 판단된다. Fig.8은 중앙단면의 속도분포를 세 레이놀즈수에 대하여 함께 표시한 결과이다. 레이놀즈수가 높을수록 속도분포가 크게 나타남을 알 수 있다. 즉, 강제와의 거시적인 와도 또는 각 속도가 크게 나타나며 이는 구동류의 운동에너지의 크기에 거의 비례함을 알 수 있다.

5.2 압력계산

PIV의 연구결과는 대체로 속도벡터 자체만을 얻는 데에 중점을 두고 있으며, 이를 이용한 압력분포의 획득에 관한 연구는 매우 드물다. 예를 들면 K.Imaichi¹³⁾ 및 J. Massons¹⁴⁾ 등은 Navier-Stokes 방정식의 차분식에 기초를 두고 압력값을 구하고 있다. 그러나 이 경우에도 벽면까지의 압력분포를 구하지 않았으며 대상유동장도 저레이놀즈수에 국한되어 있다.

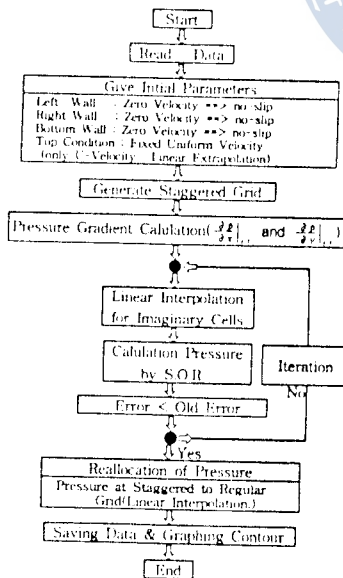


Fig.9 Flow Chart of Pressure Calculation

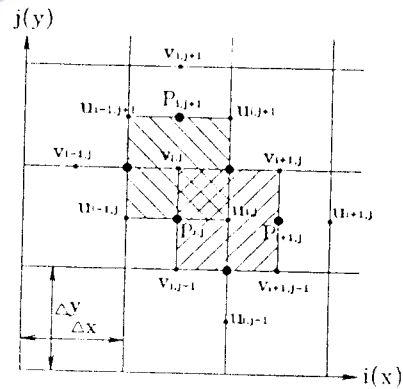


Fig.10 Distribution of Variables for Regular Grid

Fig.9와 Fig.10는 압력계산의 계통도와 계산에 사용된 MAC법에서의 엇갈림격자

배치를 보이고 있다. 격자의 해상도는 2차원 등간격 40×40 을 기본으로 하고 사용되는 데이터로서는 SOLA 알고리즘에 의해 구한 것과 3차원 PIV에 의해 얻어진 실험데이터의 두가지를 가지고 $Re=1.0 \times 10^4$ 의 경우에 관하여 계산을 수행하였다.

먼저 프와송방정식을 PIV에 의해 얻어진 실험데이터에 적용하여, 벽면을 포함한 전유동장의 압력분포를¹⁵⁻¹⁶⁾ 구하는 것이 타당한가를 검토하기 위하여 CFD에 의해 구해진 일정시각의 속도 값을 이용하였다. 즉, 이 값을 프와송방정식에 적용하여 구해진 압력이 CFD결과에 의한 압력값과 같은 경우에는 제안된 경계조건 및 계산요령이 합리적이라고 판단하였다. 그리고 이 방법을 PIV에 의한 실험결과에 적용하여 벽면을 포함한 전유동장의 압력분포를 구하였다.

압력에 관한 프와송방정식은 $(\zeta - \psi)$ 계를 이용하였으며 다음의 식과 같다.

$$\nabla^2 p = S \quad (5.1)$$

$$S = 2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (5.2)$$

식(5.2)의 소오스항을 계산하는 경우에 있어서 벽면에서는 부착조건(no-slip)을 적용하며, 벨트부분에서는 v 에 대해서는 슬립, u 에 대하여는 벨트부분에 일정유속 조건을 적용해서 가상셀에서 u 속도를 구하였고 벨트부분을 중심으로 바로 위 및 아래의 각각 하나의 셀에 대해서만 내부의 속도 값을 이용해서 u 속도를 테일러의 일차식을 이용해 외삽하는 방식을 택했다. 다시 말해서 벨트부근에서는 격자의 해상도 등이 낮기 때문에 지나치게 큰 속도구배가 형성되므로 벨트가 존재하지 않는다고 가정하고 그 부근의 속도 값을 내부 값을 이용해 근사적으로 구해서 소스 및 압력구배식에 사용하였다.

5.3 압력계산에 관한 고찰

Fig.11은 2차원의 벨트구동 캐비티흐름이며 80×80 의 부등간격의 계산격자상에서 SOLA의 알고리즘을 적용하여 구한 속도벡터분포이며 Fig.12은 SOLA의 수치해법에 의해 구해진 압력분포를 벽면을 포함하여 보여준다.

Fig.13는 프와송방정식의 해에 의해서 구한 결과이다. 외견상, 대체로 일치하고 있는 경향을 보여주고 있다. 그러나 네코너에서의 분포특성에 약간의 차이점이 발견된다. 이는 수치해법상 이곳에서의 낮은 해상도로 인한 것으로 추정할 수 있다.

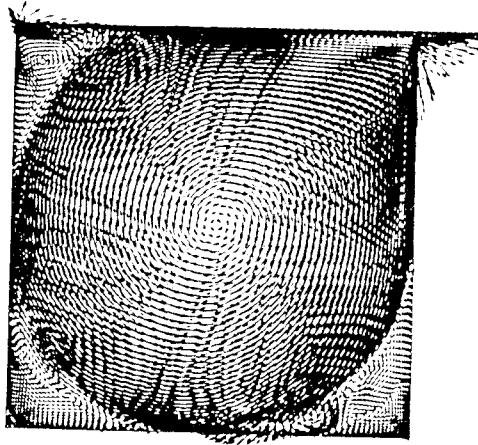


Fig.11 Velocity Vectors by SOLA

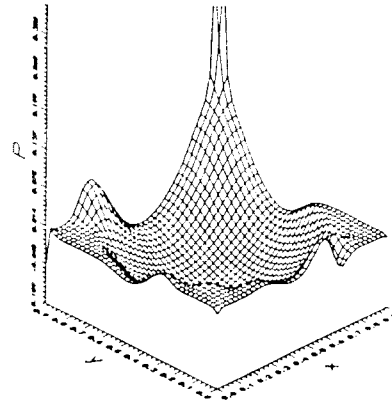


Fig.12 Pressure Distribution by SOLA

Fig.14는 압력계산에 이용된 속도분포로서 $Re = 1.0 \times 10^3$ 의 유동장에 대한 입력 화상을 임의의 등간격으로 처리하여 5개의 유동장의 속도벡터를 합하고 속도벡터를 거리의 역수보간¹⁷⁾의 방법으로 정방형격자에 속도벡터를 재배치하여 보인 것으로 주류방향의 중앙부($z = 0.5$)이며 캐비티유동장의 속도분포를 비교하는 데 가장 빈번히 인용되는 단면이다.

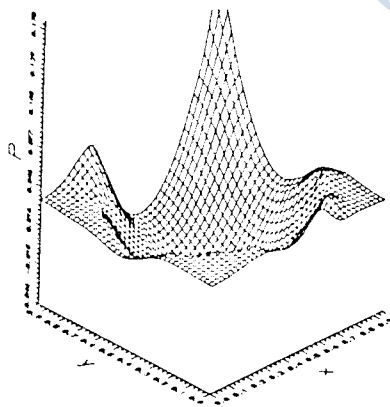


Fig.13 Pressure Distribution by Poisson's ($Re: 1.0 \times 10^4$)

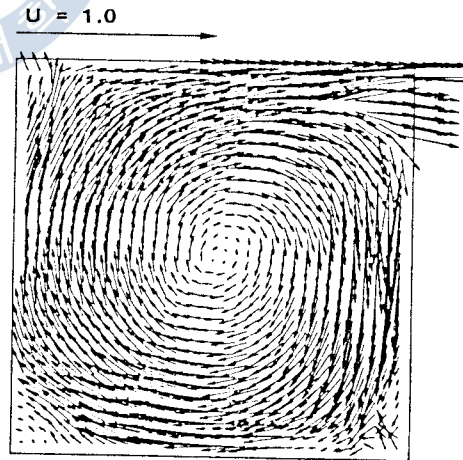


Fig.14 Interpolated Velocity Vectors at Regular Grid ($Re: 1.0 \times 10^4$)

압력분포는 이 속도분포를 기초로 하여 앞절에서 제안된 기법을 적용하여 구하였고 그 결과를 Fig.15에서 보인다. 앞의 Fig.12 및 Fig.13과 외견상 비슷한 분

포를 보이고 있다. 그러나, 수치해석은 2차원의 결과이며, 이 압력분포는 입방형 3차원캐비티내에서의 2차원단면이므로 직접적인 비교는 불가능하다.

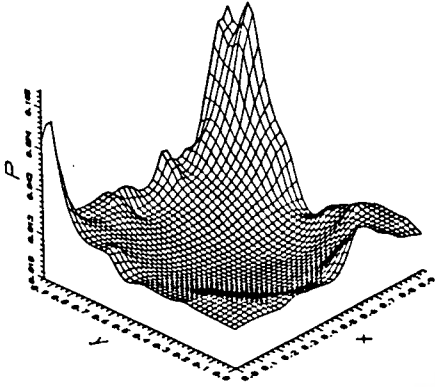


Fig.15 Pressure Estimation
by PIV-Poisson($Re:1.0 \times 10^4$)

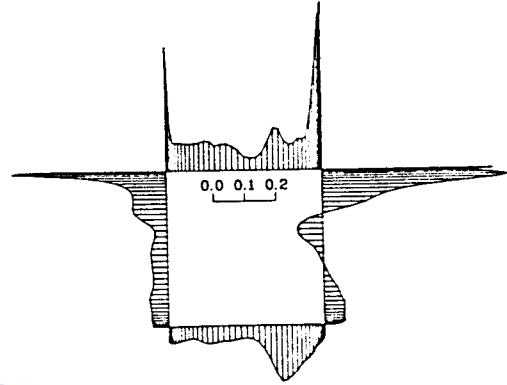


Fig.16 Wall Pressure Estimation
by PIV-Poisson($Re=1.0 \times 10^4$)

Fig.16은 벽면에서의 압력분포변동을 보이고 있다. 특히, 벨트하류부에서 비교적 낮은 압력증가가 나타나고 있으며 2차원의 수치해석의 결과보다는 벽면근처에서 변동이 심한 경향을 보이고 있다. 특히, 하류측 2차와 부분 및 상류벽면 중간지점에서 캐비티흐름에서는 중요한 유동특성중의 하나로 밝혀져 있는 압력고개 (pressure hill)가 나타나고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 2차원 평면Poiseuille구동류를 캐비티 상부에 두어 형성된 3차원 캐비티유동장의 내부 유동특성을 이미지보오드를 이용한 화상처리유속계로서 PIV를 적용하여 고찰하였다. 또한 속도계측에서 동일입자의 추적법으로서 2프레임의 상관 원리를 응용하는 알고리즘을 제시하였고 얻어진 실험데이터를 사용하여 벽면을 포함한 전유동장의 압력을 구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PIV에 있어서 개인용컴퓨터 및 이미지보오드를 이용하고 필요한 화상처리에 대한 처리소프트를 개발하여 사용함으로써 전용 화상처리장치에 비해 소

형, 경량으로 경제적인 PIV계측시스템을 확립하였다.

- 2) PIV에 의해 속도벡터를 구하는데 있어서 본 연구에서 제안한 2프레임의 동일입자추적 알고리즘을 3차원 캐비티유동장을 계측한 실험데이터에 적용하여 속도벡터를 구하여 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 기존의 4프레임법과 비교하였을 때 최종 유효입자의 수가 증가하였고, 특히 고속의 영역에서 유효입자획득율이 높아지는 결과를 얻었다. 즉 2프레임 알고리즘은 고속의 흐름에서 보다 우수하며 전체적인 처리시간도 단축되는 장점이 있다.
- 3) 실험 결과에서 2차원 Poiseuille흐름에 의해 구동되는 캐비티유동은 내부에 잘 발달된 강제와 형태의 제1와가 존재하며 이 세기는 레이놀즈수가 증가함에 따라 커진다. 또한, 캐비티구동류와 제1와의 충돌부에서 전단혼합작용이 발생하여 압력 및 속도분포의 변동이 심한 결과를 얻었다. 이는 층류구동류에 의해 발생하는 밀폐흐름의 한 특징으로 고찰된다.
- 4) PIV에 의해 계측된 3차원의 실험 유동장의 속도벡터를 격자보간한 것과 SOLA 알고리즘을 사용하여 계산된 속도값을 압력에 관한 프와송방정식의 계산에 적용하고 벽면을 포함한 전유동장의 압력분포를 계산한 결과 대체로 일치하는 결과를 얻었다.

층류구동류에 의한 밀폐 흐름에서 구동류와 내부에 발달된 강제와의 충돌부에 발생하는 전단혼합작용에 대하여 여러 레이놀즈수에 걸친 일관된 연구와 3차원 CFD결과와의 비교, 검토는 다음의 연구과제로 남기기로 한다.

참 고 문 헌

- [1] R.C.Gonzalez, "Digital Image Processing", Addison Wesley Pres., 1987
- [2] C.Gray, The Evolution of Particle Image Velocimetry, Workshop "Optical Method & Data Processing in Heat and Fluid Flow", IMechE, 1992, pp.19-36.
- [3] N.Kasagi, K.Nishno, Flow field Measurement with particle Image Velocimetry, JSME, Vol.96, No.895, 1993, pp.498-503.
- [4] L.Hesselink, Digital Image Processing in Flow Visualization, Annu. Rev. Fluid Mech., 1988, p.421-485.
- [5] T.kobayashi, T.saga, S.segawa, and H.Kanda, Development of a

- Real-Time Velocity Measurement System for Two-Dimensional Flow Fields Using a Digital Image Processing Technique, 1989, JSME Vol.55, No.509, pp.107-114.
- [6] 최장운, 조대환, 이영호, PIV에 있어서의 입자추적기법의 개선, 대한기계학회 추계학술대회 논문집 제2권, 1993, pp.360-365.
- [7] Young-Ho LEE, Y.Matsumoto, T. Kobayashi, T. Saga, Velocity Measurements in a Cavity Flows by PIV, Proc. 2nd KSME-JSME Fluids Eng. Conf. Vol.1, 1990, pp.293-298.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 이영호, 김춘식, 최민선, 작은 밀도차를 갖는 구형입자의 추종성에 관한 연구, 해사산업연구소논문집, 1집, 1991, pp.127-139.
- [12] 이영호, 김춘식, 조대환, 최장운, TGL와의 거동특성에 관한 연구, 한국박용기관학회지, 제17권 4호, 1993, pp.254-263.
- [13] 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.
- [14] J.Massons, J.Gavalda, F.Diaz, Image processing of Cylinder Wake Generation, Phys. Fluids A 1(8), 1989, pp.1415-1423.
- [15] P.M.Gerhart, R.J.Gross, J.I.Hochstein, "Fundamentals of Fluid Mechanics", Addison-Wesley press, 1992, pp.310-395.
- [16] 최장운, 이영호, 김춘식, PIV에 의한 벽면압력분포의 추정, 대한기계학회 94년도추계학술대회논문집 제2권, 1994, pp.346-350.
- [17] T.Yoshida, Image Display for Plane Distribution of Scalar Quantity, 流れの可視化, Vol.6, No.20, 1986, pp.66-72.