

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol.17, No.3, 1997

PTV에 의한 채널캐비티 유동의 속도 및 압력계측

조대환*, 김진구*, 이영호**

- * 한국해양대학교 대학원
- ** 한국해양대학교 기계공학부

Velocity and Pressure Measurement of Channel Cavity Flow by PTV

D. H. Cho*, J. G. Kim*, Y. H. Lee**

- * *Korea Maritime Univ. Graduate*
- ** *Korea Maritime Univ.*

요 약

본 연구에서는 PTV기법에 의해 속도를 계측하였으며 계측시스템은 레이저를 이용한 시이트라이트와 이미지보오드를 내장한 퍼스널컴퓨터 그리고 관련 소프트웨어로 구성하였다. 속도벡터는 PTV 시스템에 의해 구하였으며 그 결과를 압력에 관한 프와송방정식에 적용하여 전유동장의 압력을 구하였다. 이때의 경계조건으로서는 벽면에서는 부착조건을 부여하였고 구동류가 흐르는 캐비티의 상부에서는 내부의 속도 값을 외삽하였다. 압력계산에 있어서 격자의 해상도는 40×40 이며 등간격의 엇갈림격자를 사용하였다. 계측결과는 유동장의 속도 및 압력분포를 잘 나타내었다.

Abstract

The present study adopted the PTV method for the velocity acquisition. The system consists of an image grabber built-in a personal computer and a laser-based sheet light projector and particle identification softwares. Velocity vectors are obtained by PTV 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 40x40 and 2-dimensional uniform mesh using MAC staggered grid is adopted. The result of experiment reveal that newly suggested measuring method is capable of estimating pressure and velocity distribution of flow field reasonably.

1. 서론

열, 유체분야의 실험적연구에서 속도와 압력의 정량적인 계측은 매우 중요하다. 열선유속계, LDV 등을 이용한 계측기법은 정도면에서 우수하여 주로 이용되어 왔으나 점계측의 한계를 갖고 있다.

PTV(Particle Tracking Velocimetry, 입자추적유속계, 이하에서 PTV) [1][2][3]는 PIV(Particle Image Velocimetry)기법의 한 부류로서 분류되며 가시화 실험결과에 대해 디지털 영상처리(Digital Image processing)를 행하여 정량적인 속도값을 계측하는 기법이다. 원리적으로 보면 추종성이 좋은 입자를 유동장에 고루 분포하고 일정시간 간격으로 촬영하여 입자의 이동변위를 구하면 속도를 쉽게 구할 수 있다. PTV는 속도벡터의 시점과 종점을 예측하는 이러한 동일입자확인을 디지털영상처리에 의해 구한 개개의 입자 위치를 구하여 사용하는 방식[4]을 채택하고 있어 처리시간이 매우 짧은 장점이 있다. 그러나 PIV 및 PTV계측에 있어서의 연구는 주로 속도계측에 관련된 연구가 주류를 이루고 있으며 압력추정에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다. 실제 압력은 내부에서 발생하는 누 와류의 거동에 많은 영향을 미치므로 전유동장의 압력을 실험적으로 구하는 것은 내부유동특성을 파악하는데

유용한 자료로서 이용될수 있다.

본 연구에서는 속도와 압력의 동시다점계측을 위한 계측기법을 제안하고 상부에 구동류를 갖는 입방형캐비티를 대상으로 계측을 수행하였다. 속도계측은 PTV기법에 의하였으며 압력계산은 PTV결과데이터를 압력에 관한 프와송방정식에 적용하여 유동장의 전 영역에 대해 속도와 압력을 동시에 구하고 대상유동장인 캐비티내부의 유동특성을 고찰하였다.

2. 관련 이론

Adrian[5]은 추적입자의 밀도에 따라 LSV, 고밀도(high-image density)PIV 및 저밀도(low-image density)PIV로 분류하였다. 이는 검사셀에 존재하는 입자의 영상갯수를 나타내는 영상밀도의 개념을 적용하여 정의 된것이며 저영상밀도 PIV를 입자추적 PIV를 대표하여 PTV라는 명칭으로 사용하고 있다. K.Imaichi[6] 및 J. Massons 등[7]은 Navier-Stokes방정식의 차분식에 기초를 두고, 압력구배항을 공간 적분하여 압력 값을 구하고 있다.

Lee 등[8][9]은 압력에 관한 프와송(Poisson)방정식을 이용하여 2차원 밀폐캐비티흐름을 대상으

로 전 유동장에 걸친 압력분포를 얻고자 각점의 속도벡터를 격자 보간하고 압력을 추정하고 벽면을 포함한 유동장의 압력분포를 구하였다.

실험유동장에서 PTV 계측된 속도벡터를 격자보간한 다음 압력에 관한 포와송방정식의 계산에 적용하여 벽면을 포함한 유동장압력분포[9]를 추정하고자 하였다.

중력 항을 고려하지 않는 경우의 Newton 유체로서 2차원의 정상 비압축성흐름을 기술하는 기초방정식은 다음의 연속의 식과 Navier-Stokes 방정식으로 나타낼수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

여기서 u, v 는 각각 x, y 방향의 속도분포, 압력 p , 밀도 ρ 및 동점성계수 ν 이다. 압력에 관한 포와송방정식은 다음의 식으로 표시된다.

$$\nabla^2 p = S \quad (2.4)$$

$$S = 2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (2.5)$$

경계조건으로서는 벽면에 대하여 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.

3. 실험

그림1과 그림2는 가시화 실험장치의 개략도 및 캐비티 크기이다. 대상유동장은 폭, 길이 및 높이가 각각 150mm인 입방형이며 경계조건이 단순하여 전산유체역학 또는 실험에 의해 체계적으로 비교 검토가 가능하기 때문에 연구대상 유동장으로서 이상적이다. 본 실험에서는 캐비티 내부에 전단응력을 공급하기 위하여 유동장의 상부 입구측에 폭 150mm, 높이 7.5mm, 길이 750mm의 평행평판을 제작 설치하고 $Re=500$ 전후의 2차원 평면 Poiseuille흐름(유입대표속도 $U=6.27$ cm/sec 기준)이 구동류로서 상부에 흐를 수 있게 하였다. 입방체 캐비티는 15mm의 투명한 아크릴을 사용하여 가시화 실험에 적합하도록 하였고, 주입입자는 직경 $150\mu m$ 정도의 백색 구형입자인 나일론12를[10] 사용하였다. 가시화를 위한 유동장의 조명은 출력 300mW의 Argon-Ion 레이저에 광섬유 케이블을 연결하고 그 종단에 원통형 렌즈를 부착하여 두께 약 2mm의 시이트라이트를 유동장에 주사하고 배경을 흑색으로 코팅처리하여 가시화 하였다. 사진 1은 실험에 사용된 실험장치이다. 실험은 대상 유동장의 스펜방향 중앙단면($z=0.5$)에 국한하였다.

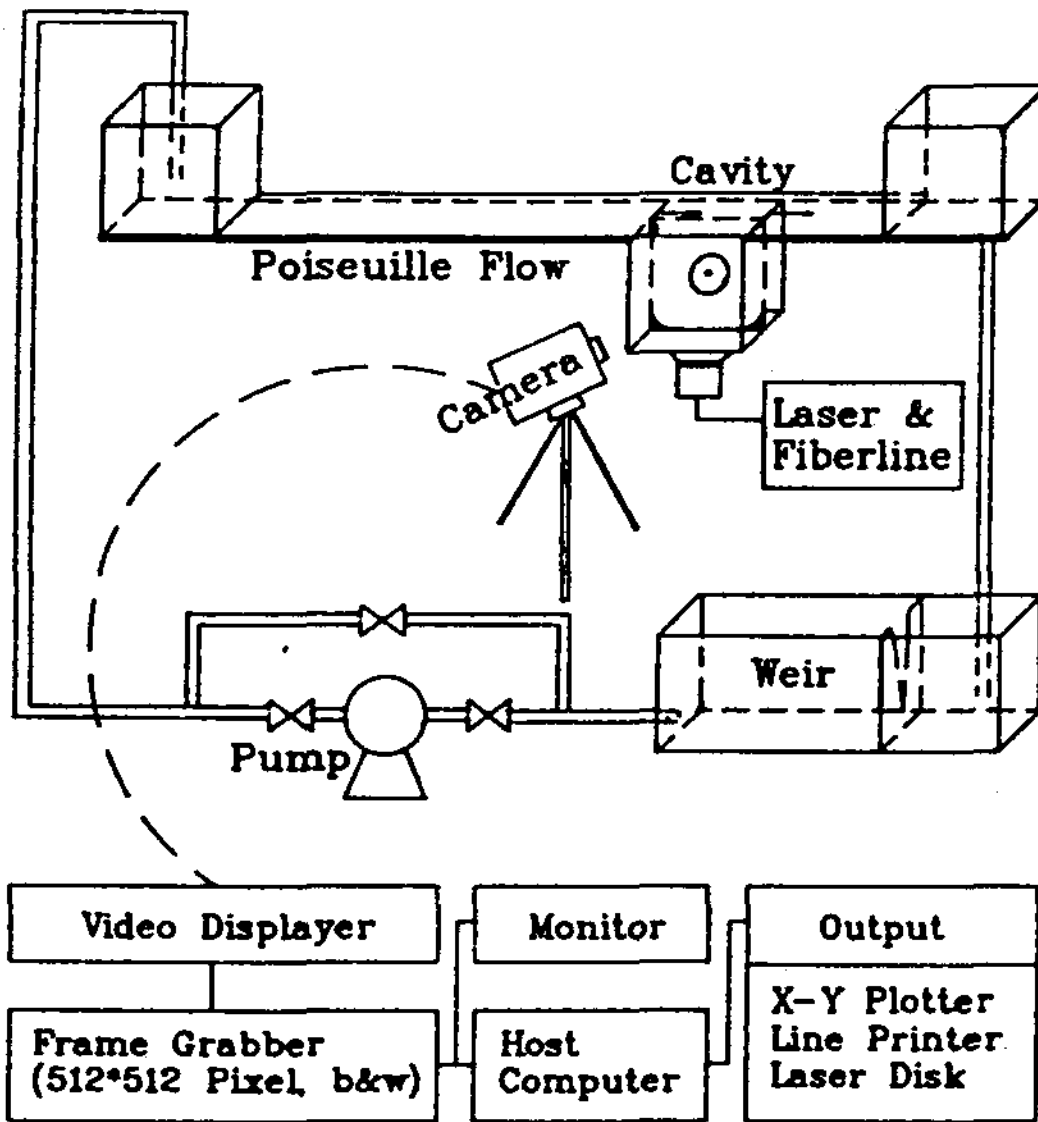


Fig.1 Schematic Diagram of PTV System

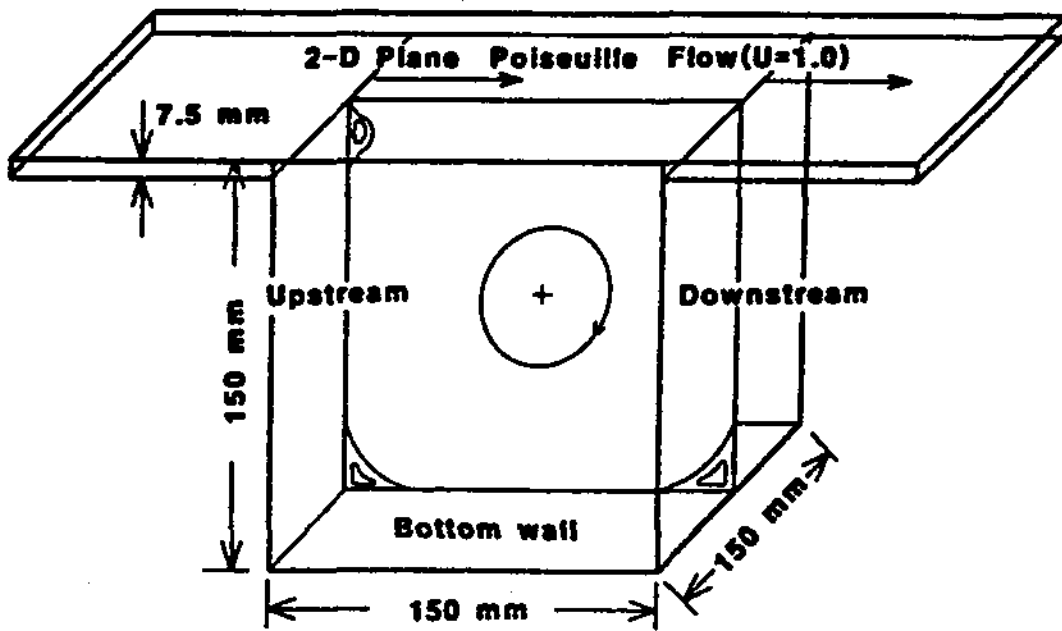


Fig.2 Cavity Dimension

캐비티의 높이를 대표길이, 캐비티 입구에서의 평균유입속도를 대표속도로 하여 겉보기 레이놀즈수를 계산하였으며, 채택된 레이놀즈수는 10^4 의 경우이다. 캐비티의 평균유입유속은 캐비티 출구측에 설치한 삼각위어(폭:52.9mm 내

각:20도)에서 계측하였다. 삼각위어에서 유량을 구하는 일반식은 식(3.1)과 같이 비압축성유체의 이상유동에 기초를 두어서 얻어진 것으로 실제 유동에 대한 유량의 측정은 유량계수에 의해 수정되어야 한다.

$$Q = C \frac{8}{15} \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{2g(H+\Delta H)}^{\frac{5}{2}}$$

(3.1)

삼각위어는 비교적 작은 유량을 계측하고자 할 때에 사용되며 다른 형상의 위어와 마찬가지로 유량계수가 실험적[11]으로 구해져 있으나 본 연구에서는 이에 관한 예비실험 결과를 최소자승법으로 보정하여 적용하였다.

그림3과 그림4는 위어헤드에 대한 유출유량 및 온도에 따른 캐비티의 레이놀즈수를 나타낸다. 측정된 유량을 캐비티입구에 유입하는 유량으로 가정하고 단면평균속도를 계산하였으며 식(3.2)로서 유동장의 레이놀즈수를 구하였다.

$$Re = \frac{V_{inlet} B}{\nu_T} = \frac{1}{\nu_T} \frac{1}{\gamma_T} \left(\frac{BW}{ab} \right)$$

(3.2)

유동장의 기록 및 재생은 NTSC방식을 채택하고 있는 가정용 캠코우터를 이용하였다. 그리고 프레임간의 시간간격 Δt 는 실험에 사용된 이미지보오드의 하드웨어적인 제약 때문에 1/15초이다.

그림5는 DT2853 이미지보오드의 구성도를 보여주고 있다. 이미지보오드는 내부의 LUT와 이미지 메모리 그리고 입출력을 위한 신호변환기로 구성되며 그 외에 외부동기신호 입력부 등이 있다.

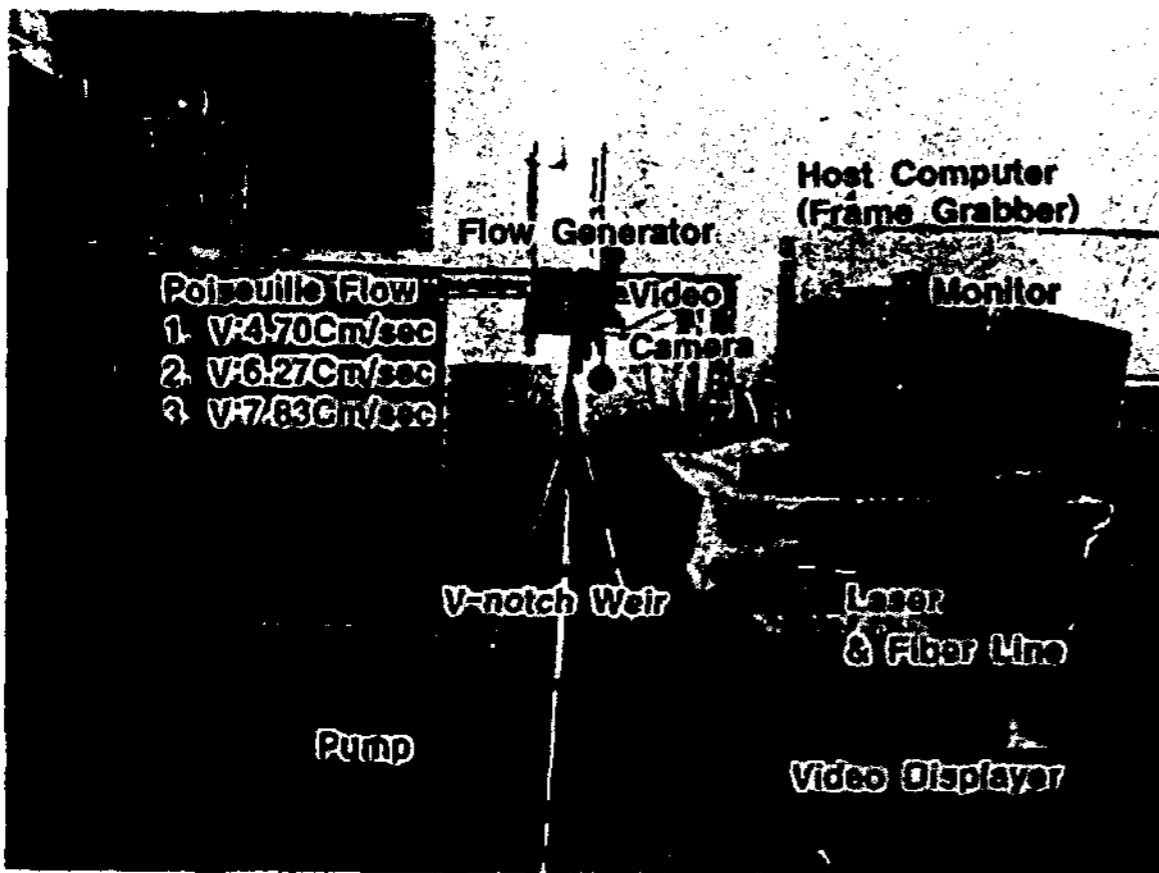


Photo.1 Experimental Apparatus

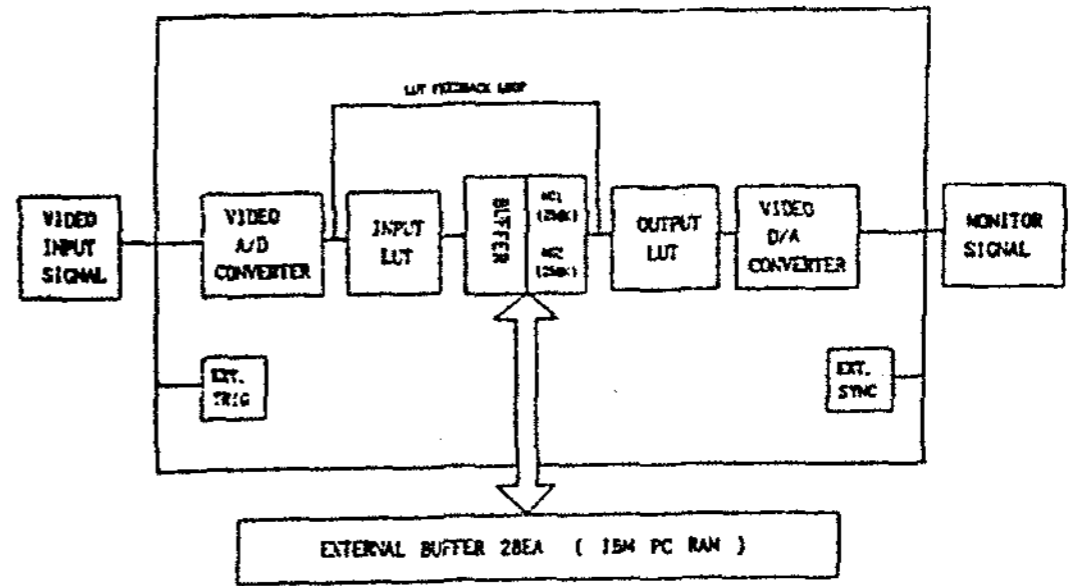


Fig.5 Configuration of Image Board

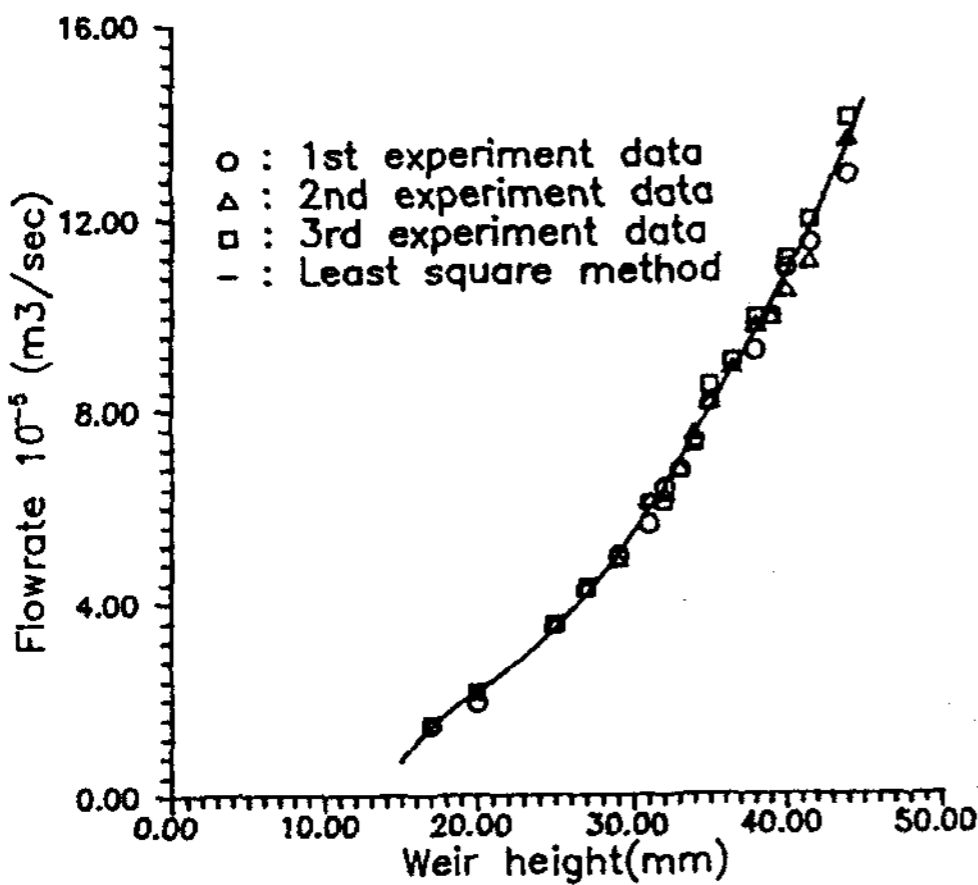


Fig.3 Discharge Flow Rate of V-notch Weir

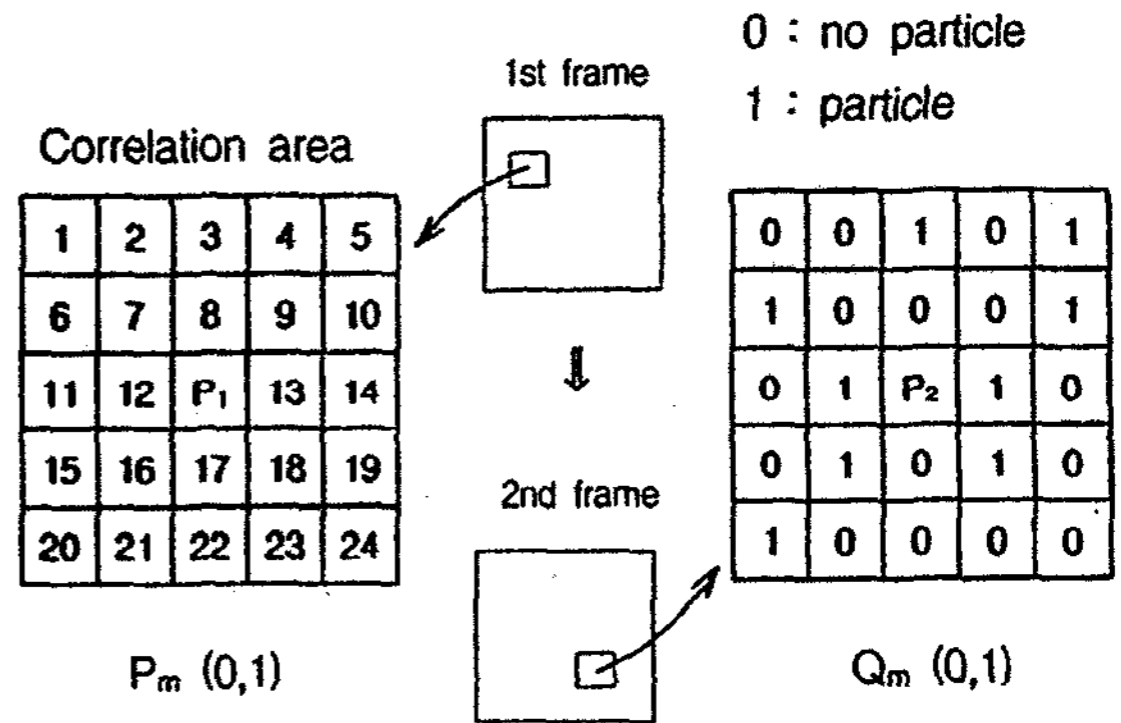


Fig.6 Two-frame Identification

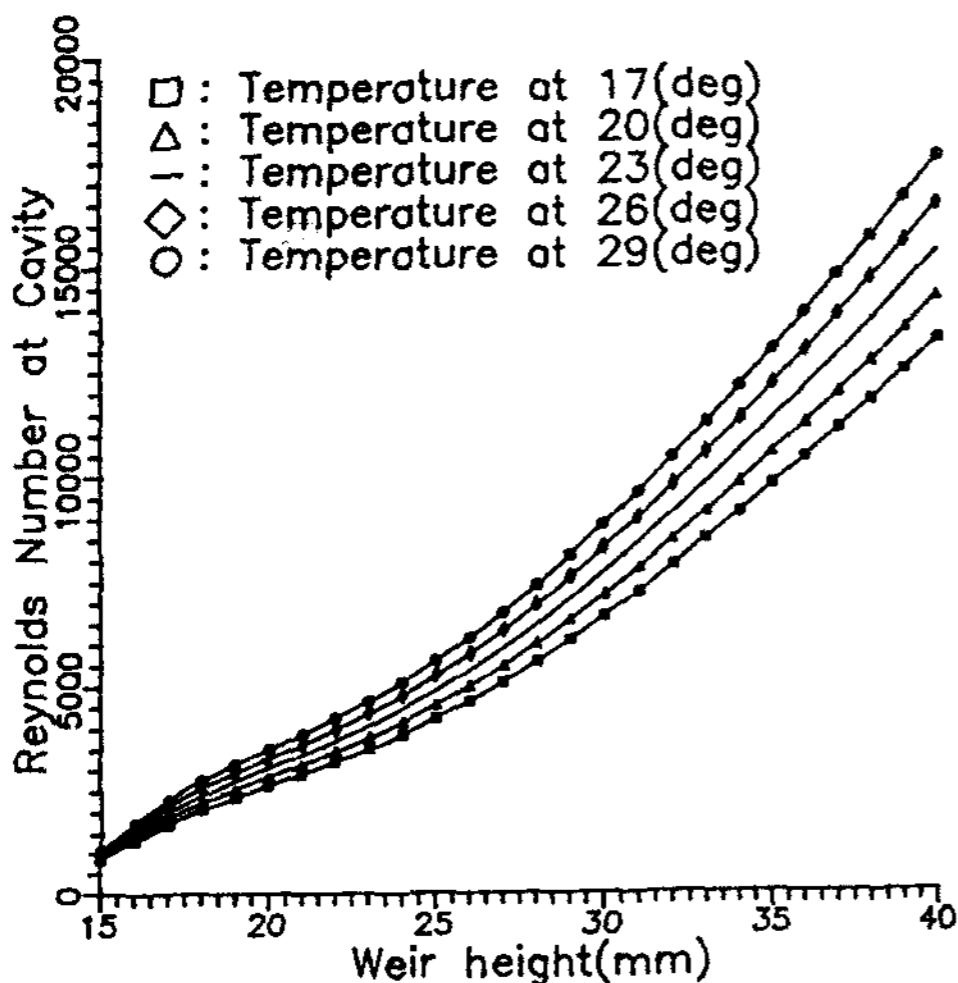


Fig.4 Temperature Compensation of V-notch Weir

유동장의 속도를 측정하기 위해서는 미소시간간격 동안에 이동한 다수의 입자의 이동변위를 자동적으로 추적하여야 한다. 미소시간 간격의 2프레임을 데이터 처리하여 동일 입자를 확인하는 방식에는 몇가지의 기법이 제안되어 있으며, 어느 경우에도 입자의 분포특성에 대한 상관계수를 구하여 동일입자를 판별한다. 그림6은 본 연구에서 채택한 동일입자의 확인방법인 2프레임의 도심좌표 상호상관법[4]의 원리를 개념적으로 보여주고 있다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig.7은 시간평균의 유동특성을 알아 보기 위하여 $Re=103$ 의 순간 속도벡터를 일정한 시간간격으로 샘플링된 순시 속도벡터를 한 단면당 2,000개 전후가 될 때까지 중첩한 결과이다.

그림8은 그림 7을 등간격의 격자(34×34)상에 보간된 속도벡터분포로서 유동장 전체에 걸쳐 일그러진 형태의 강제와 형태의 제 1와가 존재하며 우측하단구석에는 작은규모의 2차와가 발생하고 있다. 이는 지금까지의 벨트구동 캐비티 흐름에 관한 연구에서와 마찬가지로 벽면존재로 인한 점성담핑효과에 의해 압력과 원심력의 균형이 무너짐으로서 상류측의 강한 전단속도가 약화되어 압력고개를 넘어서지 못하기 때문으로 보여진다. 중앙단면에서의 실선중 수평선은 u 속도분포를, 수직선은 v 속도분포의 기준선을 보이고 있으며, 굵은 선은 주류에 의해 형성된 제1와(primary vortex)의 중심을 원점으로 한 u 및 v 의 속도분포를 보이고 있다.

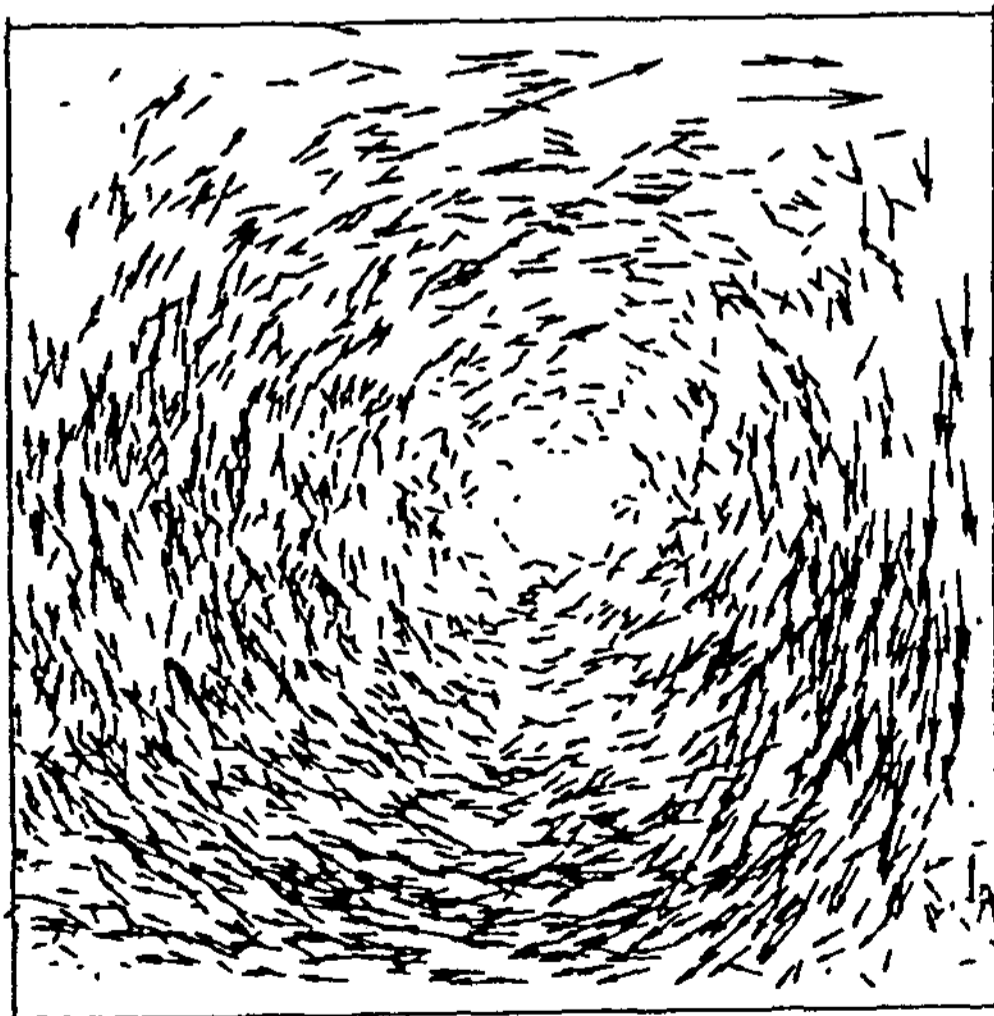


Fig.7 Overlapped Velocity Vectors by PTV (Re=104)

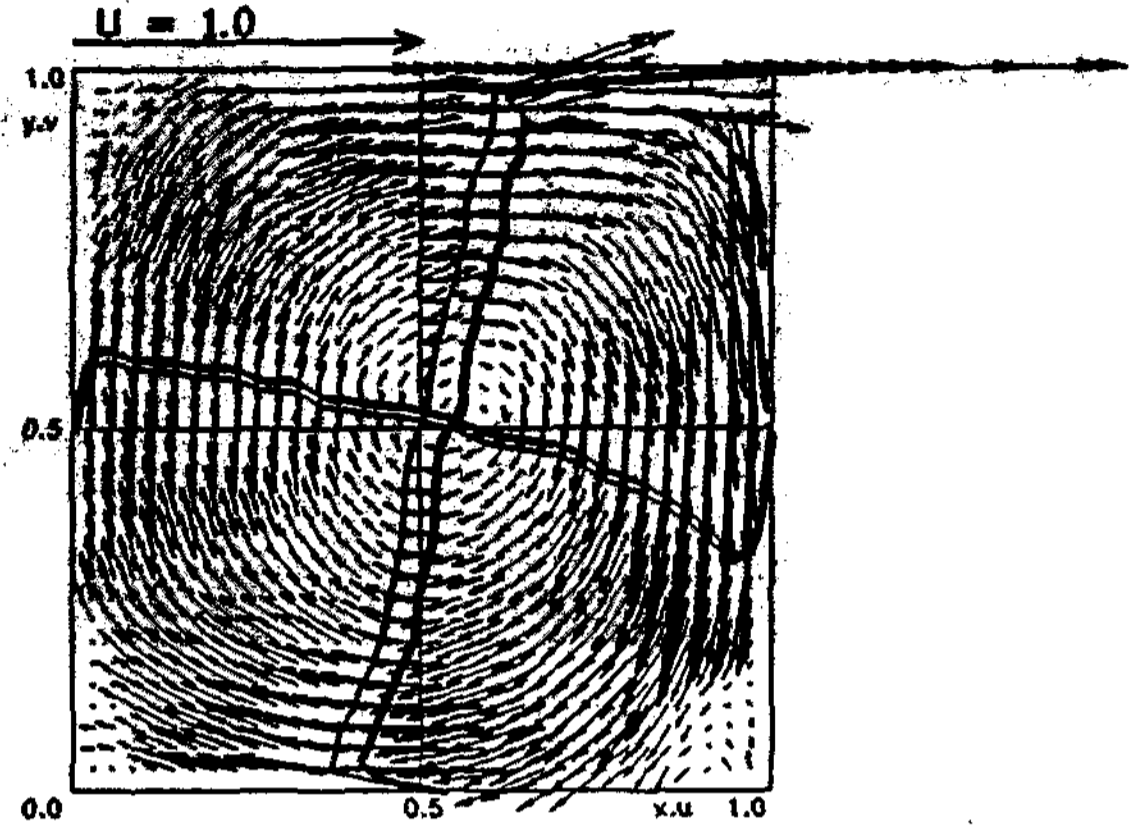


Fig.8 Velocity Distribution (Re=1.0 x 10⁴)

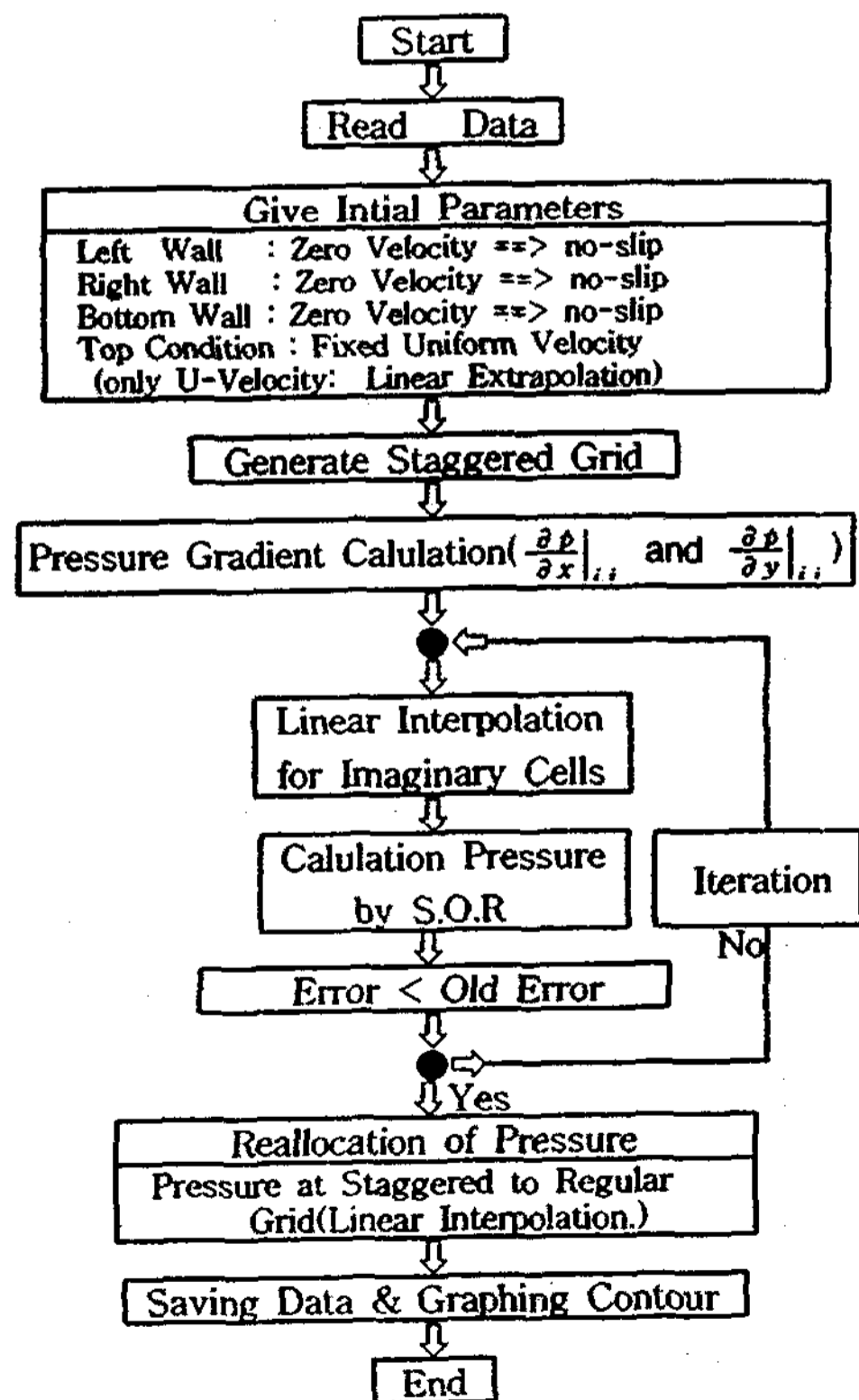


Fig 9 Flowchart of Pressure Calculation

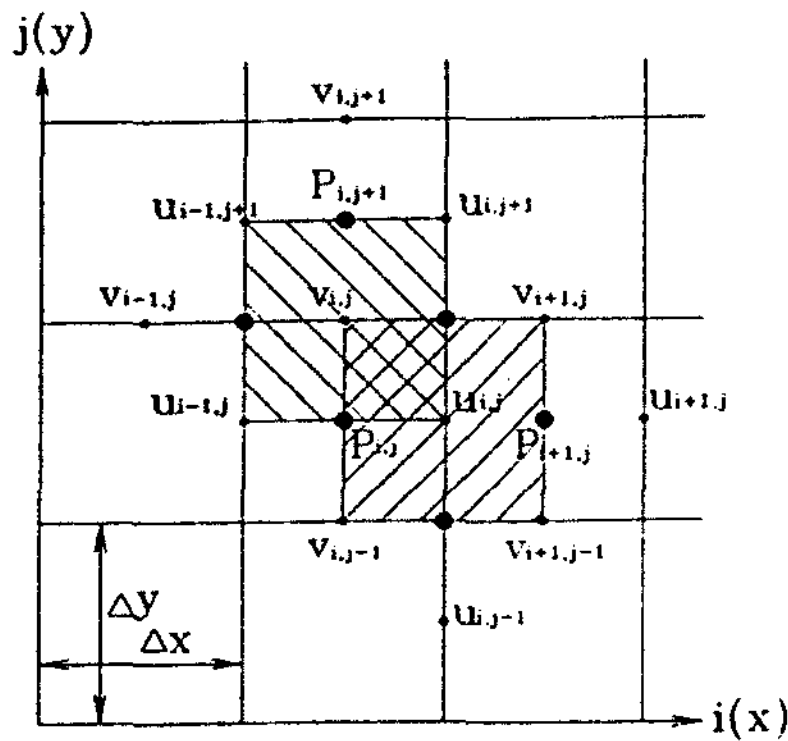


Fig.10 Distribution of Variable for Regular Grid

특히, 와의 중심을 기준으로 한 속도분포는 유동장의 운동에너지가 회전에 의해 변화하는 특성을 잘 보여주고 있다. 유동장은 우측 상방향으로 약간 치우쳐서 회전하고 있으며, 이는 캐비티 상면에서 공급되는 주류회전방향의 전단응력이 충분하지 못하여 우측의 벽면 경계층에서 스핀방향으로의 운동에너지분배가 상대적으로 큼을 나타내고 있다. 그 결과, 하부 및 좌측 그리고 상부측에서의 속도분포도 평탄한 모양을 나타내고 있다. 가시화 결과를 촬영한 비디오를 보면 캐비티내부의 재순환흐름과 구동류가 만나는 상부의 속도분포가 굴곡되고 있음을 볼수 있으나 그림에서는 곡선근사에 의해 보다 부드럽게 도시되었다. 이것은 상부에서 공급되는 2차원의 평면 Poiseuille흐름과 보다 저속으로 회전하는 캐비티 내부에서의 제1와의 충돌에 의해 발생된 전단혼합층(sheared mixing layer)의 영향으로 보여진다. 그림9과 10은 프와송방정식을 이용하여 압력계산에 사용된 계산 순서도와 등간격 엇갈림 격자의 배치도이다.

그림 11은 실험에서 얻은 속도벡터를 거리의 역수보간의 방법으로 정방형격자에 재배치하고 프와송방정식에 적용하여 얻은 압력분포이다. 이 단면은 $Re=10^4$ 에서 유동장 $z=0.5$, 즉, 주류방향의 중앙부이며 캐비티유동장의 속도분포를 비교하는 데 가장 빈번히 인용되는 단면이다. 특히,

캐비티 하류부에서 비교적 낮은 압력증가가 나타나고 있으며 밀폐캐비티의 결과보다는 벽면근처에서 변동이 심한 경향을 보이고 있다.

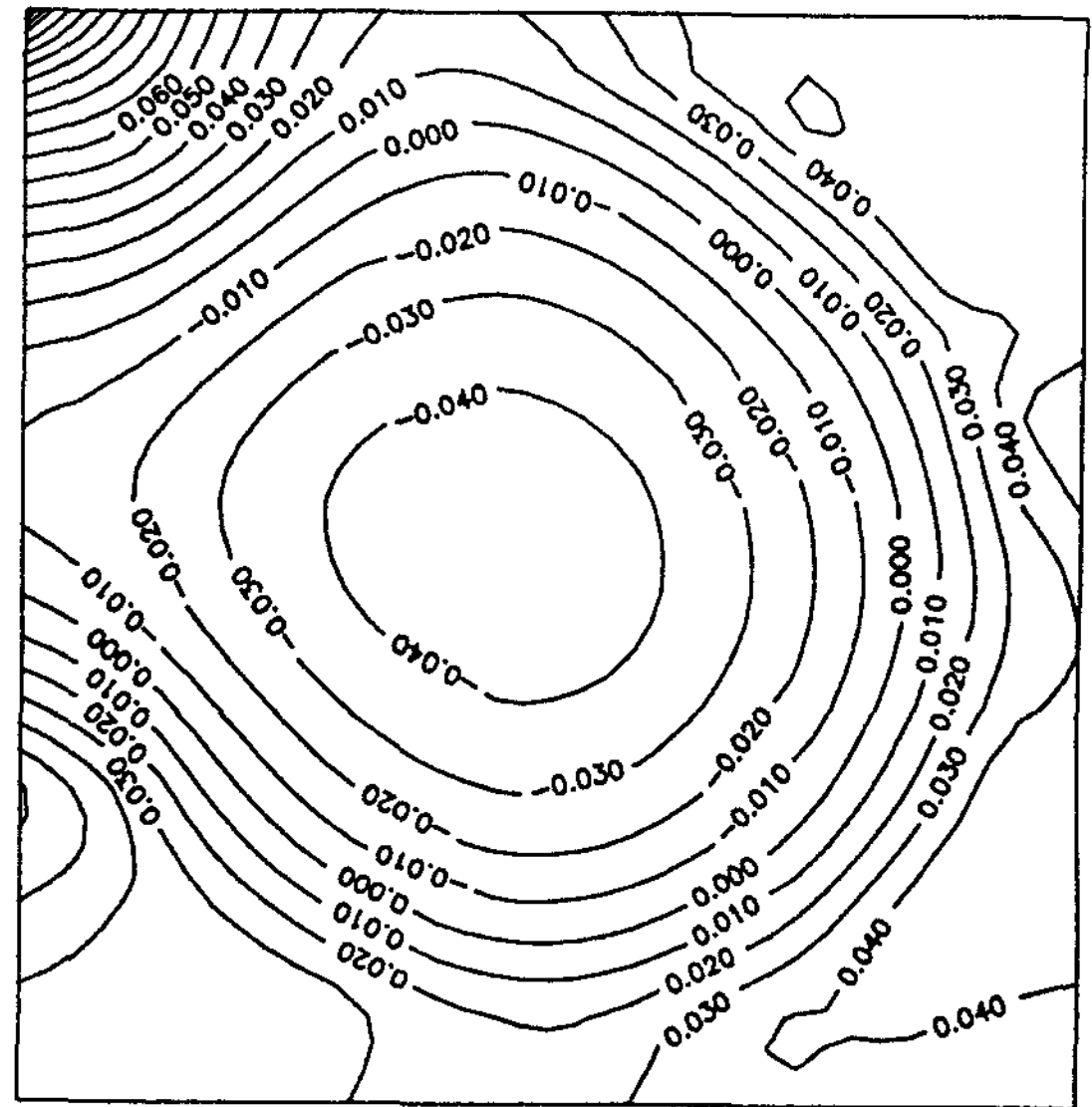


Fig.11 Equi-Baric Lines by PIV-Poisson($Re=104$)

특히, 하류측 2차와 부분 및 상류벽면 중간지점에서 캐비티흐름에서는 중요한 유동특성중의 하나로 밝혀져 있는 압력고개(pressure hill)가 나타나고 있다. 또한 상부하류측에 전단혼합영역의 영향에 의한 압력상승부분을 볼수있다.

5. 결론

본 연구에서는 속도와 압력의 동시다점계측을 위한 계측기법을 제안하고 상부에 구동류를 갖는 입방형캐비티를 대상으로 계측을 수행한 결과 다음의 결과를 얻었다.

1. 속도계측결과 채널캐비티 유동은 전체적으로 강제와에 유사한 속도분포가 지배적이며 또한, 캐비티상부에서 속도와 압력분포의 변동이 심하

였다. 이는 밀폐흐름에 있어서 층류구동류에 의해 발생하는 내부흐름의 한 특징으로 여겨지며, 구동류와 캐비티내부에서의 제1와가 충돌한 결과 형성된 전단혼합층의 영향으로 추정된다.

2. PTV 계측된 속도벡터를 격자보간한 다음 압력에 관한 포와송방정식의 계산에 의하면 모서리부에서 역압력구배를 나타내는 압력고개의 현상을 관찰할 수 있었다.

속도와 압력의 동시다점계측기법의 확립을 위해서는 차후에 여러 가지 레이놀즈수에 대하여 정압공계측을 포함한 일관성 있는 실험을 통한 검토가 필요하다.

Nomenclature

- a : 유입평행평판의 폭
- B : 캐비티의 대표길이
- b : 유입평행평판 높이
- C : 삼각위어의 유출계수
- H : 삼각위어의 계측높이
- Q : 삼각위어의 체적유량
- ΔH : 삼각위어의 양정 수정계수
- P : 압력
- Re : 캐비티내 흐름의 레이놀즈수
- W : 삼각위어의 중량유량
- γ : 비중량 θ : 삼각위어의 내각
- ν : 동점성계 ρ : 밀도
- ζ : 유량함수 ψ : 와도

참고문헌

1. C.Gray, The Evolution of Particle Image Velocimetry, Workshop "Optical Method &

- Data Processing in Heat and Fluid Flow", IMechE, 1992, pp.19-36.
2. N.Kasagi, K.Nishino, Flow field Measurement with particle Image Velocimetry, JSME, Vol.96, No.895, 1993, pp.498-503.
3. L.Hesselink, Digital Image Processing in Flow Visualization, Annu. Rev. Fluid Mech., 1988, p.421-485.
4. 최장운, 조대환, 이영호, PIV에 있어서의 입자 추적기법의 개선, 대한기계학회 추계학술대회 논문집 제2권, 1993, pp.360-365.
5. R.D.Keane and R.J.Adrian, "Optimization of Particle Image Velocimeters. Part 1: Double Pulsed Systems", Meas. Sci. Technol. Vol.1, pp.1202-1215, 1990
6. K.Imaichi, K.Ohmi, "Numerical Processing of Flow-Visualization Pictures-Measurement of Two-Dimensional Vortex Flow", J. Fluid Mech. Vol.129, P.283, 1983.
7. J.Massons, J. Gavalda, F.Diaz, "Image processing of Cylinder Wake Generation", Phys. Fluids A 1(8), P.1415, 1989.
8. Young-Ho LEE, Y.Matsumoto, T.Kobayashi, T. Saga, "Velocity Measurements in a Cavity Flows by PIV", Proc. of 2nd KSME-JSME Fluids Eng. Conference Vol.1, p.293, 1990.
9. 최장운, 이영호, 김춘식, PIV에 의한 벽면압력 분포의 추정, 대한기계학회 94년도추계학술대회논문집 제2권, 1994, pp.346-350.
10. 이영호, 김춘식, 최민선, 작은 밀도차를 갖는 구형입자의 추종성에 관한 연구, 해사산업연구소논문집, 1집, 1991, pp.127-139.
11. R.D. Blevins, Applied Fluid Dynamics Handbook, Van Nostrand Reinhold Co., 1984, pp.201-208.

Velocity and Pressure Measurement of Channel Cavity Flow by PTV

D. H. Cho*, J. G. Kim*, Y. H. Lee**

* *Korea Maritime Univ. Graduate*

** *Korea Maritime Univ.*

Abstract

The present study adopted the PTV method for the velocity acquisition. The system consists of an image grabber built-in a personal computer and a laser-based sheet light projector and particle identification softwares. Velocity vectors are obtained by PTV 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 40x40 and 2-dimensional uniform mesh using MAC staggered grid is adopted. The result of experiment reveal that newly suggested measuring method is capable of estimating pressure and velocity distribution of flow field reasonably.