

## PIV의 성능개선에 관한 연구

이영호\* · 김춘식\*\* · 최장운\*\*\*

### A Study on the Improvement of PIV Performance

Y. H. Lee · C. S. Kim · J. W. Choi

**Key words** : PIV(입자영상유속계), Image processing(영상처리), Particle identification(동일입자확인), Wall pressure estimation(벽면압력추정)

#### Abstract

The present study is aimed to improve the PIV performance by suggesting a two-frame particle identification technique and by introducing estimation method of wall pressure distribution from the velocity data. Adopted image processing system consists of one commercial image board slit into a personal computer, 2-D sheet light generator, flow picture recording apparatus and related particle identification software. A revised particle tracking method essential to PIV performance is obtained by particle centroid correlation pairing(CCP) and its effectiveness is ascertained by comparison with multi-frame identification. As another contribution to PIV performance, wall pressure estimation by solving Poisson equation for pressure is newly suggested. Preliminary examinations are carried out for correct boundary conditions. Graphical representations reveal that newly suggested method is capable of reasonable estimation of wall pressure distribution.

#### 1. 머릿말

유체의 유동특성을 정량적으로 파악하기 위한 계측기법의 확립은 유체공학발전에 필수불가결한 요소이다. 따라서, 대표적인 계측대상인 유체의 속도 및 압력을 측정하는 방법이 여러가지 측면에서

연구되어 왔다. 최근에는 컴퓨터 성능이 급속히 향상되어 종래에는 원리적으로만 가능하다고 여겨졌던 계측기법이 새롭게 각광을 받고 있다. 이에 관련하여 유동장에 분포된 추종입자의 위치를 영상처리에 의해 자동추적함으로써 속도벡터를 전 유동영역에 걸쳐 동시에 구할 수 있는 입자영상유

\* 정회원, 한국해양대학교 이공대학  
 \*\* 정회원, 한국해양대학교 해사대학  
 \*\*\* 준회원, 한국해양대학교 내학원

속계(Particle Image Velocimetry, 이하 PIV)의 개발이 이루어져서 많은 적용에<sup>1),2),3)</sup>를 보이고 있다.

그러나, 보다 효과적인 계측을 위해서는 여러가지의 점들이 개선되어야 한다. 우선 고가의 전용장치를 이용하는 대신 내장형의 이미지그래버 등을 이용한 간이시스템의 개발이 실용적인 관점에서 중요하다고 보여진다. 이 경우에는 사용된 이미지그래버의 하드웨어제약을 최소화하기 위한 문제점들이 해결되어야 한다. 다음으로 동일입자추적의 고속화가 중요한 연구과제가 되고 있다. 본 연구에서는 두프레임의 영상에서 얻어진 입자의 도심좌표를 이용하여 최대상관계수를 이용하는 방법을 제시하고자 하였다.

한편, 현재까지의 연구결과들은 속도벡터 자체만을 얻는데에 중점을 두고 있으며, 이를 이용한 압력분포의 획득에 관한 연구는 매우 드물다. 예를 들면 K. Imaichi 등<sup>4)</sup> 및 J. Massons 등<sup>5)</sup>은 Navier - Stokes 방정식의 차분식에 기초를 두고, 압력구배향을 공간적분하여 압력값을 구하고 있다. 그러나 이 경우에도 벽면까지의 압력분포를 구한 예는 보고되어 있지 않다. 공학적인 관점에서 보면, 벽면의 압력분포특성은 매우 중요하며, PIV에서 이 문제를 해결할 수 있다고 한다면 영상처리에 의한 유동장의 계측은 보다 우수한 성능을 발휘할 것으로 예상된다. 이를 위해 압력에 관한 프와송방정식이 적용되었으며 경계조건을 만족시키기 위하여 CFD에서와 같이 가상벽면내에서는 발산을 영으로 하는 기법을 채택하였다. 적용된 유동장은 3차원 벨트구동의 정방형 캐비티흐름이었으며 얻어진 결과는 벽면을 포함한 유동장압력분포를 잘 나타내었다.

## 2. 시스템 구성

유동장의 화상을 기록하기 위하여 캠코우더(SONY 8mm)를 이용하였다. 해상도는 512×512 픽셀이다. 화상입력은 캠코우더에 기록된 대상유동장을 재생하거나 별도의 VTR을 이용하여 이미지그래버에 공급하는 방식을 택하였다. 이미지그래버는 2개의 LUT와 2개의 메모리버퍼 그리고 입출력을 위한 A/D 및 D/A 컨버터, 외부 트리거

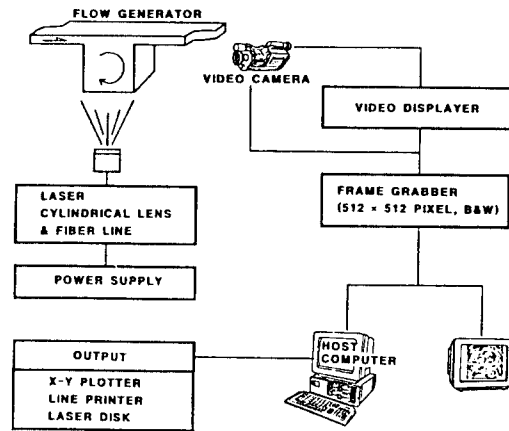


Fig. 1 Schematic Diagram of PIV System

및 외부동기신호를 위한 포트에 구성되어 있다. 입력 화상신호는 고속A/D 변환기를 거쳐 이진화일인 512×480×8비트 용량의 디지털정보로 바뀌며, 두 프레임분의 용량을 갖춘 메모리버퍼, 또는 호스트컴퓨터의 램드라이브에 만들어진 다수의 메모리 버퍼에 순차적으로 저장된다. Fig. 1은 본 연구에서 채택한 처리시스템의 구성을 보이고 있다.

유동장의 적용은 3차원의 정방형캐비티흐름을 대상으로 하였다. 캐비티형상은 높이, 폭 그리고 길이가 100mm인 정방형으로서 상면에서 일정한 전단응력을 공급하여 내부에 3차원의 비정상유동장을 형성한다. 레이놀즈수는 뒷개의 이동속도 및 정방형캐비티의 높이로 계산하였다. 출력 5W의 아르곤이온레이저를 조명발생장치로써 사용하였다. 광화이버 및 실린드릭 렌즈를 이용하여 폭 2.5mm전후의 시이트라이트를 만들고 3축 트래버스장치에 의해 임의의 단면을 조명하였다. 추적입자는 직경 150μm 전후의 나이론 12의 구형입자이다. 입자는 선별하여 밀도차가 무시될 수 있는 것만을 사용하였다. 유동장의 기록은 캠코우더를 이용하여 비디오테이프에 기록한다.

PIV의 개략적인 처리순서는 Fig. 2와 같다. 이미지그래버에 의해 얻어진 최초의 정보는 유동장의 촬영시에 나타나는 여러가지의 잡음성분을 포함하고 있다. 따라서, 캐비티의 윤곽선을 제거할 필요가 있다. 이를 위하여 편의적인 방법으로 동일한

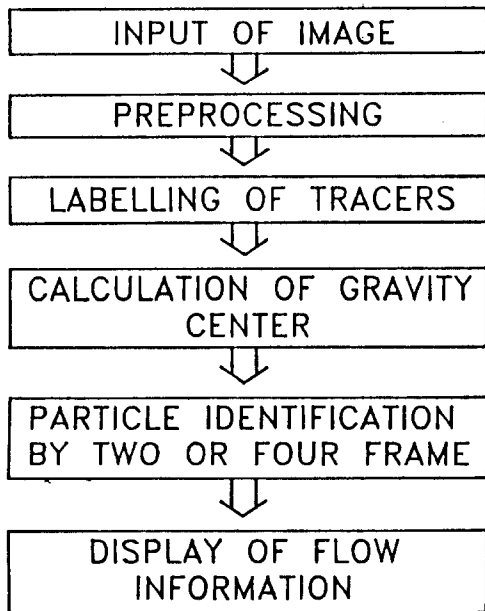


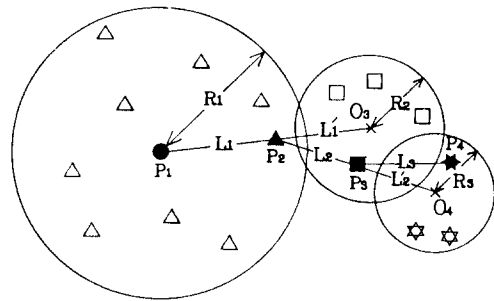
Fig. 2 Flow Chart of PIV Processing

유동장의 임의의 시간화면을 배경화면으로 설정한 다음, 전픽셀에 걸쳐 해석대상의 화면으로부터 계조값에 대하여 단순히 마이너스연산을 행하는 방법을 택하였다. 다음으로 적당한 역치(threshold level)를 각픽셀에 공통으로 부여하여 그 값 이하가 되는 픽셀을 입자가 아닌 잡음성분으로 인식하여 제거하였다. 입자로 인식되는 화소를 연결하는 윤곽선추적(boundary trace) 및 각각의 입자의 도심좌표(centroid)의 계산이 필요하다. 도심좌표는 면적모멘트 공식에 의해 구하였다.

### 3. 동일입자 추적법

#### 3. 1. 4프레임 입자추적법

Fig. 3에서, 제1프레임에 위치한 입자가 제2프레임까지 이동할 수 있는 최대거리를 유동장의 특성으로부터 미리 파악한다. 이 범위내( $R_1$ )에 존재하는 입자는 입자  $P_1$ 이 이동하여 제2프레임의 화상에 위치할 수 있는 이동위치점 후보들이 될 수 있다. 같은 원리로 제2프레임의 입자  $P_2$ 가 제3프레임에 위치할 수 있는 예상이동위치점 제2프레임까지의 이동거리와 같은 곳에 위치한다고 볼 수 있



- : Particle of 1st frame,  $L_1=L'_1$
- △ : Particle of 2nd frame,  $L_2=L'_2$
- : Particle of 3rd frame,  $P$ =Particles
- ☆ : Particle of 4th frame,  $R$ =Searching radius

Fig. 3 Four Frame Identification

다. 단, 이와 같이 정해진 제3프레임에서의 동일입자의 후보탐사범위를 제1·2프레임의 것보다 축소하면 처리속도를 향상시킬 수가 있다. 제4프레임에서의 입자이동위치 및 탐사범위는 동일한 요령으로 구해진다. 이와 같은 방법으로 구해진 하나의 입자에 대한 이동경로는 일종의 계층구조를 형성하여 수많은 예상케적이 얻어진다. 다음으로 얻어진 예상후보 가운데 입자의 참된 이동경로로 판단되는 하나의 경로를 얻기 위해서 각각의 이동거리  $l_1, l_2, l_3$ 에 대하여 입자의 직선성, 등간격이동성을 전제로 한 평가함수  $\{2l_2 - (l_1 + l_3)\}$ 의 값이 최소가 되는 경로를 참된 입자경로로 택하였다. 프레임수를 더 늘리면 원리적으로는 동일입자의 검색에 수반하는 오차를 줄일 수가 있다. 그러나, 이 경우에는 처리시간이 더 걸리고 무엇보다도 입자의 직선, 등간격이동이라는 원래의 조건을 벗어나기 쉬움으로서 최종적으로 얻어진 속도값에 수반하는 불확실 성분이 커지게 된다.<sup>6)</sup>

#### 3. 2. 2프레임 입자추적법

기본원리는 입자의 분포특성에 대한 상관계수를 구하여 동일입자를 판별하는 방법이다. Fig. 4는 이 기법을 개념적으로 보여주고 있다. 우선 제1프레임과 제2프레임의 모든 입자도심좌표에 1의 값을 부여한다. 이 때에 입자도심에는 큰 값을, 멀리 떨어져 질수록 작은 값을 부여하여 가중계수를 채택할 수도 있다. 다음으로 제1프레임에 존재하는

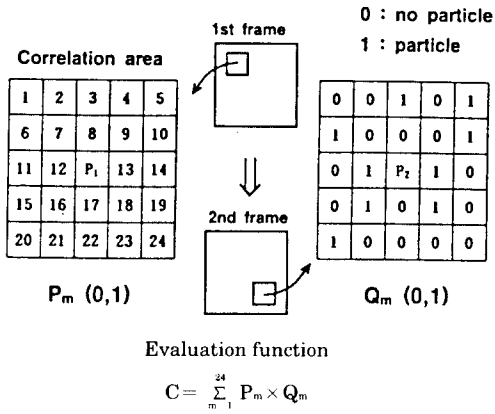


Fig.4 Two Frame Identification

입자가 이동할 수 있는 최대거리치를 제2프레임에서 구하여 각각의 입자위치를 중심으로 하여 상관계수의 계산영역을 설정한다. 같은 크기를 갖는 양쪽영역의 대응위치에서 이 값들을 곱한다. 따라서 대응하는 각각의 배열에서 1의 값을 갖는 경우에만 (1×1)=1의 상관값을 갖게 된다. 이와 같은 조작을 상관영역 전체에 걸쳐 행하여 그 합을 구하고 이 값이 최대가 되는 입자위치를 동일입자의 이동위치로 결정한다.

3. 3. 성능비교

역치는 모든 경우에 있어서 똑같이 80을 부여하였다. 본연구에서는 0-1버퍼의 프레임간 시간간격이 0.067초 그 외의 버퍼는 0.267초로 설정되어 있다. 단일입자 검출시에 역치에 의한 중심좌표의 변동이 문제가 된다. Fig. 5는 기준의 역치를 70으로 한 경우의 결과이다. 50에서는  $x = -0.399$ ,  $y = -0.125$ 픽셀의 평균변동값을, 90의 경우에는  $x = 0.213$ ,  $y = -0.133$  픽셀의 평균변동값을 보여주고 있다. 이 결과는 최종적으로 얻어진 속도벡터의 계산에 수반하는 불확실성 성분으로 반드시 고려되어야 한다.

Table 1은 역치의 값을 변화시켰을 경우의 입자 인식 및 처리속도관계를 정량적으로 보여주고 있다. 역치 70을 중심으로 50과 90을 부여했을 경우의 유효입자수를 검토한다. 화면대화형으로 에러처리를 끝낸 후의 입자수의 비율은 각각 원래의 입자수에 대하여 93%, 95% 및 94%로서 비슷하다.

Table 1. Particle Identification by Threshold Level (Re=5×10<sup>3</sup>)

Threshold level	50	70	90
Identified particle number	365	304	268
Auto removed particle number	35	302	266
Manually removed particle number	340	286	253
Elapsed time(sec) (80486 - 50MHz)	3.3	2.4	2.2

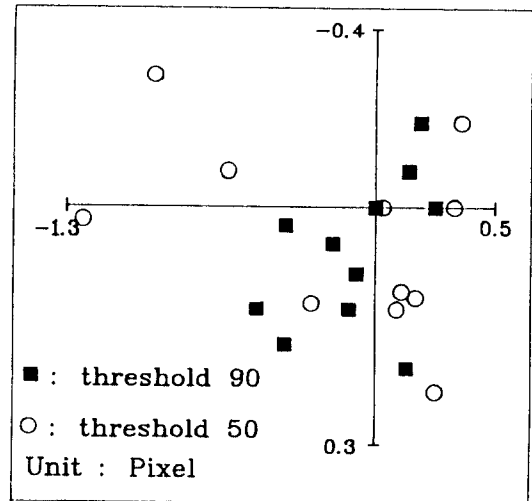


Fig.5 Variation of Centroids due to Threshold Level

그러므로 역치에 따라서는 유효입자의 획득비율은 크게 달라지지 않음을 알 수 있다. 대화형으로 에러처리된 후의 최종 유효입자수를 비교해 보면 약 10% 정도의 차를 보여주고 있다. 역치가 낮아질수록 입자획득률은 증가하나 수동으로 처리해야 할 에러가 많아질 뿐만 아니라 시각적으로도 에러입자를 판별해 내기가 어려운 점이 지적된다. 역치가 90의 경우에는 50의 경우에 비해 유효입자수가 상당히 감소한다. Re=5×10<sup>3</sup>에서는 역치를 50-70으로 부여했을 때가 유효입자수, 에러처리 및 처리시간에서 적절함을 알 수 있었다. 적절한 역치의 선정은 구체적으로 해당유동장에서 경험적으로 정할 수가 있다.

Table 2를 보면 알 수 있듯이 0-1 버퍼는 화면의 입력시간간격이 작기 때문에 입자의 최대 이동변위가 작게 되고, 따라서 추적할 범위가 훨씬 좁혀지므로 처리시간은 줄어들게 된다. 또한 미소변

**Table 2. Comparison of Identification Method**

(a) 2 - Frame method

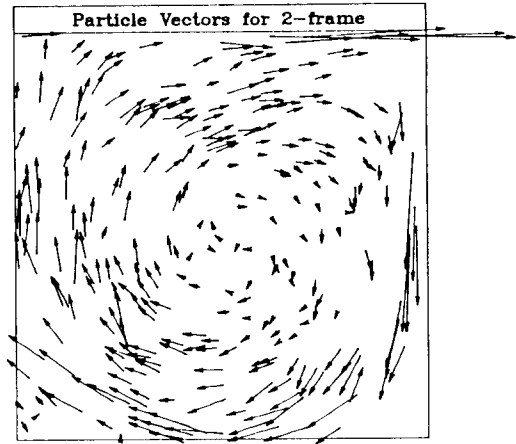
Reynolds number	$1 \times 10^3$		$3 \times 10^3$		$5 \times 10^3$	
	0 - 1	2 - 3	0 - 1	2 - 3	0 - 1	2 - 3
Used buffer						
Identified particle number	129	128	223	231	304	349
Auto - removed particle number	×	127	223	218	302	320
Manually removed particle number	×	123	216	207	286	280
Elapsed time(sec) (80486 - 50MHz)	0.6	0.6	1.4	3.2	2.4	10.4

(b) 4 - Frame method

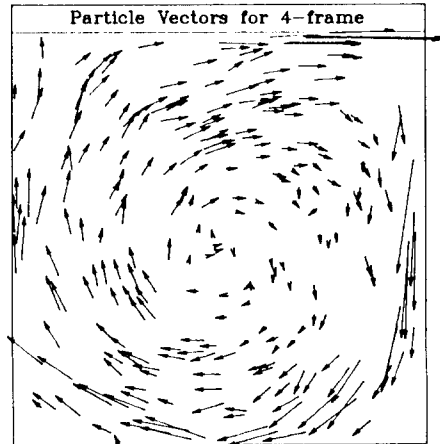
Reynolds number	$1 \times 10^3$		$3 \times 10^3$		$5 \times 10^3$	
	0 - 3	2 - 5	0 - 3	2 - 5	0 - 3	2 - 5
Used buffer						
Identified particle number	118	122	181	181	226	238
Auto - removed particle number	×	122	181	175	225	216
Manually removed particle number	×	118	180	175	224	205
Elapsed time (sec) (80486 - 50MHz)	0.3	0.3	1.2	1.2	2.5	7.2

위를 움직이므로 2차원 시트라이트면의 이탈이 적게 되고 유효입자의 손실도 방지할 수가 있다. 그리고 직선, 등속도이동에 보다 충실할 수 있으므로 곡률을 갖는 유동장에서 발생할 수 있는 평균조작 오차(averaging error)의 문제도 감소한다. 그러나 프레임간의 시간간격이 극히 작을 때, 예를 들면, 레이놀즈수가 낮은 경우( $Re=1 \times 10^3$ )에는 두 프레임간의 도심좌표가 근접되어 있어 자동에러치리에 있어서 방향성의 판별에 문제가 발생한다. 따라서 프레임간의 시간간격이 짧아서 입자의 이동변위가 유동장 전체에 걸쳐 너무 작은 경우에는 프레임간의 시간간격을 늘려 주어야 한다.

2프레임과 4프레임의 동일입자추적방법에 의한 결과를 세 경우의 레이놀즈수 중  $Re=5 \times 10^3$ 에 대하여 유효입자수를 비교해 보면, 2프레임의 경우가 유효입자수 면에서 약 37% 이상이나 많다.  $Re=3 \times 10^3$ 의 경우는 약 4% 정도로 거의 차이가 없는데, 이 경우는 확인된 입자수에 대한 유효입자의 획득률이 각각 96% 및 97%이다. 이와 같이 획



**Fig. 6 Velocity Vectors by Two - Frame Method**



**Fig. 7 Velocity Vectors by Four - Frame Method**

득률이 높은 것은 전체적으로 입자의 이동변위가 작으며 2차원성이 강한 안정된 흐름이기 때문이다. 즉 저속의 안정된 흐름에서는 2프레임이나 4프레임방식이 모두 높은 유효입자의 획득률을 보이나, 이동변위가 큰 흐름에서는 2프레임방식이 우수하다.

Fig. 6은 2프레임방식에 의해 얻어진 속도벡터이다. 부적합한 상관값에 의한 이상치(outlier)를 통계적인 방법으로 제거하였다. 통계적인 에러치리의 판별식은 예를 들면, 이동거리와 각도에 의한 평가함수를 들 수가 있다. 이들 중에는 유효한 벡터도 포함될 수 있으므로 화면을 보면서 대화형으로 복구를 하거나, 자동에러치리에서 제거되지 않

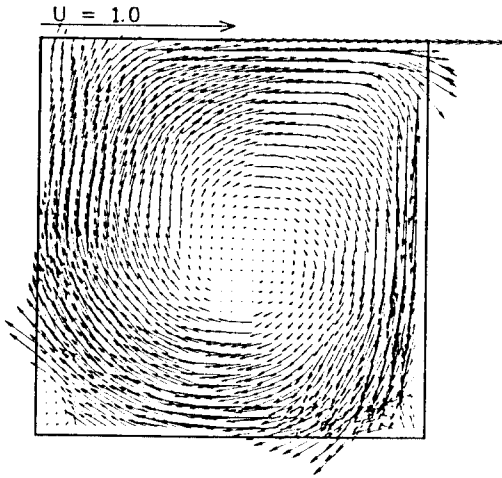


Fig. 8 Interpolated Velocity Vectors at Regular Grid

은 이상치를 다시 제거한다. Fig. 7은 4프레임방식에 의한 속도벡터이다. Fig. 8은 속도벡터를 정방형의  $39 \times 39$  격자상에서 거리의 역수비례에 의해 보간한 결과이다.

#### 4. 벽면압력추정

##### 4. 1. 수치계산

예비검토탄계에서는 Imaichi<sup>4)</sup> 및 Massons<sup>5)</sup>가 제시한 방법을 적용하였다. 벽면을 제외한 내부공간에서는 NS방정식에서의 압력구배항을 공간적분하였고 이 값을 외삽하여 벽면에서의 압력분포까지를 구하였다. 그러나 이 기법을 PIV에 의해 얻어진 실험데이터에 적용해 보면 벽면근처에서 대단히 불규칙한 분포특성을 보임으로서 유체역학의 기초를 벗어난 결과를 나타내었다. 따라서, PIV에 의해 얻어진 속도 벡터를 압력에 관한 프와송방정식에 적용하여, 벽면을 포함한 전유동장의 압력분포를 구하는 것을 목표로 하였다. 그러나, 가장 문제가 되는 것은 차분식에 적용되는 벽면경계조건이다. 이를 검토하기 위해서 CFD에 의해 구해진 일정시각의 속도값을 이용하였다. 즉, 이 값을 프와송방정식에 적용하여 구해진 압력이 CFD결과에 의한 압력값과 같은 경우에는 제안된 경계조건 및 계산요령이 합리적이라고 판단하였다. 다음으로, 이 방법을 PIV에 의한 실험결과에

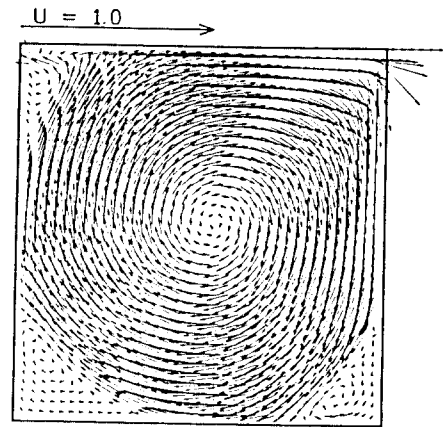


Fig. 9 Velocity Vectors by SOLA( $Re=5 \times 10^3$ )

적용하여 벽면을 포함한 전유동장의 압력분포를 구하고자 하였다.<sup>7,8)</sup>

계산에 인용된 유동장은 2차원의 벨트구동 캐비티흐름이다. 레이놀즈수는  $5 \times 10^3$ 이다.  $40 \times 40$ 의 정방형계산격자상에서 SOLA의 알고리즘을 적용하였다. Fig. 9는 속도벡터분포를 나타낸다.

프와송방정식은  $(\phi - \zeta)$ 계를 이용하였으며 다음의 식으로 표기된다.

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

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

소오스항을 계산하는 경우에 있어서 고정벽면에서는 부착조건을 적용하였다. 그러나, 상부 벨트에서, 대표속도를 만족하는 가상의 속도값을 부여하는 통상의 기법을 적용한 경우에는 급격한 속도구배의 영향으로 압력분포가 올바르게 얻어지지 않았다. 이와 같은 경향은 상류2차와가 발생하는 캐비티좌상부에서 현저하게 나타나고 있다. 여기에서 발생한 노이즈가 반복계산을 거치면서 전 유동장에 전파되어 전체적으로 모순된 압력분포의 형성을 가져왔다. 따라서, 이 문제를 해결하는 데 많은 시행착오를 겪었으며 결국, 내부유동장의 속도값에 의하여 직선외삽하는 방법을 택하였다. 이는, 속도구배가 특히 큰 벨트하부에서 계산격자의 해상도가 낮기 때문으로 보여진다. PIV에 있어서도 벽면근처에서 보다 정확한 계측데이터를 우선적으로 확보하여야 하며, 격자보간시 부등간격격

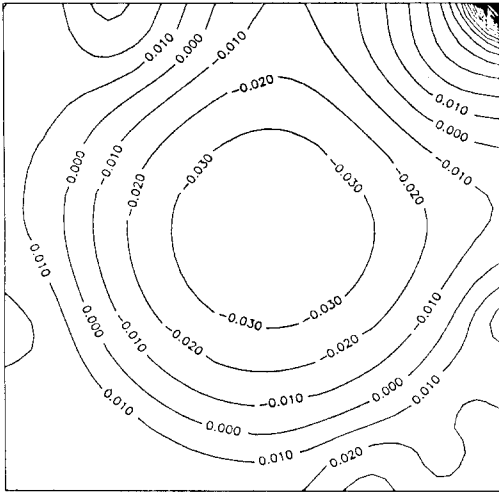


Fig. 10 Equi - Baric Lines by SOLA

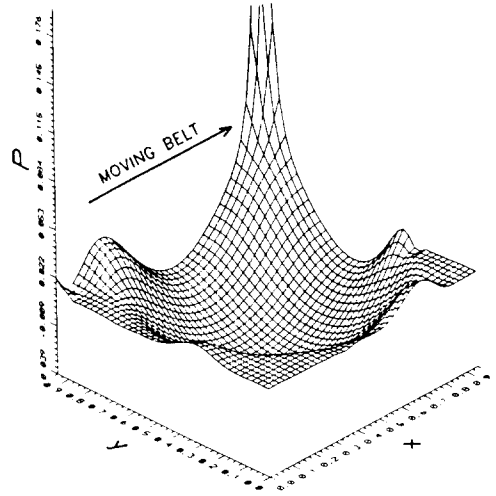


Fig. 12 Pressure Distribution by SOLA

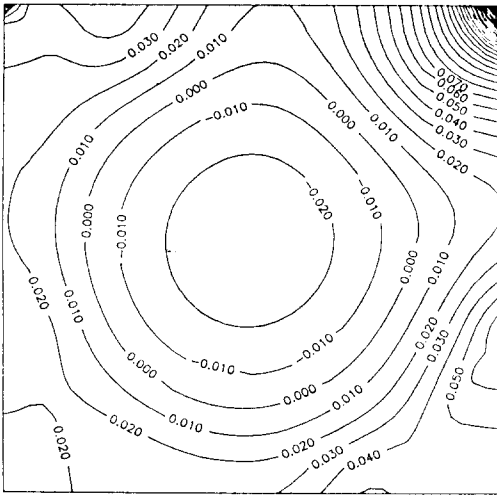


Fig. 11 Equi - Baric Lines by Poisson's

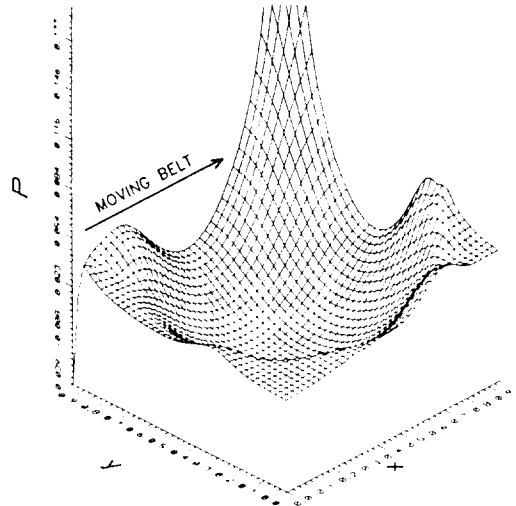


Fig. 13 Pressure Distribution by Poisson's

자를 생성하여 이와 같은 문제점을 해결하여야 할 필요성이 있음을 보여준다.

한편, 프와송 방정식을 풀기 위하여 벽면의 가상 격자에서 압력값을 정의하여야 한다. 본 연구에서는 MAC법에서 제시한 대로 발산을 영으로 하는 기법을 그대로 택하였다.

Fig. 10은 SOLA의 수치해법에 의해 구해진 압력분포를 벽면까지 포함해서 보여준다. Fig. 11은 프와송방정식의 해에 의해서 구한 결과이나, 외경상, 대체로 일치하고 있는 경향을 보여주고 있다. Fig. 12 및 Fig. 13은 각각 Fig. 10 및 Fig. 11의 결

과를 3차원적으로 도시한 결과이다. 벨트하류부에서의 압력분포특성에 비교적 큰 차이가 나타남을 알 수가 있다.

#### 4. 2. PIV적용

압력계산에 이용된 속도분포는 Fig. 8이다. 이 단면은  $z=0.5$ , 즉, 주류방향의 중앙부이며 캐비티 유동장의 속도분포를 비교하는데 가장 빈번히 이용되는 단면이다. 캠코우더에 기록된 테이프를 재생하여 어느 한 시각의 유동장만을 해석한 결과이

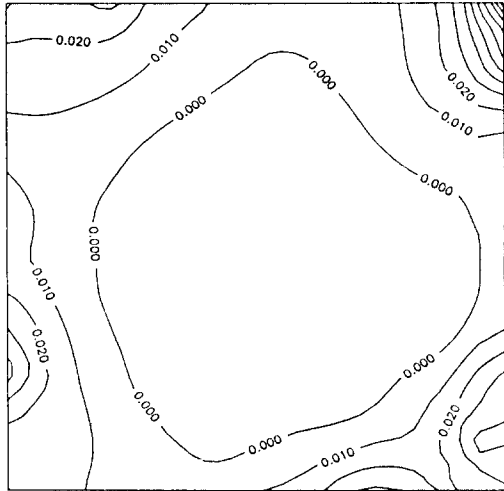


Fig. 14 Equi Baric Lines by PIV - Poisson

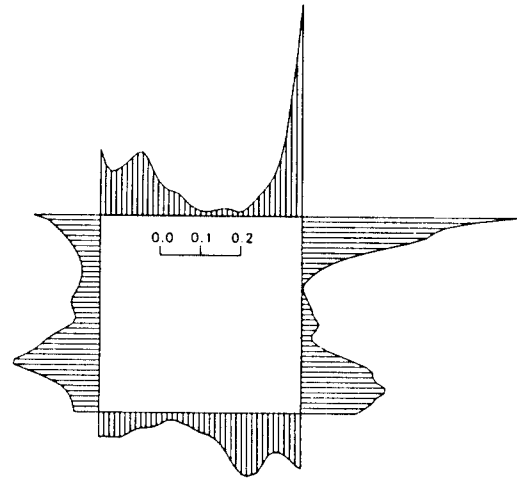


Fig. 16 Wall Pressure Estimation by PIV - Poisson

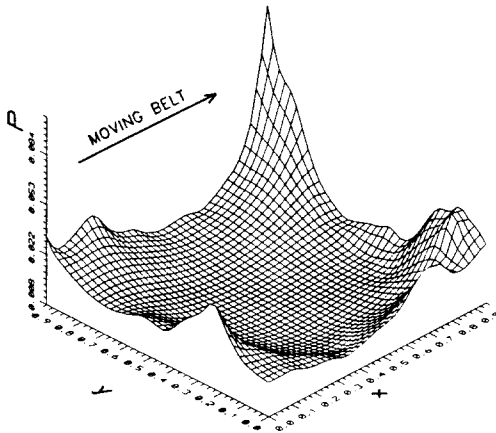


Fig. 15 Pressure Estimation by PIV - Poisson

다. 유효벡터수는 350개 전후이며 격자상의 속도 값은 거리의 역수보간을 취해 구하였다. 이 값을 기초로 하여 앞절에서 제안된 기법을 적용하여 압력분포를 구한 것이 Fig. 14이나, 앞의 Fig. 10 및 Fig. 11과 외견상 비슷한 특징을 보이고 있다. 그러나, 수치해석은 2차원의 결과이며, Fig. 14는 정방향 3차원캐비티내에서의 2차원단면이므로 직접적인 비교는 불가능하다. Fig. 15은 전유동장에 걸친 압력분포를 3차원적으로 보여주고 있으며, Fig. 16은 벽면에서의 압력분포변동을 보이고 있다. 벽면에 따라 급격한 압력고개(pressure hill)가 나타나고 있음을 알 수가 있다.

한편, 본 연구에서는 비정상유동을 하는 캐비티 흐름의 임의의 한시각에서만 속도값을 구한 예를 보이고 있다. 또한, 프와송방정식에서도 시간항이 생략된 유량함수-와도계의 소오스를 이용하고 있으나, 속도-압력계에 의한 방정식을 채택하여 시간항까지를 고려하면 비정상적인 압력변동까지를 예측할 수 있을 것으로 보여진다. 나아가, 실험에서는 벽면에서의 정압공에 의한 계측결과와 엄밀한 비교검토가 필요하다.

## 5. 결 론

본연구에서는 PIV에 있어서 전용의 영상처리장치를 이용하는 대신, 개인용 컴퓨터 및 이미지그래버를 이용한 간이시스템을 구성하였다. PIV의 성능을 개선할 목적으로 동일입자의 추적방법으로서 2프레임에 의한 처리 알고리즘을 새롭게 제안하여 4프레임방법과 그 특성을 정량적으로 비교, 검토하였다. 그 결과 2프레임식이 원리적인 장점과 함께 유효입자의 획득면에서 우수함을 알 수 있었다. 나아가, 속도벡터를 이용하여 유동장내부 및 벽면의 압력분포까지를 구하였다. 압력에 관한 프와송방정식을 적용하였으며 이 경우에 적용되는 벽면의 경계조건을 검토하였다. 고정벽면에서는 부착조건을 적용하였으며, 이동벨트에서는 내부의 속도값을 외삽하는 방법을 새롭게 택하였다. 그



결과 CFD에 의한 검토에서는 비교적 양호한 일치를 보였으며, 실험에 있어서는 PIV를 이용한 속도 벡터값을 이용하였다. 도시된 그림들은 벽면까지의 압력변동을 잘 나타낼 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 1993년도 교육부 학술연구조성비(기계공학분야)에 의하여 연구되었으므로 관계자여러분께 사의를 표합니다.

## 참고문헌

- 1) Hesselink, Digital Image Processing in Flow Visualization, Annu.Rev. Fluid Mech. 1988, p. 421.
- 2) C. Gray, The Evolution of Particle Image Velocimetry, Workshop - Optical Method & Data Processing in Heat and Fluid Flow, IMechE, 1992, p. 19.
- 3) 이 영호, PIV에 의한 유동장계측, 대한조선학회지 제14권 제2호, 1994, p. 43.
- 4) K. Imaichi, K. Ohmi, Numerical Processing of Flow - Visualization Pictures - Measurement of Two - Dimensional Vortex Flow, J. Fluid Mech. Vol. 129, 1983, p. 283.
- 5) J.Massons, J. Gavalda, F.Diaz, Image Processing of Cylinder Wake Generation, Phys. Fluids A 1 (8), 1989, p. 1415.
- 6) 최장운, 조대환, 이영호, PIV에 있어서의 입자추적 기법의 개선, 대한기계학회 93년도 추계학술대회 논문집 제2권, 1993, p. 360.
- 7) 최장운, 이영호, 김춘식, PIV에 의한 벽면압력분포의 추정, 대한기계학회 94년도춘계학술대회논문집 제2권, 1994, p. 346.
- 8) Young - Ho LEE, Chun - Sik KIM, Dae - Hwan CHO, Jang - Woon CHOI, PIV Measurements of Cubic Cavity Driven by 2 - D Plane Poiseuille Flow, Proc. 3rd JSME - KSME Fluids Engineering Conference, 1994, p. 335.