

# PIV에 의한 속도계측 방법의 확립

최장운\* · 조대환\* · 김춘식\*\* · 이영호\*\*\*

## Establishment of Velocity Measurement Method by PIV(Particle Image Velocimetry)

*J.W.Choi · D.H.Cho · C.S.Kim · Y.H.Lee*

### Abstract

The present study is aimed to develop a new experimental method to measure velocity components in flow field by image processing technique called Particle Image Velocimetry(PIV). Here is represented a novel particle identifying algorithm by correlating two consecutive frames. And it is compared with four-frame identifying method, resulting in higher processing speed and more effective acquisition of the same particle pairs.

The image processing system consists of one commercial image board slit into a personal computer and 2-dimensional sheet light generator and flow picture recording apparatus.

Particle labelling, calculation of gravity centers, boundary detection and related techniques are also scrutinized and distribution of interpolated velocity vectors, equi-baric contours are also illustrated as examples.

### 1. 머릿말

유체의 유동특성을 정량적으로 파악하기 위한 계측수법은 유체공학 관련의 제반문제를 해결하기 위하여 필수불가결한 요소이다. 또한, 대표적인 계측대상인 유체의 속도 및 압력을 측정하는 방법이 여러가지 관점에서 연구되어 왔다.

최근에는 컴퓨터 성능의 급속한 향상, 그래픽 어댑터의 고해상도 및 하드웨어의 저가격화 등으로 인하여

---

\* 한국해양대학교 대학원

\*\* 한국해양대학교 해사대학 기관공학과

\*\*\* 한국해양대학교 이공대학 기계공학과

화상처리를 위한 컴퓨터 및 주변장치를 보다 쉽게 구입할 수 있게 되었다. 따라서, 이전부터 원리적으로만 제시되어 왔던 정량적인 가시화 수법의 적용이 가능하게 되었다.

이들 수법중 PIV(Particle Image Velocimetry : 입자화상유속계, 이하 PIV로 부르기로 함)<sup>1)-4)</sup>는 대상 유동장에 추종성이(traceability)이 우수한 입자를 분포시키고 이들 입자의 순시적인 위치를 미소시간 간격을 두고 기록하여 적절한 화상처리를 거친 다음, 각각의 입자의 변위를 계산하여 속도벡터를 전유동장에 걸쳐 동시에 구할 수 있는 속도계측수법이다.

원리적으로 비정상유동장에 대하여 동시다점계측이 가능하며, 유동장을 기록, 보존하여 재현성의 문제를 해결할 수 있기 때문에 전산유체역학에 필적할 수 있는 유일한 계측수법으로 평가되고 있다.

그러나, 이들 수법을 실용화하기 위해서는 여러가지의 점들이 개선되어야 하며, 특히 동일입자의 추적수법을 고속화하여 리얼타임의 속도계측이 가능하도록 하여야 한다. 한편, 화상처리를 하기 위해서는 고가의 전용장치를 이용할 수도 있으나, 저가의 이미지보오드를 활용하는 수법은 실용상 대단히 유용하다고 보아진다.

본 연구에서는 이와 같은 점들에 착안하여 이미지보오드를 이용한 경우에 필요한 하드적인 구성 및 입자추적을 위한 새로운 알고리즘의 개발을 목표로 하였다.

그 결과 새롭게 제안된 2프레임의 동일입자추적수법은 원리적인 장점이 충분히 발휘되어 유효입자의 획득면에서 우수함이 입증되었다. 또한 저가의 PIV시스템을 구성할 수 있게 되어 유동장의 계측에 적극적으로 이용될 수 있는 실험체계를 확립할 수 있었다.

## 2. 시스템 구성

### 2-1. 화상입력장치

유동장의 화상을 기록하기 위하여 가정용의 캠코우더를 이용하였다. 해상도는 512×480 픽셀이다. 최근에는 고해상도를 갖춘 CCD카메라 또는 HDTV카메라가 보급되고 있어 해상도의 문제는 점차 해결되어 가고 있으나, 표준적인 방법으로서 512×480 픽셀의 해상도를 갖춘 입력장치가 사용되고 있다. 화상입력은 캠코우더에 기록된 대상유동장을 VTR에서 재생하여 이미지보오드에 공급하는 방식을 택하였다.

### 2-2. 화상처리장치

화상처리장치는 입력화상데이터를 임시 보관하는 이미지메모리와 메인프로세서 및 연산 유닛을 갖추어야 한다. 전용의 화상처리장치는 풍부한 자체 명령어를 이용하여 고속으로 필요한 처리를 행할 수 있으나 개인용계산기를 이용하는 경우에는 이미지보오드 및 부속소프트를 운용하기 위한 별도의 처리수법의 개발이 필요하다. 따라서, 이미지보오드가 제공하는 기본명령어를 효과적으로 활용하여, 고속으로 화상처리를 행하기 위한 일련의 알고리즘을 확립하는 것이 우선적으로 요구되며, 실제로 많은 시행착오와 노력을 요하는 부분으로 보아진다. 그림1은 본 연구에서 채택한 처리시스템의 구성을 보이고 있다.

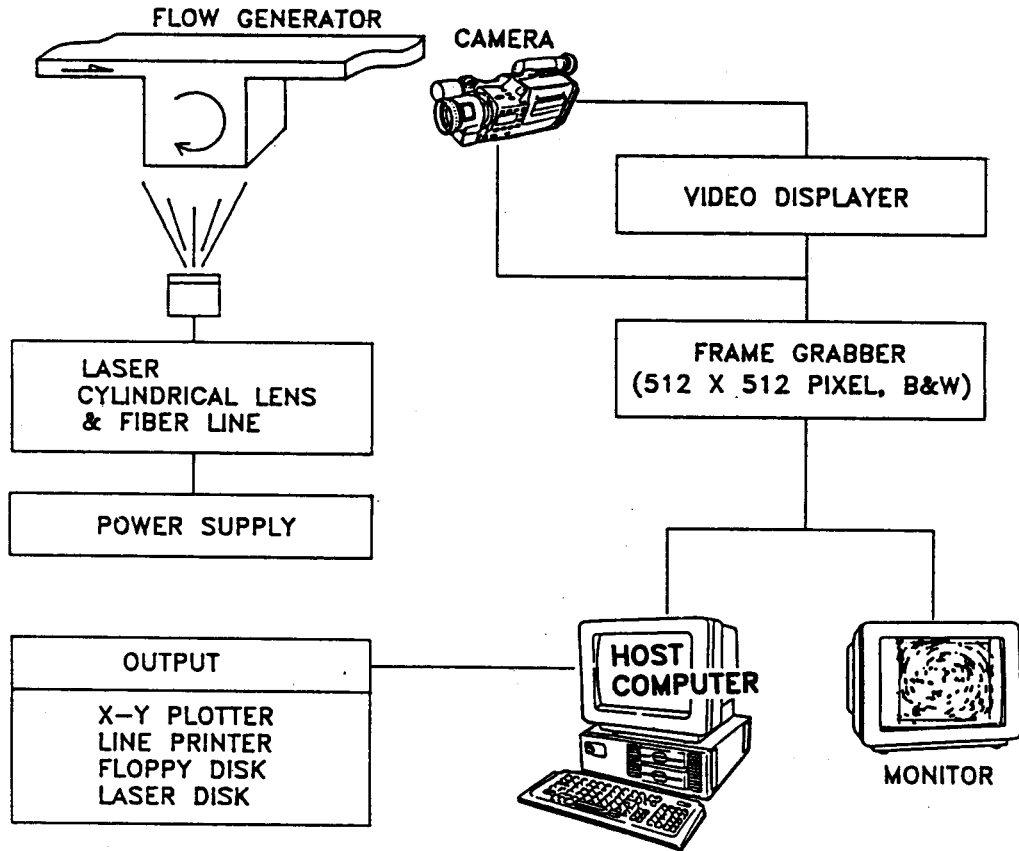


Fig. 1. Schematic Diagram of PIV System

2-3. 이미지보오드

이미지보오드는 그림2에서 보이는 바와 같이 2개의 LUT와 2개의 이미지 메모리 그리고 입출력을 위한

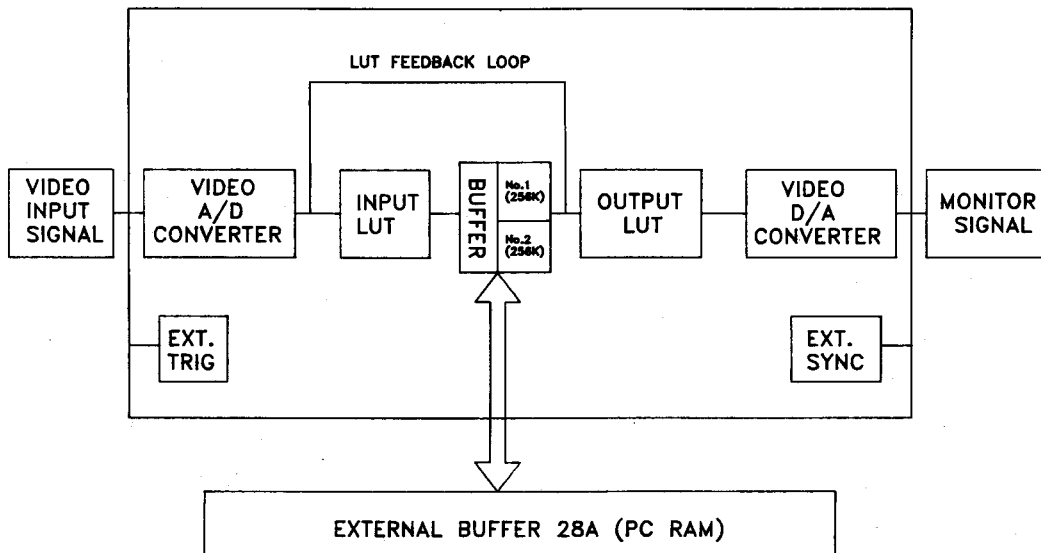


Fig. 2. Configuration of Image Board

A/D 및 D/A 컨버터, 외부 트리거 및 외부동기신호를 위한 포트가 구성되어 있다. 입력 화상신호는 고속 A/D 변환기를 거쳐 이진화일인 512×512×8비트 용량의 디지털정보로 바뀌어, 두 프레임분의 용량을 갖춘 메모리버퍼, 또는 호스트컴퓨터의 램드라이브에 자동으로 생성된 다수의 메모리 버퍼에 저장된다.

그리고 입력부와 출력부에 있는 룩업테이블(look-up table : LUT, 계조변환용의 초고속램)은 이미지 메모리의 내용을 변경하지 않고 계조변화나 강조처리 등을 행할 수 있다. 그러나 본 연구에서 구성된 이미지 보오드는 LUT연산 등을 행하지 않고 일차원의 이진화일로 저장된 화상정보, 즉, 각픽셀의 계조치(grey level)를 하드디스크 등에 저장하기 위한 역할만을 행하며, 그 외의 처리는 모두, 호스트컴퓨터에서 별도의 처리소프트를 이용하도록 되어 있다.

### 2-4. 유동장의 형성

3차원의 캐비티흐름을 대상유동장으로 하였다. 이에 관한 유체역학적인 고찰은 본 연구범위를 벗어나므로 여기에서는 단지 유동장의 형성에 필요한 기술적인 내용에 국한한다.

1) 캐비티형상 : 높이, 폭 그리고 길이가 100mm인 정방형으로서 일면에서 일정한 전단속도를 공급하여 내부에 3차원의 비정상유동장을 형성한다. 레이놀즈수는 덮개의 이동속도 및 정방형캐비티의 높이로 계산된다.

2) 조명방법 : 출력 5W의 아르곤레이저를 조명발생장치로서 사용한다. 광화이버 및 실린드릭 렌즈를 이용하여 폭 2.5mm의 시이트라이트를 만든다. 3축 트래버스장치를 이용하여 임의의 단면을 비춘다.

3) 사용입자 : 직경 150 $\mu$ m 전후의 나이론12의 구형입자를 트레이서 입자로 사용한다. 입자를 선별하여 밀도차가 무시될 수 있도록 한다.

4) 유동장의 기록 : 캠코우더를 이용하여 비디오테이프에 기록한다.

5) 유동장의 재생 : 가정용의 VTR을 이용한다.

### 3. 속도계측

개략적인 처리순서는 그림3과 같다. 이미지보오드로 부터 256 계조의 디지털 화상정보를 공급받아 잡음성분을 제거하고 라벨링(labeling)작업을 하여 각각의 입자중심위치를 구한다. 여기에서 구한 중심좌표를 이용하여 동일입자추적을 행하며, 이때 발생하는 이상치(outlier)를 제거한다. 최종적으로 얻어진 데이터를 이용하여 속도성분을 구하며 이 값들을 기본으로 하여 속도벡터선도, 와도분포, 등유량계수선도, 등압력분포 등을 도시할 수 있다.

#### 3-1. 전처리

실험장치는 정방형의 캐비티를 이용하고 있으나 CRT에 나타나는 화상은 광학적인 수차에 의하여

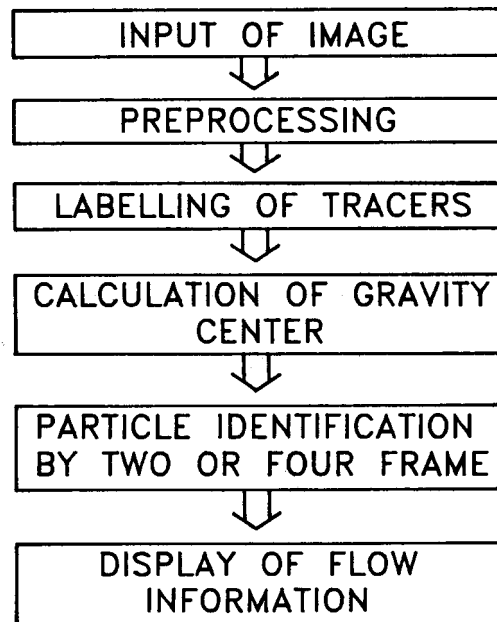


Fig. 3. Flow Chart of PIV Processing

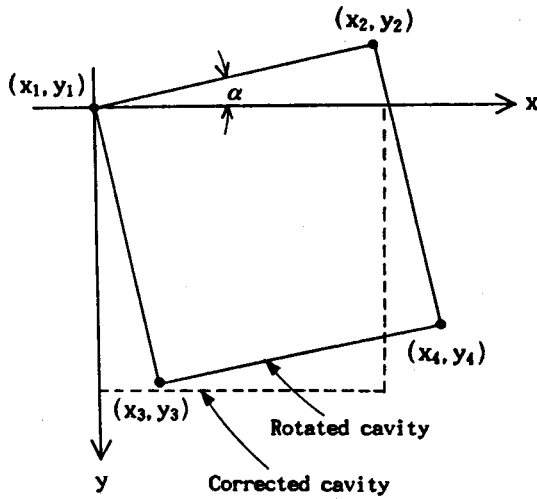


Fig. 4. Rotated Angle of Square Cavity

$$\tan(a) = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}, \quad a = \tan^{-1}\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \quad (1)$$

$$x_2' = x_2 + (x_2 - x_1) \cos(a) - (y_2 - y_1) \sin(a) \quad (2)$$

$$y_2' = y_2 + (y_2 - y_1) \cos(a) - (x_2 - x_1) \sin(a) \quad (3)$$

$a$  : 회전각도

$x_2', y_2'$  : 회전보정된 후의  $x_2, y_2$

### 3-2. 단일입자의 검출

이미지보오드에 의해 얻어진 최초의 정보는 하드디스크에 저장된다. 이 값은 각픽셀이 256계조의 값을 갖는 이진화일형태로 되어 있으며, 유동장의 촬영시에 나타나는 여러가지의 잡음성분을 포함하고 있다.

우선, 해석대상의 유동장에 포함된 내용중 입자가 아닌 부분, 예를 들어 캐비티의 윤곽선을 제거할 필요가

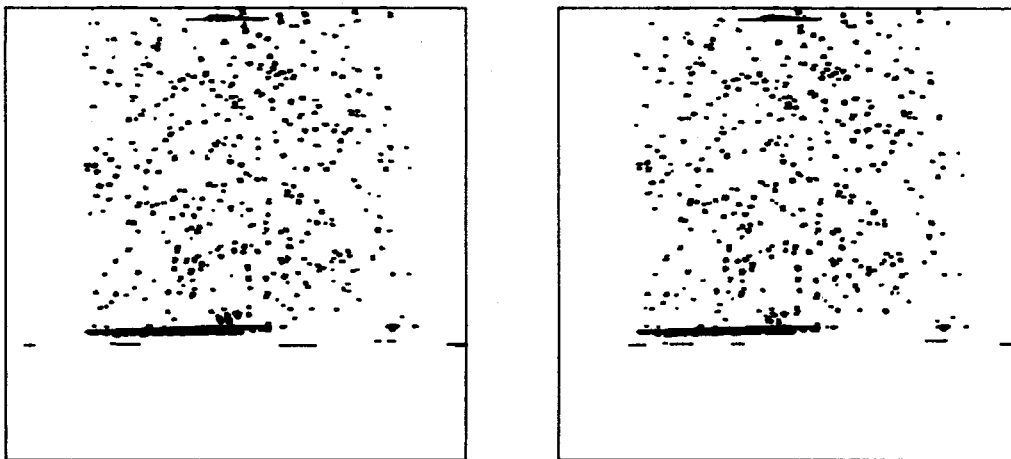


Fig. 5. Binary Image(Threshold Level=80)

바깥쪽으로 약간 팽창된 형태로 나타나며, 비디오 촬영시에 정확히 수평을 유지할 수 없으므로 대부분 카메라축을 중심으로 약간의 회전각도를 갖게 된다. 이미지보오드는 이 때의 화면을 초기 데이터로 그대로 보존하게 된다. 한편, 실제의 처리과정에서 화면의 팽창에 따른 불확실성 성분은 미소하므로 무시하기로 한다. 그러나 입력화상의 회전화면은 반드시 보정해 줄 필요가 있다. 보정방법으로서 그림4와 같이 정방형의 캐비티가 반시계방향으로 회전되어 있다면,  $(x_1, y_1)$ 점을 중심으로 해서 회전된 각도만큼 모든픽셀의 좌표를 시계방향으로 회전 이동시켜 주면 된다. 식(1), 식(2) 및 식(3)은 이에 관련된 좌표변환식이다.

있다. 이를 위하여 편의적인 방법으로 동일한 유동장의 임의의 시간화면을 배경화면으로 설정한 다음 전픽셀에 걸쳐 해석대상의 화면으로 부터 계조값에 대하여 단순히 마이너스연산을 행하는 수법을 택하고 있다.

두번째로는 적당한 역치(threshold level)를 각픽셀에 공통으로 부여하여 그 값 이하가 되는 픽셀을 입자가 아닌 잡음성분으로 인식하여 자동으로 제거한다. 그림5 (a) 및 (b)는 임의의 두 화면을 이치화하여 역치값으로 80을 부여했을 때의 화상을 보이고 있다. 그림6은 화면(b)에서 화면(a)를 뺀 결과이며 주변의 윤곽선이 제거되었음을 알 수 있다.

그림7은 2프레임의 동일입자추적법에 있어서 단일입자를 검출하기 전의 잡음성분이 제거된 이치화화상(상) 및 제1프레임과 제2프레임의 도심좌표(하)를 보여주고 있다.

다음으로 입자로 인식되는 화소를 연결하는 윤곽선추적(boundary trace)이 필요하게 된다. 여기서는  $3 \times 3$ 화소의 마스크를 사용하여, 8화소연결의 윤곽선을 추출하는 방법을 택하고 있다. 우선, 배경부분의 화소의 색을 흑, 도형을 구성하는 화소의 색을 백으로 가정한다.

먼저 그림8(a)와 같이 래스터 스캔(raster scan) 방향으로 주사해 가면서 화소가 백화소와 흑화소의 어느 것이 되는가를 조사하고, 최초로 검출된 백화소를 윤곽선 추적의 개시점으로 한다. 이 화소는 도형을 구성하는 백화소 중에서 최상행에서 가장 왼쪽의 백화소이다. 이 화소를  $P_1$ 으로 한다.

다음으로 이 화소  $P_1$ 을 중심으로  $3 \times 3$  화소의 마스크를 생각한다.  $P_1$ 으로부터 그림 8(b)의 번호를 표시한 순서로, 그 화소가 백화소인가 아닌가를 조사하고, 최초로 나타나는 백화소를  $P_2$ 로 한다. 이때  $P_1$ 이 최상행의 최좌의 화소이기 때문에, 그림 8(b)의 ①부터 ④까지를 조사해 봐도 백화소가 없을 경우,  $P_1$ 은 독립점이 된다.  $P_1$ 이 독립점이 될 때는 추적을 중지한다.

다음으로, 점  $P_n$ 이 검출되었을 때, 다음 점  $P_{n+1}$ 을 검출한다. 점  $P_1$ 으로부터 점  $P_2$ 를 검출했을 때와 마찬가지로, 점  $P_n$ 을 중심으로한  $3 \times 3$  화소의 마스크를 생각한다. 그림8(c)의 번호와 같이, 점  $P_{n-1}$ 로부터 시작하여, 반시계방향으로 ②,③...⑧의 순으로 화소의 색을 조사하고, 최초의 백화소를 점  $P_{n+1}$ 로 한다. 이 조

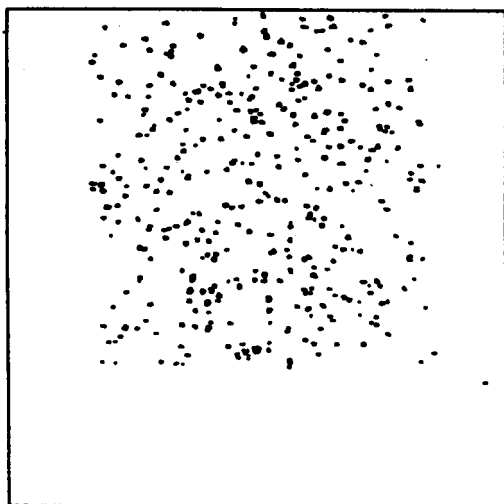
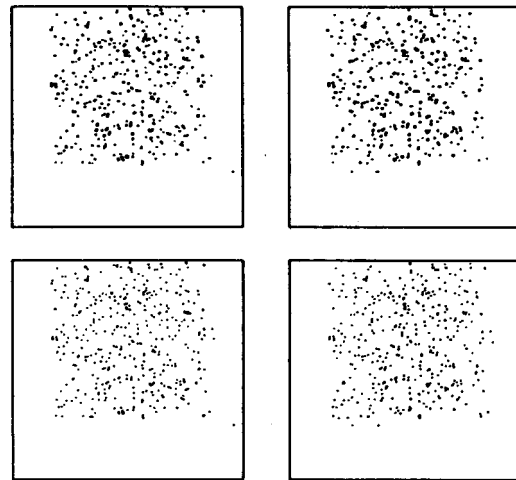


Fig. 6. Subtracted Binary Image



(a) 1st Frame (b) 2nd Frame

Fig. 7. Subtracted Binary Image and Particle Centroids

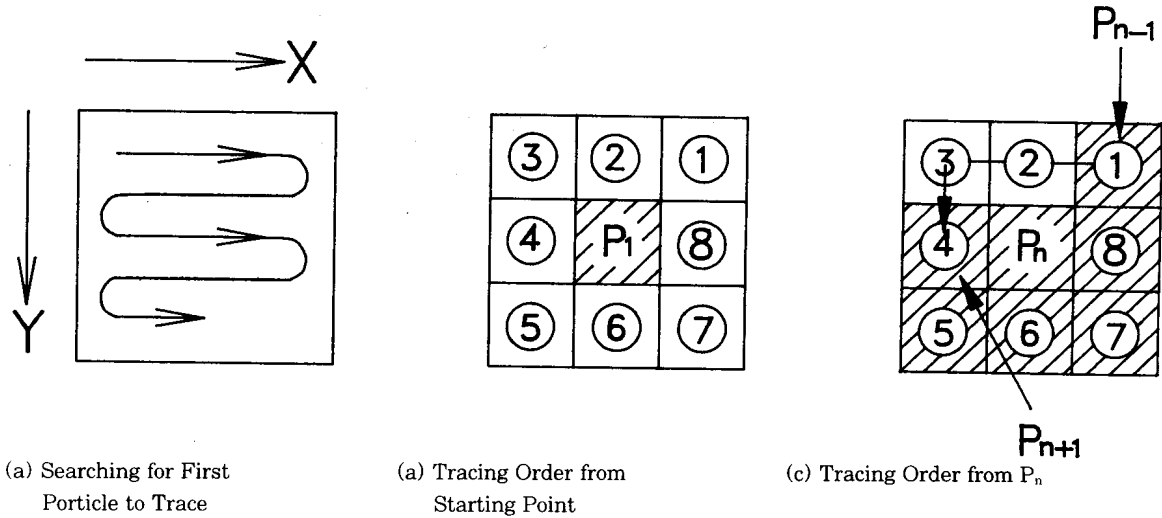


Fig. 8. Schematic Principle of Boundary Trace

작을 순번으로 행하고, 윤곽선추적의 종료는 추적 시작점을  $P_2$ 로 주었으므로  $P_n$ 이  $P_2$ 와 일치할 때 종료하게 되며, 점  $P_1$ 으로부터 점  $P_{n-1}$ 가 구한 윤곽선이 된다.

추적을 고속화하기 위한 알고리즘으로서는, 래스터 스캔 방향으로 추적해 가기 때문에, 그림8(c)에서 ⑤,⑥,⑦,⑧의 점은 독립점이 되는가의 여부를 검색할 때 그 대상에서 제외한다. 다음으로 ①,②,③,④의 순으로 독립점 여부를 조사하여 그 점이 독립점이 된다면 추적을 중지한다. 독립점도 하나의 좌표로 인식하기 위하여 윤곽선 추적은 중지하나, 도심좌표는 계산되어야 한다. 또 다른 수법으로서 점  $P_n$ 에서의 탐색 시작점은 그림 8(c)의 ①이 되나, 한 그룹 내에서  $P_{n+1}$ 을 찾고나서  $P_{n+2}$ 를 찾을 때는 ①점에서 탐색을 다시 시작하는 것이 아니라,  $P_{n+1}$ 을 찾을 때 이미 탐색했던 점은 제외 시키고 탐색하면 속도면에서 보다 개선된다.

그림10은 그림9의 정방형 영역을 4배로 확대한 것이며, 그림11은 검출된 윤곽선을 확대해서 보여주고 있다. 그림12는 미소시간간격을 갖는 연속된 두화면의 일부분을 보이고 있다.

다음으로, 윤곽선 추적과 동시에 각각의 입자의 도심좌표의 계산이 필요하다. 도심좌표는 면적모멘트 공식에 의해 다음식으로 구한다.

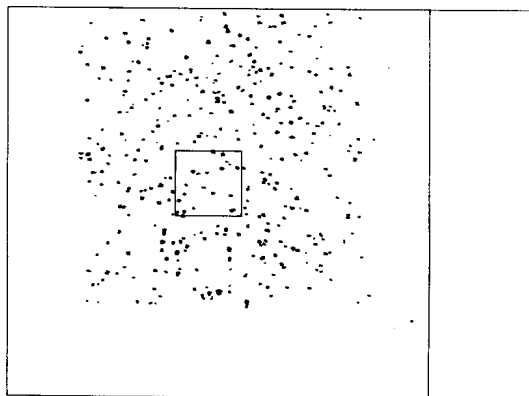


Fig. 9. Binary Image(Threshold Level=80)

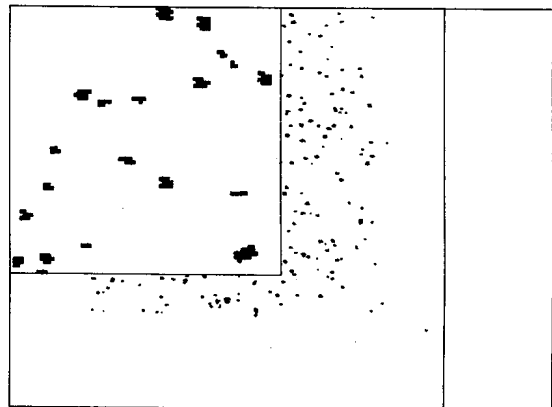


Fig. 10. Magnified Particle Image of Fig.9

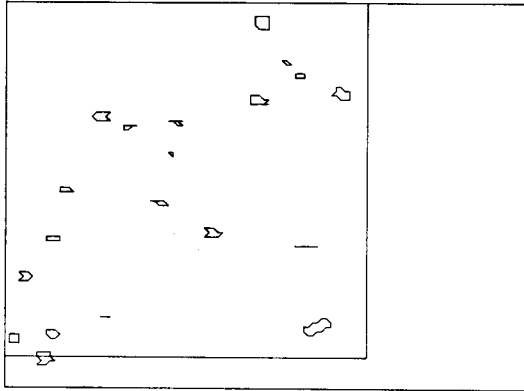


Fig. 11. Particle Shape by Boundary Trace

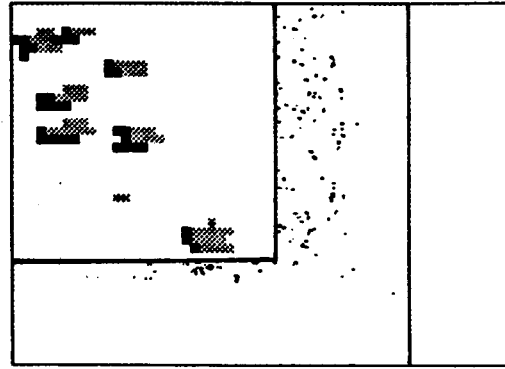


Fig. 12. Overlapped Image of Two Consecutive Frames

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i y_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (4)$$

위 식에서  $x_i, y_i$ 는 입자를 구성하는 각 픽셀의 좌표이며,  $A_i$ 는 그 면적을 의미한다.

그림13은 입자의 중심위치를 구하는 데 있어 동일한 입자에 대하여 윤곽선의 좌표만을 사용했을 때와 내부까지 고려했을 때의 입자중심위치의 변동분포를 보여주고 있다. 애초의 발상은 처리속도의 증가를 목적으로 윤곽선의 좌표만을 이용하여 중심위치를 구하고자 하였다. 그 결과 역시 80에서 387개의 입자를 검출하는 경우, 윤곽선의 좌표만을 사용했을 때에는 0.65초, 내부까지 고려했을 때에도 0.65초로 나타났다. 즉, 애초에 예상했던 처리시간의 단축은 효과가 없었으며 오히려 그림에서 보는 바와 같이 불확실성 성분만이 증가한 결과를 가져왔다. 평균변동값은  $x=0.026, y=0.019$  픽셀의 값으로 나타났다.

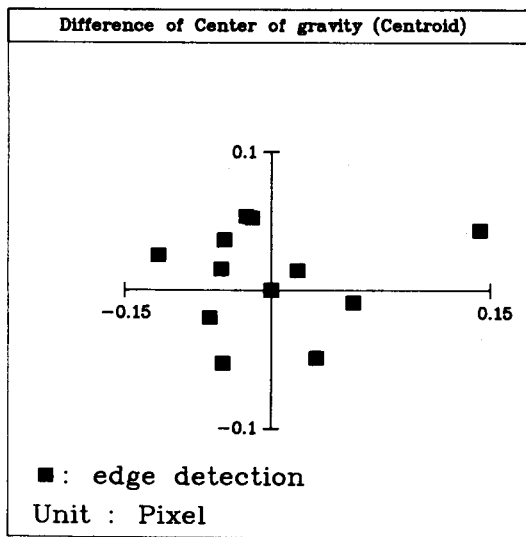


Fig. 13. Difference of Centroids by Edge Detection

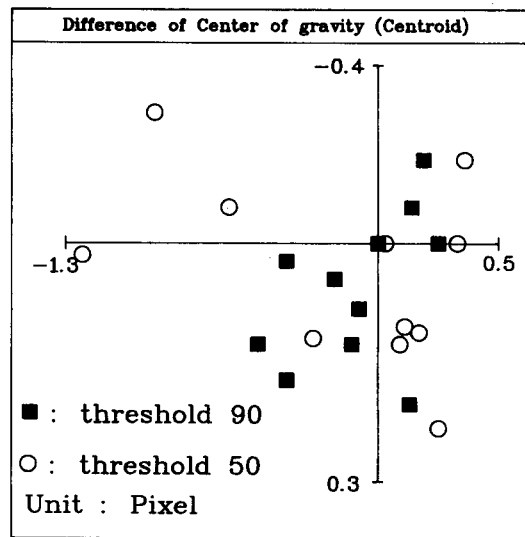


Fig. 14. Variation of Centroids Due to Threshold Levels



단일입자 검출시에 역치에 의한 중심좌표의 변동이 문제가 된다. 그림14는 기준의 역치를 70으로 한 경우의 결과이다. 50에서는  $x = -0.16$ ,  $y = -0.05$  픽셀의 평균변동값을, 90의 경우에는  $x = 0.08$ ,  $y = -0.08$  픽셀의 평균변동값을 보여주고 있다. 이 결과는 최종적으로 얻어진 속도벡터의 계산에 수반하는 불확실성 성분으로 반드시 고려되어야 한다.

표1은 역치의 값을 변화시켰을 경우의 입자인식 및 처리속도관계를 정량적으로 보여주고 있다. 처리시간은 데이터변환, 단일입자 검출 및 동일입자의 추적까지 걸린 시간이다. 우선 역치 70을 중심으로 50과 90을 부여했을 경우의 유효입자수를 검토한다.

화면대화형으로 에러처리를 끝낸 후의 입자수의 비율은 각각 원래의 입자수에 대하여 92, 91 및 91%로서 비슷하다. 그러므로 역치에 따라서는 유효입자의 획득비율은 크게 달라지지 않음을 알 수 있다. 대화형에러 처리된 후의 최종 유효입자수를 비교해 보면 약 10% 정도의 차를 보여주고 있다. 역치가 낮아질수록 입자획득율은 증가하나 수동으로 처리해야 할 에러가 많아질 뿐만 아니라 시각적으로도 에러입자를 판별해 내기가 어려운 점이 지적된다.

역치가 90의 경우에는 자동에러처리율이 높으나 50의 경우에 비해 유효입자수가 상당히 감소한다.  $Re = 5 \times 10^3$ 에서는 역치를 70전후로 부여했을 때가 유효입자수, 에러처리 및 처리시간에서 적절함을 알 수 있었다. 따라서 적절한 역치의 선정은 구체적으로 해당유동장에서 경험적으로 정할 수가 있다. 히스토그램에 의하여 역치를 자동으로 부여하는 방법도 있으나 본 연구에서는 채택하지 않았다.

**Table 1 Particle Identification by Threshold Level**

( $Re = 5 \times 10^3$ )

Threshold Level	50	70	90
Identified Par. No.	(100%) 430 (107%)	(100%) 376 (100%)	(100%) 331 (88%)
Auto-Removed Par. No.	(94%) 403 (112%)	(96%) 360 (100%)	(93%) 307 (85%)
Manually Removed Par. No	(92%) 369 (108%)	(91%) 341 (100%)	(91%) 302 (89%)
Elapsed Time(sec) (80486-50MHz)	13.32	10.52	8.72

## 4. 동일입자 추적법

### 4-1. 4프레임 입자추적법

문헌상에 나타난 다프레임의 입자추적수법은 동일입자의 확인방법으로 가장 먼저 소개된 수법이다. 어느 경우에도 그 원리는 비슷하나, 그림15를 참조하여 구체적으로 설명하기로 한다. 먼저 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 예상이동위치의 제2프레임까지의 이동거리와 같은 곳에 위치한다고 볼 수 있다. 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 수 많은 예상계

적이 얻어진다. 다음으로 얻어진 예상후보 가운데 입자의 참된 이동경로로 판단되어지는 하나의 경로를 얻기 위해서 각각의 이동거리  $l_1, l_2, l_3$ 에 대한 분산(分散)을 구하여 이 값이 최소가 되는 경로를 참된 경로로 판단한다. 본연구에서 입자의 직선성, 등간격이동성을 전제로 하고 별도의 평가함수인  $(2L_2 - (L_1 + L_3))$ 의 값이 최소가 되는 경로를 참된 입자 경로로 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.

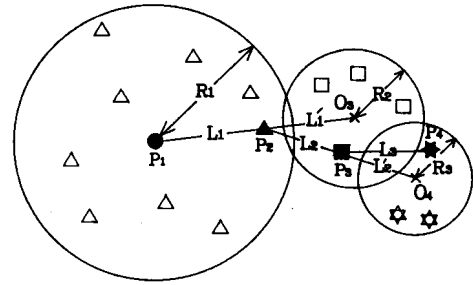
#### 4-2. 2프레임 입자추적법

2프레임방식에 의한 입자추적에는 지금까지 몇가지의 수법이 제안되어 왔으며, 어느 경우에도 입자의 분포특성에 대한 상관계수를 구하여 동일입자를 판별하는 수법을 택하고 있다. 그림16은 이 수법을 개념적으로 보여주고 있다. 우선 제1프레임과 제2프레임의 모든 입자의 픽셀좌표에 1의 값을 부여한다. 이 때에 입자의 중심점에는 큰 값을, 멀리 떨어 질수록 작은 값을 부여하여 가중계수를 채택할 수도 있다.

다음으로 제1프레임에 존재하는 입자가 이동할 수 있는 최대거리위치를 제2프레임에 설정한다. 각각의 중심을 중앙으로 하여 상관계수의 계산영역(correlation area)을 설정한다. 같은 크기를 갖는 양쪽의 상관값 계산영역의 대응위치에서 이 값들을 곱한다. 따라서 대응하는 각각의 배열에서 1의 값을 갖는 경우에만  $(1 \times 1) = 1$ 의 상관값을 갖게 된다. 이와 같은 조작을 상관영역 전체에 걸쳐 행하여 그 합을 구하고 그 값이 최대가 되는 입자위치를 입자의 이동위치로 결정한다.

다음으로, 부적합한 상관값에 의한 이상치(outlier)를 통계적인 수법 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 50도 보다 크면 에러로 처리한다.

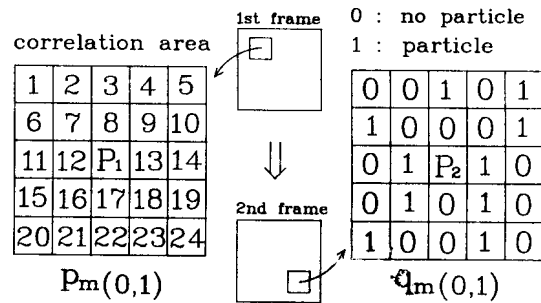


- O: Particle of 1st frame     $L_1 = L'_1$
- △: Particle of 2nd frame     $L_2 = L'_2$
- : Particle of 3rd frame    P: Particles
- ☆: Particle of 4th frame    R: Searching radius

Evaluation function

$$C = \text{MIN} ( 2L_2 - ( L_1 + L_3 ) )$$

Fig. 15. Four-Frame Identification



Evaluation function

$$C = \sum_{m=1}^{24} P_m \times Q_m$$

Fig. 16. Two-Frame Identification

4-3. 비교 및 검토

역치는 2프레임이나 4프레임수법 및 세 경우의 레이놀즈수에 있어서 똑같이 80을 부여하였다. 본연구에서는 0-1버퍼의 프레임간 시간간격은 0.067초 그 이외의 버퍼는 0.267초로 설정되어 있다.

표2를 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 미소변위를 움직이므로 2차원 시트라이트면으로 부터의 이탈이 적게 되고 유효입자의 손실도 방지할 수가 있다. 그리고 직선, 등속도이동에 보다 충실할 수 있으므로 곡률을 갖는 유동장에서 발생할 수 있는 평균조작오차(averaging error)의 문제도 감소한다.

4프레임수법에 0-1버퍼를 이용하고자 한다면 평가함수를 다시 정의해야 한다. 즉 등프레임시간간격시의 평가함수는,

$$C = \text{Min}(2l_2 - (l_1 + l_3)) \tag{5}$$

이었으나, 1-2프레임 시간간격이 0-1버퍼를 사용했을 경우보다 1/4로 줄어들게 되므로  $l_1$ 은 4배로 증가해야 한다. 평가함수를 다시 쓰면,

$$C = \text{Min}(2l_2 - (4l_1 + l_3)) \tag{6}$$

과 같이 된다.

이와 같이 하면 유효입자수 획득면에서는 물론 처리시간에 상당한 개선을 가져올 수 있다.

Table 2 Comparison of Identification Method

Reynolds Number	Used Buffer	Identified Par. No.	Auto-Removed Par. No.	Manually Removed Par. No.	Elapsed Time (sec)
$1 \times 10^3$	0-1	135	×	×	1.59
	2-3	127	121	119	1.92
$3 \times 10^3$	0-1	211	×	×	1.15
	2-3	211	191	184	1.75
$5 \times 10^3$	0-1	351	330	324	8.29
	2-3	366	340	308	40.8

(a) Two Frame

Reynolds Number	Used Buffer	Identified Par. No	Auto-Removed Par. No.	Manually Removed Par. No.	Elapsed Time (sec)
$1 \times 10^3$	0-3	118	×	×	0.49
	2-5	114	110	109	0.54
$3 \times 10^3$	0-3	169	×	×	1.31
	2-5	159	153	148	2.19
$5 \times 10^3$	0-3	266	253	254	4.88
	2-5	283	252	3209	13.1

(b) Four Frame

프레임간의 시간간격이 극히 작을 때, 예를 들면, 레이놀즈수가 낮은 경우에는 0-1버퍼에서 두 프레임간의 도심좌표가 근접되어 있어 자동에러처리에 있어서 방향성의 판별에 문제를 가져왔다. 그러나  $Re=3 \times 10^3$ 에서는 역치값으로서 50내지 60을 부여하면 0-1버퍼를 사용해도 속도벡터를 양호하게 얻을 수 있었다. 일반적으로 프레임간의 시간간격이 짧아서 입자의 이동변위가 유동장 전체에 걸쳐 너무 작은 경우에는 프레임간의 시간간격을 늘려 주어야 한다.

### 5. 적용예

그림17(a)는 2프레임의 동일입자추적수법에 의해 얻어지는 최초의 속도벡터이다. 다음으로 자동에러처리에 의해 이상치를 제거한다. 그러나 이들 중에는 유효한 벡터도 포함될 수 있으므로 화면을 보면서 대화형으로 복구를 하거나, 자동에러처리에서 제거되지 않은 에러를 다시 처리한다. 그림17(b)는 이와 같은 처리를 끝낸 속도벡터를 보인다.

그림18의 경우는 동일한 유동장에 대하여 4프레임동일입자추적수법에 의한 결과이다. 2프레임의 경우가 4프레임의 경우보다 처리시간에서는 불리하지만 2프레임수법은 원리적인 장점 및 입자획득율( $Re=5 \times 10^3$ 의 경우에, 0-1버퍼 사용시 4프레임과 비교해 127% 증가)면에서 우수함을 알 수가 있었다.

그림19는 동일입자추적으로 얻은 속도벡터를 정방형의  $30 \times 30$  격자점에 배치시킨 것이다. 격자상에 배치하기 위하여 거리의 역수보간을 사용했으며, 그 식은 다음과 같다.

$$U_p = \frac{\sum \frac{U_i}{R_i}}{\sum \frac{1}{R_i}}, \quad V_p = \frac{\sum \frac{V_i}{R_i}}{\sum \frac{1}{R_i}} \quad (7)$$

여기에서  $U_i, V_i$ 는 P점 주위의 속도벡터성분 이고,  $R_i$ 는 거리이다.

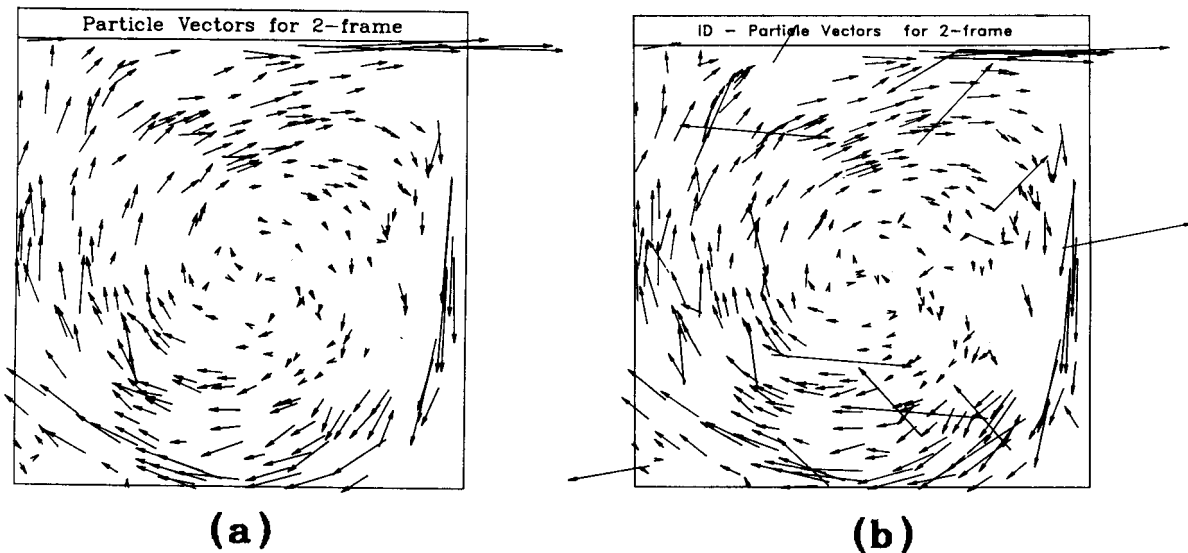


Fig. 17. Velocity Vectors by Two-Frame Method

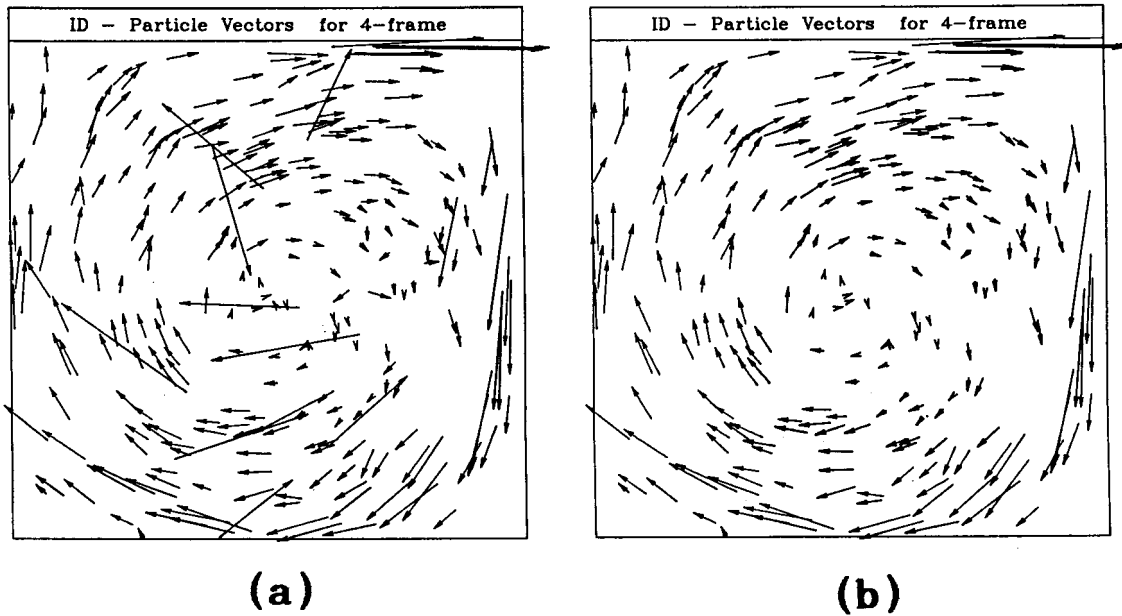


Fig. 18. Velocity Vectors by Four-Frame Method

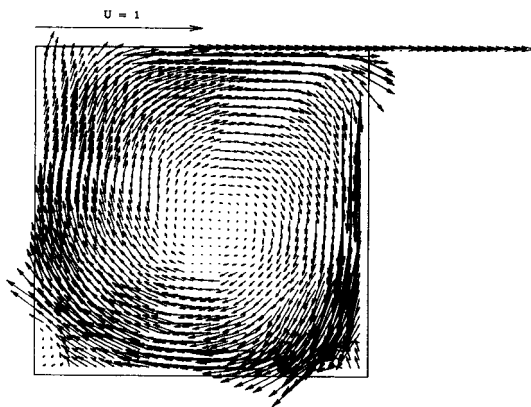


Fig. 19. Interpolated Velocity Vectors at Regular Grid

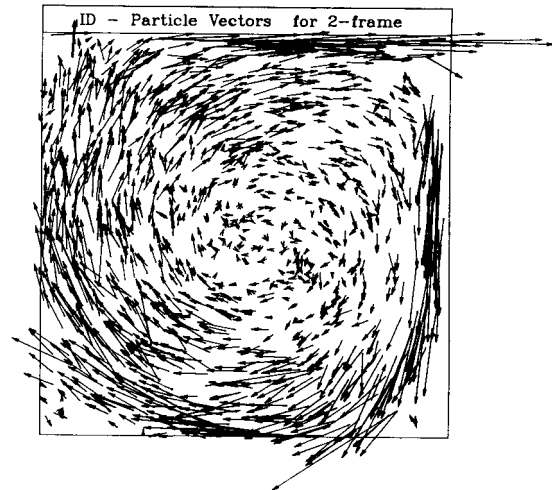
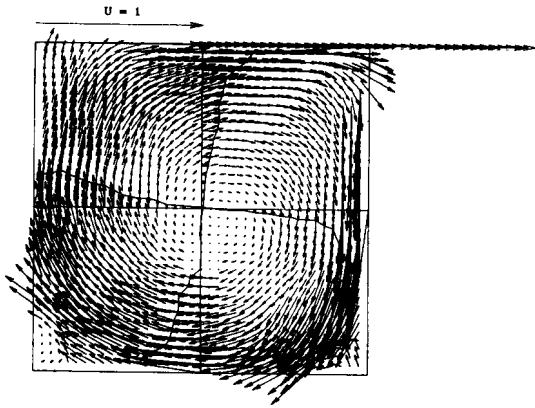


Fig. 20. Overlapped Velocity Vectors

그림20은  $Re=5 \times 10^3$ 에 있어서 입력화면을 임의의 등간격으로 처리하여 한꺼번에 보인 것으로 이 경우에는 5개의 유동장의 속도벡터를 합한 것이다. 총 속도벡터의 갯수는 1383개이다. 그림21은 그림20의 속도벡터를 보간하여 정방형격자에 속도벡터를 재배치하여 이때의 속도분포를 캐비티중심선에 대하여 도시한 결과이다. 그림 22,그림23 및 그림24는 각각 동일한 데이터를 이용하여 등와도선도, 등유량함수선도 및 등압선도를 보여주고 있다.

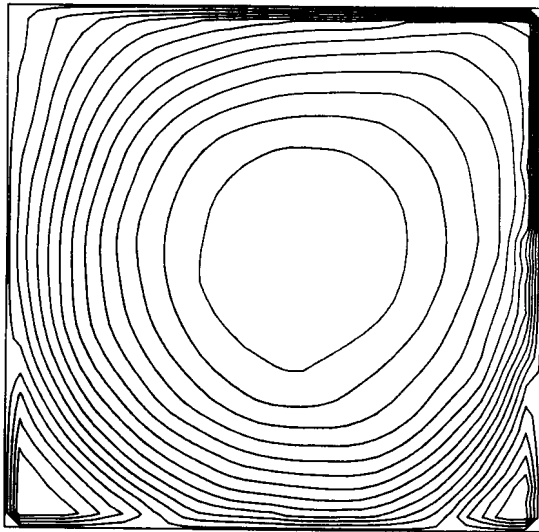
상기의 그림에 대하여 유체역학적인 고찰은 본 연구의 범위를 벗어남으로서 생략하나, 결국, 잘 운용된 PIV는 유체공학에서 궁극적으로 규명하고자 하는 유동정보의 획득 및 해석에 가장 유력한 도구가 될 수 있음을 보여주고 있다.



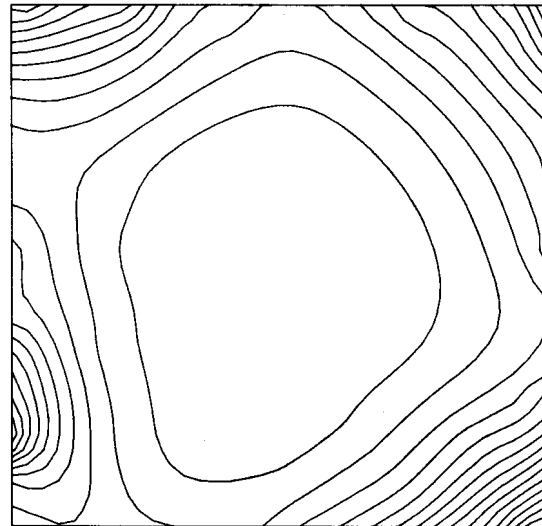
**Fig. 21.** Interpolated Velocity Distribution



**Fig. 22.** Equi-Vorticity Contours



**Fig. 23.** Contours of Stream Function



**Fig. 24.** Equi-Baric Contours

그러나 몇가지 문제점이 남아 있다. 첫째로, 유동장의 속도가 크고 변동이 심한 경우에는 입자가 유동장에 충분히 추종하지 못한다. 이와 같은 문제는 입자추적법에 의한 모든 계측수법에서 항상 고려되어야 하는 단점이다. 따라서 될 수 있으면 입자의 크기가 작은 것을 선별하여 사용하는 것이 좋으나, 그럴 경우는 화상입자의 선명도가 문제가 된다. 특히, 고속기체흐름에서는 사용입자가 극히 제한된다.

둘째로는 본 연구에서와 같은 유동장에서는 와의 중심부근과 외곽부분의 속도차가 심하기 때문에 와중심부근에서는 이동변위가 아주 작게되어 속도벡터의 방향성에 신뢰성이 낮아진다. 즉, 다이나믹레인지가 작은 것이 단점이 될 수 있다.

보다 우수한 PIV의 개발을 위해서는 하드웨어적인 면에서는 보다 성능이 우수한 처리기기의 개발이 필요하며, 소프트웨어적인 면에서는 효율좋은 처리알고리즘의 개발이 요구된다고 보아진다.

## 6. 맺음말

본연구에서는 PIV에 있어서 전용의 화상처리장치를 이용하는 대신, 개인용 컴퓨터 및 이미지보오드를 이용한 시스템을 구성하였고, 나아가, 동일입자의 추적수법으로서 2프레임에 의한 처리 알고리즘을 새롭게 제안하여 4프레임의 수법과 그 특성을 정량적으로 비교, 검토하였다. 그 결과 새롭게 제안된 수법이 원리적인 장점과 함께 유효입자의 획득면에서 우수함을 알 수 있었다.

또한, 단일입자의 확인 및 중심위치를 구하는 데 있어서 구체적인 적용예를 보였으며, 수반하는 불확실성 성분도 동시에 검토하였다.

나아가, 유동장의 해석에 필요한 물리량을 도시하여 PIV수법의 장점을 구체적으로 표현하고자 하였다.

## 7. 참고문헌

- 1) L. Hesselink, Digital Image Processing in Flow Visualization, Annu. Rev. Fluid Mech., 1988, p. 421 - 485.
- 2) C.Gray, The Evolution of Particle Image Velocimetry, Workshop - Optical Method & Data Processing in Heat and Fluid Flow, IMechE, 1992, p.19 - 36.
- 3) Y.Tanida, Proceedings of the Sixth International Symposium on Flow Visualization, 1992.
- 4) R.C.Gonzalez, Digital Image Processing, Addison Wesley, 1992.

