

## 2-프레임 PTV 시스템의 개발 및 채널유동에의 응용

백 승 조\* · 이 상 준\*\*

(1997년 12월 3일 접수)

### Development of 2-Frame PTV System and Its Application to a Channel Flow

Seung-Jo Baek and Sang-Joon Lee

**Key Words :** 2-Frame Particle Tracking Algorithm(2-프레임 입자추적 알고리즘), Match Probability(일치확률), PIV(입자영상 속도계), Separated Recirculating Flow(박리 재순환 유동), Reattachment Point(재부착 지점)

#### Abstract

A 2-frame PTV (particle tracking velocimetry) system using the concept of match probability between two consequent image frames has been developed to obtain instantaneous velocity fields. The overall 2-frame PTV system including image pre-processing, tracking algorithm and post-processing routine was implemented to apply to real flows. The developed 2-frame PTV system has several advantages such as high recovery ratio of velocity vectors, low error ratio and small computational time compared with the conventional 4-frame PTV and the FFT-based cross-correlation PIV technique. The 2-frame PTV system was applied to a turbulent channel flow over a rectangular block to check its reliability and usefulness. Total 96 sequential image frames have been captured and processed to get both mean and fluctuating velocity vector fields over the recirculating region. The mean velocity and turbulent intensity profiles were well agreed with the LDV measurements in the separated region behind the block. Time-averaged reattachment length is about 6.3 times of the block height.

기 호 설 명			
$c$	: 상수	$\Delta T$	: 획득된 화상사이의 시간 간격
$F^k$	: $k$ 번째 획득된 유동화상	$T_0$	: 유동영상이 획득될 때의 시간
$H$	: 사각블럭의 높이 (50mm)	$T_m, T_n, T_q$	: 2-프레임 입자추적 알고리즘 파라미터
$L$	: 사각블럭의 길이 (150mm)	$u_i, v_i$	: 입자중심 $x_i$ 의 $x, y$ 방향 속도성분
$N_0$	: 추출된 속도벡터의 수	$u, v$	: 임의위치 $(x, y)$ 에서의 속도성분
$P_{ij}$	: $x_i$ 와 $y_j$ 사이의 일치확률	$x_i$	: 입자중심 $x_i$ 의 $x$ 좌표
$P_i^*$	: $x_i$ 가 ( $F^2$ ) 내의 어떤 점과도 일치하지 않을 확률	$y_i$	: 입자중심 $x_i$ 의 $y$ 좌표
		$x_1$	: 첫번째 화상 ( $F^1$ )에서의 입자중심 위치벡터
		$y_j$	: 두번째 화상 ( $F^2$ )에서의 입자중심 위치벡터

\*첨단유체공학연구센터(AFERC)

\*\*회원, 포항공과대학교 기계공학과

- $W$  : 채널 및 블럭의 너비 (50 mm)
- 그리스 문자
- $\alpha_k, \beta_k$  : Multi-quadratic 보간 계수
- $\sigma$  : 기준 속도벡터와 주변 속도벡터사이의 차이에 대한 표준편차
- $\tau$  : 연속적으로 유동영상이 획득될 때의 시간변수

## 1. 서 론

우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 물체 주위유동은 유동박리, 비정상적인 재순환영역의 형성, 박리전단층의 성장 및 균질류와 비균질류사이의 상호간섭 등으로 인하여 매우 복잡한 유동구조를 가진다. LDV나 열선유속계와 같은 기존의 점측측(point measurement) 속도측정법은 국부적인 속도정보만을 제시함으로써 매순간 변하는 유동구조의 공간변화를 정확하게 해석하기에는 어려운 점이 많다. 최근들어 영상처리기법을 유동화상(flow image)에 적용한 입자영상 속도계(particle image velocimetry, PIV)나 입자추적 속도계(particle tracking velocimetry, PTV)는 유동가시화에서처럼 정성적인 순간 유동정보를 제공할 뿐만 아니라 우수한 공간분해능을 갖는 정량적인 속도정보를 추출해 낼 수 있는 새로운 측정기법이다.

유동속 입자(particle)들의 변위정보를 담고 있는 유동화상으로부터 정량적인 속도장을 구하는 데에는 다음과 같은 여러가지 방법들이 있다. PSV<sup>(1)</sup> (Particle Streak Velocimetry)는 카메라의 노출시간을 길게함으로써 형성된 유맥선(streak)을 이용하여 속도를 구하는 방법으로서 매우 간단하지만 입자수 밀도(particle number density)가 높을 경우 유맥선이 서로 겹치는 문제가 발생하며 추출된 속도의 방향결정에 어려움(directional ambiguity)이 있다. PIV<sup>(2,4)</sup> (Particle Image Velocimetry)는 유동화상의 조사구간(interrogating window)내 산란입자 영상들의 계조치(grey level) 분포에 대한 푸리에 변환(Fourier transform)이나 직접적인 상관계수를 계산함으로써 조사구간을 대표하는 평균속도를 구한다. 초기에는 2개 이상의 펄스광(pulsed light)에 의해 산란된 입자영상을 하나의 화상저장매체에 겹쳐 저장하고 미소조사구간내 영상을 Young의 프린지(fringe) 분석이나 자기상관

함수(autocorrelation function)를 이용하여 속도장을 예측하는 자기상관 PIV방식이 주류를 이루었다. 이 방법은 속도벡터 방향결정의 모호성과 낮은 신호대 잡음비(signal to noise ratio)때문에 난류유동의 속도장 예측에는 제한이 따른다. 상호상관(cross-correlation) PIV는 순간입자영상을 개별 화상저장매체에 저장하고 각 조사구간내 계조치 분포사이의 상호상관함수를 FFT 연산을 이용하여 계산한 후 가장 큰 상호상관계수를 갖는 위치를 펄스광 사이의 시간간격  $\Delta T$ 로 나누어 줌으로써 조사구간내 평균속도벡터를 추출한다. 일반적으로 PIV는 입자수 밀도가 매우 큰 경우에 적용되며 조사구간의 평균속도를 추출함으로써 제한된 공간분해능을 지닌다.

PTV<sup>(6,7)</sup> (Particle Tracking Velocimetry)는 연속적으로 획득된 여러장의 화상으로부터 각 입자위치를 추출한 후 그 입자 하나하나를 추적함으로써 입자의 변위를 결정한다. 기존의 입자추적 알고리즘은 보통 연속된 3장 이상의 화상을 요구하며 각 입자의 가능한 변위벡터들 모두를 고려하여 변위의 크기나 각도가 최소 분산을 갖는 입자경로를 유효한 변위로서 간주하게 된다. PTV방식은 PIV기법의 조사구간내 평균속도가 아닌 각 입자위치에서의 진정한 Lagrangian 속도벡터를 제공하며 속도의 방향 모호성이 없는 반면, 각 입자의 화상이 분별 가능할 정도의 낮은 입자수 밀도를 갖는 유동장에 유용하다.

국내의 경우 화상처리기법을 이용한 유동장 해석 연구는 이제 시작단계로, 그 유용성이 알려지기 시작하고 있다. 최근 선진국에서는 화상처리를 이용한 속도장 측정의 정확도와 측정가능한 속도범위를 확대시키기 위한 연구가 활발히 진행중이다. 또한 측정오차가 적고 효율적인 알고리즘의 개발 연구와 더불어 복잡한 난류유동의 예측도 시도되고 있다. 선진국에서도 현재 활발히 연구중인 이와 같은 첨단 실험기법을 자체적으로 개발함으로써 여태까지 해석이 거의 불가능하였던 3차원 난류 유동현상을 정량적으로 해석할 수 있을 것이며, 공학적인 실제 문제의 진단 및 유체역학적 성능해석에도 기여할 수 있을 것이다. 또한 국내 유체역학분야의 수준향상 측면에서도 이 분야의 연구는 절실하며 시급한 실정이다.

본 연구에서는 PIV 방식보다 시스템 하드웨어의 가격이 저렴하고 유동입자의 속도를 정확히 추출할

수 있으며, 2장의 입력영상으로부터 입자추적을 효율적으로 수행할 수 있는 일치확률방식의 2-프레임 PTV 시스템을 개발하였다. 2-프레임 입자추적 알고리즘의 입자경로(particle path) 결정과정은 2장의 연속 디지털 화상에 있는 입자의 가능한 변위벡터를 고려한 후, 각 변위벡터들에 대한 일치확률을 정의하고 이를 반복계산하여 일치확률밀도가 가장 높은 것을 속도벡터로 구하는 확률론적인 입자추적 방법으로 측정 정확도의 향상 가능성이 크며, 측정 가능한 속도범위가 넓고 벡터추출율이 높은 장점을 지니고 있다. 전체적인 화상처리시스템 하드웨어의 구성이외에도, 화상의 전처리(pre-processing) 소프트웨어와 후처리(post-processing) 소프트웨어를 개발하였다. 이렇게 개발된 측정기법을 난류강도가

높고 유동구조가 복잡한 사각블럭 후류유동에 적용시켜 순간 유동장을 구하였으며 LDV 측정결과와 비교검토함으로써 개발된 일치확률 방식의 2-프레임 PTV 시스템의 유용성과 정확성을 확인하였다.

## 2. 2-프레임 PTV 시스템

### 2.1 하드웨어 구성

본 연구에서 구현된 화상처리시스템의 하드웨어는 크게 4W Ar-ion 레이저, 레이저 단면광(light sheet) 생성장치, CCD(charge-coupled device) 카메라, 영상획득 및 처리장치, 제어 및 계산용 컴퓨터등으로 이루어지며, Fig. 1에 개략도를 나타내었다.

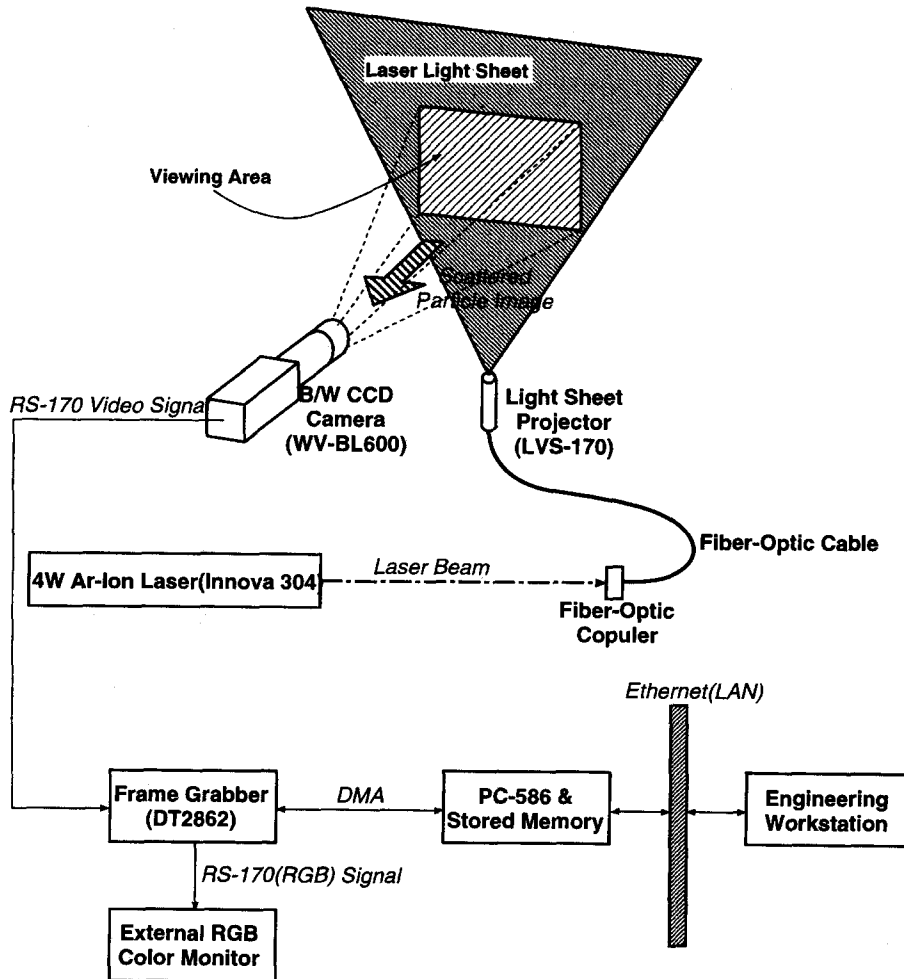


Fig. 1 Schematics of 2-frame PTV System.

먼저 관심있는 유동을 레이저 단면광으로 조명하여 원하는 유동단면을 투영하게 되며, 조명된 유동단면내의 추적 입자들에 의해 산란된 빛이 CCD 카메라에 의해 획득된다. 레이저 단면광 생성장치(LVS-170)는 유지 보수 및 이동이 용이한 광케이블과 원주형 렌즈 헤드로 이루어져 있다. 개발된 2-프레임 PTV 속도계는  $\tau = T_0$ 에 획득된 영상을 홀수 필드(odd field)영상과 짝수 필드(even field)영상으로 분할한 후, 각 필드영상을 보간하여 각각의 완전한 프레임 영상으로 만들어 2-프레임 입자 추적을 행하였다. 영상분할(image splitting)을 사용한 이유는 사용된 CCD 카메라(Panasonic WV-BL 600)가  $682 \times 492$  화소를 갖는 비월전송형(inter-line transfer) CCD이며 1초에 30 프레임(홀수 필드와 짝수 필드로 구성)을 RS-170 흑백 신호방식으로 전송함에 따라, 영상분할을 사용할 경우 시간간격  $\Delta T$ 를  $1/60$ 초로 하여 시간분해능(temporal resolution)을 증가시킬 수 있기 때문이다. CCD 카메라로부터의 입자영상을 디지털화상으로 변환하는 영상 보드(frame grabber : DT2862)는 실시간( $1/30$ 초)으로  $512 \times 512 \times 8$ 비트 화소의 유동화상을 저장할 수 있는 프레임 메모리를 4개 가지고 있다. 따라서 한번에 연속적으로 획득할 수 있는 프레임 영상은 모두 4장이며, 이들을 영상분할을 하게 되면 일정 시간간격( $\Delta T = 1/60$ 초)을 갖는 8장의 연속된 유동화상을 얻을 수 있다. 차후에 이 화상정보는 공학계산용 워크스테이션(DEC AlphaStation 233MHz)을 이용하여 각 디지털 입자영상을 노이즈 제거, 영상 개선(image enhancement), 입자중심좌표(centroid) 추출 및 라벨링(labeling)등의 전처리 과정과 개발된 2-프레임 입자추적 알고리즘을 통한 입자경로 결정과정 및 AGW(adaptive Gaussian window) 보간법, 연립이차(multi-quadratic) 보간법을 이용한 속도보간 등의 후처리 과정을 거치게 된다.

2-프레임 PTV 알고리즘의 근간은 분할된 2장의 연속된 디지털 유동화상내에 있는 입자의 가능한 모든 변위벡터들을 고려한 후, 각 변위들에 대한 일치확률(match probability  $P_{ij}$ )을 정의하고, 불일치확률(no-match probability  $P_i^*$ )과 함께 반복 계산함으로써 일치확률밀도가 가장 높은 것을 변위벡터로 채택하는 방식이다. 각 화상에서의 입자중심이 주어졌을 때 첫번째 화상( $F^1$ )에서의 입자중심을  $x_i$ 라 하고  $\Delta T$  지난 후에 획득된 두번째 화상

( $F^2$ )에서의 입자중심을  $y_j$ 라 한다. 여기서  $i$ 는 첫번째 화상의 입자중심의 번호를 나타내고  $j$ 는 두번째 화상의 매칭(matching)가능한 입자중심들의 번호를 의미한다.  $P_{ij}$ 는 두번째 프레임의 입자( $y_j$ )가 첫번째 프레임의 특정한 한 입자( $x_i$ )와 일치할 확률을 의미하며  $P_i^*$ 은 첫번째 프레임에 있는 목적입자( $x_i$ )가 두번째 프레임내에서 어떠한 일치점이 없을 확률이다. 그러므로 목적입자( $x_i$ )에 대한  $P_{ij}$ 의 합들과  $P_i^*$ 를 합하면 항상 1이 된다. 시간간격  $\Delta T$  동안  $x_i$ 에 대응 가능한 두번째 프레임의 입자는 일정치  $T_m$ (maximum movement threshold) 이상을 넘지 않는다고 가정한다. 이때 움직임의 최대치는 일반적으로 유동내에서의 최대변위에 맞추어 진다. 또한 적분길이척도(integral length scale)의 개념에 의해 일정영역  $T_n$ (neighborhood threshold)내에서 모든 입자들이 고체운동에 가깝게 움직인다고 가정할 수 있다. 즉, 첫번째 프레임의 특정한 한 입자( $x_i$ )를 중심으로 하는 반경  $T_n$ 내의 입자들은 변위차를 나타내는  $T_q$ (quasi-rigidity threshold)가 크지 않다고 가정할 수 있다. Quasi-rigidity threshold  $T_q$ 는 유동의 Taylor 미소길이척도(microscale)와 유사한 개념이다. 이러한 가정을 이용하여 연속적으로 일치확률  $P_{ij}$ 와  $P_i^*$ 를 계산한 후 가장 큰 확률을 가지는 변위벡터를 구한 뒤 이를 두 화상 사이의 시간간격  $\Delta T$ 로 나누어줌으로써 속도벡터를 구하게 된다. 화상내 입자수,  $T_m$ ,  $T_n$ ,  $T_q$  등의 여러 인자들이 개발된 2-프레임 PTV 알고리즘의 추적성능에 미치는 영향과 기존의 4-프레임 PTV와의 비교 검증 결과는 Baek & Lee<sup>(8,9)</sup>에 잘 나타나 있다.

또한 추출된 속도벡터의 신빙성을 더하기 위하여 본 연구에서는 영상분할된 2장의 유동화상( $F^1$ 과  $F^2$ )에 대해 기존의 추적알고리즘을 적용하여 첫번째 유동화상  $F^1$ 에서 두번째 유동화상  $F^2$ 로의 입자 추적을 행한 후(forward tracking),  $F^2$ 에서  $F^1$ 으로의 입자추적을 역으로 행하여(backward tracking) 공통된 속도벡터만을 유효벡터로 간주하였다.

## 2.2 전처리 과정

본 연구에서는  $512 \times 480$  화소의 영상(Fig. 2)을 각각  $512 \times 240$  화소의 홀수 필드와 짝수 필드로 분리하여 실질적인  $\Delta T$ 를  $1/60$ 초로 줄임으로써 측정 가능한 속도범위를 증가시켰다. 시간분해능의 증가에 따른 공간분해능의 감소를 보완코자 각각의 필



Fig. 2 Typical image frame captured using CCD camera: electric shutter speed=1/500sec.

드에 대해 보간을 취해준 후, 다시  $512 \times 480$  화소의 영상 프레임으로 재구성한다. CCD 카메라 센서 자체의 암전류(dark current) 노이즈와 입자산란광의 불균일성에 의해서 입자화상은 많은 노이즈를 내포하고 있기 때문에 Gaussian kernel을 이용한 저대역 필터링(low-pass filtering)과 히스토그램 등가화(histogram equalization) 과정을 거쳐서 고주파 성분의 노이즈성분을 제거한다. Fig. 3은 노출시간 1/500초로 CCD 카메라에 의해 획득된 입자화상(Fig. 2)을 홀수 필드와 짝수 필드로 나눈 후 저대역 필터링한 결과를 보여주고 있다. 여기서 두 화상사이의 시간간격  $\Delta T$ 는 1/60초이다.

PTV방식은 입자의 중심(centroid)을 추적하여 속도벡터를 추출하므로 정확한 입자중심의 산출은 매우 중요하다. 본 연구에서는 한계값(threshold)에 근거한 전역 입자도심 판정법(global particle identification)<sup>(10)</sup>을 사용하여 입자중심좌표를 추출하고 분류(segmentation)하였다. Canny operator 방법은 제조치의 1차 미분을 이용하기 때문에 약간의 노이즈에도 매우 민감한 반응을 보여 본 연구에는 적합하지 않았다. 전역 입자도심 판정법에 의해 입자중심좌표를 추출할 때, 입자의 면적과 형상에 제한을 두어 보다 정확하게 입자중심좌표를 산출하도록 하였다. Fig. 4는 Fig. 3의 영상에 대해서 전역 입자도심 판정법을 적용한 결과이며, 이 때 한계값은 130이며, 입자 면적 제한값은 5화소이다. 이렇게 각 화상에 대해서 구해진 입자중심 위치는 개발된 2-프레임 PTV 알고리즘의 입력값으로 사



(a) Odd field



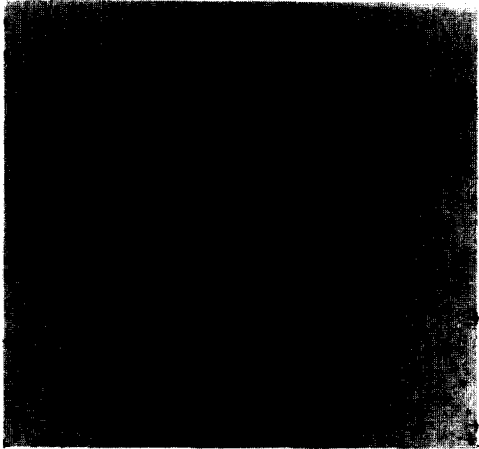
(b) Even field

Fig. 3 Split and low-pass filtered image fields:  $\Delta T$  between (a) and (b) is 1/60sec.

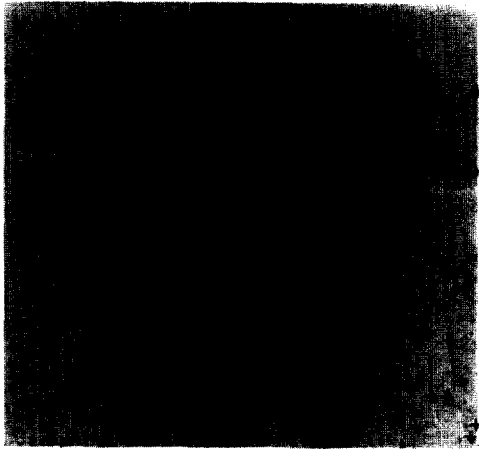
용되어 이들로부터 최종적으로 속도벡터를 구하게 된다.

### 2.3 후처리 과정

PIV, 혹은 PTV 방식의 화상처리기법에 의해 추출된 속도벡터들 중에는 유동의 3차원성 및 난류 변동에 기인하여 시간간격  $\Delta T$  사이에 영상내부로 새로운 입자가 들어오거나 기존 입자가 나감으로써 약간의 에러벡터가 존재할 수 있다. 2차원 레이저 단면광을 일반적인 3차원 유동에 조사할 때, 자유도의 감소로 인한 입자 변위정보의 손실 및 단면광의 폭, 길이방향의 단면광 강도분포 불균일성에 의한 입자의 산란을 변화등이 에러벡터들의 주된 원



(a) Particle centroids of the odd field



(b) Particle centroids of the even field

**Fig. 4** Extraction of particle centroids using the global particle identification method.

인이다. 또한 산란광을 전기적 신호로 바꾸어주는 CCD 카메라 자체의 암전류 노이즈와 출력신호인 비디오신호에 외부 노이즈가 섞여 영상의 S/N비가 나빠지게 되며 프레임그래버로 영상을 획득할 때 발생하는 이산화 오차(quantification error) 등으로 최종 입자영상의 질이 저하된다.

추적입자의 신규등장이나 사라짐으로 인해 발생하는 에러벡터들을 검출하기 위한 가장 단순한 방법은 목적점에서의 속도벡터와 주변의 속도벡터사이의 차이에 대한 표준편차  $\sigma$ 를 고려하는 것이다. 즉, 목적점  $x_i$ 에 대한 속도벡터  $(u_i, v_i)$ 는 다음의 조건에 해당될 때 에러벡터로 간주하여 제거하였다.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2} > cV \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{k} \sum_j^k \sqrt{u_j^2 + v_j^2} \quad (2)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_j^k (u_i - u_j)^2}, \quad \sigma_v = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_j^k (v_i - v_j)^2} \quad (3)$$

여기서  $\sigma_u, \sigma_v$ 는 목적점에서의 속도벡터와 주변 속도벡터들 사이의 속도 표준편차를 나타낸다. 그리고  $V$ 는 목적점 주변에 있는 모든 속도벡터들의 평균크기이며  $c$ 는 1보다 작은 상수이다. 위 식을 이용하여 에러벡터를 검출하게 되면 유동내 속도구배가 클 경우, 올바른 속도벡터도 에러벡터로 잘못 인식할 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 위와 같은 단점을 해결할 수 있는 미디언(median) 필터링 개념을 이용하여 에러벡터를 검출하였다. 미디언 필터링은 화상처리분야에서 영상내의 랜덤 노이즈를 제거하는데 매우 유용한 기법으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$|u_i - u_M| > cV_u \quad \text{또는} \quad |v_i - v_M| > cV_v \quad (4)$$

여기서  $u_M(v_M)$ 은 목적점 주변의 속도벡터들에 대한  $u(v)$  방향 중간값(median)을 나타내며,  $V_u(V_v)$ 는 목적점 주위 속도벡터들의  $u(v)$  방향 속도성분의 최대차이를 나타낸다.

본 연구에서 개발된 2-프레임 PTV 시스템은 난류 통계량을 정확히 측정할 수 있도록 많은 유동화상을 요구하며 추출된 속도장의 수도 매우 많게 된다. 그리고 PTV 시스템의 실제 적용에서 산출된 속도장 결과는 미디언 필터링을 이용한 에러벡터 처리과정을 거치더라도 약간의 에러벡터를 포함하고 있다. 이와 같은 에러벡터들을 사용자가 직접 데이터 화일을 검사하여 찾는 것은 매우 지루하고 까다로운 작업과정이다. 따라서 추출된 속도장결과를 후처리과정에서 분석하거나 검출해내지 못한 에러벡터를 수작업에 의해 처리하기 위해서는 사용하기 편리한 도구(tool)가 필요하다. 본 연구에서 개발된 GUI(Graphic User Interface)는 사용자가 컴퓨터의 마우스를 이용하여 잘못된 속도벡터를 검출함으로써 용이하게 에러벡터를 제거할 수 있도록 하였다.

2-프레임 PTV 알고리즘에 의해 구해진 속도벡터  $(u_i, v_i)$ 는 임의의 입자위치  $(x_i, y_i)$ 에서의 값이기 때문에 일정 간격의 균일 사각격자에 대해 속도벡터를 보간해 줄 필요가 있다. 이와 같은 속도보간

에는 adaptive Gaussian window (AGW) 필터를 이용하는 방법<sup>(11)</sup>과 연립이차 보간법(multi-quadratic interpolation)<sup>(12)</sup>을 사용할 수 있다.

AGW 방법은 컴퓨터 구현이 쉽고 계산이 간단하기 때문에 많이 사용되고 있으나 PTV 방식과 같이 추출된 속도벡터가 계속 변화할 경우 보간격자사이의 간격도 변하기 때문에 본 연구에서는 그리 적합하지 않았다. 본 연구에서 적용한 연립이차 보간법은 입자중심  $x_k$ 의 속도( $u_k, v_k$ )가  $N_0$ 개 있을 때, 다음과 같은  $N_0$ 개의 연립방정식을 풀어서 계수  $\alpha_k, \beta_k$ 를 먼저 구한다.

$$u_i(x_i, y_i) = \sum_{k=1}^{N_0} \alpha_k \sqrt{1 + (x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2} \quad (5)$$

$$v_i(x_i, y_i) = \sum_{k=1}^{N_0} \beta_k \sqrt{1 + (x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2} \quad (6)$$

이렇게 구해진 계수  $\alpha_k, \beta_k$ 를 이용하여 다음과 같이 임의의 위치  $(x, y)$ 에서의 속도벡터  $(u, v)$ 를 구하게 된다.

$$u(x, y) = \sum_{k=1}^{N_0} \alpha_k \sqrt{1 + (x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \quad (7)$$

$$v(x, y) = \sum_{k=1}^{N_0} \beta_k \sqrt{1 + (x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \quad (8)$$

### 3. 채널유동에의 응용

#### 3.1 실험장치 및 실험방법

먼저 2-프레임 PTV, 4-프레임 PTV와 FFT에 기초한 상호상관 PIV 기법들 사이의 직접적인 비교를 위해서 소형회류수조에 설치된 수직벽 후류유동의 속도장을 측정하였다. 소형회류수조의 시험부는 길이 1400 mm, 너비 300 mm, 깊이 200 mm의 사각형태이다. 너비 300 mm, 높이 25 mm인 수직벽을 두께 20 mm의 아크릴판에 설치한 후, 이를 회류수조 시험부 바닥에 고정시켜 박리유동장을 생성하였으며 Fig. 5에 그 개략도를 나타내었다. 수직벽의 위치는 회류수조 수축부 하류 500 mm이며, 좌표축  $x$ 는 유동방향,  $y$ 축은 회류수조의 깊이방향,  $z$ 축은 너비방향을 나타낸다. 본 실험에 사용된 수직벽의 형상비(두께/높이)는 0.12이고 종횡비(너비/높이)는 12.0이다.

이와 함께 본 연구에서 측정한 PTV 결과의 정확성을 검토하기 위해서는 비접촉식 유속측정장치인 1-D LDV 시스템으로 같은 실험조건에서 속도 분포를 측정하여 비교할 필요가 있다. 그러나 수직

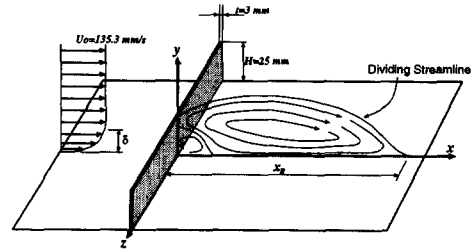


Fig. 5 A vertical fence model and coordinate system.

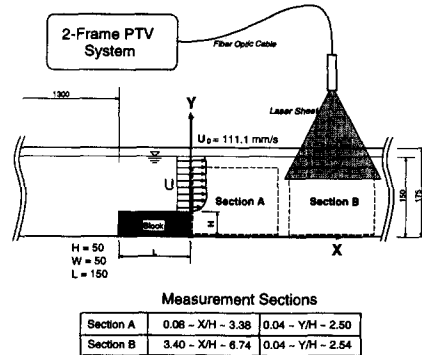


Fig. 6 Measurement set-up for open channel flow (unit: mm).

벽 후류유동의 경우 시험부의 폭이 넓어 초점거리  $f=100\text{mm}$ 인 LDV 시스템 적용에 적합하지 않아 개방형 채널(open channel) 바닥면에 놓인 사각블럭 주위유동(Fig. 6)에 적용하였다. 블럭 후류유동은 유동박리에 의한 전단층(shear layer) 성장등으로 난류강도가 높고 복잡한 유동형태를 가지고 있다. 블럭 주위유동에 사용된 개방형 채널은 순환루프(loop)형으로 되어 있으며 채널 시험부의 길이는 2500 mm, 높이와 폭은 각각 175 mm, 50 mm이다. 채널의 입구로부터 1300 mm 지점에 높이( $H$ ) 50 mm, 길이( $L$ ) 150 mm, 폭( $W$ ) 50 mm의 사각블럭을 설치하고 블럭 뒤쪽의 후류 속도를 측정하였다. 1-D LDV 시스템은 파장 632.8 nm의 He-Ne 레이저, 각종 광학장치, 브래그 셀(Bragg cell)을 이용한 주파수 편이기(frequency shifter), 계수기(counter) 방식의 신호처리기로 구성된다. 주파수 편이기는 높은 난류강도나 역방향 속도성분이 존재하는 유동에서 속도벡터의 방향성을 추출하기 위하여 사용되어진다. LDV 측정시, 데이터 획득률을 증가시키기 위하여 작동유체인 물속에 산란성, 유동추종성이 우수한 알미늄 파우더를 첨가하였으며 시스템의 이동이 용이한 후방산란방식을 채

택하였다. 각 측정점에서 4096개의 데이터를 획득한 후 이들을 통계처리하여 평균 속도와 난류강도를 구하였다. 실험시, 유량은 50lpm으로 고정하였는데, 단면적(채널내 물의 높이×채널 너비)으로 나누어준 평균유속( $U_0$ )은 111.1 mm/s이고 블록 높이  $H$ 에 기준한 레이놀즈 수는 약 5530이었다.

Fig. 6에 표시한 2개의 측정단면에서 2-프레임 PTV 시스템을 이용하여 속도장을 측정하였는데, 각 단면의 크기는 약 120×150 mm이며 단면 A는 블록 바로 뒤 그리고 단면 B는 재부착 유동이 발생하는 하류영역에 해당된다. 사용된 산란입자는 평균직경 150 $\mu$ m인 폴리스티렌(polystyrene)이며 비중은 약 1.02정도이다. 2차원 레이저 단면광은 광케이블에 연결된 원주형 렌즈 헤드에 의해 채널 유동의 자유표면 윗쪽에서 조사되며 그와 수직되는 방향인 전면에서 CCD 카메라로 입자영상을 획득하였다.

Fig. 7은 본 연구에서 적용한 2-프레임 PTV 시스템의 전체적인 처리과정을 나타낸 것이다. 입자영상을 측정하기 전에 주어진 실험조건에서 카메라의 렌즈를 조정하고 모눈종이로 만들어진 보정시트(calibration sheet)영상을 획득한다. 이 보정영상은 차후의 PTV 알고리즘 처리과정에서 산출되는 화소좌표를 물리적 좌표로 변환시키는데 이용된다. 각 측정 단면에서 512×480 화소, 256 계조(grey level)의 영상을 실시간 간격(1/30초)으로 4장 연속 획득하였으며 이러한 영상획득과정을 24번

반복하였다. 개별 영상은 짝수 필드와 홀수 필드로 분리된 후 보간 및 저대역(low-pass) 필터링을 통한 노이즈 제거, 전역 입자도심 판정법에 의한 입자의 중심좌표 추출등의 전처리과정을 거친다. 주 처리과정인 2-프레임 입자추적 알고리즘에 의해 산출된 속도벡터를 연립이차 보간방법을 이용하여 일정간격의 사각격자상에 보간한다. 96장의 유동영상

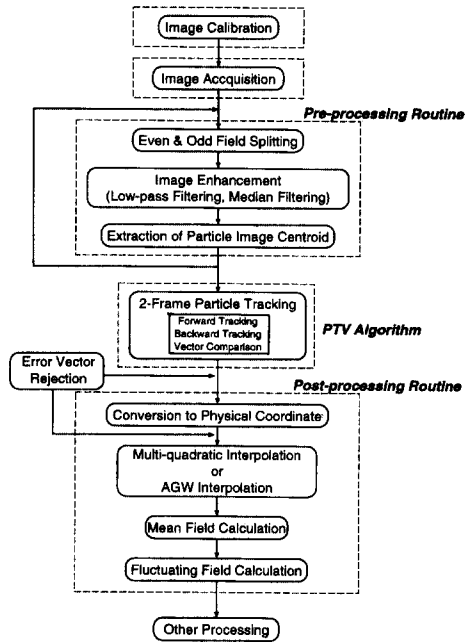
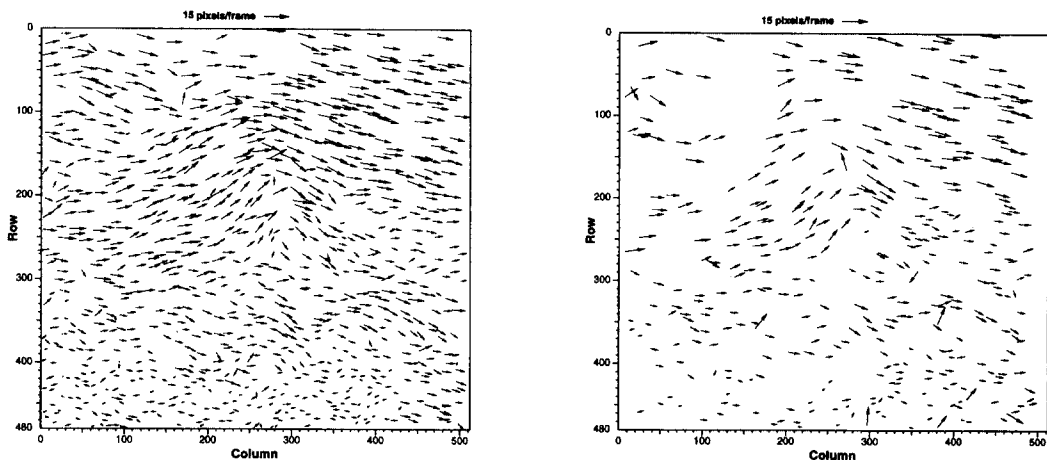


Fig. 7 Overall flowchart of the 2-frame PTV system.



(a) Two-frame PTV;  $N_0=918$ , computation time=3.7sec on DEC AlphaStation 233MHz

(b) Four-frame PTV;  $N_0=381$ , computation time=7.6sec on DEC AlphaStation 233MHz

Fig. 8 Recovered velocity vectors behind the reattachment point of vertical fence flow.



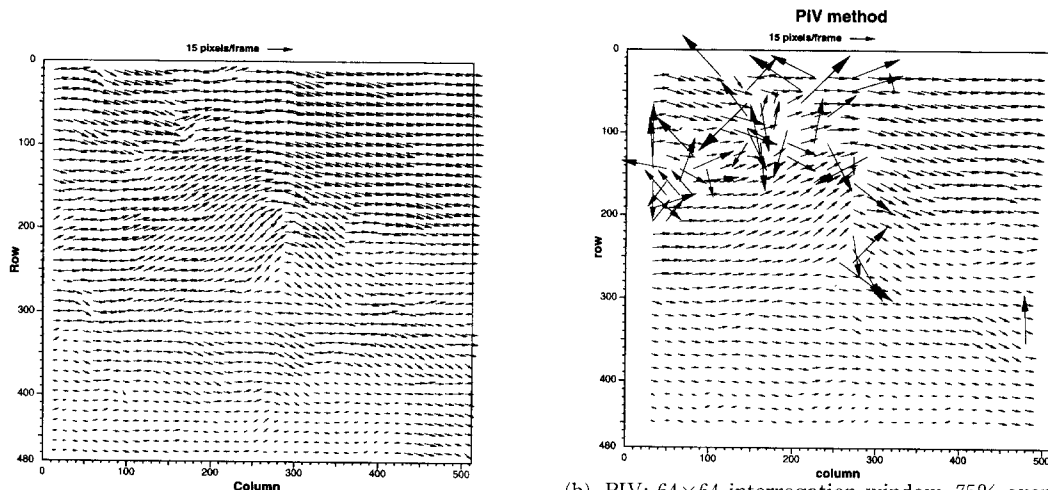
을 처리하여 순간속도장을 구한 후 이들을 앙상블(ensemble) 평균하여 각 격자점에서의 평균 속도장을 계산하고, 그로부터 변동속도장과 난류강도 분포등을 함께 계산하였다.

### 3.2 실험결과 및 토의

개발된 2-프레임 PTV 시스템의 성능을 기존의 4-프레임 PTV, FFT를 이용한 상호상관 PIV기법과 비교하기 위하여 Fig. 3과 같은 동일 유동화상에 대해서 각각의 속도장 측정기법들을 적용하였다. 유동영상은 소형회류수조에 놓인 수직벽(Fig. 5) 후방의 난류유동장<sup>(13)</sup>에서 박리전단층이 재부착된 이후의 유동단면에서 획득하였으며, 이곳의 유동은 재순환영역에 비해 속도구배가 그리 크지 않았다. Fig. 8는 본 연구에서 개발된 2-프레임 PTV와 4-프레임 PTV를 이용하여 구한 순간 속도장 결과를 비교한 것이다. Fig. 8(a), (b) 모두 에러벡터 검출과정을 행하지 않은 순간속도장 추출결과로 약간의 에러벡터들을 함유하고 있다. 이들 두가지 속도장 측정결과를 비교하여 보면 2-프레임 PTV의 경우 918개의 속도벡터를 3.7초에 회복하였다. 반면에 기존의 4-프레임 PTV방법은 같은 유동영상으로부터 약 40%인 381개의 속도벡터밖에 회복하지 못하였는데도 계산시간은 2배 이상인 7.6초나 걸렸으며, 에러벡터의 숫자도 많았다. 또 다른 중요한 사항은 속도구배가 크고, 속도변동 성분이 강한 윗부분에서 2-프레임 PTV가 4-프레임

PTV에 비해 월등한 성능을 보여주고 있다는 것이다. 따라서 기존의 컴퓨터모사실험<sup>(9)</sup>에서 나타난 2-프레임 PTV의 높은 속도벡터 회복비 및 짧은 계산시간등의 장점은 화상내 입자의 유입, 유출이 많은 실제 유동화상에 대해서도 동일하게 적용될 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 8(a)의 결과를 보간법을 적용하여 균일 격자에 보간한 속도장과 동일 유동화상으로부터 FFT 기반의 상호상관(cross-correlation) PIV 방법으로 구한 속도장 결과를 비교한 것이다. FFT 기반의 상호상관 PIV방법은 현재 상용 패키지(TSI, Dantec)들에서 일반적으로 사용되고 있는 기법으로서 본 연구에서는 조사구간의 크기를  $64 \times 64$ 화소로 하였고 16화소씩 이동하며(75% overlapping) 각 조사구간내 평균 속도를 상호상관법으로 추출하였다. 여기서 보면 조사구간내 입자영상의 변위들이 균일하지 않은, 즉 난류강도가 큰 윗부분에서 PIV 기법이 아주 많은 에러벡터들을 생성함을 알 수 있다. 물론 산란입자의 입자수 밀도를 아주 높게 하고 미소조사구간의 크기를 보다 작게 하면 이와 같은 에러벡터들을 감소시킬 수 있을 것이다. 그러나 유동의 Taylor 미소길이척도를 몇 개의 조사구간으로 하여 공간분해능을 증가시키다 보면 측정구간(field of view)이 너무 작아져 전체적인 유동정보를 얻고자 하는 속도장 측정의 본래 취지를 벗어나게 된다. 이와 같은 문제점은 유동화상



(a) Two-frame PTV; interpolated velocity vectors from Fig. 8(a)

(b) PIV;  $64 \times 64$  interrogation window, 75% overlapping; computation time=170sec on DEC AlphaStation 233MHz

Fig. 9 Interpolated velocity vector field behind the reattachment point of vertical fence flow.

을 고해상도(최소 2K×2K 화소)로 획득함으로써 해결할 수 있을 것이다. 또한, 공간분해능을 어느 정도 향상시키기 위하여 각 조사구간을 75% 중첩시키고, 계산시간이 많이 소요되는 FFT 과정을 3번 수행하여 평균속도를 추출하기 때문에 전체 속도장을 회복하는데 걸리는 전체 계산시간이 170초로 일치확률 개념의 2-프레임 PTV 기법에 비해 40배 이상 많이 걸렸다. FFT에 기초하지 않고 직접 상호관계수를 구하는 방식의 경우는 S/N비값이 우수하므로 FFT 기반의 PIV방식에 비해 에러가 적게 발생할 것이나 계산시간이 보다 증가할 것으로 예상되어진다.

이상의 비교연구를 통해 성능의 우수성이 입증된 2-프레임 PTV 시스템을 이번에는 그 유용성을 검증하기 위하여 유동형태가 복잡한 사각블럭 주위유동에 적용하였다. 사각블럭 후류유동은 넓은 영역의 평균속도와 난류강도 분포를 가지며 비교적 안정된 반리 재순환유동(separated recirculating flow) 영역을 형성하고 있다.

Fig. 10은 상류지점인  $X/H = -13, -8, -6$  위

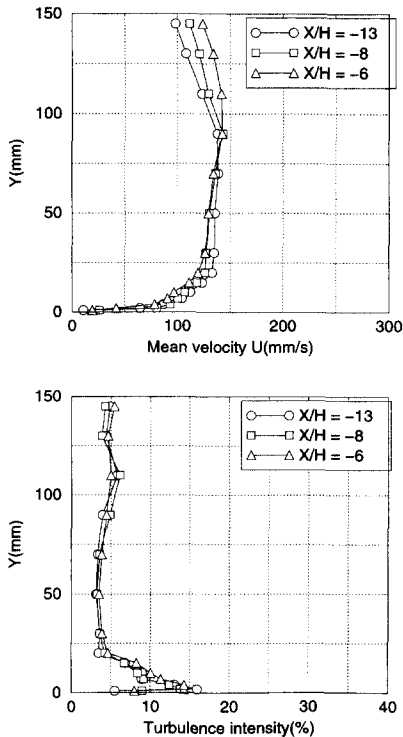
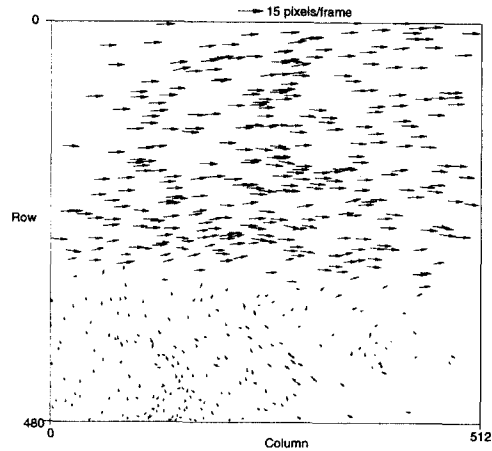


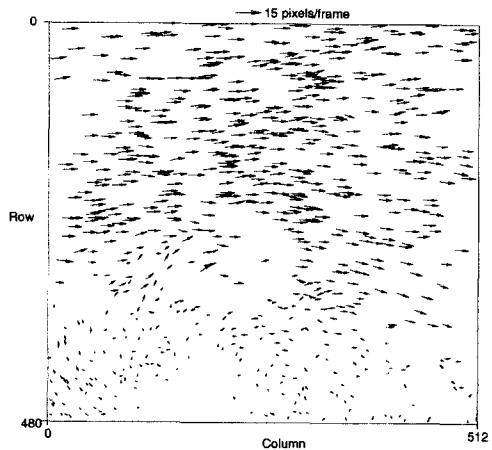
Fig. 10 Inlet flow conditions of streamwise mean velocity and turbulent intensity.

치 단면에서 LDV 측정에 의해 구한 주유동 방향 평균속도와 난류강도 분포를 나타낸다. 여기서 보면 블럭 상류위치에서는 일반적인 개방형 채널 유동의 형태를 갖는다. 즉, 중간부분에서 빠른 평균속도 분포를 보이며 난류강도는 벽근처를 제외하고 5% 미만의 값을 갖는다.

Fig. 11(a), (b)는 각각 단면 A, B에서 획득된 유동영상에 대해서 2-프레임 PTV 알고리즘을 적용하여 구한 순간 속도장을 나타낸 것이다. 이것은 순간 속도벡터들을 행(row), 열(column)의 화소 좌표로 표시한 것으로 아직 물리적 좌표로 변환되지 않은 결과이다. 보정(calibration) 영상을 이용하여 이들을 물리적 좌표로 변환시킨 후 사각격자



(a) Vector field at section A



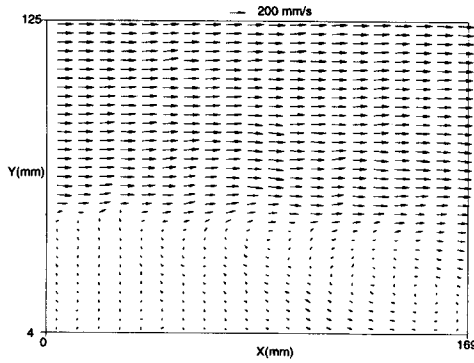
(b) Vector field at section B

Fig. 11 Recovered velocity vectors behind the rectangular block.

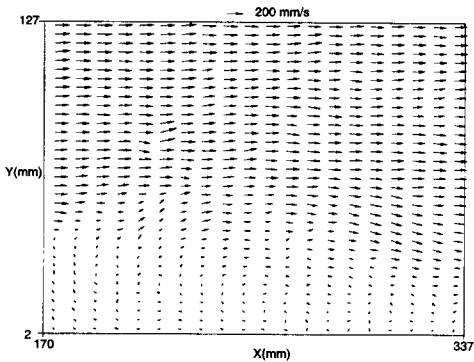
상(20×35)에 보간한 속도장을 Fig. 12(a), (b)에 나타내었다. Fig. 12(a), (b) 모두 전단(shear)에 의한 혼합층(mixing layer)의 성장을 뚜렷하게 보여주고 있다.

Fig. 13은 단면 A, B에서 획득한 96장의 유동영

상으로부터 구한 순간 속도장들을 평균하여 얻은 평균 속도장을 나타낸 것이다. 자유흐름(free stream)은 블럭을 지나면서 박리되기 때문에 블럭 직후인 A 단면에서 전단층이 점차 발달하게 된다. 단면 A구간에선 높은 난류강도와 비교적 넓은 영역에서 역방향 속도성분을 가지는 재순환 영역이 형성되며, 전단층 위부분의 비점성 영역으로부터 모멘텀(momentum)이 전단층 내부로 유입되어 지속적으로 전단층이 발달하고 있다. 단면 B구간에선 발달된 전단층이 채널의 바닥부분까지 확대되어 전체적으로 많은 혼합을 야기시킴으로써 재순환 영역이 끝나고 박리전단층이 재부착하게 된다. 시간 평균화된 재부착 지점은 Fig. 13로부터 알 수 있듯이 약  $X/H=6.3$  위치이다. 그러나 순간 유동장을 관찰한 결과, 재부착 지점은  $X/H=6.3$ 을 중심으로 앞뒤로 불규칙하게 움직이며, 박리 버블(separation bubble)의 크기도 함께 변화함을 알 수 있었다.



(a) Instantaneous vector field at section A



(b) Instantaneous vector field at section B

Fig. 12 Velocity vector field using a multi-quadratic interpolation scheme.

1/30초 간격으로 구한 순간속도장으로부터 앞에서 구한 평균속도장을 빼게 되면 변동속도장을 구할 수 있다. Fig. 14는 각각 단면 B에서 구한 변동속도장을 나타낸 것으로서, 전단층을 따라 발달(evolution)하는 유동구조를 1/30초 간격으로 보여주고 있다. 이와 같은 변동속도장 결과로부터 블럭에서 박리된 전단층이 하류로 나아감에 따라 점차적으로 발달하며, 재순환 영역과 외부 유동사이의 모멘텀 상호 교류과정을 알 수 있다. 특히 재부착 지점 부근에서는 간헐적으로 순간유동이 바뀌기 때문에 에디(eddy) 거동이 복잡하게 나타나며 많은 난류혼합이 진행되고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 개발된 화상처리를 이용한 PTV 속도장 측정기법의 유용성과 신뢰성을 확인하기 위하

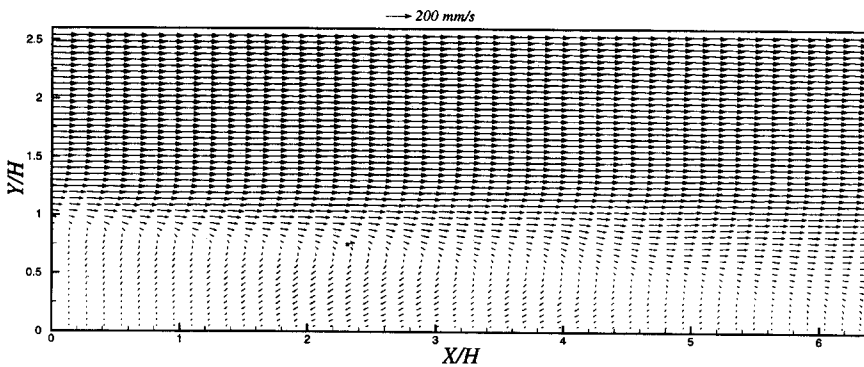


Fig. 13 Mean velocity vector field.

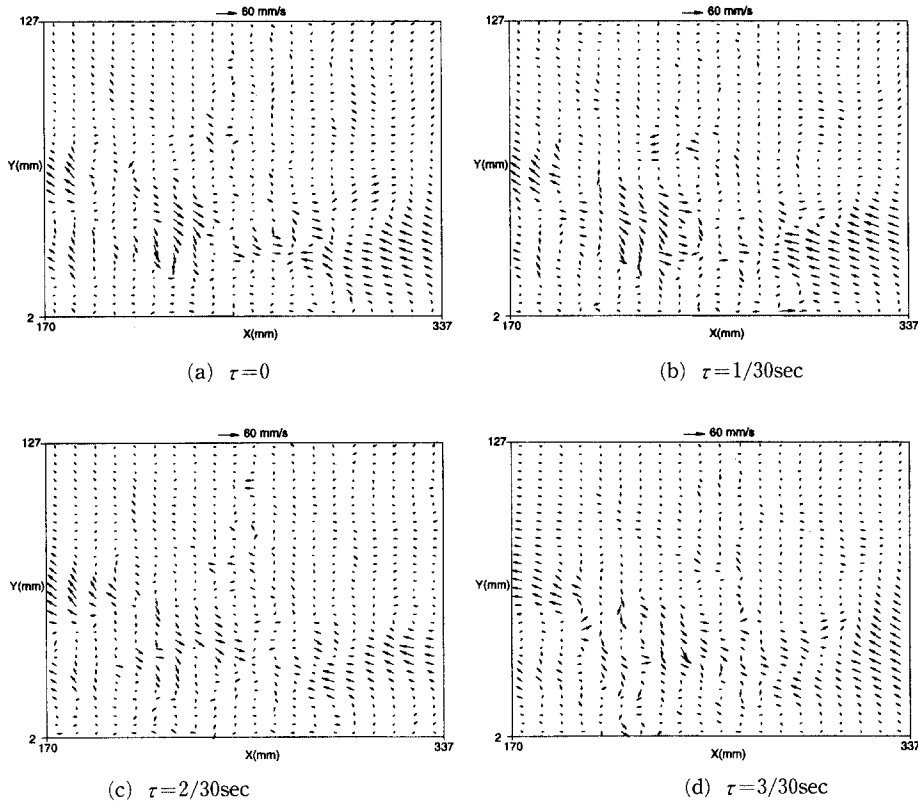


Fig. 14 Temporal evolution of fluctuating velocity vector field at section B

여 같은 실험조건에서 LDV 시스템을 사용하여 평균속도와 난류강도를 측정하였다. 2-프레임 PTV 시스템으로 측정한 96개의 순간속도장을 통계처리함으로써 평균속도장과 난류강도 분포를 구하였으며, 이것을 LDV로 구한 결과들과 비교하였다.

단면 A의  $X/H=0.5, 1, 2, 3$  위치에서 평균속도와 난류강도 분포를 비교하여 Fig. 15에 나타내었다. 여기서 난류강도 분포를 보면 블럭의 높이 50mm 근처에서 높은 값을 가져 이 부근에서 난류혼합이 활발하고 하류로 나아감에 따라 전단층이 발달하고 있음을 알 수 있다. 재순환 영역에 해당하는 이 구간에서 평균속도 분포는 LDV 결과와 매우 잘 일치하며, 난류강도 분포 또한 LDV 측정 결과에 크게 벗어나지 않음을 알 수 있다. 그러나 추출된 속도벡터의 수가 적은 벽면 가까이와 속도구배가 크고 난류강도가 높은 전단층 영역에서 두가지 난류강도 결과는 약간의 차이를 보여주고 있다. PTV 기법이나 LDV 측정 모두 에러를 유발시키는 입자들을 갖고 있지만, PTV 관점에서 불

때 이것은 유한한 크기의 산란입자가 높은 주파수의 난류떨림을 잘 추종하느냐와 난류통계치의 앙상블 평균에 사용된 96개의 순간속도장이 충분하느냐의 여부에 기인한다고 생각되어진다. Kasagi & Matsunaga<sup>(14)</sup>는 사각덕트내에 놓인 후향단 유동에 대해서 다중 프레임 방식의 3-D PTV를 적용하여 3차원 속도장을 구하였는데, 각 측정구간에서 400여장의 순간 속도장을 앙상블평균하여 난류통계치를 구함으로써 DNS 결과와 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 앙상블평균에 사용된 속도장의 수가 증가할수록 난류통계치의 정확도는 증가하지만 계산시간 및 메모리용량의 제한등이 따른다. 향후 이 부분에 대한 보다 체계적이고 자세한 연구가 요구되어진다.

## 결론

본 연구에서는 2장의 연속적인 순간 화상으로부터 각 화상내 입자중심사이의 일치확률을 이용하여

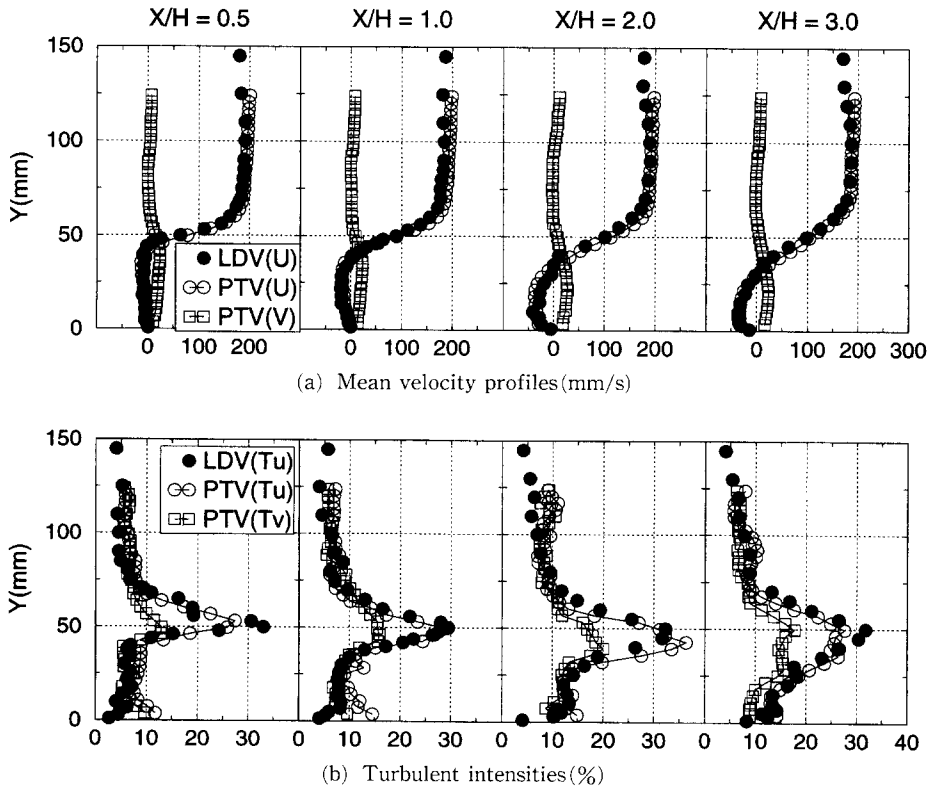


Fig. 15 Comparison of mean velocity and turbulent intensity profiles at section A;  $T_u \equiv \sqrt{u'^2}/U_0$ ,  $T_v \equiv \sqrt{v'^2}/U_0$ .

확률론적인 입자추적을 행함으로써 입자의 유동속도를 추출하는 2-프레임 PTV 시스템을 개발하였다. 전체 시스템의 검증을 위하여 난류강도가 높고 유동형태가 복잡한 사각블럭 후방의 난류유동에 적용하여 순간속도장을 구하였다. 수직벽 후류 유동장의 재발달 영역에 적용한 결과, 개발된 PTV 시스템은 속도벡터 회복비가 높고 에러벡터비가 낮으며, 짧은 계산시간등의 장점을 제공하여 기존의 4-프레임 PTV나 FFT 기반의 상호상관 PIV에 비해 속도벡터 추출성능이 우수함을 알 수 있었다. 또한 96장의 순간속도장 결과를 앙상블 평균하여 구한 평균속도장과 난류통계치를 LDV 측정 결과와 비교 검증한 결과, 평균속도 분포는 LDV 결과와 매우 잘 일치하며, 난류강도 분포 또한 바닥면 근처를 제외한 영역에서 LDV 측정결과에 크게 벗어나지 않음으로써 개발된 화상처리 시스템의 유용성과 정확성을 확인하였다. 향후 본 연구에서 개발된 일치확률개념을 이용한 2-프레임 PTV 시스템을 3-D PTV 시스템으로 확장하고, 공간분해능과

측정 가능한 속도범위(dynamic range)를 크게 향상시키는 연구가 필요하다.

### 참고문헌

- (1) Kobayashi, T., Ishihara, T. and Sasaki, N., 1983, "Automatic Analysis of Photographs of Trace Particles by Microcomputer System," *Flow Visualization* 3, pp. 231~235.
- (2) Keane, R. D. and Adrian, R. J., 1991, "Cross-Correlation Analysis of Particle Image Fields for Velocity Measurement," *ASME FED-Vol. 128*, pp. 1~8.
- (3) Willert, C. E. and Gharib, M., 1991, "Digital Particle Image Velocimetry," *Exp. in Fluids*, Vol. 10, pp. 181~193.
- (4) Büchhave, P., 1992, "Particle Image Velocimetry-Status and Trends," *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, Vol. 5, pp. 586~604.

- (5) Kasagi, N. and Nishino, K., 1991, "Probing Turbulence with Three-Dimensional Particle-Tracking Velocimetry," *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, Vol. 4, pp. 601~612.
- (6) Kobayashi, T., Saga, T., Haeno, T. and Tsuda, N., 1991, "Development of a Real-Time Velocity Measurement System for High Reynolds Fluid Flow Using a Digital Image Processing Design," *ASME FED-Vol. 128*, pp. 1220~1227.
- (7) Hassan, Y. A., Canaan, R. E., Blanchat, T. K. and Seeley, C. H., 1991, "Simultaneous Velocity Measurements of Both Components of a Two Phase Flow Using Particle Image Velocimetry," *ASME FED-Vol. 128*, pp. 85~99.
- (8) 백승조, 이상준, 1995, "일치확률방식의 2-프레임 PTV 알고리즘 개발," 대한 기계학회 논문집, 제19권, 제17호, pp. 1741~1748.
- (9) Baek, S. J. and Lee, S. J., 1996, "A New Two-Frame Particle Tracking Algorithm Using Match Probability," *Exp. in Fluids*, Vol. 22, pp. 23~32.
- (10) Chang, T. P. K., Watson, A. T. and Tatterson, G. B., 1985, "Image Processing of Tracer Particle Motions as Applied to Mixing and Turbulent Flow-I. The Technique," *Chemical Engineering Science*, Vol. 40, No. 2, pp. 269~275.
- (11) Agüi, J. C. and Jiménez, J., 1987, "On the Performance of Particle Tracking," *J. Fluid Mech.*, Vol. 185, pp. 447~468.
- (12) Blanchat, T. K., 1991, "Development of Pulsed Laser Velocimetry Techniques for Measurement of Two-Phase Interface Drag in a Horizontal Stratified Flow," *Ph. D Thesis*, Texas & University, Texas.
- (13) Baek, S. J., 1997, "Development of Two-Frame Particle Tracking Velocimetry System and Its Applications to Turbulent Separated Flows," *Ph. D Thesis*, POSTECH.
- (14) Kasagi, N. and Matsunaga, A., 1995, "Three-Dimensional Particle-Tracking Velocimetry Measurement of Turbulence Statistics and Energy Budget in a Backward-Facing Step Flow," *Int. J. Heat & Fluid Flow*, Vol. 16, pp. 477~485.