

# 적용형 하이브리드 기법을 이용한 2-Frame PTV 기법의 성능향상 연구

김 형 범\* · 이 상 준\*\*  
(1999년 8월 23일 접수)

## Performance Improvement of 2-Frame PTV Method Using an Adaptive Hybrid Scheme

Hyoung-Bum Kim and Sang-Joon Lee

**Key Words :** 2-Frame PTV(2-프레임 입자추적속도기법), Adaptive Hybrid Scheme(적용형 하이브리드 스킴), FFT-Based PIV(FFT를 이용한 입자영상속도기법), Hybrid PIV(하이브리드 입자영상속도기법)

### Abstract

The performance of 2-frame PTV(particle tracking velocimetry) system was improved using an adaptive hybrid scheme. The original 2-frame PTV method based on the match probability concept employs global match parameters for the entire flow field. Since this does not reflect fully the detailed local velocity change, it sometimes reduces the recovery rate of velocity vectors and increases the number of erroneous vectors in the region where an extraordinary flow structure exists. In this study, the preliminary FFT-based PIV results are used as an input parameter to determine the local match parameters needed for the 2-frame particle tracking algorithm. A computer simulation using synthetic particle images was carried out to study the performance of the adaptive 2-frame PTV technique. The adaptive hybrid method shows the better performance with increasing the velocity vector recovery rate and decreasing the computation time, compared to the original 2-frame PTV method.

### 기호설명

- I : 유동영상내 회색 계조치
- $T_i$  : PIV 기법에서의 픽셀 이동값
- $T_a$  : 입자의 평균이동값
- $T_m$  : 입자의 최대이동값
- $T_n$  : 입자들의 유사운동 범위
- $T_q$  : 유사운동구간내의 변위 차이
- $x_c$  : 입자중심( $x_c, y_c$ )
- $x_i$  : 첫번째 유동화상내의 입자위치
- $y_i$  : 두번째 유동화상내의 입자위치
- $\rho_N$  : 입자밀도(= 단위 픽셀당 입자수)
- $\phi$  : 회복률

### 1. 서론

화상처리를 이용한 속도장측정기법은 속도벡터를 추출하는 방법에 따라 크게 두가지로 구분되어진다. 하나는 PIV(particle image velocimetry)이고 다른 하나는 PTV(particle tracking velocimetry)기법이다. 일반적으로 PIV 기법은 유동내 산란입자의 농도가 클 경우에 주로 사용되고, PTV 기법은 산란입자의 농도가 낮은 유동에 이용되고 있다.

이들 두 가지 속도장측정기법은 모두 유동내에 작은 산란입자를 주입하고 레이저와 같은 강한 강도를 갖는 빛을 조사한 후, CCD 카메라나 필름카메라 등을 이용하여 입자화상을 기록한다는 점에서는 동일하다.

PIV 기법의 경우, 이 유동화상을 작은 조사구간(interrogation window)으로 나누어 광학이나 디지털

\* 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

TEL : (0562)279-2169 FAX : (0562)279-3199

화상처리기법을 이용하여 속도를 구한다. 이 PIV 기법의 단점은 실제 산란입자의 속도가 아닌 조사 구간의 대표속도를 구하므로 공간해상도가 떨어지고, 속도구배가 큰 조사구간내에서 정확한 속도벡터를 추출하기에는 어려움이 따른다.

PTV 기법에서는 연속된 입자화상에서 산란입자들을 직접 추적함으로써 라그랑지안(Lagrangian) 속도벡터를 구할 수 있다는 장점이 있는 반면에, 입자 중심을 정확하게 결정하기 위해서는 상대적으로 깨끗한 입자영상을 필요로 한다.

PIV 기법의 개발초기에는 고해상도 필름을 사용함으로써 PTV 기법에 비해 PIV 기법이 공간분해능이 뛰어난 것으로 인식되어 왔다. 최근 들어 빠른 속도로 발전하고 있는 전자공학의 영향으로 CCD 카메라와 디지털영상처리기법을 이용한 FFT를 이용한 PIV 기법은 PIV에서의 문제점 중의 하나인 속도벡터의 방향성 문제를 해결하여 널리 사용되고 있다. 그러나, PTV 기법은 입자추적 알고리즘이 복잡하여 PIV 기법만큼 널리 사용되지 않고 있다.

그러나, CCD 카메라와 디지털 화상처리를 이용한 DPIV(digital particle image velocimetry) 기법은 제한된 CCD 카메라의 해상도에 의해 필름방식의 PIV 기법이 갖고 있던 높은 공간해상도의 장점을 잃게 되었다. 나아가 2차원평면에서 3차원의 속도장측정기법을 개발하기 위해서는 PIV 기법의 한계를 극복하여야만 했다. 현재 홀로그래픽(holographic) PIV 기법을 제외하고 대부분의 3차원 PIV 기법은 레이저시트 조사평면에서의 3차원 속도만을 측정할 수 있는 유사(pseudo) 3D PIV 기법들이다.

최근 들어, 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 다시 PTV 기법을 활용하고자 하는 노력이 크게 증가하기 시작하였다. Keane 등<sup>(1)</sup>은 DPIV의 공간해상도를 향상시키기 위해서 PIV 기법과 PTV 방식을 하이브리드시키는 방법을 제안하였다. 그들은 하이브리드방식을 채용함으로써 PIV 기법만을 사용했을 때보다 공간해상도를 약 3배 증가시켰다. Cowen 과 Monismith<sup>(2)</sup>는 이 하이브리드 PIV 기법(HPIV)이 공간해상도뿐만 아니라 측정정확도도 PIV 기법과 비교하여 향상되었다는 것을 발표하였다. 그러나 이러한 HPIV 기법에 관한 연구들은 처음부터 PIV 기법에 기초하고 있어 PIV 기법이 갖는 단점을 그대로 가지고 있다. 즉, 이들 HPIV 기법들은 속도구배가 큰 구간이나 벽근처에서는 정확한 속도벡터 계산에 어려움이 많이 따른다.

본 연구에서는 본 연구실에서 개발된 2-frame PTV 기법<sup>(3)</sup>을 토대로 하여 새로운 하이브리드 PTV 기법을 개발하였다. 기존의 2-frame PTV 기법

은 입자추적과정에 필요한 변수들을 입자화상 전체에 걸쳐 일정한 값으로 사용하였다. 이것은 측정평면내의 속도변화를 고려하지 않았기 때문에 속도추적시간을 증가시키고, 가끔 에러벡터를 발생시켰다. 본 연구에서는 일치확률 방식의 2-frame PTV 기법에 사용되는 매개변수값들을 선행 PIV 속도장결과에서 나온 값을 사용함으로써 공간해상도와 측정정확도를 향상시키고자 한다.

## 2. 적응형 2-Frame PTV 기법의 개발

### 2.1 하이브리드 PTV

이번에 개발된 하이브리드 2-frame PTV 기법의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 상호상관방식의 PIV 기법을 이용하여 입자추적 과정에 필요한 다음의 3가지 매개 변수의 값을 결정하였다.  $T_m$ (maximum movement threshold),  $T_n$ (neighborhood threshold), 그리고  $T_q$ (quasi-rigidity threshold)가 일치확률방식의 2-frame PTV 기법에서 속도벡터를 추출하는데 필요한 매개변수들이다. 일치확률방식의 2-frame PTV 기법에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [3]에 나와 있다.

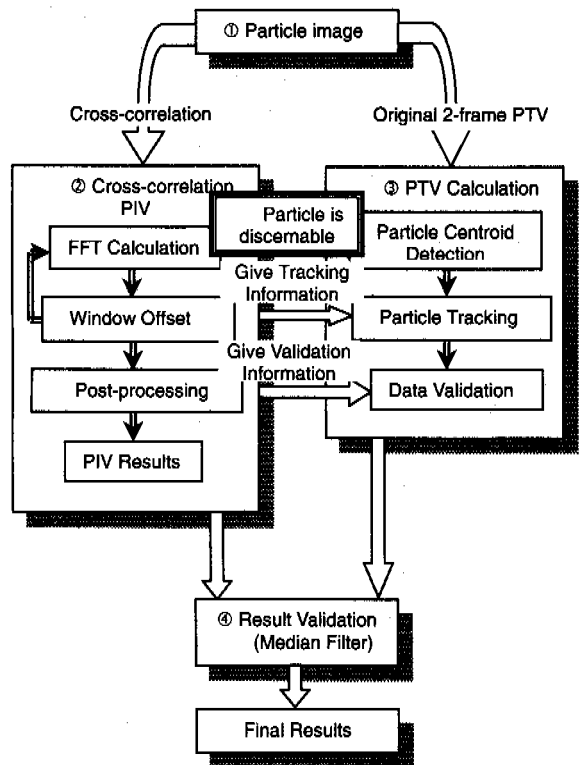


Fig. 1 Schematic diagram of the adaptive 2-frame PTV system

입자추적과정에서는 PIV 속도벡터의 크기만을 사용하여  $T_m$ ,  $T_n$  그리고  $T_q$ 를 결정한다. 속도벡터의 방향은 후후 PTV 결과의 에러벡터 제거과정에서 사용된다. 일정 격자상에 속도벡터가 나오는 PIV 기법에 비해 각각의 입자위치에서 속도벡터가 구해지는 PTV 기법이 에러벡터제거에 어려움이 많다.

## 2.2 FFT를 이용한 상호상관 PIV

### 2.2.1 상호상관 PIV

Willert와 Gharib<sup>(4)</sup>에 의해 소개된 FFT 방식의 상호상관방식의 PIV 기법은 속도벡터의 방향 모호성을 극복하고 컴퓨터에의 구현이 쉽다는 장점으로 인하여 PIV 기법에서는 현재 가장 많이 사용되고 있다. 본 연구에서도 이 방식의 PIV 기법을 2-frame PTV 매개변수를 구하기 위해 이용하였다.

### 2.2.2 윈도 오프셋(Window offsetting)

기존의 상호상관방식의 PIV 기법에서는 각각의 입자영상에서 조사구간을 동일한 위치로 결정하였다. 이것은 입자의 최대 변위를 제한하여 속도측정의 다이내믹 레인지를 줄이고 상관관계값의 S/N (signal to noise ratio)비를 떨어뜨려 에러벡터를 발생시킨다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 Keane과 Adrian<sup>(5)</sup>은 두 번째 입자화상에서의 조사구간의 크기를 증가시키는 방법을 사용하였다. 예를 들어, 첫번째 입자화상의 조사구간의 크기가 32x32(pixel)일 경우에는 두 번째 입자화상에서의 조사구간의 크기를 64x64(pixel)로 하여 조사구간을 빠져나가는 산란입자의 영향을 감소시켰다. 이 방법은 S/N 비를 증가시키는 효과가 있지만, 반대로 FFT 계산시간을 증가시키는 단점도 가지고 있다. Westerweel 등<sup>(6)</sup>은 조사구간 위치 오프셋(offset)을 0으로 하여 얻은 속도벡터의 정수값만큼 두 번째 입자화상의 조사구간을 이동시켜 S/N 비를 증가시키는 방법을 제안하였다. 이것은 Keane 등<sup>(5)</sup>이 제안한 방법에 비해 계산시간을 줄이고 S/N 비를 증가시키는 장점이 있다. 본 연구에서도 Westerweel 등<sup>(6)</sup>이 제안한 방법을 적용하였다.

### 2.2.3 서브 픽셀 추정(sub-pixel estimation)

PIV 측정기법의 정확도를 향상시키고 다이내믹 레인지를 증가시키기 위해서는 상관관계값의 정확한 위치를 결정하는 것이 중요하다. 이를 위해 서브 픽셀 추정이 사용되는데 현재 다양한 형태의 알고리즘이 개발되어 사용되고 있다. Prasad 등<sup>(7)</sup>은 속도구배가 존재할 경우, 무게중심(center-of-mass) 알고리즘이 우수한 성능을 나타낸다고 하였다. 반면에 Willert와 Gharib<sup>(4)</sup>는 3점 지수 커브피팅이

더 좋은 성능을 보인다고 발표하였다. Westerweel<sup>(8)</sup>은 3개의 커브피팅 알고리즘- 포물선(parabolic), Gaussian, center-of-mass-을 실제 실험과 해석연구를 통해 비교한 결과, 무게중심(center-of-mass) 알고리즘의 경우 속도벡터의 정수값으로 편향되며 Gaussian 커브피팅 알고리즘이 가장 좋은 성능을 보여주었다. 이것은 Cowen 등<sup>(2)</sup>의 연구결과에서도 확인되었다. 본 연구에서는 Gaussian 커브피팅 알고리즘을 PIV 상관관계값의 서브 픽셀 추정과 함께 PTV에서 입자의 중심위치 추출에 사용하였다.

### 2.2.4 에러 제거 및 벡터 보간

PIV 기법의 경우, 입자화상의 노이즈 등에 기인한 에러벡터의 제거과정이 필요하다. 본 연구에서는 매디언 필터링(median filtering)기법을 이용하여 PIV 결과에서의 에러벡터를 제거하였다. 매디언 필터링은 속도벡터가 다음의 조건을 만족하게 되면 에러벡터로 간주하여 제거하였다.

$$|u_i - u_m| > cV_u \quad \text{or} \quad |v_i - v_m| > cV_v \quad (1)$$

여기서  $u_m(v_m)$ 은 속도벡터  $x_i$ 를 중심으로 한 주위영역에서의 매디언 속도이다.  $V_{u(v)}$ 는 주위점들과의 최대속도차이를 나타낸다.

이렇게 해서 제거된 에러벡터는 AGW(adaptive Gaussian window)방식<sup>(9)</sup>의 보간법을 사용하여 새로운 속도벡터로 대체하였다. AGW 방식의 보간법은 2-frame PTV 기법에서 나온 속도벡터를 일정 격자상에 보간하는 경우에도 사용되었다.

## 2.3 2-frame PTV 기법

### 2.3.1 입자 중심위치 추출

입자추적을 수행하려면 먼저 입자의 중심위치를 결정하여야 한다. 본 연구에서는 입자의 명암(gray level)과 입자의 크기를 기준으로 하는 글로벌 쓰레스홀딩(global thresholding) 알고리즘을 사용하여 입자의 위치를 추출하였다. 이 알고리즘의 장점은 쉬운 적용과 빠른 입자추적에 있다.

### 2.3.2 입자 추적

기존의 2-frame PTV 기법에서는  $T_m$ ,  $T_n$  그리고  $T_q$ 와 같은 추적에 필요한 매개 변수들을 속도구배 등을 고려하지 않고 입자화상 전체에서 동일한 값으로 사용하였다. 따라서 이들 매개 변수들은 주어진 입자화상에서 극대값(extreme value)으로 설정되어 일치 확률을 이용한 입자 추적시 과도한 입자 후보(candidate)들을 대상으로 계산하게 된다. 이는 계산시간을 증가시킬 뿐만 아니라 간혹 일치 확률값을 계산하는 데 장애를 주어 에러벡터를 발

생시킴기도 한다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 PIV 기법으로 구한 속도벡터 정보를 입자추적 과정에 필요한 입력자료로 사용하였다.

2.3.3 유효 속도벡터 검증

PIV 기법이나 PTV 기법에 의한 속도장측정에는 에러벡터의 후처리과정이 반드시 필요하다. PIV 기법은 처음부터 일정 격자상에 속도벡터가 나오기 때문에 랜덤하게 속도벡터가 추출되는 PTV 기법에 비해 에러 벡터의 처리가 용이하다. 본 연구에서는 PTV 에서 나온 에러벡터의 처리에 다음과 같은 두가지 방법을 사용하였다.

첫째로, PIV 기법에서 얻어진 속도장 결과를 사용함으로써 PTV 결과에서의 에러벡터를 제거하였다. PIV 기법에서 얻어진 속도벡터의 크기는  $T_n$ ,  $T_m$  그리고  $T_q$  와 같은 매개 변수들의 값을 정하는 데 사용되었고, 에러 벡터의 제거에는 속도벡터의 방향을 사용하였다. 즉, PIV 결과에서 얻어진 속도벡터의 방향과 PTV 에서 나온 속도벡터의 방향을 비교하여 일정기준이상의 차이를 갖으면 에러벡터로 간주하여 제거시켰다. 일반적으로 PIV 기법에서는 조사구간내 속도구배가 3%이내에서 유효한 속도벡터를 얻는다고 알려져 있다. 본 연구에서는 PIV 기법에서 얻어진 속도벡터의 방향의  $\pm 5\%$ 내에서 PTV 속도벡터의 유효성을 확인하였다.

두번째는 Cowen 등<sup>(2)</sup>이 사용한 통계적인 방법으로 입자화상의 개수가 많을 수록 유효한 방법이다. 이것은 입자화상을 일정격자로 구분한 후, 모든 입자화상에서 동일 격자내에 위치한 속도벡터들의 확률밀도함수를 구한 후, 표준편차를 구하여 필터링 하는 방법이다. 각 격자내의 속도벡터들의 평균( $\mu$ )과 표준편차( $\sigma$ )를 계산한 후,  $\mu \pm 3\sigma$ 밖 에 있는 속도벡터를 제거하는 식으로 에러벡터를 처리하였다. 여기서 일반적인 평균의 경우 속도벡터의 비대칭도(skewness)에 영향을 받기 때문에 메디언 값을 평균값으로 사용하였다.

3. 합성 입자화상을 이용한 성능실험

새로 개발된 적응형 2-frame PTV 의 성능을 확인하기 위해서 컴퓨터에 의해 모사된 입자영상을 이용하여 모사실험을 수행하였다.

입자화상은 강제와유동을 모사하여 임의의 위치에 입자중심을 배치시킨 후 Willet 등<sup>(4)</sup>이 제안한 Gaussian 강도분포를 컨벌루션(convolution)처리하여 만들었다. 강도분포는 아래와 같다.

$$I(x) = I_0 \exp\left[-\frac{(x - x_c)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{2}$$

여기서,  $x_c$ 는 입자의 중심이고  $\sigma$ 는 Gaussian 강도 분포의 표준편차이다. 컴퓨터 모사 입자화상은 256x256(pixel)에서 1Kx1K(pixel)로 해상도를 변화시켰으며 화상내의 입자 밀도도 변화시켜가면서 이러한 인자들이 PTV 성능에 미치는 영향을 연구하였다.

첫번째 입자화상은 임의로 입자들을 배치시켜 만든 후, 두번째 입자화상은 다음의 식에 따라 입자들을 배치시켰다.

$$\begin{aligned} x_0 &= x_c - 128 ; y_0 = y_c - 128 ; r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \\ u &= U_m \left(\frac{r_0}{R}\right) \sin \theta_0 ; v = U_m \left(\frac{r_0}{R}\right) \cos \theta_0 ; \theta_0 = \tan^{-1}\left(\frac{y_0}{x_0}\right) \\ x_i &= x_c + u\Delta t ; y_i = y_c + v\Delta t \end{aligned} \tag{3}$$

입자화상의 노이즈 제거를 위하여 저대역 필터링(low pass filtering)과 메디언 필터링(median filtering)을 적용하였다.

4. 결과 및 토의

입자화상으로부터 추출된 입자중심과 그 입자화상에서 구한 속도벡터의 숫자비를 속도벡터 회복률( $\phi$ )로 정의하여 매개 변수들이 추적률에 미치는 영향을 살펴보았다.

Neighborhood threshold  $T_n$ 이 회복률( $\phi$ )에 미치는 영향을 Fig. 2 에 나타내었다. 여기서  $T_q/T_i$ 는 0.5 로 고정하고  $T_n/T_i$ 를 각각 1.1, 1.2 그리고 1.4 로 바꾸

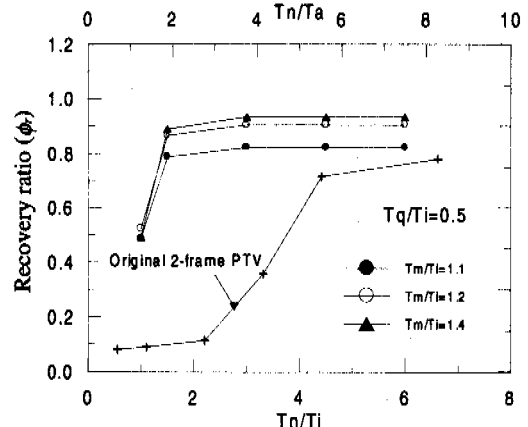


Fig. 2 The effect of the neighborhood threshold  $T_n$  on the recovery ratio

어 가면서 실험을 수행하였다. 기존의 2-frame PTV의 경우에는 정확한 일치확률을 계산하기 위하여 많은 입자들을 필요로 하였다. 따라서  $T_n$ 이 클수록 회복률도 증가하는 경우를 보였다. 그러나 새로 개발된 적응형 2-frame PTV 기법의 경우에는  $T_n/T_i$ 가 1.5 이상인 조건에서 회복률이  $T_n/T_i$ 중에 상관없이 90%이상으로 접근함을 보여주고 있다. 기존의 2-frame PTV와 비교하기 위해서 입자화상내의 평균이동변위를  $T_n$ 로 정의하여 두 속도장측정기법의 차이를 비교하였다. Fig. 2로부터 새롭게 개발된 2-frame 기법이 상대적으로 작은  $T_n$ 으로도 높은 회복률을 갖음을 알 수 있다.

Fig. 3에 최대이동변위(maximum movement threshold)  $T_m$ 이 회복률( $\phi$ )에 미치는 영향을 나타냈다. 여기서  $T_n/T_i=1.5$ ,  $T_q/T_i=0.5$ 로 설정하였다.  $T_m$ 은 입자의 최대이동변위를 나타내기 때문에,  $T_m/T_i$ 가 1보다 작으면 일치확률을 계산하는데 들어가는 입자의 유효수가 줄어들어 회복률이 급격히 떨어

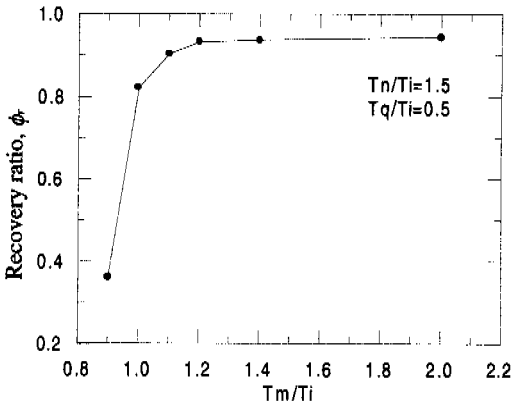


Fig. 3 The effect of the maximum movement threshold  $T_m$  on the recovery ratio

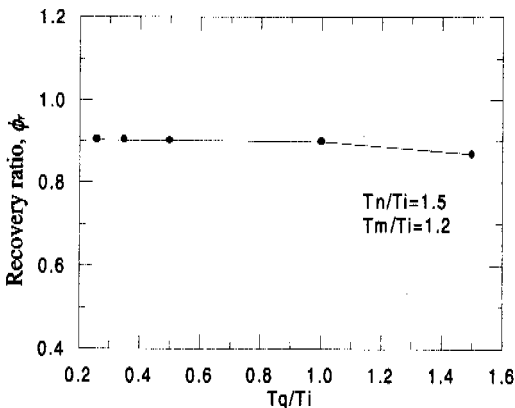


Fig. 4 The effect of the quasi-rigidity threshold  $T_q$  on the recovery ratio

짐을 보여주고 있다.  $T_n/T_i \geq 1.1$  조건에서 회복률은 90%이상으로 접근한다.

Fig. 4는 유사운동구간내의 변위차이값(quasi-rigidity threshold)  $T_q$ 가 회복률에 미치는 영향을 보여주고 있다. 여기서  $T_n/T_i$ 와  $T_m/T_i$ 는 1.2와 1.5로 각각 설정하였다. quasi-rigidity threshold  $T_q$ 는  $T_n$ 내에 있는 입자들의 다양성의 정도를 나타낸다. 따라서 기존의 2-frame PTV 기법에서는  $T_q$ 값이 커질수록 에러벡터 발생률이 증가하였다. 그러나, 새롭게 개발된 적응형 2-frame PTV 기법의 경우에는  $T_q/T_i$ 가 1.5 이하인 조건하에서  $T_q$ 값은 회복률에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 적응형 2-frame PTV 기법에서  $T_q$ 의 영향이 작게 나타난 것은 PIV에서 나온 속도결과를 사용하여  $T_m$ 과  $T_n$ 등을 적절하게 선택하였기 때문이다. 기존의 2-frame PTV 기법에서는 입자화상내의 국부적인 속도변화를 고려하지 않았기 때문에 상대적으로 큰  $T_m$ 과  $T_n$ 값이 설정되었기 때문에 일치확률을 계산할 때 에러벡터의 발생가능성이 다소 있었던 것으로 보인다.

Fig. 5는 입자밀도( $\rho_N$ )와 회복률간의 관계를 나타낸 결과이다. 입자밀도는 단위 화상 면적당 입자의 수를 의미한다. 새롭게 개발된 적응형 2-frame PTV 기법의 경우에는 입자밀도에 상관없이 거의 일정한 회복률을 갖는다. 반면에 기존의 2-frame PTV 기법의 경우, 입자 밀도가 0.005보다 커지게 되면 회복률  $\phi$ 이 감소하는 것을 알 수 있다. 입자밀도  $\rho_N = 0.012$ 에서는 회복률이 약 23%나 차이가 나고 있다. 이것으로부터 새롭게 개발된 적응형 2-frame PTV 기법이 입자화상에 들어있는 입자수가 많을 수록 기존 2-frame PTV 기법에 비해 우수한 성능을 보여줌을 알 수 있다.

Fig. 6은 기존의 2-frame PTV 기법과 새로 개발

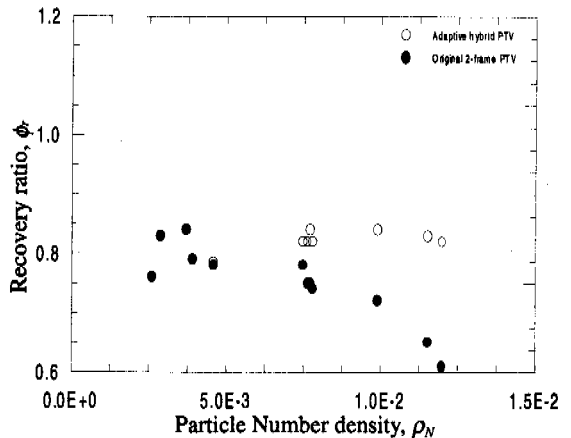


Fig. 5 Comparison of recovery ratio vs. particle number density

된 적응형 2-frame PTV 기법으로 속도장 측정시 계산시간을 비교한 결과이다. 컴퓨터의 빠른 발전으로 인하여 계산시간의 비교는 큰 의미가 없을 수도 있으나 난류통계치 등을 계산할 경우, 수백장에서 수천장에 달하는 입자화상을 처리하려면 많은 시간이 걸리게 된다. 따라서 빠른 입자추적 알고리즘의 개발이 필요하다.

기존의 2-frame PTV와 적응형 2-frame PTV 간의 계산시간을 비교하여 보면 입자수가 5000 개 이하의 경우에는 두 기법간에 큰 차이가 나지 않으나, 입자의 개수가 증가할 수록 기존의 2-frame PTV에 비해 적응형 2-frame PTV 기법의 계산시간이 훨씬 짧음을 알 수 있다. 이는 선행 PIV 결과로부터 추적 매개변수  $T_m, T_n$  등을 정확히 선택하여 일치확률계산에 사용되는 입자의 개수가 기존의 2-frame PTV 보다 작아지기 때문으로 보인다.

Fig. 7은 1K×1K 크기의 입자화상에 기존의 2-frame PTV와 적응형 2-frame PTV 기법을 적용하여 나온 결과를 비교한 것이다. 적응형 2-frame PTV 기법에서는 조사구간을 32×32 pixel로 하고 50%겹침을 한 PIV 기법을 사용하였다. 적응형 2-frame PTV 기법에서는 모두 12,236 개의 속도벡터를 추출하였으나, 기존의 2-frame PTV 기법에서는 9305 개의 속도벡터를 추출하였다. 따라서 적응형 2-frame PTV 기법을 사용함으로써 기존의 2-frame PTV 방식에 비해 속도벡터를 31.5% 더 추출함을 할 수 있다.

일반적으로 PIV 기법의 경우 공간해상도는 조사구간의 크기로 정의된다. 따라서, PIV의 경우에는 32<sup>2</sup>pixel의 해상도를 갖는다. PTV의 경우 속도벡터가 입자화상에서 임의로 추출되는 관계로 공간

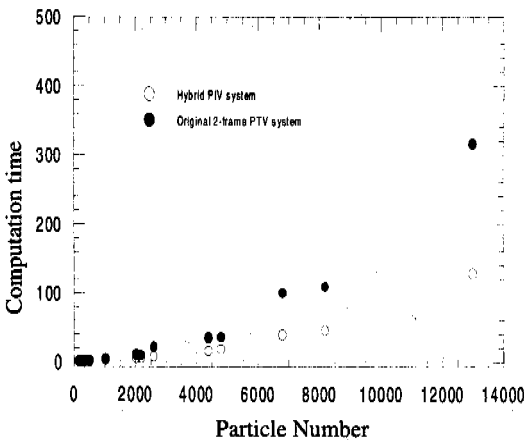
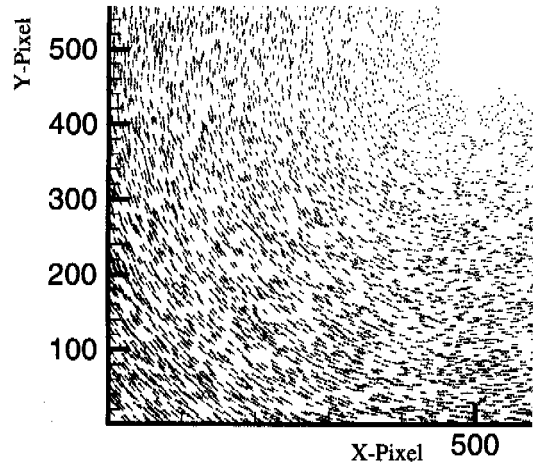
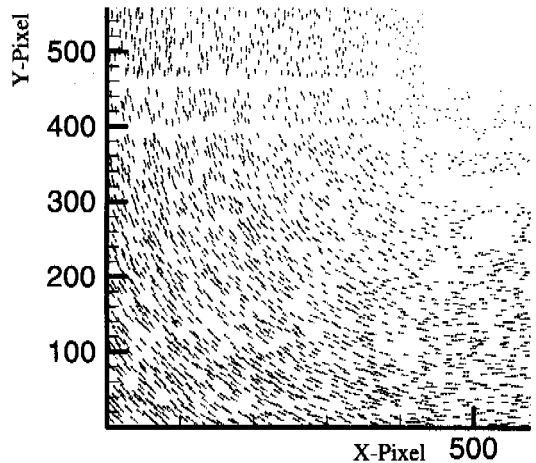


Fig. 6 Comparison of computation time between the adaptive hybrid PTV and the original 2-frame PTV method

해상도를 정의하기 힘들다. 따라서 본 논문에서는 하나의 속도벡터로부터 가장 가까운 다른 속도벡터까지의 거리의 평균을 공간해상도로 정의하여 공간해상도를 비교하였다. 기존의 2-frame PTV 기법은 10.7<sup>2</sup>pixel의 해상도를 갖는데 비해 새로 개발된 적응형 2-frame PTV 기법은 9.1<sup>2</sup>pixel의 해상도를 가져 이들 2 가지 2-frame PTV 기법 모두 기존의 상호상관방식의 PIV 기법보다 높은 해상도를 보여주었다. 또한 적응형 2-frame PTV 기법은 기존의 2-frame PTV 기법보다 해상도가 26%정도 높은 것으로 나타났다.



(a) Adaptive 2-frame PTV method  
(recovered velocity vectors: 12236)



(b) Original 2-frame PTV method  
(recovered velocity vectors: 9305)

Fig. 7 Comparison of the recovered velocity vectors from a 1K×1K image file (one quarter is shown for scaling).

## 5. 결론

상호상관방식의 PIV 기법과 일치확률방식의 PTV 기법을 하이브리드한 적응형 2-frame PTV 기법을 개발하였다. 이 적응형 2-frame PTV 기법은 기존의 일치확률방식의 2-frame PTV 기법보다 높은 속도벡터 회복률과 빠른 계산시간의 장점을 보였다.

컴퓨터로 모사된 유동화상을 이용한 실험결과, 입자화상의 크기와 화상내의 입자수가 증가할수록 적응형 2-frame PTV 기법이 더 많은 속도벡터 회복률을 보였다. 이는 새로 개발된 적응형 2-frame PTV 속도장측정기법이 고해상도 CCD 카메라를 사용한 실험연구에 보다 강력한 성능을 발휘함을 나타낸다.

결론으로 PIV 기법과 PTV 기법의 장점만을 합친 적응형 2-frame PTV 기법은 보다 많은 속도벡터를 짧은 시간내에 정확히 구해야 하는 난류유동의 실험적 해석에 효과적이고 강력한 계측방법이 될 것이다.

## 참고문헌

(1) Keane, R.D., Adrian, R.J. and Zhang, Y., 1995, "Super-Resolution Particle Image Velocimetry," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 6, pp. 754~768

- (2) Cowen, E.A. and Monismith, S.G., 1997, "A Hybrid Digital Particle Tracking Velocimetry Technique," *Exp. Fluids*, Vol. 22, pp. 199~211
- (3) Baek, S.J. and Lee, S.J., 1996, "A New Two-Frame Particle Tracking Algorithm Using Match Probability," *Exp. Fluids*, Vol. 22, pp. 23~32
- (4) Willert, C.E. and Gharib, M., 1991, "Digital Particle Image Velocimetry," *Exp. Fluids*, Vol. 10, pp. 181~193
- (5) Keane, R.D. and Adrian, R.J., 1992, "Theory of Cross-Correlation Analysis of PIV Images," *App. Sci. Res.*, Vol. 49, pp. 191~215
- (6) Westerweel, J., Dabiri, D. and Gharib, M., 1997, "The Effect of a Discrete Window Offset on the Accuracy of Cross-Correlation Analysis of Digital PIV Recordings," *Exp. Fluids*, Vol. 23, pp. 20~28
- (7) Prasad, A.K., Adrian, R.J., Landreth, C.C. and Offutt, P.W., 1992, "Effect of Resolution on the Speed and Accuracy of Particle Image Velocimetry Interrogation," *Exp. Fluids*, Vol. 13, pp. 105~116
- (8) Westerweel, J., 1993 "Digital Particle Image Velocimetry - Theory and Application," Ph.D Dissertation, Delft University, The Netherlands
- (9) Agüi, J.C. and Jiménez, J., 1987, "On the Performance of Particle Tracking," *J. Fluid Mech.*, Vol. 185, pp. 447~468