

고해상도 Cinematic PIV의 개발

박경현* · 김경천**

(2001년 2월 27일 접수, 2001년 8월 31일 심사완료)

Development of a High Resolution Digital Cinematic Particle Image Velocimetry

Kyung Hyun Park and Kyung Chun Kim

Key Words: Cinematic PIV(시네마틱 PIV), Recursive Technique(순환 기법), Multiple Correlation Validation(다중 상관 수정), Rushton Turbine(러쉬톤 터빈)

Abstract

A high resolution digital cinematic Particle Image Velocimetry(PIV) has been developed. The system consists of a high speed CCD camera, a continuous Ar-ion laser and a computer with camera controller. To improve the spatial resolution, we adopt a Recursive Technique for velocity interrogation. At first, we obtain a velocity vector for a larger interrogation window size based on the conventional two-frame cross-correlation PIV analysis using the FFT algorithm. Based on the knowing velocity information, more spatially resolved velocity vectors are obtained in the next iteration step with smaller interrogation windows. When the correct velocity vector at the first step is found to be critical, a Multiple Correlation Validation(MCV) technique is applied to decrease the spurious vectors. The MCV technique turns out to improve SNR(Signal to Noise Ratio) of the correlation table. The developed cinematic PIV method has been applied to the measurement of the unsteady flow characteristics of a Rushton turbine mixer. A total of 3,245 instantaneous velocity vectors were successfully obtained with 4 ms time resolution. The acquired spatial resolution corresponds to the conventional high resolution digital PIV system using a 1K x 1K CCD camera.

기호설명

- δ : 변위벡터
 δ^k : 실제 유동장에 대한 속도벡터
 δ_p^k : 추적구간의 변위벡터
 δ_c^k : 세분화된 추적구간의 상관변위벡터
 D : 터빈 블레이드 직경
 H : 터빈 블레이드 높이
 k : Iteration step
 Re_D : 터빈 레이놀즈수 (ND^2/ν)

T : 혼합용기의 직경

1. 서론

기존의 two-head pulse형 레이저와 CCD 카메라를 사용하는 PIV 기법은 두 화상사이의 시간을 조절하여 얻어진 변위로부터 속도장의 정보를 얻어내는 방법이다. 획득된 화상정보로부터 공간적으로는 매우 정확한 속도장을 구할 수 있지만 각각의 순간 유동장은 시간에 대해 상호 연관성이 없다. 시간적으로 연속적인 속도장을 구할수 있는 Cinematic PIV 기법은 일반적으로 연속광인 Ar-Ion 레이저와 고속카메라를 사용하여 일정시간동안 연속적인 화상의 획득이 가능하다. 이로부터 난류유동구조의 시간에 따른 공간적인 전개 과정을 파악할 수 있다. Lin과 Rockwell⁽¹⁾은

* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과
 † 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소
 E-mail: kckim@pusan.ac.kr
 TEL : (051)510-2324 FAX : (051)512-9835

35mm 무비카메라와 Ar-Ion 레이저로 초당 65장의 입자영상을 취득하여 시간에 따른 유동장 변화를 관찰한 바 있으나 시간 분해능은 난류의 해석에는 부족한 점이 있다. Lee는 Cinematic과 PIV기법으로 고속디지털 카메라로 얻은 화상으로부터 초당 200장의 속도장을 추출한 바 있다.⁽²⁾ 고속 디지털 카메라로 시간 해상도는 좋아졌으나, 기존의 적용된 Cinematic PIV 기법은 카메라의 한계로 인하여 공간의 해상도가 매우 떨어지는 단점이 있다.⁽³⁾

Keane과 Adrian⁽⁴⁾에 의하면 일반적인 상관관계를 적용할때 각 추적구간 내에는 최소 10개 이상의 추적 입자 쌍이 필요하며, Hu 등⁽⁵⁾은 최적의 입자 수는 10~20개임을 밝혔다. 이러한 공간해상도의 한계를 극복하기 위하여 Hart⁽⁶⁾는 계층적인 반복과정(recursive method)을 추가하여 공간해상도를 향상시켰으며, 특히 Hu 등⁽⁵⁾과 Scarano 등⁽⁷⁾은 한 개의 상위계층의 추적구간을 4개의 하위 추적구간으로 나누어 공간해상도를 향상시켰다. 추적구간이 감소할수록 SNR은 감소하며 따라서 실제 유동장 파악에 어려움이 있다. Hart⁽⁶⁾와 Hu 등⁽⁸⁾은 MCV(Multiple Correlation Validation)기법을 적용하여 두 추적구간의 상관관계 테이블의 곱으로 오류벡터를 추출하였다. Okamoto⁽⁹⁾에 따르면 MCV 기법에 의해서 SNR은 약 3.5배정도 향상됨을 보였다. 한편 Kim과 Lee⁽¹⁰⁾는 PIV기법으로 얻은 속도장을 기초로 하여 PTV기법으로 공간해상도를 높이는 하이브리드 기법을 개발한 바 있다.

본 논문에서는 고속카메라로부터 얻어진 연속적인 입자영상으로부터 상호상관법으로 속도장을 구할 때, 공간해상도를 Recursive 기법과 MCV기법을 사용하여 향상시킨 Cinematic PIV 시스템을 개발하고 이를 실제 유동장에 적용하고자 한다.

2. Recursive 기법

광학적인 유동측정방법으로서 LDV나 열선유속계에 비해 PIV기법은 비정상 및 정상 상태의 복잡한 2차원 또는 3차원 전체 유동장에 대해 공간상의 순간 속도장을 정량적으로 획득할 수 있다. 그러나, 공간적인 상관관계를 이용하여 얻어진 유동장의 공간해상도는 추적구간의 크기에 의해 결정되며, 이는 실제 유동장에서 입자들의 변위에 직접적으로 의존한다. 또한, 추적구간내의 입

자 쌍의 개수에도 영향을 받으므로 공간해상도에 한계가 존재할 수밖에 없다. 기본적으로 PIV기법은 추적구간내의 입자들의 평균적인 변위로부터 유동장을 추출하는 방법이므로 Recursive 기법을 사용하면 공간해상도를 크게 향상시킬 수 있다. Fig. 1은 Recursive 기법의 원리를 설명하고 있다. 실선 화살표는 상위계층의 추적구간(실선영역)에서 상관관계로부터 추출된 입자의 변위 벡터이며 이는 하위계층의 추적구간(점선영역)에서의 predictor로 사용된다. 하위계층의 추적구간의 크기는 각 방향에 대해 상위계층 영역의 반이며 그 하위 추적구간의 offset은 이전의 상관관계에 의해 결정된다.

Fig. 1(a)는 Scarano 등⁽⁷⁾과 Hu 등⁽⁸⁾이 제안한 방법으로 한 개의 상위계층의 추적구간을 4개의 하위추적구간으로 나누어 각각에 대하여 상관관계를 구함으로써 공간해상도를 향상시켰다. 위에서 설명한 바와 같이 PIV 기법에서의 속도벡터는 각 추적구간 내의 입자들의 평균 이동변위이므로 본 연구에서는 Fig. 1(b)와 같이 하위추적구간 계산시에 50% overlap을 적용하여 Fig. 1(a)보다 속도벡터의 수를 증가시킬 수 있었다. 그리고, 하위계층 추적구간의 offset을 위한 변위 δ 는 위치에 따라 2개 혹은 4개의 주위 변위벡터의 보간을 통하여 구하였다. 따라서, Recursive 기법을 이용하면 하위추적구간 내에서는 더 이상 *one quarter rule*이 의미가 없고 추적구간의 크기에 대한 제한이 없어져 공간해상도를 크게 향상시킬 수 있으며, 이론적으로 하위 추적구간의 크기는 입자 크기만큼 작게 할 수 있다.

Fig. 2는 상호상관방법을 통하여 세분화된 속도장을 얻기 위해 하위추적구간의 이동에 대한 개략적인 설명을 하고 있다. 이전 상위계층으로부터 얻어진 변위벡터 $\delta = (\delta x, \delta y)$ 가 결정되면, 입자 쌍의 개수를 최대화하기 위하여 하위추적구간에서 두 번째 화상정보는 첫 번째 화상정보에 대해 그만큼 상대적으로 이동하게 된다. δ 는 추적구간의 변위에 대해 sub-pixel 정확도를 사용하여 실수 값을 적용할 수 있지만, 이 경우 실제 이미지에서 이웃한 값으로부터 보간을 위하여 화상정보의 변형이 필요하므로 속도장 추출에 많은 시간이 소요된다.⁽⁷⁾ 그리고 화상정보의 변형에 따른 에러를 포함하게 되므로 본 논문에서는 정수

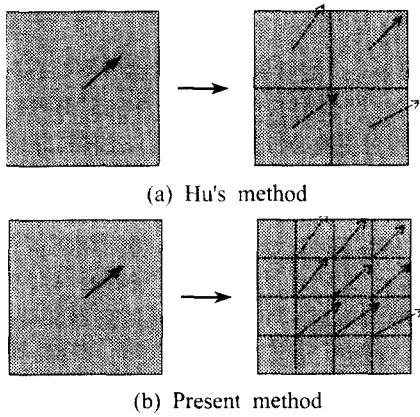


Fig. 1 Velocity vectors from coarse grids(solid line arrows) and from finer grids(dotted line arrows)

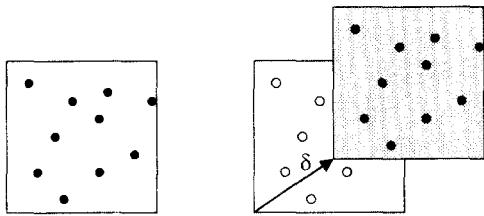


Fig. 2 Principle of window displacement

의 픽셀 값으로 변환하여 사용하였다.

Recursive 기법을 통하여 얻어진 하위 추적구간에서의 실제 속도성분 δ 는 식 (1)과 같이 δ_c 와 δ_p 의 합으로부터 결정된다.

$$\delta^k(x, y) = \delta_c^k(x, y) + \delta_p^k(x, y) \quad (1)$$

여기서, $\delta^k(x, y)$ 는 실제 유동장에 대한 속도 벡터, $\delta_p^k(x, y)$ 는 추적구간의 변위벡터, $\delta_c^k(x, y)$ 는 세분화된 추적구간의 상관관계로부터 구해진 벡터이다. 이상으로부터 Recursive 기법을 적용하는 순서는 아래와 같다.

Step 1 PIV 화상처리기법에 근거한 일반적인 상관관계를 통하여 상위 추적구간에 대하여 속도장을 추출한다.

Step 2 추출된 속도장에 대해 오류벡터 제거 및 보간을 수행한다.

Step 3 위에서 추정된 변위벡터를 다음 단계의 세분화된 공간 추적구간에 적용하고 상관관계를 통하여 속도장을 추출한다.

Step 4 원하는 추적구간 크기를 얻을 때까지 Step 2에서 Step 3을 반복한다.

Step 5 원하는 추적구간 크기에서 속도장을 추출한다.

Step 2에서 추출된 변위들은 다음 단계 추적구간의 이동변위이므로 여기서 발생된 에러들은 그대로 다음 단계로 전파되어 실제 유동장 해석에 문제를 발생시킬 수 있다. Fig. 3은 큰 추적구간에서 발생된 오류벡터가 추적구간이 작아짐에 따라 실제 유동장을 어떻게 변형시키는지가를 보여주고 있다. 최초의 추적구간에서 발생된 오류벡터들은 다음 추적구간에 대해 변위벡터로 사용되어 최초의 추적구간 영역에서 계산된 속도장이 실제 유동장을 제대로 반영하지 못함을 알 수 있다. 즉, 최종 속도장에서 이 오류벡터들은 오류로 인식되지 않고 심각한 문제를 야기할 수 있다. 따라서, Step 2에서 오류벡터의 제거와 보간은 매우 중요하며, 때때로 smoothing이 적용된다.

Fig. 4는 오류벡터를 제거한 속도장을 근거로 Recursive 기법을 통하여 공간해상도를 향상시킨 유동장을 나타내고 있다. Fig. 3과 비교해 볼 때, 추적구간의 크기가 작아짐에 따라 세분화된 추적구간의 유동장에서도 실제 유동의 형태를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

속도구배가 큰 유동장에서 추적구간의 크기가 가장 심각한 문제인데, Recursive 기법을 적용하는 경우 최초의 추적구간을 제외하고는 one quarter rule이 의미가 없으므로 이 경우 역시 유동장의 공간해상도를 높일 수 있다는 장점이 있다. 그리고 고속카메라를 이용한 Cinematic PIV 기법에서는 고속카메라의 연속적인 화상정보 획득 시간과 공간해상도의 한계로 인해 저 레이놀즈 수의 유동장에서만 측정이 가능하지만, Recursive 기법을 적용하여 공간해상도를 향상시킬 수 있었다.

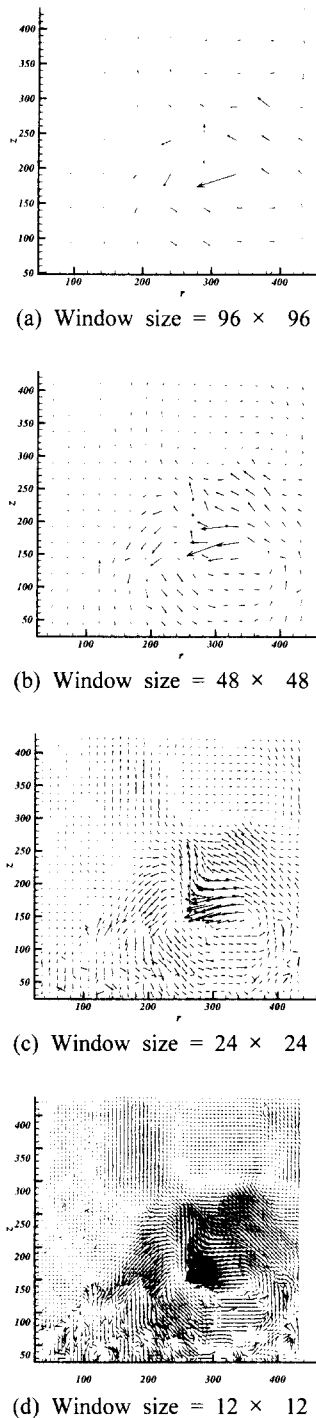


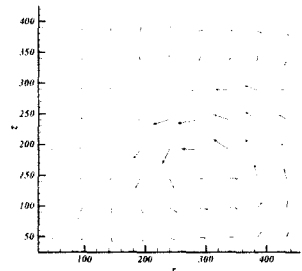
Fig. 3 Error propagation due to the spurious vector in the velocity fields with decreasing interrogation window size

3. MCV(Multiple Correlation Validation)

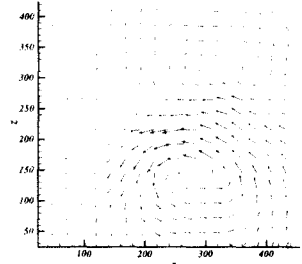
추적구간의 크기가 감소할수록 추적구간내의 입자 수는 감소하며 따라서 상관관계 테이블에서 SNR이 작아지게 되어 오류벡터의 수가 증가하게 된다. 현재 PIV 결과에서 많이 적용되고 있는 오류벡터 제거 방법은 입자 화상으로부터 구한 속도장에 적용된다. 속도장에서 통계적으로 또는 물리적으로 의미가 맞지 않는 벡터의 유무는 오류벡터와 이웃하는 벡터와의 비교를 통해서 이루어지며 검출된 오류벡터는 보간에 의해 대체된다. 이러한 후처리 방법은 대체로 분명한 상관관계 오류의 제거에는 적용될 수 있다 하더라도 미묘한 오류벡터의 제거에는 유용하지 못하다.

MCV(Multiple Correlation Validation)^{(6),(8),(11)} 기법은 상관관계에서의 오류검출을 위한 새로운 기법으로 상관관계가 예외일 때 상관관계 공간에서의 오류 peak는 불규칙적이라는 가정에 근거하며, 다른 추적구간에 대한 각각의 상관관계 테이블에서 오류 peak는 동일한 위치에서 나타나지 않을 것이다. 추적구간과 인접한 영역에서 구한 상관관계 테이블의 곱으로 오류 peak들은 제거되고 추적입자의 변위에 따른 peak들은 noise에 기인한 peak와 쉽게 구분된다. 따라서, 속도벡터가 결정되기 전에 상관관계 테이블에서 오류벡터 검출이 가능하다. Fig. 5는 MCV 기법의 기본 개념을 설명하고 있다. 추적구간 A와 인접한 추적구간 B에서 얻어진 상관관계 테이블의 곱으로부터 SNR을 증가시킬 수 있다. Hart^(6,11)(Fig. 5(a))는 두 추적구간의 중복부분에서 상관관계 테이블을 곱하여 속도벡터를 추출하였다. 이 방법의 경우 X와 Y축 방향에 대해 공간해상도가 달라지는 단점이 있다. 반면 Hu 등⁽⁸⁾은 인접 지역의 추적구간 B를 추적구간 A에 대해 Fig. 5(b)와 같이 위치시킴으로써 X와 Y축 방향에 대한 공간해상도를 일치시켰다. 본 논문에서는 Hu 등이 제안한 방법을 사용하여 noise에 대한 peak값을 증가시켰다.

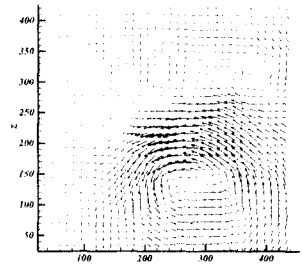
Fig. 6(a)는 기존의 PIV 기법에 의해 추적구간 A에서의 상관관계 테이블을 나타내며, (b)는 인접 지역인 추적구간 B에서의 상관관계 테이블을, (c)는 (a)와 (b)를 곱한 결과를 나타내고 있다. 이 결과로부터 MCV 방법에 의해 얻어진 상관관계 테이블에서 SNR이 크게 증가하며 peak의 모호성이 없어짐을 알 수 있다.



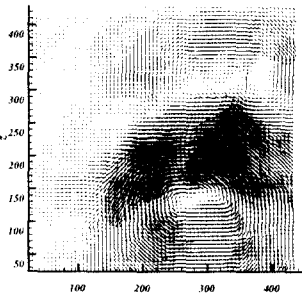
(a) Window size = 96×96



(b) Window size = 48×48

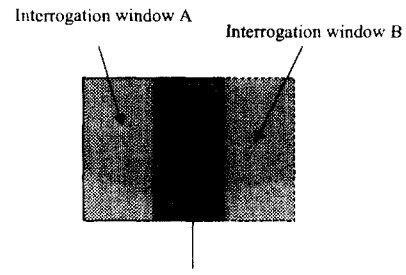


(c) Window size = 24×24



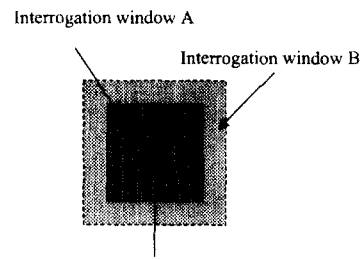
(d) Window size = 12×12

Fig. 4 Enhancement of spatial resolution in the instantaneous velocity fields after applying Recursive technique



Overlap region of Interrogation window A and B

(a) Hart's arrangement



Overlap region of Interrogation window A and B

(b) Hu's arrangement

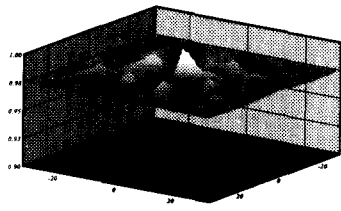
Fig. 5 Arrangement of the overlap regions of interrogation windows for the MCV technique

4. 개발된 Cinematic PIV의 적용

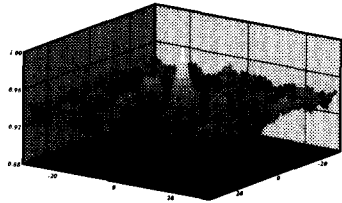
4.1 실험장치

Fig. 7은 Recursive 기법과 MCV 기법을 Cinematic PIV에 적용하기 위한 교반혼합기의 실험장치도이다.

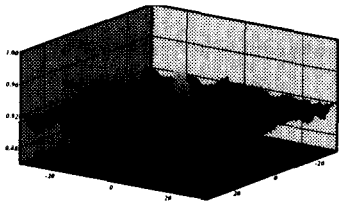
터빈 블레이드의 직경 (D)은 64mm이고 블레이드는 60° 간격으로 6개이다. 블레이드 두께는 2mm이고, 혼합용기의 직경 (T)는 190mm (즉 $3D$)이며 아크릴로 제작되었다. 수면의 높이는 용기직경과 동일하게 하였다. 터빈 블레이드는 용기의 중심에 수직으로 위치하게 하였다. 임펠러의 회전속도는 100 r.p.m., $V_{tip}=355\text{mm/s}$ 이며, Turbine Reynolds number는 다음과 같이 정의된다.



(a) Correlation table $R1(x,y)$ of window A



(b) Correlation table $R2(x,y)$ of window B



(c) $R(x,y) = R1(x,y) \times R2(x,y)$

Fig. 6 Improvement of the SNR in the correlation tables after applying the MCV technique

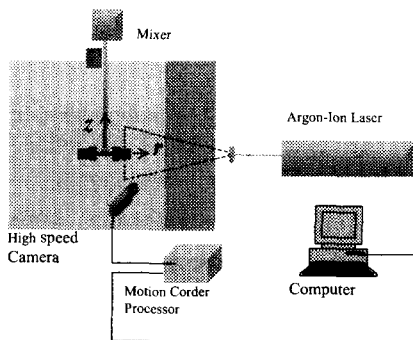


Fig. 7 Experimental setup for the cinematic PIV measurement

$$Re_D = \frac{ND^2}{\nu} \quad (2)$$

여기서 N 은 임펠러의 회전수, ν 는 물의 동점성계수이다. 따라서, 레이놀즈 수는 6,960이었으며, 관측창의 크기는 약 $69\text{mm} \times 65\text{mm}$ 이다. 유동장측을 위하여 비중이 1.5이하이고, 평균 직경이 $8\sim 12 \mu\text{m}$ 인 hollow glass 입자를 유동 내에 주입하였다. 유동내의 입자들의 조명을 위하여 Ar-Ion 레이저가 사용되었으며 원통형 렌즈를 사용하여 교반혼합기 내의 $r-z$ 평면에 평면광으로 조사된다. 레이저에 의해 산란된 입자들의 영상획득을 위해 고속카메라(Kodak Motion Corder Analyzer SR-Ultra-c)를 사용하였다. 이 고속카메라는 최소해상도 128×34 픽셀에서 10,000 frame/s, 최대해상도 512×480 픽셀에서 250 frame/s의 속도로 촬영이 가능하다.

본 실험에서 구해진 속도장의 시간해상도는 고속 디지털 카메라의 촬영속도와 같은 4ms이다. 공간해상도 향상을 위하여 Recursive 기법을 적용하여 64×64 픽셀에서 32×32 픽셀로, 여기서 16×16 픽셀로 추정구간을 세분화하였고, 50% overlap을 사용하여 3,245개의 벡터를 획득하였다. 여기서 16 픽셀은 2.154mm의 물리적 크기에 대응하며, 픽셀단위 이하의 정밀도를 얻기 위하여 Gaussian 보간법을 사용하였다.

4.2 순간유동장

고속카메라로부터 얻어진 화상정보로부터 추출된 벡터장은 약 0.004초 간격으로 5.324초까지 1,331장의 순간 유동장들이다. 이 중에서 Fig. 8은 교반혼합기에서 Cinematic PIV 기법을 사용하여 얻어진 속도장을 나타낸다. 각각의 속도장에 Recursive 기법과 MCV를 적용하였다.

Fig. 8(a)부터 Fig. 8(e)까지는 0.02초(매 5번째 속도장), Fig. 8(e)부터 Fig. 8(h)까지는 0.04초(매 10번째) 간격이며, 각 순간 속도장은 smoothing 처리를 하였다. Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)에서 블레이드로부터 강한 tip vortex의 형성을 확인할 수 있으며 이로 인하여 반경방향의 제트가 분출된다. Fig. 8(c)에서와 같이 블레이드의 상·하 면으로부터 블레이드 뒤쪽에 발생한 음압으로 유체의 강한 유입이 발생되면서 tip vortex는 밀려나게 되

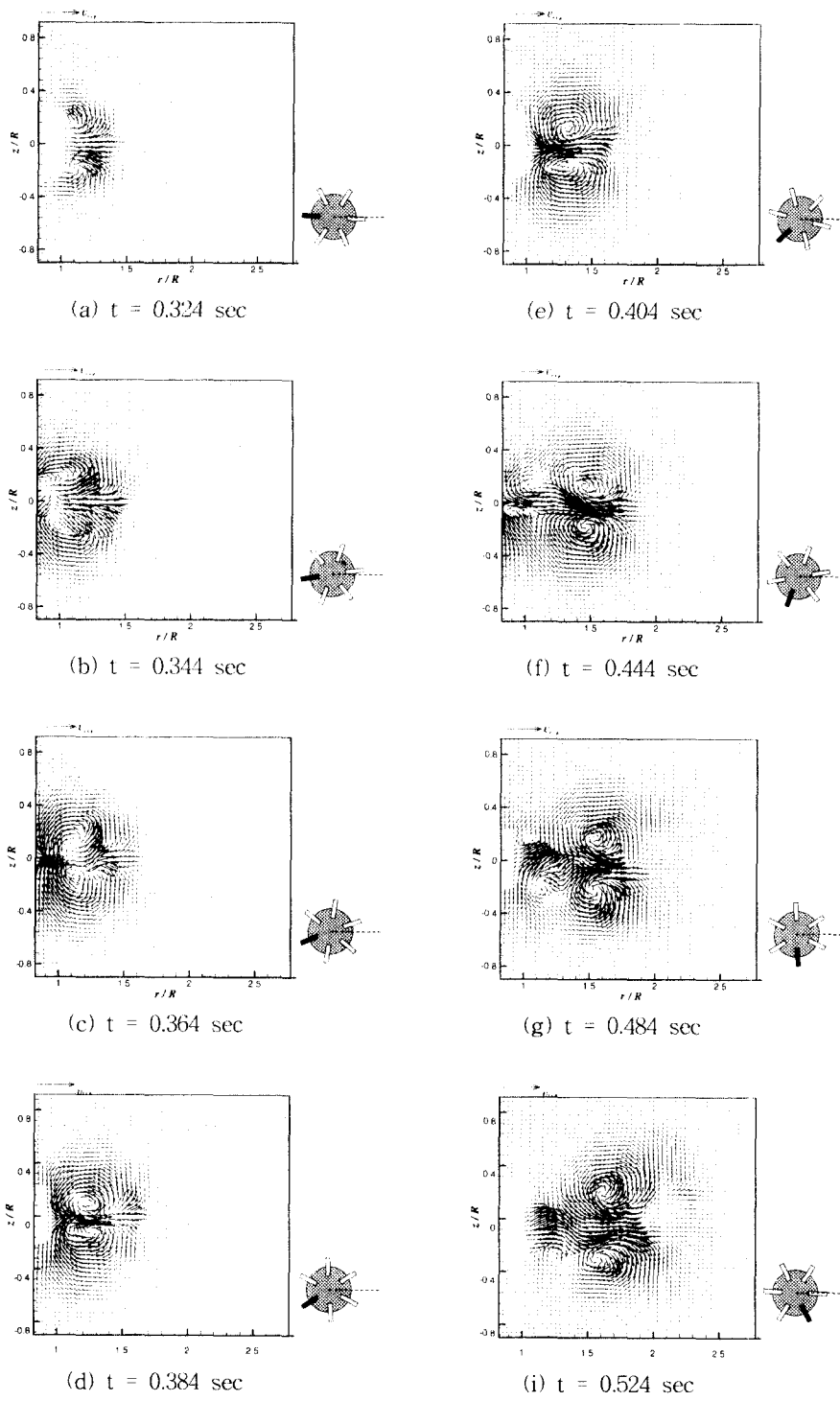


Fig. 8 Instantaneous velocity field (0.324 ~ 0.524 sec)

고, 다섯 번째 블레이드가 접근해 오면서 반경방향으로 반진와류쌍을 이동시키면서 결과적으로 반경방향으로 대류가 발생한다(Fig. 8(d)). Fig. 8(e)에서 보는 바와 같이 완전히 발달된 tip vortex pair는 반경방향 제트와 함께 반경방향으로 대류가 발생된다. 다섯 번째 블레이드 이후에는 블레이드 뒤쪽의 음압의 영향으로 Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)에서 형성된 tip vortex의 대류속도는 다소 감소되며, 네 번째 블레이드에 의해 발생된 와의 영향으로 와의 강도가 다소 작게 나타난다.

5. 결 론

난류유동의 순간속도장을 시간에 따라 연속으로 구할 수 있는 Cinematic PIV 시스템을 개발하였다. 또한, 기존 PIV 기법에서 "one quarter rule"에 따른 공간해상도의 한계와 고속카메라의 한계를 극복하기 위하여 Recursive 기법을 적용하여 공간해상도를 향상시켰다. 본 논문에서 얻어진 속도벡터의 공간해상도는 일반적인 고분해능 DPIV에서 사용되는 $1K \times 1K$ CCD 카메라로 얻은 영상에서 32×32 픽셀의 탐색영역에 50% overlap을 사용하는 경우와 같은 해상도이다. 그리고, 속도장에서 오류벡터를 제거하는 기존의 후처리 기법과 달리 MCV를 이용하여 보다 나은 속도장을 얻을 수 있었다. 이러한 기법을 교반혼합기에서의 비정상 유동장 해석에 응용하였다.

후 기

본 연구는 두뇌한국 21 핵심사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었다.

참고문헌

- (1) Lin, J.C. and Rockwell, D., 1994, "Cinematographic System for High-Image Density Particle Image Velocimetry," *Exp. Fluids*, Vol. 17, pp. 110~114.
- (2) 이상준, 1999, "Cinematic PIV기법을 이용한 난류유동장 해석," 대한기계학회 '99년도 유체공학부문 학술강연회 강연집, pp. 50~64.
- (3) 성재용, 유정열, 2000, "Cinematic PIV데이터의 3차원 위상평균 기법을 이용한 실린더 후류의 2차 와류 측정," 대한기계학회논문집 B, pp. 1540~1548.
- (4) Keane, R. D. and Adrian, R. J., 1990, "Optimization of Particle Image Velocimetry," *Measurements Science and Technology*, Vol. pp. 1202~1215.
- (5) Hu, H., Saga, T., Kobayashi, T., Okamoto, K., and Tanig, N., 1998, "Evaluation of the Cross Correlation Method by Using PIV Standard Images," *Journal of Visualization*, Vol. 1, No. 1, pp. 87~94.
- (6) Hart, D. P., 1998, "Super-Resolution PIV by Recursive Local-Correlation," *Proceedings of VSJ-SPIE 98*, AB149, pp. 1~10.
- (7) Scarano, F., and Riethmuller, M. L., 1999, "Iteration Multigrid Approach in PIV Image Processing with Discrete Window Offset," *Experiments in Fluids*, Vol. 26, pp. 513-523.
- (8) Hu, H., Saga, T. and Kobayashi, T., 2000, "Improve the Resolution of PIV Results by Using Hierarchical Recursive," *9th International Symposium on Flow Visualization*, pp. 1~12.
- (9) Okamoto, K., 1995, "Checker Board Cross-correlation Technique for PIV," *Proceeding of PSFVIP-2(Honolulu)*, CD-ROM Paper No. PF116.
- (10) 김형범, 이상준, 2000, "적응형 하이브리드 기법을 이용한 2-Frame PTV 기법의 성능향상 연구," 대한기계학회논문집 B, pp. 443~449.
- (11) Hart, D. P., 1998, "The Elimination of Correlation Error in PIV Processing," *Proceeding of 9th International Symposium on Application of Laser of Fluid Mechanics (Lisbon)*.

(1) Lin, J.C. and Rockwell, D., 1994, "Cinematographic System for High-Image Density Particle Image Velocimetry," *Exp. Fluids*, Vol. 17,