

〈論 文〉

일치확률방식의 2-프레임 PTV 알고리즘 개발

백승조* · 이상준**

(1994년 11월 2일 접수)

Development of a New 2-Frame Particle Tracking Algorithm Using Match Probability

Seung-Jo Baek and Sang-Joon Lee

Key Words : 2-Frame Particle Tracking Algorithm(2-프레임 입자추적 알고리즘), Match Probability(일치확률), Neighboring Point(이웃점), Similar Movement(유사운동)

Abstract

A new particle tracking algorithm using the concept of match probability between two consequent image frames has been developed to obtain an instantaneous 2-dimensional velocity field. A computer simulation has been carried out to check the performance and usefulness of the developed algorithm by comparing with the conventional 4-frame Particle Tracking Velocimetry(PTV) method. As a result the newly developed algorithm shows very good performance. Although the major part of the developed algorithm is time-consuming iterative updating routine of match probability, computational elapse time, to get the resonable results is a very short compared with the 4-frame PTV. Additionally, the present 2-frame PTV algorithm recovers more velocity vectors and has higher dynamic range and lower error ratio compared with the conventional 4-frame PTV.

기 호 설 명

- | | |
|---|---|
| <p>A, B : 상수($A < 1, B > 2$)</p> <p>I : 화상내의 계조분포(grey level distribtion)</p> <p>d_{ij} : x_i에서 y_j로의 변위벡터</p> <p>F^i : i번째 획득된 디지털 화상</p> <p>M : $\ d_{ij}\ < T_m$을 만족하는 y_j의 개수</p> <p>P_{ij} : x_i와 y_j 사이의 일치확률</p> <p>P_i^* : x_i가 (F^2)내의 어떤 점과도 일치하지 않을 확률</p> <p>S : 입자변위</p> <p>Δt : 획득된 화상사이의 시간간격</p> <p>T_m : 최대 movement threshold</p> | <p>T_n : Neighborhood threshold</p> <p>T_q : Quasi-rigidity threshold</p> <p>U_m : 화상내의 최대 입자속도</p> <p>x_i : 첫번째 화상(F^1)에서의 입자중심 위치벡터</p> <p>y_j : 두번째 화상(F^2)에서의 입자중심 위치벡터</p> <p>그리스문자</p> <p>ϕ_r : 총 추출가능한 속도벡터의 수에 대한 실제 추출된 벡터수의 비</p> <p>ϕ_e : 실제 추출된 속도벡터의 수에 대한 2차 벡터수의 비</p> <p>삼첨자</p> <p>(n) : 반복계산(iteration) 회수</p> <p>~ : 정규화(normalization)되지 않은 확률값</p> |
|---|---|

*포항공과대학교 대학원

**정회원, 포항공과대학교 기계공학과

1. 서 론

유체역학 연구에 있어서 유동가시화는 유동현상을 직접 관찰함으로써 유동장의 정성적 특성을 해석할 수 있는 가장 기본적인 실험기법이다. Dye tracer, hydrogen bubble, smoke 등을 이용한 고전적 유동가시화방법은 전체 유동장의 정성적인 정보를 제공하지만, 정확한 유동해석에 요구되는 정량적인 결과를 얻을 수 없다는 단점이 있다. 이와는 반대로 LDV(laser doppler velocimetry), 열선유속계 등과 같은 기존의 유속측정장비는 한 측정점에서의 정량적인 순간속도를 제시하지만 전체 유동장의 공간적구조 즉, 순간속도장을 짧은 시간내 구하기는 거의 불가능하다.

최근 들어 컴퓨터, 전자계측기술, 화상처리기법 등의 발달로 인하여 기존의 단점들을 보완한 정량적인 유동가시화기법들이 선진국을 중심으로 개발되고 있다. 이러한 화상처리를 이용한 유동가시화기법은 LDV가 갖는 장점 뿐만 아니라 비정상 유동장의 거시적인 해석 그리고 유동장의 공간적인 분포를 정성적, 정량적으로 쉽게 예측할 수 있다. 이러한 속도장 측정기법은 점점 발달되어 가는 컴퓨터 및 화상처리 기술에 힘입어 장차 유동현상의 규명에 있어서 가장 강력한 예측방법이 될 것이다.

화상처리에 의한 속도장 측정기법의 기본원리는 주어진 측정시간(Δt)동안 움직인 유동입자(particle)들의 변위정보를 CCD(charged-coupled device) 카메라와 같은 영상입력장치를 이용하여 2차원 화상데이터로 저장한 후 디지털 화상처리기법을 이용하여 변위(S)를 예측하는 것이다. 일반적으로 Δt 가 짧을수록 보다 정확한 측정이 가능하나 particle 변위 측정의 불확실성에 기인한 오차가 커지게 된다. 즉, 입자변위가 작은 경우에는 측정가능한 dynamic range가 줄어들고 측정오차가 커지며, 변위가 큰 경우는 공간분해능이 떨어지게 된다.

유동화상(flow image)으로부터 정량적인 속도장을 구하는 데에는 입자변위 S 를 구하는 방법에 따라 다음과 같은 여러가지 방법들이 있다. 정량적인 속도장 측정의 초기단계에서 개발된 PSV(particle streak velocimetry)^(1,2)는 카메라의 노출시간을 길게 함으로써 형성된 입자궤적을 이용하여 속도를 구하는 방법으로서 매우 간단하지만 대부분 film을 사용함으로써 실시간 처리가 불가능하고 입자밀도

가 높을경우 궤적(streak)이 서로 겹치는 문제가 발생하며 추출된 속도의 방향결정에 어려움이 있다.

PIV(particle image velocimetry)⁽³⁻⁶⁾는 유동화상의 조사구간(interrogating window)내 산란입자들의 강도분포에 대한 Fourier변환이나 직접적인 상관계수 계산으로부터 조사구간의 평균속도를 구한다. 다중 노출된 화상(multiple-exposed image frame)을 이용할 경우에는 렌즈를 통하여 광학적으로 Fourier 변환시킨 후 카메라의 촛점에 형성된 Young's fringe를 컴퓨터에서 분석하여 속도를 얻거나 Young's fringe를 한번 더 렌즈를 통과시킴으로써 조사구간내 입자영상들의 자기상관함수(auto-correlation)를 광학적으로 처리하여 속도를 구할 수 있다. 일정 시간간격으로 얻어진 두 개의 화상을 이용할 경우에는 조사구간사이의 상호상관함수(cross-correlation)를 계산하고 그 값이 가장 큰 점을 평균변위로 간주함으로써 속도를 구한다. PIV는 입자밀도가 매우 큰 경우에 보통 적용되며 조사구간내의 평균속도를 추출함으로써 제한된 공간분해능을 지닌다. 이 PIV 방식은 광학시스템이 고가이며 속도벡터의 방향결정에 어려움이 따른다.

PTV(particle tracking velocimetry)⁽⁷⁻⁹⁾는 연속적으로 획득된 여러 장의 화상으로부터 각 입자위치를 추출한 후 그 입자 하나하나를 추적함으로써 입자의 변위를 결정한다.

현재 사용되고 있는 기존의 PTV 입자추적 알고리즘은 연속적인 4장 이상의 화상을 요구하며 각 입자의 모든 가능한 변위벡터를 고려하여 변위의 크기나 각도가 최소 분산을 갖는 트랙(track)을 유효한 변위로서 간주하게 된다. PTV는 각 입자의 화상이 분별가능할 정도의 입자밀도를 갖는 유동장에 매우 유용하며 속도의 방향성에 대한 모호성(ambiguity)이 없고 PIV 방식과는 달리 유동입자의 실제 속도를 얻을 수 있으나 유동속의 입자밀도에 제한을 받는다.

최근 선진국에서는 속도장 측정의 정확도와 측정가능한 속도범위를 확대시키기 위한 연구가 활발히 진행중이다. 또한 측정오차가 적고 효율적인 algorithm 개발 연구와 더불어 복잡한 난류유동의 예측도 시도되고 있다. 최근 유동속에 감온성 TLC 입자를 주입한 후 TLC 거동을 컴퓨터 및 영상처리기법을 이용하여 열유동현상의 온도장 분포도 함께 구하는 측정기법도 개발되었다.

본 연구에서는 PIV 방식보다 시스템 하드웨어의 가격이 저렴하고 유동입자의 정확한 속도추출이 가능하며, 2장의 입력영상만으로써 입자추적을 효율적으로 행할 수 있는 2-frame PTV 방식의 속도추출기법을 개발하였다.

본 연구에서의 입자경로(particle path) 결정과정은 2장의 연속 디지털 화상에 있는 입자들의 모든 가능한 변위벡터를 고려한 후, 각 변위벡터들에 대한 일치확률(match probability)을 정의하고 이를 반복계산하여 일치확률밀도가 높은 것을 속도벡터로 구하는 확률론적인 입자추적 방법이다. 이 방법은 측정정확도 향상 가능성이 크며, 측정가능한 속도범위가 넓다.

2. 4-프레임 입자추적 알고리즘

통상적인 4-프레임 PTV 방식의 기본원리는 첫번째 화상의 입자중심으로부터의 모든 가능한 경로들에 대한 길이와 각도변화의 최소화에 기초한다. 즉, 입자추적은 4장의 연속적인 화상사이에서 있을 수 있는 트랙(track)의 모든 가능한 조합을 고려하며, 각 경우에 대한 길이, 각도의 분산(variance)를 계산하고 그 중 가장 최소값을 지니는 트랙을 올바른 변위로 간주한다.

Fig. 1은 4-프레임 PTV의 입자추적방법을 개략적으로 도시한 것이다. 첫번째 화상(F¹)내의 추적하고자 하는 입자중심(x_i⁽¹⁾)이 Δt동안 이동할 수 있는 거리는 두번째 화상(F²)에서의 탐색반경(search radius) S₁으로 제한된다. 세번째 화상(F³)과 네번째 화상(F⁴)에서의 탐색반경 S₂, S₃는 S₁에 의해 결정되며, 보통 S₁ > S₂ > S₃로 정하는 것이 보통이다.

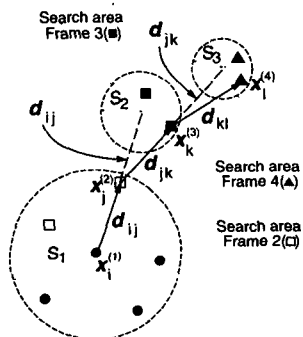


Fig. 1 Schematic diagram of the conventional 4-frame PTV tracking algorithm

F³에서 탐색구간의 중심은 목적점(x_i⁽¹⁾)과 F²에서 선택된 입자중심(x_j⁽²⁾) 사이의 트랙 d_{ij}의 직선투영(straight-line projection)에 의해 구해진다. F³에서 S₂내에 있는 임의의 한 점(x_k⁽³⁾)이 선택된다면 F⁴에서의 탐색구간 중심은 d_{kl}(x_j⁽²⁾와 x_k⁽³⁾ 사이의 변위 벡터)의 직선투영에 의해 구해지며, 다시 S₃내의 모든 점(x_l⁽⁴⁾)들에 대한 트랙(d_{kl})들을 고려하게 된다. 따라서 하나의 목적점(F¹에서의 시작점 x_i⁽¹⁾)에 대해서 다수의 트랙들의 조합이 형성되며 각 트랙들에 대해서 다음과 같은 분산계산을 행하게 된다.

$$\sigma_m^2 = \frac{1}{3} [\|d_{ij} - d_m\|^2 + \|d_{jk} - d_m\|^2 + \|d_{kl} - d_m\|^2] \quad (1)$$

여기서,

$$d_m = \frac{1}{3}(d_{ij} + d_{jk} + d_{kl})$$

$$d_{ij} = x_j - x_i \text{ etc.}$$

$$x_i \in F^1, x_j \in F^2, x_k \in F^3, x_l \in F^4$$

많은 트랙들 중에서 가장 작은 분산 σ_m을 갖는 트랙을 올바른 이동경로로 선택하게 된다.

3. 2-프레임 입자추적 알고리즘

PTV 방식의 경우 입자추적이 입자중심(particle centroid)에 대해서 행해지기 때문에 정확한 입자중심의 결정은 매우 중요한 일이다. 본 연구에서는 입자영상의 강도분포(intensity distribution)가 Gaussian 분포라고 가정하고 수직 및 수평좌표에 대한 강도분포의 1차 미분값을 이용하였다. 즉, 다음의 조건이 만족되는 지점을 입자중심 좌표로 간주하였다.

$$\frac{\partial I(x, y)}{\partial x} = \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

각 화상에서의 입자중심이 주어졌을 때 첫번째 화상(F¹)에서의 입자중심을 x_i라 하고 Δt 지난 후에 획득된 두번째 화상(F²)에서의 입자중심을 y_j라 한다. 다음으로 첫번째 화상에서의 모든 입자중심(x_i)들에 대한 두번째 화상에서의 입자중심(y_j)을 매칭(matching)시킨다. x_i에 대한 두번째 화상에서의 match point를 찾고자 할 때, 유효한 match candidate point(y_j)는 변위 벡터(displacement vector, d_{ij} = x_i - y_j)가 최대 movement threshold

T_m 내에 있는 점들이다. (Fig. 2)

$$\|d_{ij}\| < T_m, T_m = \|U_m\| \Delta t \quad (3)$$

여기서, T_m 은 4-frame PTV 알고리즘의 탐색반경 S_i 과 같은 개념으로서 유동조건에 따라 적절히 선정하여야 한다. 일반적으로 T_m 은 유동내 최대속도 U_m 과 비슷한 값으로 선정하며, U_m 보다 큰 값으로 선정할 경우 속도벡터의 recovery ratio와 error ratio는 거의 변하지 않으나 유효한 match candidate point들의 증가로 인하여 계산시간은 크게 증가하게 된다.

일치확률(match probability) P_{ij} 는 첫번째 화상에서의 x_i 가 두번째 화상에서의 식(3)을 만족하는 y_j 와 일치할 확률을 나타낸다. No-match probability P_i^* 는 x_i 가 두번째 화상에서의 어느 y_j 들과 일치하지 않을 확률을 나타낸다. 그러므로 고려하고 있는 목적점 x_i 에 대한 모든 확률치들의 합은 1이 되어야 한다.

$$\sum_j P_{ij} + P_i^* = 1 \quad (4)$$

유동내의 최대속도 U_m 에 따라 Fig. 2에서처럼 T_m 이 주어지고 목적점 x_1 에 대한 올바른 match point Fig. 2의 경우엔 y_1 를 찾고자 할 때, x_1 에 대한 match candidate point들은 T_m 내에 있는 y_1, y_2, y_3 이다. 따라서 x_1 과 관련된 일치확률은 P_{11}, P_{12}, P_{13} 이며 x_1 에서 y_1 으로 움직었다면 본 알고리즘을 이용한 계산결과는 P_{11} 이 1에 가까운 값을 나타낼 것이며 P_{12}, P_{13}, P_i^* 는 0에 가까운 값을 가질 것이다.

본 알고리즘은 일치확률 P_{ij} 의 반복계산에 의해 목적점 x_i 의 올바른 match point를 찾음으로써 입자추적을 행하기 때문에 P_{ij} 와 P_i^* 의 초기값을 다음과 같이 지정하였다.

$$P_{ij}^{(0)} = P_i^{*(0)} = \frac{1}{M+1} \quad (5)$$

여기서, M 은 식(3)을 만족하는 유효한 match candidate point들의 수를 나타낸다. Fig. 2의 경우, $M=3$ 이므로 식(3)에 의해서 $P_{11}^{(0)}, P_{12}^{(0)}, P_{13}^{(0)}, P_i^{*(0)}$ 은 각각 0.25가 된다.

다음으로 서로 유사운동(similar movement)을 행하는 x_i 의 이웃점(neighboring point) x_k 들을 neighborhood threshold T_n 을 이용하여 정의한다. (Fig. 3)

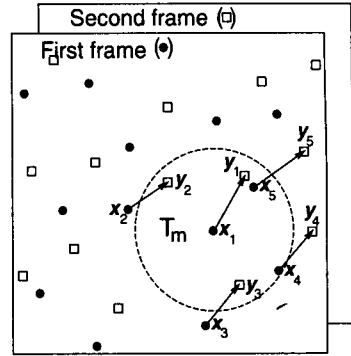


Fig. 2 Maximum movement threshold T_m

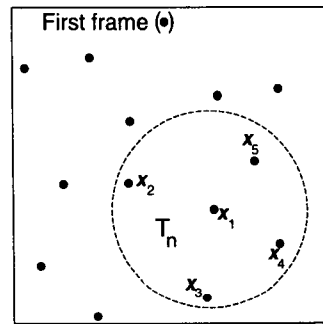


Fig. 3 Neighborhood threshold T_n

T_n 은 적분길이 척도(integral length scale)와 비슷한 개념으로서 유동내의 큰 움직임(large scale motion)을 나타낸다고 볼 수 있으며 본 알고리즘에서는 입자사이의 평균거리에 근거하여 추정하게 된다.

$$\|x_i - x_k\| < T_n \quad (6)$$

유사운동이란, Δt 동안 T_n 내의 입자들이 서로간에 많은 변위차이를 보이지 않고 비슷한 양상으로 움직이는 것을 의미한다. 즉, 식(6)과 다음의 조건이 만족될 때 x_k 와 y_i 사이의 변위벡터 d_{ki} 은 x_i 와 y_j 사이의 변위벡터 d_{ij} 와 유사하다고 할 수 있다.

$$\|d_{ij} - d_{ki}\| < T_q \quad (7)$$

여기서, T_q 는 quasi-rigidity threshold를 의미하며, 이웃점들의 허용가능한 변위변화 정도를 나타낸다. 즉, T_q 는 Taylor의 미소길이척도(Taylor's microscale)와 유사한 개념이며 본 알고리즘에서는 T_m 과 T_n 에 근거하여 화상내의 입자수 정보에 따라 가변적으로 추정하게 된다.

Fig. 3에서와 같이 T_n 이 정해졌다면 목적점 x_1 의

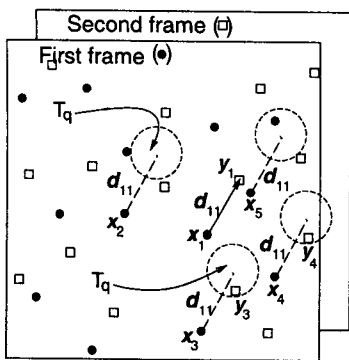


Fig. 4 Quasi-rigidity threshold T_q

이웃점들은 x_2, x_3, x_4, x_5 가 되며, Fig. 4에서처럼 T_q 가 주어졌을 때, 변위벡터 d_{11} 와 유사이동을 행한 변위벡터는 d_{33}, d_{44} 뿐이다. 따라서 neighboring match point는 $\{x_3, y_3\}, \{x_4, y_4\}$ 쌍이며 neighboring match probability P_{33}, P_{44} 는 $P_{11}(x_1$ 에서 y_1 으로의 일치확률)의 계산에 사용된다.

본 연구에 사용된 반복계산식의 형태는 다음과 같다.⁽¹⁰⁾

$$\tilde{P}_i^{(n)} = A \cdot P_i^{(n-1)} + B \cdot \sum_k \sum_l P_{kl}^{(n-1)} \quad (8)$$

여기서, A 와 B 는 상수($A < 1, B > 1$)이며 $(-)$ 심볼은 non-normalized probability값을 나타내며 윗첨자 $(n, n-1)$ 은 반복계산회수를 나타낸다. x_i 에 대한 올바른 match point를 찾고 있다고 할 때, 인덱스 k 는 식(6)을 만족하는 x_i 의 이웃점들 x_k 를 나타내며, 인덱스 l 은 식(7)를 만족하는 y_l 을 가르킨다. 따라서 식(8)은 목적점 x_i 에서 y_j 으로의 일치확률을 계산할 때, 전 스텝에서 계산된 일치확률 $P_i^{(n-1)}$ 와 식(6), (7)을 만족하는 모든 neighboring match probability $P_{kl}^{(n-1)}$ 의 합의 weighted sum으로써 반복계산됨을 의미한다.

Fig. 5은 neighboring match probability의 개념을 이용한 본 알고리즘의 입자추적방법을 도시한 것이다. 그림에서처럼 T_n, T_q 그리고 x_i 의 match candidate point가 y_j, y_l, y_r 이 되도록 T_m 이 정해져 있다면, 일치확률 P_{ij} 계산시, x_k 는 x_i 의 유일한 이웃점이며 d_{kl} 만이 d_{ij} 와 유사하다. 즉, P_{ij} 의 neighboring match probability는 $P_{kl}, P_{kl'}$ 이지만 식(7)를 만족하는 변위벡터는 d_{kl} 이기 때문에 P_{ij} 의 반복계산에는 P_{kl} 만이 사용된다.

각 x_i 와 관련된 식(3)을 만족하는 모든 y_j 에 대

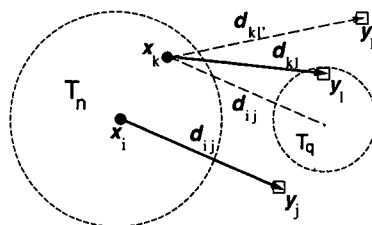


Fig. 5 Particle tracking by using the neighboring match probability

해서 식(8)을 이용하여 $\tilde{P}_i^{(n)}$ 를 계산한 후, 다음 반복계산에 사용될 normalized match probability $P_i^{(n+1)}$ 을 얻기위해 비정규화과정을 행하게 된다. 이 때, no-match probability $P_i^{*(n+1)}$ 는 각 x_i 에 대한 $\tilde{P}_i^{(n)}$ 의 반복계산이 끝난 후 식(4)에 의해 update된다.

$$P_i^{(n+1)} = \frac{\tilde{P}_i^{(n)}}{\sum_j \tilde{P}_j^{(n)} + P_i^{*(n)}}$$

$$P_i^{*(n+1)} = \frac{P_i^{*(n)}}{\sum_j \tilde{P}_j^{(n)} + P_i^{*(n)}} \quad (9)$$

이와 같은 과정을 통해 일치확률이 가장 높은 입자 변위벡터들을 구하여 시간차 Δt 로 나누어 줌으로써 속도장을 구하게 된다.

4. 개발된 2-프레임 PTV 알고리즘의 검증

개발된 알고리즘의 성능검증을 위해서 컴퓨터(SUN-SPARC2 Station) 모사실험을 수행하였으며 입력 유동화상은 강제와유동(forced vortex)의 컴퓨터 구현에 의해서 만들어졌다. 입자중심의 위치를 컴퓨터를 이용하여 임의생성(random number generation) 시킨 후, 각 입자의 중심위치에 대해 Gaussian 강도분포를 갖는 kernel matrix와 convolution을 적용함으로써 다음과 같은 입자 영상을 얻는다.

$$I(x) = I_0 \exp\left[-\frac{(x-x_c)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (10)$$

여기서, x_c 는 임의의 입자중심위치를 나타내며 σ 는 Gaussian 강도분포의 표준편차를 나타낸다. $\sigma = 1$ 화소이면, 입자산란광 I_0 의 68.3%가 1화소 반경내에 있음을 의미한다. 이와 같이 만들어진 입자 영상들은 컴퓨터 모사된 강제 와유동에 의해 이동되며 최종적으로 256×256 화소(pixel) 크기의 전체

유동화상이 얻어진다.

Fig. 6는 F^1 내의 입자수가 480개이고, $U_m=15$ pixels/frame일때, x_s 에 관련된 확률치들의 반복계산 단계 n 에 따른 변화를 나타낸다. 반복계산식 (식(8))에 사용된 상수 A, B 는 각각 0.3, 3.0이었다. $n=0$ 에서는 식(3)을 만족하는 y_j 의 수가 $7(M=7)$ 이며 식(5)에 따른 초기 확률치들은 같은 값 (0.125)을 갖는다. 반복계산이 수행됨에 따라 P_{s1} (x_s 이 y_1 과 일치할 확률)은 1에 가까운 값을 갖게 되고 나머지 확률치들은 급격히 0으로 감소하므로 이 경우의 올바른 변위벡터는 d_{s1} 이 된다.

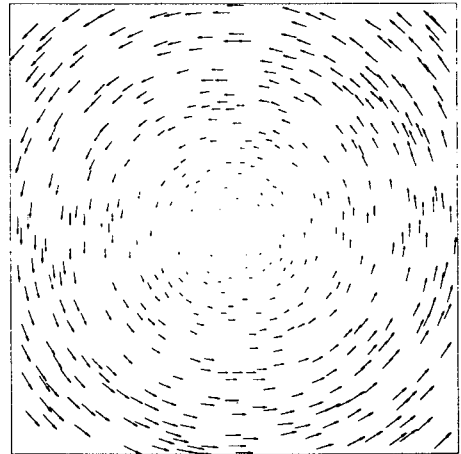
Fig. 7(a), (b)는 본 연구에서 개발한 2-프레임 PTV와 기존의 4-프레임 PTV 방법을 강제 와유동에 적용하여 추출된 속도벡터를 나타낸다. 강제 와유동의 특성상 최대속도 U_m 은 화상의 모서리부근에서 나타나며, 이 경우의 U_m 은 15 pixels/frame이다. 화상의 모서리부근에서 본 알고리즘에 의해서 추출된 속도벡터의 수가 4-프레임 PTV에 의한 경우보다 많음을 알 수 있는데, 이는 4-프레임 PTV의 경우 4장의 연속화상이 입자추적에 사용됨으로써 2-프레임 PTV의 경우보다 더 많은 입자들이 이 화상의 경계를 벗어나거나 새로 들어오기 때문이다.

Fig. 8은 화상내의 입자수 변화에 따른 각 알고리즘의 recovery ratio와 error ratio의 변화양상을 보여준다. Recovery ratio ϕ_r 은 총 추출가능한 속도벡터의 수에 대한 실제 추출된 정확한 벡터의 수의 비를 나타내며 이 값이 클수록 알고리즘의 성능이 뛰어난 것을 의미한다. Error ratio ϕ_e 는 전체 추출가능한 벡터의 수에 대한 error vector수의 비를 나타낸다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 본 알고리즘은 입자수가 많은 경우에도 4-frame PTV보다 작은

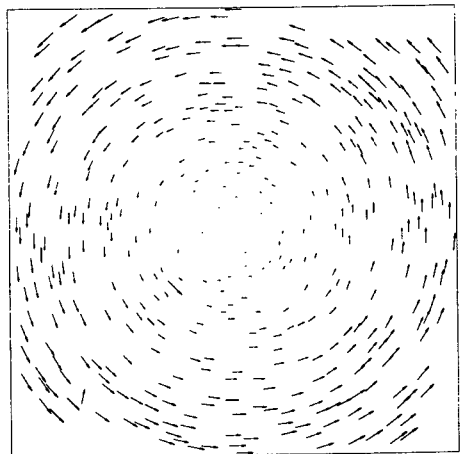
error ratio를 지니면서 더 높은 recovery ratio를 나타냄으로써 성능이 크게 향상됐음을 알 수 있다.

Fig. 9는 입자수 변화에 따른 각 알고리즘의 계산시간의 변화를 보여준다. 여기서, 본 알고리즘은 4-frame PTV보다 짧은 시간내에 더 많은 속도벡터를 추출함을 알 수 있다. 예를 들어서, 입자수가 1000개일 때, 4-frame PTV의 계산시간이 본 알고리즘보다 약 2.3배나 더 많이 걸림을 알 수 있다.

Fig. 10은 유동내의 최대속도 U_m 에 따른 ϕ_r, ϕ_e 의 변화를 나타낸다. 강제와유동의 경우 중심에서 0의 속도를 갖고 linear velocity profile을 나타내기 때문에 유동의 dynamic range는 바로 U_m 과 직



(a) Present 2-frame PTV method : $\phi_r=100\%$, $\phi_e=0\%$



(b) 4-frame PTV method : $\phi_r=95\%$, $\phi_e=0.5\%$

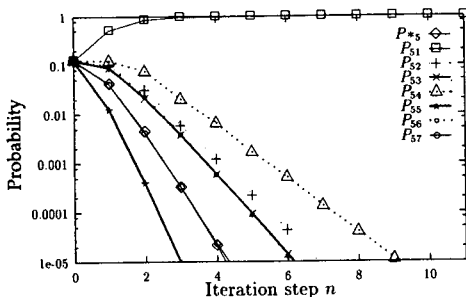


Fig. 6 Variation of probability vs. number of iteration step

Fig. 7 Recovered velocity vector field of forced vortex flow

결된다. 따라서 U_m 이 큰 경우에도 추적알고리즘이 높은 recovery ratio와 낮은 error ratio를 보인다면 그 알고리즘은 넓은 dynamic range를 지닌다고 할 수 있다. 여기서 보면 U_m 이 큰 경우에도 높은 ϕ_r 과 낮은 ϕ_e 를 나타냄으로써 본 연구에서 개발된 2-frame PTV 알고리즘의 dynamic range가 기존의 4-frame PTV 방식보다 크울 알 수 있다. 예를 들어 $U_m=30$ pixels/frame일 때, 2-frame PTV는 약 92%의 recovery ratio를 보인 반면, 4-frame

PTV의 recovery ratio는 25% 정도이다.

5. 결 론

본 연구에서는 2장의 연속적인 순간화상으로부터 각 화상내 입자중심사이의 일치확률을 이용하여 확률론적인 입자추적을 행함으로써 입자의 유동속도를 추출하는 새로운 2-프레임 PTV 알고리즘을 개발하였다. 강제 와유동장에 대한 컴퓨터 모사실험을 통하여 개발된 2-프레임 PTV 알고리즘을 기존의 4-프레임 PTV 알고리즘과 비교검증한 결과, 개발된 2-프레임 PTV 알고리즘의 성능이 매우 우수한 것으로 밝혀졌다. 즉 본 알고리즘이 4-프레임 PTV 방식에 비해 작은 error ratio와 더 큰 recovery ratio를 가지며 dynamic range가 크고 계산시간도 크게 단축시켰다.

후 기

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제와 현대중공업(주) 과제 연구비에 의해 연구되었다.

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) Kobayashi, T., Saga, T. and Segawa, S., 1986, "Some Considerations on Automated Image Processing of Pathline Photographs," *Flow Visualization* 4, pp. 241~246.
- (3) 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.
- (4) Willert, C. E. and Gharib, M., 1991, "Digital Particle Image Velocimetry," *Exp. in Fluids*, Vol. 10, pp. 181~193.
- (5) Buchhave, P., 1992, "Particle Image Velocimetry—Status and Trends," *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, Vol. 5, pp. 586~604.
- (6) Shigeru, M. and Hiroshi, S., 1992, "Measure-

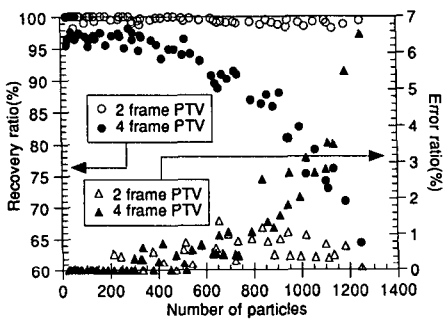


Fig. 8 Variation of the recovery ratio(ϕ_r) and error ratio(ϕ_e)

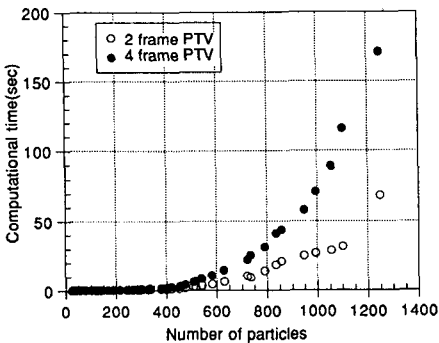


Fig. 9 Comparison of the computation time vs. number of particles

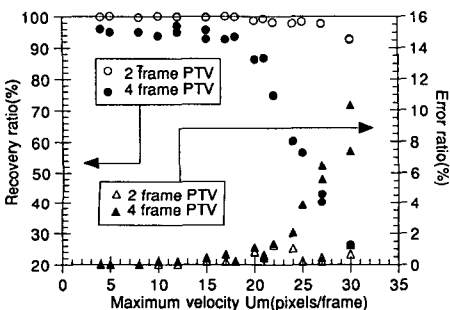


Fig. 10 Recovery ratio(ϕ_r) and error ratio(ϕ_e) vs. U_m

- ment of Unsteady Separated Flows on a Blunt Plate by a Fourier Transform Method," *Flow Visualization* 6, pp. 710~714.
- (7) Kasagi, N. and Nishino, K., 1991, "Probing Turbulence with Three-Dimensional Particle-Tracking Velocimetry," *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, Vol. 4, pp. 601~612.
- (8) 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.
- (9) Hassan, Y. A., Cnaan, 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.
- (10) Ballard, D. H. and Brown, C. M., 1982, *Computer Vision*, Prentice Hall, New Jersey, pp. 195~225.