

# 입자가 포함된 유동장에서 유체속도와 입자속도의 동시 측정기법

김 동 옥, 이 대 영<sup>†</sup>, 이 윤 표

한국과학기술연구원 열유동제어연구센터

## Simultaneous Measurement of Fluid Velocity and Particle Velocity in a Particle-Containing Fluid Flow

Dong-Xu Jin, Dae-Young Lee<sup>†</sup>, Yoon-Pyo Lee

Thermal/Flow Control Research Center, Korea Institute of Science & Technology(KIST), Seoul 136-791, Korea

(Received December 27, 2004; revision received February 14, 2005)

**ABSTRACT:** A novel method for simultaneously measuring the fluid velocity and the large particle velocity in a particle-containing fluid flow is developed in this study. In this method, the fluid velocity and the large particle velocity are measured by PIV and PTV, respectively. The PIV and PTV images are obtained from the same flow images. Since a PIV result represents the average displacement of all particles in an interrogation area, it will include an error caused by the relative displacement between the large particles and the fluid. In order to reduce the false influence of large particles on the PIV calculation, the mean brightness of small PIV particle images is substituted to the locations of large particles in the PIV images. The simulation results showed that the new method significantly reduces the PIV error caused by the large particles even at the case where the large particles occupy area fraction as large as 20% of the full image.

**Key words:** Fluid(유체), Large particle(큰 입자), PIV(입자영상속도법), PTV(입자추적속도법), Simultaneous measurement(동시 측정)

### 기 호 설 명

$A$  : 면적 [pixel<sup>2</sup>]  
 $d$  : 변위 [pixel]  
 $E_{mean}$  : 평균 오차 [-]  
 $f$  : 첫번째 탐색영역의 밝기 함수  
 $g$  : 두번째 탐색영역의 밝기 함수  
 $l_p$  : 큰 입자의 특성길이 [pixel]  
 $R$  : 상호상관함수

$s$  : 선형이동벡터 [pixel]  
 $X$  : 위치벡터 [pixel]  
 $Y$  : 위치벡터 [pixel]

### 그리스 문자

$\alpha$  :  $f$ 의 큰 입자에 대한 최적 대치값  
 $\beta$  :  $g$ 의 큰 입자에 대한 최적 대치값

### 1. 서 론

필터의 특성이나 입자 파울링(fouling)을 고찰할 때 유동 속 입자의 상대적인 거동, 즉 동일시

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5674; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: ldy@kist.re.kr

점에서의 유체와 입자 각각의 속도를 분석하여야 할 필요가 있다. 특히 입자와 유체의 밀도차가 크거나 입자의 크기가 어느 정도 이상이면 부력과 관성으로 인해 유체와 입자 사이의 속도차가 커지게 되므로 입자의 속도와 유체의 속도를 구분하여 측정하여야 한다. 안정된 유동이거나 유동의 주기 반복성이 명확한 경우에는 유체의 속도와 입자의 속도를 따로 측정하여 비교할 수도 있지만, 이렇지 못할 경우에는 동일시점에서의 유체속도와 입자속도를 한꺼번에 측정하여야 한다.

일반적으로 유체의 속도는 PIV로, 원래 유체에 들어 있는 입자의 속도는 PTV로 측정할 수가 있다. 이때 유체의 속도측정을 위해 유동에 추가되는 PIV 입자들은 원래 유체에 포함된 입자들과 명확하게 구별될 수 있도록 충분히 작게(직경 대비 원래 입자의 약 0.1 정도<sup>(1)</sup>) 선택되어야 한다. 따라서 이하 본문에서는 원래 유체에 포함된 입자는 큰 입자로, PIV 입자는 작은 입자로 칭한다.

Choi et al.<sup>(2)</sup>은 두 대의 CCD 카메라를 사용하여 원관 내에서 단일 입자/기포와 주위 유체와의 거동을 연구하였다. 유체의 속도는 PIV로, 큰 입자의 속도는 PTV로 측정하였으며 PIV와 PTV 측정시의 상호간섭을 줄이기 위해 형광 PIV 입자를 사용하였고 PTV 조명과 카메라 앞에는 Band pass 필터를, PIV 카메라 앞에는 High pass 필터를 사용하였다.

Wereley et al.<sup>(1)</sup>은 PIV와 PTV 기법을 적용하여 회전필터에서 회전축에 수직인 단면의 유체속도와 큰 입자의 속도를 각각 측정하였다. 그들은 한대의 CCD 카메라로 작은 입자와 큰 입자의 이미지를 동시에 획득한 후 큰 입자들의 이미지만 추출하여 PTV 이미지로, 큰 입자가 제거된 이미지는 PIV 이미지로 사용하였다. 실험에서 직경이 150  $\mu\text{m}$ 인 큰 입자의 체적농도는  $10^{-4}(\text{m}^3 \text{ particle}/\text{m}^3 \text{ fluid})$ 이라고 보고하고 있는데, 이를 PIV 이미지에서 큰 입자들이 차지하는 면적 백분율로 환산하면, 레이저 평면광의 두께를 1~5 mm 정도라고 추정할 때, 대략 0.1~0.5% 정도로 상당히 작은 값이다.

PIV로 구한 속도는 통계적으로 탐색영역 내 모든 입자들의 평균 속도이다. 한대의 CCD 카메라로 동시에 PIV와 PTV 이미지를 획득하여 각각 유체의 속도와 큰 입자들의 속도를 구할 때 PIV의 결과에 큰 입자들의 속도정보도 어느 정도 포

함될 수밖에 없으므로 만약 큰 입자의 속도가 유체의 속도와 다르다면 PIV 기법으로 구한 속도장이 실제의 유체속도를 정확히 대표할 수가 없게 된다. 따라서 큰 입자가 포함된 유체의 정확한 속도측정을 위해서는 가능한 한 큰 입자들이 가진 속도정보가 PIV 분석에 포함되지 않도록 하여야 한다. 본 연구에서는 큰 입자들의 농도가 매우 커서 이들이 전체 PIV 이미지에서 차지하는 면적이 수십 %가 되는 경우에 대해서도 한대의 CCD 카메라로 PIV와 PTV 측정을 동시에 할 수 있도록 PIV 측정에 대한 큰 입자의 영향을 최소화하는 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 유체속도와 입자속도의 동시 측정기법

PIV 방법 중 가장 많이 이용되는 것은 이중프레임, 상호상관법(single exposure/double frame, cross-correlation)이다. 이 방법은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 일정시간 간격을 두고 취득한 두 개의 PIV 추적입자 이미지를 이용하여, 입자군 사이의 상대적인 변위벡터를 구하는 방법에 기초한다. 입자 변위벡터의 분석은 각각의 이미지를 일정 크기의 영역으로 나눈 미소조사구간(탐색영역) 단위로 행하여지는데, 첫번째 이미지의 탐색영역  $A_f$ 에 비하여 두번째 이미지의 탐색영역  $A_g$ 의 크기는  $A_f$ 에 포함된 입자군 변위의 가능한 최대범위를 포함할 수 있을 정도로 충분히 크게 취한다. 미소조사구간의 평균 변위는  $A_f$ 를  $A_g$  위에서 움직여 가면서 입자분포가 최대한 일치하게 되는 상대적인 변위를 구함으로써 얻을 수 있다.

입자분포의 일치 정도는 다음과 같은 상호상관함수(cross-correlation function)를 이용하여 구한다.

$$R(s) = \int_{A_f} f(x)g(x+s)dx \quad (1)$$

$f$ 와  $g$ 는 처음 탐색영역과 두번째 탐색영역의 밝기 함수로서 입자분포를 나타내며,  $s$ 는 탐색영역  $g$ 에 대한 탐색영역  $f$ 의 선형이동벡터이다. 통계적 관점에서 볼 때  $f$ 와  $g$ 가 가장 잘 일치하게 되면 상호상관함수는 최대값을 가지게 된다.<sup>(3)</sup>

한편 Fig. 1에 나타난 바와 같이 추적입자와 속도가 다른 큰 입자가 탐색영역에 포함되어 있을

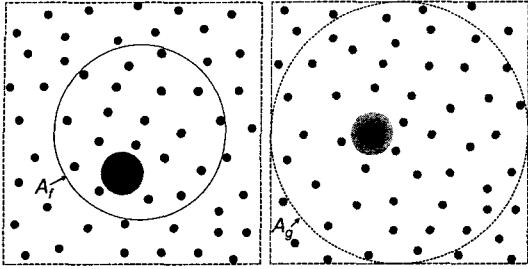
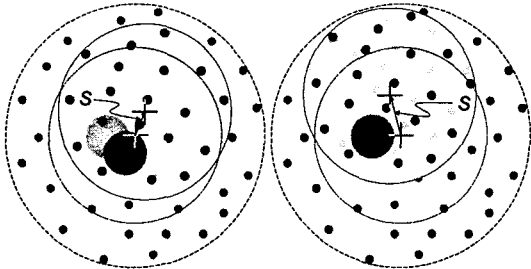
(a) Interrogation area  $f$  (b) Interrogation area  $g$ 

Fig. 1 Schematics of serial images for PIV analysis of a particle-containing fluid flow.



(a) Best match for the fluid (b) Best match for the large particle

Fig. 2 Correlating process between interrogation areas  $f$  and  $g$  in the PIV calculation.

경우, 상호상관함수의 크기가 큰 입자의 존재에 의하여 영향을 받게 된다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 상호상관함수는 PIV 입자군이 가장 잘 일치하는 변위와 큰 입자가 일치하게 되는 변위의 두 곳에서 각각 극소 최대값을 가지게 되며, 결과적으로 PIV 입자군의 변위가 큰 입자의 변위에 의하여 왜곡되어 구하여지는 결과가 발생하게 된다. 취득한 원시이미지에서 큰 입자를 제거하고 그 위치에 밝기값으로 0을 대치하더라도 밝기가 0인 부분끼리 상관관계를 가지게 되므로 큰 입자의 변위가 여전히 상호상관함수의 크기에 영향을 미치게 된다.

PIV 결과가 큰 입자 속도의 영향을 받지 않도록 하기 위해서는, 원시이미지로부터 큰 입자를 제거한 후, 큰 입자들의 제거로 인해 생긴 빈 자리를 큰 입자에 의한 상관함수의 왜곡을 최소화할 수 있는 상수의 밝기값으로 대치해 주는 것이

필요하다. 본 연구에서는 이 최적 대치값을 구하기 위하여 탐색영역  $f$ 와  $g$ 에 각각 1개의 큰 입자만 있는 간단한 경우와 큰 입자가 여러 개 존재하는 경우로 나누어 고찰한다.

한편 원시이미지에서 분리해 낸 큰 입자들의 이미지로부터 큰 입자들의 속도를 일치확률방식의 Two-frame PTV<sup>(4)</sup>를 이용하여 구할 수 있다. 밝기와 크기의 차이로부터 큰 입자들을 쉽게 구별할 수 있는 경우, PTV의 정확성은 작은 PIV 입자의 존재로 인한 영향을 거의 받지 않는다.

## 2.1 큰 입자가 1개 있는 경우

먼저 탐색영역  $f$ 에만 1개의 큰 입자가 있는 경우의 상관함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_f = \int_{A_f - A_p} f(x)g(x+s)dx + \alpha \int_{A_p} g(x+s)dx \quad (2)$$

$A_p$ 는 입자가 위치한 영역이며,  $\alpha$ 는 큰 입자의 영상을 대치한 밝기값이다. 일반적으로  $A_p \ll A_f$ 이므로, 큰 입자가 있는 경우와 없는 경우의 상관함수 차를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta R_f &= R_f - R \\ &= \int_{A_p} [\alpha - f(x)]g(x+s)dx \\ &\approx A_p [\alpha - f(X)]g(X+s) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $X$ 는 큰 입자 중심의 위치벡터이다.

식(3)의  $\Delta R_f$ 는 큰 입자의 존재로 인하여 원래의 상관함수가 왜곡되는 정도를 나타내는 값이다. PIV 결과에 대한 큰 입자의 영향을 최소화하기 위해서는  $\Delta R_f$ 의 절대치를 최소화하도록 대치값  $\alpha$ 를 정해 줄 필요가 있다. 임의의 큰 입자위치와 유체변위에 대해  $\Delta R_f$ 의 절대치를 최소화하는  $\alpha$ 는 최소자승법에 의해 다음의 관계식을 만족시켜야 한다.

$$-\frac{d}{d\alpha} \int_{A_f} dX \int_{A_s} \Delta R_f^2 ds = 0 \quad (4)$$

여기서  $A_s$ 는 선형이동벡터  $s$ 의 범위로서 탐색영

역간 상대변위의 가능한 최대 범위이다.

식(3)을 식(4)에 대입하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} &-\frac{d}{d\alpha} \int_{A_f} dX \int_{A_s} \Delta R_f^2 ds \\ &= 2A_f^2 \int_{A_f} [\alpha - f(X)] dX \int_{A_s} g^2(X+s) ds \quad (5) \\ &= 0 \end{aligned}$$

비압축성 유동의 PIV 측정에서 이상적인 추적 입자는 균일하게 분포된 유동패턴을 유지하여야 하며, 그렇지 않을 경우 상호상관함수의 크기가 유동장뿐만 아니라 입자 분포형태의 영향을 받아 오차가 발생한다.<sup>(6)</sup> 따라서 PIV 이미지에서 밝기는 균일하게 분포되어야 하며, 이 조건이 만족되는 경우, 영역  $A_s$ 를 충분히 크게 선택하면,  $X$ 에 관계없이 아래의 식이 성립한다.

$$\frac{1}{A_s} \int_{A_s} g^2(X+s) ds \approx \text{const} \equiv \langle g^2 \rangle \quad (6)$$

위의 결과로부터 식(5)를 만족시키기 위한  $\alpha$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{A_f} \int_{A_f} f(X) dX \equiv \langle f \rangle \quad (7)$$

이 결과는 탐색영역  $f$ 에 하나의 큰 입자만 있을 때, 그 입자를 대치할 최적의 밝기는  $f$ 의 평균 밝기임을 의미한다.

다음에 탐색영역  $g$ 에만 1개의 큰 입자가 있고,  $f$ 에는 큰 입자가 없는 경우를 고찰한다.  $g$ 의 큰 입자가 탐색영역  $f$ 와 겹칠 때에만 큰 입자의 존재로 인한 상관함수의 차이가 발생하는 것을 고려하여, 식(3)과 유사하게 상관함수의 차이를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta R_g \approx A_f f(Y) [\beta - g(Y+s)] \quad (8)$$

여기서  $Y$ 는 큰 입자의 위치벡터로 Fig. 3에 나타난 바와 같으며,  $\beta$ 는  $g$ 의 큰 입자 이미지를 대치하는 밝기값이다.

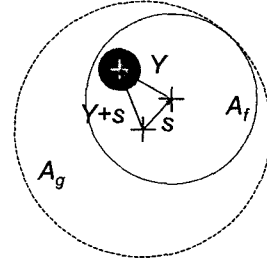


Fig. 3 Interrogation areas of  $f$  and  $g$ .

최소자승법에 의해 임의의 입자위치와 유체변위에 대해 식(8)의 절대값을 최소화하는 대치값  $\beta$ 는 아래의 식을 만족시켜야 한다.

$$\frac{d}{d\beta} \int_{A_s} ds \int_{A_f} \Delta R_g^2 dY = 0 \quad (9)$$

식(8)을 식(9)의 좌변에 대입하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\frac{d}{d\beta} \int_{A_s} ds \int_{A_f} \Delta R_g^2 dY = \\ &2A_f^2 \int_{A_f} f^2(Y) dY \int_{A_s} [\beta - g(Y+s)] ds \end{aligned} \quad (10)$$

식(6)에서와 유사하게 PIV 이미지에서 밝기의 균일한 분포가 만족되는 경우  $Y$ 에 관계없이 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{A_s} \int_{A_s} g(Y+s) ds \approx \text{const} \equiv \langle g \rangle \quad (11)$$

식(11)을 식(10)에 대입하면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} &\frac{d}{d\beta} \int_{A_s} ds \int_{A_f} \Delta R_g^2 dY = \\ &2A_f^2 A_s (\beta - \langle g \rangle) \int_{A_f} f^2(Y) dY \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)를 식(9)의 좌변에 대입하고  $f^2$ 에 대한 적분이 0보다 크음을 고려하면 다음 결과를 얻는다.

$$\beta = \langle g \rangle \quad (13)$$

식(13)의 유도과정을 검토하면, 식(13)의 결과가 탐색영역  $f$  내 큰 입자의 존재에 영향 받지 않음을 알 수 있다. 이는 탐색영역  $f$ 와  $g$ 에 각각 큰 입자가 1개씩 있는 경우에도 탐색영역  $g$ 의 큰 입자 밝기에 대한 최적의 대치값은  $g$ 의 평균값임을 의미한다. 또한 탐색영역  $g$ 의 큰 입자에 밝기  $\langle g \rangle$ 을 대입하는 경우에도 식(6)이 여전히 만족되므로, 탐색영역  $g$ 에 큰 입자가 있을 때에도  $f$ 에 있는 큰 입자의 밝기를 대치할 최적 밝기는  $f$ 의 평균값이 된다.

서두에서 언급한 바와 같이 큰 입자들의 변위가 상호상관함수에 영향을 미치므로, 큰 입자들에 의한 오차를 최소화하려면, 가능한 한 탐색영역  $f$ 의 큰 입자들이 탐색영역  $g$ 에서 자신에 대응하는 부분을 찾기 어렵게 하여야 한다. 이를 위해서는 큰 입자들을 주위의 배경과 너무 구별되지 않도록 평범하게 만들어야 하며, 이때 통계적으로 주위 배경의 평균 밝기가 큰 입자 이미지를 대치할 최적의 밝기가 되는 것이다.

2.2 다수의 큰 입자가 있는 경우

탐색영역  $f$ 에만  $n(n > 1)$ 개의 큰 입자가 있고  $g$ 에는 큰 입자가 없을 때, 상관함수의 차는 다음과 같다.

$$\Delta R_f \approx \sum_{i=1}^n A_{p,i} [\alpha - f(X_i)] g(X_i + s) \quad (14)$$

여기서  $X_i$ 과  $A_{p,i}$ 는 각각  $i$ 번째 큰 입자의 위치 벡터와 면적이다.

최소자승법에 의해 모든 큰 입자들에 대해  $\Delta R_f$ 의 절대값을 최소화하는  $\alpha$ 는 아래의 식을 만족시켜야 한다.

$$\frac{d}{d\alpha} \int_{A_f} dX_1 \cdots \int_{A_f} dX_n \int_{A_s} \Delta R_f^2 ds = 0 \quad (15)$$

식(14)를 위 식의 좌변에 대입하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{d\alpha} \int_{A_f} dX_1 \cdots \int_{A_f} dX_n \int_{A_s} \Delta R_f^2 ds = 2 \int_{A_f} \sum_{i=1}^n A_{p,i} [\alpha - f(X_i)] G_i dX_i \quad (16)$$

여기서  $G_i$ 는 아래의 식을 간략하게 표시한 것이다.

$$\begin{aligned} G_i &= \int_{A_f} dX_1 \cdots \int_{A_f} dX_{i-1} \int_{A_f} dX_{i+1} \cdots \\ &\quad \int_{A_f} dX_n \int_{A_s} \sum_{j=1}^n A_{p,j} g(X_i + s) g(X_j + s) ds \\ &= A_f^{n-2} \sum_{j=1, j \neq i}^n A_{p,j} \int_{A_f} dX_j \int_{A_s} g(X_i + s) g(X_j + s) ds \\ &\quad + A_f^{n-1} A_{p,i} \int_{A_s} g^2(X_i + s) ds \end{aligned} \quad (17)$$

식(6)과 식(11)을 식(17)에 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} G_i &= A_f^{n-1} \langle g \rangle \sum_{j=1, j \neq i}^n A_{p,j} \int_{A_s} g(X_i + s) ds \\ &\quad + A_f^{n-1} A_{p,i} A_s \langle g^2 \rangle \\ &= A_f^{n-1} A_s \left( \langle g \rangle^2 \sum_{j=1, j \neq i}^n A_{p,j} + \langle g^2 \rangle A_{p,i} \right) \\ &= \text{const} > 0 \end{aligned} \quad (18)$$

식(18)을 식(16)에 대입한 후 다시 식(15)의 좌변에 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$\left( \sum_{i=1}^n A_{p,i} G_i \right) \int_{A_f} [\alpha - f(X_i)] dX_i = 0 \quad (19)$$

위 식이 만족되기 위해서는 식(7)이 만족되어야 함을 알 수 있다. 따라서  $f$ 에 여러 개의 큰 입자들이 있을 때에도, 1개의 큰 입자가 있는 경우와 마찬가지로, 모든 큰 입자들의 위치에 대입되는 최적의 밝기는  $f$ 의 평균 밝기임을 알 수 있다.

한편  $f$ 에는 큰 입자가 없고  $f$ 와 겹치는  $g$ 의 영역 내에  $k(k > 1)$ 개의 큰 입자가 있는 경우의 상호상관함수 차이는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta R_g \approx \sum_{i=1}^k A_{p,i} f(Y_i) [\beta - g(Y_i + s)] \quad (20)$$

여기서  $A_{p,i}$ 과  $Y_i$ 는  $i$ 번째 큰 입자의 면적과 위치 벡터이다.

최소자승법에 의해 식(20)의 절대값을 최소화 하는  $\beta$ 는 아래의 식을 만족시켜야 한다.

$$\frac{d}{d\beta} \int_{A_s} dY_1 \cdots \int_{A_s} dY_k \int_{A_s} \Delta R_g^2 ds = 0 \quad (21)$$

위 식의 좌변에 식(20)을 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\beta} \int_{A_s} dY_1 \cdots \int_{A_s} dY_k \int_{A_s} \Delta R_g^2 ds = \\ 2 \int_{A_s} \sum_{i=1}^k F_i dY_i \int_{A_s} [\beta - g(Y_i + s)] ds \end{aligned} \quad (22)$$

여기서  $F_i$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_i = \int_{A_s} dY_1 \cdots \int_{A_s} dY_{i-1} \int_{A_s} dY_{i+1} \cdots \\ \int_{A_s} A_{p,i} \sum_{j=1}^k A_{p,j} f(Y_i) f(Y_j) dY_k \end{aligned} \quad (23)$$

식(11)을 이용하여 식(22)의 우변을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} 2 \int_{A_s} \sum_{i=1}^k F_i dY_i \int_{A_s} [\beta - g(Y_i + s)] ds = \\ 2A_s(\beta - \langle g \rangle) \sum_{i=1}^k \int_{A_s} F_i dY_i \end{aligned} \quad (24)$$

식(24)의 우변에서  $(\beta - \langle g \rangle)$ 를 제외한 부분이 0보다 크기 때문에 식(24)를 식(21)의 좌변에 대입하면 바로 식(13)을 얻을 수 있다. 즉,  $g$ 에  $k$ 개의 큰 입자들이 있을 때도 식(13)은 여전히 성립된다.

탐색영역  $f$ 와  $g$ 에 각각 1개의 큰 입자가 존재할 때와 마찬가지로 탐색영역  $f$ 의 큰 입자 존재 여부에 상관없이 식(13)이 성립됨을 알 수 있다. 또한 탐색영역  $g$ 의 모든 큰 입자들에게 상수의 밝기  $\langle g \rangle$ 를 대입하면 식(6)과 식(11)이 여전히 성립되므로  $f$ 에 있는 큰 입자들의 최적의 밝기도 식(7)로 구하여진다. 즉, 탐색영역  $f$ 와  $g$ 에 모두 큰 입자들이 존재할 때에도 큰 입자를 대치할 최적의 밝기는 각각  $f$ 와  $g$ 의 평균값이다.

큰 입자들이 차지하는 면적이 탐색영역의 면적에 비하여 훨씬 작고 또한 실제 경우에는 큰 입자들에 의해 가려진 부분의 밝기 정보를 알 수 없으므로  $f$ 와  $g$ 의 평균값은 탐색영역에서 큰 입자들을 제외한 부분만을 이용하여 구한다.

### 3. 계산결과 및 고찰

앞에서 얻은 결과의 정확성을 검증하기 위해 PIV, PTV의 동시 측정과정을 모사하였다. 계산에서 큰 입자들의 이미지를 무작위로 생성하여 표준 PIV 이미지<sup>(6)</sup>에 추가하였다. 큰 입자들은 크기가  $7 \times 7$ 픽셀(pixel)인 정4각형이고 따로 언급이 없으면 전체 PIV 이미지에서 큰 입자들의 면적분율은 20%이다. PIV 계산에서 탐색영역의 크기는  $32 \times 32$ 픽셀로 하였고 주변의 탐색영역과는 50% 겹치게 하였다.

Fig. 4는 PIV, PTV 동시 측정 계산결과를 나타낸다. PIV, PTV 통합 이미지에서 4각형의 흰 점들은 큰 입자들을 나타내고 있다. 유체의 최대 변위는 6.2픽셀이고 큰 입자들은 모두 동일한 변위를 갖도록 설정하였다. 큰 입자들의 밝기에 작은 PIV 입자들의 평균 밝기를 대입하여 구한 PIV 결과는 큰 입자들이 없을 때의 PIV 결과와 거의 같았다. 큰 입자의 밝기에 0을 대입한 PIV 결과에서는 상당한 오차가 있음을 볼 수 있는데, 이때 오차는 상당히 작은 것과 상당히 큰 것의 두 종류로 뚜렷하게 나뉘어져 있으며, 이중 큰 오차 벡터들은 큰 입자와 유체 간의 상대변위 벡터와 거의 같음을 확인할 수 있다. 이는 큰 오차가 발생하는 탐색영역에서 최대 상관함수의 위치는 아예 큰 입자의 변위에 해당되는 위치로 옮겨갔음을 설명한다.

일부 위치에서 PIV로 구한 유체의 변위가 큰 입자의 변위와 거의 같게 나타나는 원인을 살펴보기 위하여 큰 입자의 밝기를 0으로 할 때 큰 입자와 유체 간의 상대변위  $d_r$ 에 따른 상관함수의 변화를 Fig. 5에 개념적으로 나타내었다. 여기서  $R_0$ 은 탐색영역  $f$ 와  $g$ 가 전혀 일치하지 않을 때의 상관함수값이다. 큰 입자의 밝기가 0이므로 큰 입자와 대응되는 부분은 상관함수의 계산에서 제외되며 큰 입자들이 서로 완전히 겹쳐질 때 제외되는 부분이 가장 작게 된다. 따라서 상관함수는 큰 입자의 변위에 해당되는 위치에서 또 하나

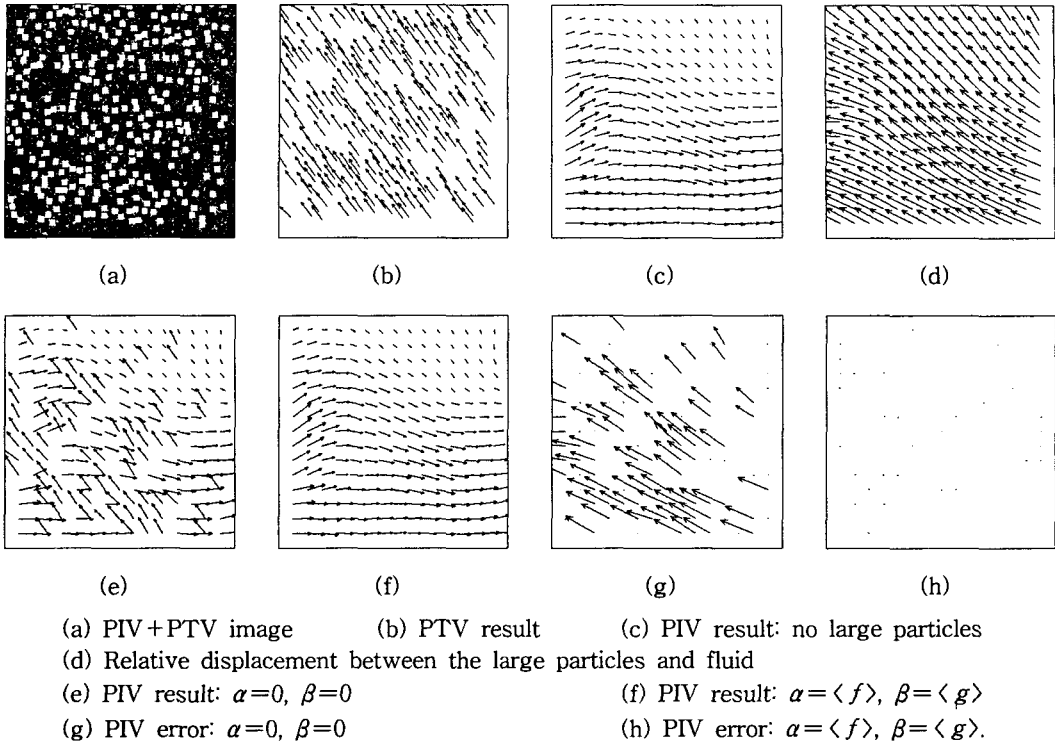


Fig. 4 Simulation results of PIV and PTV simultaneous measurement.

의 국소 최대치를 가지게 된다. 상대변위가 작으면 유체의 변위에 해당되는 위치에서 큰 입자들이 상당부분 서로 겹쳐지게 되므로 전체 탐색영역에서 상관함수의 최대치는 여전히 유체의 변위에 해당되는 위치에서 나타나게 된다. 상대변위

가 증가함에 따라 유체변위에 해당되는 위치의 상관함수 계산에서 제외되는 면적도 점차 커지게 되며 따라서 이 지점에서의 상관함수값도 점점 작아지게 된다. 상대변위가 어느 정도 커지면 큰 입자 변위에 해당되는 위치의 상관함수가 유체

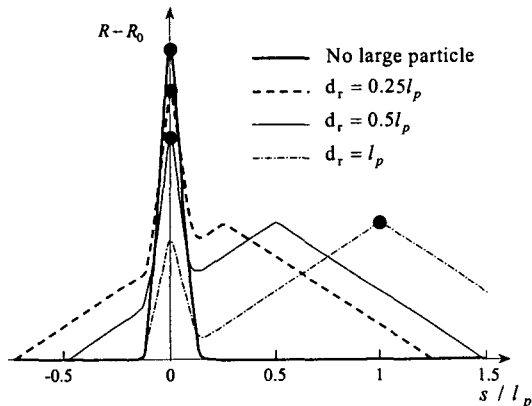


Fig. 5 Correlations for the different relative displacements between the large particles and fluid at  $\alpha=0, \beta=0$ .

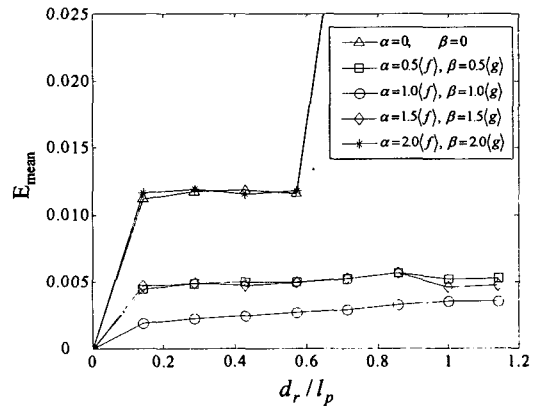


Fig. 6 Variation of the mean PIV error over the brightness of large particles.

변위에 해당되는 상관함수보다 더 커질 수도 있는데 이렇게 되면 유체의 변위가 큰 입자의 변위로 갑자기 대체되면서 Fig. 4(g)에서처럼 큰 PIV 오차가 발생하게 된다.

Fig. 6은 PIV 이미지에서 큰 입자 위치에 각기 다른 밝기를 대입하여 구한 PIV 결과의 평균 오차를 보여주고 있다. 평균 오차는 다음과 같이 정의하였다.

$$E_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{d_i - d_{ai}}{l_p} \right| \quad (25)$$

여기서  $N$ 은 탐색영역의 개수이고  $d_i$ 와  $d_{ai}$ 는 각각  $i$ 번째 탐색영역에서 유체변위의 계산값과 정확한 값이다. 큰 입자의 밝기가 작은 입자들의 평균 밝기와 같을 때 PIV 결과의 평균 오차가 가장 작았고 두 종류 입자들의 밝기 차이가 클수록 PIV 결과의 평균 오차는 크게 나왔다. 큰 입자의 밝기가 작은 입자 평균 밝기의 0배와 2배일 때 평균 오차는 처음엔 완만히 변하다가  $d_r/l_p$ 가 0.6인 점을 지나서 급속히 증가하는데 이는 큰 입자에 의한 교란이 강화되면서 큰 입자와 유체 간의 상대변위가 어느 정도로 커진 후 일부 탐색영역에서 최대 상관함수의 위치가 큰 입자의 변위에 해당되는 위치로 옮겨갔기 때문이다.

Fig. 7은 큰 입자의 면적분율이 PIV 결과에 미치는 영향을 보여주고 있다. 큰 입자들의 위치에 대입하는 밝기는 작은 입자들의 평균 밝기로 하

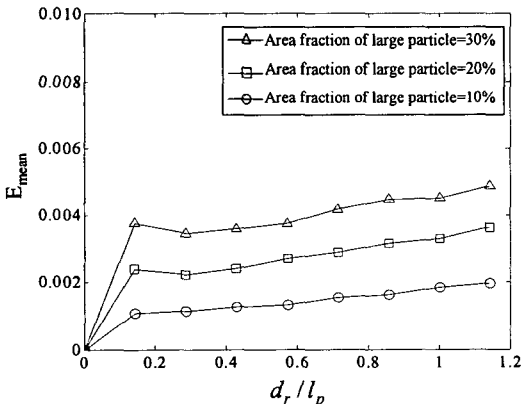


Fig. 7 Variation of the mean PIV error over the area fraction of large particles:  $\alpha = \langle f \rangle$ ,  $\beta = \langle g \rangle$ .

였다. 큰 입자들의 상대변위가 같을 때 큰 입자들의 면적분율이 클수록 평균 오차도 커지게 되는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 큰 입자들이 포함된 유동에서 한대의 카메라로 유체의 속도와 큰 입자의 속도를 동시에 측정할 수 있는 방법을 제안하였다. 이 방법에서 유체의 속도는 PIV 기법으로, 큰 입자들의 속도는 PTV 기법으로 구하며 큰 입자와 작은 PIV 추적입자가 함께 포함된 원시이미지로부터 각각 PIV 이미지와 PTV 이미지를 추출한다. 큰 입자와 유체 간의 속도 차이로 인한 PIV 측정의 오차를 줄이기 위하여 원시이미지에서 큰 입자를 추출한 후 그 위치에 작은 입자들의 평균 밝기를 대입하여 PIV 이미지로 하였다. 이렇게 함으로써 큰 입자들과 주위 배경과의 차이를 작게 하여 PIV 계산에서 큰 입자들의 속도정보를 최대한 배제하였다. 계산결과 본 기법으로 구한 PIV 결과는 큰 입자의 면적분율이 20%일 때에도 큰 입자의 존재로 인한 영향을 거의 받지 않음을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 이산화탄소 저감 및 처리 기술 개발 사업단(C-1-1) 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Wereley, S. T., Akonur, A. and Lueptow, R. M., 2002, Particle-fluid velocities and fouling in rotating filtration of a suspension, *Journal of Membrane Science*, Vol. 209, pp. 469-484.
2. Choi, H.M, Kurihara, T., Monji, H. and Matsui, G., 2002, Measurement of particle/bubble motion and turbulence around it by hybrid PIV, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 12, pp. 421-428.
3. Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., 2002, *Digital Image Processing*, 2nd ed., Prentice-



- Hall, New Jersey.
4. Ohmi, K. and Li, H. Y., 2000, Particle-tracking velocimetry with new algorithms, *Measurement Science and Technology*, Vol. 11, pp. 603-616.
  5. Westerweel, J., 1997, *Fundamentals of digital particle image velocimetry*, *Measurement Science and Technology*, Vol. 8, pp. 1379-1392.
  6. Okamoto, K., Nishio, S., Saga, T. and Kobayashi, T., 2000, Standard images for particle-image velocimetry, *Measurement Science and Technology*, Vol. 11, pp. 685-691.