

## 유사 흐름 측정을 위한 입자추적유속계 알고리즘의 개발

### Development of a PTV Algorithm for Measuring Sediment-Laden Flows

류 권 규\* / 마리안 머스테\*\* / 로버트 에테마\*\*\* / 윤 병 만\*\*\*\*

Yu, Kwonkyu / Muste, Marian / Ettema, Robert / Yoon, Byungman

#### Abstract

Two-phase flows, e.g. sediment-laden flow and bubbly flow, have two different flow profiles; flow velocity and sediment velocity. To measure velocity distributions of two-phase flows, it is necessary to use sophisticated instruments which can separate velocity profiles of two-phases. For bubbly flows, PIV (Particle Image Velocimetry) or PTV (Particle Tracking Velocimetry) has given fairly good velocity profiles of two-phases. However, for sediment-laden flows, the applications of PIV or PTV has not been so successful, because the sediment particles introduced to the flow kept the images from being analyzed.

A new algorithm, which consists of several image analysis methods, is proposed to analyze sediment-laden flows. For detection algorithm, threshold method, edge detection method, and thinning method are adapted, and for finding matching pair PIV and PTV routines are combined. The proposed method can (1) detect sediment particles with irregular boundaries, (2) remove reflected images and scattered images, and (3) discriminate tracer particles from reflected images of sediment particles.

*keywords* : PTV (Particle Tracking Velocimetry), sediment-laden flow, two-phase flow

#### 요 지

유사 입자가 포함된 흐름이나 공기 방울이 포함된 흐름과 같은 二相流 (two-phase flow) 는 유체의 속도와 입자의 속도와 같은 두 가지 서로 다른 속도 분포가 존재한다. 이러한 이상류의 속도장 분석을 위해서는 두 가지 속도 분포를 별도로 측정할 수 있는 기법을 이용해야 한다. 공기 방울이 포함된 흐름에 대해서는 입자영상 유속계(PIV)나 입자추적유속계(PTV)를 이용하여 비교적 타당한 정도로 유속 분포를 측정하여 왔다. 그러나 자연 모래를 포함한 흐름 영상의 속도 분포 해석에서는 PIV나 PTV가 그다지 성공적이지 못했는데, 그것은 흐름 중에 있는 유사 입자가 영상을 해석하기 어렵게 만들기 때문이다.

유사 흐름의 속도 분석을 위해 다양한 영상 분석 기법을 결합한 방법을 제시하였다. 입자 추출 알고리즘으로 역치 값, 경계 추출 알고리즘, 세션화 알고리즘을 조합한 새로운 방법을 제안하였다. 또한 입자의 이동 변위 계산을 위해서 PIV와 PTV를 조합한 새로운 방법을 개발하였다. 이 새로운 알고리즘은 다음과 같은 기능을 가지고 있다. (1) 새 알고리즘은 유사 입자, 특히 자연 모래와 같이 불규칙한 형태를 갖는 입자의 경계를 정확히 찾아낼 수 있다. (2) 필요한 정보를 잃어버리지 않고, 반사광이나 난반사에 의한 영상을 효율적으로 제거할 수 있다. (3) 추적 입자가 유사 입자 가까이에 있어 유사의 난반사 영역이 들어 있어도 이를 분리해 낼 수 있다.

**핵심용어** : 입자추적유속계, 유사 흐름, 이상류

\* 정회원, 명지대학교 토목공학과 연구원, 공학박사 (e-mail: kwonkyu@mju.ac.kr)

\*\* Research Engineer, Iowa Inst. of Hyd. Res., Ph.D (e-mail: marian-muste@uiowa.edu)

\*\*\* Professor, Iowa Inst. of Hyd. Res., Ph.D (e-mail: robert-ettema@uiowa.edu)

\*\*\*\* 정회원, 명지대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (e-mail: bmyoon@mju.ac.kr)

## 1. 서 론

1990년 이전까지는 실험 수로에서의 유속 측정에 주로 레이저 유속계(LDV, Laser Doppler Velocimetry)가 이용되었으나, 1990년 이후부터는 PIV가 그 역할을 대체하였다. LDV가 한 점에서의 2방향 또는 3방향 유속을 측정하는데 반하여, PIV는 2차원 유속장을 한꺼번에 측정할 수 있다는 점에서 매우 각광을 받아 왔다 (Raffel, et al., 1998). 그러나 유사 입자가 포함된 흐름 (sediment-laden flow, 이하 '유사 흐름'이라 함)에서는 PIV는 그 한계를 드러내게 되었다. 유사 입자가 포함된 흐름과 같은 이상류(二相流, two-phase flow)는 두 가지 서로 다른 속도 분포가 존재하게 되며, 보통의 PIV로는 이러한 두 속도 분포를 각각 측정할 수 없기 때문이다. 영상 분석 기술을 이용한다는 점에서 공통점을 가지나, PIV와 달리 영상내의 입자 하나 하나를 추적하여 속도를 측정하는 장치로 PTV가 있다. PTV는 입자 영상을 분석한다는 점에서 입자 영상 유속계의 일종으로 간주한다. PTV는 PIV의 일종이지만, PIV와 같이 입자의 그룹을 이용하는 것이 아니라 입자 하나 하나를 추적하기 때문에, 이상류의 측정에 적합하다. 공기 방울이 있는 흐름 (bubbly flow)을 분석하는 경우가 PTV가 이상류에 적용되는 대표적인 예라고 할 수 있다 (Gui, et al., 2000).

PTV에서 주된 문제는 입자를 찾아내는 부분 (detection algorithm)과 첫 번째 영상에 나타난 어떤 입자가 두 번째 영상에서 어디로 이동하였는가를 찾아내는 부분(matching algorithm)이다. 일반적인 PTV 알

고리즘은 입자를 찾아 내기 위해 비교적 단순한 방법을 이용한다. 입자를 배경과 분리할 때 대부분의 경우 밝기나 크기만을 이용한다. 이런 방식은 이상류를 분석할 때도 적용된 경우가 많다 (Okamoto, et al., 1995). 즉, 이상류라 하더라도 공기 방울이 있는 흐름과 같은 경우 공기 방울이 물의 추적 입자(tracer particle)에 비해 확연히 크며 공기 방울이 난반사를 만들지 않기 때문에 영상 해석에 어려움이 없다.

그러나 자연 모래를 이용한 경우는 위의 경우와 달리 입자를 주변 배경 및 흐름 추적 입자와 구별하는 데 어려움이 발생한다. Fig. 1은 유사 입자가 있는 흐름을 찍은 영상의 일부를 예로 보인 것이다. 원래 영상을 인쇄하면 입자의 판별이 어렵기 때문에, 인쇄물에서 쉽게 판별할 수 있도록 하기 위해, 영상을 반전시킨 것이다. 본고의 모든 영상은 반전된 것이다. 이 영상의 크기는 256×256 픽셀의 크기로, 원 영상(1008×1018)의 1/16 면적만을 보인 것이다. Fig. 1의 A-A은 유사 입자와 추적 입자, B-B는 유사 입자와 난반사 영상, C-C는 추적 입자와 난반사 영상을 보인 것이다. A-A과 B-B에 예로 보인 것과 같이 영상에 잡힌 유사 입자는 심한 경우 500 픽셀 (70×70) 이상의 면적을 차지하기도 한다. 이 영상은 분석하는 데 다음과 같은 세 가지 문제를 가지고 있다.

- (1) 유사 입자가 흐름 추적 입자에 비해 매우 크므로, 유사 입자 가까이 추적입자가 위치하게 되면 유사에 의한 난반사 때문에 추적 입자를 찾기 어렵다.

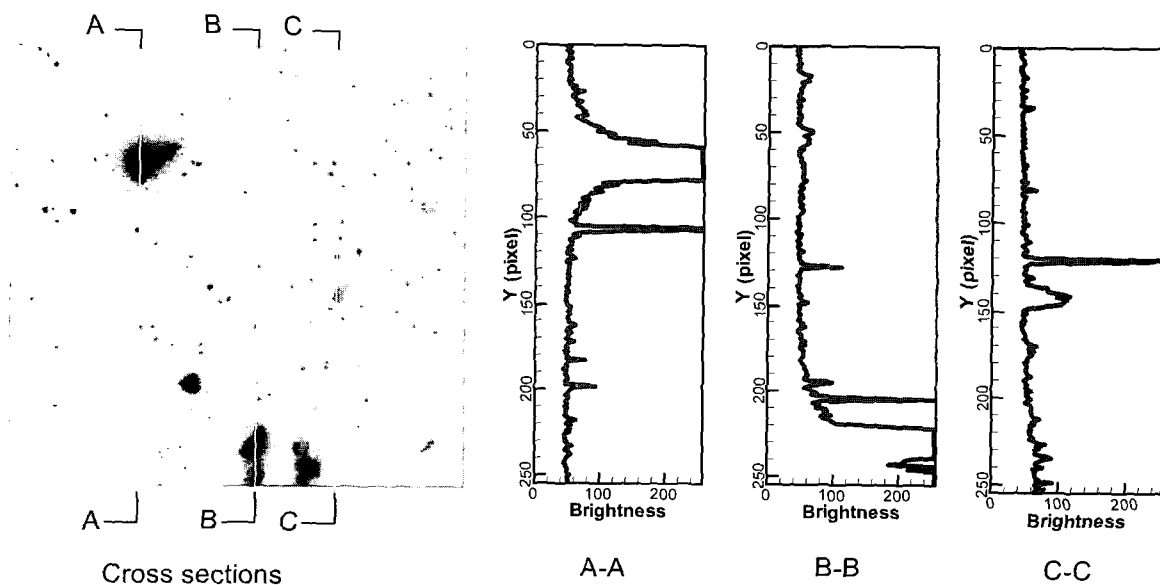


Fig. 1. A sample image and its cross-sections of sediment-laden flow

- (2) 자연 모래를 이용할 경우 그 사이에 섞여 있던 잡물이나 점토 등이 희미하게 영상을 만들기도 한다. 또는 입자의 일부만이 빛에 노출되어 (grazing) 희미하게 나타나기도 한다.
- (3) 석영질 모래는 매우 밝은 영상을 만들므로, 유사 입자가 하상 가까이 있을 경우 반사 영상을 만들기도 한다.

따라서 새로운 알고리즘의 목적은 다음과 같다.

- (1) 새 알고리즘은 유사 입자, 특히 자연 모래와 같이 불규칙한 형태를 갖는 입자의 경계를 정확히 찾아낼 수 있어야 한다.
- (2) 필요한 정보를 잃어버리지 않고, 반사광이나 난반사에 의한 영상을 효율적으로 제거할 수 있어야 한다.
- (3) 추적 입자가 유사 입자 가까이에 있어 유사의 난반사 영역이 들어 있어도 이를 분리해 낼 수 있어야 한다.

## 2. 입자 추적 유속계의 기본 원리 및 분석 방법

### 2.1 입자 찾기 알고리즘(detecting algorithm)

입자를 그 배경에서 분리해 내는 알고리즘은 역치값(threshold value)를 이용하는 방법(일부 영상 처리 교과서에서는 ‘문턱치’라 함), 경계찾기(edge detection), 세선화(thinning) 알고리즘 등이 있다(Pratt, 1991). 그러나 이들 중 어느 한 방법만을 이용할 경우 적절히 입자를 찾아내는 데 어려움이 있다. 따라서 이들 각 방법의 장점과 단점을 고려하여 적절한 과정에 따라 조합하여 이용하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

#### (1) 역치값에 의한 영상 분리 방법

먼저 역치값을 이용하는 방법은 수학적으로 다음과 같이 표현할 수 있으며, 고역통과필터(high-pass filter)라고 볼 수 있다(Gonzalez and Woods, 2003).

$$O_{i,j} = \begin{cases} I_{i,j}, & \text{만일 } I_{i,j} \geq T \\ 0, & \text{만일 } I_{i,j} < T \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $I_{i,j}$ 는 처리될 영상  $(i,j)$  픽셀의 밝기값(gray-scale value),  $O_{i,j}$ 는 처리된 영상  $(i,j)$  픽셀의 밝기값이며,  $T$ 는 적용할 역치값이다. 역치값을 이용하는 방법은 가장 단순한 방법이긴 하지만, 그에 따라 입자 판별 능력도 떨어진다. 예를 들어, 낮은 역치값을 이용할 경우 반사 영상 등이 입자로 오인되는 경우가 생기며, 반대로 높은 역치값을 이용할 경우 많은 수의 추적 입

자를 잃어버리게 된다.

Fig. 2는 역치값 200을 Fig. 1에 적용한 결과이다. Fig. 2에서 유사 위치는 분명히 알 수 있으나, 아래쪽 중간에 나타난 바와 같이 바닥에 반사된 유사 영상도 같이 나타나는 문제가 발생한다. 또한 Fig. 1의 C-C에 나타난 난반사 영상도 같이 포함되어 있는 문제가 있다. 따라서 역치값을 적용한 결과는 유사나 추적 입자 등의 위치를 대략 파악하는 데 이용될 것이다.

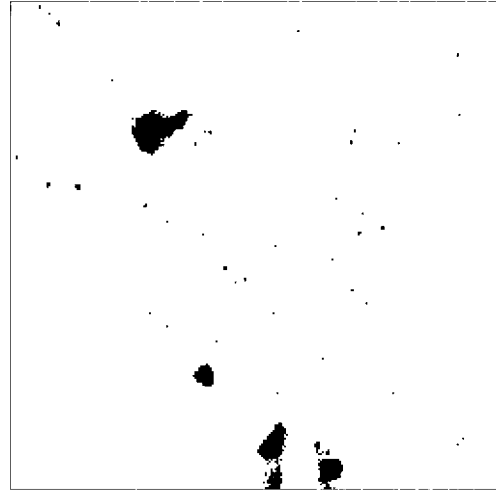


Fig. 2. Image with threshold of 200

#### (2) 경계찾기 알고리즘

경계찾기 알고리즘은 어떤 물체의 경계를 뚜렷하게 나타내서 물체를 쉽게 찾을 수 있도록 한다. 특히, 자연 모래와 같이 모양이 불규칙한 물체는 경계 찾기 알고리즘을 이용하여야 주위 배경 영상과 구별할 수 있다. 경계 찾기 알고리즘도 여러 가지가 있으나, 널리 이용되는 Sobel 경계 찾기 알고리즘(Pratt, 1991, p. 501)을 이용하였다. Sobel 알고리즘은 수식으로는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$O_{i,j} = \sqrt{R_{i,j}^2 + C_{i,j}^2} \quad (2)$$

여기서

$$R_{i,j} = \frac{1}{4} \{ [ I_{i-1,j+1} + 2I_{i,j+1} + I_{i+1,j+1} ] - [ I_{i-1,j-1} + 2I_{i,j-1} + I_{i+1,j-1} ] \} \quad (3)$$

$$C_{i,j} = \frac{1}{4} \{ [ I_{i-1,j-1} + 2I_{i-1,j} + I_{i-1,j+1} ] - [ I_{i+1,j-1} + 2I_{i+1,j} + I_{i+1,j+1} ] \} \quad (4)$$

이다. 경계 찾기 알고리즘은 기울기가 급격히 변하는 부분의 영상값을 크게 만들어 주는 것이다. Sobel 알고리즘을 Fig. 1에 적용한 결과는 Fig. 3과 같다. 경계 찾기 알고리즘에 의해 원 영상(Fig. 1)의 각 입자들의 경계가 비교적 명확하게 표현되었으나, 여기서 유사와 난반사 영상, 추적자들을 분리하기는 여전히 곤란한 점이 있다.

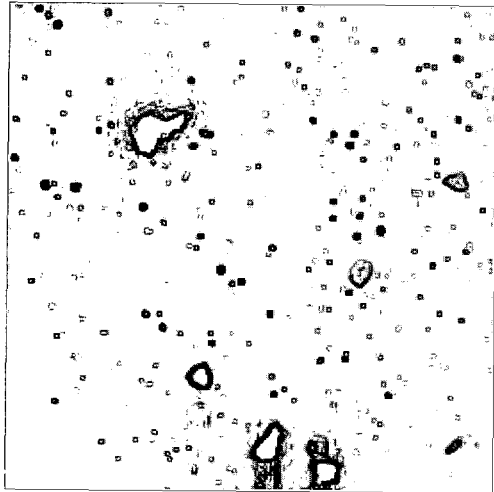


Fig. 3. Image with Sobel's edge detection

### (3) 세선화 알고리즘

한편, 세선화 알고리즘은 어떤 형태의 골격만을 추출하는 알고리즘이다. 앞의 두 알고리즘과 달리 이 세선화 알고리즘은 이진 영상(binary image)에만 적용할 수 있다. 세선화 알고리즘은 Zhang and Suen (1984)의 알고리즘이 가장 효율적인 것으로 알려져 있으며, 수학적으로 표시하면 다음과 같다.

이 알고리즘은 두 번을 부분반복해야 한다. 일차 부분반복은 픽셀  $I_{i,j}$ 가 다음 4가지 조건이 모두 참이 될 때, 삭제를 위하여 표시하는 것이다.

- (1) 픽셀의 연결성 번호는 1이다.
- (2) 이 픽셀은 최소한 2개의 검정 픽셀을 이웃으로 가지며, 이 수는 6개보다 많지 않아야 한다.
- (3)  $I_{i,j+1}, I_{i-1,j}, I_{i,j-1}$  중 적어도 하나는 흰색 (배경)이다.
- (4)  $I_{i-1,j}, I_{i+1,j}, I_{i,j-1}$  중 적어도 하나는 흰색 (배경)이다.

이 부분반복을 마친 후 표시된 픽셀들을 삭제된다. 다음의 부분 반복은 위의 단계 3과 단계 4를 제외하면 동일하다.

- (1) 픽셀의 연결성 번호는 1이다.
- (2) 이 픽셀은 최소한 2개의 검정 픽셀을 이웃으로 가지며, 이 수는 6개보다 많지 않아야 한다.

- (3)  $I_{i-1,j}, I_{i,j+1}, I_{i+1,j}$  중 적어도 하나는 흰색 (배경)이다.
- (4)  $I_{i,j+1}, I_{i+1,j}, I_{i,j-1}$  중 적어도 하나는 흰색 (배경)이다.

이 반복 과정을 마친 후 표시된 픽셀을 삭제된다. 만약 부분반복 후, 삭제되는 픽셀이 없다면 세선화 작업은 완료되고 프로그램은 종료된다. Fig. 3의 영상을 이진 영상으로 바꾼 후 세선화 알고리즘을 적용한 결과는 Fig. 4와 같다. 이 그림에서 유사 입자의 경계를 뚜렷이 찾아낼 수 있다. Fig. 4에서 완전한 폐곡선을 이루는 큰 입자들은 유사 입자이며, 난반사에 의해 만들어진 가짜 입자들은 완전한 폐곡선이 되지 못한다. Fig. 2에서 얻어낸 입자의 위치 정보와 Fig. 4를 결합하면 Fig. 5와 같이 완벽하게 유사 입자를 찾아낼 수 있다. Fig. 5에서 유사 입자의 크기와 경계, 중심의 위치를 확실하게 계산해 낼 수 있다.

이와 같이 이러한 세 가지 알고리즘을 조합하여 유사 입자를 적절히 구별해 낼 수 있다.

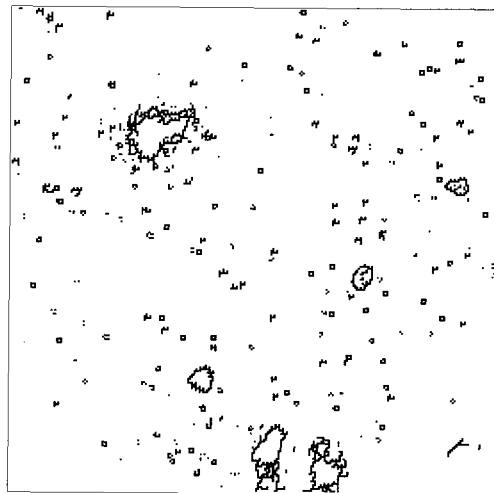


Fig. 4. Zhang & Suen's thinning algorithm

### (4) 흐름 추적입자 찾기

다음은 흐름 추적입자의 위치를 찾는 것이다. 추적입자를 찾기 위해 Fig. 3에서 유사 입자를 제거한다. 유사 입자의 정확한 크기와 모양은 Fig. 5와 같이 이미 알고 있으므로, Fig. 3에서 손쉽게 제거할 수 있다. 그 다음 제거된 영상에 적절한 크기의 역치값을 적용하면 추적 입자와 반사 영상 등을 찾을 수 있다. 여기에 다시 각 입자의 종횡비(aspect ratio)를 적용하면 흐름 추적 입자만을 골라낼 수 있다. 이것은 추적 입자는 기본적으로 원형을 하고 있으나, 반사 영상은 고리나 선형 등을 하고 있기 때문이다. 그 결과는 Fig. 6과 같다.

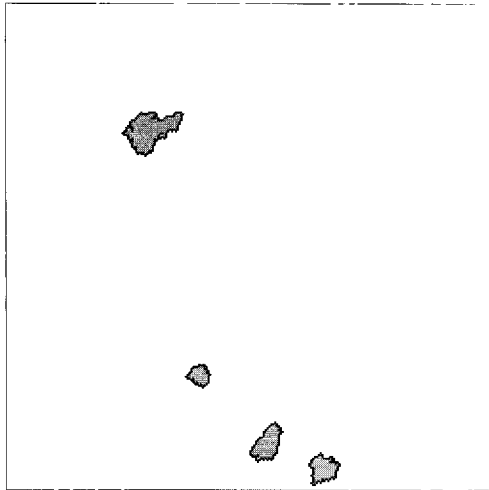


Fig. 5. Sediment particles detected

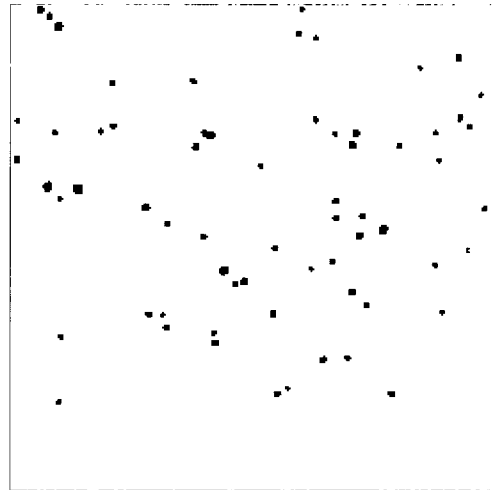


Fig. 6. Water tracers

### (5) 최종 영상

Fig. 5와 같은 유사 입자 영상과 Fig. 6와 같은 흐름 추적 입자 영상을 결합하면, Fig. 7와 같은 최종적인 영상이 완성된다. Fig. 7의 개선된 영상과 Fig. 1의 원래 영상을 비교하면, 난반사되어서 입자로 잘못 오인되던 영상들이 깨끗이 제거되었음을 알 수 있다. 이와 같은 과정을 한 쌍의 영상에 대해 적용하면, 각 영상의 입자의 위치와 크기, 경계 등에 대한 정보를 알 수 있고, 이러한 첫째 영상과 둘째 영상에 다음의 짝짓기 알고리즘을 적용하면 한 입자쌍 간의 변위를 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 변위에 영상의 척도를 곱하고, 두 영상 사이의 시간으로 나누어 속도를 계산할 수 있다.

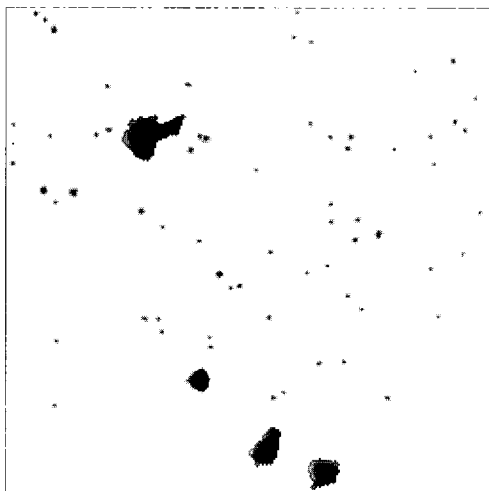


Fig. 7. Final image with tracers and sediment particles

## 2.2 입자의 짝짓기 알고리즘(matching algorithm)

위의 입자 찾기 과정 (Fig. 2 ~ Fig. 7)을 거쳐 한

쌍의 영상에 대한 입자 찾기를 마치면, 이 영상 쌍에 대해 각각의 입자들을 짝짓기를 하여 입자의 변위를 계산해 주어야 한다. 입자들의 변위를 계산하기 위해서는 첫째 영상에서 찾아낸 입자가 두 번째 영상에서 어디로 이동하였는가를 찾아내야 한다. 영상 처리 분야에서는 영상 조각 둘을 비교하여 짝짓는 것을 영상 정합이라 한다. 본고에서는 영상간 짝짓기는 영상 정합으로 표현하나, 입자간 짝짓기에서는 정합이라는 표현을 쓰기 곤란할 것으로 보여 입자의 짝짓기로 표현한다. 이렇게 두 영상 사이의 입자를 서로 짝짓는 데는 PIV와 PTV를 결합한 방법이 이용되었다.

먼저 PIV 기법을 이용하여 여러 개의 입자를 포함한  $M \times N$  픽셀 크기의 영상 조각(interrogation window라고 함)이 이동한 대략적인 위치를 추정한다. PIV에서는 첫 번째 영상과 두 번째 영상에서 각각 일정 크기의 영상 조각을 서로 비교하여 가장 가까운 형태를 갖는 영상 조각을 찾는 것이다. 영상 조각을 비교하는 데는 일반적으로 다음과 같은 상호상관법에 의한 상호상관계수가 이용된다.

$$\rho_{IJ}(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_{i,j} - \bar{I}] [J_{i+x,j+y} - \bar{J}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_{i,j} - \bar{I}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [J_{i+x,j+y} - \bar{J}]^2}} \quad (5)$$

여기서,  $I_{i,j}$ 는 첫 번째 영상의 픽셀  $(i,j)$ 에서의 영상값이고,  $J_{i,j}$ 는 두 번째 영상의 픽셀  $(i,j)$ 에서의 영상값이며,  $\bar{I}$ 는  $I_{i,j}$ 의 평균,  $\bar{J}$ 는  $J_{i,j}$ 의 평균이다. 또한  $x$ 와  $y$ 는 각각 수평과 수직 방향의 이동 픽셀을 나타내며,

각각의 범위는  $-X \leq x \leq X$  과  $-Y \leq y \leq Y$  이며,  $X \times Y$ 를 탐색영역(searching area)라고 한다. 여기서 최대의 상호상관계수값을 갖는 이동이 영상 분석에 의해 결정되는 변위인 것이다. PIV의 분석 과정에 대해서는 PIV에 대한 여러 교과서들, 예를 들면 Raffel, et al. (1988)이나 可視化情報學會 (2002) 등에 자세히 기술되어 있다.

그러나 PIV에 의해 결정된 변위는 여러 입자들의 평균적인 변위를 의미하는 것이지 개별 입자들의 변위는 아니다. 따라서 각각의 입자들을 짝짓기 위해서는 PIV에 의해 계산된 변위를 이용하여 개별 입자들에 대한 추적을 다시하여야 한다. 즉, PIV로 추정된 위치 근방에서 가장 적합한 입자를 찾아 짝을 짓는 것이다. 이 개념은 Fig. 8에 간략히 나타나 있다. 즉, 어떤 입자에 PIV에 의해 추정된 변위를 더하면, 그 입자의 추정 위치가 결정되고, 그 추정 위치를 중심으로 탐색을 하면 원하는 입자를 정확히 짝짓기 할 수 있게 된다.

### 3. 개발된 알고리즘의 시험

#### 3.1 인공 영상을 이용한 시험

제안된 방법을 인공 영상에 대해 시험하였다. 흐름장은 Fig. 9에 보인 바와 같이 뚜껑에 의한 흐름(lid flow)이며, Ferziger and Peric (1996)이 만든 프로그램으로 생성하였다. 이 흐름장에 30개의 유사 입자와 300여 개의 추적자를 임의로 투입하였다. 전체 영상의 크기는  $512 \times 512$ 픽셀이며, 추적자의 지름은 5 픽셀 이내, 유사는 10픽셀로 하였다. 이 경우 유사 입자는 부력이 없는 것으로 간주하였다. 즉, 유사 입자와 유체의 비중 차이 때문에 생기는 지체 속도(velocity-lag)은 없다고 본다.

Fig. 10은 시험에 이용될 흐름장과 생성된 한 쌍의 인공 영상이다. 기지의 유속장에 입자가 투입되었기 때문에 입자의 변위는 흐름장에서 계산할 수 있다.

Fig. 11은 제안된 알고리즘에 의한 PTV 추적 결과이다. 이 결과에서 알 수 있듯이 이 연구에서 제안된 알고리즘은 입자의 수가 매우 적은 모퉁이의 일부를 제외하고는 거의 모든 입자를 정확히 찾아내어 그 속도를 추정할 수 있었다. 추적의 정확성은 약 97% 정도였다. 즉, 투입된 330여개의 입자의 속도 중 320여개를 정확히 추적할 수 있었다.

PTV의 입자 추적에서 오류가 생기는 원인은 크게 두 가지로 볼 수 있다. 첫째는 PIV에 의한 영상 정합과정에서 생기는 오류이며, 둘째는 PTV에서 입자 추출 때 생기는 오류이다. 전자의 오류는 어떤 PIV 기법이든지 어느 정도는 가지는 일반적인 오류이다. 후자의 오

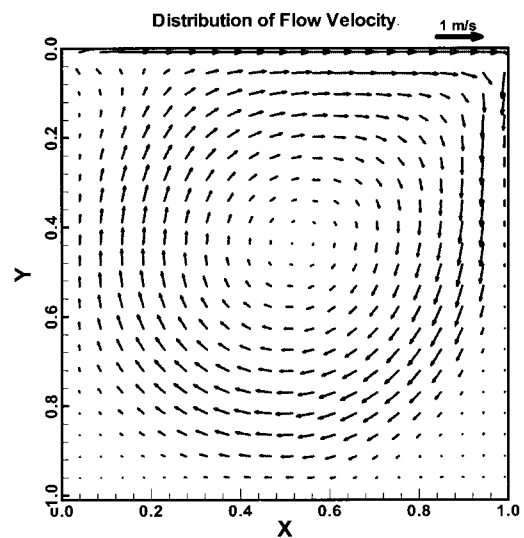


Fig. 9. Flow field of artificial images

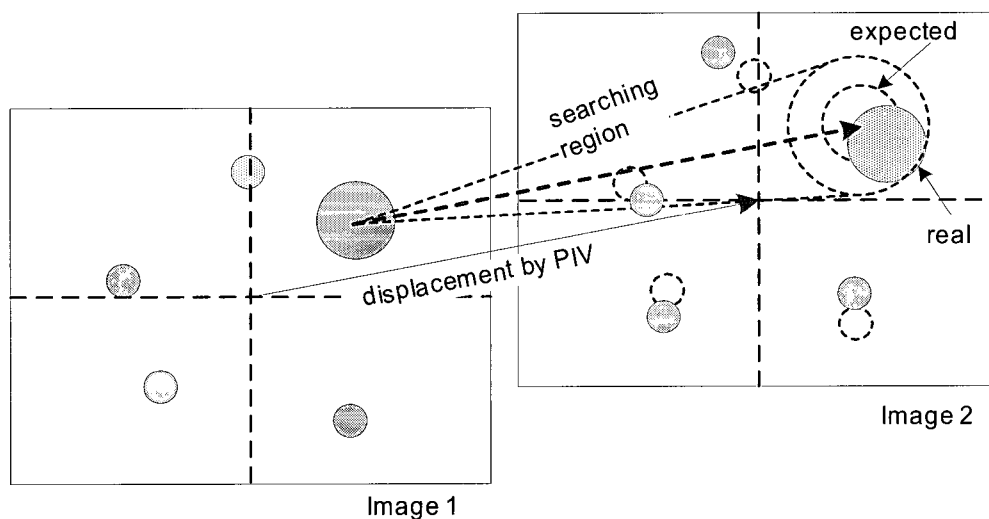


Fig. 8. Displacement calculated with PIV and PTV schemes

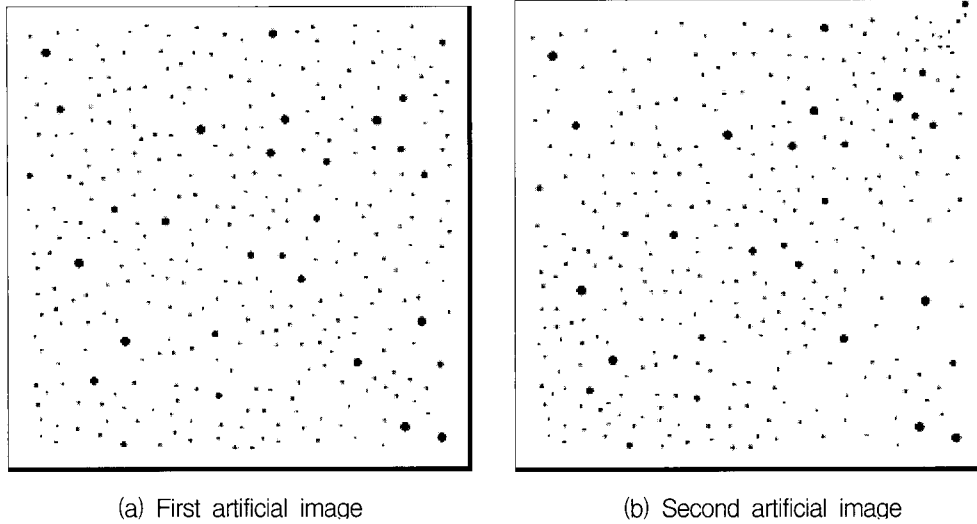


Fig. 10. Artificial images for test of the new PTV algorithm

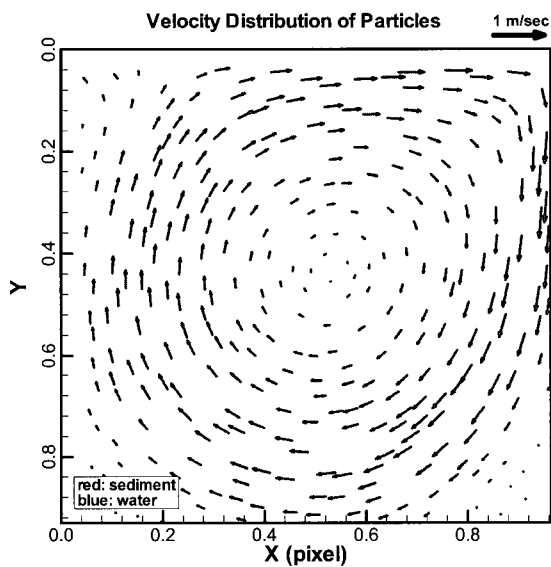


Fig. 11. Calculated velocity field with the new PTV algorithm

류는 대개 out-of-plane 흐름에 의해 첫 번 영상에 있

던 입자가 둘째 영상에서는 사라지거나 하는 경우에 발생한다. 그러나 인공영상에 의한 시험에서는 후자의 입자 추출에 의한 오류가 거의 없을 것이므로, 약 3% 정도 전부가 PIV에 의한 영상 정합 오류로 볼 수 있을 것이다.

### 3.2 유사성 있는 흐름에의 적용

유사성 있는 흐름의 영상은 일본의 고베 대학 수리 실험실에서 수행한 유사 흐름의 영상에 적용하였다 (Yu, 2004). 실험 수로는 Fig. 12에 보인 바와 같이 길이 6.0 m, 폭 0.15 m 이며, 수로 바닥은 스테인리스판으로 되어 있고 상류단에서 5.3 m 지점에 측정을 위한 유리창이 있다. 유사 입자의 퇴적을 방지하기 위해서 상류와 하류의 탱크 수위는 최소한으로 제한하였다. 실험 시 수온은 상온(약 22°)을 유지하였으며, 수로 경사는 0.011, 수심은 약 0.02 m, 평균 유속은 0.9 m 이다. 추적 입자로는 크기 0.02 mm, 비중 1.02~1.03인 나일론-12를 이용하였으며, 유사 입자로는 비중 2.65인 자연 모래를 0.21 mm와 0.25 mm로 체가름하여 사용하였다.

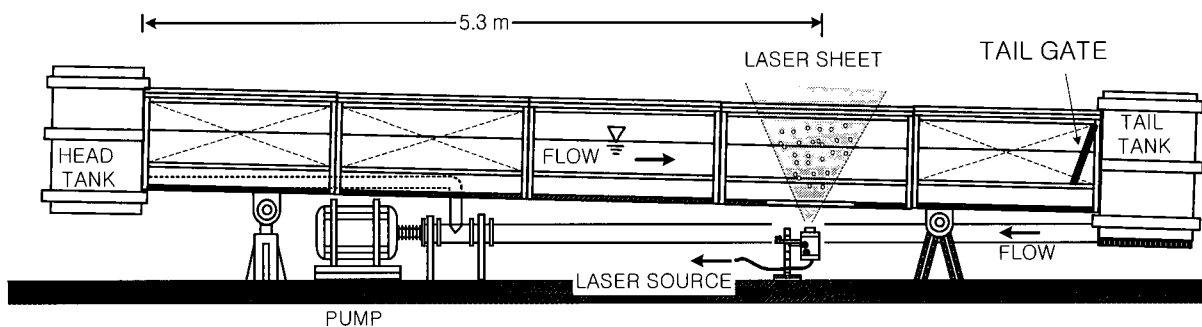


Fig. 12. Experimental setup

레이저 영상은 Kodak Megaplug, ES 1.0 Progressive Scan 카메라와 XCAP 소프트웨어를 이용하여 디지털 영상으로 만들어 저장하였으며, 영상의 해상도는 1008×1018 픽셀이다. 각 경우에 대해 약 6,000 쌍의 이미지를 획득하였다. Fig. 13은 이 수로 실험에서 얻어진 한 쌍의 영상을 예(NS2 케이스)로 보인 것이다.

이 영상 자료를 앞서 개발한 알고리즘을 이용하여 분석한 결과, 물과 유사 입자의 속도 분포를 각각 분리하여 측정할 수 있었다. 한 쌍의 영상을 이용하면, 순간 속도장을 구할 수 있으며, Fig. 14는 이렇게 구한 순간 속도장의 일부를 확대한 모습이다. Fig. 14에서 적색 화살표로 표시된 것이 속도 벡터이다. Fig. 14의 확대된 영상에서 중앙에 있는 큰 입자는 유사 입자이고, 주변

에 있는 작은 입자는 흐름의 추적자이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 제안된 알고리즘은 흐름의 추적 입자와 유사 입자를 정확하게 선별하고 있으며, 난반사 등에 의해 형성된 가짜 영상들을 적절히 제거할 수 있었다.

다만, Fig. 14의 확대된 영상에서 보인 바와 같이 일부 입자들의 경우 추적에 실패하였다. 일부 입자의 추적에 실패하는 경우는 실제 영상 처리 때 종종 발생하는 PTV의 입자 추출 오류로 보인다. 즉, 한 쌍의 영상에서 첫째 영상과 둘째 영상 사이에 평균적인 밝기의 차이가 있거나, 레이저 평면을 옆으로 벗어나는 흐름(out-of-plane flow)이 한 경우 PTV는 입자의 추적에 실패하게 된다. 본고에서 적용한 실제 영상의 경우 두 가지 모두가 해당하는 것으로 보인다.

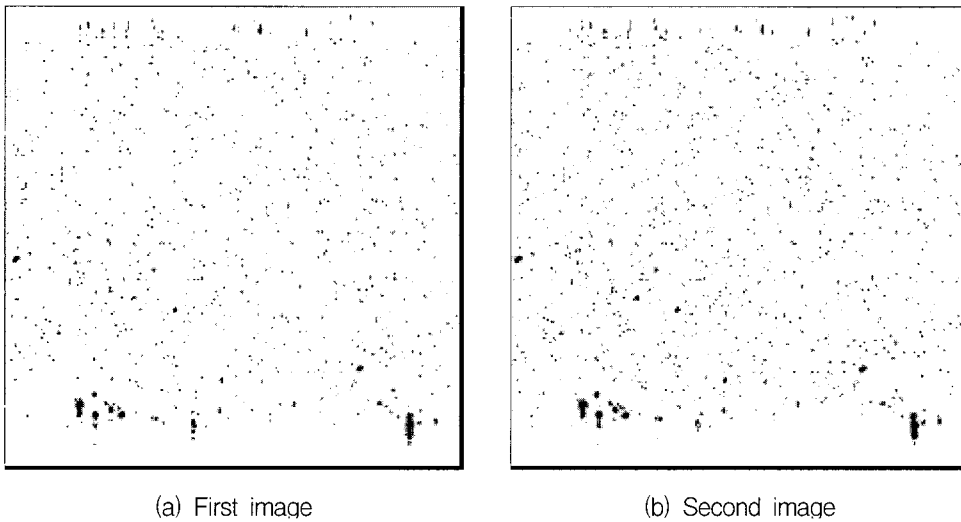


Fig. 13. Sample images of sediment-laden flow

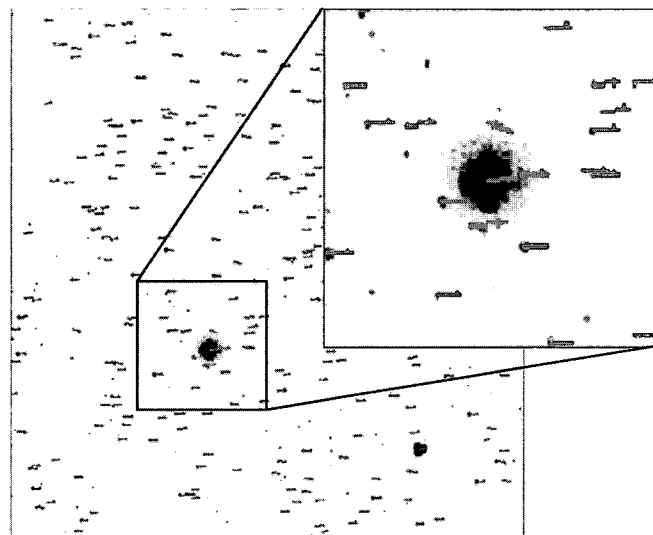


Fig. 14. A sample velocity vector field



#### 4. 결 론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 자연 모래가 혼합된 흐름에서 물과 유사 속도를 별도로 측정하기 위하여 새로운 PTV 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 유사 흐름 속에서 유사 입자와 추적 입자를 효과적으로 추출하는 입자 찾기 알고리즘과 찾아낸 입자들을 효과적으로 짝짓는 변위 추정 알고리즘의 두 가지이다.
- (2) 입자 찾기 알고리즘은 역치값 방법, 경계 추출법, 세션화 기법을 다양하게 조합한 것이다. 이 알고리즘은 반사광, 부유물 등에 의한 잡음 영상을 제거하고, 유사와 물 추적입자의 경계를 정확하게 찾을 수 있었다.
- (2) 두 영상 사이의 입자들의 변위를 추정하기 위한 알고리즘은, PIV와 PTV 기법을 조합한 것으로, 효과적이고 정확하게 입자들의 이동 변위를 찾아내었다.
- (3) 제안된 알고리즘을 인공 영상과 실험 수로의 실제 영상에 적용하였다. 인공 영상에 대한 적용 결과 알고리즘의 정확성은 97% 정도였다. 또한, 실험 수로의 실제 영상에 대한 적용 결과 유사와 추적 입자를 정확히 분리해 낼 수 있었으며, 반사광이나 부유물 등에 의한 영상은 효과적으로 제거되었다. 즉, 제안된 알고리즘은 두 경우 모두에 대해 성공적으로 입자를 추적하고 그 속도 분포를 측정할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술사업단의 연구비지원(과제번호

2-1-2)에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- 可視化情報學會 編 (2002). *PIV 핸드북*, 森北出版.
- Ferziger, J. H., and Peric, M. (1996). *Computational methods for fluid dynamics*, Springer.
- Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. (2003). *Digital Image Processing*, 2nd ed., Prentice Hall.
- Gui, L., Merzkirch, W., and Fei, R. (2000). "A digital mask technique for reducing the bias error of the correlation-based PIV interrogation algorithm." *Experiments in Fluids*, 29, 30-35.
- Okamoto, K., Hassan, Y. A., and Schmidt, W. D. (1995). "New tracking algorithm for particle image velocimetry." *Experiments in Fluids*, 19(5), 342-347.
- Pratt, W. K. (1991). *Digital image processing*, John Wiley & Sons, Inc.
- Raffel, M., Willert, C. E., and Kompenhans, J. (1998). *Particle image velocimetry, a practical guide*, Springer.
- Yu, K. (2004). *Particle tracking of suspended-sediment velocity in open-channel flow*, Ph.D. thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Iowa, Iowa City.
- Zhang, T. Y., and Suen, C. Y. (1984). "A fast parallel algorithm for thinning digital patterns." *Comm. ACM*, 27(3), 236-239.

(논문번호:05-102/접수:2005.07.16/심사완료:2005.08.18)