

상관영역 크기 변화에 따른 영상유속계의 오차 분석

Error Analysis of Image Velocimetry According to the Variation of the Interrogation Area

김 서 준* / 류 권 규** / 윤 병 만***

Kim, Seojun / Yu, Kwongkyu / Yoon, Byungman

Abstract

Recently image velocimetries, including particle image velocimetry (PIV) and surface image velocimetry (SIV), are often used to measure flow velocities in laboratories and rivers. The most difficult point in using image velocimetries may be how to determine the sizes of the interrogation areas and the measurement uncertainties. Especially, it is a little hard for unskilled users to use these instruments, since any standardized measuring techniques or measurement uncertainties are not well evaluated. Sometimes the user's skill and understanding on the instruments may make a wide gap between velocity measurement results. The present study aims to evaluate image velocimetry's uncertainties due to the changes in the sizes of interrogation areas and searching areas with the error analyses. For the purpose, we generated 12 series of artificial images with known velocity fields and various numbers and sizes of particles. The analysis results showed that the accuracy of velocity measurements of the image velocimetry was significantly affected by the change of the size of interrogation area. Generally speaking, the error was reduced as the size of interrogation areas became small. For the same sizes of interrogation areas, the larger particle sizes and the larger number of particles resulted smaller errors. Especially, the errors of the image velocimetries were more affected by the number of particles rather than the sizes of them. As the sizes of interrogation areas were increased, the differences between the maximum and the minimum errors seemed to be reduced. For the size of the interrogation area whose average errors were less than 5%, the differences between the maximum and the minimum errors seemed a little large. For the case, in other words, the uncertainty of the velocity measurements of the image velocimetry was large. In the viewpoint of the particle density, the size of the interrogation area was small for large particle density cases. For the cases of large number of particle and small particle density, however, the minimum size of interrogation area became smaller.

Keywords : image velocimetry (IV), interrogation area, artificial image, error analysis

요 지

최근 수리 실험 및 계측 분야에 영상유속계가 많이 이용되고 있다. 그러나 영상유속계의 영상 분석에 대한 표준적인 방법과 측정 불확도가 정립되어 있지 않아 일반 사용자들이 사용하기 어려운 것이 사실이다. 특히 영상유속계를 이용한 유속 산정 시 상관영역 크기 결정에 대한 기준이 없기 때문에 사용자마다 유속 산정 결과가 차이가 나는 문제가 있다. 이에 본 연구에서는 영상유속계의 상관영역 크기 변화에 따른 오차 분석을 통해 상관영역 크기 결정을 위한 자료를 제시하고

* 명지대학교 토목환경공학과 박사과정 (e-mail: seojuny@paran.com)

Ph.D. Candidate, Dept. of Civil & Environmental Eng, Myongji University, San 38-2 Nam-dong, Yongin, Gyeonggi-do 449-728, Korea

** 교신저자, 동의대학교 토목공학과 교수 (e-mail: pururumi@deu.ac.kr, Tel: 82-51-890-1631)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil Eng, Dong-Eui University, 176 Eomgwangno, Busanjin-gu, Busan 449-728, Korea,

*** 명지대학교 토목환경공학과 교수 (e-mail: bmyoon@mju.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng, Myongji University, San 38-2 Nam-dong, Yongin, Gyeonggi-do 449-728, Korea

자 한다. 오차 분석을 위해 12개의 인공영상군을 제작하였으며, 다양한 입자수와 입자크기의 영상을 획득한 후 상관영역의 크기를 변화시키면서 산정한 유속을 인공영상의 유속 참값과 비교하여 오차 분석을 수행하였다. 오차 분석 결과 상관영역의 크기 변화에 따라 영상유속계로 산정한 유속값에 대한 오차가 달라짐을 확인하였고, 상관영역의 크기를 크게 결정할수록 오차가 줄어드는 것으로 나타났고, 동일한 상관영역의 크기로 유속을 산정할 경우 입자 크기가 증가할수록 또는 입자수가 증가할수록 오차가 작게 나타났다. 특히 영상유속계의 오차는 입자의 크기 보다는 입자수의 변화에 좀 더 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 또한 상관영역의 크기가 커짐에 따라 최대 오차와 최소 오차간의 간격이 줄어드는 것을 확인하였으며, 영상 전체에서 산정한 유속의 평균 오차가 5% 이하를 만족시키는 상관영역 크기를 기준으로 그 이하의 상관영역에 대해서는 최대 오차와 최소 오차 간의 차이가 크게 나타나 영상유속계의 측정 불확실성이 큰 것으로 나타났다. 영상유속계의 신뢰수준별 입자밀도 변화에 따른 최소 상관영역의 크기를 분석한 결과 전반적으로 입자밀도가 커짐에 따라 상관영역의 크기는 작아지는 것으로 나타났지만 입자밀도가 작더라도 입자수가 큰 경우에는 신뢰수준을 만족시키는 최소 상관영역의 크기가 감소하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 영상유속계, 상관영역, 인공영상, 오차 분석

1. 서 론

영상유속계는 정량적 가시화(quantitative visualization) 기법으로서 대상영역의 정량적인 유속장을 획득할 수 있다는 장점이 있다(Lee et al., 2005). 대표적인 영상유속계인 PIV(Particle Image Velocimetry)는 Kean and Adrian (1992)이 상호상관(cross correlation) 알고리즘을 발표한 후 다양한 연구들을 통해 발전되었다. 최근에는 2차원 PIV 기법뿐만 아니라 3차원 계측을 위한 Stereoscopic PIV 기법 등이 개발되었다. 특히 하천 수리 계측 분야에서는 PIV 기법을 응용하여 Fujita and Komura (1994)와 Aya et al. (1995)이 하천 표면의 유속을 계산하는 기법인 표면영상유속계(LSPIV, Large Scale Image Velocimetry 또는 SIV, Surface Image Velocimetry)를 개발하였고, Meselhe et al. (2004), Roh (2005), Hauet et al. (2008), Kim et al. (2011), Dramais et al. (2011), Kantoush et al. (2011), Muste et al. (2011) 및 Fujita and Kunita (2011) 등에 의해 하천 또는 실험실의 수리 계측에 다양하게 활용되었다. 이와 같이 영상유속계가 유속장 계측에 활발하게 적용되고 있으나 영상유속계의 사용 방법에 대한 기준이 미흡하여 일반 사용자들이 쉽게 사용하기 어렵고, 측정 불확도가 정립되어 있지 않아 영상유속계로 측정된 유속값의 신뢰도를 제시하기 어렵다는 한계를 가지고 있다.

영상유속계에 대한 계측 정확도를 평가한 연구로는 Willert and Gharib (1991)가 가상의 디지털 영상으로부터 입자의 변위, 밀도에 따른 RMS 오차에 대해 논의하였고, TSI (1999)는 PIV 기법 적용시 경험적으로 하나의 상관영역에 10개 입자쌍이 필요하고, 입자 크기에 대해서는

입자나 영상 형태가 최소 3~6 pixel을 점유해야 한다고 하였다. 또한 Meselhe et al. (2004)은 표면영상유속계의 현장 적용시 흐름 표면에 10~30% 내외의 입자 영상 밀도가 필요하다고 하였다. 국내에서는 Lee et al. (2005)이 표면영상을 이용한 PIV의 상호상관법에 대하여 입자 직경, 변위, 입자수 밀도에 따른 오차를 분석하였고, Sung et al. (2006)은 PIV 성능시험을 위한 표준실험장치를 개발하고 2차원 상호상관 PIV 시스템의 구성요소인 상관관계법, 카메라 종류 및 영상 그래픽이 가지고 있는 계통적 불확도를 평가하였다. 이와 같이 PIV 기법과 표면영상유속계의 오차 및 불확도 평가에 대한 많은 연구들이 수행되었지만 대부분 영상내 입자크기와 입자수 변화에 따른 오차 분석을 수행하였고, 오차 분석 범위를 폭넓게 다루지 못하여 연구 결과를 일반화시키기 어렵다는 한계를 가지고 있다. 특히 영상 분석에 있어서 가장 중요한 상관영역 크기 변화에 따른 영향에 관한 연구는 많이 부족한 실정이다. Hu et al. (1998)은 상관영역의 크기 변화에 따라 상관영역내 명암값 정보가 달라지기 때문에 영상유속계의 정확도에 직접적인 영향을 미친다고 하였고, 최적의 상관영역의 크기는 13화소에서 23화소 정도이며 상관영역내 입자수는 10개에서 34개 정도라고 하였다. Forliti et al. (2000)은 영상유속계의 상관계수 침투값 탐색 과정의 오차가 상관영역의 크기의 영향을 받는다고 하였으며, Lee et al. (2005)은 통상적으로 상관영역의 크기를 64×64화소 또는 32×32화소로 설정하도록 한다고 하였다. 한편, Kim (2006)은 표면영상유속계에서 입자 혹은 패턴의 크기에 따라 최적 상관영역 크기를 결정해야 한다고 하였다. 그러나 영상유속계의 경우 실제 영상 획득 시 영상 해상도와 촬영

거리에 따라 입자가 차지하는 화소수도 달라지고, 상관영역내 입자밀도도 달라지기 때문에 상관영역 크기를 정량적인 값으로 제시하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 획득한 영상에 대하여 상관영역의 크기 변화가 영상유속계의 오차에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해서, 영상내 입자수와 입자크기를 조절하면서 인공영상을 제작하였고, 제작한 영상에 대하여 상관영역의 크기를 변화시키면서 영상유속계의 유속 산정 오차를 분석하였다. 또한 영상의 평균 입자밀도와 신뢰수준을 만족시키는 최소 상관영역 크기의 관계를 분석하였다.

2. 영상유속계의 유속 산정 원리

영상유속계는 미소영역의 명암값 분포 자료를 이용하여 상호상관법으로 유속을 산정한다(Raffel et al., 2007). 상호상관법을 이용한 유속 산정 과정은 Fig. 1과 같다. 우선 Fig. 1(a)와 같이 첫 번째 영상의 유속 측정점을 기준으로 상관영역(interrogation area)의 크기를 결정하고, Fig. (b)와 같이 두 번째 영상에서 첫 번째 영상의 상관영역 명암값 분포와 상관계수가 가장 큰 입자군을 탐색영역(searching area)내에서 찾아서 Fig. 1(c)와 같이 상관영역의 이동거리를 계산하여 영상간 시간간격으로 나누어 유속을 산정한다.

상관영역내 명암값 분포의 비교는 Eq. (1)의 상호상관법으로 계산하고, 상관계수 R_{ab} 가 1에 가장 가까운 값을 갖는 탐색영역 내 상관영역을 동일한 입자군으로 찾게 된다.

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{NY} [(a_{ij} - \bar{a}_{ij})(b_{ij} - \bar{b}_{ij})]}{\left[\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{NY} (a_{ij} - \bar{a}_{ij})^2 \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{NY} (b_{ij} - \bar{b}_{ij})^2 \right]^{1/2}} \quad (1)$$

여기서, MX 와 NY 는 상관영역의 화소 크기를 나타내며, a_{ij}, b_{ij} 는 각각 dt 시간간격으로 연속되는 두 영상내 상관영역의 화소에 대한 i 열과 j 행에 대한 명암값을 나타내고, $\bar{a}_{ij} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_{ij}$, $\bar{b}_{ij} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N b_{ij}$ 는 상관영역내 모든 명암값들의 평균을 나타낸다.

3. 오차 분석 방법

3.1 인공영상 제작

영상유속계의 오차를 정량적으로 분석하기 위해서는 기지의 속도벡터와 상호상관법으로 산정된 속도벡터 사이의 오차를 분석하는 것이 중요하다. 또한 영상유속계의 다양한 오차 요인 중 영상획득과 왜곡영상 변환 과정에서 발생할 수 있는 오차들과 같은 제반 불확실성을 배제하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 가시화정보학회(The Visualization Society of Japan, 2002)의 PIV 표준 영상 제작법을 기초로 하여 Fig. 2와 같이 일방향 흐름만 존재하는 인공영상을 제작하였다.

입자 명암값 패턴은 Gauss 분포를 사용하였으며, 입자의 실제 좌표 (x_p, y_p, z_p) 를 영상에 투영한 위치를 (X, Y) 로 놓고, 영상의 명암값 패턴 $I(x, y)$ 를 Eq. (2)로 제작하였다.

$$I(x, y) = I_0 \exp \left\{ \frac{-(x-x_p)^2 - (y-y_p)^2}{(1/8)d_p^2} \right\} \quad (2)$$

여기서, d_p 는 영상 내 입자의 크기를 나타낸다. 또한 입자의 밝기를 나타내는 입자의 밝기 값(I_0)은 레이저 평면광 두께 내부의 분포함수도 가우스함수를 사용한다. 입자 중심에서 최대 강도는 입자가 평면광 두께 내의 위치를 고

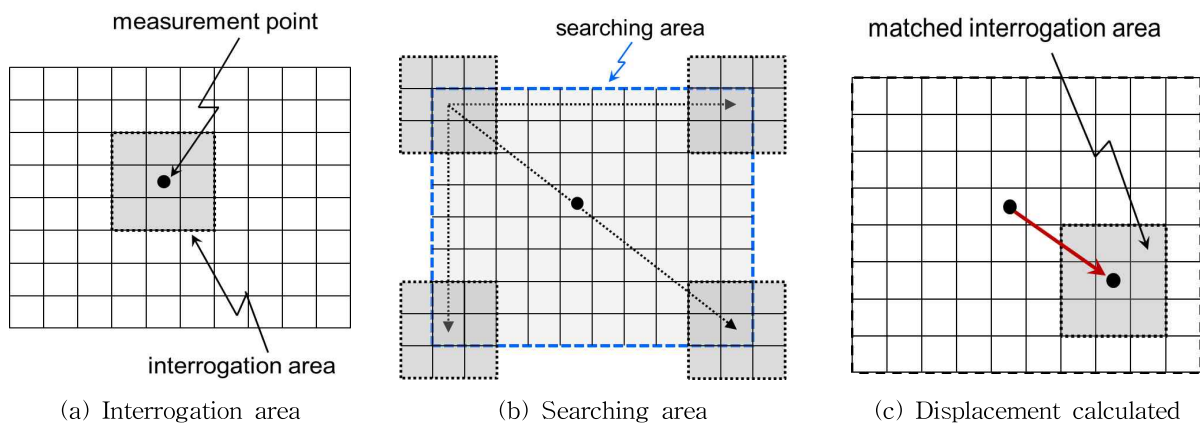


Fig. 1. Formulation of Correlation Plane by Direct Cross-correlation

려하여 Eq. (3)으로 결정하였다.

$$I_0 = I_{\max} \exp \left\{ \frac{-z_p^2}{(1/8) T^2} \right\} \quad (3)$$

여기서, T 는 레이저 광면의 두께, I_{\max} 는 영상위의 입자 휘도의 최대값이다.

본 연구에서는 인공영상 전체 해상도를 $1,000 \times 1,000$ 화소로 결정하였고, 상관영역의 크기 변화에 따른 영상유속계의 오차를 분석하기 위해 Table 1과 같이 입자 크기는 5화소, 10화소, 15화소, 20화소로 제작하였으며, 각 입자 크기에 따라 입자수는 1,000개, 5,000개, 10,000개로 변화를 주어 총 12가지 경우에 대한 인공영상을 제작하였다. 영상간의 시간 간격은 1/30초로 하여 각 경우별로 인공영상은 31매씩 제작하였다. 또한 2차원 흐름일 경우 상관영역내 유속차이에 따른 오차를 포함할 수 있기 때문에 영상내 모든 입자들을 수평방향으로 1차원 흐름만 발생하도록 하였다. 영상내 입자의 수평방향 이동속도는 초당 900화소로 제작하였으며, 연속된 영상 사이의 입자 이동거리로 환산하면 프레임당 30화소만큼 이동하도록 하였다. 일반 캠코더의 프레임 수가 30이기 때문에 이를 고려하면서 프레임당 이동거리를 정수로 만들기 위해서 30의 배수를 사용하는 것이 적절하며, 또한 입자크기를 최대 20화소까지 증가시켜도 영상 내에서 입자의 움직임을 쉽게 확인할 수 있게 하기 위해서는 이동거리가 그보다 크게 하는 것이 좋을 것으로 판단하여 이동거리를 프레임

당 30화소로 설정하였다.

3.2 유속 및 오차 산정 방법

상호상관법을 이용한 영상유속계의 유속 산정과정에는 여러 가지 요인들로 인해 오차가 발생할 수 있는데, 대표적으로 상관영역내 입자 정보가 부족한 경우, 서로 일치하지 않는 입자가 존재하는 경우, 상관영역내 유속 차이가 큰 경우 등에 의해 오류 백터가 포함될 수 있다. 이러한 오차를 줄이기 위해 Imaichi and Ohmi (1983)은 테일러전개의 1차식 및 최소자승법을 적용하여 등간격격자 보간을 제안하였고, Agui and Zimenez (1987)은 기중계수로서 Gauss 분포의 인도우 형태를 갖는 기법을 제안하였으며, Spedding and Rignot (1993)은 spline 기법을 이용한 보간법을 제시하였다. 이와 같이 오류 속도벡터를 제거하기 위해 여러 가지 보간 기법들이 개발되었으나 본 연구에서는 이들 기법들의 영향을 배제하고 상호상관 기법 자체의 기본적인 알고리즘의 오차를 분석하도록 하였다.

유속산정 격자는 가로방향으로 18개와 세로방향으로 19개로 나누어 총 342개 지점에 대하여 산정하였고, 상관영역의 크기는 유속 산정 격자점을 기준으로 가로와 세로를 동일하게 증가시키면서 정사각형 형태로 5화소부터 가로와 세로를 2화소씩 증가시키면서 81화소까지 총 20가지로 변화시켰다. 또한 탐색영역의 크기는 영상간의 입자 이동거리인 30화소보다 크게 설정하기 위해 40화소로 결정하였다. 이와 같이 상관영역의 크기를 변화시키면서 산

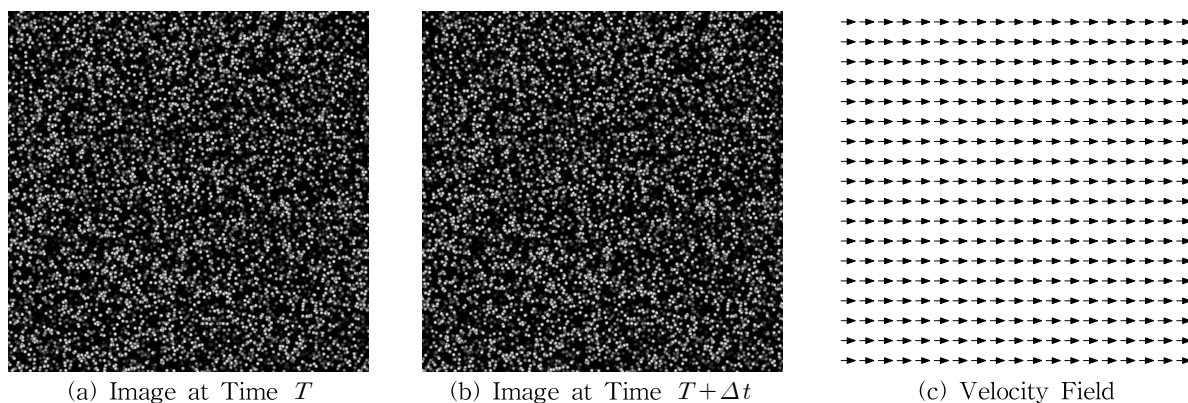


Fig. 2. Artificial Image Pair and Its Velocity Field

Table 1. Parameters for the error analysis of the Image Velocimetry

Parameters	Values			
Number of particle (N_p)	1,000	5,000	10,000	
Particle diameter (D_p)	5 pixel	10 pixel	15 pixel	20 pixel

정된 유속벡터는 참값인 900 pixel/s와 비교하여 Eq. (4)와 같이 오차를 계산하였다.

$$Error(\%) = \left| \frac{U_t - U_m}{U_t} \right| \times 100(\%) \quad (4)$$

여기서, U_t 는 인공영상의 유속 참값, U_m 는 영상유속계로 산정한 유속값이다.

영상유속계의 유속 산정 방법인 상호상관법에 따르면 배경색인 검정색을 제외한 모든 명암값은 상관계수 계산에 영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 상관영역내 입자 밀도를 영상내 명암값의 한계치 이상의 명암값을 가지는 화소의 비율로 정의하였다. 따라서 Fig. 3과 같이 명암값의 한계치를 검정색인 0의 값으로 하고 입자가 포함된 화소는 흰색인 255의 명암값을 갖도록 하여 입자밀도(Pd)를 계산하였다. 그리고 상관영역내 입자밀도를 Eq. (5)과 같이 계산하였다.

$$Pd(Particle\ density) = 1 - \frac{m_0}{m_{total}} \quad (5)$$

여기서, m_{total} 은 영상내 전체 화소수, m_0 는 명암값이 0인 화소수이다.

4. 오차 분석 결과

4.1 입자크기와 입자수 변화에 따른 오차 분석

영상유속계의 상관영역 크기 변화에 따른 오차를 분석하기 위해 입자수와 입자크기를 달리 제작한 12가지 경우의 영상들을 영상유속계로 유속을 산정하였고, 각 영상마다 산정된 총 342개 지점의 평균 오차는 Fig. 4에 나타났다. 또한 각 인공영상의 입자크기에 해당하는 화소를 점

선으로 표현하여 상관영역의 크기가 입자크기 보다 크거나 작은 경우의 오차 결과를 쉽게 비교할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 사용한 인공영상은 입자내 명암값이 동일하지 않기 때문에 Fig. 4(d)와 같이 입자크기와 상관영역의 크기가 같더라도 입자수가 10,000개일 경우는 오차가 작게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

영상내 입자크기와 입자수를 변화시키면서 오차를 분석한 결과 상관영역의 크기를 크게 결정할수록 오차가 감소하는 것으로 나타났다. Hart (2000)가 영상내 입자밀도를 증가시키지 않고 상관영역의 크기를 증가시켜 상관영역내 입자수를 증가시키는 방법으로 PIV 기법의 오차를 감소시킬 수 있다는 주장과 동일한 결과를 나타냈다. 즉, 영상내 입자밀도가 동일할 경우 상관영역의 크기를 증가시키면 상관영역내 입자수가 증가하고 이에 따라 상관영역내 입자 정보가 많아지기 때문에 상관계수 침투값 탐색 오류를 줄일 수 있는 확률이 커지므로 유속 산정 오차가 감소하는 것으로 나타났다. 또한 동일한 상관영역의 크기로 유속을 산정할 경우 입자 크기가 증가할수록 또는 입자수가 증가할수록 오차가 작게 나타났다. 예를 들어 입자수가 5,000개로 동일한 영상에 대하여 상관영역의 크기를 9화소로 결정하고 유속을 산정하게 되면 영상 전체의 평균 오차가 입자크기가 5화소인 경우는 44%, 10화소인 경우는 24%, 15화소인 경우는 9%, 20화소인 경우는 3% 발생하는 것으로 나타났다. 반대로 입자크기가 10화소로 동일한 영상에 상관영역의 크기를 9화소로 결정하고 유속을 산정하게 되면 영상 전체의 평균 오차가 입자수가 1,000개인 경우는 75%, 5,000개인 경우는 24%, 10,000개인 경우는 5% 발생하는 것으로 나타났다. 또한 영상유속계의 오차는 입자크기 보다는 입자수의 변화에 좀 더 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

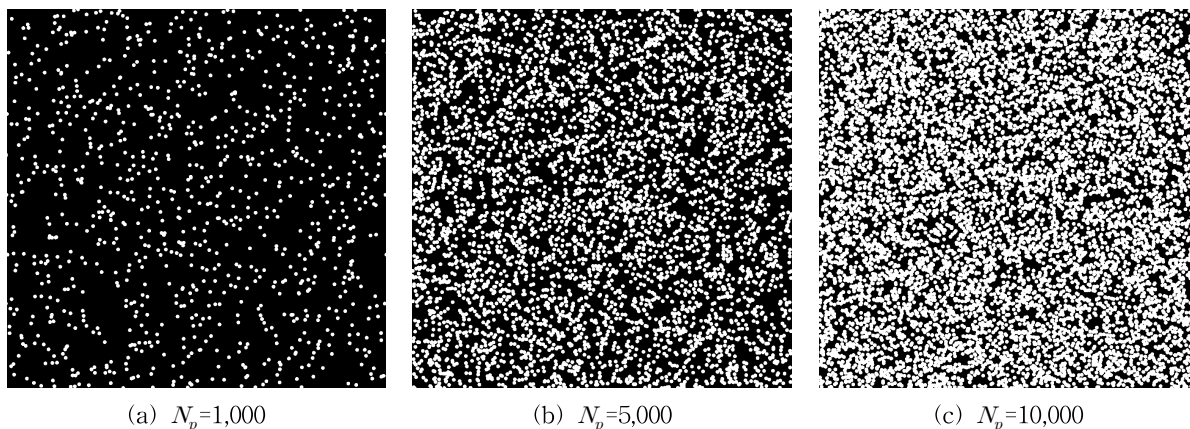


Fig. 3. Binarized Artificial Images with Various Number of Particles

4.2 입자밀도 변화에 따른 오차 분석

실제 영상의 경우 입자크기를 하나의 값으로 결정하기 어렵다. 따라서 입자수와 입자크기를 대표할 수 있는 값으로 본 연구에서는 입자밀도를 사용하였다. 다양한 입자수와 입자크기를 갖는 영상이라 하더라도 입자밀도는 하나의 값을 갖기 때문에 영상의 명암값 특성을 입자밀도로 대표할 수 있을 것으로 판단하였다. 본 연구에서 제작한 총 12가지 경우의 영상에 대한 평균 입자밀도는 Table 2와 같다. 전체적으로 입자밀도는 0.02에서 0.958까지 다양하게 분포하였다. 입자밀도별 상관영역 크기 변화에 따른 오차를 분석한 결과 영상내 총 342지점의 유속 산정값의

오차는 Fig. 5와 같이 최대값과 최소값 및 평균값으로 나타내었다. 분석 결과 전반적으로 상관영역의 크기가 커짐에 따라 최대 오차와 최소 오차간의 간격이 줄어드는 것을 확인하였다. 또한 평균 오차가 5% 이내로 나타난 상관영역 크기 이하의 상관영역에 대해서는 최대 오차와 최소 오차 간의 간격이 너무 크게 나타나 영상유속계의 측정 불확실성이 큰 것으로 나타났다. 예를 들어 영상의 평균 입자밀도가 0.020 ($D_p=5$ 화소, $N_p=1,000$)인 경우는 상관영역의 크기가 25화소일 때와 33화소일 때 최대 오차와 최소 오차가 약 53% 정도 차이를 보였으며, 영상의 평균 입자밀도가 0.267 ($D_p=20$ 화소, $N_p=1,000$)인 경우는 상관영역의 크기가 13화소일 때 최대 오차와 최소 오차가 약

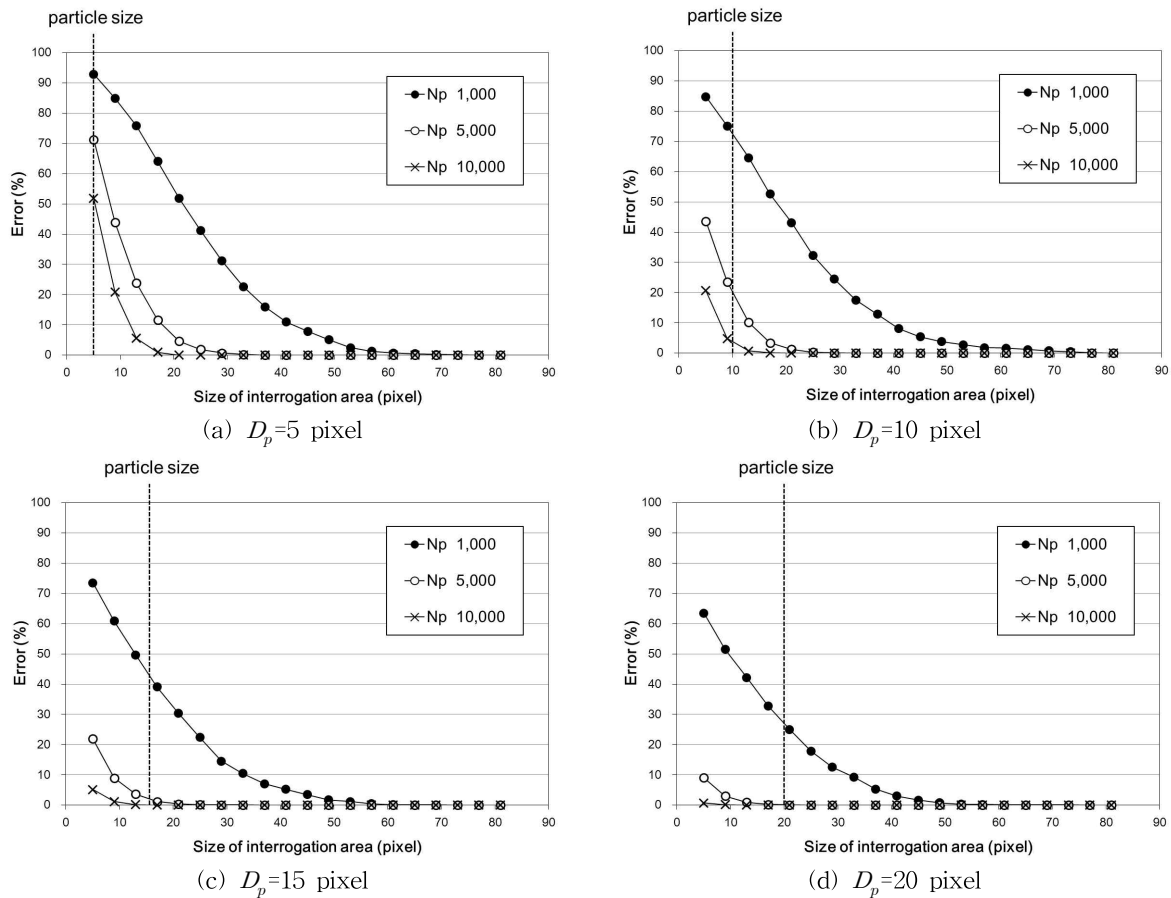
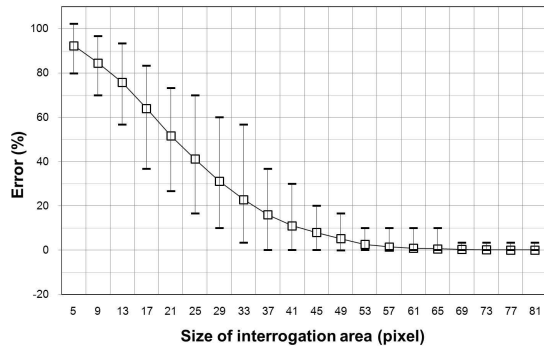


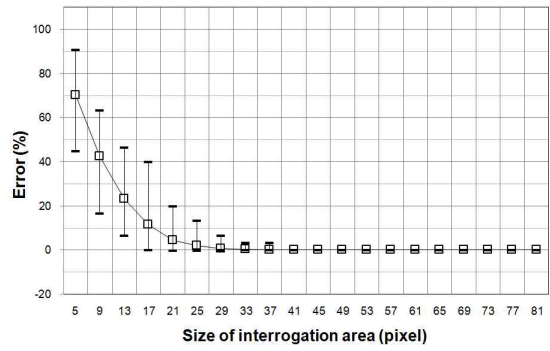
Fig. 4. Mean Error according to Variation of the Size of Interrogation Area

Table 2. Mean Particle Densities of the Artificial Images

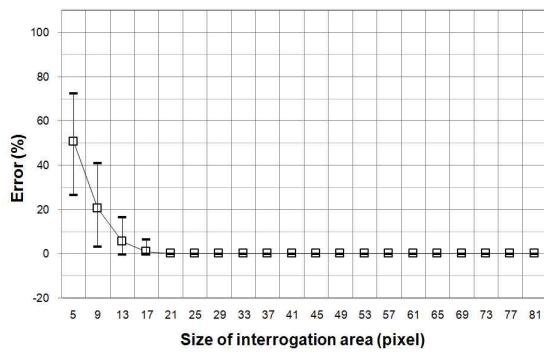
Size of particle	5 pixel			10 pixel			15 pixel			20 pixel		
Number of particle	1,000	5,000	10,000	1,000	5,000	10,000	1,000	5,000	10,000	1,000	5,000	10,000
Particle density	0.020	0.094	0.178	0.075	0.326	0.544	0.165	0.592	0.829	0.267	0.795	0.958



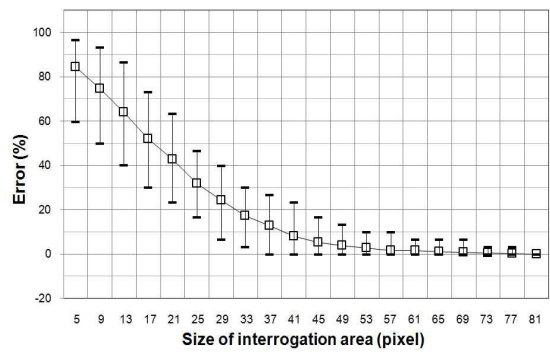
(a) Particle Density=0.020



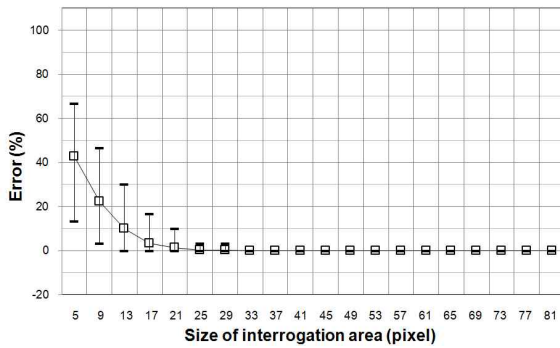
(b) Particle Density=0.094



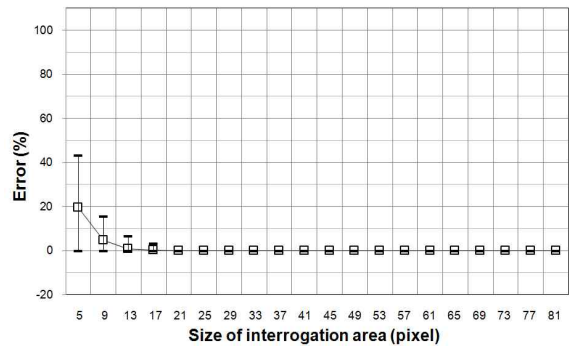
(c) Particle Density=0.178



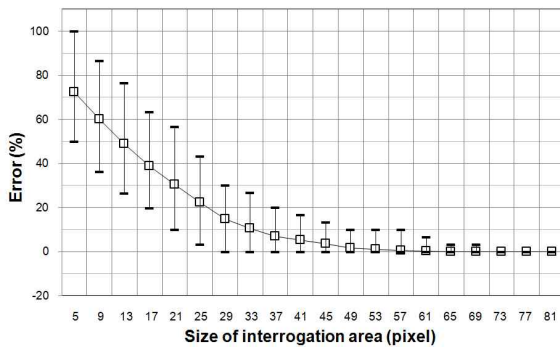
(d) Particle Density=0.075



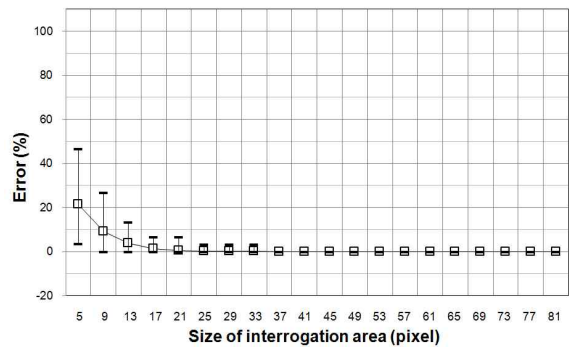
(e) Mean Particle Density=0.326



(f) Mean Particle Density=0.544

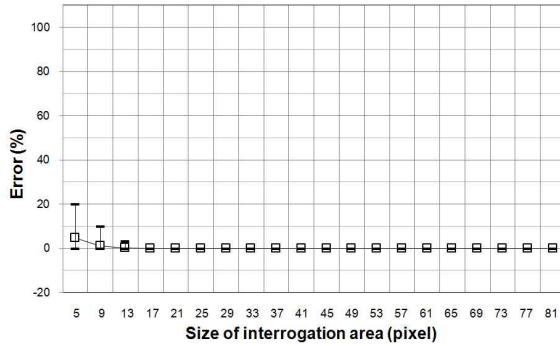


(g) Mean Particle Density=0.165

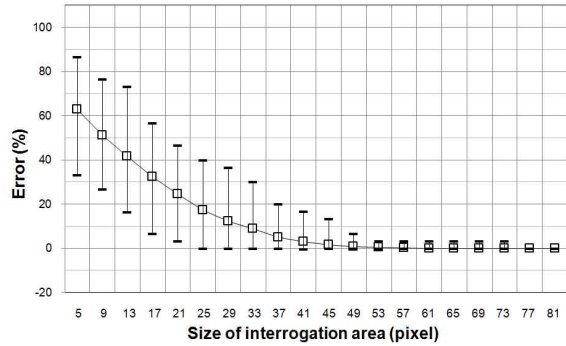


(h) Mean Particle Density=0.592

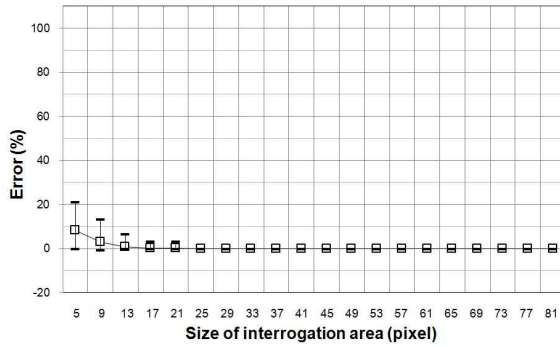
Fig. 5. Error Analyses with Various Particle Densities



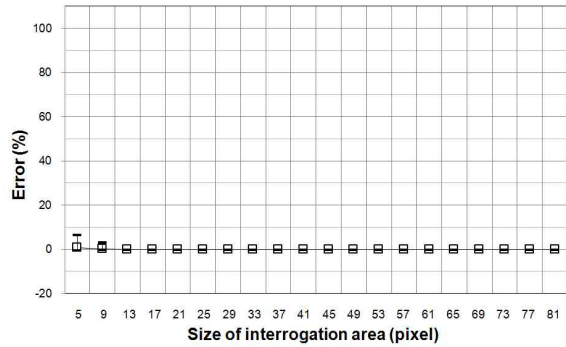
(i) Mean Particle Density=0.829



(j) Mean Particle Density=0.267



(k) Mean Particle Density=0.795



(l) Mean Particle Density=0.958

Fig. 5. Error Analyses with Various Particle Densities (continued)

56% 정도 차이를 보였다. 이와 같이 상관영역의 크기를 어떻게 결정하느냐에 따라 영상유속계의 평균 오차뿐만 아니라 각각의 유속 산정 결과에 대한 불확실성에도 많은 영향을 미치는 것을 확인하였다.

4.3 신뢰수준별 최소 상관영역 크기 비교

영상유속계의 상관영역 크기 변화에 따른 오차 분석 결과를 이용하여 신뢰수준별 최소 상관영역의 크기를 분석하였다(Table 3). 영상유속계의 신뢰수준별 입자밀도 변화에 따른 최소 상관영역의 크기를 분석한 결과 전반적으로 입자밀도가 커짐에 따라 상관영역의 크기는 작아지는 것으로 나타났다. 다만 입자밀도가 작더라도 입자수가 큰 경우에는 허용오차를 만족시키는 최소 상관영역의 크기가 감소하는 것으로 나타났다. 그 이유는 동일한 상관영역

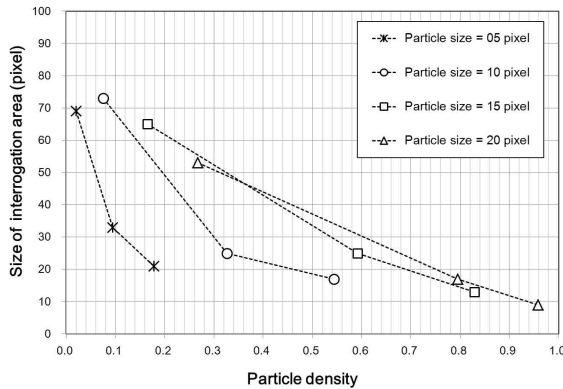
크기 안에 포함된 입자의 크기가 큰 경우보다는 입자수가 많은 경우가 좀 더 명암값 분포가 다양하여 상관계수 침투 값 탐색 오류를 줄일 수 있기 때문으로 판단된다. 예를 들어 영상유속계의 신뢰수준을 99%라고 가정하였을 때 영상의 평균 입자밀도가 0.178 ($D_p=5$ 화소, $N_p=10,000$)인 영상은 상관영역의 크기를 25화소로 설정하여도 신뢰수준을 만족시킬 수 있는 반면 영상의 평균 입자밀도가 0.267 ($D_p=20$ 화소, $N_p=1,000$)인 영상은 상관영역의 크기를 77화소로 설정하여야만 신뢰수준을 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 입자수와 입자밀도도 영상유속계의 오차에 영향을 주기 때문에 단순히 입자밀도와 상관영역 크기의 관계를 제시하기는 어려울 것으로 판단된다.

또한 Fig. 6을 살펴보면 동일한 입자크기에서 입자밀도가 작은 경우에는 상관영역 크기를 크게 결정하여야 하며,

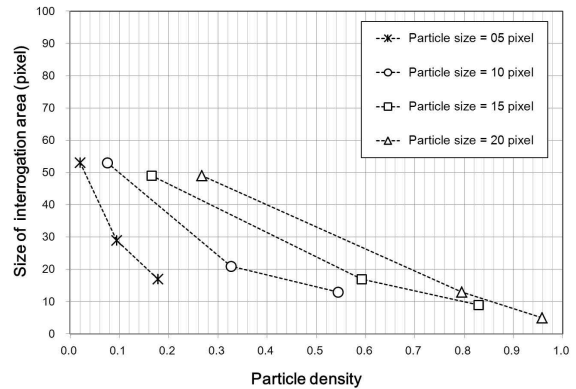
Table 3. Size of Interrogation Area with Confidence Levels

(unit=pixel)

Mean particle density	0.020	0.075	0.094	0.165	0.178	0.267	0.326	0.544	0.592	0.795	0.829	0.958	
Confidence level	99 %	-	81	41	73	25	77	33	21	37	25	17	13
	95 %	69	73	33	65	21	53	25	17	25	17	13	9
	90 %	53	53	29	49	17	49	21	13	17	13	9	5



(a) 95 percent for confidence level



(b) 90 percent for confidence level

Fig. 6. Size of Interrogation Area with Confidence Levels

입자밀도가 작더라도 입자크기가 작은 경우는 상대적으로 입자수가 많기 때문에 상관영역의 크기를 작게 결정하여도 되는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 영상의 평균 입자밀도와 원하는 신뢰수준을 만족시킬 수 있는 상관영역 크기의 관계를 대략적으로 판단하는데 유용할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 영상유속계의 상관영역 크기 변화에 따른 오차 분석을 위해 일방향 흐름을 갖는 인공영상을 이용한 오차 분석 방법을 제시하였으며 영상내 입자수와 입자크기를 변화시킨 영상들을 제작하였다. 제작한 영상을 이용하여 상관영역의 크기를 변화시키면서 영상유속계를 이용하여 산정한 유속값과 인공영상의 유속 참값을 비교하면서 오차를 분석하였다. 마지막으로 다양한 입자수와 입자크기를 갖는 영상들에 대해 상관영역 크기 변화에 따른 오차를 분석하였고, 입자밀도와 신뢰수준을 만족시키는 최소 상관영역 크기의 관계를 분석하였다. 본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 영상 내 입자수와 입자크기를 다양하게 변화시킨 영상들에 대하여 상관영역을 변화시키면서 영상유속계의 오차를 분석한 결과 상관영역의 크기를 크게 결정할수록 오차가 줄어드는 것으로 나타났고, 동일한 상관영역의 크기로 유속을 산정할 경우 입자 크기가 증가할수록 또는 입자수가 증가할수록 오차가 작게 나타났다. 특히 영상유속계의 오차는 입자의 크기 보다는 입자수의 변화에 좀 더 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.
- 2) 상관영역의 크기가 커짐에 따라 최대 오차와 최소 오

차간의 간격이 줄어드는 것을 확인하였으며, 영상 전체에서 산정한 유속의 평균 오차가 5% 이하를 만족시키는 상관영역 크기를 기준으로 그 이하의 상관영역에 대해서는 최대 오차와 최소 오차 간의 차이가 크게 나타나 영상유속계의 측정 불확실성이 큰 것으로 나타났다.

- 3) 영상유속계의 신뢰수준별 입자밀도 변화에 따른 최소 상관영역의 크기를 분석한 결과 전반적으로 입자밀도가 커짐에 따라 상관영역의 크기는 작아지는 것으로 나타났지만 입자밀도가 작더라도 입자수가 큰 경우에는 신뢰수준을 만족시키는 최소 상관영역의 크기가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 신뢰수준을 만족시키는 상관영역의 크기는 입자밀도 뿐만 아니라 입자수를 고려하여 결정하여야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 수행한 영상유속계의 오차 분석 결과는 영상의 입자밀도에 대한 신뢰수준을 만족시킬 수 있는 상관영역 크기를 결정하기 위한 기초 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다. 실제로 영상유속계를 이용하여 유속을 산정하기 위해 촬영한 영상의 해상도, 입자의 이동거리(이동화소), 입자크기, 입자수 등은 흐름특성과 촬영조건에 따라 달라지기 때문에 향후 다양한 유속 측정 환경과 분석 방법을 고려한 영상유속계의 오차 분석 연구를 통해 획득한 영상에서 발생할 수 있는 오차의 경향을 정량적으로 제시하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Agúí, J., and Jiménez, J. (1987). "On the performance of particle tracking." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 185, pp. 447-468.
- Aya, S., Fujita, I., and Yagyu, M. (1995). "Field-observation of flood in a river by video image analysis." *Annual Journal of hydraulic Engineering*, Vol. 39, No. 4, pp. 447-452. (in Japanese)
- Dramais, G., Coz, J.L., Camenen, B., and Hauet, A. (2011). "Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage discharge curves." *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 5, No. 4, pp. 301-312.
- Forliti, D.J., Strykowski, P.J., and Debatin, K. (2000). "Bias and precision errors of digital particle image velocimetry." *Experiments in Fluids*, Vol. 28, No. 5, pp. 436-447.
- Fujita, I., and Komura, S. (1994). "Application of video image analysis for measurements of river-surface flows." *Proc. of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol. 38, pp. 733-738.
- Fujita, I., and Kunita, Y. (2011). "Application of aerial LSPIV to the 2002 flood of the Yodo River using a helicopter mounted high density video camera." *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 5, No. 4, pp. 323-331.
- Hart, D.P. (2000). "PIV error correlation." *Experiment in Fluids*, Vol. 29, No. 1, pp. 13-22.
- Hauet, A., Kruger, A., Krajewski, W.F., Bradley, A., Muste, M., and Creutin, J.D. (2008). "Experimental system for real-time discharge estimation using an image-based method." *Journal of Hydrological Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 105-110.
- Hu, H., Saga, T., Kobayashi, T., Okamoto, K., and Taniguchi, N. (1998). "Evaluation of the cross correlation method by using PIV standard images." *Journal of Visualization*, Vol. 1, No. 1, pp. 87-94.
- Imaichi, K., and Ohmi, K. (1983). "Numerical processing of flow-visualization pictures-measurement of two-dimensional vortex flow." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 129, pp. 283-311.
- Kantoush, S.A., Schleiss, A.J., Sumi, T., and Murasaki, M. (2011). "LSPIV implementation for environmental flow in various laboratory and field cases." *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 5, No. 4, pp. 263-276.
- Kean, R.D., and Adrian, R.J. (1992). "Theory of cross-correlation of PIV images." *Applied Scientific Research*, Vol. 49, No. 3, pp. 191-215.
- Kim, S.J., Yu, K.K., and Yoon, B.M. (2011). "Real-time Discharge Measurement of the river using Fixed-type Surface Image Velocimetry." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 5, pp. 377-388. (in Korean)
- Kim, Y. (2006). *Uncertainty analysis for non-intrusive measurement of river discharge using image velocimetry*, Ph.D. thesis, Univ. of Iowa, Iowa City.
- Lee, S.J., Choi, J.G., Sung, J.Y., Hwang, T.G., and Doh, D.H. (2005). "Uncertainty analysis of cross-correlation algorithm based on FFT by PIV standard images." *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol. 3, No. 2, pp. 71-77. (in Korean)
- Meselhe, E.A., Peeva, T., and Muste, M. (2004). "Large Scale Particle Image Velocimetry for Low Velocity and Shallow Water Flows." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 9, pp. 937-940.
- Muste, M., Ho, H.-C., and Kim, D. (2011). "Considerations on direct stream flow measurements using video imagery: Outlook and research needs." *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 5, No. 4, pp. 289-300.
- Raffel, M., Willert, C., Wereley, S., and Kompenhans, J. (2007). *Particle image velocimetry, a practical guide*, Springer.
- Roh, Y.S. (2005). *Development of river discharge measurement technique using image analysis*. Ph.D. thesis, Dept. of Civil and Env. Eng, Myongji University. (in Korean)
- Spedding, G.R., and Rignot, J.M. (1993). "performance analysis and application of grid interpolation techniques for fluid flows." *Experiment in Fluids*, Vol. 15, No. 6, pp. 417-430.
- Sung, J.Y., Doh, D.H., Lee, S.J., and Hwang, T.G. (2006). "Development of standard experimental apparatus for PIV performance evaluation." *Journal of the Korean*

Society of Visualization, Vol. 4, No. 2, pp. 37-43. (in Korean)

The Visualization Society of Japan (2002). Handbook of Particle Image Velocimetry, Morikita Publication. (in Japanese)

TSI Incorporated. (1999). Particle image velocimetry (PIV): operation manual, Shoreview, Minn.

Willert, C.E., and Gharib, M. (1991). "Digital particle image velocimetry." *Experiment in Fluids*, Vol. 10, No. 4, pp. 181-193.

논문번호: 13-038	접수: 2013.03.25
수정일자: 2013.05.08/05.13	심사완료: 2013.05.13