

# 상호상관법을 이용한 시공간 영상유속계의 2차원 유속분포 측정

## Measurement of Two-Dimensional Velocity Distribution of Spatio-Temporal Image Velocimeter using Cross-Correlation Analysis

류 권 규\* / 김 서 준\*\* / 김 동 수\*\*\*  
Yu, Kwongyu / Kim, Seojun / Kim, Dongsu

### Abstract

Surface image velocimetry was introduced as an efficient and sage alternative to conventional river flow measurement methods during floods. The conventional surface image velocimetry uses a pair of images to estimate velocity fields using cross-correlation analysis. This method is appropriate to analyzing images taken with a short time interval. It, however, has some drawbacks; it takes a while to analyze images for the verage velocity of long time intervals and is prone to include errors or uncertainties due to flow characteristics and/or image taking conditions. Methods using spatio-temporal images, called STIV, were developed to overcome the drawbacks of conventional surface image velocimetry. The grayscale-gradient tensor method, one of various STIVs, has shown to be effectively reducing the analysis time and is fairly insusceptible to any measurement noise. It, unfortunately, can only be applied to the main flow direction. This means that it can not measure any two-dimensional flow field, e.g. flow in the vicinity of river structures and flow around river bends. The present study aimed to develop a new method of analyzing spatio-temporal images in two-dimension using cross-correlation analysis. Unlike the conventional STIV, the developed method can be used to measure two-dimensional flow substantially. The method also has very high spatial resolution and reduces the analysis time. A verification test using artificial images with lid-driven cavity flow showed that the maximum error of the method is less than 10 % and the average error is less than 5 %. This means that the developed scheme seems to be fairly accurate, even for two-dimensional flow.

**Keywords** : spatio-temporal image, image processing, correlation analysis, velocity measurement, artificial image

### 요 지

홍수시 하천의 유속을 효율적이고 안전하게 측정할 수 있는 방법의 하나로 제시된 것이 표면 영상 유속 측정법이다. 일반적인 표면영상유속계(SIV)는 두 장의 정지영상에서 영상 조각을 잘라낸 뒤 여기에 상호상관법을 적용하여 유속을 산정한다. 이 방법은 짧은 시간간격의 유속분포 측정에 매우 효율적이다. 그러나 장시간의 평균 유속장을 산정하는 데는 많은 시간이 소요되며, 순간 유속장을 산정하기 때문에 흐름 조건이나 촬영 조건에 따라 생기는 잡음이나 불확실성의 영향을 많이 받게 된다. 이를 개선하고자 개발된 방법이 시공간 영상을 이용하여 일정 시간 동안의 유속의 평균을 한 번에 산정하는 시공간영상 유속계측법(STIV)이다. 시공간영상 유속계측법 중의 하나인 휘도경사 텐서법은 일정 시간 동안의 시공간 영상을 한 번에 분석하기 때문에, 유속 산정 시간을 획기적으로 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 하천의 일방향 유속만을 계산할 수 있기 때문에 구조물 주변이나 만곡이 있는 경우의 2차원 흐름 측정은 불가능하다는 한계가 있다. 이를 개선하기 위해서 본 연구에서는 상호상관법을 이용하여 2차원적으로 시공간 영상을 분석하는 방법(상호상관 시공간영상유속계측법)을 개발하였다. 이 방법은 시공간 영상에서 시간축 방향으로 상관분석을 통해 영상 변위를 산정하는 방법이다. 기존의 시공간 영상 분석 기법 중 하나인 휘도 경사 텐서법이 주흐름 방향만 분석이 가능하였던 데 비하여, 상호상관 시공간 영상분석법은 2차원 유속분포 측정이 가능하고, 시간적인 평균을 취하기 때문에, 공간 해상도가 높으며, 전체적인 유속 분석시간이 매우 짧아지는 장점이 있다. 또한 공동 흐름에 대한 인공 영상을 이용한 오차 분석 결과 최대 10% 이내, 평균적으로 5% 이하의 오차를 보여 상당히 정확하게 2차원 유속분포 측정이 가능한 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 시공간 영상, 영상 분석, 상관분석, 유속 측정, 인공 영상

\* 동의대학교 토목공학과 교수 (e-mail: pururumi@deu.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil Eng, Dong-eui University, 176 Eomkwang-no, Busanjin-gu, Busan 614-714, Korea

\*\* 교신저자, 단국대학교 토목환경공학과 연구전담 조교수 (e-mail: seojuny@paran.com, Tel: 82-31-8005-5240)

Corresponding Author, Assistant professor, Dept. of Civil & Environmental Eng, Dankook University, 152 Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 448-701, Korea

\*\*\* 단국대학교 토목환경공학과 교수 (e-mail: dongsu-kim@dankook.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng, Dankook University, 152 Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 448-701, Korea

## 1. 서 론

수자원의 효율적인 계획과 관리를 위해서는 지속적이고 신뢰성 있는 하천의 유량 조사가 매우 중요하다. 즉, 효율적인 하천 계획과 관리를 위해서는 하천에서 실제 벌어지고 있는 현상 즉 얼마만큼의 물이 어떤 유속과 깊이로 흐르고 있는지에 대한 정보를 최대한 많은 지점에 대하여 파악할 필요가 있다. 하천에서 유속 및 수심을 관측하는 것은 일면 쉬워 보이면서도, 막상 어느 정도의 정확도를 확보하면서 측정한다는 것은 생각보다 어려운 일이다. 특히 태풍이 몰아치고 홍수가 나는 상태에서 하천에서 유속을 측정하는 일은 자칫 관측자의 목숨을 담보하는 일이기도 하고, 현장 여건에 따라 많은 인력과 비용이 필요하기 때문에 측정 지점의 수가 제한적인 수밖에 없다. 이와 같은 이유로 국내 하천 계획과 관리에 활용 가능한 관측 자료가 많이 부족한 실정이다. 일반적으로 하천의 유속 측정은 대부분 평수 시에 휴대용 프로펠러식 유속계를 이용하고 있으며 홍수 시에 부자 관측법을 이용하고 있다. 홍수 시에 이용되는 부자 관측법의 경우 많은 인력이 필요하고, 측정시간이 많이 필요하며, 부자가 흐름방향의 유속을 정확하게 따라가지 못하는 문제가 있기 때문에 고정확도의 유속 측정을 기대할 수 없다는 한계를 가지고 있다(Fujita and Tsubaki, 2003).

이에 최근 전기/전자, 컴퓨터, 그리고 신호처리기법의 비약적인 발전은 결국 하천의 유동현상을 측정 및 도시할 수 있는 디지털 계측 기기들의 개발로 이어지고 있다. 새로 등장한 다양한 유속 계측 기기들은 우리에게 이미 익숙한 초음파, 영상 및 전자기적 파동을 디지털 기술과 결합하여 측정기에 발전적으로 적용하여 개발되었다. 이러한 기술과 하천 관측 방법의 결합을 통해 탄생된 최신 유속 측정 기법으로 초음파를 응용한 초음파유속계(ADCP), 이미지 분석기법을 활용한 표면영상유속계(SIV; Surface Image Velocimeter), 또는 LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry), RADAR 기법을 응용한 전자파표면유속계 등이 있다. 이와 같은 자동 유속측정 기기들은 유속 측정 능력을 급속도로 향상시켜 광범위한 지역에서 매우 상세한 유속 자료를 신속, 정확, 저렴하게 관측할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

이 중에서 표면영상유속계측법은 입자영상유속계측법(PIV, Particle Image Velocimetry)의 유속 산정 원리를 기초로, 한 쌍의 영상을 이용하여 하천 표면의 2차원 유속 분포를 계측하는 방법이다(Raffel et al., 2007). 이 방법은 PIV 기법을 하천 표면이라는 큰 규모에 적용했다는 의미에서 Ettema et al. (1997)이 LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry)라고 이름을 붙였다. 국내에서는 장치

의 특성인 표면 영상을 이용하여 유속을 측정한다는 의미에 보다 충실하기 위해 표면영상유속계측법(Surface Image Velocimetry)이라 하고, 이 기법으로 유속을 측정하는 장비는 표면영상유속계(SIV, Surface Image Velocimeter)로 부르고 있다(Kim et al., 2011).

여기서 본고에서 사용하는 관련 용어를 정리하고자 한다. velocimeter는 유속을 측정하는 장비이므로 유속계, velocimetry는 유속을 측정하는 방법이므로 유속계측법이라는 용어로 통일할 것이다. 따라서 Surface Image Velocimeter는 표면영상유속계, Surface Image Velocimetry는 표면영상유속계측법이며, SIV는 이 두 용어의 약자로 모두 쓰일 수 있으나, 본고에서는 전자에 국한하여 사용할 것이다.

표면영상유속계는 일반 동영상 촬영 장비와 분석 소프트웨어만 있으면 유속을 측정할 수 있기 때문에 매우 경제적이고, 대상영역의 정량적인 유속분포를 간편하게 측정할 수 있고, 짧은 시간의 영상 촬영만으로 유속을 산정할 수 있기 때문에 급변하는 유속 및 유량 측정이 가능하다는 장점이 있다. 또한 비접촉식으로 유속을 측정할 수 있기 때문에 흐름에 방해를 주지 않을 뿐만 아니라 홍수 시 유속 측정의 위험성을 최소화할 수 있다는 장점이 있다.

표면영상유속계의 유속 측정 방법을 좀 더 살펴보면 일반적으로 표면영상유속계는 PIV 기법에서 사용하고 있는 상호상관법(cross-correlation method)을 이용한다. 상호상관법의 경우 두 장의 영상만을 이용하여 유속을 산정하기 때문에 짧은 시간간격의 유속분포 측정에는 장점을 갖고 있지만 흐름특성과 촬영조건 및 분석방법에 따라 유속 측정 결과가 달라지기 때문에 불확도를 포함할 수 있다는 한계가 있다(Kim et al., 2013). 이를 해결하기 위한 방법으로 Fujita and Tsubaki (2003)와 Fujita et al. (2005)은 시공간영상 유속계측법(STIV, Spatio-Temporal Image Velocimetry)을 개발하였다. 시공간 영상(STI, Spatio-Temporal Image)이란 연속된 영상 시계열로부터 한 영상에서 한 줄씩 영상줄을 잘라내고, 이를 시간에 따라 연속적으로 연결하여 만든 영상을 말한다. 즉, 시공간 영상은 한 축은 공간, 다른 한 축은 시간으로 이루어진 영상이다. 또한 시공간 영상 분석이란 시공간 영상에 나타난 물체의 움직임을 영상 휘도값의 미분을 통해 분석하는 방법을 말한다(Jähne, 1993; Bigun, 2006). 다시 말하자면, 시공간 영상 분석법은 여러 개의 연속된 영상을 한꺼번에 분석하여 그 시간 동안의 평균 유속을 분석하는 방법이다. 예를 들어 초당 30장의 영상을 촬영하는 일반 캠코더를 이용하였을 경우, 일반적인 상호상관법으로 분석을 하게 되면 하나의 측정점에 대하여 29개의 유속벡터 시계열이 측정되지만 시

공간 영상 분석법으로 분석을 하게 되면 30장의 영상을 이용하여 1개의 유속 벡터를 산정하게 된다. 이와 같이 연속된 영상을 이용하기 때문에 영상 내 입자 부족과 노이즈에 따른 불확도를 줄여서 유속 측정 정확도를 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 이 때, 일련의 영상에서 하나의 유속벡터만 산정하기 때문에 시간해상도가 낮아지는 단점이 있다. 그러나 일반적으로 하천의 유량을 산정할 경우 시간 평균 유속을 사용하여도 큰 오차를 포함하지 않기 때문에, 이 단점은 큰 문제가 되지 않으며, 시공간 영상 분석법이 기존의 상호상관법보다 실용성이 높다고 할 수 있다(Fujita et al., 2005).

그러나 시공간 영상 분석법도 아직까지는 유속 측정의 한계를 가지고 있다. 현재까지 개발된 시공간 영상 유속계는 측정 대상의 주흐름 방향 성분만으로 측정 가능하다는 한계가 있다(Fujita and Tsubaki, 2003; Fujita et al., 2005). 즉, 종래의 시공간 영상 유속계측법은 영상 휘도의 편미분 분석만을 고려하고 있기 때문에 주흐름 방향 성분만 분석할 수 있는 단점이 있다. 다시 말하자면, STIV를 이용할 경우 하천의 일방향 유속만을 계산할 수 있기 때문에 구조물 주변이나 만곡이 있는 경우의 2차원 흐름 측정은 불가능하다는 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 기존의 휘도 경사 텐서법을 이용한

시공간 유속 산정 방법의 한계를 검토하고, 이를 개선하기 위하여 시공간 영상을 상호상관법을 분석하는 방법을 이용한 유속 측정 방법을 개발하고자 한다. 또한 수치해석의 표준 문제 중 하나인 공동흐름을 재현한 인공영상을 이용하여, 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법의 2차원 유속분포 측정 오차를 계산함으로써 정확도를 검증하고자 한다.

## 2. 휘도 경사 텐서법

### 2.1 휘도 경사 텐서법의 원리

시공간 영상 분석법을 처음으로 하천의 표면 영상에 적용한 것은 일본 고베 대학의 후지타 이치로이다(Fujita and Tsubaki, 2003; Fujita et al., 2005). Fujita and Tsubaki (2003)는 Jähne (1993)가 제시한 2-D 텐서 방법을 하천흐름에 적용하여 시공간 영상의 얼룩무늬의 이동 각도( $\phi$ )를 계산하였다. 그들은 이 방법을 1차원(주흐름 방향)에 한정하여 이용하였으며, 이를 휘도 경사 텐서법이라 하였고, 이 분석법을 이용한 표면영상유속계측법을 STIV라고 하였다. 예를 들어 Fujita et al. (2005)은 하천 흐름의 수표면 영상을 동영상으로 촬영한 뒤, 여기에 Fig. 1(a)와 같이 흐름과 평행한 직선, 즉 측정선(measurement line)을

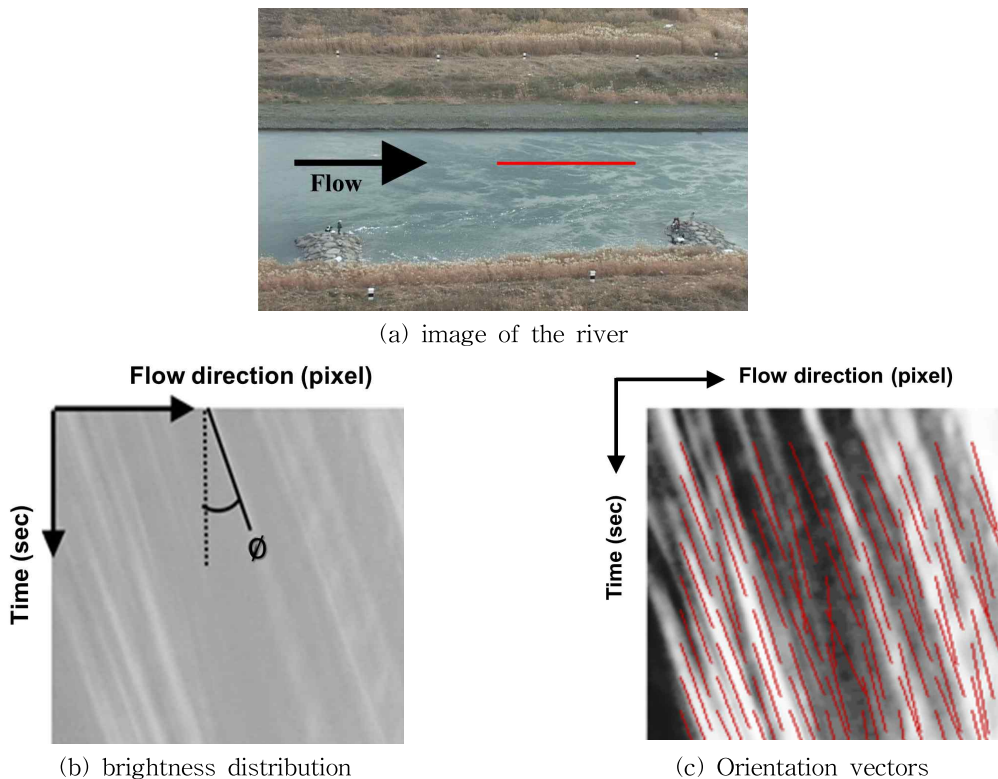


Fig. 1. Measurement of Velocity using STIV (Fujita et al., 2005)

곳, 이 측정선을 따라 한 프레임에서 한 줄의 영상 자료를 얻어내고, 이를 Fig. 1(b)와 같이 시간에 따라 연속적으로 연결하여 시공간 영상을 만들었다. Fig. 1(b)와 같이 제작된 시공간 영상에서 얼룩무늬의 기울기의 역수( $\Delta x / \Delta t$ )가 (영상)속도에 해당하므로 Fig. 1(c)와 같이 유속을 산정할 수 있다. 이와 같이 시공간 영상 분석법은 연속된 영상들로 제작한 시공간 영상의 얼룩무늬 기울기를 이용하여 유속을 산정하는 영상처리 기법이다.

휘도 경사 텐서법을 좀 더 자세히 살펴보면 Fig. 1(b)에서 가로축은 흐름 방향이고, 세로축은 시간이다. Fig. 1(b)의 흰색 줄무늬들은 Fig. 1(a)의 측정선 위의 물체들이 시간에 따라 이동한 것을 나타낸다. 즉, 이것은 영상 내 각 점에서의 공간적-시간적 변화를 이용한 것이다. 따라서 이 줄무늬의 평균적인 기울기( $\phi$ )를 구하면 측정선 상을 통과하고 있는 표면 흐름의 평균 유속을 얻을 수 있다. 즉, 검사선상의 평균 유속은 Eq. (1)으로 구할 수 있다.

$$U = \frac{S_p}{S_t} \tan \phi \quad (1)$$

여기서,  $S_p$ 는 영상의 측정선축(주흐름 방향 또는 영상의 가로축)의 단위 길이 척도 (m/화소)이고  $S_t$ 는 시간축의 단위 시간 척도 (sec/화소)이다.

이동 각도( $\phi$ )를 계산하기 위해 Fujita and Tsubaki (2003)가 채택한 방법은 2-D 텐서를 이용한 것으로, 텐서의 고유값 문제(eigenvalue problem)을 푸는 것이다 (Jahne, 2004). 시공간 영상 상의 휘도 경사에 관련된 텐서는 다음 Eq. (2)와 같이 정의하였다.

$$J_{pp} = \int_A \frac{\partial f}{\partial p} \frac{\partial f}{\partial p} dp dt \quad (2.a)$$

$$J_{tt} = \int_A \frac{\partial f}{\partial t} \frac{\partial f}{\partial t} dp dt \quad (2.b)$$

$$J_{pt} = \int_A \frac{\partial f}{\partial p} \frac{\partial f}{\partial t} dp dt \quad (2.c)$$

여기서,  $A$ 는 휘도 경사값의 적분 영역(가로축이  $p$ 이고 세로축이  $t$ )이다. 또한 줄무늬의 기울기는 다음 Eq. (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\tan 2\phi_p = \frac{2J_{pt}}{J_{tt} - J_{pp}} \quad (3)$$

Eq. (2)를 계산할 때는 편미분을 여러 가지 방법으로 계산할 수 있겠으나, Fujita and Tsubaki (2003)는 Eq. (4)와 같이 1차 편미분을 5차 정도의 중앙 차분으로 근사하였다.

$$\frac{\partial f}{\partial p} \cong \frac{f_{i+3} - 9f_{i+2} + 45(f_{i+1} - f_{i-1}) + 9f_{i-2} - f_{i-3}}{60\Delta p} \quad (4)$$

이 때, 줄무늬의 상관성(coherency)은 다음 Eq. (5)와 같이 정의된다.

$$C_p = \frac{\sqrt{(J_{tt} - J_{pp})^2 + 4J_{pt}^2}}{J_{pp} + J_{tt}} \quad (5)$$

여기서,  $C_p$ 는 줄무늬의 강도를 나타내는 변수이며, 이상적인 줄무늬의 경우에 1, 전혀 줄무늬가 없는 경우에는 0의 값이 된다.

## 2.2 휘도 경사 텐서법의 한계

기존의 PIV의 상호상관법은 면적을 갖는 상관영역 내 명암값 분포의 변화를 분석하여 2차원 유속 벡터를 산정하는 데 반해, STIV의 휘도 경사 텐서법은 연속된 수십 개의 영상을 모두 이용해서 직선상의 1차원 유속을 산정한다는 차이가 있다. Fujita et al. (2005)이 제안한 STIV의 휘도 경사 텐서법이 기존의 PIV의 상호상관법보다 나은 장점은 다음과 같이 정리할 수 있다.

첫째, 휘도 경사 텐서법은 상호상관법에 비해 계산 시간이 빠르다는 장점이 있다. 상호상관법의 경우 동일한 시간 동안 촬영한 영상을 프레임 수에 따라 나누어 각각을 분석한 다음에 순간유속들을 평균하는 방식이고, 휘도 경사 텐서법은 영상 전체를 한꺼번에 계산하여 평균유속을 산정하기 때문에 계산 시간이 무척 짧아질 수 있다.

둘째, 하천에 대한 일반적인 상관법의 경우 초당 30 프레임의 영상을 홍수 때가 아닌 저수 때에는 불필요하게 많은 정보를 갖게 된다. 즉, 저수기에는 유속이 느려서 각 프레임 사이의 영상 변화가 매우 적어 영상 분석의 최소 단위인 한 화소 이하의 변화가 발생하기 때문에 영상 분석의 정밀도가 떨어지게 된다. 따라서 일반적으로 유속이 느릴 경우는 연속되는 프레임을 사용하지 않고, 몇 개씩 건너뛰면서 분석을 할 필요가 있다. 반대로 유속이 너무 빨라서 영상 내 변화가 너무 커서 전체 영상에서 빠져나가는 경우가 발생하여 영상간의 시간간격을 더 짧게 해야 하는 어려움이 있다. 그에 비해 휘도 경사 텐서법은 연속되는 프레임을 이용하므로, 주어진 정보를 충분히 활용할 수 있으며 유속에 따라 분석 프레임을 달리해야 할 필요가 없어진다. 마지막으로 상호상관법의 상관영역 크기 결정이 필요 없기 때문에 불확도도 줄일 수 있다는 장점이 있다.

그러나 Fujita and Tsubaki (2003)의 방법을 실제 적용해 본 결과, 오류 벡터가 발생하는 빈도가 매우 높았다. 오

차의 원인을 고찰한 결과, 1차 편미분을 차분으로 근사하는 과정에서 생기는 문제인 것으로 나타났다. 시공간 영상을 확대하면, 일반적으로 Fig. 2와 같은 계단상 무늬가 나타난다. 이 경우 Eq. (4)와 같은 편미분에 대한 차분식을 사용하면, 전체적인 선분의 기울기가 아닌, 부분적인 선분의 기울기를 구하게 된다. 즉, 국부 기울기를 구하고 평균하여 전체 기울기를 구하기 때문에 줄무늬의 기울기가 명확하게 연속적인 경우에는 정확하게 유속을 산정할 수 있지만 그렇지 못할 경우는 오차를 많이 가질 수밖에 없다. 이러한 문제 때문에 회도 경사 텐서법의 적용을 주류 방향이 아닌 경우 적용이 어려우며, Fujita and Tsubaki (2003)가 유속 분석을 주류 방향만으로 한정하는 것으로 판단된다. 따라서 시공간 영상의 줄무늬 기울기를 정확하게 구할 수 있다면, 이러한 많은 문제들이 일거에 해결될 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법

앞서 살펴본 회도 경사 텐서법의 문제점을 개선하기 위해 본 연구에서는 상호상관법을 이용한 새로운 시공간 영상 분석법을 개발하였다. 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법은 기존의 회도 경사 텐서법의 한계인 일방향 유속 측정과 줄무늬 기울기 계산의 부정확성을 개선하기 위

하여 Fig. 3과 같이 영상의 가로축 방향과 세로축 방향을 모두 고려할 수 있도록 하였으며 기울기를 계산함에 있어 상호상관법을 이용하여 정확도를 개선하고자 하였다.

상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법에서는 2차원 유속분포 측정을 위해서 먼저  $\Delta t$ 의 시간 간격으로 촬영된  $n$ 매의 영상에서 측정점( $p, q$ )을 지정하고, 이 측정점을 중심으로 두 방향의 측정선을 설정하였다. 이와 같이 두 개의 측정선을 설정하게 되면 2차원 유속분포 측정에는 문제가 없다. 다만 주 흐름 방향이 측정선들과 정확히  $45^\circ$ 의 각을 이루는 경우, 즉  $t$  시각에 ( $p, q$ )에 있던 영상은  $t + \Delta t$  시각에는 두 측정선 모두를 벗어나게 된다. 즉, 영상 분석에 의한 상관성이 매우 떨어져서 결과를 신뢰하기 어렵게 된다. 따라서 이를 고려하여 측정선을 추가로 설정할 필요가 있다. 만일, 주 흐름 방향이 검사선들과  $45^\circ$  이하인 경우는  $t$  시각에 ( $p, q$ )에 있던 영상은  $t + \Delta t$  시각에는 두 측정선과 약간 벗어나기는 하지만 여전히 남아 있게 되며, 상호상관 분석에 의해 두 측정선의 유속을 분석해 낼 수 있다. 결국, 이동할 수 있는 방향은 ( $p, q$ ) 화소를 둘러싼 8개 화소 방향이 전부이다. 측정선 하나는 두 방향을 나타낼 수 있으므로, Fig. 4와 같이 오른쪽 방향( $e$ ), 아래쪽 방향( $s$ ), 오른쪽 아래방향( $se$ ) 및 오른쪽 윗방향( $ne$ )으로 총 4개의 측정선을 설정하였다. 각 방향에는 동서남북을 의미

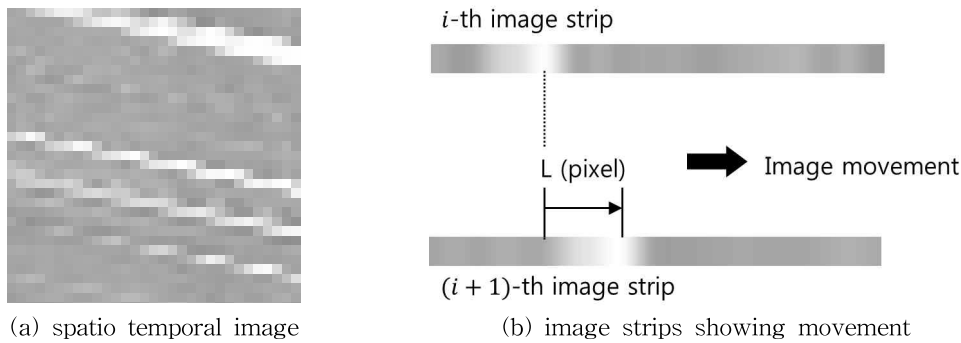


Fig. 2. Strips of Spatio-temporal Image

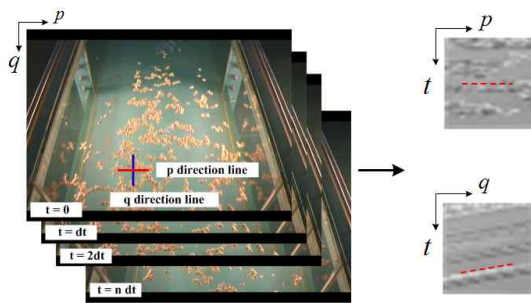


Fig. 3. Concept of STIV using Cross-Correlation Analysis

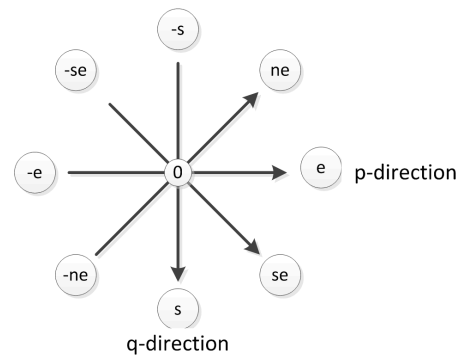


Fig. 4. Direction of Measurement Line

하는 기호를 부여하였다. 여기서  $e$ -방향은  $p$ 방향과,  $s$ -방향은  $q$ 방향과 일치한다. 영상 내 입자의 이동이 있을 경우 반드시 이들 중 하나의 방향으로 화소의 움직임이 있게 될 것이며, 입자의 이동이 없을 경우는  $(p, q)$ 에 머물게 되기 때문에 두 개의 측정선을 설치하여 유속을 계산하는데 있어 측정선을 벗어나는 문제를 해결할 수 있다.

상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법에서 최대 상관 계수와 변위를 산정하는 과정을  $t-p$  시공간 영상을 예로 들어 살펴보면 다음과 같다. 우선 Fig. 5와 같은  $M_t$ 개의 영상위의 점  $(p, q)$ 에서 Fig. 5와 같은 네 방향으로 각각  $M_p$ 개의 행방향 영상을 잘라내어 시공간 영상을 구성한다. 이와 같이 잘라낸 영상의 길이는 유속 자료를 공간 평균하는 역할을 한다. 따라서 유속 측정 환경을 고려하여 잘라내는 영상의 행방향 길이를 결정하여야 한다. 하지만 일반적으로 하천의 유량 조사에서는 흐름방향의 공간 평균이 유량 정확도에 크게 영향을 미치지 않기 때문에 문제는 없다. 시공간 영상 중  $e$ -방향(방향  $p$ )의 영상을 개념적으로 보이면 Fig. 5와 같다.

시공간 영상에서 영상 변위를 구하기 위해 Fig. 6과 같이  $t$ 방향 행의 수인  $M_t$ 보다 하나 작은  $M_t-1$ 개의 쌍에 대한 영상 변위( $L$ )의 상관 계수( $R_L$ )를 Eq. (6)을 이용하여 모두 계산한다.

$$R_L = \frac{\sum_{j=1}^{M_t-1} \sum_{i=1}^{M_t-L} (I_{i,j-L} - \bar{I})(I_{i+1,j} - \bar{I}_L)}{\sqrt{\sum_{j=1}^{M_t-1} \sum_{i=1}^{M_t-L} (I_{i,j-L} - \bar{I})^2 \sum_{j=1}^{M_t-1} \sum_{i=1}^{M_t-L} (I_{i+1,j} - \bar{I}_L)^2}}, \quad (L < 0) \quad (6.a)$$

$$R_L = \frac{\sum_{j=1}^{M_t-1} \sum_{i=1}^{M_t-L} (I_{i,j} - \bar{I})(I_{i+1,j+L} - \bar{I}_L)}{\sqrt{\sum_{j=1}^{M_t-1} \sum_{i=1}^{M_t-L} (I_{i,j} - \bar{I})^2 \sum_{j=1}^{M_t-1} \sum_{i=1}^{M_t-L} (I_{i+1,j+L} - \bar{I}_L)^2}}, \quad (L \geq 0) \quad (6.b)$$

여기서,  $\bar{I}$ 는 원영상의 명암값 평균이며,  $\bar{I}_L$ 은  $I$  영상을 시간적으로 1, 공간적으로  $L$ 만큼 이동한 영상의 명암값 평균이다. Eq. (6)은 시공간 영상의 자기상관(auto-correlation)의 성격을 갖는다. 또한, 이 과정은 시공간 영상의  $i$ 번째 행과  $i+1$ 번째 행의 쌍, 즉  $M_t-1$ 개의 쌍에 대해 각 변위별 상관계수를 평균한 것과 같은 의미를 갖는다. 이와 같은 방법으로 상관 계수의 시간 평균을 한꺼번에 구할 수 있다. 다음으로 여러 영상변위  $L$ 에 대한 상관계수 중에서 가장 큰 값인 최대 상관계수( $R_{L_{max}}$ )를 갖는 변위( $L_{max}$ )를 구한 후 다음 Eq. (7)을 이용하여 줄무늬의 기울기를 계산한다.

$$\tan\phi = \frac{L_{max}}{\Delta t} \quad (7)$$

이와 같이 계산한 줄무늬의 기울기( $\tan\phi$ )를 그대로 적용하면, 이산화된 유속을 얻게 된다. 따라서 PIV 기법에서 이용하는 부화소법(sub-pixel method)을 이용하여 보간하는 작업이 필요하다(Raffel et al., 2007). 다음 Eq. (8)

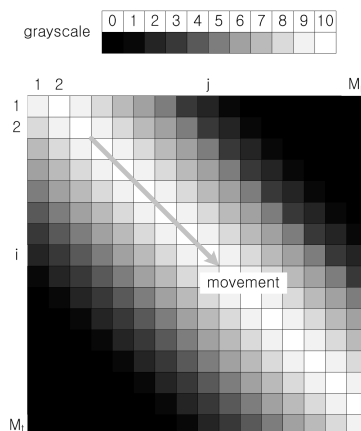


Fig. 5. Concept of Spatio-temporal Image

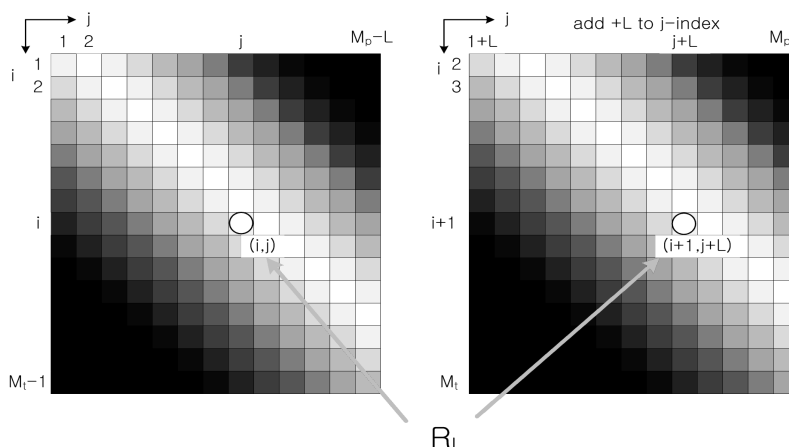


Fig. 6. Cross-Correlation Analysis

과 같이 이차첨두형 보간법을 이용하면 최종적으로 오른쪽 방향 변위( $L_e$ )를 구할 수 있다.

$$L_e = L_{\max} + \frac{R_{L_{\max}-1} - R_{L_{\max}+1}}{2R_{L_{\max}-1} - 4R_{L_{\max}} + 2R_{L_{\max}+1}} \quad (8)$$

만일 이 때,  $R_{L_e}$  가 어떤 정해진 값(대체로 0.7 정도)보다 작은 경우는  $L_e$ 를 0으로 보도록 한다. 마찬가지로 영상의 다른 세 방향( $s$ -방향,  $se$ -방향,  $ne$ -방향)에 대해서도 시공간 영상 분석을 하여 각 방향 영상 변위를 구할 수 있다. 그리고 네 가지 방향의 영상 변위 중에서 가장 상관 계수가 높은 것을 채택하면 그 방향이 주흐름 방향이 되고, 그에 직각 방향을 선택하면 2차원 유속 분포를 결정할 수 있다. 이 때,  $e$ -방향 또는  $s$ -방향이 주 흐름 방향일 경우에는  $e$ -방향의 영상 변위에서  $p$  방향 변위가 결정되고,  $s$ -방향의 영상 변위에서  $q$  방향 변위가 결정되지만,  $ne$ -방향 또는  $se$ -방향이 주 흐름 방향일 경우에는 다음 Eq. (9)와 같이 결정한다.

$$p \text{ 방향 변위} = \frac{1}{\sqrt{2}}(se\text{-방향 변위}) + \frac{1}{\sqrt{2}}(ne\text{-방향 변위}) \quad (9.a)$$

$$q \text{ 방향 변위} = \frac{1}{\sqrt{2}}(se\text{-방향 변위}) - \frac{1}{\sqrt{2}}(ne\text{-방향 변위}) \quad (9.b)$$

또한  $p$  방향 변위와  $q$  방향 변위는 화소 단위이기 때문에 실제 유속을 계산하기 위해서는 화소단위를 실제 거리 단위로 환산해주어야 한다. 즉, 영상 좌표  $(p, q)$ 는 전체 분석 시간  $t$  동안  $(p+L_p, q+L_q)$ 로 이동할 것이다. 따라서 영상 좌표  $(p, q)$ 와  $(p+L_p, q+L_q)$ 를 실제 좌표  $(x, y)$ 와  $(x+\Delta x, y+\Delta y)$ 로 변환하여야 한다. 이 때 왜곡된 영상을 보정하기 위하여 8점 변환이나 11점 변환 등의 좌표 변환 과정이 필요하다. 8점 변환은 Roh (2005)에 자세히 소개되어 있으며, 11점 변환은 Kim et al. (2011)에 제시되어 있다. 8점 좌표 변환을 간단히 소개하면 영상 좌표  $(p, q)$ 와 실제 좌표  $(x, y)$ 는 다음 Eq. (10)과 같은 관계로 나타낼 수 있다(Roh, 2005).

$$x = \frac{b_1 p + b_2 q + b_3}{b_4 p + b_5 q + 1} \quad (10.a)$$

$$y = \frac{b_6 p + b_7 q + b_8}{b_4 p + b_5 q + 1} \quad (10.b)$$

여기서,  $b_1, \dots, b_8$ 은 좌표 역변환 계수이다. 마찬가지로  $(p+L_p, q+L_q)$ 와  $(x+\Delta x, y+\Delta y)$ 의 관계도 다음 Eq. (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x + \Delta x = \frac{b_1(p+\Delta p) + b_2(q+\Delta q) + b_3}{b_4(p+\Delta p) + b_5(q+\Delta q) + 1} \quad (11.a)$$

$$y + \Delta y = \frac{b_6(p+\Delta p) + b_7(q+\Delta q) + b_8}{b_4(p+\Delta p) + b_5(q+\Delta q) + 1} \quad (11.b)$$

이와 같이 변환된  $(x, y)$ 와  $(x+\Delta x, y+\Delta y)$ 를 이용하여 유속  $(u, v)$ 를 다음 Eq. (12)와 같이 구할 수 있다.

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad v = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (12)$$

#### 4. 인공 영상을 이용한 정확도 검증

상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법의 영상 분석 성능을 객관적으로 평가하기 위해 인공 영상(artificial images)을 이용하여 오차 분석을 실시하였다. 인공 영상의 경우 영상의 움직임을 사용자가 원하는 대로 제작할 수 있기 때문에 참값을 확보할 수 있다는 장점이 있다. 인공영상의 생성방법은 일본의 가시화정보학회(The Visualization Society of Japan, 2002)에서 제시된 PIV 표준 영상 제작법을 재현하였다. 인공영상을 생성하기 위해서는 대상이 되는 속도장을 결정하고, 추적 입자의 위치 정보를 기반으로 영상 내 입자를 생성하는 과정이 필요하다. 이와 같은 인공영상 생성방법을 간단히 소개하면 우선 대상으로 하는 속도장으로서 1차원적인 해석 함수를 이용하거나, Rankine 와류나 Couette 흐름과 같이 수치적으로 모의하기 쉬운 흐름장을 이용하거나, LES 또는 직접 수치 모의에 의한 수치 모의 결과를 속도장으로 이용하도록 한다. 그리고 입자 명암값 형태는 Gauss 분포를 사용하였으며, 입자의 실제 좌표  $(x_p, y_p, z_p)$ 를 화상에 투영한 위치를  $(X, Y)$ 로 놓고, 화상의 명암값 형태  $I(x, y)$ 를 Eq. (13)으로 구한다.

$$I(x, y) = I_0 \exp\left\{\frac{-(x-x_p)^2 - (y-y_p)^2}{(1/8)d_p^2}\right\} \quad (13)$$

여기서,  $d_p$ 는 영상 내 입자의 크기를 나타낸다. 또한 입자의 밝기를 나타내는 입자의 명암값( $I_0$ )은 레이저 평면광 두께 내부의 분포함수도 가우시함수를 사용한다. 입자 중심에서 최대 강도는 입자가 평면광 두께 내의 위치를 고려하여 Eq. (14)로 결정하였다.

$$I_0 = I_{\max} \exp\left\{\frac{-z_p^2}{(1/8)T^2}\right\} \quad (14)$$

여기서,  $T$ 는 레이저 광면의 두께,  $I_{\max}$ 는 화상위의 입자의 최대 명암값이다.

마지막으로 입자를 생성하기 위해, 먼저 난수에 의해 추적 입자의 3차원 위치를 결정하고, 추적 입자의 명암값 형



태( $I$ )을 구한다. 결정한 흐름특성에 따라 입자 위치를 변화시키면서, 두 번째 시각의 입자 위치를 계산하고, 두 번째 시각의 명암값 패턴을 구한다. 이것을 필요한 입자 개수만큼 반복적으로 적용하여 연속된 인공영상을 생성한다.

본 연구에서는 인공영상 내 입자의 움직임을 뚜껑 유도 공동 흐름(lid-driven cavity flow)으로 결정하였고, 인공영상의 참값을 확보하기 위해서 공동 흐름에 대한 해석은 Ferziger and Peric (2002)에서 제시한 유한체적법을 이용하였다. 본 연구에서 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법의 오차 분석에 공동 흐름을 이용한 이유는 공동 흐름이 Ghia et al. (1982)의 연구 이후 많은 연구자들에 의해 흐름 특성이 명확히 밝혀져 있고, 흐름특성으로는 2차원 유속분포를 갖고 있으며, 유속 분포가 균일하지 않고, 최대 유속과 최소 유속의 범위가 크기 때문에 수치 해석 기법의 성능 평가를 위해 많이 이용되고 있으며, 영상 분석 프로그램의 성능 평가에도 가장 적합할 것으로 판단하였다. 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법의 오차 분석을 위한 인공영상은 Table 1과 같은 조건에 대하여 제작하였고, 제작한 인공 영상은 Fig. 7과 같다. 인공영상은 총 60매를 제작하였다.

상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법으로 계산한 속도벡터와 공동흐름의 참값을 비교한 결과 Fig. 8과 같이 2차원 유속분포의 흐름방향을 상당히 정확하게 분석하

는 것으로 나타났고, 인공영상 전체에 대한 오차를 분석한 결과 Fig. 9와 같이 회전 흐름이 발생하는 대부분의 측정점에서 최대 10% 이내의 만족스러운 오차를 나타냈다. 비록 5 화소/sec 이하로 속도가 거의 없는 좌우측의 하단부와 중앙부의 오차는 크게 나타났으나, 이는 속도가 너무 작기 때문에 분석 결과가 조금만 차이가 나더라도 상대적으로 오차는 클 수밖에 없기 때문에 문제가 되지 않는 것으로 판단된다. 대표적인 회전 흐름이 발생하는 지점의 오차 분석 결과를 좀 더 구체적으로 살펴보면 우선( $\kappa$ )방향의 2차원 흐름을 보이는 영상의 좌측 하단의(200, 800) 지점에서는  $p$ 방향 참값은 -176.6 화소/sec이고, 계산된 속도는 -171.7 화소/sec로 둘 사이의 오차는 약 4.8 화소/sec(약 2.7%)로 나타났고,  $q$ 방향 참값은 -154.7 화소/sec이고, 계산된 속도는 -156.3 화소/sec로 둘 사이의 오차는

Table 1. Information of artificial images generation

Number of particles	20,000
Number of images	60
Mean diameter of particles (pixel)	10
Time interval (sec.)	1/60
Width of laser sheet (mm)	2
Image size (pixel)	1,000×1,000

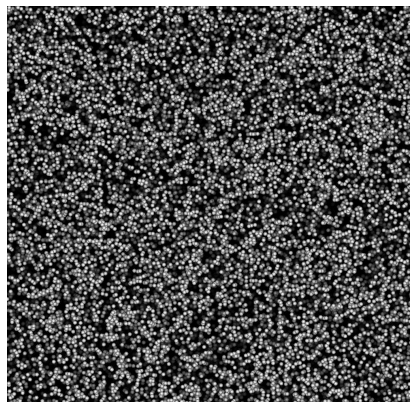


Fig. 7. An Artificial Image

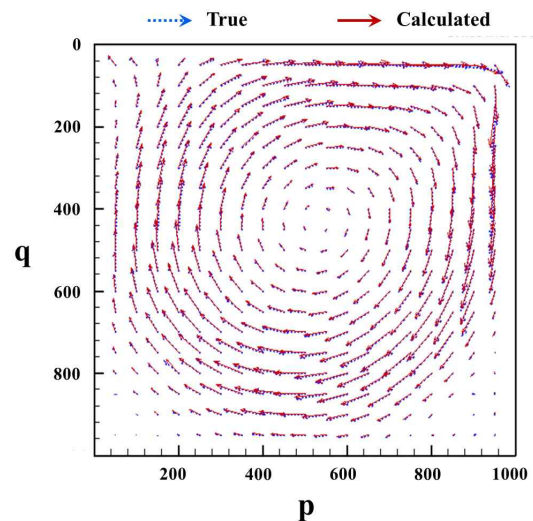


Fig. 8. Comparison of the Velocity

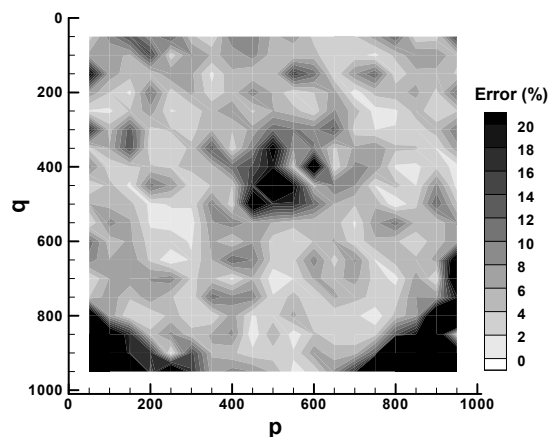


Fig. 9. Result of Error Analysis



약 1.6 화소/sec(약 1%)로 나타나 2차원 유속 분포를 매우 정확하게 계산하는 것으로 나타났다. 또한 흐름이 (→) 방향에서 (↓) 방향으로 급격히 변하는 우측 상단의(800,300) 지점을 살펴보면  $p$ 방향 참값은 49.0 화소/sec이고, 계산된 속도는 47.8 화소/sec로 둘 사이의 오차는 1.2 화소/sec(약 5.0%)로 나타났고,  $q$ 방향 참값은 244.3 화소/sec이고, 계산된 속도는 239.4 화소/sec로 둘 사이의 오차는 5.0 화소/sec(약 2.0%)로 나타났다.

본 연구에서 개발된 상호상관 시공간영상분석법은 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 기존의 PIV 기법의 상호상관법은 유속 측정에 있어서 상관영역의 크기에 따라 유속 측정 정확도에 차이가 나타났으나(Kim, 2013), 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법의 경우 상관영역 크기 결정이 필요 없기 때문에 이에 따른 불확도를 고려하지 않아도 되는 장점이 있었다. 둘째, 기존의 휘도 경사 텐서법은 주흐름 방향만 분석할 수 있었던 것에 반해, 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법은 상호상관법을 시공간 영상에 8-방향 모두에 적용하여 2차원 유속분포를 측정할 수 있는 것을 확인하였다. 셋째, 시간 평균 유속을 산정하는데 있어 기존의 PIV 기법과 비교하여 분석시간이 크게 단축됨을 확인하였다. 영상 분석시간은 영상의 수와 영상 내 측정 수 및 상관영역의 크기에 따라 결정된다. 동일한 측정 수와 상관영역의 크기가 같다고 가정하였을 때 시간 평균 유속을 얻기 위해서 기존의 PIV 기법은 일정 시간간격을 갖는 두 장의 영상을 이용하여 분석된 순간유속을 분석하고자 하는 시간동안 평균하여 시간 평균 유속을 계산해야 하지만 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법은 연속된 영상을 연결한 한 장의 시공간 영상을 사용하기 때문에 분석에 필요한 영상의 수가 기존의 PIV 기법과 비교하여 크게 감소시킬 수 있다. 예를 들어 하천의 유량 조사 시 10초 평균된 유속을 얻고자 하였을 때, 기존의 영상유속계는 총 600 장의 영상을 두 장씩 묶어서 총 599회 영상 분석을 실시한 후 그 결과들을 평균하였다면 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법은 600장의 영상을 시간 축으로 놓고 한 번에 계산하기 때문에 동일한 측정 수와 상관영역의 크기가 같다고 가정하였을 때 기존의 PIV 기법의 유속 계산 시간을 약 1/600 정도로 감소되었다. 따라서 향후 실시간 하천 유량조사가 필요한 지점에 크게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

다만, 시간 평균한 유속을 계산하기 때문에 시간해상도가 떨어져 난류 분석이 어렵다는 단점이 있다. 이 부분은 기존의 PIV 기법에서 사용하는 상호상관법이나 STIV 기법에서 사용한 휘도 경사 텐서법과 비교하여 단점이라 할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기존의 휘도 경사 텐서법을 이용한 시공간 유속 산정 방법의 한계를 검토하고, 이를 개선하기 위해 상호상관법을 이용한 시공간 영상을 이용한 유속 측정 방법을 개발하였다. 또한 공동흐름을 하는 인공영상을 이용하여 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법의 2차원 유속분포 측정 오차를 계산함으로써 정확도를 검증하였다. 본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기존의 STIV 기법의 휘도 경사 텐서법의 경우 주흐름 방향의 1차원 유속만을 측정한다는 한계 때문에 2차원 유속분포를 측정하기 어려웠고, 시공간 영상의 줄무늬 기울기를 분석하는데 있어 줄무늬가 연속적이지 않을 경우에는 1차 편미분을 차분으로 근사하는 과정에서 오차가 크게 발생하는 것으로 나타났다.
- 2) 본 연구에서 개발한 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법은 시공간 영상의 인접한 행 사이의 상관성이 존재한다는 것을 이용하여, 영상의 행 사이의 줄무늬 기울기를 구하고 이를 유속으로 환산하는 효율적인 방법임을 확인하였다. 또한 기존의 STIV 기법의 휘도 경사 텐서법이 주흐름 방향의 유속 측정만 가능한 반면 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법은 시공간 영상의 8-방향을 모두 적용하여 2차원 유속분포 측정이 가능한 것을 확인하였다.
- 3) 시간 평균 유속을 산정하는데 있어 기존의 PIV 기법과 비교하여 분석시간이 크게 단축됨을 확인하였다. 이와 같이 유속 산정 시간이 짧아질 수 있다는 장점은 향후 실시간 하천 유량 조사에 크게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법의 정확도를 검증하기 위해 공동흐름을 하는 인공영상을 이용하여 오차 분석을 수행한 결과 2차원 유속분포의 흐름방향을 비교적 정확하게 분석하는 것으로 나타났고, 2차원 유속분포의 전체 오차를 정량적으로 평가한 결과, 보통 5% 이내이며, 공동흐름의 급격한 2차원 방향 전환이 발생하는 지점에서도 최대 10% 이내의 오차를 보여 상당히 정확하게 2차원 유속분포 측정이 가능한 것으로 나타났다.

마지막으로 본 연구에서 개발한 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법은 기존의 PIV 기법을 이용한 표면 영상유속계와 비교하여 시간 평균한 유속을 짧은 시간에 계산할 수 있고, 비교적 신뢰할 수 있는 정확도를 보이기 때문에 추후에 다양한 현장 적용을 통해 실용성을 검증하

는 연구가 필요할 것이다. 특히 기존의 표면영상유속계로 유속 측정이 어려웠던 야간의 적외선 영상과 같이 노이즈가 심한 영상, 입자가 부족한 영상 및 홍수 시 수면과문 등에 대한 적용 및 정확도 평가가 필요할 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2013학년도 동의대학교 교내연구비(2013AA123)의 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

### References

Bigun, J. (2006). *Vision with direction—a systematic introduction to image processing and computer vision*, Springer.

Ettema, R., Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A. (1997). “Particle-image velocimetry for whole-field measurement of ice velocities.” *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 26, pp. 97–112.

Ferziger, J.H., and Peric, M. (2002) *Computational methods for fluid dynamics*, Springer.

Fujita, I., and Tsubaki, R. (2003) “Convection velocity measurement of river surface ripples by using space-time images.” *J. of River Technology*, JSCE, Vol. 8, pp. 55–60 (in Japanese).

Fujita, I., Watanabe, H., and Tsubaki, R. (2005). “Efficient analysis method for river flow measurement using space-time images.” *Proc. of 31th IAHR Congress*,

Sep. 11~16, Seoul, Korea.

Ghia, U., Ghia, K.N., and Shin, C.T. (1982) “High-resolutions for incompressible flow using the Navier–Stokes equations and a multigrid method.” *J. Computational Physics*, Vol. 48, pp. 387–411.

Jähne, B. (1993). *Spatio-temporal image processing*, Springer, pp. 150–152.

Kim, S.J. (2013). *Determination of interrogation-area size based on error analysis for the surface image velocimetry*, Ph.D. thesis, Myongji University. (in Korean)

Kim, S.J., Yu, K., and Yoon, B.M. (2011). “Real-time Discharge Measurement of the river using Fixed-type Surface Image Velocimetry.” *J. of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 5, pp. 377–388. (in Korean)

Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S.T., and Kompenhans, J. (2007). *Particle image velocimetry, a practical guide*, 2nd ed., Springer.

Roh, Y.S. (2005). *Development of River Discharge Measurement Technique using Image Analysis*, Ph.D. thesis, Myongji University. (in Korean)

The Visualization Society of Japan (2002). *PIV Handbook*, Morikita Pub. (in Japanese).

논문번호: 14-034	접수: 2014.04.08
수정일자: 2014.05.08/05.13	심사완료: 2014.05.13