

## 고정식 표면영상유속계 (FSIV)를 이용한 실시간 하천 유량 산정 Real-time Discharge Measurement of the River Using Fixed-type Surface Image Velocimetry

김 서 준\* / 류 권 규\*\* / 윤 병 만\*\*\*

Kim, Seojun / Yu, Kwonkyu / Yoon, Byungman

### Abstract

Surface Image Velocimetry (SIV) is a recently-developed discharge measurement instrument. It uses image processing techniques to measure the water surface velocity and estimate water discharge with given cross section. The present study aims to implement a FSIV (Fixed-type Surface Image Velocimetry) at Soojeon Bridge in the Dalcheon. The hardware system consists of two digital cameras, a computer, and a pressure-type water stage gauge. The images taken with the hardware system are sent to a server computer via a wireless internet, and analyzed with a image processing software (SIV software). The estimated discharges were compared with the observed discharges through Goesan dam spillway and index velocity method using ADVN. The computed results showed a good agreement with the observed one, except for the night time. The results compared with discharges through Goesan dam spillway reached around 5~10% in the case of discharge over 30 m<sup>3</sup>/s, and the results compared with discharges through index velocity method using ADVN reached around 5% in the case of discharge over 200 m<sup>3</sup>/s. Considering the low cost of the system and the visual inspection of the site situation with the images, the SIV would be fairly good way to measure water discharge in real time.

**Keywords** : fixed-type surface image velocimetry, real-time discharge measurement, image analysis, multi camera

### 요 지

표면영상유속계(SIV)는 영상 분석 기법을 이용하여 하천의 표면유속을 측정하고, 이를 토대로 유량을 산정하는 시스템이다. 본 연구에서는 고정식 표면영상유속계(FSIV) 시스템을 달천 수전교에 설치하여 실시간으로 연속적인 유량 측정을 실시하였다. 수전교에 적용된 FSIV의 하드웨어 시스템은 영상 획득을 위한 2대의 디지털 카메라와 컴퓨터, 그리고 수위 측정을 위한 초음파 수위계로 구성된다. 이 현장 장비들에서 획득된 실시간 영상과 수위 자료는 무선인터넷을 이용하여 실시간으로 홈페이지에 전송되며, 표면영상유속분석 소프트웨어를 이용하여 유량을 산정한다. FSIV에 의한 유량산정 결과는 직상류의 괴산댐 방류량과 FSIV와 동일한 지점에 설치된 Acoustic Doppler Velocity Meter (ADV)를 설치한 후 유속지수법으로 산정된 유량과 비교하여 검토하였다. 댐 방류량과 비교한 결과 30 m<sup>3</sup>/s 이상의 유량에서는 대부분 5~10%의 오차를 보였으며, ADV를 이용하여 측정된 유량과 비교한 결과는 약 200 m<sup>3</sup>/s 이상의 유량에서는 오차가 약 5% 이내로 확인되었다. FSIV의 설치 경비와 운용에 드는 비용과 인력을 감안한다면, FSIV는 실시간으로 유량을

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

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

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

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil Eng, Dong-Eui University, 995 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 Namdong, Yongin, Gyeonggi-do 449-728, Korea

관측할 수 있는 좋은 대안이 될 것으로 판단된다.

**핵심용어** : FSIV (고정식 표면영상유속계), 실시간 유량산정, 영상분석, 다중카메라

## 1. 서론

수자원의 정량적인 계획과 관리를 위해서는 지속적이고 신뢰성 있는 하천의 유량 조사가 매우 중요하다. 하천의 유량 조사를 위한 수위측정은 현장에 나가서 교각에 설치된 수위표를 확인할 수도 있고, 초음파수위계와 압력식수위계 등을 이용하여 자동으로 측정할 수 있기 때문에 실시간으로 자료 획득이 가능하다. 하지만 유속측정은 사람이 현장에 직접 나가서 유속계와 봉부자 등을 이용하여 측정하여야 한다. 따라서 유속측정에는 시간과 인력이 많이 요구되고, 홍수시 많은 위험이 따르기 때문에 측정지점의 수를 무작정 늘릴 수 없을 뿐만 아니라 지속적인 유량측정을 위해서는 많은 어려움이 따른다. 뿐만 아니라 홍수시 하천에 나가서 유속측정을 실시한다고 하더라도 최소한 3~8개의 유속측선수를 측정하는데 많은 시간이 소요되므로 짧은 시간에 급변하는 유량을 측정할 수 없는 단점도 가지고 있다. 따라서 최근에는 IT기술의 발전과 더불어 유속측정 분야에도 자동측정 장비들에 대한 연구가 많이 진행되고 있다 (Rantz, 1982a; Rantz, 1982b). 하지만 최근 개발된 자동 유속측정 장비들은 설치가 어려울 뿐만 아니라 비용이 많이 들기 때문에 쉽게 적용하기가 어려워 극히 소수의 지점에서만 운영 중에 있다.

이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 보다 간편하고 경제적인 유속측정 방법으로 최근에 주목을 받고 있는 방법이 표면영상유속계 (Surface Image Velocimetry, SIV)<sup>1)</sup>이다. 표면영상유속계는 일정한 시간간격의 정지화상을 추출하여 일련의 영상처리 과정을 거친 후 영상내 추적입자의 이동거리를 정지화상의 시간간격으로 나누어 사용자가 원하는 영역의 평면 유속분포를 계산하는 유속측정 기법인 PIV 기법을 실제 하천에 적용하여 표면유속을 측정하기 위한 새로운 영상측정기법이다 (노영신, 2005). 원래 기계 공학 분야의 유속 측정 기술로 개발된 PIV 영상처리 기술 (Raffel et al., 2007)은 기노시타 (木下, 1984)가 한 쌍의 항공사진을 이용하여 하천의 유속을 측정할 것이 LSPIV의 시초라 볼 수 있다. 그 후, 후지타와 고무라 (藤田과 河村, 1994)는 하천의 항공사진이 아닌 비디오

영상을 이용할 수 있도록 발전시켰다. 한편, 미국 Iowa 대학교 (Fujita et al., 1998)에서는 이를 하천 표면류나 실험실 수로와 같이 대규모의 흐름 영역에 적용시켰다 하여 LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry)로 명명하였다. 국내에서는 윤병만 등 (2002)이 LSPIV를 이용하여 곤지암천의 유속측정을 실시하였으며, 개수로 실험장치에서 활차를 이용하여 LSPIV 기법의 정확도를 검증한 것이 시초라 볼 수 있다. 그 뒤 노영신 (2005)과 노영신 등 (2004, 2005)은 여러 가지 하상조건에 대해 개수로 유속분포를 측정하고 분석한 후 LSPIV 기법을 이용하여 계산된 표면유속을 평균유속으로 환산할 수 있는 방법을 개발하였다. 이와 같이 국내외에서 표면영상유속계를 이용한 유속측정 및 유량 산정에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 하지만 앞의 연구들은 대부분 LSPIV의 적용에 대한 검증 및 문제점 개선을 위한 일회성 측정에 머물렀으며, 연속적인 실시간 유속측정에 대한 시도는 최근에 와서야 시작되었다.

최근 Hauet et al. (2008)은 LSPIV 기법을 개량하여 실시간 유량 산정이 가능한 RTLSPV (Real-Time Large Scale Image Velocimetry)를 개발하고, 이를 Iowa 강에 적용하여 실시간 유량 산정 과정을 시험 운영하였다. 그리고 Dramais et al. (2011)은 휴대용 LSPIV를 이용하여 Arc 강의 홍수시 유량을 측정하였다. 하지만 아직까지는 표면영상유속계를 이용한 시험 적용에 따른 문제점을 도출하는 정도에 그쳐, 표면영상유속계를 이용한 실시간 유량 산정 기법의 정확도와 오차 원인에 대한 부분이 정리되어 있지 못한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고정식 표면영상유속계 시스템 (FSIV, Fixed-type Surface Image Velocimetry)을 개발하였고, 이를 직접 달친 현장에 적용하였다. 그리고 FSIV를 이용하여 산정된 유량의 정확도는 괴산댐 방류량과 Acoustic Doppler Velocity Meter (ADVM)를 이용하여 산정된 유량 결과 (김용전 등, 2009)를 비교하여 평가하였고, FSIV를 이용하여 유량을 산정할 경우 고려해야 할 문제점 및 개선안을 도출하였다.

## 2. 고정식 표면영상유속계 (FSIV) 시스템

### 2.1 고정식 표면영상유속계 (FSIV) 개요

FSIV를 이용하여 표면유속을 산정하는 원리는 기존

1) 표면영상유속계를 기존에는 LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry)와 LSIV (Large Scale Image Velocimetry)로 사용하였지만, 본 연구에서는 표면영상을 분석한다는 의미를 강조하기 위하여 SIV (Surface Image Velocimetry)라고 표현하고 있다.

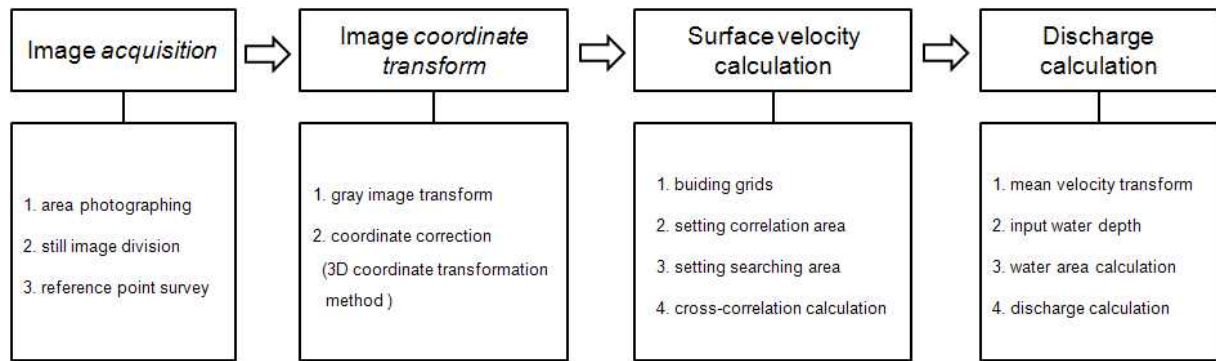


Fig. 1. Principle of Fixed-type Surface Image Velocimetry

PIV 분석 과정과 동일하다. 단, 현장 영상의 왜곡 보정과 계산된 표면유속을 수심 평균유속으로 환산한 후 유량을 계산한다는 점에서 차이가 있다. FSIV의 유량 산정 원리는 Fig. 1과 같이 우선 일정 시간 간격의 연속된 정지영상을 획득한 후 획득된 영상을 분석할 수 있도록 정사영상으로 좌표 변환을 수행하고, 최종적으로 보정된 영상을 분석 소프트웨어를 이용하여 표면유속을 산정한다. 마지막으로 산정된 표면유속을 수심평균유속으로 변환한 후 수위계에서 측정된 수심을 이용하여 횡단면적을 계산한 후 최종적으로 유량을 산정하게 된다.

기존 표면영상유속계를 실험실에서 사용할 때는 사용자가 최적의 환경을 만들어주고 사용하였기 때문에 정확도를 확보하기 용이하나, 현장에 설치되는 FSIV의 경우에는 현장 상황을 고려하여 최대한 대응할 수 있도록 시스템을 구성하여야 한다. Hauet et al. (2008)은 조명과 바람에 의한 문제점을 제시하였으나 그 외에도 현장 적용시 다양한 문제가 발생할 수 있다.

표면영상유속계를 실험실이 아닌 현장에 적용할 경우 발생할 수 있는 대표적인 문제들은 ① 하천 폭이 매우 넓어 한 대의 카메라로 하천 전체의 영상을 획득하기 어렵고, ② 다양한 수위와 유량에 대응할 수 있어야 하고, ③ 유량 측정시 수위자료를 함께 측정해야 하고, ④ 악천후에도 견딜 수 있어야 하고, ⑤ 실시간으로 유량 산정이 이루어져야 한다는 점 등이다.

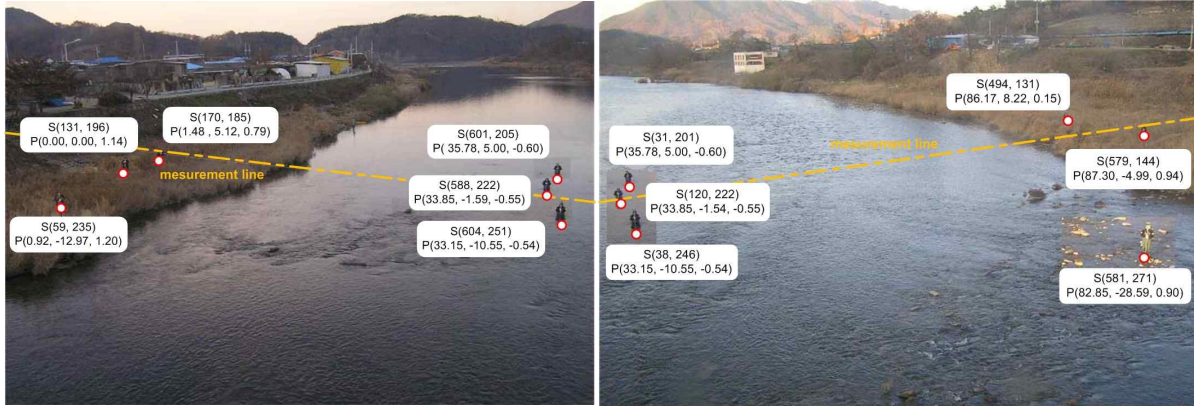
이를 극복하기 위해 본 연구에서는 ① 다중카메라 방식으로 영상을 획득하고, ② 수위 변동에 따라 측정점 격자를 새로 작성할 수 있는 11점 변환을 이용하고, ③ 측정 단면의 수위자료를 수위계에서 입력받고 유량 계산에 사용하였고, ④ 정진, 낙뢰 등의 사고에 대비하여 비상시 컴퓨터를 작동할 수 있는 보조 배터리를 사용하였고, ⑤ 유·무선데이터 통신 기술을 이용하여 실시간 영상 전송 및 유량 계산을 할 수 있도록 하였다. 이들 중에서 ①과 ②는 본 연구에서 최초로 시도된 것이다.

## 2.2 다중카메라 방식의 영상획득 기법

FSIV를 폭이 넓은 하천에 적용할 경우 한 대의 카메라로는 유량측정 단면 전체를 영상에 담기 어렵다. 표면영상유속계는 영상에 포함되어 있는 움직임만을 분석하기 때문에 영상에 포함되지 않는 영역은 분석을 할 수 없을 뿐만 아니라 너무 먼 거리의 영상자료는 한 화소(pixel)에 해당하는 물리거리가 너무 길어 영상 분석시 많은 오차를 갖게 된다(김서준, 2007).

따라서 폭이 넓은 하천의 유량 측정을 하기 위해 다중카메라 방식의 영상획득 기법을 사용하였다. 다중카메라 방식을 영상획득 기법은 각각의 카메라에서 획득한 영상을 중첩시켜 촬영한 후, 중첩이 되는 영역내 3개의 기준점 좌표를 이용하여 각각의 영상에서 계산된 표면유속값을 연결하는 방식이다. 단, 유량측정선에 대해 각각의 영상을 이용하여 별도로 유속을 분석한 후 겹쳐진 부분의 유속은 상관 계수가 높은 쪽을 채택하였다.

본 연구에서는 Fig. 8과 같이 2대의 카메라의 설치하여 하천 중심을 기준으로 좌안과 우안의 영상을 획득하여 분석하였다. 획득한 영상은 카메라의 경사 때문에 왜곡이 되어 있기 때문에, 현장영상을 실제 좌표가 담긴 정사영상으로 변환하는 작업이 필요하다. 이를 위하여 Fig. 2와 같이 각각의 카메라에서 획득한 영상에 포함된 6개의 기준점을 선정한 후 측량을 통하여 각 점의 상대좌표를 획득하였다. 본 연구에서는 두 대의 카메라를 사용하였기 때문에, 카메라가 중첩되는 영역의 3개점을 포함하여 총 9개의 점을 설치하였다. 그 중 유량측정선에 해당하는 기준점 3개가 포함되어 있다. Fig. 2에서 P는 실제 좌표(physical coordinate), S는 영상 좌표(screen coordinate)를 의미한다. 그리고 Fig. 2에 노란 과선으로 표시된 유량 측정선(measurement line)에 해당하는 측정 단면의 횡단 자료를 측량하여 수면적을 구한 후 최종적으로 유량을 산정하게 된다.



(a) Left Camera Image

(b) Right Camera Image

Fig. 2. Plane Survey of Reference Points

### 2.3 영상 왜곡의 보정 기법

기존의 많은 영상유속계 (Fujita와 Komura, 1994; Fujita 등, 1998; 노영신, 2004; Hauet 등, 2008)에서는 영상 왜곡의 보정을 위해 다음과 같은 8점 변환을 이용하였다.

$$p = \frac{c_1 X + c_2 Y + c_3}{c_7 X + c_8 Y + 1} \quad (1a)$$

$$q = \frac{c_4 X + c_5 Y + c_6}{c_7 X + c_8 Y + 1} \quad (1b)$$

이 때,  $(X, Y)$ 는 물리 좌표이며,  $(p, q)$ 는 영상 좌표이고,  $c_1, \dots, c_8$ 은 변환 계수이다. 이 방법은 수면이나 지형이 모두 같은 평면위에 있으며, 시간에 따른 변화가 없다는 가정에 기반하고 있다. 즉, 지형의 기록을 반영할 수 없으며, 수면이 변동되어도 영상 위의 같은 측정선을 이용하므로 실제 물리 좌표에서는 다른 지점의 유속을 산정하게 되는 오류가 있다. 수면 변동이 작을 경우 이 오차는 무시할 수 있을 것이나, 수면 변동이 큰 우리나라의 하천에서는 상당한 오차를 불러 올 가능성이 있다.

본 연구에서는 수면 변동이 심한 경우에도 적용할 수 있도록 하기 위해, Fig. 3과 같은 물리 좌표  $(X, Y, Z)$ 와 영상 좌표  $(p, q)$ 를 연결하는 다음과 같은 11점 영상 변환을 이용하였다.

$$p = \frac{c_1 X + c_2 Y + c_3 Z + c_4}{c_9 X + c_{10} Y + c_{11} Z + 1} \quad (2a)$$

$$q = \frac{c_5 X + c_6 Y + c_7 Z + c_8}{c_9 X + c_{10} Y + c_{11} Z + 1} \quad (2b)$$

여기서,  $c_1, \dots, c_{11}$ 은 변환 계수이다. 만일, Eq. (2)에서  $Z$ 좌표를 0으로 설정 (수면 표고가 0)하면, Eq. (2)는 Eq. (1)과 같게 된다.

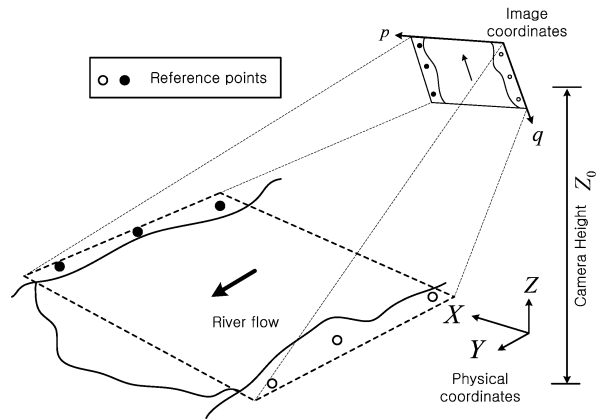


Fig. 3. Physical and Image Coordinates

Eq. (2)를 풀어 쓰면 다음과 같다.

$$c_1 X + c_2 Y + c_3 Z + c_4 - c_9 p X - c_{10} p Y - c_{11} p Z = p \quad (3a)$$

$$c_5 X + c_6 Y + c_7 Z + c_8 - c_9 q X - c_{10} q Y - c_{11} q Z = q \quad (3b)$$

Eq. (3)에  $n$ 개의 참조점  $(X_1, Y_1, Z_1) \sim (X_n, Y_n, Z_n)$ 과 이에 대응하는  $n$ 개의 영상 좌표  $(p_1, q_1) \sim (p_n, q_n)$ 을 대입하면, 다음과 같이 쓸 수 있다. 이 때, 변환 계수가 11개이므로 참조점은 최소 6개 이상이어야 한다.

$$Ac = b \quad (4a)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -p_1 X_1 & -p_1 Y_1 & -p_1 Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -q_1 X_1 & -q_1 Y_1 & -q_1 Z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -p_n X_n & -p_n Y_n & -p_n Z_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -q_n X_n & -q_n Y_n & -q_n Z_n \end{bmatrix} \quad (4b)$$

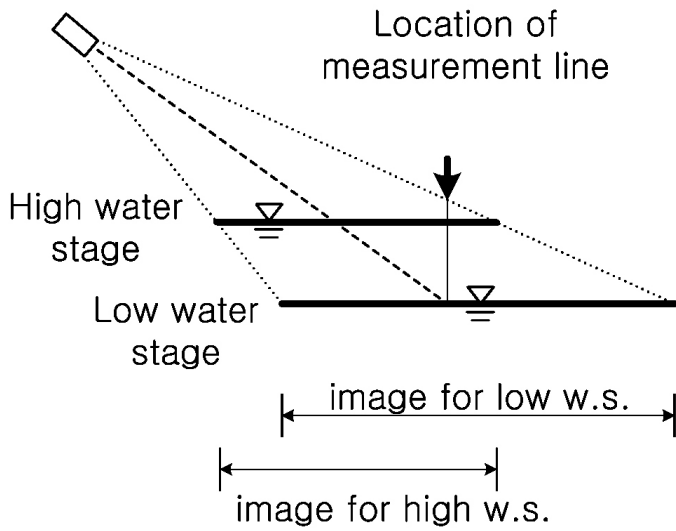


Fig. 4. Change of Measurement Lines Due to Water Stage Change. (upper right: low water stage, lower right: high water stage)

$$\mathbf{c} = [c_1 \cdots c_{11}] \quad (4c)$$

$$\mathbf{b} = [p_1 q_1 \cdots p_n q_n] \quad (4d)$$

미지 벡터  $\mathbf{c}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{c} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (5)$$

Eq. (2)의 변환과 Eq. (6)의 역변환 관계를 이용하면, 측정선의 위치를 화면에 나타낼 수 있다. 먼저 측정선의 위치 또는 유속을 산정할 격자점의 물리 좌표를 결정하고, Eq. (2)를 이용하여 그 측정선과 측정점의 위치를 화면상에 표시할 수 있다. 또한, 수위가 변동이 될 경우 측정선의 영상 좌표가 바뀌게 되는 데, 이것은 Fig. 4와 같이 수위 변동에 따라 새로운 측정선을 결정할 수 있다.

한편, Eq. (2)의 역변환, 즉 영상 좌표  $(p, q)$ 를 물리 좌표  $(X, Y, Z)$ 로 바꾸는 것은 다음과 같다. 단, 이 때 영상 공간은 2차원, 물리 공간은 3차원이므로, 일대일 대응 관계를 만들기 위해서는 공간 좌표  $Z$ (여기서는 대부분 수면 표고)에 대한 정보가 들어가야 한다.  $Z$ 를 기지의 값으로 하면, Eq. (2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$X = \frac{m_1 p + m_2 q + m_3}{m_{13} p + m_{14} q + 1} Z + \frac{m_4 p + m_5 q + m_6}{m_{13} p + m_{14} q + 1} \quad (6a)$$

$$Y = \frac{m_7 p + m_8 q + m_9}{m_{13} p + m_{14} q + 1} Z + \frac{m_{10} p + m_{11} q + m_{12}}{m_{13} p + m_{14} q + 1} \quad (6b)$$

여기서,  $m_i$  ( $i = 1, \dots, 14$ )는 다음과 같이 주어지는 역변환 계수이다.

$$\begin{aligned} m_1 &= \frac{(c_6 c_{11} - c_7 c_{10})}{(c_1 c_6 - c_2 c_5)}, & m_2 &= \frac{(c_3 c_{10} - c_2 c_{11})}{(c_1 c_6 - c_2 c_5)}, & m_3 &= \frac{(c_2 c_7 - c_3 c_6)}{(c_1 c_6 - c_2 c_5)} \\ m_4 &= \frac{(c_6 - c_8 c_{10})}{(c_1 c_6 - c_2 c_5)}, & m_5 &= \frac{(c_4 c_{10} - c_2)}{(c_1 c_6 - c_2 c_5)}, & m_6 &= \frac{(c_2 c_8 - c_4 c_6)}{(c_1 c_6 - c_2 c_5)} \\ m_7 &= \frac{(c_7 c_9 - c_3 c_{11})}{(c_1 c_6 - c_2 c_5)}, & m_8 &= \frac{(c_1 c_{11} - c_3 c_9)}{(c_1 c_6 - c_2 c_5)}, & m_9 &= \frac{(c_3 c_5 - c_1 c_7)}{(c_1 c_6 - c_2 c_5)} \\ m_{10} &= \frac{(c_8 c_9 - c_6)}{(c_1 c_6 - c_2 c_5)}, & m_{11} &= \frac{(c_1 - c_4 c_9)}{(c_1 c_6 - c_2 c_5)}, & m_{12} &= \frac{(c_4 c_5 - c_1 c_8)}{(c_1 c_6 - c_2 c_5)} \\ m_{13} &= \frac{(c_5 c_{10} - c_6 c_9)}{(c_1 c_6 - c_2 c_5)}, & m_{14} &= \frac{(c_2 c_9 - c_1 c_{10})}{(c_1 c_6 - c_2 c_5)} \end{aligned} \quad (7)$$

## 2.4 실시간 영상 및 수위자료 전송 기법

FSIV는 기존 유량측정 방법과 달리 현장에 나가서 유속을 측정하지 않고 언제 어디서든 영상을 전송 받아서 유량을 계산할 수 있도록 다음 Fig. 5와 같이 실시간 영상 및 수위자료 전송 기법을 도입하였다. 먼저 현장에서 획득된 일정 시간 간격을 갖는 정지영상과 영상 획득 시 수심자료를 현장의 컴퓨터에 저장하고, 이를 유무선 통신 기술을 이용하여 연구실의 서버컴퓨터로 전송한다. 서버컴퓨터에 저장된 영상은 홈페이지에 실시간으로 올라오도록 하여 사용자가 언제든지 확인할 수 있도록 하였다. 이와 같은 방식으로 FSIV를 개선할 경우 언제 어



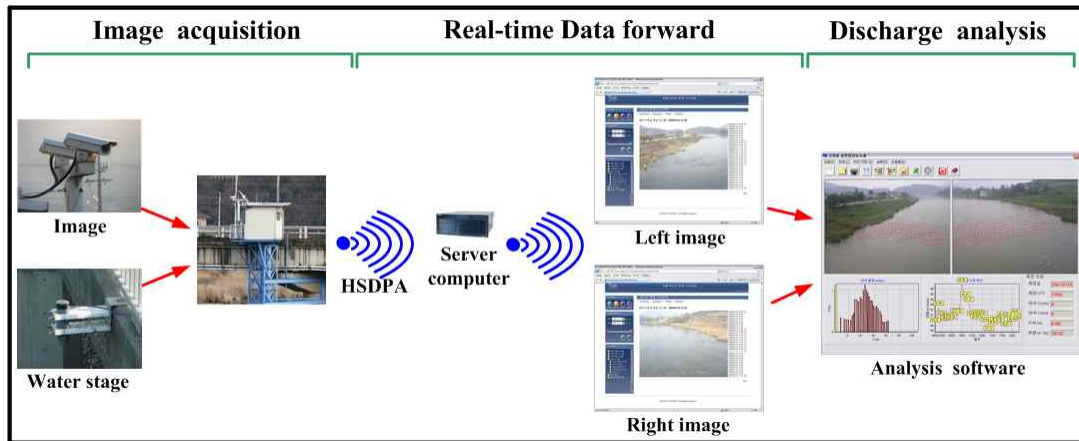


Fig. 5. Concept of Fixed Surface Image Velocimetry System



Fig. 6. Location of Study Area



Fig. 7. Image Acquisition System

디서나 사용자가 원하는 시간에 현장 영상과 수심자료를 이용하여 실시간으로 유량을 산정할 수 있는 장점이 있다.

### 3. 고정식 표면영상유속계 (FSIV) 현장 적용 및 결과

#### 3.1 현장 적용

FSIV를 설치한 지점은 Fig. 6에서와 같이 충청북도 괴산군 칠성면의 달천에 위치한 수전교이다. 대상 지점의 평수시 하폭은 약 60m, 홍수시는 약 100m 정도이다. 그리고 1km 정도 상류에는 괴산댐이 위치하고 있다. 괴산댐의 방류량은 유지 방류량이 약  $16 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이며, 홍수 때는  $1,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 에 이르기도 한다.

FSIV 시스템은 Fig. 7과 같이 수전교 중앙에 설치하였으며, 전체 시스템은 Fig. 8과 같이 2대의 디지털 카메라 (Olympus UZ-640)와 한 대의 컴퓨터 그리고 초음파수위계로 구성되어 있다. 2대의 카메라는 하천을 폭방향으로 양분하여 절반 정도씩을 촬영할 수 있도록 한 후 최종적으로 유량 산정시 중첩되고 촬영된 3개의 기준점을 이용

하여 합성하였다. 영상은 각 카메라가 0.5초 간격으로 좌우안 2매씩 총 4장의 사진을 30분 간격으로 촬영한다. 획득된 영상의 해상도는  $680 \times 480$  화소이다. 또한 촬영 간격은 30분 간격으로 설정하였으나, 이것도 홍수 때와 같이 흐름이 급변할 경우 더 짧은 시간 간격으로 조절하여 촬영할 수 있도록 하였다. 그리고 초음파수위계의 측정 시간 간격은 영상획득 시간 간격과 동일하게 하였다.

#### 3.2 유속 산정

본 FSIV는 좌측 및 우측의 2대의 카메라를 이용하기 때문에, 2매의 유속장을 측정하게 된다. 즉 Fig. 2에 보인 격자점을 따라 산정한 결과의 예를 보이면 Fig. 9와 같다. 이처럼 실제 계산된 유속 벡터에는 상당부분 오류 벡터가 포함되며, 필터링이나 오류 수정 등의 과정이 필요하다. 또한, 이렇게 계산된 두 벡터장에서 좌우가 겹쳐진 부분은 상관 계수가 높은 유속 계산값을 선택하여, 전체 격자점의 유속 벡터장을 결정한다. Fig. 9에서 보면 현재는 격자점이 흐름 방향(물리 좌표의  $y$  방향)으로 3개씩 배열되어 있는데, 이 흐름 방향으로 유속을 상관 계수의 가중 평



Fig. 8. Fixed-type Surface Image Velocimetry at Soojeon Bridge

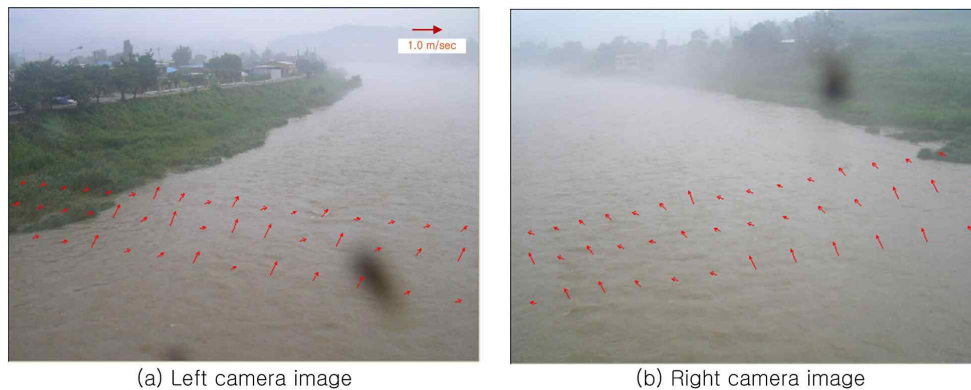


Fig. 9. Velocity Vectors Calculated with FSIV

균을 취하여, 측정선을 따른 각 측정점 (Fig. 2 참조)의 표면 유속을 결정하였다.

### 3.3 유량 산정

본 연구에서는 위와 같이 산정된 각 측정점의 표면유속을 평균유속으로 환산하고, 여기에 측정선 위치의 수심과 폭을 곱하여 유량을 산정하였다. 일반적으로 미국지질조사국 (USGS, 1982)에서는 표면유속 ( $U_s$ )과 평균유속 ( $U_m$ )의 관계를 개수로 흐름의 유속분포가 전형적인 대수법칙에 따른 유속분포의 형태를 띠고 최대유속이 수표면에서 발생한다고 가정하였을 때,  $U_m/U_s = 0.85$ 를 사용하도록 하고 있다 (Costa et al., 2000). Hauet et al. (2008)은 Iowa강에서 실시간 PIV를 이용하여 표면유속을 산정한 다음  $U_m/U_s = 0.85$ 로 평균유속을 산정하였다. 그러나 Cheng and Gartner (2003)가 실제로 80m 하폭의 샌조아퀀강에서 단면을 20개로 분할하여 각 분할단면의 유속 분포를 측정된 결과, 유속 감소 현상으로 인해 표면유속

과 평균유속의 비가 0.88~0.93으로 나타남을 확인하였다. 노영신 (2005)은 유속감소가 발생하는 수표면 영역의 기존 이론적인 후류법칙과 잘 일치하는 유속분포의 경우에는 평균유속과 표면유속의 비가 0.85~0.86의 값을 보이며, 이 경우에는 최대유속이 수표면에서 발생하지만 실제 하천의 경우 평균유속과 표면유속의 비는 이차류에 의한 수표면의 유속감소 현상으로 이보다 큰 값을 갖게 된다고 하였다. 따라서 FSIV를 이용하여 산정된 표면유속을 평균유속으로 바꾸기 위해서는 하천의 하상조건 및 수리특성에 따른 유속분포의 변화 및 유속감소현상을 고려하여야 한다. 이를 위한 최상의 방법은 지속적인 현장 측정을 통해 다양한 수위변화에 대한 표면유속과 평균유속의 관계를 개발할 필요가 있다. 하지만 본 연구에서는 처음 설치되는 지점이므로 USGS의 방법 (Rantz, 1982a, 1982b)와 Le Coz et al. (2010) 및 Costa et al. (2000)에서 제시하는  $U_m/U_s = 0.85$ 를 이용하여 평균유속을 산정한 후 유량을 계산하였다. 본 수전교 지점에 적합한 방법 또는 계수

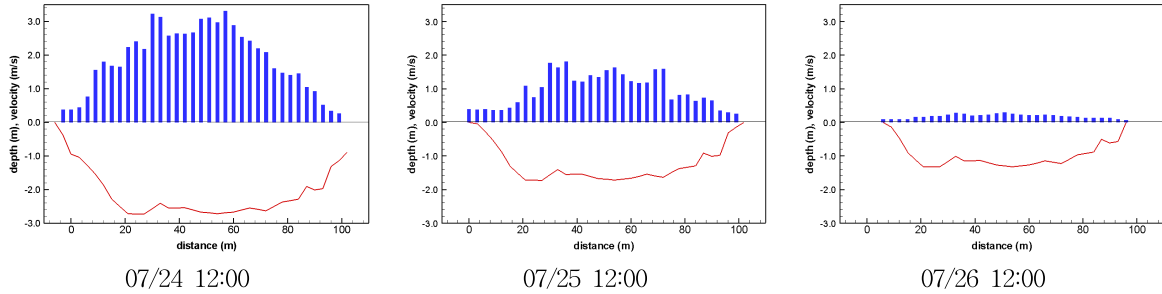


Fig. 10. Cross-sectional Velocity Distribution

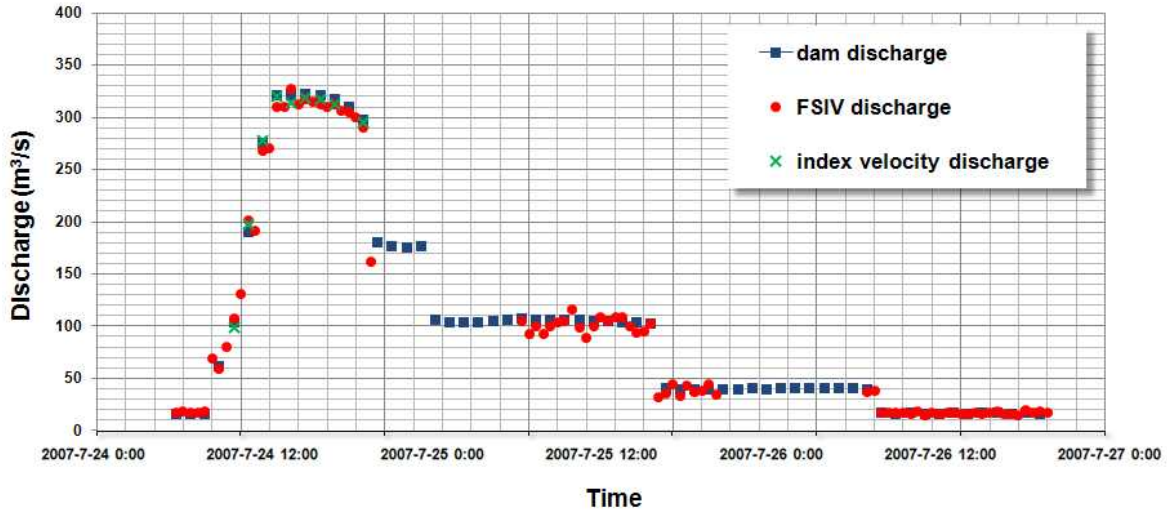


Fig. 11. Discharge measurement with FISV at Soojeon Br. (Jul. 24-26, 2007)

를 산정하기 위해서는 장기적인 유속 관측과 검토가 필요할 것이다.

FSIV를 이용하여 산정한 횡방향의 유속 분포 및 유량 산정에 사용된 횡단면을 보이면, Fig. 10과 같다. Fig. 10은 최대 유량(7/24 12:00 댐 방류량  $275.7 \text{ m}^3/\text{sec}$ , 수위 2.09 m), 중유량(7/25 12:00 댐 방류량  $104.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ , 수위 1.09 m), 소유량(7/26 12:00 댐 방류량  $16.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ , 수위 0.69 m)일 때의 유속 분포를 보인 것이다.

최종적으로 FSIV를 이용하여 산정된 유량 결과에 대한 정확도를 평가하였다. Fig. 11은 2007년 7월 24일부터 7월 26일 사이의 홍수사상에 대하여 FSIV를 이용하여 측정된 유량과 댐방류량 자료 및 유속지수법을 이용한 유량 산정 결과를 보다 자세하게 비교한 것이다. FSIV를 이용한 유량 산정은 빛이 있는 시간에만 영상획득이 가능하므로 야간의 경우는 결측되었다.

FSIV를 이용한 유량 산정 결과의 정확도를 평가한 결과는 Fig. 12와 Table 1에서 알 수 있듯이, 댐 방류량과 유속지수법을 이용하여 산정된 유량을 이용하여 정확도를 평가한 결과 대부분의 경우 5~10% 이내의 오차 범위내에서 유량을 산정할 수 있었다. 그리고  $30 \text{ m}^3/\text{sec}$  이하의

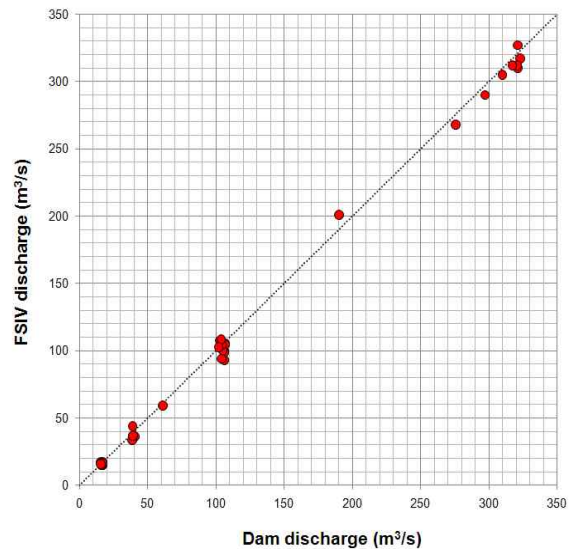


Fig. 12. Comparison of FSIV Discharges with Dam Discharges

저유량일 경우 정확도가 0.3~13.3%의 범위를 보여 정확도가 불안정한 것이 확인되었다. 이때는 표면유속이  $0.2 \sim 0.4 \text{ m}/\text{sec}$ 로 계산되었는데, 실제로 이 부분은 하폭이 매



Table 1. Comparison of FSIV Discharges, Dam Discharges and Index Velocity Discharge

Time (YY-MM-DD HH:MM)	① FSIV discharge ( $m^3/s$ )	② Dam discharge ( $m^3/s$ )	Error		③ Index velocity discharge ( $m^3/s$ )	Error	
			①-② ( $m^3/s$ )	(①-②)/②*100 (%)		①-③ ( $m^3/s$ )	(①-③)/③   * 100(%)
2007-07-24 06:00	16.5	16.4	0.1	0.6	-	-	-
2007-07-24 07:00	16.5	15.6	0.9	5.8	-	-	-
2007-07-24 08:00	17.9	16.3	2.6	9.8	-	-	-
2007-07-24 09:00	59.4	61.0	-1.6	2.6	-	-	-
2007-07-24 10:00	107.4	103.1	4.3	4.2			
2007-07-24 11:00	201.1	190.2	10.9	5.7	198.0	3.1	1.6
2007-07-24 12:00	267.9	275.7	-7.8	2.8	277.9	-10.0	3.6
2007-07-24 13:00	310.0	321.1	-11.1	3.5	320.4	-10.4	3.3
2007-07-24 14:00	327.0	321.2	5.8	1.8	313.6	13.4	4.3
2007-07-24 15:00	317.0	322.9	-5.9	1.8	318.3	-1.3	0.4
2007-07-24 16:00	312.0	320.9	-8.9	2.8	317.6	-5.6	1.8
2007-07-24 17:00	312.0	317.3	-5.3	1.7	312.8	-0.8	0.3
2007-07-24 18:00	305.0	309.9	-4.9	1.6	-	-	-
2007-07-24 19:00	290.0	297.3	-7.3	2.5	295.6	-5.6	1.9
2007-07-25 06:00	105.3	106.8	-1.5	1.4	-	-	-
2007-07-25 07:00	100.0	106.2	-13.2	5.8	-	-	-
2007-07-25 08:00	99.9	106.1	-6.2	5.8	-	-	-
2007-07-25 09:00	104.8	106.5	-1.7	1.6	-	-	-
2007-07-25 10:00	98.9	106.2	-7.3	6.9	-	-	-
2007-07-25 11:00	99.9	105.0	-5.1	4.9	-	-	-
2007-07-25 12:00	104.6	104.5	0.1	0.1	-	-	-
2007-07-25 13:00	108.3	103.9	4.4	4.2	-	-	-
2007-07-25 14:00	94.0	104.0	-10.0	9.7	-	-	-
2007-07-25 15:00	102.5	102.1	0.4	0.4	-	-	-
2007-07-25 16:00	36.1	40.7	-4.6	11.2	-	-	-
2007-07-25 17:00	33.6	38.8	-5.2	13.3	-	-	-
2007-07-25 18:00	36.7	38.9	-2.2	5.8	-	-	-
2007-07-25 19:00	44.1	39.0	5.1	13.0	-	-	-
2007-07-26 06:00	36.9	39.5	-2.6	6.6	-	-	-
2007-07-26 07:00	17.0	17.1	-0.1	0.5	-	-	-
2007-07-26 08:00	16.5	16.4	0.1	0.9	-	-	-
2007-07-26 09:00	15.4	17.1	-1.7	10.1	-	-	-
2007-07-26 10:00	14.9	16.3	-1.4	8.5	-	-	-
2007-07-26 11:00	16.3	16.3	0.0	0.3	-	-	-
2007-07-26 12:00	16.5	17.1	-0.6	3.7	-	-	-
2007-07-26 13:00	15.7	15.6	0.1	0.4	-	-	-
2007-07-26 14:00	16.0	17.1	-1.1	6.2	-	-	-
2007-07-26 15:00	17.7	17.1	0.6	3.8	-	-	-
2007-07-26 16:00	16.2	15.6	0.6	4.1	-	-	-
2007-07-26 17:00	19.1	17.1	2.0	11.8	-	-	-
2007-07-26 18:00	18.5	16.4	2.1	12.5	-	-	-

우 넓어서 저유량(저유속)일 때는 수표면의 움직임이 작아서 영상 분석이 어려운 경우와 수심이 작을 경우 하상의 바위 등에 흐름이 부딪혀 실제 흐름이 왜곡되어 정확도가 약간 떨어지는 것으로 확인되었다.

아울러 FSIV와 동일지점에 ADVm를 설치한 후 유속 지수법으로 유량을 산정하고 그 결과도 Fig. 11에 같이 수록하였다. Table 1에서 보면, 약 200 m<sup>3</sup>/s 이상의 유량일 경우 FSIV의 결과는 ADVm과 0.4~4.3% 이내의 오차를 보였다. FSIV를 이용한 유량 산정에 필요한 인력과 경비 등을 생각한다면, 이 정도 오차는 다른 유량측정 방법들의 측정에 필요한 비용 및 노력을 생각해 보았을 때 획기적인 것으로 보인다.

#### 4. 고정식 표면영상유속계(FSIV)의 한계 및 개선안

FSIV를 이용한 실시간 하천 유량 산정 시스템은 기존의 유량 측정 방법들과 비교하여 매우 간편하고 경제적으로 지속적인 유량을 산정할 수 있을 뿐만 아니라, 언제 어디서든 현장 모니터링이 가능하다는 장점이 있는 것은 틀림없다. 하지만 FSIV는 현장 상황의 변화에 따라 다음과 같이 해결해야 할 문제점들을 가지고 있는 것으로 확인되었다.

첫째, 현재 FSIV는 디지털카메라를 이용하여 0.5초 간격으로 2장의 사진을 획득한 후 분석을 수행하고 있다. 만약 영상내 수표면의 움직임이 0.5초 보다 짧은 시간에 사라지게 된다면 유속 계산의 정확도를 떨어뜨리게 될 것이다. 이는 실시간으로 동영상을 정지영상으로 바꾸어 줄 수 있는 방법이 없기 때문이다. 따라서 향후 캠코더와 CCTV를 이용하여 좀 더 짧은 시간간격의 정지영상으로 유속을 계산한다면 좀 더 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

둘째, 연구 대상 지점인 달천 수전교의 FSIV 시스템은 하루 중 6시부터 19시까지 30분 간격으로 촬영을 하여 영상을 획득하고 있다. 이는 빛이 없는 야간이나 일출, 일몰 시 빛의 반사 때문에 분석 가능한 영상을 획득하기 어렵기 때문이다. 야간촬영에 대한 대안으로 적외선 카메라와 투광기를 이용하여 현장 적용 후 야간유속 측정의 한계를 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

셋째, 수심변화에 따라 표면유속과 평균유속간의 관계를 현장 검증을 통하여 검토할 필요가 있다. 홍수시와 갈수시에 수심 차이가 있음에도 불구하고 현재까지는 동일한 매개변수를 사용하고 있기 때문에 향후 다양한 현장 검증을 통하여 각 하천에 적합한 수심 변화에 따른 표면유속과 평균유속간의 관계 수립이 요구된다.

넷째, 평수시 수표면의 움직임이 거의 없는 경우 측정

에 어려움이 있었다. 표면영상유속계의 특성상 영상을 이용하여 유속을 구하기 때문에, 일정 유속 이하의 경우 수표면의 움직임이 잘 나타나지 않아 측정이 어렵다. 따라서, 향후 측정이 가능한 최소 유속 범위에 대한 기준을 마련하고, 최소 유속 이하의 흐름에서는 입자를 뿌린 후 영상을 획득하는 방법을 사용하여 유속을 계산하여야 할 것이다. 다만, 이런 방법을 채택할 경우 실시간 연속 측정을 위해서는 입자 살포기를 설치하거나 입자 살포가 가능한 특정 지점의 유속에서 전체 유속을 추정하는 등 별도의 대책을 마련해야 하는 어려움이 생긴다.

다섯째, 영상 획득시 카메라 1대를 이용하여 정확도를 보장할 수 있는 촬영 범위에 대한 기준이 없어 수위가 올라가는 경우 수표면적이 넓어져 가장자리의 유속 계산의 정확도가 떨어지는 어려움이 있었다. 따라서 다중카메라 방식의 FSIV를 현장에 설치할 때 어느 지점에 카메라를 고정시켜야 하고, 카메라에서 어느 정도 떨어진 지점을 유량측정선으로 결정해야 하는지에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 기존의 표면영상유속계를 이용하여 현장에 나가지 않고 언제 어디서든 실시간으로 유량을 산정할 수 있는 고정식 표면영상유속계(FSIV) 시스템을 개발하였다. 그리고 FSIV를 이용하여 산정된 유량의 정확도를 평가하기 위하여 FSIV 설치 지점 직상류에서 1 km 떨어진 지점의 피산댐 방류량과 ADVm를 이용하여 계산된 유량 산정 결과와 비교하였다. 본 연구를 통해 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) FSIV를 폭이 넓은 하천에 적용하기 위하여 다중카메라 방식을 이용할 경우 기존의 1대 카메라만을 이용할 때와 비교하여 영상의 질이 좋아져 영상 분석 시 정확도가 향상되었다. 따라서 FSIV를 중소 규모의 하천뿐만 아니라 대하천에 적용하여 정도 높은 유량 산정이 가능해졌다.
- 2) 지형의 기복을 반영하고, 수위 변화에 따라 측정선을 위치를 변경할 수 있는 11점 좌표 변환법을 제안하고 이를 구현하였다.
- 3) FSIV를 이용하여 획득된 영상을 유무선 통신기술을 이용하여 인터넷에 올릴 수 있도록 실시간 무인 시스템을 사용하였다. 그 결과 유량 조사를 위해 현장에 나가지 않더라도 언제 어디서나 자유롭게 사용자가 홈페이지에서 영상을 받아 유량을 산정할 수 있도록 하였다. 뿐만 아니라 홍수시 하천의 모습을 직접 확인하면서 유량을 산정할 수 있다는 점은 다른

자동유량측정 방법과 비교하여 큰 장점인 것으로 판단된다.

4) FSIV의 정확도를 댐 방류량과 유속지수법을 이용한 유량 산정 결과와 비교한 결과 대부분의 경우 5 ~ 10 % 이내의 오차 범위내에서 유량을 산정할 수 있었다. 저유속시 수표면의 움직임이 거의 없어 영상 분석이 어려운 경우와 수심이 작을 경우 하상의 바위 등에 흐름이 부딪혀 실제 흐름이 왜곡되어 정확도가 떨어지는 것으로 확인되었다. 또한, 고유량일 경우 비교적 작은 오차를 보였다. 따라서 FSIV를 이용한 유량 산정에 필요한 인력과 경비 등을 생각한다면, 이 정도 오차는 다른 유량측정 방법들의 측정에 필요한 비용 및 노력을 생각해보았을 때 획기적인 것으로 보인다.

5) FSIV를 현장에 적용한 결과 다음과 같은 문제점과 개선안을 도출하였다. 첫째, 영상획득시 정지영상의 시간 간격에 대한 기준이 필요하며, 둘째, 야간의 유속 측정이 가능하도록 개선하여야 한다. 셋째, 표면 유속을 평균유속으로 환산할 경우 현장 검증을 통하여 충분히 검토한 후 수심 변화에 따른 표면유속과 평균유속의 관계를 수립하여야 한다. 넷째, 수표면의 움직임이 거의 없는 저유속일 경우 영상 분석이 어려워 정확도가 떨어지는 것을 확인하였다. 향후 표면 영상 유속계의 측정 가능 최소유속 범위에 대한 기준 마련이 필요할 것으로 판단된다. 여섯째, 영상 획득시 카메라 1대를 이용하여 정확도를 보장할 수 있는 촬영 범위에 대한 기준이 없어 수위가 올라가는 경우 수표면적이 넓어져 가장자리의 유속 계산의 정확도가 떨어지는 어려움이 있었다.

향후 영상 촬영의 시간적 한계, 빛이 없는 경우의 한계 및 유량 계산을 위한 하천의 표면유속과 평균유속의 관계 작성 등과 같은 개선사항들을 보완한다면, 기존 유량 측정 방법과 더불어 수자원 전반에 필요한 유량을 실시간으로 확보하는데 많은 도움이 될 것으로 판단된다. 그리고 FSIV의 사용상의 기준에 대한 추가적인 개선을 통하여 보다 좋은 정밀도와 유지 관리가 보장된다면, 현재 측정 인원의 부족으로 인하여 측정하기 어려운 중·소하천의 실시간 유량 측정에 활용하여 매우 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원 (과제번호 2-1-3)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

김서준, 윤병만, 류권규, 주용우 (2007). “LSPIV기법을 이용한 탄천 (대곡교) 유량 측정.” **한국수자원학회 학술 발표대회**, 한국수자원학회, pp. 911-915.

김용진, 이찬주, 김동구, 김원 (2009). “유속지수법을 이용한 자동유량측정.” **한국수자원학회 학술발표대회**, 한국수자원학회, pp. 1845-1849.

노영신, 김영근, 윤병만 (2004). “LSPIV를 이용한 표면유속 측정기법의 검증 및 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제2호, pp. 155-161.

노영신 (2005). 영상해석기술을 이용한 하천유량 측정기법 개발. 명지대학교 토목환경공학과, 박사학위논문.

노영신, 윤병만, 류권규 (2005). “표면유속을 이용한 평균유속 추정방법의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제11호, pp. 917-925.

윤병만, 노영신, 김영근, 류권규 (2002). “개수로 실험장치를 이용한 LSPIV기법의 검증.” **한국수자원학회 학술 발표회**, 한국수자원학회, pp. 982-988.

木下良作 (1984) “航空寫眞による洪水流解析の現状と今後の課題”, **土木學會論文集**, No. 345/II-1, pp. 1-19. (일본어)

藤田一郎, 河村三郎 (1994) “ビデオ畫像解析による河川表面流計測の試み”, **水工學論文集**, Vol. 38, pp. 733-738. (일본어)

Cheng, R.T., and Gartner, J.W. (2003). “Complete velocity distribution in river cross-sections measured by acoustic instruments.” *Proceedings of the IEEE/DES 7th Working Conference in Current Measurement Technology*, pp. 21-26.

Costa, J.E., Spicer, K.R., Cheng, R.T., Peter Haeni, F., Melcher, N.B., and Michael Thurman, E. (2000). “Measuring stream discharge by noncontact methods: A proof of concept experiment.” *Geophys. Res. Letter*, Vol. 27, No. 4, pp. 553-556

Dramais, G., Le Coz, J., 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*(in Press).

Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A. (1998). “Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering application.” *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 36, No. 3, pp. 397-414.

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.
- Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G., and Camenen, B. (2010). "Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers." *Journal of Hydrology*, Vol. 394, No. 1-2, pp. 42-52.
- Raffel, M., Willert, C., Wereley, S., and Kompenhans, J. (2007). *Particle image velocimetry, a Practical Guide*, Springer.
- Rantz, S.E. (1982a). "Measurement and computation of streamflow: Volume 1. Measurement of stage and discharge." Water-Supply Paper 2175. U.S. Geological Survey.
- Rantz, S.E. (1982b). "Measurement and computation of streamflow: Volume 2. Computation of discharge." Water-Supply Paper 2175. U.S. Geological Survey.
- Stevens, C., and Coates, M. (1994). "Application of a maximized cross-correlation technique for resolving velocity fields in laboratory experiments." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 32, No. 2, pp. 195-212.

논문번호: 11-016	접수: 2011.02.14
수정일자: 2011.04.20/05.02	심사완료: 2011.05.02