흔들리는 영상 분석을 위한 표면 영상 유속계 알고리즘

A Surface Image Velocimetry Algorithm for Analyzing Swaying Images

류 권 규* / 윤 병 만** / 정 범 석***

Yu, Kwonkyu / Yoon, Byungman / Jung, Beomseok

Abstract

Surface Image Velocimetry (SIV) is an instrument to measure water surface velocity by using image processing techniques. To improve its measuring accuracy, it is essential to get high quality images with low skewness. A truck-mounted SIV system would be a good way to get images, since its crane gives high altitude to the images. However, the images taken with a truck-mounted SIV would be swayed due to the movement of crane and the camera by winds. In that case, to analyze the images, it is necessary to compensate the side sway in the images. The present study is to develop an algorithm to analyze the swayed images by combining common image processing techniques and coordinate transform techniques. The system follows the traces of some selected fixed points and calculates the displacements of the video camera. By subtracting the average velocity of the fixed points from that of grid points, the velocity fields of the flow can be corrected. To evaluate the system's performance, two image sets were used, one image set without side sway and another set with side sway. The comparison of their results showed very close with the error of around 6 %.

keywords : Surface Image Velocimetry, image processing, image correction, velocity measurement

요 지

표면 영상 유속계(SIV, Surface Image Velocimetry)는 영상 처리 기술을 이용하여 수표면의 유속을 측정하는 장비이다. 유속 측정의 정밀도를 높이기 위해서는 화질이 좋고, 왜곡이 적은 영상을 획득하는 것이 매우 중요하다. 트럭에 장착된 기중기를 이용하는 차량탑재형 표면 영상 유속계는 왜곡이 적은 영상을 얻는 좋은 방법이 될 수 있다. 이 때, 기중기의 흔들림 때문에 획득된 영상이 흔들리는 문제가 발생하며, 영상의 흔들림을 보정하여 유속을 측정할 수 있는 영상 처리 알고리즘이 필요하게 된다. 본 연구에서는 영상 분석 기법과 좌표 변환 기법, 유속 산정 기법 등을 조합하여 흔들리는 영상에서 표면 유속을 측정하는 기법을 개발하였다. 즉, 비디오 카메라로 촬영된 연속 영상에서 고정점들의 움직임을 추적하여 카메라의 위치 변동을 파악한다. 영상 분석에서 구한 격자점의 속도에서 고정점의 속도를 빼서, 격자점의 유속장을 산정하였다. 개발된 기법의 검증을 위해서 실험 수로에서 동일한 흐름에 대해 흔들리지 않은 영상과 흔들리는 영상의 두 가지 영상을 만들고, 흔들림이 없는 영상의 처리 결과를 기준으로 삼아, 흔들

* 동의대학교 토목공학과 전임강사

Full-time Instructor, Dept. of Civil Eng., 995 Eomgwang-no Busanjin-gu Busan, 614-714, Korea
(e-mail: pururumi@deu.ac.kr)

** 명지대학교 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil & Environmental Engr., San 38-2 Namdong Cheoin-gu Yongin Gyeonggi-do, 449-728, Korea
(e-mail: bmyoon@mju.ac.kr)

*** 동의대학교 토목공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil Eng., 995 Eomgwang-no Busanjin-gu Busan, 614-714, Korea
(e-mail: bsjung@deu.ac.kr)

림이 있는 영상의 처리 결과를 검토하였다. 그 결과, 흔들림이 지나치게 커서 참조점들의 추적이 불가능한 경우를 제외하고는 두 자료의 처리 결과는 거의 동일하였으며, 유속 측정의 오차는 약 6 % 내외로 나타났다.

핵심용어 : 표면 영상 유속계, 영상 처리, 영상 보정, 유속 측정

1. 서 론

하천에서 유속을 측정하는 일은 상당히 많은 인력과 경비가 소요되며, 각종 사고의 위험을 안고 있는 작업이다. 따라서 최근에는 표면 영상 유속계(SIV, Surface Image Velocimetry)를 이용하여 표면 유속을 측정하고 여기서 유량을 추정하려는 연구가 국내외적으로 많이 진행 중이다(Fujita and Komura, 1994; 노영신, 2005; Kim, *et al.*, 2006; 김서준 등, 2007). 표면 유속 측정은 매우 경제적이며, 단시간에 유속 측정을 할 수 있으므로, 홍수와 같이 수위나 유속이 급격히 변하는 상황에서라도 원하는 간격으로 유속을 측정할 수 있다.

노영신(2005)에 따르면 SIV에 의한 실험실 검증 결과는 표면 유속 측정시 최대 오차가 약 7 % 정도이고, 현장 적용시 유량 환산 오차는 약 10 % 정도인 것으로 나타났다. SIV의 사용에 필요한 노력을 고려한다면, 이 정도의 오차는 매우 획기적인 일이라 할 수 있다. 그러나, SIV는 영상 분석 기술을 이용하기 때문에 그 정확성은 분석할 영상의 품질에 의해 좌우되게 된다. SIV의 정확도를 높이기 위해서는 해상도가 높은 선명한 영상을 정사영에 가깝게 취득하는 것이 매우 중요하다. 정사영에 가깝게 영상을 획득하기 위해서는 가급적 촬영 각도를 높게 하는 것이 영상 왜곡에 따른 측정의 오차를 줄일 수 있는 장점이 있다(김서준, 2008).

정사영에 가까운 영상을 획득하기 위한 한 방법으로

Iowa 대(University of Iowa)의 수리연구소(IIHR, Iowa Institute of Hydraulic Research)에서는 트럭에 기중기를 장착하고, 그 끝에 카메라를 달아서 영상을 획득하는 차량탑재형 표면 영상 유속계(MLSPIV, Mobile Large Scale Particle Image Velocimetry) 시스템을 개발하고 있다(Kim *et al.*, 2005). (주: 본 연구에서는 표면 영상 유속계를 Surface Image Velocimetry라고 표현하고 있으나, IIHR에서는 Large Scale Particle Image Velocimetry라고 표현하고 있다. 따라서 SIV는 본 연구의 표면 영상 유속계를, MLSPIV는 IIHR의 차량탑재용 표면 영상 유속계를 의미할 것이다.) 이 시스템의 하드웨어는 트럭, 디지털 카메라, PTU (Pan and Tilt Unit), 노트북 컴퓨터로 이루어져 있다(Kim *et al.* 2005). 이때, 영상 분석에 이용된 분석 소프트웨어는 본 연구에서 이용한 표면 영상 유속계 프로그램과 같은 것으로 Yu(2004)에서 개발된 것이다.

Fig. 1은 IIHR의 MLSPIV의 기본적인 개념도를 보인 것이다. 기본적인 원리는 트럭에 장착된 기중기 끝에 카메라를 설치하여 이 카메라에서 잡은 영상을 분석하는 것이다. 그것은 MLSPIV의 영상에서 가급적 높은 고도에서 작은 왜곡 각도로 획득한 영상이 영상 분석의 정확성을 높일 수 있기 때문이다. Fig. 2는 실제로 제작된 MLSPIV 시스템과 트럭의 기중기를 세운 모습이다. 이렇게 획득된 영상을 분석하는 과정에서 몇 가지 새로운 문제점들이 드러났다.

Fig. 1. Hardware System of a Truck-mounted Surface Image Velocimetry (Kim *et al.* 2005)

Fig. 2. Real Image of a Truck-mounted Surface Image Velocimetry(Kim *et al.* 2005)

가장 큰 문제는 영상의 흔들림이다. 현재까지 이 장비를 운용한 결과, 바람이 거의 없는 날은 어느 정도 분석이 가능한 영상을 얻을 수 있었으나, 조금이라도 바람이 있는 날은 그 흔들림 때문에 거의 분석이 불가능하였다. 그것은 현재 운용중인 디지털 카메라에 의한 최소 영상 획득 간격이 약 1초 내외로, 그 사이에 카메라의 흔들림에 따른 영상 변화가 지나치게 크기 때문이다. 따라서 MLSPIV의 영상분석 프로그램은 반드시 영상 흔들림을 보정할 수 있는 방법이 보완되어야 할 것이다.

본 연구는 IIHR의 MLSPIV와 같은 하드웨어 시스템을 상정하고, 이 시스템에서 사용가능한 표면 영상 유속계 분석 프로그램을 개선하고자 하는 것이다. 이 루틴은 장차 국내에서 이와 비슷한 시스템을 개발할 때 적용하기 위한 것이다.

2. 흔들림 보정 방법의 개발

2.1 영상 분석 과정

먼저 SIV에서 한 쌍의 영상을 분석하는 과정은 크게 영상 획득, 영상 변환, 영상 분석의 세 단계로 나눌 수 있다. 여기서 카메라의 흔들림이 문제가 생기는 것은 2단계의 물리적 추적 계산 부분이나 3단계의 FFT(Fast Fourier Transform)의 영상 비교 과정이다. 따라서, SIV의 개선을 위한 흔들림 보정 방법은 다음과 같이 두 가지 대안을 생각할 수 있다.

첫째 방법은 두 번째 영상을 첫 번째 영상과 같은 좌표로 변환한 뒤 분석하는 방법이다. 이 방법은 먼저 가장 기본이 될 수 있는 영상을 첫째 영상으로 선정하고, 둘째 영상에서 기준점에 대한 PIV 분석을 수행하여 기준점들의 변위를 측정한다. 그 다음 SIV의 좌표 변환 방법을 사용하여 두 영상을 공통의 물리 공간 좌표로 변환시키면 된다. 이 변환된 두 영상을 분석하면 중간에 흔들림이 있는 영상의 분석이 가능하다. 단, 이 방법에는 두 영상 사이의 시간 간격이 극히 짧아서 기준점들의 변위가 크지 않아야 한다는 근본적인 가정이 하나 들어간다. 즉, 영상 간격이 클 경우 영상내 입자들의 변위가 커져서 SIV 분석에 문제를 초래할 위험이 있다. 즉, 일반적인 상용 비디오 카메라를 이용할 경우 각 프레임간의 변위는 너무 작아서 SIV 분석에 오차가 크다는 것이다. 즉, 기준점의 PIV 추적에는 가급적 프레임간 시간 간격이 짧아야 하는 대신, SIV 분석에서는 프레임간 시간 간격이 지나치게 짧아서는 안된다는 것이다. 결국 이 경우는 영상 변환 때 발생하는 오차들이 영상 분석에 포함되어 최종적인 유속의 산정에 영향을 미

칠 수 있다는 문제가 있다.

두 번째 방법은 좌표 변환하기 전 영상을 분석한 뒤 분석된 유속을 좌표 변환하는 방법이다. 즉, 한 쌍의 영상을 있는 그대로 SIV 분석하고 나서, 분석된 결과를 좌표 변환시키는 방법이다. 이 방법은 첫째 방법에 비해 영상의 변환시 불가피하게 발생하는 오차를 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한, 직접 영상의 좌표를 변환하는 것이 아니라 분석된 수치를 좌표 변환하는 것이기 때문에 계산 양을 줄일 수 있는 장점이 있다. 반면, 영상 분석 때 탐색 영역의 범위가 상대적으로 크게 되어야 하는 문제가 있다. 이 방법도 위의 좌표 변환후 영상 분석법과 마찬가지로 유체 추적자의 프레임간의 실제 변위가 지나치게 작거나 크면 문제에 봉착할 수 있다. 본 연구에서는 두 번째 방법인 영상 분석후 좌표를 변환하는 방법을 선택하였다. 이 방법이 좌표 변환후 영상 분석법보다 프로그램의 작성이나 응용이 간편하기 때문이다.

위의 두 가지 방법 모두, 카메라의 흔들림이 지나치게 커서 참조점의 추적에 실패할 경우 분석이 곤란해지는 문제점이 있다. 그러나 일반적인 측정 상황, 즉 카메라의 흔들림이 작은 각도에 머물 경우 두 방법 모두 영상 분석에 큰 문제가 없는 것으로 보인다. 카메라의 흔들림이 클 경우에 생기는 문제는 참조점이 영상을 벗어나는 경우와 영상이 선명하게 찍히지 않는 경우를 상정할 수 있다.

2.2 영상 분석법

SIV의 영상 분석은 획득한 영상 위에 격자망을 형성하고, 한 쌍의 영상에서 이들 격자점의 이동 변위를 측정하고 여기에 영상의 축척을 곱하여 유속으로 환산하는 것이다. 이 때 각 격자점 위에는 작은 크기의 영상 조각(영어로는 interrogation window 또는 image patch라 하며, 본고에서는 상관영역이라 할 것임.)을 설정한 후, 쌍이 되는 영상에서 이 영상 조각과 가장 밀접한 영상 조각을 찾는 것이다. 영상 조각을 찾는 범위를 이동할 수 있는 범위 또는 탐색 영역(searching area)이라 한다. 이 때 가장 밀접한 정도는 상관계수(correlation coefficient)로 나타낸다. 각 상관영역의 상관계수 R_{ab} 의 계산은 연속되는 두 번째 영상의 검색 영역내에서 상관영역을 화소단위로 이동하면서 모든 상관영역에 대해 수행된다. 두 입자군 즉 상관영역간의 상관계수 R_{ab} 는 연속되는 두 영상의 상관영역내 명암 등급값 a_{ij} 와 b_{ij} 로부터 계산되며, 검색영역내에서 가장 큰 R_{ab} 값을 갖는 입자군을 동일한 입자군으로 판단, 두 입자군간의 이동

거리를 산정하는 방식이다. 상호상관 기법에서의 상관 계수 R_{ab} 는 Eq. (1)과 같이 정의 할 수 있다.

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} [(a_{ij} - \overline{a_{ij}})(b_{ij} - \overline{b_{ij}})]}{\left[\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (a_{ij} - \overline{a_{ij}})^2 \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (b_{ij} - \overline{b_{ij}})^2 \right]^{1/2}} \quad (1)$$

여기서 MX 와 MY 는 상관영역의 크기를 나타내며, a_{ij} 와 b_{ij} 는 각각 연속되는 두 영상내 상관영역의 픽셀에 대한 i 열과 j 행에 대한 명암 등급값을 나타낸다. $\overline{a_{ij}}$ 와 $\overline{b_{ij}}$ 는 상관영역 내의 모든 명암 등급값의 평균이다(Yu, 2004).

이와 같은 영상 분석을 통하여 한 쌍의 영상에서 격자점의 변위를 측정할 수 있다. 이들 격자점들은 추후의 좌표 변환과 흔들림 보정을 거쳐서 표면 유속 분포를 산정하는 데 이용될 것이다.

2.3 고정점의 추적

영상의 흔들림을 파악하기 위해서는 영상내에 몇 개의 고정점을 선택하고 이 점들이 시간에 따라 어떻게 움직이는지를 알아야 한다. 고정점의 추적 방법은 영상 내에서 움직이지 않는 사물을 고정점으로 선택하고, 연속되는 영상 속에서 이 점의 이동 변위를 연속적으로 추적하는 것이다. 추적 방법은 앞의 2.2절에서 제시한 일반적인 SIV의 영상 분석법과 동일하다. 이 추적 정보를 이용하여 영상이 얼마나 흔들리는지 파악할 수 있다. 앞서 좌표 변환에서 변환 계수를 산정하기 위한 최소의 자료점 수가 4이므로, 좌표 변환을 위해 사용해야 할 고정점의 수는 4 개 이상이 될 것이다.

2.4 좌표 변환

영상의 좌표 변환은 주어진 4개 이상의 참조점을 이용하여 정사영을 만드는 과정으로 Fujita *et al.*(1997)에 의해 처음 제시되었으며, 노영신 (2005)에 자세히 설명되어 있다. 2차원 투영좌표 변환법에 의한 실제 좌표계 (X, Y) 와 영상 좌표계 (x, y) 간의 관계식은 다음 Eqs. (2)~(3)과 같다.

$$x = \frac{c_1 X + c_2 Y + c_3}{c_4 X + c_5 Y + 1} \quad (2)$$

$$y = \frac{c_6 X + c_7 Y + c_8}{c_4 X + c_5 Y + 1} \quad (3)$$

여기서 c_i ($i=1, 2, \dots, 8$)는 회전 보정, 병진이동 보정

및 (x, y) 좌표에 대한 직각보정과 평행하지 않은 두 좌표계간의 좌표보정을 위한 8개의 변환 계수이다. Eq. (1)과 Eq. (2)로부터 왜곡된 영상의 (x, y) 좌표로부터 보정된 실제 좌표계의 (X, Y) 좌표를 계산할 수 있다. (X, Y) 좌표는 보정을 위한 지표면상의 기준점이 되고, (x, y) 는 이에 해당하는 왜곡된 사진 상의 좌표가 된다. Eq. (1)과 Eq. (2)는 기준점 각각에 대해 성립하며 8개의 미지수를 갖기 때문에 최소 4개의 기준점이 필요로 하나, 해석을 위해 4개 이상의 기준점을 두는 것이 좋다.

변환 계수는 이미 알고 있는 실제 좌표계의 n 개의 기준점 $(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)$ 과 영상좌표계의 n 개의 대응점 $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ 를 이용하여, 최소자승법에 의해 결정된다. 이러한 변환 계수는 다음 Eq. (4)로부터 얻을 수 있다.

$$TB = Z \quad (4)$$

여기서,

$$B = [b_1, b_2, \dots, b_8]^T \quad (5)$$

$$Z = [x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_n]^T \quad (6)$$

$$T = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1 X_1 & -x_1 Y_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ X_n & Y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_n X_n & -x_n Y_n \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & 1 & -y_1 X_1 & -y_1 Y_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & 1 & -y_n X_n & -y_n Y_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

실제 좌표계와 영상 좌표계간의 관계는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다(Fujita *et al.*, 1998). 기준점은 Fig. 4와 같이 보통 하천 양안에서 몇 개의 점을 선정하여 정확하게 된다. 기준점은 측량을 통해 얻게 되며, 기준점으로부터 8개의 변환 계수가 결정되면 이로부터 Eq. (2)와 Eq. (3)을 반복 계산하여 나머지 좌표에 대한 변환을 수행하게 된다.

이 방법은 원래 영상의 변환을 위해 개발되었으나, 영상 전체가 아닌 영상 내의 몇 개의 점에 적용하는 것도 문제가 없다. 본 연구에서는 영상을 직접 변환시키지 않고 좌표 변환의 변환 계수만을 산정하였다. 이 변환 계수를 이용하여 격자점과 고정점 만을 좌표 변환한 뒤 여기에서 유속과 카메라의 흔들림 속도를 분석하도록 하였다. 다시 말하자면, 격자점과 고정점에 대한 좌표 변환을 실시하면, 이들의 이동 변위를 산정할 수 있다. 이 이동 변위를 시간으로 나누면 격자점과 고정점

Fig. 3. Physical Coordinates and Image Coordinates(Fujita *et al.*,1998)

의 유속을 산정할 수 있다. 그런데, 고정점은 이동하지 않으므로 유속이 0이어야 하며, 고정점의 계산된 유속은 카메라의 흔들림에 따른 흔들림 속도이다. 따라서, 격자점의 유속에서 고정점의 유속을 빼면, 격자점의 실제 유속을 산정할 수 있다. 이 때, 여러 개의 고정점들의 속도가 서로 약간씩 차이가 날 수 있으나, 이것은 이들의 평균 속도를 이용하여 해결할 수 있다.

2.5 격자점 이동

일단 한 쌍의 영상을 분석한 후에, 다음 한 쌍의 영상에서는 격자점의 위치가 변경되어야 한다. 즉, 고정점이 변한 만큼 격자점을 이동시켜 주어야만 직전 영상과 같은 위치의 속도를 분석할 수 있게 되는 것이다.

2.6 흔들림을 보정한 영상 분석 과정

앞서 설명한 영상 분석 과정과 흔들림 보정 과정을 종합하면, Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 5에서 회색으로 처리된 부분이 기존의 SIV의 분석 과정에 새로 추가된 부분이다. 이 분석 과정에서는 영상을 직접 좌표 변환하지 않고 변환 계수만 산정하였다. 그리고, 먼저 영상 분석을 하여 각 격자점에서의 변위를 구한 뒤에 좌표 변환 계수를 이용하여 격자점과 고정점의 속도를 분석하였다. 다음에 격자점의 속도에서 고정점의 속도를 빼서, 실제 격자점의 유속을 산정하도록 하였다.

3. 적용 및 분석

3.1 분석 영상

개발된 두 방법을 비교하기 위해, 모형 교각의 실험 수로(Fig. 6)에서 비디오 카메라를 연직으로 하여 촬영된 영상을 이용하였다. 실험 수로의 폭은 1.2 m, 수로 중앙에 설치된 모형은 아크릴로 제작된 지름이 0.07 m

Fig. 4. Reference Points for Coordinate Transform (Fujita *et al.*, 1998)

의 모형 교각이다. 수로 중앙에 2.0 m 높이의 역 U 자형 프레임을 설치하고 여기에 카메라를 장착하였다. 카메라는 SONY의 DCR-HC20 캠코더이며, 영상은 NTSC 표준인 640×480 화소로 초당 30 프레임이다. 고정점으로는 Fig. 6에 □로 표시된 4개의 점과 모형 교각을 이용하며, 실험에 사용된 추적 입자는 합성 세제의 거품이다. 이 때 흐름의 수심은 0.17 cm, 평균 유속은 0.45 m/s이고, 흐름 방향은 Fig. 6의 오른쪽에서 왼쪽 방향이다.

Fig. 5. New Image Processing Procedure with Sway Correction for Surface Image Velocimetries

Fig. 6. Experimental Setup

첫째 자료는 카메라를 완전히 고정하고 흔들림이 없게 하였으며(WO), 둘째 자료는 인위적으로 카메라를 작은 폭으로 진동시키면서(WS) 촬영하였다. 두 자료 모두 30초(900 프레임) 동안의 자료를 이용하였으며, 흔들리는 영상에서는 참조가 되는 고정점이 영상에서 벗어나지 않는 부분만 이용하였다. 영상 분석에서 각각의 상관 영역의 크기는 16×16 픽셀로 하였으며, 격자의 수는 18×17 로 하였다. 이 때, 모형 교각에 인접한 부분(기준점에서 수평 방향으로 0.7~0.8 m 인 부분)은 생략하였다. 이것은 Fig. 6에 보인 것과 같이 실험 수로 단면에 불연속선(바닥의 재료가 달라서 색상이 달라 보임)이 영상 분석에 오류를 유발할 수 있기 때문이다.

3.2 적용 결과

개발된 SIV를 이용하여 위의 실험 자료를 분석한 결과는 흔들림이 없는 경우(WO)에서 평균 유속장은 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 좌측의 벡터장이 모형 교각 하류의 흐름(WO1)이고 우측의 벡터장이 모형 교각 상류의 흐름(WO2)이다.

Fig. 7. Average Velocity Field for Images without Sway

흔들림이 있는 영상에 대해 고정점의 움직임을 먼저 구해야 한다. Fig. 8은 1초 마다의 화면을 차례로 보인 것이다. Fig. 8에 제시된 영상에 대해 고정점의 움직임을 나타낸 것이 Fig. 9이다. 이 움직임은 평균적으로 0.1 rad/sec이고 최대 0.17 rad/sec 이었다. 화면의 중앙에 있는 모형 교각에 대해 선속도로 환산하면, 평균적으로는 0.15 m/sec이고, 최대 0.25 m/s 이었다. 흔들림 속도는 흐름의 평균 유속의 1/3~1/2 정도로 아주 심하게 흔들린 것은 아니었다.

한편, 흔들림이 있는 경우(WS)에서 순간 유속장의 한 예를 보이면 Fig. 10과 같다. Fig. 10의 결과에서 이러한 참조점의 변동(카메라의 흔들림)을 고려하여 좌표 변환을 하여 보정하면 유속장은 Fig. 11과 같다.

또한 흔들림 있는 영상의 30초 동안의 평균 유속장을 구해 보면, Fig. 12와 같다. 흔들림 보정 루틴의 정확도를 분석하기 위해서는 흔들림이 없는 경우와 흔들림 있는 경우의 평균 유속장을 비교하여야 한다. 실제로는 흔들림이 없는 경우(WO)와 있는 경우(WS)의 영상이 동일하지 않으므로 그 계산 결과가 정확히 같은

Fig. 8. A series of Images with Sway

Fig. 9. Movement of Reference Points of Fig. 8

Fig. 10. Instantaneous Velocity Field for Swaying Image Case

Fig. 11. Corrected Instantaneous Velocity Field for Swaying Image Case

Fig. 12 Average Velocity Field for Swaying Image Case

Fig. 13 Comparison of Average Velocities

것은 아니다. 흔들림이 없는 경우의 평균 유속은 0.452 m/s이고, 흔들림이 있는 경우 0.432 m/s 로 4.4 % 정도의 오차가 발생하였다. 또한, Fig. 13은 각 격자점에서 수평 방향의 평균 유속을 비교한 것이다. 전체 306개의 격자점 중 $\pm 10\%$ 이상 오차가 나는 격자점은 2개, $\pm 5 \sim 10\%$ 의 오차가 발생한 격자점은 16개로 나타나, $\pm 5 \%$

이상의 오차가 나는 경우는 전체의 5.9 % 정도였다. 다시 말하자면 흔들림 보정 기법이 약 6% 이내의 오차로 보정이 가능하다는 의미라고 볼 수 있다. 그러나 이 정도 오차는 SIV의 실용적인 적용에 아무런 문제가 없는 정도인 것으로 보인다. 또한, Fig. 13에서 알 수 있듯이 유속이 작은 부분(대부분은 교각의 후류의 영향을 받는

부분)이 비교적 큰 오차를 보이고 있다. 이 부분은 흐름이 부정류이기 때문에 사실은 흔들림이 없는 경우와 있는 경우의 흐름 양상이 다를 가능성도 있다. Fig. 13에서 대부분의 유속은 0.4~0.5 m/sec에 집중되어 있으며, 이 그림에서 자료점들이 중복되어 있는 점이 많다.

이 때 생기는 오차는 흔들림 때문에 생기는 영상의 열화(화면이 선명하게 찍히지 않음) 때문으로 추정된다. 즉, 카메라가 빠르게 흔들릴 경우 일부 영상이 선명하지 않은 경우가 생기며, 이 경우는 영상 분석 오차가 크게 된 것으로 보인다.

5. 요약 및 결론

이 연구는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 흔들림이 있는 카메라에 의해 획득한 영상을 표면 영상 유속계로 분석하기 위해 흔들림 보정 기법을 개발하였다. 이것은 고정점들을 영상 분석 기법으로 추적하여 카메라의 흔들림을 파악하고, 분석된 유속값을 고정점의 변위로 보정하였다. 또한, 연속적인 분석을 위하여 격자점을 고정점 변위만큼 이동시키도록 하였다.
- 2) 개발된 방법을 모형 교각 주위의 흐름에 대한 실험 영상에 적용한 결과, 약간의 오차가 발생하였으나, 실용상으로는 거의 문제가 없는 것으로 사료된다. 이 오차는 흔들림 때문에 생기는 영상의 열화 때문인 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호:2-1-2)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김서준, 윤병만, 류권규, 주용우 (2007). "LSPIV기법을 이용한 탄천(대곡교) 유량측정." **한국수자원학회 학술발표대회 개요집**, p. 205.
- 김서준 (2008). **표면 영상 유속계를 이용한 유량측정 기법의 정확도 분석**, 명지대학교 석사학위논문.
- 노영신 (2005). **영상해석 기술을 이용한 하천 유량 측정 기법 개발**, 명지대학교 박사학위논문.
- Fujita, I. Aya, S., and Deguchi, T. (1997). "Surface velocimetry measurement of river flow using video images of an oblique angle." *Proc. XXVII IAHR Conference, Thema B, Vol.1, San Francisco, CA.*, pp. 227-232.
- Kim, Y. S., Muste, M., Kruger, A., Krajewski, W., Bradley, A., and Weber, L. (2005). "Real-time stream monitoring using mobile large-scale particle image velocimetry." *Proc. of XXXI IAHR Congress*, Sep. 11-16, Seoul.
- Yu, K. (2004). *Particle tracking of suspended-sediment velocities in open-channel flow*. Ph.D thesis, Univ. of Iowa, Iowa city, IOWA.

(논문번호:08-20/접수:2008.02.14/심사완료:2008.07.03)