

# 보정된 카메라를 이용한 표면영상유속계의 좌표변환방법

## Coordinate Transform Method of Surface Image Velocimetry with a Calibrated Camera

류 권 규\* / 정 범 석\*\* / 윤 병 만\*\*\*

Yu, Kwonkyu / Jung, Beomseok / Yoon, Byungman

### Abstract

Surface Image Velocimetry (SIV) is an instrument to measure water surface velocity by using image processing techniques. It gives us one of the easiest ways to measure water velocity. However, since it requires a set of plane survey data to estimate the velocity, it may give us some kind of misconception that its usage would be difficult or cumbersome in spite of its handiness. If it has a feature that can estimate the plane survey data easily, it may be treated as like one of the conventional propeller velocimetries and its applicability would be improved so high. The present study is to propose a method to estimate the plane geometry of the physical coordinate with a calibrated camera. With the feature we can half-automatize the estimating procedure for the whole water velocity field. Photogrammetric technique to calculate the plane coordinates of the reference points with a calibrated camera was studied, which has originally studied for long time in the field of computer vision. By applying this technique to SIV, it is possible to estimate the location of reference coordinates for projective transform without plane survey. With this procedure the cumbersome plane survey for the reference points is omitted. One example application of the developed method showed fairly good results with insignificant errors.

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

### 요 지

표면영상유속계(SIV)는 영상 처리 기술을 이용하여 수표면의 유속을 측정하는 장비이다. 표면영상유속계는 하천의 유속을 매우 간편하게 측정할 수 있도록 한다. 그러나, 표면영상유속계를 이용하여 유량을 산정하고자 할 경우, 하천 표면의 평면 측량 자료와 하천의 단면 측량 자료가 반드시 필요하다. 이 때문에 표면영상유속계의 간편성과 유용성에도 불구하고, 이용자들이 쉽게 이용하기 어렵다는 그릇된 인식을 줄 수 있다. 만일 효율적이고 간편하게 하천의 평면을 추정할 수 있다면, 표면영상유속계를 마치 일반적인 프로펠러 유속계처럼 쉽게 이용할 수 있을 것이며, 그 적용성도 크게 증진될 것이다.

\* 동의대학교 토목공학과 전임강사

Instructor, Dept. of Civil Engineering, Dong-eui University, 995 Eomgwangno, Busanjin-gu Busan 614-714, Korea  
(e-mail: [pururumi@deu.ac.kr](mailto:pururumi@deu.ac.kr))

\*\* 동의대학교 토목공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-eui University, 995 Eomgwangno, Busanjin-gu Busan 614-714, Korea  
(e-mail: [bsjung@deu.ac.kr](mailto:bsjung@deu.ac.kr))

\*\*\* 명지대학교 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, San 38-2 Namdong, Yongin, Gyeonggi-do 449-728, Korea  
(e-mail: [bmyoon@mju.ac.kr](mailto:bmyoon@mju.ac.kr))

이 연구는 보정된 카메라를 이용하여 실제의 평면 좌표(물리 좌표)를 추정하는 방법에 대한 것이다. 이 방법을 이용하면 유속장을 추정하는 과정을 반자동화할 수 있다. 보정된 카메라에서 평면 좌표를 산정하기 위해 사진 측량학적 기법을 채택하였다. 이 기법들은 컴퓨터 시각 분야에서 오랜 동안 연구되어 온 것이다. 이 기법을 표면영상유속계에 적용하여 사영 변환을 위한 참조점들의 좌표를 구할 수 있다. 이를 통해 참조점 측량에 대한 번거로운 과정을 생략할 수 있다. 개발된 방법을 실제 적용해 본 결과는 오차를 무시할 수 있을 정도임을 입증하였다.

**핵심용어** : 표면영상유속계, 영상 처리, 영상 보정, 유속 측정

## 1. 서 론

하천에서 유속을 측정하는 일은 상당히 많은 인력과 장비가 소요되며, 각종 사고의 위험을 안고 있는 작업이다. 따라서 최근에는 표면영상유속계(SIV, Surface Image Velocimetry)를 이용하여 표면 유속을 측정하고 여기서 유량을 추정하려는 연구가 국내외적으로 많이 진행 중이다(Fujita *et al.*, 1997; 노영신, 2005; Kim, *et al.*, 2006; 김서준 등, 2007).

영상을 이용한 유동장의 해석은 입자영상유속계(PIV, Particle Image Velocimetry)라는 이름으로 기계 공학 분야에서 처음으로 시도되었다(Raffel *et al.*, 1998). PIV는 레이저를 얇은 판 형태로 주사하고, 일정 시간 간격을 두고 CCD 카메라로 촬영한 한 쌍의 영상의 이용하여 유속을 분석하는 장비이다. PIV의 개발은 1990년대부터 본격적으로 이루어졌으며, 현재는 3차원 PIV, 스테레오 PIV 등 다양한 종류의 PIV가 개발되어 판매되고 있다.

Kinoshita (1984)는 이런 PIV의 기법을 하천에 적용하려고 시도하였다. 그는 한 쌍의 항공사진을 이용하여 하천의 유속측정을 시도하였다. 그러나 항공사진에 의한 분석은 많은 비용이 소모되고, 홍수사상 전체의 시간적 분포를 측정하기가 불가능할 뿐만 아니라 기상조건 등에 의한 제약을 받는 단점이 있다. 또한, Fujita and Komura (1994)은 비스듬한 각도로 촬영된 비디오 영상을 분석하기 위한 기법을 개발하여 강둑에서 카메라를 사용하여 이미지를 획득하여 유동장 분석에 사용하였다. Fujita *et al.* (1997)은 Yodo 강의 홍수시에 적용하여 유속분포를 보여주었으며, 하천표면을 떠나려가는 나뭇조각과 기포를 발생시키는 와류를 분석하여 하천의 2 차원 유속분포를 계산하였다. 뿐만 아니라 영상과 화소의 크기에 따라 최대 7%까지 유속 값에 차이가 남을 보였다.

한편으로는 Ettema *et al.* (1997)은 Mississippi 강과 Missouri 강 합류부에 대한 수평방향 1:500, 수직방향 1:100의 왜곡모형 실험의 유속측정에 표면영상유속계

기법을 이용하였으며, 이밖에도 여러 가지 형태의 대상 영역에 성공적으로 적용하였다. 이 때, 처음으로 대규모 입자영상유속계(LSPIV, Large Scale Particle Image Velocimetry)라는 이름이 붙여졌다. 그러나, 본고에서는 표면 유속 측정이라는 이 장비의 특성을 가장 잘 나타낼 수 있는 이름인 표면영상유속계(SIV)라는 명칭을 사용할 것이다.

그 밖에도 일본과 미국을 중심으로 모형 실험 및 하천 현장 등의 표면 유속을 측정하는 데 SIV가 다양하게 이용되어 왔다.

한편, 국내에서는 SIV와 같은 영상기법을 이용한 하천 등 대규모 영역의 유속장 측정에 대한 연구는 해외에 비해 다소 늦어서 2000년대 초반부터 시작되었다. 노영신 등(2002, 2004)은 활차를 이용하여 LSIV의 표면 유속 측정결과를 검증하고 현장 유량측정에 적용하였다. 또한, 여흥구 등(2006)과 같이 모형 실험에서 흐름장을 SIV를 이용하여 측정하기도 하고, 김서준 등(2007)과 같이 하천 현장에 고정적으로 설치하여 유량 측정을 하려는 시도도 있다.

SIV에 의한 표면 유속 측정은 가장 큰 장점은 매우 경제적이며, 단시간에 유속 측정을 할 수 있다는 점이다. 측정에 소요되는 시간도 수 초 정도의 녹화된 동영상 또는 수십매 정도의 정지 영상이면 충분하므로, 기존 측정방법에 비해 측정시간을 약 1/10로 단축할 수 있다. 따라서 홍수 측정시 유량이 급격하게 변화하여 신속한 측정이 필요한 경우에 특히 유용한 방법이다. 또한, 사용하는 측정 장비가 캠코더와 같은 간단한 촬영장치 뿐이므로 측정인원도 기존의 3~4 명에서 1~2 명으로 줄어, 측정 작업을 더욱 효과적으로 수행할 수 있다. 따라서, 홍수와 같이 순간적으로 변하는 상황에서도 원하는 간격으로 유속을 측정할 수 있다(노영신, 2005). 아울러, 전체 흐름장을 파악할 수 있어 교각 또는 수제와 같은 구조물 주변의 국부적인 흐름변화를 파악하기가 용이하다. 따라서 유량측정의 활용뿐만 아니라 수리모형실험 및 하천의 주요 관심영역에 대한 흐름장을 파악하는데도 편리하게 활용될 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 편리성(간편성)을 고려한다면, 이 정도의 오차는 매우 획기적인 일이라 할 수 있다.

다만, SIV는 영상에서 분석한 화소 단위의 변위를 실제 물리 공간의 길이 단위 변위로 환산하는 과정이 필요하며, 이를 위해서는 하천의 평면 측량 자료가 반드시 필요하다. 그런데, 하천 현장에서 유속 측정을 하는 경우는 대부분 강우시 또는 악천후시이므로, 사전에 하천 평면을 측량해 두지 않았다면, SIV를 적용하는 데 어려움이 있을 수 있다. 본 연구는 보정된 카메라를 이용하여 실제의 평면 좌표(물리 좌표)를 추정하는 방법에 대한 것이다. 이것은 컴퓨터 비전 분야나 사진 측량학 분야에서 오랜 동안 이용하던 기법들을 응용한 것이며, 이를 SIV에 적용하면 보정된 카메라를 이용하여 미 측정된 평면 좌표를 산정할 수 있다. 따라서, 현장의 평면 측량이라는 번거로운 절차 하나가 생략되어, 유량 측정이 훨씬 신속하고 간편하게 될 수 있다.

## 2. 영상 변환

### 2.1 8계수 변환법

일반적으로 SIV를 적용하는 데 사용하는 영상은 Fig. 1과 같이 비스듬하게 촬영되기 때문에 이를 분석하거나 결과를 도출하는 데는 반드시 정사영(right projection)으로 변환해야 한다. 이 변환을 역사영 변환(inverse prospective transform)이라 부르며, 이 변환을 위해서는 실세계 좌표(real world coordinate), 다른 이름으로는 물리 좌표계(physical coordinate) 상의 몇 개

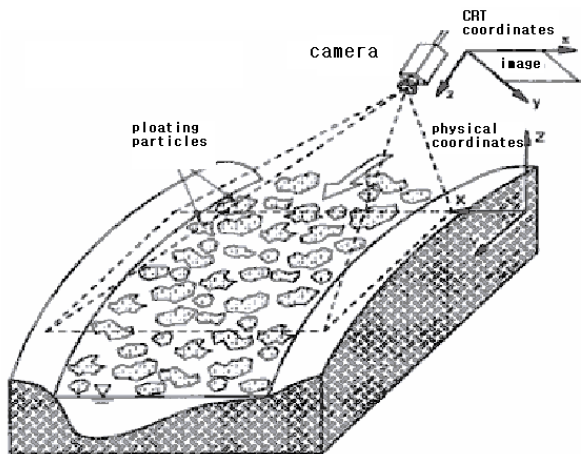


Fig. 1. Perspective Image with Tilted Camera (Fujita, et al., 1997)

의 참조점의 좌표와 이에 대응하는 점들의 영상 좌표(image coordinate)를 알아야 한다(Fig. 2).

이 때, 참조점의 실세계 좌표와 영상 좌표 간의 관계는 두 가지 사항이 있다. 첫째는 3차원 좌표 점을 대응하는 2차원 영상점으로 사상시키는 카메라 모형(camera model)이고, 다른 하나는 특정한 영상점에서 그에 대응하는 3차원 실세계 점을 찾아내는 역사영 변환이다. 영상화 과정은 (3차원 좌표 점에서 2차원 영상점으로) 투영하는 것이므로, 역의 과정 즉 주어진 영상점에 대한 역사영 과정은 단일하지 않다. 즉, 2차원 영상점은 3차원 세계에서 무한히 많은 점으로 이루어진 선으로 사상된다. 카메라 모형과 역사영 변환에 대해서는 오랜 동안 컴퓨터 시각(computer vision)과 로봇 시각(robot vision) 분야에서 연구되어 왔다(Ballard and Brown, 1982; Vernon, 1991; Corrochano, 2005).

Fig. 1과 같이 단일 카메라를 이용할 경우 2차원 투영좌표 변환법에 의해 물리 좌표계  $(x, y)$ 와 각 영상의 영상 좌표계  $(u, v)$ 간의 관계(Fig. 2)는 다음의 Eq. (1)과 Eq. (2)와 같다(Fujita, et al., 1997). 여기서 물리 좌표계란, 하천의 어떤 기준점에 대한 좌표이며, 실세계 좌표라고 부르기도 한다. 한편, 영상 좌표계란 영상의 좌상단을 원점으로 하는 화소 단위의 좌표계이며 픽셀 좌표계(pixel coordinate)라고 부르기도 한다.

$$u = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_7x + b_8y + 1} \quad (1)$$

$$v = \frac{b_4x + b_5y + b_6}{b_7x + b_8y + 1} \quad (2)$$

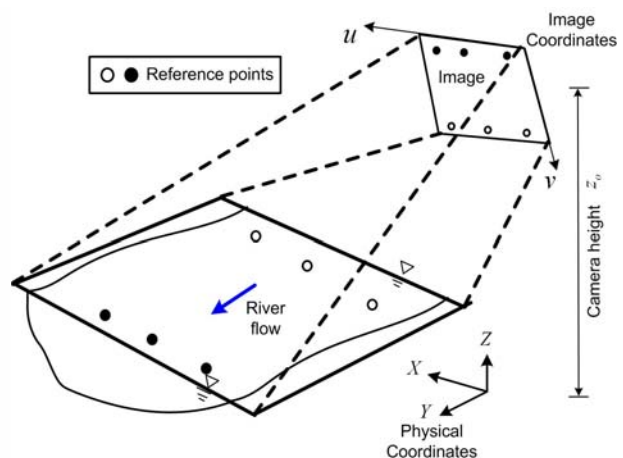


Fig. 2. Reference Points for Coordinate Transform (Fujita, et al., 1997)

여기서  $b_i$  ( $i=1,2,\dots,8$ )는 회전(rotation), 병진(translation) 등을 위한 8개의 변환 계수(또는 사상 계수)이다. 단, Eq. (1)은 기준점들의 높이를 고려하지 못하며, 기준점들은 같은 평면에 위치하는 것으로 가정한다. 이 가정은 많은 경우 큰 문제가 없이 적용될 수 있다. 즉, 하천의 표면 유속을 측정할 경우 수면이 수평이라고 한다면 이 가정에는 큰 문제가 없다.

Eqs. (1)과 (2)의 역변환을 이용하면, 영상 좌표  $(u,v)$ 에서 물리 좌표  $(x,y)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$x = \frac{(b_5 - b_6 b_8)u + (b_3 b_8 - b_2)v + (b_2 b_6 - b_3 b_5)}{(b_4 b_8 - b_5 b_7)u + (b_2 b_7 - b_1 b_8)v + (b_1 b_5 - b_2 b_4)} \quad (3)$$

$$y = \frac{(b_6 b_7 - b_4)u + (b_1 - b_3 b_7)v + (b_3 b_4 - b_1 b_6)}{(b_4 b_8 - b_5 b_7)u + (b_2 b_7 - b_1 b_8)v + (b_1 b_5 - b_2 b_4)} \quad (4)$$

이 방법은 8개의 변환 계수를 이용하므로 4개의 참조점을 이용하면 정확하게 계수들을 구할 수 있다. 이 방법은 Fujita *et al.* (1997)에 의해 처음 제안되었으며, SIV에서 기존에 써 오던 방법이다(노영신, 2005; Kim, *et al.*, 2006; 김서준, 2008). 그러나, 앞서 지적한 바와 같이 이 방법에서는 실세계가 모두 같은 평면에 있다고 가정하고 있으며, 유속 측정을 위해서는 항상 참조점의 실제 좌표와 영상 좌표를 입력해 주어야 한다는 번거로움이 있다.

## 2.2 카메라 모형

위의 Fig. 2와 같은 상태에서 처음부터 다시 물리 좌표와 영상 좌표를 재구성할 수 있다. 이에 대한 내용들은 Ballard and Brown (1982), Vernon (1991), Corrochano (2005) 등에서 찾아볼 수 있다.

어떤 영상점의 영상 좌표(화소 단위)가  $(u,v)$ 이라고 하면, 이것은 벡터형으로  $[u \ v]$ 로 나타낼 수 있다. 여기서, 윗첨자  $T$ 는 행렬이나 벡터의 전치(transpose)를 의미한다. 또한, 이 점을 동차 좌표(homogeneous coordinates)로 표현하면  $[U \ V \ t]$ 로 나타낼 수 있다. 따라서, 영상 좌표와 동차 좌표간에는 다음의 관계가 성립한다.

$$u = \frac{U}{t} \quad (5)$$

$$v = \frac{V}{t} \quad (6)$$

3차원 실세계 좌표의 점  $(x,y,z)$ 을 대응하는 2차원

영상점  $(u,v)$ 로 사상시키는 카메라 모형을  $M$ 라고 하자.  $(x,y,z)$ 를 동차 벡터로 나타내면  $[x \ y \ z \ 1]$ 로 쓸 수 있으므로, 둘 사이의 관계는 다음과 같다.

$$M \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ V \\ t \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서  $M$ 는  $3 \times 4$ 의 동차 변환(homogeneous transform)이며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \quad (8)$$

그리고, 다음의 관계가 성립한다.

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ V \\ t \end{bmatrix} \quad (9)$$

이 행렬 방정식을 전개하면

$$m_{11}x + m_{12}y + m_{13}z + m_{14} = U \quad (10)$$

$$m_{21}x + m_{22}y + m_{23}z + m_{24} = V \quad (11)$$

$$m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34} = t \quad (12)$$

그런데, Eq. (5)와 Eq. (6)의 관계를 다시 쓰면, 다음의 관계가 성립한다.

$$U - ut = 0 \quad (13)$$

$$V - vt = 0 \quad (14)$$

따라서, Eqs. (10)~(12)를 Eq. (13)과 Eq. (14)에 대입하면

$$m_{11}x + m_{12}y + m_{13}z + m_{14} - u m_{31}x \quad (15)$$

$$- u m_{32}y - u m_{33}z - u m_{34} = 0$$

$$m_{21}x + m_{22}y + m_{23}z + m_{24} - v m_{31}x \quad (16)$$

$$- v m_{32}y - v m_{33}z - v m_{34} = 0$$

이 두 방정식은 실세계의 특정한 점  $(x,y,z)$ 와 대응하는 영상 좌표계의 점  $(u,v)$ 를 관련짓는 데서 만들어진 것이다.

만일 우리가 이 관계를 설정하면, 즉,  $x, y, z, u, v$

의 값을 측정하면, 우리는 미지수로 12개의 카메라 모형 계수와 2개의 방정식을 가지게 된다. 이 때,  $x, y, z$  는 실제 좌표의 길이 단위이며,  $u$ 와  $v$ 는 화소(pixel) 단위이다. 관측점 하나는 두 개의 방정식을 만들므로, 6개의 관측점이 있다면, 필요한 카메라 모형의 계수  $m_{ij}$ 를 전부 산정할 수 있는 12개의 방정식이 생기게 된다. 그러나, 그 전에  $M$ 의 전체적인 축척을 나타내는 계수는 수식화 과정에서 별 관계가 없다는 것을 유념해야 한다. 따라서  $m_{34}$ 를 임의로 1로 놓고,  $M$ 의 모든 항이 다 포함되도록 Eqs. (15)와 (16)을 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} m_{11}x + m_{12}y + m_{13}z + m_{14} + m_{21}0 + m_{22}0 \\ + m_{23}0 + m_{24}0 - um_{31}x - um_{32}y - um_{33}z = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} m_{11}0 + m_{12}0 + m_{13}0 + m_{14}0 + m_{21}x + m_{22}y \\ + m_{23}z + m_{24} - vm_{31}x - vm_{32}y - vm_{33}z = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

이렇게 하면 미지수의 수가 11개로 줄어든다. 즉 6개의 관측점을 이용하면, 12개의 방정식과 11개의 미지수를 얻게 되며, 연립 방정식은 과대 결정(over determined)된다. 이 식을 행렬 형태로 재구성하고, 의사 역변환 방법(pseudo-inverse method)을 이용한 최소 제곱법(least square method)으로 해를 구할 수 있다. 만일  $n (\geq 6)$ 개의 관측점을 이용한다면, Eqs. (17)과 (18)은 다음과 같은 벡터식 형태로 쓸 수 있다.

$$Ac = b \quad (19)$$

여기서,  $A$  는  $(2n \times 11)$ 의 기지 행렬,  $c$ 는  $(11 \times 1)$ 의 미지 벡터,  $b$ 은  $(2n \times 1)$ 의 기지 벡터이다. 즉, 이들은 다음과 같이 구성된다.

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -u_1y_1 & -u_1z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -v_1x_1 & -v_1y_1 & -v_1z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_nx_n & -u_ny_n & -u_nz_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & z_n & 1 & -v_nx_n & -v_ny_n & -v_nz_n \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$c = [m_{11} \ m_{12} \ m_{13} \ m_{14} \ \cdots \ m_{31} \ m_{32} \ m_{33}]^T \quad (21)$$

$$b = [u_1 \ v_1 \ \cdots \ u_n \ v_n]^T \quad (22)$$

Eqs. (20)과 (21)에서 아랫첨자는 관측점의 번호이다. 미지 벡터  $c$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$c = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (23)$$

### 2.3 역사영 변환

카메라 모형  $M$ 이 결정되면, 이제는 역사영 변환을 통하여 물리 좌표점을 영상 좌표로 나타내야 한다.

Eqs. (10)~(12)를 상기하면

$$m_{11}x + m_{12}y + m_{13}z + m_{14} = U = ut \quad (24)$$

$$m_{21}x + m_{22}y + m_{23}z + m_{24} = V = vt \quad (25)$$

$$m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34} = t \quad (26)$$

$t$ 에 대한 Eq. (26)을 Eqs. (24)와 (25)에 대입하면

$$m_{11}x + m_{12}y + m_{13}z + m_{14} \quad (27)$$

$$= u(m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34}m_{11}x)$$

$$m_{21}x + m_{22}y + m_{23}z + m_{24} \quad (28)$$

$$= v(m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34}m_{11}x)$$

따라서, Eqs. (27)과 (28)을  $x, y, z$ 에 대해 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$(m_{11} - um_{31})x + (m_{12} - um_{32})y \quad (29)$$

$$+ (m_{13} - um_{33})z + (m_{14} - um_{34}) = 0$$

$$(m_{21} - vm_{31})x + (m_{22} - vm_{32})y \quad (30)$$

$$+ (m_{23} - vm_{33})z + (m_{24} - vm_{34}) = 0$$

Eqs. (29)와 (30)에서 다음과 같이 기호를 바꾸어 쓸 수 있다.

$$a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0 \quad (31)$$

$$a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0 \quad (32)$$

여기서

$$a_1 = m_{11} - um_{31}, \quad a_2 = m_{21} - vm_{31}$$

$$b_1 = m_{12} - um_{32}, \quad b_2 = m_{22} - vm_{32}$$

$$c_1 = m_{13} - um_{33}, \quad c_2 = m_{23} - vm_{33}$$

$$d_1 = m_{14} - um_{34}, \quad d_2 = m_{24} - vm_{34} \quad (33)$$

이 두 방정식은 실제로 두 개의 평면 방정식이다. 이 평면들의 교차선이 영상점  $[u \ v]$ 로 투영되는 실세계 좌표점들의 집합을 이루는 직선이다.

Eqs. (31)과 (32)를  $x$ 와  $y$ 에 대해 연립해서 풀면

$$x = \frac{z(b_1c_2 - b_2c_1) + (b_1d_2 - b_2d_1)}{(a_1b_2 - a_2b_1)} \quad (34)$$

$$y = \frac{z(a_2c_1 - a_1c_2) + (a_2d_1 - a_1d_2)}{(a_1b_2 - a_2b_1)} \quad (35)$$

따라서, 물리 좌표점의 높이  $z = z_0$ 를 가정하고, 영상 점의 좌표  $(u, v)$ 를 이용하면, 물리 좌표에서 그에 대응하는 점  $(x_0, y_0)$ 는 유일하게 결정된다. 이를 위해서는 앞서 설명한 바와 같이 6개 이상의 참조점이 필요하다.

SIV를 이용하는 경우 연구실이나 현장에서 간단히 기준 좌표점들에 대해 모형 보정을 통해 카메라 모형의 변환 계수(Eq. (21)의 벡터  $c$ )와 카메라의 높이  $z_c$ 를 구하고, 측정하고자 하는 면으로 카메라를 위치시킨 뒤 수면의 높이  $z_0$ 를 측정하여 입력하면, Eqs. (33)~(35)를 이용하여 영상점  $(u, v)$ 에 대한 수면의 좌표  $(x, y)$ 를 구할 수 있다. 또한, SIV의 실제 적용시에는 대부분 교량 위에서 작업이 이루어지므로, 교량 바닥과 수면간의 높이 차이를 입력하면 손쉽게 카메라를 보정할 수 있다.

### 3. 적용

#### 3.1 카메라 보정

먼저 실내에서 캠코더를 보정하였다. Fig. 3은 보정에 이용된 영상이다. 복도의 바닥은  $0.90 \times 0.90$  m의 정사각형을 이루고 있다. 이 때 카메라의 높이는 1.50 m 이고, 카메라의 위치를  $(0.00, 0.00, 0.00)$ 으로 했을 때, Fig. 3에서 점 ①은  $(0.00, 4.50, -1.50)$ , 점 ②는  $(0.90,$

$4.50, -1.50)$ 가 된다. 일반적인 측량의 경우 mm 단위까지 측정을 하여야 하나, 본 연구에서는 영상 좌표계의 선정이나 보정 등을 위해서는 cm 정도의 정확도라도 충분한 것으로 보인다. 따라서, 모든 측정은 0.1 m 혹은 0.01 m 단위로 표기할 것이다. 카메라 보정을 위해서 ①~⑥의 6개의 점을 이용하여 변환 계수를 계산하고, ①~⑤는 위치 산정의 정확성 분석을 위해 사용하였다. Table 1은 입력된 자료와 계산된 변환 계수, 산정된 좌표값을 보여주고 있다.

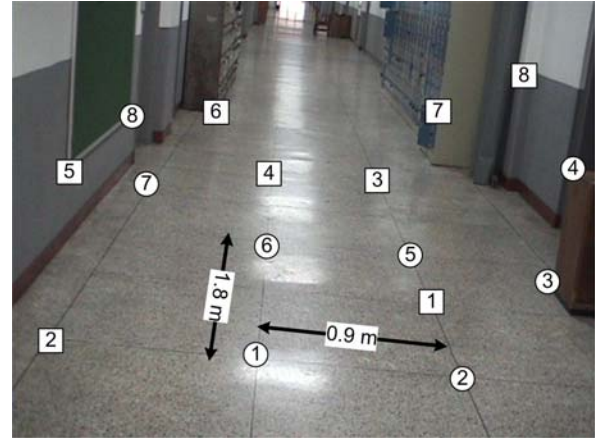


Fig. 3. Image for Camera Calibration

Table 2의 결과에서 보면,  $y$  방향 거리가 멀어질 수록 오차가 커지는 것을 알 수 있다. 이것은  $y$  방향 거리가 멀어질 수록 영상에서 한 화소에 대응하는 실제 물리적 거리가 커지기 때문에, 한 두 화소의 오차가 실제 세계 거리에서는 매우 큰 오차로 나타나기 때문이다. 또한, 일부 계산에서 상대 오차가 10% 이상 발생하는 경우가 있으나 이것은 대부분 측정점의 좌표값의 값이

Table 1. Calibration of Camera Model with Indoor Image

No.	Image coord. (pixel)	Physical coordinate (m)		
		Surveyed	Computed	Relative Error (%)
①	269, 393	0.00, 3.60, -1.50	-0.017, 3.598, -1.500	***, -0.1, 0.0
②	495, 412	0.90, 3.60, -1.50	0.918, 3.596, -1.500	2.0, -0.1, 0.0
③	593, 317	1.76, 5.00, -1.50	1.673, 4.883, -1.500	-4.9, -2.3, 0.0
④	611, 186	1.70, 5.00, -0.78	1.720, 4.943, -0.800	1.2, -1.1, 2.6
⑤	434, 276	0.90, 5.40, -1.50	0.905, 5.383, -1.500	0.6, -0.3, 0.0
⑥	278, 263	0.00, 5.40, -1.50	0.002, 5.402, -1.500	***, 0.0, 0.0
⑦	147, 210	-0.90, 6.30, -1.50	-0.895, 6.362, -1.500	-0.6, 1.0, 0.0
⑧	131, 127	-1.15, 6.80, -1.06	-1.201, 6.732, -1.000	4.4, -1.0, -5.7

Note: Error = (compute - surveyed)  $\times$  100 / surveyed, if surveyed coordinate value is not equal to zero. In case of zero, the error was expressed as \*\*\*.

**Table 2. Verification of Camera Model with Indoor Image**

No.	Image coord. (pixel)	Physical coordinate (m)		
		Surveyed	Computed	Relative Error (%)
①	460, 333	0.90, 4.50, -1.50	0.914, 4.486, -1.500	1.6, -0.3, 0.0
②	39, 368	-0.90, 3.60, -1.50	-1.004, 3.657, -1.500	11.6, 1.6, 0.0
③	405, 206	0.90, 7.20, -1.50	0.911, 7.007, -1.500	1.2, -2.7, 0.0
④	285, 196	0.00, 7.20, -1.50	0.037, 7.043, -1.500	***, -2.2, 0.0
⑤	63, 182	-1.15, 4.80, -1.00	-1.323, 4.922, -1.000	15.0, 2.5, 0.0
⑥	224, 122	-0.70, 10.23, -1.50	-0.588, 9.952, -1.500	16.0, -2.7, 0.0
⑦	467, 122	1.53, 8.46, -1.00	1.450, 8.123, -1.000	-5.2, -4.0, 0.0
⑧	562, 78	2.10, 7.70, -0.47	2.013, 7.365, -0.470	-4.1, -4.4, 0.0

Note: Error = (compute - surveyed) × 100 / surveyed. (if surveyed ≠ 0)  
 Error = (compute - surveyed) × 100 / computed. (if surveyed = 0)

작아서 상대 오차가 크게 나타난 것이며, 절대 오차는 그리 크지 않은 것을 알 수 있다. 예를 들어 검정점 ⑥에서 상대 오차는 16.0 %로 최대이나, 절대 오차는 0.112 m이다. 이 점의 y 방향 거리가 10.23 m 나 되는 것을 고려한다면, 이 오차는 정확도에 큰 영향을 줄 정도는 아닌 것으로 보인다.

**3.2 현장 적용**

보정된 카메라를 온천천에 적용하였다(Fig. 4). 이 때 카메라는 수표면에서 5.50 m 높이에 위치하였다. 따라서, Eqs. (34)~(35)에서 수면은 z = -5.50 m로 생각할 수 있다. 평면 측량 결과의 검증에 위해 대상 지역 일대를 평면 측량하였다. 평면 측량은 소키아사의 Set 2010 광과기를 이용하였다.

그 결과 하폭은 9.90 m 였으며, Fig. 5의 참조점 ①~

⑤의 위치는 Table 3과 같다. Table 3에서 계산된 참조점의 (x,y) 좌표는 모두 원래 카메라의 위치를 (0.00, 0.00, 0.00)으로 설정하고 계산되었다. 그러나, 평판 측량의 측량 좌표는 Fig. 4의 참조점 ①을 기준으로 설정되었다. 즉, Fig.4의 참조점 ①의 (x,y)좌표가 (0.00, 0.00)이므로, 서로 비교하기 위하여, 계산된 좌표 ①를 원점으로 평행 이동시킨 뒤, ①과 ③을 연결한 선이 수평축이 되도록 회전시킨 것이다. Table 3에서 알 수 있듯이, 평면 좌표 계산 결과는 대부분 0.10 m 내외의 오차를 보이며, 최대 오차는 ⑥점의 거리 측정에서 0.36 m의 오차가 발생한 것이다. 사실 이 정도의 오차는 영상에서 한 두 화소의 거리에 해당하며, 실제 영상 유속계의 적용에는 별 영향을 미치지 않을 정도의 오차이다. 따라서 실제 SIV의 적용에 전혀 무리가 없는 정도의 오차이다.

**Table 3. Application of the Method to a Site**

No.	Image coord. (pixel)	Physical coordinate (m)		
		Surveyed	Computed	Relative Error (%)
①	214, 459	0.00, 0.00, -5.50	0.00, 0.00, -5.50	0.0, 0.0, 0.0
②	329, 420	1.66, 0.22, -5.50	1.60, 0.18, -5.50	-3.6, -18.2, 0.0
③	559, 372	5.20, 0.00, -5.50	5.31, 0.00, -5.50	2.1, 0.0, 0.0
④	404, 169	11.80, 9.90, -5.50	11.78, 10.18, -5.50	-0.2, 2.8, 0.0
⑤	23, 203	2.00, 9.90, -5.50	2.02, 10.21, -5.50	1.0, 3.1, 0.0
⑥	126, 193	4.10, 9.90, -5.50	4.28, 10.26, -5.50	4.4, 3.6, 0.0
⑦	251, 233	5.00, 6.60, -5.50	5.10, 6.88, -5.50	2.0, 4.2, 0.0

Note 1) The computed physical coordinates of all the points were translated and rotated to compare the surveyed ones.

Note 2) Error = (compute - surveyed) × 100 / surveyed. (if surveyed ≠ 0)  
 Error = (compute - surveyed) × 100 / computed. (if surveyed = 0)

### 3.3 표면영상유속계의 적용

위의 결과를 SIV에 직접 적용하여 유속을 측정하였다. 유속 측정 결과는 Fig. 5 및 Table 4와 같다. SIV의 검정을 위해 프로펠러 미속계(APM사의 Model 3000 휴대용 유량계)로 유속을 측정하였다. 이 유속계의 측정 범위는 0.03~7.5 m/s이다. 현장 적용을 하였을 때, 온천천의 수심은 약 0.1 m 내외이므로, 도섭을 하여 수심의 0.6 배 높이에서 측정선마다 일점법으로 측정을 하였다. Table 4는 미속계에 의한 유속 측정 결과와 SIV에 의한 유속 측정 결과를 보여 주고 있다.

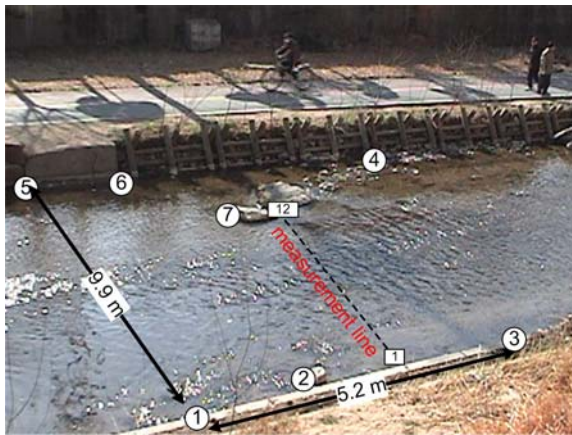


Fig. 4. Image of Application Site

지점에 따라 약간의 차이는 있으나 대체적으로 측정된 유속 분포는 매우 유사한 결과를 보여 주고 있다. 대체적으로는 SIV에 의한 측정 유속이 약간의 차이를 보이고 있는데, 이것은 미속계로는 0.6 수심 깊이의 평균 유속을 측정하였으나, SIV는 표면 유속을 측정했기 때문으로 보인다. 유량으로 환산한 결과 미속계의 경우 0.202 m<sup>3</sup>/s, SIV의 경우 0.209 m<sup>3</sup>/s으로 나타났다. 실제, 온천천은 자연형 하천 사업의 일환으로 낙동강의 물금 취수장에서 약 0.20 m<sup>3</sup>/s의 물을 양수하여 상류에서 방류하고 있다. 따라서, 측정된 결과들은 매우 만족스러운 것으로 보인다.



Fig. 5. Velocity field measured with SIV

Table 4. Velocity and Discharge Measured with Propeller Velocimeter and Surface Image Velocimetry

No.	Dist. from right bank (m)	Velocity (m/s)	
		propeller velocimeter	SIV
1	0.5	0.000	0.023
2	1.0	-	0.165
3	1.5	0.393	0.123
4	2.0	-	0.378
5	2.5	0.534	0.511
6	3.0	-	0.423
7	3.5	0.477	0.434
8	4.0	-	0.525
9	4.5	0.599	0.575
10	5.0	-	0.451
11	5.5	0.244	0.250
12	6.0	-	0.085
Discharge (m <sup>3</sup> /s)		0.202	0.209

다만, 본 연구의 주안점은 보정된 카메라를 이용하여 하천 평면의 좌표를 얻는 것이며, SIV의 정확도에 대한 것이 아니다. 따라서, 다양한 상황에 대한 검증은 시행하지 않았다. SIV의 정확도를 검증하기 위해, 다양한 상황에 대한 SIV와 프로펠러 유속계의 측정결과를 비교한 연구로는 노영신 (2005)와 김서준 (2007) 등이 있으며, 이 연구들을 통해 SIV 자체의 정확성은 입증된 것으로 볼 수 있기 때문이다. 예를 들어 노영신 (2005)의 연구에 따르면 SIV를 실험실에서 적용했을 때 유속 측정의 최대 오차는 약 7 % 정도이고, 현장 적용시 유량 환산 오차는 약 10 % 정도인 것으로 나타났다.

### 4. 요약 및 결론

표면영상유속계는 홍수 때에 하천의 표면 유속을 측정하는 매우 간편하고 효율적인 장비이다. 그러나, 이 장비는 유속을 추정하기 위해 반드시 하천 주변의 몇



개의 참조점의 평면 좌표를 필요로 한다.

본 연구는 보정된 카메라를 이용하여 실세계의 평면 좌표를 추정하는 방법을 개발하는 것이다. 즉, 실험실이나 실내 등 카메라의 보정이 용이한 상황에서 보정을 하고, 이 카메라를 현장에 그대로 적용하여 하천 현장의 평면 좌표를 구하는 방법이다. 이처럼 보정된 카메라를 이용한 간단한 측량에 대해서는 컴퓨터 비전 등의 분야에서는 시도된 바 있으나, 이를 영상유속계에 활용하는 것은 아직 아무도 시도해보지 않은 분야이다.

카메라의 보정을 위해 가장 일반적인 카메라 모형과 역사영 변환에 대해 6개 이상의 관측점을 사용하도록 하였다. 이렇게 보정된 카메라 모형에 높이에 대한 정보를 추가하여, 별도의 평면 측량없이도 하천에서 평면 좌표를 측정할 수 있도록 하였다. 이 방법을 이용하면, 번거로운 평면 측량 과정이 생략되기 때문에 유속장을 추정하는 과정을 자동화할 수 있다.

개발된 방법을 실제 하천에 적용해 본 결과, 오차를 무시할 수 있을 정도임을 입증하였다. 평면 측량 오차는 평균적으로 0.2 m 내외였으며, 최대 0.4 m 이하로, 영상 좌표에서 보면 1~2 화소 정도의 크기이다. 따라서 실제 표면영상유속계의 적용에 전혀 무리가 없는 정도의 오차이다.

또한, 이 방법을 적용하여 표면 유속을 산정한 결과, 과정이 대폭 생략되므로, 유속 측정 작업의 효율을 높일 수 있었으며, 산정 결과도 매우 만족스럽게 나타났다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

김서준, 윤병만, 류권규, 주용우 (2007). "LSPIV기법을 이용한 탄천(대곡교) 유량측정" **한국수자원학회 학술발표대회**, 한국수자원학회, p. 205.

김서준 (2008). **표면영상유속계를 이용한 유량측정기법의 정확도 분석**, 명지대학교 석사학위논문.

노영신, 윤병만, 김영근, 유권규 (2002). "개수로 실험장치를 이용한 LSPIV기법의 검증." **한국수자원학회 학술발표회**, 한국수자원학회, pp. 982-988

노영신, 김영근, 윤병만 (2004). "LSPIV를 이용한 표면 유속 측정기법의 검증 및 적용." **수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제2호, pp. 155-161.

노영신 (2005). **영상해석 기술을 이용한 하천 유량 측정 기법 개발**, 명지대학교 박사학위논문.

여홍구, 노영신, 강준구, 김성중 (2006). "단일수계 설치에 따른 흐름중심선과 흐름분리영역의 변화." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제4호, pp. 313-320.

Ballard, D. H. and C. M. Brown (1982). *Computer vision*, Prentice Hall.

Corrochano, E. B., ed. (2005). *Hanbook of geometric computing, applications in pattern recognition, computer vision, neural computing and robotics*, 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 Journal*, Vol. 26, No. 2. pp. 97-112.

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.

Fujita, I., and Komura, S. (1994). "Application of video image analysis for measurements of river surface flows." *Proceedings of Hydraulic Engineering, JSCE*, 38, pp. 733-738.(in Japanese).

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.

Kinoshita, R. (1984). "Present status and future prospects of river flow analysis by aerial photography." *Proceedings of JSCE*, NO. 345/II-1, pp. 1-19. (in Japanese)

Raffel, M., Willert, C.E., and Kompenhans, J. (1998). *Particle image velocimetry, a practical guide*, Springer.

Vernon, D. (1991). *Machine vision: automated visual inspection and robot vision*, Prentice Hall.

(논문번호:08-44/접수:2008.03.20/심사완료:2008.05.06)