Ecology and Resilient Infrastructure (2021) 8(2): 88-96
https://doi.org/10.17820/eri.2021.8.2.088

http://www.kseie.or.kr/
Online ISSN: 2288-8527

ORIGINAL ARTICLE

하천 표면영상유속 측정을 위한 경사영상 왜곡 보정 기술 개발

Development of Distortion Correction Technique in Tilted Image for River Surface Velocity Measurement

김희정[1] · 이준형[2] · 윤병만[3] · 김서준[4*]

[1]평화 엔지니어링 수자원부 사원, [2]명지대학교 토목환경공학과 박사과정, [3]명지대학교 토목환경공학과 교수, [4]주식회사 하이드로셈 부사장

Hee Joung Kim[1], Jun Hyeong Lee[2], Byung Man Yoon[3] and Seo Jun Kim[4*]

[1]Staff, Water resources, Pyunghwa Engineering Consultants, Anyang 13949, Korea
[2]PhD Course, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin 17058, Korea
[3]Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin 17058, Korea
[4]Vice President, Corp. HydroSEM, Yongin 17058, Korea

Received 18 December 2020, revised 22 December 2020, accepted 22 December 2020, published online 30 June 2021

ABSTRACT: In surface image velocimetry, a wide area of a river is photographed at an angle to measure its velocity, inevitably causing image distortion. Although a distorted image can be corrected into an orthogonal image by using 2D projective coordinate transformation and considering reference points on the same plane as the water surface, this method is limited by the uncertainty of changes in the water level in the event of a flood. Therefore, in this study, we developed a tilt image correction technique that corrects distortions in oblique images without resetting the reference points while coping with changes in the water level using the geometric relationship between the coordinates of the reference points set at a high position the camera, and the vertical distance between the water surface and the camera. Furthermore, we developed a distortion correction method to verify the corrected image, wherein we conducted a full-scale river experiment to verify the reference point transformation equation and measure the surface velocity. Based on the verification results, the proposed tilt image correction method was found to be over 97% accurate, whereas the experiment result of the surface velocity differed by approximately 4% as compared to the results calculated using the proposed method, thereby indicating high accuracy. Application of the proposed method to an image-based fixed automatic discharge measurement system can improve the accuracy of discharge measurement in the event of a flood when the water level changes rapidly.

KEYWORDS: 2-D projective coordinate transformation, Correcting image distortion, Reference points, Surface Image Velocimetry, Water level

요 약: 표면영상유속계를 이용한 유속 측정 시 하천의 넓은 영역을 경사지게 촬영하기 때문에 필연적으로 영상 왜곡이 발생하게 된다. 이와 같이 경사영상을 정사영상으로 변환하는 방법으로 수표면과 동일한 평면상의 참조점 좌표를 이용하는 2차원 투영 좌표 변환법을 사용할 경우 홍수 시 수위가 변할 경우 대응이 어렵다는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 수위가 변하더라도 참조점을 재설정할 필요가 없는 경사영상 왜곡 보정 방법을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 기법은 높은 위치에 설정한 참조점의 좌표와 카메라의 좌표, 그리고 카메라의 수표면 사이의 연직거리 간의 기하학적인 관계를 이용해 수위 변화에도 대응할 수 있는 경사영상 보정 기법이다. 본 연구에서 개발한 영상 왜곡 보정 방법의 검증을 위해 실규모 하천 실험을 수행하였으며, 참조점 변환식에 대한 검증과 표면유속 측정 결과에 대한 검증을 수행하였다. 검증 결과 개발 기술의 경사영상 보정 정확도는 97%

***Corresponding author:** seojuny@paran.com, ORCID 0000-0002-7415-2993

ⓒ Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.
This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이상을 나타냈고, 유속 검증 결과 개발 기술을 적용하여 산정한 유속을 비교한 결과 약 4% 이내의 차이를 보이는 것으로 나타나 높은 정확도 확보가 가능한 것으로 나타났다. 따라서 개발 기술을 영상 기반의 고정형 자동유량계측 시스템에 적용한다면 수위가 급변하는 홍수 시 유량측정의 정확도를 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

핵심어: 2차원 투영 좌표 변환법, 영상 왜곡 보정, 참조점, 표면영상유속계, 수위

1. 서 론

하천에서 신뢰성 있는 유속 및 유량 측정 자료는 수자원의 효율적인 계획과 관리를 위한 가장 기본적인 자료이다. 유속 및 유량을 측정하기 위해 지금까지는 주로 프로펠러 유속계나 초음파 유속계 또는 봉부자 등을 활용해왔으며, 특히 홍수 시에는 교량에서 봉부자 또는 전자파유속계를 이용하여 유량을 측정하고 있지만 측정 환경이나 측정자에 따라 정확도 차이가 난다는 한계점이 있으며 실제 홍수 시에는 여러 명의 측정자가 현장에 나가서 측정해야하기 때문에 위험성이 높다는 한계가 있다.

최근 이와 같은 문제들을 해결하기 위한 대안으로 여러 가지 비접촉식 유속 측정법을 이용한 하천 유속 및 유량 측정 방법에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다. 특히 영상을 이용한 비접촉식 유속 측정 방법인 표면영상유속측정법 (LSPIV, Large Scale Particle Image Velocimetry)은 수표면을 촬영한 영상을 분석하여 하천의 표면유속을 측정하는 기법으로, 영상 촬영 장비와 분석 소프트웨어만 있으면 하천의 유속을 손쉽게 측정할 수 있다. 타 유속 측정 장비에 비해 장비 구성과 측정 방식이 매우 간단하기 때문에 경제적이고 신속한 유속 측정이 가능하며 비접촉식 유속 측정 방법이므로 안전하며 흐름 영역의 유속장을 동시에 측정할 수 있어 급변하는 유속 변화를 정확히 측정할 수 있다는 장점이 있다 (Kim et al. 2011). 표면영상유속측정법은 1990대 중반에 일본에서 처음으로 개발되어 하천 유속 측정에 적용되었다 (Fujita and Komura 1994, Aya et al. 1995, Fujita et al. 1997). Fujita and Komura (1994)와 Aya et al. (1995)은 비스듬한 각도로 촬영한 비디오 영상을 분석하기 위한 기법을 개발하였고, 이를 이용하여 하천 제방에서 획득한 영상을 이용하여 유속장을 계산하였으며, 이를 시작으로 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. 최근에는 CCTV, 헬리콥터 및 드론을 이용하여 촬영한 영상으로 하천의 표면유속을 측정하는 연구들이 진행 중에 있다.

하지만 표면영상유속측정법은 하천의 한 지점이 아닌 넓은 영역을 카메라로 촬영해야 하는데 이러한 특징 때문에 영상 왜곡은 필연적으로 발생한다. 이러한 영상 왜곡을 보정하기 위해 2차원 투영 좌표 변환법을 사용하고 있다. 2차원 투영 좌표 변환법은 수표면과 동일한 평면에 최소 4개의 참조점을 설치하여 영상 왜곡을 보정하는 기법이다. 2차원 투영 좌표 변환식은 4개의 참조점만 있으면 영상 왜곡에 대한 보정을 할 수 있어 간편하지만 참조점이 수표면과 동일한 평면상에 위치하지 않을 경우 유속 분석 결과에 큰 오차가 발생하게 된다. 특히 홍수 시 하천의 수위가 급변할 경우 수위 변화에 맞춰 참조점을 재설정해야 하지만 매 측정 마다 측정자가 하천에 접근하여 참조점을 재설정한다는 것은 현실적으로 불가능한 일이다. 따라서 홍수기에 연속적인 하천 유량 측정을 위해서는 새로운 영상 왜곡 보정 기술이 필요하다. 이를 해결하고자 Fujita and Aya (2000)는 수위 변화를 고려한 3차원 투영 좌표 변환법을 제시하였다. 3차원 투영 좌표 변환법은 수위보다 높은 6개 이상의 참조점과 수표면 상의 임의의 3개 이상의 점을 추가하여, 수위 변화에 따라 영상 왜곡을 보정할 수 있는 방법이다. 하지만 참조점의 배치에 따라 영상 왜곡 정확도가 차이를 보이기 때문에 실제 하천에서 수위 변화 시 영상왜곡 보정 정확도가 떨어지는 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 참조점을 이용한 2차원 투영 좌표 변환법을 그대로 사용하면서 하천의 수위 변화를 고려할 수 있는 간편한 영상 왜곡 보정 방법을 개발하였고, 실규모 하천 수로에서 영상 왜곡 보정 정확도를 검증하고, 유속 측정 결과의 정확도를 평가하였다.

2. 수위 변화를 고려한 2차원 투영 좌표 변환법

2.1 2차원 투영 좌표 변환 기법

표면영상유속측정법은 교량 또는 제방에서 수표면

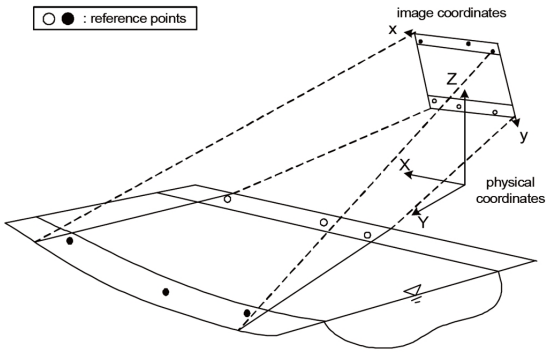


Fig. 1. Reference points on the water surface for image transformation (Fujita et al., 1998).

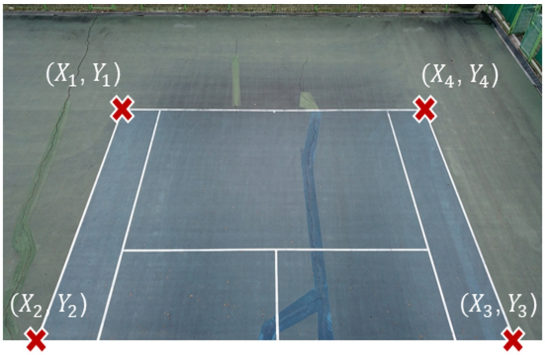
의 영상을 획득하기 때문에 비스듬한 각도로 영상을 촬영하게 된다. 따라서 실제로 동일한 거리일지라도 촬영 각도 및 위치에 따라 영상 내에서는 거리가 달라져 왜곡이 발생한다. 이러한 왜곡을 보정해주기 위해서 영상에 포함된 참조점을 통해 정사영상으로 변환하여 표면유속을 산정한다. 이와 같은 영상 왜곡은 Fig. 1과 같이 수면과 같은 평면에 최소 4개의 참조점을 설치하고, 4개의 실제 물리좌표를 측량하여 Eq. 1과 같이 2차원 투영 좌표 변환식으로 영상 왜곡을 보정한다.

$$X=\frac{b_1x+b_2y+b_3}{b_4x+b_5y+1} \qquad Y=\frac{b_6x+b_7y+b_8}{b_4x+b_5y+1} \quad \text{(Eq. 1)}$$

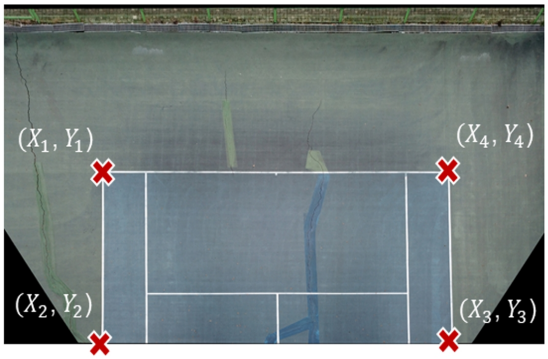
여기서, X, Y는 실제 물리좌표이고 x, y는 영상좌표이다. 또, b_i (i =1,2,...,8)는 회전 보정, 병진이동 보정, (x, y)좌표에 대한 직각보정과 평행하지 않은 두 좌표계간의 좌표보정을 위한 8개의 맵핑 계수이다. 즉, 8개의 미지수를 갖기 때문에 이론상 4개의 참조점의 실제 물리좌표가 필요하다. 미지수는 이미 알고 있는 실제 물리좌표계의 N개의 참조점 (X_1, Y_1), ⋯ ,(X_N, Y_N)과 이에 대응하는 영상 좌표계의 N개의 점 (x_1, y_1), ... ,(x_N, y_N)을 이용하여 최소자승법에 의해 결정된다. 이렇게 4개 이상의 참조점으로부터 8개의 미지수가 결정되면 Eq. 1을 이용하여 수표면의 추적자 변위를 계산하게 된다. Fig. 2 (a)는 테니스장의 왜곡 영상이고, Fig. 2 (b)는 2차원 투영 좌표 변환을 이용하여 보정한 영상이다.

2.2 수위 변화를 고려한 영상 왜곡 보정 기법

수위 변화를 고려한 새로운 영상 왜곡 보정 방법은



(a) Distorted image before transformation



(b) Corrected image after transformation

Fig. 2. Distorted and corrected images of the river.

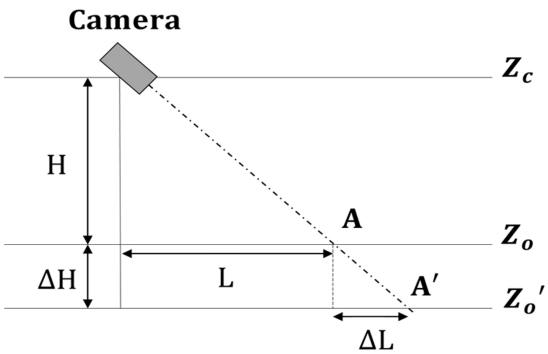


Fig. 3. Reference point movement as per changes in the water level.

참조점이 수위보다 높게 설정될 경우, 즉 제방 상단에 설정된 참조점을 수표면과 동일한 평면에 위치시키는 방법으로 카메라와 수표면 사이의 거리를 이용하여 수표면과 동일 평면의 가상의 참조점 좌표를 구한 후 기존의 2차원 투영 좌표 변환법을 이용하여 왜곡 영상을 보정하도록 한다.

제방 상단에 설정된 참조점을 수표면과 동일한 평면에 위치시키는 방법을 구체적으로 설명하면 Fig. 3과

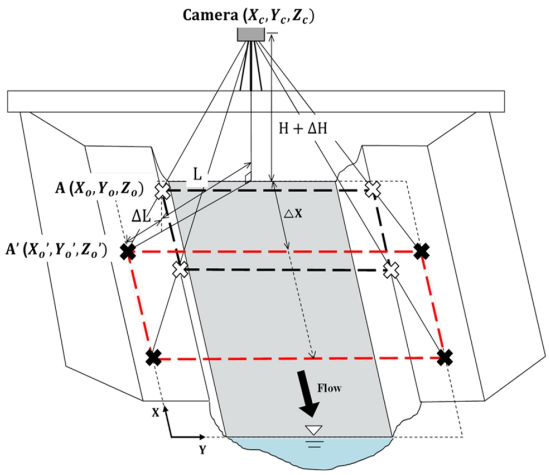


Fig. 4. Correction method for the reference point as per changes in the water level.

같이 수표면의 높이가 Z_0일 때 카메라로 하천의 참조점 (A)을 촬영한 영상 좌표와 수표면의 높이가 Z_0'일 때 카메라로 하천의 참조점 (A′)을 촬영한 영상 좌표는 동일하다. 즉, 카메라와 수표면의 거리 H에 설치한 참조점 (A)은 수위가 변하여 카메라와 수표면의 거리가 H + △H가 되었을 때는 하천의 참조점 (A′)으로 투영된다. 이와 같은 원리를 이용하여 수위가 변하더라도 미리 측량한 참조점 (A)을 이용하여 가상의 참조점 (A′)을 구할 수 있다.

실제 하천을 대상으로 적용하기 위해서는 Fig. 4와 같이 참조점 (A)을 제방 상단에 설치하고 참조점과 하천의 유속측정 영역이 모두 영상에 담기도록 카메라를 설치한다. 참조점 좌표 보정식은 제방 상단에 설정된 최소 4개의 참조점의 실제좌표 (X_0, Y_0, Z_0)와 카메라의 좌표 (X_c, Y_c, Z_c), 그리고 카메라와 수표면 사이의 연직거리 (H+△H)를 이용해 간편하게 구할 수 있다.

참조점 좌표 보정식의 이해를 돕고자, Fig. 4에서 제방 상단에 설정된 4개의 참조점 중 하나의 참조점만을 대상으로 참조점 좌표 보정식을 적용하면 다음과 같다. 카메라의 좌표는 (X_c, Y_c, Z_c)로 측량한 값이며, 그 중 Z 좌표인 Z_c는 수표면을 기준으로 카메라까지의 연직거리 H+△H이다. 제방 상단에 설정된 참조점은 기존 참조점이고, 기존 참조점의 실제좌표는 A (X_0, Y_0, Z_0)에 해당한다. 참조점이 수표면과 동일한 평면에 위치하도록 참조점 좌표 보정식을 이용해 보정한 가상의 참조점은 Fig. 4에서 A′ (X_0', Y_0', Z_0')에 해당한다. 이때 제방 상단에 설정된 기존 참조점 A와 보정된 참조점 A′은 영상 내에서 같은 점이다. 왜냐하면 카메라와 기존 참조점, 보정된 참조점은 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 일직선을 이루기 때문이다. Eq. 2의 L은 카메라와 기존 참조점 사이의 (X, Y)평면상 거리를 의미하고 Eq. 4의 △L은 기존 참조점과 보정된 참조점 사이의 (X, Y)평면상 거리이다. 이와 같이 기존 참조점의 실제좌표 A (X_0, Y_0, Z_0), 카메라의 좌표 (X_c, Y_c, Z_c) 및 카메라와 수표면 사이의 거리 (H+△H)의 기하학적인 관계를 이용하여 기존 참조점을 수표면과 동일한 평면에 위치하도록 보정한다. 보정된 참조점 A′ (X_0', Y_0', Z_0')의 X, Y좌표는 다음 Eqs. 5 and Eq. 6과 같다.

$$L = \sqrt{(X_C - X_O)^2 + (Y_C - Y_O)^2} \quad \text{(Eq. 2)}$$

$$(H + \triangle H) : (L + \triangle L) = H : L \quad \text{(Eq. 3)}$$

$$(L + \triangle L) = \frac{(H + \triangle H)}{H} L \quad \text{(Eq. 4)}$$

$$X_O' = X_C + (L + \triangle L)\frac{(X_O - X_C)}{L} = X_C + \frac{H + \triangle H}{H}(X_O - X_C) \quad \text{(Eq. 5)}$$

$$Y_O' = Y_C + (L + \triangle L)\frac{(Y_O - Y_C)}{L} = Y_C + \frac{H + \triangle H}{H}(Y_O - Y_C) \quad \text{(Eq. 6)}$$

이와 같이 제방 상단에 설정된 기존 참조점 (A)과 보정된 참조점 (A')은 영상 내에서 같은 점이다. 따라서 수위가 만큼 변하게 될 경우 2차원 투영 좌표 변환법에 기존 참조점 (A)의 영상좌표를 이용하고, 수표면 상의 가상의 참조점 (A')의 물리좌표를 이용하여 영상 왜곡 보정을 실시한다.

3. 실험 방법 및 결과 분석

3.1 실험 방법

본 연구에서는 2가지 실험을 통해 개선된 영상 왜곡 보정 방법의 검증을 수행하였다. 첫째, 수표면과 동일 높이에 있는 참조점을 이용한 2차원 투영 좌표 변환법

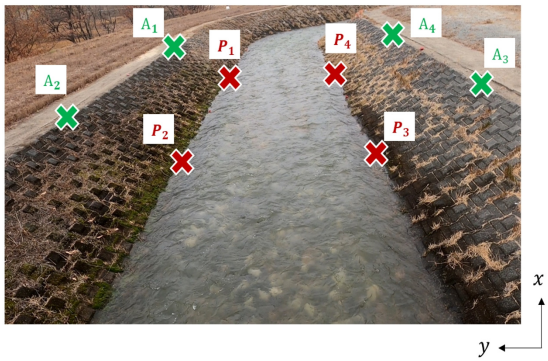


Fig. 5. Reference points considered in the experimental channel.

과 본 연구에서 개발한 참조점 변환식을 이용한 2차원 투영 좌표 변환법으로 각각 왜곡된 영상을 보정하고, 측량한 참조점의 좌표 비교를 통해 검증을 수행하였다. 둘째, 두 가지 방법으로 영상을 보정한 후 표면유속 측정 결과를 비교하였다.

참조점 좌표 비교 실험은 다음과 같이 진행하였다. 먼저, 하천실험센터 급경사수로 (A1)에 Fig. 5와 같이 수표면과 동일한 평면에 4개의 참조점 (P_1, P_2, P_3, P_4)을 설치하고, 제방에도 똑같이 4개의 참조점 (A_1, A_2, A_3, A_4)을 설치하였다. 그 후 참조점이 설치된 상류에 위치한 교량에서 8개의 참조점이 모두 영상에 담기도록 카메라를 설치하고, 카메라의 위치와 참조점의 위치를 측량하였다. 측량 결과는 카메라의 (x, y)평면 상의 위치를 (0, 0)으로 하여 Table 1에 정리하였다.

그 다음 수로 바닥보다 위에 설치한 참조점 (A_1, A_2, A_3, A_4)을 이용하여 기존 2차원 투영 좌표 변환법과 본 연구에서 개발한 새로운 2차원 투영 좌표 변환법으로 영상 왜곡을 보정하였다. 마지막으로 수로 바닥에 설치한 참조점 (P_1, P_2, P_3, P_4)의 물리좌표를 각각 계산하여 비교를 수행하였다.

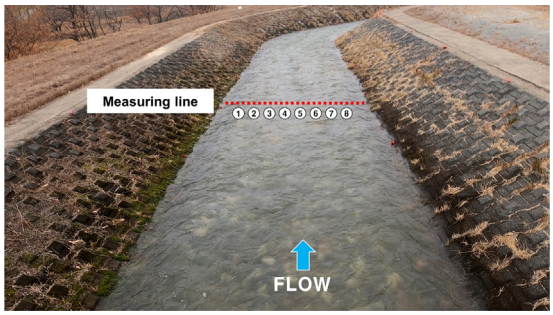


Fig. 6. Crossline for measuring the surface velocity.

표면유속 측정 실험을 위해 앞선 실험과 마찬가지로 8개의 참조점이 모두 영상에 담기도록 카메라를 설치하였다. 그리고 기존 2차원 투영 좌표 변환법으로 제방에 있는 참조점을 이용하여 왜곡을 보정한 영상, 새로운 2차원 투영 좌표 변환법으로 제방에 있는 참조점을 이용하여 왜곡을 보정한 영상, 수표면에 있는 참조점을 이용하여 왜곡을 보정한 영상을 이용하여 표면유속을 산정하고 비교하였다. Fig. 6과 같이 참조점 내부 영역에 유속 산정 측선을 정하였다.

3.2 영상 좌표 변환 결과

본 연구에서 개발한 개선된 영상 왜곡 보정 방법의 검증을 위한 실규모 하천 실험에서는 기존 2차원 투영 좌표 변환법과 본 연구에서 개발한 새로운 2차원 투영 좌표 변환법으로 각각 왜곡된 영상을 보정하고, 기측량한 참조점의 좌표 비교를 통해 검증을 수행하였다. 그리고 참조점의 좌표를 이용하여 참조점 사이의 거리를

Table 1. Image & physical coordinates of the reference points and the camera

		Image coordinate (pixel)	Physical coordinate (m)
Reference points	P_1	(1157, 354)	(16.36, 2.69, -0.02)
	P_2	(899, 747)	(8.37, 2.93, 0.07)
	P_3	(1926, 677)	(8.33, -1.82, 0.06)
	P_4	(1736, 297)	(16.25, -2.03, 0)
	A_1	(832, 228)	(16.40, 5.09, 1.23)
	A_2	(329, 525)	(8.50, 5.20, 1.25)
	A_3	(2492, 370)	(8.29, -4.04, 1.25)
	A_4	(2019, 129)	(16.25, -4.19, 1.14)
Camera		-	(0, 0, 3.56)

Table 2. Comparison of the physical coordinates of the reference points

		Surveyed physical coordinate (m)		Calculated physical coordinate (m)		Difference (m)	
		x	y	x	y	x	y
Conventional 2-D projection coordinate transformation	P_1	16.36	2.69	10.66	1.75	5.70	0.94
	P_2	8.37	2.93	5.45	1.90	2.89	1.03
	P_3	8.33	-1.82	5.42	-1.14	2.91	-0.68
	P_4	16.25	-2.03	10.83	-1.32	5.42	-0.71
Improved 2-D projection coordinate transformation	A_1	16.36	2.69	16.17	2.41	0.19	0.28
	A_2	8.37	2.93	8.31	2.55	0.06	0.38
	A_3	8.33	-1.82	8.44	-2.07	-0.11	0.25
	A_4	16.25	-2.03	16.43	-2.23	-0.18	0.20

Table 3. Comparison of the distance between each reference point

		Calculated distance (m)	Surveyed distance (m)	Accuracy (%)
Conventional 2-D projection coordinate transformation	P_1-P_2	5.18	7.99	64.83
	P_2-P_3	3.04	4.75	64.01
	P_3-P_4	5.41	7.92	68.32
	P_4-P_1	3.07	4.72	65.12
Improved 2-D projection coordinate transformation	P_1-P_2	7.86	7.99	98.34
	P_2-P_3	4.62	4.75	97.30
	P_3-P_4	7.99	7.92	99.13
	P_4-P_1	4.65	4.72	98.43

계산하고 이를 기측량한 참조점 사이의 거리와 비교하였다. Table 2에는 참조점 (A_1, A_2, A_3, A_4)를 이용하여 기존 2차원 투영 좌표 변환법과 개선된 2차원 투영 좌표 변환법으로 각각 영상 왜곡 보정을 수행한 뒤, 참조점 (P_1, P_2, P_3, P_4)의 물리좌표를 각각 계산한 결과를 정리하였다. Table 3에는 각각의 방법으로 구한 참조점 (P_1, P_2, P_3, P_4)의 물리좌표를 이용하여 참조점 사이의 거리를 계산하여 정리하였다. 또한 참조점 사이의 거리는 기측량된 값을 참으로 보고 정확도를 평가하였다.

영상 왜곡보정이 정확히 이루어졌다면, 2차원 투영 좌표 변환식을 이용해 구한 참조점의 물리좌표와 측량한 물리좌표가 같아야 한다. 하지만 Table 2에서 보는 바와 같이 기존 2차원 투영 좌표 변환식을 이용해 구한 물리좌표는 측량한 실제 좌표와 확연히 다른 값으로 산정됨을 알 수 있다. 이는 Table 3에서 보는 바와 같이 거리 측정에도 큰 오차를 유발하게 되며 기측량한 참조점 사이의 거리에 비해 약 65%의 정확도를 보인다. 이렇게 산정된 물리좌표의 오차는 유속 측정에도 영향을 미쳐 유속도 마찬가지로 오차를 유발하게 된다.

하지만 Table 2에서 보는 바와 같이 본 연구에서 개발한 개선된 영상 왜곡 보정 방법을 이용하여 구한 참조점의 물리좌표와 측량한 물리좌표는 거의 같음을 알 수 있다. Table 3에서 보면 개선된 2차원 투영 좌표 변환법을 이용하여 구한 참조점 사이의 거리는 기측량한 참조점 사이의 거리와 비교하였을 때 98% 이상의 정확도를 보인다. 이는 영상 좌표를 특정하는 과정에서 발생하는 오차를 감안하면 아주 정확하게 영상 왜곡을 보정한다고 판단된다.

결론적으로, 수위보다 높게 설정한 참조점을 이용하여 영상 왜곡을 보정할 경우 영상 왜곡 보정 결과에 오차를 유발시켜 참조점은 수표면과 항상 동일한 평면 상에 위치하도록 설정해야 하지만 본 연구를 통해 개선된 2차원 투영 좌표 변환법을 사용하면 수표면보다 위에 있는 참조점을 이용하여도 정확하게 영상 왜곡 보정을 수행할 수 있다.

3.3 유속 산정 결과 비교

본 연구에서 개발한 개선된 영상 왜곡 보정 방법의 검증을 위해 안동 하천실험센터의 급경사수로(A1)에서 실험을 실시하였다. 안동 하천실험센터의 실험 하천은 소하천 규모의 자연하천과 유사하며 흐름의 통제가 가능하다는 장점이 있다. 안동 하천실험센터에서의 실험에서는 기존 2차원 투영 좌표 변환법과 본 연구에서 개발한 새로운 2차원 투영 좌표 변환법으로 각각 왜곡된 영상을 보정하여 실험수로의 표면유속을 측정하고, 수표면과 동일 평면에 존재하는 참조점으로 영상 보정 및 영상 분석을 수행한 표면영상유속계의 유속 측정 결과와 비교하였다. 또한 접촉식 초음파유속계인 Flow-Tracker를 이용하여 실측한 유속과도 비교하였다. 표면영상유속계를 이용한 유속 산정 결과를 비교할 때에는 각별히 주의해야 하는데, 영상 내의 측선 위치나 상관영역 및 탐색영역의 크기 등 유속 산정 결과에 영향을 미치는 다양한 요인이 존재하기 때문이다. 따라서, 유속을 산정하는 측선은 참조점 내부에 있는 영역으로 선정하였으며 상관영역 및 탐색영역의 크기는 모두 같은 조건으로 분석을 수행하였다. 유속 비교는 흐름방향의 유속만을 수행하였으며 분석 결과 유속벡터는 Fig. 7과 같이 나왔으며 측점별 유속은 Table 4에 정리하였다.

유속 산정 결과, 제방에 설치한 참조점을 이용하여 기존 2차원 투영 좌표 변환법으로 영상을 보정하여 유속을 산정한 경우 수표면과 동일 평면에 존재하는 참조점을 이용하여 영상을 보정하고 유속을 산정한 경우보다 평균 33% 정도 작게 산정됨을 확인하였다. 이는 수표면보다 위에 설치된 참조점을 사용하여 영상 보정을 수행하였기 때문에 영상 내 화소당 물리거리가 실제 수표면보다 작게 계산되어 유속 산정 결과로까지 이어져 유속이 작게 산정된 것으로 판단된다.

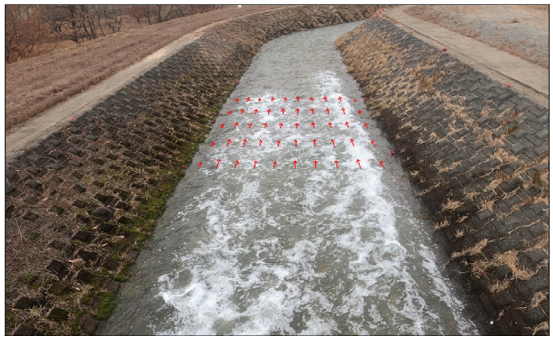


Fig. 7. Velocity field of the experimental channel.

반면에 제방에 설치한 참조점을 이용하되 개선된 영상 왜곡 보정 방법을 사용하여 영상을 보정하여 유속을 산정한 경우 수표면과 동일 평면에 존재하는 참조점을 이용하여 영상을 보정하고 유속을 산정한 경우와 비교하였을 때 1 m/s 이상의 유속에서는 4% 이내의 차이를 보여 정확도가 크게 개선되었음을 확인하였다. 또한 초음파유속계를 이용하여 측정한 유속과 비교하였을 때에도 1m/s 이상의 유속에서 5% 이내의 차이를 보여 정확도가 크게 개선되었음을 확인하였다.

결론적으로, 수위보다 높게 설정한 참조점을 이용하여 영상 왜곡을 보정할 경우 영상 왜곡 보정 결과에 오차를 유발시키며 유속을 과소산정하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 하지만 개선된 2차원 투영 좌표 변환

Table 4. Comparison of the surface velocity in each method

NO	Conventional 2-D projection coordinate transformation (m/s)	Improved 2-D projection coordinate transformation (m/s)	LSPIV (m/s)	Flow Tracker (m/s)	Difference with conventional and LSPIV (%)	Difference with improved and LSPIV (%)	Difference with improved and FlowTracker (%)
1	0.854	1.251	1.299	1.302	34.26	3.70	3.91
2	0.739	1.100	1.099	1.087	32.76	0.09	1.24
3	0.775	1.142	1.156	1.191	32.96	1.21	4.09
4	0.856	1.260	1.257	1.292	31.90	0.24	2.47
5	1.021	1.498	1.477	1.436	30.87	1.42	4.31
6	0.884	1.295	1.297	1.272	31.84	0.15	1.82
7	0.929	1.359	1.358	1.356	31.59	0.07	0.24
8	0.930	1.364	1.368	1.314	32.02	0.29	3.82

법을 사용하면 참조점을 수표면과 동일한 평면에 재설치 하는 번거로움 없이 유속 산정 정확도를 크게 개선할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 표면영상유속계를 이용한 하천의 표면유속 측정 시 경사진 영상에서 발생하는 영상 왜곡을 보정하는 2차원 투영 좌표 변환법을 개선하여 수위가 급변하는 상황에서도 별도의 참조점 재설치 없이 간편하게 영상 왜곡을 보정하는 기법을 개발하였다. 또한 본 연구에서 개발한 기법을 좌표를 이용한 거리 산정과 표면유속 산정 실험을 통해 검증하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 기존 표면영상유속측정법의 경사영상 왜곡 보정을 위해 사용하는 2차원 투영 좌표 변환법이 수위 변화를 고려하기 어렵다는 한계를 해결하기 위해 본 연구에서는 4개의 참조점 측량결과와 카메라 좌표 및 카메라와 수표면 사이의 거리를 이용하여 간편하게 수위 변화에 따라 수표면과 동일한 높이에 가상의 참조점 좌표를 계산할 수 있는 기법을 개발하였다.
2) 개발한 개선된 2차원 투영 좌표 변환법은 수표면보다 높은 위치에 설정한 참조점과 카메라의 좌표, 카메라와 수표면 사이의 연직거리 간의 기하학적인 관계를 이용해 수표면보다 높은 위치에 설정한 참조점을 수표면과 동일한 평면상에 위치하도록 보정한다. 이를 통해 수위가 급변하는 상황에서도 별도의 참조점 재설치나 측량 없이 기존에 설치된 참조점을 이용하여 수표면의 표면유속을 측정하는데 발생하는 오차를 줄일 수 있음을 확인하였다.
3) 개선된 2차원 투영 좌표 변환법의 검증을 위해 실규모 하천 수로에서 실험을 실시하였다. 실험수로에 설치한 참조점의 좌표를 이용하여 참조점 사이의 거리를 산정하고 정확도를 평가한 결과 기존의 2차원 투영 좌표 변환법은 정확도가 60% 정도였던 것에 반해 개선된 영상 왜곡 보정 방법의 경우 정확도가 98%로 매우 높게 산정되었다. 안동 하천실험센터의 실규모 하천수로에서 표면유속을 측정한 실험의 경우 수표면에 설치한 참조점을 이용한 표면유속 산정 결과와 비교하였을 때 기존의 2차원 투영 좌표 변환법이 평균 33%의 차이를 보인 반면 개선된 영상 왜곡 보정 방법의 경우 1 m/s 이상의 유속에서는 4% 이내의 차이를 보였으며, 초음파유속계로 측정한 유속과 비교하였을 때 5% 이내의 차이를 보여 정확도가 크게 개선되었음을 확인하였다.

본 연구에서는 표면영상유속계를 이용한 하천의 표면유속 측정 시 경사진 영상에서 발생하는 영상 왜곡 보정 방법을 개선하여 수위가 변하는 상황에서도 간편하고 정확하게 영상 왜곡을 보정하는 기법을 개발하였다. 하지만 본 연구에서 개발한 기법을 사용하려면 하천 제방에 설치된 참조점이 영상에 담기도록 높은 곳에서 촬영하거나 경사지게 촬영하여야 하는데, 이 경우 카메라와 수표면 사이의 거리가 멀어져 측정 불확도가 커지며 경사지게 촬영할 경우 유속 측정 영역이 참조점 내부 영역을 벗어나게 되어 영상 변환 과정에서 오차가 발생할 수 있다. 따라서 향후 카메라와 수표면 사이의 거리에 의한 유속 측정 불확도에 대한 연구와 영상 촬영 각도에 대한 정량적인 기준 제시가 필요할 것으로 판단된다. 이와 같은 점을 보완한다면 향후 홍수 시나 수위가 급변하는 지역에서 표면영상유속계를 적용하는데 있어 본 연구 결과들을 활용하여 표면유속을 정확하고 간편하게 측정하는데 활용될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20DPIW-C153760-02).

References

Aya, S., Fujita, I., and Yagyu, M. 1995. Field-observation of flood in a river by video image analysis." Annual Journal of hydraulic Engineering 39(4): 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 5(4): 301-312.

Fujita, I. and Komura, S. 1994. Application of video image analysis for measurements of river-surface flows. Proc. of Hydraulic Engineering, JSCE 38: 733-738.

Fujita, I., Aya, S., and Deguchi, T. 1997. Surface velocity measurement of river flow using video images of an

oblique angle. Proc., 27th IAHR Congress, Theme B, San Francisco.

Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A. 1998. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic application. Journal of Hydraulic Research, 36(3), 397-414.

Fujita, I. and Aya, S. 2000. Refinement of LSPIV Technique for Monitoring River Surface Flows."Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000.

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 5(4): 323-331.

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 13(2): 105-110.

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 5(4): 263-276.

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, 44(5): 377-388. (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 130(9): 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 5(4): 289-300.

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)