

ORIGINAL ARTICLE

표면영상유속계(SIV)를 이용한 홍수유출량 측정

김용석 · 양성기* · 류권규¹⁾ · 김동수²⁾

제주대학교 토목공학과, ¹⁾동의대학교 토목공학과, ²⁾단국대학교 토목환경공학과

Flood Runoff Measurements using Surface Image Velocimetry

Yong-Seok Kim, Sung-Kee Yang*, Kwon-kyu Yu¹⁾, Dong-su Kim²⁾

Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju-Do 690-756, Korea

¹⁾Department of Civil Engineering, Dong-eui University, Busan 614-714, Korea

²⁾Department of Civil & Env. Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea

Abstract

Surface Image Velocimetry(SIV) is an instrument to measure water surface velocity by using image processing techniques. Since SIV is a non-contact type measurement method, it is very effective and useful to measure water surface velocity for steep mountainous streams, such as streams in Jeju island. In the present study, a surface imaging velocimetry system was used to calculate the flow rate for flood event due to a typhoon. At the same time, two types of electromagnetic surface velocimetries (electromagnetic surface current meter and Kalesto) were used to observe flow velocities and compare the accuracies of each instrument. The comparison showed that for velocity distributions root mean square error(RMSE) was 0.33 and R-squared was 0.72. For discharge measurements, root mean square error(RMSE) reached 6.04 and R-squared did 0.92. It means that surface image velocimetry could be used as an alternative method for electromagnetic surface velocimetries in measuring flood discharge.

Key words : SIV, Kalesto, electromagnetic surface current meter, Doppler radar, Surface velocity

1. 서론

최근 전 세계적인 기상이변이나 집중호우로 인해 과거와는 다른 강수현상과 기록적인 호우가 자주 발생하고 있다. 엘니노 및 라니냐와 같은 기상이변 현상은 북반구 지역의 기록적인 집중호우와 홍수를 유발시키면서 많은 수해피해와 재산피해를 입혔으며, 우리나라도 유례없는 이상기후현상이 다양하게 발생하여 많은 인명 및 재산상의 피해를 입었다. 이와 같은 기록적인 집중호우의 영향에 의한 하천범람 피해와

도시침수 피해를 막고, 수자원 확보 및 효율적인 관리를 위해서는 수자원에 대한 정밀한 관측 및 연구가 수행되어야 한다.

수자원의 효과적인 관리를 위한 하천의 유량측정 자료는 가장 기초적인 수문자료이므로, 정확하고 효율적인 유량측정방법이 필요하다. 기존의 유량측정방법에는 유속계를 이용하여 평수기 때의 유속을 측정하는 유속면적법과 홍수 시 봉부자를 이용한 유속측정방법이 이용되었다. 그러나 이와 같은 접촉식 유속측정방법은 많은 시간과 인력이 요구되며, 측정시간에 따라

Received 12 November, 2012; Revised 8 January, 2013;

Accepted 5 April, 2013

*Corresponding author : Sung-Kee Yang, Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea
Phone: +82-64-754-3451
E-mail: skyang@jeju.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. 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.

오차가 발생하는 문제점이 있다(Kim 등, 2011). 최근에는 접촉식 유속측정방법의 단점을 보완하여 표면영상유속계(SIV, Surface Image Velocimetry)와 전자파 표면유속계(Electromagnetic surface current meter 또는 Doppler radar)와 같은 비접촉식으로 표면의 흐름 속도를 계산하는 방식이 많은 각광을 받고 있다(Yang 등, 2011). 이와 같은 비접촉식 유속측정방법은 제주도 하천의 흐름 특성상 기존 유속측정방법에 비해 안전하고 효과적이며 정확한 유속을 측정할 수 있을 것으로 기대된다.

제주도의 하천은 섬의 중앙부에 1,950 m 높이의 순상화산체인 한라산을 중심으로 원추형 화산의 특징인 방사상 수계를 이루고 있다. 제주도의 강우량은 연평균 약 2,000 mm로서 우리나라 최다우지역이며 육지부와 다른 지질학적 특성으로 인해 전체 143개의 하천 중 6개 하천을 제외한 하천이 평상시에는 물이 흐르지 않는 건천을 이루고 있다. 이와 같이 제주도 하천

의 가장 큰 특징인 건천의 경우는 태풍 또는 집중호우의 영향으로 선행강우량이 80 mm 이상일 경우에만 평균 3~4 m/sec의 돌발성 홍수유출이 발생하며, 1일 미만의 단시간에 유출이 끝나는 특이한 유출현상을 보이고 있다(Yang, 2007).

본 연구에서는 제주도 하천의 유출특성을 고려하여 제주도 북부 중앙부에 위치한 한천의 하류부인 제2동산교에서 홍수발생시 유량관측을 위해 비접촉 유속측정 방식인 표면영상유속계를 이용하여 유량을 산정하였다. 동시에 전자파 표면유속계로 관측한 유량과 비교·분석하여 표면영상유속계의 정확도와 활용성을 모색하였다.

2. 연구재료

한천의 총연장은 11.5 km, 유역면적은 37.39 km², 유역의 평균 폭은 3.25 m이며, 하상은 대부분 거석 및 입

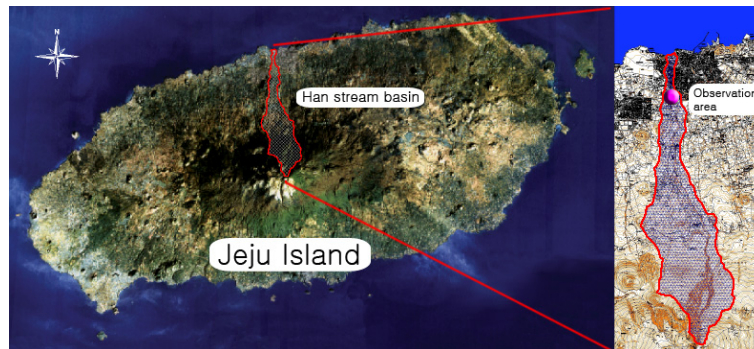


Fig. 1. Location of the study area.



(a) dry season



(b) flood season

Fig. 2. The Han Stream in Jeju island.

도가 큰 자갈로 구성되어 있다. 한천유역은 제주도 북부 중앙부에 위치하며, 한라산 정상부근에서 발원하여 남북 방향으로 흘러 제주시 오라동과 용담동을 거쳐 바다로 유입되고 있다(Fig. 1). 한천의 유로 연장은 비교적 짧고 경사가 급하며, 하상은 투수성이 높은 현무암질로 구성되어 평상시는 건천을 형성하고 있으나, 집중호우 시와 태풍 통과 시 선행강수와 밀접한 관련을 가지면서 유출이 발생하고 있다(Fig. 2). 관측 지점은 한천 하류부에 위치한 제2동산교이며 홍수유출 시 현장조사를 실시하고 유량을 산정하였다.

3. 연구방법

3.1. 표면영상유속계

표면영상유속계의 기본 이론은 캠코더를 이용하여 하천의 수표면의 유동을 촬영하고, 영상을 초당 30프레임으로 분석하여 영상 변위를 구한 다음, 영상과 실상과의 축척 관계를 이용하여 최종적으로 표면 유속을 구하는 방법이다(Kim, 2008). 표면영상분석을 위한 전체적인 분석과정은 Fig.3과 같다.

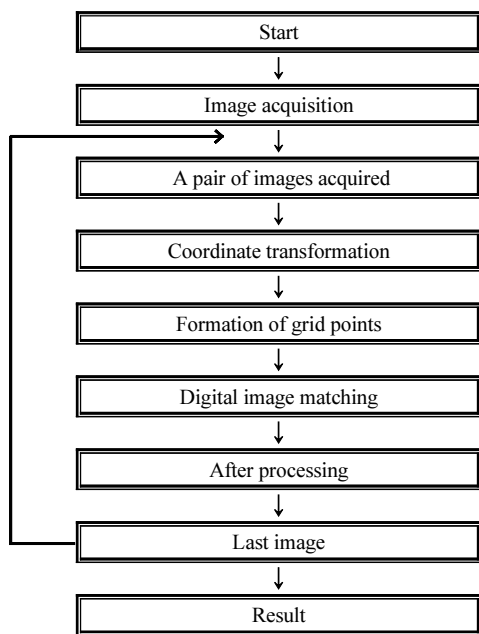


Fig. 3. Analysis procedure of Surface Image Velocimetry (Kim, 2008).

홍수 시 표면영상유속계(SIV)를 이용한 실제 하천의 표면유속 측정과정은 다음과 같다. 먼저 관측 구간에 대해 촬영이 용이한 장소를 정하고, 디지털 카메라나 캠코더를 이용하여 흐름에 대한 연속촬영을 수행한다. 획득된 디지털 영상자료를 사용된 카메라의 초당 프레임 값을 고려하여 이미지로 분할하고, 시간에 따른 각각 한 쌍의 영상을 획득한다.

디지털카메라의 촬영 시 3차원 공간의 실제 흐름을 영상으로 전환할 경우 2차원의 평면 형태로 기록되므로 원근에 따른 영상 왜곡 현상을 보정하여 계산하기 위해 좌표 변환작업을 실시한다. 좌표변환 과정에서 왜곡영상 보정방법은 2차원 투영좌표 변환법(2-D perspective coordinate transformation)이 사용되며, 획득되는 영상에서 최소 4개의 기준점이 필요하나, 오차를 줄이기 위해서는 4개 이상의 기준점을 두는 것이 좋다.

다음 단계로 영상분석 구간에 대해 격자점을 형성하고 영상분석에 의한 유속을 산정한다. 이 때 산정되는 유속벡터는 연속되는 두 영상의 검색영역 내에서 각 입자군의 상관계수를 계산하여 최대 상관계수를 갖는 입자군을 동일 입자군으로 판별하고, 입자군간 도심의 이동거리를 두 영상의 시간간격으로 나누어 유속벡터를 계산한다.

연속되는 두 영상간의 분석을 통해 순간 유속장이 결정되고, 이를 전체 영상에 대해 반복적인 계산을 거치면 분석영상의 수만큼 순간 유속장을 얻을 수 있다. 이런 순간 유속장은 오류벡터를 포함할 수 있으므로, 오류벡터를 보정하는 후처리 작업을 수행하여 오차를 줄여야 한다(Kim, 2008).

3.2. 전자파표면유속계

전자파표면유속계는 도플러 효과(Doppler effect)의 원리를 이용한 장비로 약 10GHz의 극초단파 신호를 수표면에 전송하여 산란되어 반사 수신된 신호를 측정하여 흐름방향의 표면유속을 산출하는 방식이다(Lee와 Julien, 2006). 그리고 측정된 표면유속에 평균 유속 보정계수 0.85를 적용하여 평균유속을 간접 계산하고, 미리 관측된 하천단면자료를 이용하여 유량을 산출한다. 연구에 사용된 이동식 전자파표면유속계는 흐름이 저속유동(약 0.3 m/s 이하)인 경우 관측

정확도가 저하됨을 보고한 바 있으나(Yang 등, 2011), 표면유속이 2~4 m/s의 고유속의 유동인 경우 관측오차가 약 2% 정도로 나타난다고 보고된 바 있다(Lee 등, 1997).

제 2동산교에 설치된 고정식 전자파표면유속계(Kalesto)는 유속과 수위를 동시에 관측할 수 있으며, 관측구간이 하상단면의 중앙 1개 지점에서 표면유속을 계측한다. 단일구간의 유속자료를 이용하므로 계측된 유속이 과소, 또는 과측정되는 경우 유량산정 시 오차를 포함할 수 있다(Yang, 2012). 하지만 건천의 돌발성 홍수유출 시, 기존 접촉식 유속계로 측정이 어려운 경우 효과적으로 측정할 수 있으며, 야간에도 안전하게 측정할 수 있는 장점이 있다.

3.3. 표면영상유속계와 전자파표면유속계를 이용한 유속 및 유량 측정

유속계산시 표면영상유속계의 적용성과 정확도의 비교를 위해 전자파표면유속계의 관측지점과 동일한 지점에서 촬영한 수직영상자료를 이용하였다. 수직영상자료를 이용한 영상 분석방식은 본 연구의 현장조건처럼 교량이 있을 경우 효과적으로 사용할 수 있으며, 별도의 참조점을 필요하지 않는다. 또한 약 5초간의 짧은 영상을 이용하여 표면유속을 계산하므로 현장조건에 따른 오차를 줄이는 장점이 있다(Yang 등 2012).

표면영상유속계(SIV)를 이용한 영상분석은 Fig. 4

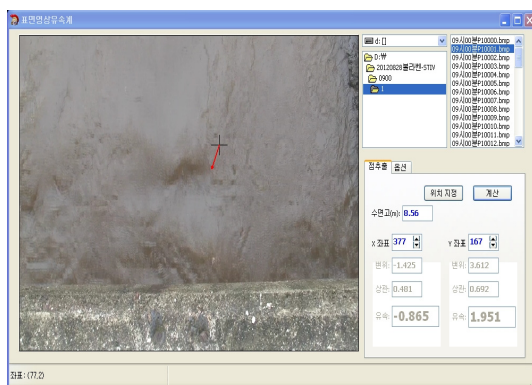
(a)와 같으며, 측정된 유속산정 결과 값은 유량계산이 수월하도록 Excel을 이용하여 산정하였다(Fig. 4 (b)).

Fig. 5는 태풍의 영향으로 유출 발생 시 표면영상유속계와 이동식 전자파표면유속계를 이용한 하천의 유속관측방식을 보여주고 있으며, 교량의 상부에는 고정식 전자파표면유속계(Kalesto)가 설치되어 유속을 관측하고 있음을 확인할 수 있다.

유량 산정을 위한 적용단면은 Fig. 6과 같은 측량자료를 이용하여 면적을 계산하였다. 적용 면적 계산 시 AutoCAD를 이용하였으며, 관측 시간에 따른 수위자료와 정밀 측량된 하천 단면자료를 이용하였다. Fig. 6에서처럼 수위에 따른 적용면적 계산 시 표면영상유속계는 교량 상부에서 수직 관측 단면을 이용하였고, 이동식 전자파표면유속계와 고정식 전자파표면유속계는 관측 각도로 고려하여 관측되는 하상의 단면자료를 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

이 연구에서는 2012년 8월 29일 제 15호 태풍 블라벤의 영향으로 제주도 한천의 제 2동산교에서 유출이 발생했을 때, 비접촉식 유속관측방식인 표면영상유속계(SIV)를 이용하여 유속을 관측하고 유량을 산출하였다. 또한, 표면유속계의 정확도를 비교하기 위해 이동식 전자파유속계와 고정식 전자파표면유속계(Kalesto)에



(a)

측정시간	관측포인트	수면고(m)	STV 유속(m/sec)	평균유속(m/sec)	보정평균유속(m/sec)	수면고에 따른 유출 단면(m ²)	유량(m ³ /sec)
09시00분	1P	6.56	X 좌표 0.955	2.13	1.81	0.71	1.29
			Y 좌표 1.591			2.53	4.59
	2P	X 좌표 0.983	1.82	1.55	3.84	5.94	
		Y 좌표 1.725			4.47	6.92	
		X 좌표 1.678	2.69	2.29	5.82	13.32	
3P	Y 좌표 1.93			5.24	11.99		
	X 좌표 1.15	2.21	1.88	3.81	7.17		
	Y 좌표 1.859			2.53	4.76		
4P	X 좌표 0.922	1.93	1.64	2.74	4.90		
	Y 좌표 1.921			2.50	4.11		
11시00분	1P	8.87	X 좌표 1.215	2.33	1.98	0.16	0.32
			Y 좌표 1.959			1.74	3.45
	2P	X 좌표 0.435	2.01	1.71	3.05	5.22	
		Y 좌표 1.844			3.72	6.28	
		X 좌표 1.996	2.28	1.94	4.59	8.66	
3P	Y 좌표 2.001			4.46	8.63		
	X 좌표 0.008	1.84	1.57	3.02	4.73		
4P	Y 좌표 1.844			1.79	2.81		
	X 좌표 0.245	1.90	1.61	1.92	3.10		
	Y 좌표 1.894			1.50	2.42		
11시30분	1P	9.01	X 좌표 0.936	2.09	1.78	0.05	0.09
			Y 좌표 2.093			1.39	2.47
	2P	X 좌표 1.72	2.65	2.06	2.70	6.09	
		Y 좌표 2.02			3.38	7.62	
		X 좌표 1.969	2.84	2.41	4.61	11.13	
3P	Y 좌표 2.048			4.11	8.93		
	X 좌표 0.099	1.56	1.32	2.67	3.93		
4P	Y 좌표 1.992			1.45	1.92		
	X 좌표 0.198	1.73	1.47	1.54	2.27		
	Y 좌표 1.719			1.08	1.59		

(b)

Fig. 4. Method of surface flow velocity calculation; (a) Surface Image Velocimetry(SIV); (b) Result data of surface flow velocity and discharge.



Fig. 5. Various velocity measurement systems in the study site : (a) Surface Image Velocimetry(SIV); (b) Electromagnetic surface current meter; (c) Kalesto; (d) Staff gauge.

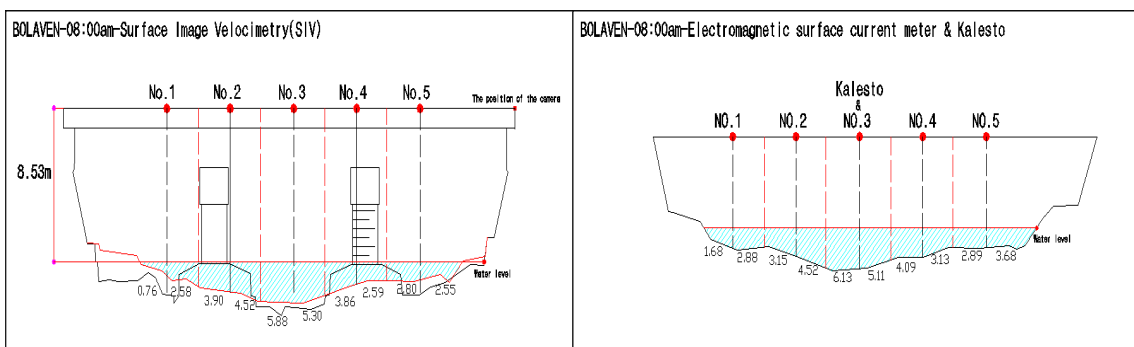


Fig. 6. Cross sectional areas for discharge calculation.

의한 유속과 유량의 자료를 각각 비교·검토하였다.

제 15호 태풍 볼라벤은 2012년 8월 20일 미국의 괌 서쪽 해상에서 발생하여 2012년 8월 28일 새벽 제주도와 남부 지방에 영향을 주었고, 중심기압 986 hPa의 강한 대형급 태풍으로 최대풍속이 65 m/s의 강한 풍속을 동반하였고, 산간지역에는 500 mm이상의 강수량을 기록하였다. 측정시간은 2012년 8월 28일 08시 00분부터 18시 00분까지 30분 간격으로 조사를 실시하였으나, 관측을 실시하는 과정에서 강한 비바람의 영향으로 관측의 위험성을 감안해 오전 시간에는 현장의 상황에 맞춰서 조사를 실시하였다. 이후 태풍의 영향권이 제주도를 벗어나고 현장의 안전성이 보장되면서, 오후 시간에는 30분 간격으로 표면영상유속계와 이동식 전자파표면유속계를 이용한 관측을 실시하였다. 그러나 강한 풍속은 오후 내내 관측에 영향을 주었으며 영상촬영 과정에서 최대한 움직임 없이 고정된 자료를 획득하는 어려움이 있었다. 이와 같은 흔들림에 대한 영향은 획득된 영상 이미지분할 과정에서 분할된 각각 이미지 자료의 연관성을 최대한 고려하여 흔들림 영향을 가장 적게 받은 영상 파일만 추출하

여 표면영상분석을 실시하였다.

각 표면유속계측기기의 유속 값과 적용단면과 유량을 산정한 결과는 Table 1과 같다. Kalesto의 자료는 17시00분부터 유속 값이 결측되는 문제가 발생하여 표면영상유속계와 비교·분석 시 17시00분~18시 00분의 자료는 제외하였다.

08시00시부터 18시00분까지 각각의 비접촉식 유속 측정 기기를 이용하여 측정한 유속을 Fig. 7에 나타내었다. 표면영상유속계(SIV)와 이동식 전자파표면유속계의 유속을 비교한 결과 평균제곱근 오차(RMSE)는 0.33, 결정계수 R^2 은 0.72로 나타났으며, 고정식 전자파표면유속계(Kalesto)는 평균제곱근 오차(RMSE)가 0.22, 결정계수 R^2 은 0.68로 비교되었다(Fig. 8.). 이동식 전자파표면유속계로 유속을 측정한 결과는 시간의 흐름에 따라 큰 변동폭 없이 감소하는 경향을 보였으나, 고정식 전자파표면유속계(Kalesto)의 유속은 수위의 변동이 있는 구간에서 비교적 큰 폭으로 증가하거나 감소하는 경향을 보였다. 표면영상유속계(SIV)의 경우 두 유속계측기기에 비해 약간 높은 유속이 산정되었다. 그 이유는 다음과 같은 두 가지로 추정된다.

Table 1. Measured velocities and calculated flow discharges with various methods

Time	Surface Image Velocimetry			Electromagnetic surface current meter			Kalesto		
	Velocity (m/sec)	Section (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Velocity (m/sec)	Section (m ²)	Discharge (m ³ /sec)	Velocity (m/sec)	Section (m ²)	Discharge (m ³ /sec)
08:00am	2.17	34.77	75.37	2.01	37.26	79.99	1.90	37.26	70.63
09:00am	1.84	34.19	64.60	1.70	26.66	66.19	2.08	26.66	76.34
11:00am	1.76	26.35	46.70	1.29	28.53	39.57	1.66	28.53	47.29
11:30am	1.85	22.98	46.63	1.28	24.88	34.41	1.58	24.88	39.34
12:00pm	1.68	19.47	33.57	1.24	21.05	28.43	1.45	21.05	30.42
13:00pm	1.59	18.32	33.35	1.05	16.73	20.08	1.19	16.73	19.91
13:30pm	1.60	22.50	36.79	1.25	24.35	31.86	1.60	24.35	38.91
14:00pm	1.52	20.55	33.05	1.21	22.23	29.68	1.57	22.23	34.96
14:30pm	1.50	21.17	34.32	1.08	22.90	26.88	1.27	22.90	29.00
15:00pm	1.23	20.58	26.56	1.18	22.26	27.33	1.25	22.26	27.81
15:30pm	1.17	19.88	25.33	1.07	21.52	25.23	1.19	21.52	25.61
16:00pm	1.11	20.79	24.36	1.09	22.48	26.70	1.27	22.48	28.47
16:30pm	1.25	18.58	24.07	1.03	20.05	23.62	1.15	20.05	23.01
17:00pm	1.07	16.25	18.40	0.99	17.50	21.00	-	-	-
17:30pm	1.11	16.54	19.65	0.82	17.86	16.12			
18:00pm	1.24	15.55	19.78	0.90	15.21	13.37			
Total			562.53			510.46			491.69

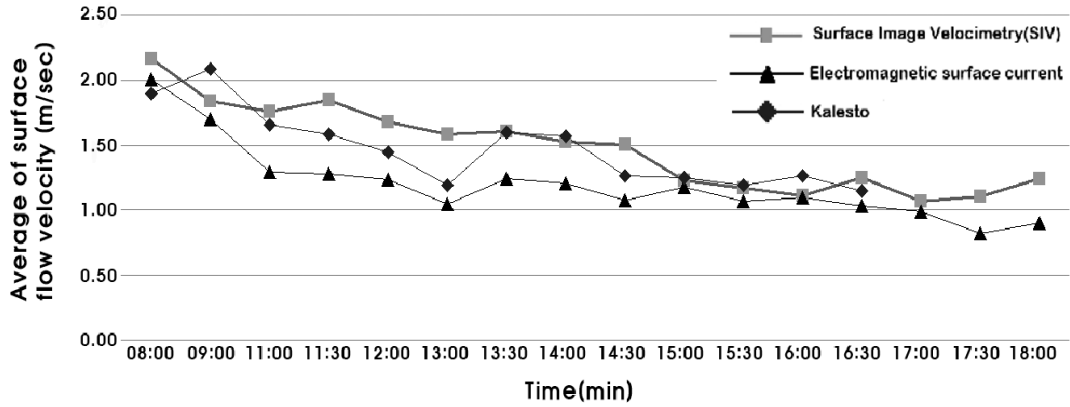


Fig. 7. Comparison of surface velocities.

첫째, 측정 위치가 표면영상유속계는 교량의 상류 쪽 난간 직하류에 가깝지만, 전자파표면영상유속계는 그보다 약간 더 상류에서 측정하기 때문에, 그 영향을 받았을 수 있다. 제2동산교의 경우 교량 직하류가 상당한 낙차를 보이는 강하곡선을 이루기 때문에 교량에 가까울수록 유속이 크게 측정되었을 가능성이 있다.

둘째, 표면영상유속계를 이용하여 유속을 산정하는 과정에서 분석 자료의 획득 시 강력한 바람을 동반

한 태풍(최대 풍속 65 m/s)의 영향으로 화면이 전체적으로 흔들리는 문제와 연관이 있을 수도 있다고 판단된다. 실제 하천의 흐름 상태는 일정하게 흐르고 있지만 영상을 촬영하고 획득하는 과정에서 2차원으로 저장된 화면이 상하로 흔들리는 경우, 입자군간 도심의 이동거리가 실제 흐름보다 과다하게 이동한 것으로 분석되기 때문이다.

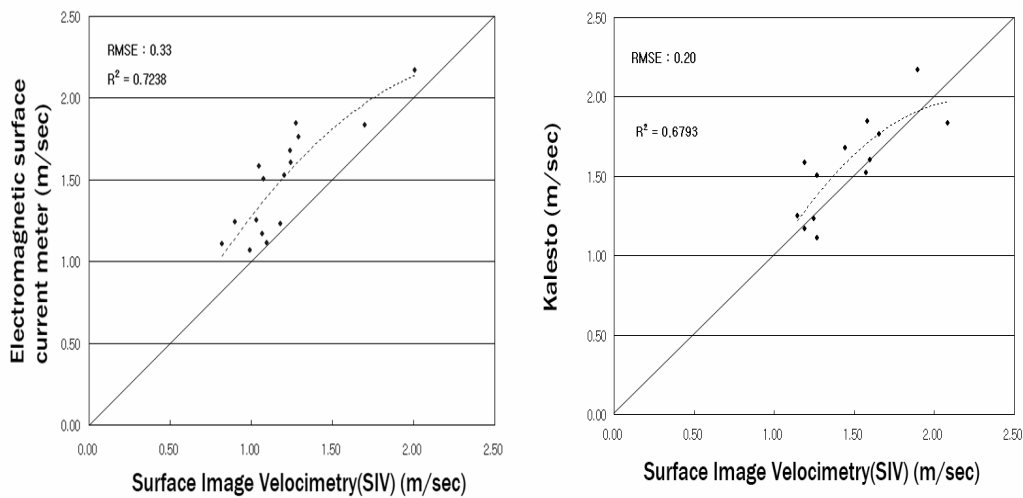


Fig. 8. One-to-one relationships of velocity measurements between the electromagnetic wave surface velocimetry and the surface image velocimetry.

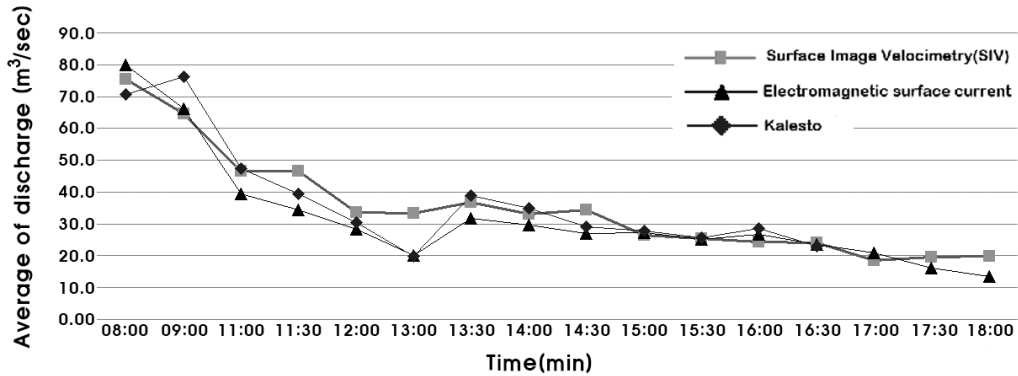


Fig. 9. Comparison of flow discharges.

각각의 유량계측기기의 유속을 이용하여 유량산출 결과는 Fig. 9와 같다. 표면영상유속계와 이동식 전자파표면유속계의 유량을 비교한 결과는 평균제곱근 오차(RMSE)가 6.04, 결정계수 R^2 은 0.92로 나타났다. 고정식 전자파표면유속계(Kalesto)와 유량을 비교한 결과는 평균제곱근 오차(RMSE) 5.95, R^2 = 0.88로 높은 상관성을 나타내었다(Fig. 10). 결정계수 R^2 (R -Squared)은 비교하는 두 값의 적합성을 판단하는 측정 계수로, 보통 0과 1의 사이 값을 갖는다. 비교결과 1에 가까운 결정계수의 값은 관측방식이 상

이한 두 방식이 실제유량을 나타낸다고 결정할 수 없지만, 유량결과의 적합성을 판단할 수 있다.

5. 결론

제주도 한천 제 2동산교에서 2012년 8월 29일 제 15호 태풍 불라벤에 의한 유출이 발생했을 때 표면영상유속계(SIV)를 적용하여 유속 및 유량을 산정하였다. 이때 동시 관측한 이동식 및 고정식 전자파표면유속계의 관측 결과와 비교·분석하였으며, 본 연구를

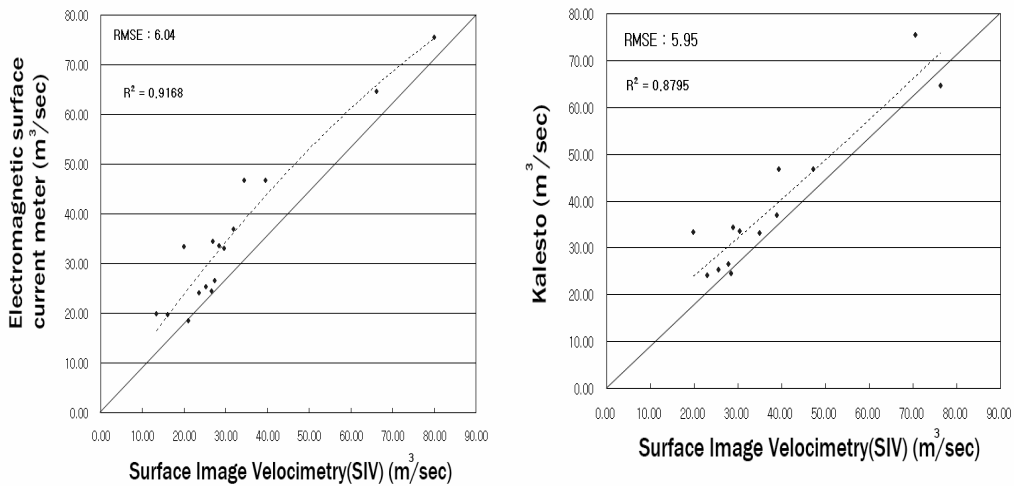


Fig. 10. One-to-one relationships of discharge measurements between the electromagnetic wave surface velocimetry and the surface image velocimetry.

통해 얻은 결과 및 결론은 다음과 같다.

1) 유속의 상관관계를 비교한 결과 결정계수 R^2 (R -Squared)은 각각 0.72(표면영상유속계-이동식 전자파유속계), 0.68(표면영상유속계-고정식 전자파유속계)로 낮은 상관관계를 나타냈다. 이와 같은 결과는 표면영상유속계의 경우 교량 하부의 수직 구간을 관측하였고, 이동식 및 고정식 전자파표면유속계는 표면영상유속계의 관측구간에 비해 6 m 상류의 단면을 관측하였기 때문에 유속관측구간의 차이에 의한 영향으로 유속 차이가 발생하였다고 판단된다.

2) 관측 구간에 적용되는 하천단면을 이용하여(Fig. 6), 유량을 산정한 결과는 결정계수 R^2 이 각각 0.92(표면영상유속계-이동식 전자파유속계), 0.88(표면영상유속계-고정식 전자파유속계)로 높은 상관성을 나타냈다. 관측방식이 서로 상이한 두 장비를 이용하여 유량을 산정하고 비교한 결과는 돌발성 산지하천의 특성을 갖는 제주도 하천에 대해 실제 유량에 가까운 값을 산정할 수 있는 효과적인 방법이라 판단된다.

3) 유출발생 시 계측기기에 따라 측정된 유속 값의 정확한 참값을 판단할 수 없지만, 제주도와 같은 산지하천의 빠른 유속에서 접촉식 유량측정 방법의 적용이 어려울 경우 매우 효과적인 방식이라 판단된다. 향후 더 정밀한 유량산정을 위해 홍수 시 수직유속분포에 대한 연구가 필요하다고 판단되며, 다양한 유출 사상에 대해 SIV기법을 적용하여 검증하고, 동시에 다양한 유량 관측기법과 비교·검토한다면 제주도 하천 유출의 유량 측정 기술을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(10지역기술혁신B02, 제주수자원연구단)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- Kim, S. J., Ryu, K. G., Youn, B. M., 2011, Real-time Discharge Measurement of the River Using Fixed-type Surface Image Velocimetry, Mag. Korea Water Resour. Assoc., 44(5), 377-388.
- Kim, S. J., 2008, The Accuracy Analysis of Discharge Measurement Technique using Surface Image Velocimetry, M. Sc. Dissertation, Myoungji University, Korea.
- Lee, J. S., and Julien, P. Y., 2006, Electromagnetic Wave Surface Velocimetry, J. Hydraul. Eng., 132(2), 146-153.
- Lee, S. H., Kim, W. G., Kim, Y. S., 1997, Practical Aspects of Microwave Surface Velocity Meter Applied to Measurements of Stream Discharges, Mag. Korea Water Resour. Assoc., 30(6), 671-678.
- No, Y. S., Yun, B. M., Yu, K. K., 2005, Estimation of Mean Velocity from Surface Velocity, Mag. Korea Water Resour. Assoc., 38(11), 917-925.
- Yu, K. K., Kim, D. S., Yun, B. M., 2005, Development of Fast and Exact FFT Algorithm for Cross-Correlation PIV, Mag. Korea Water Resour. Assoc., 38(10), 851-859.
- Yang, S. K., Kim, D. S., Yu, K. K., Kang, M. S., Jung, W. Y., Lee, J. H., Kim, Y. S., You, H. J., 2012, Comparison of Flood Discharge and Velocity Measurements in a Mountain Stream Using Electromagnetic Wave and Surface Image, J. Environ. Sci., 21(6), 739-747.
- Yang, S. K., Kim, D. S., Jung, W. Y., Yu, K. K., 2011, Analysis and Comparison of Stream Discharge Measurements in Jeju Island Using Various Recent Monitoring Techniques, J. Environ. Sci., 20(6), 738-788.
- Yang, S. K., 2007, River Management and Improvement of Jeju Island, Assoc. Korea Rivers, 3(4), 104-115.