소하천 모니터링을 위한 자동유량계측기술 개발 및 적용성 검토

Development and Evaluation of Automatic Discharges Measurement Technology for Small Stream Monitoring

정태성* · 주재승** · 최현석*** · 김서준****

Cheong, Tae Sung*, Joo, Jaeseung**, Choi, Hyunsuk***, and Kim, Seojun****

Abstract

Small streams have flood effects on both national and local streams located further downstream. Moreover, damages are increasing in these basins, making the development of adaptive prevention and response measures an urgent necessity. However, the challenge is that small streams remain non-measuring sites. Furthermore, there are about 22,800 small streams, which are too many for the local governments to measure during the flood season. Thus, in this study, a CCTV-based automatic discharge measurement technology was developed to support local governments in monitoring, and minimize the labor required. To evaluate the new technology, discharges were measured in Jungsunfil-chun of Ulju-gun, which is a test bed operated by the National Disaster Management Institute, and compared with the Aquatic Doppler Velocimetry (ADV) based discharges and the weir discharges. The results show that measurements using the new technology are in good agreement with the ADV based discharges. Furthermore, the new technology has the advantage of being able to capture peak flood discharges with short measurement times. Moreover, it is a sustainable measurement method to support flood control by verification of stream flow and situational influences, and provides stable measurements by using a non-contact measurement method. It is expected that the new technology may be used to increase the number of monitoring sites, and the hydraulic data sets collected from various small stream test beds can be used to enhance the design code for estimating flood discharges and the small stream flood warning system to reduce damage in small streams.

Key words : Small Stream, Sustainable Measuring Method, Automatic Discharge Measurement Technology, Acoustic Doppler Velocimetry, Weir Discharges

요 지

소하천은 상류에 위치해 하류에 위치한 국가 및 지방하천의 홍수피해에 미치는 영향이 클 뿐만 아니라 소하천 유역 내에서도 피해가 증가하고 있어 적절한 예방·대응 대책이 필요하다. 그럼에도 불구하고 소하천은 미계측 유역으로 남아 있어 적절한 대책 마련에 어려움을 겪고 있다. 더불어 국내 소하천은 22,800여개로 지자체 소하천 담당 공무원의 수에 비해 그 수가 너무 많아 홍수 시 수리량 자료를 계속하는 데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 최소한의 인력으로도 소하천 계측이 가능한 CCTV 기반의 자동유량계측기술을 개발한다. 개발된 기술의 정확성을 검증하기 위하여 국립재난안전연구원 시험운영중인 울주군에 위치한 중선필천에서 유량을 계측하고 그 결과를 도플러유속계를 이용하여 실측한 유량과 위어유량을 함께 비교하였다. 비교 결과 자동유량계측기술은 실측 유량을 잘 재현하는 것은 물론 계측시간이 짧아 소하천의 침투유량을 측정하는데 유리한 것으로 나타났다. 더불어 본 기술은 수면과 직접접촉하지 않고도 소하천의 표면영상만을 이용하여 유속을 계측함으로써 안정적으로 유량을 계측함은 물론 하천흐름과 현장상황을 동시에 파악할 수 있어 소하천 홍수대응 지원도 가능한 지속가능한 계측방법이라고 할 수 있다. 본 연구에서 개발된 계측기술로 인해 소하천에서의 모니터링이 확대될 것으로 판단되며, 이를 통해 수집된 수리량 자료는 홍수량산정을 위한 설계기준 개정이나 소하천의 재해저감을 위한 소하천 홍수 예·경보시스템 고도화 지원에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 소하천, 지속가능한 계측방법, 자동유량계측기술, 도플러유속계, 위어유량

*정회원, 국립재난안전연구원 시설연구관(E-mail: bangjaeman@korea.kr)

Member, Senior Researcher, National Disaster Management Research Institute

**교신저자, 정회원, 국립재난안전연구원 선임연구원(Tel: +82-52-928-8182, Fax: +82-52-928-8199, E-mail: wnwtmd1@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Researcher, National Disaster Management Research Institute

***정회원, 국립재난안전연구원 선임연구원(E-mail: chseokuo@korea.kr)

Member, Researcher, National Disaster Management Research Institute

****정회원, 명지대학교 토목환경공학과 연구교수(E-mail: seojuny@paran.com)

Member, Research Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Myoungji University

1. 서 론

하천유량은 강우-유출해석(Grimaldi et al., 2010), 수리학적 전이(Kreibich et al., 2009), 침식모델(Zeng et al., 2008), 수위-유량 관계곡선(McMillan et al., 2010) 등의 수리학적 연구에 필수적으로 요구된다. 유량계측에 있어 필수적으로 요구되는 유속 측정방법은 하천규모, 접근성, 그리고 하천의 수리학적 특성에 따라 매우 다양한데, 프로펠러 유속계, 부자식 유속계는 아직까지도 많이 사용되고 있는 방법이다(Buchanan and Somers, 1969; Planchon et al., 2005; Leibundgut et al., 2009; Tazioli, 2011; Hrachowitz et al., 2013; deLima and Abrantes, 2014). 그러나 이들 유속계들은 Table 1에 제시된 바와 같이 홍수기 계측의 위험성, 장비유지·관리의 어려움, 계측결과 의 연속성 및 신뢰성 저하 문제 때문에 대안으로 Acoustic Doppler Velocimetry (ADV; Yorke and Oberg, 2002)나 이동식 레이더유속계, 전자파표면유속계(Microwave Water Surface Current Meter, MWSCM), 미세파형센서, 위성 등 원격센서 기반의 유속계측기술(Fulton and Ostrowski, 2008; Alessandrini et al., 2013; Tarpanelli et al., 2013; Kim et al., 2015)이 많이 사용되고 있다.

국내에서는 유량조사사업단이 ADV를 활용하여 국가·지방하천에서 연평균 95% 정도의 신뢰성 높은 수리량 자료를 취득하기도 하였다. Yang et al. (2015)은 ADV는 이러한 장점에도 불구하고 홍수 시 부유물에 인한 손상우려가 커 소하천에서는 적용이 어렵다고 밝혔다. Tauro et al. (2014)에 의하면 이동식 레이더유속계나 미세파형센서를 이용한 계측장비는 고가의 비용이 요구되며, 위성자료를 이용한 계측은 이미지의 해상도 문제로 소하천에 부적합하다고 밝혔다. 최근에 와서는 표면영상유속계(Surface Image Velocimetry, SIV)가 소하천에 적용 가능한 대안으로 개발연구가 꾸준히 진행되어 오고 있다(Fujita et al., 1998; Bradley et al., 2002; Creutin et al., 2003; Jodeau et al., 2008; Hauet et al., 2008; Hauet et al., 2009; Bechle et al., 2012; Gunawan et al., 2012; Bechle

and Wu, 2014). 국내에서는 주로 실험수로 및 하천에서 표면 영상유속계를 검증하는 연구(Yu et al., 2008; Choi et al., 2010)가 주로 수행되었다.

지금까지 표면영상유속계측기술은 실시간 계측보다는 영상자료를 일정기간 저장장치에 저장한 이후 내업을 거쳐 유속을 계측하는 방법이 주로 사용되어져 왔다. 더불어 홍수 사상 이후에 내업을 통해 유속을 계측함으로써 유속결과를 수위계측 결과와 연계하여 실시간으로 유량을 계측하려는 시도는 거의 이루어지지 않았다. Hauet et al. (2008)은 Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) 기법을 개량하여 실시간 유량산정이 가능한 실시간 표면영상유속계(Real-Time Large Scale Image Velocimetry)를 개발하고 이를 Iowa 강에 적용하여 실시간 유량산정과정을 시범운영하였다. 국내에서는 Kim et al. (2011)이 고정식 표면영상유속계(Fixed-type Surface Image Velocimetry)를 개발하고 달천에 적용하여 괴산댐 방류량과 실시간 유량계측결과를 비교하는 방법으로 정확도를 검증하였다. 이들 실시간 유량계측기술들은 직접측정·기록 혹은 자료수집·분석 등의 노력이 수반되지 않아 극한 수리조건에서도 유량계측이 가능한 장점이 있으나, 현장적용을 위한 장비개발이나 적용성 검증 연구가 전무해 이들을 하천현장에서 적용하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 홍수시에 유량자료를 기계적으로 계측할 수 있도록 표면영상계측기술과 수위계측기술을 실시간 연계하는 CCTV 기반 자동유량계측기술을 개발한다.

본 연구에서 개발하고자 하는 자동유량계측기술은 흐름에 의해 생성·이동하는 부유물 등 수표면 영상이미지 변화를 분석하여 구한 표면유속에 유수단면적을 곱하여 실시간으로 유량을 계측하는 기술이다(Kim et al., 2008; Muste et al., 2008; Muste et al., 2011). 따라서 상대적으로 수면이 잔잔한 평수기 보다는 홍수기에 적용이 유리하며, 대규모 하천 보다는 흐름이 불규칙한 소하천에 적합하다(Tauro et al., 2014). 본 연구에서는 영상이미지를 측정하기 위한 장비로 활용성 측면에서 장점이 많은 CCTV를 사용하였는데,

Table 1. The Pros and Cons of a Discharge Measuring Method Used in Small Stream

Measuring Method		Pros	Cons	Adequacy
contact liquid measurement	float method	- convenient to measure - lower price	- difficult to find optimal site - large measuring error	△
	current-meter Method	- lower price	- improper by floating particle	×
	ADVM, ADCP	- high accuracy - convenient to measure	- higher price - higher time, labor intensities	○
Non-contact liquid measurement	depth-discharge curve	- convenient to measure - lower price	- need depth-discharge curve - need for wave correction	△
	MWSCM	- convenient to measure	- large error in low discharge - higher time intensities	△
	SIV	- convenient to measure - low labor intensity	- need initial setting - need geometric correction	○

소하천은 상대적으로 하폭이 좁아 영상 왜곡도가 크지 않고 비교적 근거리에서 촬영이 가능해 해상도 저하를 최소화할 수 있다는 장점이 있다(Tsubaki et al., 2011; Bechle et al., 2012). 본 연구에서는 자동유량계측기술의 계측시간간격에 따른 유량의 계측 정확도를 비교·검증하기 위하여 국립재난안전연구원 실험동에 설치된 개수로 실험시설에서 유량 변화에 따른 계측 정확도를 검토하였다. 더불어 기술의 적용성 검토를 위하여 국립재난안전연구원이 시범소하천으로 운영 중인 울주군에 위치한 중선필천에 자동유량계측기술을 설치하고 2016년과 2017년 홍수기에 유량을 계측하였다. 소하천에서의 유량계측 정확도를 검증하기 위하여 동일 기간에 ADV와 위어를 이용하여 유량을 실측하고 이들 결과를 함께 비교하였다.

2. 자동유량계측기술 및 실험수로 계측결과 비교

자동유량계측을 위한 장비간 연계성 및 적정 계측간격 검토를 위하여 국립재난안전연구원에 설치된 길이 22 m, 높이 1 m, 폭 2.0 m의 수로에 CCTV 기반 표면영상유속계와 초음파 수위계를 설치하고 실시간 유량을 계측하였다. 자동유량계측을 위한 장비로는 적외선 카메라가 장착된 CCTV, 초음파수위계, 영상처리장비, 컴퓨터 등이 사용되었으며, CCTV는 Fig. 1과 같이 상류측으로부터 5 m 떨어진 지점에 하류방향으로 설치하고 수위계가 설치된 10 m지점의 횡단면 표면유속을 계측한다.

실험수로 바닥은 매끈한 철판 재질이며 좌, 우측벽면은 강화아크릴 재질로 전체 조도는 0.01정도이다. 또한 하류단 수위조절 수문과 수로경사를 1/50까지 조절할 수 있는 유압 장치가 설치되어 있다. 자동유량계측기술의 실시간 수위, 유량계측결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 경사를 고정하고 하류부 수위조절을 하지 않는 조건에서 상류부 유량을 일정하게 변화시켜 가면서 수위와 유량을 계측하였다. 유량

계측에 있어 필수요소인 유속은 Raffel et al. (2007)과 Kim et al. (2013)이 적용·검증한 상호상관법을 사용하여 계측하였다. 이 방법은 첫번째 영상에서 상관영역(interrogation area)을 결정하고 두번째 영상인 탐색영역(searching area)내에서 상관영역과 상관계수가 큰 영역을 구하고 이들 영역간 이동거리를 영상간 시간간격으로 나누어 유속을 산정하는 방법이다.

이때 상관계수는 다음 Eq. (1)으로 구해진다.

$$\left(\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{NY} E_a E_b \right) / \left(\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{NY} E_a^2 \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{NY} E_b^2 \right)^{0.5} \quad (1)$$

여기서 MX 와 NY 는 상관영역의 화소크기를 나타내며, E_a 와 E_b 는 상관영역과 탐색영역내 비교영역의 잔차값으로써 각각 $(a_{ij} - \bar{a}_{ij})$ 와 $(b_{ij} - \bar{b}_{ij})$ 로 구해진다. 이때 $\bar{a}_{ij}$ 와 $\bar{b}_{ij}$ 는 영역내 명암값들의 평균이다. 표면유속은 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{v}_i$ 로 구해지며 이때 $\bar{v}_i$ 는 탐색영역내 그리드의 i 번째 노드에서 계측된 시간평균유속이며, N 은 그리드 전체 노드 개수이다.

자동유량계측기술을 이용하여 계측한 수위와 유량 결과는 Fig. 2에 제시하였다. 자동유량계측기술은 실험수로에서 실측한 최대수위인 0.3 m와 최대유량인 1 m/s를 잘 재현하는 것으로 나타나 실시간 유량계측에 활용할 수 있을 것으로 판단된다(Fig. 2a). 계측을 위해 설치된 CCTV는 초당 30프레임의 영상을 촬영할 수 있는데, 본 연구에서는 이중 20프레임의 영상으로 10개 유속장을 계측하고 이들을 평균하는 방법으로 매10초 간격의 유량을 계측하였다. 이때 유량계측을 위한 계산시간은 약 2초 정도가 소요되었다. 이렇게 계측한 유량은 Fig. 2(b)와 같이 유량변동폭이 큰 것으로 나타났는데, 유속계측에 있어 더 많은 프레임을 평균하여 계측한다면 변동폭을 최소화 할 수 있다. 그러나 이 경우 계산시간이 증가하여 유량계측 간격이 증가할 수밖에 없으므로 신중한 접근이 필요하다.

Fig. 1. Conceptual Diagram of CCTV and Water Level Gauge Implemented in Open Channel

Fig. 2. Comparisons of Water Surface Elevation and Flow Discharge Collected from Open Channel. Shaded Areas Indicate the Standard Deviation Over the Sequence of 10 Frames Analyzed in this Experiments and - is Water Level and Discharges

3. 시범소하천 계측결과 비교

자동유량계측기술의 현장 적용성 및 정확도 검증을 위하여 울산광역시 울주군에 위치한 소하천인 중선필천에 Fig. 3과 같은 자동유량계측장비를 설치하고 홍수기에 유량을 계측하였다. 계측장비 설치 위치는 지형 및 구조물현황, 상·하류 흐름영향 그리고 측정 및 장비설치의 용이성 등을 고려하여 중선필천 하류부 교량(35°39' 19.88" N, 129°7' 29.82" E)으로 결정하였다. 중선필천 유역의 기하학적 특성은 유역면적이 5.09 km², 유로연장은 3.18 km, 유역평균폭은 1.60 km, 유역의 형상계수가 0.50인 나뭇잎 형상을 가진 유역이며, 유역의 최고표고는 867 m, 평균표고는 435 m, 최대경사는 71°, 평균 경사는 23°로써 비교적 급경사 유역이다.

본 기술을 현장에 적용하는데 있어 어려운 점은 CCTV가 Fig. 3(a)와 같이 기둥과 같은 구조물에 일정한 각도로 설치되기 때문에 바람 등 외력에 취약해 영상이 흔들리는 경우가 발생하기 쉽고 Fig. 3(b)와 같이 촬영영상은 실제흐름과 다르게 왜곡되어 촬영되므로 이들을 보정해야만 한다는 것이다. 본 연구에서는 외력에 의한 영상의 흔들림을 최소화하기

위하여 기둥을 강한 소재로 구성하였으며, 그럼에도 불구하고 흔들리는 영상은 Yu et al. (2008)이 개발·검증한 알고리즘으로 보정하였다. 왜곡영상을 정사영상으로 보정하기 위해서 Fig. 3(b)와 같이 측정구간에 표정점을 설치하고 2차원 투영 좌표변환프로그램으로 촬영영상을 정사영상으로 변환하여 유속을 계측하였다(Kim et al., 2004; Choi et al., 2010; Kim et al., 2011). 이 밖에도 야간에도 촬영이 가능한 적외선카메라를 설치하였음에도 불구하고 수면이 잔잔한 평수기 야간에는 유속계측이 어려워 이를 보완하기 위해 조명을 설치하여 계측을 수행하였다.

3.1 계측 장비 및 방법

자동유량계측기술의 유속 및 유량계측결과와의 검증을 위하여 본 연구에서는 중선필천에서 수위, 유속 그리고 유량 등의 수리량 자료를 직접 측정하였다. 수리량자료 중 유속측정은 도플러유속계(ADV)를 사용하였으며, 수심측정은 쇠자를 이용하여 측정하였다. 이때 도플러유속계는 수심평균 유속을 전자파표면유속계는 표면유속을 측정하여 이를 이용하여 단면평균 유량을 계측하였다.

Fig. 3. a) Close-up View of the Proposed CCTV Implementation and b) Sketch of the Ground Reference Point for Geometric Correction and View of Water Level Gauge Implementation

본 연구에서는 소하천의 유량측정 확대 가능성 검토 및 자동유량계측기술 검증에 위하여 직접측정방법 이외에도 보나 낙차공 등을 활용하여 유량을 계측하는 간접측정방법도 활용하였다. 중선필천의 상류부는 경사가 급해 하안보호를 위해 다수의 낙차공이 설치되어 있는데, 본 연구에서는 유속측정위치에서 가장 가까운 15 m 상류에 위치한 낙차공 위어를 이용하여 Eq. (2)로 유량을 간접 측정하고 그 결과를 자동유량계측 결과와 비교하였다.

$$Q = C_d L H^{3/2} \quad (2)$$

이때 C_d 는 유량계수로써 $0.433 \sqrt{2g} \frac{(P+H)}{(2P+H)}$ 로 구해지며, 여기서 P 는 광정위어 높이 이고 H 는 월류수심이다.

유량측정을 위하여 낙차공 상류부에 초음파수위계를 설치하고 실시간 수위를 측정하였으며 이렇게 측정된 수위를 이용하여 유량을 산정하였다. 실시간 유량계측기술의 검증을 위하여 Table 2와 같이 '16년과 '17년 강우사상에 대해 중선필천에서 실측한 수리량 자료를 이용하였다. '16년과 '17년 2년 동안 울주군에 발생한 강우 중 최대 시우량 20 mm가 넘는 강우는 3번 밖에 발생하지 않아 총 3회의 강우사상에 대한 실측자료를 사용하였다.

소하천에서의 표면유속 산정은 정확도 제고를 위해 실험수로 보다 많은 150프레임을 사용하여 표면유속을 계측하였다. 계측오차를 줄이기 위해 유속은 각 프레임 비교를 통해 구한 전체유속의 평균값을 사용하였으며, 계산과정에서 10 m/s 이상 유속 등 이상치는 평균값 산정에서 제외하고 표면유

속을 계측하였다. 정밀도 높은 표면유속 계측을 위해 횡방향으로 약 40개 측선에 대해 계측을 수행하였는데, 이때 측선 간 간격은 약 20 cm이었다. 더불어 유속분포를 확인하기 위해 Fig. 4와 같이 하천 흐름방향으로 8개의 측정점을 추가 설정하여 총 40 × 8개의 측정점에 대해 표면유속을 계측하였다. 이렇게 계측된 유속분포는 하천의 흐름 양상을 이해하는데 도움을 줄 뿐만 아니라 자동유량계측기술의 계측 정확도 확인 및 신뢰도 확보에 기여한다.

3.2 계측 결과 분석

자동유량계측기술의 유량계측 정확도 비교를 위하여 2016년 9월 17일 22:15경 프로펠러 유속계를 이용하여 횡단면을 4개로 분리하여 1점법으로 유속을 측정하였는데, 이때 유량은 2.35 m³/s로 측정되었다. 당시엔 자동유량계측기술 결과를 실측결과와 직접 비교하지 못했는데, 그 이유는 적외선 카메라를 사용했음에도 불구하고 야간에 표면영상 획득이 어려웠기 때문이며, 이후에 현장에 조명을 설치하는 방법으로 이 문제를 해결하였다. 본 연구에서는 2016년 9월 17일 강우사상에 대해 07:00부터 1시간 간격으로 총 12회에 걸쳐 표면유속을 계측하였으며, 이 결과를 수위자료와 함께 활용하여 시간-유량 곡선을 계측하였다. 당시 첨두유량은 16:00경에 발생하였으며, 이때의 유속분포는 Fig. 4(a)와 같고 유량은 3.55 m³/s로 계측되었다.

2016년 10월 5일에는 태풍 차바에 따른 유량 변화를 정밀 계측하기 위하여 계측간격을 10분으로 줄여 유량을 계측하였다. 당시 첨두유량은 11:30경에 발생하였으며, 이때의 유속분포는 Fig. 4b)와 같고 계측유량은 15.52 m³/s이었다. 본

Table 2. Measuring Date and Maximum Hydraulic Data Set Measured in Jungsunfil-chun, Ulsan City

Date	Maximum Rainfall (mm/h)	Maximum Depth (m)	Maximum Discharge (m³/s)
2016.09.17.	50	0.65	6.00
2016.10.05.	90	1.20	17.0
2017.09.11.	20	0.28	0.15

a) 2016.9.17. 16:00

b) 2016.10.5. 11:30

Fig. 4. Close-up View of Measured Velocity Profile Measured by Using New Technology

연구에서는 자동유량계측기술 검증을 위하여 강우초기인 09:00-10:00 동안 동일한 계측단면에서 횡방향으로 0.6 m 간격으로 단면을 분할하고 1점법으로 단면유속을 측정하였다. 이때 최대 측정유속은 1.62 m/s로 측정되었으며, 수심과 유량은 각각 0.54 m와 1.71 m³/s로 계측되었다. 동일 시간의 자동유량계측 결과는 2.37 m³/s로 유량실측 결과에 비해 27.3% 정도 과대 산정하는 것으로 나타났다. 자동유량계측 기술의 계측유량이 큰 이유는 표면유속을 이용하여 계측한 유량이기 때문인데, 미지질조사국(US Geological Survey, USGS)이 제시한 환산계수인 0.85를 사용하여 유량을 산정하면 약 15.1% 정도의 오차를 보이는 것으로 나타나 비교적 정확하게 유량을 산정하는 것으로 나타났다. 2017년 9월 11일 강우 당시에는 강우량이 앞서의 두 경우와 다르게 크지 않아 강우초기부터 강우가 끝날 때 까지 유량을 측정하였다. 당시 자동강우계측기술 계측결과에 따르면 침투유량 발생 시각은 13시이며 이때의 유량은 0.196 m³/s로 나타났다. 자동유량계측기술의 유속계측 정확도 비교를 위하여 2017년 9월 11일 계측된 유속결과를 도플러유속계 계측결과와 비교하여 Fig. 5에 도시하였다. 이때 도플러유속계로 구한 평균유속과 비교를 위하여 자동유량계측기술로 계측한 표면유속은 USGS의 환산계수인 0.85를 사용하여 평균유속으로 환산하여 비교하였다. 도플러유속계를 이용하여 유속을 측정하기 위하여 단면은 0.6 m 간격으로 분할하고 1점법으로 단면평균유속을 계측하였다.

Fig. 5. Comparisons of Velocity Profiles Measured by ●: Acoustic Doppler Velocimetry and ○: Real-time Discharge Measuring Technology in the Test Site

3.3 계측결과 검증

자동유량계측기술은 Fig. 5(a, b and e)와 같이 저유속에서는 도플러유속계 계측결과에 비해 유속을 과소 계측하는 것으로 나타났으나 고유속에서는 도플러유속계와 비슷한 유속분포를 보이는 것으로 나타났다. 평균계측오차는 시간 변화에 따라 각각 0.056 m/s, 0.113 m/s, 0.037 m/s, 0.026 m/s, 0.083 m/s로 나타났다. 이런 차이를 보이는 이유는 저유속 흐름일 때는 와류나 하상물질에 의한 흐름교란 영향이 커져 이들 영향이 반영됨에 따라 유속을 과소 계측하는 것으로 밝혀졌다. 특히 11:30분에 계측된 Fig. 5(b) 유속은 Fig. 6에서와 같이 도플러유속계를 이용하여 유속을 측정하고 있는 중에 표면유속을 계측함으로써 흐름교란으로 인해 유속이 과소 계측된 것으로 밝혀졌다.

Fig. 6. Close-up View of Measured Velocity Profile by using New Technology and Measured Velocity by ADV at 2017.9.11. 11:30

2017년 9월 11일 자동유량계측기술로 계측된 유량과 도플러유속계로 계측한 유량 및 위어계측유량을 Fig. 7에 함께 도시하였다. Fig. 7에서 자동유량계측기술은 유량 또한 유속이 과소 산정된 저유속 흐름에서는 도플러유속계로 계측한 유량을 과대 산정하는 것으로 나타났으나, 고유속에서는 도플러유속계로 계측한 유량을 잘 재현하는 것으로 나타났다. 계측오차는 시간변화에 따라 각각 6.38%, 26.89%, 5.64%, 4.32%, 12.3%로 나타났다. 위어를 이용하여 계측한 유량 또한 도플러유속계로 계측한 유량을 잘 재현하는 것으로 나타나 위어가 설치된 소하천에서는 수위계만을 설치하여 위어 월류유량을 계측하는 것도 가능한 것으로 판단된다. 그러나 위어유량은 Fig. 5에서 13시 이후의 급격한 유량 감소를 잘 관측하지 못하는 것으로 나타나 계측에 있어 세심한 주의가 요구된다.

도플러유속계를 이용하여 유량을 계측하기 위해서는 1회 계측 시 평균 10~15분 가량의 관측시간과 횡단면을 이동하면서 계측함에 따라 계측에 많은 시간이 소요되어 시간에

Fig. 7. Comparisons of Time-discharge Curves Measured by ●: Acoustic Doppler Velocimetry, ■: Real-time Discharge Measuring Technology and ■: Weir in the Test Site

따른 유량 변동폭이 큰 소하천에서는 계측으로 인한 오차가 크게 발생하는 문제점이 있다. 더불어 계측시간 간격이 커 최대유량을 계측하는데 어려움이 있는 반면 자동유량계측 기술은 최소 2분 간격으로 계측이 가능해 Fig. 5와 같이 최대유량을 계측하는데 장점이 것으로 나타났다. 위어 유량은 침투 홍수 이후의 유량변화를 잘 재현하지 못하는 것으로 나타났는데, 이는 수위변화가 크지 않아도 유속의 변화가 큰 소하천 흐름의 특성을 잘 반영하지 못해 발생하는 것인데, 소하천의 홍수대응을 위한 계측이 목적이라면 상승기의 유량이 중요하므로 상승기를 잘 계측하므로 위어유량을 활용하는 것도 가능하리라 판단된다.

4. 결 론

소하천은 하천차수(stream order)가 1차나 2차에 해당하는 하천으로서 우리나라 전체 하천길이(65,295 km)의 54% 정도를 차지하고 있다. 소하천은 지방하천과 국가하천의 상류에 위치하고 있어 하류의 홍수 재해에 미치는 영향이 클에도 불구하고 미계측 유역으로 남아있어 예·경보시스템 개발, 예방·복구사업 등 적정대책 마련에 어려움을 겪고 있다. 더불어 국내에는 22,823개의 소하천이 존재하여 적은 인력의 지자체 공무원만으로 유량을 계측하는데 한계가 있다. 본 연구에서는 지자체가 소하천에서 수리량 자료를 계측함으로써 홍수예방대책 및 홍수량산정 등에 활용할 수 있도록 적은 인력으로도 효율적인 모니터링이 가능한 실시간 자동유량계측기술을 개발하였다. 개발기술을 검증하기 위하여 본 연구에서는 중선필천을 시범유역으로 선정하고 2016년~2017년의 2년 동안 도플러유속계와 낙차공을 이용하여 유량을 측정하고 그 결과를 자동유량계측 결과와 함께 비교하였다. 검증 결과 자동유량계측기술은 20% 정도의 오차 범위 내에서 유량을 재현하는 것으로 나타났다.

더불어 본 연구에서는 위어의 유량측정 가능성을 검토하고 자 중선필천에서 위어유량을 측정하고 자동유량계측기술과 도플러유속계를 활용한 측정결과를 함께 비교하였다. 비교 결과 위어유량은 도플러유속계를 활용하여 측정한 유량을 비교적 잘 재현하는 것으로 나타나 소하천에 설치된 보나 낙차공 등은 수위계 설치만으로도 유량계측이 가능할 것으로 판단된다.

자동유량계측기술은 CCTV와 수위계만을 이용하여 유량을 계측함으로써 설치 및 운영이 용이하고 극한홍수 시에도 실시간으로 유량을 계측하는 물론 하천 상황을 모니터링할 수 있다는 큰 강점을 지닌다. 그러나 표면유속을 평균유속으로 환산하기 위한 검증과정이 수반되어야 하고 바람에 의한 흔들림이나 빗방울에 의한 오차 보정 등의 후처리 기법이 요구되는 등 기술적으로 가장 복잡한 방법이라 할 수 있다. 본 연구에서는 위와 같이 발생 가능한 문제점을 해결하기 위한 처리방법 혹은 기술을 개발하였으나, 아직 밝혀내지 못한 문제점에 대해서는 추가적인 연구를 통해서 도출하고 이를 개선하기 위한 연구를 지속할 계획이다. 이밖에도 소하천은 홍수기 전후 단면변화가 큰데 2017년에 측정한 단면은 2016년에 비해 0.17~0.3 m 정도의 증감이 발생한 것으로 나타났다. 따라서 정확한 유량계측을 위해서는 주기적인 단면측량이 요구되며, 이와 함께 소하천에 자라는 식물들을 주기적으로 제거해 주어야 하는 어려움이 있다. 이들은 유량계측을 자동화하는데 있어 해결해야 할 문제점들로서 지속적인 시범하천운영 연구를 통해 이들을 개선할 계획이다.

References

- Alessandrini, V., Bernardi, G., and Todini E. (2013). An operational approach to real-time dynamic measurement of discharge. *Hydrol. Res.*, Vol. 44, No. 6, pp. 953-964.

- Bechle, A., Wu, C., Liu, W., and Kimura, N. (2012). Development and application of an automated river-estuary discharge imaging system. *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 138, No. 4, pp. 327-339.
- Bechle, A.J., and Wu, C.H. (2014). An entropy-based surface velocity method for estuarine discharge measurement. *Water Resour. Res.*, Vol. 50, No. 7, pp. 6106-6128.
- Bradley, A.A., Kruger, A., Meselhe, E.A., and Muste, M.V.I. (2002). Flow measurement in streams using video imagery. *Water Resour. Res.*, Vol. 38, No. 12, Article No. 1315.
- Buchanan, T.J., and Somers, W.P. (1969). Discharge measurements at gaging stations. *U.S. Geol. Surv. Tech. Water Resour. Invest.* Book 3, Chap. A8, 65pp.
- Choi, D.Y., Yu, K., and Paik, J. (2010). LSPIV technique for measurements of surface velocity of debris flow in a experimental flume. *Proceedings of Civil Expo 2010*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 864-867.
- Creutin, J.D., Muste, M., Bradley, A.A., Kim, S.C., and Kruger, A. (2003). River gauging using PIV techniques: A proof of concept experiment on the Iowa River. *J. Hydrol.*, Vol. 277, No. 3-4, pp. 182-194.
- de Lima, J.L.M.P., and Abrantes, J.R.C.B. (2014). Using a thermal tracer to estimate overland and rill flow velocities. *Earth Surf. Proc. Land.*, Vol. 39, No. 10, pp. 1293-1300.
- Fulton, J., and Ostrowski, J. (2008). Measuring real-time streamflow using emerging technologies: Radar, hydroacoustics, and the probability concept. *J. Hydrol.*, Vol. 357, No. 1-2, pp. 1-10.
- Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *J. Hydraul. Res.*, Vol. 36, No. 3, pp. 397-414.
- Grimaldi, S., Petroselli, A., Alonso, G., and Nardi, F. (2010). Flow time estimation with spatially variable hillslope velocity in ungauged basins. *Adv. Water Resour.*, Vol. 33, No. 10, pp. 1216-1223.
- Gunawan, B., Sun, X., Sterling, M., Shiono, K., Tsubaki, R., Rameshwaran, P., et al. (2012). The application of LS-PIV to a small irregular river for inbank and overbank flows. *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 24, pp. 1-12.
- Hauet, A., Creutin, J.D., and Belleudy, P. (2008). Sensitivity study of large-scale particle image velocimetry measurement of river discharge using numerical simulation. *J. Hydrol.*, Vol. 349, No. 1-2, pp. 178-190.
- Hauet, A., Muste, M., and Ho, H.-C. (2009). Digital mapping of riverine waterway hydrodynamic and geomorphic features. *Earth Surf. Proc. Land.*, Vol. 34, No. 2, pp. 242-252.
- Hrachowitz, M., Savenije, H., Bogaard, T.A., Tetzlaff, D., and Soulsby, C. (2013). What can flux tracking teach us about water age distribution patterns and their temporal dynamics? *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 17, pp. 533-564.
- Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, A., Le Coz, J., and Dramais, G. (2008). Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 19, No. 2, pp. 117-127.
- 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*, Vol. 44, No. 5, pp. 377-388.
- Kim, S.J., Yu, K.K., and Yoon, B.M. (2013). Error analysis of image velocimetry according to the variation. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 8, pp. 821-831.
- Kim, Y., Rho Y., and Yoon, B.M. (2004). Verification and application of surface-velocity measurement method using LSPIV. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 2, pp. 155-161.
- Kim, Y., Muste, M., Hauet, A., Krajewski, W.F., Kruger, A., and Bradley, A. (2008). Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: A proof of concept. *Water Resour. Res.*, Vol. 44, No. 9, W090502.
- Kim, Y.S., Won, N.I., Noh, J.W., and Park, W.C. (2015). Development of high-performance microwave water surface current meter for general use to extend the applicable velocity range of microwave water surface current meter on river discharge measurements. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 8, pp. 613-623.
- Kreibich, H., Piroth, K., Seifert, I., Maiwald, H., Kunert, U., Schwarz, J., et al. (2009). Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling? *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 9, pp. 1679-1692.
- Leibundgut, C., Maloszewski, P., and Külls, C. (2009). *Tracers in hydrology*. Oxford, UK: Wiley-Blackwell.
- Muste, M., Fujita, I., and Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resour. Res.*, Vol. 44, No. 4,

W00D19.

- Muste, M., Ho, H.-C., and Kim, D. (2011). Considerations on direct stream flow measurements using video imagery: Outlook and research needs. *J. Hydro-environ. Res.*, Vol. 5, No. 4, pp. 289-300.
- McMillan, H., Freer, J., Pappenberger, F., Krueger, T., and Clark, M. (2010). Impacts of uncertain river flow data on rainfall-runoff model calibration and discharge predictions. *Hydrol. Process.*, Vol. 24, No. 10, pp. 1270-1284.
- Planchon, O., Silvera, N., Gimenez, R., Favis-Mortlock, D., Wainwright, J., Le Bissonnais, Y., and Govers, G. (2005). An automated salt-tracing gauge for flow-velocity measurement. *Earth Surf. Proc. Land.*, Vol. 30, No. 7, pp. 833-844.
- Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S.T., and Kompenhans, J. (2007). *Particle image velocimetry: A practical guide*. NY: Springer.
- Tarpanelli, A., Barbeta, S., Brocca, L., and Moramarco, T. (2013). River discharge estimation by using altimetry data and simplified flood routing modeling. *Remote Sens.*, Vol. 5, No. 9, pp. 4145-4162.
- Tauro, F., Porfiri, M., and Grimaldi, S. (2014). Orienting the camera and firing lasers to enhance large scale particle image velocimetry for streamflow monitoring. *Water Resour. Res.*, Vol. 50, No. 9, pp. 7470-7483.
- Tazioli, A. (2011). Experimental methods for river discharge measurements: Comparison among tracers and current meter. *Hydrolog. Sci. J.*, Vol. 56, No. 7, pp. 1314-1324.
- Tsubaki, R., Fujita, I., and Tsutsumi, S. (2011). Measurement of the flood discharge of a small-sized river using an existing digital video recording system. *J. Hydro-environ. Res.*, Vol. 5, No. 4, pp. 313-321.
- Yang, D., Shi, X., and Marsh, P. (2015). Variability and extreme of Mackenzie River daily discharge during 1973-2011. *Quatern. Int.*, Vol. 380-381, pp. 159-168.
- Yorke, T.H., and Oberg, K.A. (2002). Measuring river velocity and discharge with acoustic Doppler profilers. *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 13, No. 5-6, pp. 191-195.
- Yu, K.K., Yoon, B.M., and Jung, B.S. (2008). A surface image velocimetry algorithm for analyzing swaying images. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 8, pp. 855-862.
- Zeng, J., Constantinescu, G., Blanckaert, K., and Weber, L. (2008). Flow and bathymetry in sharp open-channel bends: Experiments and predictions. *Water Resour. Res.*, Vol. 44, No. 9, W09401.

Received	July 1, 2018
Revised	July 3, 2018
Accepted	August 27, 2018