

## 하상재료에 따른 ADCP의 유량측정 비교 분석

# Comparative Analysis of ADCP Flow Measurement According to River Bed Material

최진우<sup>1</sup> · 홍창수<sup>1</sup> · 신경용<sup>1</sup> · 이진욱<sup>1</sup> · 김정애<sup>1</sup> · 조용철<sup>1\*</sup> · 유순주<sup>2</sup>

<sup>1</sup>국립환경과학원 한강물환경연구소 전문위원, <sup>2</sup>국립환경과학원 한강물환경연구소 소장

Jin-Woo Choi<sup>1</sup>, Chang-Su Hong<sup>1</sup>, Kyung-Yong Shin<sup>1</sup>, Jin Uk Lee<sup>1</sup>, Jeong-ae Kim<sup>1</sup>, Yong-Chul Cho<sup>1\*</sup> and Soon-Ju Yu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Han River Environment Research Center, National Institute of Environment Research, 12585, Korea

<sup>2</sup>Han River Environment Research Center, National Institute of Environment Research, 12585, Korea

Received 3 September 2018, revised 17 September 2018, accepted 21 September 2018, published online 30 September 2018

**ABSTRACT:** This research aimed at analyzing comparison results between in gravel and sand bed with respect to the detailed Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) measurement in a velocity, depth, and flow rate data based on Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) measurement result. Conclusively, similar results were shown for gravel and sand bed in velocity, depth and flow rate data using ADV and ADCP measurement. The results of the flow rate show a relative error mean of 3.5 - 4.8% in the gravel bed and 0.02 - 3.2% in the sand bed, which is better performance than the mean error of 5% suggested by United States Geological Survey (USGS). The results can be used as a basis data for the measurement of ADCP and potentially able to be utilized for the more detailed uncertainty analysis of ADCP flow rate measurement.

**KEYWORDS:** ADCP, ADV, Depth, Flow rate, Velocity

**요약:** 본 연구는 하상재료에 따른 ADCP의 측정 적합성을 평가하기 위해 하상 재료가 다른 자갈 하상과 모래 하상인 지점에서 ADCP의 유속, 수심 및 유량 자료를 ADV의 측정 결과와 비교 분석하였다. 연구결과 자갈 하상과 모래 하상에서의 ADV와 ADCP를 이용한 유속 분포와 수심 측정 자료는 비슷하게 나타났다. 유량측정 결과 자갈 하상에서 평균 3.5 - 4.8%, 모래 하상에서 평균 0.02 - 3.2%의 상대오차 범위를 나타내어 USGS에서 제시한 평균 오차 5%의 범위보다 작아 신뢰가 높은 결과인 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 향후 ADCP의 하천 적용성에 대한 기초자료로 활용될 수 있으며 ADCP의 불확도 평가에 중요한 자료로 이용될 것으로 판단된다.

**핵심어:** ADV, ADCP, 수심, 유량, 유속

## 1. 서론

하천의 유량조사는 물의 순환과정을 규명하고 수자원의 효율적인 계획과 관리를 위한 중요한 자료로 이용된다(Lee 2010). 이에 국내에서는 1990년대 후반부터 초음파 유속계와 유속지수법과 같은 실시간 하천 유량

측정 방법들을 도입하였다(Kim 2008). 하지만 하천의 유량을 장기간 또는 연속적으로 관측하는 것은 쉬워 보이면서도 어느 정도의 정확도를 확보하면서 측정하는 것은 생각보다 어렵다(Kim 2015). 특히 최근 기후변화에 따른 빈번한 집중호우와 하천환경 변화 등으로 인하여 회전식 유속계와 Acoustic Doppler Velocimeter

\*Corresponding author: yc800222@korea.kr, ORCID 0000-0002-4145-9829

© 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.

(ADV) 등의 유량측정 장비들로 측정하기에는 한계가 있다. 국외에서는 1980년대부터 유량측정의 정확도와 수문관측의 비용 저감을 위해 초음파를 이용한 Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) 측정방법을 유량측정에 활용하고 있는 추세이다(Gordon 1989, Adler and Nicodemus 2001, Yorke and Oberg 2002). 또한, 중대 규모 하천이나 난류 측정(Stacey et al. 1999, Lu and Lueck 1999, Nystrom et al. 2007), 감조지역(Geyer and Signell 1990) 등의 연구에 활용되고 있고, 세로 방향 확산계수의 산정(Kim 2012), 부유사 모니터링(Reichel and Nachtnebel 1994), 바이오매스 연구(Brierley et al. 1998) 등의 연구에 활발하게 사용되고 있다.

국내에서는 1990년대 후반부터 ADCP가 도입되기 시작하여 이에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, Lee (2005) 등은 ADCP를 이용한 유속과 유량측정에 관한 연구를 통하여 기존 유속 면적법과 ADCP를 이동식으로 운영하여 얻은 결과와 비교분석 하였다. Kim (2008) 등은 자연하천에서 Chiu의 유속분포와 최대유속 추정을 이용한 유량산정방법의 적용성을 검토하기 위해 유속 면적법과 지표 유속 법을 이용하여 비교검토 하였다. 또한 Kim (2009) 등은 하상에 ADCP를 매설하고 회전식 유속계와 비교하여 유속 및 수심의 측정 정확도를 연구하였다. Lee (2010) 등은 유량측정 기기별 측정성과에 대한 실험적 비교분석을 통해 기기별 유량 값의 오차를 나타내었고, Ji (2013) 등은 회전식 유속계, 초음파 유속계 등 다양한 유속계와 ADCP를 이용하여 동일지점에서 유량을 비교한 결과 유사한 측정결과를 보여 기계 오차를 반영하면 크게 문제되지 않을 것으로 판단하였다. 기존 연구에서는 동일한 지점에서 ADCP의 유량 및 유속을 비교한 연구, 유량측정장비에 대한 비교 연구 등으로 ADCP의 측정 적합성을 평가하기엔 한계가 있으며 하상재료가 유속 및 수심 측정에 미치는 영향에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 따라서 ADCP의 측정 적합성을 평가하기 위해서는 다양한 하상재료에서 ADCP의 정밀한 측정을 통한 분석이 필요하다. 이에 본 연구에서는 자갈 하상과 모래 하상에서 ADCP의 측정 적합성을 평가하기 위해 ADCP의 유속, 수심 및 유량을 정밀하게 측정하였다. 그리고 ADCP의 유속 측정 결과를 비교하기 위해 유속 측정 정확도가 높다고 알려진 ADV의 유속 측정 결과값을 사용하였다.

또한 동일한 측선에서 측정한 수심 결과를 바탕으로 ADCP의 수심 측정 적합성을 평가하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 조사시기 및 조사지점

본 연구에서는 자갈 하상과 모래 하상의 특성을 나타내는 지점을 선정하였다. 하상재료가 자갈인 지점은 섬강의 말단지점에 위치한 섬강교 하류 400 m에서 유량 측정을 하였으며 하상재료가 모래인 지점은 황구지천 말단지점에 위치한 수입교 하류 200 m에서 유량측정을 하였다(Fig. 1). 섬강의 측정지점은 자갈로 이루어져 하상단면이 균일하지 않으며 황구지천의 측정지점은 모래하상으로 이루어져 하상단면이 균일한 특징을 가지고 있다(Fig. 2). 분석에 사용된 측정자료는 2017년 1월 10일-13일에 섬강과 황구지천에서 각각 ADV 4회, ADCP 16회를 측정하였다.

### 2.2 측정장비의 종류 및 측정 원리

본 연구에서 유량을 측정하기 위한 유속계의 제원을 비교하여 Table 1에 제시하였다. ADCP의 종류에는 Rio Grande, StreamPro, RiverRay, RiverPro, RiverSurveyor S5, RiverSurveyor M9등이 있지만, 본 연구

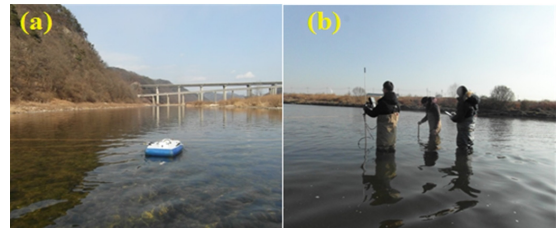


Fig. 1. Field flow measurement in stream using ADCP (a) and ADV (b).

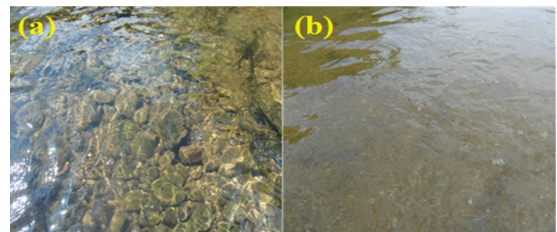
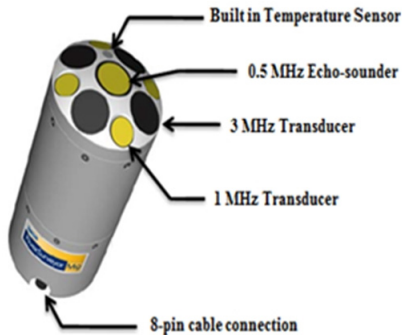


Fig. 2. Field river bed material gravel (a) and sand (b).

**Table 1.** Specifications of various flow measurement equipments

Specifications	Riversurveyor M9	FlowTracker
Range of distance	0.2 - 30 m	Minimum 2 cm
Range of velocity	$\pm 20$ m/s	0.001 - 4.0 m/s
Accuracy	$\pm 0.25\%$ $\pm 0.2$ cm/s	$\pm 1.0\%$ $\pm 0.25$ cm/s
Cell size	0.02 - 4 m	-
Frequency	1.0 and 3.0 MHz	-

**Fig. 3.** Riversurveyor M9 (Riversurveyor S5/M9 System Manual, 2016).

에서는 Sontek사의 RiverSurveyor M9을 이용하였다 (Fig. 3). RiverSurveyor M9의 장점은 협대역 시스템을 사용하며 기기 설정이 간편하고, 수심 셀에 대한 독립적인 유속 측정이 가능하므로 상하층간의 유속 차가 큰 전단류 상황에서 유리하다. 또한, 측면으로 전달되는 에너지가 광대역에 비해 상대적으로 작아 측면효과의 영향이 감소되고, 진폭이 작은 음파를 사용하므로 수중에서 물고기와 같은 큰 반사체에 의한 간섭이 적다. RiverSurveyor M9의 수심측정은 3 MHz 또는 1 MHz 빔으로 측정된 4개의 평균값을 사용하는 하상추적 (bottom tracking) 방식과 0.5 MHz 1개의 빔으로 측정된 값을 사용하는 수직빔 (vertical beam) 방식이 있다. 현장상황에 따라서 하상추적 방식과 수직빔 방식을 바꿔가며 사용할 수 있다. ADCP측정영역은 유속을 직접 측정할 수 있는 측정역 (measured area)과 측정된 유속을 이용하여 간접적으로 유속 및 유량을 추정하는 측정 불가역 (unmeasured area)로 나뉜다. 측정 불가역의 범위가 클 경우 추정유량은 실제 유량에 비해 오차가 클 수 있으므로 도선에 의한 유속-면적법 등 별도의 방법을 동원하거나 유량측정 전에 현장상황을 고려하여 측정을 해야 한다. ADCP와 ADV의 유량 값을 비교하기 위한 장비로 국내에서 일반적으로 사용되고 있고 유속

**Fig. 4.** FlowTracker (Measuring Discharge with Flowtracker Acoustic Doppler Velocimeters 2015).

측정 정확도가 높다고 알려진 Sontek 사의 ADV의 FlowTracker를 사용하였다 (Fig. 4). FlowTracker는 초음파를 이용한 유속계로 얇은 수심, 저유속에서 정밀하게 측정할 목적으로 고안되었다.

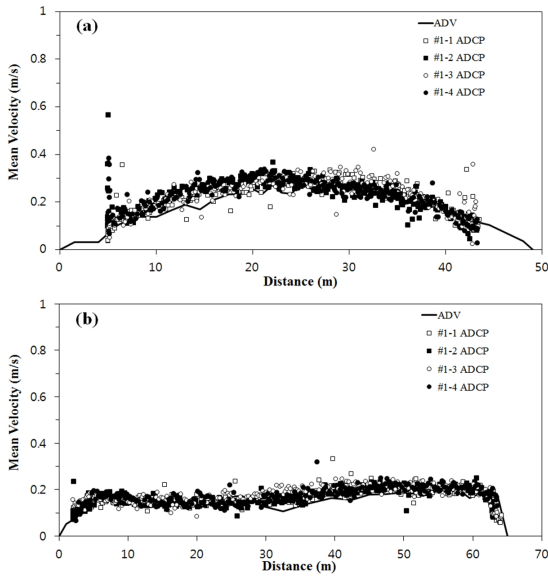
### 2.3 유량측정 방법

ADV의 유량측정 방법은 수질오염공정시험기준의 하천 유량측정 방법과 국토부에서 발간한 수문관측 매뉴얼에 있는 유량측정 방법 기준을 준용하였다. 유량측정 기준으로 국제표준기구 (International Organization for Standardization, ISO), 미국 지질조사국 (United States Geological Survey, USGS) 등의 유량측정기준에 관한 자료를 이용하였다.

ADCP의 유량측정 방법에는 교량법, 횡측선법, 정지측정법 등이 있으며 교량법은 하천을 횡단하는 교량이 있는 곳에서 시행할 수 있다. 교량이 수면에서 너무 높을 경우 ADCP의 제어가 어려우므로 가급적 수면에서 높지 않은 교량에서 측정한다. 횡측선법은 횡측선이 설치 가능한 곳에서 측정할 수 있으며 교량 등의 시설물이 없는 곳에 적절하며 느린 속도로 운영할 수 있으며

**Table 2.** Comparison table of data measured by ADV and ADCP

Station	Case	Width (m)	Depth (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Relative error (%)	Date
Seom Gang River	#1-1 ADCP	49.12	0.56	27.69	6.051	4.06	2017-01-10
	#1-2 ADCP	49.13	0.56	27.55	6.129	5.40	
	#1-3 ADCP	49.11	0.56	27.49	6.067	4.33	
	#1-4 ADCP	48.90	0.57	27.75	6.121	5.26	
	Aver.	49.06	0.56	27.62	6.092	4.76	
	#1 ADV	49.00	0.58	28.24	5.815		
	#2-1 ADCP	49.03	0.56	27.37	6.068	4.93	
	#2-2 ADCP	48.91	0.56	27.57	5.935	2.63	
	#2-3 ADCP	49.29	0.55	27.13	6.029	4.25	
	#2-4 ADCP	49.16	0.56	27.39	5.905	2.11	
	Aver.	49.10	0.56	27.37	5.984	3.48	
	#2 ADV	49.00	0.58	28.29	5.783		
	#3-1 ADCP	49.52	0.55	27.35	5.864	4.05	2017-01-12
	#3-2 ADCP	49.39	0.56	27.59	5.857	3.92	
	#3-3 ADCP	49.20	0.56	27.54	5.878	4.29	
	#3-4 ADCP	49.31	0.55	27.32	5.885	4.42	
	Aver.	49.35	0.56	27.45	5.871	4.17	
	#3 ADV	49.00	0.57	28.17	5.636		
	#4-1 ADCP	49.77	0.55	27.58	6.077	7.39	
	#4-2 ADCP	49.24	0.57	27.96	6.009	6.18	
#4-3 ADCP	49.56	0.57	28.09	5.793	2.37		
#4-4 ADCP	49.47	0.56	27.66	5.772	2.00		
Aver.	49.51	0.56	27.82	5.913	4.48		
#4 ADV	49.00	0.58	28.41	5.659			
Hwangguji Stream	#1-1 ADCP	66.24	0.53	35.10	5.719	1.35	2017-01-11
	#1-2 ADCP	64.90	0.54	34.90	5.753	1.95	
	#1-3 ADCP	65.30	0.53	34.32	5.712	1.22	
	#1-4 ADCP	63.61	0.54	34.51	5.639	0.07	
	Aver.	65.01	0.53	34.71	5.706	1.11	
	#1 ADV	65.50	0.54	35.41	5.643		
	#2-1 ADCP	65.12	0.60	39.75	7.580	2.88	
	#2-2 ADCP	65.28	0.59	39.40	7.483	4.13	
	#2-3 ADCP	65.12	0.59	39.50	7.627	2.28	
	#2-4 ADCP	65.89	0.60	39.38	7.655	1.92	
	Aver.	65.35	0.59	39.51	7.586	2.80	
	#2 ADV	65.50	0.62	40.39	7.805		
	#3-1 ADCP	64.78	0.54	34.98	6.025	3.04	2017-01-13
	#3-2 ADCP	65.60	0.54	35.31	5.861	0.24	
	#3-3 ADCP	65.22	0.54	35.51	5.826	0.36	
	#3-4 ADCP	65.49	0.54	35.46	5.681	2.84	
	Aver.	65.27	0.54	35.32	5.848	0.02	
	#3 ADV	65.50	0.56	36.65	5.847		
	#4-1 ADCP	64.76	0.54	34.75	5.655	4.45	
	#4-2 ADCP	63.72	0.53	33.66	5.331	1.53	
#4-3 ADCP	64.55	0.54	34.60	5.669	4.71		
#4-4 ADCP	66.23	0.54	35.64	5.683	4.97		
Aver.	64.82	0.53	34.66	5.585	3.15		
#4 ADV	65.50	0.54	35.53	5.414			



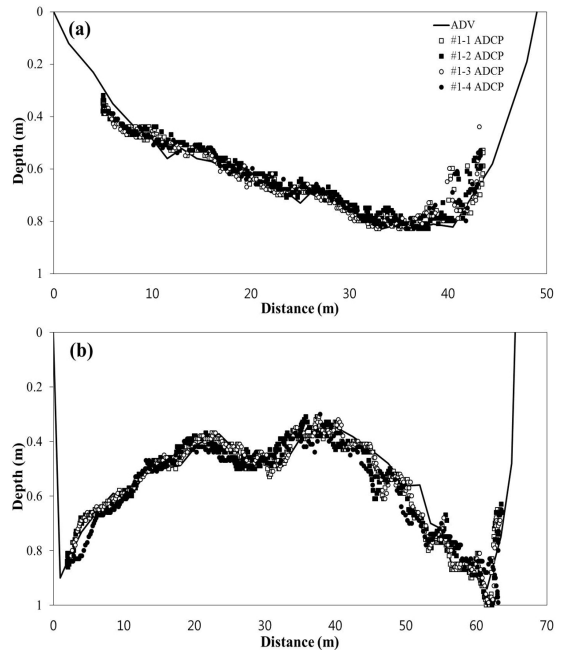
**Fig. 5.** Comparison of ADV and ADCP velocity distribution in gravel bed (a) and sand bed (b).

로 유속이 느린 곳에서도 적용 가능하다. 정지측정법은 교량이나 횡측선이 설치되어야 하고, 교량에서 측정할 경우 수면에서 너무 높지 않아야 한다. 본 연구에서는 ADCP를 보트에 고정시켜 측정하는 횡측선법을 이용하였다. USGS의 경우 조위의 영향을 받는 하천을 제외한 일반적인 하천에서는 최소 4회 이상의 측정을 권장하고 있으며, 그 중 1개의 자료라도 평균 유량오차가  $\pm 5\%$ 를 넘었을 경우 4회의 추가 측정이 바람직하다고 제안하였다(Simpson 2001). 따라서 본 연구에서는 각 지점마다 4회씩 측정하였으며 ADCP의 경우 1회차마다 4회 측정할 수면폭, 수심, 면적 유량, ADV와 ADCP 유량 값의 상대오차를 Table 2에 제시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 유속 분포 비교

측정된 유속 분포 비교는 횡측선을 따라 측정된 모든 연직 유속 분포의 평균치로 산출하였다. ADV는 하천 폭에 따라 횡측선 상에서 30 - 35개 측선의 유속을 측정하지만, ADCP의 경우 한번 횡단에 수백 개 이상의 연속적인 유속자료를 획득하므로 보다 세밀한 유속 분포를 나타냈다. 자갈 하상(a)과 모래 하상(b)에서 측정된 ADV와 ADCP의 유속 분포 비교 자료 중 1 case를 Fig. 5에 나타내었다.



**Fig. 6.** Comparison of depth measurement for ADV and ADCP in gravel bed (a) and sand bed (b).

자갈 하상과 모래 하상에서 ADV와 ADCP의 유속 결과는 비슷하게 나타났지만 자갈 하상의 경우 ADCP 측정 간의(#1-4ADCP) 유속 산포가 크고, 모래 하상은 상대적으로 유속 산포가 작다. 또한 자갈 하상에서는 좌안부터 20 m 까지 ADV의 유속 측정 결과 값과 차이가 있는데, 이는 자갈 하상의 경우 난류의 발생이 커질 가능성이 있기 때문이라고 판단된다. 모래 하상에서는 30 m - 50 m 구간에서 ADV의 유속 측정 결과 값과 차이가 있는데, 이는 수심 약 0.5 m 이하인 부근에서는 ADCP의 잠김 깊이와 측정 공백거리 때문에 센서 부근과 아래의 일정 깊이는 측정이 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

#### 3.2 수심측정 비교

자갈 하상과 모래 하상에서 측정된 ADV와 ADCP의 수심 측정 결과를 Fig. 6에 나타냈다. ADV는 각 지점마다 설치된 30 - 35개의 측선에 대하여 수심 측정 스타프로 측정하였고, ADCP는 횡측선을 따라 측정된 연속적인 데이터를 사용하였다.

자갈 하상과 모래 하상 모두 ADCP로 측정된 수심 측정 자료는 수심 측정 스타프로 측정된 수심과 전반적으로 일치하는 경향을 나타내었으나 자갈 하상의

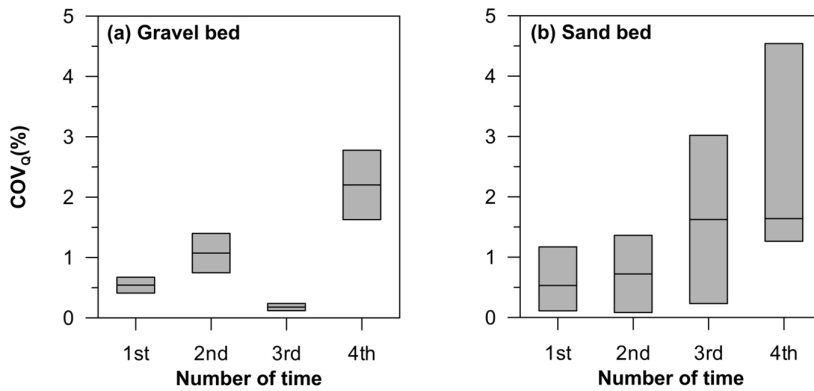


Fig. 7. Coefficient of variation of ADCP data.

경우 좌안에서부터 5 - 15 m 구간과 40 - 45 m 구간에서 일부 차이가 있는 것을 알 수 있다. 이는 자갈 하상의 경우 하상 단면이 불규칙적이기 때문에 측선 간격이 넓을 수록 오차 범위가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. Table 2에는 측정된 하천의 폭과 단면적이 제시되어 있다. 하폭은 자갈 하상의 경우 0.5%, 모래 하상의 경우 0.6% 정도의 오차 범위로 측정되었으며, 단면적은 두 지점 모두 2.5% 정도의 오차 범위로 측정되었다.

### 3.3 유량측정 결과

자갈 하상과 모래 하상에서 측정된 ADV와 ADCP의 유량측정 결과를 비교하여 Table 2에 제시하였다. 각 지점별로 ADV 4회, ADCP 16회의 측정 자료가 수집되었으며, 각 회차마다 동일한 시간 및 수위에서 진행하였다. 자갈 하상에서 ADV와 ADCP로 측정된 개별 자료의 경우 최소 2.00%, 최대 7.39%의 오차가 나타났는데, 이러한 오차는 하상이 불균일하고 자갈, 지름이 20 - 30 cm인 호박돌 (boulder rubble stone) 등에 의해 난류의 발생이 커질 가능성이 있기 때문인 것으로 판단된다. USGS에서는 ADCP를 이용하여 유량을 측정할 경우 4회 이상의 평균값을 유량 측정값으로 결정하는 것이 바람직하다고 제시하였다. 이에 따라 각 case 별로 4회의 평균값을 사용한다고 볼 때 오차는 3.48 - 4.76% 정도 범위로 감소한다.

모래 하상에서 ADV와 ADCP로 측정된 개별 자료의 경우 최소 0.07%, 최대 4.97%의 오차가 나타났으며, 자갈 하상과 마찬가지로 4회의 평균값을 사용한다고 볼 때 오차는 0.02 - 3.15%로 오차 범위가 감소한다. 따라서 ADCP를 이용하여 측정된 유량 값은 자갈 하상

과 모래 하상 모두 ADV의 결과값과 비교하여 큰 오차가 없는 것으로 판단된다.

### 3.4 ADCP 측정 자료 검증

ADCP의 측정 자료 검증을 위해 회차별 유량 변동계수(COV<sub>Q</sub>)를 Fig. 7에 나타내었다. 섬강 지점은 1회차 0.07 - 1.26%, 2회차 0.74 - 1.40%, 3회차 0.12 - 0.24%, 4회차 1.63 - 2.78%로 나타났고, 황구지천 지점에서는 1회차 0.23 - 0.83%, 2회차 0.08 - 1.36%, 3회차 1.26 - 4.54%, 4회차 0.23 - 3.02%로 나타났다. 모두 USGS에서 권장하는 5% 범위 내에 속하여 신뢰성 있는 자료로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 하상재료에 따른 ADCP의 측정 적합성을 평가하기 위해 하상 재료가 다른 자갈 하상과 모래 하상인 지점에서 ADCP의 유속, 수심 및 유량을 측정하였다. ADCP의 측정 결과 자료를 비교하기 위해 국내 하천에서 많이 사용하고 측정 정확도가 높다고 알려진 ADV의 측정 결과값을 사용하였다.

ADCP의 유속과 수심 측정 결과는 자갈 하상과 모래 하상에서 비슷하게 나타났다. 하지만 자갈 하상에서 ADCP의 유속 산포가 크게 측정되었다. 이는 자갈 하상의 경우 모래 하상 보다 난류의 발생이 커질 가능성이 있기 때문인 것으로 판단된다. 유량 측정 결과 자갈 하상에서 평균 3.5 - 4.8%, 모래 하상에서 평균 0.02 - 3.2%의 상대오차 범위를 나타내어 USGS에서 제시한 평균 오차 5% 범위보다 작아 신뢰가 높은 결과로 판단

된다. 이와 같은 연구결과는 향후 ADCP의 하천 적용성에 대한 기초자료로 활용될수 있으며 ADCP의 불확도 평가에 중요한 자료로 이용할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 저갈수기, 저유속의 안정적인 흐름조건 및 특정 현장 조건에 한정된 결과이므로 추후 홍수기, 고유속 등의 다양한 하천환경 및 기기종류에 따른 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 한강수계관리위원회의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2018-05-01-011, 한강수계 유량 관측망 운영).

## References

- Adler, M. and Nicodemus, U. 2001. A new computer model for evaluation of data from acoustic doppler current profiler. *Physics and Chemistry of the Earth(C)* 26(10-12): 711-715.
- Brierley, A.S., Brandon, M.A., and Watkins, J.L. 1998. An assessment of the utility of an acoustic doppler current profiler for biomass estimation. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 45(9): 1555-1573.
- Geyer, W.R. and Signell, R. 1990. Measurements of tidal flow around a headland with a shipboard acoustic doppler current profiler. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 95(C3): 3189-3197.
- Gordon, R.L. 1989. Acoustic measurement of river discharge. *Journal of Hydraulic Engineering* 115(7): 925-936.
- Ji, J.Y., Park, S.Y., Lee, G.W., Park, G.M., Hwang, S.H., Kim, D.H., and Lee, Y.J. 2013. Analysis and comparison of flow rate measurements using various discharge measuring instrument and ADCP. *Journal of Environmental Science International* 22(2): 251-257. (in Korean)
- Kim, C.W., Lee, M.H., Yoo, D.H., and Jung, S.W. 2008. Discharge computation in natural rivers using Chiu's velocity distribution and estimation of maximum velocity. *Journal of Korea Water Resources Association* 41(6): 575-585.
- Kim, D. 2012. Assessment of longitudinal dispersion coefficients using acoustic doppler current profilers in large river. *Journal of Hydro-Environment Research* 6(1): 29-39.
- Kim, E.S., and Choi, H.I. 2009. Verification and application of velocity measurement using price meter and ADCP. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation* 9(3): 101-106. (in Korean)
- Kim, J.M., Kim, D.S., Son, G.S., and Kim, S.J. 2015. Accuracy analysis of velocity and water depth measurement in the straight channel using ADCP. *Journal of Korea Water Resources Association* 48(5): 367-377. (in Korean)
- Lee, C.J., Kim, W., Kim, C.Y., and Kim, D.G. 2005. Velocity and discharge measurement using ADCP. *Journal of Korea Water Resources Association* 38(10): 811-824. (in Korean)
- Lee, J.H., Lee, S.H., Jung, S.W., and Kim, T.W. 2010. Experimental comparison and analysis of measurement results using various flow meters. *Journal of Korean Wetlands Society* 12(1): 95-103. (in Korean)
- Lu, Y., and Lueck, R.G. 1999. Using a broadband ADCP in a tidal channel. Part II: Turbulence. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 16(11): 1568-1579.
- Measuring Discharge with Flowtracker Acoustic Doppler Velocimeters, 2015.
- Nystrom, E.A., Rehmann, C.R., and Oberg, K.A. 2007. Evaluation of mean velocity and turbulence measurements with ADCPs. *Journal of Hydraulic Engineering* 113(12): 1310-1318.
- Reichel, G., and Nachtnebel, H.P. 1994. Suspended sediment monitoring in a fluvial environment: Advantages and limitations applying an acoustic doppler current profiler. *Water Research* 28(4): 751-761.
- Riversurveyor S5/M9 System Manual, 2016.
- Simpson, M. 2001. Discharge measurement using a broadband acoustic Doppler current profiler (p. 123). Reston: US Department of the interior, US Geological Survey.
- Stacey, M.T., Monismith, S.G., and Burau, J.R. 1999. Observations of turbulence in a partially stratified estuary. *Journal of Physical Oceanography* 29(8): 1950-1970.
- Yorke, T.H., and Oberg, K.A. 2002. Measuring river velocity and discharge with acoustic doppler profilers. *Flow Measurement and Instrumentation* 13(5-6): 191-195.