

ADCP를 이용한 직선 하천의 유속 및 수심 측정 정확도 분석

Accuracy Analysis of Velocity and Water Depth Measurement in the Straight Channel using ADCP

김종민* / 김동수** / 손근수*** / 김서준****
Kim, Jongmin / Kim, Dongsu / Son, Geunsoo / Kim, Seojun

Abstract

ADCPs have been highlighted so far for measuring streamflow discharge in terms of their high-order of accuracy, relatively low cost and less field operators driven by their easy in-situ operation. While ADCPs become increasingly dominant in hydrometric area, their actual measurement accuracy for velocity and bathymetry measurement has not been sufficiently validated due to the lack of reliable bench-mark data, and subsequently there are still many uncertain aspects for using ADCPs in the field. This research aimed at analyzing inter-comparison results between ADCP measurements with respect to the detailed ADV measurement in a specified field environment. Overall, 184 ADV points were collected for densely designed grids for the given cross-section that has 6 m of width, 1 m of depth, and 0.7 m/s of averaged mean flow velocity. Concurrently, ADCP fixed-points measurements were conducted for each 0.2 m and 0.02 m of horizontal and vertical spacing respectively. The inter-comparison results indicated that ADCP matched ADV velocity very accurately for 0.4~0.8 of relative depth (y/h), but noticeable deviation occurred between them in near surface and bottom region. For evaluating the capacity of measuring bathymetry of ADCPs, bottom tracking bathymetry based on oblique beams showed better performance than vertical beam approach, and similar results were shown for fixed and moving-boat method as well. Error analysis for velocity and bathymetry measurements of ADCP can be potentially able to be utilized for the more detailed uncertainty analysis of the ADCP discharge measurement.

Keywords : acoustic doppler current profiler (ADCP), acoustic doppler velocimeter (ADV), velocity and water depth measurement, accuracy analysis

요 지

최근 수문관측의 측정 인력과 비용의 절감과 측정 정확도를 높이기 위해 초음파를 이용한 ADCP 유량 측정 방법의 적용이 활발하게 이루어지고 있으며 점점 그 비중이 높아지고 있다. 하지만 ADCP의 유속 및 수심 측정 정확도에 대한 자료가 부족하여 ADCP 측정 결과에 대한 신뢰도를 확신하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 직선하천에서 체계적이고 정밀한 측정을 통해 ADCP의 유속 및 수심 정확도를 분석하였다. ADCP의 유속 측정 정확도를 분석하기 위해 횡단면에 184개의 측정점에서 측정한 ADV 유속 측정 결과와 ADCP의 유속 측정 결과를 비교하여 오차를 계산하였다. 그 결과 바닥을 기준으로 수심비(y/h)가 0.4~0.8 범위에서는 ADCP가 정확하게 유속을 측정하는 것으로 나타났으나, 수면 근처에서는 유속을 작게 측정하였고, 하상 근처에서는 유속을 크게 측정하여 정확도가 떨어지는 것을 확인하였다. 또한 ADCP의 수심 정확도를 분석한 결과 하상추적(bottom tracking) 방식이 약 6%의 오차를 보였고, 연직 빔(vertical beam) 방식이 약 9%의 오차를 보여 식생이 활착한 자연하천의 경우 하상추적 방식이 좀 더 정확하게 수심을 측정하는 것으로 확인하였다. 그리고 고정 측정 방법과 이동 측정 방법의 차이를 검토한 결과 두 방법 모두 유사한 정확도를 나타냈다. 이와 같은 연구 결과는 향후 ADCP의 측정 불확도 평가를 위한 기초 자료로 활용한다면 ADCP를 하천에 적용함에 있어 좀 더 정확한 유속 및 수심 측정이 가능할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 음향 도플러 유속계(ADCP, ADV), 유속 및 수심 측정, 정확도 분석

* 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 (e-mail: kimjongmin@dankook.ac.kr)
Ph.D Candidate, Dept. of Civil & Environmental Eng, Dankook University, Gyeonggi-do 448-701, Korea

** 단국대학교 토목환경공학과 조교수 (e-mail: donsukim@dankook.ac.kr)
Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng, Dankook University, Gyeonggi-do 448-701, Korea

*** 단국대학교 토목환경공학과 연구원 (e-mail: geunsoo87@dankook.ac.kr)
Researcher, Dept. of Civil & Environmental Eng, Dankook University, Gyeonggi-do 448-701, Korea

**** 교신저자, 단국대학교 토목환경공학과 연구전담조교수 (e-mail: seojuny@paran.com)
Corresponding Author, Research Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng, Dankook University, Gyeonggi-do 448-701, Korea

1. 서 론

수자원의 효율적인 계획과 관리를 위해서는 지속적이고 신뢰성 있는 하천의 유량 조사가 매우 중요하다. 하천의 유속 및 수심을 관측하는 것은 일면 쉬워 보이면서도 막상 어느 정도의 정확도를 확보하면서 계측을 하는 것은 생각보다 어렵다. 특히 태풍이 몰아치고 홍수가 나는 상태에서 하천에서 유속 및 수심을 재는 일은 자칫 관측자의 목숨을 담보하는 일이기 때문에 하천 유량 측정의 중요성에도 불구하고 유량 측정에 많은 인력과 비용이 필요하여 유량조사 계획 수립 및 관리에 많은 어려움이 있는 것이 사실이다.

이에 수문관측 선진국에서는 유량 측정 인력과 비용을 절감할 수 있고, 유량측정 정확도를 높이기 위해 전파, 음향 및 영상 기술을 이용한 첨단 유량측정 방법들의 개발 및 적용에 많은 노력을 기울이고 있다. 특히 음파 기술을 이용한 음향 도플러 유속계(ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler) 측정 방법은 1980년대 말부터 도입하여 널리 활용되어 유량 측정 뿐만 아니라 하천에서의 수리동역학적인 특성을 규명하기 위한 연구의 질을 급속도로 향상 시켜왔다. ADCP를 활용한 유량관측은 현존하는 유량 관측 기법 중 매우 정확한 기법으로 알려져 있으며 미국의 경우 지리조사국(USGS)에서는 약 57%에 해당하는 유량관측소의 수위-유량 곡선 구성을 선박, 케이블, 교량 등에서 실시한 ADCP 관측을 통해 이루어지고 있으며 그 비중은 계속 높아지고 있다(Muste et al., 2007). 기존의 회전식 유속계가 하천의 한 지점에서의 유속을 제한적으로 측정할 수 있던 것에 반해 ADCP는 선박에 장착해 횡단 운항함으로써 하천 단면의 수천~수만 지점에서 3차원 유속을 매우 신속하게 측정하여 제공하는 장점이 있다. 또한 ADCP의 정밀한 유속 및 수심자료는 하천의 수리학적 특성을 도출하는데 이용할 수도 있어 하천의 속도장 규명(Dinehart and Burau, 2005), 난류 측정(Stacey et al., 1999; Lu and Lueck, 1999; Schemper and Admiraal, 2002; Nystrom et al., 2002; Howarth, 2002), 바닥전단응력 산정(Kostaschuk et al., 2004; Sime et al., 2007), 유사이동 측정(Rennie et al., 2002), 하천의 생태학적 연구(Shields et al., 2003; Gaeuman and Jacobson, 2005) 및 종방향 확산계수 산정(Carr et al., 2005; Kim et al., 2007) 등의 연구에 ADCP의 측정 자료가 적극적으로 활용되고 있다.

한편 최근에는 ADCP의 활용 범위가 점차 커지면서 ADCP로 측정된 유속, 수심 측정 결과에 대한 정확도 검토에 대한 연구들도 다방면으로 진행되고 있다. 우선 Morlock (1996)과 Mueller (2002)는 ADCP의 유량 측정

결과와 수위-유량 관계식으로 산정한 유량을 비교한 결과 ADCP가 비교적 정확한 유량 측정 결과를 보여준다고 하였으나, 대부분 보트를 이용한 ADCP 유량 측정의 경우 횡단면 전체의 순간유속을 측정하여 유량을 산정하기 때문에 유량 측정 결과에 대한 불확실성은 포함될 수밖에 없다고 하였다. 이를 규명하고자 Gonzalez-Castro et al. (2007)은 AIAA 표준안을 기초로 하여 보트 이동식 측정 방법에 대한 ADCP의 측정 불확도 평가 방법을 제안한 바 있으며, Muste et al. (2010)은 실내 실험에서 ADCP와 ADV의 유속 측정 결과를 분석하여 ADCP 센서 근처에서의 유속이 과소하게 측정되는 양상 및 ADCP 본체가 흐름에 미치는 영향을 분석하여 제시한 바 있다. 또한 Lee et al. (2014)은 과거의 연구 성과 및 실험 자료를 토대로 실내 실험장 및 자연하천에서 Flow tracker와 ADCP의 계측 결과를 비교하여 ADCP가 갖는 유속, 수심 및 유량에 대한 측정 불확도를 GUM 표준안을 기반으로 하여 제시하였다. 또한 국내에서는 Lee et al. (2005)이 하천에서 ADCP 유속과 수심 측정 결과를 유속-면적법의 유속과 도섬봉으로 측정된 수심을 이용하여 비교하여 정확성을 평가하였고, Kim and Choi (2009)는 하상에 고정된 ADCP의 유속 및 수심의 측정 정확도를 현장에 설치한 수위표 및 회전식 유속계와 비교하여 평가한 바 있다. 하지만 과거 ADCP의 유속 및 수심 측정 정확도 검토 결과들만으로 ADCP의 측정 정확도를 일반화시켜 말하기에는 측선 및 측정 수가 부족하다는 한계가 있다. 따라서 ADCP의 측정 불확도 평가 기준을 마련하기 위해서는 실제 하천에서 좀 더 체계적이고 정밀한 ADCP 측정 정확도 분석이 필요한 상황이다.

이에 본 연구에서는 ADCP의 유속 및 수심 측정 정확도를 평가하기 위해 실제 하천 규모의 안동하천실험센터의 실규모 직선 수로에서 횡단면의 유속과 수심을 체계적이고 정밀하게 계측하였다. 이를 통해 동일한 지점에서 측정된 ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)와 ADCP의 유속 측정 결과를 각각 비교하여 ADCP 유속 측정 정확도를 평가하고, 수심별 유속 측정 정확도를 평가하여 ADCP의 유속 측정 한계를 제시하고자 한다. 또한 각 측선의 수심을 정밀 측량한 결과를 이용하여 ADCP의 수심 측정 방법별 정확도를 평가하고자 한다.

2. ADCP의 유속 및 수심 측정 원리

일반적인 유속계들이 하천의 한 지점에서의 유속을 제한적으로 측정할 수 있는 반면에 ADCP는 횡단을 운항함으로써 하천 단면의 수천~수만 지점에서 3차원 유속을 매

우 신속하게 측정한다는 장점이 있다. 그것이 가능한 이유는 ADCP가 20~30도 정도 기울어진 3~4개의 빔을 이용해서 약 200 kHz~3 MHz 분포의 초음파를 발사하여 하천의 부유물질에 반사된 음파의 도플러 편차를 이용하여 일정간격의 깊이 단위로 빔 진행방향의 유속을 측정하고 각각의 빔에서의 유속을 수학적으로 계산하여 3차원 유속을 측정할 수 있기 때문이다(RDI, 1996; SonTek, 2000).

ADCP는 4개의 빔에서 쏘아진 초음파의 도플러 효과를 이용하여 유속을 측정하며, 이 때 4개의 빔을 통해 초음파를 한번 쏘아 반사파를 받은 후 위상차로 유속을 산정하는 비간섭성 맥동 대 맥동 방식(pulse to pulse incoherent or smart pulse off option) 방식과 4개의 빔을 통해 초음파를 두 번 연속으로 발사한 후 수신된 2개의 초음파의 위상차를 통해 유속을 산정하는 간섭성 맥동 대 맥동 방식(pulse to pulse coherent or smart pulse on option) 방식이 있다. 일반적으로 pulse to pulse coherent 방식이 동일한 수심에서 보다 많은 수의 유속 분포를 얻을 수 있으며, 일반적으로 수심이 10 m 이하의 중소규모 하천에서는 pulse to pulse coherent 방식이 많이 사용되고 있고, 그 이상의 수심인 경우에는 pulse to pulse incoherent 방식으로 측정 한다. 유속 측정 방법과는 별개로 Fig. 1과 같이 ADCP로 유속을 측정하기 위해서

는 반드시 음파 송수신기가 수면에 잠겨야하기 때문에 어느 정도의 잠김 깊이만큼은 유속 측정이 어렵고, ADCP의 송수신기로 정상적인 신호를 받기 위해 음파 간섭 등의 효과를 차단하므로 이로 인해 송수신기로부터 어느 정도 수심까지는 유속 측정이 어렵게 된다. 또한 음파가 송수신기에서 출발하여 하상에 도달할 때 강한 반사파를 발생시켜 전달하므로 인해 하상 부근의 유속 측정 시 노이즈가 발생하여 유속 측정이 어렵다는 한계가 있다(Simpson, 2001).

한편 ADCP의 수심 측정은 하상추적(bottom tracking)과 연직 빔(vertical beam)을 사용하는 방법을 사용한다. 하상추적 방법은 Fig. 2에서와 같이 ADCP의 3MHz 또는 1 MHz 빔으로 측정된 4개의 수심을 평균하여 사용한 방법이고, 수직 빔 방법은 ADCP 중앙에 위치한 0.5MHz 빔으로 측정된 수심을 사용한 방법이다. 따라서 현장 상황에 따라 하상추적 방법과 수직 빔 측정 방법의 결과가 차이가 날 수 있다. 하지만 아직까지 두 방법에 따른 정확도를 분석한 연구가 미흡하여 정확한 기준을 제시하기는 어려운 상황이다.

3. 실험 방법 및 조건

본 연구는 Fig. 3과 같은 안동 하천실험센터의 직선수

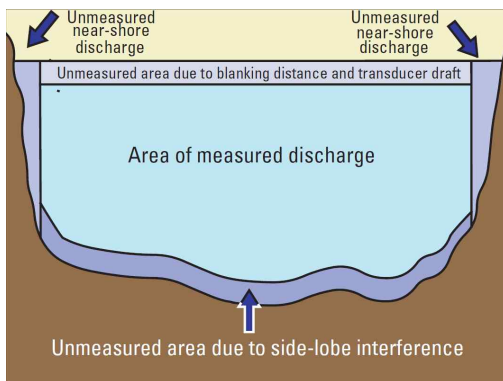


Fig. 1. Unmeasured Areas in ADCP Measurement Cross Section (Simpson, 2001)

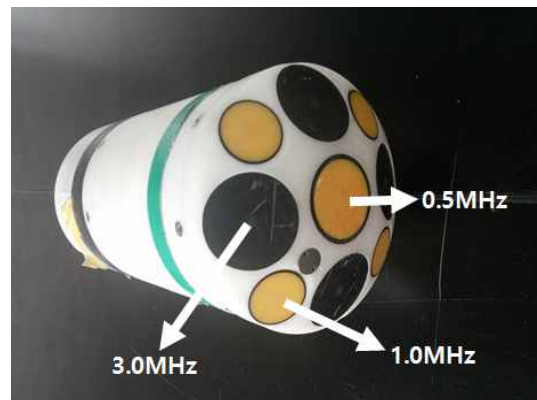


Fig. 2. ADCP M9



Fig. 3. Experiment Site

로에서 수행하였다. 직선수로의 연장은 490m이고, 하상 경사는 약 1/800, 하상재료는 모래로 구성된 이동상 하상으로 일반 중소규모 하천과 거의 유사한 규모와 특징을 갖고 있다. 실험은 흐름의 안정을 확보하기 위해 수로 최상단에서 약 300m 하류 지점에서 수행하였으며, 측정 단면은 Fig. 4와 같은 1:2 경사를 갖는 사다리꼴 단면이고, 하상은 Fig. 5와 같이 모래하상에 약간 식생이 활착되어 있는 상태이다.

본 연구에서 사용한 ADCP는 Fig. 2와 같이 SonTek사에서 제작한 RiverSurveyor M9을 사용하였으며, 해당 계측기는 저수심용 3MHz 빔 4개와 고수심용 1MHz 빔 4개, 그리고 수심측정용인 0.5MHz 빔 1개로 총 9개의 빔을 사용한다. 또한 ADCP의 유속 측정결과를 비교하기 위한 참값으로는 실내 실험에서 유속 측정 정확도가 높다고 알려진 ADV 유속측정 결과를 사용하였으며, 두 계측기기 모두 정확한 측선에 위치시키고 측정을 수행하기 위하여 Fig. 6과 같이 측정 단면의 대차에 고정시킨 후 동일한 측정점에서 계측을 수행할 수 있도록 하였다.

ADV의 유속 측정 방법은 Fig. 7과 같이 0.25m 간격으로 총 27개의 측선을 선정하였으며, ADV의 수심방향 측

점은 0.05~0.1 m 간격으로 하여 총 184개의 측정점에서 유속을 측정하였다. ADCP도 ADV와 마찬가지로 대차에 고정하고 수면에 센서 부분이 잠기게 하여 각 측선별 연직 유속분포를 측정하였다. 또한 ISO 1088 (2007)에서 제시한 측정 정확도가 높은 측정 시간이라고 제시한 300초를 기준으로 ADCP의 측정 시간으로 결정하였고, ADV는 Fig. 8과 같이 초당 50회로 총 300초 동안 측정한 후 이동 평균을 한 결과를 기초로 약 90초 이상에서는 유속 측정 결과가 수렴한다고 판단되어 각 측정별로 90초 동안 측정을 수행하였다. 또한 Fig. 7과 같이 수심이 약 60cm 이상 확보가 되어 ADCP로 유속을 측정할 수 있는 단면(No. 5~No. 22)에 대해서만 정확도 분석을 실시하였다.

한편 ADCP의 정확도 분석을 위해서는 계측하는 동안 수로 내 흐름이 일정하게 유지되는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 특히 실내 수로와 다르게 본 연구의 직선수로는 일반 하천과 같이 하상으로 침투되는 유량이 발생할 수 있기 때문에 흐름이 정류 상태로 안정화되는 것을 확인하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 측정단면을 기준으로 상 하류에 총 6개의 수위표를 설치하고 30분~1시간 간격으로 수위 변화를 관찰



Fig. 4. Experiment Cross Section

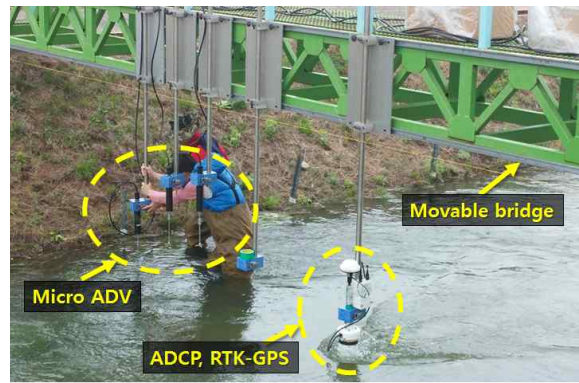


Fig. 6. Measurement Devices



Fig. 5. River Bed of Cross Section

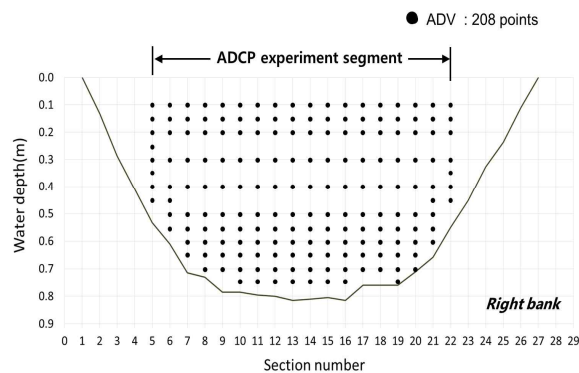


Fig. 7. Experiment Section

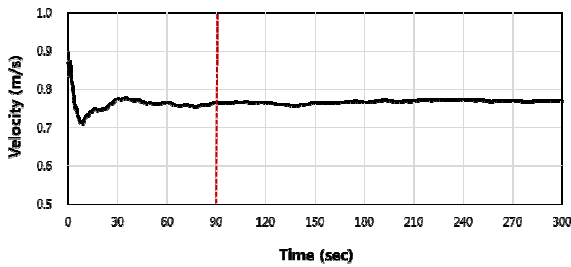


Fig. 8. ADV Moving Averaged Velocity

하였고, ADCP를 이용하여 1~2시간 간격으로 유량을 측정하여 확인하였다. 그 결과 초기 6시간까지는 수위 및 유량의 변화가 확인되었으며, 그 이후 시간동안에는 수위의 변화가 거의 발생하지 않는 것을 확인하였고, 그 이후에 실험 시간(약 22시간) 동안에는 수위 변화가 거의 없이 안정화된 것을 확인하였다.

4. ADCP 유속 측정 정확도 분석

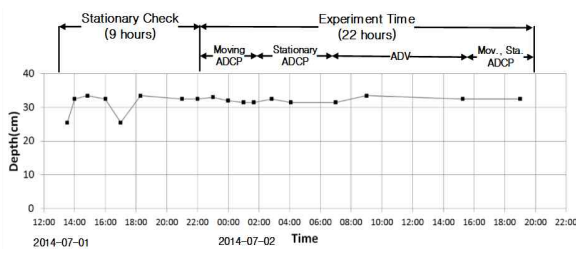


Fig. 9. Steady State Check

ADCP와 ADV를 이용하여 각 측선별로 측정된 유속 결과는 Fig. 10과 같았다. 본 연구의 유속 측정 결과는 실제 하천 규모에서 정확도를 확보할 수 있도록 충분히 시간평균 하였고, 공간적으로도 매우 정밀하게 측정하였기 때문에 전 세계적으로도 매우 희소성 있는 계측 결과라 할 수 있다. ADCP로 측정된 유속과 ADV로 측정된 유속을 비교하면 대체적으로 연직유속분포의 경향을 어느 정

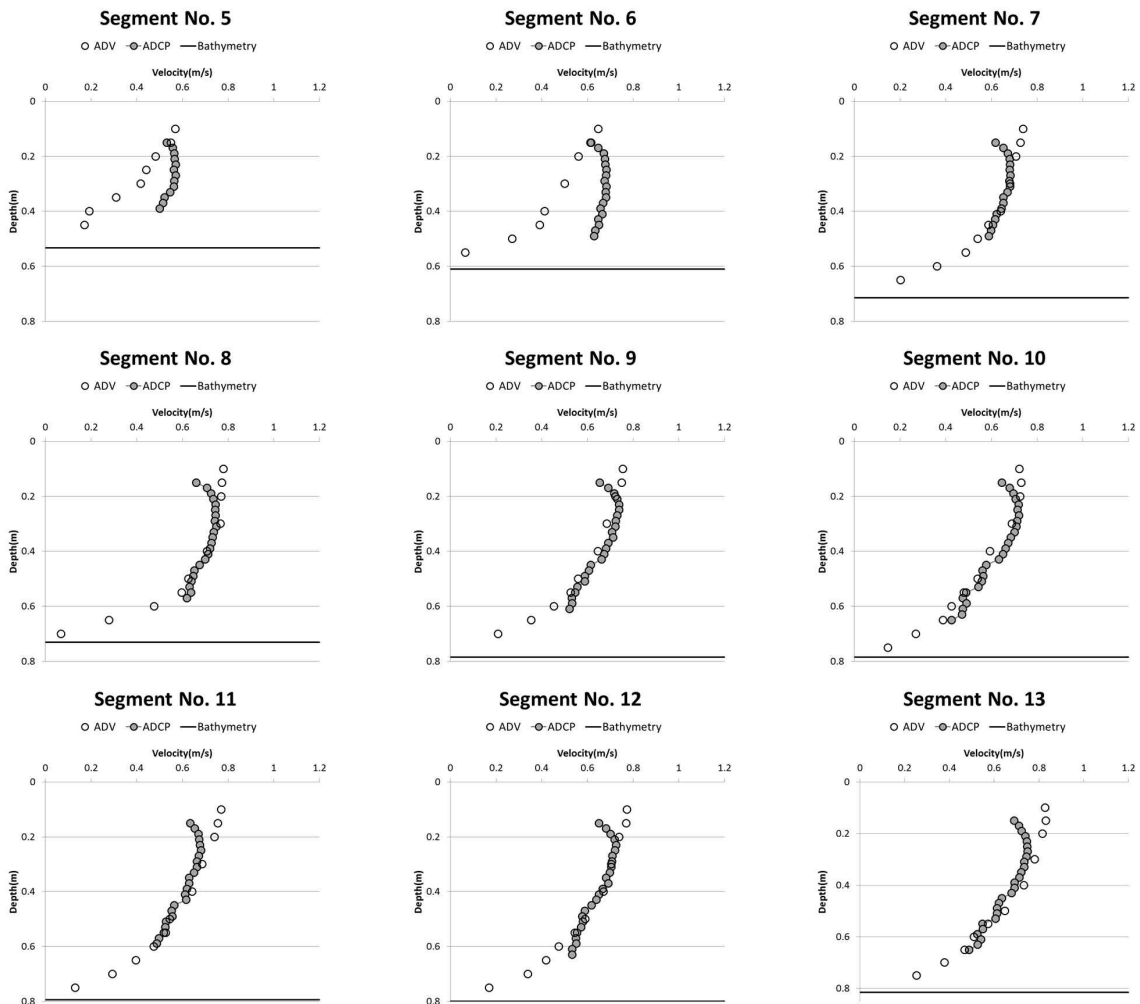


Fig. 10. Velocity Measurement using ADCP and ADV

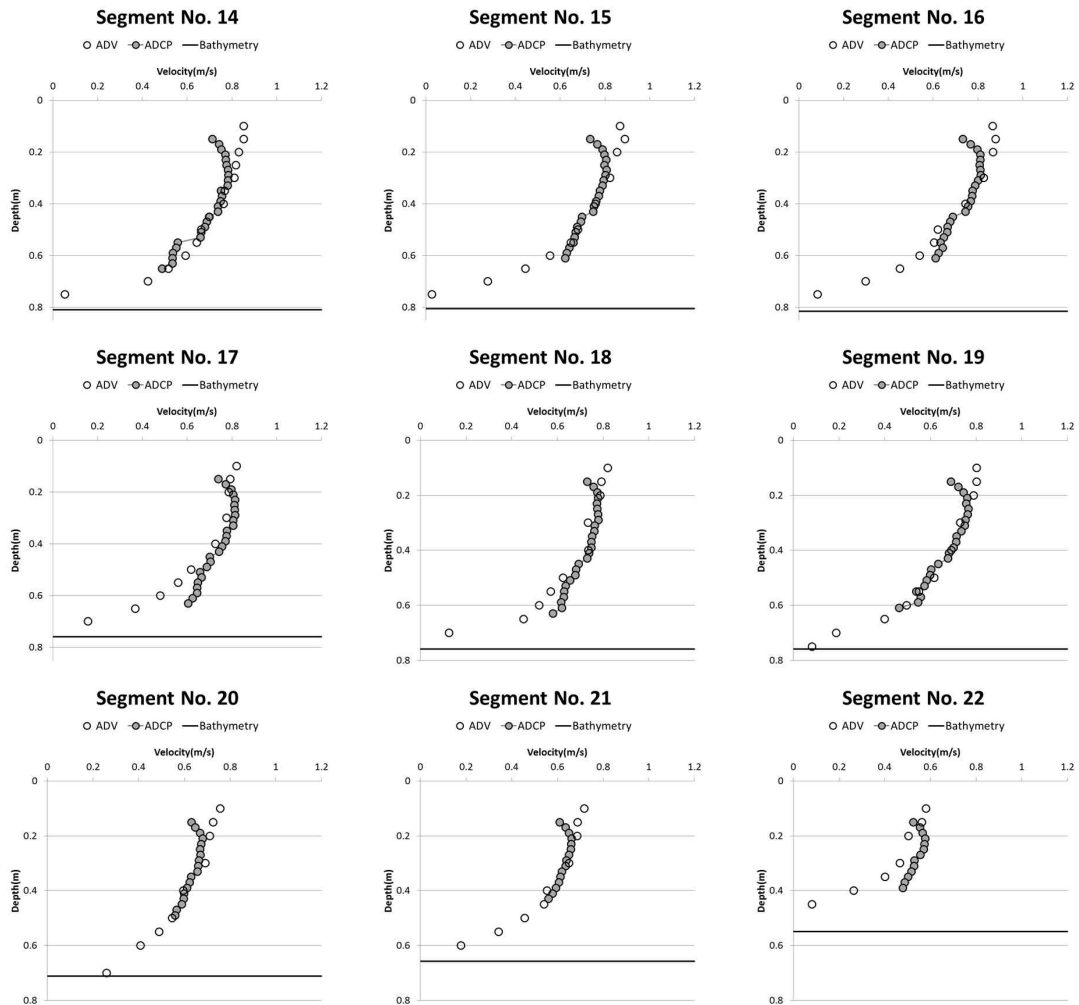


Fig. 10. Velocity Measurement using ADCP and ADV (continued)

도는 정확하게 측정하는 것으로 나타났다. 하지만 No. 5, No. 6 및 No. 22와 같이 수심이 낮은 경우에는 차이가 크게 나타나는 것을 확인하였고, 수표면 근처에서는 ADCP의 유속 측정 결과가 작게 나타나는 경향을 나타냈으며, 하상 근처에서는 유속을 약간 크게 산정하는 경향을 나타냈다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 ADCP 센서와 하상 근처의 잡음으로 인한 오차로 생각한다.

우선 ADCP의 연직방향 유속분포 측정 정확도를 분석한 결과를 구체적으로 살펴보면 No. 5, No. 6 및 No. 22와 같이 수심이 낮은 경우를 제외하면 전체적으로 수면을 기준으로 수심의 25~75%의 영역에서는 ADCP와 ADV의 유속 측정 결과가 유사하게 나타난 것을 확인하였고, 그 외의 부분에서는 두 측정 기법의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 그리고 No. 5, No. 6 및 No. 22와 같이 수심이 0.6 m 이하인 경우에는 ADCP로 유속 측정은 가능하지만 유속 측정 정확도가 크게 떨어지는 것으로 나타났다. 유

속 차이는 바닥으로 갈수록 크게 나타나는 특징이 있어 0.6 m 이하의 수심에서는 ADCP를 이용한 유속 측정은 바람직하지 않은 것으로 판단된다.

한편 수면에서부터 약 0.08m는 ADCP의 센서가 잠긴 깊이이므로 유속 측정이 어려웠고, 바닥에서부터 약 0.15~0.20 m는 유속 측정이 어려운 것으로 나타났다. 바닥의 미세측 영역은 각 측정마다 불규칙하게 나타났으며 이는 하상의 식생 유무에 따른 영향으로 생각한다. 각각의 측선별 연직유속분포를 수심비에 따라 유속 측정 결과를 비교하여 정확도를 평가한 결과 Fig. 11과 같이 나타났다. 바닥을 기준으로 수심비(y/h)가 0.4~0.8 범위에서는 ADV 유속 측정 결과와 비교하여 평균적으로 -3.64~2.60% 차이를 보여 ADCP가 어느 정도 정확하게 유속을 측정하는 것으로 나타났다. 하지만 y/h가 0.0~0.2의 하상 근처의 영역에서는 평균적으로 약 22.21% 정도 유속을 크게 측정하는 경향을 나타냈고, y/h가 0.2~0.4의 범위에서도 마찬가지로

가지로 평균적으로 약 6.74% 정도 유속을 크게 측정하는 경향을 나타나 정확도가 떨어지는 결과를 나타냈다. 또한 y/h 가 0.8~1.0의 ADCP 센서 근처 영역에서는 초음파의 울림 현상(ringing)의 영향으로 인해 ADV에 비해 평균적으로 약 -14.39% 정도 유속을 작게 측정하는 결과를 나타냈다. 수면 근처에서 ADCP가 유속을 과소 산정하는 결과는 Mueller et al. (2007)과 Muste et al. (2010) 및 Lee et al. (2014)에서도 언급한 바와 일치하는 경향을 보였으나 하상 근처에서 ADCP가 유속을 과다 측정하는 경향은 이전 연구에서도 확인할 수 없었던 새로운 결과로 ADCP 측정 불확도 평가에 있어서 본 연구 결과들이 매우 중요한 의미가 있다고 생각한다.

일반적으로 ADCP의 유속 측정 결과에서 신뢰도가 떨어진다고 판단되어 측정 결과 표출 시 제거하는 영역은 유속 측정 단면 상단부의 잠긴 깊이(Draft)와 차단 깊이(blanking distance)이고, 측정 단면 하단부의 음파 산란에 의한 교란 깊이(side lobe interference)이다. 잠긴 깊이는 ADCP의 센서가 실제 잠겨있는 깊이를 측정하는 것으로 본 실험에서는 0.08m가 발생하였으며, 차단 깊이는 약 0.07m로 상단부에서 약 0.15m이다. 또한 음파 산란에 의한 교란 깊이는 수심의 약 10~15%를 기본 값으로 사용하고 있다. 하지만 본 실험 결과에 따르면 상단부의 잠긴 깊이와 차단 깊이 이상의 깊이까지 유속이 과소 측정되었고, 하단부에서도 음파 산란에 의한 교란 깊이 이상의 깊이까지 유속을 과다 측정하는 것으로 나타났기 때문에 향후 상단부와 하단부의 보정 깊이(screening depth) 조정 및 개선에 관한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 생각한다.

5. ADCP 수심 측정 정확도 분석

일반적으로 ADCP를 이용한 수심 측정은 초음파를 이용하기 때문에 하상 근처에서 발생하는 산란으로 인한 교란과 식생과 자갈의 영향으로 인해 실제 하상까지 초음파가 도달하지 못하여 과소 산정될 확률이 높다(Lee et al., 2005; Lee et al., 2014). 이에 본 연구에서는 ADCP의 수심 측정 정확도 분석을 위해 Total station 측량 장비를 이용하여 산정한 수심과 ADCP로 측정한 수심을 비교하였다. Total station의 측정은 ADCP가 측정 가능한 5~22번 측정점에 대하여 ADCP의 측선과 정확하게 일치하도록 하였다. Total station을 사용한 이유는 Total station은 하상의 식생 유무와 상관없이 수심을 정확하게 측정할 수 있기 때문에 ADCP의 초음파를 이용한 수심 측정 시 식생의 영향으로 인한 오차를 확인이 가능하기 때문이다.

ADCP의 수심 측정을 4개의 범으로 측정된 수심을 평균하여 수심을 측정하는 하상추적 방식과 ADCP 중앙에 위치한 1개의 연직 범으로 수심을 측정하는 연직 범 방식에 대하여 모두 검토하였다. 또한 각각의 측정 방법에 따라 Figs. 12 and 13과 같이 ADCP를 대차에 고정된 상태에서 이동시켜 측정한 방법(mov. ADCP)과 고정시켜 측정한 방법(sta. ADCP)에 대하여 검토하였다. 이 때 이동식 수심 측정의 경우는 왕복 3회 실시한 후 평균하였고, 고정식 수심 측정의 경우는 각각의 측선에서 약 300초 동안 측정한 결과를 평균하였다.

ADCP의 수심 측정 정확도 분석 결과 ADCP가 하상에 있는 식생을 측정하는 한계로 인해 전체적으로 Total Station 수심 결과와 비교하여 수심을 과소 측정하는 것으로 나타

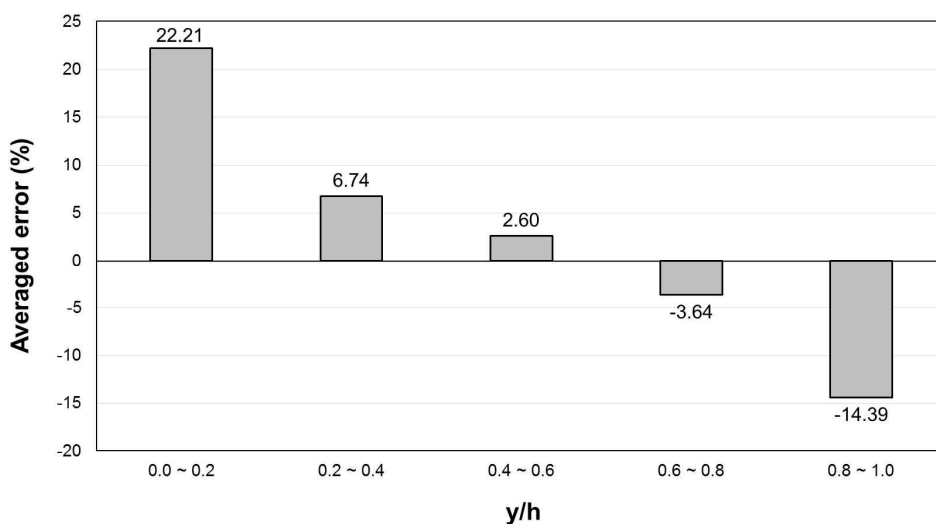


Fig. 11. ADCP Velocity Measurement Error

났다. 구체적으로 하상추적 방식으로 수심을 측정된 결과 Fig. 12와 Table 1과 같이 이동식으로 측정된 경우는 평균적으로 -6.1%의 오차를 나타냈고, 최대 -12.4%까지 오차를 나타냈고, 고정식으로 측정된 경우는 평균적으로 -6.4%의 오차를 나타냈고, 최대 -11.8%까지 오차를 나타냈다. 즉, 이동식으로 측정된 경우가 약간 더 오차가 큰 것으로 나타났지만 대체적으로 이동식과 고정식 모두 유사한 경향을 나타냈다. 또한 두 가지 측정 방법 모두 최대 오차가 발생한 측선은 No. 16 단면으로 식생이 좀 더 많이 분포한 이유로 오차가 크게 나타났다.

한편 연직 빔 방식으로 수심을 측정된 결과 Fig. 13과 Table 2와 같이 이동식으로 측정된 경우는 평균적으로 -9.5%의 오차를 나타냈고, 최대 -16.0%까지 오차를 나타냈으며 이동식으로 측정된 경우는 평균적으로 -9.0%의 오차를 나타냈고, 최대 -12.5%까지 오차를 나타냈다. 앞선 하상추적 방식과는 반대로 이동식 측정이 고정식 측정보다 오차가 약간 크게 나타났지만 측정 결과의 경향은 유사한 것으로 확인하였다. 하지만 하상에 식생이 활착되어 있는 경우는 하상추적 방식이 연직 빔 방식보다 좀 더 정확하게 측정할 수 있는 것으로 나타났다. 그 이유는 본

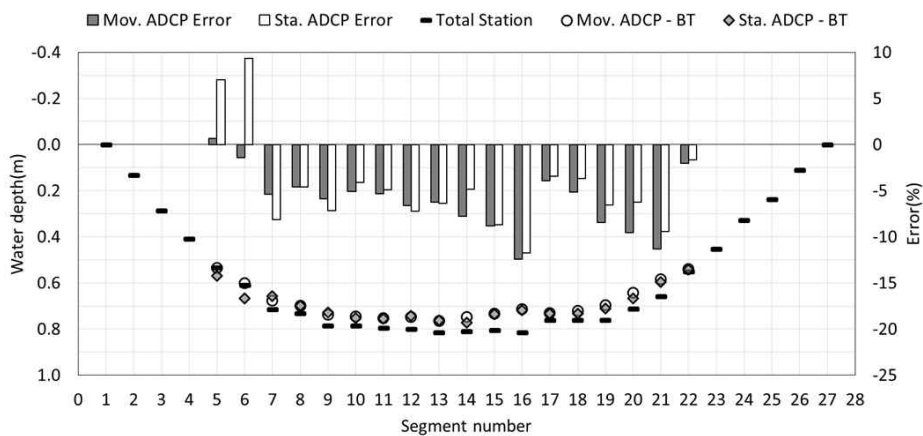


Fig. 12. Result of Bathymetry Measurements using Bottom Tracking Method

Table 1. Bathymetry Measurement Error (Bottom tracking)

Section No.	Total Station [m]	Mov. ADCP [m]	Difference [m]	Error [%]	Sta. ADCP [m]	Difference [m]	Error [%]
5	0.533	0.536	0.004	0.7	0.570	0.038	7.0
6	0.610	0.602	-0.009	-1.4	0.667	0.057	9.3
7	0.715	0.677	-0.038	-5.4	0.657	-0.058	-8.1
8	0.731	0.698	-0.033	-4.6	0.698	-0.033	-4.6
9	0.785	0.739	-0.046	-5.9	0.729	-0.056	-7.1
10	0.785	0.745	-0.040	-5.1	0.753	-0.032	-4.1
11	0.795	0.753	-0.043	-5.3	0.756	-0.039	-4.9
12	0.800	0.747	-0.053	-6.6	0.742	-0.058	-7.3
13	0.815	0.764	-0.051	-6.3	0.763	-0.052	-6.4
14	0.810	0.747	-0.063	-7.8	0.771	-0.039	-4.8
15	0.805	0.734	-0.071	-8.8	0.735	-0.070	-8.7
16	0.815	0.714	-0.101	-12.4	0.719	-0.096	-11.8
17	0.760	0.730	-0.030	-3.9	0.734	-0.026	-3.4
18	0.760	0.721	-0.039	-5.1	0.732	-0.028	-3.7
19	0.760	0.696	-0.064	-8.4	0.710	-0.050	-6.6
20	0.712	0.644	-0.068	-9.6	0.667	-0.045	-6.3
21	0.658	0.584	-0.075	-11.3	0.596	-0.062	-9.4
22	0.550	0.539	-0.011	-2.0	0.541	-0.009	-1.6
Averaged error	-	-	-0.047	-6.1	-	-0.047	-6.4

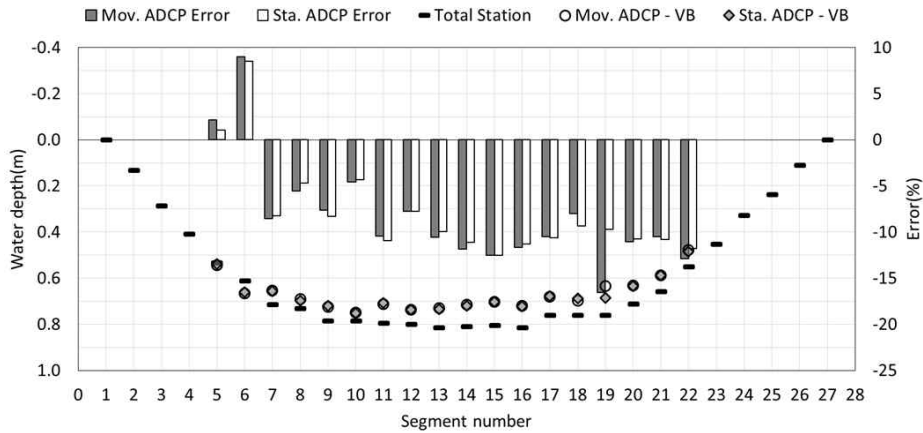


Fig. 13. Result of Bathymetry Measurements using Vertical Beam Method

Table 2. Bathymetry Measurement Error (Vertical beam)

Section No.	Total Station [m]	Mov. ADCP [m]	Difference [m]	Error [%]	Sta. ADCP [m]	Difference [m]	Error [%]
5	0.533	0.544	0.012	2.2	0.538	0.006	1.0
6	0.610	0.665	0.055	9.0	0.662	0.052	8.5
7	0.715	0.654	-0.061	-8.5	0.656	-0.059	-8.3
8	0.731	0.691	-0.040	-5.5	0.697	-0.034	-4.7
9	0.785	0.725	-0.060	-7.6	0.720	-0.065	-8.3
10	0.785	0.749	-0.036	-4.6	0.751	-0.034	-4.3
11	0.795	0.712	-0.083	-10.4	0.708	-0.087	-10.9
12	0.800	0.738	-0.062	-7.8	0.738	-0.062	-7.8
13	0.815	0.729	-0.086	-10.6	0.734	-0.081	-9.9
14	0.810	0.714	-0.096	-11.9	0.720	-0.090	-11.1
15	0.805	0.704	-0.101	-12.5	0.704	-0.101	-12.5
16	0.815	0.720	-0.095	-11.7	0.723	-0.092	-11.3
17	0.760	0.680	-0.080	-10.5	0.679	-0.081	-10.7
18	0.760	0.699	-0.061	-8.0	0.689	-0.071	-9.3
19	0.760	0.634	-0.126	-16.6	0.686	-0.074	-9.7
20	0.712	0.633	-0.079	-11.0	0.635	-0.077	-10.8
21	0.658	0.589	-0.069	-10.5	0.587	-0.071	-10.8
22	0.550	0.479	-0.071	-12.9	0.485	-0.065	-11.8
Averaged error	-	-	-0.071	-9.5	-	-0.067	-9.0

실험 수로의 경우 식생이 드문드문 활착되어 있어서 하상 추적 방식으로 측정하게 되면 식생뿐만 아니라 하상의 모래를 좀 더 포함하여 측정할 수 있기 때문에 좀 더 정확하게 수심을 측정할 수 있었던 것으로 생각한다. 따라서 ADCP로 수심을 측정하고자 할 경우 하상 재료에 따라 측정 방법을 잘 선정할 필요가 있는 것으로 나타났다. 예를 들어 하상이 불규칙하고 식생과 자갈 등이 불규칙하게 분포된 경우는 하상추적 방식을 이용하여 평균적으로 수심을 측정하는 것이 바람직하고, 세굴 등과 같이 지점의 수심을 정확하게 측정하고자 한다면 연직 빔 방식을 사용

하는 것이 바람직할 것으로 생각한다.

6. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 ADCP의 유속 및 수심 측정 정확도를 평가하기 위해 실제 하천 규모의 직선 수로에서 측정된 ADV와 ADCP의 유속 측정 결과를 각각 비교하여 ADCP 유속 측정 정확도를 평가하고, 수심별 유속 측정 정확도를 평가하여 ADCP의 유속 측정 한계를 제시하고자 한다. 또한 각 측선의 수심을 정밀 측량한 결과를 이용하여

ADCP의 수심 측정 방법별 정확도를 평가하였다.

ADCP의 유속 측정 정확도를 분석한 결과 수심이 0.6m 이상 확보된 경우에는 수심의 ADCP와 ADV의 유속 측정 결과의 경향은 유사하게 나타나는 것을 확인하였고, 바닥을 기준으로 수심비(y/h)가 0.4~0.8인 범위에서는 평균적으로 -3.64~2.60%차이를 보여 ADCP가 어느 정도 정확하게 유속을 측정하는 것으로 나타났다. 하지만 y/h가 0.0~0.2범위의 하상 근처 영역에서는 평균적으로 약 22.21% 정도 과다 추정되는 경향을 나타냈고, y/h가 0.2~0.4의 범위에서도 평균적으로 약 6.74%정도 과다 추정되는 경향을 나타냈으며, y/h가 0.8~1.0의 범위에서는 ADCP 센서 근처 영역에서는 평균적으로 약 -14.39%정도 유속을 과소 측정하여 정확도가 많이 떨어지는 것을 확인하였다. 특히 수면 근처에서 ADCP가 유속을 과소 산정한다는 결과는 기존 연구에서 이미 확인되었으나, 하상 근처에서 ADCP가 유속을 과다 측정하는 경향은 이전 연구에서도 확인할 수 없었던 새로운 결과로 ADCP 측정 불확도 평가에 있어서 매우 중요한 의미가 있다고 생각한다.

ADCP의 유속 측정 정확도를 분석한 결과 하상 추적 방식으로 이동하며 수심을 측정한 경우는 평균적으로 -6.1%의 오차를 나타냈고 고정시켜 수심을 측정한 경우는 평균적으로 -6.4%의 오차를 나타냈다. 즉, 이동식으로 측정한 경우가 약간 더 오차가 큰 것으로 나타났지만 대체적으로 이동식과 고정식 모두 유사한 경향을 나타냈다. 또한 연직 빔 방식으로 이동하며 수심을 측정한 경우는 평균적으로 -9.5%의 오차를 나타냈고, 고정시켜 수심을 측정한 경우는 평균적으로 -9.0%의 오차를 나타냈다. 앞선 하상 추적 방식과는 반대로 이동식 측정이 고정식 측정 보다 오차가 약간 크게 나타났지만 측정 결과의 경향은 유사한 것으로 확인하였다. 이와 같이 하상에 식생이 활착되어 있는 경우는 하상 추적 방식이 연직 빔 방식 보다 좀 더 정확하게 측정 할 수 있는 것을 확인하였다. 그 이유는 본 실험 수로의 경우 식생이 드문드문 활착되어 있어서 하상 추적 방식으로 측정하게 되면 식생뿐만 아니라 하상의 모래를 좀 더 포함하여 측정할 수 있기 때문에 좀 더 정확하게 수심을 측정할 수 있었던 것으로 생각한다. 따라서 ADCP로 수심을 측정하고자 할 경우 현장의 하상 상태를 고려하여 측정 방법을 선정할 필요가 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 직선하천에서 ADCP를 이용한 유속과 수심 측정 시 정확도를 평가한 결과 25~75% 정도의 수심 범위에서는 ADCP 측정 유속의 정확도가 높은 것을 나타냈으나 그 이외의 영역에서는 정확도가 다소 떨어지는 것을 확인하였다. 따라서 향후 ADCP의 미측정 영역에 본 연구

에서 정확도가 떨어지게 나타난 영역을 포함시켜 유속 측정 결과를 개선할 수 있는 보간 방법에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 생각한다. 또한 직선하천 뿐만 아니라 다양한 흐름 및 하상 조건에 대한 추가적인 ADCP의 유속 및 수심 측정 정확도 분석 연구가 필요할 것으로 생각한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었으며, 본 연구를 위해 많은 협조를 해주신 여홍구 박사님과 강준구 박사님을 비롯한 한국건설기술연구원 하천실험센터의 관계자분들께 감사의 마음을 전합니다.

References

- Carr, M.L., and Rehmann, C.R. (2005). "Estimating the dispersion coefficient with an acoustic Doppler current profiler." *Proceeding, World Water and Environmental Resources Congress 2005* (CD-ROM), ASCE, Reston, VA.
- Dinehart, R.L., and Burau, J.R. (2005). "Averaged indicators of secondary flow in repeated acoustic Doppler current profiler crossings of bends." *Water Resources Research*, Vol. 41, W09405, doi:10.1029/2005WR004050.
- Gaeuman, D., and Jacobson, R.B. (2005). "Aquatic habitat mapping with an acoustic current profiler: Considerations for data quality." Open-file Report 2005-1163, *U.S. Geological Survey*, Reston, VA.
- González-Castro, J., and Muste, M. (2007). "Framework for estimating uncertainty of ADCP measurements from a moving boat by standardized uncertainty analysis." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 12, pp. 1390-1410.
- Howarth, M.J. (2002). "Estimates of Reynolds and bottom stress from fast sample ADCPs deployed in continental shelf seas." *Proceeding, Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2002* (CD-ROM), ASCE, Reston, VA.
- ISO 1088 (2007). "Hydrometry-Velocity-area Methods Using Current-Meters-Collection and Processing of Data for Determination of Uncertainties in Flow Measurement. International Organization for Stan-

- andardization.”, *ISO 1088*, Geneva, Switzerland.
- Kim, E.S., and Choi, H.I. (2009). “Verification and application of velocity measurement using price meter and ADCP.” *Korean society of hazard mitigation*, Vol. 9, No. 3, pp. 101-106.
- Kim, D.S., Muste, M., and Weber, L. (2007). “Software for assessment of longitudinal dispersion coefficient using acoustic-Doppler current profiler measurements.” *XXXII International Association of Hydraulic Engineering and Research Congress*, Venice, Italy.
- Kim, D.S., and Kang, B.S. (2011). “Validation of assessment for mean flow field using spatial averaging of instantaneous ADCP velocity measurements.” *Journal of Environmental Science International*, Vol. 20, No. 1, pp. 107-118.
- Kostaschuk, R., Villard, P., and Best, J. (2004). “Measuring velocity and shear stress over dunes with acoustic doppler profiler.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 9, pp. 932-936.
- Lee, K.T., Ho, H.C., Muste, M., and Wu, C.H. (2014). “Uncertainty in open channel discharge measurements acquired with streampro ADCP.” *Journal of Hydrology*, Vol. 509, pp. 101-114.
- Lu, Y., and Lueck, R.G. (1999). “Using broadband ADCP in a tidal channel. Part II: Turbulence.” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 16, pp. 1568-1579.
- Morlock, S.E. (1996). Evaluation of acoustic Doppler current profiler measurements of river discharge, *US Geological Survey Water Resources Investigations*, Report 95-4218.
- Muste, M., Yu, K., and Spasjjevic, M. (2004). “Practical aspects ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; part I : moving-vessel measurement.” *Flow measurement and instrumentation*, Vol. 15, No. 1, pp. 1-6.
- Muste, M., Vermeyen, T., Hotchkiss, R., and Oberg, K. (2007). “Acoustic velocimetry for riverine environments.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 115, No. 12, pp. 1297-1298.
- Muste, M., Kim, D.S., and González-Castro, J.A. (2010). “Near-Transducer Errors in ADCP Measurements: Experimental Findings.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, No. 5, pp. 275-289.
- Nystrom, E.A., Oberg, K.A., and Rehmann, C.R. (2002). “Measurement of turbulence with acoustic Doppler current profilers sources of error and laboratory results.” *Proceeding, Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002(CD-ROM)*, ASCE, Reston, VA.
- RDI (1996). “Acoustic Doppler Current Profilers—rinciple of operation.” *A Practical Primer*. San Diego, CA, RD Instruments.
- Rennie, C.D., Millar, R.G., and Church, M.A. (2002). “Measurement of bedload velocity using an acoustic Doppler current profiler.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No.5, pp. 473-483.
- Schemper, T.J., and Admiraal, D.M. (2002). “An examination of the application of acoustic Doppler current profiler measurements in a wide channel of uniform depth for turbulence calculations.” *Proceeding, Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002 (CD-ROM)*, ASCE, Reston, VA.
- Shields, F.D., Knight, S.S., and Church, M.A. (2003). “Use of acoustic Doppler current profilers to describe velocity distributions at the reach scale.” *Journal of the Atmosphere and Water Resources Association*, Vol. 39, No. 6, pp. 1397-1408.
- Simpson, M.R. (2001). Discharge measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler, *US Geological Survey Open-File Report 01-1*.
- SonTek (2000). “Doppler Velocity Log for ROV/AUV Applications.” *SonTek Newsletter*, 6(1), SonTek, San Diego, CA.
- Stacey, M.T., Monismith, S.G., and Burau, J.R. (1999). “Observations of turbulence in partially stratified estuary.” *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 29, pp. 1950-1970.

paper number : 15-021
 Received : 12 March 2015
 Revised : 31 March 2015
 Accepted : 31 March 2015