

# ADCP 정지법 측정 시 미계측 영역의 유량 산정 정확도 분석

## Accuracy Analysis of ADCP Stationary Discharge Measurement for Unmeasured Regions

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

### Abstract

Acoustic Doppler Current Profilers (ADCPs) have capability to concurrently capitalize three-dimensional velocity vector and bathymetry with highly efficient and rapid manner, and thereby enabling ADCPs to document the hydrodynamic and morphologic data in very high spatial and temporal resolution better than other contemporary instruments. However, ADCPs are also limited in terms of the inevitable unmeasured regions near bottom, surface, and edges of a given cross-section. The velocity in those unmeasured regions are usually extrapolated or assumed for calculating flow discharge, which definitely affects the accuracy in the discharge assessment. This study aimed at scrutinizing a conventional extrapolation method (i.e., the 1/6 power law) for estimating the unmeasured regions to figure out the accuracy in ADCP discharge measurements. For the comparative analysis, we collected spatially dense velocity data using ADV as well as stationary ADCP in a real-scale straight river channel, and applied the 1/6 power law for testing its applicability in conjunction with the logarithmic law which is another representative velocity law. As results, the logarithmic law fitted better with actual velocity measurement than the 1/6 power law. In particular, the 1/6 power law showed a tendency to underestimate the velocity in the near surface region and overestimate in the near bottom region. This finding indicated that the 1/6 power law could be unsatisfactory to follow actual flow regime, thus that resulted discharge estimates in both unmeasured top and bottom region can give rise to discharge bias. Therefore, the logarithmic law should be considered as an alternative especially for the stationary ADCP discharge measurement. In addition, it was found that ADCP should be operated in at least more than 0.6 m of water depth in the left and right edges for better estimate edge discharges. In the future, similar comparative analysis might be required for the moving boat ADCP discharge measurement method, which has been more widely used in the field.

**Keywords** : stationary ADCP measurement, discharge accuracy, unmeasured region, velocity profile extrapolation

### 요 지

ADCP는 하천의 3차원 유속과 수심 자료를 매우 효율적이고 빠르게 측정할 수 있으며, 그 자료의 공간 및 시간적 해상도는 기존의 전통적인 유속 측정 방법들과 비교하여 매우 정밀하다는 장점이 있다. 하지만 ADCP는 하상 부근과 센서 근처에서의 미계측 영역이 발생하고 이 미계측 영역의 유속을 얼마나 정확하게 산정하느냐에 따라 ADCP 유량 측정의 정확도에 영향을 미친다. 본 연구에서는 ADCP 유량 산정 시 범용적으로 활용되고 있는 1/6 멱법칙(power law)을 활용한 미계측 영역의 유량 측정 결과의 정확도를 분석하였다. 이를 위해 실규모 직선수로에서 ADCP를 고정시킨 상태에서 측정된 유속 자료를 1/6 멱법칙과 대수 법칙(log law)을 적용하여 외삽 한 유속분포와 유량 산정 결과를 ADV를 이용하여 정밀하게 측정된 결과와 비교하였다. 비교 결과 전체적으로 대수 법칙으로 외삽한 경우가 높은 정확도를 나타냈으며, 수표면 근처 미계측 영역에서는 1/6 멱법칙은 유량을 작게 산정하는 경향을 나타냈고, 하상 근처의 미계측 영역에서는 유량을 크게 산정하는 경향을 나타냈다. 이 결과는 기존 1/6 멱법칙을 활용한 하상 및 수표면 부근 미계측 영역 유량 추정 방법이 오차를 수반함을 의미한다. 따라서 ADCP 정지법 측정 방식을 사용할 경우, 대수 법칙이 1/6 멱법칙보다 정확한 상하부 미계측 유량 추정 결과를 보여주었으므로 대안으로 고려되어야 할 것이다. 또한 제방 근처 미계측 영역의 유량 측정 정확도를 높이기 위해서는 수심이 0.6 m 이상을 확보한 측선을 기준으로 유량을 산정할 경우 신뢰도 높은 유량 측정 결과를 보였다. 향후, ADCP 정지법 측정 방식에 비해 보다 많이 활용되고 있는 보트탑재 이동식 ADCP의 경우도 이와 같은 검증이 필요하다고 하겠다.

**핵심용어** : ADCP 정지법 측정, 유량 측정 정확도, 미계측 영역, 유속분포 외삽

\* 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 (e-mail: kimjongmin@dankook.ac.kr)  
Ph.D Candidate, Dept. of Civil & Environmental Eng, Dankook University, 152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 448-701, Korea  
\*\* 단국대학교 토목환경공학과 연구전담조교수 (e-mail: seojuny@paran.com)  
Research Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng, Dankook University, 152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 448-701, Korea  
\*\*\* 단국대학교 토목환경공학과 연구원 (e-mail: geunsoo87@dankook.ac.kr)  
Researcher, Dept. of Civil & Environmental Eng, Dankook University, 152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 448-701, Korea  
\*\*\*\* 교신저자, 단국대학교 토목환경공학과 조교수 (e-mail: dongsu-kim@dankook.ac.kr, Tel: 82-31-8005-3611)  
Corresponding Author, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng, Dankook University, 152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 448-701, Korea

## 1. 서 론

최근 초음파를 이용한 계측 장비들의 등장으로 하천에서의 수리동역학적 특성을 규명하기 위한 연구 또는 기술 수준이 급속히 발전하고 있다. 초음파를 이용한 수리계측 장비는 하천의 부유 물질에 반사된 음파의 도플러 편차를 이용하여 유속까지 관측할 수 있는 기법으로 음파 도플러 유속계(ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler)가 대표적인 계측기기이다. ADCP는 하천의 3차원 유속과 수심 자료를 매우 효율적이고 빠르게 측정할 수 있으며, 그 자료의 공간 및 시간적 해상도는 기존의 전통적인 유속 측정 방법들과 비교하여 매우 정밀하다는 장점이 있다. 이와 같은 이유로 ADCP는 국내·외에서 하천의 유속, 수심 및 유량 등의 다양한 정보를 측정할 수 있는 기기로 다양하게 활용되고 있다(Rehmel, 2006; RDI, 2012; Frizell and Vermeyen, 2007; Muste et al., 2007; Mueller and Wagner, 2009; Gunawan et al., 2010; USGS, 2011; Garcia et al., 2012). 하지만 ADCP를 이용한 하천 유량 측정 방법도 어느 정도 한계를 갖고 있다. 예를 들어 측정자와 측정 방법에 따라 유속, 수심 및 유량 측정 결과가 많은 불확실성을 갖고 있다(Frizell and Vermeyen, 2007; Gunawan, 2010). 따라서 ADCP의 장점을 최대한 활용하면서 정확도 높은 계측 결과를 도출하기 위해서는 ADCP의 유량 산정 정확도에 대한 정밀하고 체계적인 검토가 필요하다.

ADCP의 유량 측정 정확도는 기기의 좌표 보정, 측정 횟수 및 측정 시간 등과 같이 측정 과정의 오차 요인들에 의해 영향을 받을 수 있기 때문에 사용자에게 따라 유량 측정 결과의 차이가 발생할 수 있다. 이를 위해 미국 USGS의 OSW (Office of Surface Water)에서 제공하는 ADCP를 이용한 유량 측정과 자료 취급에 관한 품질 관리상의 지침에 따르면 각 단면에서 최소 4회(2회 왕복) 단면 유량 측정을 실시하고, 4회 계측 자료를 비교하여 5% 이상의 차이가 발생하는 경우에는 4회를 다시 측정하여 총 8회 측정 결과를 평균한 값을 측정 유량으로 제시하도록 하였다(Oberg et al., 2005). 이 방법은 미국뿐만 아니라 전 세계에서 널리 사용하고 있지만 엄밀하게는 측정값들 간의 차이를 줄이고자 하는 방법이기 때문에 실제 유량 측정값에 포함되어 있는 오차들은 여전히 포함할 수밖에 없다는 한계가 있다. 따라서 ADCP가 측정된 유속을 이용하여 유량을 얼마나 정확하게 계산하는지에 대한 검토를 통해 ADCP의 유량 측정 오차를 개선하려는 노력이 필요하다.

ADCP의 유량 측정 한계로 언급되고 있는 대표적인 요인으로 초음파로 측정할 수 없는 미계측 영역의 유량 산

정 방법이 있다. ADCP의 미계측 영역에 대한 유속 및 유량 외삽 방법에 관련해서는 Muste et al. (2004)이 하천에서 ADCP로 측정된 수심방향 연직유속분포 측정 자료를 기초로 1/6 멱법칙을 적용하여 미계측 영역의 유속을 계산하고 Sontek사의 Flowtracker로 측정된 유속들과 비교하여 1/6 멱법칙으로 외삽 방법의 문제점을 제시하였다. 또한 Muste et al. (2010)은 고정 측정식 ADCP의 측정 정확도를 분석하기 위하여 실내실험에서 ADV와 ADCP의 유속측정 결과의 비교를 통해 초음파의 울림 현상(ringing)의 영향으로 ADCP가 수면부근에서 유속을 과소 추정한다고 발표한 바 있으며, Huang (2012)은 유속분포의 상/하단을 1/6, 1/2, 1/20을 지수로 사용한 멱법칙으로 외삽한 결과를 비교하여 각각의 지수에 대한 ADCP의 유속 측정 불확도를 평가한 바 있다. 또한 Lee et al. (2014)은 실제 하천에서 관측한 StreamPro ADCP와 Sontek사의 FlowTracker 자료를 이용하여 중앙단면법으로 계산한 ADCP의 유량 측정 결과에 대한 불확도를 제시한 바 있다. 국내에서는 Lee et al. (2010)이 ADCP로 측정된 유량을 댐 방류량, LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) 및 봉부자로 측정된 유량과 비교 검토한 연구들은 있었으나, ADCP가 갖고 있는 유량 측정 한계를 상세하게 분석한 연구는 아직까지 이루어지지 못하였다.

현재 ADCP를 이용한 유량측정에 있어서 수심방향 유속분포의 외삽 방법으로 대부분 1/6 멱법칙을 사용하고 있다. 그 이유는 1/6 멱법칙으로 외삽을 하게 되면 수심방향 유속분포를 강제로 고정시킬 수 있기 때문에 현장 상황에 따라 발생할 수 있는 잡음의 영향을 줄일 수 있기 때문이다. 특히 보트를 이용하여 ADCP 유량 측정을 할 경우 잡음의 영향으로 유속분포의 형태가 현실적이지 않게 나오는 경우가 있기 때문에 일정 기준으로 잡음의 영향을 제거하는 것이 실무적으로는 바람직할 수 있다. 하지만 하천에서 1/6 멱법칙으로 외삽을 하였을 때 발생하는 오차에 대해서는 전 세계적으로 아직까지 제시된 바가 없기 때문에 ADCP의 유량 측정 결과의 신뢰도를 낮추는 요인이 되고 있다. 뿐만 아니라 수심이 낮은 제방 근처의 미계측 영역에 대한 유량 외삽 방법에 대해서도 아직까지 명확한 정확도 평가가 이루어지지 못한 실정이다.

이에 본 연구에서는 ADCP의 미계측 영역의 유량 측정 결과의 정확도를 분석하기 위해 실규모 직선수로에서 ADCP를 고정시킨 상태에서 측정된 유속분포와 ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)를 이용하여 정밀하게 측정된 유속분포를 비교하였다. ADCP의 미계측 영역에 대한 유속분포 외삽을 위해 1/6 멱법칙과 대수 법칙을 적용하였으며

각각의 오차를 비교하여 미계측 영역의 유속분포 외삽 방법의 대안을 제시하였다. 또한 ADV로 측정된 유속 자료를 이용하여 산정한 유량 참값을 기준으로 1/6 멱법칙과 대수 법칙을 적용하여 산정한 ADCP의 미계측 영역의 유량에 대한 오차를 정량적으로 분석하였다. ADCP의 미계측 영역은 수심방향으로 수표면 근처 영역과 하상 근처 영역으로 나누어 오차를 분석하였으며, 횡방향으로 좌우안의 제방 근처 영역에 대한 오차를 분석하였다.

## 2. ADCP의 미계측 영역의 유속 및 유량 산정 방법

ADCP를 이용한 유량 측정 방법도 기존의 하천 유량 측정 방법과 마찬가지로 하천 횡단면의 유속 분포를 모두 측정하여 유량을 산정할 수는 없다. 왜냐하면 ADCP가 초음파의 도플러 효과로 측정된 유속을 이용하여 유량을 산정하기 때문에 Fig. 1과 같이 하천의 횡단면을 기준으로 크게 세 부분의 미계측 영역이 존재한다. 첫 번째로 ADCP의 잠김 깊이(submerged depth)와 음파의 공백거리(blanking distance)를 포함한 수표면 근처 미계측 영역(top zone)에서는 유속을 측정할 수 없다. 왜냐하면 ADCP가 유속을 측정하기 위해서는 음파 송수신기가 수면 아래 잠겨 있어야 하고, ADCP는 음파의 송·수신으로 변경하는 과정에서 음파를 수신하지 못하기 때문에 유속 측정이 어렵다. 두 번째로 음파를 쏠 때 발생하는 사이드 로브(side lobe)가 하상에 반사되면서 주 음파(main lobe)의 측정 결과를 교란시키는 음파 간섭에 의한 교란 깊이(side lobe interference) 만큼은 하상 근처 미계측 영역(bottom zone)에서 유속을 측정할 수 없다. 그 이유는 음파가 송수신기에서 발생하여 하상으로 전달될 때 음파의 확산각이 아닌 빗겨간 방향으로 일부 음파가 정상적인 음파에 비해 일찍 하상에 도달되어 강한 반사파를 발생시켜 전달되므로, 하상 부근의 유속 측정 시 노이즈가 발생하는 측면 효과가 존재하기 때문이다. 이와 같은 이유로 ADCP는 일정 수심

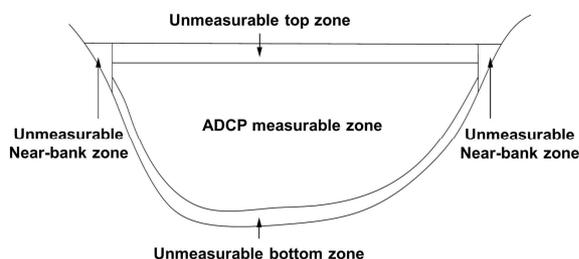


Fig. 1. Limitation of Discharge Measurement using ADCP

이상에서만 유속 측정이 가능하다는 한계를 갖게 된다. 따라서 세 번째로 제방 근처 미계측 영역(near-bank zones or edge zone)의 수심이 얇은 부분에서는 앞에서 언급한 잠김 깊이, 공백거리 및 음파 산란에 의한 교란 깊이가 중첩되기 때문에 유속을 측정하지 못한다. 이와 같은 한계를 극복하기 위해 ADCP로 측정 가능한 영역의 유속 측정 자료를 기초로 외삽 작업을 거쳐 각각의 미계측 영역의 유속 및 유량을 산정한다.

일반적으로 ADCP 미계측 영역의 유속은 RDI (1996)와 SonTek (2000)에서 제안한 방법을 사용하여 외삽하고 있다. 우선 각각의 미계측 영역의 유속의 외삽에 앞서 미계측 영역의 범위를 정확하게 결정하는 것이 중요할 것이다. 이를 위해 수표면 근처의 미계측 영역 중에서 잠김깊이는 수면에서부터 ADCP 센서까지의 깊이를 실제로 측정하여 결정하고, 공백거리는 잠김깊이를 기준으로 수심아랫방향으로 약 10cm 정도로 결정한다. 또한 하상 근처의 미계측 영역인 음파 산란에 의한 교란 깊이는 전체 수심의 대략 10%로 결정한다. 제방 근처의 미계측 영역은 ADCP 측정이 가능한 지점을 기준으로 하여 현장에 적합하도록 결정하고 있다. 하지만 미계측 영역의 범위는 측정하고자 하는 현장 상황에 따라 달라질 수 있기 때문에 다양한 하천 형태, 흐름조건 및 하상 조건에 대한 미계측 영역의 범위를 결정하는데 있어 많은 주의가 요구된다.

ADCP는 각각의 미계측 영역의 유속 외삽을 위해 Fig. 2와 같이 선형외삽법(linear interpolation)과 1/6 멱법칙을 사용하고 있다. 선형외삽법의 경우는 외삽 작업이 간단하지만 정확도가 많이 떨어지기 때문에 일반적으로 1/6 멱법칙을 이용하여 미계측 영역의 유속을 결정한다.

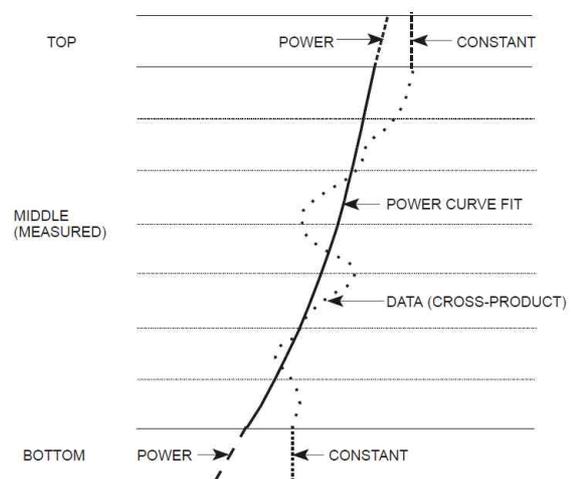


Fig. 2. Discharge Extrapolation Method (RDI, 2003)

또한 USGS에서는 경험적인 연구 결과들을 통해 ADCP의 미계측 영역의 유속 외삽을 위해 Eq. (1)과 같이 Chen (1991)이 제안한 1/6 멱법칙을 추천하고 있다(Simpson, 2001; Oberg et al., 2005).

$$\frac{u}{u_*} = 9.5 \left( \frac{z}{z_0} \right)^{1/6} \quad (1)$$

여기서,  $u$ 는 바닥으로부터  $z$ 만큼 떨어진 지점의 유속,  $u_*$ 는 마찰속도,  $z$ 는 바닥으로부터의 거리,  $z_0$ 는 바닥 조고이다.

RDI사와 SonTek사에서 제공하는 ADCP 유량 측정 소프트웨어에서도 1/6 멱법칙의 지수를 변경할 수 있는 옵션이 추가적으로 있기는 하지만 실제 하천의 흐름특성에 대한 정확한 정보를 알기 어렵기 때문에 일반적으로 1/6을 지수로 사용하고 있다(RDI, 2003; Sontek, 2000). 하지만 실제 하천의 모든 흐름 조건에 대하여 항상 1/6 멱법칙을 이용하여 미계측 영역의 유속을 외삽한다는 것은 ADCP의 오차를 발생시킬 수 있기 때문에 이에 대한 기준 마련이 필요한 실정이다.

한편 하천의 제방 근처 영역의 경우 ADCP로 유속을 측정하기 어렵기 때문에 유속 외삽을 할 수 없다. 따라서 제방측에 가장 가까운 지점의 수심평균 유속을 이용하여 유량을 외삽한다. 일반적으로 ADCP로 측정 가능한 최외측 지점에서 10초 이상 측정된 수심 평균유속 및 수심을 활용하여 산정하게 되고, 제방 근처의 미계측 영역 유량은 Eq. (2)와 같이 계산한다(RDI, 2003).

$$v = c \times b \times y_s \times \bar{v} \quad (2)$$

여기서,  $b$ 는 ADCP 유속 측정이 가능한 최외측 단면에서 하안까지의 거리(m),  $y_s$ 는 ADCP 유속 측정이 가능한 최외측 단면의 수심(m),  $\bar{v}$ 는 ADCP 유속 측정이 가능한 최외측 단면의 수심 평균유속(m/s),  $c$ 는 단면 형상에 따른 경험적인 상수로 삼각형인 경우는 0.3535, 사각형 형상인 경우는 0.91이다(Fulford and Sauer, 1986).

이와 같이 ADCP의 미계측 영역의 유속과 유량의 외삽 방법에 따라 ADCP의 유량 측정 결과의 정확도에 직접적으로 영향을 미치므로 ADCP를 이용한 하천 유량 측정 결과에 많은 불확실성을 포함시키게 된다(Le Coz et al., 2012). 따라서 ADCP의 유량 측정 정확도를 평가하기 위해서는 실제 하천에서 ADCP의 미계측 영역의 외삽 결과에 대한 정확도 검토가 반드시 필요하다.

### 3. 실험 하천 실험 개요

본 연구에서는 한국건설기술연구원 하천실험센터의 실험 직선수로에서 실험을 수행하였다. 직선수로의 총 연장은 490m이고, 하상경사는 약 1/800이다. 또한 Fig. 3과 같이 하상재료는 모래로 구성되어 있으며 자연 상태의 하천과 같이 식생이 활착되어 있어 실제 하천과 거의 유사한 수로 조건을 가지고 있다. 본 실험은 공급 유량의 안정화를 위해 수로 최상단 위어에서부터 약 300m 정도 하류 지점에서 수행되었으며, 실험 중 정류조건이 만족되는지를 검토하기 측정단면을 기준으로 상 하류에 총 6개의 수위표를 설치하고 30분~1시간 간격으로 수위 변화를 관찰하였다. 그 결과 유량 공급 시작부터 약 6시간 동안은 약  $\pm 10$ cm의 수위 변화가 확인되었으나 그 이후로 약 22시간 동안에는 수위 변화가 거의 없이 직선수로 내 흐름이 안정화 된 상태에서 실험을 진행하였다. 이 때 흐름조건은 수면 폭이 약 6.75m이고 최대 수심은 0.8m이었다.

ADCP 미계측 영역의 유량 측정 정확도를 평가하기 위해 본 연구에서는 일반적으로 실내 실험에서 측정 정확도가 높다고 알려진 MicroADV를 이용하여 측정된 유속과 이를 이용하여 산정한 유량 결과를 참값으로 사용하여 ADCP 측정 오차를 계산하였다. 이를 위해 ADCP와 ADV의 유속 측정 위치를 정확히 일치시키는 것이 무엇보다 중요하기 때문에 Fig. 4와 같이 직선수를 횡단하는 대차에 Figs. 5 and 6과 같이 ADCP와 ADV를 고정시키고 동



Fig. 3. Experiment Cross Section

일한 위치에서 유속을 정확하게 측정할 수 있도록 하였다. 또한 가능한 미세측 영역의 유속을 정밀하게 측정하기 위해 Fig. 7과 같이 ADCP와 ADV의 측선 간격을 0.25 m로 하여 총 27개 측선을 선정하였으며, 수심방향으로는 약 5~10 cm 간격으로 유속 측정을 실시하였다. 즉, 횡단면 내에 총 208개의 유속 측정 지점을 설치하였다. 특히 ADV의 경우 센서의 끝단에서 5 cm 아래지점의 유속을 측정하는 것을 기준으로 해서 ADV 측정점을 결정하였다. ADCP의 측정시간은 ISO 1088 (2007)와 Lee et al. (2014)이 측정 정확도를 신뢰할 수 있다고 제시한 300초로 결정하였으며, ADV의 측정시간은 한 지점에서 300초 동안 측

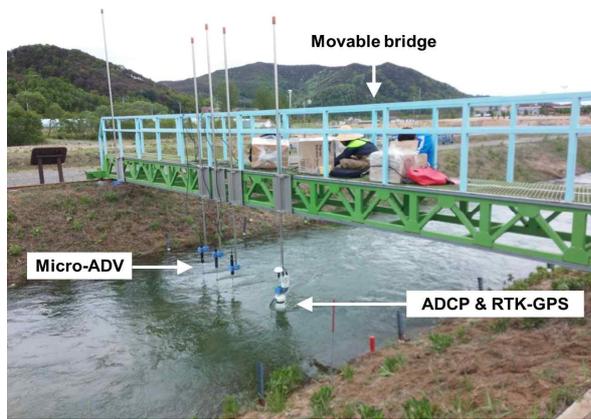


Fig. 4. Measurement Devices



Fig. 5. ADCP and RTK-GPS



Fig. 6. Micro-ADV

정한 후 이동평균 유속이 어느 정도 수렴한다고 확인된 90초를 기준으로 하여 유속 측정을 수행하였다.

#### 4. ADV를 이용한 미세측 영역 유량 측정

ADCP의 미세측 영역의 유속 및 유량 참값을 확보하기 위해 본 연구에서는 Fig. 8과 같이 208개의 측정점에서 ADV를 이용한 정밀 유속 측정을 통해 미세측 영역의 유량을 산정하였다. 하지만 ADV를 이용하여 5~10 cm 간격으로 유속을 아주 정밀하게 측정한다 하여도 Fig. 8과 같이 수표면과 바닥 근처의 유속은 측정이 어렵기 때문에 본 연구에서는 ADV를 이용하여 측정된 유속을 수심방향으로 외삽하여 미세측 영역의 유속 자료를 확보하여 유량을 계산하였다.

ADV를 이용한 미세측 영역의 유량 산정 결과의 정확도를 높이기 위하여 본 연구에서는 대수 법칙과 1/6 멱법칙을 이용하여 유속을 계산하였다. ADV 유속 측정 결과의 외삽을 위해 대수 법칙은 Eq. (3)을 이용하였고, 1/6 멱법칙은 Eq. (1)을 이용하였다.

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \log(z^+) + A \quad (3)$$

여기서,  $U^+ = u/u_*$  이고,  $z^+ = zu_*/\nu$ ,  $u_*$ 는 마찰속도,  $A$ 는 적분상수,  $\kappa$ 는 von Karman 상수,  $z$ 는 벽면으로부터의 거리,  $\nu$ 는 동점성계수이다.

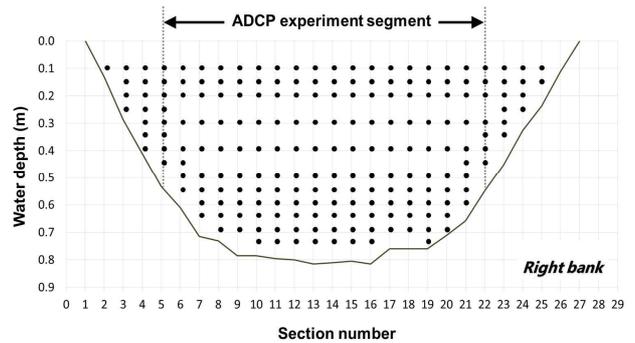


Fig. 7. Measurement Section and Point

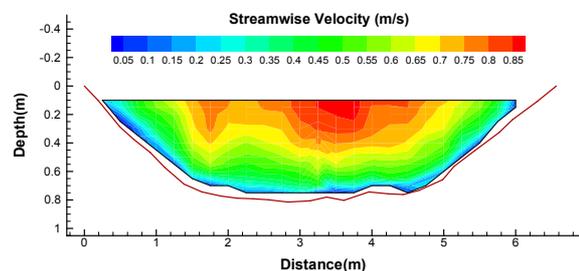


Fig. 8. Result of Velocity Measurement Using ADV

ADV를 이용한 수심방향 유속 측정 결과는 Fig. 9와 같이 대수 법칙의 경우 RMSE가 0.027 m/s로 ADV 측정 결과를 어느 정도 정확하게 외삽하는 것으로 나타났고, 1/6 멱법칙을 이용한 경우는 RMSE가 0.128 m/s로 대수 법칙에 비하여 정확도가 낮은 모의 결과를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 실제 ADV 유속 측정 결과를 잘 나타낼 수 있는 대수 법칙으로 외삽을 한 유속 결과를 이용하여 유량 참값을 계산하였다.

ADV로 측정된 각각의 수심방향 유속분포를 이용한 횡단면 유량 산정은 Eq. (4)와 같이 중간단면법을 사용하였다. 또한 수심이 너무 낮아서 ADV로도 측정하지 못한 좌안측 No. 1과 No. 2 및 우안측 No. 26과 No. 27의 유량은 Eqs. (5) and (6)과 같이 ADCP의 제방 근처 미계측 영역에서 사용하고 있는 유량 산정 방법을 사용하여 유량을 산정하였다. 마지막으로 Eq. (7)과 같이 앞서 계산한 각각의 유량을 모두 합하여 총 유량을 산정하였다. 이와 같이 ADV로 측정된 총 유량은 2.09 m<sup>3</sup>/s이었다.

$$q_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[ v_{ij} \times \frac{(b_{i+1} - b_{i-1})}{2} \times \frac{(h_{j+1} - h_{j-1})}{2} \right] \quad (4)$$

$$q_{LE} = 0.3535 \times \overline{v_{LE}} \times b_{LE} \times h_{LE} \quad (5)$$

$$q_{RE} = 0.3535 \times \overline{v_{RE}} \times b_{RE} \times h_{RE} \quad (6)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_{ij} + q_{LE} + q_{RE} \quad (7)$$

여기서,  $n$ 은 횡방향 측선 번호,  $m$ 은 수심방향 측선 번호,  $q_{ij}$ 는  $i$ 열과  $j$ 행에 대한 유량,  $v_{ij}$ 는  $i$ 열과  $j$ 행에 대한 유속,  $b_i$ 는 좌안을 기준으로 한  $i$ 열 측선까지의 거리,  $h_j$ 는 수표면을 기준으로 한  $j$ 열 측선까지의 거리,  $q_{LE}$ 는 좌안 제방 근처 미계측 영역의 유량,  $q_{RE}$ 는 우안 제방 근처 미계측 영역의 유량,  $\overline{v_{LE}}$ 는 좌안 최외측 측선의 수심방향 평균 유속,  $\overline{v_{RE}}$ 는 우안 최외측 측선의 수심방향 평균 유속,  $b_{LE}$ 는 좌안 제방에서부터 좌안 최외측 측선까지의 횡방향 거리,  $b_{RE}$ 는 우안 제방에서부터 우안 최외측 측선까지의 횡방향 거리,  $h_{LE}$ 는 좌안 최외측 측선의 수심,  $h_{RE}$ 는 우안 최외측 측선의 수심,  $Q$ 는 총 유량이다.

## 5. ADCP 미계측 영역의 유량 측정 정확도 분석

### 5.1 ADCP와 ADV의 수심방향 유속분포 측정 결과 비교

본 연구에서는 ADCP의 미계측 영역의 유량 산정 정확

도를 검토하기 위하여 우선 유속분포 외삽 결과의 정확도를 분석하였다. 이를 위해 각 측선별 ADCP 유속 측정 결과를 1/6 멱법칙과 대수 법칙을 적용하여 외삽을 수행한 후 ADV 측정 결과와 비교를 통해 정확도를 살펴보았다. ADCP의 수심방향 유속분포의 외삽 방법으로 USGS에서 제안한 1/6 멱법칙과 ADCP 측정 결과의 경향을 잘 반영할 수 있는 대수 법칙을 적용하였다. 우선 ADCP의 미계측 영역의 범위를 살펴보면 Fig. 10과 같이 ADV 유속 측정 결과(Fig. 9)와 비교하여 수표면과 하상 근처 영역 및 제방 근처에서 미계측 영역이 좀 더 커진 것을 확인할 수 있다. 좀 더 구체적으로 Fig. 11과 같이 수표면 근처(I구간)와 하상 근처(III구간)에서 각각 전체 수심의 약 20% 정도는 ADCP로 유속 측정이 어려운 것으로 나타났고, Fig. 10과 같이 약 0.5m 이하의 수심을 갖는 제방 근처 영역에서는 유속 측정이 어려운 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 ADCP 수심방향 유속분포를 Fig. 12와 같이 총 18개 측선에 대하여 ADV 유속 측정 결과와 1/6 멱법칙과 대수 법칙을 적용하여 획득한 ADCP의 수심방향 유속분포 결과를 비교하였다.

ADCP 유속 측정이 가능한 II 구간을 살펴보면 모든 측선에서 ADCP 유속 측정 결과가 수표면 가까이 갈수록

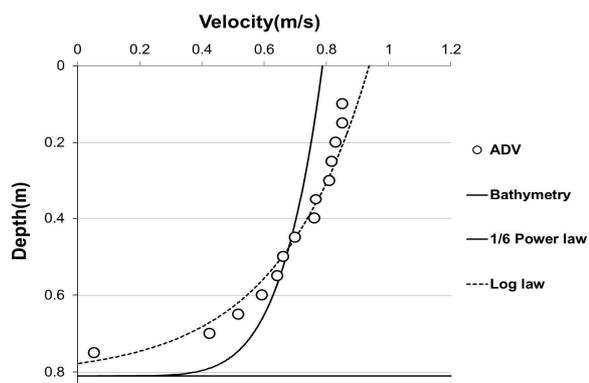


Fig. 9. Velocity Extrapolation of ADV

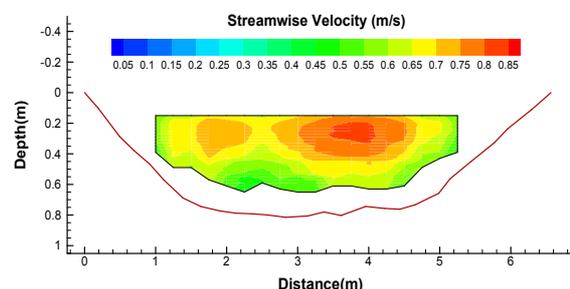


Fig. 10. Result of Velocity Measurement using ADCP

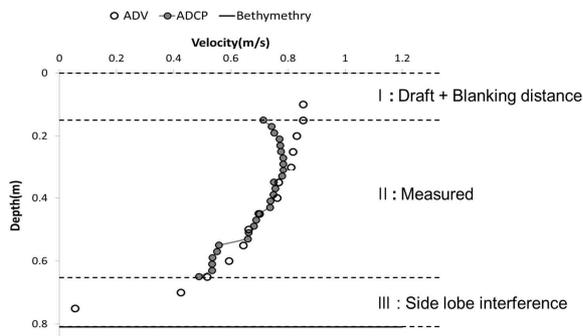


Fig. 11. Discharge Measuring Accuracy Analysis Region

점점 작게 측정되는 경향을 보였고, 대부분의 측선(No. 10, No. 11, No. 13, No. 14 및 No. 19는 제외)에서 하상 가까이 갈수록 유속이 크게 산정되는 경향을 나타냈다. 즉, ADCP로 측정된 유속을 이용하여 미계측 영역의 유속분포를 외삽함에 있어 수표면 부근에서는 유속을 작게 산정하였고, 하상 근처에서는 크게 산정하는 경향을 보였다.

한편 1/6 멱법칙을 적용할 경우 하상 근처 영역(III 구간)에서는 유속을 과다 산정하고, 수표면 근처 영역(I구간)에서는 유속을 과소 산정하는 것으로 나타났다. 또한 대수법칙을 적용할 경우는 전체적으로 1/6 멱법칙을 적용한 경

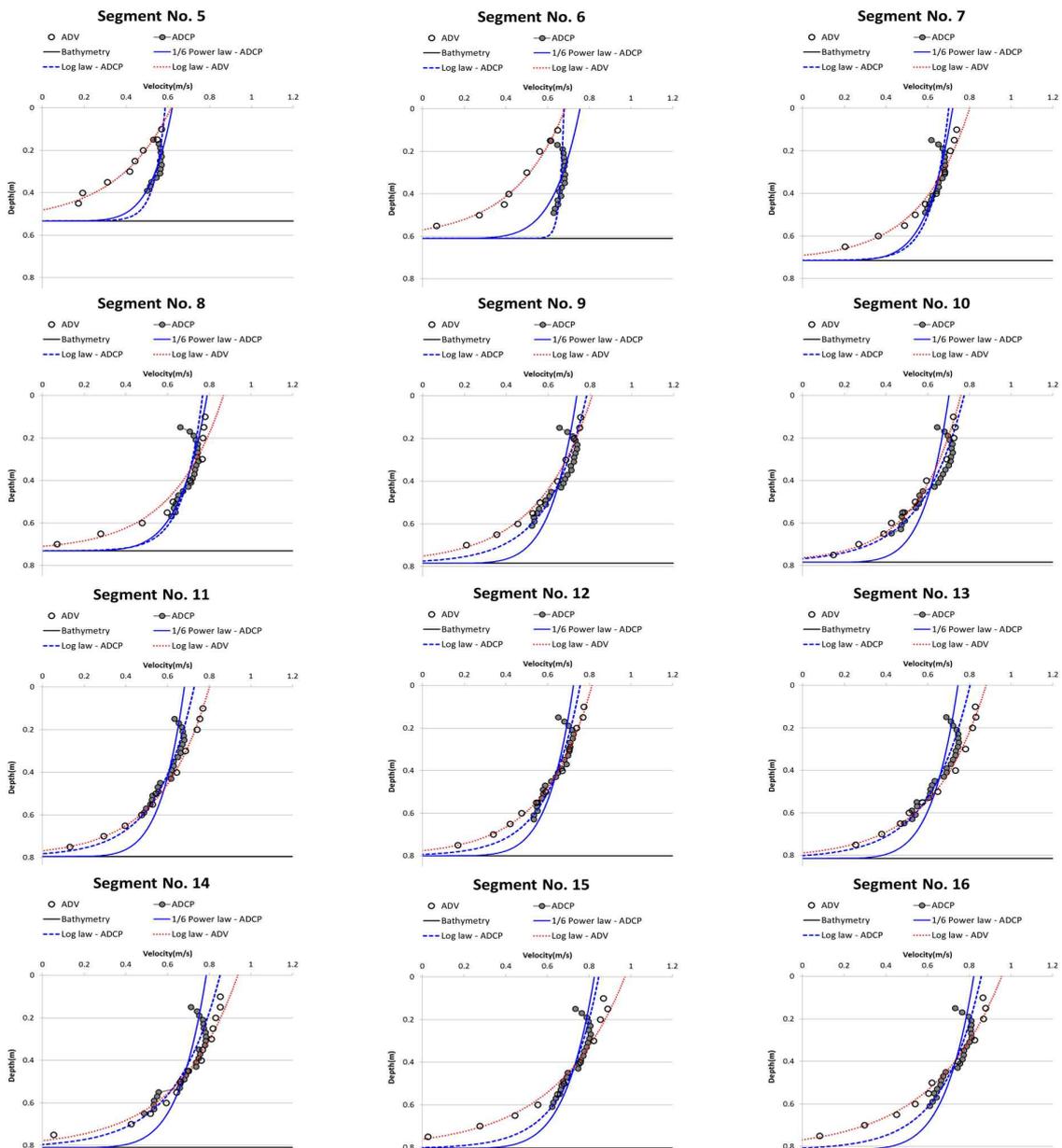


Fig. 12. Extrapolation Results of Vertical Velocity Distribution for ADV and ADCP

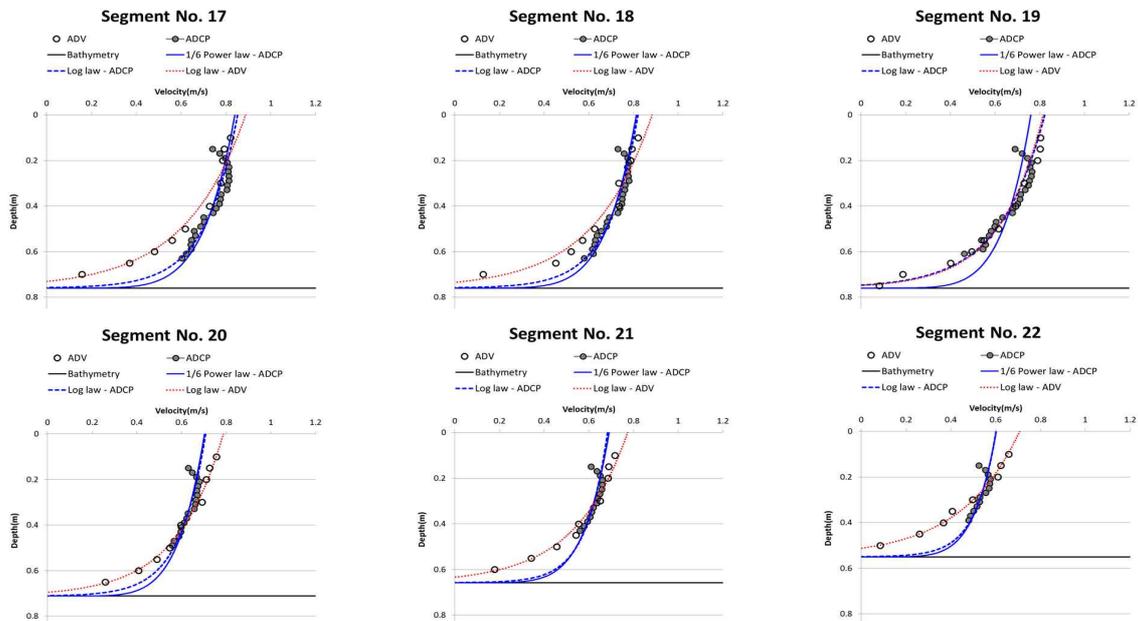


Fig. 12. Extrapolation Results of Vertical Velocity Distribution for ADV and ADCP (continued)

우보다 정확도가 높은 것으로 나타났다. 특히 No. 10, No. 11, No. 13, No. 14 및 No. 19와 같이 하상 근처의 유속이 정확하게 측정된 측선의 경우에는 대수 법칙을 적용하면 정확도 높은 수심방향 유속분포를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이와 같이 기본적으로 1/6 멱법칙을 적용할 경우는 하상 근처와 수표면 근처의 미계측 영역 내 유속분포의 오차가 큰 것을 확인하였고, ADCP 측정 결과가 정확할 경우 대수 법칙을 적용할 경우 미계측 영역의 유속분포를 정확도 높게 외삽할 수 있었다. 따라서 정확도 높은 ADCP 유속 측정 결과만을 이용하여 대수 법칙을 적용하는 것이 고정식 ADCP 유량 측정의 정확도를 높일 수 있는 방법임을 확인하였다. 특히 수표면 근처 미계측 영역의 경우 전체적으로 과소 측정되고 있기 때문에 수표면 근처의 ADCP 측정 결과에 대한 필터링이 필요할 것으로 생각된다.

한편 전체 수심이 0.6m 이하인 최외측 측선(No. 5, No. 6 및 No. 22)의 경우는 ADCP 유속 측정 결과의 정확도가 많이 떨어져 외삽을 수행한 결과 역시 측정 정확도가 낮은 것으로 나타났다. 이는 제방 근처 미계측 영역의 유량 산정 정확도에 직접적으로 영향을 미칠 수 있기 때문에 정확도 개선을 위해 ADCP 측정 최소 수심을 0.6m 이상으로 제한할 필요가 있을 것으로 생각된다.

## 5.2 수표면과 하상 근처 미계측 영역의 ADCP 유량 측정 정확도 분석

앞서 살펴본 고정식 ADCP의 수심방향 유속분포를 이용

한 유량 산정 정확도를 평가하였다. ADCP의 유량 산정 정확도 분석은 Fig. 12에서 제시한 3구간에 대하여 실시하였으며, I구간과 III구간의 ADCP의 유속분포는 1/6 멱법칙과 대수 법칙을 적용하여 외삽 한 결과를 이용하였고, II구간에 대해서는 ADCP 측정 결과를 이용하였다. 또한 0.6m 이하에서 측정된 No. 5, No. 6 및 No. 22 단면은 유속분포 정확도가 너무 낮게 나타나 유량 정확도 평가에서 제외하였다.

우선 수표면 근처 영역(I구간)의 유량 산정 정확도를 살펴보면 Table 1과 같이 1/6 멱법칙과 대수 법칙 모두 유량을 작게 산정하는 것으로 나타났으며, 상대적으로 유속 분포의 정확도가 높았던 대수 법칙의 유량 정확도가 좀 더 높게 나타났다. 또한 1/6 멱법칙의 경우 최대 -10.8%의 오차를 보인 반면 대수 법칙의 경우는 최대 -6.2%의 오차를 보여 대수 법칙이 전반적으로 오차가 작은 것으로 나타났다. 한편 ADCP로 유속 측정이 가능한 II구간의 유량 정확도를 살펴보면 Table 2와 같이 평균 -1.6%의 오차를 나타내어 매우 정확한 것으로 나타났다. 또한 측선별로 유량 오차의 범위는 -6.4~6.6%로 신뢰할 수 있는 유량 측정 정확도를 보인다고 생각된다. 하지만 II구간에서는 Muste et al. (2010)의 연구에서와 마찬가지로 센서 근처에서의 울림현상(ringing)과 신호의 비상관성 등으로 인한 영향으로 수표면 근처의 유속분포가 감소하는 경향을 나타내어 유량이 작게 산정하기 때문에 향후 이에 대한 개선이 필요할 것으로 판단된다. 특히 II구간의 유속 감소 현상은 측정 구간의 유속이 빠를수록 더 크게 영향

Table 1. ADCP Discharge Estimation Results (Region I)

Zone	Segment number	ADV (m <sup>3</sup> /s)	ADCP					
			1/6 power law			Log law		
			Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Difference (m <sup>3</sup> /s)	Error (%)	Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Difference (m <sup>3</sup> /s)	Error (%)
I	7	0.013	0.012	-0.0005	-4.2	0.012	-0.0008	-6.2
	8	0.028	0.027	-0.0005	-2.0	0.027	-0.0012	-4.2
	9	0.026	0.025	-0.0009	-3.3	0.027	0.0006	2.2
	10	0.025	0.024	-0.0007	-2.8	0.026	0.0016	6.2
	11	0.026	0.023	-0.0028	-10.8	0.025	-0.0014	-5.4
	12	0.027	0.025	-0.0017	-6.2	0.026	-0.0007	-2.5
	13	0.029	0.026	-0.0030	-10.5	0.027	-0.0012	-4.3
	14	0.030	0.027	-0.0030	-10.0	0.029	-0.0010	-3.2
	15	0.031	0.028	-0.0026	-8.2	0.029	-0.0019	-6.1
	16	0.031	0.028	-0.0023	-7.6	0.029	-0.0012	-3.9
	17	0.029	0.029	0.0003	1.0	0.029	0.0007	2.4
	18	0.029	0.028	-0.0005	-1.9	0.028	-0.0003	-1.0
	19	0.027	0.026	-0.0010	-3.6	0.028	0.0009	3.5
	20	0.026	0.024	-0.0016	-6.3	0.024	-0.0015	-5.6
21	0.012	0.012	-0.0006	-4.8	0.012	-0.0007	-5.5	
Average			-	-0.0014	-5.4	-	-0.0005	-2.2

Table 2. ADCP Discharge Measurement Results (Region II)

Zone	Segment number	Discharge (m <sup>3</sup> /s)		Difference (m <sup>3</sup> /s)	Error (%)
		ADV	ADCP		
II	7	0.030	0.029	-0.0010	-3.2
	8	0.079	0.077	-0.0019	-2.4
	9	0.076	0.078	0.0018	2.4
	10	0.078	0.080	0.0019	2.4
	11	0.074	0.070	-0.0046	-6.1
	12	0.081	0.080	-0.0013	-1.6
	13	0.091	0.085	-0.0058	-6.4
	14	0.095	0.090	-0.0055	-5.7
	15	0.091	0.088	-0.0032	-3.5
	16	0.090	0.088	-0.0016	-1.7
	17	0.086	0.092	0.0057	6.6
	18	0.086	0.089	0.0025	2.9
	19	0.082	0.080	-0.0022	-2.7
	20	0.058	0.057	-0.0009	-1.5
21	0.024	0.023	-0.0008	-3.3	
Average				-0.0011	-1.6

을 받는다고 하였고 하천 시 ADCP를 이용한 유량 측정 시 이에 대한 보정이 필요할 것으로 생각한다. 마지막으로 하상 근처 영역(III구간)의 유량 산정 정확도를

살펴보면 Table 3과 같이 앞선 I구간과 II구간의 유량 산정 오차들과 비교하여 매우 오차가 크게 나타남을 확인하였다. 그 이유는 III구간의 경우 유속이 상대적으로 작기

Table 3. ADCP Discharge Estimation Results (Region III)

Zone	Segment number	ADV (m <sup>3</sup> /s)	ADCP					
			1/6 power law			Log law		
			Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Difference (m <sup>3</sup> /s)	Error (%)	Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Difference (m <sup>3</sup> /s)	Error (%)
III	7	0.009	0.014	0.0048	53.9	0.014	0.0051	58.0
	8	0.011	0.020	0.0091	86.4	0.020	0.0095	90.1
	9	0.009	0.020	0.0109	117.8	0.013	0.0041	43.9
	10	0.008	0.014	0.0063	82.8	0.006	-0.0013	-16.6
	11	0.015	0.023	0.0078	52.7	0.015	0.0000	0.2
	12	0.011	0.019	0.0076	66.4	0.014	0.0024	21.3
	13	0.011	0.019	0.0077	69.4	0.011	0.0000	-0.4
	14	0.010	0.019	0.0088	85.4	0.011	0.0003	3.2
	15	0.013	0.026	0.0122	90.5	0.021	0.0075	55.9
	16	0.015	0.027	0.0122	82.0	0.020	0.0053	35.9
	17	0.007	0.016	0.0088	123.8	0.013	0.0062	86.8
	18	0.007	0.015	0.0084	118.8	0.013	0.0062	87.7
	19	0.009	0.017	0.0082	91.1	0.010	0.0009	9.5
	20	0.020	0.026	0.0061	30.7	0.024	0.0037	18.4
21	0.009	0.013	0.0043	46.9	0.013	0.0039	43.0	
Average			-	0.0082	79.9	-	0.0038	35.8

때문에 상대오차가 커지는 것도 있겠지만 기본적으로 외삽 방법의 한계로 인해 유속분포가 크게 결정되어 유량이 전반적으로 크게 산정되었기 때문이다. 즉 II구간의 하단부에서 ADCP 유속 측정 결과가 조금씩 크게 측정되기 때문에 외삽 결과 역시 유속이 크게 결정되는 것이 유량 산정 정확도를 높이는 원인이 되었다. 그 결과 1/6 멱법칙을 적용한 경우는 기본적으로 하상 근처의 유속분포를 형태를 고정시켰음에도 불구하고 평균적으로 약 80% 정도 유량을 크게 산정하였으며, 대수 법칙을 적용한 경우는 평균적으로 약 38% 정도 유량을 크게 산정하는 것으로 나타났다. 특히 1/6 멱법칙은 최대 124%의 오차를 보였으며, 대수 법칙은 최대 90%의 오차를 보였기 때문에 ADCP의 유량 측정 정확도를 높이기 위해서 II구간 하단부의 ADCP 유속 측정 결과에 대한 필터링이 필요할 것으로 생각한다.

각 측선별로 수심방향 유속분포를 III구간을 구분하여 ADCP의 유량 측정 정확도를 살펴본 결과들을 모두 합하여 Tables 4 and 5와 같이 각 측선별 유량 측정 정확도를 살펴보았다. 그 결과 미계측 영역의 유속분포를 1/6 멱법칙으로 외삽 한 경우는 평균적으로 5.4%의 오차를 나타냈

고, 대수 법칙으로 외삽 한 경우는 4.2%의 오차를 나타내어 고정식 ADCP 유량 측정에 있어서는 상대적으로 대수 법칙을 적용한 경우가 정확도가 높은 것으로 나타났다. 또한 전체적으로 1/6 멱법칙과 대수 법칙을 적용할 경우의 측선별 유량 측정 오차의 경향은 유사하게 나타나는 것으로 보아 ADCP의 유속 측정 가능 영역(II구간)의 유속 측정 정확도가 미계측 영역의 유량 측정 정확도에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 ADCP의 유량 측정 정확도를 높이기 위해서는 II구간의 유속 측정 결과에서 상단부의 유속감소 현상과 하단부의 유속증가 현상을 고려한 필터링 방법에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 생각한다.

### 5.3 제방 근처 미계측 영역의 ADCP 유량 측정 정확도 분석

ADCP의 미계측 영역 중에서 수심이 낮아 측정이 어려운 양쪽 제방 근처 영역에 대한 ADCP 유량 측정 결과의 정확도를 분석하였다. 제방 근처 영역의 유량은 ADCP로 측정 가능한 최외측 측선의 수심평균 유속을 이용하기 때

Table 4. ADCP Discharge Measurement Results with Respect to the Segments (1/6 power law)

Segment number	Discharge (m <sup>3</sup> /s)		Difference (m <sup>3</sup> /s)	Error (%)
	ADV	ADCP		
7	0.052	0.055	0.0033	6.3
8	0.117	0.124	0.0067	5.7
9	0.112	0.124	0.0119	10.6
10	0.110	0.118	0.0075	6.8
11	0.115	0.116	0.0004	0.3
12	0.119	0.124	0.0046	3.9
13	0.131	0.130	-0.0012	-0.9
14	0.136	0.136	0.0003	0.2
15	0.136	0.142	0.0064	4.7
16	0.135	0.143	0.0083	6.2
17	0.122	0.137	0.0148	12.1
18	0.122	0.132	0.0104	8.5
19	0.118	0.124	0.0050	4.3
20	0.104	0.107	0.0036	3.5
21	0.046	0.049	0.0029	6.3
Absolute averaged error			0.0058	5.4

Table 5. ADCP Discharge Measurement Results with Respect to the Segments (Log law)

Segment number	Discharge (m <sup>3</sup> /s)		Difference (m <sup>3</sup> /s)	Error (%)
	ADV	ADCP		
7	0.052	0.055	0.0034	6.5
8	0.117	0.124	0.0065	5.5
9	0.112	0.118	0.0065	5.8
10	0.110	0.112	0.0022	2.0
11	0.115	0.110	-0.0059	-5.1
12	0.119	0.120	0.0005	0.4
13	0.131	0.124	-0.0071	-5.4
14	0.136	0.130	-0.0061	-4.5
15	0.136	0.138	0.0024	1.8
16	0.135	0.138	0.0026	1.9
17	0.122	0.134	0.0126	10.3
18	0.122	0.130	0.0084	6.9
19	0.118	0.118	-0.0004	-0.3
20	0.104	0.105	0.0013	1.3
21	0.046	0.048	0.0025	5.4
Absolute averaged error			0.0046	4.2

문에 최외측 측선을 어떻게 결정하는지가 제방 근처 유량 측정 정확도에 직접적으로 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 Table 6과 같이 최외측 측선을 변화시키면서 Eq. (2)를 이용하여 산정한 유량의 오차를 분석하였다. 또

한 유량 산정 단면이 사다리꼴 형태이기 때문에 상수  $c$ 는 0.3535를 사용하였다.

최외측 측선 변화에 따른 제방 근처 유량의 정확도를 분석한 결과 Table 6과 같이 좌안측 미세측 영역의 경우

Table 6. Edge Discharge Error at Each Case

Case	Bank	Extreme segment	Discharge (m <sup>3</sup> /s)		Difference (m <sup>3</sup> /s)	Error (%)
			ADV	ADCP		
I	Left	No. 5	0.078	0.115	0.037	48.1
II		No. 6	0.137	0.173	0.035	25.9
III		No. 7	0.223	0.231	0.008	3.8
IV	Right	No. 22	0.115	0.157	0.042	36.1
V		No. 21	0.192	0.222	0.030	15.8

는 앞서 살펴본 바와 같이 No. 5와 No. 6의 유속분포 측정 결과의 정확도가 낮기 때문에 유량 산정 오차가 매우 크게 나타났으며 No. 7을 최외측 측선으로 결정할 경우 약 4%의 오차를 나타내어 신뢰할 수 있는 정확도를 보였다. 또한 우안측에서도 마찬가지로 No. 22의 유속분포 정확도가 낮게 나타났기 때문에 유량 산정 오차 역시 크게 나타났고, No. 21의 경우도 16.4%의 오차를 보여 유속분포 정확도에 비해 유량 산정 오차가 다소 크게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 좌안측의 제방 경사보다 우안측 제방 경사가 조금 급하여 삼각형으로 가정할 제방 근처의 통수 단면적이 다소 크게 적용되었기 때문이다. 이와 같이 제방 근처 미계측 영역의 경우 최외측의 측선 선정 시 수심이 0.6m 이상 확보 여부를 확인하는 것이 중요하고, 유량 계산에 사용하는 계수인 0.3535는 삼각형을 기준으로 제안된 값이기 때문에 제방 경사를 고려할 수 있도록 다양하게 제안할 필요가 있는 것으로 나타났다.

## 6. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 ADCP를 고정하여 유량 측정을 실시할 경우 미계측 영역의 유량 산정 정확도를 평가하기 위해 실규모 직선수로에서 ADCP를 고정시킨 상태에서 측정된 유속 자료를 1/6 먹법칙과 대수 법칙을 적용하여 외삽한 유속분포와 유량 산정 결과를 ADV를 이용하여 정밀하게 측정된 결과와 비교하였으며, 본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) ADCP를 이용하여 유량을 산정함에 있어 수표면 근처와 하상 근처에서 각각 전체 수심의 약 20% 정도와 약 0.5m 이하의 수심을 갖는 제방 근처 영역에서 미계측 영역이 발생함을 확인하였다.
- 2) ADCP 유속분포 측정 정확도를 살펴보면 ADCP로 유속 측정이 가능한 구간에서는 대부분의 측선에서 수표면 가까이 갈수록 점점 작게 측정되었고, 하상 가까이 갈수록 유속이 크게 산정되는 경향이 나타났

다. 그 결과 외삽을 통한 미계측 영역의 유속분포도 마찬가지로 수표면 부근에서는 유속을 작게 산정하였고, 하상 근처에서는 크게 산정하는 경향을 보였다. 외삽 방법에 있어서는 전체적으로 대수 법칙을 적용한 경우가 1/6 먹법칙을 적용한 경우보다 정확도가 높은 것으로 나타났다. 또한 ADV로 측정된 총 유량은 2.09m<sup>3</sup>/s이었고, 1/6 먹법칙으로 산정한 ADCP 유량은 2.22m<sup>3</sup>/s로 약 6.0% 오차를 나타냈고, 대수 법칙으로 산정한 ADCP 유량은 2.16m<sup>3</sup>/s로 약 3.2% 오차를 나타내어 대수 법칙으로 외삽한 유량 산정 결과가 상대적으로 좀 더 정확한 것으로 나타났다.

- 3) 수표면 근처의 미계측 영역에 대한 ADCP 유량 측정 정확도를 평가한 결과 1/6 먹법칙은 평균 -5.4% 오차를 나타냈으며, 대수 법칙은 평균 -2.2% 오차를 보여 두 방법 모두 유량을 작게 산정하는 것으로 나타났다. 상대적으로 유속분포의 정확도가 높았던 대수 법칙의 유량 정확도가 좀 더 높게 나타났다. 또한 ADCP로 유속 측정이 가능한 구간의 유량 측정 정확도를 평가한 결과 평균 -1.6%의 오차를 나타내어 매우 정확하게 유량을 측정함을 확인하였다. 하지만 센서 근처에서의 울림현상(ringing)으로 인한 영향으로 수표면 근처의 유속분포가 감소하는 경향이 나타남으로 인해 유량이 작게 산정되는 것은 향후 개선이 필요할 것으로 판단된다. 마지막으로 하상 근처의 미계측 영역에 대한 유량 측정 정확도를 평가한 결과 1/6 먹법칙을 적용한 경우는 기본적으로 하상 근처의 유속분포를 형태를 고정시켰음에도 불구하고 평균적으로 약 80% 정도 유량을 크게 산정하였으며, 대수 법칙을 적용한 경우는 평균적으로 약 38% 정도 유량을 크게 산정하는 것으로 나타났다. 그 이유는 ADCP의 최하단 유속 측정 결과가 다소 크게 측정되었기 때문이다. ADCP의 유량 측정 정확도를 높이기 위해서는 ADCP 유속 측정 결과에서 상단부의 유속감소 현상과 하단부의 유속증가 현

상을 고려한 필터링 방법에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 생각한다.

- 4) 최외측 측선 변화에 따른 제방 근처 미세측 영역의 유량 측정 정확도를 분석한 결과 최외측의 측선 선정 시 수심이 0.6 m 이상에서 측정한 수심평균유속을 이용하게 되면 유량 측정 정확도를 높일 수 있었으며, 유량 계산에 사용하는 계수인 0.3535는 삼각형을 기준으로 제안된 값이기 때문에 제방 경사를 고려할 수 있도록 다양하게 제안할 필요가 있는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 ADCP의 미세측 영역의 유량 산정에 있어 ADCP로 측정한 유속 측정 결과의 정확도가 직접적으로 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 ADCP 유속 측정 결과에 대한 다양한 필터링 기법의 적용을 통해 미세측 영역의 유량 정확도를 개선하기 위한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 생각한다. 또한 본 연구에서는 고정식 ADCP 유량 측정에 대한 정확도를 분석하였지만 실제 하천에서는 보트를 이용하여 측정하는 경우가 대부분이기 때문에 ADCP를 보트에 부착한 상태로 측정한 유속자료들을 이용하여 미세측 영역의 유량 산정 정확도를 평가하기 위한 연구도 필요할 것으로 생각한다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었으며, 본 연구를 위해 많은 협조를 해 준 여흥구 센터장과 강준구 박사를 비롯한 한국건설기술연구원 안동 하천실험센터 관계자분들께 감사의 마음을 전합니다.

## References

Chen, C.L. (1991). "Unified theory on power laws for flow resistance." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 3, pp. 371-389.

Frizell, K.W., and Vermeyen, T.B. (2007). "Comparing apples and oranges: teledyne/RDI StreamPro ADCP and the OTT Qliner river discharge measurement system." *Proceedings of Hydraulic Measurements and Experimental Methods (HMEM) Congress*, Lake Placid, New York, USA.

Fulford, J.M., and Sauer, V.B. (1986). "Comparison of velocity interpolation methods for computing open-

channel discharge. In: Subitsky, S.Y. (Ed.) "Selected papers in the hydrologic sciences, US Geological Survey Water-Supply Paper. 2290, pp. 139-144.

Garcia, C.M., Tarrab, L., Oberg, K., Szupianny, R., and Cantero, M.I. (2012). "Variance of discharge estimates sampled using ADCPs from moving platforms." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 138, No. 8, pp. 684-694.

Gunawan, B. (2010). "A study of flow structures in a two-stage channel using field data." A Physical Model and Numerical Modelling. PhD Thesis Dissertation, The University of Birmingham, UK.

Huang, H. (2012). "Uncertainty model for in situ quality control of stationary ADCP open-channel discharge measurement." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 138, No. 1, pp. 4-12.

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 Standardization*, ISO 1088, Geneva, Switzerland.

Lee, C.J., Kim, D.G., Kwon, S.I., and Kim, W. (2010). "Inter-comparison of Accuracy of Discharge Measurement Methods-A Case Study Performed in the Dalcheon River Downstream of the Goesan Dam-." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 12, pp. 1039-1050. (in Korean)

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.

Mueller, D.S., and Wagner, C. (2009). "Measuring discharge with ADCPs from a moving boat." US Geological Survey Tech Method 3A-22. USGS, Reston VA.

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., 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.

- 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.
- Oberg, K.A., Morlock, S.E., and Caldwell, W.E. (2005). Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Acoustic Doppler Current Profilers, US. Geological Survey, Scientific Investigation Report.
- RDI (1996). "Acoustic Doppler Current Profilers- Principle of operation, A Practical Primer." San Diego, CA, RD Instruments.
- RDI (2003). "WinRiver User's Guide-International Version, A Practical Primer." San Diego, CA, RD Instruments.
- RDI (2012). "StreamPro & Section by Section Software Operation Manual." Teledyne RD Instruments, Poway, CA.
- Rehmel, M.S. (2006). "Field Evaluation of shallow-water acoustic Doppler current profiler discharge measurements." *Proceedings of ASCE-EWRI Congress*, May, pp. 21-25, Omaha, NE.
- 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.
- USGS (2011). "Exposure time for ADCP moving-boat discharge measurements made during steady flow conditions." USGS Office of Surface Water Technical Memorandum 2011.08.

<p>paper number : 15-040          Received : 28 April 2015          Revised : 1 June 2015          Accepted : 1 June 2015</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------