

# QRev를 이용한 ADCP 이동측정법 유량측정 성과의 불확도 산정 및 분석

박석근\* · 김형수\*\*

\*인하대학교

## Uncertainty Estimation and Analysis of ADCP Moving-Boat Discharge Measurements Using QRev

Seok Geun Park\* · Hung Soo Kim\*\*

\*Inha University, Korea

(Received : 25 August 2025, Revised : 21 September 2025, Accepted : 21 September 2025)

### 요약

음향 도플러 유속계(ADCP)는 신속하고 효율적인 유량측정을 가능하게 하지만, 다양한 오차 요인을 분리하여 정량화하기 어려워 불확도 산정에 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 여러 연구가 수행되었으며, USGS는 ADCP 유량측정 성과의 불확도 산정이 가능한 QRev 소프트웨어를 개발하였다. 본 연구에서는 QRev를 이용하여 전국 407개 유량관측소에서 최근 3년간 획득한 12,852개의 ADCP 이동측정법 유량측정 성과를 분석하여 활용성을 검토하고 불확도 특성을 분석하였다. 평균 불확도는  $\pm 9.85\%$ 로 평가되었으며, USGS 기준 P등급에 해당하였다. 성분별 분석 결과, 유량 변동계수와 평균유속이 불확도 증가와 뚜렷한 상관관계를 보였고, 지점특성별로는 조위 영향, 건천화, 댐·보 영향을 받는 구간에서 높은 불확도가 산정되었다. 본 연구를 통해 QRev의 활용성과 향후 우리나라 수문조사 특성을 고려한 불확도 등급 기준 마련이 필요함을 확인하였다.

핵심용어 : 불확도, QRev, ADCP, ADCP 이동측정법, 유량측정

### Abstract

The Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) enables rapid and efficient discharge measurements, but the separation and quantification of diverse error sources remain challenging, limiting the accurate estimation of uncertainty. To address this, various studies have been conducted, and the U.S. Geological Survey (USGS) developed the QRev software to estimate the uncertainty of ADCP discharge measurements. In this study, 12,852 ADCP moving-boat discharge measurements collected over the past three years from 407 gauging stations across Korea were analyzed using QRev to evaluate its applicability and to investigate uncertainty characteristics. The average uncertainty was assessed as  $\pm 9.85\%$ , corresponding to a P grade according to the USGS classification. Component-wise analysis revealed strong correlations between increased uncertainty and both the coefficient of variation of discharge and mean velocity. Site-specific analysis showed that stations influenced by tidal effects, ephemeral streams, and dam or weir regulation exhibited higher uncertainty. The findings confirm the applicability of QRev for uncertainty assessment and highlight the need to establish uncertainty-based grading criteria tailored to the characteristics of hydrological surveys in Korea.

Key words : Uncertainty, QRev, ADCP, ADCP Moving-Boat Method, Discharge Measurement

\*To whom correspondence should be addressed.

Inha University, Korea  
E-mail : [sookim@inha.ac.kr](mailto:sookim@inha.ac.kr)

• Seok Geun Park Inha University, Korea/Ph.D. Candidate([dicast97@gmail.com](mailto:dicast97@gmail.com))  
• Hung Soo Kim Inha University, Korea/Professor([sookim@inha.ac.kr](mailto:sookim@inha.ac.kr))



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

하천유량( $m^3/s$ )은 특정한 하천단면을 단위시간 동안 통과하는 물의 양으로 정의되며, 일반적으로 단면적( $m^2$ )과 유속(%)의 곱으로 나타내며, 하천유량의 측정은 횡단면에서의 수면폭(m), 수심(m), 유속(%)을 각각 측정하여 이에 대한 적분을 통해 이루어진다. ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler, 음향도플러 유속계)는 유수의 흐름을 방해하지 않으면서 수중에 발사된 음파의 도플러 효과(Doppler effect)를 이용하여 유속과 유량을 측정하는 첨단 장비이다.

ADCP를 이용한 유량측정은 크게 두 가지 방법으로 구분된다. 첫째는 하천을 연속적으로 횡단하며 유속 및 수심 자료를 수집하는 이동측정법(Moving-boat method)이며, 둘째는 특정 지점에 고정하여 유속 분포를 측정하는 정지측정법(Stationary deployment 또는 Section-by-Section method)이다. 이동측정법은 폭이 넓고 수심이 깊은 대하천에서 특히 효율적이며, 신속하게 유량을 측정할 수 있어 기존의 유속-면적법에 비해 인력과 시간을 크게 절감할 수 있다. 반면, 정지측정법은 ADCP를 고정시킨 상태에서 유속 자료를 측정하며, 결빙하천, 유사량이 큰 조건 또는 식생, 하상 이동, 장애물 등으로 인해 이동측정이 어려운 특정상황에서 주로 활용된다.

ADCP는 그 효율성과 측정 능력으로 인해 전 세계적으로 활용이 확대되고 있다. 미국 지질조사국(United States Geological Survey, USGS)은 1982년 미시시피강 유량측정에 최초 활용한 이후, 1985년부터 장비 확보 및 관련 소프트웨어 개발을 추진하는 등, ADCP를 전국적인 유량측정에 적극적으로 도입하였다(Mueller, et al., 2013). 약 1.5m 내외의 얇은 수심에서도 사용 가능한 모델이 개발되면서 1990년대 후반에 그 사용 범위가 더욱 확대되었으며(Oberg, et al., 2005), USGS는 ADCP를 수치 모델 검증, 수리 연구, 서식지 평가 등 다양한 분야에 활용하고 있다(Mueller, et al., 2013). 국내에서도 1990년대 후반부터 ADCP가 도입되기 시작하여, 유량측정 기법 및 국내 하천에의 적용성에 대한 검토가 진행되었으며, 활용이 점차 확대되고 있다. 우리나라의 국가 유량측정을 전담하는 한국수자원조사기술원(구유량조사사업단)의 2009년~2014년 측정장비별 측정 성과를 살펴보면, ADCP 사용률은 2009년 7.8%에서 2014년 27.8%로 약 3배 이상 증가하였다(Song, et al., 2016).

ADCP 활용의 확대는 국가적인 수자원 관리 정책과 기술 발전이 상호작용한 결과로 해석된다. 국내의 4대강 사업과 같은 대규모 국책 사업은 ADCP와 같은 첨단 측정 기술의 도입을 가속화하는 중요한 계기가 되었다(Song, et al., 2016). 동시에, ADCP 장비 자체의 지속적인 개선(예: 더 얇은 수심에서의 측정 능력, 원격 제어 보트 및 IoT 기술과의 통합)은 장비의 적용성과 효율성을 더욱 높여 활용 확대를 촉진하였고, 이러한 변화는 홍수기 등 급변하는 수문 환경에서 신속하고 포괄적인 데이터 수집에 대한 요구가 증대됨에 따라 더욱 중요해졌다(Oberg, et al., 2005; Song, et al., 2016; Song, et al., 2017). 유량 자료는 하천 설계, 홍수 예측 등 다양한

정책 이행 및 의사결정에 활용되고 있으므로, 첨단 장비에 대한 의존도가 높아질수록 측정결과의 신뢰성을 보장하기 위해 정량적인 품질보증 체계 마련은 필수적이다.

ADCP 유량측정 성과의 불확도는 측정방법에 따라 다르게 산정한다. 먼저 정지측정법은 기존 기계식 유속계를 이용한 방법과 동일하게 유속-면적법을 기반으로 유량을 산정하므로 불확도도 기존 방법과 유사하게 산정할 수 있다. 반면에 이동측정법은 측정의 복잡성과 역동적인 하천 환경으로 인해 개별 오차 원인을 분리하고 정량화하기 어렵기 때문에 측정 성과의 신뢰성 확보를 위한 불확도 연구가 국내외에서 활발히 진행되어 왔다.

Kim, D. S., & Kim, J. M.(2016)은 GUM 표준안을 활용한 ADCP 정지측정법 유량측정 성과의 불확도 산정에 대한 연구를 수행하며, ADCP 불확도 산정 소프트웨어(ACUA, ADCP Uncertainty Analysis)를 개발 중이라고 소개하였다. 이 연구는 현장 실험을 통해 불확도 요인들을 분석하고, GUM 표준안을 ADCP에 적용하는 방법을 제시하였다. Song, et al.(2017)은 QRev를 이용한 ADCP 이동보트법 측정유량의 처리 및 분석을 다루며, 제조업체 소프트웨어의 제한적인 품질 평가 기능과 상이한 알고리즘 문제를 지적하고, USGS의 QRev 개발 배경과 국내 활용 방향을 제시하였다. Kim, et al.(2022)은 GUM 기반 ADCP 유량측정 불확도 산정을 위한 소프트웨어(AQUA, ADCP discharge(Q) Uncertainty Assessment) 개발에 대해 보고하였다. Gonzalez & Muste(2007)는 ADCP 이동측정법 유량측정 성과 불확도 추정을 위한 엄격한 방법론이 부족함을 지적하며, AIAA(American Institute of Aeronautics and Astronautics) 표준을 적용한 프레임워크를 개발하였다. Moore et al.(2016/2017)는 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용한 ADCP 이동측정법 유량측정 성과 불확도 평가 도구인 QUant를 개발하였다. Mueller(2016)는 QRev 소프트웨어를 개발하여 ADCP 이동측정법 유량 데이터의 필터링 및 품질 평가를 자동화하였다. QRev는 Type A 및 Type B 평가를 통해 무작위(Random) 및 계통적(Systematic) 불확도를 추정한다. Huang(2018)은 ADCP 이동측정법 유량측정 성과의 불확도 추정을 위한 이론적 및 준경험적 모델을 제시하고 205개 데이터셋으로 보정한 후, 382개 데이터셋으로 검증하였다. Despax, et al.(2023)는 GUM 프레임워크를 따르는 OURSIN 방법의 개선안을 제시하여 QRevInt 소프트웨어에 구현하였으며, 몬테카를로 방식의 효율적인 대안으로 요소 측정 불확도 원인, 횡단측정 간 유량 변동성, 미측정 영역의 불확도를 결합하여 대규모 반복 측정 실험을 통해 검증하였다.

국내외 연구 동향을 살펴보면, ADCP 활용이 급증하는 추세 속에서 GUM 기반 불확도 산정의 복잡성을 해결하려는 노력이 두드러진다. GUM, AIAA 기반 프레임워크, OURSIN과 같은 불확도 전파 방법론과 Monte Carlo 시뮬레이션(QUant)을 활용하여 ADCP 유량측정 성과의 개별 오차 원인을 체계적으로 식별하고 정량화하는 방향으로 점차 발전하고 있다. 이를 통해 ACUA, AQUA, QRev, QUant, AQUA, ACUA, QRevInt와 같은 소프트웨어들이 개발되었으며, 이를 통해 ADCP 측정

성과의 신뢰성 확보하고자 하였다. 환경부 수문조사보고서를 보면 ADCP 정지측정법 측정 성과의 경우 지속적으로 불확도가 제시되어 오고 있고, 이동측정법 측정 성과의 경우 '23년부터 불확도가 제시되고 있으나 불확도 산정결과에 대한 명확한 분석 및 평가가 다소 미흡한 실정이다. 유량 자료는 다양한 국가 주요 정책 수립 및 이행에 활용되고 있어 불확도를 산정하여 신뢰성을 평가하여야 하므로 본 연구에서는 전국 하천 407개소에서 최근 3년간(2021년~2023년) 측정된 총 12,852개 ADCP 이동측정법 유량측정 성과를 대상으로 QRev를 이용하여 불확도를 산정하고 그 결과를 분석하고자 한다.

## 2. QRev 불확도 산정 방법론

### 2.1 ADCP 이동측정법 유량 산정 방법

ADCP는 음파의 전파 시간과 도플러 효과(Doppler shift)를 이용해 유속과 수심을 측정한다. 그러나 장비의 물리적 제한으로 인해 단면 전체가 아닌 일부 영역에서만 유속이 측정된다(Mueller et al., 2013). 측정된 영역은 수직 방향으로는 셀(cell 또는 bin)로, 수평 방향으로는 앙상블(ensemble)이라 불리는 단위로 분할된다(Fig. 1 참조). 셀을 통과하는 유량  $Q_{i,j}$ 는 ADCP 기준에서의 상대 유속  $\vec{\omega}_{i,j}$ 와 보트속도  $\vec{v}_i$ 의 벡터곱을 수직 단위벡터  $\vec{k}$ 에 내적한 후, 셀크기  $dz_{i,j}$ 와 시간 간격  $dt_i$ 를 곱하여 계산된다(Despax et al., 2023).

$$Q_{i,j} = (\vec{\omega}_{i,j} \times \vec{v}_i) \cdot \vec{k} dz_{i,j} dt_i \quad (1)$$

여기서  $\vec{k}$ 는 수직 방향 단위벡터,  $dz_{i,j}$ 는 셀의 높이,  $dt_i$ 는 인접 앙상블 간 시간 간격이다.

미측정 영역(Fig. 1 참조)에 대해서는 인접한 유효 데이터에 기반하여 보간되며(Mueller, 2016), 하상 부근(bottom discharge), 수면 부근(top discharge), 예지 근처 좌·우측 영역(left/right edge)에서는 유량을 외삽하여 계산한다. 따라서 하나의 횡단측정  $k$ 에 대한 유량  $Q_k$ 는 Eq. (2)와 같이 계산한다.

$$Q_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} Q_{i,j} + Q_{invcell} + Q_{invens} + Q_{top} + Q_{bot} + Q_{left} + Q_{right} \quad (2)$$

여기서  $n$ 은 기록된 앙상블의 총 수,  $m_i$ 는  $i$ 번째 앙상블 내의 셀 수이다.

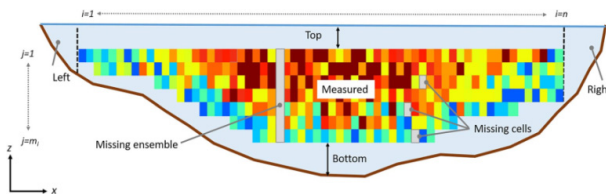


Fig. 1. Decomposition of an ADCP cross-sectional transect (Despax et al., 2023)

측정역 유량  $Q_{meas}$ 는 위 식에서 첫 번째 항, 즉 유효 셀 유량의 총합으로 정의된다(Despax et al., 2023).

$$Q_{meas} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} Q_{i,j} \quad (3)$$

최종적으로 하나의 ADCP 유량측정 성과  $\bar{Q}$ 는, 동일한 유량 조건 하에서  $P$ 개의 연속 횡단측정  $Q_k$ 의 평균으로 계산된다(Despax et al., 2023).

$$\bar{Q} = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P Q_k \quad (4)$$

유량측정 성과는 방향 편향(directional bias)이 발생하지 않도록 쌍을 이루는 왕복 횡단측정을 하는 것을 기본으로 하고 있으며, 연속 횡단측정 횟수  $P$ 의 기준은 수문조사 기관마다 상이하다(Huang, 2019; Le Coz et al., 2008; Mueller et al., 2013). USGS는 최소 720초 동안 수행되는 1쌍 이상의 왕복 횡단측정을 권장하며(Mueller et al., 2013; Oberg & Mueller, 2007), 프랑스에서는 최소 900초 동안 수행되는 3쌍 이상의 왕복 횡단측정을 요구한다(Le Coz et al., 2008). 우리나라의 수문조사 전담기관인 한국수자원조사기술원에서는 최소 500초 이상 최소 2회 이상의 왕복 횡단측정을 권장하고 있으며, 횡단측정 유량의 편차가 5% 이상일 경우 4회 이상의 왕복 횡단측정을 시행하도록 하고 있다.

### 2.2 ADCP 이동측정법 유량측정 성과의 불확도 산정 방법

ADCP 유량측정 성과의 불확도는 두 가지 접근 방식으로 추정할 수 있다. GUM에서 정의된 불확도 전파 방법은 단일 측정에 대해 적용 가능하며, 반복 측정 실험(repeated measures experiments)은 일정 조건 하에서 계측기법의 평균 불확도를 제공하며 ISO에서는 inter-laboratory method라고 불린다(ISO, 1994; ISO, 2010). 본 연구에서 활용한 QRev는 개별 유량측정 성과에 대한 불확도를 평가하므로 불확도 전파 방법을 이용한다. 불확도 전파 방법을 적용하려면 측정 과정을 수학적으로 표현한 모델, 즉 데이터 환산식(Data Reduction Equation, DRE)이 필요하며, 입력값(기초 측정값)의 불확도를 추정하거나 모델링하여야 한다(Despax et al., 2023).

### 2.3 QRev 개요

QRev는 미국 지질조사국(USGS) 수문국에서 개발한 ADCP 이동측정법 유량측정 성과의 전처리 및 품질평가 소프트웨어이다. 2016년 첫 공개된 이후 현장 적용 결과를 반영하여 개선되었으며, QRev 4.xx 버전이 출시되고 있다. QRev의 핵심 목표는 제조사별 소프트웨어에 의존하지 않고, 모든 ADCP 기기로부터 얻은 데이터를 공통의 알고리즘으로 일관성 있게 처리하는 것이다. 이를 통해 측정자나 장비에 따른 결과 편차를 줄이고 자동화된 품질관리(Quality Control)를 구현하고자 하였으며, 주요 기능은 다음과 같다.

- ① 데이터 품질검사 자동화 : 수심 측정 오류, 보트 경로 이상, 신호 세기 저하 등 다양한 오류 징후를 자동 검출하여 경고 메시지로 피드백 제공(예: Error Velocity나 Vertical Velocity 기준을 벗어나는 데이터 하이라이트 표시 등, 측정 중 놓칠 수 있는 품질저하 요인 알람).
- ② 자료 필터링 및 보정: 사용자 설정 기준에 따라 이상치 데이터 제거(예: 일정 오차 이상 데이터 제외) 및 보간 자동 처리. 외삽, 좌우안 손실보정(LC, Left/Right Bank Coefficient), 이동상 보정(SMBA) 등 자동 적용.
- ③ 일관된 계산 및 동일 알고리즘 적용: TRDI, SonTek사 ADCP 측정자료를 동일한 절차로 처리.
- ④ 결측자료 보완 및 오류처리 개선: 제조사 소프트웨어 기능을 개선한 자체 로직으로 결측 보완. 그 결과 WinRiver II나 RiverSurveyor Live로 계산한 유량과 QRev 결과가 상이할 수 있음.
- ⑤ 불확도 산정 및 출력: 불확도 추정치를 자동 계산하여 결과와 함께 제시.

**2.4 QRev 불확도 산정 방법**

QRev(Mueller, 2016, 2021)의 불확도 산정방법은 GUM의 단순화된 접근 방식이다. 이는 전문가 판단에 의해 추정되거나 단순 계산으로 구한 불확도 성분(components of uncertainty)을 조합하는 방식이다.

오차들이 서로 독립이라는 가정 하에, 총 유량의 상대 표준 불확도는 다음과 같이 각 성분의 제곱합의 제곱근(quadratic sum)으로 계산된다.

$$u'^2(\bar{Q}) = u'^2_{syst} + u'^2_{cov} + u'^2_{mb} + u'^2_{comp} + u'^2_{invalid} + u'^2_{edges} + u'^2_{extrap} \quad (5)$$

각 항의 의미는 다음과 같다:

- $u'_{syst}$  : 장비 관련 계통 오차(systematic error)에 의한 불확도
- $u'_{cov}$  : 무작위 측정 오차(random errors)에 의한 불확도
- $u'_{mb}$  : 이동하상(moving bed)에 의한 불확도
- $u'_{comp}$  : 컴퍼스 오차(compass bias)에 의한 불확도
- $u'_{invalid}$  : 유효하지 않은 데이터(보간된 유량의 10%)에 의한 불확도
- $u'_{edges}$  : 에지(edge) 유량의 불확도(에지 유량의 15%)
- $u'_{extrap}$  : 상단, 하단 외삽 유량에 대한 불확도(여러 외삽 방법 간 유량 차이 기반)

무작위 측정 오차에 의한 불확도는 다음과 같이 계산된다.

$$u'_{cov} = t_{2.5\%}^{P-1} CV / \sqrt{P} \quad (6)$$

여기서,  $CV$ 는  $P$ 개의 횡단측정유량의 변동계수(Coefficient of variation, CV),  $t_{2.5\%}^{P-1}$ 은 자유도  $P-1$ 에 대한 Student  $t$ -분포의 97.5% 분위값이다. 반복 횟수  $P$ 가 적을 경우,

불확도가 너무 커지는 결과가 발생하여 두 개 횡단측정만 수행된 경우의 품질 등급을 실증적으로 평가하고,  $CV=0.01$ 일 때 불확도 최소값을 3%, coverage factor를 기존 12.7 대신 3.3으로 설정하였다(Mueller, 2012).

하상추적(bottom-track)이 기준인 경우, 유효한 이동하상 테스트가 수행되었다면 이동하상에 따른 불확도  $u'_{mb}$ 는 이동성 하상이 감지되지 않으면 0.5%, 감지되었으면 0.75%이다. 만약 이동성 하상 테스트가 수행되지 않았거나 유효하지 않은 경우  $u'_{mb}=1.5\%$ 이다. 하상추적(bottom-track)이 기준이 아닌 경우,  $u'_{mb}=0\%$ 이다.

컴퍼스 오차에 따른 표준 불확도는 1도(°)로 가정되며, 이에 대한 세부사항은 Mueller(2018)를 참조한다. 수직 외삽에 따른 불확도  $u'_{extrap}$ 는 선택된 수직 유속 분포 프로파일과, 7가지 가능한 외삽 옵션 중 가장 근접한 4개 옵션 간의 유량 백분율 차이의 평균값으로 산정된다.

QRev 적용 후 결과를 출력하면 총 불확도와 함께 Random (무작위), InvalidData(유효하지 않은 데이터), Edge(에지), Extrapolation(외삽), MovingBed(이동하상), Systematic(계통) 오차 등 6개 성분에 대한 불확도를 얻을 수 있다. 다만, 이 성분별 불확도를 산정식에 적용한 총 불확도와 QRev에서 도출된 총 불확도가 불일치하여 본 논문에서는 불확도 성분을 Other(기타)로 정의하고 재산정하여 분석에 활용하였다. 이 기타 오차 항목에는 산정식에 있는 위의 컴퍼스 오차 등이 포함되어 있는 것으로 간주한다.

**2.5 USGS 유량측정 성과의 불확도 등급 평가 기준**

유량측정 성과는 다양한 방식으로 활용되지만, 가장 중요한 활용 목적은 실시간으로 예측되는 수위 또는 유속 자료를 이용하여 연속적인 유량을 산정하기 위해 수위-유량관계곡선식

Table 1. Accuracy ratings of individual discharge measurements (Sauer, V. B. et al., 1992)

Accuracy ratings		Uncertainty range
Excellent	(E)	within 2 percent of the actual "true" discharge
Good	(G)	within 5 percent
Fair	(F)	within 8 percent
Poor	(P)	measured discharge 8 percent greater or less than the true discharge

Table 2. Discharge measurement datasets of ADCP moving-boat method

Basin name	# of Stations	# of measurements
Han river	111	3,383
Nakdong river	113	3,470
Geum river	89	2,788
Yeongsan river	94	3,211
Sum	407	12,852

Table 3. Hydraulic characteristics of ADCP moving-boat measurements

Characteristics	Min.	Max.	Mean	Q10**	Q90**
Discharge(ABS*), $Q$ (m <sup>3</sup> /s)	0.00	3,327.45	45.03	0.60	94.54
Cross-sectional area, $A$ (m <sup>2</sup> )	0.57	4,944.46	158.98	8.11	276.30
Mean velocity, $V$ (m/s)	0.00	2.36	0.31	0.03	0.75
Width, $B$ (m)	1.39	803.65	72.64	17.37	144.51
Mean depth, $D$ (m)	0.14	13.19	1.18	0.39	2.20

\* ASB : Absolute value(Since there are negative values, it is expressed as an absolute value)

\*\* Q10 and Q90 are the 10<sup>th</sup> and 90<sup>th</sup> percentile

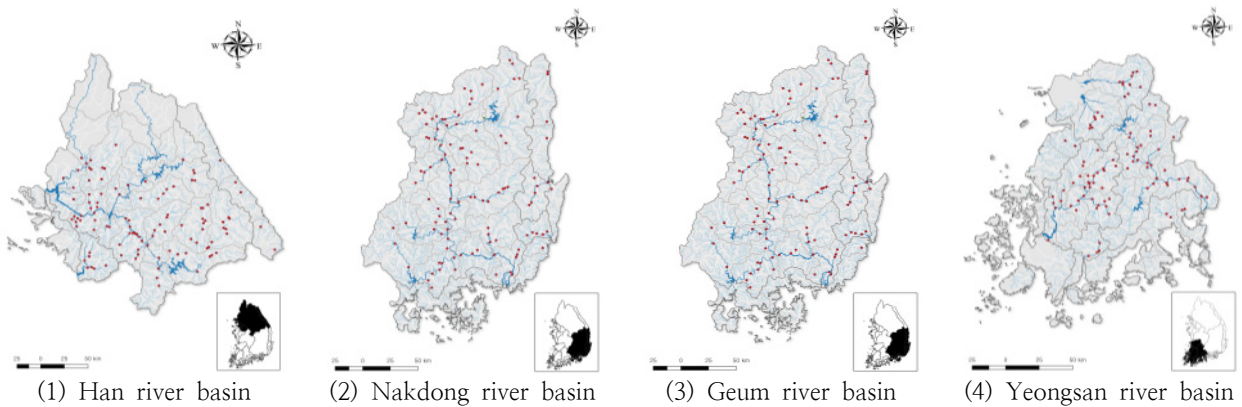


Fig. 2. Discharge gauging stations of four river basin

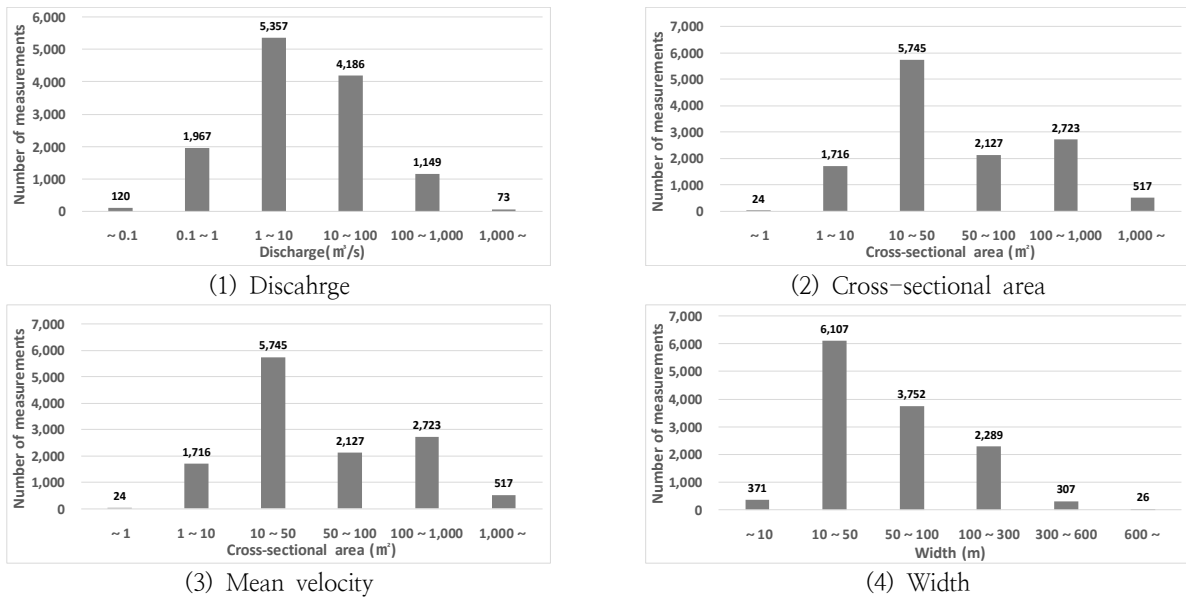


Fig. 3. Number of ADCP moving-boat measurements by characteristic ranges

(Stage-Discharge rating)이나 지표유속식(Index-velocity rating)을 정의하여 데 있다. 환산유량의 정확도는 개별 유량 측정 성과의 정확도에 크게 좌우되므로 개별 유량측정 성과의 정확도를 정량적으로 평가하는 것은 매우 중요하다. USGS (1988)는 유량측정 성과의 불확도를 구성하는 다양한 요소들을 정의하고, 이를 종합하여 전체 유량측정 오차를 추정하는 수많은 연구를 기반으로 개별 측정값의 오차를 직접 계산하는

대신, 오랫동안 활용되어 온 준(準)정량적 평가방법을 뒷받침 하는데 활용하였다. 이 방법은 단면의 균일성, 유속분포의 균질성, 하상조건 등을 바탕으로 측정인원의 판단에 따라 유량측정 성과의 정확도에 영향을 줄 수 있는 여러 요인을 질적으로 평가하는 방식으로 이에 근거하여 개별 유량측정 성과에 대해 Table 1과 같이 정확도 등급을 부여하고 있으며, 우리나라에서도 동일하게 활용하고 있다.

### 3. QRev를 이용한 ADCP 이동측정법 유량측정 성과 불확도 산정 및 분석

#### 3.1 대상지점 및 측정자료

본 연구에서는 QRev를 이용한 ADCP 이동측정법 유량측정 성과의 불확도 산정 및 분석을 위해 Fig. 2 및 Table 2와 같이 전국 407개 지점의 최근 3개년('22~'24년) ADCP 이동측정법 유량측정 성과 12,852개를 수집하였으며, 측정 성과의 수리 특성은 Table 3과 같다.

수집된 ADCP 유량측정 성과의 수리특성(Fig. 3)을 살펴보면, 전체의 약 74.3%인 9,543개 성과가 유량 1~100m<sup>3</sup>/s 범위에 있으며, 0.1m<sup>3</sup>/s 미만, 1,000m<sup>3</sup>/s 이상의 유량 구간에서는 ADCP를 활용도가 낮게 나타난다. 단면적은 10~50m<sup>2</sup> 범위에 5,745개(약 44.7%)로 가장 많았고, 100~1,000m<sup>2</sup> 범위에 2,723개(약 21.2%), 50~100m<sup>2</sup> 범위에 2,127개(약 16.6%) 순으로 나타났다. 평균유속의 경우 0.1~0.5% 범위에 5,732개(약 44.6%)로 가장 많은 성과가 분포하였으며, 다음으로는 0.01~0.1% 범위에 4,059개(약 31.6%)가 포함되어 0.5% 미만의 저유속 구간에서 ADCP가 많이 활용되고 있음을 알 수 있다. 수면폭은 10~300m 범위에 대부분의 성과(12,148개, 약 94.5%)의 성과가 분포하였으며, 평균수심은 전체의 약 88.3%인 11,348개의 성과가 2m 미만 구간에서 측정되었다.

#### 3.2 QRev를 이용한 ADCP 이동측정법 유량측정 성과 불확도 산정

QRev는 4.xx 버전이 출시되었으나 한글 호환성 등의 문제로 전체 성과에 대한 적용이 불가능하여 3.43 버전을 활용하였다. 수집된 개별 ADCP 이동측정법 유량측정 성과의 불확도를 산정하였으며, 이를 이용하여 도출한 전체 및 권역별 평균 불확도를 Table 4에 나타내었다. 전체 12,852개 측정 성과에 대한 평균 불확도는  $\pm 9.85\%$ 로 다소 높게 산정되었으며, 권역별로 보면 한강권역이  $\pm 7.71\%$ 로 가장 낮고 낙동강권역이  $\pm 12.57\%$ 로 가장 높았고, 금강권역과 영산강권역은 각각  $\pm 8.86\%$ 와  $\pm 10.03\%$ 로 나타났다. USGS 유량측정 성과 불확도 등급 기준으로 평가한 결과, 한강권역만 F등급으로 평가되었고, 전체 성과와 이외 권역 성과는 P등급이었다.

Fig. 4는 지점별 전체 지점별 측정 성과의 불확도를 권역별 박스플롯으로 나타낸 자료이며, 상대적인 비교를 위해 불확도 범위를  $\pm 500\%$ (좌)와  $\pm 100\%$ (우)로 나타내었다. 권역별 평균 불확도와 마찬가지로 낙동강권역과 영산강권역이 다소 산포도가 크게 나타나고 있으며, 상대적으로 낮은 불확도를 나타낸 한강권역과 금강권역의 산포 정도가 양호한 것을 확인할 수 있다. 평균 불확도  $\pm 20\%$  초과, 최대 불확도  $\pm 50\%$  초과, 불확도 편차 20% 초과한 성과품질이 특히 낮은 지점들을 살펴보면, 한강권역 양평군(양평교) 등 4개소, 낙동강권역 상주시(후천교) 등 16개소, 금강권역 부여군(백제교) 등 2개소, 영산강권역 정읍시(정읍교) 등 6개소로 총 28개소로 나타났으며, 낙동강권역에서 특히 많은 지점이 포함되었다.

불확도 범위별 측정 성과 분포는 Fig. 5와 같이 불확도  $\pm 6\sim 8\%$ (F등급) 구간에 가장 많은 성과가 분포하였고,  $\pm 5\sim 6\%$ (F등급) 구간,  $\pm 5\%$  미만(G등급) 구간 순으로 나타나 불확도  $\pm 8\%$  미만(F등급) 구간에 전체 약 74%(9,462개) 성과가 분포하였다. 다만, 불확도  $\pm 10\%$  이상(P등급)의 측정 성과도 전 권역 2,032개 성과로 매우 크게 나타난 것을 알 수 있다. 권역별 결과를 보면, 낙동강, 금강, 영산강권역의 경우 전체 결과와 동일한 경향을 나타내고 있으나, 한강권역의 경우  $\pm 5\%$  미만,  $\pm 5\sim 6\%$ ,  $\pm 6\sim 8\%$  구간이 거의 유사한 측정 성과가 분포하여 다른 권역과 차이를 보였다.

우리나라는 홍수예보, 갈수예보, 유지유량 관리, 댐/보 관리 등 목적에 따라 수문관측소를 설치·운영하고 있어 조사에 적합하지 않은 위치에서도 유량조사를 시행하고 있으며, 특히 수심이 깊고 유속이 느린 측정지점에서는 ADCP를 대체할 측정장비도 없는 실정이다. 앞서 살펴본 바와 같이 최근 3년간의 ADCP 이동측정법 측정 성과 불확도는 다소 높게 산정되었으며, USGS의 유량측정 성과 불확도 등급 기준 역시 P등급으로 나타나고 있어, 산정된 불확도의 특성을 분석하여 주요 원인을 도출하고자 한다.

#### 3.3 불확도 특성 분석

##### 3.3.1 성분별 오차 및 기여도 분석

QRev 불확도 산정을 위해 총 7개의 성분을 이용하고 있으며, 전체 측정자료에 대한 성분별 오차는 Table 5와 같다. 무작위(Random) 오차가  $\pm 7.29\%$ 로 전체 불확도 대비 약 54.81%의

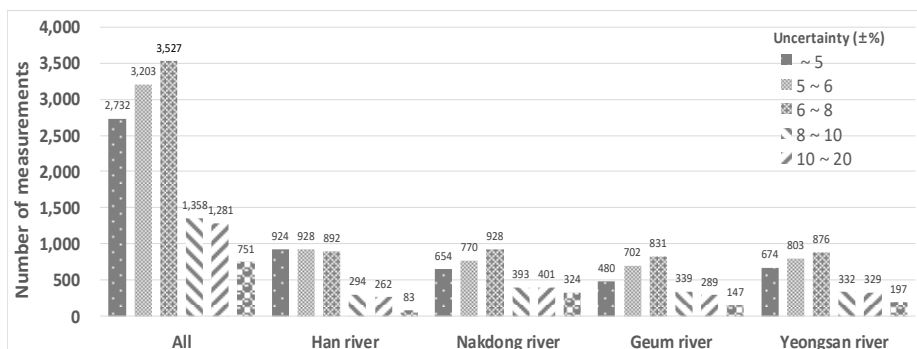
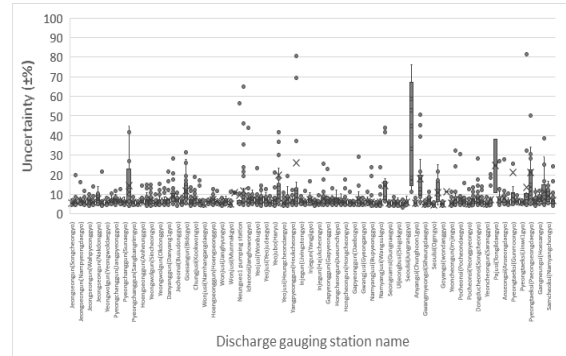
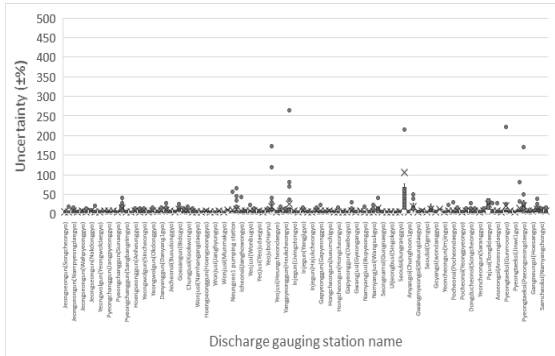


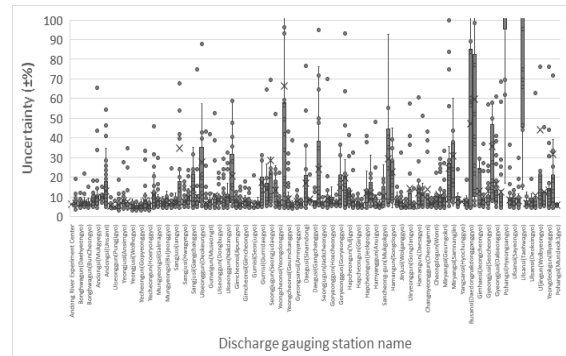
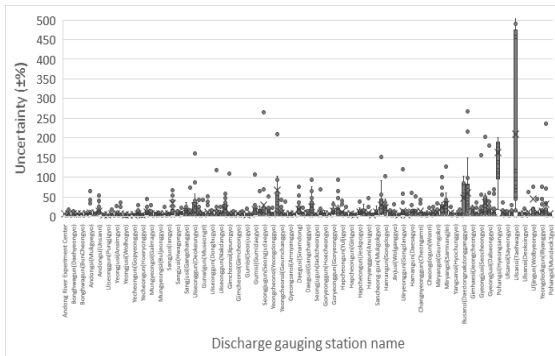
Fig. 5. Number of ADCP moving-boat measurements by uncertainty range

Table 4. Mean uncertainty and accuracy rating by basin

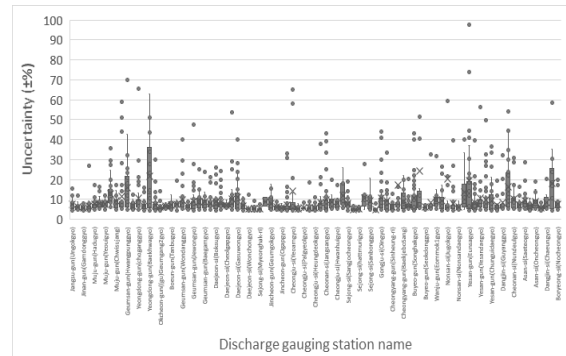
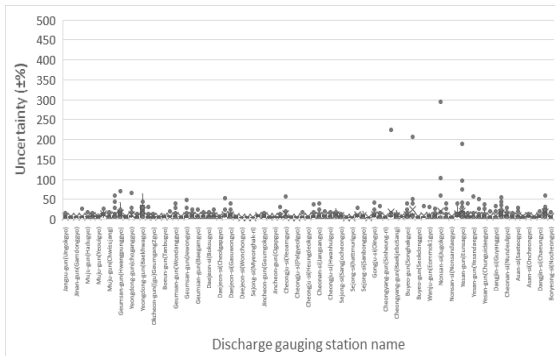
Characteristics	All	Han river	Nakdong river	Geum river	Yeongsan river
Mean uncertainty ( $\pm\%$ )	9.85	7.71	12.57	8.86	10.03
Accuracy Rating	P	F	P	P	P



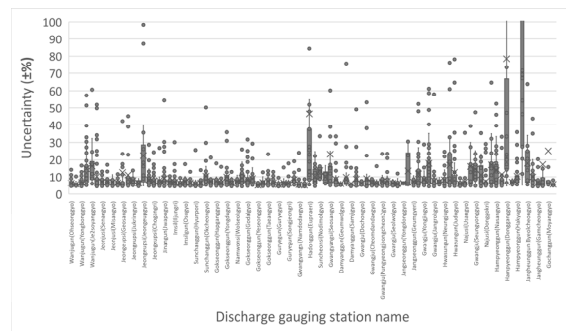
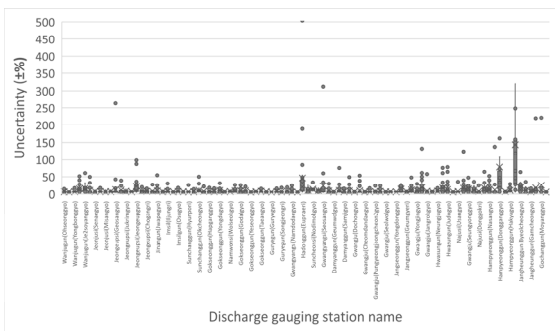
(1) Han river



(2) Nakdong river



(3) Geum river



(4) Yeongsan river

Fig. 4. Uncertainties by basins and discharge gauging stations

비중을 차지하고 있고, 다음으로는 기타(Other) 오차가  $\pm 5.29\%$ 로 약 28.82%의 기여도를 나타내고 있다.

불확도 범위별 성분별 오차 및 기여도는 Fig. 6과 같이 대체로 무작위 오차, 이동하상(MovingBed) 오차, 기타 오차가  $\pm 2\%$  이상으로 상대적으로 큰 성분별 오차와 기여도를 나타내고 있다. 무작위 오차는 총 불확도 5% 미만인 경우 기여도가 약 11.5%에 불과하지만 총 불확도  $\pm 10 \sim 20\%$ 일 때 82.2%,  $\pm 20\%$  이상일 때는 89.18%의 비중을 차지하는 등 총 불확도가 증가할수록 가장 지배적인 영향력을 가진다. QRev에서 이동하상 오차는 GPS를 사용하지 않았거나 이동하상 테스트를 수행하지 않으면 이동하상 발생 여부와 관계없이  $\pm 1.5\%$ 로 산정되므로, 불확도  $\pm 5\%$  이하에서는 37%, 불확도  $\pm 10\%$  이하에서도 10% 이상의 비교적 높은 비중을 나타내고 있다. 유효하지 않은 데이터(InvalidData) 오차와 외삽(Extrapolation) 오차도 불확도 범위에 따라 증가하는 추세를 나타내고 있으나

무작위 오차에 비해 매우 작기 때문에 미치는 영향은 크지 않다. 에지(Edge) 오차는 불확도에 대한 기여도가 가장 작게 나타났으며, 이동하상 오차와 계통(Systematic) 오차는 불확도 범위에 따른 변동성이 거의 없다.

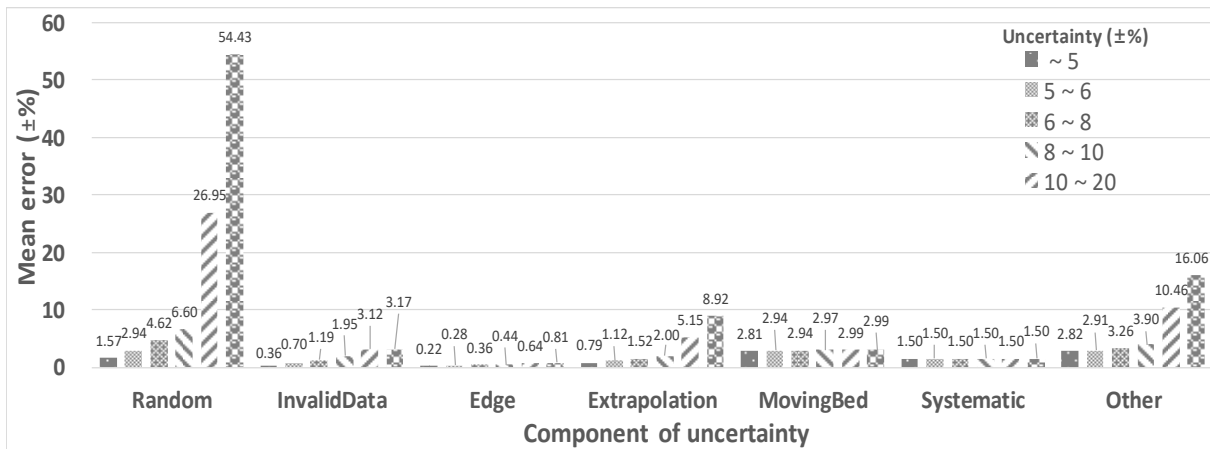
QRev 성분별 오차 중 가장 큰 영향을 미치는 무작위 오차는 2.3절 Eq. (6)과 같이 유량 변동계수(CV)가 주요 인자이므로 불확도 범위별 평균 유량 변동계수를 산정하여 검토한 결과(Fig. 7), 불확도 증가에 따라 유량 변동계수가 급격히 증가하고 있으며, 앞서 불확도가 높게 산정된 낙동강권역에서 상대적으로 큰 유량 변동계수를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

3.3.2 측정 성과 수리특성과의 연계성

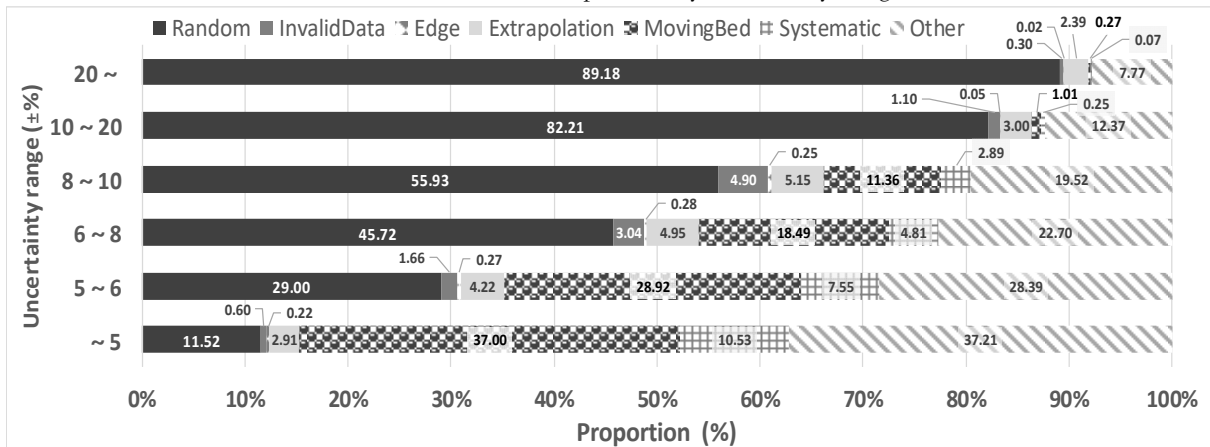
불확도와 측정 성과 수리특성의 연계성 검토를 위해 불확도 범위별 평균 수면폭, 단면적, 평균유속, 평균수심을 산정하여

Table 5. Mean errors and relative contributions of uncertainty components

Characteristics	Random	InvalidData	Edge	Extrapolation	MovingBed	Systematic	Other
Mean error ( $\pm\%$ )	7.29	1.18	0.36	1.89	2.92	1.50	5.29
Contribution ratio (%)	54.81	1.43	0.14	3.68	8.80	2.32	28.82



(1) Mean errors of components by uncertainty range



(2) Relative contributions of components by uncertainty range

Fig. 6. Mean errors and relative contributions of uncertainty components by uncertainty range

Fig. 8에 나타내었다. 수면폭, 단면적, 평균수심의 경우  $\pm 10\%$  이내의 불확도 범위에서는 거의 유사한 값을 나타내고 불확도와 뚜렷한 경향성이 있다고 보기 어려우나, 평균유속의 경우 불확도가 커질수록 감소하는 명확한 경향성을 나타내고 있어 평균유속이 불확도의 주요한 변동원인이 됨을 알 수 있다.

### 3.3.3 지점특성과의 연계성

앞서 측정 성과의 불확도는 유량 변동계수, 평균유속과의 상관성이 높으며, 권역별 특성도 나타나는 것을 확인하였다. 이런 요소들은 지점특성에 따라 경향성을 나타낼 수 있으므로 측정지점의 특성을 조사하여 지점특성별 수리특성 및 불확도를

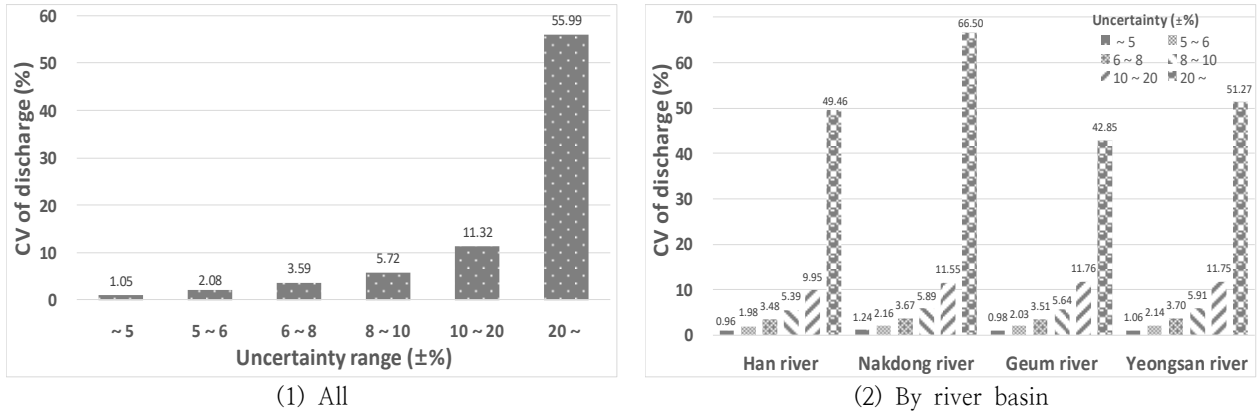


Fig. 7. Coefficient of Variation of discharge by uncertainty range

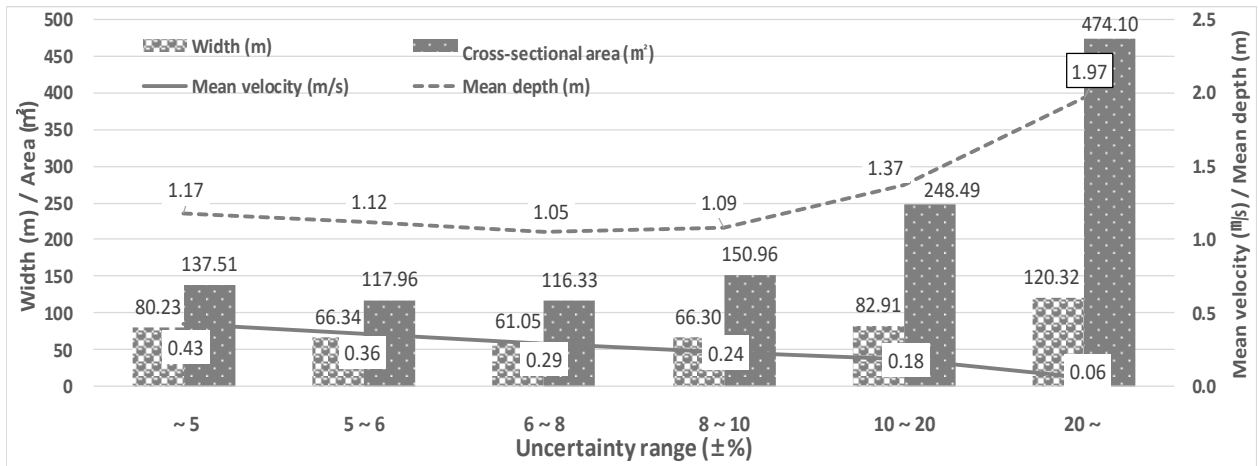


Fig. 8. Hydraulic characteristics by uncertainty range

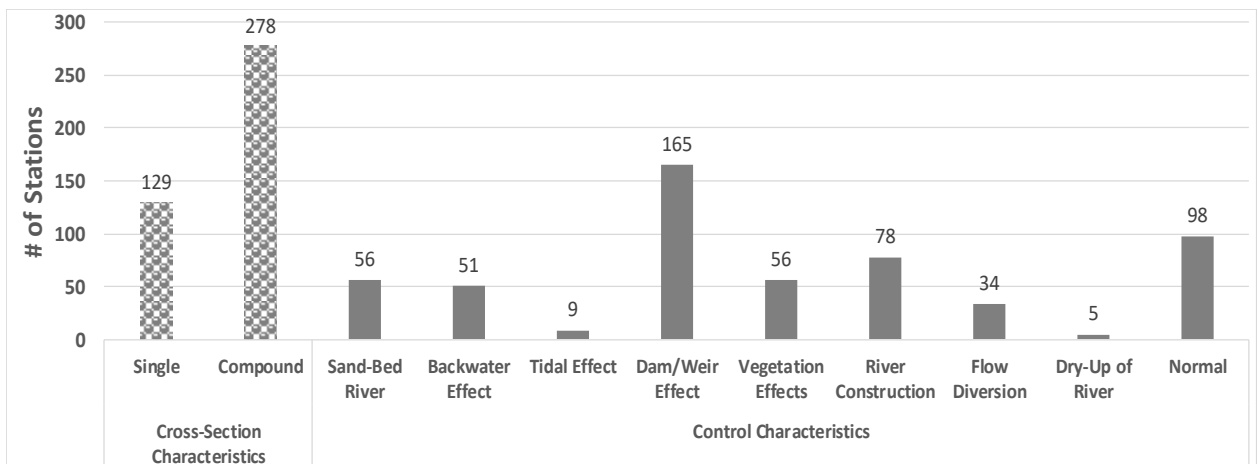


Fig. 9. Survey results of site characteristics at discharge gauging stations

구분하고 앞 절에서의 분석 결과와 연계하여 불확도 특성을 분석하였다.

1) 지점특성 조사

대상지점 407개소에 대한 지점특성은 하천흐름에 영향을 주는 단면특성 2개, 통제특성 9개로 구분하여 조사하였으며, Fig. 9와 같다. 통제특성 중 배수영향은 본류 및 지류 배수영향 지점이며, 댐/보에 의한 배수영향 지점과 조위영향 지점에 의한 배수영향 지점은 각각 댐/보영향, 조위영향 지점으로 구분하였다. 조사 결과를 살펴보면 단면특성은 복단면(278개소)이 단단면(129개소)에 비해 2배 이상 많고, 통제특성에서는 댐/보영향 지점이 165개소로 가장 많았으며, 하천공사 78개소, 모래하천/식생영향 56개소, 배수영향 51개소 등으로 나타났다.

2) 지점특성별 수리특성

모든 측정 성과에 대해 지점특성별 수리특성(수면폭, 단면적, 평균유속, 평균수심) 및 유량 변동계수를 검토하여 Table. 6에 나타내었다. 앞서 불확도 영향 요소로 분석된 두가지 요소(평균유속과 유량 변동계수)를 보면, 먼저 평균유속의 경우 댐/보영향, 건천화 지점에서 0.3% 미만으로 매우 느리게

산정되었고, 유량 변동계수는 조위영향 지점이 30.99%로 가장 높았으며, 댐/보영향, 건천화 지점에서도 9% 이상으로 큰 값을 보였다.

3) 지점특성별 불확도

개별 측정 성과를 지점특성별로 구분하여 평균 불확도를 산정하고, 지점특성별로 불확도 범위에 포함된 측정 성과의 비율을 분석하였다. Fig. 10을 보면 평균 불확도가 가장 큰 지점특성은 조위영향(±44.43%)이었고, 전체 성과에 대한 평균 불확도인 ±9.85% 이상은 건천화(±12.17%), 댐/보영향(±11.93%) 지점특성 항목에서 나타났으며, 측정여건이 좋지 못한 통제특성인 식생영향, 하천공사 지점의 평균 불확도는 각각 ±8.13%, ±7.59%로 의외로 낮게 산정되었다.

불확도 범위별 측정 성과를 지점특성별로 구분하여 구성 비율을 분석한 결과는 Fig. 11과 같으며, 불확도 ±10% 이상의 성과분포를 보면 조위영향(±36.2%), 댐/보영향(±23.1%), 건천화(±24.8%) 지점에서 다른 지점특성(약 ±10% 내외)에 비해 상대적으로 더 많이 분포하고 있음을 알 수 있다. 대부분의 통제특성에서는 불확도 ±6~8% 구간의 구성 비율이 가장 높게 나타났으며, 모래하천, 배수영향, 조위영향 지점에서는

Table 6. Hydraulic characteristics by site characteristics

Component of uncertainty	Width (m)	Cross-sectional area (m <sup>2</sup> )	Mean velocity (m/s)	Mean depth (m)	CV of discharge (%)
Sand-Bed River	54.15	75.74	0.40	0.95	4.44
Backwater Effect	73.46	95.15	0.34	1.08	4.07
Tidal Effect	195.51	648.89	0.33	2.33	30.99
Dam/Weir Effect	99.22	292.45	0.26	1.55	9.36
Vegetation Effects	45.85	43.43	0.31	0.78	4.93
River Construction	57.24	61.44	0.34	0.92	4.47
Flow Diversion	61.80	77.87	0.38	0.99	4.07
Dry-Up of River	47.04	32.75	0.27	0.70	9.93
Normal	56.95	75.47	0.30	1.00	5.56

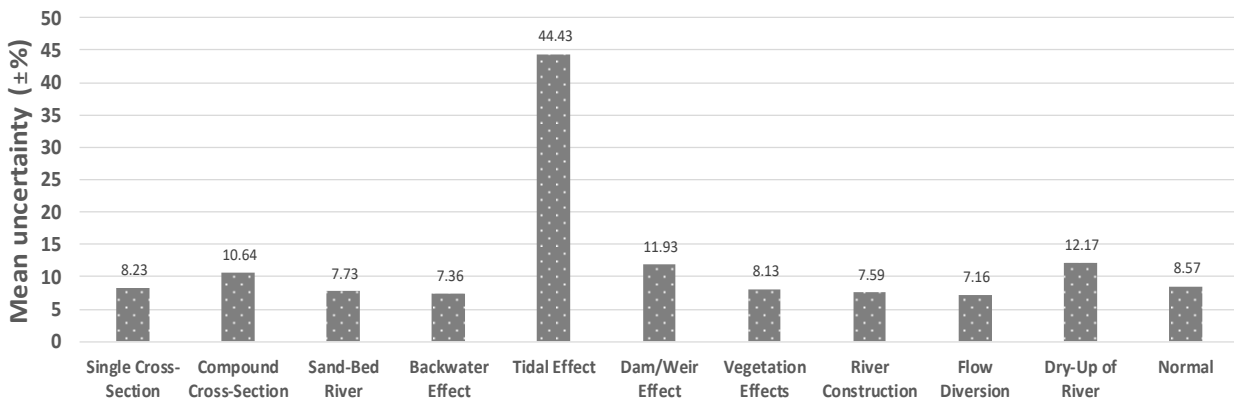


Fig. 10. Mean uncertainty by site characteristics

불확도  $\pm 5\%$  이하 구간이 가장 크게 분포하여 상대적으로 양호한 성과를 나타내었다. 조위영향과 배수영향 지점은 일반적으로 유량 변동이 크고 유속이 느려 불확도가 높게 산정될 수 있는 조건이지만 불확도  $\pm 5\%$  이하 구간이 가장 크게 나타났는데 조위나 배수는 일시적으로 발생하는 현상으로 이런 영향이 발생하지 않는 시기에 측정된 성과가 많이 포함된 것으로 판단된다. 다만, 조위영향 지점에서는 불확도  $\pm 20\%$  이상의 성과 비율도 25%로 매우 높게 나타나 조위영향 발생 시의 성과도 다수 존재하는 것을 알 수 있다.

불확도와와의 연계성이 높게 검토되었던 유량 변동계수와 평균유속을 불확도 구간별 지점특성별로 검토하였으며, Fig. 12에 나타내었다. 검토 결과, 지점특성과 관계없이 불확도 증가에 따라 유량 변동계수는 증가하고 평균유속은 감소하는 동일한 경향을 보이므로 이 두 항목이 불확도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 QRev 소프트웨어를 이용하여 ADCP 이동 측정법 유량측정 성과의 불확도를 산정하고 QRev의 각 요소별

불확도 및 기여도와 측정 성과의 수리특성, 지점특성과의 연계성을 분석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

첫째, 우리나라 407개 유량관측소에서 측정된 12,852개 ADCP 이동측정법 유량측정 성과에 대해 QRev를 이용하여 불확도를 산정하여 분석하였다. 평균 불확도는 9.85%로 다소 높게 산정되었으며, 불확도  $\pm 8\%$  미만(F등급) 9,462개(약 74%),  $\pm 8\%$  이상(P등급) 3,390개(약 26%)로 F등급 이하에 더 많은 측정 성과가 포함되었으나 P등급 측정 성과의 불확도가 매우 과대하여 평균이 높아진 것으로 판단된다. 한강권역과 금강권역의 측정 성과가 낙동강권역, 영산강권역의 측정 성과보다 상대적으로 양호한 결과를 나타내었으며, 불확도 구간별 측정 성과 분포는 불확도  $\pm 6\sim 8\%$ (F등급) 구간에 가장 많은 성과가 분포하였다.

둘째, 총 7개의 QRev 성분별 오차 및 불확도에 대한 기여도를 산정하여 분석하였다. 성분별 오차 검토 결과, 무작위 오차, 이동하상 오차, 기타 오차가 상대적으로 크게 나타났으며, 특히 무작위 오차와 그 주요 인자인 유량 변동계수는 불확도가 높아질수록 더 지배적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이동하상 오차는 낮은 불확도에서 높은 비중을 나타내었으며, 실제 이동하상 발생 여부를 반영하지 않으므로 이에 대한

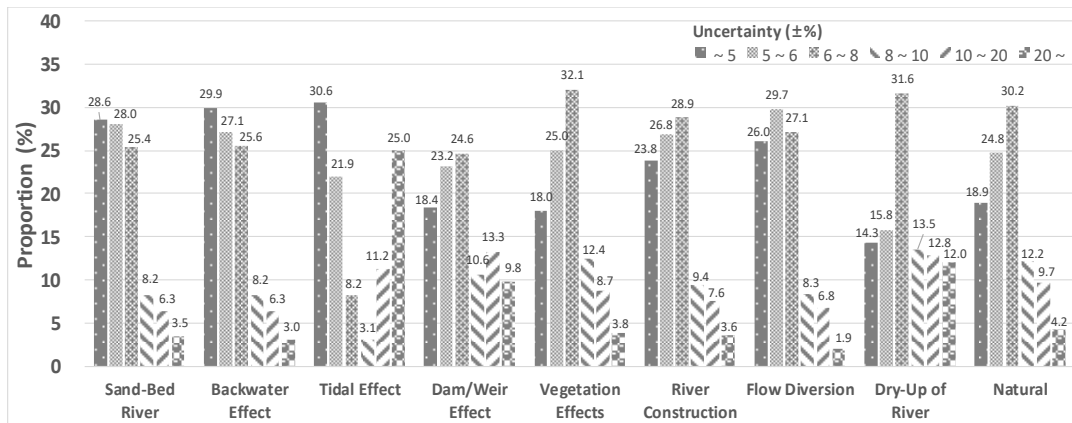
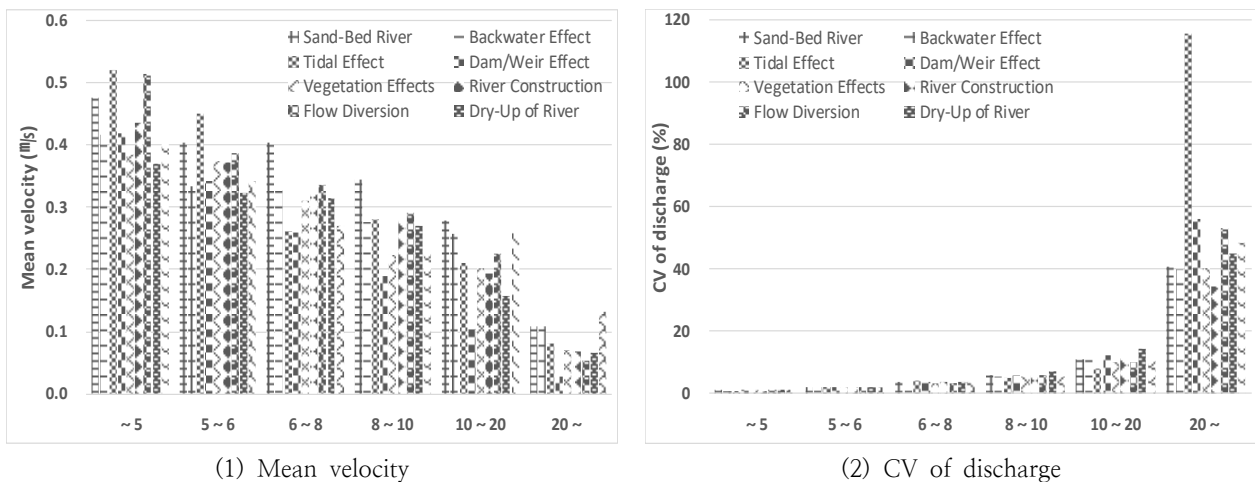


Fig. 11. Distribution of measurements by uncertainty range and site characteristics



(1) Mean velocity

(2) CV of discharge

Fig. 12. Analysis of site-specific hydraulic characteristics by uncertainty range

개선을 검토할 수 있을 것으로 판단된다.

셋째, 불확도와 측정 성과 수리특성의 연계성을 분석을 위해 측정 성과의 불확도 구간별 평균 수면폭, 단면적, 평균유속, 평균수심을 산정하여 검토하였으며, 평균유속이 불확도와 가장 높은 연계성을 나타내는 수리특성인 것으로 나타났다.

넷째, 유량측정 지점특성이 불확도에 미치는 영향을 분석하기 위해 단면특성 2개, 통제특성 9개의 지점특성을 조사하였으며, 전체 측정 성과에 대해 지점특성별 수리특성 및 불확도를 분석하였다. 대상 지점 407개소의 단면특성은 복단면 278개소, 단단면 129개소였으며, 통제특성은 댐/보영향 지점이 165개소로 가장 많았다. 지점특성별 수리특성 및 불확도 검토 결과, 조위 영향 지점, 건천화 지점, 댐/보영향 지점에서 높은 불확도를 나타내었고, 불확도 범위별 측정 성과의 지점특성별 구성비율 역시 동일한 경향을 나타내었다. 배수영향 지점은 측정에 불리한 통계특성임에도 불확도가 상대적으로 낮게 산정되어 해당 영향이 없는 시기에 측정된 성과가 많이 포함된 것으로 판단되며, 조위영향 지점에서는 불확도  $\pm 6\%$  이하의 성과와 불확도  $\pm 20\%$  이상의 성과 비율이 높게 나타나 양호한 조건의 성과와 조위영향이 발생하는 조건의 성과가 상존하는 것을 알 수 있다. 불확도 범위별 유량 변동계수와 평균유속을 지점특성별로 검토 검토한 결과, 지점특성과 관계없이 불확도 증가에 따라 유량 변동계수는 증가하고 평균유속은 감소하는 경향을 보이므로 두 항목이 불확도에 가장 큰 영향을 미치는 요소임을 다시 한번 확인할 수 있었다.

위와 같은 분석과정을 통해 ADCP 이동측정법 유량측정 성과의 불확도 산정에 USGS 소프트웨어인 QRev의 활용성을 확인하였다. 우리나라 수문조사의 특성으로 인해 유량조사 지점 중 불확도가 높게 산정되는 특성의 지점이 반드시 포함되고 있으므로 QRev를 이용한 불확도가 높게 산정되어 기존 USGS 불확도 등급 기준으로 평가한 결과 역시 양호한 결과를 얻지 못하였다. 이를 개선하기 위해서는 QRev의 성분별 불확도를 일부 보완하거나 본 연구에서의 불확도와 연계성이 높은 수리특성 인자 및 지점특성 분석 결과를 반영하여 향후 우리나라 특성에 맞는 불확도 등급 기준 개발이 필요할 것으로 판단된다. 더불어 본 연구에서의 분석 결과는 향후 ADCP 이동측정법 유량측정 성과의 품질관리와 유량 자료 신뢰성 확보를 위한 연구의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2022R 1A2 C2091773).

## References

Despax, A., et al. (2023). "Validation of an Uncertainty Propagation Method for Moving-Boat ADCP Discharge

Measurements." *Water Resources Research*, 59(1), e2021WR031878.

Gonzalez-Castro, J. & Muste, M. (2007). "Framework for Estimating Uncertainty of ADCP Measurements from a Moving Boat by Standardized Uncertainty Analysis." *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(12), 1390-1402.

ISO. (1994). ISO 5725:2 - Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method (p. 42).

ISO. (2010). Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation (p. 38). International Organization for Standardization.

Huang, H. (2018). "Estimating uncertainty of streamflow measurements with moving-boat acoustic Doppler current profilers." *Hydrological Sciences Journal*, 63 (11), 1658-1671.

Kim, D. S., & Kim, J. M. (2016). "Assessment of ADCPs Discharge Measurement Uncertainty by GUM Framework." *Water and Future: Journal of Korea Water Resources Association*, 49(12), 23-31.

Kim, D. S., Kim, J. M., Byeon, H. H., & Kang, J. K. (2017). "Uncertainty Analysis of ADCP Point Measurement Method Discharge Based on GUM Framework." *Journal of Korea Water Resources Association*, 50(8), 521-535.

Kim, J. M., & Kim, D. S. (2022). "Development of Software for GUM-based ADCP Discharge Measurement Uncertainty Assessment." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, 17-17.

Kim, J. M., et al. (2025). "Improvement of ADCP Edge Discharge Measurement Accuracy." *Journal of Korea Water Resources Association*, 58(1).

Ministry of Environment (ME). (2019-2023). "Hydrological Annual Report in Korea." Sejong: Ministry of Environment.

Moore, S. A., et al. (2017). "Monte Carlo Approach for Uncertainty Analysis of Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurement by Moving Boat." *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(3), 04016104.

Mueller, D. S. (2016). "QRev—Software for computation and quality assurance of acoustic Doppler current profiler moving-boat streamflow measurements." U.S. Geological Survey Open-File Report 2016-1068.

Mueller, D. S. & Wagner, C. R. (2006). "A negative bias in discharge measurements made with an acoustic Doppler current profiler (ADCP) is attributed to the movement of sediment on or near the streambed." USGS Open-File Report 2006-1135.

- Mueller, D. S., et al. (2013). "Measuring discharge with acoustic doppler current profilers from a moving boat." U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 3-A22.
- Naudet, G., et al. (1999). "A correction method for moving bottom error on ADCP discharge measurements." In Proceedings of the XXVIIIth International Association of Hydraulic Engineering and Research Congress, 913-918.
- Oberg, K. A., et al. (2005). "Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Acoustic Doppler Current Profilers." U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5183.
- Sauer, V. B. & Meyer, R. W. (1992). "Determination of Error in Individual Discharge Measurements" U.S. Geological Survey Open-File Report 92-144.
- Song, J. H., Kim, C. Y., & Kim, S. E. (2016). "Analysis of the Status of Discharge Measurement using ADCP." Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference, 448-448.
- Song, J. H., Kim, S. E., Jang, B. J., & Jung, S. W. (2017). "Processing and Analysis of Moving-Boat ADCP Discharge Measurements using QRev." Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference, 505-505.