



## Uncertainty analysis for Section-by-Section method of ADCP discharge measurement based on GUM standard

Kim, Dongsu<sup>a</sup> · Kim, Jongmin<sup>b\*</sup> · Byeon, Hyunhyuk<sup>c</sup> · Kang, Junkoo<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Dankook University

<sup>b</sup>River Experiment Center, KICT

<sup>c</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

Paper number: 17-013

Received: 23 January 2017; Revised: 22 March 2017 / 21 June 2017; Accepted: 21 June 2017

### Abstract

Acoustic Doppler Current Profilers (ADCPs) have been widely utilized for assessing streamflow discharge, yet few comprehensive studies were conducted to evaluate discharge uncertainty in consideration of individual uncertainty components. It could be mostly because it was not easy to determine which uncertainty framework can be appropriate to rigorously analyze streamflow discharge driven by ADCPs. In this regard, considerable efforts have been made by scientific and engineering societies to develop a standardized theoretical framework for uncertainty analysis in hydrometry. One of the well-established UA methodology based on sound statistical and engineering concepts is Guide to the Expression of Uncertainty Measurement (GUM) adopted widely by various scientific and research communities. This research fundamentally adapted the GUM framework to assess individual uncertainty components of ADCP discharge measurements, and subsequently provided results of a customized experiment in a controllable real-scale artificial river channel. We focused particularly upon sensitivities of uncertainty components in the GUM framework driven by ADCPs direct measurements such as depths, edge distance, submerged depth, velocity gap, sampling time, repeatability, bed roughness and so on. Section-by-Section method for ADCP discharge measurement was applied for uncertainty analysis for this study. All of measurements were carefully compared with data using other instrumentations such as ADV to evaluate individual uncertainty components.

**Keywords:** Uncertainty, ADCP, GUM, Discharge, River experiment center

## GUM 표준안 기반 ADCP 지점 측정 방법 유량 측정 불확도 분석

김동수<sup>a</sup> · 김종민<sup>b\*</sup> · 변현혁<sup>c</sup> · 강준구<sup>b</sup>

<sup>a</sup>단국대학교 토목환경공학과, <sup>b</sup>한국건설기술연구원 하천실험센터, <sup>c</sup>명지대학교 토목환경공학과

### 요 지

음향 도플러 유속계(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCPs)는 하천의 유량측정에 널리 사용되고 있으나, 유량 측정성과의 불확도를 평가하는 방법에 대하여 진행된 연구는 부족한 현실이며, 이는 실제 하천에서 유속 및 유량 등의 수리량을 조절하는 것이 현실적으로 불가능하여 ADCP의 불확도 요인별 실험 및 분석이 어렵기 때문이다. 유량 및 수리량의 측정 불확도를 평가하기 위하여 과학 및 공학 분야에서는 다양한 연구들이 진행되어 왔으며, 그 중 국제적으로 공인받고 있는 방법 중 하나가 GUM (Guide to the Expression of Uncertainty Measurement)이다. 본 연구에서는 GUM 표준안을 기반으로 ADCP의 유량 측정 불확도를 평가하기 위한 연구를 수행하였다. ADCP의 유량 측정 불확도 요인별 분석을 수행하기 위하여 유량 공급의 조절이 가능한 실험 규모 수로를 보유하고 있는 하천실험센터에서 실험을 진행하였으며, ADCP의 측정 정확도에 영향을 미치는 수심, 측정 지점에서 하안까지의 거리, ADCP의 잠김 깊이, 유속 오차, 측정 시간, 반복 횟수, 하상 조건 등에 대한 측정 정확도 평가 실험을 수행하였다. ADCP로 유량을 측정하는 방법은 지점측정방식을 기반으로 유속-면적법을 통해 산정하는 방법과 일반적으로 사용되는 이동측정방식이 있으며, 본 연구에서는 ADCP의 지점측정방식을 통해 유량을 산정하는 Section-by-Section 방법으로 산정된 유량의 불확도를 평가하였다. 모든 측정 결과는 요인별 불확도 평가를 수행하기 위하여 유속은 ADV, 수심은 광파기로 측정된 결과와 비교하였다.

**핵심용어:** 불확도, ADCP, GUM, 유량, 하천실험센터

\*Corresponding Author. Tel: +82-54-843-1803

E-mail: jongminkim@kict.re.kr (J. Kim)

## 1. 서론

유량 측정 성과는 유역의 설계 홍수량 산정 및 관측 지점의 수위-유량 관계곡선 구축 등이· 치수를 위한 설계나 유역의 장·단기 계획의 수립 시 기초자료로 사용되고 있으며, 설계나 연구 등의 목적을 위해 2·3차원 수치해석 모델의 입력 및 검·보정 자료로서 사용되고 있다(Jung et al., 2000; Son et al., 2014). 국내의 경우 평수기의 유량 측정은 일반적으로 부자나 지점 유속계로 측정된 유속으로부터 유량을 산정하거나, 수심이 충분히 확보되는 하천에서는 ADCP를 이용하여 유량을 측정하고 있으며, 홍수기에는 부자나 전자파 표면유속계를 이용한 방법을 사용하고 있다(Kim et al., 2015c; Lee et al., 1995; Lee et al., 1997). 그러나, 각종 장비로 측정된 유량성과에 대한 신뢰성을 나타내는 지표인 측정 불확도를 산정하거나 공시하는 경우는 드물다. 그 이유로는 불확도 산정에 필수적인 이론적인 표준안이 통일되지 않았고 유량 측정에 영향에 미치는 다양한 불확도 인자들에 대한 정보가 부족하였기 때문이다. 따라서 단순히 반복 측정된 유량의 표준편차를 불확도로 잘못 이해하거나, 프로펠러유속계 기반 도섭법의 경우 간편법인 ISO 748 (ISO, 2007) 등을 활용하고 있어, ADCP 등 최근 도입된 측정방법에 대한 불확도 산정에 적용함에 있어 한계가 있었다.

2000년대에 들어 미국항공학회(AIAA, 1995) 및 미국기계학회(ASME, 1998)에서 제시된 불확도 산정안이 ADCP 등 유량계측 불확도 산정에 도입되기 시작하였으나 (Gonzalez-Castro and Muste, 2007), 위 표준안의 수학적/통계학적 방법론에 대한 이견들이 제시되었다. 따라서 WMO의 Chy (Commission of Hydrology)는 IAHR, IAHS, ISO, USGS, Water Surveyor of Canada 등에서 파견된 전문가들과 공동으로 문제점을 공유하고 기존 표준안들을 검토하여 ISO 및 BIPM, IFCC 등 6개 기구가 공동으로 제시한 측정 불확도 산정 지침서(Guide to the expression of Uncertainty in Measurement, GUM, 1993)가 유량 산정 불확도 표준안으로 타당하다고 결론짓고 GUM을 보완하고 구체적인 적용안을 확충하여 제시하였다(JCGM 100, 2008). GUM의 경우, 국내에서 이미 물리 및 역학, 전기, 화학, 미생물 시험 등의 분야에서 불확도 평가를 위한 표준안으로 채택되어 사용되고 있다(KOLAS-G-005, 2012).

그러나, GUM 표준안도 모든 계측 분야에 적용할 수 있는 일반적인 안으로, ADCP 등과 같은 특정 장비에 기반하고 정형화된 유량산정 알고리즘에 구체적으로 적용하는 단계에 이르기 위해서는 추가적인 적용 작업이 필요하였다. 이에, Lee

et al. (2014)는 지점 측정 방식 ADCP로 측정된 유량측정 결과를 GUM 표준안에 적용하여 17가지 불확도 인자들을 고려하여 유량산정 불확도를 평가한 바 있다. Lee et al. (2014)의 연구는 드물게 GUM 표준안을 ADCP에 적용한 사례이나, 유량 산정 방법이 RDI에서 제공하는 Section by Section method (RDI, 2014)와 이동측정방식(Moving boat method, RDI, 1996; SonTek, 2009)의 가장자리(Edge) 유량 산정식을 혼용하여 사용하였기 때문에 일반적인 중앙단면법에 대한 유량 불확도 산정법이 아니다. 그리고, 사용한 센서 근처에서의 오류(Kim et al., 2015a; Mueller et al., 2007; Muste et al., 2010)와 수심측정 불확도 등과 같은 인자에 대한 불확도를 고려하지 못한 면이 있었다. 또한, 흐름이 통제되지 않아 부정류가 빈번한 실제하천에서 평가하였고, 유속 정확도에 대한 신뢰도가 검증되지 않은 FlowTracker (SonTek, 2009)로 ADCP 측정 유속 오차를 평가하는 등 현장실험과 평가 장비에 대한 신뢰도가 떨어지는 한계가 있었다.

본 연구에서는 GUM 표준안에 대한 개요를 간략히 제시하고, ADCP 지점식 유량 측정 실무에서 사용하고 있는 ‘Section-by-Section’ 방법에 기반한 유량 불확도를 GUM 기준에서 평가하기 위한 이론적인 절차를 확립하고, 실제 실험을 통해 불확도 인자들을 분류 및 산정하여 시범적으로 평가한 결과를 제공하고자 한다. ADCP 유량 산정 불확도에 영향을 미치는 인자들의 요소 불확도를 산정하기 위해 소규모 하천 규모이지만 흐름의 안정적 통제가 가능하고, 실내 실험에서 정밀 유속 측정에 사용되고 있는 microADV를 활용하여 ADCP 유속을 검증할 수 있는 한국건설기술연구원 하천실험센터의 직선수로로 사용하였다. 실험에서는 ADCP 측정 유속의 정확도를 평가하고 초음파 수심측정 결과를 광파기(Total Station)를 활용한 실제 수심과 비교하는 등 정밀 현장실험에 기반하여 지점 측정 방식 ADCP의 불확도 인자인자들을 수심 평균 유속 산정에 발생하는 불확도 인자 7가지, 수심 측정 결과에 대한 불확도 인자 3가지, 횡방향 측선 간격 측정 결과에 대한 불확도 인자 2가지, 유량 산정 모델에 대한 불확도 인자 5가지로 제시하고 분석을 수행하였다. 또한, 불확도 수치(Uncertainty budget)를 산정하여 요소 인자들 중 유량 불확도에 영향을 미치는 우선순위를 분류하여 불확도 저감을 위한 방안도 제시하고자 한다.

## 2. GUM 표준안 개요

GUM 표준안은 다양한 불확도 인자에 대한 영향을 오차의 전파법칙에 기반하여 고려하고 있으며, 불확도를 평가하는

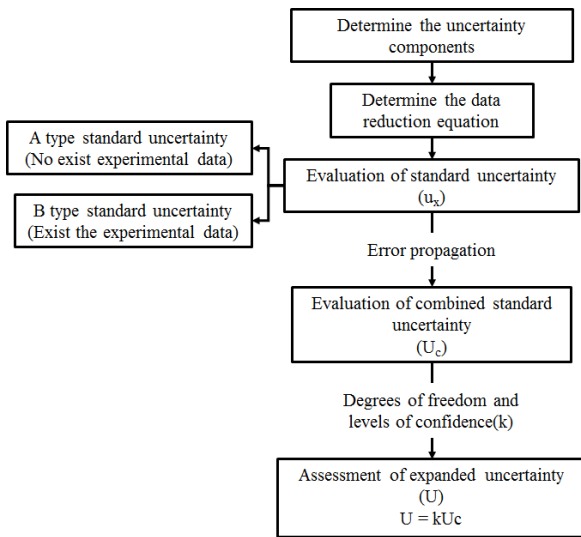


Fig. 1. A procedure for uncertainty assessment based on GUM framework (JCGM 100, 2008)

방법은 Fig. 1과 같이 5가지 단계로 구분할 수 있다(JCGM 100, 2008). 이와 같은 단계는 임의의 관측값을 산정하는 데 일반적으로 적용될 수 있고, 본 연구에서는 유량 산정이 목표이므로 이후 임의의 관측값 대신 유량 산정으로 구체화하였다.

**2.1 불확도 인자 분류 및 유량산정관계식 설정**

첫 단계에서는 유량 산정에 영향을 미치는 불확도 인자들을 분류하고 결정한다. 유량 측정의 경우, 기기 자체에서 갖고 있는 측정 정확도나 유량을 계산하는 모델 등의 요소가 있을 수 있고 자연하천의 경우에는 측정하는 환경에 따라라도 측정 결과 및 방법이 변화하기 때문에 발생 가능한 인자들을 분석하여 결정해야 한다. 두 번째 단계는 유속, 수심 등에 기반한 유량산정 관계식(Data Reduction Equation)의 설정이다. ADCP 유량산정 관계식은 대표적으로 이동식 유량산정법(Moving-boat method)과 지점식 유량산정법(Section-by-Section method)이 있다.

**2.2 유량 인자 별 불확도 산정**

세 번째 단계에서는 첫 단계에서 산정된 유량산정에 영향을 미치는 인자들의 불확도 유형을 구분하고 산정한다. 일반적으로 특정 인자에 대한 불확도는 측정 기기가 갖고 있는 계통적인 오차(Bias error)에 따라 발생하는 불확도와 측정기기나 환경에 따라 발생하는 우연 오차(Precision error)에 의한 불확도로 구분하였다. 그러나, GUM 표준안에서는 계통적 오차에 의해 발생하는 불확도와 우연 오차에 의해 발생하는 불확도로 구분하지 않고, 해당 불확도 인자에 대한 분석결과

의 존재 유무에 따라 A형 불확도와 B형 불확도로 구분하고 있다. 이 부분은 GUM을 이해하기 위한 중요한 구분으로 상세히 설명하면 다음과 같다.

A형 불확도는 기 수행된 실험자료가 없을 경우 사용되는 불확도 산정방법으로서 일반적으로 해당 인자에 대하여 10회 이상 반복 측정된 결과를 통해 산정하는 것을 장려하고 있다. 이 때, 반복 측정된 결과는 평가하고자 하는 불확도 인자 외에는 모두 동일한 측정 조건에서 졌다고 가정하고, 측정된 자료가 정규 분포 또는 t-형 분포로 해석하게 된다. A형 불확도는 반복측정된 자료의 평균의 표준편차를 이용하여 산정한다(JCGM 100, 2008).

B형 불확도는 분석하고자 하는 불확도 인자에 대하여 충분히 실험이 수행된 자료를 이용하여 불확도를 결정하는 방법으로 인자에 대한 불확도 발생은 항상 일정한 범위 내에서 발생할 수 있다는 근거 하에 산정할 수 있다. B형 불확도는 주어진 확률분포내에서 발생할 수 있는 표준편차를 불확도로 사용하고 있다.

일반적으로 실험 및 계측분야에서 나타나는 분포모형으로 장방형, 삼각형, 정규분포 모형이 있으며, 각 분포모형에 대한 반복범위가 제시되어 있을 경우 불확도 산정방법은 다음과 같다.

$$\text{장방형 분포 } u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \tag{1}$$

$$\text{삼각형 분포 } u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \tag{2}$$

여기서,  $a$ 는 확률분포모형의 반범위이다. 과거의 실험 자료가 정규 분포를 이루고 있고, 확장불확도가 공시되어 있는 경우에는 다음의 식을 통해 불확도를 결정할 수 있다. 여기서,  $U$ 는 확장불확도,  $k$ 는 보정계수이다.

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \tag{3}$$

**2.3 합성불확도( $u_c$ ) 산정**

합성불확도는 측정 결과에 영향을 미치는 인자들의 불확도를 합성하여 하나의 불확도값으로 표현하는 것을 말하며, 오차전파의 법칙에 기반하여 표현하게 된다. 합성불확도의 산정은 크게 불확도 인자들 사이의 상관관계가 없는 경우와 인자들의 상관관계가 있는 경우로 구분할 수 있다. 인자들의 상관관계가 없는 경우의 합성불확도는 다음의 식에 의하여 산정이 가능하다(JCGM 100, 2008).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (4)$$

여기서,  $u_c(y)$ 는 합성불확도,  $f$ 는 DRE,  $x_i$ 는 불확도 인자 항,  $u(x_i)$ 는 인자별 불확도이다. 각 인자간의 상관관계가 없는 경우에는 위의 식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (5)$$

$$u_c(y) = \sqrt{u_1^2(y) + u_2^2(y) + \dots + u_N^2(y)} \quad (6)$$

여기서,  $u_c(y)$ 는 합성불확도,  $u_i(y)$ 는 인자별 불확도,  $c_i (= \partial f / \partial x_i)$ 는 감도계수(Sensitivity coefficient)로 DRE에 대한 편미분항이다.

인자들의 상관관계가 있는 경우의 합성불확도는 다음의 식에 의해 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_c^2(y) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \\ &= \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $u_c(y)$ 는 합성불확도,  $f$ 는 DRE,  $x_i$ 는 불확도 인자 항,  $u(x_i)$ 는 인자별 불확도,  $u(x_i, x_j)$ 는 두가지 인자의 추정 공분산이다.

## 2.4 확장불확도(U) 평가

GUM 표준안에서는 합성불확도는 산정하는 과정, 즉 오차의 전파 법칙을 적용하면서 불확도가 발생할 수 있기 때문에 불확도 평가 결과의 신뢰성을 제고하기 위하여 보정계수( $k$ )를 불확도에 곱한 확장불확도의 개념을 적용하였다(JCGM 100, 2008).

$$U = k u_c \quad (8)$$

여기서,  $U$ 는 확장불확도,  $k$ 는 보정계수,  $u_c$ 는 합성불확도이다. 보정계수는 신뢰수준과 유효자유도를 t-분포에 적용하여 산정하고 있으며, 유효자유도는 불확도 산정에 사용된 인자들의 자유도를 고려할 수 있는 Welch-satterthwaite 공식을 적용하여 산정하게 된다(JCGM 100, 2008). 과거의 측정된 자료가 많을 경우에 자유도는  $\infty$ 에 가까워지게 되며, 유효자유

도와 신뢰도가 결정되면 최종적으로 t-분포에 적용하여 보정계수를 산정할 수 있다. 일반적으로 관측자료가 충분한 경우의 신뢰구간 95%에 대한 보정계수는 2를 사용한다.

## 3. GUM 표준안 기반의 ADCP 유량 측정불확도 평가안

GUM 표준안은 불확도를 산정하는 일반적인 절차를 제시한 것으로 ADCP 유량 관측과 같은 특정 방식의 불확도 산정을 위해서는 유량산정을 위한 관계식 설정(Data Reduction Equation), 관계식에 기반한 오차전파를 위한 미분항(혹은 민감도) 산정, 관련 불확도 인자 정의 등의 추가적인 과정이 필요하다. 우선, 유량산정 관계식 ADCP를 활용한 유량을 산정하는 방식은 크게 2가지로 나눌 수 있는데 가장 일반적인 이동측정방식(RDI, 1996; SonTek, 2009)과 기존의 도섭법과 유사한 지점식 측정방식이 있다. 지점식 측정방식은 일정한 간격의 단면에서 ADCP를 고정시키고 측정하는 다음 시간평균된 유속을 활용하는 방식으로, 일반적으로 도섭법에서 사용하는 중앙단면법(Mid-section method) 혹은 ADCP를 적용한 경우 'Section-by-Section' 방법(RDI, 2014), SonTek의 경우 'Stationary method'로 명명된다(Stasulis, 2011). 지점식 측정방식은 결빙 시 유량관측, 강한 유사와 식생, 강한 유속 및 난류 등으로 바닥추적(Bottom Tracking)이 불능 시, 하상이동(Moving bed) 조건일 경우, 하천 부유물 등 장애물로 이동식을 적용할 수 없을 경우, 유량관측을 상호점검할 경우 등에 사용된다(Stasulis, 2011). Lee et al. (2014)는 지점식 방식 중에서 'Section-by-Section'방법을 적용하되, ADCP가 가장 자리 유속 측정 가능 수심이 낮아 최말단 단면이 지나치게 커져 큰 오차를 유발할 수 있다고 보고 이동식 측정방식의 가장 자리 유량 측정 방법을 혼합 적용하였다. 그러나, 본 연구에서는 일반적인 ADCP 지점식 측정방식으로 중앙단면법과 동일한 'Section-by-Section'방법을 유량 산정관계식으로 적용하였다(Eq. (14) 및 Fig. 2).

$$Q_i = \sum_{n=2}^{n-1} v_n \times \frac{b_{n+1} - b_{n-1}}{2} \times d_n \quad (9)$$

여기서,  $Q_i$ 는 총 유량( $m^3/s$ ),  $\bar{v}_n$ 은  $n$ 번째 측선의 수심평균유속( $m/s$ ),  $d_n$ 은  $n$ 번째 측선의 수심,  $b_n = (b_{n+1} - b_{n-1})/2$ 는  $n+1$ 번째 측선과  $n-1$ 측선 사이의 거리( $m$ )이다.

'Section-by-Section' 유량산정방법의 주요 인자인 단면

평균유속( $\bar{v}_n$ ), 수심( $d_n$ ), 그리고 측선사이의 거리( $b_n$ )의 불확도는 유량관계식 Eq. (9)를 각각에 변수에 대해 미분한 양만큼을 가중치로 보는 상관관계(Eqs. (10)~(12))를 가지고 최종 유량 불확도에 전파된다.

$$\frac{\partial Q_t}{\partial v_n} = \frac{b_{n+1} - b_{n-1}}{2} \times d_n \quad (10)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial d_n} = \bar{v}_n \times \frac{b_{n+1} - b_{n-1}}{2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial b_n} = \bar{v}_n \times d_n \quad (12)$$

그리고, 관계식에 포함되지 않는 불확도 인자들도 존재한다. Lee et al. (2014)와 도섭법 불확도 산정 시 활용되어 온 ISO 748 (2007) 및 1088 (2007)을 참고하면, 2점법 혹은 3점법 등 유량모델산정의 불확도( $u(Q_{mo})$ ), 측선수에 대한 불확도( $u(Q_{nv})$ ), 그리고 현장조건이 비정상류일 경우의 불확도( $u(Q_{us})$ )를 포함할 수 있다. 이러한 불확도는 유량에 직접 영향을 미치는 불확도 인자이므로 등가중치로 최종 유량불확도에 전파되며 단위는 유량( $m^3/s$ )과 동일하다. Eq. (13)은 위에서 제시된 불확도가 측선별로 적용되었을 때, 전체 단면 유량의 불확도( $u_c(Q)$ )로 전파되는 관계식을 보여준다.

$$u_c(Q)^2 = \sum_{n=2}^{n-1} (u(\bar{v}_n)^2 (\frac{\partial Q_t}{\partial v_n})^2) + \sum_{n=2}^{n-1} (u(b_n)^2 (\frac{\partial Q_t}{\partial b_n})^2) + \sum_{n=2}^{n-1} (u(d_n)^2 (\frac{\partial Q_t}{\partial d_n})^2) + u(Q_{mo})^2 + u(Q_{nv})^2 + u(Q_{us})^2 \quad (13)$$

여기서,  $u(\bar{v}_n)$ 은 수심평균유속에 대한 불확도,  $u(b_n)$ 는 횡방향 측선간격에 대한 표준불확도,  $u(d_n)$ 는 수심에 대한 불확도이다.

유속, 수심, 측선 간격에 영향을 미치는 불확도 인자들도 복수로 존재한다. 따라서 Eq. (13)을 적용함에 앞서 이들 주요 인자들에 영향을 미치는 ADCP 지점식 측정 방식을 고려한 표준불확도들을 고려해야 한다. 측선 평균 유속의 불확도( $u(\bar{v}_n)$ )는 Gonzalez-Castro and Muste (2007), Lee et al. (2014) 등의 참고문헌 및 본 실험 결과를 종합할 때, 기기 해상도에 대한 불확도( $u(\bar{v}_{re})$ ), 기기 정확도에 대한 불확도( $u(\bar{v}_{ac})$ ), 측정시간에 대한 불확도( $u(\bar{v}_{st})$ ), 센서 근처의 오류에 대한 불

확도( $u(\bar{v}_{nt})$ ), 하상 근처의 오류에 대한 불확도( $u(\bar{v}_{nb})$ ), 수심 평균유속 계산 모델에 대한 불확도( $u(\bar{v}_{mo})$ ), 실험 조건에 대한 불확도( $u(\bar{v}_{op})$ )가 지배적인 영향을 미친다고 볼 수 있다. 그리고, 이들은 Eq. (14)에서 사용되는 단면평균유속( $u(\bar{v}_n)$ )과 다음과 같은 관계를 가질 수 있다.

$$u(\bar{v}_n) = \sqrt{u^2(\bar{v}_{re}) + u^2(\bar{v}_{ac}) + u^2(\bar{v}_{st}) + u^2(\bar{v}_{nt}) + u^2(\bar{v}_{nb}) + u^2(\bar{v}_{vm}) + u^2(\bar{v}_{op})} \quad (14)$$

마찬가지로 수심관측의 불확도( $u(d_n)$ )는 각각 수심측정기기 해상도에 대한 불확도( $u(d_{ac})$ ), 음향장비 혹은 눈금자 등 장비 정확도에 대한 불확도( $u(d_{ac})$ ), 그리고 모래, 식생, 자갈 등 현장 측정 조건에 따른 측정 불확도( $u(b_{op})$ )에 영향을 받는다고 볼 수 있다. 이들은 수심관측 불확도와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$u(d_n) = \sqrt{u^2(d_{re}) + u^2(d_{ac}) + u^2(d_{op})} \quad (15)$$

측선 간격의 불확도( $u(b_n)$ )는 보통 줄자를 사용하므로 기기 해상도에 대한 불확도( $u(b_{re})$ )와 현장 조건에 따른 불확도( $u(b_{op})$ )로 나눌 수 있고 측선간격의 불확도와 다음의 관계를 가진다.

$$u(b_n) = \sqrt{u^2(b_{re}) + u^2(b_{op})} \quad (16)$$

Eq. (13)에서 각종 관련된 오차가 전파되어 산정된 합성불확도인  $u_c(Q)$ 는 유의수준 95%를 고려하여 Eq. (17)과 같이 확장불확도로 나타낼 수 있고, 자료의 수가 충분히 많다고 가정하였을 경우  $t$ -분포에서 유의수준 95%의  $k$ 값은 일반적으로 2에 가깝기 때문에 본 연구에서  $k$ 는 2로 보았다.

$$U = ku_c(Q) \quad (17)$$

### 4. 실험 방법 및 조건

2, 3장과 같이 GUM 표준안에 따른 Section-by-Section 방법의 ADCP 유량 산정 불확도 계산안 및 관련된 불확도 인자들을 정의한 후, 실제 적용을 위해서는 각 불확도 인자들에 대한 산정이 필요하다. 일부 인자들의 불확도는 제조사에서 제

공하거나 이론적인 값에 의존할 수 있으나 대부분 실측을 통해 규명되어야 하지만, 실제 하천 현장에서 제시된 불확도 인자들을 정량적으로 산정하는 작업은 매우 어렵거나 불가능하다. 그 이유는 현장조건에서 ADCP의 유속 및 수심 측정이 실제와 상이한 지 정밀하게 검증하기 어렵고, 대부분 흐름 조건이 시간에 따라 변화하기 때문이다. 이러한 문제는 GUM 표준안 기반 ADCP 유량 불확도 산정을 근본적으로 어렵게 하고 있다.

본 연구에서는 소하천 규모의 자연하천에서 흐름의 통제가 가능하고 microADV 등 실험실에서만 사용가능했던 장비들로 ADCP 측정치를 검증할 수 있는 한국건설기술연구원 안동 하천실험센터에서 ADCP 유량 산정 인자의 불확도를 산정해보고자 하였다. 이런 면에서 안동 하천실험센터는 소하천 규모이지만 불확도 인자를 규명하는데 있어 매우 유리한 환경을 갖추고 있다. 실험은 직선형태를 유지하고 경사가 완만한 하천실험센터 완경사수(A2)에서 수행되었는데(Fig. 2(a)), 유로 연장은 490 m, 하상경사는 약 1/800, 측정 단면은 1:2 경사를 갖는 사다리꼴 단면이다. 하상 재료는 기본적으로 자연상태의 사질 하상이며, 실험이 2014년 7월에 수행되어 활착된 식생을 대부분 제거했으나 일부 식생이 활착되어 있는 상태이다(Figs. 2(b) and 2(c)). 실험은 흐름의 안정이 충분히 확

보되었다고 판단된 수로 최상단에서 약 380 m 하류 지점에서 수행되었다.

본 연구에서는 ADCP로 SonTek 사의 RiverSurveyor M9 (SonTek, 2009)을 사용하였으며, ADCP의 초음파 수심측량 불확도를 산정하기 위해 흐름을 공급하기 전 광파기로 하상을 측량한 성과와 비교하였다. ADCP 유속 정확도 비교를 위해 실내 실험에서 일반적으로 사용되어왔고 유속 측정 정확도가 높다고 알려진 SonTek microADV (SonTek, 2016)의 유속 측정 결과를 사용하였다. 모든 측정을 동일한 위치에서 수행하기 위해 Fig. 4와 같이 모든 측정장비를 대차에 고정된 상태에서 실험을 수행하였다.

실험에 적용된 흐름 조건은 유량이 2.09 m<sup>3</sup>/s, 최대 수심 0.82 m, 수면폭 6.5 m의 소하천 규모라 할 수 있고, Froude 수가 0.23으로 흐름은 비교적 안정된 완경사 하천 조건이다. 실험 조건은 본 연구에서 도출된 ADCP 유량 불확도 산정에 필요한 속도, 수심 등의 인자들이 적용될 수 있는 조건이라는 것을 의미한다.

Fig. 3은 지점식 측정 방식의 ADCP의 측선 및 유속검증을 위한 ADV 관측점을 나타내고 있다. SonTek RiverSurveyor M9는 저수심에서 3 MHz의 주파수로 Pulse-to-Pulse Coherent 방식으로 운용되었으며 수직 간격 2 cm (셀 크기)로 3차원 유

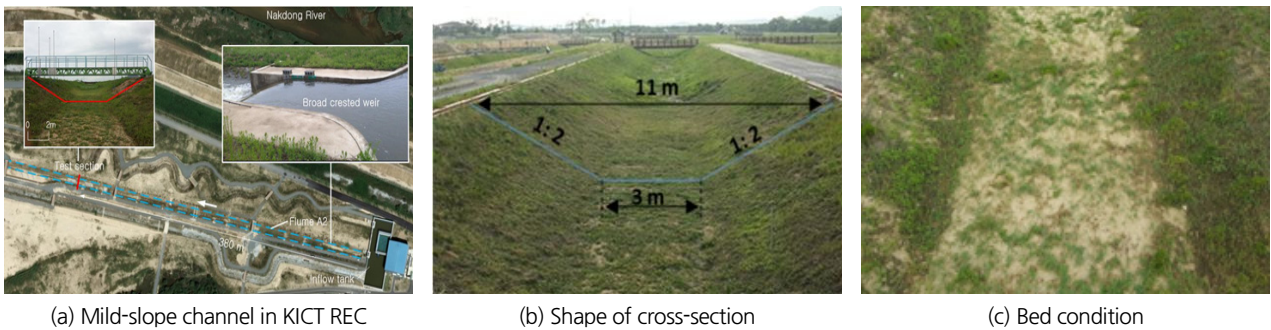


Fig. 2. Test section in mild-slope channel (A2) located in KICT River Experiment Center at Andong

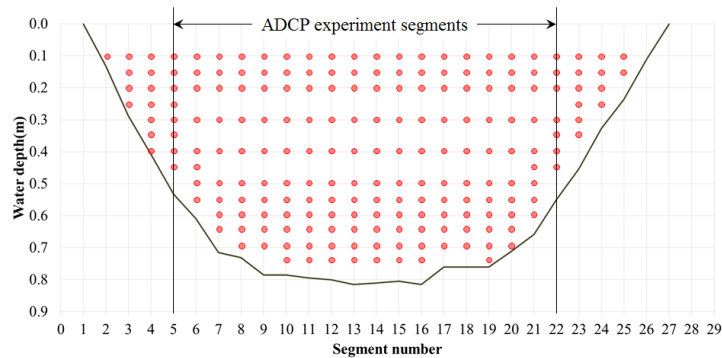


Fig. 3. Measurement verticals for ADCP and ADV in the test section, where circular dots indicate ADV measurement points

속을 초당 1회 제공한다. ADCP는 장비의 잠긴깊이(8 cm) 및 막음길이(blanking distance, 7 cm)로 인해 수면으로 15 cm부터 유속 측정이 가능하였고, 바닥 부근에서는 Side-Lobe 현상으로 바닥으로부터 대략 6~10 cm는 측정되지 않았다. ADCP는 각 측선 별로 대차에 고정시켜 90초간 운영하였으며, 자료 취득 후 시간 평균 및 주방향 흐름 속도성분을 추출하였다. 중앙 측선(Fig. 5의 No.14)에서는 추가적으로 300초간 지속적으로 측정하였는데 이는 측정 시간에 따른 평균유속의 변화를 추적하기 위함이다. ADCP는 좌우 하안 부근 저수심 약 50 cm 미만에서 유속 측정이 불가하여 제외하였다.

ADV 측정 간격은 횡방향 25 cm, 수직 방향으로 5 cm 간격으로 총 208개 지점을 각각 90초간 측정하였다. 다만, 측선에서 중앙 부근에서는 유속의 변화가 크지 않으므로 일부 지점은 10 cm 간격으로 측정하였다. 측정한 시계열 유속 자료는 시간 평균하여 주흐름 방향 유속 성분을 ADCP 측정값과 비교하는 데 활용하였다. ADV 또한 유속측정 불확도가 존재하지만 본 연구에서는 이 값이 ADCP에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다고 판단하여 ADV 측정값을 참값으로 가정하였다.

ADCP 및 ADV 측정에는 상당한 시간이 소요되고 계속 기간 흐름의 교란을 방지하기 위해 독립적으로 측정되었다. 독립적으로 측정된 이 기종간 비교를 위해서는 흐름이 동일한 조건이라는 가정이 성립되어야 한다. 안동 하천실험센터의

환경사수로(A2)의 경우, 하상이 사질토이므로 초기 일정 부분 하상 침투로 유량이 유실될 수 있으므로 실험 전 9시간 동안 측정 작업 없이 흐름을 유지시켰고, 실험 도중 30분~1시간 간격으로 설치된 수위표를 확인하여 안정화 여부를 점검하였다. 실험 시간(약 22시간) 동안 수위표 목측으로 인한 약간을 오차를 감안하면 수위 변화가 거의 없는 안정화된 흐름이 유지되었음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 안동 하천실험센터가 실제 현장에서 구현하기 매우 힘든 정상류 상태를 장시간 유지시킬 수 있음을 의미하여 ADCP의 유속 관측 오차를 규명하는 데 적합한 실험시설이라고 할 수 있는 근거이다.

ADCP 수심 관측은 각 관측 지점에서 수직빔의 수심관측 시계열 자료를 평균한 값을 사용하였고, 추후 흐름 발생 전 관측한 광파기의 측정성과(Fig. 5 수심)와 비교하였다. 실험이 종료된 후 재측정한 결과 수심의 변동이 거의 없어 하상도 안정화된 상태로 판단된다.

### 5. 실험 결과

ADCP와 ADV 간의 측선 별 유속 비교 및 ADCP와 광파기와의 수심 비교 결과는 Figs. 4 and 5에 각각 나타나 있다. 측선 별 상세한 유속분포 비교는 Kim et al. (2015a, 2015b) 논문

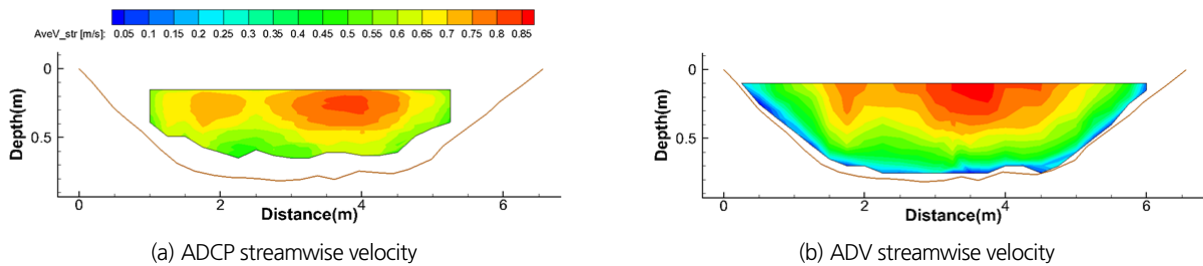


Fig. 4. Streamwise velocity contours interpolated based on time-averaged ADCP and ADV velocity

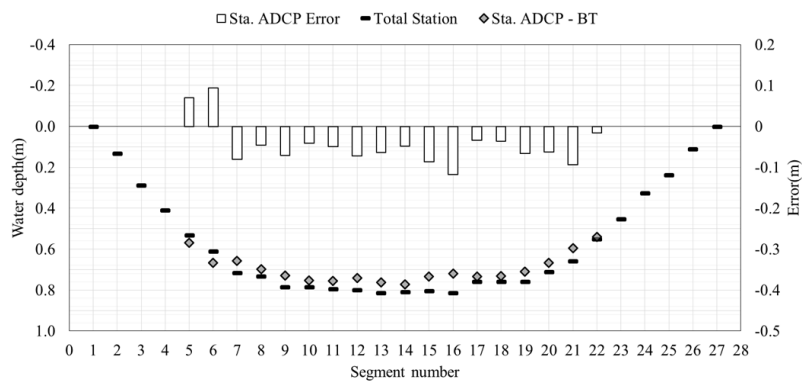


Fig. 5. Bathymetry comparison measured by ADCP and Total Station: bed condition where partially vegetated regions exist

상세히 제시된 바 있다. ADCP 유속은 ADV와 비교한 결과, 특히 상단에서 상당한 불일치를 보였고, 하단에서도 이격되는 현상을 보였다. 이는 ADCP가 가지는 계측장비 부근의 오차로 Muste et al. (2007)이 제시한 결과와 일치된다. ADCP 수심 측정 결과는 광파기와 비교하였을 때, 하상이 모래인 경우(측선 8~12)를 제외하고 식생이 일부 존재하는 측선에서는 실제보다 작게 관측됨을 알 수 있다.

## 6. 인자별 불확도 산정 및 ADCP 유량 측정 불확도

실험 결과를 바탕으로 3장에 기술된 바와 같이 ADCP 지점식 유량 측정 방식에 필요한 인자들의 불확도를 분석하여 제시하고 GUM 표준안을 적용하여 지점식 ADCP 유량 측정 불확도를 산정하고자 한다. 본 실험 포함되지 않은 인자들의 불확도는 Lee et al. (2014) 등과 같은 선행연구들과 제작사 (SonTek)에서 제공하는 값을 사용하였다. 인자별 불확도는 크게 수심평균 유속 산정에 대한 불확도( $u(\bar{v}_n)$ ), 수심 측정에 대한 불확도( $u(d_n)$ ), 횡방향 측선 간격 측정에 대한 불확도( $u(b_n)$ ), 유량 산정 모델에 대한 불확도( $u(Q_{mo})$ ), 측선 수에 대한 불확도( $u(Q_{nv})$ )로 구분하여 제시한다. 이때, 부정류에 의한 불확도는 본 실험 조건이 정상류를 유지하였다고 볼 수 있어 제외하였다.

### 6.1 ADCP 수심평균 유속 산정에 대한 불확도( $u(\bar{v}_n)$ )

#### 6.1.1 기기 유속 해상도( $u_{v,rs}$ )

측정 기기의 기기해상도는 측정 기기의 측정 가능한 최소 단위를 나타내는 인자로서 측정기기 자체의 하드웨어나 후처리 소프트웨어에 따라 결정되게 된다. 본 연구에서 사용된 SonTek 사의 ADCP Riversurveyor는 유속을 소수점 3번째 자리까지 표현하기 때문에 기기 해상도에 대한 불확도는 최소 단위의 절반인 0.005 m/s이다.

#### 6.1.2 기기 유속 정확도( $u_{v,ac}$ )

일반적으로 하천에서 유량측정을 수행하게 되면 물에 떠다니는 부유물질이나 순간적인 흐름의 변화 등 다양한 인자들에 의해 동일한 지점에서 측정된 결과라 하더라도 그 결과가 매번 일정하게 나타나지 않는다. 기기 정확도는 ADCP가 한 개의 측정점을 측정하는 정확도를 나타내는 인자로서 ADCP가 갖고 있는 수표면 근처와 하상 부근에서 발생하는 오류를 제외한 점들의 측정결과만을 이용하였으며, 측정 시간은 기존 연구들(Stone and Hotchkiss, 2007; Szupiany et al., 2007; Gunawan, 2010; Lee et al., 2014)에서 유속 측정결과가 충분히 안정화되는 측정시간으로 발표한 300초를 사용하였으며, 기기의 측정 조건 또한 동일하게 유지하고 실험을 수행하였다. 수표면과 하상 부근의 오차는 별도로 구분하여 처리하였다.

기기 정확도의 불확도 평가를 위해 사용된 자료는 ADV와 동일하게 측정된 15개 측선의 57개 측정점에 대하여 수행되었으며, 불확도는 0.94%로 나타났다.

$$u_{v,ac} = \sqrt{\frac{\sum e}{n-1}} \quad (18)$$

여기서,  $u_{v,ac}$ 는 기기정확도에 대한 불확도(%),  $e$ 는 ADCP와 ADV로 측정된 유속의 오차(%),  $n$ 은 자료의 수이다.

#### 6.1.3 측정 시간( $u_{v,st}$ )

실제 하천에서의 계측 시 한 개 측선에 대한 측정시간에 따라 전체 계측시간이 좌우되기 때문에 측정시간의 결정은 유량 측정 시에 매우 중요한 요소 중 하나이다. Flowtracker의 경우 40초와 같이 실무에서 도섭법으로 유속 측정 시 권장되는 지속 측정 시간이 있지만 근거없이 사용되는 경향이 있다. 본 연구에서는 중앙단면(No.12)에서 900초 동안 지속적으로 측정하였고 시간평균한 유속을 참값으로 가정하여 시간을 줄였을 경우와의 차이를 분석하여 ADCP 측정 시간에 따른 불확도를

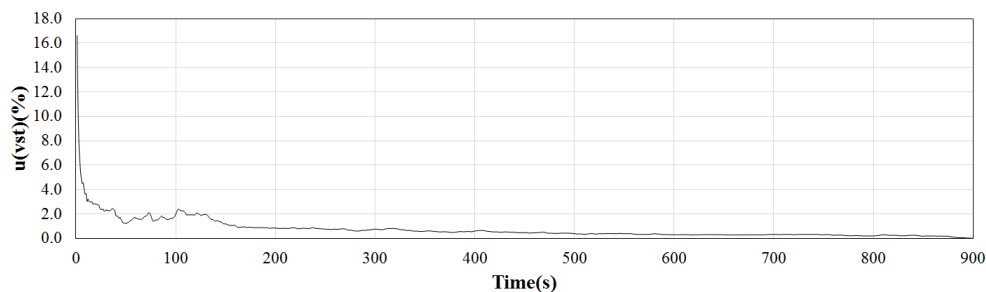


Fig. 6. Moving average of continuously measured streamwise velocity using ADCP: averaged moving average results for each cells for 900 seconds



**Table 1.** Standard uncertainty for sampling time in some measurement durations

| Sampling time (s) | Standard uncertainty (%) | Sampling time (s) | Standard uncertainty (%) |
|-------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|
| 30                | 2.35                     | 180               | 0.88                     |
| 60                | 1.64                     | 210               | 0.81                     |
| 90                | 1.61                     | 240               | 0.81                     |
| 120               | 2.01                     | 270               | 0.77                     |
| 150               | 1.19                     | 300               | 0.75                     |

제시하였다. ADCP의 각 수심 별 28개 셀에 대해 지속시간에 따른 오차를 절대값 평균하여 나타낸 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 그리고, Table 1은 Fig. 6으로부터 대표적인 지속 시간 별 유속측정 불확도를 나타냈다. 본 연구의 경우, 모든 측선에서 ADCP를 90초 동안 운용하였으므로 1.61%의 오차를 나타낸다고 볼 수 있다.

#### 6.1.4 센서 근처에서의 오류( $u_{v,nt}$ )

ADCP의 측정 방법 중 Pulse-to-pulse coherent 방식을 사용하게 되면 보다 조밀한 간격으로 유속 측정 결과를 확인할 수 있다. 하지만 해당 옵션을 사용하게 되면 센서 근처에서 유속이 과소 산정된다는 연구결과가 발표된 바 있다(Mueller et al., 2007; Muste et al., 2010; Lee et al., 2014; Kim et al., 2015a). 본 연구에서는 센서 근처에서 발생하는 오류에 대한 불확도 분석을 수행하였으며, 분석 방법은 Eq. (19)와 같이 ISO 1088에서 제시된 수심평균 유속 산정 모형에 대한 오차 분석방법(ISO 1088 Annex F, 2007)과 동일하게 수행하였다. ADCP 측정 결과 중 상단부의 오류를 발생하는 부분을 제거한 후의 수심평균유속을 참값으로 가정한 후 상단부를 과소 측정했을 때의 수심평균유속과의 오차를 14개 측선에 대해 계산하여 다른 인자들을 배제시키고 수면부의 오차의 영향만 고려하였다(Eq. (19)). 계산 결과로부터 산정된 센서 근처에서의 오류에 대한 불확도는 14.47%로 나타났다. 이는 상당히 큰 편차(bias)로 실제 유속보다 항상 작게 나타나는 경향을 보이고, ADCP 유량 측정 불확도에 상당한 영향을 미친다고 볼 수 있다.

$$u_{v,nt} = e_{avg.} + \frac{\sigma_{v,nt}}{\sqrt{n}} \quad (19)$$

여기서,  $u_{v,nt}$ 는 센서 근처에서의 오류에 대한 불확도,  $e_{avg.}$ 는 센서 근처에서의 오류를 제거하기 전의 ADV와 ADCP의 수심평균 유속의 절대값 오차,  $\sigma_{v,nt}$ 는 자료의 표준편차,  $n$ 은 자료의 수이다.

#### 6.1.5 수심평균 유속 계산모델( $u_{v,mo}$ )

Section-by-Section 방법이나 중앙단면법에서는 측선의 수심평균 유속을 이용하여 단면 전체의 유량을 산정하게 되고, 수심평균 유속을 산정하는 방법에 따라 총 유량 산정 결과는 변동되게 된다. 따라서 수심평균 유속을 계산할 때 수심방향으로 몇 개의 측정점을 사용했는지에 따른 유속 측정 정확도에 대한 분석이 필요하다. IOS 1088 (2007)에서는 10가지 수심평균 모델로 측정된 결과를 이용하여 산정된 각 모델별 불확도 및 산정 방법을 제시하였다(ISO 1088 Annex F, 2007). 하지만 본 연구에서는 상대적으로 제한된 측정 수로 수심평균을 산정하는 점법에 비해 정확한 ADCP로 측정된 수심방향 유속분포를 이용하여 수심평균을 계산하였기 때문에 ADCP가 측정하지 못한 수표면 근처와 하상근처의 유속은 기존의 연구(Kim et al., 2015b)에서 수심방향 유속분포를 잘 모의한다고 발표된 대부분으로 보간하여 수심평균 유속을 산정하였으며, ADV로 측정된 수심평균 유속과 ADCP로 측정된 수심평균 유속을 비교하여 불확도를 평가하였다. 15개 측선에 대한 측정 결과를 사용하였으며, Eq. (18)에 기반하여 최종적으로 결정된 수심평균 유속 계산 모델에 대한 불확도는 8.69%로 나타났다.

#### 6.1.6 Flow angle induced error ( $u_{v,fa}$ )

ADCP RiverSurveyor M9은 자체에 내장되어 있는 컴퍼스로부터 표출된 방향과 측정되는 흐름과의 관계를 이용하여 유속을 측정하게 된다. 하지만 기기 자체에 내장되어 있는 컴퍼스에도 불확도 요소를 포함하고 있기 때문에, 측정되는 결과에 영향을 미칠 가능성을 내포하고 있다. Huang (2012)은 컴퍼스의 보정이 완전하지 않을 경우 1%의 컴퍼스 오차를 발생시킬 수 있고, 컴퍼스의 오차가 0.15%와 0.31% 일 경우 흐름각의 오차는 5%와 10%가 발생한다는 연구를 발표한 바 있다. 그러나, 본 연구를 위한 실험에서는 SonTek에서 제공하는 소프트웨어를 이용하여 컴퍼스 보정을 충분히 수행하였기 때문에 컴퍼스 보정에 대한 불확도는 없다고 판단하였다. 추후 컴퍼스에 대한 불확도 평가를 위해 보다 상세한 실험을 수행하여 해당 인자에 대한 불확도 평가가 필요하다.

### 6.1.7 기기 운용 조건( $u_{v,op}$ )

하천 계측은 동일한 계측 기기로 측정하여도 측정자, 측정 환경, 측정 시간 등 다양한 조건들에 대한 영향을 받게 된다. 또한 자연하천의 경우 흐름이 일정하지 않고 상류 조건 및 기왕 강우에 대한 지하수 유출 등 다양한 인자들의 영향에 따라 측정 결과의 변화가 발생한다. 이러한 측정 환경의 영향에 따른 불확도를 고려하기 위하여 본 연구에서는 Lee et al. (2014)의 연구를 참고하여 기기운용조건에 대한 불확도를 산정하였다. 해당 인자는 동일한 측선에서 ADCP를 정지법으로 90초씩 10회 반복 측정된 결과를 이용하여 결정하였으며, 불확도는 0.003 m/s로 산정되었다.

## 6.2 수심 측정에 대한 불확도( $u_d$ )

### 6.2.1 ADCP 수심 측정 해상도( $u_{d,rc}$ )

ADCP M9의 수심 측정은 중앙의 1개의 빔을 이용한 수직 빔 방식과 4개의 경사빔으로부터 측정된 수심을 평균하여 사용할 수 있는데, 본 연구에서는 수직빔 자료를 활용하였다. 제공되는 수심은 소수점 셋째자리이므로 수심 측정에 대한 기기 해상도 불확도는 0.0005 m로 볼 수 있다.

### 6.2.2 ADCP 수심 측정 정확도( $u_{d,acc}$ )

ADCP의 수심측정은 센서에서 송신된 초음파가 하상에 반사되어 수신되는 동안 발생한 시간차를 이용하여 측정하고, SonTek RiverSurveyor M9의 경우 최소 0.4~0.5 m에서 최고 100 m까지 측정가능하다고 알려져 있다(SonTek, 2014). 초음파는 물속에서 조금씩 퍼지면서 방사되기 때문에 하상에 반사되는 면적이 초기 발사된 면적보다는 증가하게 되므로 정확한 ADCP의 측정 위치의 수심과는 다소 차이가 발생할 수 있다. 그리고 자갈, 모래, 식생 등 하상의 상태와 하상 일부 변동에 따라 초음파 산란 등으로 인해 관측되는 수심이 실제 수심과 이격될 수 있다. 또한, 수중에 부유하는 유송물질이나 어류 등에 의한 이상반사가 있거나 알 수 없는 신호처리 오차로 계측값의 오류를 수반할 수 있다. 특히 ADCP의 경사빔을 활용하여 호소, 대하천 등 고수심 측량에 적용할 경우, 음파가 수온 및 염도 등 밀도차로 성층화되었을 때 Snell의 법칙에 의해 음파가 휘 수가 있어 수심 측량값의 상당한 오차를 유발할 수 있다(SonTek, 2011). 마지막으로 사용자가 직접 입력하는 기기 잠긴깊이(submerged depth)의 오차가 측정값에 지속적인 편차(bias)를 야기할 수 있다. 그러나 실무에서는 ADCP 수심관측 정확도에 대해서는 마땅한 검증방법이 없어 참값으로 보고 그대로 사용되고 있는 상황이다. 본 실험의 경우, Fig. 8(b)에 나타난 바와 같이 식생이 일부 존재하는 모래 하상 조건

으로 하상이동은 없다고 볼 수 있다. 또한, 저수심에서 수직빔을 활용하였으며, 신호이상으로 인한 관측 이상치 등도 발견되지 않았고, 잠긴깊이는 정확히 입력하여 오류가 없다고 가정하였다. 이러한 조건에서 수심 측정의 불확도를 평가하기 위하여 각 측선에서 ADCP가 90초 동안 측정된 시간평균된 수심과 동일지점에서 물을 공급하기 전에 광파기를 활용하여 직접 측량한 수심을 비교하였다(Fig. 5). 각 측선 별 차이를 종합한 결과, 수심측정에 대한 기기의 측정 정확도에 대한 불확도는 Eq. (18)과 동일한 형태로, ADCP와 광파기로 측정된 수심 측정결과를 토대로 산정하였으며, 0.0165 m로 나타났다. 즉, 본 실험조건과 같이 하상에 식생이 일부 존재하는 경우, ADCP는 약 1~2 cm 정도 수심을 저평가한다고 나타났다. 이는 하천의 고수부 등과 같이 식생의 크기가 큰 조건에서 ADCP를 운용할 경우, 이 보다 큰 오차를 수반할 수 있다는 것을 의미이다.

### 6.2.3 기기 운용 조건( $u_{d,op}$ )

실제 자연하천에서는 하상에 부분적으로 활착되어 있는 식생의 움직임이나, 하상 재료나 부유물질의 이동 등에 의해 초음파로 측정된 결과의 불확도를 야기할 수 있다. 또한 일반적인 하천에서 지점측정 방식을 사용하였을 경우에는 측정 장비가 측정위치에 완벽하게 고정되어 측정하기는 어렵다는 한계를 갖고 있다. 이에 본 연구에서는 동일 위치에서 10회 반복 측정된 결과를 통해 기기 운용 조건에 대한 측정불확도 평가를 수행하고자 하였으며, 불확도는 0.0015 m로 볼 수 있다.

## 6.3 횡방향 측정 거리에 대한 불확도( $u_b$ )

### 6.3.1 기기 해상도( $u_{b,rc}$ )

횡방향 측정 거리는 측정 장비를 설치한 대차에 부착된 눈금자를 이용하여 측정하였으며, 모든 측정 위치에 마킹을 해 둔 상태로 실험을 수행하였다. 자의 최소 단위는 0.001 m이었으며, 횡방향 측정 거리에 대한 기기 해상도의 불확도는 자 최소 단위의 절반인 0.0005 m이다.

### 6.3.2 기기 운용 조건( $u_{b,op}$ )

실제 하천에서 측정 시 횡방향 측선 간격을 측정하는 것은 매우 어려운 작업 중 하나이다. 특히 하폭이 넓은 경우에는 태그 라인이나 측점을 표시하기 어렵기 때문에 일반적으로 GPS나 측정자의 경험들을 이용하여 측정하게 되며, 이러한 측정 방법들은 주변 환경에 대한 조건들의 영향이 크게 발생한다. ISO 748 (2007)에서는 측정 단면의 횡방향 측선 거리를 측정하는 방법을 제시하였고, ISO 1088 (2007)에서는 횡방향 측

선 간격에 대한 불확도 산정 시 불확도는 하폭의 0.5%를 넘으면 안된다고 제시하였으며, 하폭 범위가 0~100 m사이에서의 불확도는 0.15%로 제시하였다(ISO 1088 Annex G, 2007). Lee et al. (2014)의 연구에서는 기기 운용 조건에 대한 불확도를 ISO 1088 규정에 맞추어 산정 하였으며, 본 연구에서도 이를 참고하여 하폭 6.75 m의 0.15%인 0.010 m를 불확도로 산정하였다.

**6.4 유량 계산 모델에 대한 불확도( $u_Q$ )**

**6.4.1 유량 계산 모델( $u_{Q,mo}$ )**

지점식 측정 방식으로 측정된 유속으로 단면의 유량은 산정하는 방법은 매우 다양하게 있으며, ISO 748 (2007)에서는 8가지 산정 방법에 대하여 제시한 바 있다. 그 중 본 연구에서 사용한 방식은 Section-by-Section 방법을 선택하였으며, 불확도는 다양한 측정 결과를 이용하여 산정해야 하지만 본 연구에서는 1가지 측정 결과밖에 없었기 때문에 불확도를 산정하기에는 한계가 있었다. 이에 따라 Muste et al. (2004)이 8개 측정결과를 바탕으로 산정한 불확도를 사용하였으며, 유량 계산 모델에 대한 불확도는 0.5%이다.

**6.4.2 측선의 수( $u_{d,rc}$ )**

유속-면적법에서는 임의로 나눈 측선의 수에 따라 유량 측정 결과가 차이를 보이게 되며, 측선의 수에 따라 측정 시간도 결정된다. ISO 1088 (2007)에서는 측선의 수에 따른 유량 측정 결과에 대한 불확도를 제시한 바 있으며, 하폭의 1/50이나 0.25 m 중 큰 값을 측정 간격으로 지정하는 것을 제안하였다.

본 연구를 위한 실험에서는 하폭이 6.75 m이었으며, 측정 간격은 0.25 m를 사용하였으며, 총 23개 측선에 대한 측정이 수행되었다. 측선의 수에 대한 불확도 또한 다양한 조건에서 수행된 실험을 바탕으로 불확도를 평가하여야 하지만 본 연구에서는 한 가지 측정 결과만을 사용하였기 때문에 ISO 1088 (2007)의 규정을 따라 불확도를 선정하였으며, 횡방향 측정 간격을 ISO 1088 (2007)에서 권고한 0.25 m로 사용하였기 때문에 불확도는 0%으로 볼 수 있다.

**6.5 ADCP 유량 측정 불확도**

Table 2는 본 실험을 통해 직접 산정하였거나 기존 연구 및 제조사 문헌을 참고하여 본 실험 조건에 해당하는 소하천 규모에 지점식 ADCP 유량 불확도를 산정하기 위한 관련 인자별 표준불확도를 정리하여 나타내었다. 직접 실험을 통해 산정된 표준불확도는 GUM 기준에 따라 ‘A형’ 불확도로 명기되고, 유사 연구 및 제조사 문헌을 참고한 경우 ‘B형’ 불확도로 명기하였다.

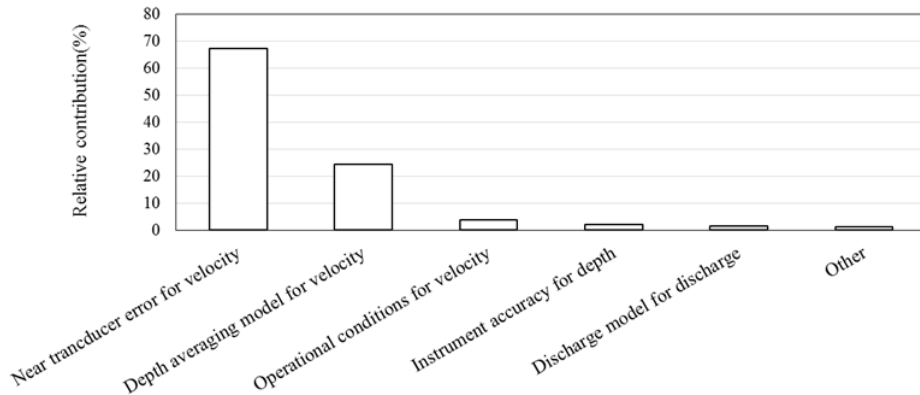
도출된 인자별 표준불확도는 Eqs. (10)~(12)에서 기술된 민감도 계수와 함께 전파되어 유량에 대한 합성 불확도를 산정할 수 있다. 본 실험 결과에 적용하였을 경우, 합성불확도는 4.25%로 나타났다. 확장불확도를 산정하기 위해 사용된 보정계수( $k$ )는 신뢰수준 95%, 자유도는 A형 불확도 산정시 최소 10개 이상의 자료를 사용하였으며, B형 불확도에서 사용된 자료들도 충분히 많은 실험 결과로 산정되었다고 가정했을 때, 자유도는  $\infty$ 에 가깝기 때문에 2로 결정되었으며, 확장불확도는 Eq. (17)에 의하여 8.5%로 나타났다.

**Table 2.** Summarized elemental uncertainty sources associated with discharge measurement based on Section-by-Section method using ADCP RiverSurveyor M9

| Uncertainty source  | Type | Standard uncertainty, $u(x_i)$ | Relative contribution to total uncertainty (%) | Estimation source |
|---|------|--------------------------------|--|-------------------|
| Sources associated with the depth averaged velocity in verticals, $v_n$ |      |                                |  |                   |
| Instrument resolution, $u(\bar{v}_{re})$                                | B    | 0.0005 m/s                     | 0.01   | SonTek            |
| Instrument accuracy, $u(\bar{v}_{ac})$                                  | A    | Field (vs. ADV)                | 0.26   | Field test        |
|   |      | $\pm 0.94\%$                   |  |                   |
| Sampling time, $u(\bar{v}_{st})$  | A    | 2.10%                          | 0.83   | Field test        |
| Near transducer, $u(\bar{v}_{nt})$                                      | A    | 14.47%                         | 67.38  | Field test        |
| Near bottom, $u(\bar{v}_b)$   | -    | -                              | -  | Field test        |
| Depth averaging model, $u(\bar{v}_{vm})$                                | A    | 8.69%                          | 24.29  | Field test        |
| Flow angle induced error, $u(\bar{v}_{an})$                             | -    | Not active                     | -  | Huang (2012)      |
| Operational conditions, $u(\bar{v}_{op})$                               | A    | $\pm 0.003$ m/s                | 3.65   | Field test        |

**Table 2.** Summarized elemental uncertainty sources associated with discharge measurement based on Section-by-Section method using ADCP RiverSurveyor M9 (Continue)

| Uncertainty source  | Type | Standard uncertainty, $u(x_i)$ | Relative contribution to total uncertainty (%) | Estimation source    |
|---|------|--------------------------------|--|----------------------|
| Sources associated with the depth in verticals, $d_n$         |      |                                |  |                      |
| Instrument resolution, $u(d_{re})$                            | B    | 0.0005 m                       | 0.02   | SonTek               |
| Instrument accuracy, $u(d_{ac})$                              | A    | Field (vs. Total station)      | 2.01   | Field test           |
|   |      | $\pm 0.0165$ m                 |  |                      |
| Operational conditions, $u(d_{op})$                           | B    | 0.0015 m                       | 0.01   | Field test           |
| Sources associated with the distance between verticals, $b_n$ |      |                                |  |                      |
| Instrument resolution, $u(b_{re})$                            | B    | 0.0005 m                       | 0.01   | Scale resolution     |
| Operational conditions, $u(b_{op})$                           | B    | 0.0010 m                       | 0.1  | ISO 1088 (2007)      |
| Sources associated with the estimation of discharge, $Q_n$    |      |                                |  |                      |
| Discharge model, $u(Q_{mo})$                                  | B    | 0.50%                          | 1.38   | Muste et al. (2004a) |
| Number of verticals, $u(Q_{nv})$                              | B    | 0%                             | 0.00   | Field test           |
| Flow unsteadiness, $u(Q_{us})$                                | B    | 0                              | 0.00   | Field test           |



**Fig. 7.** Uncertainty budget for individual error sources to be propagated to the total uncertainty for ADCP stationary discharge measurement

각 불확도 인자들이 유량 산정 불확도에 미치는 영향을 상대적으로 나타내는 불확도 수치(uncertainty budget) 혹은 상대 기여도(relative contribution)는 Fig. 7과 같다. 불확도 수치는 현 유량 측정 방식의 불확도 인자 중 지배적인 인자를 구분해 낼 수 있어 기술 및 기법 개선을 통해 불확도 인자를 저감시키는 데 효과적으로 이용할 있다. 본 연구와 같이 다양한 ADCP 중 ADCP RiverSurveyor M9에서 Pulse-to-Pulse coherent 방식을 지점식 유량 측정 방식에 적용한 경우, 계측기 부근의 유속 오차가 거의 67.38%에 해당하는 영향을 줄 수 있음을 알 수 있는데, Lee et al. (2014)가 GUM 기준으로 RDI StreamPro를 활용한 산출한 유사한 방식의 불확도가 4.1%임에 비해 본 연구의 경우가 8.5%로 크게 나타난 이유가 될 수 있다. 만약, 계측기 부근 유속 오차를 적절한 필터링 기법을 적용하여

제거할 경우, 불확도는 4.9%로 상당량 저감되었다. 이는 불확도 수치 분석을 통해 상대적으로 영향이 큰 불확도 인자를 식별하고 다양한 실험 및 이론적인 연구를 통해 관련 인자 불확도를 저감 혹은 제거를 통해 전체 유량 불확도를 낮추는 개선 효과가 있음을 알 수 있다. 그리고, Fig. 7과 같이 상대적으로 기여효과가 낮은 불확도 인자들에 대해서는 불확도 분석에 있어 무시할 수 있다. 이러한 결과는, 상기와 같은 불확도 분석을 통해 유량 불확도 저감(Uncertainty reduction)을 위한 장비의 선택, 현장운영 방법 개발, QA/QC 기법 개발 등을 적절히 할 수 있는 근간을 마련할 수 있음을 시사한다.

본 연구에는 현장 특성 상 포함되지 않거나 분석되지 않은 인자들 중 측선개수 및 부정류의 영향 등도 ISO 1088 (2007) 등 기준 표준안을 참고할 때 중요한 부분이다. 적절한 측선의

개수는 실제 현장 계측에서 작업량을 결정하는 주요한 요소로 일반적으로 본 연구와 같이 조밀하게 할 수 없는 부분으로, 실제 유량 불확도에 중요한 영향을 미칠 수 있는 인자라 사료된다. 그리고 부정류의 영향 역시 현장에서 빈번하게 발생하므로 추후 상이한 방법으로 규명되어야 할 것이다. 또한 불확도 평가 방법에 대하여 살펴보면, 사용된 수심평균 유속 모델은 조밀한 ADCP의 측정 결과를 모두 사용하여 계산된 수심평균 유속이며, Lee et al. (2014)에서 사용된 수심평균 유속 모델은 ISO 1088 (2007)에서 제안된 10가지 지점법을 사용하고, 해당 보고서에서 제시된 불확도를 사용하였다. 그러나, ISO 1088 (2007)에서 제안한 지점법 별 측정 불확도는 1960년대 프로펠러 유속계를 활용하여 다양한 흐름조건(0.7~7,550 m<sup>3</sup>/s)하에 측정된 자료를 평균한 결과로 소규모 하천의 ADCP를 활용한 경우에 적용하기에는 한계가 있을 것이라 판단되며, 본 연구에서 수행한 바와 같이 ADCP로 측정된 전체 유속분포를 이용하여 수심평균 유속을 산정하는 것이 타당하다고 판단된다.

## 7. 결론

본 연구에서는 GUM 표준안을 제시하여 최근 국제적으로 공인되고 있는 불확도 산정안에 대한 이해를 높이고, GUM을 적용한 지점식 ADCP 유량 불확도 산정 사례를 제시하였다. 그리고, 실험을 통해 유량 산정에 관련되는 인자들의 불확도를 중소하천 규모에서 도출하고 불확도 평가를 실시하였다. 마지막으로 불확도 지수 분석을 통해 불확도 해석이 관측 불확도 저감 주요 인자를 산출하고 불확도를 저감하는 방안을 제시할 수 있음도 보여주었다. 이러한 일련의 불확도 산정 과정을 통해 다음과 같은 시사점을 발견할 수 있었다.

- 1) GUM 표준안은 최근 국제적으로 공인되고 있는 불확도 산정 표준안이 되고 있고, 기존 통용되고 있는 ISO 748 (2007) 등에 비해 수학적 및 통계학적 이론 기반이 개선되었다고 볼 수 있어 국내에서도 향후 불확도 표준안으로 사용될 것이 권장된다.
- 2) 본 연구를 통해 ADCP 지점식 유량 산정 방법(Section-by-Section method)에 적용한 것과 같이 FlowTracker를 이용한 도섭법 및 ADCP 이동식 유량 산정 방법과 같은 다른 장비 및 유량 산정방법에 GUM을 적용할 가능성을 보여주었다.
- 3) GUM 방식의 불확도 산정 방식은 개별 불확도 인자를 선별하고 해당 인자의 불확도를 산정하는 작업에 상당한 노

력을 요구하여 비록 GUM 방식 자체의 우수성에도 불구하고 실무에서 GUM을 활용한 불확도 산정을 어렵게 한다. 즉, 개발 인자의 불확도는 본 연구와 같이 실험 등을 통한 다양한 흐름 및 현장 조건에서의 인자 별 불확도 산정이 필요하고, 이러한 성과가 축적이 되면 실무에서 대부분의 인자 별 불확도가 'B형' 불확도로 사전에 제공되고, 실무에서는 현장조건에 민감한 소수의 인자만 현장 실험을 통해 확보하여(즉, 'A형' 불확도) 실무 적용성을 높여야 할 것이다. 이런 관점에서, 본 연구에서 제공하는 Table 2는 환경사소하천 규모의 ADCP 유량 불확도 산정에 직접 적용될 수 있는 성과라 할 수 있다.

- 4) 불확도 수지(uncertainty budget) 해석을 통해 유량 측정 불확도에 영향을 미치는 주요인자를 구분하는 작업은 향후 측정방법의 개선안 도출 및 불확도 저감을 위해 활용될 수 있다.
- 5) 마지막으로, 소하천 규모의 자연하천과 유사하며 흐름의 조절 및 안정적 공급이 가능한 건설기술연구원 하천실험센터는 유량 산정에 영향을 미치는 인자들의 불확도를 산정하는 데 최적의 장소로 판단되며 향후 다양한 계측장비를 활용한 유량 불확도를 평가하는 데 사용될 것으로 기대된다.

다양한 본 연구의 성과에도 불구하고 다음과 같은 한계도 존재한다. 첫째, Table 2와 같이 도출된 결과는 환경사소하천 규모에 적합한 결과로, 하천 환경이 완전히 상이한 경우 적용하기 어렵다. 따라서 추후 규모가 상이한 하천에서 본 연구와 같이 방식이 실험이 수행되어 완결성을 높여야 할 것이다. 둘째, 본 연구의 주요 성과가 현장에서 정확도를 검증해본 사례가 매우 드문 ADCP 유속 및 수심 측정치를 정확도가 상대적으로 높은 ADV 및 광파기로 정밀 검증했다는 데 있다. 그러나 ADV와 광파기 자체의 측정 불확도도 분명 존재하나 정량화하기 어려워 본 연구에는 반영되지 못하였으나 추후 가능하다면 반영되어야 할 것이다. 셋째, 제시된 불확도 인자들 중 부정류의 영향은 현장에서 중요한 요소이나 본 연구에서는 오히려 정상류 상태로 실험을 수행하여 정량화하지 못한 면이 있어 후속 실제 현장 실험이 가능하다면 검토되어야 할 부분이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었다. 그리고, 본 논문에서

자로 참여하지 못하였지만 원활한 실험이 되도록 협조해준 한국건설기술연구원 여흥구박사, 나무영주임 등에게 감사를 표하며, 명지대학교 김서준박사, 실험에 참여한 단국대학교 토목환경공학과 하천정보연구실의 손근수, 김태은, 서강현, 유호준 등에게 감사의 말을 전한다.

## 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.
- GUM (1993). *Guide to the expression of uncertainty in measurement*. ISBN 92-67-10188-9. BIPM. IEC. IFCC. ISO. IUPAC. IUPAP. OIML. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- 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 Standardization, ISO 1088, Geneva, Switzerland.
- ISO 748 (2007). *Hydrometry-measurement of liquid flow in open channels using current-meters and floats*. International Organization for Standardization, ISO 748, Geneva, Switzerland.
- Jun, J. W., Han, J. S., and Yoon, S. E. (2000). "An analysis of the flow and bed topography characteristics of curved channels with numerical model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 33, No. 1, pp.183-191.
- 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.
- 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, 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, J. M., Kim, D. S., Son, G. S., and Kim, S. J. (2015a). "Accuracy analysis of velocity and water depth measurement in the straight channel using ADCP." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 5, pp. 365-375.
- Kim, J. M., Kim, S. J., Son, G. S., and Kim, D. S. (2015b). "Accuracy analysis of ADCP stationary discharge measurement for unmeasured regions." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 7, pp. 553-566.
- Kim, Y. S., Won, N. I., Noh, J. W., and Park, W. C. (2015c). "Development of high-performance microwave water surface current meter for general use to extend the applicable velocity range of microwave water surface current meter on river discharge measurements." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 8, pp. 671-678.
- KOLAS-G-005 (2012). *Guidance to the assessment of measurement uncertainty*. Korean Agency for Technology and Standards, KOLAS-G-005, Korea
- 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.
- Lee, S. H., Kim, W. G., and Kim, Y. S. (1997). "Practical aspects of microwave surface velocity meter applied to measurements of stream discharges." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 30, pp. 671-678.
- Lee, S. H., Lee, H. G., and Kim, W. G. (1995). "Velocity measurement of stream water surface using microwave." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 28, pp.183-191.
- 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.
- Mueller, D., Abad, J., García, C., Gartner, J., García, M., and Oberg, K. (2007). "Errors in acoustic Doppler profiler velocity measurements caused by flow disturbance." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, pp.1411-1420.
- 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.

- Muste, M., Yu, K., and Spaspjevic, 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.
- 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 - principle of operation, a practical primer*. RD Instruments, San Diego, CA.
- RDI (2014). *SxS PRO software users guide*. RD Instruments, San Diego, CA.
- 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 broadband acoustic Doppler current profiler*. US Geological Survey Open-File Report 01-1.
- Son, G. S., You, H. J., and Kim, D. S (2014). "Feasibility calculation of FaSTMECH for 2D velocity distribution simulation in meandering channel." *Journal of KSCE*, Vol. 34, No. 6, pp. 1753-1764.
- SonTek (2000). *Doppler velocity log for ROV/AUV applications*. SonTek Newsletter, 6(1), SonTek, San Diego, CA.
- SonTek (2009). *FlowTracker handheld ADV technical manual*. SonTek, San Diego, CA
- SonTek (2009). *RiverSurveyor S5/M9 system manual firmware version 1.0*. SonTek, San Diego, CA
- SonTek (2011). *SonTek RiverSurveyor and CastAway-CTD integration*. SonTek Technical Note, SonTek, San Diego, CA.
- SonTek (2016). *A Primer on SonTek ADV systems*. SonTek Technical Notes, 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.
- Stasulis, N. (2011). *Best practices for collecting mid-section discharge measurements with ADCPs, marine water science center*. USGS Hydroacoustics webinar presented in September 19 and 22, 2011.