



Accuracy evaluation of microwave water surface current meter for measurement angles in middle flow condition

Son, Geunsoo^a · Kim, Dongsu^{b*} · Kim, Kyungdong^c · Kim, Jongmin^d

^aPh.D Candidate, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University, Yongin, Korea

^bAssociate Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University, Yongin, Korea

^cPh.D Candidate, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University, Yongin, Korea

^dResearch Specialist, River Experiment Center, KICT, Andong, Korea

Paper number: 19-083

Received: 29 October 2019; Revised: 25 November 2019; Accepted: 25 November 2019

Abstract

Streamflow discharge as a fundamental riverine quantity plays a crucial role in water resources management, thereby requiring accurate in-situ measurement. Recent advances in instrumentations for the streamflow discharge measurement has complemented or substituted classical devices and methods. Among various potential methods, surface current meter using microwave has increasingly begun to be applied not only for flood but also normal flow discharge measurement, remotely and safely enabling practitioners to measure flow velocity postulating indirect contact. With minimized field preparedness, this method facilitated and eased flood discharge measurement in the difficult in-situ conditions such as extreme flood in active ways emitting 24.125 GHz microwave without relying on natural lights. In South Korea, a rectangular shaped instrument named with Microwave Water Surface Current Meter (MWSCM) has been developed and commercially released around 2010, in which domestic agencies charging on streamflow observation shed lights on this approach regarding it as a potential substitute. Considering this brand-new device highlighted for efficient flow measurement, however, there has been few noticeable efforts in systematic and comprehensive evaluation of its performance in various measurement and riverine conditions that lead to lack in imminent and widely spreading usages in practices. This study attempted to evaluate the MWSCM in terms of instrument's monitoring configuration particularly regarding tilt and yaw angle. In the middle of pointing the measurement spot in a given cross-section, the observation campaign inevitably poses accuracy issues related with different tilt and yaw angles of the instrument, which can be a conventionally major source of errors for this type of instrument. Focusing on the perspective of instrument configuration, the instrument was tested in a controlled outdoor river channel located in KICT River Experiment Center with a fixed flow condition of around 1 m/s flow speed with steady flow supply, 6 m of channel width, and less than 1 m of shallow flow depth, where the detailed velocity measurements with SonTek micro-ADV was used for validation. As results, less than 15 degree in tilting angle generated much higher deviation, and higher yawing angle proportionally increased coefficient of variance. Yaw angles affected accuracy in terms of measurement area.

Keywords: Microwave water surface current meter, Surface velocity, ADV, Accuracy, Yaw and Tilt

전자파표면유속계의 측정 각도에 따른 평수기 유속 측정 정확도 분석

손근수^a · 김동수^{b*} · 김경동^c · 김종민^d

^a단국대학교 토목환경공학과 박사과정, ^b단국대학교 토목환경공학과 부교수, ^c단국대학교 토목환경공학과 박사과정,

^d한국건설기술연구원 하천연구센터 전임연구원

요 지

하천 유량관측은 수자원의 관리를 위해 활용되는 기초적이고 대표적인 자료로 하천에서 정확한 유량을 관측하는 것은 중요하다. 따라서 최근에는 다양한 첨단 장비들이 개발되어 전통적인 하천의 유량관측을 대체하거나 보완하고 있다. 여러 최신 장비들 중 전자파표면유속계는 홍수기와 같이 하천에 접근하여 직접 유량계측이 위험하고 정확도 확보가 어려운 경우 전자파를 이용하여 비접촉식으로 유량을 계측하는 장비로 홍수기 및 평갈수기에도 하천 유량계측에 활용되기 시작하였다. 전자파표면유속계는 사용법이 간단하고 간접적으로 유속을 측정하기 때문에 기존의 직접측정 방법에 비해 안전한 장점이 있어 현재 국내에서는 홍수기 또는 접근이 어려운 하천의 유속 측정을 위해 사용되고 있다. 국내에서는 1993년 유량측정 장치 개발을 위해 전자파표면유속계(MWSCM: Microwave Water Surface Current Meter)를 개발을 연구를 수행하였고, 최근에는 국내에서 개발된 전자파표면유속계를 활용하여 유량측정을 위해 사용되고 있다. 하지만 국내에서 개발된 전자파표면유속계가 실제 하천에서 유속측정의 정확도에 대한 연구는 부족한 실정이다. 전자파표면유속계는 기기로부터 전자파를 이용해 유속을 측정하기 때문에 수직각과 편각과 같은 각도 변화에 따라 측정정확도가 바뀔 수 있고, 전자파표면유속계 본체에서 방사되는 전자파의 측정영역에 따라 유속측정에 오차가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 국내에서 개발 전자파표면유속계의 측정정확도를 분석하기 위해서 실제하천과 유사한 실규모 하천수로에서 수직각과 편각을 변화시키며 측정을 수행하여 수직각과 편각에 변화에 따른 유속측정 정확도를 분석하였다. 그리고 전자파표면유속계의 측정영역의 고려를 통해서 측정영역에 따른 유속측정결과를 분석하였다. 유속측정 결과를 통해서 수직각 15° 이하에서는 유속측정의 오차가 커지게 되는 것으로 나타났고, 편각이 커질수록 유속측정의 결과의 변동계수가 커지는 것으로 나타났다. 그리고 편각에 따른 오차의 영향은 전자파표면유속계의 측정영역에 따라 결과가 달라지는 것으로 나타났다.

핵심용어: 전자파표면유속계, 표면유속, ADV, 정확도, 수직각 및 편각

*Corresponding Author. Tel: +82-31-8005-3611

E-mail: dongsu-kim@dankook.ac.kr (D. Kim)

1. 서론

하천 유량 관측은 수자원의 지속적인 관리를 위해 매우 중요하다. 최근 국내에서는 유량관측을 위해 국가하천을 대상으로 2006년부터 초음파 방식의 자동유량측정시설을 도입하기 시작하여, 현재 63개소로 확장하여 유량 조사를 수행하고 있다. 하지만 지방하천과 소하천과 같이 자동유량측정장치가 설치되지 못한 유량관측 지점은 자동유량측정장치의 부재로 인해 국내의 연구기관이나 대학교에서 용역의 형태로 주기적으로 유량관측을 수행하고 있어 측정자에 따라 유량측정의 품질 차이가 발생할 수 있다. 유량측정의 일반적인 방법은 평수기에는 초음파지점유속계(FlowTracker) 또는 전자식 유속계(Electromagnetic velocimeter)와 같은 지점유속계를 이용하여 측정인원이 도섭법을 통해 유량측정을 수행하거나 최근에는 초음파도플러유속계(ADCP)를 활용한 횡단측정을 통해 유량을 산정하고 있다(Szupiany *et al.*, 2007; Mueller *et al.*, 2009). 하지만 홍수기와 같이 유속이 매우 빠르고 수위의 변동이 심해 빠른 시간에 측정을 수행해야 되는 경우에는 직접적인 유량관측의 어려움으로 전통적인 유량측정 방법인 부자법을 통해 측정하거나 최근에는 비접촉식 방법으로 유량관측을 수행하고 있다.

부자법은 하천의 횡단면에 일정한 간격으로 측선을 설정하고 부자를 투하시켜 이동거리와 시간을 이용하여 유속을 산정하는 방법이다. 이러한 부자법을 활용한 유속 측정법은 횡단면의 형상, 유속분포가 비대칭적일 경우 부자가 빠른 경로를 따라 이동하게 되는 경향을 나타내어 유량 측정 불확도가 크게 발생할 수 있다.

따라서 최근에는 홍수기 유량측정을 위해 비접촉식 방법을 이용한 유량측정이 활용되고 있다. 비접촉식 유량측정의 대표적인 방법은 표면영상유속계(Fujita *et al.*, 2007; Muste *et al.*, 2008; Le Coz *et al.*, 2010; Dramais *et al.*, 2011)와 전자파표면유속계를 이용한 방법(Fulton and Ostrowski, 2008; Corato *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2012, Kim *et al.*, 2014)이 있다. 표면영상유속계는 측정 지점의 전체적인 유속분포를 측정하여 유량뿐만 아니라 대상지역의 전체적인 유속분포의 경향을 분석하는데 매우 유리하지만 참조점의 설치, 야간촬영의 어려움 등의 문제점이 있고, 전문가에 의해 분석이 수행되고 있어 일반 측정인원이 사용하는데 어려움이 있어 왔다. 이에 비해 전자파표면유속계는 표준화된 제품으로 생산되어 측정자가 쉽게 사용할 수 있도록 개발되었고, 전자파를 이용하여 유속을 측정하기 때문에 야간에도 측정이 가능한 장점이 있다. 전자파표면유속계는 2000년도에 일본과 미국을 중심

으로 활발하게 개발되기 시작하였고 검증을 위한 다양한 연구가 진행되었다(Plant *et al.*, 2005; Costa *et al.*, 2006; Lee and Julien, 2006; Fukami *et al.*, 2008). Tamari *et al.* (2014)는 해외에 상용화된 제품인 “Stalker Pro II SVR”를 이용하여 실험수로 및 실제하천에서 측정을 통해 수직각에 따른 오차분석, 상·하류 측정방향에 따른 분석을 통해 전자파표면유속계의 측정정확도를 분석한 바 있다.

한편 국내에서는 홍수기에 정확하고 안정한 유량측정을 위해 1993년부터 유량측정 장치 개발을 위한 연구를 시작하였고, 이 연구의 성과로 전자파표면유속계가 개발되었다(Lee *et al.*, 1995; Lee *et al.*, 1997). 최근에는 평수기 저유속으로 측정 범위를 확대하였고, 교량 등이 없는 경우 하천 측면에서 유속 측정 즉 편각 측정이 가능하도록 개발되어(Mutronics, 2011), 주어진 측정 단면에서 복수지점의 유속이 측정이 가능해 평수기·홍수기에 비교적 적은 인원으로 빠른 시간에 유량측정이 가능하다고 제시하였다(Kim *et al.*, 2015). Yang *et al.* (2011)은 전자파표면유속계의 측정 성능이 유속 1 m/s 이상에서는 신뢰할만하다고 보고하였고, Kim *et al.* (2014)는 홍수기 산지하천에서 형하고가 비교적 낮은 교량에서 유속 3~4 m/s 고 유속에 전자파표면유속계(Mutronics, 2011)를 적용하여 유량을 측정하고 ADCP 등과 비교 검토하여 10% 내외로 나타나는 등 우수한 성능을 보였으나 제주하천과 같이 하상이 거친 급경사 하천에서 대략 2 m/s 이상에서 다소 과소산정 할 수 있음을 보여주었다. 전자파표면유속계는 이동식으로 현장에서 매우 간편하게 유속을 측정할 수 있고, 특히 홍수기 유량 측정 시 부자를 대체할 수 있는 좋은 대안으로 고려될 수 있다(Yang *et al.*, 2012; Tamari *et al.*, 2014). 그러나, 이러한 편리성에도 불구하고 전자파표면유속계의 다양한 측정 조건에서 나타나는 유속측정 성능을 평가할만한 연구 결과는 여전히 부족하여 장비의 현장 적용에 제약사항이 되고 있다. 특히, 전자파표면유속계가 조준하는 측정위치가 명확하지 않고 측정자에 따라 달라질 수 있어 소하천과 같이 하폭이 작은 경우 좌우측방 유속분포 변화가 상대적으로 커지게 되어 측정지점의 위치 오류로 인해 유속오차가 발생할 수 있다(Yang *et al.*, 2012). 그리고 형하고가 높은 교량점에서 측정을 수행할 경우 측정영역(Footprint or Illuminated area)이 넓어질 수 있어 좌·우안 인근과 같이 유속의 공간적 분포가 심한 지역 등에 측정영역에 따른 오차가 발생할 수 있어 측정영역에 따른 주의필요할 필요가 있다고 제시한 바 있다(Decatur Electronics, 2011). 또한, 측면 관측시 나타날 수 있는 편각과 장비의 연직각에 따른 측정 성능도 평가가 필요하다.

본 연구에서는 국내에서 개발된 Mutronics사의 전자파표면

유속계(Microwave Water Surface Current Meter (MWSCM), Mutronics, 2011)를 활용하여 표면유속 약 0.5 m/s~1 m/s의 자연하천과 유사한 대략 폭 6 m, 수심 0.8 m 내외의 소하천 규모의 한국건설기술연구원 안동 하천실험센터 직선하천에서 장비 측정 시 수반되는 수직각(Tilt angle) 및 편각(Yaw angle)에 따른 유속을 측정하여 직접측정 결과와 비교하여 관측 조건에 따른 오차를 제시하고자 한다. 전자파표면유속계의 측정정확도를 분석하기 위해 동일한 횡단면에서 정밀한 유속측정이 가능한 micro-ADV를 이용한 단면전체에 상세한 유속을 측정하였고, 동일한 측선에 대해서는 연직유속분포를 외삽하여 표면유속을 산정하여 전자파표면유속계의 측정값과 비교하였다.

2. 전자파표면유속계 측정원리

전자파표면유속계는 운동하는 물체에 의하여 산란된 전자파의 주파수가 변하게 되는 도플러효과를 이용하여 유속을 측정한다. 전자파유속계의 측정모식도는 Fig. 1과 같고 이를 수식으로 나타내면 Eq. (1)과 같다(Kim *et al.*, 2015).

$$V = \frac{\lambda}{2 \cos \theta} f_d \quad (1)$$

여기서, V 는 물체의 속도, λ 는 전파의 파장, 그리고 θ 는 물체의 속도방향과 전파의 진행방향이 이루는 수직각(Tilt angle)을 의미하는데 MWSCM는 $0^\circ \sim 50^\circ$ 의 범위로 측정이 가능하다 (Mutronics, 2011). Tamari *et al.* (2014)은 국외에서 사용되고 있는 SVR (Surface Velocity Radar)을 이용하여 수직각을

$20^\circ \sim 70^\circ$ 의 범위에서 조절한 측정결과를 통해 수직각이 50° 이내일 때 적절한 측정결과를 나타내고 있었고, 수직각이 50° 를 초과할 경우 과소 산정하는 결과를 나타낸다고 제시하였다. 그리고 Lee and Julien (2006)은 수직각이 30° 일 때 가장 적절한 값을 얻을 수 있다고 제시하였다. 이와 같이 국외의 전자파표면유속계 수직각 측정범위는 일반적으로 $20^\circ \sim 50^\circ$ 사이일 때, 적합하다는 것을 알 수 있다. 하지만 국내의 전자파표면유속계의 경우(Mutronics, 2011), 측정가능 수직각이 $0^\circ \sim 50^\circ$ 범위로 제시하고 있어, 제원과 동일하게 수직각을 조정하였을 때 적절한 결과가 나타나는지 검증이 필요하다.

그리고 전자파표면유속계는 일정한 빔폭(Beam width)의 전자파를 발생시켜 유속을 측정하므로 측정높이에 따른 측정영역(Footprint)의 고려가 필요하다. 측정영역을 고려하기 위해 하천의 경사가 완경사일 경우 전자파표면유속계의 측정영역이 평평하다고 가정하면 종방향길이(F_L)와 횡방향길이(F_T)는 Eq. (2)와 같이 계산할 수 있다(Tamari *et al.*, 2014).

$$L = \frac{h}{\cos \phi} \quad (2a)$$

$$F_L = L \times \cos \phi \times [\tan(\phi + \frac{\gamma_V}{2}) - \tan(\phi - \frac{\gamma_V}{2})] \quad (2b)$$

$$F_T = 2L \times \tan(\frac{\gamma_H}{2}) \quad (2c)$$

여기서 L 은 전자파표면유속계와 측정지점의 거리, ϕ 는 입사각(Incidence angle)으로 $(90 - \theta)$ 를 의미하고 h 는 전자파표면유속계의 높이, γ_V 와 γ_H 는 각각 수직, 수평방향 빔각도를 의미한다. 참고로, 국내에서 개발된 전자파표면유속계의 수직방향 빔각도는 5° 이고, 수평방향 빔각도는 9° 이다.

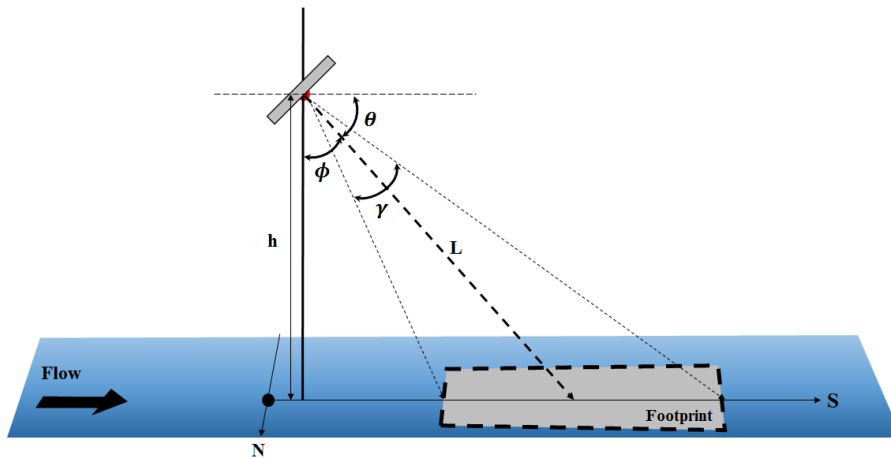


Fig. 1. MWSCM footprint driven by for the given measurement configuration

3. 대상구간 및 측정방법

3.1 대상구간 현황

본 연구에서는 전자파표면유속계의 측정 정확도를 분석하기 위해 한국건설기술연구원 하천실험센터의 실규모 직선수로에서 실험을 수행하였다. 하천실험센터는 낙동강으로부터 물을 취수하여 고수로를 통해 수로에 물이 유입되기 때문에 유량을 일정하게 공급할 수 있어 동일한 조건에서 지속적인 측정이 가능하다. 또한 Fig. 2와 같이 식생이 활착되어 있어

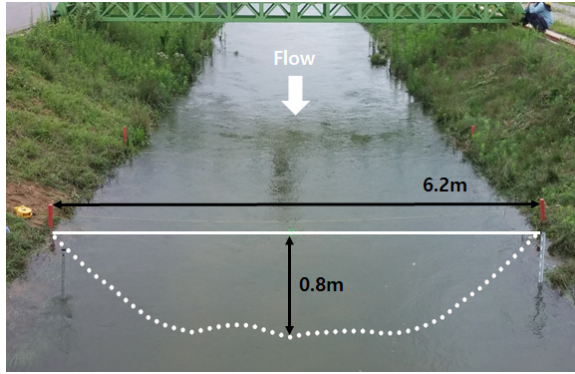


Fig. 2. In-situ flow and geometric condition pictured in a cross-section of the straight channel located in KICT River Experiment Center, Andong

실제 소하천과 거의 유사한 형태를 이루고 있고 수로에 대차가 있어 실제 교량에서 전자파표면유속계를 이용하여 측정하는 방법과 유사하게 측선별로 측정이 가능하다. 측정을 수행할 때 흐름조건은 유량 2.2 m³/s 수면 폭이 약 6.2 m이고 최대 수심은 약 0.8 m이었다.

전자파표면유속계의 측정원리를 이용하여 산정된 측정영역(Footprint)은 하천의 표면이 평탄하다고 가정하였을 때 타당하다(Tamari *et al.*, 2014). 하천실험센터 직선수로의 하상경사는 약 0.00125로 완경사의 형태를 띠고 있어 경사로 인한 보정은 필요 없다고 가정하였다. 또한 바람에 의해 측정 오차가 발생할 수 있으므로 측정 기간 중 바람의 영향으로 인한 오차는 없을 것으로 가정하기 위해 본 연구에서는 바람이 불지 않을 때 측정을 수행하였다.

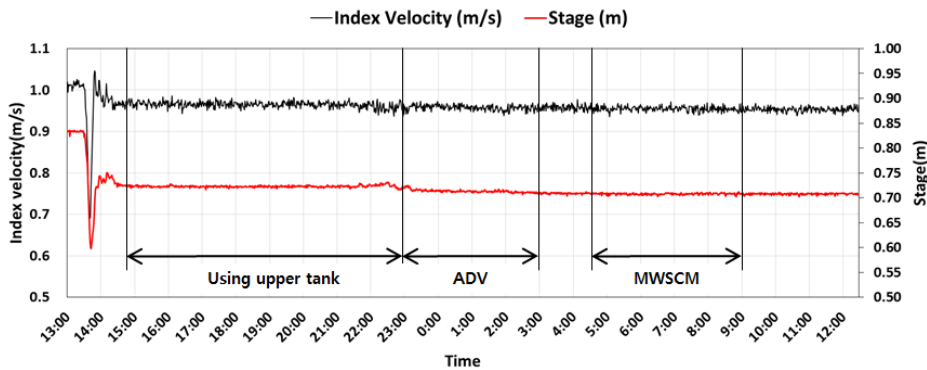
3.2 측정방법

3.2.1 흐름 안정화 검토

전자파표면유속계의 측정정확도를 분석하기 위해서 측정 중에 흐름을 안정화 상태(Steady Flow)를 점검하기 위해 Sontek사의 SL-3000을 측정단면의 상류에 설치하여 유속 및 수위를 지속적으로 측정하여 측정 중에 흐름이 안정하게 유지되는지 검토하였다. SL-3000은 Fig. 3(a)와 같이 초음파를 설치된 2개의 빔에서 각각 횡방향으로 25°로 발사하고 도플러효



(a) In-situ installation and configuration of the SL-3000



(b) Continuous monitoring stage and velocity adjacent upstream of the experimental cross-section

Fig. 3. Steady status checkup during the experiment with Sontek SL-3000 for 7.5 hours

과를 이용하여 유속을 측정하며, 기기 윗면에 부착된 센서를 이용하여 수심을 측정할 수 있다. 이때, 자료는 1분 간격으로 측정되어 지속적인 유속 및 수위를 검토할 수 있다. Fig. 3(b)는 SL-3000을 이용하여 측정시간동안 지표유속과 수위를 통해 흐름 안정화 검토를 수행한 결과이다. 모든 측정이 완료되는 시간까지 유속과 수위의 표준편차 각각 0.02 m/s, 0.02 m로 흐름의 변화는 거의 나타나지 않았고 안정화된 것을 확인하였고, 약 4시간 동안 ADV를 이용하여 횡단면 측정을 실시하였고, 약 3.5시간 동안 전자파표면유속계를 이용하여 측정을 실시하였다.

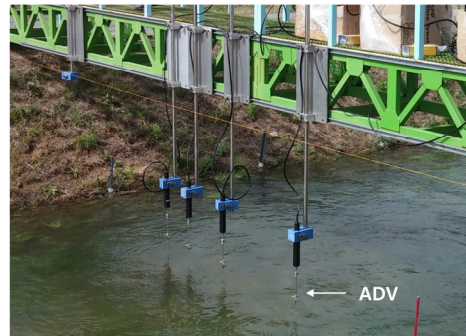
3.2.2 micro-ADV 유속 측정

전자파표면유속계의 측정정확도를 분석하기 위해서는 측정지점에서 기준유속이 필요한데, Tamari *et al.* (2014)는 실제 하천에서 이동식 초음파지점유속계인 Sontek FlowTracker를 이용하여 수표면 아래 2 cm 부근에서 측정된 유속을 이용하여 비교하였고(Sontek, 2009), 유속이 빠른 경우 영상유속계를 활용하여 전자파표면유속계의 측정결과와 비교하였다. 그러나, FlowTracker와 같은 지점유속계의 경우 수표면의 유

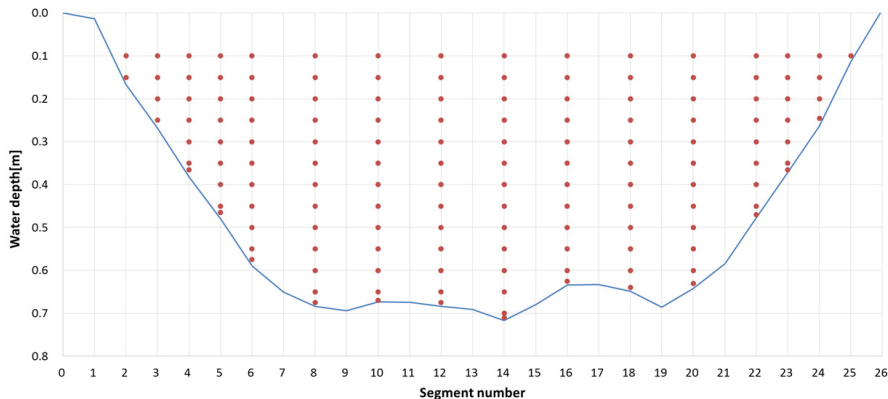
속을 측정할 수 없어 실제로 동일한 지점에서 유속을 측정했다고 할 수 없고 영상표면유속계(LSPIV)의 경우 전자파표면유속계와 같이 표면유속을 측정하고 패치(patch)를 평균한다는 의미를 가질 수 있으나 영상취득 및 분석 조건에 따라 측정 불확도를 포함할 수 있다(Kim *et al.*, 2011). 본 연구에서는 Mutronics 전자파표면유속계의 성능평가를 위한 기준유속으로 주로 실내 실험에서 기준유속 측정에 사용되는 SonTek Micro-ADV(Fig. 4(a))를 Fig. 4(b)와 같이 실외 하천현장에 대차에 설치하여 운영하였고(Sontek, 1997), 측정간격은 횡방향으로 0.5 m 간격으로 16개의 측정점에 대해 수심방향 0.05 m로 지점유속을 측정하여 전체 횡단면 유속분포를 산정하였다(Fig. 4(c)). Micro-ADV는 초당 50회 유속을 측정하고 각 측정점에서 30초간 측정하여 시간 평균한 유속을 도출하였다. Micro-ADV는 센서로부터 5 cm 떨어진 지점에서 유속을 측정하는데 실제로 센서의 잠김 깊이와 측정거리를 고려하면 수표면으로부터 수심방향 약 10 cm 이상의 지점부터 유속을 측정할 수 있어 Tamari *et al.* (2014)이 사용한 FlowTracker와 유사하게 엄밀히 말해 표면유속을 측정할 수 없다. 다만, 본 연구에서는 각 측정지점에서 연직 유속분포를 산정하였으



(a) Feature of SonTek micro-ADV



(b) Micro-ADV installation mounted on a mobile measurement bridge



(c) Gridded micro-ADV measurement configuration in the given cross-section

Fig. 4. Reference velocity measurement using SonTek micro-ADV in KICT REC channel



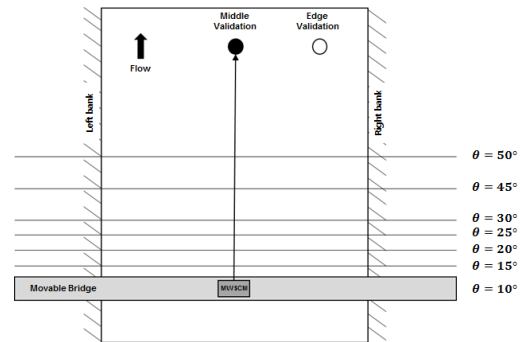
Fig. 5. MWSCM measurement on a mobile bridge located in the KICT REC straight channel

로 Tamari *et al.* (2014)과 같이 표면 부근 유속을 표면유속으로 가정하는 대신, 대수법칙 유속분포식을 가정하여 표면유속을 추정하였다.

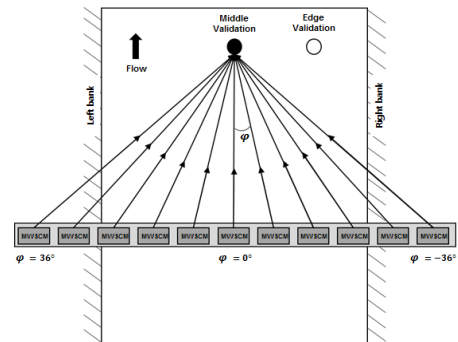
3.2.3 전자파표면유속계(MWSCM) 측정

전자파표면유속계의 측정 방법은 Fig. 5와 같이 대차에 설치하여 횡단면의 중심(Middle)과 횡단면의 우안 가장자리(Edge)를 검증지점으로 선정하여 측정을 수행하였다. 전자파표면유속계의 측정방법은 매우 간단하지만 측정정확도의 검증에 위해서 측정위치에 정확한 조준이 필요하다. 실제 현장 측정 시에는 조준에 의한 오차나 불확도가 실제 유속측정의 영향을 미칠 수 있으나, 본 연구에서는 전자파표면유속계를 측정지점에 정확하게 조준하기 위해 레이저포인트를 안테나방향지시기에 부착하여 측정을 수행하여 조준에 의한 오차나 불확도는 없다고 가정하고 실험을 수행하였다.

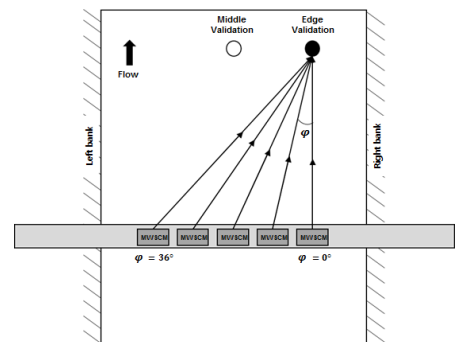
측정 방법은 다음과 같다. Fig. 6(a)와 같이 전자파표면유속계의 수직각 변화에 따른 측정정확도를 분석하기 위해서 횡단면 중심(Middle)를 기준으로 수직각을 변경하기 위해 일정거리를 이동시키며 40초간 유속을 측정하였다. 전자파표면유속계는 주어진 시간동안 측정된 유속의 평균을 최종값으로 제공한다. 그리고 편각 조정에 따른 유속 측정정확도를 분석하기 위해 Fig. 6(b)와 같이 횡단면 중심(Middle)지점을 기준으로 수직각은 25°로 고정시키고 측정을 수행한 뒤, 전자파표면유속계의 측정위치를 좌우로 1 m씩 변경시켜 수직각과 편각의 조정을 통해 동일한 측정지점에 측정을 수행하였다. 전자파표면유속계를 이용한 편각 측정 시, 측정영역의 유속분포의 변화가 심할 경우의 측정정확도를 고려하기 위해 Fig. 6(c)와 같이 횡단면의 우안(Edge)검증지점을 기준으로 동일한 방법으로 측정위치를 횡간격 1 m씩 변경시키며 측정을 수행하였다. 이때, 측정시간은 각각 120초 동안 측정을 수행하였고, 측정 시간간격은 약 1.67초에 한번으로 측정하였다.



(a) Tilt angle by moving the mobile bridge in longitudinal direction



(b) Different yaw angle by targeting middle location with various location of MWSCM



(c) Different yaw angle by targeting edge location

Fig. 6. MWSCM measurement campaign for sensitivity analysis according to diverse angle configuration against

4. 측정결과분석

4.1 ADV 측정결과

전자파표면유속계의 유속측정 정확도를 분석하기에 앞서 측정 횡단면의 전반적인 유속분포의 경향을 분석하였다. ADV를 이용하여 측정된 횡단면의 유속분포는 Fig. 7과 같다. 단면의 전체적인 유속분포는 단면의 중심(Middle)에서 우안으로 치우쳐 유속이 강하게 발생하고 있었는데, 이는 측정단면의 상류에 위치한 낙차공의 영향으로 유량공급은 일정하게 유지되었지만 구조물의 영향으로 유속이 우안으로 편향되어 발생한 것으로 판단된다.

전자파표면유속계와 동일한 검증단면에서 ADV 연직유속분포를 이용하여 표면유속을 산정하기 위해 대표적인 세가지의 유속분포 일반적인 멱법칙을 통한 방법, ADCP와 같이 멱법칙의 지수를 1/6로 고정시켜 외삽하는 방법, 대수법칙(logarithmic law)을 통한 외삽방법을 적용하였다. 세가지의 유속분포에 대한 식은 Eq. (3)와 같다.

$$\text{Power law: } \frac{u}{u_*} = a \left(\frac{z}{z_0} \right)^b \tag{3a}$$

$$\text{1/6 Power law: } \frac{u}{u_*} = a \left(\frac{z}{z_0} \right)^{1/6} \tag{3b}$$

$$\text{Log law: } \frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \log \left(\frac{zu_*}{\nu} \right) + A \tag{3c}$$

여기서, u 는 바닥으로부터 z 만큼 떨어진 지점의 유속, u_* 는 마찰속도, z 는 바닥으로부터의 거리, z_0 는 바닥 조고, a 는 멱법칙을 통해 산정된 지수, A 는 적분상수, κ 는 von Karman 상수, ν 는 동점성계수이다.

각각의 산정된 표면유속을 산정하여 비교하여 연직방향 유속측정치와 가장 유사한 추세를 보이는 유속분포법으로 추산된 표면유속을 동일지점에 해당하는 전자파표면유속계 측정성과를 검증하는 기준유속으로 선정하였다. Fig. 8은 각각 가정된 유속분포법칙을 비교에 적용된 중간(Middle) 및 측면(Edge) 지점에 나타난 결과를 보여주고 있는데, 측정치와 비

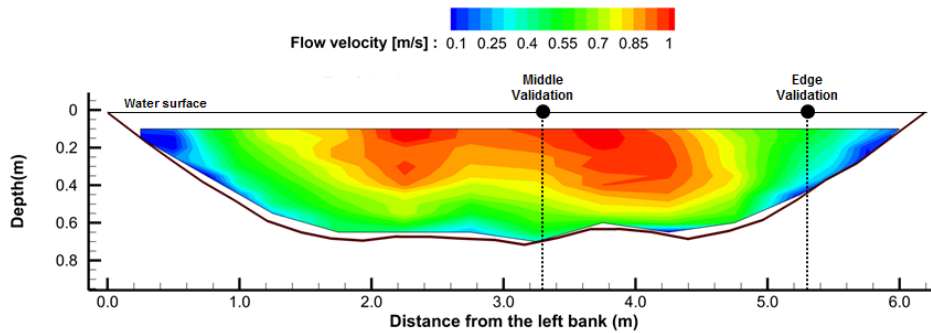


Fig. 7. Streamwise velocity contour for the measurement cross-section interpolated from micro-ADV measurement

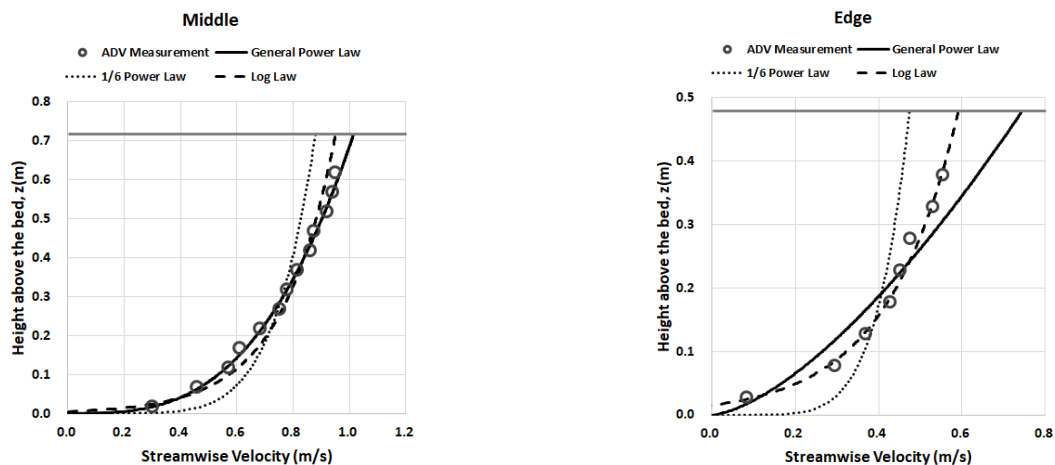


Fig. 8. Micro-ADV time-averaged streamwise velocity profiles for the middle and edge location depicted in Fig. 6 and regressed lines applied after general power law, 1/6 power law, and log law

교했을 때 두 측정지점에서 먹법칙을 통한 표면유속을 추정된 결과는 다른 방법에 비해 크게 산정되는 경향이 나타나고 있었으며, 지수를 1/6로 고정하였을 때는 표면유속을 작게 산정하는 경향을 보이고 있는데 반해 대수법칙을 통해 산정된 표면유속의 결과가 실제 측정된 유속을 가장 잘 표현하는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 대수법칙을 통해 산정된 표면유속을 기준유속으로 사용하여 전자파표면유속계의 측정결과와 비교하였다. Keulegan (1938)가 대수법칙을 개수로 전체 흐름에 적용한 이후 대부분의 개수로 연구의 경우 대수법칙은 바닥에서부터 자유표면까지 흐름의 전체 수심에 대해 적용되었다. 하지만 최근 난류에 대한 이론에서는 대수법칙 공식은 $y/h < 0.2$ 인 내부영역에서만 적용할 수 있다고 제시한 바 있다. Steffler et al. (1985)과 Nezu and Rodi (1986)는 LDA 시스템을 이용하여 개수로 흐름에서의 벽면영역의 유속분포를 실험을 통해 산정한 바 있다. 개수로의 흐름에 대한 von Karman 상수 κ 와 적분상수 A는 Reynolds 수와 Froude 수와는 관계없이 일정하게 각각 0.41과 5.29의 값을 추천한다(Nezu and Rodi, 1986). 하지만 이와 같은 연구 결과들은 실제 하천에 대한 검증이 이루어지지 않은 실험실에서의 연구 결과들이기 때문에 이에 대한 다양한 흐름조건에서의 체계적인 검증 연구가 필요한 것이 사실이다. 본 연구에서는 대수법칙이 일반적으로 적용가능한 범위의 상한이 바닥으로부터 약 15~20% 정도 수심으로 알려져 있으나(Nezu and Nakagawa, 1993; Tennekes and Lumley, 1972), 개수로에서는 연직으로 완전 혼합된 난류 흐름의 경우 대수법칙을 바닥에서부터 자유표면까지 흐름의 전체 수심에 대해 적용할 수도 있다는 사례에 착목하여 전체에 적용하였다(Keulegan, 1938; Bathurst, 1997).

4.2 수직각 변화에 따른 유속 측정 정확도 분석

전자파표면유속계의 수직각 변화에 따른 유속 측정 정확도를 분석하기 위해 횡단면의 중앙(Middle)지점에서 수직각(α)을 $10^\circ \sim 50^\circ$ 범위에서 변경하며 표면유속을 측정하였다

(Fig. 6(a)). Fig. 9는 하천중앙에서 대수법칙을 통해 산정된 기준유속과 수직각 변화에 따른 전자파표면유속계 측정값과 비교한 결과이다. 기준유속과 전자파표면유속계의 유속을 비교한 결과, 전자파표면유속계의 유속은 전반적으로 기준유속에 비해 다소 작게 유속을 측정하고 있는 것으로 나타났고, 수직각이 작아질수록 유속측정값이 점차 작아지는 것으로 나타났다. Table 1은 수직각의 변화에 따른 전자파표면유속계의 유속 평균값(mean), 중앙값(median), 횡·종방향 측정영역, 변동계수(C_v)와 오차를 나타낸 결과이다. 이때 오차의 계산방법은 Eq. (4)와 같다.

$$Error(\%) = \frac{ADV_{extrapolation} - MWSCM}{ADV_{extrapolation}} \times 100 \quad (4)$$

평균과 중앙값을 기준유속과 비교한 결과, 중앙값을 사용하는 것이 평균값보다 기준유속과 비교하여 더 정확하게 측정

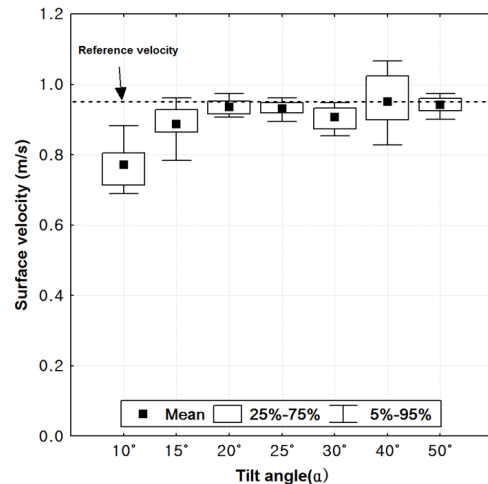


Fig. 9. MWSCM velocity measurement evaluation against micro-ADV measurement in terms of different tilt angles toward middle location in the cross-section

Table 1. Velocity error results of MWSCM at the middle location of the cross-section compared with micro-ADV measurement in terms of different tilt angle (i.e., vertical angle)

Tilt angle (°)	Vmean (m/s)	Vmedian (m/s)	L	F_L	F_T	Coefficient of variation (C_v)	Error (%)
50	0.941	0.951	4.52	0.52	0.71	0.025	1.1
40	0.950	0.943	5.38	0.73	0.85	0.085	0.1
30	0.907	0.915	6.92	1.22	1.09	0.035	4.6
25	0.931	0.933	8.19	1.71	1.29	0.022	2.1
20	0.936	0.931	10.1	2.62	1.59	0.025	1.6
15	0.887	0.896	13.4	4.63	2.10	0.081	6.7
10	0.771	0.780	19.9	10.7	3.14	0.075	18.9

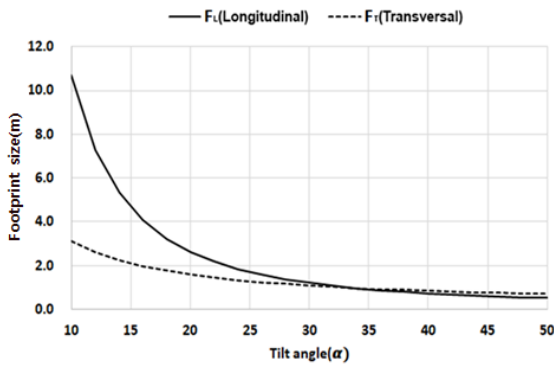


Fig. 10. Longitudinal and transversal maximum footprint size depending on tilt angle

하는 것으로 나타났다. 수직각이 40°를 제외하면 20°이상일 때 측정결과는 변동계수가 0.03으로 측정되는 반면에 15°이하에서는 측정결과의 변동계수가 커지는 경향을 보이고 있었다. 그리고 오차 또한 20°이상에서는 비교적 안정적이고 정확한 관측값을 보이고 있으나 15°이하에서는 오차가 커지는 것으로 나타났다. 수직각이 낮아질수록 오차가 커지는 결과는 전자파표면유속계의 F_L (종방향) 및 F_T (횡방향)의 측정범위 (Footprint)가 넓어지게 되면서 횡단면의 전체적인 유속을 샘플링하여 유속값이 작게 산정되는 원인과 측정 중에 각도가 낮아지게 되면 발사된 전자파표면유속계의 신호가 제대로 돌아오지 못하게 되면서 측정값이 제대로 측정되지 않는 경우가 발생하게 되는데 이로 인해 유속의 편차가 크게 측정되는 것으로 판단된다. 즉, 수직각에 대한 적절한 관측정확도를 확보하기 위해서는 적어도 20°의 수직각을 확보할 필요가 있다는 것을 의미한다.

Fig. 10은 대차에서 전자파표면유속계로 관측시 수면으로부터 측정높이가 3.46 m 일 때, 수직각 변화에 따른 측정영역의 종방향 및 횡방향의 거리를 계산한 결과이다. 수직각 10°와 50°를 비교하면 종방향 길이는 약 20배, 횡방향 길이는 약 4.5 배 증가하고 있는데 특히 수직각 20°보다 낮아지면 종방향의 측정영역이 매우 커지게 되는 것을 알 수 있다. 다음과 같이 수직각이 작아지게 될수록 측정영역이 넓어지게 되고 이로 인해 유속의 변동성이 커지게 되고, 측정값이 작게 측정된 것으로 판단된다.

4.3 편각 측정에 따른 정확도 분석

전자파유속계의 측정원리상 편각이 커질수록 동일한 측정 지점에 조준하기 위해서는 수직각은 더 작아지게 된다 (Mustonics, 2011). 하지만, 동일한 거리에서 편각을 이동시키며 측정을 수행하면 편각의 변화에 따라 측정영역은 넓어지

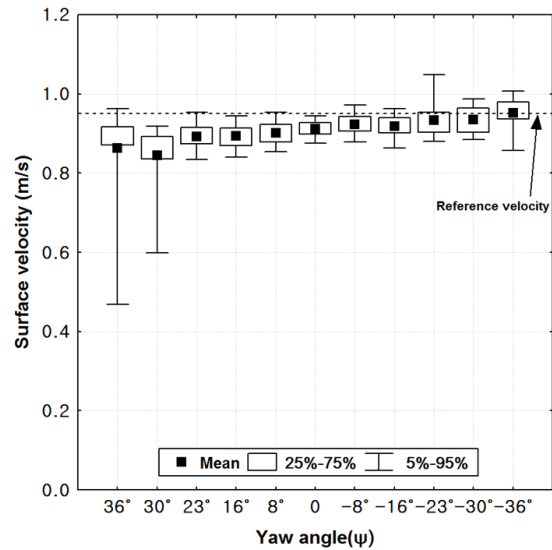


Fig. 11. MWSCM velocity measurement evaluation against micro-ADV measurement in terms of different yaw angles toward middle location in the cross-section

게 된다. 다음과 같이 편각조정에 따른 측정영역이 넓어지게 될 경우 소하천과 같이 하폭이 좁을 경우에는 측정영역에 대한 고려가 필요하다. Tamari et al. (2014)는 편각조정을 하면 유속이 작게 측정된다고 제시한 바 있다. 이에 본 연구에서는 편각 측정에 따른 정확도 분석을 위해 하천의 중심부(middle)와 우안의 가장자리(Edge) 부분 두 개의 지점을 선정하여 편각 측정을 수행하였다(Fig. 6(b) and (c)). 두 지점의 차이는 중앙부의 경우 유속의 크기가 약 1 m/s 내외이고 측정영역을 고려할 때, 횡단면의 유속분포의 변화가 크지 않은 지역이고, 우안 가장자리(Edge)의 경우 유속의 크기가 약 0.5 m/s로 횡단면의 유속분포 변화가 비교적 크게 발생하는 지점이다. 측정방법은 대차에 설치된 전자파표면유속계의 수직각 25°로 고정시키고 편각을 조정하지 않고 측정을 수행한 뒤, 1 m 간격으로 좌우로 이동시키며 수직각과 편각의 조정을 통해 동일한 측정 지점에 측정을 수행하였다.

Fig. 11은 전자파표면유속계를 좌우로 1 m 간격으로 이동시키며 하천중앙(Middle)지점을 측정했을 때 편각(ψ)에 따른 유속 측정 결과이다. 여기서 (+)방향의 편각은 시계방향으로 편각을 조정한 결과이고, (-)방향은 반시계방향으로 편각을 조정한 결과이다. 즉, 편각이 0°를 기준으로 (+)방향은 측정 지점의 좌측에서, (-)방향은 측정 지점의 우측에서 측정된 것을 의미한다. 측정결과 (+)방향으로 편각을 조정할 경우 유속을 작게 산정하는 경향을 나타내고 있었고 (-)방향으로 편각을 조정할 경우에는 유속이 점차 크게 산정되는 것으로 나타났다. 그리고 편각이 -36°일 때를 제외하면 평균값과 중앙값

모두 기준유속보다 작게 산정되었다. 편각이 커질수록 측정 자료의 편차가 증가하고 있었는데 편각 30°, 36°에서는 편차가 상대적으로 크게 나타났다. 그리고 다음과 같이 측정결과가 중앙값을 기준으로 상한과 하한의 극치(Outlier)의 차이가 크게 발생할 경우에는 평균값보다 중앙값이 기준유속과 비교할 때 정확한 것으로 나타났다(Table 2).

Fig. 12는 편각에 따른 측정결과를 변동계수와 ADV로 측정된 연직유속분포로부터 외삽을 통해 구한 기준유속과의 오차를 분석한 결과이다. 측정결과를 분석한 결과, 편각 0° 일 때 변동계수가 가장 작았고 편각을 조절 할수록 점차적으로 변동계수가 커지는 것으로 나타났다. 그리고 오차는 (-)방향으로 편각을 조절했을 때 가장 작게 나타나는 경향을 보이고

Table 2. Velocity error results of MWSCM at the middle location of the cross-section compared with micro-ADV measurement in terms of different yaw angle

Yaw angle (°)	Vmean (m/s)	Vmedian (m/s)	Coefficient of variation (C _v)	Error (%)
36	0.863	0.896	0.146	9.2
30	0.846	0.870	0.109	11.1
23	0.893	0.893	0.041	6.1
16	0.894	0.894	0.034	6
8	0.902	0.906	0.034	5.2
0	0.912	0.912	0.023	4.1
-8	0.923	0.926	0.031	2.9
-16	0.919	0.920	0.032	3.4
-23	0.934	0.927	0.047	1.7
-30	0.936	0.935	0.038	1.6
-36	0.953	0.960	0.047	-0.2

있었다. 이러한 결과는 Fig. 7과 같이 ADV로 측정 횡단면 유속분포가 중앙부에서 약간 우안으로 치우쳐 최대유속이 발생하고 있었는데 이로 인해 (-)방향의 편각이 커질수록 측정영역이 넓어지게 되면서 최대유속이 발생하는 단면의 중심의 우측의 유속을 같이 측정하게 됨으로써 유속이 상대적으로 크게 계산되는 것으로 판단된다. 반대로 (+)방향으로 편각을 점차적으로 조정하게 되면 상대적으로 단면의 중심보다 유속이 느린 좌안부분의 유속이 측정영역에 포함되어 유속의 평균값이 작게 산정되는 것으로 나타났다. Fig. 11의 결과에서도 편각을 (+)방향으로 조정할 경우 좌안의 느린 유속이 같이 측정되면서 점차적으로 하한의 신뢰구간이 떨어지게 되고 극치 또한 매우 작아지는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 13은 본 연구에서 측정한 횡단면의 측정거리와 측정간격을 통해 편각의 변화에 따른 종방향과 횡방향의 측정영역을 계산한 결과이다. MWSCM의 편각측정이 가능한 범위는 0~40°로 편각 40°와 0°를 비교하면 종방향길이는 약 1.8배, 횡방향길이 2.3배 커지게 되는 것을 확인 할 수 있다. 이로 인해 동일한 지점의 유속을 측정하여도 측정영역이 변하게 되어 유속의 값이 변화할 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 14는 전자파표면유속계를 좌로 1 m 간격으로 이동시키며 측정 지점을 중심으로 유속분포 크게 변하게 되는 하천 우안의 가장자리 지점을 측정했을 때 편각(ψ)에 따른 유속측정 결과이다. 편각을 조정하지 않았을 경우 기준유속에 비해 작게 측정되었지만 편각을 크게 조정할수록 유속이 커지게 경향을 보이고 있고 기준유속에 비해 크게 측정되는 결과를 보이고 있었다. 상한과 하한의 극치(Outlier)구간이 점차적으로 대칭에서 상한의 신뢰구간이 커지게 되는 경향을 보이고 있는데 이는 측정영역이 넓어지게 되면서 횡단면 중심부의

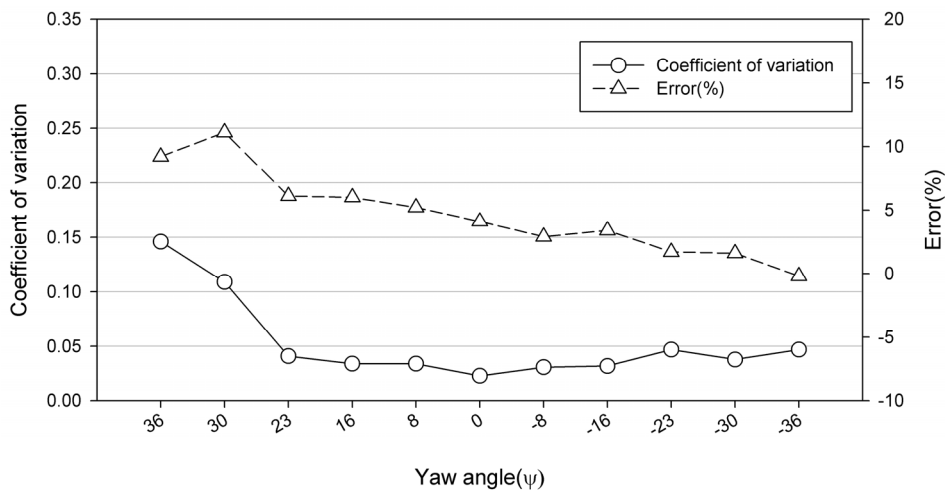


Fig. 12. Coefficient of variation and error of MWSCM velocity measurement at the middle location with respect to different yaw angle

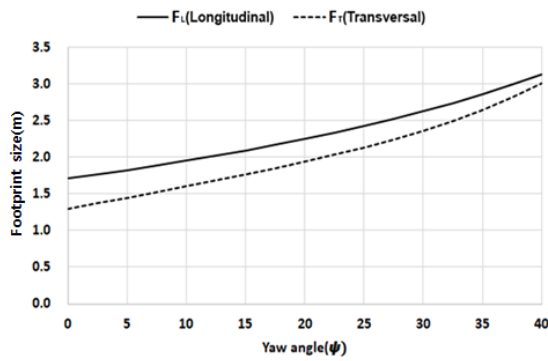


Fig. 13. Longitudinal and transversal maximum footprint size depending on yaw angle

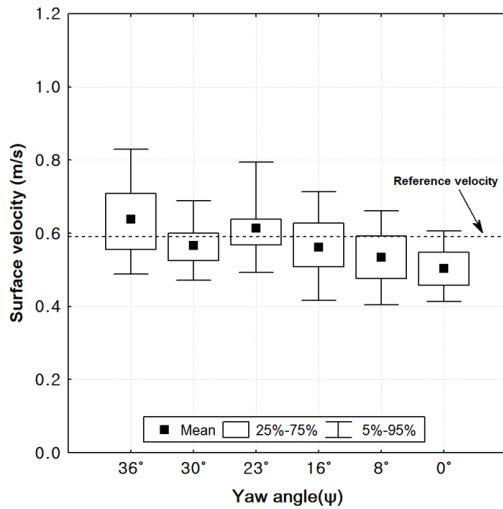


Fig. 14. MWSCM velocity measurement evaluation against micro-ADV measurement in terms of different yaw angles toward edge location in the cross-section

빠른 유속을 측정하게 되어 유속이 크게 측정된 것으로 판단된다. 그리고 상한과 하한의 편차가 커지게 될 경우에는 앞서 결과와 동일하게 평균값보다는 중앙값이 더 잘 맞는 경향을 나타내고 있었다(Table 3).

Fig. 15는 편각 조정에 따른 변동계수와 오차의 변화를 도시한 결과이다. 변동계수는 중앙지점과 비교하면 약 3배정도 크게 나타나고 있었는데, 변동계수가 크게 나타난 원인은 우안의 측정영역이 유속분포가 변화하는 구간으로 측정영역 내에서 유속의 변화가 중앙지점에 비하여 크게 나타나기 때문에 변동계수가 크게 나타난 것으로 판단된다. 그리고 오차의 경우 중앙지점과 다르게 편각이 커질수록 점차 줄어들고 있었는데 이는 편각이 커질수록 동일한 지점을 측정해도 측정영역이 넓어지게 되면서 하천중앙부의 유속도 측정되어 오히려 기준유속과 비슷하게 측정이 되어 오차가 줄어든 것으로 판단된다.

Table 3. Velocity error results of MWSCM at the edge location of the cross-section compared with micro-ADV measurement in terms of different yaw angle

Yaw angle (°)	Vmean (m/s)	Vmedian (m/s)	Coefficient of variation (C _v)	Error (%)
36	0.638	0.620	0.173	-7.9
30	0.566	0.556	0.114	4.2
23	0.614	0.609	0.126	-4
16	0.563	0.563	0.168	4.8
8	0.534	0.542	0.149	9.6
0	0.503	0.498	0.125	14.8

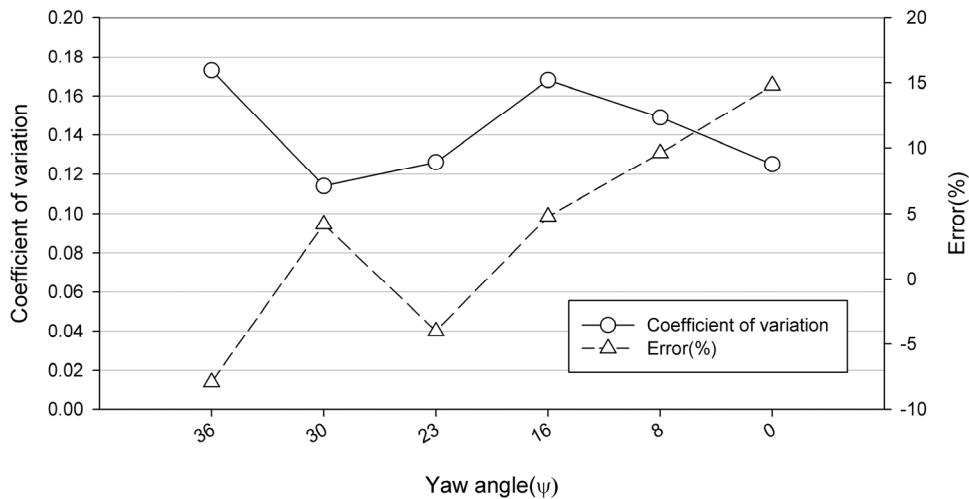


Fig. 15. Coefficient of variation and error of MWSCM velocity measurement at the edge location with respect to different yaw angle

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 국내에서 개발된 Mutronics사의 전자파표면 유속계(MWSCM; Microwave Water Surface Current Meter)를 이용하여 표면유속 약 0.5 m/s ~ 1 m/s의 자연하천과 매우 유사한 실제 소하천 규모의 직선하천에서 수직각 및 편각을 변화시켜가며 측정된 유속을 측정하였다. 측정된 자료와 ADV를 통해 측정된 연직유속분포로부터 추정된 표면유속을 기준 유속으로 활용하여 전자파표면유속계의 측정결과와 비교하였고 측정정확도를 분석하였다. 본 연구를 통해 얻은 분석결과는 다음과 같다.

- 1) 전자파표면유속계의 수직각 조정을 통한 유속측정의 정확도를 분석한 결과, 수직각 15° 이하에서는 유속측정의 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 수직각이 작아짐에 따라 측정영역이 커지게 되고 전자파의 신호가 돌아오지 못하는 현상이 발생하여 나타나는 것으로 판단된다. 따라서 전자파표면유속계를 사용할 경우 제조사에서 제시한 0°~50°의 수직각 범위를 모두 사용하는 것보다 20°~50°의 범위에서 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- 2) 편각의 조정에 따른 유속 측정정확도를 분석한 결과, 편각을 조정하지 않았을 경우는 전자파표면유속계의 측정값이 기준유속에 비해 작게 산정되는 경향을 나타내고 있었고, 편각이 커질수록 측정영역이 커지게 되어 변동계수가 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 우안 가장자리 지점과 같이 유속의 변동이 심한 지점을 측정할 경우에는 측정영역의 유속분포의 변화가 심하기 때문에 변동계수는 더욱 커지게 되어 측정에 대한 불확실도가 증가할 수 있을 것으로 나타났다. 따라서, 제조사의 제원대로 편각 0°~40° 운영은 가능하지만, 편각을 증가시키면 하천 횡방향의 측정 범위를 더 많이 고려해야 하므로 유속의 변동이 심한 지역은 편각을 되도록 줄이는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- 3) 수직각과 편각 조정을 통한 측정결과를 분석한 결과, 측정 오차는 측정영역에 따라 크게 바뀔 수 있는 것으로 나타났다. 그리고 상한과 하한의 중앙값을 기준으로 극치의 차이가 심할 경우에는 단순히 평균을 사용하여 유속을 측정하는 것보다 중앙값을 사용하는 것이 기준유속과 비교할 때 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 실제 소하천 규모에서 전자파표면유속계를 이용하여 측정을 수행할 때, 측정영역을 고려한 측선을 선택하여 측정을 수행하여야 좋은 품질의 자료를 얻을 수 있을 것이다.

본 연구에서는 전자파표면유속계의 수직각과 편각에 변화에 따른 측정정확도를 분석한 결과로 추후에는 전자파표면유속계의 측정정확도 향상을 위한 측정자료의 필터링을 통해서 정확한 유속을 측정할 수 있도록 개선이 필요할 것으로 판단된다. 그리고 본 연구에서 수행한 유속은 0.5~1 m/s로 실제 홍수기 유속과 같이 빠른 유속에 대해서도 측정정확도를 추가 분석할 필요가 있고, 실제 유속 측정자료를 이용하여 유량을 계산하는데 영향을 미칠 수 있으므로 유량측정결과에 반영되는 불확도도 함께 분석이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 성과는 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(NRF-2016R1D1A1B03 933965), 본 논문에 기여한 ㈜하이드로셈 김서준박사, 국립재난안전연구원 변현혁, 단국대학교 토목환경공학과 하천정보연구실의 연구실 일원들에게 감사의 말을 전한다.

References

- Bathurst, J.C. (1997). "Environmental river flow hydraulics." *Applied fluvial geomorphology for river engineering and management*, pp. 69-93.
- Corato, G., Moramarco, T., and Tucciarelli, T. (2011). "Discharge estimation combining flow routing and occasional measurements of velocity." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, No. 9, pp. 2979-2994.
- Costa, J.E., Cheng, R.T., Haeni, F.P., Melcher, N., Spicer, K.R., Hayes, E., Plant, W., Hayes, K., Teague, C., and Barrick, D. (2006). "Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods." *Water Resources Research*, Wiley, Vol. 42, No. 7.
- Decatur Electronics (2011). *SVR (Surface Velocity Radar) User's Manual*. Decatur Electronics Europe Inc.
- Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B., and Hauet, A. (2011). "Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage-discharge curves." *Journal of Hydro-Environment Research*, Elsevier, Vol. 5, No. 4, pp. 301-312.
- Fujita, I., Watanabe, H., and Tsubaki, R. (2007). "Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space-time image velocimetry (STIV)." *International Journal of River Basin Management*, Vol. 5, No. 2, pp. 105-114.
- Fukami, K., Yamaguchi, T., Imamura, H., and Tashiro, Y. (2008). "Current status of river discharge observation using non-contact

- current meter for operational use in Japan." *In World Environmental and Water Resources Congress 2008: Ahupua'A*, pp. 1-10.
- Fulton, J., and Ostrowski, J. (2008). "Measuring real-time streamflow using emerging technologies: Radar, hydroacoustics, and the probability concept." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 357, No. 1-2, pp. 1-10.
- Keulegan, G.H. (1938). "Laws of turbulent flow in open channels." *US: National Bureau of Standards*, Vol. 21, pp. 707-741.
- Kim, D.S., Yang, S.K., and Jung, W.Y. (2014). "Error analysis for electromagnetic surface velocity and discharge measurement in rapid mountain stream flow." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 23, No. 4, pp. 543-552.
- Kim, Y.S., Won, N.I., Noh, J.W., and Park, W.C. (2015). "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*, KWRA, Vol. 48, No. 8, pp. 613-623.
- Kim, S.J., Yu, K.K., and Yoon, B.M. (2011). "Real-Time Discharge Measurement of the River Using Fixed-type Surface Image Velocimetry." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 5, pp. 377-388.
- Le, Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G., and Camenen, B. (2010). "Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers." *Journal of hydrology*, Elsevier, Vol. 394, No. 1-2, pp. 42-52.
- Lee, J.S., and Julien, P.Y. (2006). "Electromagnetic wave surface velocimetry." *Journal of hydraulic engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 2, pp. 146-153.
- Lee, S.H., Kim, U.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*, KWRA, Vol. 30, No. 6, pp. 671-678.
- Lee, S.H., Lee, H.G., and Kim, U.G. (1995). "Velocity measurement of stream water surface using microwave." *Water for future*, KWRA, Vol. 28, No. 6, pp. 183-191.
- Mueller, D.S., Wagner, C.R., Rehm, M.S., Oberg, K.A., and Rainville, F. (2009). *Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat*. United States Geological Survey: Reston, WV, USA 2009.
- Muste, M., Fujita, I., and Hauet, A. (2008). "Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments." *Water resources research*, Wiley, Vol. 44, No. 4.
- Mustronics (2011). *User's Manual*. Mustronics.
- Nezu, I., and Nakagawa, H. (1993). "Turbulence in open channel flows." *IAHR Monograph*, A. A. Balkema, Rotterdam.
- Nezu, I., and Rodi, W. (1986). "Open-Channel flow measurements with a laser doppler anemometer." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 5, pp. 335-355.
- Plant, W.J., Keller, W.C., and Hayes, K. (2005). "Measurement of river surface currents with coherent microwave systems." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 43, No. 6, pp. 1242-1257.
- Sontek (1997). *Acoustic Doppler Velocimetry Operation Manual, Firmware version 4.0*. Sontek, San Diego.
- Sontek (2009). *FlowTracker. Handheld ADV. User's Manual*. Sontek, San Diego.
- Steffler, P.M., Rajaratnam, N., and Peterson, W. (1985). "LDA measurements in open channel." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 1, pp. 119-130.
- Szupiany, R.N., Amsler, M.L., Best, J.L., and Parsons, D.R. (2007). "Comparison of fixed-and moving-vessel flow measurements with an aDp in a large river." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 12, pp. 1299-1309.
- Tamari, S., García, F., Arciniega-Ambrocio, J.I., and Porter, A. (2014). "Testing a handheld radar to measure water velocity at the surface of channels." *La Houille Blanche*, No. 3, pp. 30-36.
- Tennekes, H., Lumley, J.L., and Lumley, J.L. (1972). *A first course in turbulence*. MIT press, Massachusetts.
- Yang, S.K., Kim, D.S., Jung, W.Y., and Yu, K.K. (2011). "Analysis and comparison of stream discharge measurements in Jeju island using various recent monitoring techniques." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 20, No. 6, pp. 783-788.
- Yang, S.K., Kim, D.S., Yu, K.K., Kang, M.S., Jung, W.Y., Lee, J.H., Kim, Y.S., and You, H.J. (2012). "Comparison of flood discharge and velocity measurements in a mountain stream using electromagnetic wave and surface image." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 21, No. 6, pp. 739-747.