

## 하천유량측정의 효율성 향상을 위한 범용 전자파표면유속계 개발

김영성\* · 노준우 · 최광순

한국수자원공사 K-water연구원

**Development of Microwave Water Surface Current Meter for General Use to Increase Efficiency of Measurements of River Discharges. Kim, Youngsung\*, Joonwoo Noh and Kwangsoon Choi (K-water Research Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Korea)**

**Abstract** Discharge measurement during flood season is very difficult. Microwave water surface current meter (MWSCM) can measure river surface velocities easily without contacting water. This study introduces its improved version, MWSCM for general use. The existing version of MWSCM is for floods so that its applicable period in a year is short. It has been improved to extend its applicability in a year. The range of measurable velocity for MWSCM for general use is extended so it can be applied during normal flows as well as high flows. MWSCM for general use can measure the velocity range of  $0.03 \sim 20.0 \text{ m s}^{-1}$ , whereas MWSCM for floods can measure the velocity range of  $0.5 \sim 10.0 \text{ m s}^{-1}$ . To make such innovation of MWSCM for general use, the applied microwave frequency of MWSCM was changed from 10 GHz to 24 GHz. Waveguide slot array antenna has been designed with the new development of the circuit of transmitting and receiving part. Improvement requests on the existing MWSCM for floods - weight lightening, measured velocity stabilization, self-test, low power consumption, and waterproof and dampproof - from the users of it have been reflected for the development of the new version of MWSCM.

**Key words** : MWSCM for floods, MWSCM for general use, microwave frequency, waveguide slot array antenna

우리나라에서 하천의 유량측정은 1960년대 말부터 유역조사사업, 다목적 댐 건설 및 치수 사업 등과 더불어 시작되었다(K-water, 1995). 그러나 여름철 홍수기의 유량측정은 여전히 큰 어려움으로 남아 있는 실정에 있다. 현재 사용되고 있는 유량측정방법은 회전식 유속계-권양기 체계로서 회전식 유속계를 하천의 일정한 깊이 에 위치하도록 물속에 투입한 후, 정해진 시간 동안 그 의 회전수를 측정하여 유속을 환산하는 방식으로 하천

의 홍수유량을 측정하는 데 많은 문제점이 있다. 유속 계-권양기 체계는 주로 차량에 탑재하므로 이동성은 좋 으나, 홍수 유속측정 때 빠른 유속에서 야기되는 항력이 너무 커서 장비뿐만 아니라 측정인력도 매우 위험한 안 전성의 문제점이 있다. 이로 인해 홍수기에는 아직도 전 통적 방법인 부자측정법을 많이 이용하고 있다. 부자측 정법은 수심별로 일정한 흘수를 유지하도록 제작된 부 자를 하천에 투하하여 이동한 거리에 대한 소요시간을 측정하여 유속을 측정하는 방법으로, 통상 측정에 6인 내외의 측정인원이 필요하다. 부자측정법은 측정인원이 많이 소요되는 점, 수심별로 부자를 준비해야 하는 점 및 대하천에서 주간과 야간 측정 때 식별이 어려운 점

Manuscript received 14 August 2014, revised 30 September 2014,  
revision accepted 1 October 2014

\* Corresponding author: Tel: +82-42-870-7432, Fax: +82-42-870-7499,  
E-mail: yskim@kwater.or.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

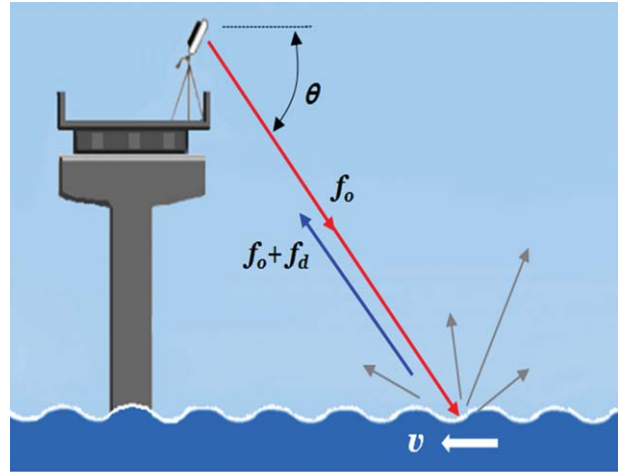
등 각종 애로사항을 포함하고 있다. 이러한 여건에도 불구하고 국내에서는 별다른 대안없이 홍수의 유량측정에 통상적으로 부자를 사용하고 있다. 최근들어 이미지 해석방법인 LSPIV (large scale particle image velocimetry)가 개발되어 물과 비접촉식으로 유량을 측정하고 있으나, 이 방법 또한 예기치 못한 다양한 제약조건이 있어 실용적이지 못한 실정이다 (Fujita and Komura, 1994; Muste *et al.*, 2000; Haute *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2011).

홍수기에 정확하고 안전한 유량측정을 통하여 물관리에 필요한 기초수문자료를 확보하고자 한국수자원공사(K-water)는 1993년부터 대하천을 중심으로 하천유량측정 신기술 개발을 위한 연구를 시작하였으며 (K-water, 1994), 이 연구의 성과물이 전자파를 이용하여 물과 비접촉식으로 유속을 측정한 후 유량으로 환산하는 전자파표면유속계 (microwave water surface current meter, MWSCM)로 1999년도에 국내 특허등록 되었다 (특허제 0204980호). 이것은 기존 회전식 유속계의 적용에서 안전성과 부자측정의 각종 문제점에 대한 대안이 될 수 있는 측정시스템에 해당한다. 홍수용 MWSCM은 78대가 보급되어 홍수유량측정실무에 이용되고 있다. 하지만 기존에 사용 중인 MWSCM은 홍수기용으로써 장마나 태풍 때 많은 양의 강우발생으로 인해 하천의 유속이 고유속 ( $>0.5 \text{ m s}^{-1}$ ) 일 때에 적용가능하다. 따라서 국내 하천에서 유량이 풍부할 때에만 사용할 수 있어, 이것의 적용시기와 기간이 극히 제한적이다. 그래서 MWSCM의 활용성을 높이고자, 이의 성능개선을 통하여 유속측정범위를 확장시켰다. 즉, 홍수기뿐만 아니라 평·갈수기에도 하천 유량측정을 가능하게 함으로써 그 효용성을 높이고, 기존 사용자들의 개선요구사항을 최대한 반영함으로써 현장에서 유량을 측정하기에 손쉬운 기기로 개발하고자 하였다.

운동하는 물체에 의하여 산란된 전자파의 주파수가 변하게 되는 현상을 도플러효과라고 한다. 이때의 주파수 변화량을 도플러 주파수라고 하며, 수학적으로 다음식(1)과 같다.

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

여기서,  $f_d$ 는 도플러 주파수이고,  $v$ 는 물체의 속도,  $\lambda$ 는 전파의 파장, 그리고  $\theta$ 는 물체의 속도 방향과 전파의 진행방향이 이루는 각으로써  $20^\circ \sim 50^\circ$  범위의 값을 이용한다. 홍수용 MWSCM은 유속으로 인해 나타나는 초고주파 센서의 출력 즉, 도플러 신호의 주파수( $f_d$ )를 판별하고, 이를 아래의 식 2를 이용하여 표면유속( $v$ )을 계산



(a)



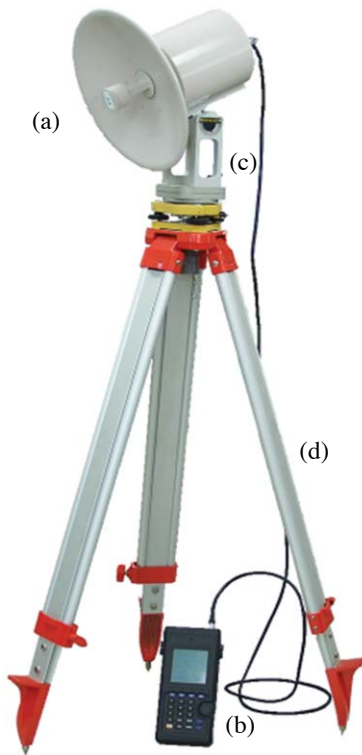
(b)

**Fig. 1.** Illustration of velocity measurement principle with MWSCM. ( $v$ : velocity,  $\theta$ : vertical angle,  $f_0$ : transmitting frequency,  $f_d$ : doppler frequency) (a) schematic diagram, (b) field deployment.

하게 된다 (Fig. 1).

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

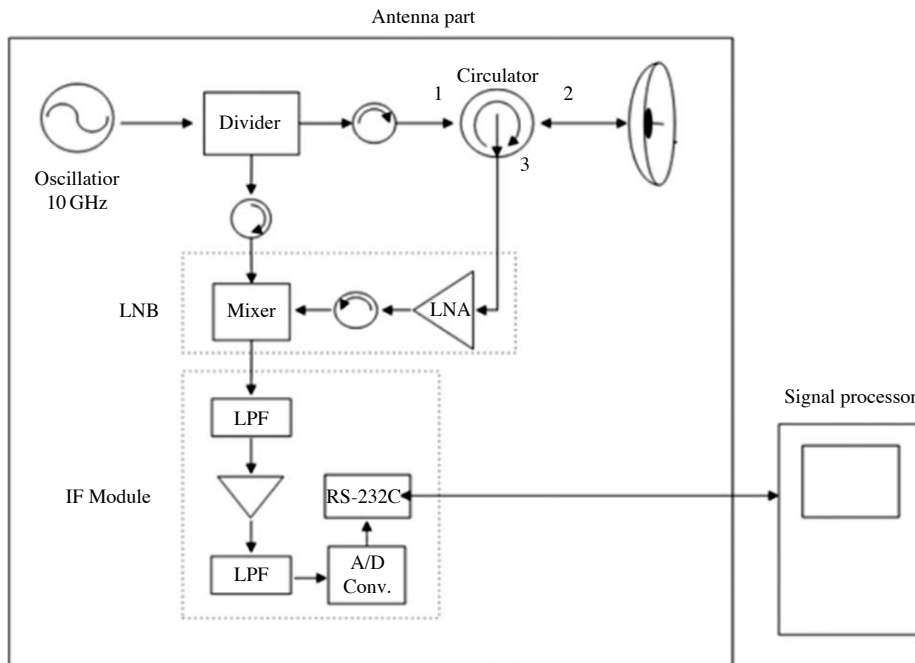
홍수용 MWSCM에서 도플러 주파수를 얻기 위한 일련의 과정은 다음과 같다. 홍수용 MWSCM (Fig. 2)은 하나의 파라볼릭 안테나를 통해서 송수신한다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 10 GHz를 발사하는 송신단과 물표면에 반사되어 돌아오는 신호를 수신하는 수신단이 써클레이터 (circulator)를 통해서 분리가 되는 구조이다. 송신 주파수는 써클레이터 포트 1로 입력되어 포트 2를



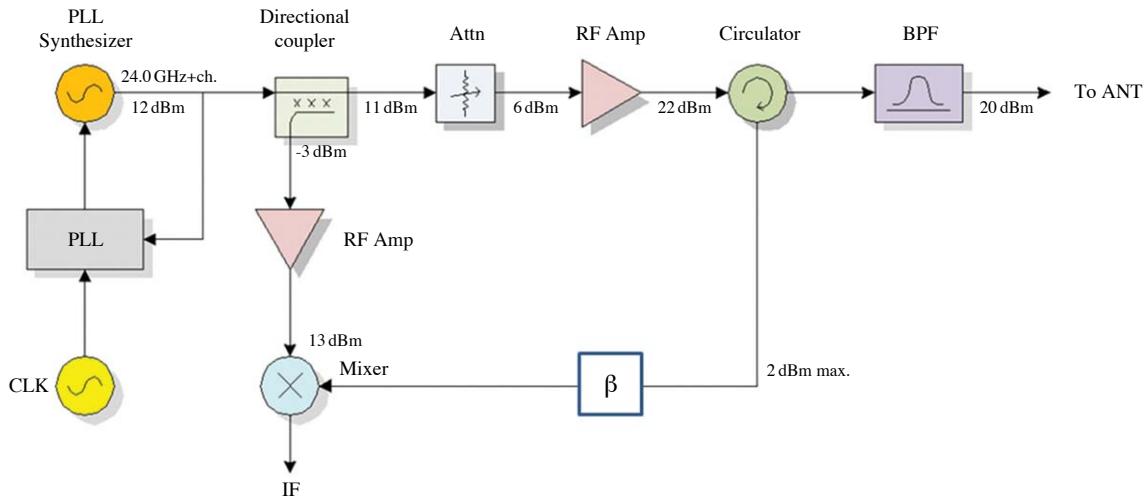
**Fig. 2.** A photograph of MWSCM components: (a) parabolic antenna, (b) signal processor, (c) angle measuring part, (d) tripod.

통해서 안테나로 출력되고, 수신되는 도플러 주파수는 포트 2로 입력되어 포트 3으로 출력되는 구조를 갖고 있다. 수신된 도플러 주파수는 저잡음 증폭기(LNA)를 통해서 10 dB로 증폭된 후 혼합기(mixer)를 거쳐서 유속에 대응하는 최종 도플러 주파수를 추출한다(K-water, 1994).

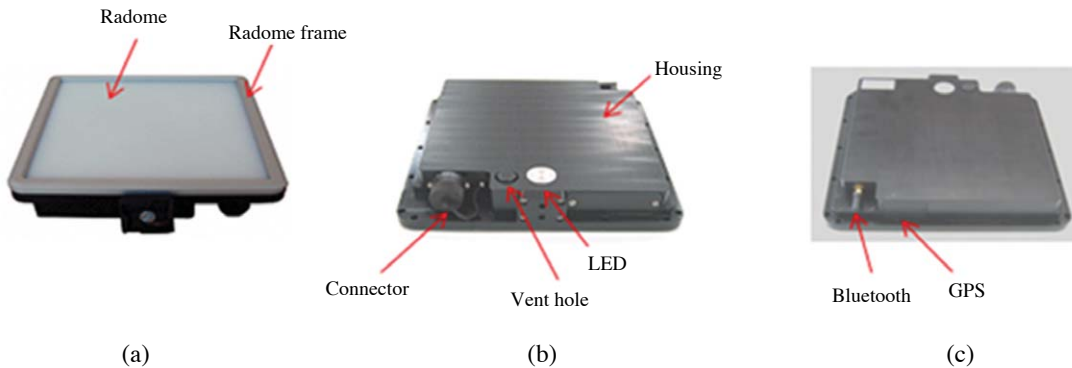
기존 홍수용 MWSCM의 측정한계인  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  이하의 유속에 대해서 측정이 가능하도록 하는 것에 주안점을 둔 범용 MWSCM는 안테나에 대한 재설계를 실시하였고, 사용주파수 대역을 변경하였다(K-water, 2010). 그 결과 사용자의 편의성증진을 위한 사항인 기기의 소형 경량화 제작이 또한 가능하였다. 기존 홍수용 MWSCM이 10.0 GHz의 주파수를 사용하는 반면, 성능개선 제품개발에서는 ISM-band 중에서 24.00~24.25 GHz의 주파수 대역을 사용하였다. ISM (industrial, scientific and medical)-band는 산업, 과학 및 의학적 목적을 가지고 사용하는 장비에서 전세계적으로 비교적 자유롭게 사용할 수 있는 주파수 대역이다. 24 GHz 대역을 사용하는 경우, 기존의 10 GHz 대역과 상대적으로 비교하여 동일한 방사 패턴, 이득 등의 안테나 특성을 만족시키면서 안테나의 크기를 줄일 수 있고, 측정 정밀도를 높일 수 있는 장점이 있다. 반면에 전파 대기손실이 크고, 부품과 시스템의 제작에 있어서 기술적 난이도



**Fig. 3.** Circuit diagram of MWSCM for floods. Conv.: converter, IF: intermediate frequency, LNA: low noise amplifier, LNB: low noise block down converter, LPF: low pass filter.



**Fig. 4.** Plan for RF (radio frequency) receiving and transmitting part for increasing performance of MWSCM for general use. Ant (antenna), Attn (attenuator), BPF (band-pass filter), CLK (clock), Conv. (converter), IF (intermediate frequency), LNA (low noise amplifier), LNB (low noise block down converter), LPF (low pass filter), PLL (phase locked loop)synthesizer, RF Amp (radio frequency amplifier),  $\beta$  (phase difference).



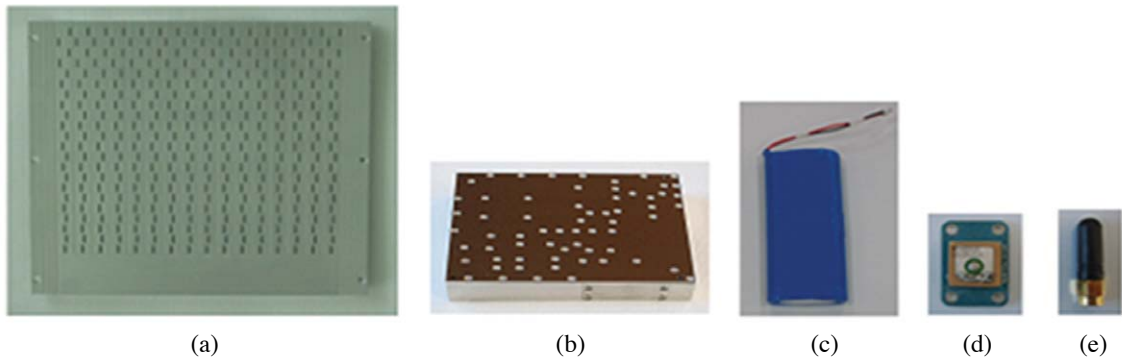
**Fig. 5.** Exterior view of MWSCM for general use. (a) front side (b) back side bottom (c) back side top.

와 제작비용이 상대적으로 높은 단점이 있다.

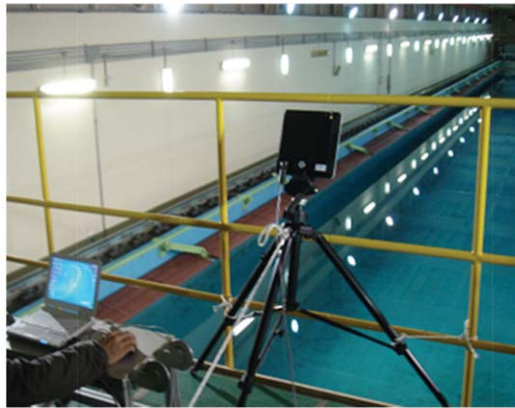
금번 성능개선에서 유속측정 범위의 확대, 정확도 향상 및 사용자가 휴대하기에 용이한 소형 경량화에 비중을 두고서 24 GHz 대역을 사용하는 것으로 선정하였고, 기술적 난이도와 제작비용의 증가 부분은 양산을 고려하여 설계 최적화를 통해 극복하였다. RF (radio frequency) 송수신부는 24 GHz 대역의 송수신 신호를 통해 도플러신호를 출력하는 도플러유속계의 핵심이 되는 부분이다. 이것의 설계, 제작 성능에 따라 도플러 유속계의 성능이 대부분 결정되고, 이 또한 소형화 제작이 요구된다. 송수신센서 내부의 배터리를 통해 전원을 공급받기 때문에 충분한 사용시간을 보장하기 위해서 저전력 소모를 고려한 설계가 되어야 한다.

내부회로 구성방안은 통상의 호모다인 (homodyne) 도플러 레이더와 동일한 구성을 가진다. 세부 구성은 24 GHz의 신호를 만들어 내기 위한 위상고정주파수 합성기 (phase locked loop (PLL) synthesizer), 송신신호의 일부를 신호혼합기에 공급하기 위한 방향성결합기 (directional coupler), 송신신호와 수신신호의 경로를 제어하는 서큘레이터 (circulator), 송신신호와 수신신호를 혼합하여 도플러 주파수를 출력하기 위한 신호혼합기 (mixer), 그리고 각 부품의 출력을 증폭하고 파워를 제어하기 위한 증폭기 (amplifier), 감쇄기 (attenuator) 등으로 되어 있다 (Fig. 4). 구성상의 주요 매개변수를 보면, 최종출력은 20 dBm을 목표이고, 수신단 잡음지수는 호모다인 수신기의 구조로 인해 약 10 dB 정도가 될 것으로 판단된다.

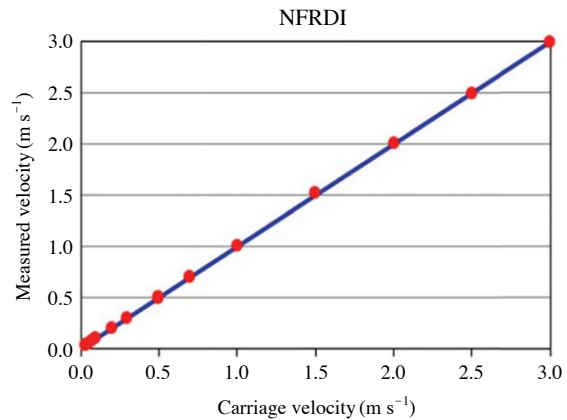




**Fig. 6.** Components of MWSCM for general use (a) RF (radio frequency) antenna (b) RF signal processing module (c) battery (d) GPS antenna (e) Bluetooth antenna.



(a)



(b)

**Fig. 7.** Measured velocity verification of MWSCM for general use. (a) towing tank of National Fisheries Research & Development Institute (NFRDI) (b) comparison between measured velocity with MWSCM for general use and carriage speed.

범용 MWSCM의 본체는 단일모듈로 제작되었다. 본체의 하우징에는 RF송수신부 모듈, 도파관슬롯배열 안테나, GPS와 Bluetooth 안테나 및 배터리 등이 내장되어 있다. 그리고 본체와 단위 구성품별로 각각 방수처리하여 2중 방수가 되도록 하였다. 본체의 앞면은 도파관 슬롯배열 안테나가 내장되어 있고, 그 앞에는 보호막 역할을 하는 안테나 레이돔이 있다. 안테나 레이돔과 본체의 하우징은 오링(O-ring)이 내장된 알루미늄 재질의 레이돔 고정틀로 장착하여 완전하게 방수가 되도록 설계하였다(Figs. 5, 6).

본체의 뒷면에는 방수용 LED와 밴트홀(vent-hole)이 위치하고 있다. LED는 본체의 전원 ON/OFF를 지시해 준다. 밴트홀은 물 입자의 통과를 차단하고, 공기입자만을 통과시키는 역할을 하는 방수용 필터로서 본체의 방수규격인 IP67과 방수/방진규격을 만족하도록 설계하였

다.

본체의 윗면에는 GPS 안테나와 Bluetooth 안테나가 각각 부착되어 있다. GPS 안테나 전면에는 플라스틱 재질의 보호용 레이돔은 본체 하우징에 실리콘에폭시로 부착하는 방수구조이다. Bluetooth 안테나는 하우징에 있는 방수용 SMA (subminiature version A) (f) 커넥터에 장착하는 방법으로 되어있다. 본체의 아래면에는 유선 인터페이스를 위한 방수용 원형 커넥터가 부착되어 있고, 배터리의 탈부착이 용이한 알루미늄 재질의 덮개가 있다. 배터리는 반복되는 충전과 방전으로 인해 수명이 다할 때까지 거의 교체가 없기 때문에 그 덮개를 볼트로 고정하도록 하였고, 이것도 오링을 삽입하여 완전방수가 되는 구조이다. 또한 아래면의 중앙에는 pan/tilt 고정장치에 장착할 수 있는 플레이트가 부착되어 있다.

본 연구에서 개발한 범용 MWSCM 시제품의 성능실

험은 유속측정용 견인수조에서 수행하였다. 이 실험은 개발제품에 대한 유속측정의 정확도를 확인하고, 보완사항을 파악하는 것이 목적이었다. 특히  $0.03 \sim 3.0 \text{ m s}^{-1}$  범위의 유속측정에 중점을 두었다.

국립수산과학원의 선박시험용 수조는 폭이 10 m이고, 활차 속도의 정밀제어가 가능하다. 수조 위에 설치된 전동카트의 속도를 정밀제어하여  $0.03 \sim 3.0 \text{ m s}^{-1}$  범위로 수조를 따라 정속으로 이동하도록 제작되었다. 전동카트 위에 개발한 범용 MWSCM 시제품을 실제 현장의 교각 위에 설치하는 것과 동일한 방법으로 수면을 향해 안테나를 틸트하여 설치하였다. 그런 후 전동카트를 일정한 속도로 이동하면서 측정된 유속데이터를 전동카트의 이동속도와 비교하여 일치하는지를 확인하였다. 그 결과,  $0.03 \sim 3.0 \text{ m s}^{-1}$  범위의 속도에서 평균편차가 0.97%의 오차를 갖는 결과를 얻었다(Fig. 7).

본 연구노트에 소개되는 범용 MWSCM은 1999년에 개발 완료하여 실용화하여 상용보급한 홍수용 MWSCM의 활용성을 높이고자 한 것이다. 기존 홍수용 MWSCM 사용자를 대상으로 설문조사 후 개선요구사항을 파악하였고, 이를 최대한 반영하여 간편하면서도 편리한 홍수기 및 평·갈수기에 적용이 가능한 유속측정기기이다. 기존의 홍수용 MWSCM 사용자에게 대한 설문조사를 실시한 결과 첫째, 보급가격이 사용자들이 생각하는 것보다 높은 것으로 파악되어 범용 MWSCM의 경우, 보급가격을 낮출 것을 염두에 두고 개발을 착수하였다. 둘째, 유속측정 시 비정상적인 유속측정을 경험한 사례가 보고되고 있어 유속측정의 안정성 확보에 성능개선의 주안점을 두었다. 셋째, 사용자들이 현장에서 판단하기 힘든 기기 상태에 대한 자동 점검기능을 탑재할 수 있도록 범용 MWSCM의 개발에 고려하였다. 넷째, 현장에서 실무자들이  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  이하의 유속에서도 MWSCM을 적용할 수 있도록 유속측정 가능범위를 확장할 수 있는 고성능 제품개발을 시도하였다.

범용 MWSCM은 기존 홍수용 MWSCM에서 측정 가능한  $0.5 \sim 10.0 \text{ m s}^{-1}$  범위의 유속을  $0.03 \sim 20.0 \text{ m s}^{-1}$ 로 확장하였다. 이렇게 함으로써 기존 홍수용 MWSCM이 홍수기에 국한되어 활용도가 적었던 반면에, 범용 MWSCM은 최소  $0.03 \text{ m s}^{-1}$ 까지 측정할 수 있게 개발되어 활용도가 커졌다. 다만  $0.03 \text{ m s}^{-1}$ 에 대한 검증실험은 정밀제어 되는 실내 견인수조에서 실시된 것으로서  $0.2 \text{ m s}^{-1}$  이하의 유속측정 시에 주변 환경 여건의 영향을 많이 받아 실제 측정하는 물표면의 유속 자체가 불안정함에 따라 측정되는 유속값이 불안정해질 수 있는 가능성이 있다.

범용 MWSCM 시제품을 상품화하기 위하여 기존 홍수용 MWSCM의 사용자들이 제시한 현장적용상의 문제점에 대한 해결에 주력하였다. 첫째, 기존 홍수용 MWSCM의 사용편의를 개선하기 위하여 소형화 및 경량화를 추진하였고, 이를 위하여 사용 주파수를 기존의 10 GHz에서 24 GHz로 변경함으로써 안테나 크기의 소형화(직경 30 cm의 포물선형 안테나를  $22 \times 22 \text{ cm}$ 의 도파관슬롯배열 안테나로 수정 개발)를 실현하였다. 그리고 송수신부의 무게를 기존 4.9 kg에서 3.3 kg으로 감량하였고, 송수신부에 측각부를 내장하여 기기를 단순화하였다. 둘째, 측정값의 안정화를 개선하기 위하여 안테나의 특성을 고려하여 부엽(side-lobe) 레벨  $-30 \text{ dB}$  이하 및 전후방비(front-back ratio) 50 dB 이상으로 보완하여 안테나가 지향하는 방향 이외의 위치에서 반사되어 나타나는 신호를 줄여서 측정값의 안정화를 이루었다. 셋째, 자체점검 기능을 추가 탑재하여 유속측정 전에 self-test기능을 통하여 측정자가 기기의 상태를 사전에 파악 가능하도록 함으로써, 기기 오작동에 대한 능동적으로 대처할 수 있도록 하였다. 이외에도 저전력 회로설계를 통하여 배터리 사용시간을 확장하였고, 기존 홍수용 MWSCM의 문제점으로 제기된 방습 및 방수 기능을 보완하여 이에 대해 내성을 갖는 제품으로 설계 제작하여 유속측정이 안정적으로 이루어질 수 있도록 하였다.

## 적 요

본 연구는 홍수기 유량측정의 어려움을 극복하고자 물과 비접촉식으로 유속을 측정하여 유량을 산정하는 전자파표면유속계(microwave water surface current meter, MWSCM)의 성능개선 제품인 범용 MWSCM에 대하여 소개하고자 하였다. 기존에 사용 중인 MWSCM은 홍수용으로써 연중 활용도가 낮아 이것의 이용성을 높이고자 성능을 개선하였다. 유속측정 범위를 확장하여 평·갈수기에도 하천 유량측정이 가능하게 하였다. 즉 기존 홍수용 MWSCM의 유속측정 범위가  $0.5 \sim 10.0 \text{ m s}^{-1}$ 이었던 반면, 금번에 개발된 범용 MWSCM은  $0.03 \sim 20.0 \text{ m s}^{-1}$ 로 홍수기 및 평수기 측정이 가능하도록 성능을 개선하였다. 이를 위해서 사용주파수의 변경(10 GHz  $\rightarrow$  24 GHz), 안테나 및 송수신부 회로가 새롭게 설계 제작되었다. 이와 더불어 기존 홍수용 MWSCM 사용자들의 개선요구사항-기기 경량화, 유속 안정화, 자체점검기능, 저전력, 방수 및 방습을 파악하여 반영함으로써 현장에서 유량을 측정하기에 용이한 기기로 개발하였다.

## 사 사

본 연구개발은 한국수자원공사 K-water연구원의 자체과제('07.1~'12.12)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 그리고 기기의 정밀검증 테스트에 많은 도움을 준 국립수산과학원에 감사드립니다.

## REFERENCES

- Fujita, I. and S. Komura. 1994. Application of video image analysis for measurements of river-surface flows. Proc. of Hydraulic Engineering. *Japan Society of Civil Engineers* **38**: 733-738.
- Hauet, A., A. Kruger, W.F. Krajewski, A. Bradley, M. Muste and M. Wilson. 2005. Real-time estimation of discharge of the Iowa river using image-based method-user's manual. IIHR-Hydroscience and Engineering, The University of Iowa, Iowa City, IA.
- Kim, S., K. Yu and B. Yoon. 2011. Real-time discharge measurement of the river using fixed-type surface image velocimetry. *Journal of Korea Water Resources Association* **44**: 377-388.
- K-water. 1994. Development of measurement facilities for stream discharge (development of a microwave surface velocity meter and supersonic correlation current meter). WRR-94-1.
- K-water. 1995. Development of measurement facilities for stream discharge (development of a velocity measurement instrument for stream water surface using microwave). WRR-95-1.
- K-water. 2010. Improvement of accuracy on discharge measurement using surface velocity, KWI- WR-10-01.
- Muste, M., Z. Xiong, A. Bradley and A. Kruger. 2000. Large-scale particle image velocimetry - a reliable tool for physical modeling. ASCE 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management, Minneapolis, Minnesota.