

## 전자파표면유속계를 이용한 하천유량측정의 적용범위 확장을 위한 고성능 범용 전자파표면유속계의 개발

### 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

김 영 성\* / 원 남 일\*\* / 노 준 우\*\*\* / 박 원 철\*\*\*\*

Kim, Youngsung / Won, Nam-Il / Noh, Joonwoo / Park, Won-Cheol

#### Abstract

To overcome the difficulties of discharge measurements during flood season, MWSCM (microwave water surface current meter) which measures river surface velocities without contacting water has been applied in field work since its development. The existing version of MWSCM is for floods so that its applicability is low due to the short periods of floods. Therefore the renovative redesign of MWSCM to increase the applicability was conducted so that it can be applied to the discharge measurements during normal flows as well as flood ones by extending the measurable range of velocity. A newly developed high-performance MWSCM for general use can measure the velocity range of 0.03~20.0 m/s from flood flows to normal flows, whereas MWSCM for floods can measure the velocity range of 0.5~10.0 m/s. The improvement of antenna isolation between transmitter and receiver to block the inflow of transmitted signals to receiver and the improvement of phase noise of oscillator are necessary for detecting low velocity with MWSCM technology. Separate type antenna of transmitting and receiving signals is developed for isolation enhancement and phase locked loop synthesizer as an oscillator is applied to high-performance MWSCM for general use. Microwave frequency of 24 GHz is applied to the new MWSCM rather than 10 GHz to make the new MWSCM small and light for convenient use of it at fields. Improvement requests on MWSCM for floods—stable velocity measurement, self test, low power consumption, and waterproof and dampproof—from the users of it has been reflected on the development of the new version of MWSCM.

**Keywords** : MWSCM for floods, high-performance MWSCM for general use, microwave frequency, isolation, phase noise

#### 요 지

홍수기 유량측정의 어려움을 극복하고자 물과 비접촉식으로 유속을 측정하여 유량을 산정하는 전자파표면유속계를 개발하여 실무에 적용하고 있다. 기존에 사용 중인 전자파표면유속계는 홍수용으로 연중 활용도가 낮아 이의 활용도를 높이고자 전자파표면유속계의 성능개선을 통하여 유속측정범위를 확장하여 평·갈수기에도 하천 유량측정이 적용할 수 있게 하였다. 즉 기존 홍수용 전자파표면유속계의 유속측정범위가 0.5~10.0 m/s이었던 반면, 급변 개발된 고성능 범용 전자파표면유속계는 0.03~20.0 m/s로 홍수기뿐만 아니라 평수기에 유속측정이 가능하도록 성능을 개선하였다. 전자파표면유속계를 이용한 저유속의 측정을 위해서 필요한 요소를 조사한 결과, 송신신호의 수신단 유입을 차단하여 저유속의 미세한 수신신호에 대한 검출능력을 향상할 수 있도록 송수신 격리도의 개선, 이와 함께 공진기의 위상잡음 특성개선이 저유속의 검출에 필수사항임을 파악하였다. 따라서 이를 감안하여 안테나의 송신부와 수신부가 분리된 안테나를 개발함으로써 송수신 격리도를 개선하였고, 기존 공진기의 위상잡음 특성을 개선하기 위하여 위상고정주파수합성기를 공진기로 적용함으로써 저유속 검출 성능을 개선하였다. 또한 고성능 범용 전자파표면유속계의 사용편의성 증진을 위하여 안테나의 소형, 경량화 제작을 가능토록 하고자 사용주파수(10 GHz→24 GHz)를 변경하였다. 이와 더불어 기존 전자파표면유속계 사용자들의 개선요구사항—측정유속 안정화, 자체점검기능, 저전력, 방수 방습—을 반영함으로써 현장에서 유량측정하기에 간편한 기기로 개발하였다.

**핵심어** : 홍수용 전자파표면유속계, 고성능 범용 전자파표면유속계, 사용주파수, 송수신 격리도, 위상잡음

\* 한국수자원공사 K-water연구원, 책임연구원, 공학박사 (e-mail: yskim@kwater.or.kr)

Principal Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea

\*\* 교신저자, 한국수자원공사 K-water연구원, 책임연구원, 농학박사 (e-mail: namilwon@kwater.or.kr, Tel: 82-42-870-7453)

Corresponding Author, Principal Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea

\*\*\* 한국수자원공사 K-water연구원, 책임연구원, 공학박사 (e-mail: jnoh@kwater.or.kr)

Principal Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea

\*\*\*\* 한국수자원공사 아라뱃길관리처, 관리처장, 공학석사 (e-mail: humanp@kwater.or.kr)

Director General, Gyeong-in Ara Waterway Business Division, Korea Water Resources Corporation, Incheon, Korea

## 1. 서 론

하천유량은 수자원시설물의 설계 및 유지관리에 있어서 가장 기본적인 자료이다. 우리나라의 하천유량측정 업무는 1960년대 말의 다목적 댐 건설 및 유역 조사 사업, 치수 사업 등과 더불어 수행되어 왔는데, 홍수 유량 측정은 그 측정여건의 어려움으로 여전히 쉽지 않은 실정이다. 유량측정실무자들은 현재 사용하고 있는 프로펠러 유속계-권양기 체계로서 하천의 홍수 유량을 측정하는데 큰 어려움을 느끼고 있다. 유속계-권양기 체계는 차량에 탑재하므로 이동성은 좋으나 홍수 유속측정 시 빠른 유속에서 야기된 항력이 너무 커서 장비뿐만 아니라 유량측정 실무자까지도 매우 위험하게 되는 단점이 있다. 따라서 홍수기에는 전통적인 방법인 부자측정법을 많이 이용하고 있다. 부자측정법의 적용 시에 측정인원이 많이 소요되는 점, 수십벌로 다른 크기의 부자를 준비해야 하는 점 및 대하천에서 주간 및 야간 측정 시 식별이 어려운 점 등 여러 가지 애로사항이 상존한다. 이러한 여건에도 불구하고 국내에서는 별다른 대안이 없이 대체로 홍수 유량 측정 업무에 부자를 사용하고 있다.

1980년대부터 국제적으로 이러한 홍수유량측정의 어려움을 극복하고자 하는 시도가 시작되었다. 일본에서는 1986년 이후로 토목연구소를 중심으로 전파유속계를 개발하여 하천유량측정업무에 적용하였으며 이를 확장하여 교량에 고정식으로 설치하여 실시간 홍수유량측정에 적용하고 있다(Yamaguchi, 1992). 일본의 전파유속계는 처음 개발 당시에는 10 GHz의 주파수를 이용한 파라볼릭안테나를 이용하여 센서로 이용하였으나, 2008년도에 휴대용 전파유속계의 경우 24 GHz의 주파수를 적용한 혼안테나를 적용하여 소형경량화한 Ryukan을 개발하여 100대 이상을 현업에 보급하여 이용 중에 있다(Miyamura et al., 2012). 미국에서는 U.S. Geological Survey (USGS)에서 Hydro 21 Committee가 1996년 발족되어 유량측정 신기술에 대한 검토 및 개발을 하여, 여러 가지 유형의 안테나 -6.36 GHz의 마이크로웨이브 도플러 레이더, 24 GHz의 연속파 마이크로웨이브시스템, 350 MHz의 UHF 레이더 시스템을 이용하여 표면유속을 측정하였다(Costa et al., 2000; Costa et al., 2006). 이중 350 MHz의 주파수를 이용한 레이더는 미국 Codar사에서 RiverSonde라는 표면유속계로 실용화한 300×300 m의 물표면의 유속을 측정하는 동시다점측정유속계이다. 이미지를 이용한 유속측정 방법인 LSPIV (large scale particle image velocimetry)가 개발되어 물과 비접촉식으로 유량을 측정하고는 있으

나 여러 가지 제약조건이 있어 전면적인 적용이 용이하지 못한 실정이다(Fujita and Komura, 1994; Haute et al., 2005; Muste et al., 2000; Kim et al., 2011).

국내에서는 홍수기 안전하고 정확한 유량측정을 통하여 물관리에 필요한 기초수문자료를 확보하고자 한국수자원공사에서 1993년도부터 대하천 유량 자동 측정설비 개발이라는 주제로 하천유량측정 신기술 개발을 위한 연구를 시작하였다(Lee et al., 1995; Lee et al., 1997). 이 연구의 주요성과물이 전자파를 이용하여 홍수시 유속을 물과 비접촉식으로 측정하여 유량으로 환산하는 전자파표면유속계의 개발이다. 전자파표면유속계는 기존 회전식 유속계의 적용상의 안전성 및 부자측정시의 문제점에 대한 대안이 되는 유속측정시스템이다. 그간의 연구 성과를 바탕으로 1999년도에 전자파표면유속계를 특허등록(제 0204980호)하였고 그와 동시에 이의 상품화를 추진하여 현재까지 78대를 보급하여 실무에서 이용하고 있다(kwater, 2010).

기존에 사용 중인 전자파표면유속계는 홍수용으로 장마나 태풍 시 많은 양의 강우발생으로 인한 하천의 유속이 고속( $V > 0.5 \text{ m/s}$ ) 일 때에 적용가능하다. 따라서 국내의 하천에 유량이 풍부할 때에만 사용 가능하다보니 연중 적용시기가 극히 제한적이다. 이에 이의 활용성을 높이고자 전자파표면유속계의 성능개선을 통하여 유속측정 범위를 확장하여 평·갈수기에도 하천 유량측정이 적용할 수 있게 함으로써 이의 효용성을 높이고, 기존 전자파표면유속계 사용자들의 개선요구사항을 파악하여 반영함으로써 현장에서 유량측정하기에 간편한 기기로 개발하고자 하였다.

## 2. 전자파표면유속계의 유속측정 원리

운동하는 물체에 의하여 산란된 전자파의 주파수가 변하게 되는 현상을 도플러효과라고 한다. 이때의 주파수 변화량을 도플러 주파수라고 하며, 수학적으로 다음 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서,  $f_d$ 는 도플러 주파수이고,  $v$ 는 물체의 속도,  $\lambda$ 는 전자파의 파장, 그리고  $\theta$ 는 물체의 속도 방향과 전자파의 진행방향이 이루는 각으로  $20^\circ \sim 50^\circ$  사이의 각을 이용한다.

전자파표면유속계는 유속으로 인해 나타나는 초고주파 센서의 출력 즉, 도플러 신호의 주파수( $f_d$ )를 판별하고 이

를 아래의 Eq. (2)를 이용하여 표면유속( $v$ )을 계산하게 된다(Fig. 1).

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

전자파표면유속계에서 도플러 주파수를 얻기 위한 일련의 과정은 다음과 같다. 홍수유속 측정을 위한 전자파표면유속계(Fig. 2)는 하나의 파라볼릭 안테나를 통해서 송수신을 한다. 아래 Fig. 3에서 보는 바와 같이 10 GHz를 발사하는 송신단과 물표면에 반사되어 돌아오는 신호를

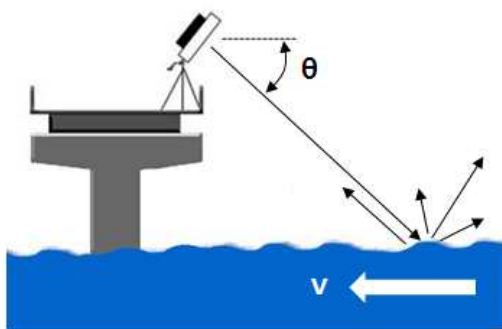


Fig. 1. Schematic Diagram of Velocity Measurement with MWSCM



Fig. 2. MWSCM for Floods

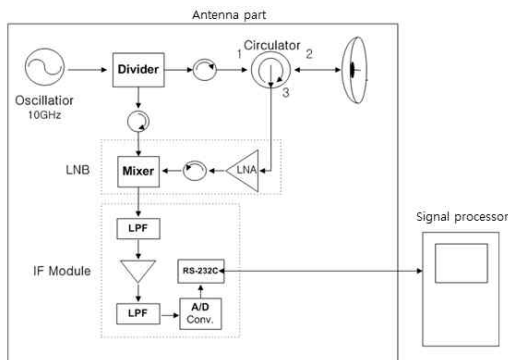


Fig. 3. Composition of MWSCM

수신하는 수신단이 써큘레이터(Circulator)라는 부품을 통해서 분리가 되는 구조이다. 송신 주파수는 써큘레이터 포트1로 입력되어 포트2를 통해서 안테나로 출력되며 수신되는 도플러 주파수는 포트2로 입력되어 포트3으로 출력되는 구조를 갖고 있다. 수신된 도플러 주파수는 저잡음증폭기(LNA)를 통해서 10 dB 증폭된 후 혼합기(Mixer)를 거쳐서 유속에 대응하는 최종 도플러 주파수를 추출한다(K-water, 1994).

### 3. 전자파표면유속계의 보급현황 및 사용자의 개선요구사항 분석

전자파표면유속계는 1993년 이에 대한 개발 연구를 시작한 이후 6년만인 1999년도에 이에 대한 특허등록이 되었으며, 이를 토대로 상품화 보급을 개시하였고, 2010년도까지 한국수자원공사 33대, 대학교 36대, 관공서 및 연구소 등 9대를 보급하여 총 78대를 보급하였다.

전자파표면유속계는 상품화 개시 이후 지속적으로 사용자의 편의성을 향상시키기 위하여 개선이 진행되어졌다. 1999년 이후로 78대가 보급된 시점에서 사용자의 개선요청사항에 대한 조사를 실시하여 전자파표면유속계의 성능개선 시 반영하고자 하였다. 전자파표면유속계의 개선요구사항에 대한 조사는 전자파표면유속계를 소유하고 있고 사용하고 있는 사용자들을 대상으로 조사를 실시하였다. 전체 31명을 대상으로 설문조사를 실시하였고, 이 중 한국수자원공사 내부사용자가 12명, 외부사용자가 19명으로 구성되었으며 이중 29명이 설문에 응답하였다(Fig. 4).

첫째, 사용자들이 생각하는 전자파표면유속계의 보급 적정가격을 조사하였다. 조사결과에 나타나는 바와 같이 사용자들이 희망하는 적정보급가격은 천만원이 46%, 천 오백만원이 25%로 사용자들은 전자파표면유속계의 가격이 다소 비싼 것으로 느끼고 있었다.

둘째, 전자파표면유속계의 측정값의 정확성측면에서 현장에서 유속측정 시 비정상적인 유속이 측정되는 현상의 경험유무에 대한 설문에서는 69%의 사용자가 이와 같은 현상을 경험한 것으로 나타나고 있다. 이는 전자파표면유속계에 자가진단기능이 없음으로 인하여 기기의 오작동 여부를 미리 진단하지 못하기 때문에 발생하는 현상이다.

셋째, 기기의 정상적인 유지관리를 위하여 측정전에 사전점검을 실시하는지 여부에 대해서는 90% 이상이 사전점검을 실시하고 있는 것으로 파악되었다.

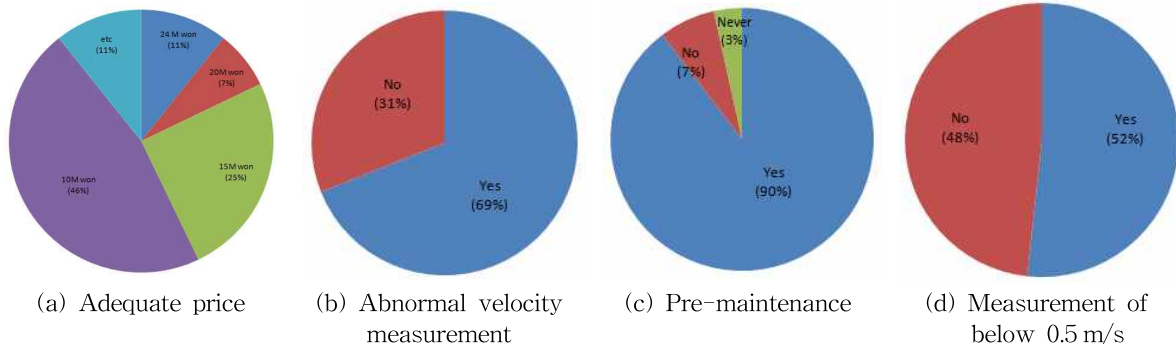


Fig. 4. Survey for users of MWSCM

넷째, 전자파표면유속계의 측정범위가 0.5~10m/s로 제시되어 있는데, 유속 0.5m/s 이하의 평수기에 유속측정을 시도하는 경우가 48%에 이르고 있다. 즉 전자파표면유속계를 이용한 유량측정이 기존의 방법보다 간편하므로 사용자들이 평·갈수기에도 이를 적용하고자 시도하는 것으로 나타나고 있다. 이외에도 기타 의견으로는 기기의 경량화, 유속측정가능시간의 확대, 방수 및 방습 확보, 안테나의 Side-lobe에 의한 후측방에서 발생하는 신호 차단 등이 유속측정 시에 보완해야 할 사항으로 제시되었다.

## 4. 전자파표면유속계의 성능개선 제작

### 4.1 전자파표면유속계의 성능개선 고려사항

전자파표면유속계에 대한 사용자 설문조사를 통하여 현장실무자들이 필요로 하는 기능에 대한 파악을 하였다. 우선 안정적인 유속측정을 위하여 자체점검 기능을 탑재하여 기기의 이상유무에 대해 사용자들이 판단할 수 있도록 하였다. 현재의 최신기술을 적용하여 기기의 성능을 높이면서 제품가격은 기존대비 25% 내외 인하할 수 있도록 설계하고자 하였다. 0.5 m/s 이하의 유속에도 측정이 가능하도록 기기를 개선함으로써 평·갈수기에도 유량측정실무자들이 간편하게 하천유량을 측정할 수 있도록 개선하는데 주안점을 두었다. 이와 더불어 설문조사에서 제시된 여러 가지 사항에 대하여 금번 성능개선에 고려하여 설계 및 제작하고자 하였다.

### 4.2 전자파표면유속계를 이용한 저유속 측정 가능성에 대한 실험

현장실험조건은 불규칙적인 유속으로 인해 계측기를 이용한 정밀측정 시험에서도 측정데이터를 분석하는데 어려움이 따른다. 일정한 저유속의 흐름조건이 갖추어진다면 유속측정시험 데이터의 분석이 용이하며 기준자료

로 활용 가능하기에 개수로실험장치를 이용한 실험을 추진하였다. 실험에 이용한 개수로는 수로의 폭이 50 cm이었고, 개수로실험장치를 이용하여 유속측정실험을 통하여 저유속에서 측정된 도플러 파형이 Spectrum Analyzer에 정확하게 관측될 것으로 예상하였으며 저유속 상태에 대응하는 기준 파형 획득을 기대하였다(K-water, 2008).

#### 4.2.1 시험방법

두 대의 홍수용 전자파표면유속계를 물표면의 같은 지점을 향하도록 설치한 후 한쪽 안테나는 송신안테나로 설정하여 Signal Generator 8257D를 연결한다. 다른 한쪽 안테나는 수신안테나로 설정하여 Spectrum Analyzer를 연결한다. 안테나 이격에 따른 Isolation 값을 측정하고 물 유속에 다른 도플러 파형을 관측한다. 1차 시험은 물 흐름 방향의 하류측에서 측정을 진행하였고 2차 시험은 상류측에서 측정을 하였다(Fig. 5). 하류측에서 측정한 이유는 개수로 실험장치의 저유속 조건이 수로 끝부분에서 안정된 조건으로 형성되었기 때문이다. 물의 유속은 저유속 상태 즉 0.1 m/sec 이하의 유속부터 시작하여 점차적으로 고유속 조건으로 진행하였다.

#### 4.2.2 실험결과

실험결과 저유속 상태에서는 반사된 신호의 레벨이 낮아서 물표면으로부터의 반사값을 이용한 신호검출이 어려워, 물표면에 나뭇잎과 알루미늄 호일 등을 주입한 결과 저유속에서 최저 3Hz까지 유속을 검출하였다. 시험결과에서 파악한 바와 같이 최고 성능의 계측장비를 활용한 도플러 주파수 검출한계는 3Hz (0.05 m/s)까지 가능함을 확인하게 되었다(Table 1). 0.1 m/sec 이하의 유속에서 반사된 신호의 레벨이 주위의 잡음 레벨과 비슷한 수준에서 검출되기 때문에 검출이 단속적으로 발생하는 현상이 나타나는 것이다. 이러한 현상은 고도의 신호처리기법을



(a) Downstream measurement



(b) Upstream measurement

Fig. 5. Low Velocity Measurements using Open Channel

Table 1. Measured Doppler Frequency using Open Channel

Velocity condition	Measured spectrum	Experiment condition
below 0.1 m/sec	6 Hz	water surface / downstream
below 0.1 m/sec	3 Hz	leaf / downstream
below 0.1 m/sec	3 Hz	aluminum foil / downstream
below 0.1 m/sec	8 Hz	aluminum foil / downstream
below 0.1 m/sec	10 Hz	aluminum foil / downstream
over 0.9 m/sec	60 Hz	water surface / upstream
over 1.0 m/sec	70 Hz	water surface / upstream

적용하여 안정된 유속으로 검출할 수 있을 것으로 판단하였다.

### 4.3 시스템의 설계

저유속 측정을 위한 전자파표면유속계의 성능개선 필수요소 파악을 위한 실내실험결과로부터 첫째, 송수신 격리도의 확보, 둘째 공진기의 위상잡음의 개선이 필수적임을 파악하였다. 송수신 격리도 확보는 송신신호가 수신단으로 누설되어 물표면에서 반사되어 돌아온 도플러신호에 영향을 미치는 현상을 최소화하는 것이다. 누설된 신호가 수신된 신호보다 크다면 수신된 신호로부터 유속을 계산할 수가 없기 때문이다. 따라서 송수신 격리도는 저유속 측정에서 물표면에 반사된 신호를 수신하는 성능을 향상시켜 미소한 신호를 검출하는 성능을 결정짓는 요소이며 측정 거리를 확장시키는 요소이기도 하다. 기존의 전자파표면유속계가 채택하고 있는 파라볼릭안테나는 단일 안테나를 이용하여 송신과 수신을 하고 있기 때문에 송수신 격리도의 확보에 한계가 있다. 송수신 격리도의 확보를 위하여 급변 전자파표면유속계의 개선에서는 송수신분리안테나(도파관슬롯배열안테나, waveguide slot array antenna)를 채택하였다. 안테나는 외형적으로는 단일안테나와 같은 형상을 보이지만, 내부에서는 안테나의 반쪽

은 송신을, 다른 반쪽은 수신을 담당하기 때문에 기존 안테나에서 보였던 송신신호의 수신단으로 누설되는 현상을 차단할 수 있다. 공진기(Oscillator)의 위상잡음은 유속에 비례한 도플러 신호의 주파수의 검출 한계를 결정짓는 요소이다. 위상잡음 수치의 절대값이 증가할수록 공진기가 좋은 특성을 갖는 것이며 그에 비례하여 저유속 검출 성능은 증가한다. 기존의 공진기인 유전체 공진기는 다른 공진 방식보다 비교적 간단한 구조인 반면 저유속을 측정하기에는 위상잡음 특성이 떨어지므로 고유속뿐만 아니라 저유속에 대해서 안정적으로 반응하는 위상고정주파수합성기(Phase Locked Loop Synthesizer)를 공진기로 적용하였다(Table 2). 최종단의 주파수 흔들림을 고정하기 위하여 PLL IC를 적용하였으며 고정하는 방식은 출력 주파수에 대한 Feedback Loop를 형성하여 Feedback을 받은 후 연속적인 위상 비교를 통하여 출력 주파수의 흔들림을 방지할 수 있도록 하였다. 기존의 공진기를 이용하였을 때 발생하는 주파수의 흔들림 현상으로 저유속을 측정하는데 있어서 큰 오차를 유발하게 된다. 이러한 제반 기술적 요소의 성능개선을 통하여 0.03~0.5 m/s 범위의 저유속이 측정가능하게 되었다.

전자파표면유속계로 0.5m/s 이하의 유속이 측정가능하도록 하면서 동시에 기기의 소형경량화를 이루기 위하

**Table 2. Specifications of Various MWSCMs**

	MWSCM for floods	MWSCM for general use (trial version)	MWSCM for general use
Antenna type	Diameter 30 cm parabolic	35 × 35 cm patch array	22 × 22 cm waveguide slot array
Power (dBm)	10	15	19
Gain (dBi)	27	24	28
Isolation (dB)	-13	-32	-60
Phase noise of Oscillator (dBc@10 kHz)	free run type -80	PLL type -85	PLL type -90
Beam width (°) horizontal/vertical	7 / 7	4 / 7	9 / 5
Reflecting area of microwave for 50 m distance, m <sup>2</sup>	29.4 (D=6.1 m)	21.4 (3.5 × 6.1 m)	34.4 (7.9 × 4.4 m)
Antenna weight (kg)	4.6	20	3

여서 안테나의 사용주파수대역을 변경하여 안테나에 대한 재설계를 실시하였다. 이에 앞서서 저유속 측정이 가능한 전자파표면유속계 시제품의 사용주파수를 기존 홍수용 전자파표면유속계와 같은 10 GHz를 채택하여 시험한바 있다(K-water, 2008). 저유속 측정 가능한 전자파표면유속계 시제품은 최저유속 0.05m/s의 측정은 성공하였으나 크기가 크고 무게가 무거워서(크기 35×35 cm, 무게: 20 kg) 현장에서 실무자들이 유량측정에 간편하게 사용하기에는 어려움이 있을 것으로 판단하였다. 기존의 홍수용 전자파표면유속계 및 저유속 측정가능한 전자파표면유속계 시제품은 10.0 GHz의 주파수를 사용하는 반면, 금번 성능개선에 있어서는 ISM-band 중에서 24.00~24.25 GHz의 주파수 대역을 사용하였다. ISM-band는 Industrial, Scientific and Medical의 영문 첫자를 딴 주파수 대역으로, 산업용, 과학용, 의료용 목적을 가지고 사용하는 장비에서 전 세계적으로 비교적 자유롭게 사용할 수 있는 주파수 대역이다. 이 24GHz 대역을 사용하는 경우 기존의 10GHz 대역과 상대적으로 비교하여 동일한 방사 패턴, 이득 등의 안테나 특성을 만족시키기 위해 안테나의 크기를 줄일 수 있으며 측정정밀도를 높일 수 있는 장점이 있는 반면 전파 대기 손실이 크고 부품과 시스템의 제작에 있어서 기술적 난이도와 제작비용이 상대적으로 높은 단점이 있다. 금번 성능개선에서는 유속측정범위 확대, 유속측정 정확도 향상 및 사용자가 휴대하기에 용이한 크기에 비중을 두고 24 GHz 대역을 사용하는 것으로 선정하였으며 기

술적 난이도와 제작비용의 상승부분은 양산을 고려한 설계를 통해 극복하였다. 24 GHz의 주파수를 채택하여 안테나를 재설계함으로써 그 크기를 22×22 cm로 줄일 수 있었다.

RF송수신부는 24 GHz 대역의 신호 송수신을 통해 도플러신호를 출력하는 도플러유속계의 핵심으로 이 부분의 설계, 제작 성능에 따라 도플러 유속계의 성능이 대부분 결정되며 이 또한 소형화 제작이 요구되며 송수신센서 내부의 배터리를 통해 전원을 공급받기 때문에 충분한 사용시간을 보장하기 위해 저전력 소모 측면을 충분히 고려한 설계가 이루어져야 한다. 내부회로 구성방안은 통상의 호모다인(Homodyne) 도플러 레이더와 동일한 구성을 가지며 24GHz의 신호를 만들어 내기 위한 위상고정주파수 합성기(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 구성된다(Fig. 6). 저유속 측정을 위하여 개발된 고성능 범용 전자파표면유속계 상품화 제품의 성능은 Table 2와 같다. 안테나의 전방성 성능을 나타내는 출력(10 dBm → 19 dBm)과 이득(27 dBi → 28 dBi)이 개선되었으며, 저유속측정이 가능토록 송수신 격리도를 송수신 분리형안테나를 적용함으로

써 향상시켰으며(-13 dB → -60 dB), 낮은 주파수의 검출 성능향상을 위하여 공진기의 위상접합 특성을 개선(-80 dBc@10 kHz → -90 dBc@10 kHz)하였다. 안테나를 수직으로 나누어 송수신분리형으로 제작한 결과, 수평빔폭이 기존의 7도에서 9도로 약간 증가하였다. 따라서 대하천의 경우 측정거리를 50m로 가정했을 경우 가로 7.9m, 세로 4.4m로 빔이 퍼지는 특성이 있다. 측정거리 5m 정도의 소하천의 경우, 가로 0.8m, 세로 0.4m의 폭으로 전자파가 퍼져나가는 특성이 있으므로 소하천에서 적용시 이러한 점을 사전에 인지하고 이를 적용해야한다. 측정값의 안정화를 개선하기 위하여 안테나의 특성을 개선하여 부엽(side-lobe) 레벨 -30 dB 이하 그리고 진후방비(front-back ratio) 50 dB 이상으로 개선하여 안테나가 지향하는 방향 이외의 위치에서 반사되어 나타나는 신호를 줄여 측정값의 안정화를 이루었다.

일본의 전파유속계인 Ryukan은 기존 전파유속계를 소형 경량화 제작에 주안점을 두어 안테나의 크기를 줄일 수 있도록 기존의 10 GHz의 주파수를 24 GHz의 주파수로 변경하였고, 혼(horn) 안테나를 채택하였을 뿐 저유속 측정을 위한 측면에는 관심을 두지 않았던 것으로 파악된다.

#### 4.4 성능개선된 고성능 범용 전자파표면유속계의 제작

고성능 범용 전자파표면유속계의 본체는 단일모듈로 제작되었다. 본체의 하우징에는 RF송수신부 모듈, 도파관슬롯안테나, GPS안테나 및 Bluetooth안테나, 배터리 등이 내장되어 있다. 방수를 위하여 본체의 전체 방수와 구성품 단위의 방수 등 2중으로 방수처리 하였다(Fig. 7).

본체의 앞면은 도파관슬롯배열안테나가 내장되어 있으며 그 앞에 안테나 레이돔이 보호막 역할을 하고 있다. 안테나 레이돔과 본체의 하우징은 오링이 내장된 알루미늄 재질의 레이돔 고정틀로 장착하여 완전방수가 되도록 설계하였다. 도파관슬롯배열안테나의 구조는 그림 8과 같다. 배열도파관 수는 16개이며, 각 도파관마다 Broadwall의 중심을 기준으로 양쪽에 22개의 슬롯을 대칭으로 두었다. 안테나를 세로로 구분하여 각각 송신안테나와 수신안테나로 구성하였다(Fig. 8).

본체의 뒷면에는 완전방수용 LED와 벤트홀(vent-hole)이 구비되어 있다. LED는 본체의 전원 ON/OFF를 알려주며 벤트홀은 물입자의 통과를 차단하고 공기입자만을 통과시키는 역할을 하는 방수용 필터로서 본체의 방수구

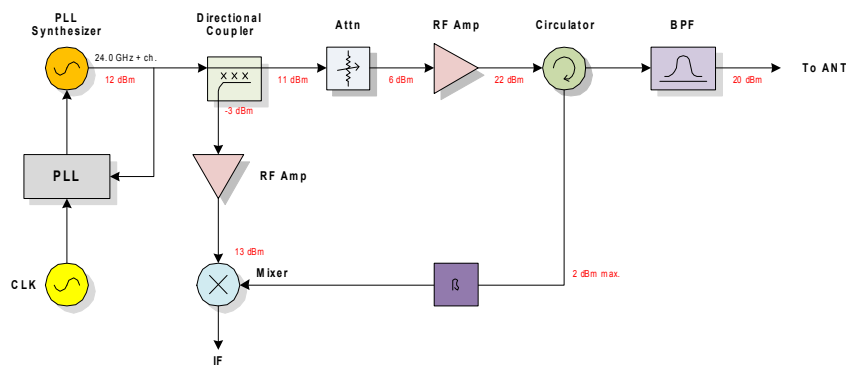


Fig. 6. Block Diagram for RF Receiving and Transmitting Part

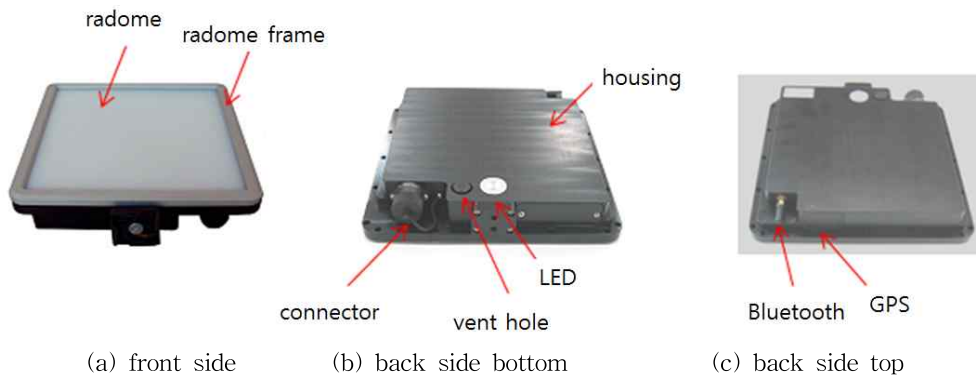


Fig. 7. Exterior View of MWSCM for Normal Flow

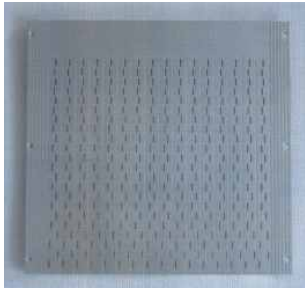


Fig. 8. Waveguide Slot Array Antenna (16 array wave guide \* 22 slot per wave guide)

격인 IP67을 만족 방수/방진규격을 만족하도록 벤트홀(vent-hole) 설계하였다.

#### 4.5 개발된 시스템의 유속측정 성능검증

4.2절의 실내 개수로실험에서는 저유속 측정에 필요한 전자파표면유속계 최적사양의 결정을 위하여 우선 물표면에서의 반사되는 신호의 세기를 강하게 만들어 저유속 측정의 가능성여부를 파악하기 위함이었다. 이를 위해서 물표면에 인위적으로 물표면에 나뭇잎과 알루미늄 호일 등을 주입하였다. 결정된 사양을 바탕으로 개발된 고성능 범용 전자파표면유속계의 성능검증실험에서는 이전 실험과는 달리 물표면에 반사특성을 유리하게 해 줄 수 있는 부유물을 뿌리지 않고 물표면 자체에 의해 발생하는 수신 신호만을 이용하여 유속측정성능을 검증하였다. 개발한 고성능 범용 전자파표면유속계 상품화 시제품의 성능실험을 한국건설기술연구원 및 국립수산과학원의 유속측정용 견인수조에서 수행하였다. 이 실험은 개발제품의 유속 측정 정확도를 확인하고 보안사항을 파악하는 것이 목적이었다. 특히 0.03~3.0 m/s의 유속에서의 측정에 주안점을 두었다. 실내실험에서는 유속 정밀도가 약 3% 이내로 매우 정확히 측정됨을 확인하였다.

##### 4.5.1 한국건설기술연구원 성능검증실험

한국건설기술연구원의 유속계성능시험시설은 전동카트를 수로 위에 설치하고 그 전동카트의 속도를 제어하여 정속도로 수로를 따라 이동하도록 고안되어 있다. 이 전동카트 위에 개발한 고성능 범용 전자파표면유속계 상품화 시제품을 실제 현장의 교각 위에 설치하는 것과 동일한 방법으로 수면을 향해 안테나를 틸트하여 설치하고 전동카트를 일정한 속도로 이동하면서 측정된 유속데이터를 확인하여 전동카트의 이동속도와 측정된 유속데이터가 일치하는지를 확인하였다. 본 개발제품의 유속측정범위는 0.03~20 m/s이지만 건설기술연구원의 전동카트의

속도가 0.05~3.0 m/s로 제한되어 있어, 0.05 m/s 이하의 저속 및 3.0 m/s 이상의 고속실험은 불가하였다.

한국건설기술연구원 성능검증실험으로부터 0.05~3.0 m/s의 속도에서 평균적으로 2.48%의 오차를 갖는 결과를 얻었다(Fig. 9). 다만 0.05 m/s의 최저속도에서 가끔씩 순간적으로 높은 속도가 감지되는 현상이 있었으나 시험상 별다른 이상동작은 나타나지 않았다.

##### 4.5.2 한국건설기술연구원의 유속측정 성능검증 실험결과를 이용한 시스템 보완

한국건설기술연구원의 고성능 범용 전자파표면유속계 성능검증실험을 통하여 장비의 작동신뢰성과 측정정밀도는 만족한 결과를 얻었다. 그러나 0.05 m/s의 최저속도에서 가끔씩 순간적으로 나타는 높은 속도로 계산하는 현상에 대해서는 원인을 분석하여 보완하였다. 이 순간적인 오차의 원인은 송수신부의 시스템잡음이나 외부잡음 또는 개수로 주변의 Multi-path 반사파 등으로부터 순간적으로 나타나는 고주파 성분들을 신호처리부에서 완벽하게 필터링하지 못했기 때문으로 판단되었다. 즉 0.05 m/s의 최저속도는 1 m의 거리를 이동하는데 20초가 걸리는 매우 느린 속도로서 송신주파수가 24 GHz인 본 고성능 범용 전자파표면유속계 상품화 시제품에서는 안테나 틸트각 45도에서 약 5.66 Hz 밖에 되지 않는 초저주파수의 도플러 신호를 검출하는 상황이다. 신호처리부에서는 2 kHz 샘플링 주기로 2048개의 데이터를 획득하여 FFT를 하였으므로 5.66 Hz의 도플러주파수는 약 1.024초 동안 5.8 사이클의 주기를 갖는 시스템 잡음이 혼합된 사인파 성분을 검출하고 있다. 따라서 한 주기 샘플링시간인 1.024초 동안에 시스템잡음 또는 외부잡음이 순간적으로 나타날 수 있다. 이러한 순간적으로 변하는 도플러신호를 필터링할 목적으로 FFT를 한 다음 칼만필터를 적용한 신호처리알고리즘을 사용하고 있으며, 칼만필터의 가중치

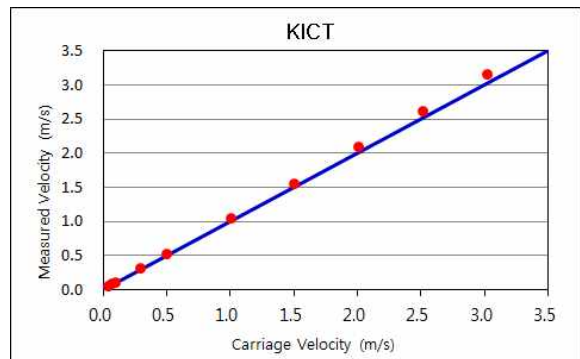


Fig. 9. Velocity Verification Result in KICT



를 변경하여 측정할 수 있는 최대유속변화량을 설정할 수 있다. 실제 하천에서 폭우나 댐방류 등으로 나타날 수 있는 최대유속변화량에 대해서도 속도를 검출해 낼 수 있도록 급변 개발된 고성능 범용 전자파표면유속계 상품화 시 제품은 최대측정유속이 20 m/s가 목표이다. 그러나 본 장비는 목표치보다 훨씬 빠른 유속까지 측정할 수 있도록 설정하여 이번 한국건설기술연구원 실험을 수행하였다. 그 결과 순간적으로 급격하게 차이가 나는 속도정보를 필터링하지 못하였던 것이다. 따라서 한국건설기술연구원 실험을 통하여 칼만필터의 가중치를 수정하여 신호처리 소프트웨어 보완에 반영하였다.

유속측정 성능검증 결과, 측정평균오차가 실제속도보다 +2.48% 높게 측정되는 현상을 발견하였다. 그 원인은 안테나 복사패턴의 -3dB 빔폭이 약 5°이기 때문에 수면의 Footprint 내의 확산된 반사파로부터 도플러성분을 검출하면 평균적으로 약간은 높은 주파수스펙트럼이 검출되는 이유로 판단되었다. 즉 본 실험에서 안테나 틸트각(수직각)은 45°로 하였으며 -3dB 안테나 빔폭의 Footprint는  $45 \pm 2.5^\circ$ 로 확산되어 반사각은 약 1.5° 낮은 43.5°인 것처럼 미세한 차이가 난다. 이러한 오차는 무시할 수도 있는 값이지만 신호처리부의 속도환산 프로그램에서 틸트센서의 지시각도를 보정해 주도록 보완하였다.

#### 4.5.3 국립수산과학원 성능검증실험

국립수산과학원의 선박시험용 수조에서는 0.05 m/s 이하의 유속에 대한 검증 및 0.05~3.0 m/s의 유속에 대한 비교 검증을 위하여 유속측정 성능실험을 실시하였다. 국립수산과학원의 선박시험용 수조는 한국건설기술연구원과 유사한 유속측정 시뮬레이터이며 수로의 폭이 10m이며, 활차의 속도의 정밀제어가 가능하다. 0.03~3.0 m/s의 속도범위에서 한국건설기술연구원에서와 동일한 실험을 실시하였다.

국립수산과학원 실험에서는 0.03~3.0 m/s의 속도에서 평균 2.43%의 오차를 갖는 결과를 얻었다(Figs. 10 and 11). 한국건설기술연구원의 실험결과에 비해 측정치가 기준속도를 중심으로 +/-로 분포된 점은 한국건설기술연구원의 실험을 통해 보완한 약 1.5°의 입사각 보상효과이다. 또한 0.05 m/s 이하의 저속에서의 측정 시 가끔씩 나타나는 순간적인 측정오류현상도 나타나지 않았다. 이는 칼만필터의 가중치가 잘 적용되었음을 의미한다. 또한 각 기준유속에서 연속측정한 결과, 저속 및 고속에서 안정적으로 속도를 측정되었다(Figs. 12 and 13). 고속에서는 활차의 속도가 정해진 속도를 유지하는 시간이 짧아 1.0 m/s

이하의 경우보다 속도측정 갯수가 작다. 전반적으로 활차 속도를 정확히 측정함을 알 수 있다.

#### 4.5.4 정밀계측기를 이용한 성능검증실험

개발된 고성능 범용 전자파표면유속계의 유속측정범위 상한값이 10 m/s에서 20 m/s로 상향되었다. 이와 같은 고속에 대한 직접 유속측정검증실험을 할 수 있는 시설이 부재하여 정밀계측기를 이용한 간접적인 방법으로



Fig. 10. Experiment in NFRDI

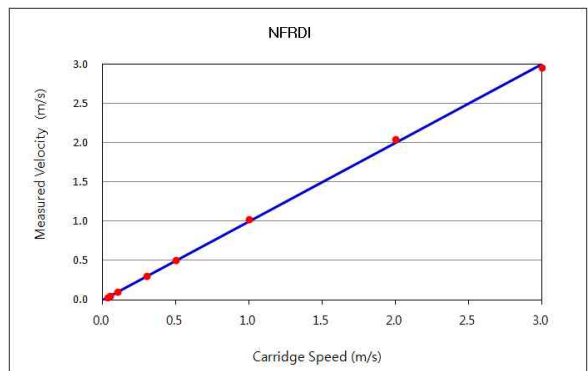


Fig. 11. Velocity Verification Result in NFRDI

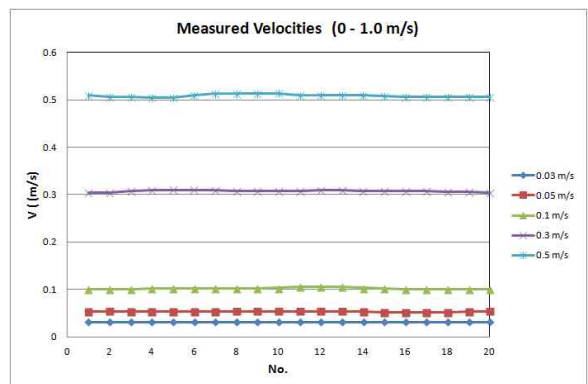


Fig. 12. Measured Low Velocities in NFRDI

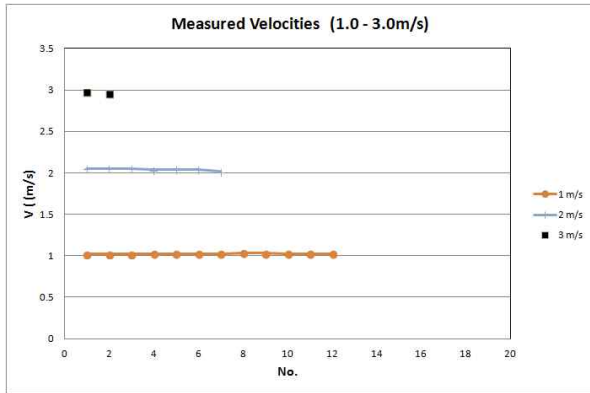


Fig. 13. Measured High Velocities in NFRDI

20 m/s까지의 속도 검증실험을 실시하였다. 즉, 고성능 범용 전자파표면유속계를 이용한 속도측정에 있어 RF Oscillator를 이용하여 24 GHz의 주파수에 임의유속에 해당하는 도플러주파수 만큼을 더한 주파수를 발사하여 이로부터 해당 유속을 검출하는지 검증하였다. Eq. (1)로부터 20 m/s에 해당하는 도플러주파수는 다음과 같다.

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} = \frac{2 \times 20}{0.0125} = 3200 \text{ Hz} \quad (3)$$

여기서, 주파수 24 GHz에 해당하는 파장( $\lambda$ )은 0.0125 m이다. 따라서 3,200 Hz 만큼을 더한 주파수를 RF Oscillator에서 발사하여 이에 해당하는 유속을 검출하는지 검증하였다. 검증실험결과 3~20 m/s 범위의 유속을 정확하게 검출하였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 1999년도에 개발완료하여 실용화보급을 시작한 홍수용 전자파표면유속계의 활용성을 높이고자 측정유속의 범위를 기존의 0.5 m/s 이상을 포함하여 0.5 m/s 이하 저유속 측정이 가능한 고성능 버전인 범용 전자파표면유속계를 개발하였다. 이와 함께 기존 홍수용 전자파표면유속계 사용자들을 대상으로 설문조사를 실시하여 개선요구사항을 파악하여 이를 반영하였다.

전자파표면유속계를 이용한 저유속의 측정을 위해서 필요한 요소를 조사한 결과, 송신신호의 수신단 유입을 차단하여 저유속의 미세한 수신신호에 대한 검출능력을 향상할 수 있도록 송수신 격리도의 개선, 이와 함께 공진기의 위상잡음 특성개선이 저유속의 검출에 필수사항임을 파악하였다. 따라서 이를 감안하여 안테나의 송수신부와 수신부가 분리된 안테나를 개발함으로써 송수신 격리도

를 개선하였고, 기존 공진기의 위상잡음 특성을 개선하기 위하여 위상고정주파수합성기를 공진기로 적용함으로써 저유속 검출성능을 개선하였다. 이로부터 고성능 범용 전자파표면유속계는 기존 홍수용 전자파표면유속계의 0.5 ~ 10.0 m/s의 측정가능 유속범위를 0.03~20.0 m/s로 확장하였다. 이로써 기존 홍수용 전자파표면유속계가 홍수기에 국한되어 활용도가 떨어졌던 반면, 고성능 범용 전자파표면유속계는 최저 0.03 m/s까지 측정할 수 있게 개발되어 활용도가 높아졌다. 다만 0.03 m/s에 대한 검증실험은 정밀제어 되는 견인수조에서 실시된 것으로, 일반하천에서 0.2 m/s 이하의 유속측정 시에는 측정하는 여러가지 환경여건의 영향을 받아 실제 측정하는 물표면유속이 민감하게 변화할 수 있음 감안하여야 한다.

기존 홍수용 전자파표면유속계의 사용자에 대한 설문조사를 실시한 결과 첫째, 보급가격이 사용자들이 생각하는 것보다 높은 것으로 파악되어 고성능 범용 전자파표면유속계의 경우, 보급가격을 낮출 것을 염두에 두고 개발을 착수하였다. 둘째, 유속측정시 비정상적인 유속측정을 경험한 사례가 보고되고 있어 유속측정의 안정성 확보에 성능개선의 주안점을 두었다. 셋째, 사용자들이 현장에서 판단하기 힘든 기기상태에 대한 자체점검기능을 탑재할 수 있도록 고성능 범용 전자파표면유속계의 개발에 고려하였다. 고성능 범용 전자파표면유속계의 상품화를 위하여 기존 홍수용 전자파표면유속계의 사용자들이 제시한 현장적용상의 문제점에 대한 해결에 주력하였다. 기존 홍수용 전자파표면유속계의 사용편의를 개선하기 위하여 소형화 및 경량화를 추진하였고, 이를 위하여 사용주파수를 기존의 10 GHz에서 24 GHz로 변경함으로써 안테나의 크기의 소형화를 실현(직경 30 cm의 포물선안테나 → 22 × 22 cm의 도파관슬롯배열안테나)하였으며, 이와 함께 송수신부의 무게를 기존 4.9 kg로부터 3.3 kg으로 줄였으며 송수신부에 측각부를 내장하여 기기를 단순화하였다. 유속측정값의 안정화를 개선하기 위하여 안테나의 특성을 개선하여 부엽(side-lobe) 레벨 및 전후방비(front-back ratio)를 개선하여 안테나가 지향하는 방향 이외의 위치에서 반사되어 나타나는 신호를 줄여 측정값의 안정화를 이루었다. 또한, 자체점검 기능을 탑재하여 유속측정 전에 기기의 상태에 대한 Self test 기능을 통하여 측정자가 기기의 상태를 사전에 파악 가능하도록 함으로써, 기기 작동에 대한 능동 대처할 수 있도록 하였다. 이외에도 저전력 회로설계를 통하여 배터리 사용시간을 확장하였고, 기존 홍수용 전자파표면유속계가 가지고 있던 방습 및 방수에도 내성을 갖는 제품으로 설계 제작하여 유속측정이

안정적으로 이루어질 수 있도록 하였다.

## References

- Costa, J.E., Spicer, K.R., Cheng, R.T., Haeni, F.P., Melcher, N.B., and Thurman, E.M. (2000). "Measuring stream discharge by non-contact methods: A proof-of-concept experiment." *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 27, pp. 553-556.
- 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*, 42, W07422, doi:10.1029/2005WR004430.
- Fujita, I., and Komura, S. (1994). "Application of video image analysis for measurements of river-surface flows." *Proc. of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol. 38, pp. 733-738.
- Hauet, A, Kruger, A., Krajewski, W.F., Bradley, A., Muste, M., and Wilson, M. (2005). *Real-time estimation of discharge of the Iowa river using image-based method-user's manual*. IIHR-Hydrosience and Engineering, The University of Iowa, Iowa City, IA.
- Kim, S., Yu, K., and Yoon, B. (2011) "Real-time Discharge Measurement of the River Using Fixed-type Surface Image Velocimetry." *J. of Korea Water Reso. Asso.* Vol. 44, pp. 377-388.
- K-water (1994). Development of Measurement Facilities for Stream Discharge (Development of a Microwave Surface Velocity Meter and Supersonic Correlation Current Meter). WRRR-WR-94-1.
- K-water (2008). Development of All-time Discharge Measuring System Using Microwave Water Surface Current Meter(2nd yr). KIWE-HRC-08-01.
- K-water (2010). Improvement of Accuracy on Discharge Measurement Using Surface Velocity, KWI-WR-10-01
- Lee, S.H., Kim, W.G., and Kim, Y.S. (1997). "Practical Aspects of Microwave Surface Velocity Meter Applied to Measurements of Stream Discharges." *J. of Korea Water Reso. Asso.* Vol. 30, pp. 671-678.
- Lee, S.H., Lee, H.G., and Kim, W.G. (1995). "Velocity Measurement of Stream Water Surface Using Microwave." *J. of Korea Water Reso. Asso.* Vol. 28, pp. 183-191.
- Miyamura, E., Nakajima, Y., and Yoshimura, A. (2012). "Full-scale Commercialized Microwave Doppler Current Meter-Fixed Doppler Current Meter & RYUKAN." *New Era of River Discharge Measurement*, Vol. 3, pp. 55-60. (in Japanese)
- Muste, M., Xiong, Z., Bradley, A., and Kruger, A. (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.
- Yamaguchi, T. (1992). Flood Discharge Observation System Using Radio Current Meter, Foundation of River and Basin Integrated Communications, Japan.

paper number : 14-062

Received : 21 July 2014

Revised : 6 February 2015 / 11 June 2015

Accepted : 11 June 2015