

# 펄스반복주파수 기법을 이용한 초음파 유속 프로파일러 개발

## Development of an Acoustic Velocity Profiler by Using Pulse Repetition Frequency Technique

이 찬 주\* / 김 동 구\*\* / 이 재 훈\*\*\* / 김 원\*\*\*\*

Lee, Chan Joo / Kim, Dong Gu / Lee, Jae Hoon / Kim, Won

### Abstract

An acoustic velocity profiler is developed, which is able to be used for open-channel flow measurement. It measures flow velocity based Doppler effect on acoustic signals, which is estimated by using pulse repetition frequency technique. Laboratory and field tests were made to verify velocity measuring performance of the developed device. It is confirmed that the acoustic velocity profiler can normally measure vertical velocity profile in the range above 0.1 m from the bottom and has equivalent performance to commercial acoustic velocity measuring devices.

**Keywords** : acoustic velocity profiler, pulse repetition frequency (PRF), velocity, measurement, test

### 요 지

본 연구에서는 국내 기술로 개수로 흐름 측정에 활용할 수 있는 초음파 유속 프로파일러를 개발하였다. 이 유속 프로파일러는 초음파의 도플러 효과를 유속을 측정하는 원리에 기반을 두고 있으며, 도플러 주파수는 펄스반복주파수(Pulse Repetition Frequency) 기법에 의해 산정된다. 개발된 유속 프로파일러의 성능을 검증하기 위해 실내 실험 및 현장 테스트를 수행하였다. 실험 결과 개발된 유속 프로파일러는 바닥에서부터 약 0.1 cm 이상의 수심에서는 정상적인 유속 분포를 측정하며, 상용 유속센서 등과 비교하여 유사한 측정 성능을 가진 것으로 확인되었다.

**핵심용어** : 초음파 유속 프로파일러, 펄스반복주파수 (PRF), 유속, 측정, 실험

## 1. 서 론

개수로의 흐름을 측정하는 유속계는 유체역학 및 수리학적 연구와 유량 측정 등의 업무에 필수적인 장비이다. 그동안 국내에서는 일부 전자파표면유속계(이상호 등, 1997; 김영성 등, 2002)와 영상처리 기반의 LSPIV(김영

근 등, 2004)와 같은 비접촉식 유속측정 장치가 개발되어 활용되고 있지만, 유속 및 유량 측정에 보다 널리 사용되고 있는 수중 투입식 유속계의 경우 거의 개발되지 않았다. 특히 유속분포를 측정하는데 활용될 수 있는 초음파 방식 유속 프로파일러는 거의 전적으로 외국제품에 의존하고 있다. 일반 유속계가 점유속을 측정하는데 비해 유

\* 교신저자, 한국건설기술연구원 하천해양환경연구소 수석연구원 (e-mail: c0gnitum@kict.re.kr)

Corresponding Author, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

\*\* 한국건설기술연구원 하천해양환경연구소 전임연구원 (e-mail: kimdg@kict.re.kr)

\*\*\* 아이에스테크놀로지(주) 센서시스템연구소 전임연구원 (e-mail: jhlee@sondar.com)

\*\*\*\* 한국건설기술연구원 하천해양환경연구소 연구위원 (e-mail: wonkim@kict.re.kr)

속 프로파일러는 센서가 지향하는 방향선을 따라 공간적인 유속분포를 동시에 획득할 수 있으므로 측정 효율성이 높다는 장점을 지닌다. 본 연구에서는 국내 기술로 개수로 흐름 측정에 활용할 수 있는 초음파 유속 프로파일러를 개발하였다. 본 논문에서는 개발된 유속 프로파일러의 원리와 특징을 설명하고, 물을 이용한 개수로 실험에 적용한 결과를 제시하고자 한다.

## 2. 유속 프로파일러의 개념과 측정 원리

### 2.1 유속 프로파일러의 개념

Fig. 1은 본 연구에서 개발한 유속 프로파일러의 기본 개념을 보여준다. 프로파일러는 수로 바닥에 설치하며 위쪽으로 수면을 바라보고 45도 각도로 초음파 빔을 송신하는 배치를 가진다 (Fig. 1a). 송신주파수는 1 MHz이며, 한 핑 (ping)에는 10 주기의 초음파가 10 μs의 시간 동안 발사되며, 다음 핑의 송신 전까지는 수신 모드로 작동한다 (Fig. 1b). 이렇게 수중으로 발사된 음파는 수중에 부유하는 작은 입자들 (scatterers)에 부딪쳐서 돌아오며, 수신 신호의 도플러 진이 (Doppler shift)를 이용하여 Fig. 1c와 같은 연직방향의 유속분포를 얻는다.

### 2.2 초음파의 도플러 효과를 이용한 유속 측정 원리

초음파 유속센서는 초음파를 발사한 후 수중에 부유하는 미세 입자에 부딪쳐 돌아오는 반사 초음파 신호를 이용하여 유속을 측정한다. 이때 송신 주파수와 수신 주파수의 차이인 주파수 편이 (frequency shift)를 이용하여 수중 미세 입자의 이동 속도와 방향을 탐지한다. 이러한 주파수 편이를 이용하여 속도를 측정하는 방법을 밝혀낸 사람이 크리스티안 도플러 (Christian Doppler)이며, 도플러 효과를 이용하여 유속을 측정하는 장치가 초음파 도플러

유속계이다. 유속은 초음파의 주파수 (본 연구에서는 1 MHz)와 수중에서의 음속 (섭씨 20도에서 약 1,500 m/s)을 이용하여 계산된다. 도플러 효과에 편이된 주파수는 초음파의 입사각 방향에서 얻어지는 주파수이므로 유속의 방향에 맞게 각도 변환되어야 한다. 본 연구에서 개발한 유속 프로파일러는 유속의 상류 방향으로 초음파를 입사하며, 그 각도는 45도이다. 따라서 이를 적용하면, 유속 프로파일러를 측정 단면에 직각으로 배치하였을 때, 단면을 통과하는 유속은 Eq. 1에 의하여 계산된다.

$$v = \frac{f_d c}{f_0 2 \cos \theta} \quad (1)$$

여기서,  $f_d$ 는 도플러 주파수 (Hz), 즉 주파수 편이량,  $f_0$ 는 송신 주파수 (Hz),  $c$ 는 수중에서의 음속 (m/s),  $\theta$ 는 입사각 (°)이다.

### 2.3 펄스반복주파수 기법

도플러 진이에 의해 유속을 측정하기 위해서는 도플러 주파수를 찾아내야 한다. 수중에서의 음속과 비교하여 유속은 매우 작으므로 도플러 주파수는 송신 주파수에 비해 극히 작다. 따라서 이를 찾아내기 위한 방법이 필요한데, 본 연구에서 개발한 유속 프로파일러에 사용한 기법은 상관적 신호처리 기법 (coherent Doppler method)의 일종인 펄스반복주파수 (pulse repetition frequency, 이하 PRF) 기법이다.

펄스반복주파수 기법은 특정한 주기를 가지고 반복적인 펄스 신호를 트랜스듀서를 통해 송신한 후 PRF 시간별로 수신된 신호들 사이의 위상차를 이용하여 새로운 신호를 재구성하고, 이를 통해 도플러 주파수를 추출하는 방법이다. 이를 Fig. 2에서 자세히 살펴보면, Fig. 2(a)에서는 트랜스듀서에서 초음파 신호를 송신하고, 수중 미세 입자들에 반사되어 초음파 신호가 수신된다. 그러면 유속

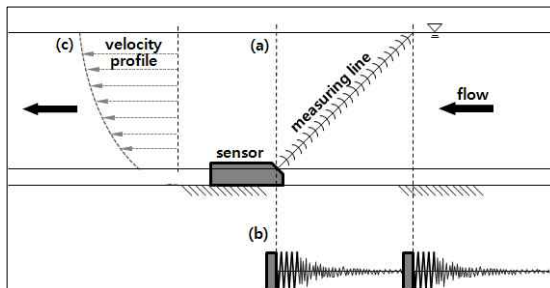


Fig 1. Concept of Acoustic Velocity Profiler: (a) Sensor and Beam Arrangement, (b) Transmitted and Received Acoustic Signal, (c) Velocity Profile

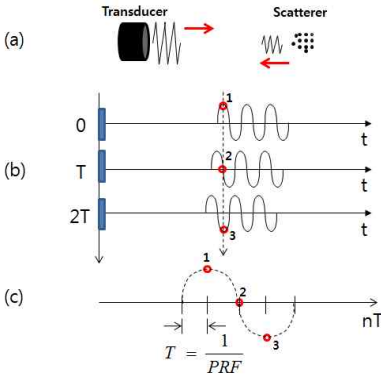


Fig. 2. Concept of the PRF Method. (a) Acoustic Signal Transmission-receipt, (b) Received Signals at PRF Times, (c) Reconstructed Signal

프로파일러의 신호처리부에서는 각 PRF 시간별 ( $T$ )로 수신파에 대해 디지털 샘플링을 실시하며 그 결과는 Fig. 2(b)에서 보여준다. 이들 신호들은 제3의 신호를 구성하기 위해 사용되며, 최종적으로 Fig. 2(c)의 신호가 재구성되는데, 이는 특정한 수직축에서 추출한 것으로서 물리적으로는 연직방향의 특정 수심 위치에 대한 파형(신호)이다. 이 파형의 주파수가 도플러 주파수(도플러 편이)이다. 그리고 도플러 주파수는 Eq. 1에 따라 유속으로 변환된다. 또한, PRF 주파수 내의 시간 영역인 Fig. 2(b)의  $t$ 축에서의 위치에 따라 연직 방향의 수심 위치가 결정되므로 이들을 모두 모으면 연직 방향의 유속 분포를 얻을 수 있다. PRF 기법은 측정 대상 물체의 3차원 속도를 측정하기 위해 도플러 주파수 편이를 추정하는데 활용되는 방법으로 초음파와 레이더 등을 이용한 다양한 계측 분야에서 활용되어 왔다(Takeda, 1986; Takeda, 1990; Harley and Cole, 1974; Moriizumi, 1994; Ganz, 1977). 본 연구에서는 유속 측정을 통해 유량을 산정하는 것이 목적이므로 유속 프로파일러를 측정 단면에 직각 방향으로 배치하고 단면에 직각으로 통과하는 유속 성분만을 측정하는 1차원 프로파일러를 제작하였다.

PRF 기법은 사용하는 PRF 주파수에 따라 측정 가능한 수심과 유속 범위의 한계가 있다. 측정 수심의 한계는 펄스 신호를 반복적으로 송/수신하는데 따라 발생하는 제한으로 PRF 주파수와 반비례한다(Eq. 2). 또한 송수신 주기( $1/PRF$ )가 도플러 신호의 샘플링 주기가 되기 때문에 Nyquist 정리에 의해 PRF의 1/2 이상이 되는 도플러 편이 주파수에 대해서는 원신호와 주기가 중복되는 문제인 앨리어싱(aliasing)이 발생하여 측정할 수 없게 되기

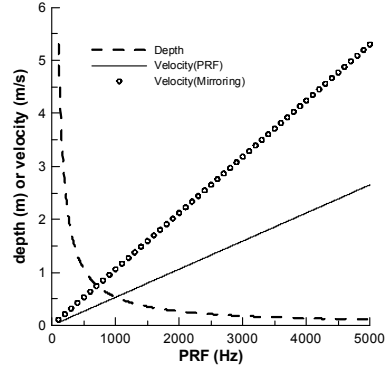


Fig. 3. Depth and velocity limits related with PRF

때문이다(Hardcastle, 1995). 이로 인해 측정 유속에 제한이 있게 된다(Eq. 3).

$$d_{\max} = \frac{c T_R}{2} \cos(90 - \theta) = \frac{c}{2PRF} \cos(90 - \theta) \quad (2)$$

$$v_{\max} = \frac{c PRF}{4f_0} \frac{1}{\cos \theta} \quad (3)$$

Eq. 2에서  $d_{\max}$ 는 최대수심(m),  $T_R$ 은 PRF 주파수에 따른 시간간격(초)으로  $1/PRF$ 와 같은 값이며,  $PRF$ 는 PRF 주파수(Hz)를 나타낸다. Eq. 3의  $v_{\max}$ 는 최대유속(m/s)을 의미한다. Eq. 2와 Eq. 3에 의하면 PRF 기법은 수심이 깊은 조건에서는 낮은 PRF 주파수를 사용하여야 하므로 빠른 유속을 측정할 수 없고, 빠른 유속을 측정하기 위해서는 깊은 수심을 측정할 수 없다는 한계가 있다. Fig. 3은 PRF 주파수에 따른 최대수심과 최대유속 한계를 나타낸다.

## 2.4 미러링(mirroring) 기법

본 연구에서 개발한 유속 프로파일러는 하천 횡단구조물인 보 등에 설치하여 유속을 측정할 목적으로 개발한 것이다. 그런데 단순한 PRF 기법만으로는 실제 하천에서 발생할 수 있는 유속 및 수심 범위를 측정하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로는 흔히 광대역(broad-band) 방식이라고 알려진 신호의 위상을 변경하여 암호화하는 방법(Cabrera et al., 1987; Brumley et al., 1987; Hackett et al., 1987)과 송신주파수를 이중으로 하는 방법(Bugnon and Whitehouse, 1991) 등이 있다. 하지만, 이러한 방법은 본 연구에서 사용하지 않았다. 그 대신 PRF 주파수로 측정가능한 최대 유속을 초과하는 유속을 측정하기 위해 미러링 기법을 사용하였다. 미러링 기법은 주

어진 PRF의 최대유속을 초과하는 실제 유속이 PRF 기법으로는 낮은 유속으로 측정되므로 이를 반사시켜 실제 유속인 높은 유속으로 계산해 주는 방법이다 (Fig. 4). 다만, 미러링 기법을 적용하기 위해서는 센서가 설치된 보의 바닥으로부터 수면으로 가면서 유속이 증가될 것이라는 조건이 충족되어야 한다. 배수 영향을 받거나 양방향 흐름이 발생하지 않는 일반적인 개수로 흐름에서는 그 조건이 충족되므로 미러링 기법을 적용할 수 있다고 판단하였다. 이론상 미러링 기법은 PRF 최대유속의 2배 및 그 이상의 유속을 측정할 수 있다. 하지만 유속분포가 가정한 조건을 충족시키지 못하는 경우에는 미러링을 적용하는 것이 적절하지 않으며, 미러링의 경계부인 최대유속 부근에 측정된 유속의 경우 상하 유속의 난류 특성으로 인해 오차가 발생할 가능성이 있으므로 가급적 시간평균된 유속에 대하여 미러링을 적용하여 이러한 문제를 해결한다.

결한다.

### 3. 유속 프로파일러 시스템 구성

개발된 유속 프로파일러는 하드웨어와 소프트웨어 부분으로 구성되어 있다. 하드웨어는 초음파를 송수신하는 트랜스듀서, 아날로그 신호를 처리하는 송수신 회로와 주파수 샘플링을 수행하는 아날로그-디지털 변환기 (ADC, Analog-Digital Converter)와 디지털 신호처리기 (DSP, Digital Signal Processor)로 이루어져 있다.

트랜스듀서는 압전복합세라믹 소재로 제작된 것으로 송신 후 자체 진동시간이 짧아 공백거리 (blanking distance)가 짧은 특성을 가진다. 트랜스듀서만을 이용하여 5 주기의 음파 신호를 인가하여 측정된 공백거리는 0.8cm 미만이었으나 개발된 유속 프로파일러 시스템은 10 주기

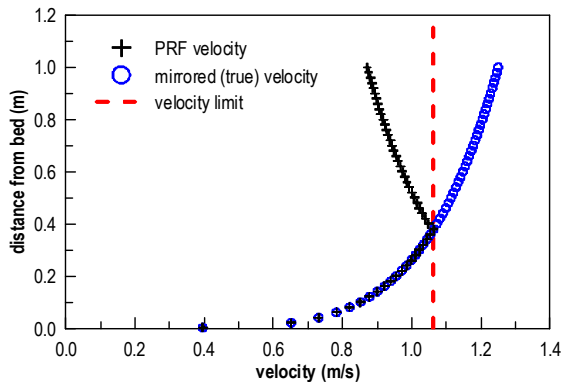


Fig. 4. An Example of PRF (original) and Mirrored Velocity for PRF 2,000 Hz

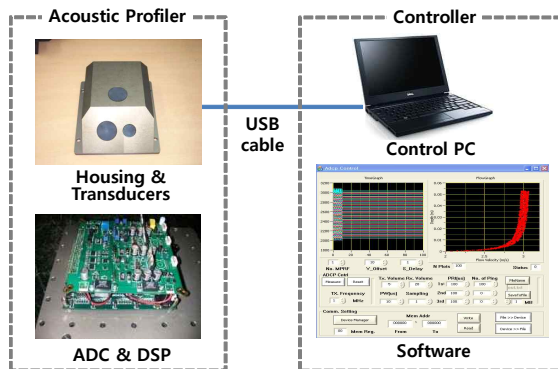


Fig. 5. The Acoustic Profiler System

의 신호를 인가하므로 이론적으로는 약 1.6cm의 공백거리를 가지며, 실험조건에서는 수심과 PRF 주파수에 따라 다르지만 약 2cm의 공백거리를 갖는다. 아날로그처리기는 1MHz 주파수로 초음파 신호를 송신하며 수신된 신호는 증폭한다. ADC는 수신 신호를 12MHz의 속도로 디지털 샘플링하여 주파수 파형을 취득한다. DSP는 파형신호로부터 PRF 기법 (Fig. 2(c))을 통해 도플러 주파수에 해당하는 파형을 재구성한다. 재구성된 파형은 이산화된 신호 데이터로서 이에 대해 고속푸리에변환 (Fast Fourier Transform) 과정을 수행하여 유속에 해당하는 도플러 주파수를 얻게 된다. 이러한 과정은 유속 프로파일러로부터의 거리에 따라 반복 수행된다. 마지막으로 소프트웨어 부분에서는 측정된 도플러 주파수를 유속으로 계산하여 유속 분포를 계산한다. 아울러 PRF의 제어 기능도 담당한다. Fig. 5는 개발된 유속 프로파일러 시스템을 나타내고 있다.

## 4. 성능 검증

### 4.1 수로 실험

본 연구에서 개발한 초음파 유속 프로파일러 시스템을 이용하여 한국건설기술연구원 하천수리실험실의 직선수로에서 검증실험을 실시하였다. 실험수로는 길이 15m, 폭 1.5m, 최대 수심 1.0m의 제원을 가지고 있으며 최대 0.3 m<sup>3</sup>/s의 유량이 공급될 수 있다. 수심은 하류단 게이트에 의해 조절된다. 실험을 위해 수로 바닥에 고밀도 스티로폼이 깔려 있어 초음파의 난반사 (multi-path)를 최소화할 수 있는 조건이 갖추어져 있다 (Fig. 6).

실험은 두 가지로 나누어 실시하였다. 먼저 유속분포 자체를 측정하는 성능을 확인하기 위해 1차적으로 기본 측정성을 실험을 실시하였다. 그 다음으로는 측정된 유속이 정확한지를 판단하기 위해 몇 차례에 걸쳐 상용 유속센서와 비교하는 실험을 실시하였다. 실제 검증실험에서는 최



Fig. 6. Photograph of the Test Experiment

종적으로 개발한 시스템을 사용하지 않고, 트랜스듀서와 상용 신호처리 회로가 연결된 시제품으로 실험을 수행하였다. 현장 적용 시스템은 아날로그-디지털 신호처리가 내장된 것이며, 시제품은 최종 시스템과 동일한 트랜스듀서와 신호처리 기법을 적용하고 있으나 신호처리부가 별도로 되어 있다. 유속 계산 알고리즘은 동일하며, 따라서 측정된 유속 역시 동일하다.

#### 4.1.1 기본 측정성능 실험

개발된 유속 프로파일러가 정상적인 유속분포를 측정하는지를 확인하기 위하여 수로의 유량을 조절하여 수심과 유속을 변화시킨 6가지 조건에 대해 성능 실험을 실시하였다. 실험은 수심 약 0.28m에 대해서는 0.08, 0.15, 0.23, 0.42, 0.6 m/s 등 5가지 유속 조건, 0.23m 수심에서는 0.9 m/s 1 가지 유속 조건을 적용하여 시행하였다. 개발된 유속 프로파일러는 0.2초마다 1개의 순간 연직유속분포를 측정할 수 있는데 실험에서는 10초의 시간 길이에 해당하는 총 50개의 연직유속분포를 취득하고 평균한 값을 그래프로 도시하였다. 시제품으로 실험을 수행하는 과정에서 매회 측정시마다 파형 데이터를 저장하는데 시간이 소요되므로 그 10초는 연속적인 시간이 아니며 총 측정 시간을 의미한다. 유속 프로파일러의 수심 셀 크기는 0.0037 cm이며, 공백거리와 센서 높이를 고려한 실제 측정 수심 범위인 총 23.4 cm에 대해 6,250개의 유속 자료가 취득되었다. 수로 바닥과 수면에서 난반사되는 음파 신호의 간섭 효과 (side-lobe effect)를 제거하기 위해 40 Hz High-Pass 필터를 적용하였다.

Fig. 7은 유속 프로파일러로 측정된 연직유속분포를 보여준다. 실선은 0.0037 cm 간격으로 측정된 연직유속분포를 연결한 것이며, 점은 수로 바닥에서부터 0.08 m 또는 0.1 m의 높이로부터 수심 0.02 m 간격으로 공간평균한 결과이다. 실측한 연직유속분포가 일반적인 유속분포와 유사성이 있는지를 보기 위하여 0.02 m 간격으로 공간평균한 값에 대해 최소자승법을 적용한 대수분포식을 적합적으로 사용하여 함께 도시하였다 (파선으로 표시). 대수분포는 Prandtl von Karman 대수법칙 (P-vK law)의 식 (Eq. 4)으로 계산하였다.

$$u(y) = \frac{1}{\kappa} (gdS)^{1/2} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) \quad (4)$$

위 식에서,  $y$ 는 바닥으로부터의 연직거리 (m),  $u(y)$ 는  $y$ 에서의 유속 (m/s),  $\kappa$ 는 von Karman 상수,  $g$ 는 중력가속도 (m/s<sup>2</sup>),  $d$ 는 수심 (m),  $S$ 는 에너지경사,  $y_0$ 는 유속이 0이 되는 바닥으로부터 미소거리 (m)이다. 대수분포식의 적용 목적이 유속분포의 기형을 비교하는데 있으므로,  $S$ ,

$y_0$  값은 실험 조건에 맞게 조정하였다.

실측 유속분포는 6가지 유속, 수심 케이스에 대해 비교적 정상적인 결과를 보여주고 있다. 주어진 유속 조건과 비교하여 유속이 과다하거나 과소하게 측정되는 경우는 없었다. 실측 유속분포를 이론적인 P-vK 분포와 비교하여 보면 바닥으로부터 약 0.1m 이상의 위치에서는 수심에 따른 유속의 변화를 특성이 케이스별로 약간 다르기는 해도 전체적으로 P-vK 분포와 큰 불일치를 보이는 경우는 없었다. 하지만, 0.1 m 이하의 위치에서는 유속이 낮게 측정될 뿐만 아니라 유속의 감소 정도가 급격하게 나타나고 있다. 이러한 결과는 유속 프로파일러 자체에 의한 흐름 저항 요인을 감안하더라도 정상적인 결과로 보기는 어려우며, 특히 바닥으로부터 약 0.06 m 이하에서 측정된 유속은 모든 케이스에서 공히 비정상적인 결과로

판단된다.

#### 4.1.2 상용 유속센서와의 비교

개발된 유속 프로파일러로 측정된 유속의 정확성을 검증하기 위해 상용 유속센서와 비교 측정 실험을 실시하였다. 비교 측정 실험은 4차에 걸쳐 6가지 조건에 대해 실시되었다 (Table 1). 1차 실험은 2009년 3월 4일에 실시되었다. 이 실험에서는 세 가지 유속-수심 조건에 대해 유속 프로파일러와 Sontek사의 현장용 2차원 ADV인 FlowTracker를 함께 사용하여 비교 측정을 하였다. 2009년 7월 29일의 실험에서도 역시 같은 2차원 ADV를 사용하여 유속을 비교하였다. 2009년 11월 26일과 12월 2일에는 상용 유속 프로파일러인 Hydrovision사의 Q-Eye를 함께 사용하였는데, 11월 26일은 깊은 수심 조건에 대해

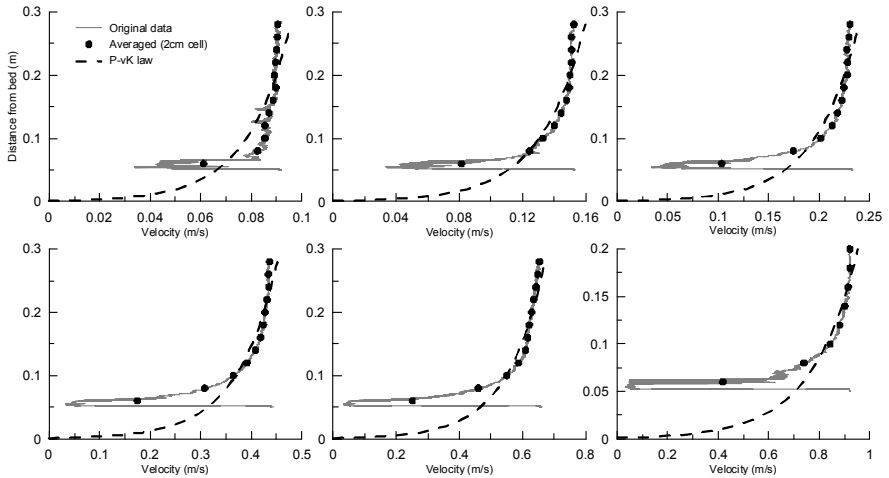


Fig. 7. Measured Vertical Velocity Profiles for Six Velocity Cases

Table 1. Comparative Experiment Cases

Case	Experimental condition					Comparison measurement	RMSE (%)		Fig
	Depth (m)	Velocity (m/s)	PRF (Hz)	No. of samples	Sampling time (sec)		> 0.06 m	> 0.1 m	
20090304(1)	0.35	0.4	1,600	50	10.0	2-D ADV	17.7	4.6	8(a)
20090304(2)	0.26	0.85	2,500	"	"	"	22.2	7.0	8(b)
20090304(3)	0.23	1.10	4,000	"	"	"	7.2	3.0	8(c)
20090729	0.30	0.65	2,000	5	1.0	"	9.6	3.5	8(d)
20091126	0.70	0.23	800	50	10.0	Q-Eye	7.2	2.3	8(e)
20091202	0.24	0.90	2,000	"	"	"	13.4	3.2	8(f)

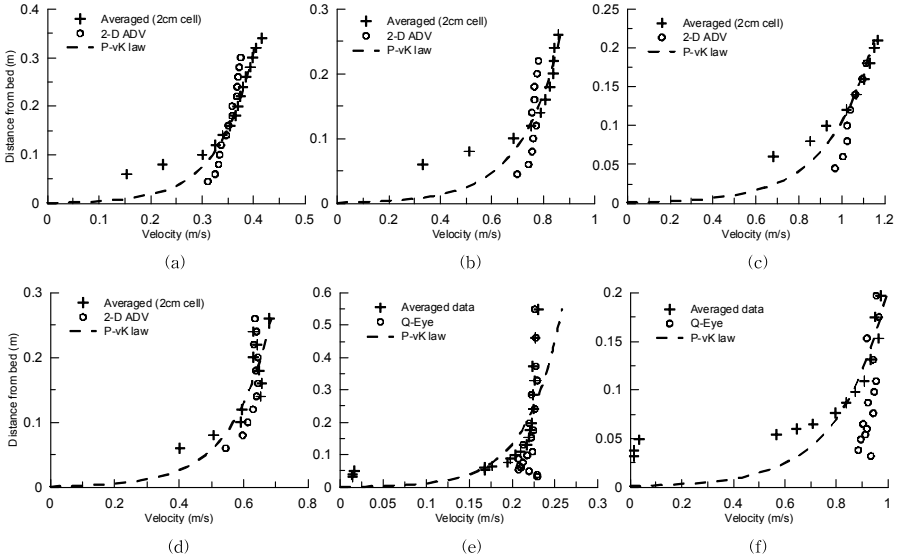


Fig. 8. Velocity Comparison of the Acoustic Profiler with Commercial Velocity Sensors

서, 12월 2일을 상대적으로 빠른 유속 조건에 대해서 비교 측정 실험을 하였다.

Fig. 8은 실험 결과를 나타내는 그래프이다. 삽자표는 유속 프로파일러로 측정된 것으로 각 실험조건별로 5개 또는 50개의 연속유속분포를 시간평균하고 또 0.02 m 수심 간격 또는 Q-Eye의 위치와 동일한 위치에 대해 공간 평균한 연속유속분포이다. 동그라미는 상용 유속계 및 유속 프로파일러로 비교 측정된 결과이다. 파선은 P-vK 대수분포식을 적용한 결과이다.

전체적으로 바닥으로부터 약 0.08~0.1 m 이상의 위치와 그 이하의 위치에서 유속 프로파일러의 실측값과 상용 센서의 실측값 사이의 차이가 뚜렷이 구분된다고 볼 수 있다. 즉, 0.1 m 이상의 위치에서 두 값은 대체로 근사한 값을 나타내는데 비해, 그 이하의 위치에서는 유속 프로파일러의 실측값이 뚜렷이 작게 나타나고 있다. 0.1 m 이하에서 나타나는 이러한 격리는 P-vK 분포와 비교하여도 분명하며, 기본 측정 성능 실험에서 이미 확인되었던 사실이다. 이로 볼 때, 유속 프로파일러는 바닥에서 0.1 m 이하의 위치에서는 측정값이 정상적인 범위를 벗어난 것으로 판단된다. 하지만, 그 이상의 위치에서는 상용 센서의 실측값과 비교하여 수용할만한 정확도의 범위에서 오차를 나타낸다고 볼 수 있다. Table 1에는 유속 프로파일러로 측정된 유속과 상용 센서로 측정된 유속의 상대오차

비율을 RMSE로 계산하여 보여준다. 바닥으로부터 유속 프로파일러로 측정된 거의 모든 값이 포함된 0.06 m 이상의 범위에 대해서는 7.2~22.2%의 상대오차를 나타내는데 비해 0.1 m 이상의 범위에서는 2.3~7.0%의 상대오차를 나타내고 있다. 한편, 본 연구의 실험 케이스가 많은 것은 아니지만, 개발된 유속 프로파일러가 바닥으로부터 0.1 m 이상의 위치에서는 비교적 정확한 측정값을 나타낸다고 판단할 수 있다.

#### 4.2 현장 적용 검증

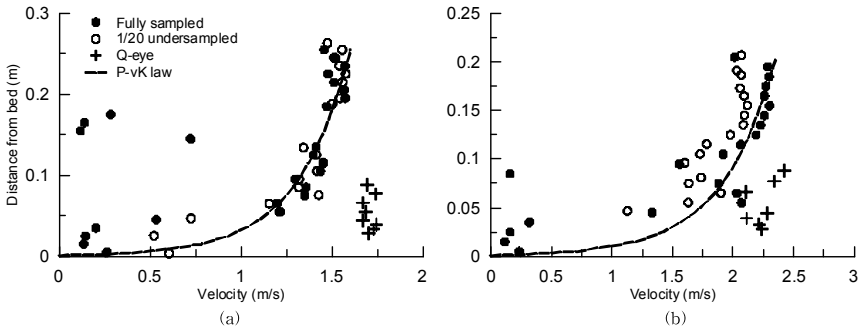
실내 실험을 통해 유속 프로파일러의 기본적인 성능이 바닥으로부터 약 0.1 m 이상에서는 정상적인 것으로 검증 되었으므로 현장 적용과 성능 테스트를 실시하였다. 현장에 적용된 센서는 실험실에서 적용한 센서를 보다 개선하여 아날로그-디지털 변환기를 내장한 형태이다. 센서는 Fig. 9와 같이 층복 피산군 칠성면 둔율리에 소재한 달천 송동보의 마루부에 매립형과 돌출형으로 설치하였다. 송동보는 마루폭이 203 m이고, 높이는 약 1.5 m이다. 현장 설치는 2010년 6월에 실시하였으며, 유속 측정 실험은 홍수기인 2010년 8월 13일 오후 및 8월 14일 자정 경에 60.8 m<sup>3</sup>/s과 144.4 m<sup>3</sup>/s 규모의 피산댐 여수로 방류 조건에서 실시하였다. 실측은 돌출형 센서 (Fig. 9(a)의 우측 센서) 로만 수행하였다. 실험 조건은 Table 2에 요약되어 있다.

**Table 2. Conditions of the Field Experiment**

Test		Discharge (m <sup>3</sup> /s)	PRF	Experimental settings	Measured range (m)	Concurrent measurement
Date	Time					
2010. 8. 13.	16:36	60.8	2,000	Full-scale 12 MHz sampling, Mirroring (1 time, 0.1 sec)	0.265	Q-eye
	17:53 ~18:12			1/20 undersampling, Mirroring, 5 times		
2010. 8. 13.	23:15 ~23:42	144.4	2,500	1/20 undersampling, Mirroring, 5 times	0.212	"
2010. 8. 14.	00:02			Full-scale 12 MHz sampling, Mirroring (1 time, 0.08 sec)		



**Fig. 9. Photograph of the Acoustic Profilers Installed on the Crest of Songdong Weir (a) and Flow over It (b)**



**Fig. 10. Velocity Comparison between the Acoustic Profiler and Q-eye at Songdong-Weir**

현장 실험은 실내 수로실험과는 달리 PRF 기법의 최대유속 한계를 넘는 유속이 발생하므로 이를 극복하기 위해 앞 절에서 제시한 미러링 방법을 적용하였다.

Fig. 10에서 점은 0.08/0.1초의 순간에 대해 센서가 취득할 수 있는 최대한의 수심 정밀도로 측정된 자료를 0.01 m 간격으로 공간평균한 것이며, 원은 수심 셀을 1/20 간격으로 정밀도를 낮추어 얻은 자료로서 5회 측정된 값 (0.4/0.5 초)을 시간평균하고 역시 0.01 m 간격으로 공간평균한 자

료이다. 파선은 P-vK 분포이다.

전체적으로 보면, 바닥으로부터 0.1 m 이상에서 측정된 유속은 일부 수심층에서 나타나는 이상치를 제외하면 P-vK 대수분포와 비교적 일치하고 있다. 다만, 실내 실험에서와 같이 바닥에서부터 0.1 m 이하의 위치에서는 측정 유속이 P-vK 분포나 상용 유속센서 (Q-Eye)와 비교하여 비정상적인 결과를 나타내고 있다. 이상치는 60.8 m<sup>3</sup>/s 조건 (Fig. 10(a))에서는 0.15~0.18 m 위치에서, 144.4 m<sup>3</sup>/s



조건 (Fig. 10(b))에서는 0.08m 부근에서 확인되는데, 이는 실험실의 스티로폼 바닥과 달리 거친 콘크리트 표면으로 인한 초음파의 난반사 (multi-path)가 반영되었기 때문으로 보인다. 이론상 유속 프로파일러가 보 마루의 하류단에 설치되어 있으므로 (Fig. 9(a)), 초음파의 진행 거리가 긴 고수심보다 저수심 조건에서 난반사의 가능성이 높다. 측정 결과 역시 수심이 더 깊은 144.4m<sup>3</sup>/s의 유량 조건에서 이상치가 더 적은 것으로 나타났다.

현장 시험이 홍수 조건하에서 이루어졌으므로 2차원 ADV를 적용하지 못하고, 유속 프로파일러와 가까운 위치에 설치되어 있는 Q-Eye로 측정된 값으로 유속을 비교하였다. Q-Eye는 사양상 1m 수심에 대해 유속분포 실측이 가능하지만, 실제로는 바닥으로부터 약 0.1m 이내의 유속만이 측정되었다. 유속 프로파일러는 실제 실험 등에서 이미 확인된 바와 같이 0.1m 이하의 위치에서 측정 성능이 좋지 않았으므로 두 기법을 직접 비교하기는 곤란하였다. 다만 바닥에서 0.1m 이상의 위치에서의 평균값으로 보면 유속 프로파일러는 Q-Eye와 비교하여 Full-scale 측정을 기준으로 60.8m<sup>3</sup>/s 조건에서는 유속이 약 12.8% 작게 측정되었고, 144.4m<sup>3</sup>/s의 유량 조건에서는 2.5% 작게 측정되었다. Q-Eye의 결과는 바닥 부근에서 측정된 값으로 그 이상의 위치에서는 유속이 더 높아질 수도 있고 따라서 상대차이는 더 키질 수도 있다. 그런데 유속 프로파일러의 측정값은 단 1회의 순간 유속값이므로 변동성이 있다는 점과 보 마루에서의 흐름 구조의 영향 등을 고려하면 상대오차는 달라질 수도 있다. 이랬든 두 번의 실험만으로는 유속 프로파일러의 성능을 충분히 평가할 수 없으나 현장에서의 유속 측정에도 적용할 수 있다는 점을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 하천의 보 등에 부착하여 개수로의 흐름 측정에 활용할 수 있는 초음파 유속 프로파일러를 개발하고 실험실 및 현장에서의 적용을 통한 검증 결과를 간략하게 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 초음파 도플러 효과를 기본 원리로 하여 상관적 신호처리 기법의 하나인 펄스반복주파수 (PRF) 기법에 의한 유속 프로파일러를 개발하였다. 또한 PRF 기법의 한계 유속을 초과하는 유속을 측정하기 위하여 미러링 기법을 적용하였다.
- 2) 유속 프로파일러 시스템은 트랜스듀서, 신호처리장치 등으로 구성되는 하드웨어와 유속 계산 기능을 가지는 소프트웨어로 구성된다.
- 3) 개발된 유속 프로파일러의 성능을 검증하기 위한

실내 실험을 실시하였으며, 그 결과 측정된 유속 분포는 바닥으로부터 0.1m 이상의 위치에서는 P-vK 대수분포와 비교하여 정상적인 결과를 보였으며, 상용 유속센서와 비교하여도 유속 값이 근사하고 큰 차이가 없음을 확인하였다. 하지만 0.1m 이하의 위치에서는 유속 측정이 다소 비정상적인 것으로 나타났다.

- 4) 실제 하천의 보에 설치하여 홍수시 유속 측정 성능을 테스트한 바, 초음파의 난반사 등으로 인한 이상치가 포함되어 있고, 상용 유속센서와 비교하여 2.5~12.8% 이상의 상대차이가 있으나 현장에서도 적용될 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발한 유속 프로파일러는 바닥으로부터 0.1m 이내에서의 오측, 초음파의 난반사에 의한 이상치 문제 및 난류 변동을 완화하기 위한 시간평균 측정 등을 위한 향후 보완 개발이 필요하다. 향후 지속적인 연구 개발과 실험으로 성능을 향상시킨다면 하천 유속 측정 실무에 활용도가 높을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다 (과제번호 2-1-3).

## 참고문헌

김영근, 노영신, 윤병만 (2004). "LSPIV를 이용한 표면유속 측정기법의 검증 및 적용." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제2호, pp. 155-161.

김영성, 양재원, 추태호, 고익환 (2002). "표면유속을 이용한 하천유량 측정기법 개선." **한국수자원학회기술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 940-945.

이상호, 김우구, 김영성 (1997). "전차와 표면 유속계의 하천 유량 측정에 관한 실용성." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제6호, pp. 671-678.

Brumley, B., Heuchling, P., Koehler, R., and Terray, E. (1987). "Coded pulse-coherent Doppler sonar." *Proceedings of IEEE Oceans*, Vol. 87, No. 1, pp. 89-92.

Bugnon, F., and Whitehouse, I. (1991). "Acoustic Doppler current meter." *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 420-426.

Cabrera, R., Deines, K., Brumley, B., and Terray, E. (1987). "Development of a practical coherent Doppler current profiler." *Proceedings of IEEE Oceans*, Vol.

- 87, No. 1, pp. 93-97.
- Ganz, F.M. (1977) Multi-PRF signal processor system, US Patent No. 4,057,800.
- Hackett, B., Lohrmann, A., and Roed, L. (1987). "Bottom currents measured with a pulse-to-pulse coherent sonar." *Proceedings of IEEE Oceans*, Vol. 87, No. 1, pp. 83-88.
- Hardcastle, P.J. (1995). "A high resolution coherent acoustic Doppler profiler for the measurement of near bed turbulent flow." *Proceedings of Oceans '95 MTS/IEEE conference*, pp. 1361-1366.
- Hartley, C.J., and Cole, J.S. (1974). An ultrasonic pulsed Doppler system for measuring blood flow in small vessels, Vol. 37, pp. 626.
- Moriizumi, T. (1994). Ultrasonic imaging system capable of varying maximum pulse repetition frequency depending upon pulse transmission frequency, US Patent No. 5,325,858.
- Takeda, Y. (1986). "Velocity profile measurement by ultrasound Doppler shift method." *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 7, No. 4, pp. 313-318.
- Takeda, Y. (1991). "Development of an ultrasound velocity profile monitor." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 126, pp. 277-284.

논문번호: 11-034	접수: 2011.03.22
수정일자: 2011.05.17/08.08	심사완료: 2011.08.08