

펄스반복주파수 기법을 이용한 초음파 유속 프로파일러 개발

Development of an ultrasonic velocity profiler by using pulse repetition frequency method

이찬주*, 김동구**, 권성일***, 김원****

Chan Joo Lee, Dong Gu Kim, Sung Il Kwon, Won Kim

요 지

개수로의 흐름을 측정하는 유속계는 유체역학 및 수리학적 연구와 유량 측정 등의 업무에 필수적인 장비이다. 그동안 국내에서는 일부 전자과표면유속계(이상호 등, 1997)와 영상처리 기반의 LSPIV(김영근 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 유속 분포를 측정하는데 활용될 수 있는 초음파 방식 유속 프로파일러는 거의 전적으로 외국제품에 의존하고 있다. 일반 유속계가 점유속을 측정하는데 비해 유속 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. 이 유속 프로파일러는 초음파 펄스를 반복적으로 송수신하는 PRF 기법을 이용하여 개발하였다. 개발된 유속 프로파일러는 직사각형 수로에서 유속 분포를 측정하기 위해 적용하였으며, 기존의 2차원 유속계와 그 결과를 비교하였다. 본 연구에서 개발한 유속 프로파일러는 실제 하천에 활용하기에는 측정 가능한 유속 및 수심 범위의 한계가 있으나 PRF 기법의 한계 범위에서는 실측 유속분포를 비교적 잘 재현하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 펄스반복주파수(PRF), 유속 프로파일러, 연직 유속분포

1. 서론

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

* 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 전임연구원 · E-mail : c0gnitum@kict.re.kr

** 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 연구원 · E-mail : kimdg@kict.re.kr

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 박사후연구원 · E-mail : ksi1973@kict.re.kr

**** 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 연구위원 · E-mail : wonkim@kict.re.kr

2. 유속 프로파일러의 원리

그림 1은 유속 프로파일러의 기본 원리를 보여준다. 센서는 수로 바닥에 설치하여 위쪽으로 수면을 바라보고 45도 각도로 초음파 빔을 송신하는 배치를 가진다(그림 1a). 본 연구에서 개발한 센서에서는 1MHz의 주파수의 초음파를 송수신하며, 한 핑(ping)은 10 μ s 동안 10 파장의 초음파가 발사되며, 다음 핑의 송신 전까지는 수신 모드로 작동한다(그림 1b). 이렇게 수중으로 발사된 음파는 수중에 부유하는 작은 입자들(backscatterers)에 부딪쳐서 돌아오며, 이를 재구성하여 그림 1c와 같은 연직방향의 유속분포를 얻을 수 있다.

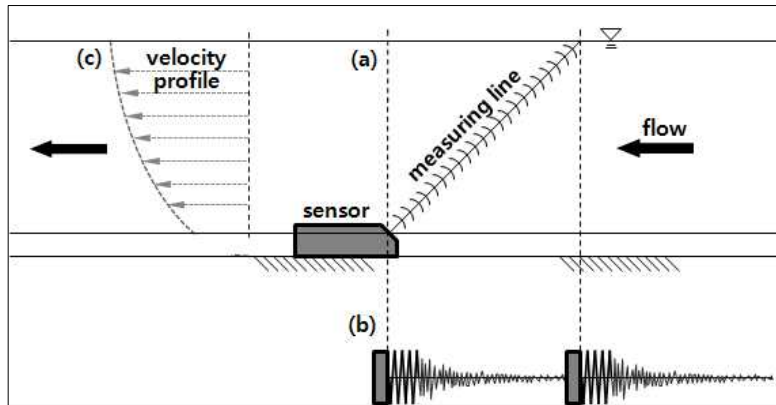


그림 1. 유속 프로파일러의 원리: (a) 센서와 초음파 빔의 배치, (b) 송신/수신된 초음파 신호, (c) 측정된 연직유속분포.

본 연구에서 개발한 유속 프로파일러는 펄스반복주파수(pulse repetition frequency, 이하 PRF) 기법으로 신호처리를 하는 유속 프로파일러이다. PRF 기법은 특정한 주기를 가지고 반복적으로 동일한 펄스 신호를 송수신하고 수신된 신호들의 위상차를 이용하여 수중 미립자의 이동 속도를 추정하는 기법이다(그림 2). PRF 기법은 측정 대상 물체의 3차원 속도를 측정하기 위해 도플러 주파수 변이를 추정하는데 활용되는 방법으로 초음파와 레이더 등을 이용한 다양한 계측 분야에서 활용되어 왔다(Takeda, 1986; Takeda, 1990; Harley와 Cole, 1974; Moriizumi, 1994; Ganz, 1977).

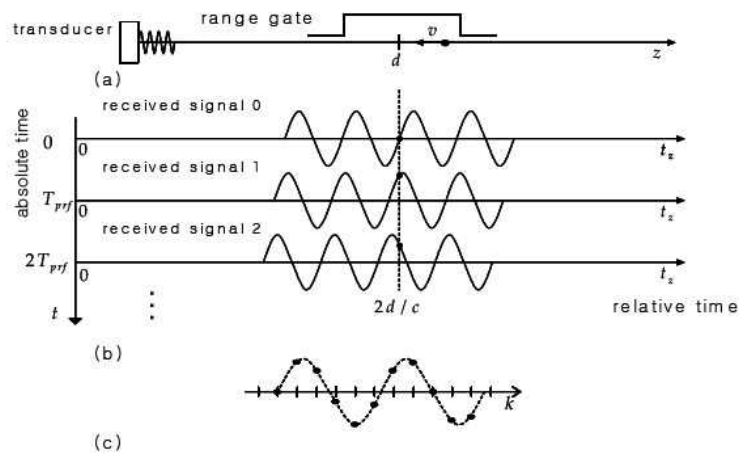


그림 2. 펄스반복주파수 기법의 개념

3. 검증 실험

1) 1차 검증실험

본 연구에서 개발한 초음파 유속 프로파일러를 이용하여 한국건설기술연구원 하천수리실험실의 직선수로에서 검증실험을 실시하였다. 개발된 유속 프로파일러는 0.2초마다 1개의 순간 연직유속분포가 측정되며, 본 실험에서는 10초간 총 50개의 연직유속분포를 평균하였다. 실험 과정에서 발생할 수 있는 바닥과 수면에서 난반사되는 음파 신호에 의해 발생하는 측면 효과(side-lobe effect)를 제거하기 위해 40Hz HighPass 필터를 적용하였다. 1차 검증실험에서는 수심을 약 0.28m로 고정한 상태에서(유속 0.8m/s에서는 0.23m) 기준 유속을 0.08~0.8m/s 범위에서 변경하면서 실험을 실시하였다(그림 3).



그림 3. 초음파 유속프로파일러 검증 실험 장면

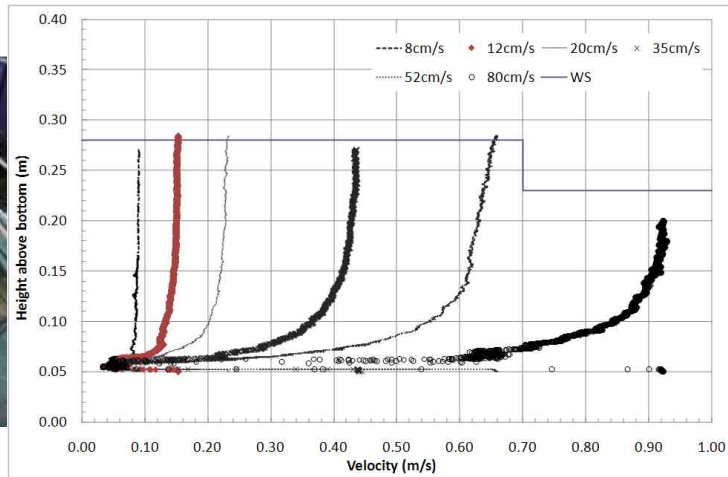


그림 4. 1차 검증 실험에서 연직유속분포

그림 4는 1차 검증 실험 결과 얻은 연직유속분포이다. 본 연구에서 개발한 유속프로파일러는 최대 1cm 이하의 수심 해상도로 연직유속분포를 얻을 수 있다. 그림 4에 따르면, 센서 부근의 유속은 다소 불안정하나 수면으로 올라가면서 유속분포가 대체로 잘 측정된다는 것을 알 수 있다. 1차 검증 실험에서는 2차원 ADV를 이용하여 수면에서부터 60% 아래 지점에서 유속을 비교하였는데, 그 결과 역시 저유속에서는 다소 차이가 있으나 유속 0.2m/s 이상에서 비교 유속과 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

표 1. 유속 프로파일러와 2차원 ADV의 유속비교

기준 유속	본 연구의 유속 프로파일러	2차원 ADV	차이 (%)
0.08 m/s	0.087	0.068	28.2
0.12 m/s	0.139	0.119	17.0
0.20 m/s	0.207	0.195	6.3
0.35 m/s	0.384	0.348	10.4
0.52 m/s	0.573	0.522	9.9
0.80 m/s	0.822	0.857	-4.1

2) 2차 검증실험

2차 실험에서는 세 가지 유속-수심 조건(0.3m/s-0.35m, 0.8m/s-0.24m, 1.1m/s-0.23m)에 대해

유속 프로파일러로 측정을 하고 2차원 ADV로 측정한 연직유속분포와 비교한 실험이다(그림 5). 2차 실험에서도 연직유속분포는 대체로 유사한 결과를 보이고 있으며, 2차원 ADV와 비교한 결과도 다소 차이는 있으나 대체로 유사한 것으로 나타났다. 다만 유속이 0.8m/s, 1.1m/s인 경우에는 ADV에 비해 유속 프로파일러의 결과가 다소 크게 나타났는데, 이는 고유속에서 센서의 침봉에 의해 흐름이 교란된 데 기인한다. 한편, 유속 프로파일러는 바닥으로부터 약 5~8cm 구역에서 측정이 불가능하다는 것을 보여주고 있다. 하지만, 바닥에서부터 10cm 이상의 위치에서는 ADV 대비 평균 RMSE가 5.0%로 유속이 거의 비슷한 것으로 나타났다.

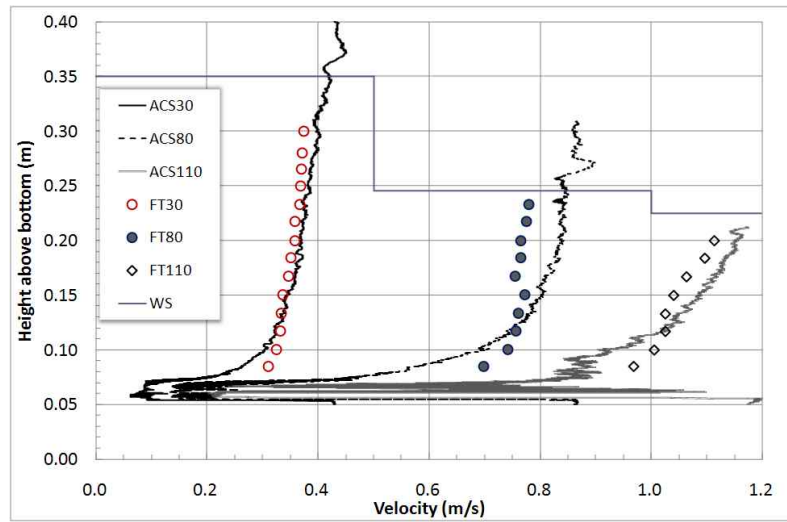


그림 5. 2차 검증실험 결과

4. 결론

본 논문에서는 개수로의 흐름 측정을 위한 초음파 유속 프로파일러를 개발하고 그 결과를 간략하게 제시하였다. 개발된 유속 프로파일러는 2차원 ADV를 이용하여 검증실험을 실시한 결과 비교적 양호한 결과를 얻을 수 있었으며, 적용 가능성을 확인하였다. 하지만, 센서 부근의 유속 분포를 정확하게 측정할 수 있도록 개선이 필요하다는 것을 확인하였다. 향후 지속적인 연구 개발과 실험으로 성능을 향상하여 실용화할 계획이다.

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, 제37권 2호, pp. 155-161
- 김영성, 양재린, 추태호, 고익환(2002) 표면유속을 이용한 하천유량 측정기법 개선, 한국수자원학회학술발표회논문집, pp. 940-945
- 이상호, 김우구, 김영성(1997) 전자파 표면 유속계의 하천 유량 측정에 관한 실용성, 한국수자원학회논문집, 제30권 6호, pp. 671-678

Ganz, F. M.(1977) Multi-PRF signal processor system, US Patent No. 4,057,800

Hartley, C., J., 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