

초음파 유량측정 시스템에 의한 유량측정

Discharge Measurement by Ultrasonic Discharge Measurement System

김치영* · 윤광석** · 김동구* · 김원***

Kim, Chi Young · Cha, Jun Ho · Kim, Dong Gu · Kim, Won

요 지

초음파를 이용한 측정은 하천의 반대편에 흐름방향에 경사지게 초음파를 발사하여 다시 반사되어 오는 시간차를 기록함으로써 주어진 깊이에서 유속을 연속적으로 측정하는 것이다. 하류로 내려가는 음파는 음향 축선(acoustic path)과 평행한 유속 성분 때문에 상류로 올라가는 음파보다 빠른 속도를 가진다.

탄천 및 괴산댐에 초음파 유량 측정시스템을 시험 설치하고 운영 결과를 검토하였다. 시험적용결과 연속적인 유량자료 획득이 가능하였으며, 기존 유속면적법 대비 4.21%의 상대오차를 지니고 있어 기존 방법과 비교적 일치하는 측정결과를 나타냈다. 또한 지표유속(Index Velocity)를 활용한 단일회선 유량산정법을 검토한 결과, 다회선에 의해 운영한 결과와 평균 2.9%의 상대오차를 지니고 있었다. 이 방법은 조석구간 및 배수영향을 받는 구간에서 작은 비용으로 연속유량자료를 획득할 수 있는 방법으로 판단된다.

시험적용 결과 개선해야 할 사항으로는 안정적인 자료 획득을 위한 초음파 변환기의 개선, 자료의 필터링 기술의 정밀화, 그리고 유량산정 방법에서 정확도 향상 기술 개발 등이 도출되었다. 초음파 유량 측정시스템은 자료의 연속성을 확보할 수 있는 점에서 매우 중요한 의미를 지니고 있다. 지금까지의 연속 유량 산출법은 연속적인 수위를 측정하고 각 수위에 따른 유량 측정 후 수위-유량관계를 통하여 연속적인 유량을 산출하였다. 그러나 초음파 유량 측정 시스템은 직접 유속과 수위를 측정하여 연속유량이 산출되기 때문에 연속유량 산출에 비교적 간편하다고 할 수 있다. 또한 정확도 면에서 기존 유량 측정법인 유속-면적법의 불확실도 5%~10%에 비교하여 5% 내외의 정확도 수준을 지니고 있어 정확도 향상을 기대할 수 있다. 경제적인 측면에서도 매년 측정사업에 소요되는 비용과 비교하였을 때 장기적으로는 경제적인 방법이 될 수 있다.

핵심용어: 유량, 초음파, 탄천, 유량측정 정확도, 시험유역

1. 서론

수자원의 효율적인 관리를 위해선 정확한 자료의 제공이 필수적이다. 하지만 현 유량측정방법인 유속계측정법과 부자를 이용한 측정법은 그 오차와 경제성 면에서 많은 단점이 발견되는 바, 정확도와 경제성 면에서 많은 장점을 가지고 있는 초음파 유속계를 시험 설치하여 갈수기 및 홍수기에 정확한 유량 자료를 실시간으로 공급할 수 있도록 할 것이다.

초음파 유속계가 우리나라의 자연하천에 이용된 사례가 없기 때문에 초음파 유속계의 자연하천에 대한 적용성을 검증하기 위해 한국건설기술연구원에서 탄천과 괴산지점에 초음파 유속계를 시험 설치하여 약 2년여간 시험운영하고 있다. 본 연구는 시험설치하여 운영하고 있는 초음파 유속계의 정확도를 분석하여 활용성을 검토하고자 한다. 또한 현재 운영상 발생하는 문제점을 분석하고 이에 대한 개선방안을 도출하고자 한다.

2. 초음파를 이용한 유량측정법

초음파를 이용한 측정은 하천의 반대편에 흐름방향에 경사지게 초음파를 발사하여 다시 반사되어 오는 시간차를 기록함으로써 주어진 깊이에서 유속을 연속적으로 측정하는 것이다. 하류로 내려가는 음파는 음향 축선(acoustic path)과 평행한 유속 성분 때문에 상류로 올라가는 음파보다 빠른 속도를 가진다. 물에서 유속은 음속보다 느리기 때문에 상하류 유하시간의 차이는 매우 작다. 높은 정확도를 위해서는 정확한 시간을 측정할 수 있어야 한다.

*정회원 · 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구원
**정회원 · 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원
***정회원 · 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 수석연구원

변환기(transducer)는 음파를 주고받기 위해 하천 양쪽 제방에 설치된다. 변환기 사이의 연결선과 흐름방향과의 각은 보통 45°~60°로 한다. 유속은 보통 ±0.1% 오차범위 내에서 측정할 수 있다. 동시에 흐름의 평균 수심은 부상기록계나 비슷한 종류의 계기를 이용해 측정한다. 유량은 평균유속, 평균수심, 하폭 값을 이용하여 유속-단면적법을 이용하여 계산한다. 흐름은 끊임없는 변화를 보이기 때문에 유속측정은 1초에 몇 번을 실시하고 몇 분에 한번씩 평균을 한다.

2.1 초음파 유속계를 이용한 유량 측정의 원리

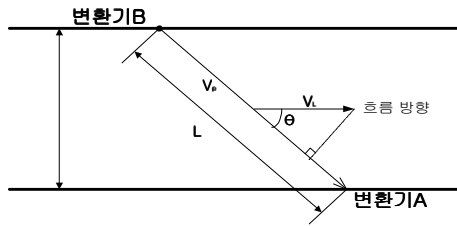


그림 1 초음파 측정방법의 원리

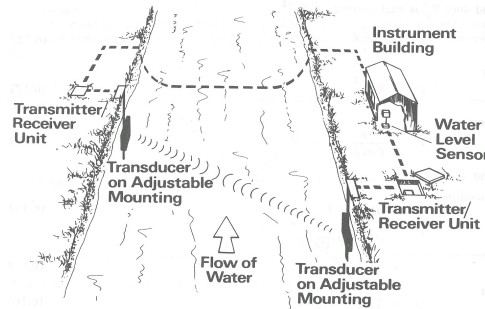


그림 2 현장에서의 초음파 유속계 설치도

초음파 유속계에 의해 유량을 측정하는 방법에는 이동 시간차 방법(Travel time difference method), 주파수차 방법(Frequency difference method)이 있다. 현재 탄선이 설치되어 시험운영 중인 방법은 이동 시간차 방법이다. 이동 시간차 방법은 그림 1과 같이 도식화 하여 나타낼 수 있다.

여기서, L 는 변환기 간 거리(m), v_L 은 어떤 변환기의 높이에서 측방향 흐름의 속도 (m/s), C 는 물속에서의 음속 (약 1500 m/s), θ 는 흐름 방향과 음향 축선(acoustic path)이 이루는 각 (degree), d 는 AB를 따르는 흐름의 평균 수심 (m), t_{AB} 는 A에서 B로 초음파가 이동하는 시간, t_{BA} 는 B에서 A로 초음파가 이동하는 시간, v_P 는 음향 축선 상을 이동하는 유속 성분이다. 이동 시간차 방법에서 유속을 결정하는 식은 식(1)과 같다.

$$Q = A \overline{v_L} = \overline{v_L} d L \sin \theta \quad (1)$$

$$Q = \frac{L^2 \overline{d} \Delta t \tan \theta}{2 \overline{t^2}} \quad (2)$$

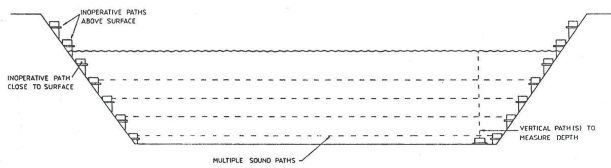


그림 3 하천단면에 대한 초음파 변환기 설치 단면도

단일 시스템에서 $\overline{v_L}$ 은 단면에서 변환기가 평균 유속이 발생하는 수심에 위치하고 있을 때의 유속이다. 다중 시스템에서는 $\overline{v_L}$ 은 다중 유속들의 평균값이다. 실제로 유량은 단면을 변환기를 잇는 선에 따라 절편으로 나누어 유속에 단면폭과 절편 두께를 곱하고 이를 모두 합하여 계산한다.

2.2 초음파 유속계를 이용한 유량 측정 종류 및 특징

초음파를 이용한 유량측정 종류는 크게 단일 시스템(Single Path system), 다중 시스템(Multipath system)으로 나누어 볼 수 있다.

(1) 단일 시스템을 이용하는 방법

단일 시스템에서 유속 측정은 가장 많이 유지되는 수심의 0.6h 되는 지점에 변환기 한 쌍을 설치해서 하나의 깊이에 대해서만 측정을 한다. 만약 변환기의 움직임을 조절할 수 있다면, 깊이에 따라 유속을 측정함으로써 시스템을 보정하는데 사용할 수 있다. 하지만 이는 경제적 비용이 많이 소요되는 단점을 지니고 있다. 한편 최근에 단일시스템에 측정된 지표유속(Index Velocity)을 활용하여 유량을 환산하는 방법이 개발되어 있다.

(2) 다중시스템을 이용하는 방법

단일 시스템보다 보편적인 다중 시스템은 다양한 수심에서 유속을 측정할 수 있는 다수의 변환기 쌍을 제공한다. 그리고 특히 수위의 변화가 심하고 유속분포가 불규칙한 하천에 적합하다. 그림 3은 다수의 변환기 쌍으로 구성된 다중시스템을 나타낸다. 총 설치 비용에 비해 변환기를 추가하는 비용은 상대적으로 작기 때문에 다중시스템으로 구성된 시스템이 자주 사용된다.

(3) 특징

초음파 이용법은 수위-유량관계가 안정되지 않고 구조물에 의한 관측이 적합하지 않은 폭 약 300m 정도까지의 하천에 적용할 수 있다. 따라서 이 방법은 댐으로 인한 배수 영향, 조석, 그 외 원인으로 인한 영향에 적합한 방법이고 유량 측정용 구조물의 설치비용이 많이 드는 곳이나 흐름이 충분하지 않거나 수두가 확보되지 않는 곳에 적합하다. 초음파 이용방법의 보다 중요한 장점은 하천에서 측정을 위한 수축부나 구조물이 없다는 것과 결과는 평균유량으로 나오며 역류를 측정할 수 있으며 측정결과가 연속적이라는 것이다. 초음파를 이용한 측정방법은 통상적인 방법으로 만족할 만한 결과를 얻지 못했던 지점에서 측정방법으로 사용하면 좋은 결과를 얻을 수 있다.

초음파 유속계를 이용한 유량측정 방법의 정확도는 잘 구성된 시스템에서 측정상 발생할 수 있는 불확실도는 오차 5% 정도이다. 더불어 다중시스템은 자가검증이 된다. 그리고 유속계나 다른 방법을 이용하여 시스템을 점검하여야 한다. 또한 초음파 측정기는 mm/s 단위의 아주 작은 크기도 측정할 수 있고 속도 측정의 상한선은 없다. 하지만 초음파법의 경우 $\pm 5\text{m/s}$ 정도까지 정도 있는 측정을 수행하는 것으로 알려져 있다.

3. 초음파 유량 측정 시스템 설치

3.1 설치 위치 선정 기준

초음파 유속계 설치를 위한 하폭은 20~300m 사이가 경제적으로 적합하다. 그리고 수로에는 식생이 없어야 하고, 부유사는 2000mg/L 정도의 농도까지 허용한다. 따라서, 허용치를 넘는 농도일 때는 일시적으로 작동을 멈추고 농도가 내려가면 다시 작동하는 시스템이 필요하다. 그리고 측정 지점 부근에 빠른 급류나 낙수(waterfall)가 없어야 한다. 상류에서 온도차가 많이 나거나 높은 염분 농도의 유입수가 들어와서는 안된다. 두 측정 장치 사이의 단면은 균일하고 직선이고 유속분포도 비슷해야 한다. 하상은 안정되어야 하고, 극히 얇은 하천에 설치하는 피해야 한다.(Herschy, 1985)

3.2 설치지점

본 연구를 위하여 탄천하구부와 괴산지점에 초음파 유량계를 시험 설치하여 운영하고 있다. 설치된 시스템은 유속을 측정하기 위한 초음파 변환기와 수위를 측정하는 부분으로 나누어져 있다. 측정된 유속과 수위값에 따라 순간적인 유량을 계산해 내게 된다. 그림 4와 그림 5는 초음파 유량계를 설치한 탄천 하구부와 괴산지점 전경을 나타낸다.

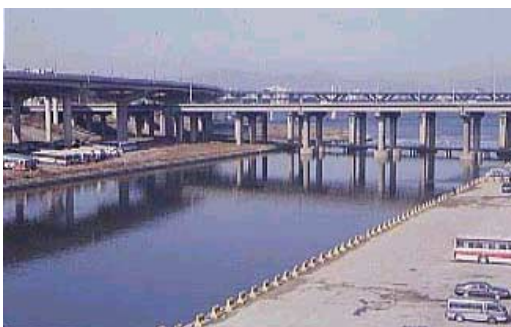


그림 4 설치 지점(탄천 하구부)

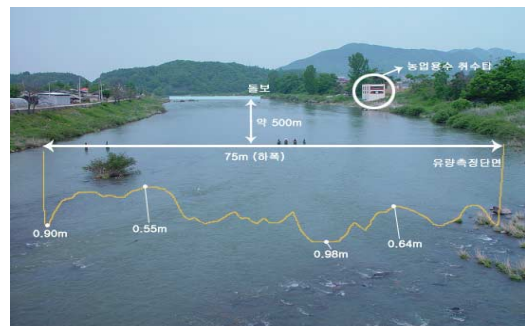


그림 5 설치 지점 (괴산지점)

설치한 시스템은 (주)창민테크에서 개발한 하천용 초음파 수평평균 유속장치(MODEL : UR-200000)이며, 수평 평균 유속 측정오차는 $\pm 0.5\%$ 로 알려져 있다. 그림 6은 초음파 유량계의 설치개념도이다.

4. 초음파 유량측정 시스템에 의한 유량측정

인공개수로가 아닌 자연하천인 경우에 하상변화가 변화가 생긴다. 하상변동은 유량측정 오차 요인이 될 수 있다. 이를

개선할 수 있는 방법으로 주기적인 하천측량이 필요하다. 그림 7은 회전 평균 유속을 이용하여 유량을 산정하는 개념이다.

탄천에서 2003년 상반기 동안 총 8회 유속-면적법에 의한 유량측정을 시행하여, 초음파에 의한 측정결과와 비교 분석하였다. 그리고 괴산댐 지점의 경우 댐방류량 기록과 비교하였다.

4.1 초음파 유량계의 측정 안정성 검토

그림 8은 탄천에 설치되어 있는 초음파 유량계의 측정결과의 예시이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 측정유속은 부유물질 등에 의한 이상치를 포함하고 있다. 그리고 홍수기의 경우 결측이 발생하는 경우가 있는데, 원인으로는 SS와 기포에 의한 음파의 감쇄현상으로 보고되고 있다. 따라서 홍수기 측정을 위해 SS, 기포에 대한 대책 수립이 요구된다.



그림 6 초음파 유속계 설치 개념도

4.2 초음파 유량계의 정확도 검토

초음파 유량계의 정확도를 분석하기 위해 정밀유량측정 결과와 비교하였다. 평수기인 3월 13일 유속-면적법에 의해 측정된 유량 15.6cms에 대하여 유속-면적법 측정시간동안 초음파 측정 평균유량 16.1cms로 상대오차 3.21%를 나타내 비교적 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 4월 25일 유속-면적법에 의해 측정된 유량은 51.0, 45.7cms였으며, 유속-면적법 측정 시간동안 초음파 유량의 평균유량은 54.2, 49.1cms로 측정되어 각각 상대오차(%)는 6.27, 7.46%로 5%의 이상의 상대오차를 나타냈다. 총 8회에 걸쳐 유속-면적법 및 초음파 유속계 측정에 의해 측정된 유량과 유속-면적법에 대한 상대오차를 표 2에 나타냈다. 8회 측정의 상대오차 평균은 4.21%로 5%이하로 나타나 양호한 결과라 할 수 있다. 그림 9는 측정 결과의 산포도를 나타낸 것이다.

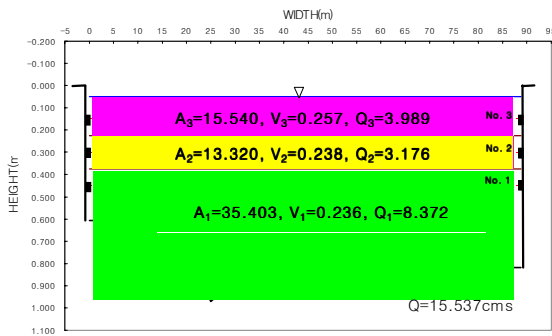


그림 7 초음파 유속계에 의한 유량산정 개념

표 1 유량측정 결과 비교(초음파-유속면적법)

No	초음파법 (cms)	유속 면적법 (cms)	상대 오차 (cms)	유속-면적법에 대한 상대오차 (%)	측정 년월일
1	16.1	15.6	0.5	3.21	2003.3.13
2	22.7	21.3	1.4	6.57	2003.4.21
3	54.2	51.0	3.2	6.27	2003.4.25
4	49.1	45.7	3.4	7.46	2003.4.25
5	54.9	53.6	1.2	2.27	2003.5.7
6	15.7	15.1	0.7	4.31	2003.6.20
7	24.6	23.9	0.8	3.14	2003.6.23
8	22.3	22.2	0.1	0.41	2003.6.23
평균 상대 오차 (%)				4.21	

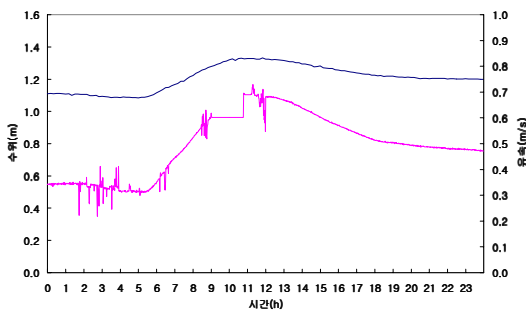


그림 8 초음파 유속계에 의한 측정(2003.04.25)

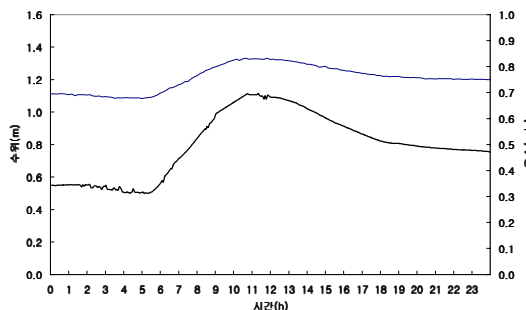


그림 9 이상치·결측치 제거 및 보정후(2003.04.25)

4. 지표유속(Index Velocity)에 의한 유량산정

일반적으로 유량은 수위-유량관계를 통하여 연속적으로 측정된 수위를 유량으로 환산하여 얻을 수 있다. 최근에 자동

유량측정 기법에 의해 연속적인 유속측정이 가능해지면서 수위-유속-유량관계로부터 연속적인 유량을 산정하는 방법이 널리 사용되고 있다. 이러한 방법은 기존 수위-유량관계가 일대일 대응으로 설명될 수 없는 복잡한 흐름에서 유량을 산정하기 위해 개발되었다. 이 방법은 수위에 따른 면적관계로부터 수위에 따른 통수면적을 구하고, 그림 8과 같이 유속-면적법 등에 의해 측정된 평균유속과 초음파에 의해 측정된 지표유속과의 관계를 수립하여 지표유속에 대응하는 평균유속을 산출한다. 유량은 수위에 따른 통수면적과 지표유속으로부터 환산된 평균유속의 곱으로 구할 수 있다.

이 방법은 단일회선에 의한 시스템을 구축할 수 있고, 조석구간이나, 배수영향을 받는 구간에서 활용성이 뛰어나다는 장점을 지니고 있다. 본 연구에서 다회선 시스템에 의해 환산된 유량과 지표유속을 활용하여 단일회선으로 계산한 유량의 상대오차는 2.9%를 나타냈다.

5. 결론

본 연구에서 탄천 및 괴산지점에 초음파 유량 측정시스템을 시험 설치하고 운영 결과를 검토하였다. 시험적용결과 연속적인 유량자료 획득이 가능하였으며, 기존 유속면적법 대비 4.21%의 상대오차를 지니고 있어 기존 방법과 비교적 일치하는 측정결과를 나타냈다. 또한 지표유속을 활용한 단일회선 시스템을 다회선 시스템과 비교한 결과 평균 2.9%의 상대오차를 지니고 있는 것으로 나타났다.

홍수기 측정에 있어 결측 및 이상치가 발생하는 한계를 나타내고 있었는데, 그 원인은 SS나 기포의 영향인 것으로 추정된다. 따라서 홍수기 측정에 많은 주의를 요한다.

초음파 유량 측정 시스템은 직접 유속과 수위를 측정하여 연속유량이 산출되기 때문에 연속유량 산출에 비교적 간편하다고 할 수 있다. 또한 정확도 면에서 기존 유량측정법인 유속-면적법의 불확실도 5%~10%에 비교하여 5% 내외의 정확도 수준을 지니고 있어 정확도 향상을 기대할 수 있다. 경제적인 측면에서도 매년 측정사업에 소요되는 비용과 비교하였을 때 장기적으로는 경제적인 방법이 될 수 있다.

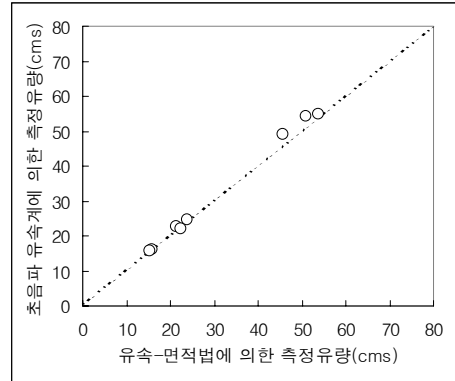


그림 10 유량측정 결과 비교

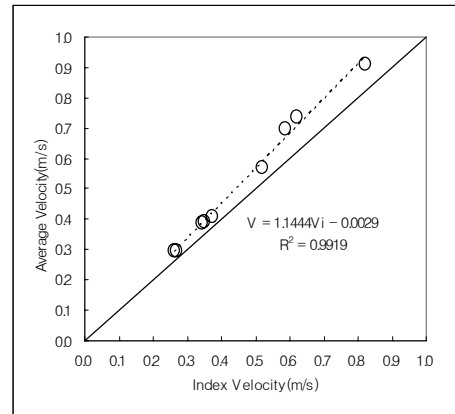


그림 11 평균유속과 지표유속과의 관계

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-1-1)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Rantz and others(1982). Measurement and computation of streamflow : Volume 1. Measurement of stage and discharge, U.S. Geological Survey Water-supply Paper 2175.
- WMO(1980). Manual on stream gauging, Volume 1. Fieldwork, WMO Operational Hydrology Report No. 13.
- 社団法人 全日本建設技術協會(1996) 水文觀測
- Reginald W. Herschy(1985). Streamflow Measurement
- Takeo kinosita(1982). Improvement of ultrasonic flowmeter in rivers in Japan