

전자부자 시스템을 활용한 자연하천의 유속과 유량 측정

Measurement of Velocity and Discharge In Natural Streams with the Electronic Float System

이찬주* · 김 원** · 김치영*** · 김동구****

Lee, Chan Joo · Kim, Won · Kim, Chi Young · Kim, Dong Gu

Abstract

In this study we briefly introduce the electronic float system based on the GPS and RF communication technology and present some field application results. The system is capable of operating 15 floats simultaneously for making discharge measurement. Since the electronic floats (EFs) acquire flow paths, they can improve velocity measurement accuracy up to 10%. Additionally, measured velocities by the EFs show good agreement with those by an ADCP. Relative difference in sub-section area calculated by the electronic and conventional float methods is -79~71% and, due to convergent tendency of floats flowing along near banks, it increases much larger. It is possible to improve accuracy up to 5~6% in making discharge measurement by the electronic floats at site with irregular flow paths and section arrangement. The electronic float system is capable of calculating more accurate velocity and section area using position information based on GPS. By real-time measurement of velocity, cross-section area and discharge, the electronic float system is expected to reduce manpower and improve accuracy, rapidity and efficiency of flood discharge measurements.

Keywords : *electronic float, GPS, RF, velocity, cross-section area, discharge*

요 지

본 연구에서는 GPS와 RF 통신을 이용하여 개발한 전자부자 시스템을 간략하게 설명하고 현장 실측 결과를 분석하고 제시하였다. 개발된 시스템은 15개의 전자부자를 동시에 이용하여 유량측정에 활용할 수 있다. 전자부자는 GPS를 이용하여 실제 유하경로를 측정할 수 있으며, 이를 통해 기존 부자법에 비해 10% 정도의 유속 측정 정확도의 개선이 가능하였다. 또한 ADCP와 유속 측정값을 비교한 결과 대체로 일치하는 결과를 보였다. 전자부자와 일반 부자법에 의해 계산된 소단면별 단면적 차이는 -79~71%에 달하였으며, 특히 부자의 중앙 수렴 경향으로 인해 좌우안 부근의 단면적 차이가 증가하였다. 부자의 유하경로와 단면의 배치가 불규칙한 지점에서 전자부자는 댐 방류량 대비 5~6%의 유량 개선 효과를 가지는 것으로 나타났다. 전자부자는 GPS에 기반한 측위 정보를 제공함으로써 정확한 유속과 단면적 산정이 가능하며, 현장 여건과 관계없이 적은 인력으로 측정과 분석, 유량계산을 신속하게 실시간으로 수행함으로써 홍수 유량측정의 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 전자부자, GPS, RF, 유속, 단면적, 유량

1. 서 론

우리나라는 여름철 집중호우에 의해 급격한 홍수 사상이 많이 발생하고 있다. 이러한 홍수를 제어하고 그로 인한 피해를 예방하기 위해서는 무엇보다 정확한 홍수량의 측정이 필수적이다.

홍수량의 측정은 일반적인 유속과 유량 측정과는 달리 위험하며, 측정시 악천후가 동반되기도 하고, 종종 수위와 유량이 급격하게 변하므로 신속한 측정이 필요하다. 이러한 조건에서는 부자를 이용한 유량측정 기법이 널리 사용되어 왔

다(WMO, 1994). 하지만, 부자 유량측정법은 그 안전성과 편의성에 비해 유량 측정의 불확실도가 크다는 단점을 가지고 있으며(황석환 등, 2006), 측정에 많은 인원이 동원된다. 최근 이에 대한 대안으로 전자과표면유속계(이상호 등, 1997)나 ADCP를 이용한 홍수량 측정 기법(이찬주 등, 2007)이 도입되었다. 이 중 전자과표면유속계를 활용한 방법의 경우 일부 기관을 중심으로 활용되고 있으며, ADCP를 이용한 방법의 경우 아직 일선 현장에서 널리 활용되지는 못하고 있다.

봉부자법의 편리성이나 신속성을 고려할 때, 향후 상당한

*정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 하천 · 해안항만연구실 연구원 (E-mail : c0gnitum@kict.re.kr)

**정회원 · 한국건설기술연구원 하천 · 해안항만연구실 책임연구원 (E-mail : wonkim@kict.re.kr)

***유량조사사업단 연구개발실장 (E-mail : cy_kim@kict.re.kr)

****정회원 · 한국건설기술연구원 하천 · 해안항만연구실 연구원 (E-mail : kimdg@kict.re.kr)

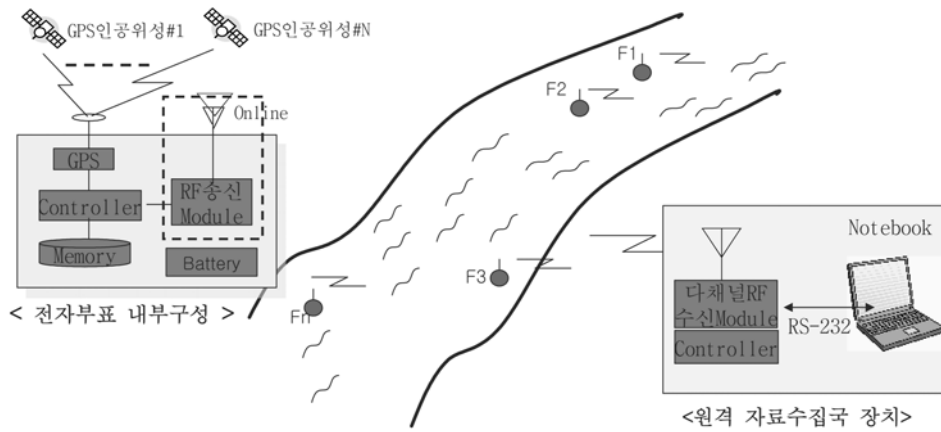


그림 1. 유속과 유량측정을 위한 전자부자 시스템의 개념도 (김치영 등, 2007)

기간 동안 홍수량 측정 기법으로써 계속 활용될 가능성이 높으며, 이에 따라 부자법이 갖는 부정확성을 개선할 방법이 요구되었다. 기존의 부자법은 유하경로를 알 수 없으므로 가정된 직선의 경로를 따라 유속과 단면적을 산정하고 유량을 계산하므로 그로부터 이탈에 따른 단면적과 유속 변화를 반영할 수 없다. 또한 하나의 측정단면이 투하단면이나 상하류의 다른 측정단면과 평행하게 배치되지 않거나 좌우의 기준점이 부정확할 경우 유속계산의 기준이 되는 구간거리가 부정확해지는 문제가 있다. 나아가 측정시에 시준 단면에서 시준자에 의한 오차도 발생할 수 있는데, 특히 야간이나 악천후시에 그 가능성이 높아진다. 이러한 문제점을 배경으로 본 연구에서는 기존 부자법 유량 측정의 단점을 개선하기 위하여 위성측위체계로부터 위치정보를 수신하고, 이를 RF(Radio Frequency) 무선통신을 통해 수신국으로 전달하고 컴퓨터에서 실시간으로 궤적을 계산하여 유속을 측정하는 전자부자 시스템을 개발하였다. 본 논문에서는 전자부자 시스템의 개념과 구성을 설명하고 현장에서 전자부자를 이용하여 유속과 유량을 측정한 결과를 기존의 일반 부자법과 비교하여 제시함으로써 현장 적용성을 검토하고자 한다.

2. 전자부자의 기본 특징

2.1 GPS에 의한 위치 결정

기존 부자법에서는 부자가 미리 가정된 직선 경로를 따라 이동하는 것을 전제하며, 인접한 부자들은 평행하거나 평행에 가깝게 거리를 유지한다는 것을 전제한다. 그러나 실제 하천에서 부자들이 이렇게 유지하는 경우는 극히 드물다. 전자부자는 GPS 위성에 의해 결정되는 절대 측위 정보를 실시간으로 획득하여 유하 경로를 추적함으로써 기존 부자법에서 전제하는 기본 가정이 불필요하므로 유량 계산의 핵심 요소인 유속과 대응 단면적의 정확한 산정이 가능하다.

2.2 실시간 RF 통신

전자부자는 측위 정보를 실시간으로 RF 통신에 의해 관측자에게 전달한다. RF 통신 주파수 대역은 소출력의 424, 433, 447 MHz의 3개 UHF 대역으로 500 m 정도의 통신거리를 갖고 있으며, 전력 소모가 적고 범용성이 뛰어난 뿐만 아니라 악천후나 너울 등에 의한 통신 장애가 적어 유량측정에 적합하다(과학기술부, 2007). 이러한 특성에 전자부자는 일단 투하하기만 하면 회수 여부에 관계없이 유하 경로를 추적할 수 있으므로 홍수시와 같은 악조건에서도 유량 측정에 활용될 수 있으며 관측자가 유하 상황을 감시하면서 보다 정확한 유량 측정을 위한 의사 결정을 내리는데 도움을 줄 수 있다. 이러한 특징은 기존에 외국에서 개발된 GPS 부자(Hopping과 Smith, 2002)나 GPS를 장착한 부표(USGS, 2008)가 측위 정보를 내부메모리에만 저장하기에 실시간 위치 추적이 불가능하고 회수가 곤란한 홍수 흐름 등의 조건에 활용될 수 없다는 점에 비해 개선된 것이다.

2.3 시분할 기법에 의한 다수 부자의 동시 측정

기존의 부자법에서는 한 번에 하나의 부자만을 투하하여 측정하였으므로 시간이 상대적으로 많이 소요되어 측정 시간 동안의 수위, 유량 변화가 큰 경우가 있었으며, 이에 대응하면서 부자 측선 수를 줄이게 되어 불확실도가 증가하는 결과를 낳았다. 이에 비해 본 연구에서 개발한 전자부자는 3개 주파수를 동시에 활용하면서 하나의 주파수당 최대 5개의 부자의 측위 정보를 수집하므로 최대 15개까지의 부자를 동시에 활용할 수 있다는 장점을 가진다. 이는 개별 전자부자가 GPS 위치 정보 중에서 GPRMC(Global Positioning System Recommended Minimum data Code) 코드만을 추출하고 간략화하여 측위 정보를 전송할 뿐만 아니라 5개 전자부자가 상호 교신하면서 수신국에 시분할 방식으로 자료를 전송하기 때문이다(그림 2).

Sequence	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	...
Timing (sec)	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2	5.6	...
Float ID	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	...

그림 2. 시분할 기법에 의한 전자부자의 위치 정보 수집 기법

3. 현장 실험

전자부자를 이용한 유속과 유량 측정 실험은 달천 괴산지

점, 북한강 화천댐 하류의 구만교, 북한강 강촌지점, 남한강 여주지점, 임진강 적성지점 등 총 5개 지점에서 실시되었다. 5개 현장은 모두 대체로 직선형의 하도 형태를 가지고 있으

표 1. 현장 측정 지점의 기본 정보

하천	지점	경위도	측정일시	측정내용	유량조건	비교 유량
달천	괴산	127-50-40, 36-45-51	2007.08.31	유속/유량	홍수유량	댐 방류량
북한강	강촌	127-38-08, 37-48-53	2008.04.15(1)	유속	저수유량	댐 방류량
			2008.04.15(2)	유속/유량		
	구만교	127-47-00, 38-07-00	2008.05.02	유속/유량	저수유량	댐 방류량
			2009.05.07	유속비교		
남한강	여주	127-38-58, 37-17-33	2008.07.24	유속	홍수유량	-
임진강	적성	126-55-15, 37-58-56	2008.07.21	유속/유량	홍수유량	수위-유량관계

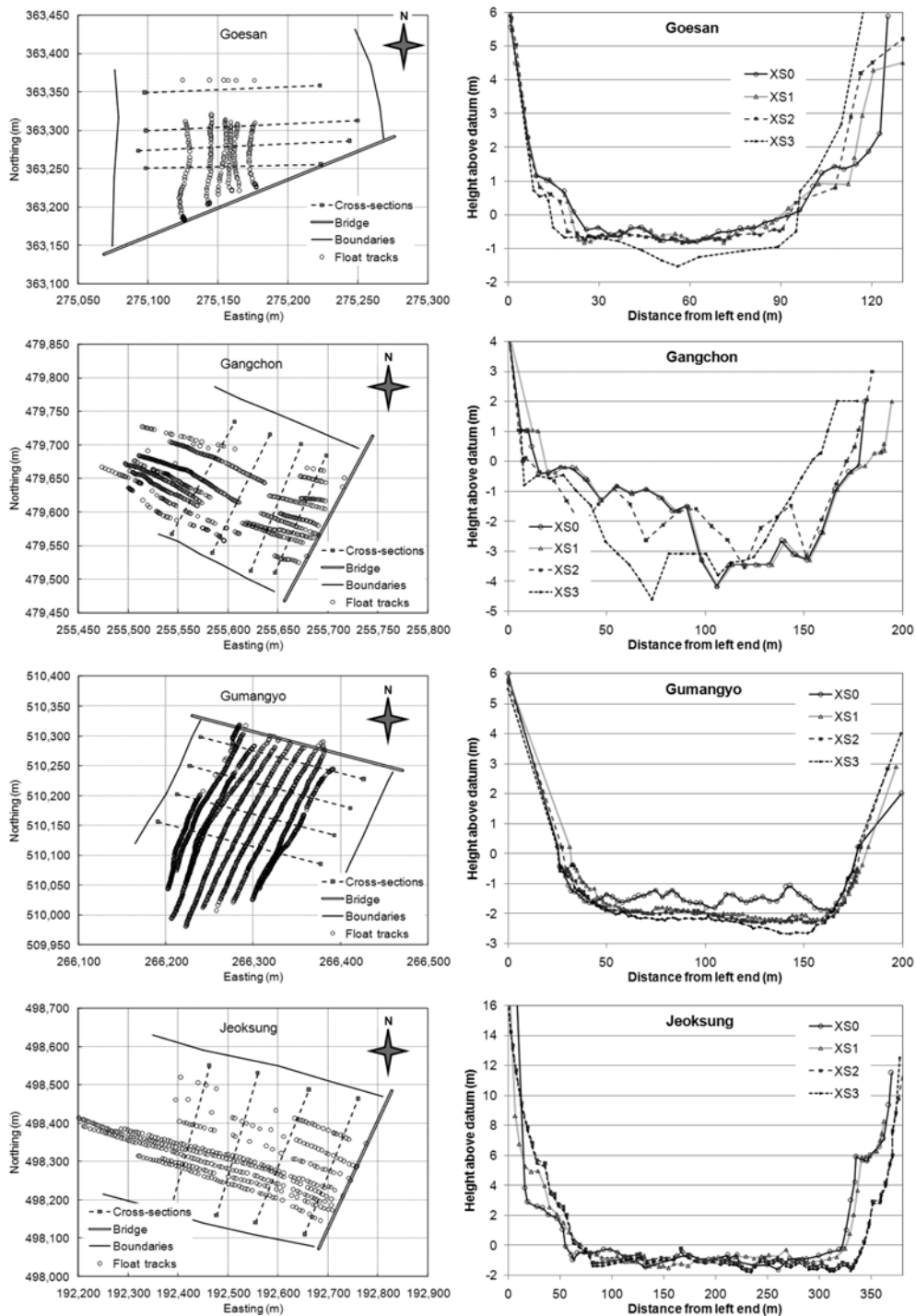


그림 3. 각 지점의 위치, 전자부자의 궤적과 측정 단면

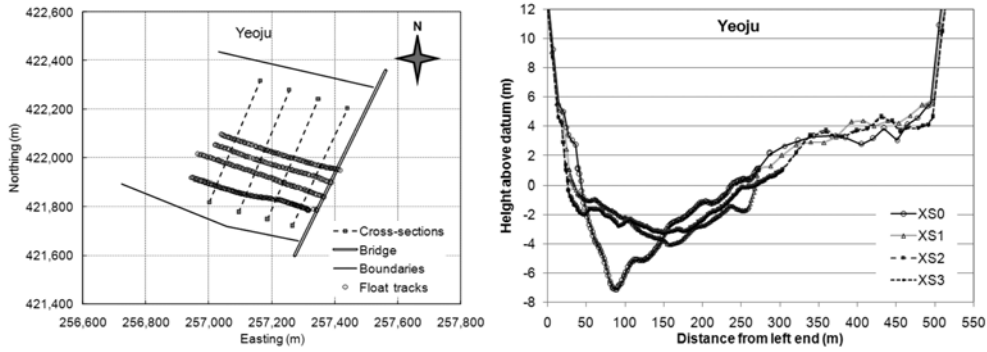


그림 3. 계속

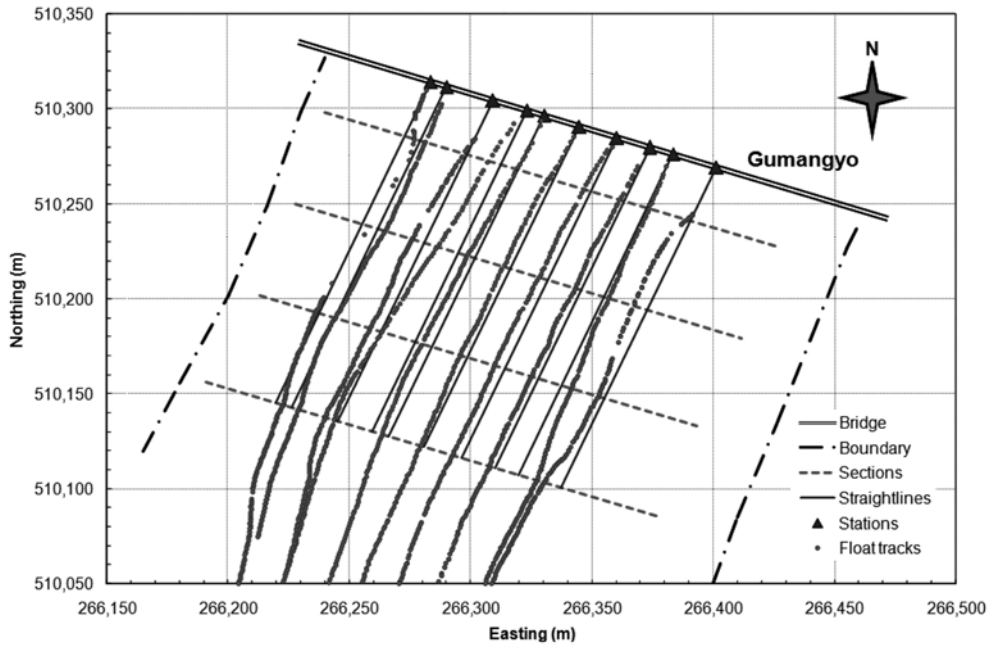


그림 4. 일반 부자법의 가정된 직선과 전자부자로 측정한 실제 경로의 비교(구만교)

며, 부자 유하에 필요한 적절한 흐름을 나타내고 있다. 화천, 강촌 지점에서는 평저수시에 상류에 있는 화천댐, 의암댐의 방류 시점에 맞추어 유량이 일정하기를 기다려 측정하였다. 이 때, 일반적으로 댐 방류가 시작되면 수위와 유량이 변화하며, 측정 지점이 멀수록 유량 비교가 어려운 점을 고려하여 동일한 방류량이 상당한 시간 지속되는 조건에서만 측정을 실시하였다. 또한 바람이 거의 없거나 미약한 조건에서만 측정을 실시하였다. 한편, 괴산, 여주, 적성 지점은 실제 부자를 활용하는 조건과 동일한 조건인 홍수기에 현장 실측을 실시하였다.

그림 3은 현장 실측 지점의 중부원점 TM 좌표상의 위치와 단면을 보여준다. 측정 단면은 좌우안의 경계선 안쪽에서 측량되었다. 전자부자는 각 지점의 상류 교량에서 투하되었으며, 4개 측정단면(0~3단면, XS0~XS3)을 거쳐 하류 방향으로 유하한다. 괴산 지점의 경우 교량이 전체적인 하도의 선형과 비슷하게 놓여 있으며, 측정단면은 주흐름의 방향을 고려하여 배치되었다. 다른 네 개 지점의 경우 전체적인 하도의 형태는 직선형이며, 교량은 주흐름 방향과 대체로 직각을 이루고 있다. 측정단면의 경우 구만교와 여주 지점의 경우 대체로 서로 평행하지만, 강촌과 적성 지점의 경우 다소 평행하지 않아서 좌안 끝점을 기준으로 한 구간거리와 우안 끝점을 기준으로 한 구간거리가 차이가 있다.

단면의 경우 구만교, 적성 지점의 경우 4개 측정단면의 형상이 비슷하면서 넓고 수심이 일정한 형태를 나타내고 있다. 괴산 지점의 경우 우안 쪽에 일부 고수부지가 있으나 대체로 수심이 일정한 형태를 나타내고 있다. 반면에 강촌 지점의 경우 하상에 거석과 암반 노출이 심하여 불규칙한 단면을 나타내고 있으며, 여주 지점의 경우 교량 직하류 0 단면에서는 좌안이 매우 깊은 비대칭 단면을 나타내지만, 하류로 가면서 좌안쪽의 수심이 다소 얕아지는 형태를 나타내고 있다.

그림 4는 북한강 구만교 지점에서 전자부자로 실측한 사례를 일반 부자법과 비교하여 나타낸 것이다. 부자의 투하는 삼각형으로 표시된 교량 위 측선에서 이루어지며, 원형의 점은 전자부자의 궤적을 나타내는데, GPS에 의해 수신된 경위도 좌표를 중부원점의 TM 좌표로 변환하여 도시한 것이다. 이에 비해 하류 방향의 직선은 일반 부자법이 유하할 것으로 가정되는 직선이다. 그림 4에서 전자부자의 유하경로는 직선과 차이를 나타내고 있다. 특히 교량 직하류와 마지막 단면 하류에서의 유하경로는 직선과 방향 상의 차이도 다소 크게 나타난다. 또한, 10개의 전자부자 중에서 하도 중앙을 유하하는 것들은 대체로 직진성이 높은 반면, 좌우안 부근의 부자는 하류로 가면서 하도 중앙으로 점차 수렴되는 특성을 보이고 있다.

4. 유속과 유량 측정

$$v'_{j,j+1} = k \frac{L_{i,j+1}}{\sum \Delta t} s \quad (4)$$

4.1 유속 계산 방법

일반적으로 부자가 하천의 흐름과 동일하게 유하한다는 기본적인 가정에 의하면, 부자의 유하속도에 흘수에 따라 연직 유속분포를 고려하는 보정계수를 곱하면 하천의 연직평균 유속과 같으며 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$v = k \frac{l}{t} \quad (1)$$

여기서 v 는 유속, k 는 수심 대비 부자의 잠김 비율 (immersed ratio)을 나타내는 보정계수(WMO, 1994)로서 0.85~0.96의 값의 범위에 있으며, l 은 상하류 단면에 직각인 유하거리, t 는 시간이다.

전자부자는 GPS에 의해 절대적 측위를 통해 부자의 유속을 계산하며, 유속을 계산하는 방법은 세 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 부자의 경로에 대한 연속적인 측위 정보 중에 단지 두 개만을 사용하여 거리와 시간을 구하는 방법이다.

$$v_i = k \frac{l_i}{\Delta t} = k \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}{t_i - t_{i-1}} \quad (2)$$

여기서 v_i 는 시간의 유속, l_i 는 i 시각의 위치(x_i, y_i)에서 $i-1$ 시각의 위치(x_{i-1}, y_{i-1}) 간의 변위, Δt 는 i 시각과 $i-1$ 시각의 시간차이다. 이렇게 하면 두 측위점을 이동하는 짧은 시간동안의 유속이 얻어진다. 이 방법은 주로 각 측위점에서의 2차원 유속 벡터를 구하려는 목적으로 활용될 수 있다. 두 번째 방법은 단순히 식 (2)를 상하류 측정단면 사이의 구간에 대해 연속적으로 누가하는 방법으로 경로거리를 반영한다.

$$v_{j,j+1} = k \frac{\sum l_i}{\sum \Delta t} \quad (3)$$

세 번째 방법에서는 상하류 단면과 교차하는 두 점만을 이용하여 유속을 계산한다. 이 방법에서 경로는 무시된다.

여기서 $L_{j,j+1}$ 은 두 교차점간의 직선거리이다. 본 연구에서 개발한 전자부자 시스템에서 이 방법은 최소한의 측위점만을 이용하여 유속을 계산하는 방법으로 혹시 발생할지 모르는 위치 정보 손실 가능성에 대비한다.

유량계산을 위해서는 단면에 직각인 유속 성분만이 사용된다. 따라서 위의 방법으로 측정된 유속이 단면에 직각이 아닐 경우 각보정이 필요하다. 흐름 방향이 측정단면과 이루는 각이 큰 경우에 반드시 각보정을 해야 한다. 그런데, 식 (3)에서 매 위치점마다 산정되는 유속을 각보정한 값을 상하류 구간에 대해 누가적으로 적용한 것은 식 (4)에서 상하류 두 단면의 교차점을 이용하여 유속을 구하고 각보정한 것과 원칙상 동일하다. 본 논문에서는 전자부자를 이용하여 유량을 산정하는 것이 주목적이므로 본 논문에서는 식 (4)만을 이용하여 유속을 계산하였다.

4.2 유속 실측 결과

표 2는 2008년에 실측한 4개 지점(구만교, 강촌, 적성, 여주)에서 전자부자와 일반부자로 실측한 99개의 실측자료를 이용하여 거리와 유속을 구간별로 평균하여 나타낸 자료이다. 비교 분석의 편의상 여기서는 흘수에 따른 보정계수를 고려하지 않고 유속을 계산하였는데, 이는 전자부자와 일반부자 비교시 동일한 흘수의 부자를 사용하였기 때문이다. 표 2에서 전자부자의 유속은 유량계산에 적용되는 유속으로서 하류 단면을 기준으로 단면에 직각으로 통과하는 유속성분만을 추출하기 위해 각보정을 적용하여 계산한 것이며, 일반부자의 유속은 각 지점별로 적용된 명목적인 부자법 구간거리를 유하시간으로 나눈 유속이다.

표 2에 따르면, 구만교 지점의 경우 전자부자와 일반부자 사이의 유속차이는 평균 1% 미만으로 대체로 동일하였다.

표 2. 전자부자와 일반부자로 측정된 거리와 유속

지점	구간	거리 (m)						각도 (°)	유속 (m/s)		상대차이 (%)
		유하거리	직선거리	보정거리	좌안기준점 간 거리	우안 기준점 간 거리	명목 구간거리		전자부자	일반부자	
구만교	XS0-XS1	50.49	50.32	50.26	50.84	49.83	50.0	88.4	0.666	0.663	0.5
	XS1-XS2	49.78	49.67	49.60	49.31	49.81	50.0	89.1	0.582	0.587	-0.8
	XS2-XS3	50.73	50.54	50.46	50.34	50.56	50.0	91.0	0.528	0.523	0.9
강촌(1)	XS0-XS1	27.53	27.08	26.79	24.13	30.26	25.0	83.0	1.285	1.200	7.2
	XS1-XS2	38.80	38.65	38.15	47.00	34.19	40.0	80.9	1.040	1.115	-4.6
	XS2-XS3	43.44	43.32	42.93	49.13	40.14	50.0	83.5	1.191	1.390	-14.1
강촌(2)	XS0-XS1	26.58	26.43	26.08	24.13	30.26	25.0	81.8	0.801	0.762	4.3
	XS1-XS2	40.32	40.19	39.69	47.00	34.19	40.0	81.7	0.742	0.760	-0.8
	XS2-XS3	45.31	45.15	44.06	49.13	40.14	50.0	79.2	0.771	0.883	-11.9
적성	XS0-XS1	104.33	104.11	102.32	103.12	101.21	100.0	79.6	3.097	3.026	2.3
	XS1-XS2	94.67	94.45	92.81	80.45	110.72	100.0	79.8	2.837	3.075	-7.2
	XS1-XS2	96.86	96.72	95.12	92.23	98.78	100.0	80.0	3.104	3.267	-4.9
여주	XS0-XS1	89.69	89.42	89.27	83.72	100.25	100.0	87.1	1.836	2.050	-10.7
	XS1-XS2	96.70	96.65	96.28	95.00	99.03	100.0	88.3	1.928	2.001	-3.7
	XS2-XS3	100.72	100.66	100.20	101.24	99.43	100.0	84.8	2.065	2.061	0.2

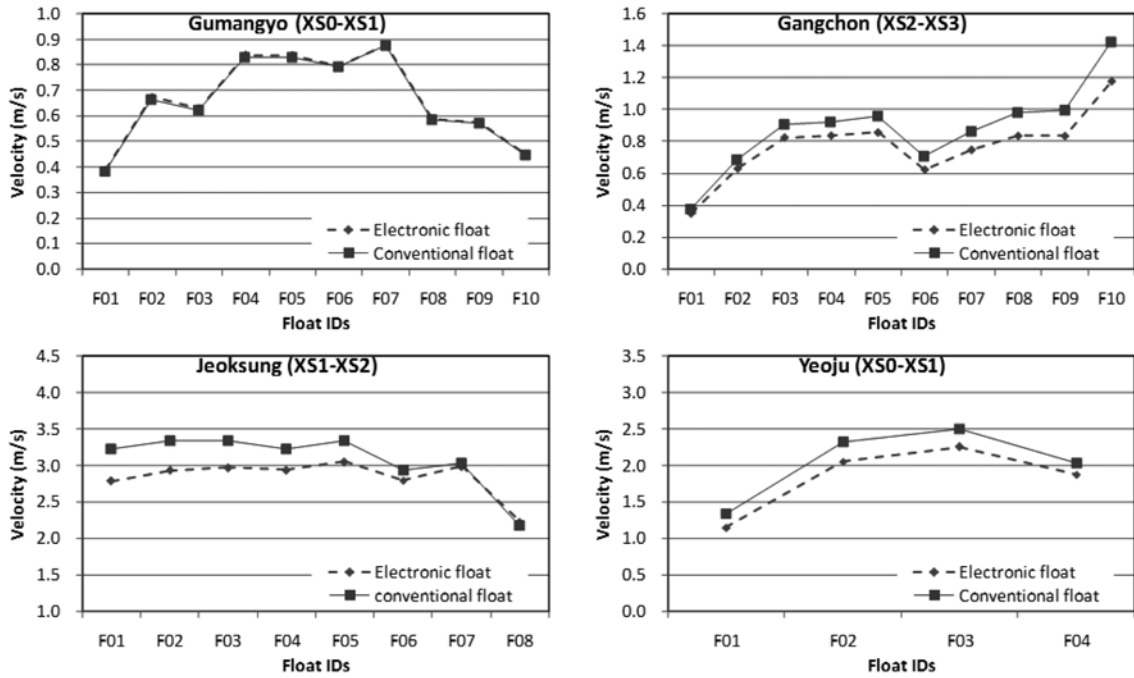


그림 5. 일반부자와 전자부자로 측정된 횡방향 유속 차이

이는 그림 3에서 나타난 것처럼 구만교 지점의 단면 배치 거의 평행할 뿐만 아니라 전자부자로 계산한 거리와 명목적인 부자법 구간거리가 거의 동일하기 때문이다. 이와는 달리 강촌, 적성, 여주 지점의 경우 상하류 측정단면이 서로 평행하지 않고 거리 또한 명목적인 구간거리와 차이가 발생하여 유속 차이가 작게는 0.8%에서 크게는 -14.1%까지 발생하였다. 이는 전자부자가 정확한 측위와 시간 정보를 활용할 경우 현장 조건에 따라서는 일반부자에 비해 10% 정도의 유속 측정 정확도 개선 효과가 있음을 의미한다. 한편, 전자부자의 유속보정에 적용된 각도를 보면, 단면이 평행하면서 대체로 흐름과 직각을 이루고 있는 구만교 지점과 여주 지점의 경우 90도에 가까운 값을 나타내고 있는 반면, 강촌과 적성 지점의 경우 부자의 통과각도가 80도 내외로 나타나 단면 배치가 주흐름과 다소 기울어져 있음을 알 수 있다.

그림 5는 표 2보다 다소 구체적으로 4개 지점에서 전자부자와 일반부자의 횡방향 유속분포 차이를 부자번호에 따라 비교한 것이다. 구만교 지점의 경우 전자부자와 일반부자의 유속차이는 거의 없으나 강촌, 적성, 여주 지점의 경우 전자부자의 유속이 일반부자의 유속에 비해 다소 느리게 나타난다. 이는 위에서도 언급한대로 일반부자법에서 적용한 명목 구간거리가 실측 거리에 비해 다소 길게 산정되었기 때문이다. 한편, 전자부자와 일반부자의 유속차이가 횡방향으로 비슷한 경우인 여주 지점의 경우 단면이 서로 대체로 평행한 조건을 보여주며, 강촌과 적성의 경우 한쪽 하안에서는 전자부자와 일반부자가 유속이 거의 같으나 반대편 하안의 경우 유속 차이가 벌어지는 형태를 나타낸다. 강촌과 적성의 경우 상하류 단면이 평행하지 않고 좌우안의 거리가 다소 다르기 때문에 이러한 결과가 나타난다. 이처럼 단면 배치와 구간거리 관련된 기하학적 차이는 주로 일반부자법에서 구간거리를 측정할 때 현장의 지형조건을 고려하다보니 한쪽 하안에서 측정하거나 또는 정확하게 하천의 선형을 반영하여 거리를 측정하지 못하기 때문으로 풀이된다. 이에 비해 전자

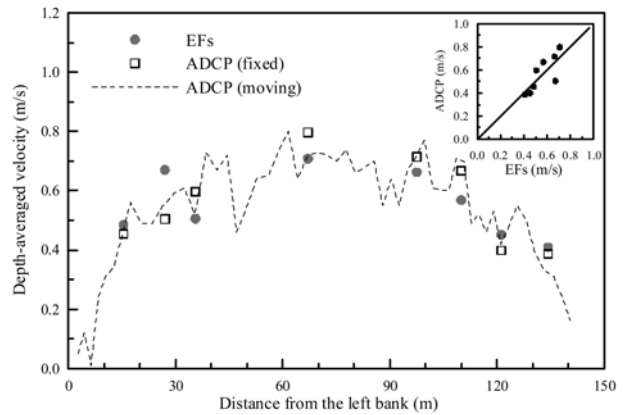


그림 6. 전자부자와 ADCP로 측정된 유속의 비교

부자는 부자의 경로와 단면 배치에 대한 정확한 기하학적 계산을 통해 거리를 산정하므로 단면 배치가 평행하지 않더라도 정확한 유속을 산정할 수 있으며, 이를 통해 평행하지 않거나 기존 부자법의 거리가 부정확한 경우에도 정확한 유속측정이 가능하다는 것을 의미한다.

그림 6은 구만교 하류 약 50 m 지점에 위치한 기준 단면에서 전자부자와 ADCP를 이용하여 동시에 유속을 측정할 결과를 나타낸다. 전자부자로 측정된 유속이 매 지점에서 순간적인 점을 고려하여 기준 단면을 통과하기 전후로 5초씩의 유속을 평균하여 유속값으로 정하였다. ADCP는 정지측정법과 이동측정법으로 측정하였는데, 정지측정법은 부자의 궤적과 기준 단면이 만나는 점에서 40초 측정된 평균값이며, 이동측정법은 기준 단면을 따라 횡단하면서 측정된 결과로서 순간적인 유속 특성을 잘 보여주고 있다. 그림 6의 결과는 좌안으로부터 약 29 m 지점에서 전자부자 유속이 ADCP에 비해 다소 크게 산정된 것을 제외하고는 ADCP의 정지측정법 및 이동측정법 유속과 대체로 일치함을 나타낸다. 이 결과를 통해 전자부자가 기존 부자법에 비해 유속의 개선 효과가 있을 뿐만 아니라 다른 측정 방법과 비교하여

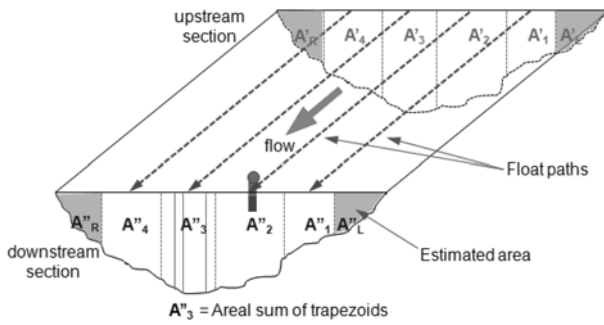


그림 7. 부자법의 단면적 계산 방법 (ISO(1997)에서 수정)

도 비교적 정확한 유속값을 제공한다는 것을 알 수 있다.

덧붙여, 일반부자법에서는 사람이 직접 단면을 시준하여 부자의 통과 여부를 결정하므로 시준상의 오차도 발생할 가능성이 있고, 이는 특히 악천후와 야간에 심해질 수 있다. 이에 비해 전자부자는 시준상의 오차 역시 미연에 방지함으로써 불확실성을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

4.3 단면적 측정

일반적으로 기존 부자법에서는 유하단면적을 산정할 때, 홍수 전후에 측량을 통해 수립한 측정 단면을 부자 측선별로 분할하여 계산하는 방법을 사용한다(그림 7).

$$A_i = \frac{A'_i + A''_i}{2} \quad (5)$$

이 때 개별 부자는 직선으로 유하한다고 가정하므로 부자의 소단면폭은 투하지점에서 결정한 소단면폭과 같거나 같은 비율로 증감하며, 유하단면적은 식 (5)와 같이 상하류 대응단면의 평균 면적으로 계산한다. 그리고 각 단면의 면적은 측량점을 이용하여 사다리꼴의 면적을 합산함으로써 구한다. 이에 비해 전자부자법의 경우 대응단면적 산정시 초기의 투하지점에서의 소단면폭을 적용할 필요가 없으며 각 단면의 통과시 인접한 좌우의 부자 위치에 의해 결정되는 소단면폭을 활용하여 단면적을 계산한다.

본 연구에서는 좌우안 부근의 한계를 명확하게 나타낼 수

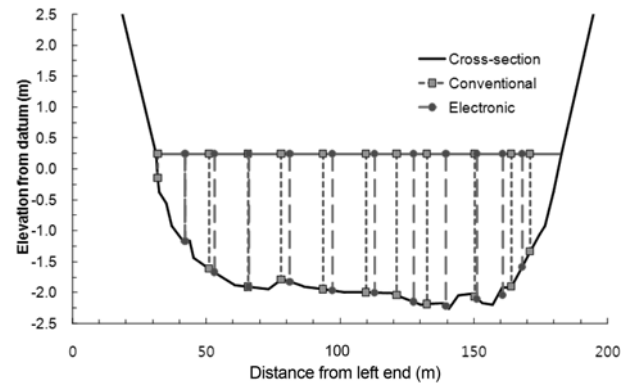


그림 8. 측정단면에서 개별 부자에 대응하는 소단면의 공간적 차이

있도록 유속 측선이 단면 중앙에 위치하도록 하는 중간단면적법을 택하여 대응단면적을 계산하였다(Herschy, 1999). 이로 인해 기존 부자법과는 달리 좌우안에 A'_L, A''_L, A'_R, A''_R 등의 단면적이 추가로 생기는데, 이는 하도 좌우안 부근에 중심이 얇고 장애물이 많아 부자 투하를 할 수 없는 구간이다. 유속계를 이용한 유량 측정에서는 가급적 하안에 가까운 곳에서 유속 측정을 실시할 수 있으므로 이 구역의 영향이 미미한 반면, 부자법에서는 이를 적절히 고려해 주어야 한다. 따라서 본 연구에서는 하안 부근 구역의 면적을 단면 측량 자료를 이용하여 정확하게 계산하였다.

표 3은 구만교 지점에서 일반 부자법과 전자부자법에 의해 계산한 소단면별 유하단면적을 보여주며, 그림 8은 역시 구만교 지점의 1단면(누가거리 80 m)에서 두 방법에 의해 계산한 유하단면적이 공간적 차이를 나타낸다. 각 단면에서 소단면의 합산 단면적은 같지만, 개별 부자에 적용되는 단면적의 경우 -79~71%로 부자의 이동에 따라 계산 단면적의 공간적인 차이가 크게 발생하였다. 이러한 차이는 부자의 위치가 가정된 직선에서 더 많이 이탈할수록 커지고 있다.

앞서 그림 4에서 보여지듯이 좌우안 부근의 부자는 하류 쪽으로 이동하면서 점차 하도 중앙으로 수렴하는 경향이 관찰되며, 다른 지점에서도 유사한 경향이 나타났다. 이러한 부자의 중앙 집중 경향으로 인해 직접 부자에 의해 측정되지 않는 좌우안 부근에서의 면적이 점차 증가하는 특징을 보이

표 3. 각 측정단면에서 개별 부자 ID에 대응하는 단면적 (구만교)

측정 단면	부자 유형	부자 ID										좌안 부근	우안 부근	합계
		F01	F02	F03	F04	F05	F06	F07	F08	F09	F10			
XS0 (30 m)	일반	31.3	25.6	20.0	25.2	31.2	19.9	20.2	28.3	26.0	14.5	2.2	10.2	254.6
	전자	28.4	25.8	23.0	26.2	28.7	22.9	20.8	21.7	19.9	10.8	5.6	20.8	254.6
	차이 (%)	-9	1	15	4	-8	15	3	-23	-23	-26	155	104	0
XS1 (80 m)	일반	25.6	29.9	26.6	33.1	35.8	26.1	26.9	42.0	31.8	13.2	0.1	11.3	302.4
	전자	18.6	26.6	32.7	34.3	35.4	33.3	29.5	27.1	23.1	15.0	10.8	16.5	302.4
	차이 (%)	-27	-11	23	4	-1	28	10	-35	-27	13	10739	47	0
XS2 (130 m)	일반	31.1	31.2	27.4	33.9	36.9	28.0	28.4	44.1	34.0	15.5	2.2	10.1	322.7
	전자	21.3	31.1	37.6	34.3	37.6	42.6	28.6	25.5	29.7	17.8	10.1	6.5	322.7
	차이 (%)	-31	0	37	1	2	52	1	-42	-13	15	367	-36	0
XS3 (180 m)	일반	34.5	33.3	29.9	37.6	38.9	29.6	30.9	50.9	35.2	11.4	7.4	3.4	343.0
	전자	7.2	26.9	44.6	36.9	37.9	50.6	36.0	22.5	24.2	14.1	33.9	8.2	343.0
	차이 (%)	-79	-19	49	-2	-3	71	17	-56	-31	24	361	137	0

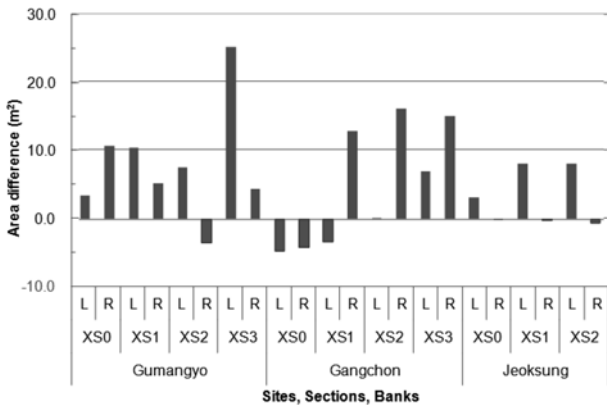


그림 9. 일반부자와 전자부자로 계산한 좌우안 부근 소단면의 차이

게 된다. 그림 9는 좌우안 부근까지 부자 측정이 이루어진 3개 지점에서 일반 부자법과 전자부자법에 의해 계산된 좌우안 구역의 차이를 보여준다. 구만교와 강촌 지점의 경우 하류로 가면서 부자가 점차 중앙으로 수렴되므로 유량 추정이 필요한 좌우안 구역 면적이 대체로 증가하고 있다. 특히 2-3단면 사이에서 1번 부자의 중앙 수렴이 급격했던 구만교 지점 좌안의 경우 단면적이 크게 증가하였다. 적성 지점의 경우 유량 산정 구간 내에서의 부자의 수렴이 거의 관찰되지 않았는데, 이에 따라 좌안 부근은 단면적이 약간 다소 증가하였고, 우안은 거의 동일한 것으로 나타났다.

기존 부자법이 미리 가정된 직선경로를 토대로 단면적을 계산하므로 유하경로가 가정과 달라질 때에 발생하는 유량의 편중이나 좌우안 부근 유량의 부정확한 추정을 고려할 수 없는데 비해 전자부자는 이러한 문제를 해결할 수 있다는 장점을 가진다. 또한 황석환 등(2006)이 지적하였던 부자법 적용시의 단면적 배치에 관한 문제도 근본적으로 해결된다.

4.4 유량 계산

부자를 이용한 유량 계산법은 근본적으로는 유속계를 이용할 때의 계산법과 동일하다. 다만, 부자의 특성상 자연하천의 불규칙한 좌우 하안 가까운 곳에서는 유속 측정이 불가능하므로 이 영역에 대한 유량을 추정하는 일이 필요하다. 본 연구에서는 하안에 인접한 미측정 구역에서의 유량을 추정할 때 사용하는 Fulford와 Sauer(1986)의 비율내삽법의 개념을 부자법에 응용하여 식 (6)을 제시하였으며, 이 때, 좌우안 부근의 단면적을 삼각형으로 가정하지 않고 실측 단면적으로 계산하였다.

$$Q_L = k_L V_1 \frac{A'_L + A''_L}{2}, Q_R = k_R V_n \frac{A'_R + A''_R}{2} \quad (6)$$

여기서, Q_L 과 Q_R 은 각각 좌우안의 유량 추정값이고 k_L 과 k_R 은 유속계수, V_1 과 V_n 은 각각 좌안과 우안 부근의 유효

부자유속이다. 전자부자 시스템에서는 측정과 동시에 유량이 계산될 수 있도록 좌우안의 유량을 추정하기 위한 유속계수를 미리 입력하는데, 본 연구에서는 k_L 과 k_R 의 기본값으로 0.707을 적용하였다(Simpson, 2001). 이는 측정된 5개 지점의 하도 선형이 대체로 직선이고 단면에 사수역이 없으므로 흐름이 정상적이기 때문이다. 다만, 다른 지점에 적용할 경우 현장 여건과 흐름 조건을 고려하여 계수를 적용할 필요가 있다.

전체 단면에 대한 기존 부자법과 전자부자법 측정이 이루어진 4개 지점에 대해 유량이 계산되었다(표 4). 여주 지점의 경우 전체 하폭에 대한 측정이 이루어지지 못하여 유량 비교에서는 제외되었다. 괴산 지점과 강촌 지점의 경우 댐 방류량과 비교했을 때, 일반 부자법에 비해 전자부자법에 의해 산정된 유량이 상대 차이가 작아 전자부자를 활용할 경우 정확도의 개선효과가 뚜렷한 것으로 나타났다. 또한 괴산과 구만교 지점의 경우 전자부자로 측정한 유량이 댐 방류량과 비교하여 1~3%의 상대 차이만을 보여 비교적 유량을 정확하게 산정하는 것으로 나타났다. 적성 지점에서는 다른 측정 방법으로 비교가 곤란하여 2007년에 수립한 수위-유량 관계로 계산한 유량과 비교하였는데, 상대 차이가 2% 정도로 작게 나타났다. 구만교와 적성 지점은 괴산, 강촌 지점에 비해 단면의 배치와 형태, 하도의 선형과 유속분포가 대체로 균일하여 기존 부자법과 유량이 거의 같게 산정되었다. 하지만, 유량 측정 지점 중에 불가피하게 만곡이 있거나 흐름의 편중이 발생하는 조건이 있는 곳에서 전자부자를 적용한다면, 유하경로의 추적을 통해 유량을 보다 정확하게 산정할 수도 있을 것으로 예상된다.

5. 요약과 결론

이 글에서는 GPS와 RF 통신을 이용하여 개발한 전자부자 시스템을 간략하게 설명하고 국내의 다섯 지점의 자연하천에서 전자부자를 이용하여 유속과 유량을 실측한 결과를 일반 부자법과 비교하여 분석하였다. 본 논문을 요약하면 다음과 같다.

1. 전자부자는 일반 부자법에서 가정되는 직선 유하경로와는 달리 GPS에 의해 실제 유하경로를 측정할 수 있는 것으로 나타났다.
2. GPS에 의해 정확한 측위와 시간 정보를 활용할 경우, 전자부자는 일반 부자법과 비교하여 현장 조건에 따라 대략 10% 정도의 유속 측정 개선이 가능함을 보여주었다. 또한 전자부자로 측정한 유속을 ADCP로 측정한 유속과 비교한 결과 대체로 일치하는 것을 알 수 있었다.
3. 전자부자와 일반 부자법에 의해 계산한 소단면별 유하단

표 4. 전자부자법, 일반부자법으로 측정된 유량과 참고 유량의 비교 결과

측정 일자	지점	측정 유량 (m³/s)		상대차이 (%)		참고값	
		전자부자	일반부자	전자부자	일반부자	유량(m³/s)	유형
2007. 8. 31.	괴산	64.8	68.1	2.86	8.10	63.0	댐 방류량
2008. 4. 15.	강촌	317.8	332.7	15.10	20.50	276.1	댐 방류량
2008. 5. 2.	구만교	155.1	155.7	0.71	1.10	154.0	댐 방류량
2008. 7. 21.	적성	2,702.6	2,698.8	1.76	1.61	2,656.0	수위-유량관계

면적 차이는 -79~71%에 달해 실제 유하경로와 직선 경로를 가정할 때의 차이를 크게 보여주었다. 특히 좌우안 부근의 경우 부지의 중앙 수렴 경향이 발생할 경우 전자 부지와 일반 부지법의 단면적 차이가 더 크게 벌어졌다.

4. 전자부지와 일반 부지법으로 유량을 계산한 결과를 댐 방류량이나 수위-유량관계로 계산한 유량과 비교하였다. 부지의 유하경로와 단면 배치가 다소 불규칙한 지점의 경우 일반 부지법에 비해 댐 방류량 대비 상대오차가 5~6% 적게 나타나, 유량 산정의 개선이 가능함을 보여주었다.

전자부지는 일반 부지법이 제공할 수 없는 측위 정보를 제공함으로써 보다 정확한 유속 및 단면적의 산정이 가능하다. 뿐만 아니라 현장의 여건과 관계없이 적은 인력만으로 측정과 유하경로 정보의 수집 및 분석을 실시간으로 수행함으로써 홍수 유량측정의 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 다만 현 시점에서 전자부지를 1회용으로 사용하기에는 제작비용이 다소 높으므로 인력이 적고 긴급한 측정이 필요한 조건에서 활용하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

감사의 글

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

참고문헌

과학기술부(2007) 지표수 조사 시스템 적용(21세기 프론티어연구 개발사업 수자원의지속적 확보기술개발 사업-) 2단계 최종보

고서.

김치영, 김원, 김동구, 이찬주(2007) 전자부지 개발, 2007년 한국수자원학회 학술발표회논문집, 한국수자원학회, pp. 508-512.

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

이찬주, 김원, 김치영, 김동구(2007) ADCP 정지측정법을 이용한 유량 측정, 2007년 대한토목학회 학술발표회논문집(CD-ROM), 대한토목학회.

황석환, 김치영, 정성원, 김원(2006) 부지측정에 의한 유량산정방법 개선, 2006년 한국수자원학회 학술발표회논문집, 한국수자원학회, pp. 852-857.

Herschy, R.W. (1999) Flow measurement, In: Herschy, R. W.(ed.), *Hydrometry: principles and practices*, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York, pp. 9-84.

Hopping, P.N. and Smith, B.T. (2002) Measurement of flow patterns using GPS Drogues, *Conference Proceedings of Hydraulic measurement and experimental method 2002* (CD-ROM).

International Organization for Standardization (1997) *Measurement of liquid flow in open channels-Velocity-area methods* (ISO 748), 42p.

Fulford, J.M. and Sauer, V.B. (1986) Comparison of velocity interpolation methods for computing open-channel discharge, In: Subitsky, S.Y.(Ed.), *Selected papers in the hydrologic sciences*: USGS Water Supply Paper 2290, 154p.

Simpson, M.R. (2001) *Discharge measurements using a broadband acoustic doppler current profiler*, US Geological Survey Open-File Report 01-1.

World Meteorological Organization (1994) *Guide to hydrological practices*, WMO-No. 168.

USGS (2008) <http://or.water.usgs.gov/hydro21/index.shtml>

(접수일: 2008.12.19/심사일: 2009.2.9/심사완료일: 2009.6.4)