ADCP 정지측정법을 이용한 유량 측정

이 찬 주 |
한국건설기술연구원 수자원환경연구본부
하천해안항만연구실 연구원
c0gnitum@kict.re.kr

김 용 전 |
한국건설기술연구원 수자원환경연구본부
하천해안항만연구실 연구원
wasu3ri@kict.re.kr

김 동 구 |
한국건설기술연구원 수자원환경연구본부
하천해안항만연구실 연구원
kimdg@kict.re.kr

김 원 |
한국건설기술연구원 수자원환경연구본부
하천해안항만연구실 책임연구원
wonkim@kict.re.kr

1. 서론

ADCP는 하천을 횡단하면서 단면 전체에 대해 유속과 유량을 실시간으로 편리하게 측정할 수 있는 장비로서 국내에서도 점차 사용이 증가하고 있다. ADCP를 이용한 유량 측정 방법은 크게 이동측정법(moving-vessel method)과 정지측정법(fixed-vessel/stationary method)으로 구분된다. 그 중에 정지측정법은 ADCP의 연직유속분포 측정 기능과 유속면적법의 유량 계산 방법을 결합한 방법이다. 즉, ADCP를 일정한 위치(측선)에 일정시간 고정시킨 상태에서 유속을 측정하고 이를 단면적과 곱하여 유량을 계산한다.

정지측정법은 유량 측정 방법으로서 여러 장점을 가지고 있다. ADCP는 측정 중에 수면 위의 일정한 위치에 고정된 상태로 최소 수 십 초 동안 유속 분포를 측정하므로 저유속부터 고유속까지의 넓은 범위에서 신속하면서도 정확한 측정을 할 수 있다. 또한 유속면적법에 대해 적용하는 불확실도 계산법을 준용할 수 있으므로 계량적인 품질관리가 가능하다. 이동측정법과는 달리 사람이 직접 보트를 타고 하천에 들어갈 필요가 없고, 우리나라 하천에 많은 교량을 이용하므로 안전하고 편리한 측정이 가능하다. 이로 인해 평저수시 뿐만 아니라 홍수시에도 유속계를 이용하여 측정하는 것 이상의 정확도로 유량 측정이 가능하다.

이 글에서는 이러한 장점을 가진 ADCP 정지측정법에 대해 그 개념과 적용 방법을 간략히 설명하고, 2005~2009년의 기간 동안 괴산댐 하류 달천과 임진강 적성지점에서 실측한 사례를 제시함으로써 유량 측정 방법으로서의 적용 가능성과 유용성

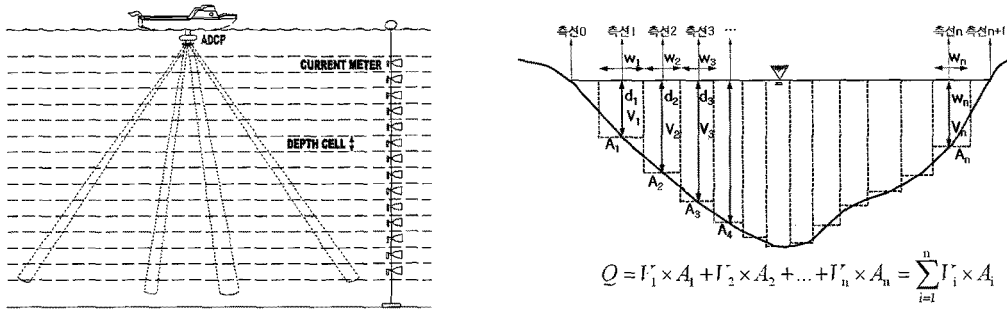


그림 1. ADCP 정지측정법의 두 가지 요소: 연직유속분포 측정(좌), 유속면적법(우)

을 살펴보고자 한다.

2. ADCP 정지측정법의 개념

ADCP 정지측정법은 ADCP의 연직유속분포 측정 기능과 가장 기본적인 유량 측정 방법인 유속면적법을 결합시킨 방법이다(그림 1).

먼저 유속면적법을 간단히 설명하면, 하천을 여러 개의 소단면으로 분할하고 각 소단면에서 측정된 평균유속과 단면적을 곱하여 유량을 계산한 후, 이를 합산하여 유량을 구하는 방법이다. 따라서, 유속면적법은 수면폭, 수심, 평균유속 등 세 가지 측정 요소로 구성된다. 우리나라에서 채택하고 있는 중간단면적법(mid-section method)에 따르면, 수심과 평균유속은 소단면의 대표 위치인 측선에서 측정되며, 수면폭은 인접한 두 측선의 거리에 의해 계산된다.

ADCP 정지측정법은 유속면적법의 세 가지 측정 요소 중에 수심과 평균유속을 ADCP를 이용하여 동시에 측정한다. 수심의 경우 ADCP는 초음파를 수중으로 송신하고 강바닥에 부딪쳐 돌아오는 반사파를 판독하여 측정한다. 평균유속의 경우 유속면적법에서는 측선에서 일반 유속계를 물속에 담가 보통 1~3개의 측점(point)에서 점유속을 측정하고 이를 평균하여 구하지만, 정지측정법에서는 수면 위에 떠 있는 ADCP에 의해 연직유속분포를 측정하고 이를 통해 평균유속을 구한다는 점이 다르다. 그런데, 1~3개의 측점에서 점유속을 측정하고 이를 평균유속으로 환산하는 방법은 하천 흐름이 가지는 연직유속분포에 대한 가정을 기초로 한다는 점에서 ADCP는 이러한 가정이 부합하지 않는 흐름 조건에서도 정확한 평균유속의 측정이 가능하다. 다만, ADCP가 직접 측정할 수 없는 수면과 하상 부근의 유속은 실측된 유속을 이용하여 외삽한다.

3. ADCP 정지측정법의 적용 실제

■ 적용 절차

ADCP 정지측정법을 적용하는 절차는 일반적인 유량 측정의 절차와 비슷하지만, 유선으로 연결되는 유속계 대신 무선통신을 이용하는 ADCP를 사용하므로 그에 맞는 설정이 필요하다. 대략적인 정지측정법의 절차는 다음과 같다.

① 측정 단면(횡측선 또는 교량)의 결정
② 대상 하천의 수심에 맞는 주파수를 갖는 ADCP 선택
③ 유속을 고려하여 플랫폼을 선정하고 ADCP를 장착
④ ADCP와 컴퓨터(또는 PDA)간의 무선통신 연결
⑤ 자료 취득 소프트웨어의 가동
⑥ 측선별 유량측정 실시
⑦ 유량측정 결과의 검토 및 확인

■ 자료 취득 소프트웨어

ADCP 정지측정법을 이용한 유량 측정은 두 가지 방법으로 수행할 수 있다. 그 하나는정지측정법 전용 자료 취득 소프트웨어를 사용하는 방법으로 전용 소프트웨어가 제시하는 단계를 따라 측정 조건과 관계된 방위각, 잠김깊이, 수면-하상 부근의 외삽 방법 등 ADCP 설정 과정을 진행하고 측선별로 유량을 측정하면 된다. 전용 소프트웨어는 유속면적법의 유량 계산법을 토대로 개발되어 유속면적법에 익숙한 기존 측정자들에게는 이해가 쉽고, 매측선별로 유량이 계산되므로 단면 전체에 대하여 예상되는 유량과 비교하여 몇 %의 유량비로 측정하고 있는지를 바로 확인할 수 있어서 등유량 기준을 준수하기가 용이하다. 게다가 일부 소프트웨어에서는 유속면적법을 기준으로 한 불확실도를 산정하는 기능이 포함되어 있어 품질관리에도 용이하다. 현재 PC에서 사용 가능한 정지측정법 전용 소프트웨어는 RiverSurveyor:Stationary-Measurement와 WinriverⅡ가 있으며, PDA용은 저수심용 소형 ADCP인 StreamPro를 위한 Section-by-Section 소프트웨어를 활용한다. 정지측정법 전용 소프트웨어가 없을 경우, ADCP 이동측정법용 소프트웨어를 사용하여 현장에서 연속적인 연직유속분포를 측정한 후 별도의 후처리 과정을 통해 직접 유량을 계산한다. 이 방법을 사용할 경우 반드시 현장에서 방위각을 측정하여 측정 단면에 직각인 유속으로 변환하여야 한다.

■ 적용시 주의사항

ADCP 정지측정법으로 유량을 측정할 경우에도 일반적인 유량 측정에 요구되는 주의사항을 준수하는 것이 바람직하다. 특히 매끄럽고 적절한 단면의 선정은 유량 측정의 정확도를 높이고 불필요한 오차를 줄이는데 중요하다. 수심의 변화가 급격하고 하상이 불규칙한 단면의 경우 단면적 계산이 부정확해 질 수 있다. 정지측정법이 교량에서 시행될 경우 항상 양호한 단면을 얻는 것이 아니므로 최선의 단면을 택해야 하며, 특히 와류나 교각 하류에 발생하는 후류는 반드시 피하여 측정해야 한다.

ADCP 정지측정법과 관련된 주요한 주의사항은 다음과 같다.

적절한 주파수의 ADCP 사용 : 이동측정법과 마찬가지로 정지측정법을 적용할 경우에도 대상 하천의 최대 수심 이상까지 측정할 수 있는 주파수의 ADCP를 사용해야 한다. 그렇지 않으면 유속 측정뿐만 아니라 수심 측정이 불가능하여 정확한 유량 계산이 불가능해 진다. 특히 홍수시에는 하상의 탁도가 높아 음파의 감쇄가 심하므로 측정 가능한 수심이 평저수시에 비해 감소한다. 홍수시 ADCP가 수심을 측정하지 못할 경우를 대비하여 미리 측량을 통해 각 측선의 수심을 대략 정하는 방법도 있다.

방위각의 정확한 입력 : 정지측정법에서는 유량

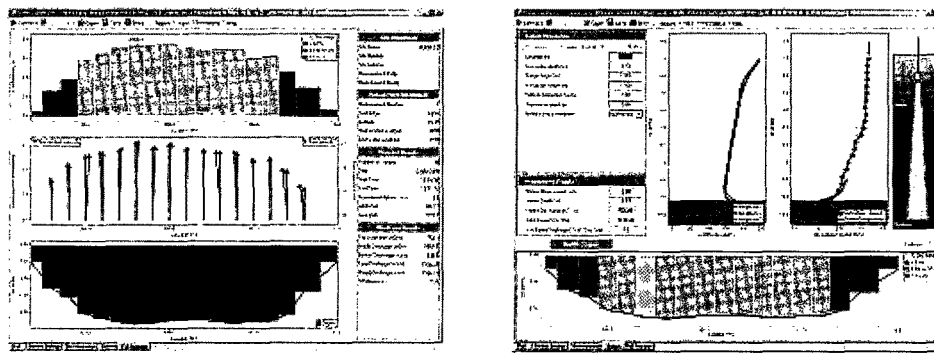


그림 2. PC용 ADCP 정지측정법 전용 소프트웨어

계산을 위해 측정 단면에 직각 방향의 유속이 측정되어야 한다. 이를 위해서는 측정 단면을 주흐름에 직각이 되도록 설정하고 방위각(azimuth)을 결정한다. 정지측정법에서의 방위각은 측정 단면을 좌안으로부터 우안 방향으로 선을 그을 때 ADCP 나침반의 자북과 이루는 각을 의미한다. 방위각은 현장에서 ADCP의 나침반 보정과 함께 실측하여 입력하여야 한다. 방위각 입력의 오차는 유속 및 유량 측정 오차와 직결되므로 ADCP로 현장에서 정확하게 측정해서 입력해야 한다.

적절한 플랫폼의 선택 : 홍수시에는 유속이 빠르고 수면의 요동이 심하다. 정확한 측정을 위해서는 ADCP가 수면 아래로 적절하게 잠긴 상태를 유지해야 한다. 이를 위해 수면의 최대 유속을 견딜 수 있는 ADCP 플랫폼의 선정이 중요하다(Rehmel 등, 2003, 그림 3). ADCP 자체는 최대 10m/s 정도의 유속을 측정할 수 있으므로 적절한 플랫폼의 사용은 ADCP의 적용 유속 한계를 결정짓는 중요한 요인이 될 수 있다. 어떤 플랫폼은 2m/s 이상의 유속에서 부침을 반복하여 ADCP가 물속에 정상적으로 잠기지 못할 수가 있다. 만일 ADCP가 물속으로 적절하게 잠기지 않으면 ADCP 주변에 공동현상이 발생하고 기포가 생기면서 음파 신호가 정상적으로 인식되지 않으므로 유속의 측정이 불가능해진다. 그러므로 홍수시에는 평저수시와는 달리 빠른 유속을 견디면서 안정된 상태를 유지할 수 있는 플랫폼의 사용이 필수적이다. 또한 유속이 빠를 경우 흐름에 직접 마주치는 플랫폼의 앞부분이 들리는 경우가 있을 수 있으므로 ADCP를 지지하는 줄의 중간 부분에 추 등을 매달아 주는 것이 좋다.

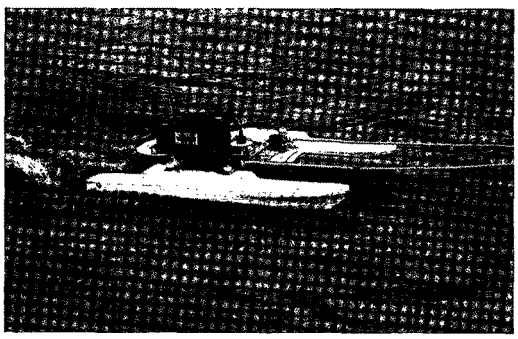


그림 3. 빠른 유속에 안정적으로 견딜 수 있는 ADCP 플랫폼(Trimaran)

4. 정지측정법 적용 사례

■ 괴산댐 하류 달천 적용 사례

ADCP 정지측정법의 적용성을 검토하기 위해 2005년부터 2009년의 기간 동안 괴산댐 하류에서 시험 측정을 수행하였다. 시험 측정은 평저수 4회, 홍수 17회를 실시하였다(표 1). 측정에 사용한 ADCP는 Sontek사의 ADP로 수심에 따라 1.5㎒와 3.0㎒ 주파수의 ADCP를 선택적으로 사용하였다. 플랫폼은 삼동선(Trimaran)을 이용하였다. 유량 측정시 18~31개의 측선에서 각각 40~60초 동안 연직유속분포를 취득하였다.

측정한 유량을 괴산댐의 방류량과 비교하여 정확도를 살펴보았다. 평저수시 측정의 경우 댐 방류량이 가장 큰 66.3 m^3/s 조건에서 측정유량은 60.9m^3/s로 5.4m^3/s의 유량차이를 보였다. 평저수기 측정은 횟수는 4회로 적으나 댐 방류량 대비 약 4%의 상대 차이를 보여주었다. 총 17회 실시한 홍수기 측정의 경우 댐 방류량 대비 오차는 -6.0~7.6% 범위이고, 평균 3.6%의 상대오차를 보였다. 정지측정법과 거의 같은 시간에 측정한 7회

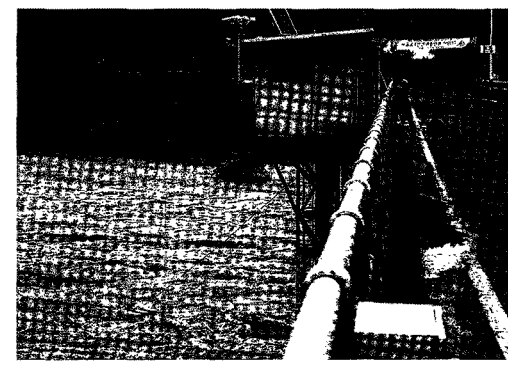


그림 4. 홍수시 정지측정법의 적용 (괴산댐 하류)

의 봉부자법으로 측정한 유량 값이 댐 방류량 대비 5.7~22.2%로 평균 14.2% 오차를 보인 것과는 대조적이다.

ADCP 정지측정법에 의한 측정 소요시간은 평저수기, 홍수기 포함한 총 21회의 사례에서 평균 39분으로 나타났다. 평저수시 경우 28~52분으로 1점법 기준 유속면적법 측정시간과 비슷하였지만, 홍수시에는 14~59분, 평균 38분이 소요되었다. 홍수시 같은 시간대에 실시한 부자법이 평균 23분을 나타난 것과 비교하면 약간 긴 시간이다. 하지만 봉부자법과 비교하여 측정 소요시간에 대한 유량값의 정확도 측면을 고려한다면 효율적인 방법이라고 할 수 있다.

일부 전용 프로그램은 ISO(1997) 기반의 불확실도 계산이 가능한데(Sontek, 2007), 측정 자료의 불확실도는 2.1~3.5% 범위에 있었다. 유속면적법이 통상 5% 내외의 불확실도를 갖는 점을 고려하면, ADCP 정지측정법으로 측정한 결과는 이와 비슷하거나 낮은 불확실도를 나타낸다고 볼 수 있다.

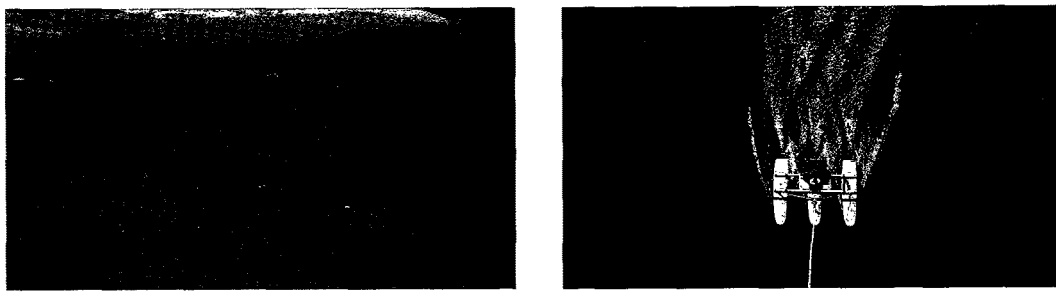
■ 임진강 적성 지점 적용 사례

파주 적성 지점에서 임진강은 유역면적이 6,750km^{2}에 달하는 대하천으로 수면폭은 저수시 200m 이상, 홍수시 400m에 이른다. 계획 홍수량은 15,300m^3/s이며, 여름철 수위 변화의 폭은 10m 이상에 이른다. 괴산댐 하류 달천에서 효율성이 입증된 정지측정법을 보다 넓은 범위의 유량, 수심 변화를 보이는 임진강 적성 지점에 적용함으로써 홍수기 측정 방법으로서의 활용 가능성을 검토하고자 하였다(그림 5).

적성지점에서 사용한 ADCP의 주파수는 1.0㎒와 3.0㎒로 1.0㎒ ADCP의 경우 측정 가능한 최대 수심이 25~35m이며 부유사로 인해 탁도가 높은

표 1. 정지측정법의 적용 사례(괴산댐 하류)

시기	측정일자	소요시간	측정유량 (m^3/s)	댐방류량 (m^3/s)	댐방류량 대비 상대오차	주파수 (㎒)	불확실도
평저수	2006-05-23	52분	16.9	16.0	5.6%	3.0	2.2%
	2006-07-31	40분	62.8	63.5	-1.1%	3.0	3.0%
	2007-08-07	47분	58.4	58.5	-0.2%	3.0	3.3%
	2007-08-08	28분	60.9	66.3	-8.2%	3.0	2.8%
홍수	2005-07-01	29분	103.2	99.1	4.1%	3.0	2.5%
	2005-07-12	46분	174.5	171.5	1.7%	3.0	2.5%
	2006-07-11	34분	156.4	146.3	6.9%	1.5	2.9%
	2006-07-11	48분	135.3	144.0	-6.0%	3.0	2.8%
	2006-07-17	42분	399.5	383.1	4.3%	1.5	2.3%
	2006-07-17	59분	585.6	544.2	7.6%	1.5	2.2%
	2006-07-18	44분	753.6	758.5	-0.6%	1.5	2.1%
	2007-07-24	45분	329.9	321.0	2.8%	3.0	2.3%
	2007-07-24	14분	109.1	104.5	4.4%	3.0	2.8%
	2007-08-05	42분	393.7	380.9	3.4%	3.0	2.2%
	2007-08-05	41분	282.2	288.0	-2.0%	3.0	2.6%
	2007-08-05	31분	252.5	246.9	2.3%	3.0	2.7%
	2008-07-25	40분	572.9	557.9	2.7%	3.0	2.9%
	2008-07-25	34분	338.5	332.9	1.7%	3.0	2.9%
	2009-07-12	20분	418.9	408.1	2.7%	3.0	3.2%
	2009-07-13	44분	95.1	91.1	4.4%	3.0	2.3%
	2009-07-21	36분	391.6	382.0	2.5%	3.0	3.5%
평균		39분			4.1%		2.7%



(a) 임진강 적성지점 홍수 전경 (b) ADCP를 이용한 정지측정법

그림 5. 임진강 적성지점 홍수전경 및 정지측정법

조건에서도 활용 가능하다. 괴산댐 하류에서 적용한 정지측정법과 마찬가지로 측정시간은 40~60초이고, 18~24개의 측선에서 측정하였다.

2009년 7~8월 동안 3회의 큰 홍수사상이 있었으며, 총 26회의 유량 측정이 1,046.5~9,662.7 m^3/s 범위에 대해 실시되었다(그림 6). 특히 세 차례의 첨두홍수량 부근에서 측정된 유량 8,588.5, 7,100.9, 9,662.7m^3/s는 각각 이 지점의 계획홍수량 15,300m^3/s의 46~63%에 해당하는 유량이다(표 2). 측정 기간 동안 단면 평균유속은 1.3~

표 2. 정지측정법의 적용 사례(임진강 적성 사례)

측정일시	소요시간	수위 (m)	평균유속 (m/s)	측정 유량 (m^3/s)	주파수 (㎒)	불확실도
2009-07-14 19:32	42분	7.4	2.3	5,901.4	1.0	3.0%
2009-07-14 21:15	41분	8.2	2.7	7,572.4	1.0	3.0%
2009-07-15 01:59	36분	9.4	2.6	8,588.5	1.0	3.0%
2009-07-15 12:29	32분	7.2	2.3	5,861.2	1.0	3.0%
2009-07-15 14:19	28분	6.6	2.3	5,334.5	1.0	3.0%
2009-07-15 16:13	28분	6.0	2.2	4,732.9	1.0	3.0%
2009-07-15 19:51	31분	5.0	2.2	3,978.0	1.0	3.1%
2009-07-15 22:59	33분	4.3	2.1	3,330.5	1.0	3.3%
2009-07-16 02:16	32분	3.7	2.0	2,852.6	3.0	3.3%
2009-07-16 04:54	29분	3.3	1.9	2,378.6	3.0	3.3%
2009-07-16 09:11	29분	2.8	1.8	2,037.3	3.0	3.1%
2009-08-12 13:33	36분	8.2	2.5	7,100.9	1.0	3.0%
2009-08-12 14:38	33분	7.9	2.4	6,624.3	1.0	3.0%
2009-08-12 15:25	40분	7.7	2.3	6,102.0	1.0	3.1%
2009-08-12 16:40	37분	7.0	2.2	5,493.7	1.0	3.0%
2009-08-12 18:30	28분	6.0	2.1	4,563.6	1.0	3.1%
2009-08-12 19:03	24분	5.7	2.0	4,092.7	1.0	3.1%
2009-08-12 20:27	29분	5.0	2.1	3,716.7	1.0	3.3%
2009-08-12 22:55	28분	3.8	2.0	2,864.4	1.0	3.3%
2009-08-13 01:27	33분	3.0	1.9	2,229.9	1.0	3.3%
2009-08-13 04:17	29분	2.4	1.6	1,601.1	3.0	3.3%
2009-08-13 10:47	28분	1.8	1.3	1,046.5	3.0	3.5%
2009-08-27 05:26	29분	2.6	1.7	1,806.6	3.0	3.5%
2009-08-27 06:24	23분	2.8	1.9	2,062.2	3.0	3.3%
2009-08-27 13:52	46분	8.0	2.7	8,684.4	1.0	3.0%
2009-08-27 17:14	1시간 52분	9.2	3.0	9,662.7	1.0	3.0%
평균	32분					2.8%

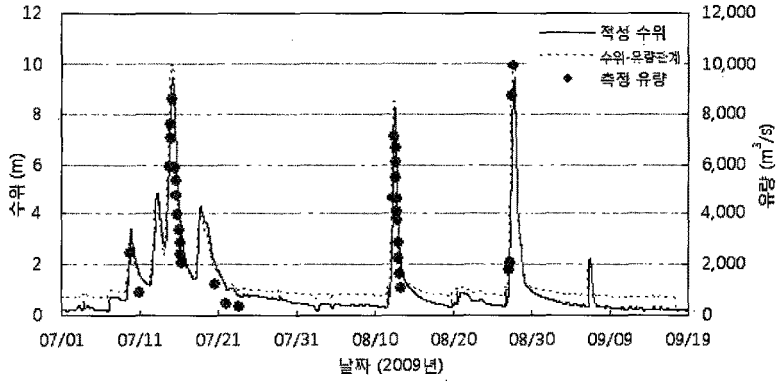


그림 6. 임진강 적성 지점에서 정지측정법 유량측정 결과

3.0m/s였으며, 측선별 유속으로는 8,684.4m³/s에서 최대 4.1m/s, 평균 3.6m/s의 유속 범위까지 측정을 실시하였다. 불확실도는 3.0~3.5% 범위이고, 평균 3.2%로 이 역시 유속면적법과 부자법에 비해 낮다.

임진강 적성지점에서 정지측정법을 이용하여 유량 측정을 하는데 걸리는 시간은 측정 조건이 불량하여 1시간 52분이 걸린 2009-08-27 17:14의 자료를 제외하면 측정평균 32분으로 같은 지점에서 동일한 시간 측정한 봉부자법의 평균 소요시간 29분과 큰 차이가 없었다.

5. 유량 측정 방법으로서의 유용성

괴산댐 하류와 임진강 적성지점에서 수행된 ADCP 정지측정법 적용 결과는 유량 측정 방법으로서 유용성을 시사한다. 첫째, 제한된 자료이기는 하지만, ADCP 정지측정법은 비교적 정확한 유량값을 나타낸다는 것이 확인되었다. 둘째, 현 시점에서 ADCP가 갖는 고유의 계통 오차가 충분히 고려되지 못하지만, ISO(1997) 기준에 의하여 일반 유속면적법과 비교할 수 있는 불확실도를 산정할 수 있으므로 품질 관리가 가능하다. 셋째, 평저수시에는 측정 시간을 늘림으로써 정확도를 높일 수 있고, 홍수시에는 봉부자법과 비교하여도 큰 차이가 없는 신속한 측정으로 급격한 흐름 변화에 대응할 수 있다. 넷째, 하나의 홍수 사상에 대한 연속적인 측정이라는 관점에서 보면, 기존에는 저수위에서는 교량에서 유속계를 사용하고 고수위로 변화하면서 봉부자법을 사용하는 방식인데 비해, ADCP 정지측정법을 이용할 경우 측정 방법의 변경없이 단일한 방법으로 효율적인 측정이 가능하다. 다만, 큰 규모를 갖는 첨두 홍수량에 대해 봉부자법으로 사용하는 것이 보다 안전하므로 ADCP 정지측정법만을 사용할 수는 없을 것이나 ADCP 정지측정법 역시 교량에서 실시된다는 점을 고려하면 봉부자법과 변경되는데 따른 시간적 불연속성을 줄일 수 있을 것으로 이러한 점에서 ADCP 정지측정법은 기존의 유속계-봉부자법 조합에 비해 효율적일 수 있다. 다섯째, ADCP 정지측정법에서는 수심을 직접 측정하므로 홍수 전/후의 측량을 통해 단면적을 산정하는 봉부자법 및 표면유속측정에 기반한 유량 측정방법과 비교하여 하상 변동에 따른 유량 변화를 실시간으로 반영할 수 있다. 이러한 측면에서 ADCP 정지측정법은 홍수 유량 측정에 있어 이들 방법들과 비교하면서 활용될 수 있으므로 이들 방법들에 대한 상대적 정확성을 평가하는 도구로도 활용될 수 있다.

6. 맺으며

이 글에서는 ADCP를 이용한 정지측정법의 특성과 적용 방법을 간략하게 설명하고 괴산댐 하류 달천과 임진강 적성 지점에서의 2005~2009년 동안의 측정 결과를 제시하였다. 이 결과를 토대로 평저

수기와 홍수기를 망라할 수 있는 단일한 측정 방법으로서 ADCP 정지측정법의 유용성을 검토하였다. 향후 여러 측정자들이 참여하는 보다 많은 현장 측정을 통해 그 적용성과 유용성이 분석되고 정보가 교환된다면 기존의 유량 측정방법과 함께 널리 활용될 수 있는 방법으로 정착될 것으로 기대된다.

■ 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-1-3)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Rehmel, S. M., Stewart, J. A., Morlock, S. E.(2003) Tethered Acoustic Doppler Current Profiler Platforms for Measuring Streamflow, US Geological Survey Open-File Report 03-237
2. International Organization of Standardization (1997) Measurement of liquid flow in open channels velocity-area methods.
3. Sontek (2007) Discharge Uncertainty Calculations in the Sontek/YSI FlowTracker and RiverSurveyor: Stationary-Measurement. Sontek/YSI Technical Note.