

ADCP를 이용한 유량 측정의 원리와 적용



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



김 원 |
한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원
wonkim@kict.re.kr



김 치 영 |
한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원
cy_kim@kict.re.kr



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

1980년대 말부터 유량 측정 기법으로 도입되기 시작하였으며, 이후 다년간의 현장 하천에 대한 적용성 평가가 이루어진 후 최근에는 평저수시 유량 측정을 위한 공식적인 방법으로 점차 인정받고 있는 추세이다. 우리나라의 경우 1990년대 후반부터 ADCP가 도입되기 시작하였으나 아직까지 ADCP를 이용한 유량 측정 기법과 현장 적용상의 문제가 충분히 검토되지 못하고 있는 실정이다. 이는 기존 유속계에 비해 ADCP가 간편하게 유량을 측정할 수 있지만 복잡한 절차를 거쳐 유량을 계산하므로 현장 상황과 흐름 상태에 따라 적절한 운용 방법이 필요하기 때문이다(Simpson, 2001).

본 기사에서는 ADCP를 이용한 유량 측정의 원리를 살펴보고 외국에서의 운용 사례와 한국건설기술연구원에서 지난 수 년간의 ADCP 운용 경험에서 나타난 ADCP 측정상의 문제를 검토하고자 한다. 이를 통해 다양한 하천 현장에서 보다 정확한 유량 측정 결과를 얻기 위해 ADCP를 적절하게 사용할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. ADCP의 유량 측정 원리

ADCP는 물 속으로 일정 주파수의 초음파를 전송하고, 부유하는 입자들에 의해 산란되어 돌아오는 반향을 수집, 도플러 효과를 이용하여 유속을 측정한다. 이 때 돌아오는 반향의 시차를 이용하여 수심에 따라 일정 깊이별로 정리하여 수심별 유속 분포를 만들어 내고 이를 이용하여 수심 평균한 유속을 계산한다.

ADCP는 본질적으로 하천을 횡단하면서 순간적인 유속을 측정하므로 시간평균한 평균유속과의 차이가 발생하지만 1초에 1회 이상의 빠른 속도로 연직유속

1. 배경과 목적

최근 미국을 비롯한 수문관측의 선진국에서는 운영 인력과 비용이 적게 들면서도 실시간으로 정확한 유량을 측정할 수 있는 기법들이 현장에 도입되고 있다. 국내에서도 기존의 유량 측정 방법을 대체할 수 있는 보다 정확하면서도 인력과 비용이 절감되는 새로운 유량 측정 방법을 도입하려는 노력이 이루어지고 있다(건기연, 2004). 이러한 기법 중 ADCP는 미국을 중심으로

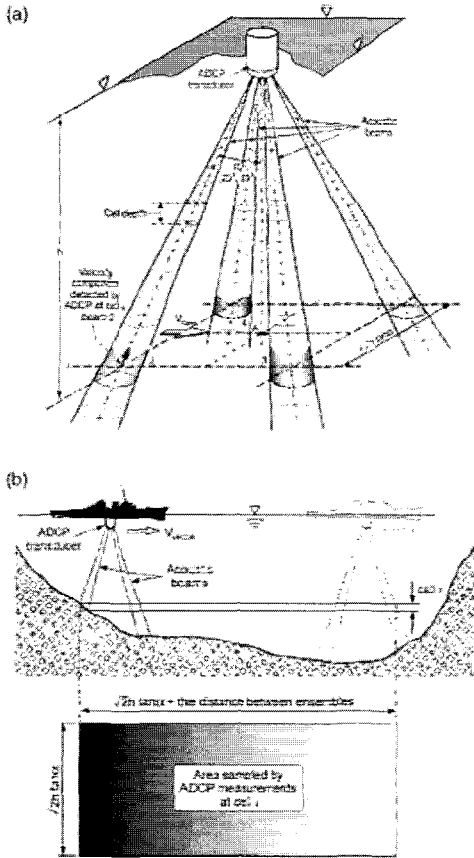


그림 1. ADCP의 샘플링 원리(Muste 등, 2004)

분포를 수집하면서 이를 공간적으로 평균함으로써 순간 유속이 갖는 변동성을 완화시키는 특징을 갖는다(그림 1).

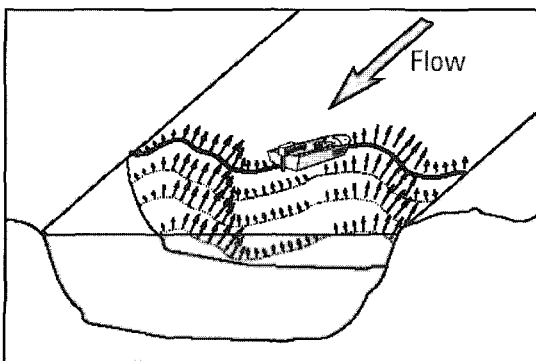


그림 2 유속벡터를 이용한 유량 계산 원리

ADCP를 이용하여 하천에서 유속을 측정하는 경우 ADCP를 보트에 고정시키거나 별도의 작은 부유체에 고정시켜 하천을 가로지르는 횡측선을 따라서 이동하면서 측정한다. ADCP는 자체적으로 기기의 방향과 유속의 방향을 내장한 나침반에 의해 파악하며 하상으로 보낸 음파를 탐지하여 기기가 이동하는 경로와 수심을 자동으로 추적하는 기능을 갖고 있다. 이에 따라 일정 시간동안 이동한 거리와 단면적을 계산하고 음파에 의해 수집된 연속유속분포를 종합하여 유량을 계산한다(그림 2). 물론 음파에 의한 하상 추적에 DGPS를 이용한 이동 경로의 추적도 가능하다. 그러므로 일반적인 유량 측정 방법처럼 유수의 흐름에 직각으로 횡측선을 설치하는 등의 작업이 불필요하여 교량이 없는 지점이나 대하천, 그리고 조석의 영향을 받는 하천에서도 손쉽게 유량을 측정할 수 있는 장점이 있다(김원 등, 2002). ADCP는 식 1에 따라 유량을 계산한다(Gordon, 1989).

$$Q = \iint n(L) \cdot U(z, L) dz dL \quad (\text{식 1})$$

여기서 Q는 유량, n은 L에서 측선을 따른 직각 단위 벡터, U는 유속 벡터, z는 수심이다.

ADCP는 기기의 특성상 하천 단면 전체에서 유량을 측정할 수 없는 한계를 지니는데 측정 가능한 영역은 그림 3과 같다. 그리고 측정할 수 없는 영역의 유량은 측정할 수 있는 영역에서 얻은 유속 자료를

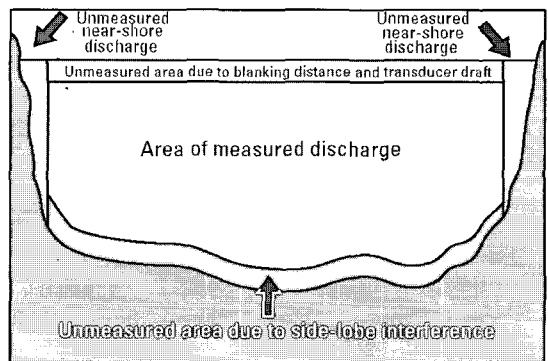


그림 3. ADCP의 측정 가능영역과 추정 영역

이용하여 추정한다. ADCP가 직접 유량 측정을 하지 못하고 추정하는 부분은 크게 셋으로 나누어진다. 첫째, 수면 부근에서는 ADCP가 수면 아래로 잠긴 깊이에 기기 바로 아래에서 발생하는 음파의 간섭 등의 효과를 차단하기 위해 설정하는 공백 깊이를 더한 만큼을 측정하지 못한다. 둘째, 하상 부근에서는 정상적인 방향으로 진행하는 음파에 비해 일찍 하상에 도달한 음파가 강한 반사파를 발생시켜 측정에 노이즈를 일으키므로 측정이 불가능하다. 셋째, 하천의 양안에서는 ADCP가 측정할 수 있는 최소 수심보다 얇을 경우 측정이 불가능하다. 이 중 수면과 하상 부근의 경우 단면적은 측정될 수 있으므로 유속을 추정한 후 단면적을 곱하여 유량을 계산하며, 하천 양안의 경우에는 단면 형상을 사용자가 대략적으로 입력하고 측정 가능한 인접 유속 자료를 이용하여 유량을 추정한다. 그리고 측정된 유량과 추정된 유량을 합하여 하천 단면의 유량을 계산하는 것이다.

3. ADCP를 이용한 유량 측정시 고려사항

ADCP의 측정 원리는 한편으로는 하천 유량을 간편하게 측정할 수 있도록 도와주지만, 실제 하천에 적용할 경우 이러한 원리를 잘 고려하여 측정하지 않으면 정확성이 저하되고 불확실도가 증가되기도 한다. 그러므로 ADCP를 이용한 유량 측정시 다음 사항을 고려하여야 한다: 1) 유량 측정 지점의 선정, 2) ADCP 측정 모드의 설정, 3) 측정 불가 영역에 대한 추정 방법 설정, 4) ADCP의 이동 경로와 속도, 5) 유량값 결정을 위한 반복 횟수.

3.1 유량 측정 지점의 선정

ADCP를 이용하여 유량을 측정하는 경우 가장 우선적으로 고려해야 할 사항은 측정 지점의 선정이다. ADCP는 기기에 따라 측정 가능한 최소/최대 수심 범위와 유속 범위가 있을 뿐만 아니라 현장 특성에

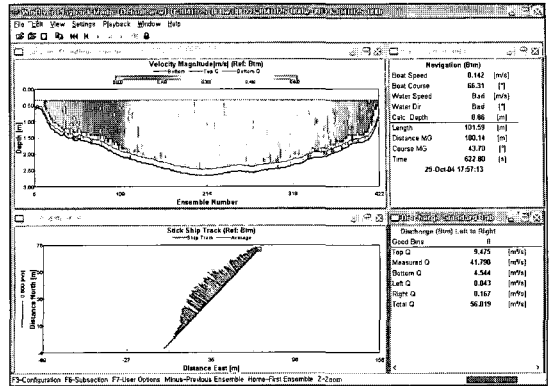


그림 4. RDI사의 ADCP를 이용한 측정 장면

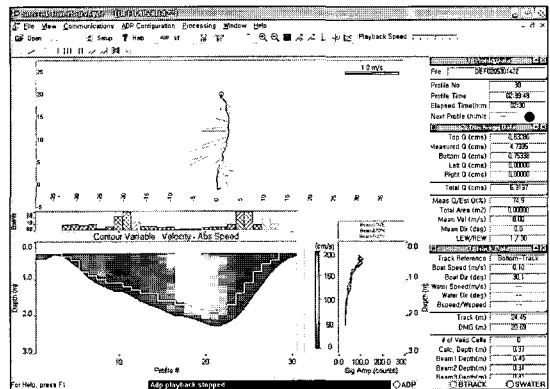


그림 5. Sontek사의 ADP를 이용한 측정 장면

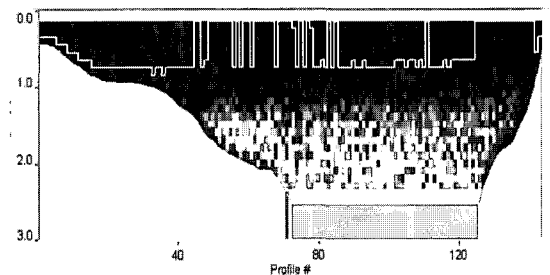


그림 6. 기기 한계를 넘는 수심측정시의 문제

맞게 기기 설정을 적절히 조절해 주지 않으면 유량 측정시 오차가 증가하거나 측정이 불가능할 수 있기 때문이다(그림 6).

측정 지점을 선정할 때 고려할 사항은 하천의 규모, 단면 형상, 하상 재료, 수면경사, 유속, 수심 등이 있다. 이러한 사항들은 현장에 적합한 기기와 작동

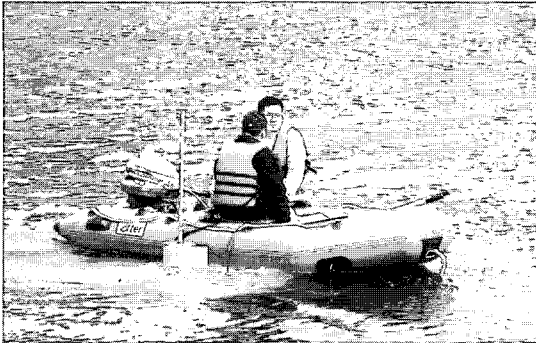


그림 7. 보트를 이용한 측정 방법

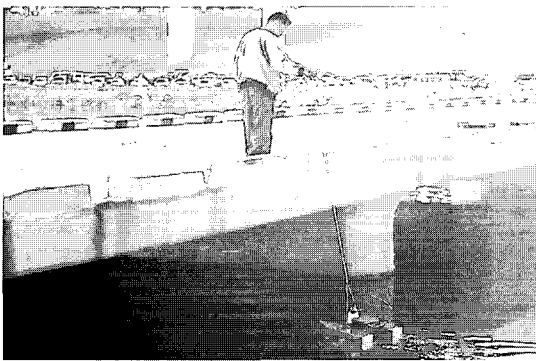


그림 8. 교량을 이용한 측정 방법

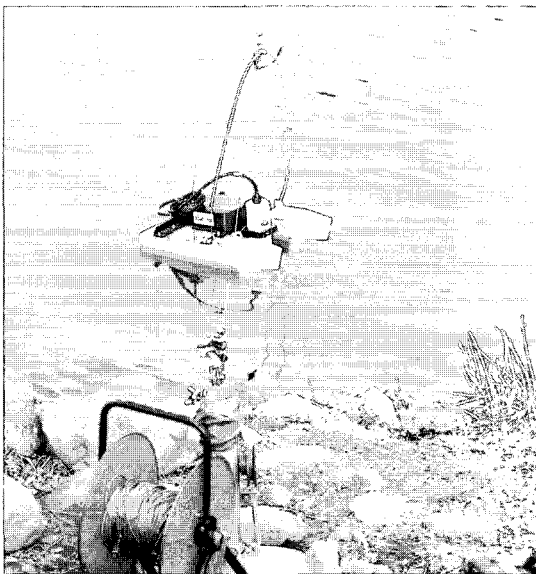


그림 9. 케이블을 이용한 측정방법

용한 유량 측정의 오차를 가늠하는데 매우 중요하다. 그러므로 가능한 하천의 특성을 상세하게 파악하고 기록해 두어야 한다. 하상 재료가 모래이고 유속이 빠를 경우 유사(流砂)의 이송이 발생하여 하상추적의 오차가 증가한다. 자갈하천의 경우 하상이 매우 울퉁불퉁하여 수심 측정시 오차가 커질 가능성이 높다. 또한 여름에서는 수면의 요동이 심하면서 수심이 얇아 측정이 곤란하고 소(沼)의 경우 수심이 깊어 유속이 너무 느릴 수도 있고 여름철에는 상하층간에 온도차가 커져 유속 측정의 오차가 발생할 수 있다. 그러므로 자갈하천에서는 여름 마루보다 약간 상류 쪽의 수면이 잔잔한 구역이 측정에 적합하다. 유속이 기기의 작동 범위보다 너무 빠르거나 느린 지점도 피하는 것이 좋다. 특히 유속이 너무 느릴 경우 유량 측정의 오차가 증가하는 것으로 알려져 있다(Simpson, 2001). 따라서 ADCP는 충분한 수심이 확보된 상황에서 평저수시 측정에 이용하는 것이 가장 적합하다.

측정 지점을 설정하고 나면 ADCP를 이용하여 측정을 수행할 방법을 결정하여야 한다. 이를 위해서는 먼저 측정 지점을 1~2회 정도 사전에 시험적으로 횡단하며 ADCP를 가동하여 하상의 상태나 수심 범위를 파악하고 양안 부근에서 측정 가능한 최소 수심이 확보되는 경계 지점을 찾아 부표 등으로 표시하는 일이 필요하다. 이 때 가급적이면 하상의 불규칙성이 적고 하천의 중간에 최소 수심보다 얕아지거나 최대 수심보다 깊어지는 부분이 없는지를 파악하고 유속이 너무 느리지 않은지를 검토해야 한다. 우리나라의 경우 평저수기에는 유량이 적은 반면 하천단면이 넓고 얇은 형태를 갖고 있어 ADCP를 이용한 측정시 많은 주의가 필요하다. 이렇게 측정 지점의 상태가 파악되면 ADCP를 이용한 측정 방법(도선, 보트에 부착, 교량 이용, 무선 조종, 케이블법 등)을 결정할 수 있으며 이중 하천의 규모가 커서 횡측선을 설치하지 못하고 보트를 이용하여 횡단할 경우 흐름 속도와 방향을 고려하여 보트의 대략적인 운전 경로를 결정해야 한다(그림7~9).

모드를 선택하는데 중요할 뿐만 아니라 ADCP를 이

3.2 ADCP 측정 모드의 설정

ADCP의 측정 모드는 RD Instrument사에서 최근에 제작된 ADCP에만 해당된다. Sontek사의 ADP의 경우 하천 상황에 따라 조절 가능한 모드가 제공되지 않는다. 유속 측정 모드는 다양한 하천 상황에 적합하게 유량을 측정할 수 있도록 개발되었다. 각 모드는 서로 다른 지체 거리, 파동 길이, 코드 요소의 조합과 유속 측정 기법을 갖고 있다. 따라서 부적절한 모드를 사용할 경우 오차가 증가될 수 있다. 현재 RDI사의 ADCP는 기기에 따라 1, 5, 8, 11, 12 등의 여러 모드를 갖고 있는데, 이중 모드 11은 얇은 수심에서 많은 유속 자료를 취득하기 위해 개발된 ZedHed™라는 모듈을 장착한 경우에 사용할 수 있다. 각 모드별 적용 가능한 수심 및 유속 범위는 그림 10과 같다.

모드 1은 '동적' 모드라고 하는데, 이 일반적인 특성은 대부분의 일상적인 유량 측정시 사용된다. 모드 1은 ADCP가 측정할 수 있는 최대 수심 및 최대 유속 범위에서 사용 가능하며 하상이 거칠고 흐름이 빨라 난류가 심한 극한 조건을 포함하므로 다른 유속측정 모드로 측정이 되지 않는 하천 상황에 모두 적용할 수 있다. 대신 모드 1은 수심 셀의 크기가 0.25~0.5m로

다른 모드에 비해 매우 크며 연직유속분포 수집을 위한 측정신호(ping)의 표준편차가 커서 유속 측정의 오차가 큰 단점이 있다. 이러한 단점을 개선한 것이 모드 12이다. 모드 12는 수심 셀의 크기가 0.1~0.25m이고 최대 수심 셀을 255개까지 수집할 수 있어 보다 조밀한 측정이 가능하며 초당 20개의 자료를 평균하는 기능을 가지고 있어 모드 1에 비해 정확도를 높인 것이 특징이다.

모드 5는 유속이 느리고 수심이 얇아 난류가 약한 하천에서 주로 사용되는 것으로 수심 셀의 크기가 0.1m로서 조밀한 연직유속분포를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 측정신호의 표준편차가 매우 작아 정확성이 높은 장점을 갖고 있다. 모드 11은 최근에 모드 5를 개량한 것으로 수심 셀의 크기가 최소 0.01m까지 가능하고 최대 수심 셀을 255개까지 수집할 수 있고 수면 부근의 공백 거리도 작아 정밀 유속, 유량 측정에 적합하다. 그러나 유속이 1m/s 이상일 경우 측정이 곤란하다. 수심이 얇은 경우 측정 가능한 영역보다 추정해야 하는 영역이 커지게 되므로 주의가 필요하다. 이 경우 측정 가능 영역에서 가능한 조밀하게 수심별 유속분포를 획득하여야 수면 부근의 추정시 오차가 줄어들게 된다. 따라서 수심이 얇은 경우 모드 11의 사용이 권장된다.

모드 8은 모드 1과 모드 5의 중간 정도에 해당하는 유속 및 수심 범위에서 사용할 수 있으나 제조사는 과거에 전문적인 경험을 가진 경우가 아니고는 사용을 권장하지 않고 있는데 이는 최근 모드 11, 12가 새로 적용되면서 사용의 필요성이 적어졌기 때문이다.

Sontek ADP의 경우 측정 모드를 지원하지 않고 있다. 그러나 측정 모드는 하천의 흐름 조건을 반영하는 것이므로 이러한 지식은 Sontek ADP를 이용할 경우에도 참고하여야 한다. 즉, 수심이 깊고 유속이 빠를 경우 수심 셀의 크기를 크게 하여야 하며, 오차가 증가한다는 사실을 염두에 두어야 하고, 이와 반대로 수심이 얇고 유속이 느린 경우 수심 셀 크기를 줄임으로써 정밀도를 높일 수 있다는 것이다.

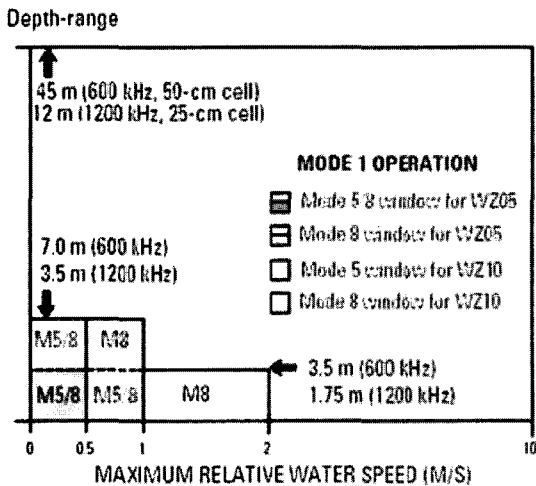


그림 10. 수심 및 유속범위와 적용 모드

표 1. RDI 1,200KHz RioGrande의 모드별 특징

	모드 1	모드 12	모드 11	모드 5	모드 8
일반적인 적용범위	모든 수심 범위 빠른 유속 범위 큰 난류	모든 수심 범위 빠른 유속 범위	느린 유속 얕은 수심 약한 난류	느린 유속 얕은 수심 약한 난류	느린 유속 얕은 수심 중간 난류
권장 최소 수심셀 크기(m)	0.25	0.10	0.05	0.10	0.10
최소 수심셀 크기(m)	0.25	0.10	0.05	0.10	0.10
측정신호의 표준편차(cm/s)	18.0	7.0	0.37	0.4	7.8
측정가능 최초 수심셀(m)	0.56	0.26	0.35	0.35	0.35
측정가능 최대 수심셀(m)	12	12	3.5	3.5	3.5
측정가능 최대 유속(m/s)	10	10	1(수심에 따라)	0.5	1

3.3 측정 불가 영역에 대한 추정 방법 설정

앞서 원리에서 언급한대로 ADCP는 수면 부근과 하상 부근, 그리고 양안 부근에 대해 측정을 할 수 없다. 그러므로 단면 전체에 대한 유량 측정을 위해 ADCP는 측정한 데이터를 토대로 유속을 추정하는 기법을 사용한다.

ADCP는 유량 측정을 수행하는 과정에서 연직 유속 분포를 획득하며, 수면과 하상 부근에 대해서는 측정된 유속 자료를 이용하여 추정한다. 이 때 전체 연직 유속 분포가 power 법칙을 따른다고 가정하여 상하의 유속을 계산한다. 지수값은 1/6로 되어 있으며 사용자가 변경할 수 있다. 하상 부근의 경우 유속이 0으로 추정되거나 매우 느린 유속이 되므로 오차가 적은 반면, 수면 부근의 경우 바람이나 조위, 배수위 등의 영향으로 상하층이 쌍방향적 흐름을 나타낼 경우 power 법칙으로 추정하면 오차가 증가하는 요인이 된다. 이러한 이유로 USGS(Simpson, 2001)에서는 수면 부근의 유속을 측정된 최상위 유속과 동일하게 계산하는 '상수' 추정법으로 설정할 것을 권장하고 있다.

하천 양안에서 수심이 얇아 ADCP가 측정하지 못하는 영역의 경우 두 가지 문제를 고려해야 한다. 그 하나는 양안 부근의 유속을 추정하기 위해 경계 지점에서 10회 이상 지속적인 연직 유속 분포를 획득하여야 한다는 점이다. 이는 측정 불가능한 지점을 추정

하기 위해 최소 10초 이상의 시간 평균 자료를 이용한다는 것을 의미한다. 다른 하나는 양안의 면적과 형상을 정확하게 계산하여야 한다는 점이다. 많은 경우 경계 지점에서부터 양안까지의 거리나 형상을 잘못 입력하여 오차가 발생한다. 만일 현장에서 사용하는 ADCP가 양안의 넓은 부분을 측정할 수 없는 경우라면 측정 지점을 이동하거나 유속-면적법 등 별도의 방법으로 측정하여야 한다.

3.4 ADCP의 이동 경로와 속도

ADCP를 이용한 측정에서 유량 측정의 정밀도는 다음과 식 2로 계산할 수 있다.

$$\sigma_q = \frac{\sqrt{\left[\left(100 \frac{X_w}{V_m}\right)^2 + \left(100 \frac{X_b}{V_m}\right)^2 + \sigma_p^2 + \sigma_z^2\right]}{\sqrt{0.75N_bN_s}} \quad (\text{식 2})$$

여기서 σ_q 는 유량측정 표준편차(%), V_m 은 평균유속(cm/s), X_w 은 ADCP의 유속측정 정밀도(cm/s), X_b 은 ADCP의 하상추적 정밀도(cm/s), σ_p 자연적인 진동의 추정 표준편차, σ_z 는 수심 오차, N_b 평균적인 수심 셀 수, N_s 는 구간단면의 총 수이다. 이 식은 유량측정의 정밀도가 ADCP의 기기 정밀도와 측정 하천의 수심, 유속, 그리고 ADCP로 하천을 횡단하는 속도 등에 의해 좌우됨을 보여준다. 즉 이 식은 ADCP를 이용하여 하천을 횡단할 경우 오차를 줄이려면 연직 유속 분포

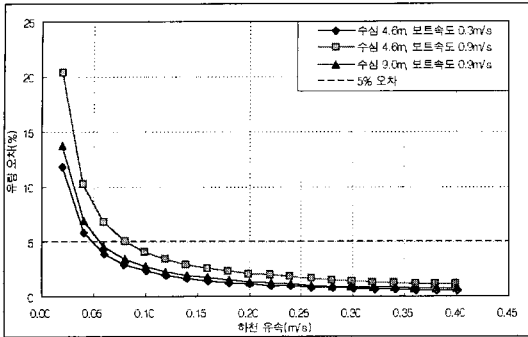


그림 11. 수심, 보트속도, 하천 유속에 따른 유량 오차 (Simpson, 2001)

를 조밀하게 하여 구간단면 수를 늘려야 한다는 것을 의미한다.

일반적으로 ADCP를 이용할 때는 보트에 장착하여 하천을 횡단하면서 유량을 측정한다. 그런데 보트의 속도를 높이면 단시간에 측정을 할 수 있으나 측정되는 구간단면의 수가 감소하며, 수심과 단면적을 세밀하게 측정하기 어려워 하상 추적의 정밀도도 낮아지게 되어 측정의 오차가 증가한다. 이러한 경향은 하천의 평균 유속이 느릴수록 두드러지며, 유속이 빨라질 경우 이러한 영향이 감소한다(그림 11). 그러므로 현장 하천의 상황에 맞게 ADCP 측정 방법을 결정하고 보트를 운용하여야 한다.

3.5 유량값 결정을 위한 반복 횟수

ADCP는 단 한번의 하천 횡단으로 유량을 측정할 수 있으나 보다 정확한 유량 측정을 위해서 수 회의 반복 횡단 측정 결과를 평균하는 것이 바람직하다. 대체로 일정한 흐름 상태가 지속될 경우 4회 이상(좌수 측정) 좌안에서 우안으로 우안에서 좌안으로 반복 횡단하여 측정값을 유량값으로 결정하는데 흐름의 상황에 따라 10회 이상 반복 측정하기도 한다(RDI, 2003, Simpson, 2001, Muste 등, 2004). 만일 4회 측정시 하나의 자료가 $\pm 5\%$ 를 넘는 결과를 나타낼 경우, 그 자료가 문제가 없다고 판단되면 추가적으로 4회 이상 측정하는 것이 바람직하다. 그림 12는

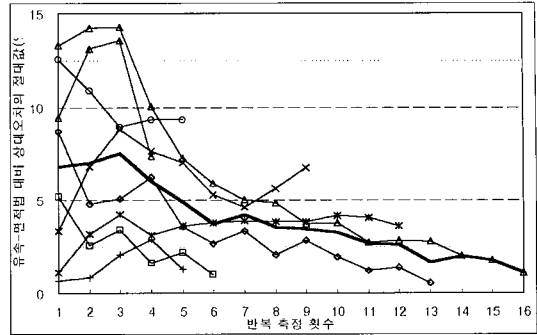


그림 12. 반복측정 횟수에 따른 유속-면적법 대비 상대 오차의 변화(한국건설기술연구원, 2005)

반복 측정의 횟수가 증가할수록 유속-면적법 대비 유량의 상대 오차가 전반적으로 감소한다는 것을 보여준다. 요컨대 유량값을 결정하기 위해서는 최소 4회 이상의 반복 측정이 필요하며, 현장 상황이 불량하여 측정의 오차가 예상될 경우 측정 횟수를 증가시키는 것이 바람직하다.

바람이 심하게 불거나 조위, 배수위 등에 의해 수면이 영향을 받는 경우 측정치의 오차가 커질 수가 있으므로 시험적인 측정을 통해 추정 변수를 변화시켜 가면서 적절한 값을 찾는 것이 필요하다. 조위가 변하는 하천이나 부정류 상태가 예상되는 곳에서는 가능한 신속하게 측정하여야 한다. 이러한 개별 측정 결과는 현장에서 즉시 유량측정 차트에 기록하여 차후 분석의 자료로 활용하여야 한다.

4. 결론

ADCP는 정밀한 기술에 의해 제작된 유량 측정 장비이므로 이를 이용하여 유량을 측정하는 것은 간편하면서도 인력과 비용이 절감되지만, 하천 현장에 맞게 적절하게 사용하지 않을 경우 유량 측정의 불확실성과 오차가 증가한다. 이 글에서는 현장 하천에서 ADCP를 이용하여 유량을 측정하고자 할 때 고려해야 할 사항을 제시하였다.

ADCP를 이용하여 유량을 측정하고자 할 때는 먼

저 하천 현장의 상황을 충분히 파악하여야 하며 시험적인 측정을 통해 측정 모드와 작동 설정, 보트의 운전 속도를 적절하게 결정하여 측정에 임해야 한다. 바람이 불거나 조위, 배수위 등의 영향을 받을 경우는 특히 측정이 불가능한 영역에 대한 추정 방법에 신경을 써야 한다. 마지막으로 하천을 수 차례 반복 횡단함으로써 보다 정확한 유량값을 얻도록 해야 한다.

※ 감사의 글

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

참고문헌

- 김원, 윤광석, 김동구, 차준호(2002) "ADCP를 이용한 유량측정", 2002년도 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 529-534
- 한국건설기술연구원(2004) 지표수 조사기술 개발 연구 보고서
- 한국건설기술연구원(2005) 지표수 조사시스템 적용 1차년도 요약보고서
- Gordon, R. L.(1989). "Acoustic measurement of river discharge." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 115, No. 7., pp. 925-936
- Muste, M, Yu, K., Spaspjevic, M.(2004). "Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; part I :moving-vessel measurements." *Flow measurement and instrumentation*, Vol. 15, No. 1, pp. 1-16
- RDI(2003) Winriver User's Guide International Version, RD Instruments, San Diego, CA
- Simpson, M. R.(2001). *Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler*, US Geological Survey Open-File Report 01-1