韓國水資源學會論文集
第38卷 第10號 · 2005年 10月
pp. 811~824

ADCP를 이용한 유속과 유량 측정

Velocity and Discharge Measurement using ADCP

이 찬 주* / 김 원** / 김 치 영*** / 김 동 구****
Lee, Chan Joo / Kim, Won / Kim, Chi Young / Kim, Dong Gu

Abstract

The ADCP is an instrument based on Doppler effect, which measures discharge of a river in a short time while crossing it. In this study we aim to make a comparison of the discharge results from a moving-vessel ADCP with those measured by velocity-area method at the same cross-section, and to investigate the characteristics of velocity and discharge data using ADCP. Bathymetry measured by ADCP almost coincides with that by direct depth measurements. Because velocity data from ADCP are essentially instantaneous, individual velocity profiles obtained by ADCP are rather different from time-averaged velocity profiles. But spatially averaged velocity profiles of the individual ADCP data near the comparable verticals have similar vertical velocity pattern with the time-averaged ones. The average velocity profile from repeatedly crossed data is also similar with the time-averaged one. In case of the velocity distribution, individual and spatially averaged data for the sub-width of mid-section method have good agreement with those by velocity-area method. Discharge data determined by averaging several ADCP measurement transects have 0.1%~9.3% of difference with those from velocity-area method, and as the number of measurement increases, the relative difference to the velocity-area method decreases.

keywords : ADCP, velocity-area method, velocity profile, velocity distribution, discharge

요 지

ADCP는 음파의 도플러 효과를 이용하여 하천을 횡단하면서 단시간에 유속과 유량을 측정할 수 있는 장비이다. 본 연구는 현장 하천에서 ADCP를 이동식으로 운용하여 측정한 유속, 유량 자료를 동일한 지점에서 측정한 유속-면적법과 비교하여 ADCP를 이용한 유속, 유량 자료의 특성을 살펴볼 목적으로 수행되었다. ADCP에 의해 측정된 수심 분포는 직접 측심에 의해 측정한 수심 분포와 거의 일치하였다. ADCP로 측정한 유속은 순간적이므로 개별 연직유속분포는 시간평균한 유속-면적법 자료와 차이가 있었으나 유속 측선의 좌우에 근접한 자료를 공간적으로 평균할 경우 그 차이는 감소하고 유사한 유속 패턴을 나타내었으며, 왕복하여 반복한 측정 자료를 평균할 경우에도 시간평균한 자료와 비슷한 연직유속분포를 나타내었다. 수평유속분포의 경우 ADCP의 개별 자료 및 이를 중간단면적법에

* 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원
Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea
(e-mail: c0gnitum@kict.re.kr)
** 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원
Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea
*** 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원
Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea
**** 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원
Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

해당하는 구간 하폭만큼 평균한 자료 역시 유속-면적법 자료와 잘 일치하는 양상을 나타내었다. 유량의 경우 한 지점에서 수 회 이상 평균한 값은 유속-면적법과 비교하여 0.1%~9.3%의 차이가 나는 것으로 조사되었으며, 반복 측정 횟수를 늘릴 경우 유속-면적법 대비 오차가 감소하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : ADCP, 유속-면적법, 연직유속분포, 수평유속분포, 유량

1. 서 론

ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)는 유수의 흐름을 방해하지 않으면서 음파 도플러 효과를 이용하여 수심에 따른 3차원 유속 분포를 수집하고 이를 이용하여 유량을 측정하는 장비이다. ADCP를 이용한 유량 측정은 하천을 횡단하여 이동하면서 유량을 측정하므로 유속-면적법 유량측정에 비해 인력과 시간이 절감되어 미국과 유럽 등의 외국에서는 평저수기의 유량 측정에 점차 널리 활용하고 있는 추세이다(Adler and Nicodemus, 2001; Mueller, 2002). 이에 따라 다양한 하천 규모에 적합한 여러 종류의 ADCP가 개발되어 보급되고 있으며, 이러한 기기들을 이용하여 유속 및 유량을 측정한 결과에 대한 다각적인 분석 연구가 행해지고 있다. 나아가 최근에는 난류 및 유사 이송을 측정하는데도 이용되면서 적용 범위를 넓혀가고 있다(Barua and Rahman, 1998; Nystrom et al., 2002; Rennie et al., 2002). 국내에도 이미 90년대 후반에 ADCP가 도입되어 수 년간의 측정이 이루어졌으며 최근에는 일부 ADCP에 대한 분석 연구도 수행되었다(Kim 등, 2002; 김원 등, 2002; 이찬주 등, 2004). 하지만 아직까지 ADCP를 이용한 유량 측정 방법과 기존의 유량 측정 방법 간의 비교 연구가 충분히 이루어지지 않았으며, 특히 ADCP에 의해 얻어지는 순간적인 유속 자료와 한 지점에서의 연속적인 측정과 이를 시간평균한 유속 자료를 비교한 경우는 거의 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 국내의 일부 현장 하천에서 ADCP를 이용하여 유속과 유량을 측정하고 기존의 시간평균한 유속 측정에 기초한 유량 측정 방법과 비교함으로써 유속 및 유량 측정 방법으로서 ADCP의 적용 가능성을 검토하였다.

2. ADCP의 측정 원리

ADCP는 물 속으로 일정 주파수의 초음파를 전송하고, 부유하는 입자들에 의해 산란되어 돌아오는 반향을 수집, 도플러 효과를 이용하여 유속을 측정한다. 유사한 원리의 ADV나 LDA가 아주 작은 체적에 집중하여 높은 주파수로 반향을 수집하는 것과는 달리 ADCP는 큰 체적에서 반향되는 초음파를 수집하고 이를 수심에 따라 일정 깊이별로 정리하여 수심별 유속 분포를 만들어 낸다. 그러므로 각기 다른 발생기에서 나온 음파들의 확산각이 클수록, 수심이 깊어질수록 더 큰 체적에서 자료가 수집되는 특성을 갖는다(Fig. 1 참조).

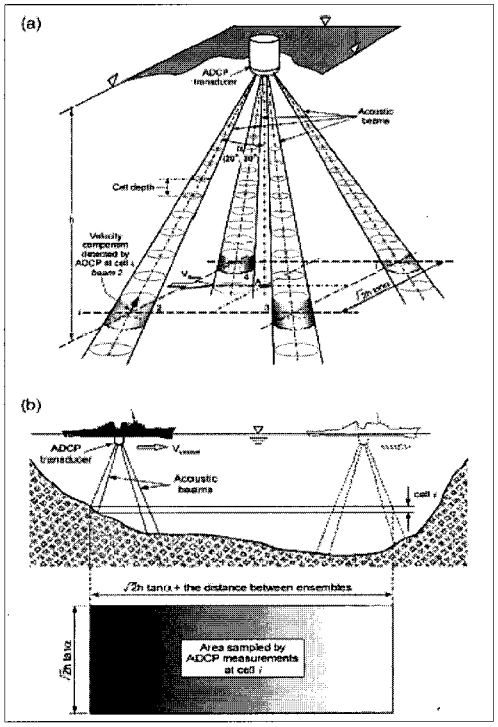

Fig. 1. Sampling principle of ADCP (Muste et. al., 2004b)

일정 시간동안 한 지점에서 연속적으로 점유속을 측정하는 일반적인 유속계와는 달리 ADCP는 기본적으로 순간 유속을 측정한다. 따라서 하천을 가로지르며 ADCP로 측정한 유속 자료는 수 십초 이상의 연속 측정으로 얻어지는 시간평균 유속 자료와는 차이가 존재하며 다양한 시간 규모에서 나타나는 난류의 영향을 반영하지 못하는 것으로 알려져 있다. 그러나 Fig. 1에서처럼 ADCP는 한 지점의 유속이 아닌 일정한 수심 범위의 유속을 측정하고 공간적으로 이를 평균함으로써 시간적 순간성을 보완하는 특성을 갖고 있다.

통상 ADCP를 이용하여 현장 하천에서 유속을 측정하는 경우 ADCP를 보트에 고정시키거나 별도의 작은 보트에 고정시켜 하천을 가로지르는 횡측선을 따라서 이동시거나 하폭이 큰 하천의 경우 대략적인 코스를 정

하여 이동하면서 측정한다. 이 때 ADCP는 자체적으로 기기의 방향과 유속 방향을 내장한 나침반에 의해 파악한다. 또한 기기가 이동하는 경로를 하상에 쏜 음파를 분석하여 측정하는 하상추적 기능을 갖고 있어 일정시간동안 이동한 거리와 단면 형태, 그리고 음파에 의해 수집된 유속 자료 등을 종합하여 유량을 계산한다. 이에 따라 유수의 흐름에 직각으로 측선을 설치하는 등의 작업이 불필요하여 대하천에서도 손쉽게 유량을 측정할 수 있는 장점이 있다. ADCP가 유량을 계산하는 것은 다음 식에 의해 이루어진다(Gordon, 1989).

$$Q = \iint \mathbf{n}(L)\cdot\mathbf{U}(z,L)dzdL$$

여기서 Q는 유량, n은 L에서 측선을 따른 직각단위벡터, U는 유속 벡터, z는 수심이다. ADCP는 측정된 유속에서 하상추적에 의해 계산된 보트의 이동 속도를 빼고 이를 보트의 진행 방향에 직각인 성분으로 변환하여 유량 계산에 활용하는 유속 성분을 추출한다. 그러므로 ADCP를 이동시키는 속도가 실제 유수의 흐름에 비해 빠른 경우 유속 측정에 오차가 발생하기 쉽다. 특히 유속이 전체적으로 느린 경우 그 오차가 증가하는 것으로 알려져 있다(Simpson, 2001). 그러므로 ADCP를 이동시키는 속도는 통상 유속의 3배를 초과하지 않는 것이 좋으며 가장 최적의 데이터를 얻기 위해서는 유속보다 느린 속도로 운용하는 것이 바람직하고 알려져 있다(RDI, 2003).

ADCP는 기기의 특성상 하천 단면 전체에서 유량을 측정할 수 없는 한계를 지니며 측정 가능한 영역은 Fig. 2와 같다. ADCP가 유속을 측정하기 위해서는 음파 송수신기가 수면 아래 잠겨 있어야 하며 ADCP부터 아래로 일정 거리까지는 정상적인 신호를 받기 위해 음파의 간섭 등의 효과를 차단하므로 이로 인해 수면 부근의 공백 거리가 발생하는데 이는 저주파의 ADCP일수록 크게 나타난다. 또한 음파가 송신기에서 발생하여 하상으로 전달될 때 음파의 확산각이 아닌 빗겨간 방향으로 일부 음파가 전달되므로 정상적인 음파에 비해 일찍 하상에 도달되어 강한 반사파를 발생시켜 하상 부근의 유속 측정시 노이즈가 발생하는 측면 효과가 존재한다. 이로 인해 ADCP는 하상 부근의 일정 깊이를 측정할 수 없게 된다. ADCP가 작동하는 최소 수심보다 얕은 양안 부근에서는 측정이 불가능하다는 특징이 있다. 그런데 ADCP는 이러한 측정 불가능 영역을 측정된 유속 자료를 이용하여 추정한다. 따라서 ADCP는 측정한 유량과 추정한 유량을 합산하여 하천 단면의 유량을 계산하는 것이다.

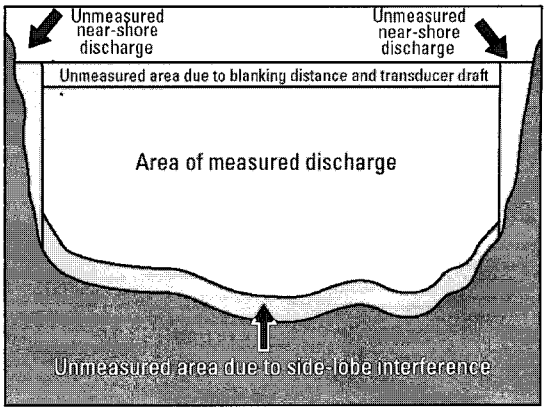

Fig. 2. Measured and estimated areas of ADCP (Simpson, 2001)

3. ADCP를 이용한 외국의 연구 동향

ADCP는 초기에는 바다를 운행하는 선박의 속도를 측정하는 장비로 개발되었으며 이후 주로 해양 연구에 이용되었으나 80년대 후반 이후로 하천의 유량 측정에도 도입되기 시작하였다(Gordon, 1989). 1990년대 이르러 ADCP 장비는 점차 개량되어 유속 측정의 정밀도가 향상되고 하상 추적 기능이 개선되어 하천 유량 측정에 점차 확대되어 이용되었다. USGS(Morlock, 1996)에서는 하천 유량 측정에 대한 ADCP의 적용성을 검토하기 위해 12개의 USGS 유량 관측소의 실측 결과를 이용하였으며, 기존 프라이스 유속계나 지점의 수위-유량 관계식과 비교하여 1~7%의 편차를 갖는 것으로 나타났다. Mueller(2002)는 RDI, Sontek 등 제조업체의 다양한 ADCP 모델을 현장 유량 측정을 통해 평가하였으며 하상 추적 기능에 의한 편차 등을 분석하였다. Oberg(2002)는 ADCP를 보정할 수 있는 기존의 방법을 검토하고 DGPS를 이용하여 하상 추적 기능의 편차를 산정할 수 있는 기법을 제시하였다. Gartner and Ganju(2002)는 공백 거리가 작은 ADCP에 의해 야기될 수 있는 수면 부근 유속 측정 오차를 ADV와의 비교를 통해 밝히는 연구를 수행하였다. Gonzales-Castro 등(2002)은 이동식 ADCP에 의해 측정된 순간 유속 자료를 고정식 ADCP에 의한 측정 결과와 비교하여 하류 방향의 유속은 시간 평균 유속을 대표하기에는 편차가 크다는 점을 지적하였으나, 공간적인 평균화에 의해 이러한 편차가 완화될 수 있음을 지적하였다. 이러한 연구를 토대로 미국 USGS에서는 2002년경부터 공식적인 유량 측정에 ADCP를 적용하기 시작하였다.

한편, 최근에는 ADCP를 이용하여 유량 측정 목적 외에 유속이나 난류 측정, 유사 농도 측정 등에 응용하는 등 다양한 연구가 진행되고 있다. Adler and

Nicodemus(2001)은 평균 유속 벡터를 계산하기 위해 ADCP로 측정한 자료를 후처리하는 소프트웨어를 개발하였으며, Muste et al. (2004b)은 ADCP 측정 결과를 후처리하여 유속 벡터를 산출하는 연구를 수행하였다. Barua and Rahman(1998)은 인도 Bramaputra 강에서의 측정을 통해 난류 강도와 같은 모멘트를 산정하기 위해서는 고정된 위치에서 15분 이상의 지속적인 측정이 필요함을 지적하였으며, Muste et al. (2002, 2004a, 2004b)은 고정식으로 ADCP를 운용하고 적절한 후처리 과정을 거칠 경우 난류를 산정할 수 있음을 보여주었다. Nystrom et al. (2002)는 ADCP가 갖는 기기상의 특성으로 인해 발생하는 난류 측정시의 오차를 지적하였다. 최근에는 ADCP의 반사파(Backscatter) 강도를 이용하여 소류사의 이동속도나 부유사의 농도를 측정하는 시도가 이루어졌다(Rennie et al., 2002; Holmes and Garcia, 2002; Nystrom and Gary, 2003).

4. 측정 장비와 현장

본 연구에서는 한국건설기술연구원에서 보유하고 있는 RDI사의 WorkHorse Rio Grande ADCP와 Sontek 사의 RiverCat을 이용하여 현장 측정을 실시하였다. 기기의 제원은 Table 1과 같다.

현장 하천에 대한 측정은 2003년 3월부터 2004년 12월까지 달천(괴산댐 지점), 금강(공주 지점), 탄천(종합운동장옆), 섬강(간현 지점) 등에서 수행되었으며 각 지점은 서로 다른 하상 조건을 지니고 있다. 괴산댐 지점과 공주 지점에서는 유속-면적법과 동일한 횡측선 상에서 유속 비교를 위해 ADCP를 이용하여 측정을 수행하였으며(Table 2), 특히 괴산댐 지점에서는 괴산댐 방류량 자료를 추가적으로 비교하였다. 그리고 네 지점 모두에서 유속-면적법 측정과 동일한 시간대에 유량 측정을 수행하여 두 방법을 비교하였다.

Table 1. Instrument summary

Item	WorkHorse Rio Grande	RiverCat
Manufacturer	RDInstrument(USA)	Sontek(USA)
Frequency of acoustic beams	1,200㎑	5,000㎑
Measurement mode	1, 5, 8, 11, 12	N/A
Depth bin size	0.05 ~ 1m	0.1 ~ 0.2m
Blanking Distance	0.2 ~ 1m	0.1m
Maximum profiling depth	4 ~ 30m	2.3m
Averaging method of profiling	Single pinging	5-second averaging

Table 2. Comparison of data from ADCP and velocity-area methods measured in the same section

Station	Instrument	Case	Date	Time (min)	No. of profiles (No. of verticals)	Width (m)	Area (m²)	Discharge (cms)
Gongju	WorkHorse Rio Grande (1,200㎑)	KJ#1	10.25 17:47	10	418	108.14	215.86	56.019
		KJ#2	10.25 18:03	15	1023	107.77	212.49	55.067
		KJ#3	10.25 18:24	7	469	108.16	215.82	57.230
		KJ#4	10.25 18:42	9	624	108.15	211.91	56.695
		average				108.06	214.02	56.250
	Propeller Type	Velocity-area method	10.25 12:40	180	27	106.50	218.40	71.290
Goesan-Dam	WorkHorse Rio Grande (1,200㎑)	TR#1	12.03 19:41	9	544	83.57	108.28	12.765
		TR#2	12.03 19:50	9	555	82.42	105.66	12.130
		TR#3	12.03 20:00	12	778	83.58	108.80	12.754
		TR#4	12.03 20:12	13	859	82.04	105.34	11.670
		TR#5	12.03 20:25	5	260	83.18	111.03	12.677
		TR#6	12.03 20:30	3	221	81.74	105.77	11.543
		average				82.76	105.66	12.260
	RiverCat (5,000㎑)	TR#A1	12.03 20:36	4	47	78.70	N/A	10.991
		TR#A2	12.03 20:41	3	40	82.33	N/A	10.100
		TR#A3	12.03 20:45	3	41	78.34	N/A	10.374
		TR#A4	12.03 20:51	4	52	79.94	N/A	13.493
		average				79.83	N/A	11.240
	Price AA Type	Velocity-area method	12.03 18:00	135	31	83.00	108.59	12.135
	Dam release		12.03 19:00	240				11.875

5. 수심 측정 결과

현장 하천에서 ADCP를 사용할 때는 유속-면적법과는 달리 통상 횡측선을 설치하지 않는다. 그러므로 ADCP를 이동시키는 경로는 직선이 아닌 곡선이고, 종종 유수의 흐름에 영향을 받아 휘어지기도 한다. 이러한 현장 조건 하에서 ADCP로 측정한 유량 자료가 신뢰성을 갖기 위해서는 정확한 하상 추적과 이를 토대로 정확한 수심 측정과 단면적 계산이 이루어져야 하며, ADCP는 이러한 현장 조건을 고려하여 개발된 기기이다. 그러나 아직까지 ADCP 하상 추적 기능의 정확성에 대해 국내 하천에 적용하여 검토한 사례가 거의 없었다. 본 연구에서는 하상 특성이 서로 다른 달천 괴산 지점과 금강 공주 지점을 대상으로 유속-면적법과 동일한 직선의 횡측선에서 ADCP의 하상 추적 기능을 검토하였다.

유속-면적법과 동일한 횡측선을 따라 Rio Grande WorkHorse와 RiverCat 두 대의 ADCP를 정밀하게 이동시킨 결과 얻어진 수심 분포와 도섭봉(또는 표척)에 의해 측정된 수심 분포는 Fig. 3과 4와 같다. 하상이 모래와 잔자갈로 구성된 공주 지점에서는 ADCP와 표척에 의해 측정된 수심이 거의 일치하였다. 괴산댐 지점의 경우 두 대의 ADCP 모두 도섭봉에 의해 측정한 수심과 전반적으로 일치하는 결과를 나타내었으나 좌안에서부터 20~35 m 지점과 57~75 m 지점에서 일부 도섭법에 의한 수심과 약 10 cm 정도의 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 하상이 울퉁불퉁한 호박돌 하천에서 도섭봉에 의해 한 지점에서 얻어지는 수심과 ADCP의 3개 혹은 4개의 음파가 획득한 수심의 평균치와의 차이로 생각된다. 이러한 결과는 ADCP의 하상추적 기능이 하천의 단면적을 대체로 정확하게 계산할 수 있음을 뜻한다.

Table 2에는 고정된 횡측선을 따라 ADCP에 의해 측정된 하폭과 단면적이 제시되어 있다. 하폭의 경우 횡측선과 비교하여 ±1.5% 정도의 오차 범위로 측정되었으며, 단면적의 경우 유속-면적법과 비교하여 ±3% 정도의 차이가 있는 것으로 나타났다. 유속-면적법의 경우 측선 간격을 크게 할 경우 단면적의 오차가 발생할 수 있다는 점을 고려하면 ADCP의 하상 추적에 의해 계산되는 단면적은 상당히 정확한 것으로 생각된다.

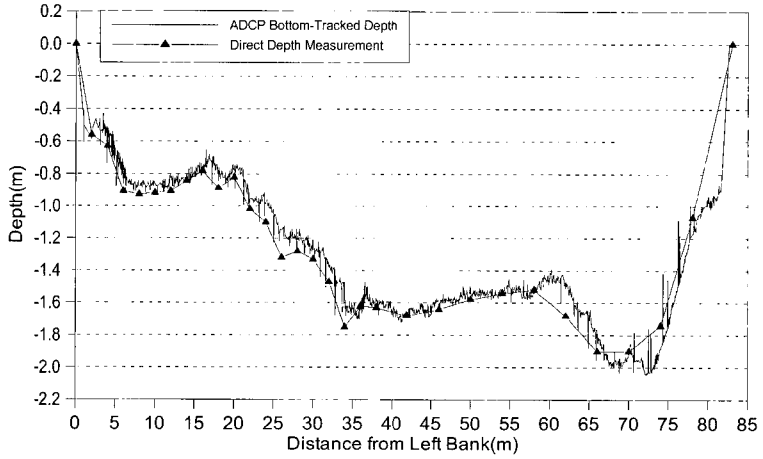

Fig. 3. Depth profile at Goesan-Dam station

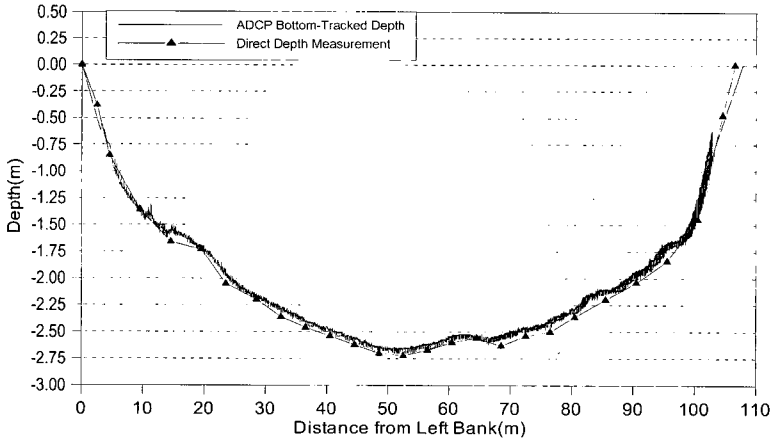

Fig. 4. Depth profile at Gongju station

6. 유속 측정 결과

유속-면적법을 이용하여 유속을 측정할 경우 하천을 횡단하는 횡측선을 설치하고 이를 따라 일정 간격의 측선을 정하고 각 측선마다 1~3점법으로 최소 수 십 초 이상의 평균 유속을 측정한다. 그 결과 얻어지는 유속 자료는 한 지점에서 시간적으로는 평균된 자료이면서, 공간적으로는 연직방향과 하폭 방향 모두에서 불연속적인 특성을 지닌다. 이에 비해 ADCP를 이용하여 유속을 측정할 경우 하천을 횡단하면서 순간적으로 유속을 측정하므로 얻어지는 유속 데이터가 시간적으로는 순간적이면서 공간적으로는 연속적인 특성을 지닌다는 차이점이 있다. 본 연구에서는 동일 단면에서 유속 분포를 비교하기 위해 2개 지점(달천 괴산댐 지점과 금강 공주 지점)에서 동일한 횡측선을 따라 ADCP와 유속-면적법을 이용하여 유속을 측정하고 비교하였다.

6.1 연직유속분포

통상적으로 수행되는 유속-면적법을 이용한 유량 측정에서는 각 측선에서의 평균 유속을 수심에 따라 1점법, 2점법, 3점법 등을 사용하여 결정한다. 이들 방법은 각 측선에서 수면 아래 수심의 0.6D, 0.2D/0.8D, 0.2/0.6/0.8D에서 측정한 유속을 산술 평균한 유속이 평균유속과 같다고 가정하는 이론식 내지는 경험식에 바탕을 두고 있다. 그러므로 현장 하천의 연직유속분포가 가정하는 이론식을 따르지 않을 경우 1점법 내지는 3점법을 이용하는 측정 방법은 정확한 평균유속을 획득할 수 없다. 이를 보완하여 정확한 평균유속을 얻기 위해서 사용하는 방법 중에는 수심의 0.1D에 해당하는 간격으로 점유속을 측정하는 유속분포법이 알려져 있으나, 각 점에서의 시간평균값을 획득하여야 하므로 하천 단면을 모두 측정하는데는 매우 긴 시간이 소요된다. 이에 비해 ADCP는 하천을 횡단하면서 순간적으로 한 측선의 연직유속분포를 얻을 수 있으므로 하천 단면의 유속분포를 단시간에 측정할 수 있다는 장점이 있다.

ADCP와 유속-면적법에 의한 연직유속분포를 비교하기 위해서는 원칙적으로 두 방법 모두 시간평균한 자료를 이용하여야 한다. 하지만 하천에서 ADCP를 실무적으로 이용하는 경우 하천을 가로질러 이동하면서 유속을 측정하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 ADCP에 의해 측정된 순간유속자료가 유속-면적법에 의해 얻어진 시간평균 유속과 어떤 차이가 있는지를 연직유속분포의 관점에서 살펴보고자 하였다. 비교를 위해 금강 공주 지점과 달천 괴산댐 지점에서 이동식으로 측정한 ADCP 자료와 동일 횡측선상의 같은 측선(vertical)에서 얻은 유속-면적법 자료를 사용하였다. 이동식 ADCP의 경우 내장 나침반의 방위를 이용한 ENU(East-North-Up) 좌표계를 이용하여 유속을 산출하므로 횡측선의 방향을 기준으로 좌표변환하여 하류방향 유속을 계산하였다.

Fig. 5~7은 달천 괴산댐 지점에서 수심과 평균 유속이 서로 다른 세 연직측선에서 ADCP로 얻은 연직유속분포를 2점법 내지는 3점법 자료와 비교한 것이다. ADCP의 연직유속분포는 측정 수심 범위에서 정상값으로 측정된 자료와 측정 불가능 영역에서는 power 법칙을 이CC용하여 추정 계산된 자료로 구성되는데 이는

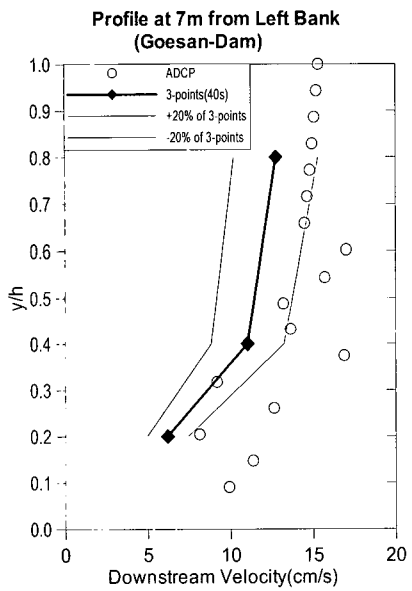

Fig. 5. Goesan-Dam(depth 0.9m)

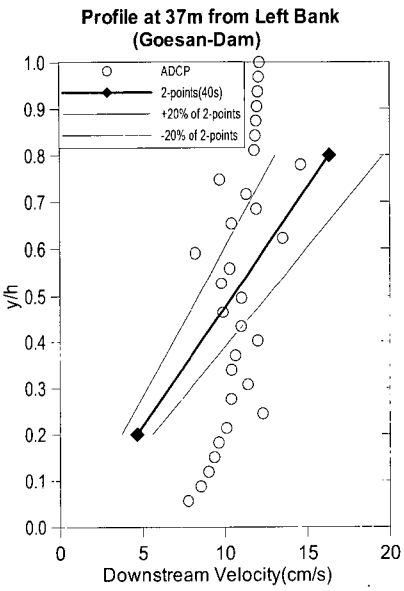

Fig. 6. Goesan-Dam(depth 1.6m)

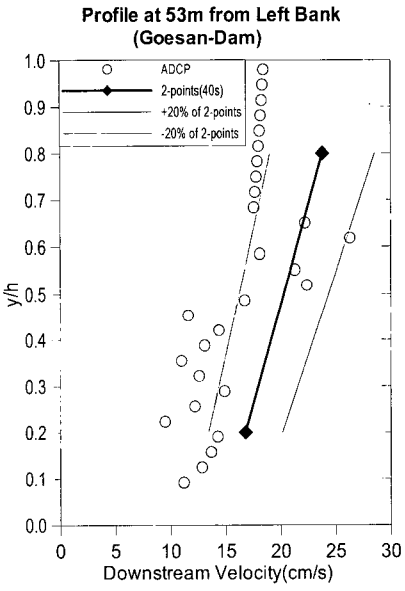

Fig. 7. Goesan-Dam(depth 1.5m)

수면부근, 하상부근, 그리고 측정 수심 범위 내의 오류값 등을 정상치의 자료 분포를 이용하여 수심 셀의 크기에 따라 내외삽하여 계산한다. ADCP의 순간 측정으로 얻어진 자료는 2점법 내지 3점법으로 측정한 40초 이상의 시간평균한 자료와 비교하여 일부는 비슷하기도 하나 대체로 측선에 따라 큰 차이를 나타내고 있으며 일관된 경향을 나타나지 않고 있다.

Fig. 8~10은 공주 지점에서 수심과 유속이 각기 다른 세 지점에서 ADCP로 얻은 연직유속분포를 3점법 자료와 비교한 것이다. 괴산댐 지점과는 달리 공주 지점 결과에서는 유속에 따라 약간의 경향성이 있어 보인다. 즉 유속이 느린 경우 ADCP 자료와 유속-면적법 자료와 차이가 크게 나타났으나(Fig. 8) 유속이 보다 빠른 조건(Fig. 9, 10)에서는 두 방법에 의한 자료가 비슷한 양상을 나타내고 있다. 또한 괴산댐 지점에서 ADCP 유속의 산포 정도가 큰 반면 공주 지점에서는 유속의 산포 정도가 적은데, 이는 공주 지점의 하상이 상대적으로 매끄러운데 기인하는 것으로 생각된다.

ADCP는 하천을 가로질러 순간적으로 획득하는 유속 자료를 기초로 유량을 계산하므로 순간 유속이 평균 유속과 큰 차이가 있을 경우 유량 계산의 불확실도가 증가할 가능성이 높아진다. 하지만 기존의 연구 결과들은 ADCP에 의해 측정된 유량값이 유속-면적법을 이용한 유량값과 비교하여 상당히 정확하다고 보고하고 있다(Morlock, 1996; Mueller, 2002). 이는 순간유속자료에 기반하여 유량을 측정하는 불확실성에도 불구하고 ADCP가 하폭 방향으로 조밀한 연직유속분포를 생성함으로써 순간유속이 가진 문제점들을 공간적으로 상쇄하는 효과를 나타내기 때문인 것으로 알려져 있다(Gonzales-Castro et al., 2002).

Figs. 11 and 12는 각각 괴산댐 지점과 공주 지점에서 동일한 시간평균 유속-면적법의 연직측선에 좌우로 0.5 m 범위 내에 인접하고 수심이 거의 같은 3개의 ADCP 연직유속분포를 공간적으로 평균한 결과를 유속-면적법과 비교하여 나타낸 것이다. 측정시 ADCP를 부착한 보트를 유속과 비슷하거나 유속보다 느린 속도(초당 0.3 m 이하)로 하천을 가로질러 이동시켰으므로 0.5m 범위에 드는 인접 자료를 확보할 수 있었다. Figs. 11 and 12를 보면 인접한 3개의 연직유속분포를 평균한 값은 하상 부근을 제외한 대부분의 수심 범위에서 대체로 시간평균한 자료와 비슷한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 13은 공주 지점에서 ADCP를 횡측선에 따라 4회 반복 이동시키면서 측정한 값을 평균한 자료를 나타내고 있다. 이 결과는 횡측선을 따라 반복 측정하여 평균한 연직유속분포가 같은 지점의 시간평균한 연직유속분포와 상당히 비슷하다는 것을 잘 보여주고 있다. 물론 하천을 가로지르는 횡측선을 설치하지 못하거나 수심이 깊고 보트의 이동속도가 빠른 경우 동일한 지점(또는 근접 지점)에 대한 유속 자료를 획득하기 어려우므로 이러한 평균을 산정하기 곤란한 점이 있으나 이러한 결과들은 ADCP를 동일한 측선을 따라 수 차례 반복하여 측정할 경우 ADCP의 이동식 운용이 충분히 양질의 유속 자료를 제공할 수 있다는 것을 나타낸다고 할 수 있다(Muste et al., 2004b).

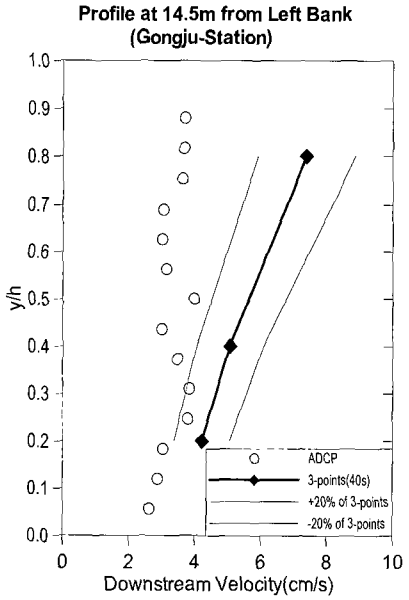

Fig. 8. Gongju(depth 1.5m)

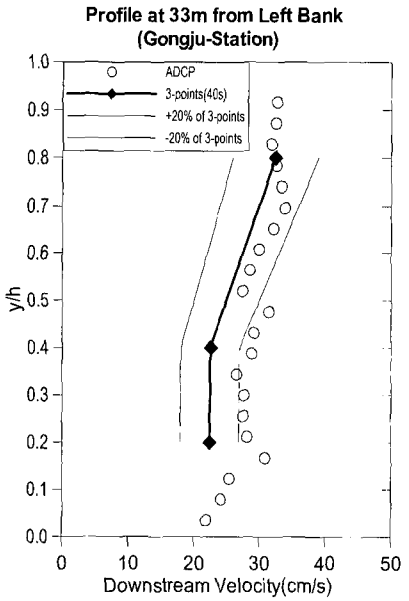

Fig. 9. Gongju(depth 2.1m)

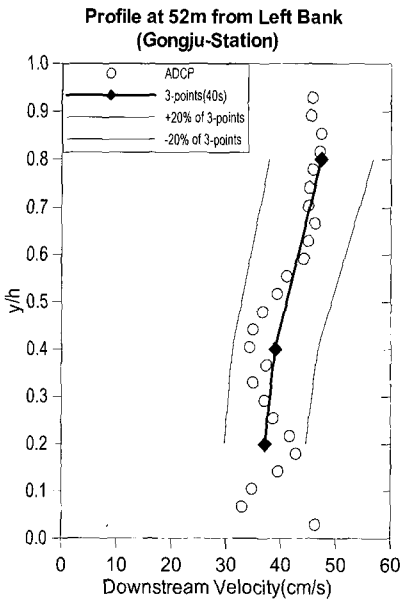

Fig. 10. Gongju(depth 2.75m)

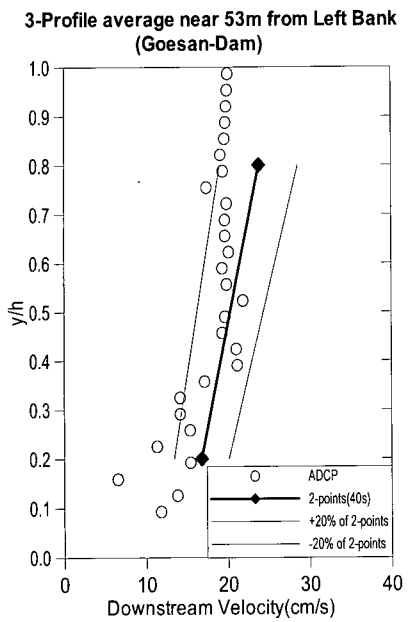

Fig. 11. A spatial-averaged profile of 3 adjacent ensembles (Goesan-Dam)

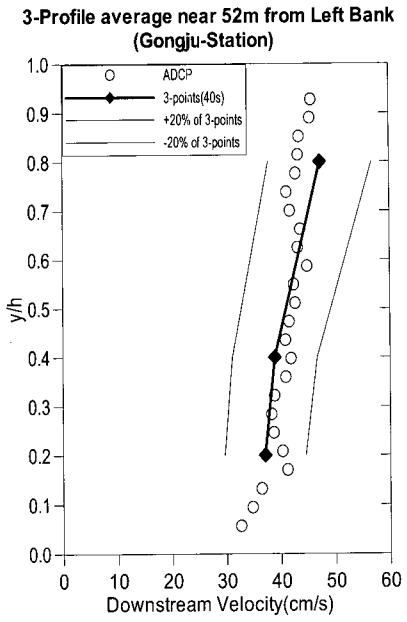

Fig. 12. A spatial-averaged profile of 3 adjacent ensembles (Gongju)

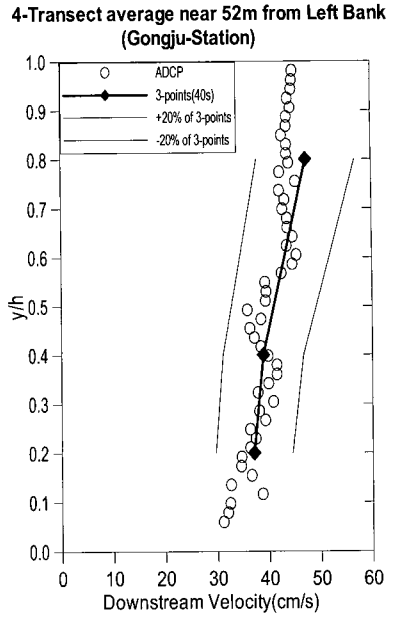

Fig. 13. A averaged profile four transects at one point (Gongju)

6.2 수평유속분포

수평유속분포는 횡측선을 따라 측정된 모든 연직유속분포의 수심평균치로 구성된다. 유속-면적법의 경우 하천의 하폭이나 흐름 상황에 따라 차이가 있으나 횡측선 상에서 20~40개의 측선의 유속을 측정하여 수평유속분포가 결정되지만, ADCP를 이용할 경우 횡측선을 한 번 가로지르는 것만으로도 수 십 내지는 수 백개 이상의 연직유속자료를 획득하므로 보다 세밀한 수평유속분포를 획득할 수 있다.

Figs. 14 and 15는 각각 괴산댐 지점과 공주 지점에서 측정한 ADCP 자료의 수평유속분포이다. ADCP에 의한 유속분포는 전체적으로 매우 변동성이 있어 순간자료의 특징을 잘 보여주고 있다. 실선은 유속-면적법에 의한 측정 결과이고 Figs. 14 and 15의 Transect #1~4는 각각 횡측선을 따라 ADCP를 반복 이동한 결과이다.

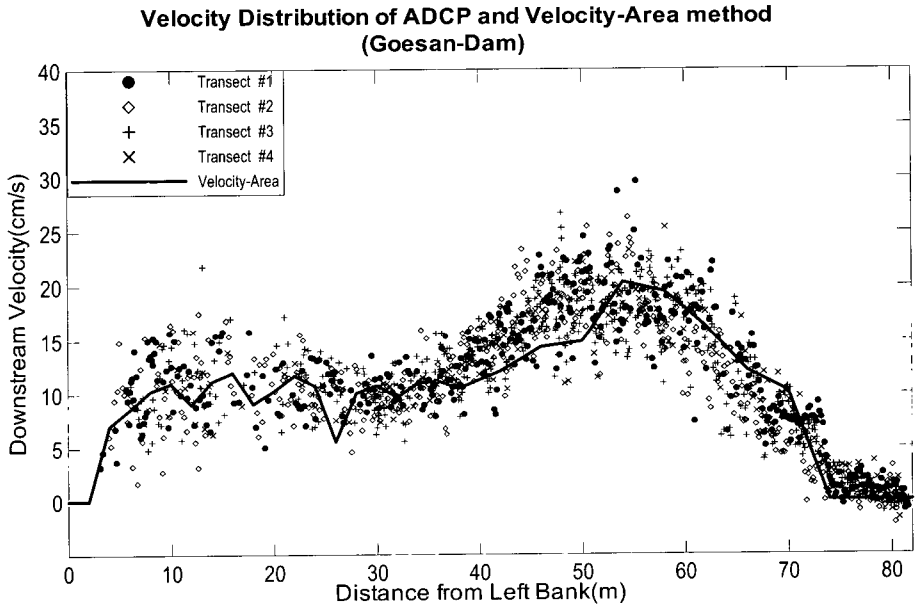

Fig. 14. Comparison of the ADCP's four instantaneous velocity distributions with the time-averaged one by velocity-area method(Goesan-Dam)

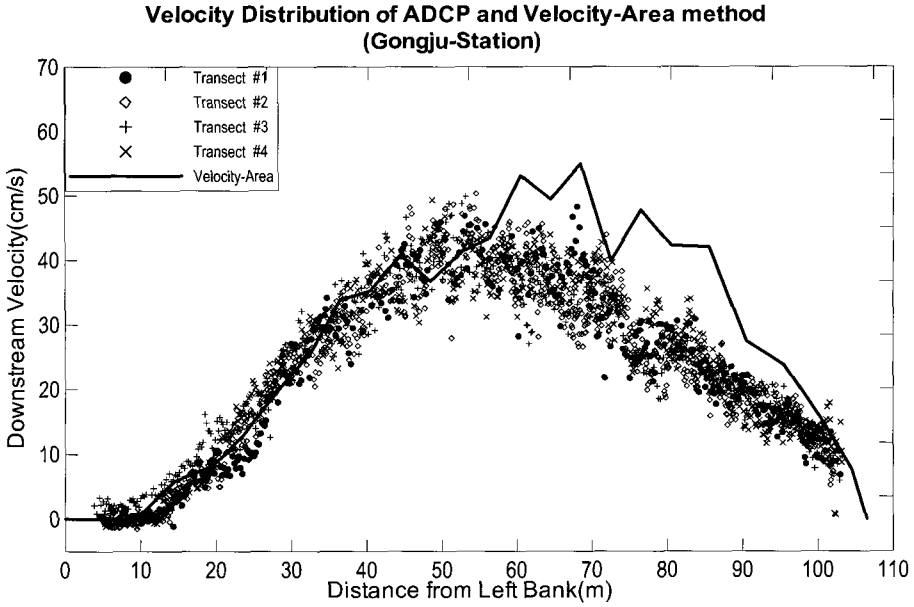

Fig. 15. Comparison of the ADCP's four instantaneous velocity distributions with the time-averaged one by velocity-area method(Gongju)

괴산댐 지점의 자료는 순간 유속자료임에도 전체적으로 유속-면적법 자료의 주변에 대체로 고르게 분포하는 양상을 나타내고 있다. 하지만 좌안 쪽의 0~30 m 구간에서는 유속-면적법 자료와 ADCP 자료 모두 다른 부분에 비해 약간 편차가 크게 나타나고 있다. 이러한 특징은 주로 두 가지 원인에 의한 것으로 파악된다. 그 하나는 괴산댐 지점의 경우 하상이 호박돌 이상으로 구성되어 있어 울퉁불퉁하며 이로 인해 난류의 발생이 보다 커질 가능성이 있다는 점이다. 다른 하나는 이 구간의 측정된 평균 유속이 10 cm/s 정도의 상대적으로 저유속인 관계로 평균 유속 대비 순간 유속의 불확실도가 큰 데 기인하는 것으로 생각된다. 그로 인해 40초 평균 유속인 유속-면적법 측정 결과도 인접 측선에서 차이가 비교적 크게 나타나고 있다. ISO 748(ISO, 1997)에 따르면 평균 유속이 느릴수록 유속 측정 시간에 기인한 불확실도가 커진다. 이는 결국 평균 유속 대비 순간 유속의 편차가 크다는 점을 의미한다.

공주 지점의 자료의 경우 좌안으로부터 약 55 m까지의 경우 대체로 유속-면적법 자료와 거의 일치하는 양상을 나타내며, 유속 자료의 진동 또한 괴산댐 자료에 비해 적은 것으로 나타났다. 이러한 특징은 유속이 상대적으로 낮은 좌안 0~30 m 지점에서도 마찬가지인 점으로 미루어 주로 공주 지점의 하상이 괴산댐에 비해 상대적으로 매끈한 잔자갈 내지는 모래로 구성되어 있는데 기인하는 것으로 파악된다. 공주 지점 자료의 경우 하폭 전체에 걸쳐 순간 유속 자료의 진동폭은 괴산댐 지점에 비해 작게 나타나고 있다. 55m보다 우안 쪽의 경우 유속-면적법과 ADCP 자료의 결과가 차이를 나타내고 있다. 이러한 이탈의 경향은 하천을 4회 횡단하면서 측정한 결과에 모두 공통되는 현상이다. 앞서 검토한 수심 측정 결과와 ADCP에 의한 4회 반복 측정 결과가 동일한 경향을 나타내고 있는 점을 고려한다면 이는 ADCP 결과의 문제가 아니라 유속-면적법 측정 결과의 문제라고 파악된다. 그리고 그 원인은 두 가지 정도로 추정된다. 첫째는 유속-면적법 측정상의 오류로 인한 것으로 생각된다. 좌안으로부터 60~80 m 범위에서 하상 부근의 0.8D 지점 유속 측정 시 하상에 별다른 특징이 없는데도 불구하고 수면 부근 유속보다 크거나 거의 비슷한 정도의 유속이 관찰되었다. 이는 평균 유속이 50 cm/s에 육박하는 측정 위치의 특성상 추의 무게가 유속계를 정확하게 연직 방향으로 지지하지 못할 경우 유속계가 제 위치에서 지속적으로 측정되지 못하고 승강을 거듭하였을 수 있기 때문으로 추정된다. 따라서 유속계의 승강이 반복되면서 보다 위쪽의 빠른 유속을 반영할 가능성이 있다. 둘째, 유수의 주흐름이 횡측선에 직각이 되지 않고 비스듬한 방향을 가지므로 유속계의 방향이 흐름을 따르다보니 유속이 과도하게 측정되었을 것으로 추정된다. 이러한 원인들에 의한 차이를 제외한다면, ADCP로 측정한 유속이 대체로 유속-면적법 측정값과 유사하다는 것을 알 수 있다.

Figs. 16 and 17은 중간단면적법으로 계산하는 유속-면적법의 측선에 해당하는 구간 수면폭만큼 공간적으로 ADCP의 연직유속분포 자료를 평균하여 나타낸 것이다.

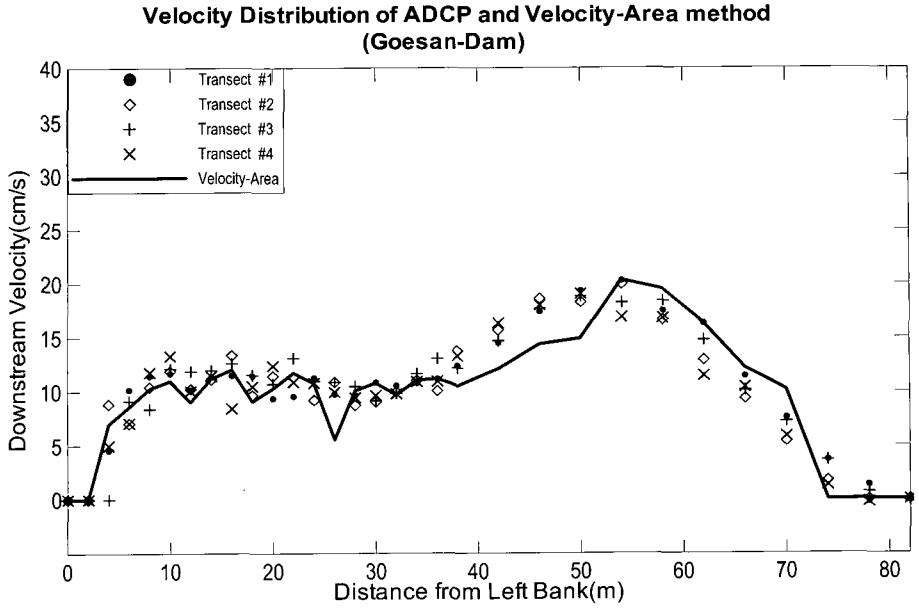

Fig. 16. A comparison of sub-section width spatial-averaged velocity distributions of ADCP with that of velocity-area method(Goesan-Dam)

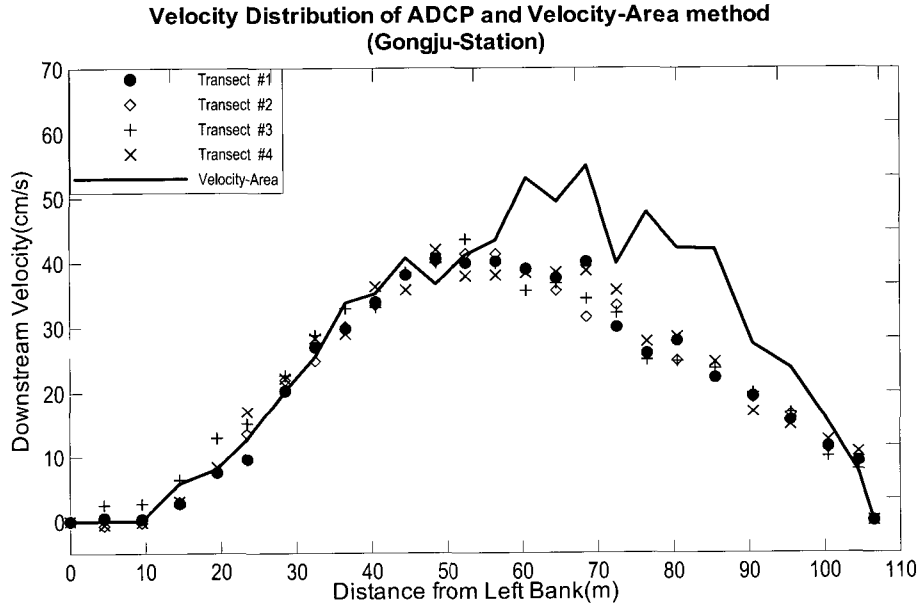

Fig. 17. A comparison of sub-section width spatial-averaged velocity distributions of ADCP with that of velocity-area method(Gongju)

이 결과들은 공주 지점에서 유속-면적법 측정상의 문제를 제외한다면 ADCP 자료가 유속-면적법 결과와 비교하여 상당히 비슷한 분포를 나타낸다는 것으로 보여주고 있다.

공간평균한 유속자료는 그 성격상 시간평균한 유속자료를 대신할 수 없는 것이 사실이다. 하지만, 본 연구 결과는 ADCP가 획득한 순간유속자료를 공간적으로 평균할 경우 시간평균한 유속자료와 비슷한 결과를 나타낸다는 점을 보여주고 있다. 따라서 수심 측정 결과가 동일하다면 결과적으로 동일한 유량을 산출할 수 있게 된다. 그러므로 ADCP를 이용한 유량 측정은 횡측선을 따라 흐름 상황에 맞게 충분한 횟수를 반복할 경우 시간적으로도 단축되면서 양질의 유속과 유량 자료를 얻을 수 있다는 장점을 갖는다. 또한 유속-면적법이 하천 현장의 상황에 의해 비정상적인 유속 측정치를 획득할 가능성이 있는 반면에 ADCP의 경우 기기가 보장하는 수심, 유속 범위 및 적정 이동 속도를 준수하여 측정할 경우 충분히 정확한 유속과 유량 측정이 가능할 것으로

생각된다.

7. 유량 측정 결과

하천을 가로질러 설치한 횡측선 상에서 얻은 연직유속분포나 이를 수심평균한 수평유속분포가 시간평균한 유속 측정 방법의 결과와 비슷하고 단면적이 동일하다면 대체적인 유량이 큰 오차없이 비슷할 것으로 예상할 수 있다. 사실상 ADCP는 이러한 과정을 내장된 컴퓨터로 수행함으로써 현장에서 즉각적으로 유량을 측정할 수 있게 고안된 장비이다. 하지만 ADCP를 이용하여 실제 현장에서의 유량 측정을 수행할 경우 인적, 시간적 경제성을 고려하면 정확한 횡측선을 설치하거나 보트를 매우 느린 속도로 이동시키는 것은 사실 쉽지 않다. 그러므로 하천 현장에서 쉽게 적용할 수 있는 방법으로 ADCP를 사용하여 얻어진 유량을 유속-면적법과 같은 기존의 유량 측정기법이나 알려진 댐 방류량과 비교하고 그 오차를 평가한다면 ADCP의 현장 적용성을 간접적으로 평가할 수 있다고 생각된다.

Table 3은 2003년부터 2004년까지 탄천, 간현, 괴산댐 등의 지점에서 ADCP와 유속-면적법을 동시에 시행

Table 3. Comparison table of discharge data measured by ADCP and velocity-area method

Station	No. of measurement	Discharge (m^3/s)	Relative error	Station	No. of measurement	Discharge (m^3/s)	Relative error	Station	No. of measurement	Discharge (m^3/s)	Relative error
Tanchun-P4	1	16.94	8.7%	Tanchun-P6	1	17.08	13.3%	Ganhyun-P1	1	16.78	0.7%
	2	15.71	0.8%		2	17.36	15.1%		2	16.84	1.0%
	3	16.46	5.6%		3	17.27	14.5%		3	15.37	-7.8%
	4	17.12	9.9%		4	14.66	-2.8%		4	15.75	-5.5%
	5	14.46	-7.2%		5	14.48	-4.0%		5	17.57	5.4%
	6	15.29	-1.9%		6	15.00	-0.5%		**COV**		**5.4%**
	7	16.75	7.5%		7	14.99	-0.6%		**Average**	**16.46**	
	8	14.46	-7.2%		8	15.65	3.8%		**VA**	**16.67**	
	9	17.04	9.4%		9	14.29	-5.3%		**Difference**		**1.3%**
	10	14.59	-6.4%		10	15.76	4.5%	Goesan-P2	1	10.99	-9.4%
	11	14.67	-5.9%		11	13.91	-7.8%		2	10.10	-16.8%
	12	16.06	3.1%		12	15.71	4.2%		3	10.37	-14.5%
	13	14.08	-9.6%		13	15.34	1.7%		4	13.49	11.2%
	COV		**7.2%**		14	13.86	-8.1%		**COV**		**13.8%**
	Average	**15.66**			15	14.84	-1.6%		**Average**	**11.24**	
	VA	**15.58**			16	13.76	-8.7%		**VA**	**12.14**	
	Difference		**0.5%**		**COV**		**7.7%**		**Dam**	**12.90**	
Tanchun-P5	1	21.03	-1.1%		**Average**	**15.25**			**Difference**		**7.4%**
	2	22.86	7.5%		**VA**	**15.08**		Goesan-P3	1	14.70	12.5%
	3	22.62	6.3%		**Difference**		**1.1%**		2	14.27	9.2%
	4	21.25	-0.1%	Ganhyun-P2	1	17.11	2.7%		3	13.70	4.9%
	5	22.43	5.5%		2	18.27	9.6%		4	14.42	10.4%
	6	22.25	4.6%		3	18.67	12.0%		5	14.31	9.5%
	7	22.30	4.8%		4	17.26	3.6%		**COV**		**2.5%**
	8	21.94	3.1%		5	17.32	3.9%		**Average**	**14.28**	
	9	22.17	4.3%		6	15.98	-4.1%		**VA**	**13.06**	
	10	22.80	7.2%		7	16.68	0.1%		**Dam**	**12.00**	
	11	21.82	2.6%		8	18.69	12.1%		**Difference**		**9.3%**
	12	21.02	-1.2%		9	19.15	14.9%	Goesan-PA	1	12.77	5.2%
	COV		**2.9%**		**COV**		**6.0%**		2	12.13	0.0%
	Average	**22.04**			**Average**	**17.68**			3	12.75	5.1%
	VA	**21.27**			**VA**	**16.56**			4	11.67	-3.8%
	Difference		**3.6%**		**Difference**		**6.8%**		5	12.68	4.5%
									6	11.54	-4.9%
									COV		**4.5%**
									Average	**12.26**	
									VA	**12.14**	
									Dam	**12.00**	
									Difference		**1.0%**

* COV : coefficient of variance(standard deviation/average), VA : velocity-area method, Dam : Dam release

하여 유량을 측정한 결과를 비교한 자료이다. 총 70회의 측정 자료가 수집되었으며, 각 자료와 지점별 평균치를 동일한 시간에 수행된 유속면적법 자료와 비교하였다. Table 3의 결과는 ADCP로 측정한 개별 자료의 경우 최대 16.8%의 오차를 나타내고 있다. 이러한 오차는 ADCP의 측정상 오차뿐만 아니라 비교 대상으로 유속-면적법을 시행할 때 정밀법(6점법)으로 수행하는 과정에서 장시간 측정하여 일부 수위의 변동이 발생한 경우(탄천P6 케이스)와 댐 방류량의 변동으로 인한 요인도 포함된다(괴산댐 케이스). USGS의 연구는(Simpson, 2001) ADCP를 이용하여 유량을 측정할 경우 4회 이상의 평균값을 유량 측정값으로 결정하는 것이 바람직하다고 제시하고 있다. 이에 따라 각 케이스별로 수 회의 자료를 평균하여 유량 값으로 사용한다고 볼 때 평균값을 기준한 오차는 0.1%~9.3% 정도 범위로서 유속면적법 대비 오차가 감소함을 나타내고 있다(Fig. 18). 이는 USGS에서 조사한 결과(Mueller, 2002)인 평균 5% 정도의 범위보다는 약간 큰 정도이다. 물론 보다 넓은 유량 범위에 대해서, 또 다양한 하천을 대상으로 하여 ADCP의 적용성을 검토해야 하겠지만, 현재까지의 결과는 ADCP를 이용한 측정값이 기존의 유속-면적법 유량 측정값과 비교하여 큰 오차가 발생하지 않는 것으로 파악된다.

현장 하천에서 ADCP를 이용하여 유량을 측정하는 대부분의 경우 하천의 규모와 흐름 상태에 따라 다르긴 하나 유량 변화가 없는 측정 시간(1시간 이내) 동안 수회 이상 하천을 좌우로 횡단하면서 유량을 측정하는 것이 일반적이다. WorkHorse를 제조하는 RDI 사의 경우 최소 4회 이상의 짝수 측정을 권장하고 있으며(RDI, 2003), Muste 등(2004b)의 경우 충분히 여러 번 반복(10회 이상)할 경우 양질의 자료를 얻을 수 있다고 제안하였다. USGS의 경우 조위의 영향을 받는 하천을 제외한 일반적인 하천에서 최소 4회 이상의 측정을 권장하고 있으며, 그 중 1개의 자료라도 평균의 ±5%가 넘을 경우 4회의 추가 측정이 바람직하다고 제안하였다(Simpson, 2001). 본 연구에서는 반복 횟수에 따라 유량 오차의 변화를 살펴보기 위해 동일 지점에서 최소 4회, 최대 16회를 반복하여 측정한 유량 자료를 이용하여 횟수의 증가에 따라 유속-면적법 대비 누적평균오차가 어떻게 변화되는 지를 조사하였다(Fig. 19). 연구의 결과는 반복 횟수가 많아져도 전체 평균과 유속-면적법 사이에 어느 정도의 오차가 남아 있으나 전체적으로는 반복 측정 횟수가 증가함에 따라 상대오차의 절대값이 감소하는 경향을 나타내고 있으며 대체로 8회 정도 반복할 경우 5% 정도의 범위에 드는 것으로 나타났다. 따라서 ADCP로 유량 측정할 경우 총 측정 시간이 과다하여 유량 변동이 반영되지 않는 범위 내에서 가급적 수회 이상의 반복 측정이 바람직할 것으로 판단된다.

8. 요약 및 결론

ADCP는 음파의 도플러 효과를 이용하여 하천을 횡단하면서 단시간에 유속과 유량을 측정할 수 있는 장비로서 본 연구는 현장 하천에서 ADCP를 이동식으로 운용하여 측정한 유속, 유량 자료를 동일한 지점에서 측정한 유속-면적법과 비교하여 ADCP를 이용한 유속, 유량 자료의 특성을 살펴볼 목적으로 수행되었다. 분석은 먼저 유량 계산의 기초가 되는 수심 분포로부터 시작하였으며, 연직유속분포, 수평유속분포와 유량을 기존

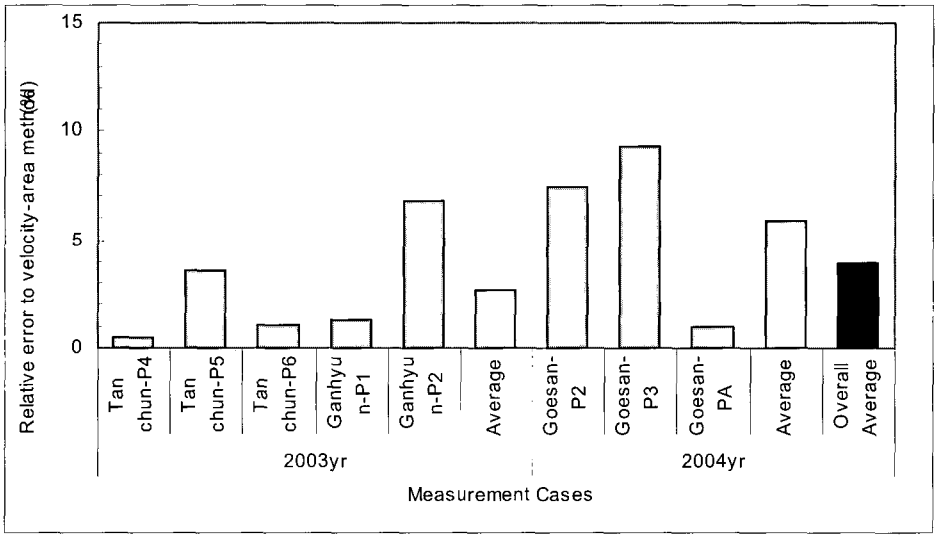

Fig. 18. Relative errors of ADCP discharge data to those of velocity-area method

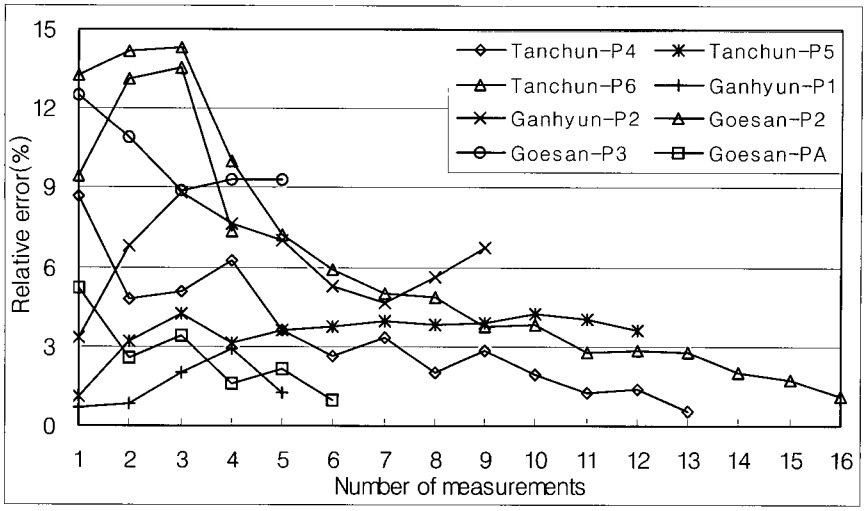

Fig. 19. Change of relative errors with increase of the number of measurements

의 유속-면적법 결과와 비교하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

1) ADCP에 의해 측정된 수심 분포는 하상 조건에 일부 영향을 받았으나 직접 측심에 의해 측정한 수심 분포와 거의 일치하였다.
2) 이동식 ADCP로 획득한 연직유속분포 자료의 경우 개별적인 연직유속분포는 시간평균한 유속-면적법 자료와 지점별로 유사하거나 일부 차이가 나타났다. 그러나 유속-면적법의 기준 유속 측선에 좌우에 근접한 3개의 연직유속분포 자료를 공간적으로 평균한 결과 그 차이는 감소하고 유사한 유속 패턴을 나타내었으며, ADCP를 반복하여 왕복하면서 측정한 자료를 가장 가까운 기준 유속 측선 자료와 비교한 결과도 시간평균한 자료와 비슷한 연직유속분포를 나타내었다.
3) 수평유속분포의 경우 모든 연직유속분포자료를 그대로 이용한 결과는 횡방향으로 유속의 진동이 있으나 전체적인 경향은 유속-면적법의 분포와 대체로 일치하였으며 개별 자료를 유속-면적법이 계산되는 중간단면적법에 따라 해당 구간 하폭만큼 공간적으로 평균할 경우 유속-면적법 자료와 보다 잘 일치하는 양상을 나타내었다. 연직과 수평유속분포에서 얻어진 이러한 결과들은 ADCP가 순간적인 유속자료를 생성하지만 이를 공간적으로 평균한 자료가 시간평균한 자료와 근사한 결과를 나타낸다는 사실을 확인하고 있다.
4) 유량의 경우 ADCP로 측정한 개별 측정값들은 어느 정도 오차를 나타내고 있으나 통상적으로 유량값으로 결정하기 위해 4회 이상의 측정치를 평균한다는 관점에서 각 케이스별로 수 회 이상 평균한 값은 유속-면적법과 비교하여 작은 차이가 나는 것으로 조사되어 유속-면적법을 보완할 유량측정 방법으로서의 적용성이 있음을 보여주었다. 또한 한 지점에서 반복 횟수를 늘릴 경우 유속-면적법 대비 오차가 감소하는 것으로 나타났다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

김원, 윤광석, 김동구, 차준호 (2002). "ADCP를 이용한 유량측정." **2002년도 한국수자원학회 학술발표회 논문집,** pp. 529-534

이찬주, 이두한, 김명환 (2004). "ADCP를 이용한 하천 유속 자료의 추출." **2004년도 한국수자원학회 학술발표회 논문집(CD-ROM)**

Adler, M. and Nicodemus, U. (2001). "A new computer model for evaluation of data from acoustic dopper current profiler(ADCP)." *Physics and Chemistry of the Earth(C)*, Vol. 26, No. 10-12, pp. 711-715

Barua, D. K. and Rahman, K. H. (1998). "Some aspects of turbulent flow structure in large alluvial rivers." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 36, No. 2, pp. 235-252

Gartner, J. W. and Ganju, N. K. (2002). "A

preliminary evaluation of near-transducer velocities collected with low-blank acoustic Doppler current profiler." *Hydraulic Measurements & Experimental Methods, ASCE-IAHR Joint Conference*, Estes Park, CO(CD-ROM)

Gonzalez-Castro, J., Ansar, M. and Kellman, O. (2002). "Comparison of discharge estimates from ADCP transect data with estimates from fixed ADCP mean velocity data." *Hydraulic Measurements & Experimental Methods, ASCE-IAHR Joint Conference*, Estes Park, CO(CD-ROM)

Gordon, R. L. (1989). "Acoustic measurement of river discharge." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 7., pp. 925-936

Holmes, R. R. and Garcia, M. H. (2002). "Velocity and sediment concentration measurements over bedforms in sand-bed rivers." *Hydraulic Measurements & Experimental Methods, ASCE-IAHR Joint Conference*, Estes Park, CO(CD-ROM)

ISO. (1997). "ISO 748: Measurement of liquid flow in open channels—Velocity-area methods." *International Standard Organization Technical Report*, ISO

Kim, W., Yoon, K. and Woo, H. (2002). "Analysis of hydraulic characteristics in the river mouth with large tidal difference - ADCP application." *Hydraulic Measurements & Experimental Methods, ASCE-IAHR Joint Conference*, Estes Park, CO(CD-ROM)

Morlock, S. E. (1996). *Evaluation of acoustic Doppler current profiler measurements of river discharge*, US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4218

Mueller, D. S. (2002). "Field assessment of acoustic-doppler based discharge measurements." *Hydraulic Measurements & Experimental Methods, ASCE-IAHR Joint Conference*, Estes Park, CO(CD-ROM)

Muste, M, Yu, K., Pratt, T. C. and Abraham, D. (2002). "ADCP measurements at fixed river locations." *Hydraulic Measurements & Experimental Methods, ASCE-IAHR Joint Conference*, Estes Park, CO(CD-ROM)

Muste, M, Yu, K., Pratt, T. and Abraham, D. (2004a). "Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; part II :fixed-vessel measurements." *Flow measurement and instrumentation*, Vol. 15, No. 1, pp. 17-28

Muste, M, Yu, K. and Spaspjevic, M. (2004b). "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

Nystrom, E. A., Oberg, K. A. and Rehmann, C. R. (2002). "Measurement of turbulence with acoustic Doppler current profilers-Source of error and laboratory results." *Hydraulic Measurements & Experimental Methods, ASCE-IAHR Joint Conference*, Estes Park, CO(CD-ROM)

Nystrom, E. and Wall. G. (2003). "ADCP measurement of suspended sediment in the tidal Hudson River." *USGS Surface Water Conference*

Oberg, K. (2002). "In search of easy-to-use methods for calibrating ADCP's for velocity and discharge measurements." *Hydraulic Measurements & Experimental Methods, ASCE-IAHR Joint Conference*, Estes Park, CO(CD-ROM)

RDI. (2003). *Winriver User's Guide International Version*, RD Instruments, San Diego, CA

Rennie, C. D., Millar, R. G. and Church, M. A. (2002). "Measurement of bedload velocity using an acoustic Doppler current profiler." *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 5., pp. 473-483

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

(논문번호:05-19/접수:2005.02.07/심사완료:2005.08.17)