

ADCP를 이용한 하천 유속 자료의 추출

Acquisition of River Velocity Data Using Acoustic Doppler Current Profiler

이찬주*, 이두한**, 김명환*

Lee, Chan Joo, Lee, Du Han, Kim, Myoung Hwan

요 지

본 연구에서는 ADCP를 이용하여 수집된 3차원적 하천 유속 자료를 기기 특성상 오류, 운용상 오류 등을 고려하여 검토하였으며, 원시 자료의 편차를 보정하는 공간평균기법을 적용하여 필터링함으로써 유속 자료를 추출하였다. 공간평균기법으로 추출된 자료는 원시 자료에 비해 유속 편차가 감소되어 매끄러운 유속 분포를 보여주었을 뿐만 아니라 원시 자료에 의한 유량 계산 결과와 거의 일치하여 유속 분포를 적절하게 필터링하는 것으로 파악되었다. 또한 공간평균된 유속 자료를 이용하여 하천의 흐름장을 일목요연하게 제시할 수 있는 평면적 유속 벡터와 단면상 유속 벡터를 제시하였다. 차후 다른 유속계를 이용한 결과와 적절히 비교된다면 공간평균된 자료는 원시 자료에 비해 보다 유용할 것으로 예상되며 하천 흐름 해석 및 수치 모의에 기초 자료로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : ADCP, 하천 유속, 공간 평균, 유속 벡터

1. 서론

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. ADCP는 하천 횡단면 상에서 단시간에 유량을 측정할 수 있다는 장점으로 인해 각광을 받고 있을 뿐만 아니라 하천의 3차원적 흐름에 대한 정보를 제공함으로써 유사 이송, 확산 등의 수리적 현상을 연구하는데 도움을 주고 있다. 나아가 최근에는 ADCP를 이용하여 획득한 유속 자료가 하천 흐름에 대한 수치 모의를 검증하는 기초적인 자료로도 사용되는 등 그 용도는 점차 확대되고 있다. 그러나 ADCP의 특성에 대한 적절한 이해와 이에 기초한 현장 운용이 없이는 유용한 유속 자료를 획득하기가 곤란할뿐만 아니라 ADCP로 측정된 원시 유속 자료는 측정의 순간성으로 인해 시간평균한 유속 자료에 비해 편차가 크므로 이를 직접적으로 활용하는 것은 유속 자료의 신뢰성과 이용 가치를 저하시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 먼저 ADCP의 기본적인 특성을 살펴보고 이에 기인하는 노이즈와 하천 현장의 상황 및 운용 과정 등에 기인한 오류를 제거하는 방법을 검토하였으며 원시 유속 자료가 갖는 편차를 보정(smoothing)하기 위한 공간평균기법을 도입하여 유속 자료를 추출하였다. 나아가 이를 이용하여 가시적인 평면 및 단면 유속 벡터를 도출함으로써 유속 자료의 유용성을 높이고자 하였다.

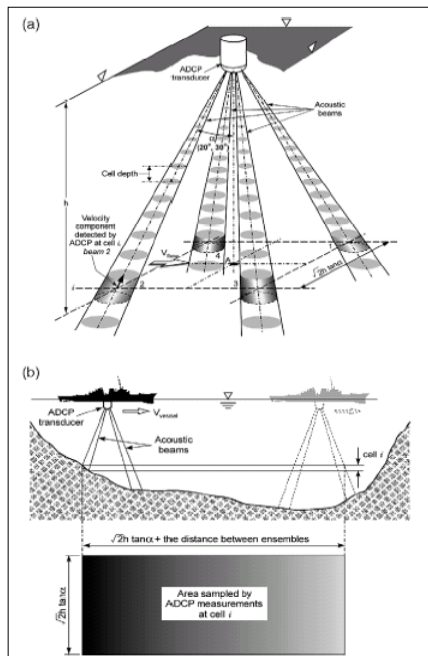


그림-1 ADCP의 샘플링 원리(Muste 등, 의해 산란되어 돌아오는 반향을 수집, 도플러효과를 이용하여 유속을 측정한다. 2004)

2. ADCP의 특성

ADCP는 물 속으로 일정 주파수의 초음파를 전송하고, 부유하는 입자들에

* 정희원, 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : c0gnitum@kict.re.kr, narrowgate@kict.re.kr

** 정희원, 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 · E-mail : dhlee@kict.re.kr

유사한 원리의 ADV나 LDA가 작은 체적에 집중하여 높은 주파수로 반향을 수집하는 것과는 달리 ADCP는 큰 체적에서 반향되는 초음파를 수집하고 이를 수심에 따라 일정 깊이별로 정리하여(range-gating) 수심별 유속 분포를 만들어 낸다. 그러므로 각기 다른 발생기에서 나온 음파들의 확산각이 클수록, 수심이 깊어질수록 더 큰 체적에서 자료가 수집되는 특성을 갖는다. 하천에서 유속을 측정하는 경우 횡단 측선을 따라서 보트에 탑재하거나 도설하며 측정하므로 이동 속도에 따라서 샘플링 체적은 더욱 증가한다(그림-1).

ADCP는 기기의 특성상 수면부터 일정 깊이까지 음파의 간섭 등으로 인해 측정불가능 영역(blanking distance)이 존재한다. 이는 저주파일수록 크게 나타난다. 또한 하상에 반사되는 음파의 강도는 물 속 입자에 의해 반사된 음파의 강도에 비해 훨씬 커서 하상 부근의 유속 측정에 노이즈가 발생하는 측면 효과(side-lobe effect)가 존재한다. 이러한 이유로 인해 ADCP가 유효하게 측정하는 수심 범위에는 일정 부분의 제약이 존재한다.

일정 시간동안 한 지점에서 연속적으로 유속을 측정하는 유속계와는 달리 ADCP는 기본적으로 순간 유속을 측정한다. 순간적인 음향의 송수신을 핑(ping)이라고 하는데 ADCP는 하나의 수심별 유속분포(profile)를 얻기 위해 일정 시간(예를 들어, 5초)마다 수 개 내지는 수 십 개의 핑을 통해 얻어진 자료를 평균하여 유속을 산정한다. 따라서 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. 그런데 ADCP는 큰 체적을 대상으로 유속을 측정하는 방법을 사용함으로써 이러한 문제점을 보완한다. 이외의 ADCP의 자세한 특성은 Muste 등(2004)에서 자세히 다루고 있다.

본 연구에서는 한국건설기술연구원에서 보유하고 있는 Sontek사의 ADP(Acoustic Doppler Profiler)를 이용하여 현장 측정을 실시하였다. 음파의 주파수는 5,000kHz로 수심이 비교적 얇은 중소 하천에 적합하다. 측정가능 수심범위는 0.15~2.3m, 수심 셀의 최소 크기는 10cm, 핑의 샘플링 속도는 50Hz이다(유속 샘플링 25Hz, 하상 샘플링 25Hz). 조사는 2003년 10월 8일부터 9일까지 홍천강 노일리 부근에서 수행되었으며, 보트를 이용하여 측선을 따라 이동하면서 유속을 측정하였다. 측선 수는 6개이고 수심은 0.8~2.8m 정도인데, 측선 선정시 수심이 얇고 물살이 센 여울 구간은 제외되었고 수면이 비교적 안정된 지점에서 측정을 실시하였다. 수심 셀의 크기가 작을수록 오차가 심해지는 기기의 특성을 고려하여 보다 정확한 유속 측정을 위해 보트의 이동 속도는 약 0.5% 내외로 느리게 운용하였다.

3. 유속 자료의 추출

3.1 측정된 유속 자료의 검토

ADCP의 원시 유속 자료는 보트의 이동과 함께 순간적으로 측정되며, 일반적으로 알려진 시간평균적 수심별 유속 분포에 비해 불규칙한 형태를 나타낸다(그림-2, 3). 이러한 특성은 유속이 느릴수록, 수심이 깊어 기기의 한계에 가까울수록 커지는 경향이 있다. 그러므로 이러한 자료는 직접 활용되기도 하지만, 보다 정확한 유속 분포를 추출하기 위해서 몇 가지 측정상의 피할 수 없는 오차를 제거하기도 한다. 첫째, ADCP로부터 발생한 음파는 서로 다른 하상 깊이에서 반향이 일어나며, 측면 효과로 인해 하상 부근에서 샘플링된 유속은 오차가 발생할 가능성이 높다. 그러나 수심이 아주 얇은 곳에서는 유효한 수심 셀을 많이 획득하기 어려워지며 이 경우 ADCP의 적용성이 감소하므로 현재의 연구에서는 하상 부근의 셀 값을 잘 검토하여 선정하였으며, 수심이 2m 이상이 되어 센서의 한계에 근접하는 경우, 하상 부근의 1개 셀에서 얻어진 자료를 제거하였다. 둘째, 수면 부근에서 샘플링된 셀의 경우, 이동용 거치대에 장착한 센서의 흔들림(ringing)으로 인한 오차가 발

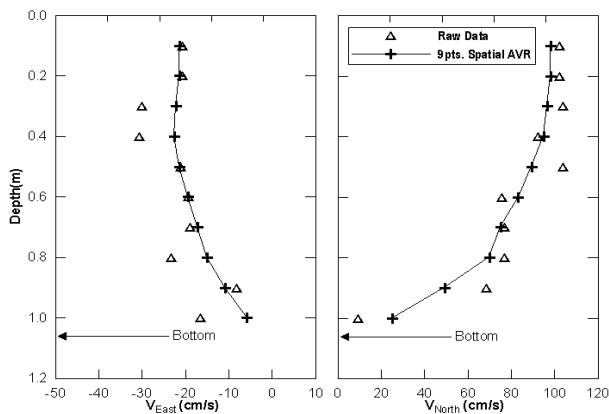


그림-2 측선-2(profile25)의 수심별 유속 분포

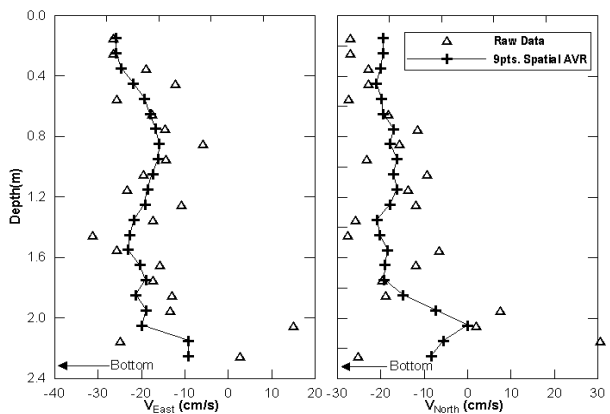


그림-3 측선-6(profile28)의 수심별 유속 분포

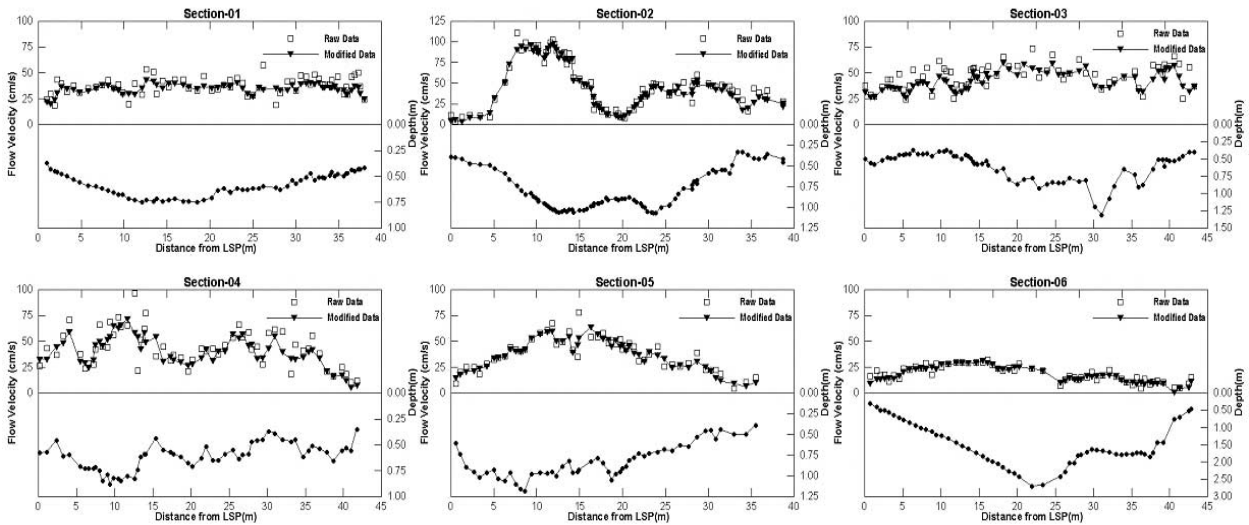


그림-4 전체 측선에 대한 원시자료 및 공간평균자료에 의한 수심평균 유속 분포

생한다. 그런데 가능한 한 조심스럽게 운용하면 오차를 줄일 수 있으므로 유효 셀에 포함시켰다. 셋째, 측정 지점에서 불가피하게 수심이 센서의 한계를 넘는 경우(측선-6에서 최대 2.5m를 초과함) ADP의 하상추적센서가 정상적으로 작동하지 못하여 수집된 유속 자료의 신뢰성이 저하되므로 이 경우 수집된 프로파일 전체를 배제하였다. 넷째, 보트의 이동경로가 순간적으로 급격히 변동하는 경우 노이즈가 발생할 가능성이 높아져 자료의 품질이 저하되므로 이 역시 프로파일 전체를 제거하였다.

3.2 유속 자료의 보정(smoothing) 기법과 적용 결과

하천의 수리적 특성에 대한 분석이나 수치 모의의 기초 자료로 유속이 제공되기 위해서는 보다 정확한 유속 분포가 요구된다. 보정(smoothing) 과정은 ADP에 의해 측선에서 수집된 자료를 보다 적절한 유속 분포를 얻기 위해 조정하는 것을 의미한다(Muste 등, 2004). 기존의 연구 중에 Adler와 Nicodemus(2001)은 수심평균한 자료를 선후 프로파일과 공간평균하여 보정하였으며, Muste 등(2004)은 수심별 자료의 3점 내지는 5점 이동평균, 가중치 없는 9점 공간평균기법과 여러 가지 회귀곡선을 이용한 결과를 비교하고 멱함수 법칙(power-law)에 의한 보정이 가장 적절함을 주장하였다. 본 연구의 경우 수심이 얇은 중소 하천의 저수위를 대상으로 하였기에 수심별 데이터가 많지 않으므로 함수에 의한 회귀기법은 극단적인 값에 의해 크게 영향을 받을 가능성이 높다. 하지만 주파수가 높은 ADP를 사용하므로 유속 수집의 단위인 수심 셀의 크기가 작아 인근 셀에서 얻어진 유속의 유사성이 커진다는 장점이 있다. 그러므로 본 연구에서는 공간평균기법을 이용하여 유속 분포를 보정하였다. 이 기법은 식(1)에 의해 계산되는데, 유속 셀의 상하 및 좌우값 9개를 이용하여 가중치 없이 계산하는 방법으로 Sontek의 후처리 프로그램인 ViewADP에서도 제공하고 있다. 그리고 하상 및 수면 부근, 시자/끝 부근에서는 9개 이하의 가용한 셀을 이용하도록 하였다. 마지막으로 ADP가 측정할 수 없는 수면 부근의 유속과 하상 유속은 보정된 유속 자료에서 각각 가장 위쪽, 아래쪽 셀의 유속값과 동일하게 처리하는 상수 기법을 적용하였다.

$$u_{sa}^{ij} = \frac{1}{9} \sum_{i=i-1}^{i+1} \sum_{j=j-1}^{j+1} u^{ij} \quad \text{식 (1)}$$

표-1 원시 자료와 공간평균 결과의 유량 비교

측 선	유 량 (cms)		공간 평균 (본 연구)	오 차
	원시 자료(RiverSurveyor)			
	좌 → 우	우 → 좌		
Section-01		7.80	7.80	0.00%
Section-02	12.20		12.12	-0.66%
Section-03		11.40	10.98	-3.68%
Section-04	10.00		9.80	-2.00%
Section-05		10.90	10.32	-5.32%
Section-06	10.90		11.40	4.59%

표-1은 ADP의 자료 수집 프로그램으로서 기기 운용과 동시에 유량을 계산하는 River Surveyor에서 수면 부근과 하상 부근을 공간평균 기법과 동일한 조건으로 한 후 공간평균 결과와 유량을 비교한 것이다. 오차는 각 측선에서 대략 5% 이내로 나타난다. 측정상의 문제점이나 하상 추적에 의한 오류 등에 의해 일부 원시 자료가 삭제되거나 변경되었음을 고려하면 본 연구에서 적용한 기법이 유속 분포의 편차를 감소시키면서도 전체적으로 큰 오차를 발생시키지 않음을 알 수 있으며 유속 자료로서 이용하는 데 부적합하지 않다는 것을 보여준다. 그러나 다른 유속계를 이용한 측정 결과와의 비교는 본 연구에서 수행되지 못하였으며 이에 대해서는 차후에 보완이 필요하다.

그림-2~3의 그래프는 공간평균 기법으로 보정된 수심별 유속 분포를 보여준다. 전체적으로 공간평균 결과는 비교적 원시 자료와 근접할 뿐만 아니라 수면에 근접할수록 유속이 빨라지는 양상을 나타내어 일반적인 하천의 유속 프로파일과 유사하다. 그러나 그림-3의 우측이 보여주듯이 원시 자료와 마찬가지로 수심이 깊거나 유속이 느릴수록 프로파일에서 그 경향이 약화된다. 이는 보트가 이동하면서 순간적으로 유속을 수집해야 하는 ADCP의 기기적 특성과도 관련이 있다. 샘플링하는 시간이 짧을수록 순간 유속은 수집하기 용이하지만 다양한 시간 규모를 갖는 난류의 영향을 반영하기가 불가능하다 (Muste 등, 2004). 이러한 문제는 ADCP 운용시 더욱 주의가 요망됨을 시사한다.

한편, 그림-4는 전체 측선에 대해 횡방향으로 원시 자료에 의한 수심평균 유속분포와 공간평균 자료에 의한 수심평균 유속분포를 나타낸 것이다. 원시 자료의 경우 수심평균한 각각의 프로파일에 있어서도 인접한 프로파일과 때로는 큰 편차를 보이는데 수심이 비교적 얇은 부분에서 이러한 불규칙성이 두드러진다. 여기에는 몇 가지 원인이 있는데 첫째, 저수심 지역의 특성상 수심에 따라 많은 유속 셀이 확보되지 않으며, 둘째, 그 결과 도점으로 측정하거나 보트의 이동이 수월치 않은 관계로 ADP 운용이 매끄럽게 이루어지기 어렵고, 셋째, 하상에 존재하는 자갈 등의 영향을 보다 쉽게 받을 수 있기 때문인 것으로 풀이된다. 따라서 이러한 문제는 측선을 세심하게 주의를 기울여 선정하면서 가능한 범위 내에서 ADP가 부드럽게 운용될 수 있도록 각종 장비를 이용하는 것이다. 그러나 현실적으로 모든 조건을 만족시키기 곤란하며 공간평균기법과 이러한 유속 편차를 어느 정도 보정(smoothing)할 수 있다. 모든 측선에서 공간평균된 횡방향 유속 분포는 원시 자료에 비해 매끄러운 분포를 제공한다. 이러한 횡방향 공간평균을 적용하기 위해서는 한 가지 전체 조건이 있는데 곧 ADP를 느린 속도로 운용해야 한다는 것을 의미한다. 그렇지 않으면 인접한 프로파일 사이에 유속이 실제로도 큰 차이가 날 가능성이 있으며 공간평균기법은 이 경우 실제 유속을 강제적으로 보정하는 결과를 낳게 된다.

3.3 수심평균한 유속 벡터의 도출

수심방향으로 평균된 2차원 유속 벡터는 하천의 흐름을 시각적으로 일목요연하게 제시할 뿐만 아니라 하천 흐름에 대한 수치 모의의 결과와 비교 검증하는데 매우 중요한 역할을 한다. 이미 국내에서도 기존의 오염 확산에 관한 현장 실험 및 수치 모의 연구에 ADCP를 이용해 측정된 유속 분포가 이용되었다(서일원 등, 2003; 오정선 등, 2003). 1차원 프로펠러 유속계와 같은 장비로는 현장에서 흐름을 방향을 알 수 없으며, 2차원 유속계를 이용할 경우 수 십 미터의 하폭을 일정 간격으로 수심별로 측정해야 흐름 방향을 얻을 수 있다. 그러나 이는 매우 비경제적인 방법이다. ADCP는 단시간에 이러한 문제를 모두 해결할 수 있을 뿐만 아니라 사후에 이를 적절히 변환함으로써 유속 벡터를 획득할 수 있는 장점이 있다.

ADCP로 현장에서 얻어진 자료는 노트북컴퓨터 등을 통해 실시간으로 그 유속 벡터를 확인할 수 있지만 원시 자료는 보트의 이동 경로를 통해 얻어진 자료로서 이를 직접 활용하기는 곤란하다. 본 연구에서는 공간평균기법을 적용함으로써 보정된 유속 자료를 기초로 유속 벡터를 도출하였다. 또한, 보트의 이동 경로를 따라 얻어진 자료를 기준 측선에 맞추어 변형함으로써 시각적으로 보다 정돈된 유속 벡터를 생성하는 프로그램을 제작하였으며 그림-5는 그 결과를 요약하여 보여준다. 이중 좌측 그림은 ADCP를 현장에서 획득한 원시 자료의 벡터이고, 중앙은 공간평균기법을 이용한 보정된 유속 벡터이며,

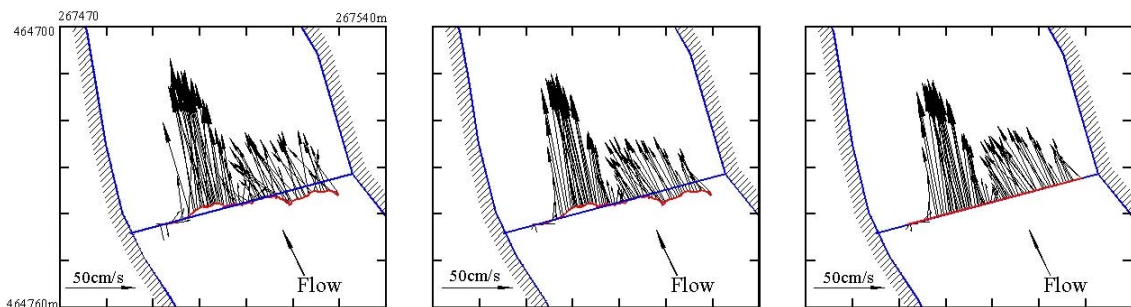


그림-5 공간평균 기법과 이동 경로 수정을 통해 얻어진 유속 벡터도

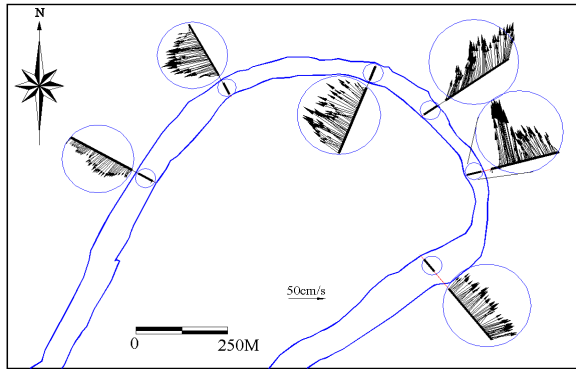


그림-6 홍천강 노일리 부근의 유속 벡터도

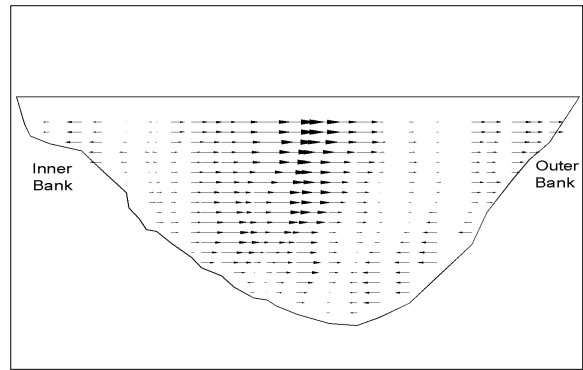


그림-7 단면상 횡방향 유속 벡터

우측 그림은 측선에 일치시킨 것이다. 하지만 벡터의 시각적 변환 결과는 시각적인 후처리에 의한 것이므로 가급적 측선과 일치되는 경로를 따라 유속을 측정해야 한다. 그림-6은 홍천강 노일리 부근의 유속 벡터도이다. 측선들은 GPS 자료를 토대로 표시되었으며, 유속 벡터는 확대되어 표시되었다.

그림-7은 단면상의 횡방향 유속 벡터로서 ADCP의 운용 시점과 종점간을 기준 측선으로 한 것이다. 이 그림은 급한 만곡부의 소(pool) 부분에서 측정된 자료로서 수면 부근 내지는 하도의 중심부에서 외측 강터으로 향하는 2차적 흐름과 하상 부근, 외측 강터에서 내측으로 돌아오는 방향의 2차류를 보여준다. 이같은 횡방향 유속 벡터는 2차적 흐름을 보여주지만, 순간적인 유속 측정 자료에 기초하기 때문에 횡방향 유속이 주유속에 비해 크게 작은 경우 시간평균한 유속 자료에 비해 부정확한 결과를 나타낼 수 밖에 없을 뿐만 아니라 측선을 따라 보트의 이동이 일정하지 않을 경우 보트 이동에 의한 오차를 배제할 수 없다는 단점이 있다. 동일한 이유로 본 연구에서는 수직방향의 유속 벡터가 고려되지 않았는데 이는 주유속이나 횡방향 유속에 비해서도 훨씬 작은 규모이므로 그 일관성이 오차에 의한 영향을 가장 많이 받기 때문이다.

4. 요약과 결론

본 연구에서는 ADCP를 이용하여 현장에서 취득한 원시 유속 자료를 기기 특성상 노이즈, 운용상 오차 등을 고려하여 검토하였으며, 원시 자료가 갖는 편차를 감소시키기 위해 공간평균기법을 도입하여 필터링함으로써 유속 자료를 추출하였으며, 그 결과를 원시 자료와 비교하였다. 유량 오차는 대략 5% 이내로 공간평균기법이 원시 자료와 비교해서 부적합하지 않은 결과를 산출함을 알 수 있었으며, 유속의 편차를 감소시키고 분포를 매끄럽게 하는 것이 확인되었다. 이렇게 추출된 자료를 이용하여 하천의 흐름장을 일목요연하게 제시할 수 있는 평면적 유속 벡터를 얻을 수 있었으며, 이는 원시 자료를 이용한 유속 벡터보다 정돈된 분포를 보여주었다. 또한 단면상 유속 벡터를 통해 2차적 흐름 패턴이 추정될 수 있었다. 차후 다른 유속계를 이용한 결과와 적절히 비교된다면 공간평균된 자료는 원시 자료에 비해 보다 유용할 것으로 예상되며 하천 흐름 해석 및 수치 모의에 기초 자료로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

1. 서일원, 백경오, 전태명, 진준하(2003) 사행하천에서 횡혼합에 관한 추적자 실험, 한국수자원학회논문집, 제36권 4호, pp. 673-689
2. 오정선, 서일원, 백경오, 성기훈(2003) 자연하천에서 오염물질 거동특성 연구, 대한토목학회학술발표회논문집(CD-ROM), pp. 1937-1942

3. Adler, M., 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

4. 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