

ADCP를 이용한 자연하천의 연직유속분포 분석

Analysis of vertical velocity distribution in natural rivers with ADCPs

이혜은¹⁾, 이찬주²⁾, 김용전³⁾, 김원⁴⁾
Hea Eun Lee, Chan Joo Lee, Yong Jeon Kim, Won Kim

요 지

본 연구에서는 ADCP를 이용하여 국내 하천에서의 연직유속분포 특성을 살펴보았다. 먼저, 김치영 등 (2004)의 10점법 측정 자료와의 비교를 통하여 power law와 log law로 ADCP의 측정불가역의 유속분포를 추정하는 방법을 검증하였다. 또한, 국내 하천의 다양한 흐름조건을 고려한 4개 지점, 총 26개 자료를 사용하여 각각의 ADCP 측정자료마다 최적의 power 식과 log 식을 구했으며, 이 식들로부터 구한 수심평균유속을 ADP-stationary (고정된 지수 1/6)의 평균유속과 비교하였다. 그 결과 power law로 ADCP 측정불가역을 외삽하는 경우 하천의 흐름에 적절한 지수를 사용했는지 여부가 평균유속의 정확도에 큰 영향을 미침을 확인하였다. 이에, Limerinos (1970)의 조도계수 계산식과 ISO (1997)에 제시된 power law 지수식을 토대로 측정 자료의 power law 지수와 하상재료, 수심의 상관관계를 살펴보았다.

핵심용어: 연직유속분포, ADCP, 측정불가역, power law, log law

1. 서론

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)는 기존의 측정 장비들에 비해 유속 및 유량 정보를 빠르고 간편하게 획득할 수 있어, 자연하천의 흐름을 분석하는 데에 ADCP의 활용도가 점차 높아지고 있다. ADCP를 이용한 흐름 측정 시 공백거리 (blanking distance)와 측면효과 (side-lobe effect)로 인하여 좌·우 하안부근, 수면, 그리고 하상 근처에 측정불가역이 존재하며, 하천 단면의 평균유속과 유량 산정 측면에서 이 측정불가역의 유속 및 유량 추정은 불가피하다. 이렇게 측정불가역에 대한 추정의 필요성에도 불구하고 ADCP를 이용한 흐름 측정은 믿을만한 결과를 보이는 것으로 알려져 있다. 한편, ADCP 전용 소프트웨어에서는 power law를 이용하여 측정 불가역의 흐름을 추정하는데, 이때 power law의 지수는 사용자가 입력한 고정된 값을 사용하도록 되어있으며 소프트웨어 상에서 기본적으로 사용하는 지수는 1/6이다. 그러나 power law에서 지수는 연직유속분포의 분포형을 결정하며 그 값이 하천에 따라 다르게 나타나므로 적절한 지수를 선택했는지 여부가 ADCP를 이용한 흐름측정의 정확도를 좌우하는 주요인이라 하겠다. 따라서 ADCP의 활용에 있어 연직유속분포의 특성을 파악하는 것은 측선의 수심평균유속을 추정하는

1) 정회원 · 한국건설기술연구원 하천·해안항만연구실 연구원 E-mail: nunari@kict.re.kr
2) 정회원 · 한국건설기술연구원 하천·해안항만연구실 연구원 E-mail: cOgnitum@kict.re.kr
3) 정회원 · 한국건설기술연구원 하천·해안항만연구실 연구원 E-mail: wasu3ri@kict.re.kr
4) 정회원 · 한국건설기술연구원 하천·해안항만연구실 책임연구원 E-mail: wonkim@kict.re.kr

면에서나 더 나아가 유량 측정의 정확도를 높이는 면에서 모두 중요하다. 본 연구에서는 ADCP를 이용하여 국내 하천에서의 연직유속분포 특성을 살펴보았다. 국내 하천의 다양한 흐름조건을 고려하여 2005년에서 2008년에 걸쳐 4개 지점에서 측정한 총 26개 자료를 사용하였다. 먼저, power law와 log law를 이용하여 ADCP의 측정불가역의 유속분포를 추정하는 방법을 검증하였다. 이를 위해 김치영 등 (2004)의 10점법 측정 자료에서 ADCP 측정 영역의 자료만을 이용하여 power 식과 log 식을 구하였으며, 이렇게 구한 power 식과 log 식을 수심적분하여 구한 평균유속과 10점법 평균유속과의 오차를 살펴보았다. 또한, 26개 ADCP 측정 자료마다 최적의 power 식과 log 식을 구하여 수심평균유속을 비교해 보았으며, Limerinos (1970)의 조도계수 계산식과 ISO (1997)에 제시된 power law 지수식을 토대로 측정 자료의 power law 지수와 하상재료, 수심의 상관관계를 살펴보았다.

2. ADCP 측정자료

매 여름 심각한 홍수를 겪는 우리나라의 경우 산악지형의 영향이 더해져 하천의 수위 및 유량이 단시간에 급격히 변화한다. 이러한 다양한 흐름조건을 고려하여 연직유속분포를 얻기 위한 측정 지역 및 측정 시기를 선정하였다. 특히, 홍수 시 유속 측정으로 동일지역에서도 다양한 수위의 흐름을 측정하였다. 2008년 ADCP를 이용하여 측정한 연직유속분포 자료는 표 1과 같다. 측정에 사용한 기기는 Sontek사의 3.0 *Mhz* ADCP이며, 측선별로 600초간 데이터를 수집하였다.

표 1. ADCP 측정자료

| | 자료번호 | 측정시간 (s) | 수심 (m) | 측점 수 |
|-----|-----------------|----------|--------|------|
| 괴산 | 080725_1722_75 | 600 | 2.77 | 13 |
| | 080725_1738_75 | 600 | 2.79 | 13 |
| | 080725_1935_45 | 600 | 2.01 | 9 |
| | 080725_1953_55 | 600 | 2.02 | 9 |
| 적성1 | 080803_0106_17 | 600 | 6.50 | 12 |
| | 080803_0106_18 | 600 | 6.50 | 12 |
| | 080803_0106_19 | 600 | 6.50 | 12 |
| | 080803_0214_170 | 600 | 6.50 | 12 |
| | 080803_0214_171 | 600 | 6.50 | 12 |
| | 080803_0214_172 | 600 | 7.00 | 13 |
| | 080803_0214_173 | 600 | 7.00 | 13 |
| | 080804_1639_170 | 600 | 3.06 | 11 |
| 적성2 | 080804_1639_171 | 600 | 2.66 | 9 |
| | 080804_1639_172 | 600 | 2.50 | 9 |
| | 080804_1639_173 | 600 | 2.50 | 9 |
| | 080825_1943_225 | 600 | 1.68 | 7 |
| 여주 | 080825_1943_226 | 600 | 1.48 | 6 |
| | 080825_2017_205 | 600 | 3.54 | 13 |
| | 080825_2017_160 | 600 | 4.74 | 15 |

3. ADCP 측정자료의 특징

그림 1은 ADCP 측정자료와 측정불가역에 대한 추정식이다 (괴산 080725_1935_45). ADCP 유속자료는 매 5초마다 5초 평균 유속을 출력하며, 그림 1과 같이 시간평균유속을 중심으로 산포된다. 이때, 유속이 측정되는 영역은 공백거리 (blanking distance)와 측면효과 (side-lobe effect)로

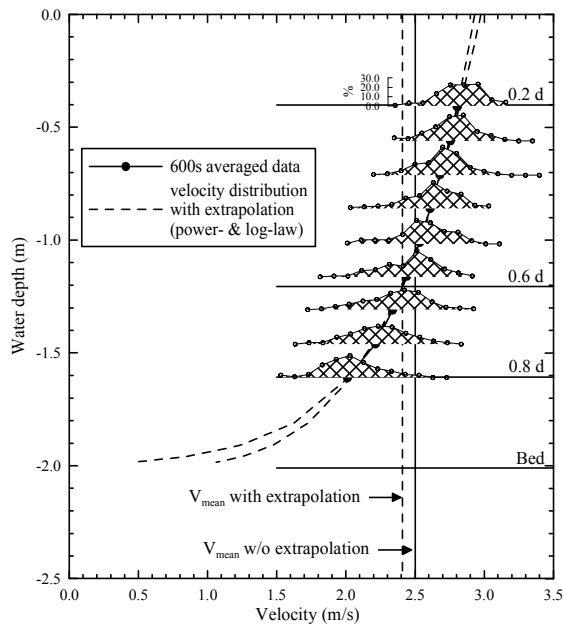


그림 1. ADCP 측정자료와 power law와 log law를 이용한 측정불가역 유속 측정

인한 수면과 하상 근처의 측정불가역을 제외한 전체 수심의 약 55 % ~ 75 %이다. ADCP 측정 자료만으로 평균유속을 구하는 경우 측정영역이 저유속 구간을 포함하지 못하므로 표 2와 같이 평균유속을 과대추정하게 되며, 평균유속의 위치 역시 실제보다 상승한다. 이러한 ADCP의 한계를 극복하기 위해 least square fit 방법으로 측정 영역의 유속분포에 최적화된 log law와 power law 식을 이용하여 측정불가역의 유속을 추정하였다. log law와 power law를 이용하여 측정불가역의 유속을 추정하는 경우 평균유속의 감소와 더불어 평균유속의 위치도 기존의 연구에서 알려진 바와 같이 수심의 약 60% 지점에 위치하게 된다.

하지만 이처럼 전체 수심의 일부를 통해 측정불가역의 유속분포를 예측하는 것은 그 방법의 정확도와 타당성에 대한 검증이 필요하다. 하천 단면 내의 한 측선에서 평균유속을 결정하는 방법으로 10점법이 널리 사용되며 정확한 방법으로 알려져 있다. power 식과 log 식을 이용한 외삽이 측선의 평균유속 추정에 어느 정도의 정확도를 갖는지 살펴보기 위해 김치영 등 (2004)의 10점법 측정 자료에서 ADCP 측정영역에 해당하는 0.2d ~ 0.8d의 자료에 최적화된 power 식과 log 식을 구했다. 이 식들을 전체 수심에 대하여 적분한 평균유속과 10점법에 의해 구한 평균유속은 표 3과 같다. power 식과 log 식이 velocity dip과 같은 현상을 반영하지 못하기 때문에 평균유속이 10점법보다 크게 나타나지만, 대체로 5 % 안팎의 오차를 보인다. 또한, Price 유속계를 이용한 10점법 역시 수면 근처와 바닥 근처에서 오측 가능성을 내포하고 있으므로 10점법과 5 % 내외의 오차를 갖는 power 식과 log 식이 ADCP 측정불가역의 유속을 추정하는 데에 무리가 없다고 판단하였다.

4. 외삽을 위한 Power Law의 지수값 (1/m) 검토

연직유속분포 측정자료에 최적화된 식을 찾기 위해 다음과 같은 형태의 power 식과 log 식을 이용했다.

$$u = Cz^{1/m} \quad \text{Power law} \quad (1)$$

$$u = C_1 \ln z + C_2 \quad \text{Log law} \quad (2)$$

표 2. ADCP 측정자료, power law, log law를 이용한 수심평균유속 및 평균유속위치 추정

| | 측정된 자료 | power law | log law |
|------------|--------|-----------|---------|
| 평균유속 (m/s) | 2.50 | 2.43 | 2.40 |
| 평균유속 위치 | 0.53d | 0.58d | 0.61d |

표 3. 김치영 등 (2004)의 10점법 자료와 추정식 (power, log)의 평균유속 비교

| 자료 | 평균유속 (m/s) | | | 상대오차 | |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|
| | 10점법 | power | log | power | log |
| 압록 | 0.191 | 0.199 | 0.197 | 0.042 | 0.028 |
| 간현1 | 0.283 | 0.308 | 0.297 | 0.087 | 0.050 |
| 간현2 | 0.173 | 0.178 | 0.176 | 0.031 | 0.021 |
| 간현3 | 0.140 | 0.145 | 0.143 | 0.038 | 0.025 |
| 괴산 | 0.242 | 0.252 | 0.245 | 0.040 | 0.010 |
| 낙동 | 0.611 | 0.674 | 0.644 | 0.103 | 0.054 |
| 팔당1 | 0.751 | 0.799 | 0.769 | 0.063 | 0.024 |
| 팔당2 | 0.651 | 0.668 | 0.652 | 0.025 | 0.002 |
| 송정 | 0.588 | 0.638 | 0.580 | 0.086 | 0.012 |

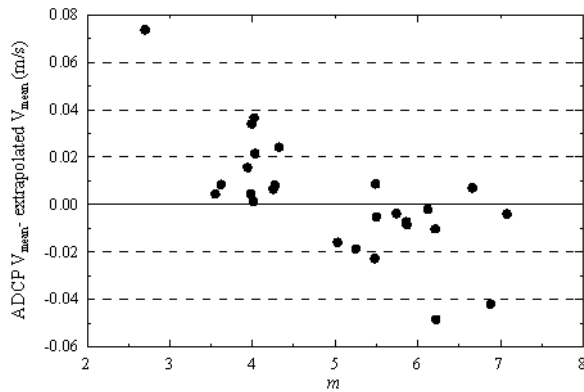


그림 2. 고정된 지수 ($m = 6$)와 최적화된 지수의 power 식 평균유속 비교

유속을 과소추정 하기도 하고 과대추정 하기도 한다. 최적화된 m 값이 클수록 $m = 6$ 을 사용하는 경우보다 평균유속이 크게 계산되며, 지수의 최적화 여부에 따라 평균유속이 약 0.07 m/s 까지 차이나고 있음을 알 수 있다. 그러므로 특정 하천의 연직유속분포로부터 평균유속을 구하는 데에 적절한 m 값을 사용했는지 여부가 평균유속의 정확도에 큰 영향을 미친다고 할 수 있다.

하천의 연직유속분포를 다양하게 하는 인자에는 여러 가지가 있지만, 그 중 하상재료와 수심, 평균유속 등이 특정 하천의 흐름 특성을 결정짓는 주요인이라 할 수 있다. Limerinos (1970)는 하상의 조도 n 을 하상재료의 크기 d_{50} 과 수심과 관련지어 다음과 같은 식으로 제시하였다.

$$\frac{n}{R^{1/6}} = \frac{0.11288}{3.06 \log(R/d_{50}) - 0.98} \quad \text{조도계수 계산식 (Limerinos, 1970)} \quad (3)$$

또한, Chezy's coefficient, 조도계수 n 의 관계를 이용한 power 식의 지수 m 은 다음과 같다.

$$m = \frac{C_{ver}}{\sqrt{g}} \left(\frac{2\sqrt{g}}{\sqrt{g} + C_{ver}} + 0.3 \right) \quad \text{지수값 (m) 계산식 (ISO, 1997)} \quad (4)$$

그림 3과 그림 4에 Limerinos (1970)의 조도계수 계산식과 ISO (1997)에 제시된 power law의 지수계산식을 이용하여 ADCP 측정자료의 Chezy's coefficient와 지수 m 의 관계를 나타냈다. 이때, 그림 3에서는 수심에 따른 m 의 변화를 살펴보았으며, 그림 4는 하상재료의 크기와 m 의 관계를 살펴보았다. power law의 지수 m 은 하상재료가 작을수록, 수심이 깊을수록 그 값이 증가함을 알 수 있으며, ADCP_stationary에서 사용하는 $m = 6$ 과 비교해 보았을 때, 측정자료에 최적화된 m

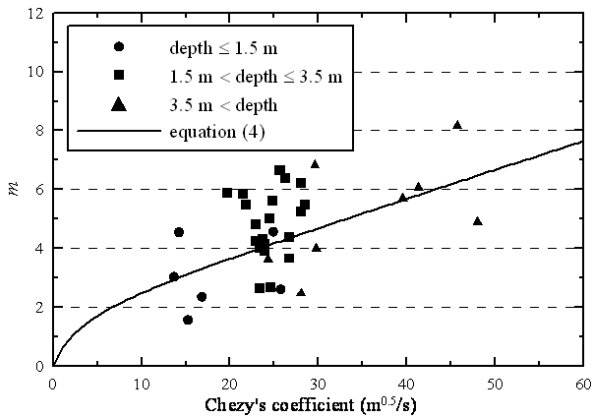


그림 3. Chezy's coefficient와 power law 지수 m 의 관계 (수심에 따른 분류)

least square fit 방법을 이용하여 power 식의 상수 C 와 m , log 식의 C_1 과 C_2 를 구했다. 이렇게 구한 상수 중 power law의 상수 m 은 연직유속분포의 속도경사를 나타내는 중요한 지표이다. power law의 지수 $1/m$ 의 경우 일반적으로 $1/6$ 로 알려져 있지만, 흐름 특성에 따라 m 값은 크게 변화한다 (ISO, 1997). ADP-stationary 프로그램의 경우 power law의 지수를 입력하여 측정 불가역에 대해 외삽 하도록 되어있으며, $m = 6$ 을 기본값으로 하고 있다. 하지만 m 을 고정된 값으로 보고 측선의 수심평균유속을 구하는 경우 측정 자료의 속도경사에 따라 그림 2와 같이 평균

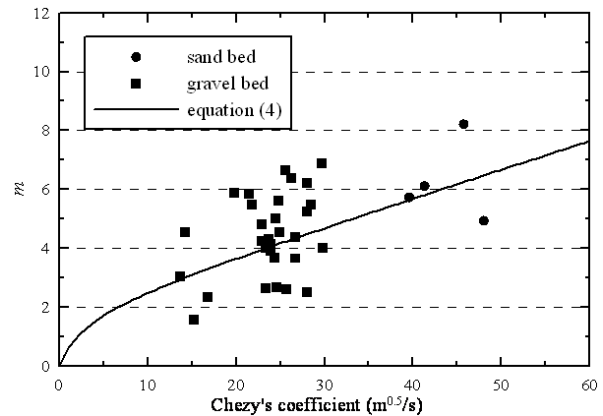


그림 4. Chezy's coefficient와 power law 지수 m 의 관계 (하상재료에 따른 분류)

은 1.57 ~ 6.88까지의 다양한 값을 보인다. 또한, 산포된 측정자료는 ISO (1997) 식의 경향을 따르고 있다. 이와 같이 power law에서 지수는 연직유속분포의 분포형을 결정하며 그 값이 하천에 따라 다르게 나타나므로 하상재료 및 수심과 같은 흐름특성에 적절한 지수를 선택했는지에 따라 흐름측정의 정확도가 좌우된다. 따라서 ADCP를 사용하여 측선의 평균유속을 계산하거나 수면/하상 부근 유속을 추정하는 경우 현장에 맞는 m 값을 사용하는 것이 적절하다.

5. 결론

ADCP 측정영역의 자료만을 이용한 측선의 평균유속 산정은 저유속 구간을 고려하지 못하기 때문에 그 값과 평균유속의 위치 면에서 실제 흐름과 상이한 결과를 보이므로 ADCP 측정불가역에 대한 외삽은 불가피하다. power 식과 log 식을 이용한 ADCP 측정불가역에 대한 외삽은 velocity dip과 같은 현상을 반영하지 못함에도 불구하고 평균유속 산정에 있어 10점법과 5 % 내외의 오차를 보이므로 ADCP 측정자료의 평균유속을 추정하는 데에 무리가 없다고 판단하였다. 한편, power 식을 이용한 외삽에서 ADP-stationary 프로그램과 같이 고정된 지수 ($m=6$)를 사용하는 경우, 하천의 흐름특성에 따라 평균유속을 과대산정하거나 과소산정하게 되므로 측정자료에 적합한 m 값을 사용해야 한다. power law의 지수 m 은 하상재료의 크기와 수심에 크게 영향을 받으며, 하상재료가 작고 수심이 깊을수록 그 값이 증가하는 경향은 Limerinos (1970)와 ISO (1997)의 식과 유사하다. 이처럼 power law의 지수는 연직유속분포의 분포형을 결정하며 그 값이 하천에 따라 다르게 나타나므로 ADCP를 사용하여 측선의 평균유속을 계산하거나 수면/하상 부근 유속을 추정하는 경우 현장에 맞는 m 값을 사용하는 것이 적절하다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

1. 김치영, 김원, 김동구 (2004). "한 측선에서 제한된 측정수에 따른 불확실도." 2004 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회.
2. Gonzalez, J.A., Melching, C.S., and Oberg, K.A. (1996). "Analysis of open-channel velocity measurements collected with an acoustic doppler current profiler." *1st International Conference on New/Emerging Concepts for Rivers*, International Water Resources Association, Chicago, USA.
3. ISO (1997). *Measurement of liquid flow in open channels-Velocity-area methods*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, ISO748.
4. Limerinos, J.T. (1970). *Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1898-B.
5. Pelletier, P.M. (1988). "Uncertainties in the single determination of river discharge: a literature review." *Canadian journal of civil engineering*, 15, 5, 834-850.