

확률론적 유속분포 공식을 활용한 유량 산정 방법

A method of discharge estimation based on probabilistic velocity distribution function

이찬주*, 김동구**, 권성일***, 김용전****

Chan Joo Lee, Dong Gu Kim, Seong Il Kwon, Yong Jeon Kim

요 지

최근 들어 하천의 자동유량측정에 많이 활용되고 있는 고정식 음파도플러유속계는 여러 개의 셀 유속 자료를 제공한다. 이러한 유속 자료들은 단면의 특정 위치에 고정되어 있어 수심 변화에 따라 변화하는 최대유속 구역을 직접 측정할 수 없으므로 최대유속과 평균유속 사이의 단순한 관계를 활용하여 유량 산정을 하기는 곤란하다. 다만, 단면상의 여러 지점에 대한 유속 측정치를 얻을 수 있다는 점을 이용하여 모의된 유속분포와 결부하면 유량을 산정하는데 활용 가능하다. 본 연구에서는 Chiu(1988)가 제안한 단면의 무차원적 유속분포를 모의하는 확률론적 유속분포 공식과 고정식 ADVM의 유속자료를 활용하여 유량을 산정하는 방법을 검토하였다. 유속분포 공식의 주요 매개변수 중에서 최대유속과 평균유속의 관계를 나타내는 M 은 ADVM이 설치된 단면 및 인접 단면에서 ADCP로 측정한 자료를 이용하여 도출하였으며, β 와 h 는 국내 하천에 대한 자료 분석을 통해 얻어진 값을 사용하였다. 2006년부터 2007년까지의 유량이 비교적 안정된 11개 케이스의 댐 방류량 조건 및 동일한 지점에서 개발된 유속지수법 유량과 상호 비교하였으며, 그 결과 댐방류량 대비 상대오차가 평균 6.44%로 유속지수법의 7.43%에 비해 약간 크지만 유량 산정이 비교적 정확하게 이루어짐을 확인할 수 있었다. 또한 연속 유량 측정 결과 여수로 방류량에 대해서 약 10.6%의 오차를 나타내고 있었다. 한편, 보다 고유속 구역을 측정할 목적으로 2008년에 기존의 ADVM에 추가로 1.25m 높은 위치에 홍수 측정을 위한 저주파 ADVM을 설치하여 운영할 경우 2008년의 4개 케이스에 대해 댐방류량 대비 2.1%의 상대오차를 나타내어 3.9%의 유속지수법에 비해 약간의 개선효과가 있었으며, 이 역시 유량을 비교적 잘 산정하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 유량, 자동유량측정, ADVM, 유속분포 공식

1. 서론

세계적으로 유량 측정은 점차 무인화, 자동화되고 있으며, 그 중심에는 음파 기술을 이용한 고정식 연속 유속측정 장치가 널리 활용되고 있다. 음파 유속측정 장치는 음파의 이동시간차 방식을 이용하는 초음파유속계(UVM, Ultrasonic Velocity Meter)와 도플러 효과를 이용하는 음파도플러유속계(ADVM, Acoustic Doppler Velocity Meter)로 크게 구분된다. 이중 ADVM은 UVM에 비해 여러 개의 셀 유속 자료를 얻을 수 있고, 하나의 센서로 운영되므로 효율적이고 설치가 간편한 잇점이 있어 그 활용이 크게 증가되고 있다.

ADVM을 이용하여 실시간으로 유속을 측정하여 유량을 산정하는 자동유량측정 시스템은 또

* 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 연구원 · E-mail : c0gnitum@kict.re.kr

** 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 연구원 · E-mail : kimgd@kict.re.kr

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 박사후연구원 · E-mail : ksi1973@kict.re.kr

**** 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 연구원 · E-mail : wasu3ri@kict.re.kr

다시 두 가지 방식으로 구별되어 활용된다. 그 하나는 유속지수법을 활용하는 것으로 여러 개의 셀 유속 중의 하나 혹은 몇 개 셀의 평균 유속을 단면의 평균유속과 관계식으로 맺어 유속지수 관계를 수립한 후 이를 통해 연속 유량을 측정하는 방법이다. 이 방법은 경험적인 방법으로 다양한 유속 범위에 대해 유량의 실측이 필요하다. 다른 한 가지 방법은 실측된 여러 셀 유속자료를 이론적인 유속 분포식과 결부시켜 유량을 산정하는 것이다(김창완 등, 2008; Nihei와 Kimizu, 2007). 본 연구에서는 후자의 방법을 채택하였는데, 이 때 단면의 유속 분포를 이론적으로 도출하기 위하여 Chiu(1987, 1988)가 제안한 확률론적인 유속 분포 공식을 사용하였다. 이 공식을 활용하면 단면의 무차원적인 유속 분포의 추정이 가능하므로 3개 이상의 실측 유속이 있을 경우 최대유속과 유량의 계산이 가능하다. 따라서 5개 이상의 셀 유속 자료가 확보되는 ADVM을 적용하기에 적절하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 괴산댐 하류 지점에서 연속적으로 측정된 ADVM 자료를 이용하여 유량을 산정하고 그 결과를 댐 방류량 및 기존에 개발된 유속지수법 유량과 비교하였다.

2. 연구 대상 지점

본 연구는 충북 괴산군 칠성면 외사리 달천에 설치한 ADVM을 이용하였다. 하도의 하폭은 약 110m 이며, 하상은 안정적인 호박돌로 구성되어 있어 단면의 변화가 크게 발생하지 않았다. 상류에는 최대 1,000 m³/s 이상의 유량을 방류하는 수력발전댐이 있어 실측 유량과의 비교가 용이한 지점이다. 그림 1은 대상 지점의 사진과 측정 단면, ADVM의 설치 및 측정 조건을 보여준다.

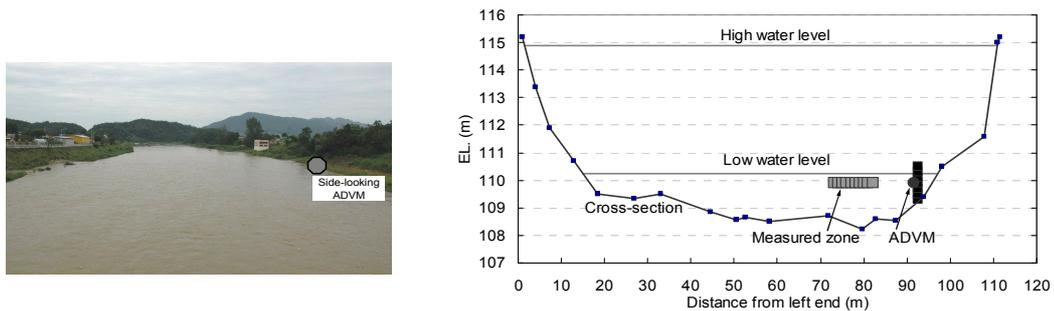


그림 1. 측정 지점의 전경과 측정 단면 및 ADVM의 설치 모습

3. 확률론적 유속 분포

3.1 유속 분포 공식

하천의 단면의 무차원화된 2차원 유속분포는 Chiu(1987, 1988)가 제안한 확률론적 유속 분포 공식에 의해 모의된다. 이 식은 주로 세 가지 요소로 이루어지는데, 1) 등유속선으로 이루어진 $\xi-\eta$ 좌표계, 2) 엔트로피 최대화 원리에 기초한 유속분포식, 3) 수리학적 매개변수 M 의 세 가지이며(이찬주 등, 2007), 이를 반영하는 세 개의 식으로 구성된다. 첫 번째 식은 등유속선 ξ 에 관한 공식으로 다음과 같다.

$$\xi = Y(1 - Z)^{\beta_i} \exp(\beta_i Z - Y + 1) \quad (1)$$

여기서, $Y = \frac{y}{D+h}$, $Z = \frac{|z|}{B_i}$ 이며, h, β_i 는 등유속선의 형상에 관계된 매개변수이다. 두 번째 식은 유속분포식으로 다음과 같다.

$$u = \frac{u_{max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{max} - \xi_0} \right] \quad (2)$$

마지막으로, 단면의 최대유속과 평균유속의 관계 및 유속 분포식에 영향을 주는 수리학적 매개변수 M 에 관한 식은 다음과 같다.

$$\phi(M) = \frac{\bar{u}}{u_{\max}} = e^M(e^M - 1)^{-1} - \frac{1}{M} \quad (3)$$

여기서 $\phi(M)$ 은 최대유속과 평균유속의 비율을 나타낸다.

3.2 매개변수의 결정

Chiu의 확률론적 유속 분포 공식을 활용하려면, 매개변수 M , h , β_i 를 결정하여야 한다. 이중 M 값은 지점의 특성을 나타내는 매개변수로서 지점별로 다르다고 하였다(Chiu, 1988). M 값을 구하기 위해서는 여러 차례의 실측을 통해 최대유속과 평균유속의 관계인 $\phi(M)$ 을 구하고 식 (3)에 의해 계산하여야 한다. 본 연구에서는 ADVN이 설치된 지점과 근접한 곳에서 측정한 자료의 선형회귀분석을 토대로 M 값을 2.36으로 산정하였다. 또한 h 와 β_i 의 경우 국내 8개 지점에서 측정한 자료를 통해 경험식을 제시한 이찬주 등(2007)의 연구를 토대로 본 연구의 대상 지점의 단면과 수심 특성을 고려하여 매개변수를 결정하였는데, 이 때 아래 식을 이용하였다. 즉, h 에 대해서는

$$h = -0.37d_{\max} + 0.9 \quad (4)$$

여기서, d_{\max} 는 단면의 최심부 깊이이다. 또한 β_i 의 경우 단면을 이등분하여 좌우측 단면에 별도로 적용되는데, 이 때 각 값은 아래 식을 이용하였으며, 먼저 $\beta_L - \beta_R$ 을 계산한 후 이찬주 등(2007)이 제시한 β_i 의 특성에 대한 구분을 기초로 β_i 를 좌측, 우측 단면에 대해 각각 산정하였다.

$$\beta_L - \beta_R = 0.89R_{area} + 0.01R_{wd} - 0.69 \quad (5)$$

여기서, R_{area} 는 좌우분할면적의 비율이고, R_{wd} 는 하폭수심비이다. 다만, 연속 유량자료 산정시에는 β_L 은 0.56, β_R 은 1.0으로 고정하여 계산하였다.

4. 계산 결과

4.1 주요 방류 사상에 대한 분석 결과

표 1은 2006년과 2007년의 주요 방류 사상에 대해 확률론적 유속분포 공식과 ADVN 10개 셀 유속 자료를 이용하여 계산한 유량을 보여준다. 비교를 위해 기존에 수립된 유속지수법 유량과 댐 방류량이 제시되어 있으며, 평균절대오차는 댐 방류량 대비 상대오차를 절대값으로 평균한 것이다. 흐름이 대체로 안정되어 있는 주요 사상에 대한 오차는 확률론적 유속분포를 이용할 경우 6.44%이고 유속지수법으로 계산할 경우 7.43%로 본 연구의 방법이 댐 방류량과 비교하여 오차가 크지 않고 경험식을 수립하여 유량을 산정하는 유속지수법 못지않게 정확성이 있다는 것을 나타내고 있다.

4.2 연속유량 산정 결과

그림 3은 2006년 홍수기 기간에 대해 확률론적 방법으로 유속을 연속 추정된 결과를 나타내고 있다. 전체적인 경향은 댐 방류량과 동일하지만, 발전 방류만 하는 평수시 유량에서는 확률론적 유속분포에 의한 유량 추정이 댐 방류량에 비해 다소 큰 오차를 보이는 것으로 나타났다. 그 결과 발전 방류를 포함할 경우 RMS 오차는 15.3%로 나타났는데, 이는 유속지수법의 7.5%에 비해 높은 것이다. 다만 홍수시 여수로 방류가 이루어지는 경우만을 고려할 경우 RMS 오차는

10.6%로 유속지수법의 4.9%보다는 높지만 대체로 정확하게 산정할 수 있는 것으로 나타났다. 이로 볼 때, 확률론적 유속분포 공식은 유속이 느린 흐름에서 유량 예측이 다소 덜 정확한 반면, 유량이 큰 경우에서 보다 정확하게 유량을 산정할 수 있는 것으로 나타났다. 확률론적 유속 분포를 이용할 경우 유속지수법에 비해 유속지수를 개발하는데 들이는 비용을 감안하면, 효율적으로 유량을 추정할 수 있는 것으로 판단된다.

표 1. 주요 유량 케이스별 매개변수와 유량 비교

케이스	매개변수				유량 (m ³ /s)		
	h	β_L	β_R	M	계산	유속 지수법	댐 방류량
200707161806	0.05	0.58	1.0	2.36	17.1	18.9	16.8
200707201900	0.00	0.58	1.0	2.36	33.8	37.4	39.1
200707240839	-0.07	0.59	1.0	2.36	64.4	74.8	61.0
200707241329	-0.52	0.59	1.0	2.36	295.3	296.5	321.2
200707242130	-0.29	0.71	1.0	2.36	166.6	182.3	175.0
200707250730	-0.17	0.64	1.0	2.36	102.0	112.5	106.1
200708050429	-0.67	0.57	1.0	2.36	410.8	414.6	407.7
200708082229	-0.69	0.56	1.0	2.36	449.3	459.7	480.4
200607161929	-1.13	0.47	1.0	2.36	778.2	779.4	830.2
200607170229	-1.41	0.45	1.0	2.36	1,063.7	1,116.8	1,093.9
200607162359	-1.56	0.44	1.0	2.36	1,135.2	1,304.7	1,307.3
평균절대오차					6.44%	7.43%	

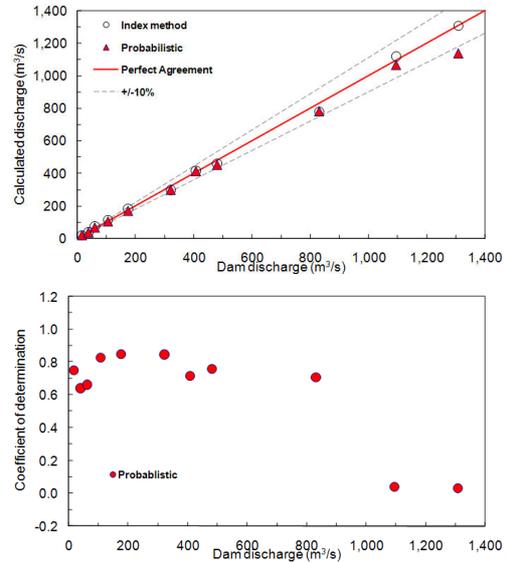


그림 2. 유량비교와 상관도 비교

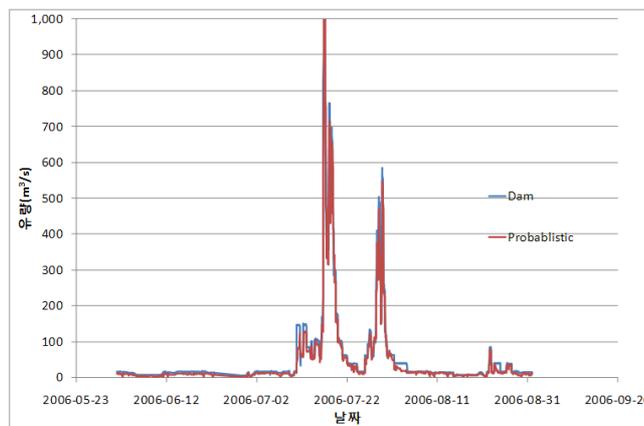


그림 3. 2006년 자료에 대한 연속 유량산정 결과

4.3 2대의 ADVM을 활용한 결과

그림 1에 보면, ADVM은 단면의 아래 쪽 부분에 설치되어 있다. 이는 저수시에도 측정을 가능케 하여, 연중 중단없이 유량 측정이 이루어질 수 있도록 하기 위함이다. 그런데, 그림 2(아래)의 결과는 유량이 약 800 m³/s 이상에서 센서에서 먼 셀 유속 자료의 상관도가 떨어짐으로써 유속 측정이 부정확하게 감소하고 그 결과 유량이 적게 산정된다는 것을 보여준다. 이는 표 1의 고 유량시에 발생하는 오차와 관련이 있다. 이런 문제를 해결하기 위해서는 보다 고유속 구역을 측정함으로써 정확도를 높이고 셀 유속의 상관도를 높이는 방법이 필요하여 기존 센서에서 1.25 m 높은 위치에 보다 멀리까지 도달하는 저주파의 ADVM을 설치하고 2008년의 홍수기의 4가지 방류량

조건에서 운영하였다. 표 2에는 기존의 하위 10개 셀 유속만을 이용한 경우와 상하위 7개 셀씩 총 14개 셀을 이용한 경우를 비교하였다. 그 결과 하위 셀만을 이용할 경우에 비해 오차가 크게 감소되었으며, 유속지수법과 비교해도 상대오차가 작은 것을 알 수 있었다.

표 2. 하위 센서만을 이용한 경우와 상하위 센서를 모두 이용한 경우의 유량 오차(2008년)

댐 방류량 (m ³ /s)	하위 10개 셀 이용		상위 7개, 하위 7개 셀 이용		유속지수법	
	유량 (m ³ /s)	상대오차 (%)	유량 (m ³ /s)	상대오차 (%)	유량 (m ³ /s)	상대오차 (%)
374.5	335.4	-10.4%	356.8	-4.7%	353.2	-5.7%
278.8	256.7	-7.9%	270.4	-3.0%	283.1	1.5%
233.8	217.7	-6.9%	232.1	-0.7%	242.4	3.7%
232.0			232	0.0%	242.6	4.6%
Average	8.4%		2.1%		3.9%	

5. 결론

본 연구에서는 Chiu(1988)가 제안한 확률론적 유속 분포 공식을 활용하여 고정식 ADV의 셀 유속 자료와 결부시켜 유량을 산정하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 2006년과 2007년의 11개의 방류 사상에 대해 유량을 산정한 결과 확률론적 유속분포는 평균 6.44% 오차를 가지는 것으로 나타났으며, 이는 유속지수법보다 약간 개선된 것이다.

나. 여수로 방류가 이루어지는 연속유량 자료에 대해 분석을 실시한 결과 댐 방류량 대비 10.6%의 오차가 계산되어 유속지수법의 4.9%와 비교하여 다소 높게 산정되었으나, 비교적 정확하게 유량을 측정하는 것으로 나타났다

다. 홍수시 보다 고유속 구역을 측정하기 위해 상위 센서를 추가하여 측정할 경우 4개의 방류량 조건에 대해 2.1% 오차를 나타내 하위 센서만을 이용할 경우보다 6% 이상 개선되었으며, 유속지수법보다도 약 2%의 유량 산정 개선이 이루어질 수 있음을 보여주었다.

본 연구에서 활용한 방법은 보다 다양한 하천 단면 조건에서 주요 매개변수인 M , h , β_i 등이 측정없이 적절히 추정될 수 있을 경우 미계측 지점에서 ADV를 이용한 홍수기 자동유량측정에 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(과제번호 2-1-3).

참고문헌

- 김창완, 이민호, 유동훈, 정성원.(2008) "자연하천에서 Chiu의 유속분포와 최대유속 추정을 이용한 유량산정," **한국수자원학회논문집**, 제41권, 6호, pp. 575-585
- 이찬주, 서일원, 김창완, 김원.(2007) "Chiu가 제안한 2차원 유속분포식의 자연하천 적용성 분석," **한국수자원학회논문집**, 제40권, 12호, pp. 959-970
- Chiu, C-L.(1987) "Entropy and probability concepts in Hydraulics," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 113(5), pp. 583-599
- Chiu, C-L.(1988) "Entropy and 2-D velocity distribution in open channels," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 114(10), pp. 738-756
- Nihei, Y., Kimizu, A.(2007) "A new discharge monitoring system with an H-ADCP

measurement and numerical simulation," *Proceedings of IAHR2007*, Vol. 1, pp. 76.