

# 자연하천에서 무차원 유속분포-지표유속법을 이용한 유량산정

## Discharge Estimation Using Non-dimensional Velocity Distribution and Index-Velocity Method in Natural Rivers

김창완\* / 이민호\*\* / 정성원\*\*\* / 유동훈\*\*\*\*  
Chang Wan Kim / Min Ho Lee / Sung Won Jung / Dong Hoon Yoo

### Abstract

It is essential to obtain accurate and highly reliable streamflow data for water resources planning, evaluation and management as well as design of hydraulic structures. A new discharge estimation method, which is named 'non-dimensional velocity distribution and index-velocity method,' was proposed in this research. This method showed very close channel discharges which were calculated with the existing velocity-area method. When velocity-area method is used to estimate channel discharge, it is required to observe point velocities at every desired point and vertical using a current meter like Price-AA. However 'non-dimensional velocity distribution and index-velocity method' is used, it become optional to observe point velocities at every desired point and vertical. But this method can not be applied for the cases of very complex and strongly asymmetric channel cross-sections because non-dimensional velocity distribution by entropy concept may be quite biased from that of natural rivers.

**Keyword :** discharge estimation, velocity-area method, index-velocity method,  
non-dimensional velocity distribution, entropy

### 1. 서론

최근 우리나라에서도 하천 유량의 효율적인 측정을 위해 초음파유속계나 유속지수법과 같은 실시간 하천 유량측정 방법들이 도입되고 있다(김창완 등, 2004; 김치영 등, 2006). 이러한 방법들은 흐름 단면 전체를 측정하지 않고 단면의 특정 영역이나 지점에서 연속적인 유속을 측정하고 이를 단면 전체에 대한 관계로 확산하여 유량을 산정한다. 따라서 측정 영역의 유속과 전체 단면의 유속 사이에 합리적이고 이론적인 관계를 수립하는 것이 필요하다.

Chiu(1987, 1988)는 기존의 결정론적인 흐름 방향 유속분포식의 한계를 극복할 수 있는 방법으로 확률통계에서 사용되는 엔트로피 개념을 이용한 단면 2차원 유속분포식을 제안하였다. Chiu의 식은 흐름단면에서 유속이 동일한 점들을 연결하는 등유속선과 유속과의 1:1 대응 관계를 이용하므로 수면 아래에서 최대유속이 나타나는 실제 현상을 이론적으로 재현할 수 있다. 하지만 이론적인 유속분포식을 검증할 수 있는 실측자료의 제약으로 인해 그가 제안한 유속분포식은 단면 형상이 일정한 직사각형이나 사다리꼴 등의 실험수로 또는 운하에만 제한적으로 적용된 바 있다(Chiu, 1988; de Araujo와 Chaudhry, 1998). Chiu와 Murray(1992)는 확률론적인 유속분포의 분석을 통해 불규칙한 개수로 단면에서 평균유속, 운동량 보정계수, 에너지 보정계수 등을 결정할 수 있음을 보여준 바 있다. 엔트로피 유속분포식은 Chiu에 의해 제안된 이래로 여러 방면에서 연구의 진전이 있었다. 하지만 하천 단면의 2차원 유속분포에 관한 실측자료가 적었던 관계로 자연하천의 유

\* 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원 E-mail : cwkim@kict.re.kr

\*\* 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 E-mail : 518minho@kict.re.kr

\*\*\* 정회원·한국건설기술연구원 / 유량조사사업단 단장 E-mail : swjung@kict.re.kr

\*\*\*\* 정회원·아주대학교 환경건설교통공학부 교수 E-mail : dhyoo@ajou.ac.kr

속분포를 모의하는 연구에는 거의 적용되지 못하였다.

본 연구에서는 Chiu가 제안한 엔트로피 유속분포식을 이용하여 자연하천의 무차원 유속분포를 모의하였다. 무차원 유속분포와 실측유속을 이용하여 최대유속을 추정하였다. 추정된 최대유속을 무차원 유속분포에 대입하여 단면 전체에 대한 유속분포를 추정하여 유량을 산정하였다. 본 연구에서 개발된 유량산정 방법의 적용성을 검토하기 위하여 2005년도 유량측정성과(한강홍수통제소, 2006; 낙동강홍수통제소, 2006; 금강홍수통제소, 2006; 영산강홍수통제소, 2006)에 나타나 있는 유량자료를 이용하였다. 유속면적법으로 산정한 전통적인 유량측정성과와 본 연구에서 개발된 지표유속법을 이용하여 산정된 유량을 비교·검토하여 개발된 유량산정 방법의 적용성을 검토하였다.

## 2. 유량산정 방법

유속면적법(area-velocity method)은 전통적인 유량산정 방법으로 측정유속이 지배하는 흐름단면적을 계산하고 유속과 단면적을 곱하여 유량을 산정하는 방법이다.

$$Q = A \bar{u} = A_1 \bar{u}_1 + A_2 \bar{u}_2 + \dots + A_{n-1} \bar{u}_{n-1} + A_n \bar{u}_n = \sum_{i=1}^n A_i \bar{u}_i \quad (1)$$

여기서  $Q$ 는 전체 흐름단면에 대한 유량이며,  $A$ 는 전체 흐름단면적,  $A_i$ 는 측선분할 흐름단면적,  $\bar{u}$ 는 전체 단면의 평균유속,  $\bar{u}_i$ 는 측선분할 흐름단면의 평균유속이다.

지표유속법(index velocity method)은 유속지수법이라고 불리기도 하며 최대유속을 유량산정의 지표로 하여 유량을 계산하는 방법이다.

$$Q = c u_{\max} A \quad (2)$$

여기서  $c$ 는 유속지표(velocotiy index),  $u_{\max}$ 는 최대유속이다.

## 3. 무차원 유속분포

Chiu(1987, 1988)가 제안한 단면 2차원 유속분포식은 확률통계에서 사용되는 엔트로피 최대화의 개념을 수리학적으로 응용한 것이다. Chiu(1988)에 의하면 개수로 단면에서 2차원 유속분포는 등유속선 기반의 좌표계, 엔트로피에 기초한 유속분포식, 수리학적 매개변수  $M$  등의 3가지 요소로 구성된다.

### 3.1 등유속선에 의한 $\xi-\eta$ 좌표계

엔트로피 유속분포식에서는 그림 1에 보인 바와 같이 단면상의 동일한 유속을 가지는 점들을 연결하는 등유속선(isovel)  $\xi$ 와 직교선  $\eta$ 로 구성되는  $\xi-\eta$  좌표계를 이용한다.  $\xi-\eta$  좌표계는 원통좌표계와 유사한데,  $\xi-\eta$  좌표계에서는 등유속선으로 표현되는 단면상의 위치와 유속 간에 1:1 관계가 성립한다. 단면에서 하폭 방향과 연직방향의 성분으로 이루어진 직교좌표계는 식 (3)에 의해  $\xi-\eta$  좌표계로 변환된다. 실제 유속분포의 계산에는  $\eta$ 가 필요가 없으므로  $\xi$ 만 계산하게 된다.

$$\xi = Z(1 - Y)^{\beta_j} \exp(\beta_j Y - Z + 1) \quad (3)$$

여기서  $Z = \delta_z / (h + \delta_z + \epsilon)$ ,  $Y = |y| / (B_j + \delta_j)$  이다.  $y$ 는 하폭방향 좌표,  $z$ 는 연직방향 좌표로 최대유속 지점을 통과하는 연직선을 선택해야 한다.  $h$ 는 수심,  $B_j$  ( $j=1$  또는  $2$ )는  $z$ 축과 이루는 좌안 또는 우안 사이의 수면 폭이다.

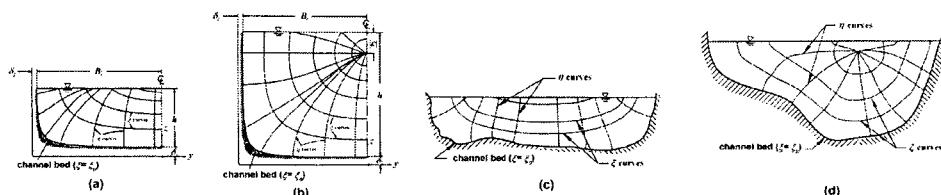


그림 1. 개수로 단면의  $\xi-\eta$  좌표계(Chiu and Murray, 1992)

식 (3)에 관련된  $\epsilon$ ,  $\delta_j$ ,  $\delta_z$ ,  $\beta_j$ 는 등유속선의 형상에 관계된 매개변수이다. 이 중  $\epsilon$ 은 연직방향으로 최대유속이 발생하는 수면으로부터의 거리이다.  $\epsilon = 0$ 인 경우는 수면에서,  $\epsilon > 0$ 인 경우 수면 위에서,  $\epsilon < 0$ 인 경우 수면 아래에서 최대유속이 발생한다.  $\delta_j$ ,  $\delta_z$ ,  $\beta_j$ 는 등유속선의 형상을 미세하게 조정하는 변수이다.

### 3.2 무차원 유속분포식

엔트로피 유속분포식은 등유속선  $\xi$ 상에서 유속  $u$ 에 관한 확률밀도함수를 이용하여 도출된다. 이를 통해 등유속선  $\xi$ 에서 무차원 유속  $u^+$ 를 나타내는 일반적인 유속분포식은 식 (4)와 같이 구할 수 있다. 이에 대한 자세한 유도 과정은 Chiu(1988)의 문헌에 기술되어 있다.

$$u^+ = \frac{u}{u_{\max}} = \frac{1}{M} \ln \left[ 1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] \quad (4)$$

식 (4)는  $M$ 을 매개변수로 갖는 개수로 단면에서의 2차원 유속분포에 관한 일반 공식이다.

### 3.3 수리학적 매개변수 $M$

엔트로피 유속분포식의 3번째 구성 요소는 유속분포의 동질성을 결정하는 수리학적 매개변수  $M$ 으로 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\phi(M) = \frac{\bar{u}}{u_{\max}} = e^M (e^M - 1)^{-1} - \frac{1}{M} \quad (5)$$

여기서  $\phi(M)$ 은 평균유속과 최대유속의 비율을 나타낸다. 하천의 특성을 나타내는 값으로 일정한 값을 가지는 것으로 알려져 있다(김영성 등, 2001; 추태호, 2002; Moramarco 등, 2004; 이찬주 등, 2007).

## 4. 무차원 유속분포-지표유속법을 이용한 유량산정

### 4.1 무차원 유속분포의 매개변수 결정

무차원 유속  $u^+$ 는 각 격자의 중앙에서 정의되면 식 (4)를 이용하여 계산한다. 식 (4)를 적용하려면 관련된 매개변수를 먼저 결정하여야 한다. Chiu and Chiou(1986)는 매개변수를 산정하기 위해 인공수로에서 하폭과 수심, 조도계수를 변화시켜 실험과 모의를 실시하고, 산정된 매개변수의 범위는 각각 다음과 같이 제시하였다.  $\epsilon$ 의 범위는  $-0.587 \sim 0.045$  m로 주로 수면 근처에서 최대유속이 발생한다.  $\delta_j$ 와  $\delta_z$ 는 0에 가까운 값이다.  $\beta_j$ 의 범위는 0~1이며 그림 1에 보인 같다.  $B = 2B_j$ 이며  $n$ 은 Manning의 조도계수이다. 본 연구에서는  $\epsilon = 0$ (수면에서 최대유속이 발생하는 것으로 가정),  $\delta_j = 0$ ,  $\delta_z = 0$ 을 적용하였으며,  $M = 2.13$ 을 채택하였다.

### 4.2 측정유속과 무차원 유속분포의 회귀분석 및 지표유속법

실측유속  $u_{j,k}$ 와 무차원 유속  $u_{j,k}^+$ 간의 원점통과 선형회귀모형을 다음 식과 같이 설정하였다.

$$u_{j,k} = \hat{u}_{\max} u_{j,k}^+ \quad (6)$$

여기서  $\hat{u}_{\max}$ 는 회귀상수로 측정 최대유속이다. 부자(float)로 측정한 실측유속인 경우 그림 2에 보인 바와 같이 수면에서 흘수심까지 격자에 측정유속을 적용한다. 유량  $Q$ 는 식 (2)에 의하여 산정된다. 이 때  $u_{\max}$  대신 식 (6)에서 산정된  $\hat{u}_{\max}$ 를 적용하고 유속지표  $c$ 는 무차원 유속분포의 단면 평균값이 된다. 아울러 측정 최대유속의 95 % 신뢰도 구간을 계산하여 유량의 신뢰도 구간도 계산하였다.

그림 2는 임진강 군남 지점에서 2006년 7월 3일 12:20에 Price-AA 유속계로 실측한 유속과 식 (6)에 의해 계산한 유속분포를 예로 도시한 것이다. 수위는 2.09 m이며, 유속면적법에 의한 유량은  $963 \text{ m}^3/\text{s}$ , 무차원 유속분포-지표유속법에 의한 유량은  $803 \text{ m}^3/\text{s}$ (95 % 신뢰도 구간:  $607 < Q < 999 \text{ m}^3/\text{s}$ )이다. 이 경우 측정 최대유속의 결정계수는 0.81이었다. 그림 3은 적성 지점에서 2006년 7월 16일 15:11에 부자로 실측한 유속과 식 (6)에 의해 계산한 유속분포를 예로 도시한 것이다. 수위는 10.76 m이며, 유속면적법에 의한 유량은  $9,489 \text{ m}^3/\text{s}$ , 무차원 유속분포-지표유속법에 의한 유량은  $9,849 \text{ m}^3/\text{s}$ (95 % 신뢰도 구간:  $8,972 < Q$

$< 10,726 \text{ m}^3/\text{s}$ )이다. 이 경우 추정 최대유속의 결정계수는 0.40이었다. 본 연구에서는 실측유량 자료가 많을수록 결정계수가 높아지고 신뢰도 구간이 좁아지는 경향을 보였다.

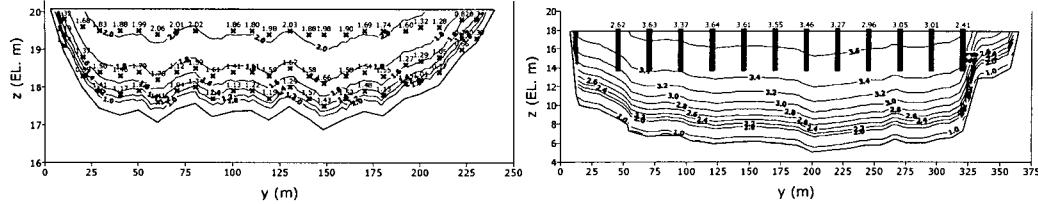


그림 2. Price-AA 측정 유속과 식 (6)에  
의한 유속분포

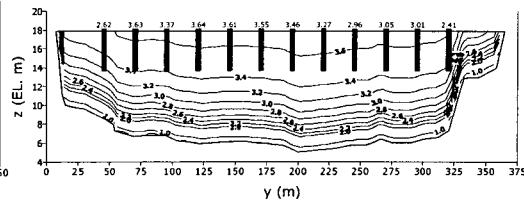


그림 3. 봉부자 측정 유속과 식 (6)에 의한  
유속분포

## 5. 자료수집 및 비교검토

### 5.1 유량측정 자료의 수집·분석

2005년도 유량측정 성과(한강홍수통제소, 2006; 낙동강홍수통제소, 2006; 금강홍수통제소, 2006; 영산강홍수통제소, 2006) 중 불확실도가 낮은 자료를 대상으로 분석하였다. 분석 지점은 18개 지점이며 측정시간의 누락, 부자의 흘수 미기재, 흐름분리 등의 문제가 있는 자료를 제외한 512개의 자료를 분석하였다. 유량측정 장비로 수위가 낮을 경우에는 Price-AA 유속계, 수위가 높을 경우에는 부자가 사용되었다. 하폭-수심비( $B/h_{\max}$ )는 매개변수  $\beta_j$ 를 결정하기 위한 중요한 값으로 수위가 높은 경우보다 수위가 낮은 경우에 그 값이 커졌다. 본 연구에서 사용한 자료에 의하면 수위가 높은 경우 10~100(평균 50), 수위가 낮은 경우 20~280(평균 116)의 범위를 보이고 있다.

### 5.2 유속면적법과 무차원 유속분포-지표유속법에 의한 유량 비교

산정유량의 검토는 측정장비와 측정유역별로 구분하여 실시하였다. Price-AA 유속계를 이용한 유량측정의 경우 그림 4에 나타낸 바와 같다. 부자를 이용한 유량측정의 경우 그림 5에 나타낸 바와 같다. 그림 4~5에서 가로축은 유속면적법에 의한 측정유량  $Q_{AV}$ , 세로축은 무차원 유속분포-지표유속법에 의한 계산유량  $Q_{IV}$ 이다. 측정유량에 대한 계산유량과 더불어  $Q_{IV}$ 의 95 % 신뢰도 구간 및 측정유량과 계산유량의 1:1 직선도 도시하였다. 그림 4~5에서 대부분의 측정유량  $Q_{AV}$ 는 계산유량  $Q_{IV}$ 의 95 % 신뢰도 구간 내에 위치하기 때문에 만족스러운 결과를 보이고 있다.

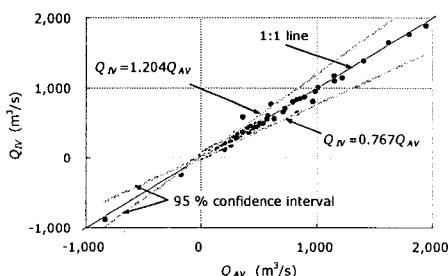


그림 4. 산정유량( $Q_{IV}$ )과 Price-AA  
실측유량( $Q_{AV}$ )

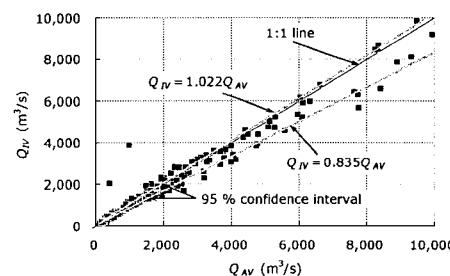


그림 5. 산정유량( $Q_{IV}$ )과 봉부자  
실측유량( $Q_{AV}$ )

이러한 결과가 나타내는 바는 본 연구에서 개발된 유량산정 기법을 이용하여 유속계에 의한 유량측정 결과를 검증하거나, 유량을 산정할 수 있음을 시사하고 있다. 부자를 이용한 유량측정자료의 적용에는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 유속분포를 이용하여 유속분포를 반영하는 주요 측정점을 선정하여 측정하여 측정시간과 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서 도출한 결론은 다음과 같다. 무차원 유속분포-지표유속법을 이용하여 기존 유속면적법과 거의 동일한 하천유량을 계산할 수 있다. 또한 Price-AA를 이용하여 유속을 측정할 경우 측선의 수심에 따라 정해진 지점에서 유속을 측정하여야 하는데, 무차원 유속분포-지표유속법을 이용하면 임의의 측선과 측점에서 유속을 측정하여도 정확한 유량계산이 가능하다. 유속이 매우 작은 경우 또는 홍수터에 흐름이 발생하면서 극단적으로 수심이 얕고 하폭이 크며 단면형상이 복잡해지는 경우에는 유속면적법과 무차원 유속분포-지표유속법으로 계산한 유량 간에 차이가 있을 수 있다.

## 감 사 의 글

본 연구는 건설교통부 한강홍수통제소 '한강유역 수자원시험장비 설치 운영(5단계)' 연구사업 및 건설교통부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(06건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 금강홍수통제소 (2006). 2005 금강유량측정보고서.
- 김영성, 양재린, 추태호, 고익환, 김우구 (2001). "엔트로피를 이용한 유량측정기법의 국내하천에의 적용." 대한토목학회 2001 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 1-4.
- 김창완, 이민호, 정상화, 민인홍 (2004). "초음파유량계를 이용한 실시간 하천유량측정." 2004년 한국수자원학회학술발표회논문집, 한국수자원학회.
- 김치영, 김원, 이찬주, 김동구 (2006) "유속지수법을 이용한 자동유량측정." 2006년 한국수자원학회학술발표회 논문집, 한국수자원학회.
- 낙동강홍수통제소 (2006). 2005 낙동강유량측정보고서.
- 영산강홍수통제소 (2006). 2005 영산섬진강유량측정보고서.
- 이찬주, 서일원, 김창완, 김원 (2007). "엔트로피 유속분포식의 자연하천 적용성 분석." 한국수자원학회논문집, 수자원학회, 심사 중.
- 추태호 (2002). "낙동강하구둑 방류량 산정방법 개선연구-엔트로피 개념에 의한 유량측정방법 적용-." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제22권, 제4-B호, pp. 485-494.
- 한강홍수통제소 (2006). 2005 임진강유량측정보고서.
- Chiou, C.-L. (1987). "Entropy and probability concepts in hydraulics." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 113(5), pp. 583-600.
- Chiou, C.-L. (1988). "Entropy and 2-D velocity distribution in open channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 114(7), pp. 738-758.
- Chiou, C.-L. and Chiou, J.-D. (1986). "Structure of 3-D flow in rectangular open channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 112(11), pp. 1050-1068.
- Chiou, C.-L. and Murray, D. W. (1992). "Variation of velocity distribution along nonuniform open-channel flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 118(7), pp. 989-1001.
- de Araujo, J. C. and Chaudhry, F. H. (1998). "Experimental evaluation of 2-D entropy model for open-channel flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 124(10), pp. 1064-1067.
- Moramarco, T., Saltalippi, C., and Singh, V. P. (2004). "Estimation of mean velocity in natural channels based on Chiou's velocity distribution equation." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 9(1), pp. 42-50.