

엔트로피 개념에 의한 유량측정 기법

Measurement of Discharge Using the Entropy Concept

추태호, 이승관
부산대학교

Choo Tai-Ho, Lee Seung-Kwan
Pusan Univ.

요약

그 동안 기술적 또는 이론적 배경의 취약으로 인하여 측정이 매우 어렵거나 불가능했던 유량을 산정하는데 유효하게 적용할 수 있으며, 형상에 관계없이 측정비용 및 시간을 많이 줄일 수 있다. 더욱이 전자파 표면 유속계와 함께, 실시간 유입수문곡선을 만들 수 있는 실시간 유량 측정 시스템을 개발하는데 사용될 수 있다.

Abstract

The method presented is also efficient and applicable in estimating the discharge in high flows that are very difficult or impossible to measure before, due to technical or theoretical reasons. The method can drastically reduce the time and cost of measurement, regardless of the irregularity in the geometrical shape. With Microwave Water Surface Velocity Meter, An entropy based method for determining the discharge in the rivers can be used to develop real-time discharge measurement system (RDMS) which can carry out the real-time inflow hydrograph.

I. 서론

현재의 수자원 기초조사는 관측지점 및 측정횟수의 부족, 관리시설의 노후화, 측정자료의 부족 및 관측의 소홀, 수문자료 관련기술 및 분석체계의 불충분 등으로 데이터에 대한 신뢰도가 저하된 실정이다. 더욱 심각한 것은 이러한 데이터의 신뢰도에 대하여 문제의 심각성을 갖고 있으나 타 분야에 비하여 실천 및 투자에 너무나 인색하고 있다는 점이다. 특히 우리나라의 수자원 관련 기술의 발달은 매년 놀라울 만큼 빠르게 선진국을 따라잡고 있는 것이 사실이나, 유독 이를 뒷받침하는 수자원 기초자료 중 가장 중요한 유량자료의 획득, 분석 및 활용에 대한 이론적인 연구는 매우 지지부진한 것이 현실이다.

따라서 본 연구에서는 확률 기법의 이론적 바탕에 근거한 효과적인 유량측정 및 분석방법을 제시하고, 실제로 외국 및 우리나라의 주요하천에서 취득한 실측자료를 이용하여 그 신뢰성과 적용성을 검증하는데 주 목적이 있다.

1. 유량자료의 활용도

유량자료의 필요성을 이해하기 위해서는 먼저 유량자료의 활용도를 살펴보아야 할 것이며, 수많은 관련 업무 중 중요한 업무를 요약하면 다음과 같다.

1.1 저수지와 하천의 지질조사, 설계, 운영 및 관리 업무

- 저수지내 단기(일), 중기(월), 장기(년)별 호소수량과 수질 예측 및 대책수립
- 저수지내 오염물질 유입률 결정 및 저수지 수질에 측 모의 주요인자 결정
- 하천 상황을 고려한 하상 변동 및 유로 변경 예측
- 감소 하천내 유량 산정

1.2 광역 상수도 운영관리 업무

- 관수로 내의 효과적인 유량산정
- 정수장 침전지 및 정수지 유속분포 및 분석업무
- 취수구 유입부 유속분포 및 분석업무

2. 현재 유량측정의 문제점

타 수문자료 취득에 비하여 유량자료의 취득에 대한 신뢰도와 실효성에 많은 의문점이 제기되고 있는 것이 현실이다. 이의 주된 원인은 유속분포에 대한 수리학적 이론을 바탕으로 한 연구가 수행되지 못하였으며, 모든 관심사가 단지 현장측정, 측정 장비와 평균유속에만 국한하여 추진되었기 때문이다. 즉 새로운 분야의 이론을 유속 또는 유량산정에 접목시키는 노력이 결여 되었고, 특히 평균유속 이외의 다른 주요수리인자에 대한 연구가 미진하였기 때문이다.

따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 유량자료의 간접 취득 대신 직접 취득하여 분석하는 방향으로 선회되어야 보다 신뢰성 있는 유량자료를 취득할 수 있을 것이다.

3. Chiu의 유속공식

log-type형 같은 기존의 유속공식은 최대유속이 항상 수표면에서 발생하며(약10%의 관측오차유발), 수로바닥 부분에서는 외살법(약15%의 관측오차유발) 등의 방법으로 추정하여 미 측정부위를 고려하여 평균유속을 구하고 이를 근거하여 간접적으로 수위와의 상관 관계를 통하여 비로써 요구되는 유량 자료를 획득하는 방법이며, 또한 식 자체 내에 근본적인 문제점을 갖고 있는 공식들이다.

Chiu의 유속공식은 확률 통계분야에서 사용되는 엔트로피 개념을 도입하여 산정된 2차원 유속공식이며, 이는 유속의 엔트로피 함수가 엔트로피 극대화에 대한 제약조건들을 만족시킴으로써 유속의 확률 밀도함수를 구할 수 있으며, 이 밀도 함수를 각 제약조건별로 다시 대입하여, 필요한 2차원 유속공식 또는 평균유속 공식을 얻을 수 있는 방법으로, 다음은 Chiu의 유속공식에 대한 유도과정을 소개한다.

3.1 유속 확률밀도함수

유속의 엔트로피 함수는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$H(u) = \int_0^{u_{max}} p(u) \ln p(u) du \tag{1}$$

여기서 u 는 수로단면에 공간적으로 분포된 시간평균유속 u_{max} 는 최대유속

$p(u)$ 는 유속의 확률밀도함수

이 엔트로피의 최대화를 위한 제약조건들은 아래와 같다.

$$\int_0^{u_{max}} p(u) du = 0 \tag{2}$$

$$\int_0^{u_{max}} up(u) du = \bar{u} = \frac{Q}{A} \tag{3}$$

제약조건들인 식 (2)과 (3)를 식(1)에 대입하여 유속의 확률 밀도함수를 구하면 다음과 같다.

$$p(u) = e^{\lambda_1 - 1} e^{\lambda_2 u} \tag{4}$$

여기서, λ_1 과 λ_2 는 Lagrange multiplier 이다.

3.2 유속의 공간적 분포

개수로에서는 최대유속이 수표면 아래에서 자주 일어나는 것은 주지의 사실이다. 따라서 유속의 공간적 분포, 즉 2차원의 유속 분포에 사용할 수 있는 ξ 식은 다음과 같다.

$$\xi = Y(1 - Z)^\beta \exp[\beta_z z - Y + 1] \tag{5}$$

$$Y = \frac{y + \delta_y}{D + \delta_y + h} \tag{6}$$

$$Z = \frac{|z|}{B_i + \delta_i} \tag{7}$$

여기서 D는 최대유속이 발생하는 지점의 수심

h 는 수표면 근처의 유속분포형과 경사를 조절하는 계수

또한 그림 1에서 알 수 있듯이, η curve는 ξ curve의 직교 궤도이며, 다음과 같다.

$$\eta = \pm \frac{1}{|Z|} (1 - Z)^{\beta_i [D + \delta_i - h(\beta_i + \delta_i)]^2} \exp[Z + \beta_i (\frac{D + \delta_i - h}{\beta_i + \delta_i} Y)] \tag{8}$$

3.3 유속 확률밀도함수와 공간적 분포와 관계

유속과 ξ 와 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = G(\xi) \tag{9}$$

ξ_0 와 ξ_{max} 사이의 ξ 값은 ξ 의 밀도함수가 균등하다고 할 수 있으며 다음과 같다.

$$f(\xi) = \frac{1}{\xi_{max} - \xi_0} \tag{10}$$

따라서, u 와 같거나 또는 u 보다 작은 유속의 확률은 다음과 같다.

$$\int_0^u p(u) du = \int_{G^{-1}(0)}^{G^{-1}(u)} p[G(\xi)] \frac{du}{d\xi} d\xi = \int_{\xi_0}^{\xi} f(\xi) d\xi \tag{11}$$

식 (10)을 식 (11)에 대입하면 유속의 확률밀도함수와 공간적 분포와의 관계를 나타내는 식 (12)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\xi - \xi_0}{\xi_{max} - \xi_0} = \int_0^u p(u) du \tag{12}$$

3.4 1차원 및 2차원 평균유속 공식

따라서 식(4)를 식(12)에 대입하여 적분하면 Chiu의 2차원 유속공식을 얻을 수 있다.

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[1 + (e^m - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] \quad (13)$$

여기서 $M = \lambda_2 u_{\max}$ (통상 엔트로피 계수라고 함)

또한, 수직 평균유속(1차원)은 식 (13)을 1차원에 대하여 적분하면 다음과 같다.

$$\bar{u}_v = \frac{1}{D} \int_0^D \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[1 + (e^m - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] dy \quad (14)$$

2차원 평균유속공식은 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 구할 수 있다.

$$\bar{u} = \int_0^{u_{\max}} up(u) du = \phi u_{\max} \quad (15)$$

$$\text{여기서 } \phi = \frac{e^M}{e^M - 1} \frac{1}{M} \quad (16)$$

3.5 최대유속 산정

최대유속은 최소유속이 영이 되므로 유속의 범위를 한정하는 중요한 통계적 매개변수이며, 평균유속과 확률밀도함수와 함께 최대유속은 유속분포를 지배하는 확률법칙을 완전히 나타낼 수가 있다. 뿐만 아니라 단면의 형상 및 유속분포에 관계 없이 어떠한 단면에서도 최대유속은 반드시 1개라는 점에 유의하여야 할 것이다. 따라서 평균유속을 직접 구하는 것보다는 최대유속을 구하여 평균유속을 구하는 방법이 더 합리적이고 효과적이다.

u_{\max} 을 산정하는 방법은 두 가지가 있다. 첫째는 최대유속이 발생하는 지점에서 측정된 3개 이상의 유속 샘플을 이용하는 방법과 둘째는 기존의 2점법 또 3점법에 의하여 측정된 자료로부터 산정하는 방법이 있다. 여기서는 기존의 유량측정 방법인 2점법에 의해서 구해진 $u_{0.2}$ 와 $u_{0.8}$ 로부터 최대유속을 산정하는 방법만 소개한다.

식 (13)과 (14)로부터 다음과 같은 3개 또는 4개의 식을 유도할 수 있다.

$$u_{0.2} = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi_{0.2} - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] \quad (17)$$

$$u_{0.8} = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi_{0.8} - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \bar{u}_v &= \frac{1}{2} (u_{0.2} + u_{0.8}) = \\ &= \frac{1}{D} \int_0^D \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] dy \end{aligned} \quad (19)$$

위 식들로부터 필요한 3개의 매개변수 (u_{\max} , M , h)을 구할 수 있으며, 여기서 M 과 h 에 대하여는 더 많은 측정자료에 의한 보완이 요구된다.

3.6 매개변수 M산정

매개변수 M 을 산정하는 방법은 두 가지가 있다. 첫 번째 방법은 신규 유량관측지점이나 과거의 관측기록이 없는 지점에서 사용할 수 있으며 비선형 회귀분석을 이용하여 식 (13)으로부터 구할 수 있다. 두 번째 방법은 기존의 유량측정 방법인 2점법에 의해서 구해진 $u_{0.2}$ 와 $u_{0.8}$ 로부터 식 (17), (18)과 (19) 3식을 동시에 풀어서 최대유속을 산정 한 후 측정된 평균유속과 함께 선형회귀분석 또는 그래프에 plotting하여 산정할 수 있다.

3.7 유속 분포 산정

식 (13) 및 매개변수 M , h 와 최대유속을 이용하면 주어진 단면에서의 유속분포를 완전하게 그릴 수 있다. 즉, 위의 값들과 식 (13)을 사용 바닥수심 0에서부터 수표면 D 까지의 유속분포를 완벽하게 나타내줌을 의미한다.

3.8 유량산정

최대유속 및 M 값 산정에서 알 수 있듯이, 다음과 같이 두 가지 방법에 의하여 유량을 산정한다.

가) 첫 번째 방법 : 측정된 3개 이상의 점 유속을 이용할 경우

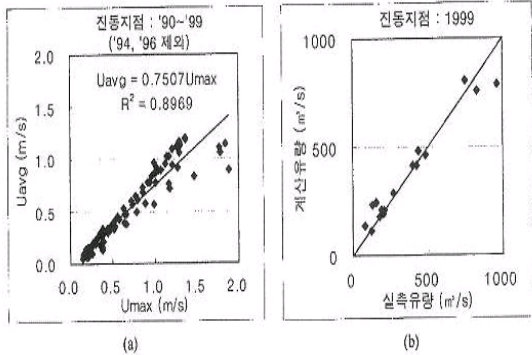
- ① 식(13)을 사용 3가지 매개변수 M , u_{\max} , h 를 구한다.
- ② 구한 M 과 u_{\max} 값을 식(16) 대입 평균유속 \bar{u} 을 구한다.
- ③ 측정 또는 알고 있는 단면적 A 에 \bar{u} 을 곱하여 유량을 산정한다.

나) 두 번째 방법 : 2점법에 의하여 기 측정된 $u_{0.2}$ 와 $u_{0.8}$ 을 이용할 경우

- ① 전단면의 $u_{0.2}$ 와 $u_{0.8}$ 을 등고선 프로그램에 입력하여 등 유속선을 그린다.
- ② 등 유속선에서 최대유속(u_{\max})을 선정한다.
- ③ 측정된 $\bar{u} = \frac{Q}{A}$ 와 u_{\max} 을 그래프에 plotting한다.
- ④ 모든 측정값(대략 10년이상)을 그래프에 plotting 또는 회기분석을 수행하여 M 값 산정.
- ⑤ M 값이 산정되면, 식 (16)을 이용하여 u_{\max} 만을 알면 언제든지 평균유속을 구한다.(여기서 u_{\max} 는 그 발생 단면지점에서 만 측정하여 u_{\max} 를 구하면 된다)

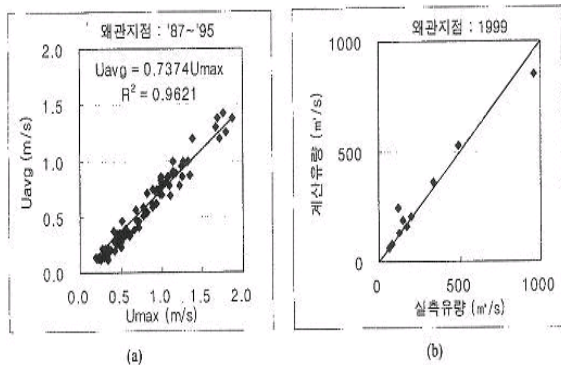
4. 국내 하천에 적용

이를 위하여 낙동강수계는 진동지점 및 왜관지점의 측정자료를 이용하여 엔트로피 파라미터 M값을 산정한 후 필요한 유량을 계산하여 실제 실측된 유량과 비교 분석하였다.



▶▶ 그림 1. (a) 최대와 평균유속관계
(b) 실측치와 계산치의 비교

그림 1(a)는 진동지점의 기 측정된 전체유량측정 성과로부터 구한 최대유속과 평균유속의 기울기 ϕ 가 식 (15)에서 같이 선형관계를 분명하게 나타내고 있으며, 그림 1(b)는 위의 선형관계를 이용하여 산정된 99년도의 유량을 실측유량과 비교한 결과 일치함을 알 수 있다.



▶▶ 그림 2. (a) 최대와 평균유속관계
(b) 실측치와 계산치의 비교

그림 2(a) 역시 왜관 지점의 기 측정된 전체유량 측정성과로부터 구한 최대유속과 평균유속의 기울기 ϕ (또는 엔트로피 파라미터 M)가 식 (15)에서 같이 선형관계를 분명하게 나타내고 있으며, 그림 1(b)는 위의 선형관계를 이용하여 산정된 99년도의 유량을 실측유량과 비교한 결과 일치함을 알 수 있다. 위와 같은 분석 결과로부터 엔트로피 개념이 도입된 Chiu의 유속 공식은 국내하천 적용성을 입증하였다.

5. 결론

본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 현재까지 유량자료는 직접측정이 기술적으로 곤란하므로 대부분 간접적으로 취득되며, 최종적으로 환산된 유량자료는 평균유속으로의 환산된 유량자료는 평균유속으로의 환산에 사용된 유속 공식 선택 시 1차 오류가, 수위-유량 측정 시 2차 오류가, Rating Curve 작성 시 3차 오류가, 수위자료로부터 유량자료 환산 시 4차 오류가 각각 발생되며, 이러한 오차는 직접측정이 가능한 타 자료에 비하여 오차의 정도가 심각함을 예상할 수 있다.
2. 위의 주된 원인은 새로운 이론을 유속 또는 유량산정에 접목시키는 노력이 결여되었고, 평균유속이외의 인자에 대한 연구가 극히 미진하였기 때문이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 유량자료의 간접취득 대신 직접취득으로 방향이 선회되어야 하며 이를 위해서는 반드시 이론적인 접근방법을 시도하여야만 신뢰성있는 유량자료를 취득 할 수 있다.
3. 최대유속의 발생지점 및 2차원 유속분포를 나타내며 이론적으로도 그 타당성이 입증된 Chiu의 유속공식을 이용한 새로운 유량관계식을 사용한다면, 수자원분야에 상당한 진전이 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 건설교통부(1995) 유량관측개선방안 연구 조사.
- [2] 건설교통부·낙동강홍수통제소(1990, 1991, 1998) 낙동강 수계 홍수량 측정조사보고서(부록)
- [3] 건설교통부·낙동강홍수통제소(1999) 낙동강수계 홍수량 측정조사보고서(부록)
- [4] 건설교통부(1983) 홍수량 측정조사
- [5] 건설교통부(1985, 1987, 1989) 홍수량측정조사(부록)
- [6] 추태호의 2인(1999) Entropy 개념에 의한 유량측정기법(최대유속을 중심으로) 한국수자원학회 학술발표회 논문집 pp.599-606
- [7] 한국수자원공사(2001) 최대유속을 이용한 하천유량 측정기법개발 연구, WRII-WR-01-14, 수자원 연구소
- [8] Chiu, C.-L., and Chiou, J.-D. (1986) Structure of 3-D. Flow in Rectangular Open Channels, Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. Vol. 112, No. 11, pp.1050-1068
- [9] Chiu, C.-L. (1988) Entropy and 2-D Velocity Distribution in Open Channel Flows. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. Vol. 114, No.7, pp.738-756
- [10] Chiu, C.-L. (1989) Velocity Distribution in Open channel Flows, Journal of Hydraulic Engineering ASCE. Vol.114, No.5 pp.576-594
- [11] Chiu, C.-L., Nurray, D. W., and Choo T. H(1992) Variation of Velocity Distribution In Non-Uniform Open Channel Flows, Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. Vol.118, No.7, pp.878-1001
- [12] Chiu, C.-L. and Chairil A. Abidin Said (1995) Maximum

- and mean velocities and Entropy in open-channel flow, Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. Vol.121, No.1, pp.26-35
- [13] Choo Tai Ho (1990) Estimation of Energy Momentum Coefficients in Open Channel Flow by Chiu's Velocity Distribution Equation, M.S. Thesis, Dep. of Civ. Engrg., Univ. of Pittsburgh, Pittsburgh.
- [14] Choo Tai Ho (1998) An Efficient Method of Discharge Measurement in Sandy Rivers. Ph.D. Dissertation, Dep. of Civ. Engrg., Univ. of Pittsburgh, Pittsburgh.