

엔트로피 개념에 의한 부정류 유량 산정에 관한 연구

추태호¹, 채수권^{2*}

¹부산대학교 사회환경시스템공학부, ²울지대학교 보건환경안전학과

A Study on the Estimation of Discharge in Unsteady Condition by Using the Entropy Concept

Tai Ho Choo¹ and Soo Kwon Chae^{2*}

¹Division of Civil Environmental Engineering, Pusan National University

²Division of Environmental Health and Safety, Eulji University

요 약 수자원에서 특히 중요한 홍수기에 대한 유량 측정은 어려움이 있고 모든 하천에 대한 지속적인 유량측정은 현재 시스템상에서는 불가능하다. 그래서 유량의 생산을 위해서 그동안 수위유량 관계 곡선이 사용되어 왔다. 하지만 수위-유량 관계 곡선은 그 편리성에도 불구하고 수위와 유량만의 관계를 사용하므로 정확성 면에서 항상 문제가 있어왔다. 따라서 본 연구에서는 Chiu의 엔트로피 개념의 2차원 유속공식을 사용하여 새로운 평균유속공식을 유도하였다. 본 공식은 수심, 중력가속도, 동수경사, 에너지경사, 동점성 계수 등 하천의 수리적 특성을 잘 반영하고 최대유속도 산정할 수 있다. 또한 최대유속과 평균유속사이의 선형관계를 검증할 수 있었고 그 결과로써 하천단면의 특성을 잘 나타내는 평형상태의 $\phi(M)$ 을 산정하였다. 평형상태의 $\phi(M)$ 을 사용하여 평균유속을 산정하였고 이를 바탕으로 유량을 산정하였다. 본 공식의 검증을 위해서 고리형 특성을 보이는 부정류 상황에서의 실험실 측정 데이터를 사용하여 계산된 유량과 실측된 유량을 비교하였고 그 결과는 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 향후 다양한 실험실 데이터 및 하천 데이터를 이용하여 연구가 지속되어 진다면 수자원 분야에 널리 이용될 것으로 판단된다.

Abstract A discharge measurement is difficult in flood season which is especially important in the water resources field and the continuous discharge measurement for all rivers is impossible on the present system. So, the stage-discharge curve has been used for a long time to produce discharge data of rivers. However, there has been problems from a reliability angle due to the fact that this method uses only stage-discharge relationship, although the stage-discharge curve has the convenience. Therefore, a new mean velocity equation was derived by using Chiu's 2D velocity formula of the entropy concept in this paper. The derived equation reflected hydraulic characteristics such as the depth, gravity acceleration, hydraulic radius, energy slope, kinematic coefficient of viscosity, etc. and estimated also a maximum velocity. In addition, this method verified the relationship between a mean and maximum velocity and estimates an equilibrium state $\phi(M)$ well presenting properties of a river cross section as the results. The mean velocity was estimated by using the equilibrium state $\phi(M)$, and then the discharge was estimated. To prove this equation to be accurate, the comparison between the measured and estimated discharge is conducted by using the measured laboratory data in the unsteady condition flow showing loop state and the results are consistent. If this study is constantly carried out by using various laboratory and river data, this method will be widely utilized in water resources field.

Key Words : Mean velocity, Unsteady flow, Loop stage-discharge curve, Equilibrium state $\phi(M)$, Entropy

*Corresponding Author : Soo Kwon Chae (Eulji University)

Tel: +82-10-9010-7146 email: cskwen@eulji.ac.kr

Received September 17, 2012

Revised October 23, 2012

Accepted December 6, 2012

1. 서론

수자원 분야에서 하천 유량의 산정은 매우 중요한 부분을 차지한다. 이치수 및 친수공간 설립 등 모든 수자원 분야에서 어떤 사업을 진행하기 위해서 이러한 유량의 측정 및 산정은 필수적인 요소이다. 따라서 국내외 여러 나라에서는 이러한 하천의 유량을 측정하기 위해서 전자 부자측정법, LSPIV, ADCP, 전자파 표면유속계 등을 이용한 측정방법들이 개발되거나 도입되어 왔다. 홍수시에는 일반적으로 봉부자법이 많이 사용되어 왔다. 하지만 그 안전성과 편의성에 비해 유량 측정의 불확실도가 크다는 단점을 가지고 있다는 것이 Hwang et al.[16]에 나타나 있다. 따라서 이를 개선하기 위하여 Kim et al.[17]은 GPS기반 위치정보를 수신하고 이를 RF무선통신을 통해 수신국으로 전달할 수 있는 전자 모듈을 부착한 전자 부자 시스템을 개발하였다. 봉부자가 가지는 단점이 많이 개선되었으나 부자법의 특성상 여전히 좌우안에서는 정확한 측정이 어려운 단점이 있다. 또한 일회 측정용으로 전자부자를 사용하기에는 경제적으로 불합리적이다.

한편, LSPIV(Large-Scale particle Image Velocimetry)는 PIV(Particle Image Velocimetry)를 실험실내 흐름규모가 큰 대형수로나 혹은 넓은 하천에서 측정을 위해 확장시킨 방법으로 홍수기에도 비교적 안전하게 유속을 측정할 수 있다는 장점은 있으나 추적자 투하, 조명, 촬영, 이미지변환, 이미지 처리 및 후처리의 6단계의 과정에서 발생할 수 있는 오차의 범위가 매우 다양하고 오차 성분을 정확히 밝히는 것도 어려움이 따른다. Hauet et al.[15]는 LSPIV를 이용하여 하천흐름측정시의 민감도에 대한 분석을 하였고 역시 매우 다양한 오차의 발생으로 값의 차이가 나는 것을 밝힌 바 있다. 그리고 Coz et al.[13]에서는 MEditerranean강에서 자주 발생하는 돌발홍수(flash-flood) 측정에 대한 LSPIV와 MLSPIV에 대한 연구를 수행하였는데 여전히 LSPIV가 가지는 근본적인 문제는 해결하지 못하였다.

ADCP(Acoustic Doppler current Profiler)를 통한 측정은 현재 많이 사용되고 있는 추세에 있고 기본적으로 하천을 횡단하면서 순간적인 유속을 측정한다. 시간 평균유속과의 차이가 발생하지만 1초에 1회 이상의 빠른 속도로 연직유속분포를 수집하고 이를 공간적으로 평균화하여 순간유속이 가지는 변동성을 완화시킨다. 하지만 그 편의성에 비하여 추정에 의존해야 하는 부분이 상당부분 존재한다. 이찬주 등[18]에서는 기기의 특성상 수면 부근에서 ADCP가 수면아래 잠긴 깊이와 기기 바로 아래에서 발생하는 음파의 간섭을 차단하기 위해 설정하는 공백 깊이를 더한 만큼을 측정할 수 없으므로 추정해야 한다

고 하였다. 또한 Pierce et al.[21]에서는 GPS와 ADCP를 설치한 안정적인 배를 이용하여 넓은 지역에서 측정하는 방법을 소개한바 있고, Tokyay et al.[23]에서는 큰 소용돌이 상황에서 ADCP를 설치한 배를 이용한 에러요소에 대한 분석을 실시한바 있다. 위의 내용과 같이 그동안 수많은 연구가 수행되어 왔지만 가장 큰 관심사인 홍수기에 대한 유량의 측정은 안전사고 발생의 위험이 따르고 인력 및 시간, 금전적인 손실을 수반하며 정확성의 측면에서도 아쉬운 부분이 많이 존재하고 있다.

따라서 비교적 정확한 측정이 가능한 수위-유량관계곡선을 사용하여 유량을 생산하는 방법이 국내외에서 널리 사용되어 오고 있고, 매우 편리하게 하천의 유량을 생산할 수 있는 장점이 있다. 하지만 수위-유량관계곡선이 성립하기 위해서는 수위와 유량이 항상 1:1의 관계를 유지한다는 기본 가정을 전제로 두고 있다. 이와 같은 단일 수위-유량 관계는 실제 자연하천에서 거의 발생되지 않는 정상 분류에서만 가능하다. 실제 하천의 홍수와 같은 부정류 흐름에서는 홍수수문곡선의 상승부와 하강부의 기울기, 조도계수, 하상경사 등 흐름에 영향을 주는 수리학적 특성인자들에 의해 수위-유량 사이의 일대일 관계가 성립하지 않는다. 즉, 수위와 유량 사이만의 관계를 이용하기 때문에 해당 하천 지점의 지형이나, 조도, 경사 등 수리적인 특성을 반영하지 못하므로 오차의 가능성을 잠재고 있다. 이미 과거의 연구에서 수위-유량 관계 곡선이 고리형 특성을 나타내는 이유로 Cunge et al.[14]은 유량과 하상경사, 조도계수 등이라고 하였다. Leon et al.[19]은 아마존 유역의 Negro 강에서 공간적 고도계량 데이터를 기반으로 하는 Muskingum, Cunge(M.C) 모델을 사용하여 수위-유량관계를 분석하고 하천유량을 산정하는 방법을 제안하였다. Asgeir et al.[1]은 홍수가 빈번한 지점에 부정확한 수위-유량 산정에 대한 방안으로 최우도법(maximum likelihood method)을 기반으로 하는 방법을 이용하는 등 이러한 수위 유량 관계 곡선을 개선하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔으나 수위-유량 관계 곡선이 가지는 근본적인 문제를 해결하지는 못하였다.

따라서 확률론적 엔트로피 개념을 도입한 Chiu의 2차원 유속공식을 활용하여 유도한 평균유속공식을 제안하였다. 제안된 공식은 에너지경사, 동점성계수, 동수반경, 중력가속도 등 수리적인 특성인자를 잘 반영할 수 있다. 이미 앞선 추태호 등 [9]의 연구에서는 낙동강과 같이 유사한 풍부한 총적하천에서 측정데이터를 바탕으로 본 공식의 정확성을 검증한바 있고 추태호 등 [11]에서는 부동류 상황의 실험실 수로에서 측정된 데이터를 바탕으로 본 공식의 정확성을 검증한바 있다.

본 논문에서는 고리형(Loop)수위-유량 관계 특성을 보

이는 실험실 부정류 측정 데이터를 사용하여 본 공식의 적용성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 기본이론

Chiu의 2차원 유속분포 공식은 수로바닥에서부터 수 표면까지의 유속분포를 잘 표현해줄 수 있는 2차원 유속 공식이다. 확률통계에서 사용되는 엔트로피 최대화의 개념을 수리학적으로 응용한 것으로 자세한 유도과정은 Chiu([2-5])논문이나 추태호([6-8,10-12])의 논문에 잘 나타나 있다.

유속의 엔트로피 함수는 아래와 같이 쓸 수 있다. $f(u)$ 는 엔트로피의 최대화를 위한 제약조건을 두게 하는 유효한 정보는 다음 식(1)과 식(2)을 포함한다.

$$\int_0^{u_{\max}} f(u) du = 1 \quad (1)$$

$$\int_0^{u_{\max}} u f(u) du = \bar{u} \quad (2)$$

또한 Method of Lagrange를 식(1)과 식(2)의 제한요소에 적용시키는 것은 다음 식(3)과 같이 유도될 수 있다.

$$f(u) = e^{\lambda_1 - 1} e^{\lambda_2 u} = e^{a_1} e^{a_2 u} \quad (3)$$

$$0 \leq u \leq u_{\max}$$

Chiu의 유속분포식은 단면상의 동일한 유속을 가지는 점들을 연결하는 등유속선(isovel) ξ 와 η 로 구성되는 ξ - η 좌표계를 사용한다. 등유속으로 표현되는 단면상의 위치와 유속 사이에 1:1관계가 성립하며, 엔트로피 유속분포식은 등유속선 ξ 상에서 유속 u 에 관한 확률 누가함수를 이용하여 도출된다.

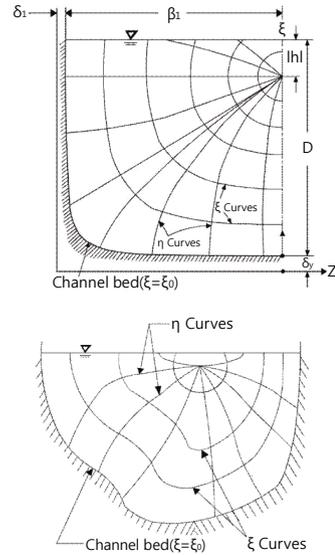
따라서 2차원 단면좌표계에서 특정 지점에 대한 유속은 다음 식(4)로 정의한다.

$$\int_0^u e^{a_1 + a_2 u} du = \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \quad (4)$$

식(3)을 식(1)에 대입하여 정리하여 $a_2 u_{\max}$ 를 M 으로 치환하면 식(5)와 같이 나온다.

여기서 M 은 유속분포를 나타내는 매개변수이다.

$$\frac{e^{a_1}}{a_2} = (e^M - 1) \quad (5)$$



[Fig. 1] $\xi - \eta$ Coordinates in open-channel sections (Chiu [4,5])

식(4)를 풀어서 식(5)를 이용하여 정리하면 바로 Chiu의 2차원 유속분포 공식인 식(6)을 얻는다.

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] \quad (6)$$

식 (3)을 식(2)에 대입하여 풀어내면 2차원 평균유속식인 식(7)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\bar{u}}{u_{\max}} = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \quad (7)$$

이 식을 간단하게 나타내면 식 (8)와 같다.

$$\bar{u} = \phi(M) u_{\max} \quad (8)$$

여기서, $\phi(M)$ 은 평형상태 $\phi(M)$ 이라고 부른다. Xia[24]의 논문에서는 최대유속과 평균유속이 선형관계를 나타낸다는 것을 Mississippi강의 측정 데이터를 활용하여 나타낸바 있다.

식(3)을 식(1),(2)에 대입하여 정리하면 식(9)을 얻을 수 있다.

$$U_{\max} e^{a_1} = \frac{M}{(e^M - 1)} \quad (9)$$

식(9)에 식(7)을 대입하여 정리하면 식(10)을 얻는다.

$$\begin{aligned} \overline{U}e^{a_1} &= \left[\frac{M}{e^M - 1} \right] \left[\frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \right] \\ &= (e^M - 1)^{-1} [Me^M(e^M - 1)^{-1} - 1] \end{aligned} \quad (10)$$

수로의 바닥전단응력은 식(11)로 나타내고 식(4)로부터 $\frac{du}{d\xi}$ 을 산정하여 정리하면 식 (12),(13)와 같이 정리된다.

$$\tau_0 = \mu \left[\frac{du}{dy} \right]_{y=y_0} = \mu \left[\frac{1}{h_\xi} \right] \left[\frac{du}{d\xi} \right]_{\xi=\xi_0} \quad (11)$$

여기서, τ_0 는 바닥전단응력, μ 는 유체의 점성계수, h_ξ 는 $d\xi$ 을 곱하여 길이단위인 dy 를 나타내는 단위환산 계수이다.

또한 평균전단응력은 식(12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{\tau_0} = \mu \left[\frac{1}{h_\xi} \right] \left[\frac{du}{d\xi} \right]_{\xi=\xi_0} = \rho g R I_f \quad (12)$$

여기서, $\overline{\tau_0}$ 는 바닥경계층의 평균전단응력, $\overline{h_\xi}$ 는 수로 경계층 따르는 h_ξ 의 평균값, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가 속도, R 는 동수반경, I_f 는 에너지경사이다.

식(12)에 있는 $\frac{du}{d\xi}$ 는 식(4)로부터 다음 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{du}{d\xi} = \left[\frac{1}{(\xi_{\max} - \xi_0) f(u)} \right] = \left[\frac{1}{(\xi_{\max} - \xi_0) e^{a_1 + a_2 u}} \right] \quad (13)$$

여기서 수로바닥경계층에서는 $u = 0$ 이므로 $\xi_0 = 0$, $\xi_{\max} = 1$ 되어 $\xi_{\max} - \xi_0$ 는 1이 된다. 따라서 식(13)는 식(14)와 같이 정리된다.

$$\left[\frac{du}{d\xi} \right]_{\xi=\xi_0} = \left[\frac{1}{e^{a_1}} \right] \quad (14)$$

식(14)를 식(11)에 대입정리하면 식(15)과 같이 된다.

$$e^{a_1} = \frac{\mu}{h_\xi \rho g R S_f} \quad (15)$$

식(15)을 식(10)식에 대입정리하면 식(16)과 같이 본 논문에서 제안하는 평균유속을 유도할 수 있다.

$$\overline{U} = \frac{\overline{h_\xi} g R S_f}{\nu F(M)} \quad (16)$$

여기서,

$$F(M) = (e^M - 1) [Me^M(e^M - 1)^{-1} - 1]^{-1} \quad (17)$$

3. 제안된 공식에 의한 유량산정 기법

확률론적 엔트로피 개념을 활용한 Chiu의 2차원 유속 공식을 바탕으로 수로경계에 직각으로 유체의 점성과 유속기울기의 합과 평균전단응력 식의 관계에서 유도된 평균유속공식이 식(17)이다. 이 식은 하천에서 쉽게 측정이 가능한 수리학적 특성인자들의 향으로 구성되어 있다. 실측한 평균유속, 하상경사, 동수반경, 동점성 계수 등의 실측값을 대입하여 식(18)로부터 $F(M)$ 값을 산정하고, 엔트로피 파라미터 M 을 계산한다. 계산된 M 의 값으로 각 측정지점의 특성을 반영하는 엔트로피 최대화의 개념에 따른 평형상태를 표현하는 식(8)으로부터 $\phi(M)$ 을 계산한다. 실측된 평균유속과 각 $\phi(M)$ 사이의 이론적 관계를 통해 개수로에서 정확한 측정이 어려운 최대유속 u_{\max} 를 계산할 수 있다. 여기서 계산된 지점별 최대유속 u_{\max} 와 실측된 평균유속을 식(8)에 대입하여 전체 하천의 평형상태를 나타내는 $\phi(M)$ 을 산정하였다. 이 과정을 통해 최대유속 U_{\max} 와 전체 평형상태 $\phi(M)$ 의 관계를 이용하여 최종평균유속을 산정하였다.

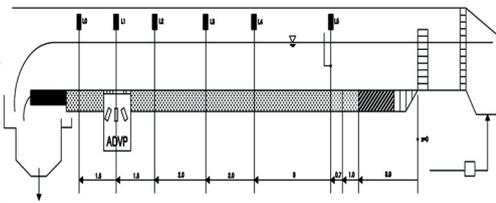
수위-유량 관계곡선은 평수기에 측정된 수위와 유량을 바탕으로 홍수기나 갈수기의 유량을 추정하며 본 논문에서 제안하는 방법도 같다. 특히 개수로에서 최대유속은 실측하기가 매우 어려운데 본 식을 이용하면 이론적으로 최대유속을 정확하게 산정할 수 있는 장점이 있다. 기존의 연구에서 대부분 평균유속을 측정하거나 계산하였고 상대적으로 최대유속이 가지는 중요성에 대하여 간과된 것은 사실이지만 최대유속은 최소유속은 0이므로 유속의 범위를 결정하는 중요한 통계적 변수가 될 수 있으며 단면의 형상 및 유속분포에 관계없이 어떠한 단면에서도 최대유속은 반드시 1개라는 점에 주목해야 한다. 즉 최대유속은 중요한 정보를 포함하고 있으며 평균유속을 구하는 것 보다 최대유속을 구하여 평균유속을 추정하는 것

이 더 합리적이고 손쉬운 방법이 될 수도 있다. Moramarco, T. et al.[20]의 논문에서는 Upper Tiver River basin에서 측정한 평균유속과 최대유속의 데이터를 이용하여 식 (7)을 이용하여 M값을 산정하였고 이 M을 이용하여 식(6)에 대입하여 유속분포를 산정하는 연구를 수행한 바 있다.

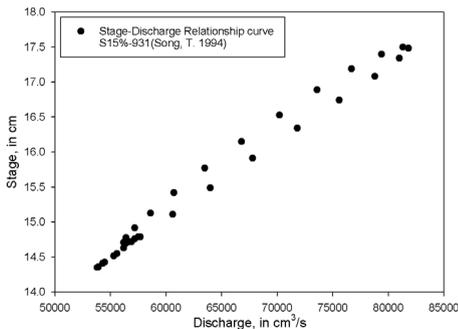
4. 부정류 측정 데이터

4.1 고리형 특성의 수위-유량곡선

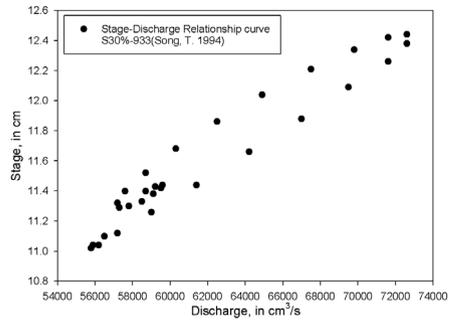
본 공식의 정확성을 검증하기 위해 스위스 로잔 공과 대학의 Song[22]의 박사논문에서 측정된 정류 데이터를 활용하여 검증하였다. 실험실 수로의 폭은 60cm이고 길이는 16.8m, 측벽은 유리, 바닥은 steel로 구성되어 있고 경사조절이 가능하나 본 논문에서는 0.0015와 0.0030의 경사에서 측정한 데이터들을 사용하였다. 유속의 측정은 바닥에 부착한 ADV를 이용하였고 유량을 다르게 흘러 보내어 L1지점에서 측정하였으며 유량 측정 장치의 형상은 아래의 Fig. 2와 같다. 또한 본 측정 자료는 부정류 상태에서 시간의 흐름에 따라 초 단위로 측정된 자료로써 루프형 수위-유량의 특성을 잘 나타내고 있으며 시간에 따른 수심 그래프는 각각의 경사에 대하여 Fig. 3과 4가 같이 나타낼 수 있다. 단위는 cm이다.



[Fig. 2] Experiment apparatus by Song



[Fig. 3] The stage-discharge curve presenting the loop form(S0.0015)

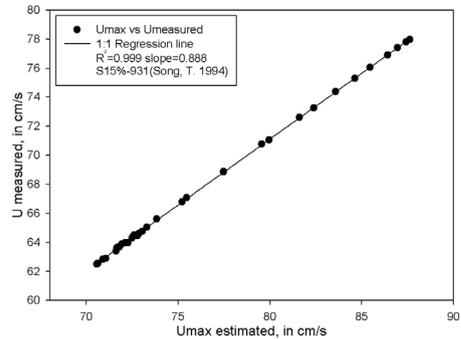


[Fig. 4] The stage-discharge curve presenting the loop form(S0.0030)

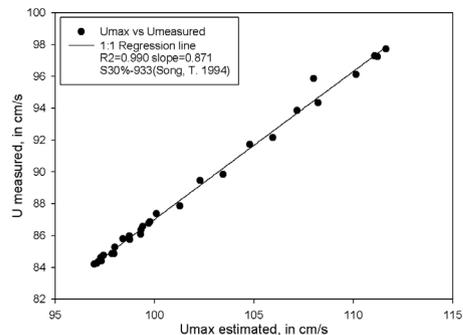
4.2 최대유속과 평균유속의 선형관계

[Table 1] The Results of coefficient of determination and $\phi(M)$

구분	결정계수	$\phi(M)$
S-0.0015	0.999	0.888
S-0.0030	0.990	0.871



[Fig. 5] The linear relationship between Maximum velocity and mean velocity(S-0.0015)

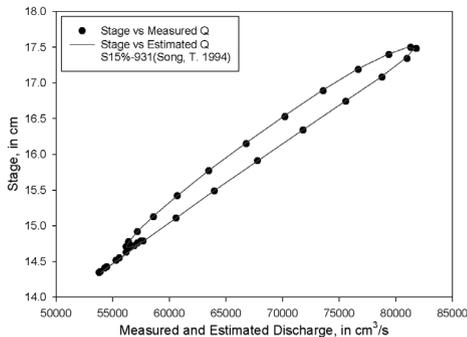


[Fig. 6] The linear relationship between Maximum velocity and mean velocity(S-0.0030)

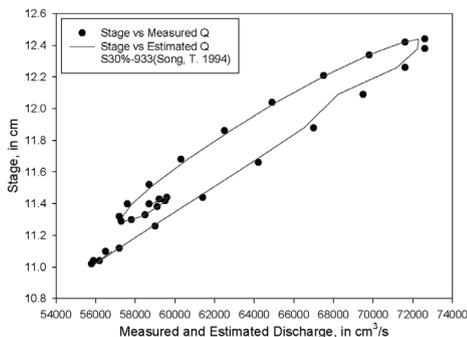
3절에서 기술한바와 같이 주어진 데이터를 사용하여 식(16)에 대입하여 계산된 최대유속과 실측된 유속과의 관계를 그래프로 나타내었고 결정계수 및 $\phi(M)$ 의 값은 아래의 표 1 및 Fig. 5, 6와 같다. 아래 결과에서 알 수 있듯이 부정류 상태에서도 최대유속과 평균유속사이의 선형관계를 확인할 수 있었다.

5. 결과분석

4.2절에서 계산되어 나온 평형상태의 $\phi(M)$ 의 값을 사용하여 유량을 산정하였고, 그 자세한 과정은 3절에서 기술한 바와 같다. 결과는 아래의 Fig. 7과 8과 같이 실측된 유량과 계산된 유량을 비교하여 나타내었고 점은 실측된 유량을 의미하고 선은 계산된 유량을 의미한다. 두 그래프에서 볼 수 있듯이 실측된 점에 아주 근접하게 산정된 유량이 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 부정류 상황에서 특히, 고리형 수위-유량 관계가 나타나는 상황에서도 본 공식을 통한 유량 산정이 비교적 정확하다는 결과를 보여주었다.

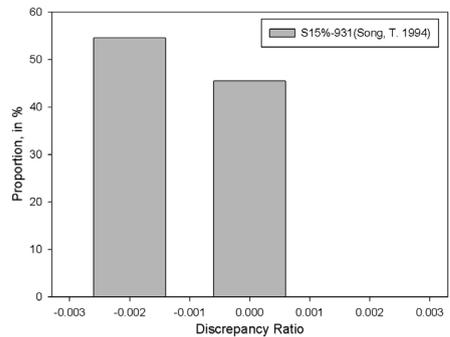


[Fig. 7] The comparison between measured and estimated discharge(S-0.0015)

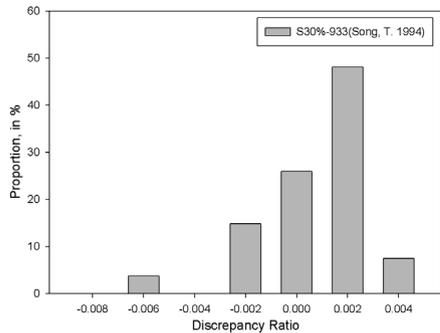


[Fig. 8] The comparison between measured and estimated discharge(S-0.0030)

Fig. 7과 8의 결과를 바 그래프로 쉽게 그 정확성을 나타내기 위해 실측된 유량과 계산된 유량 사이의 차이 정도는 Discrepancy Ratio를 사용하였다. 본 방법은 실측된 유량과 계산된 유량의 비에 상용로그를 취한 다음 그 값을 오름차순으로 정리하여 구간별 백분율을 주어 나타낼 수 있다. 그래프가 0에 많이 분포하면 값이 일치한다는 것을 뜻하고 양의 값은 과대산정, 음의 값은 과소산정을 뜻한다. 그 결과는 아래의 Fig. 9와 10와 같으며 그래프에서 나타나듯이 전체적으로 오차의 범위가 작으며 -0.006에서 0.004 사이의 범위를 보이고 있으며 0에 근접한 값이 많이 분포되어 있음을 알 수 있었다. 이 결과는 고리형 특성이 나타나는 부정류상황임을 감안해보면 상당한 성과라고 생각되어 진다.



[Fig. 9] The discrepancy ratio analysis between Measured and estimated discharge(S-0015)



[Fig. 10] The discrepancy ratio analysis between Measured and estimated discharge(S-0030)

6. 결론

본 연구에서는 고리형 수위유량 관계의 특성이 나타나는 부정류 상황에 대한 유량산정 방법에 대하여 제안하였다. 엔트로피 개념을 사용하여 유도된 평균유속공식을

사용하여 유량을 재산정 하였다. 본 공식은 Chiu의 2차원 유속공식에서 유도된 공식으로 Choo [7]의 석사논문에서 처음으로 유도된 공식이다. 실측된 유량과 계산된 유량 사이의 정확성에 대한 비교 결과는 Fig. 9와 10에 나타난 바와 같이 Discrepancy Ratio가 0 주변에 많이 분포되어 있으며 그 크기의 정도를 보면 0.00x대로 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 이 결과에서 나타나듯이 본 공식은 동수경사, 중력가속도, 동점성계수, 에너지경사, 수심 등 하천의 수리적 특성을 잘 반영할 수 있어 기존에 사용되어 오던 수위-유량관계곡선 보다 더 이론적으로 신뢰성을 가지는 것을 알 수 있다.

하지만 본 공식이 실제 하천에 적용하기 위해서는 엔트로피 파라미터 M의 값에 대한 산정이 이루어져야 함은 추후연구에서 계속 진행되어야 할 것으로 판단된다. 본 공식이 지속적으로 검증되고 연구되어 진다면 추후 하천유량을 산정하기 위한 좋은 방안이 될 것으로 사료된다.

References

- [1] Asgeir, P.Ø., Trond, R., "Accounting for rating curve imprecision in flood frequency analysis using likelihood-based method", Journal of Hydrology, Vol. 366, No. 1-4, pp. 89-100, 2009, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [2] Chiu, C-L "Three-dimensional open channel flow", Journal of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 104, No. 8, pp. 1119-1136. 1978.
- [3] Chiu, C-L. "Entropy and probability concepts in Hydraulics", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 5, pp. 583-599. 1987, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [4] Chiu, C-L. "Entropy and 2-D velocity distribution in open channels", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 10, pp. 738-756. 1988, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [5] Chiu C.L., "Velocity distribution in oprn channel flow", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 115, No. 5. pp. 576-594, 1989, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [6] Choo, T. H., "A Method of Discharge Measurement using the Entropy Concept (I)-Based on the Maximum Velocity", Journal of The Korean Society of Civil Engineers, Vol. 22, No. 4B, pp.495-505, 2002.
- [7] Choo, T. H., "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, 1990.
- [8] Choo, T. H., "Velocity measuring method using the concept of entropy (II) - focusing on maximum velocity", Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 22, No. 4B, pp. 495-515, 2002.
- [9] Choo, T. H., Kim, C. M., Ha, G. B., Yoon, H. C., "Estimation of discharge adapting changes of river environment", Korean society of hazard mitigation, Vol. 11, No. 5, pp. 241-246, 2011.
- [10] Choo, T. H., Lee, S. J., Park. S. W., Oh, R., S., "Estimation of River Discharge by probabilistic Velocity Function Considering Hydraulic Characteristics", Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 29, No. 6B, pp. 537-542, 2009.
- [11] Choo, T. H., Maeng, S. J., Yoon, H. C., Kim, D. M. and Kim, S. C., "A study on the derivation of a mean velocity formula from Chiu's velocity formula and bottom Shear stress, International Journal of Environmental Research, Vol. 6, No. 2, pp. 537-546, 2012, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [12] Choo, T. H., Ok, C. Y., Kim, J. W., Maeng, S.J., "A study on the velocity distribution in closed conduit by using the entropy concept", Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 29, No. 4B, pp. 357-363, 2009.
- [13] Coz, J. L., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G., Camenen, B., "Performance of image-based velocimetry(LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers", Journal of hydrology, 394, pp. 42-52, 2010, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [14] Cunge, J.A., Holly, F.M., Jr., and Verwey A., "Practical aspects of computational river hydraulics", Pitman, Boston, Mass, 1980.
- [15] Hauet, A., Creutin, J.-D., Belleudy, P., "Sensitivity study of large-scale particle image velocimetry measurement of river discharge using numerical simulation", Journal of Hydrology, Vol. 349, pp178-190, 2008, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [16] Hwang, S. H., Kim, C. Y., Jung, S. W., Kim, W., "Improvement to the methods of discharge computation from float measurements", Proceedings of the Korea Water Resources association Conference 2006, pp. 852-857, 2006.
- [17] Kim, C. Y., Kim, W., Kim, D. G., Lee, C. J., "Development of Electronic Float", Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference 2007, pp. 508-512, 2007.
- [18] Lee, C. J., Kim, W., Kim, C. Y., Kim, D. G., "Velocity and discharge measurement using ADCP",

- Journal of Korea water resources association, Vol. 38, No. 10, pp. 811-824, 2005.
- [19] Leon, J. G., Calmant, S., Seyler, F., Bonnet, M-P., Cauhopé, M., Frappart, F., Filizola, N., Fraizy, P. "Rating curves and estimation of average water depth at the upper Negro River based on satellite altimeter data and modeled discharges", Journal of Hydrology, Vol. 328, No. 3-4, pp. 481-496, 2006, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [20] Moramarco, T., Saltalippi, C., and Singh, V. P., "Estimation of mean velocity in natural channel based on Chiu's velocity distribution equation", Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 42-50, 2004, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [21] Pierce, S. D., Barth, J. A., Smith, R. L., "Improving acoustic doppler current profiler accuracy with wide-area differential GPS and adaptive smoothing of ship velocity", Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 16, pp.591-596, 1999, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [22] Song, T., "Velocity and turbulence distribution in non-uniform and unsteady open-channel flow", Ph. D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Federal Institute of Technology Lausanne, EPFL, 1994, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [23] Tokyay, T., Constantinescu, G., Castro, A. G., "Investigation of two elemental error sources in Boat-Mounted acoustic doppler current profiler measurements by large eddy simulations", ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 135, No. 11, pp. 875-887, 2009, [Article\(CrossRefLink\)](#)
- [24] Xia, R., "Relation between mean and maximum velocities in a natural river", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 123, no. 8, pp. 720 - 723, 1997, [Article\(CrossRefLink\)](#)

추 태 호(Tai Ho Choo)

[정회원]



- 1990년 12월 : Pittsburgh 대학교 일반대학원 토목공학과 (수리학 석사)
- 1998년 12월 : Pittsburgh 대학교 일반대학원 환경토목공학과 (환경수리학 박사)
- 1984년 2월 ~ 2002년 9월 : K-Water 연구원 책임연구원 등
- 2002년 9월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학부 교수

<관심분야>
수리수문, 하천, 댐

채 수 권(Soo Kwon Chae)

[정회원]



- 1986년 2월 : 인하대학교 일반대학원 토목공학과 (환경공학석사)
- 1995년 2월 : 인하대학교 일반대학원 토목공학과 (환경공학박사)
- 1981년 1월 ~ 1984년 2월 : 대우건설
- 1990년 3월 ~ 현재 : 을지대학교 보건환경안전학과 교수

<관심분야>
상하수도, 하천생태