

평균유속공식을 이용한 부정류 하천유량 산정

추태호¹, 채수권^{2*}, 윤현철¹, 윤관선¹

¹부산대학교 사회환경시스템공학부, ²을지대학교 보건환경안전학과

The estimation of river discharge by using the mean velocity equation in a unsteady condition

Tai Ho Choo¹, Soo Kwon Chae^{2*}, Hyeon Cheol Yoon¹ and Gwan Seon Yun¹

¹Dept. of Environmental and civil Engineering, Pusan National University

²Dept. of Environmental Health and Safety, Eulji University

요 약 본 평균유량은 하천의 임의 한 단면에 흐르는 물의 양을 평균적으로 나타내는 지표로서 하천유역의 물 순환 구조 파악, 하천시설의 설치, 각종 수공구조물 설계, 친수 공간 이용 및 관리 등을 목적으로 매우 중요하다. 기본적으로 평수기에 측정된 유량 및 수위자료를 바탕으로 수위-유량 관계곡선을 만들어 필요한 유량을 생산하고 있다. 이 방법은 등류상태에서는 잘 일치하나 홍수기 부정류 상태에서는 그 한계성을 보이고 있다. 따라서, 본 논문에서는 Chiu의 2차원 유속공식으로부터 유도된 새로운 평균유속 공식을 사용 하여 루프형 특성을 보이는 부정류 상황에서의 평균유속 산정을 하였다. RMSE 및 플라그래프 분석 결과 제안된 공식은 기존의 공식들과 비교하여 약 19배 정도의 정확성을 나타내었다.

Abstract As the average indicator for amount of water flowing in any cross section of a river, the mean discharge has been reported to be a very important factor for examining water circle constructions in a river basin, the design and construction of a hydraulic structure, and water front area use and management. The stage-discharge curve based on discharge and stage data measured in a normal season were basically derived. Using this derivation, the necessary discharge data was obtained. The values produced in this manner corresponded to the measured data in a uniform flow state well, but showed limited accuracy in a flood season (unsteady flow). In the present paper, the mean velocity in unsteady flow conditions, which exhibited loop form properties, was estimated using the new mean velocity formula derived from Chiu's 2-D velocity. The results of RMSE and Polar graph analyses showed that the proposed equation exhibited approximately nineteen times the accuracy compared to the Manning and Chezy equations.

Key Words : Manning and Chezy equations, Mean velocity equation, Rating curve, River discharge, Unsteady flow

1. 서론

평균유량은 하천의 임의 한 단면에 흐르는 물의 양을 평균적으로 나타내는 지표로서 하천유역의 물 순환구조 파악, 하천시설의 설치, 각종 수공구조물 설계, 친수 공간 이용 및 관리 등을 목적으로 매우 중요하다. 특히 기후변화로 인한 가뭄이나 집중호우에 따른 홍수 예측, 실시간

물 관리, 수자원 계획 등에 이용하기 위해서는 보다 정확한 산정 혹은 측정이 요구된다. 하지만 실제 하천을 흘러가는 유량을 정확하게 측정하거나 예측하는 것은 매우 어려운 문제로 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있다. 현재 하천의 수위는 매시간 혹은 분 간격으로 측정이 이루어지고 있으나 유량은 기술적, 경제적, 인력적 이유 등 여러 가지 원인에 의해 간헐적으로 측정되고 있다. 홍수기

*Corresponding Author : Soo Kwon Chae(Eulji Univ.)

Tel: +82-31-740-7146 email: cskwen@eulji.ac.kr

Received October 28, 2013

Revised November 25, 2013

Accepted December 5, 2013

에는 봉부자, 전자파 표면 유속계, LSPIV 등의 방법을 사용하고 평수기에는 ADCP를 주로 사용하고 있다. 이러한 직접적인 관측의 경우 특히 홍수기에는 하천유량 측정 시 위험이 따르고 있으며 정확성의 문제 또한 존재하고 있다. 따라서 현재 평수기에 간헐적으로 측정된 유량자료와 수위 자료를 활용하여 수위-유량 관계곡선을 만들어 필요한 유량자료를 생산하여 사용하고 있다. 이는 평수기에 측정된 데이터를 바탕으로 홍수기 혹은 갈수기의 유량을 회귀 추정하는 방법으로 편리하고 간편하게 사용할 수 있는 장점을 가진다. 수위-유량관계 곡선은 수위와 유량의 자료를 바탕으로 회귀 추정에 의해 간단하고 편리하게 하천의 유량을 생산할 수 있으므로 많은 수문 관측소에서 사용하고 있는 방법이다. 하지만 하천의 수위와 유량만을 반영하므로 지형이나 하천의 경사, 동수경사 등 수리학적 인자들을 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다. 또한 수위와 유량의 관계가 1:1로 대응하지 않는 배수영향 구간 혹은 감조하천에서는 정상적인 유량자료의 생산에 한계를 가지고 있다. 또한 홍수기에는 급격한 수위변화 때문에 고리형 수위-유량 관계가 발생하므로 유량의 추정에 어려움이 따른다. 자세한 내용은 다음 2절에서 다루기로 한다. 이와 같이 다양한 관측방법 및 수위-유량 관계 곡선을 사용하여 유량의 생산은 가능하지만 그 과정이나 노력, 시간이 소비되고 부정확성 등 아쉬운 부분이 존재한다. 따라서 평균유속을 정확하게 산정할 수 있는 공식 개발의 중요성은 항상 인식되어 왔다. 실제로 개수로의 수리현상을 해석할 때 평균유속공식을 사용하는 것은 매우 실용적이고 편리하다. 다양한 공식들이 그동안 많이 소개되어 왔으나 실용적으로 널리 알려진 공식들로는 Chezy[1]와 Manning 공식[9] 같은 평균유속 공식 등이 있다. 과거 많은 연구자들이 평균유속을 산정하는 공식의 중요성을 인식하고 있고 연구가 이루어져 왔으나 널리 알려진 Chezy와 Manning 공식이 개발된 이후로는 일반적으로 통용되고 널리 사용되고 있는 공식은 없는 실정이다. Chezy와 Manning식은 대표적인 등류공식으로 등류 및 부등류 상황에서는 높은 정확성을 보이고 있으나 우리가 관심을 가지고 있는 부정류 유량산정에 그대로 적용시키기에는 무리가 있다. 평균 유속공식을 활용한 유량산정은 편리하고 유용함에도 불구하고 각 공식이 가지고 있는 한계로 인해 수위-유량 관계곡선에 의존해 왔다. 따라서 하천의 수리학적 특성을 잘 반영할 수 있는 보다 정확한 평균유속 공식의 개발은 하천의 효율적 관리를 위해 필수적이다. 앞선 Choo et al. [8] 에서 Chiu의 확률론적 엔트로피 공식에서 바닥 전단응력으로부터 유도된 F(M)공식을 사용하여 Chezy와 Manning식과의 비교를 통해 정확성을 분석한 적 있다. 따라서 후속

연구로서 본 논문에서는 고리형 수위-유량관계 특성을 보이는 부정류 상황에서의 데이터 측정 자료를 바탕으로 기 유도된 확률적 평균유속 공식을 사용하여 기존의 공식들과의 정확성을 비교하였다.

2. 부정류 환경 수위-유량곡선의 한계

Manning과 Chezy식은 기본적으로 등류공식임에도 불구하고 일반하천에 적용되어 왔다. 하지만 자연하천은 일반적으로 등류상태가 아니다. 흐름의 일차원 흐름의 지배방정식인 St. Venant 방정식은 식 (1)와 같이 나타낼 수 있다.

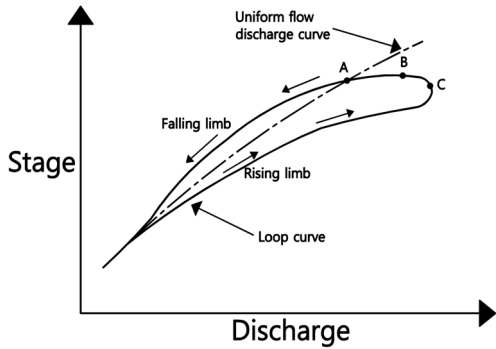
$$Q = CA \sqrt{R \left(S_o - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \right)} \quad (1)$$

하상의 경사가 일정하다고 가정 하였을 때, 부정류 흐름에서는 식 (1)과 같이 두 개의 가속도항과 하나의 압력항이 존재한다. 여기서 흐름이 정상류가 되면 가속도 항과 압력항은 사라지고 식(1)은 식(2)과 같게 된다.

$$Q = CA \sqrt{RS_o} \quad (2)$$

즉, 식 (2)은 개수로에서 널리 사용되어온 Chezy식과 같은 꼴로 되는데 이는 정상류 상태에서는 공식이 수위만의 함수로 성립함을 잘 보여주므로 정상류 상태에서는 이론적으로 만족함을 알 수 있다. 또한 수위-유량 관계곡선은 수위와 유량의 1:1대응관계를 기본가정으로 전제하고 사용한다. 즉, 수위가 상승하면 유량이 상승한다는 것이다. 하지만 식(1)과 같이 부정류 흐름에서는 수위만의 함수가 아니므로 이론적으로 오차를 내포할 수밖에 없음을 잘 보여준다. 특히 실제하천에서 정상류 상태는 매우 드물게 나타나며 관심을 가지는 홍수기는 부정류 상태이다.

홍수의 수위 상승 시와 하강 시의 수위-유량 관계는 단일 관계가 되지 않고 Fig 1과 같은 루프 형이 된다. 즉, 같은 수위에서 상승시가 하강시보다 유량이 커진다. 따라서 동일한 수위에서 유량의 값의 차이가 발생하게 된다. 위의 내용과 같이 홍수기에는 Chezy식 및 Manning식, 그리고 수위-유량 관계곡선의 사용에는 세심한 주의가 요구되고 있다.



[Fig. 1] Loop form stage-discharge curve

3. 평균유속공식의 유도

Chiu의 2차원 유속공식을 정의하기 위한 엔트로피 최대화를 위한 제한요소는 다음의 식 (2), (3), (4)와 같다.

$$\int_0^{u_{max}} f(u)du = 1 \tag{2}$$

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

$$f(u) = \exp(\lambda_1 - 1 + \lambda_2 u) = \exp(a_1 + a_2 u) \tag{4}$$

여기서, 확률론적 개념으로서 접근하며 u 는 점 유속을 의미하며 \bar{u} 는 개수로의 평균유속을 의미한다. 식(4)를 식 (2)와 (3)에 각각 대입하여 정리하면 평균유속 \bar{u} 와 최대유속 u_{max} , 엔트로피 파라미터 M 의 관계를 나타내는 아래의 식 (5)가 유도된다.

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

식 (5)는 Chiu의 평균유속공식이다. 여기서 M 은 엔트로피 파라미터이고 $\phi(M)$ 은 평균유속과 최대유속 선형 관계를 나타내는 평형상태를 대표하는 계수이다. 앞선 Xia[10]의 논문에서는 최대유속과 평균유속이 선형관계를 나타낸다는 것을 미시시퍼강의 측정 데이터를 활용하여 나타낼 수 있다.

자세한 유도과정은 Chiu 및 Choo의 이전논문에서 찾

을 수 있다. Chiu([2],[3],[4]), Chiu and Chen[5], Chiu and Tung [6], Choo [7].

한편, 평균바닥전단응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\tau}_0 = \mu \left[\frac{1}{h_\xi} \right] \left[\frac{du}{d\xi} \right]_{\xi = \xi_0} = \rho g R I_f \tag{6}$$

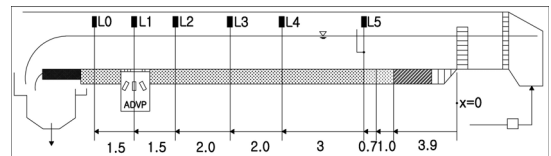
여기서, $\bar{\tau}_0$ 는 바닥경계층의 평균전단응력, \bar{h}_ξ 는 수로경계층 따르는 h_ξ 의 평균값, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, R 는 동수반경, I_f 는 에너지경사이다.

식(5)와 (6)으로 부터 부정류에서 사용가능한 평균유속 공식인 식 (7)을 유도 할 수 있다.

$$\bar{u} = \frac{\bar{h}_\xi u_*^2 [Me^M (e^M - 1)^{-1} - 1]}{\nu (e^M - 1)} \tag{7}$$

자세한 유도과정은 Choo[8]에서 찾을 수 있다.

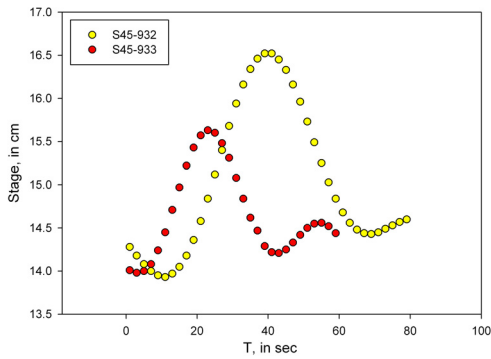
4. 실험실 데이터



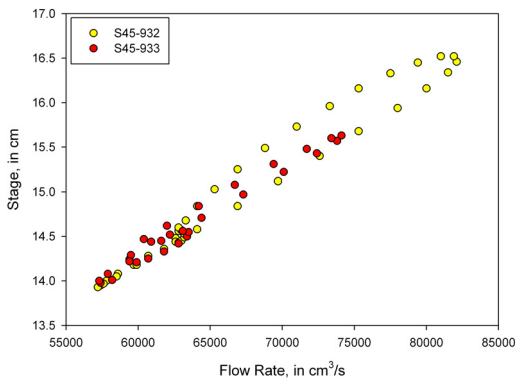
[Fig. 2] Experiment apparatus by Song

Song[11]의 박사논문에서 측정된 정류 데이터를 활용하여 본 공식의 정확성을 검증하였다. 실험실 수로의 폭은 60cm이고 길이는 16.8m, 측벽은 유리, 바닥은 steel로 구성되어 있다. 본 논문에서는 경사 0.0030에서 측정된 실험세트 931과 932를 사용하였다.

유속의 측정은 바닥에 부착한 ADV(Acoustic Doppler Velocity Profiler)를 사용하며 L1지점에서 측정하며 실험실 수로의 제원은 위의 Fig. 2와 같다. 또한 본 측정 자료는 부정류 측정 자료로써 루프형 수위-유량의 특성을 잘 나타내고 있으며 시간에 따른 수심 그래프 및 수위-유량 관계곡선은 Fig. 3와 4과 같이 나타낼 수 있다.



[Fig. 3] Time-depth graph by the measured data



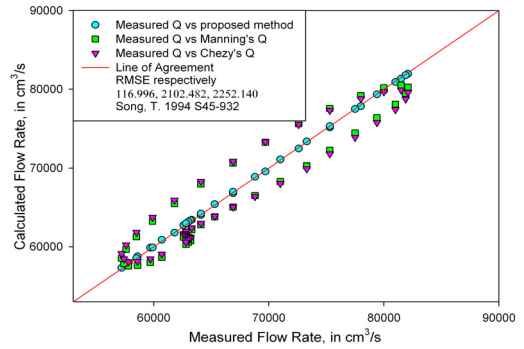
[Fig. 4] Stage-discharge relationship curve by the measured data

위의 Fig. 3은 시간에 따른 수위의 변화양상으로 부정류의 특성을 잘 보여주고 있고, Fig. 4에서는 측정된 데이터를 수위-유량곡선으로 그린 그림으로 고리형 형상을 나타내고 있다.

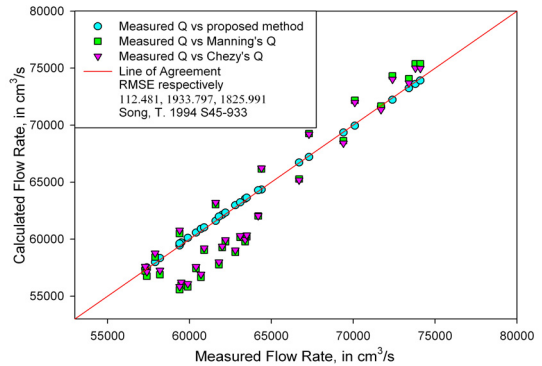
5. 결과분석

Song 박사의 실측 데이터를 이용하여 2절에서 제안된 식 (7)을 사용하여 산정된 유량 값과 Manning 및 Chezy 공식을 이용하여 산정된 값을 각각 실측값과 비교하여 Fig. 5 및 6과 같이 나타내었다. 1:1 선에 일치할수록 실측값에 잘 맞는 것을 알 수 있는데 Fig. 5와 6에서 알 수 있듯이 Manning 식과 Chezy식은 실측값과 비교하여 과소 혹은 과대 산정이 일어나고 있으나 제안된 공식에 의해 산정된 값은 실측값에 매우 일치하고 있음을 보이고 있다. 또한 Fig. 7과 8에서는 실측된 자료를 수위-유량 곡선으로 검은색 점으로 나타내고 각 공식에 의해 계산된 값은 선형으로 값의 일치여부를 나타내고 있다. Fig. 7과 8에서 나타나는 바와 같이 제안된 공식에 의해 산정된 값

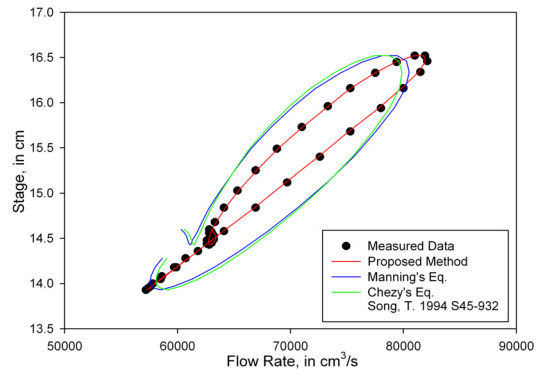
은 실측 값의 고리형을 유사하게 따라가는 반면 Manning 식과 Chezy식에 의해 산정된 값은 실측값과 비교하여 많이 분산되고 있다. 이러한 결과는 Manning식과 Chezy식이 기본적으로 등류공식이기 때문에 오는 한계점으로 볼 수 있다.



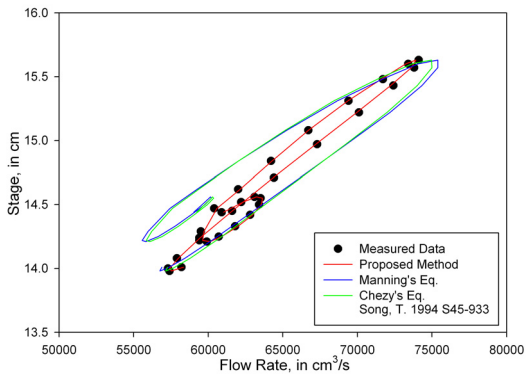
[Fig. 5] 1:1 comparative analysis of relationship between the measured and the estimated discharge by each equation (S45-932)



[Fig. 6] 1:1 comparative analysis of relationship between the measured and the estimated discharge by each equation (S45-933)



[Fig. 7] The rating curve comparisons between measured and estimated discharge (S45-932)



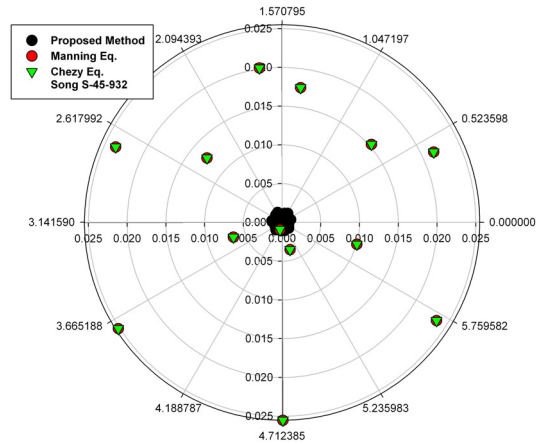
[Fig. 8] The rating curve comparisons between measured and estimated discharge (S45-933)

위의 결과를 요약하면 아래의 Table 1 과 같다. 각 공식을 통해 산정된 값과 실측된 값의 정확성을 간단하면서도 그 차이를 잘 알 수 있는 RMSE로 나타낸 것으로 RMSE(Root Mean Square Error)로 값이 작으면 작을수록 실측값에 근접한다는 것을 뜻한다. 표에 알 수 있듯이 제안된 공식을 통해 산정된 값이 Manning식과 Chezy공식과 비교하여 실측값에 일치한다는 것을 알 수 있다.

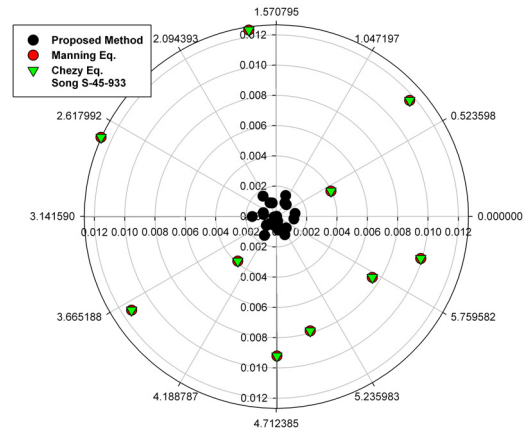
[Table 1] The Results of RMSE analysis

data set	proposed method	Manning	Chezy
S45-933	116.996	2102.482	2252.140
S45-933	112.481	1933.797	1825.991

상기의 결과를 Polar 그래프를 이용하여 Fig. 9과 10과 같이 나타내었다. 폴라의 중심에 가까우면 가까울수록 값이 정확함을 뜻하고 멀어지면 멀어질수록 정확성이 낮아짐을 뜻한다. 그래프에서 검은색 점은 제안된 방법을 뜻하는 것으로 두 그래프에서 Manning식과 Chezy식에 의해 산정된 값보다 실측값에 더 근접하고 있음을 잘 보여준다.



[Fig. 9] Polar graph analysis(S45-932)



[Fig. 10] Polar graph analysis(S45-933)

6. 결론

기후변화로 인해 변화하는 수문환경 속에서 정확한 하천 유량의 산정은 해결해야 하는 과제이다. 그리고 수자원 시설물의 관리 및 운영, 설계를 위해서 유량은 그 무엇보다도 중요한 인자이다. 현재 다양한 방법에 의해 유량이 생산되고 있으나 특히 관심을 가지고 있는 홍수기에는 정확한 유량을 산정하는 방법은 여전히 많은 연구가 이루어지고 있는 상황이다. 국내외적으로 가장 널리 사용되는 방법은 수위-유량관계곡선을 사용하는 방법으로 비교적 정확한 평수기에 측정된 자료를 바탕으로 홍수기 및 가뭄 때 예측하여 사용하고 있다. 하지만 수위-유량 관계곡선은 수위와 유량만의 관계를 이용하므로 정

확성에 문제가 있고 이는 등류상태에서만 이론적으로 성립함을 앞서 보인바 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 부정류 유량 산정을 위해 개발된 공식을 대표적인 개수로 공식인 Manning식과 Chezy식과의 비교를 통하여 본 공식의 우수성을 증명하였다. 사용된 데이터는 완벽한 고리형 특성을 보이는 부정류 측정 자료를 사용하였다. 본 공식을 통해 산정된 결과는 등류공식인 Manning과 Chezy식과 비교하여 실측값에 매우 근접함을 증명하였다. 다만 본 논문에서는 실험실 수로의 측정자료만을 다루고 있으므로 추후 실제 하천에서 검증작업이 후속연구로서 진행되어야 한다.

본 공식의 개발이 지속적으로 이루어지고 정확성이 검증된다면, 향후 국내 하천 유량 관리에 많은 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

Reference

- [1] Chezy, A. "Developed and verified by experiments made on earthen channel", the Courpalet Canal, and on the Seine river, 1769.
- [2] Chiu, C.-L., "Three-dimensional open channel flow", J Hydra Divi ASCE, Vol. 104, No. 8, pp. 1119-1136, 1978.
- [3] Chiu, C.-L., "Entropy and probability concepts in Hydraulics", J Hydra Engine ASCE, Vol. 113, No. 5, pp. 583-599, 1987.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1987\)113:5\(583\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1987)113:5(583))
- [4] Chiu, C.-L., "Entropy and 2-D velocity distribution in open channels", J Hydra Engine ASCE, Vol. 114, No. 10, pp. 738-756, 1988.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:7\(738\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:7(738))
- [5] Chiu, C.-L., Chen, Y.-C., "An efficient method of discharge measurement in tidal streams", J Hydro Vol. 265, pp. 212-224, 2002.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00100-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00100-2)
- [6] Chiu, C.-L., Tung, N. C., "Maximum and regularities in open-channel flow", J Hydra Engine ASCE, Vol. 128, No. 4, pp. 390-398, 2002.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:4\(390\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:4(390))
- [7] Choo, T. H., "Velocity measuring method using the concept of entropy (II) - focusing on maximum velocity", J Korean Society of Civil Engineers, Vol. 22, No. 4B pp. 495-515, 2002.

- [8] Choo, T. H., Yoon, H. C., Lee, S. J., "An estimation of discharge using mean velocity derived through Chiu's velocity equation", Environmental Earth Science, Vol. 69, pp. 247-256, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-012-1952-0>
- [9] Manning, R., "On the flow of water in open channels and pipes", Transactions, Institution of Civil Engineers of Ireland Vol. 24, pp. 179-207, 1895.
- [10] Xia, R., "Relation between mean and maximum velocities in a natural river." J. Hydraul. Eng., Vol. 123, No. 8, pp. 720 - 723, 1997.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1997\)123:8\(720\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:8(720))
- [11] Song, T., "Velocity and turbumence distribution in non-uniform and unsteady open-channel flow", Ph. D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Federal Institute of Technology Lausanne, EPFL, 1994.

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

윤 현 철(Hyeon Cheol Yoon)

[정회원]



- 2010년 2월 : 동아대학교 토목공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 (공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사수료

<관심분야>

하천, 댐, 수리수문

윤 관 선(Gwan Seon Yun)

[정회원]



- 2011년 2월 : 순천대학교 토목공학과 (공학사)
- 2013년 2월 : 순천대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

<관심분야>

하천, 댐, 수리수문