

엔트로피 개념을 활용한 개수로 마찰속도 산정

추태호¹, 손희삼¹, 윤관선¹, 노현석¹, 고현수^{1*}
¹부산대학교 사회환경시스템공학부

The Estimation of Friction Velocity in an Open Channel by the Entropy Concept

Tai Ho Choo¹, Hee Sam Son¹, Gwan Seon Yun¹, Hyun Seok Noh¹, Hyun Soo Ko^{1*}

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

요 약 수공구조물 설계 또는 하상의 유동 특성을 나타내기 위해선 마찰속도 산정이 필수적이다. 하지만 기존의 개수로 내의 마찰속도 공식인 Log 방법이나 Power방법은 벽면 근처에서 경계층 조건 혹은 다양한 수리적 특성이 지속적으로 변화하기 때문에 마찰속도의 산정에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 매개변수를 최소화하고 오차를 줄일 수 있는 새로운 마찰속도 공식을 제안하였다. 제안한 공식에 대한 신뢰성과 정확성을 검증하기 위하여 엔트로피매개변수M을 각각의 수로마다 산정을 하여 Dr.Song이 산정한 3가지 방법(Clauser 방법, \sqrt{gRI} 방법, 레이놀즈 응력법)으로 산정한 마찰속도와 비교하였다. 그 결과 가속부등류 조건의 경우 $R^2=0.9621$ 감속부등류 조건의 경우 $R^2=0.9274$ 등류흐름 조건의 경우 $R^2=0.8865$ 로 매우 높은 정확성으로 등류조건뿐만 아니라 부등류 조건에서도 거의 일치하였다.

Abstract In order to demonstrate the flow properties of the river bed and the design of hydraulic structures, the estimation of friction velocity is essentially required. However, existing friction velocity equations such as Log method and Power law have trouble to estimate the friction velocity because a boundary condition and various hydraulic properties are changed constantly in near the wall. In the present study, therefore, a new friction velocity equation that can minimize the parameters and reduce an error was suggested. To verify accuracy and reliability for the proposed equation, Clauser method, \sqrt{gRI} method, reynolds stress method by Dr. Song were compared with the proposed method by estimated entropy parameter M for each channel. Consequently, the results show that uniform flow condition as well as non-uniform flow condition with highly accuracy nearly matched in case of accelerating non-uniform condition of $R^2=0.9621$, Decelerating Non Uniform condition of $R^2=0.9274$, Uniform condition of $R^2=0.8865$

Key Words : entropy, friction velocity, non-uniform flow, open channel, uniform flow

1. 서론

마찰속도는 바닥경계에서의 전단력의 특성화, 주 흐름 방향의 혼합계수의 결정 그리고 하상입자의 유수 부상 여부 판단을 결정하는 중요한 매개변수이다. 또한 벽 근처에서 개수로 난류구조를 나타내는데 사용되며, 하천 및 해안의 확산된 오염물질의 비율을 예측하는데 사용되

는 등 개수로 설계에 있어 매우 중요하다.

일반적으로 마찰속도를 산정하기 위한 여러 방법 중 가장 간단한 방법은 하상경사를 이용하는 방법이다. 이 방법은 현장에서 많이 쓰일 수 있는 방법이지만, 등류조건이 확보되어야 합리적인 값을 얻을 수 있다는 단점이 있다. 또한 표면마찰계수와 Clauser 등[1]의 방법은 다양한 흐름변수 계산에 사용되고 있는 직접적 혹은 간접적

*Corresponding Author : Hyun Soo Ko(Pusan National Univ.)

Tel: +82-51-510-7654 email: phoo99@naver.com

Received September 26, 2014 Revised December 23, 2014 Accepted February 12, 2014

인 방법에서 마찰속도 사용을 일반적으로 정규화하고 있는 문제점이 있다. 경계층의 특징의 경우 정확한 경계층 근처의 데이터를 필요로 하고 이 데이터는 항상 정확히 측정하여 사용할 수 없기 때문에 마찰속도를 정확히 결정하는데 어려움을 겪는다. 그리고 점성저층에서 평균유속의 선형법칙을 이용하는 방법 역시 실제 점성저층이 존재하지 않기 때문에 실제 하천에서도 적용하기 적절하지 못하다. 평균유속의 대수법칙을 이용하는 방법은 실제 하천에서 침식과 퇴적현상으로 바닥기준면이 지속적으로 변화하고 그 특성조도높이의 산정이 어렵기 때문에 적용하기 곤란하다. 또 다른 방법으로 최성욱 등[2], Buschmann 등[3]은 매끈한 표면 위의 흐름일 때 벽법칙과 중첩지역($25 < y < 1000$)의 데이터를 사용한 마찰속도 산정법을 제안하였다. 하지만 이 방법은 거친 표면에서의 경우 줄어든 매끈한 표면에 비해 더 커진 형상항력(form drag)의 계산이 힘들기 때문에 마찰속도를 구하기가 힘들다. Nitsche 등[4]은 제시된 CPM(Computational preston tube method)은 벽면근처 난류경계층에서 임의의 상사법칙이 존재할 것이라는 가정하여 벽 법칙에 대해 수치적분을 하여 마찰 유도속을 산정한 바 있으며, Szablewski 등[5]은 실제 경계층에 영향을 줄 수 있는 조건을 고려하고 압력구배에 의한 영향도 반영하도록 하여 3가지 매개변수를 이용한 벽 법칙을 사용하였다. 위의 연구들과 같이 마찰속도 공식의 대부분은 점 유속과 최대 유속 등을 이용하며, 매개변수를 최소 3개 이상 산정해야 한다. 따라서 본 연구에서는 보다 간단하면서 정확한 마찰속도를 산정하기 위해 엔트로피 개념에 의한 마찰속도식을 제안 하였고 이를 Song(1994)[6] 실험 데이터에 적용하여 실험값과 산정값을 비교하여 신뢰성과 적용성에 대한 검증을 하였다. 국내의 Chiu의 엔트로피 개념의 유속분포를 이용한 연구로는 김영성 등[7]은 엔트로피에 의한 유량측정 기법을 한강대교, 여주, 유성 지점의 유량 측정값과 적용하여 그 타당성을 검토하였다. 오제승 등[8]은 엔트로피 매개변수 M값을 이용하여 홍수량을 추정하는 연구를 수행하였다. 이찬주[9]는 2차원 주유속 분포를 추정할 수 있는 엔트로피 개념에 기초한 확률론적 유속분포에 관한 공식을 살피고 국내 하천에서 측정된 ADCP 자료를 이용하여 그 적용성을 검토하였다.

본 논문에서는 Chiu등[10][11][12]에 의해 개발된 식으로부터 흐름 및 수리특성이 반영된 하천의 특징을 나타내는 엔트로피 매개변수M값을 바탕으로 매개변수와 오

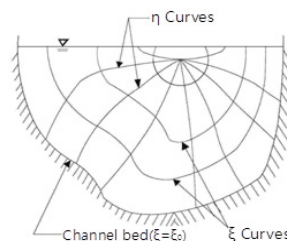
차를 최소화하고 실제 마찰속도와 가장 근접한 마찰속도식을 새롭게 제안하였다.

2. 이론적 배경

정보이론분야에서 불확실성의 측도로 많이 사용되는 엔트로피는 Shannon[13]에 의해 처음 소개되었다. 엔트로피 법칙이란 모든 현상은 항상 전체 엔트로피가 증가하는 방향으로, 다시 말해 우주의 모든 현상은 본질적으로 보다 더 무질서한 방향으로 진행된다는 것을 뜻하며 물리적인 의미로는 확률이다. 엔트로피의 개념을 사용한 광송진 등[14] Chiu의 엔트로피 유속분포식은 확률 통계에서 사용되는 엔트로피 개념을 유속공식에 도입 및 적용하여, 2차원 분포를 나타낼 수 있는 유속공식이다. 그리고 유속의 엔트로피 함수가 엔트로피 극대화에 대한 제약조건을 만족시켜 유속의 확률 밀도 함수를 구할 수 있다. 이 밀도 함수를 각 제약 조건 별로 다시 대입하여 필요한 2차원 유속공식 또는 평균유속 공식을 얻을 수 있는 방법으로 Chiu 가 최초로 이 개념을 도입하였기 때문에 Chiu의 유속공식이라 불린다. 본 논문에서는 Chiu에 의해 (1987, 1988, 1989) 유도된 Chiu의 유속공식을 이용하여 개수로의 마찰 식을 유도하고자 한다. Chiu의 유속공식에 대한 엔트로피 함수는 다음 식(1) 같다.

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

여기에서 ξ = 공간적 좌표 ($0 \leq \xi \leq 1$)의 범위, $u = \xi$ 에서의 유속을 말한다. ξ_0 는 $u=0$ 에서 수로 경계층에서 발생하는 ξ 의 최소값, ξ_{\max} 는 u 에서 ξ 의 최대값, M 은 엔트로피 매개변수이다.



[Fig. 1] $\xi - \eta$ Coordinates in open-channel sections (chiu, 1988, 1989)

Fig. 1은 등유속선 근처 경계(바닥과 측면)와 0속도 등 유속선의 모양과 같이 달라지는 좌표를 보여준다. 여기에서 η 커브는 ξ 커브의 직교궤도이다.

속도분포로써 식(1)의 이론적 기초를 설명하며, 아래와 같은 특별한 형태로 나타낼 수 있다.(Chiu, 1988, 1989)

$$\frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} = \int_0^u p(u) du \quad (2)$$

$$p(u) = \exp(a_1 + a_2 u) \quad (3)$$

위 식은 수로 단면에서 u의 확률밀도 함수이며, 식(3)은 정보 수집에서 사용된 방법과 통계역학 과 통계 Rao,1965[11]에 의해 결정된다. 이 경우에는 함수를 극대화 하여 p(u)를 유도한다.

제약조건은 다음과 같다.

$$\int_0^{u_{\max}} p(u) du = 1 \quad (4)$$

그리고

$$\int_0^{u_{\max}} u p(u) du = \bar{u} = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

여기서, A는 단면적, Q는 A를 통한 유량이다. 물리적으로, 위 공식은 ξ 가 (0부터 전체 사이)무작위로 추출되고, 그에 해당하는 유속 값, $u = G(\xi)$ 가 얻어지는 것을 의미한다. 그리고 u 와 $u + du$ 사이에 속도의 확률은 p(u)du 이다.

식(4)는 확률밀도함수의 간단한 정의(조건)이고, 식(5)는 단면의 평균 또는 평균속도가 Q/A와 동일해야 한다는 조건을 나타낸다. 식(3)을 식(4), (5)에 대입하면 식(6)과 식(7)을 유도 할 수 있다.

$$e^{a_1} = \frac{M(e^M - 1)^{-1}}{u_{\max}} \quad (6)$$

그리고

$$\bar{u} = \phi(M) \cdot u_{\max} \quad (7)$$

식(6)은 다음과 같이 나타낼수있다.

$$e^{a_1} = \frac{(e^M - 1)^{-1} [Me^M(e^M - 1)^{-1} - 1]}{\bar{u}} \quad (8)$$

(7)식을 (6)식에 대입정리하면 식(9)와 같다

$$\therefore e^{a_1} = \frac{\phi(M)}{\bar{u}} \cdot \frac{M}{e^M - 1} \quad (9)$$

유속기울기를 산정하기 위해서, (2)식을 미분하여 정리하면 (10)식과 같다.

$$\left(\frac{du}{d\xi} \right)_{\xi=\xi_0} = [(\xi_{\max} - \xi_0)p(u)]^{-1} \quad (10)$$

여기서 수로 바닥에서는 $\xi_0 = 0$, $\xi_{\max} = 1$ 되어 $\xi_{\max} - \xi_0$ 는 1이 된다.

식 (10)은 식 (11)과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$\left[\frac{du}{d\xi} \right]_{\xi=\xi_0} = \left[\frac{1}{e^{a_1}} \right] \quad (11)$$

수리학에서 수로바닥의 평균전단 응력은 다음 식(12)와 같이 나타낸다.

$$\bar{\tau}_0 = \mu \left[\frac{1}{h_\xi} \right] \left[\frac{du}{d\xi} \right]_{\xi=\xi_0} = \rho g R I_f = \rho u_*^2 \quad (12)$$

여기서, $\bar{\tau}_0$ 는 바닥경계층의 평균전단응력, \bar{h}_ξ 는 수로경계층 따르는 \bar{h}_ξ 의 평균값으로 개수로 에서는 하상바닥 으로부터 수표면의 깊이를 의미하며 일반적으로 D(수심)와 같다. ρ 는 물의 밀도, g는 중력가속도, R은 동수반경, I_f 는 에너지경사, u_* 는 마찰속도이다.

식(9)와 식(11)을 식(12)에 대입정리하면 식 (13)과 같은 새로운 마찰유속공식이 유도된다.

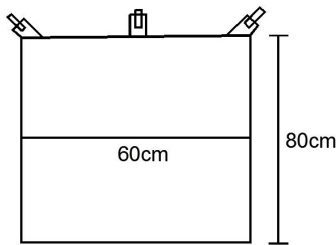
$$u_* = \sqrt{\frac{\nu \cdot \bar{u} (e^M - 1)}{D \cdot \phi(M) \cdot M}} \quad (13)$$

새롭게 제안하는 식(13)의 특징은 우선 그동안 가장 산정하기가 어려웠던 에너지경사(I_f)가 없다는 것이다. 또한 일반적으로 하천에서 구할 수 있는 수심(D), 동점성

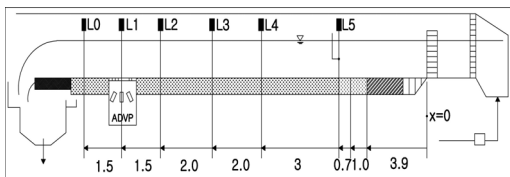
계수(ν), 평균유속(\bar{u})과 엔트로피 파라메타(M)만 있으면, 그동안 산정이 매우 어려웠던 마찰속도(u^*)를 손쉽게 산정할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 식(13)의 효용성을 증명하기 위하여 Song이 1994년에 실측한 실험 데이터에 적용하여 실험값과 산정 값을 비교 분석하였다.

3. 실험 장치 및 데이터

본 논문에서 제안한 마찰유속공식의 유용성 및 활용성을 검증하기 위하여 Song(1994)의 Ph.D.논문에서 실측된 자료를 사용하였다. 연구에 사용된 수로는 길이 16.8m, 폭 60cm, 높이 80cm이고, 재질은 유리벽과 스틸 바닥으로 구성되어 있으며, 세부사항은 Fig. 2 and 3과 같다. 그리고 수로의 기울기는 +9% 에서 -1%까지 조절이 가능하며, 유량은 ADVP를 통해 측정하였다.



[Fig. 2] The cross-section of the measurement open channel



[Fig. 3] The longitudinal section of the measurement open channel

본 연구에서는 등류와 부등류 에서 측정된 데이터를 사용하였고, 실제 자연하천 상황을 나타낼 수 있게 경사에 따른 다양한 유량변화를 주었다. 경사는 -90%에서 90%까지 유량은 50cm/s ~ 145cm/s 이며 각 수위에 따른 Horizontal velocity 를 나타내었다. 각각 측정에 대한 성과들은 Table. 1과 같다.

여기에서 문자 AC는 가속(accelerating)흐름, DC는

감속(decelerating)흐름, S는 경사 Q는 유량, D는 수심, U는 평균유속, T는 온도를 뜻한다.

[Table 1] hydraulic parameter

Division	S (%)	Q (cm/s)	D (cm)	U (cm/s)	T (°C)
S50-Q50	0.005	50000	11.8	70.6	18.8
S50-Q70	0.005	70000	14.2	82.2	18.8
S50-Q90	0.005	90000	17	88.2	18.9
S50-Q110	0.005	110000	18.9	97	19.1
S50-Q130	0.005	130000	21.3	101.7	19.2
S90-Q60	0.009	60000	11.2	89.3	19.2
S90-Q70	0.009	70000	12.2	95.6	19.2
S90-Q100	0.009	100000	15.6	106.8	19.1
ACS00-Q100	0	100000	16.2	102.9	23.2
ACS00-Q145	0	145000	20	120.8	23.2
ACS25-Q60	-0.25	60000	13.1	76.3	23.4
ACS25-Q80	-0.25	80000	15.1	88.3	23.4
ACS25-Q100	-0.25	100000	16.9	98.6	23.4
ACS50-Q60	-0.5	80000	15.9	83.8	22.8
ACS50-Q110	-0.5	110000	17.9	102.4	22.8
ACS75-Q60	-0.75	80000	16.5	80.8	23.4
ACS75-Q100	-0.75	100000	18.2	91.6	23.4
DCS75-Q60	0.75	60000	17	58.8	23.4
DCS75-Q80	0.75	80000	20.5	65	23.4
DCS50-Q55	0.5	55000	14.5	63.22	23.5
DCS50-Q70	0.5	70000	16.5	70.7	23.5
DCS50-Q90	0.5	90000	18.5	81.1	23.4

4. 제안된 식의 프로세스

식(13)의 우변항에 있는 M을 산정하기 위해 먼저 Choo 등의 (2010, 2011, 2013)등 이 유도한 평균유속공식인 식(18)를 M의 항으로 정리하면 식 (19)와 같다.

$$\bar{u} = \frac{D \cdot g \cdot R_h \cdot I_f}{\nu} \cdot \phi(M) \frac{M}{e^{M-1}} \quad (18)$$

$$\phi(M) \frac{M}{e^{M-1}} = \frac{\nu \cdot \bar{u}}{D \cdot g \cdot R_h \cdot I_f} \quad (19)$$

식(19)을 이용하여 각CASE별 M값을 산정한다. 따라서 식(13)에 산정된 M값 과 식(19)의 우변항에 실측된 수리 인자들을 대입하면, 손쉽게 마찰유속을 구할 수 있다.

5. 결과분석

식(18)을 이용하여 Table. 1에서 측정된 자료를 가지

고, 각각 실측된 자료를 이용하여 엔트로피 파라미터 M 과 u^* 를 산정하였다. 식(19)를 이용하여 M값을 산정하고 마찰속도를 산정하였다. 그 결과는 다음의 Table. 2 와 같다.

[Table 2] The entropy parameter M and friction velocity estimated by Song

Division	Entropy parameter M	u_c^* (cm/s)	u_τ^* (cm/s)	u_0^* (cm/s)	u^* (cm/s)
S50-Q50	8.66890	6.89	6.9	7.2	6.89
S50-Q70	8.92350	7.57	7.02	7.78	7.57
S50-Q90	9.09830	7.74	7.95	8.43	7.74
S50-Q110	9.47920	9.1	9.24	8.78	9.10
S50-Q130	9.63420	9.4	10	9.27	9.40
S90-Q60	8.92030	8.83	8.67	9.45	8.87
S90-Q70	8.93960	9	9.07	9.81	8.87
S90-Q100	9.56820	10.88	11.21	11.01	10.93
AS00-Q100	9.06310	8	8.23	8.05	8.43
AS00-Q145	9.46240	9.3	9.7	9.24	9.80
AS25-Q60	8.76100	6.67	7.54	7.12	7.08
AS25-Q80	8.95340	7.28	7.36	7.36	7.71
AS25-Q100	9.13910	7.91	7.89	8.26	8.36
AS50-Q80	8.92670	6.9	6.85	6.86	7.24
AS50-Q110	9.07830	7.68	8.05	7.68	8.06
AS75-Q80	8.89070	6.46	7.17	6.54	6.87
AS75-Q100	9.09360	7.2	7.42	7.45	7.60
DS75-Q60	8.64560	4.91	4.97	4.96	5.19
DS75-Q80	8.76380	4.95	5.07	5.04	5.23
DS50-Q55	8.51430	5.2	5.53	5.68	5.50
DS50-Q70	8.80880	5.86	6.25	6.2	6.20
DS50-Q90	9.15990	6.91	6.54	6.84	7.31

u_c^* 는 Song(1993)이 Clauser방법(1954)을 이용하여 산정한 마찰속도이다. 그 방법은 다음 식(14)와 같다. 식(14)로부터 식(15)를 얻는다.

$$\frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{k} \ln \frac{y u_\tau}{\nu} + B \quad (14)$$

$$\frac{U}{U_c} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{c_f}{2}} \ln \frac{y U_c}{\nu} + \sqrt{\frac{c_f}{2}} \left(B + \frac{1}{k} \sqrt{\frac{c_f}{2}} \right) \quad (15)$$

여기에서 K는 본 칼만 상수, B는 적분상수이다.

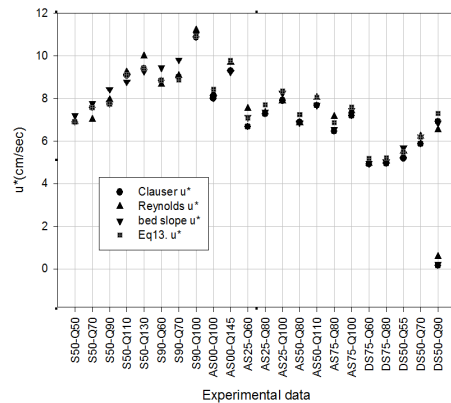
u_τ^* 는 레이놀즈 응력법으로 산정하였으며 그 방법은 식(16)과 같다.

$$\frac{\tau}{\rho} = -\overline{u'v'} + \nu \frac{du}{dy} = u_*^2 \left(1 - \frac{y}{h} \right) \quad (16)$$

u_0^* 는 하상경사를 이용한 방법인 다음 식(17)을 이용하였다.

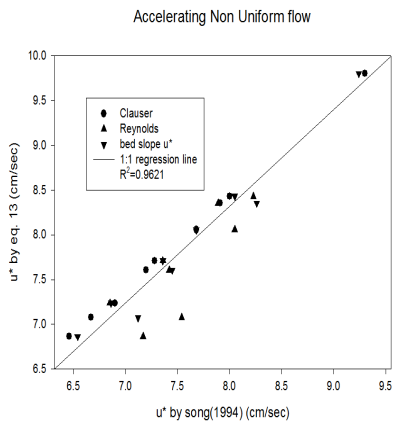
$$u_0^* = \sqrt{g r i_o} \quad (17)$$

그리고 u^* 는 본 연구에서 제시한 식(13)에 의해 산정된 값이다. 아래 Fig. 3은 경사-유량 에 따른 마찰속도 u^* 를 도식화 하였다. 여기서 S50-Q70 ~, S50-Q130, S50-Q50, S50-Q90, S50-Q110, S90-Q60, S90-Q70, S90-Q100 는 등류조건 에서 경사에 따른 유량변화이며, ACS00-Q100, ACS00-Q80, ACS25-Q100, ACS25-Q80, ACS50-Q110, ACS50-Q80, ACS75-Q100, ACS75-Q80 는 가속 부등류 흐름에서 경사에 따른 유량변화이고, DCS75-Q80, DCS75-Q60, DCS50-Q70. DCS50-Q55, DCS50-Q90 은 감속 부등류 흐름에서 경사에 따른 유량 변화에 따른 마찰속도를 나타내고 있다. 그리고 Clauser u^* 는 Clauser방법을 사용한 마찰속도값 이며, Reynolds u^* 는 레이놀즈 응력법을 사용한 마찰속도값, bed slope u^* 는 하상경사를 이용하여 산정한 마찰속도 값이다.

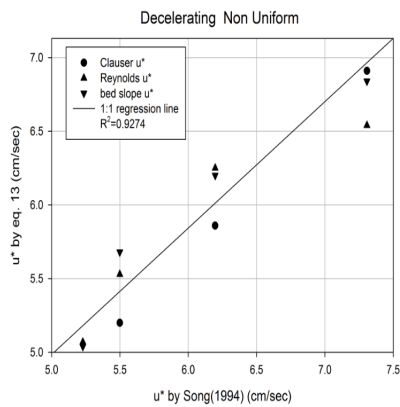


[Fig. 4] The friction velocity distribution

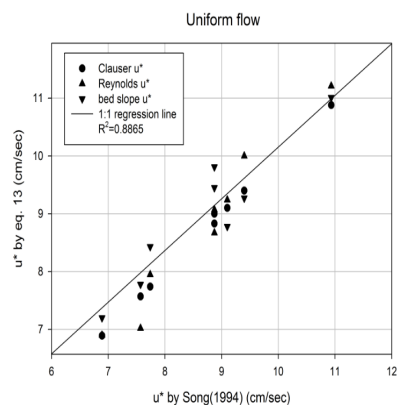
위 Fig. 4에서 알 수 있듯이, 실측된 Song 이 산정한 마찰 속도와 비교한 결과 대체로 식(13) 에 의한 마찰속도는 Clauser방법을 이용한 마찰속도와 Reynolds 방법을 이용한 마찰속도 사이에 분포하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 관계를 보다 명확하게 하기 위해서 3가지 방법으로 산정한 마찰속도 각각에 대한 분석 결과를 Fig. 5와 같이 나타내었다.



(a)



(b)



(c)

[Fig. 5] Comparison of friction velocity flow characteristics
 (a) Accelerating Non Uniform flow
 (b) Decelerating Non Uniform flow
 (c) Uniform flow

위 Fig. 4a에서 가속 부등류 흐름일 때의 결정계수는 0.9621 Fig. 4b의 감속 부등류 흐름일 때 는 결정계수 0.9274 Fig. 4c 등류 흐름일 때의 결정계수 0.8865로 등류, 부등류 모두 결정계수 1에 가까운 정확성이 나타났다.

[Table 3] RMSE Analysis

Division	RMSE		
	Clauser	Reynolds-응력	$\sqrt{gRI_0}$
가속 부등류	0.41740	0.31286	0.33435
감속 부등류	0.32063	0.36444	0.25986
등류	0.05097	0.033220	0.049395

RMSE(Root Mean Square Error)는 근사모델의 정확도 평가 방법으로 값이 0에 가까울수록 실측된 값과 계산된 값이 잘 일치함을 뜻한다. 각 흐름별 RMSE는 식(13)으로 산정한 마찰속도와의 비교를 통하였으며 Table. 3과 같이 감속 부등류 흐름일 때는 RMSE 0.31286으로 레이놀즈 응력법으로 산정한 값과 거의 일치하였으며 감속 부등류 흐름일대의 RMSE는 0.25986 으로 하상경사를 이용한방법이 가장 일치하였으며 등류 에서는 0.03으로 Reynolds 응력 법으로 산정한 값과 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다.

6. 결론

수자원 분야에서 정확한 하천흐름의 특성을 조사하는 것은 중요하다. 또한 마찰속도는 정확한 하천흐름에 필요한 매개변수로써 수자원 설계, 수질복원, 생태 변화 예측에 필수적이다. 하지만 실제로 하천의 정확한 마찰속도를 측정하는 것은 매우 어렵다. 그러나 많은 연구자들에 의해 마찰속도를 산정하는 방법에 관한 연구가 진행 중이며, 하상경사를 이용한 마찰속도 산정법의 경우 간편하지만 등류조건에서만 적용가능하다는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 부등류 흐름에서도 적용 가능한 마찰속도를 구하는 공식을 개발하였다. 이 정확성을 증명하기 위해 Song(1994)의 데이터 중 accelerating flow, Decelerating flow, Uniform flow 의 3가지 Case의 마찰속도 u^* 와 제안한 마찰유속공식을 비교하였다.

분석결과 3가지 케이스 모두 결정계수 1에 가까운 값

을 나타내었으며 RMSE 또한 높은 정확성 또한 보여주었다.

그러나 본 연구에서 사용된 자료가 실험실에서 실측된 자료이므로 자연하천의 실측자료에 대한 분석을 통한 추가적인 연구가 추진된다면 본 연구 결과인 마찰속도식의 활용성이 제고 될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Clauser F. H, "Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradients", Aeronaut. Sci., 21: 91-108, 1954
DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/8.2938>
- [2] Uk Sung Choi, Dong Kyunm Im, "Estimating Shear Velocity in Open-Channel Flows" Korean Society of Civil Engineers, Vol.2000, No.3, pp373-376, 2000
- [3] Buschmann, M, Meinert, J, "Power law or logarithmic law for turbulent boundary layers with low Reynolds numbers", Proceedings of the Colloquium Fluid Dynamics, pp. 21-28, 1999.
- [4] Nitsche, W., "A Computational Preston Tube Method," Turbulent Shear Shear Flows, Vol. 4, pp 261-276. 1983
- [5] Szablewski, W., "Turbulente Drenzs-chichten in Ablosenahe", Z., Angrew. Math., Vol. 49, pp. 215 1969
- [6] Song, T. C, "Velocity and turbulence distribution in non-uniform and unsteady open-channel flow", Doctoral dissertation, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland, 1994
- [7] K. Y. Kim, J. R. Yang, T. H. Choo, I. H. Ko, W. Gu. Kim,, "Application of discharge measurement method using entropy", Korean Society of Civil Engineers, Vol.2001, p. 1-4 2001
- [8] J. S. Oh, B. S. Kim, H. S. Kim, B. H. Seoh, "An Estimation Technique of Flood Discharge, Vol. 25, No.3B p. 207-213, 2005
- [9] C. J. Lee, "Analysis on applicability of entropy concept based velocity distribution equations of rivers", Univ. of Seoul, Dep of Structural Engrg., M.S Thesis, 2007
- [10] Chiu, C. L, "Entropy and 2-D velocity distribution in open channels", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 114(10), pp. 738-756, 1988
- [11] Chiu, C. L, "Velocity distribution in open channel flow", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 115(5), pp. 576-594, 1989
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))
- [12] Choo T. H, Yoon H. C, Lee S. J, "An estimation of discharge using mean velocity derived through Chiu's velocity equation", Environ Earth Sci 69-3 pp. 247-256, 2013
- [13] C. E. SHANNON. "Prediction and Entropy of Printed English By C. E. SHANNON". Bell Sys. Tech Jour., Vol.30, pp 51-64, Sept., 1951
- [14] Seung Jin Gwak, "A study on the applicability of chiu's velocity distribution equation", Univ. of Pusan National, Dep of Civ. Engrg, M.S Thesis,
- [15] Jeoung Ju Song, "Studies on the velocity distribution in Superpipe by using the Chiu's Velocity Equatio", Univ. of Pusan National, Dep of Civ. Engrg, M.S Thesis, 2013
- [16] Rao C. R, "The theory of least squares when the parameters are stochastic and its application to the analysis of growth curves", Biometrika 52-3 pp. 447-458, 1965
DOI: <http://dx.doi.org/10.2307/2333697>

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>

램, 수리수문, 하천

손 희 삼(Hee Sam Son)

[정회원]



- 1997년 2월 : 밀양산업대학교 토목공학과 (공학사)
- 2011년 8월 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 (공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

<관심분야>

램, 수리수문, 하천

윤 관 선(Gwan Seon Yun)

[정회원]



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

<관심분야>

댐, 수리수문, 하천

노 현 석(Hyun Seok Noh)

[정회원]



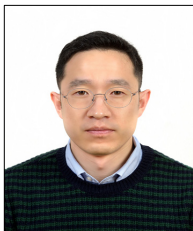
- 2013년 8월 : 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 (공학사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

<관심분야>

댐, 수리수문, 하천

고 현 수(Ko Hyun Soo)

[정회원]



- 2006년 2월 : 울산대학교 토목공학과 (공학사)
- 2008년 2월 : 울산대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

<관심분야>

댐, 수리수문, 하천