

# 엔트로피 개념을 이용한 등류수로 마찰속도식 제안

## The Proposal for Friction Velocity Formula at Uniform Flow Channel Using the Entropy Concept

추태호, 손희삼, 윤관선, 노현석, 고현수  
부산대학교 사회환경시스템공학부

Tai-Ho Choo(thchoo@pusan.ac.kr), Hee-Sam Son(hss3515@korea.kr),  
Gwan-Seon Yun(gsyun@pusan.ac.kr), Hyun-Seok Noh(debyan@pusan.ac.kr),  
Hyun-Soo Ko(phoo99@naver.com)

### 요약

마찰속도란 벽면 가까이의 흐름에서 벽면의 마찰 응력과 밀도로 정의되는 속도의 차원을 갖는 양이다. 또한 마찰속도는 바닥 흐름에서 전단력을 나타내는 수리학적 매개변수이다. 게다가 개수로 설계나 하천, 해안에서 유사 및 물질의 거동을 파악하는데 정확한 마찰속도의 산정이 매우 중요하며 주 흐름방향의 혼합 계수를 결정하는데 필수적인 요소이다. 이러한 마찰속도를 산정하는 방법들은 하상경사를 이용하는 방법, 레이놀즈 응력분포를 이용하는 방법, 점성저층에서 평균유속의 선형법칙을 이용하는 방법, 벽 전단 응력의 직접적 측정방법 등이 있다. 본 연구에서는 기존 방법과 달리 확률통계 기법에 사용되는 엔트로피 개념에 접목하여 새로운 마찰속도공식을 제안하였고, 이를 검증하기 위해 Song의 실측 실험데이터를 이용하였다. 제안한 공식과 마찰속도 공식에 의해 산정된 마찰속도의 결정계수는 0.999-1.000로 잘 일치한 것으로 분석되었다.

■ 중심어 : | 엔트로피 | 마찰속도 |

### Abstract

The friction velocity is a quantity with the dimensions of velocity defined by the friction stress and density of a wall surface at near wall of flow condition. Also, the friction velocity is the hydraulic parameter describing shear force at the bottom flow. Moreover, it is a very important factor in designing open channel and essential to determine the mixing coefficient in the main flow direction. The estimation of the friction velocity are such as methods using channel slope, linear law of the mean velocity at viscous sub-layer and direct measurement of wall shear stress, etc. In the present study, we propose a friction velocity equation that has been optimized by combining the concept of entropy, which is used in stochastic method, and to verify the proposed equation, the experimental data measured by Song was used. The R squared for friction velocities between proposed equation and friction velocity formula analyzed 0.999 to 1.000 in a very good agreement with each equation.

■ keyword : | Entropy | Friction Velocity |

\* 본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신006)에 의해 수행되었습니다.

접수일자 : 2014년 09월 30일

심사완료일 : 2015년 01월 15일

수정일자 : 2014년 12월 19일

교신저자 : 고현수, e-mail : phoo99@naver.com

## 1. 서론

개수로의 흐름은 난류이고 흐름에 저항을 주는 요소로 흐름과 개수로 경계면과의 마찰속도에 초점을 맞춘 연구들이 활발하게 진행 중이다. 난류에서는 물 분자 운동량 교환의 움직임보다 물 입자(water particle)의 불규칙한 운동에 의한 운동량 교환이 훨씬 지배적이다. 이러한 난류 운동량 교환이 개수로 흐름에서 결국 마찰 저항을 야기한다[1]. 이렇듯 개수로 설계에 있어 마찰속도는 매우 중요하게 작용하는 변수이다. 이미 마찰속도를 산정하는 방법들은 많이 개발되어 있고 여러 가지 방법으로 측정되고 계산된다. 이러한 마찰속도를 결정하기 위한 방법에는 레이놀즈 응력분포방법, 점성저층에서 평균유속의 선형법칙의 방법, 하상경사 방법 등 다양한 방법이 있다. 이러한 다양한 방법들 중 마찰속도를 산정하는 가장 간단한 방법은 하상경사를 이용하는 방법이다. 그 이유는 등류상태의 경우 하상경사, 수면경사, 에너지경사, 그리고 마찰경사가 모두 동일하므로 힘의 평형조건을 이용하면  $u_* = \sqrt{gRS_0}$  식이 유도될 수 있다[2-4]. 즉, 개수로에서 에너지 경사의 정확한 계산에는 많은 어려움이 따르지만 하상경사는 비교적 간단하게 측정할 수 있다. 하지만 실제하천의 흐름은 부정류 혹은 부등류 흐름이므로 등류조건이 확보되어야 합리적인 값을 얻을 수 있다는 단점이 있다. 또한 외부영역과 내부영역 사이의 중첩지역에서 벽 법칙의 형태를 가진 데이터를 사용하여 마찰속도를 산정하였다. 이 방법은 오직 중첩지역의 데이터만 사용하기 때문에 내부영역에서 측정된 데이터 없이 마찰속도를 산정할 수 있는 장점이 있지만, 거친 표면의 경우 매끈한 표면에 비해 더 커진 항력계수의 산정이 어려워 마찰속도를 구하기가 힘들다[5].

Barenblatt[6]는 흐름 깊이와 레이놀즈 수를 활용하여 마찰속도를 산정할 수 있지만, 이 방법 역시 거친 표면에서는 마찰속도를 제대로 산정하기 어려웠으며, Szablewski 등[7]은 벽 법칙을 활용해 von Karman 상수, von Driest 상수, 압력구배의 효과를 나타내는 매개변수들로 실제 경계층에 영향을 줄 수 있는 조건고려 및 압력구배에 의한 영향도 반영하였다. 위의 연구들과

같이 현재 진행되고 있는 마찰속도 산정에 관한 연구들은 데이터 취득이 용이하지 않거나 많은 매개변수를 필요로 하는 번거로움이 있었다. 따라서, 본 연구에서는 간단하고 정확한 마찰속도를 산정하기 위해 Chiu[8-10] 등의 엔트로피 개념과 수리학적 특성을 반영시킨 마찰속도공식을 제안하였다.

Chiu의 공식을 활용하기 위해서는 엔트로피 매개변수  $M$ 의 산정이 필수적이다. 그동안 다양한 연구에서 이러한  $M$ 을 구하기 위한 연구가 수행되어왔다. 오제승 등(2005)[11]은  $M$ 값을 이용하여 홍수량을 추정하는 연구를 수행하였고, 엔트로피 매개변수를 이용해 간단하게 유량을 산정하고 이를 한강대교, 여주, 유성 지점 등에서의 실측자료와 비교함으로써 적용성을 검토한 바 있다[12].

하지만 이러한 방법들은 엔트로피 매개변수  $M$ 을 산정하기 위해서 최대유속이 필요하다. 하지만 관수로의 최대유속 산정조건과 비교하여 상대적으로 개수로에서는 단면의 형상과 다양한 흐름 특징에 의해 최대유속의 정확한 산정이 어려워 추정에 의존하는 단점이 있다.

반면 본 논문에서 새롭게 제안하는 공식은 최대유속의 값 없이 엔트로피 매개변수  $M$ 값을 쉽게 산정할 수 있는 장점을 가진다. 또한 이론에 입각한 제안된 공식은 경험식에 의한 방법보다 더 높은 신뢰성을 기대할 수 있다.

## 2. 이론적 배경

Chiu의 엔트로피 유속 분포식은 엔트로피 개념을 유속공식에 도입 및 적용하여 2차원 분포를 나타낼 수 있는 유속공식이며 확률 통계에서 사용되고 있다. 유속의 엔트로피 함수가 엔트로피 극대화에 대한 제약조건을 만족시킴으로 확률 밀도 함수를 구할 수 있다. 그 후 각 제약 조건 별로 다시 대입해 필요한 평균유속 공식 또는 2차원 유속공식을 얻을 수 있는 방법으로 Chiu가 최초로 도입하였기에 Chiu의 유속공식이라 불린다. 본 논문에서는 Chiu의 유속공식을 이용하여 개수로의 마찰속도를 유도하고자 한다. 유속분포공식은 최근 Chiu에 의

해 [8-10] 유도 되었으며 Chiu의 유속공식에 대한 엔트로피 함수는 다음 식 (1)과 같다.

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

여기에서  $\xi =$  공간적 좌표 ( $0 \leq \xi \leq 1$ )의 범위,  $u = \xi$ 에서의 유속을 말하며,  $\xi_0$ 는  $u=0$ 에서 수로 경계층에서 발생하는  $\xi$ 의 최소값,  $\xi_{\max}$ 는  $u$ 에서  $\xi$ 의 최대값,  $M$ 은 엔트로피 매개변수이다.

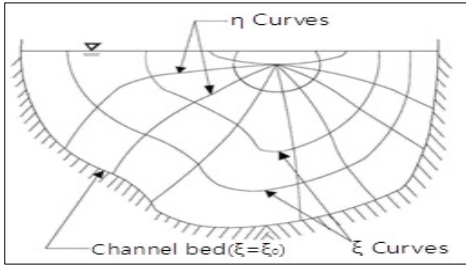


그림 1. 개수로 단면에서의  $\xi - \eta$  좌표 (Chiu, 1988, 1989)

[그림 1]은 등유속선 근처 계(바닥과 측면)와 0속도 등유속선의 모양과 같이 달라지는 좌표를 보여준다. 여기에서  $\eta$  커브는  $\xi$  커브의 직교궤도이다.

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

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

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

위 식은 수로 단면에서  $u$ 의 확률밀도 함수이며, 식 (3)은 정보 수집에서 사용된 방법과 통계역학 과 통계에 의해 결정된다[13]. 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,  $A$ 는 단면적,  $Q$ 는  $A$ 를 통한 유량이다. 물리적으로, 위 공식은  $\xi$ 가 ( $0$ 부터 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  $Q/A$ 와 동일해야 한다는 조건을 나타낸다. 식 (3)을 식 (4)와 식 (5)에 대입 정리하면 식 (6)과 식(7)을 구할 수 있다.

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

그리고

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

여기서,  $\phi(M) = \frac{e^{m-1}}{e^m} \left( \frac{1}{e^n - 1} \right) \frac{1}{n}$

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

식 (7)을 식 (6)에 대입 정리하면 식 (8) 또는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

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

한편, 유속기울기를 산정하기위해서, 식 (2)를 미분하여 정리하면 식 (10)과 같다.

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

여기서 수로 바닥에서는  $\xi_0 \approx 0, \xi_{\max} = 1$  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,  $\bar{h}_\xi$ 는 수로 경계층 따르는  $\bar{h}_\xi$ 의 평균값으로 개수로 에서는 하상바닥으로부터 수표면까지의 깊이를 의미하며 일반적으로 수심과 같다.  $\rho$ 는 물의 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $R$ 는 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( $I_f$ )항이 소거되었다는 것이다. 또한 일반적으로 하천에서 구할 수 있는 수심(D), 동점성계수( $\nu$ ), 평균유속( $\bar{u}$ )과 엔트로피 매개변수  $M$ 만 있으면, 그동안 산정이 매우 어려웠던 마찰속도  $u_*$ 를 손쉽게 산정할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 식 (13)의 효용성을 증명하기 위하여 Song(1994)[13]이 실측한 실험 데이터에 적용하여 실험값과 산정 값을 비교 검토하였다.

### 3. 실험 장치 및 데이터

본 공식의 정확성을 검증하기 위하여 Song(1994)

[13]에서 측정된 자료를 사용하였다. 실험은 단면이 직사각형인 직선 수로에서 수행되었고, 초음파도플러유속계(ADVP)는 유속분포와 난류의 측정을 위해서 사용되었다. 수심은 6개의 각기 다른 측정점에서 측정되었다. 이 연구에서 사용된 수로 제원은 길이 16.8cm, 폭 60cm 이고 높이는 80cm이다. 실험실 수로의 모식도는 아래의 [그림 2]와 같다. 수로의 벽은 유리로 되어있고 바닥은 철 재질(steel)로 구성되어있다. 수로의 경사는 -1%에서 +9%까지 다양하게 조정할 수 있다. 등류조건이 잘 발달할 수 있도록 하기 위해 수로의 물길을 인도하는 안정화된 장치가 입구단면에 설치하였다. 여러 가지 측정자료 중 본 논문에서는 하상경사 0.5, 0.75, 1, 1.25에서 각기 유량을 달리하여 측정된 4set의 자료를 사용하였다. 유량의 범위는  $10\text{cm}^3/\text{s} \sim 150\text{cm}^3/\text{s}$  사이이고 지면상 그 성과의 일부는 [표 1]과 같다. (수온, T는 19.1 °C 고정)

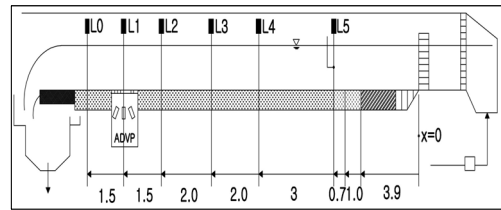


그림 2. 실험실 제원

### 4. 제안한 방법의 적용

본 연구에서 제안한 식 (13)을 활용하기 위해서는 무엇보다도 엔트로피 매개변수  $M$ 의 산정이 필요하다. 실제로 엔트로피 매개변수  $M$ 의 산정은 다양한 논문에서 다양한 방법으로 연구가 이루어져 왔으나 대부분 경험 혹은 추정에 의존하였다. 그 이유는 대부분의 논문에서 엔트로피 매개변수를 산정하기 위해서 식 (1)과 식(7)을 활용하였는데 두 공식은 기본적으로 개수로에서의 최대유속이 필요하다.

하지만 관 중앙에서 발생하는 관수로의 최대유속과 달리 개수로의 최대유속은 그 발생위치가 불분명하여 또한 많은 인력과 시간, 노력이 소요될 수밖에 없다.

표 1. 실험데이터 요약

RUN	S (%)	Q×10 <sup>3</sup> (cm <sup>3</sup> /s)	D (cm)	R (cm)	$\bar{U}$ (cm/s)
S50-Q11	0.5	11.0	5.1	4.4	35.9
S50-Q20	0.5	20.0	7.2	5.8	46.3
S50-Q50	0.5	50.0	11.8	8.5	70.6
S50-Q70	0.5	70.0	14.2	9.6	82.2
S50-Q90	0.5	90.0	17.0	10.9	88.2
S50-Q110	0.5	110.0	18.9	11.6	97.0
S50-Q130	0.5	130.0	21.3	12.5	101.7
S50-Q150	0.5	150.0	23.5	13.2	106.4
S50-Q170	0.5	170.0	25.3	13.7	112.0
S75-Q8	0.8	8.0	3.8	3.4	35.1
S75-Q10	0.8	10.0	4.2	3.7	39.7
S75-Q30	0.8	30.0	8.0	6.3	62.5
S75-Q50	0.8	50.0	10.0	7.5	83.3
S75-Q70	0.8	70.0	12.7	8.9	91.9
S75-Q90	0.8	90.0	14.9	10.0	100.7
S75-Q110	0.8	110.0	17.1	10.9	107.2
S75-Q130	0.8	130.0	19.4	11.8	111.7
S75-Q150	0.8	150.0	21.1	12.4	118.5
S100-Q5	1.0	5.0	2.7	2.5	30.9
S100-Q10	1.0	10.0	4.1	3.6	40.7
S100-Q30	1.0	30.0	7.4	5.9	67.6
S100-Q50	1.0	50.0	10.0	7.5	83.3
S100-Q70	1.0	70.0	12.2	8.7	95.6
S100-Q90	1.0	90.0	14.3	9.7	104.9
S100-Q110	1.0	110.0	16.2	10.5	113.2
S125-Q5	1.3	5.0	2.6	2.4	32.1
S125-Q10	1.3	10.0	3.8	3.4	43.9
S125-Q30	1.3	30.0	6.8	5.5	73.5
S125-Q50	1.3	50.0	9.1	7.0	91.6
S125-Q70	1.3	70.0	11.7	8.4	99.7
S125-Q90	1.3	90.0	13.8	9.5	108.7
S125-Q110	1.3	110.0	15.7	10.3	116.8

표 2. 엔트로피 M 산정 후 측정된 u\* 값

Entropy parameter M	등류(cm/s) $\sqrt{gRS_0}$	Measured u* (cm/s)	Estimated u* (cm/s)
7.56	4.62	4.91	4.62
8.00	5.33	5.77	5.33
8.52	6.44	7.20	6.44
8.71	6.87	7.78	6.87
8.97	7.29	8.43	7.29
9.06	7.54	8.78	7.54
9.22	7.81	9.25	7.81
9.35	8.04	9.64	8.04
9.42	8.20	9.90	8.20
7.42	4.98	5.22	4.98
7.49	5.20	5.47	5.20
8.34	6.81	7.42	6.81
8.47	7.42	8.14	7.42
8.83	8.10	9.09	8.10
9.03	8.55	9.75	8.55
9.22	8.95	10.37	8.95
9.41	9.31	10.99	9.31
9.49	9.54	11.36	9.54
7.14	4.93	5.22	4.93
7.75	5.95	5.08	5.95
8.42	7.63	6.72	7.63
8.80	8.57	7.89	8.57
9.04	9.22	8.17	9.22
9.24	9.74	8.94	9.74
9.39	10.15	9.16	10.15
7.27	5.41	5.22	5.41
7.75	6.43	5.08	6.43
8.41	8.24	6.97	8.24
8.76	9.25	7.89	9.25
9.16	10.15	8.50	10.15
9.38	10.76	9.03	10.76
9.55	11.24	9.16	11.24

따라서, 본 논문에서는 [14][15]에서 개발한 식(14)를 통한 방법으로 엔트로피 매개변수 M을 산정하였다.

$$\bar{u} = \frac{D \cdot g \cdot R_h \cdot I_f}{\nu} \cdot \phi(M) \frac{M}{e^M - 1} \quad (14)$$

산정된 엔트로피 매개변수 M은 최소 7.14에서 최대 9.55까지 범위를 가지고 있고 자세한 과정은 Choo[14][15]의 논문에서 찾을 수 있으며 이 방법의 장점은 불확실한 최대유속을 사용하지 않고 언제든지 그 하천의 엔트로피 매개변수를 구할 수 있다는 데에 있다. 산정된 엔트로피 매개변수 M을 본 논문에서 유도한 식 (13)에 대입하여 마찰속도를 산정하였다.

### 5. 결과분석

[표 2]는 흐름별 특성을 나타내는 각각의 엔트로피 매개변수 M을 구해  $\sqrt{gRS_0}$  방법과, Song(1994)에서 측정된 마찰속도, 제안된 공식으로 u\*를 산정한 결과를 요약하였고 각 방법으로 산정한 u\*는 아래 [그림 3]과 같이 그래프로 나타내었다. [그림 3]과 같이 제안된 공식에 의해 산정된 u\*는 등류에서 자주 쓰이는  $\sqrt{gRS_0}$  방법과 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

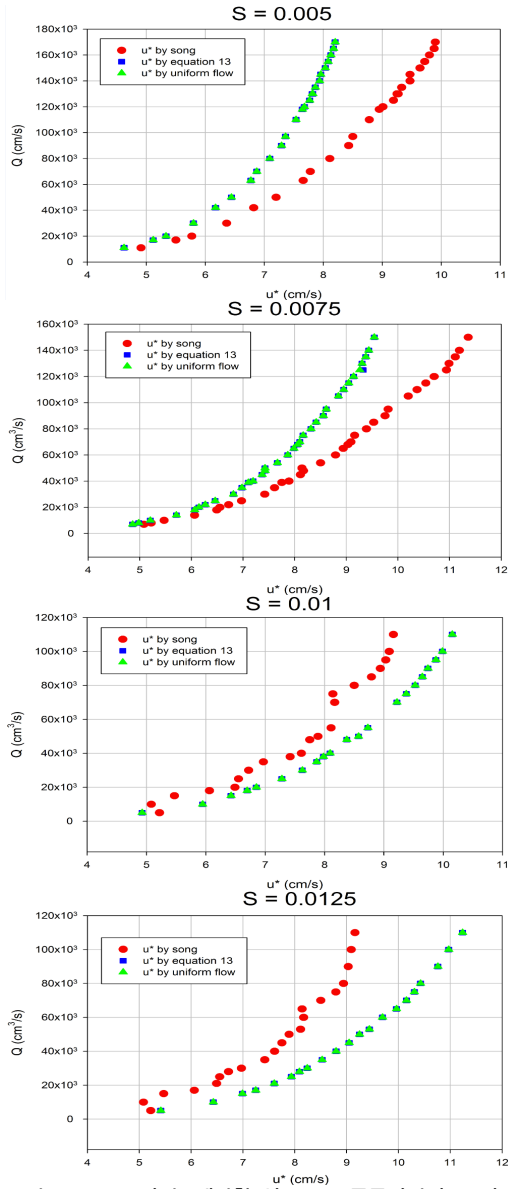


그림 3. Song방법, 제한한 식 (13), 등류방법의  $u_*$  비교

x축은  $\sqrt{gRS_0}$  방법에 의한 값으로 고정하고 y축은 제한된 공식과 Song(1994)에서 측정된 마찰속도값으로 나타내어 위의 [그림 4]와 같이 1:1 비교를 통하여 그 정확성을 검증하였다. 여기서 RMSE(Root Mean Square Error)는 가장 직관적이면서도 의미 있는 근사모델의 정확도 평가 방법으로서 0에 가까울 수록 잘 일치함을

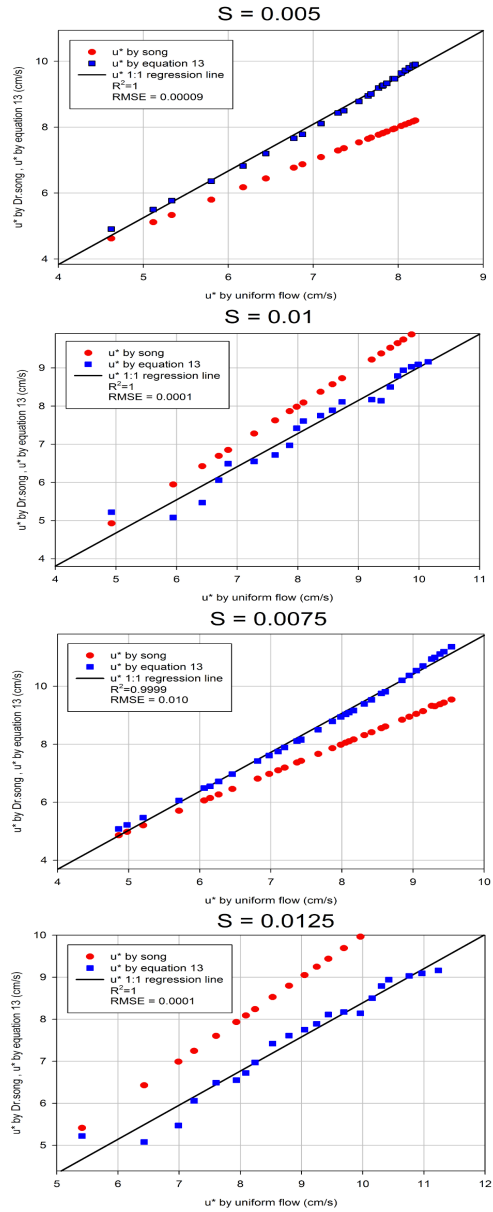


그림 4. Song방법, 제한한 식 (13), 등류방법의  $u_*$  비교

나타낸다. 경사 0.005에서는  $\sqrt{gRS_0}$  방법과 제한된 공식에 의해 산정된 값은 결정계수는 1, RMSE는 0.00009로 두 값이 매우 잘 일치함을 보여주었다. 그리고 경사 0.0075, 0.01, 0.0125에서는 각각 결정계수 0.9999, 1, 1, 그리고 RMSE는 0.01, 0.0001, 0.0001로 보여주었다.

이러한 결과는  $u_* = \sqrt{gRS_0}$ 의 경우 부등류 혹은 부정류 조건에서 에너지경사  $I_f$ 값의 산정이 어렵다. 하지만 새롭게 제안한 식(13)을 이용하면 측정 및 산정이 어려운 에너지경사를 사용하지 않고 적용해 신뢰할 수 있는 마찰속도를 손쉽게 산정할 수 있음을 알 수 있다.

### 6. 결론 및 제언

마찰속도는 정확한 하천흐름산정과 특성파악에 중요하다. 그리고 정확한 해석이 어려운 개수로의 유사량 이론에서 중요한 매개변수인 한계소류력, 흐름의 강도, 소류사량을 산정하기 위해서는  $u_*$ 의 정확한 계산이 무엇보다도 우선되어야 한다. 또한 수공구조물의 설계와 하상변동 양상파악을 위해서도 필수적인 매개변수이다. 실제로 많은 연구자들이 정확한 마찰속도를 계산하고자 하였으나 에너지경사의 산정이 용이하지 않을 뿐만 아니라 그 계산에 있어 많은 매개변수를 필요로 하기 때문에 어려움이 있어 왔다.

따라서 본 논문에서는 등류공식의 하상경사를 이용한  $u_* = \sqrt{gRS_0}$ 와 Song(1994)이 산정한 마찰속도와 본 논문에서 제안한 식(13)으로 산정한 마찰속도를 비교 검증하였다. 분석결과 등류공식  $u_* = \sqrt{gRS_0}$ 와 매우 잘 일치함을 보여주었다. 본 논문의 장점은  $u_* = \sqrt{gRS_0}$ 의 경우 부등류 혹은 부정류 조건에서 에너지경사  $I_f$ 값의 산정이 어렵다. 하지만 새롭게 제안한 식(13)을 이용하면 측정 및 산정이 어려운 에너지경사를 사용하지 않고 적용해 최적화하여 신뢰할 수 있는 마찰속도를 손쉽게 산정할 수 있음을 보여주었다.

하지만 본 논문에서는 실험실 사각단면에서 측정된 데이터만을 활용하였으므로 지속적으로 다양한 실험실 수로와 실제 하천의 실측자료를 바탕으로 지속적인 검증이 이루어져야 한다.

### Index

$u_*$ friction velocity	g gravity
S slope	$S_0$ bed slope
D depth	$\bar{U}$ mean velocity
R radius	$R_h$ hydraulic radius
$\rho$ density of water	$I_f$ energy slope
$\nu$ coefficient of kinematic viscosity	
$M$ entropy parameter	
$\phi M$ water level max velocity and ratio of mean velocity	
$\bar{\tau}_0$ mean shearing stress of ground boundary layer	

### 참고 문헌

- [1] 우효섭, *하천수리학*, 2002.
- [2] G. Gust and J. B. Southard, "Effects of weak bed load on the universal law of the wall," *Journal of Geophysical Research*, Vol.88, No.C10, pp.5939-5952, 1983.
- [3] I. Nezu and H. Nakagawa, "Turbulence in open-channel flows," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.120, No.10, pp.1235-1237, 1994.
- [4] A. Gyr and A. Schmid, "Turbulent flows over smooth erodible sand beds in flumes," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.35, No.4, pp.525-544, 1997.
- [5] M. Buschmann and J. Meinert, "Power law or logarithmic law for turbulent boundary layers with low Reynolds numbers," *Proceedings of the Colloquium Fluid Dynamics*, pp.21-28, 1999.
- [6] B. R. Pearson, P. A. Krogstad, and W. van de Water, "Measurements of the Turbulent Energy Dissipation Rate," *Physics of Fluids*, Vol.14, 2002.
- [7] W. Szablewski, "Turbulente Drenzs-chichten in Ablosenahe," *Z. Angrew. Math.*, Vol.49, p.215, 1969.
- [8] C. L. Chiu, "Entropy and probability concepts in Hydraulics, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.113, No.5, pp.583-599, 1987
- [9] C. L. Chiu, "Entropy and 2-D velocity distribution in open channels," *Journal of Hydraulic*

Engineering, Vol.114, No.10, pp.738-756, 1988.

[10] C. L. Chiu, "Velocity distribution in open channel flow," Journal of Hydraulic Engineering, Vol.115, No.5, pp.576-594, 1989.

[11] 오제승, 김병식, 김형수, 서병하, "홍수량 추정을 위한 유량 산정 기법에 관한 연구", 대한 토목학회 논문집, 제25권, 제3호, pp.207-213, 2005.

[12] 김영성, 양재린, 추태호, 고익환, 김우구, "엔트로피를 이용한 유량측정기법의 국내하천에의 적용", 대한 토목학회 학술발표회 논문집, pp.1535-1538, 2001.

[13] T. C. Song, *Velocity and turbulence distribution in non-uniform and unsteady open-channel flow*, Doctoral dissertation, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland, 1994.

[14] T. H. Choo, H. C. Yoon, and S. J. Lee, "An estimation of discharge using mean velocity derived through Chiu's velocity equation," Journal of Environ Earth Sciences, Vol.69, No.1, pp.247-256, 2013.

[15] T. H. Choo, H. C. Yoon, and S. J. Maeng, "An element technique development reflecting the entropy concept of the application to smart water grid," Joimal of Civil Engineering KSCE, Vol.18, No.1, pp.294-303, 2014.

저 자 소 개

추 태 호(Tai-Ho Choo)

중신회원



- 1990년 12월 : Pittsburgh 대학교 토목공학과 (공학석사)
  - 1998년 12월 : Pittsburgh 대학교 환경토목공학과(공학박사)
  - 1984년 2월 ~ 2002년 9월 : K-Water 연구원 책임연구원 등
  - 2002년 9월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학부 교수
- <관심분야> : 댐, 수리학, 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> : 댐, 수문학, 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> : 수문학, 하천

노 현 석(Hyun-Suk Noh)

준회원



- 2013년 8월 : 서울과학기술대학 건설시스템디자인공학과(공학사)
  - 2013년 9월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정
- <관심분야> : 하천, GIS

고 현 수(Hyun-Soo Ko)

정회원



- 2006년 2월 : 울산대학교 토목공학과(공학사)
  - 2008년 2월 : 울산대학교 토목공학과(공학석사)
  - 2013년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정
- <관심분야> : 보, 위어, 하천