

## 엔트로피 이론에 의한 개수로 마찰계수 산정

추태호<sup>1</sup>, 곽길신<sup>1</sup>, 윤관선<sup>1</sup>, 윤현철<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>부산대학교 사회환경시스템공학부

### The estimation of friction coefficient by using entropy theory in open channels

Tai Ho Choo<sup>1</sup>, Kil Sin Kwak<sup>1</sup>, Gwan Seon Yun<sup>1</sup>, Hyeon Cheol Yoon<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Environmental and civil Engineering, Pusan National University

**요약** 개수로의 흐름 특성을 결정짓는 중요한 요소 중 하나는 흐름의 저항을 나타내는 마찰속도와 마찰계수이다. 하지만 개수로 흐름에서는 그 중요성에도 불구하고 자유수면과 단면의 복잡함, 다양한 수리변수들에 의해서 완벽한 해석이 매우 어렵다. 마찰계수에 대한 연구는 경험적 실험결과에 의존하고 있으므로 손쉬운 적용이 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 엔트로피 개념을 활용하여 새로운 마찰계수 산정 공식을 제안하고 공식의 정확성을 증명하기 위해서 사다리꼴과 사각단면을 가진 개수로 실험 자료를 사용하였다. 본 공식의 장점은 무엇보다도 개수로에서 정확한 값을 알기 어려운 에너지 경사 항을 사용하지 않는 것에 있다. 그리고 이론적 배경을 바탕으로 높은 정확성을 가진 마찰계수  $f$ 의 산정이 가능함을 보여주었다.

**Abstract** Both the friction velocity and the friction coefficient have to be estimated to determine flow characteristic in an open channel. In spite of the importances in an open channel, the complete interpretation is highly difficult because of free water surface, the complex of cross section and the various hydraulic parameters. The researches related to the friction factor are based on empirical outcome. Therefore, the equations are difficult to be generally applied. For that reason, the new friction factor estimation equation using the entropy concept was proposed in the present study, and the data measured in rectangular and trapezoid cross sections was used to verify the accuracy of equation. The advantage of the proposed equation dose not use the energy slope term which is difficult to be measured and to be estimated in an open channel. In addition, the proposed method showed that the accurate friction factor  $f$  can be estimated on the Basis of theoretical background.

**Key Words** : entropy, friction coefficient, friction velocity, open channel, Reynolds number

### 1. 서론

손실수두  $h_f$ 는 수리수치해석과 유체현상의 이론적 분석에 매우 중요한 물리적 매개변수이다. 사실 손실수두의 메커니즘은 매우 복잡하고 명확하게 증명된 것은 아니다. 그래서 일반적으로 국부손실과 마찰손실 두 부분으로 나누어 고려되고 있다. 이 중에서 마찰손실은 보통 Darcy-Weisbach 공식[12]에서 마찰계수  $f$ 가 명확하게 정의되면 계산할 수 있다. 그러므로 개수로의 일정한

단면과 경사 조건에서 유속과 밀접한 관련이 있는 주요한 요소로 마찰계수를 고려하지 않을 수 없다. 홍수조절이나 수리학적 설계의 안정성을 보장하기 위해서 마찰계수의 올바른 계산은 중요하다. 실제로 개수로 흐름에서 마찰계수  $f$ 를 산정하려는 노력은 원형 관수로에 대한 연구보다 일찍 시작되었다. 그러나 원형 관수로는 관이 대칭성을 가지므로 2차류가 발생하지 않고 중심점을 기준으로 동일한 유속분포를 가지므로 이론적인 해석이 개수로와 비교하여 상대적으로 쉽기 때문에 개수로 흐름에

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었음.

\*Corresponding Author : Hyeon Cheol Yoon(Pusan National Univ.)

Tel: +82-51-510-7654 email: standupup@pusan.ac.kr

Received December 26, 2014

Revised (1st February 10, 2015, 2nd March 4, 2015)

Accepted April 9, 2015

Published April 30, 2015

대한 이론적인 접근이 상대적으로 더디었다[25].

과거의 마찰계수  $f$ 는 실험실 측정에 의해 활발한 연구가 있어왔다. 1800년대 말 Bazin[1,2]와 1900년대 초 Varwick[23]의 실험자료는 관수로에서 Moody 곡선과 마찬가지로 개수로에서  $f-Re$  관계를 잘 나타내고 있다. 여기서 Bazin[1,2]와 Varwick[23]의 실험결과를 보면 개수로 흐름에서도 관로 흐름과 비슷하게 층류, 천이류, 난류의 흐름 특성이 존재한다는 사실을 알 수 있다.

실제로 이들 실험자료를 통하여 Bazin 공식[1,2]이나 Manning 공식[14,15], Ganguillet-Kutter[13] 개발되기도 하였다. 즉 개수로 흐름에서 사용되고 있는 다양한 식들은 대부분 관측자료를 이용하여 개발된 경험식이 주를 이루고 있다. 대표적으로 앞서 언급한 Chezy[4] 공식과 Manning 공식[14,15]이 있다. 하지만 이들 공식은 근본적으로는 개수로의 흐름 특성을 적절하게 반영하고 있다고 보기는 어렵다. 모형의 신뢰성과 정확성, 수리해석의 적절성을 향상시키려면 개수로 흐름 특성에 대한 충분한 연구가 필요하다. 사실 Manning[14,15]에 나타나 있듯이 Manning의 공식은 비교적 흐름이 잘 통제되는 인공수로에서도 그 정확성이 낮다. Chow[11]은 Manning의 조도계수를 수심의 함수로 조정할 것을 추천하기도 하였다. 과거의 이러한 개수로 마찰계수 및 손실수두 산정에 관한 연구는 약 100년 전에 이루어졌던 연구결과를 기반으로 여전히 사용 중이거나 그 물리적 해법의 어려움으로 인해 연구가 활발히 진행되고 있지 않다. 점점 발달하고 복잡해지는 수자원 시설물의 안전한 설계와 운영과 관리를 위해서는 보다 정확한 마찰계수의 산정에 관한 연구가 바탕이 되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 확률론적 엔트로피 개념과 수리학적 특성을 반영시켜 하나의 이론공식을 새롭게 제안하였다. 이러한 이론에 근거한 공식은 경험식에 비하여 높은 신뢰성을 기대할 수 있다. 산정된 값의 정확성을 검증하기 위해 매끄러운 수로와 거친 수로에 대한  $f-Re$  관계를 비교하여 나타내었다. 본 공식을 활용한 결과는 이론적 배경을 바탕으로 물리적 인자를 함께 포함하는 유도된 공식을 바탕으로 마찰계수  $f$ 를 직접적으로 산정하였다. 이 결과 에너지 경사를 사용하지 않으면서도 매우 높은 정확성을 가진 마찰계수  $f$ 의 산정이 가능함을 보여주었다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 개수로 $f$ 와 $Re$ 의 관계

유명한 Darcy-Weisbach[12]의 마찰손실계수 공식은 아래의 식 (1)과 같다.

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 마찰계수,  $h_f$ 는 마찰손실수두,  $D$ 는 관수로의 직경,  $L$  주어진 구간 길이,  $v$ 는 평균유속,  $g$ 는 중력가속도를 의미한다.

여기서,  $D$ 가  $4R$  (동수반경)이고 에너지 경사는  $S = h_f/L$ 이므로, 그림 위의 공식은 다음과 같이  $f$ 의 항으로 다시 쓸 수 있다.

$$f = \frac{8gRS}{V^2} \quad (2)$$

이 공식은 개수로에서 uniform 혹은 거의 uniform에 가까운 흐름에서 적용되어 질 수 있다. 그 이유는  $S$ 가 에너지경사이므로 실제로 부등류나 부정류 흐름에서는 그 값을 정확하게 산정하기 어렵다.

그리고 매끄러운 관에서  $f-Re$ 의 관계는 Blasius[3] 식에 의해서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$f = \frac{0.223}{Re^{0.25}} \quad (3)$$

여기서,  $Re$ 는 Reynold's number를 뜻한다.

이 공식은  $Re$  값이 750에서 2500사이일 때 유효하다는 제한이 있다.

더 높은  $Re$  값에 대해서는 von Karman[24]는 Nikuradse[19]가 측정했던 데이터에 더욱 정확하게 일치하는 Prandtl[20]에 의해 수정되어진 일반적인 표현식을 개발했다. 그 결과에 따른 Prandtl-von Karman 공식 [20,24]은 식 (4)와 같다.

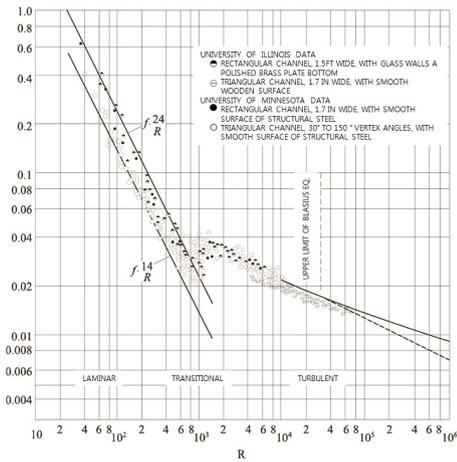
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(Re \sqrt{f}) + 0.4 \quad (4)$$

따라서 위의 공식들을 사용하여 개수로 실험에 의한  $f-Re$  관계를 수립할 수 있다.

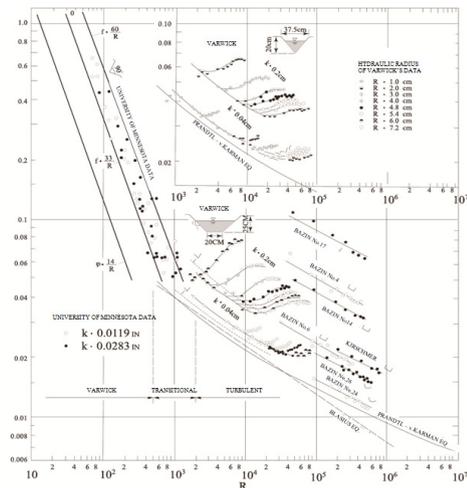
하지만 개수로 흐름에 있어  $f-Re$  관계는 수로 내 자유수면, 경심, 유량 및 수면경사 등에 의하여 복합적으로 영향을 받기 때문에 관수로에서의  $f-Re$  관계와는 다르다. Fig. 1은 Ryu et al.[21]에 수록된 매끈한 수로와 거친 수로 내 흐름에 대한  $f-Re$  관계를 해외 여러 실험자료를 분석하여 표시한 것이다.

위의 연구들의 단점은 경험식에 기반하고 있으며 특히, 개수로에서 정확한 산정이 어려운 에너지경사를 사용해야 한다. 또한  $Re$ 의 범위에 따라 공식을 다르게 적용해야 한다. 그리고 Prandtl-von Karman의 공식[20,24]의 경우 수로바닥에서 유속이 0이라는 것을 사실을 재현하지 못하는 공식의 근본적인 오류가 있으므로 이를 바탕으로 유도된 공식 (4)를 그대로 사용하기에는 불확실성이 있다.

본 연구에서는 이론을 바탕으로 이러한 흐름특성과 개수로 조건을 잘 반영할 수 있는 새로운 마찰계수 산정 공식을 다음 2.2절에서 유도하였다.



(a)



(b)

Fig. 1. The relationship between  $f$  and  $Re$  for flow conditions[19]  
(a) smooth channel (b) rough channel

## 2.2 확률론적 엔트로피 이론에 따른 새로운 마찰계수 산정공식 유도

수리분야에서 엔트로피 이론의 적용에 대한 자세한 이론 및 유도는 Chiu가 제안한 Chiu의 2차원 유속공식에 대한 다양한 논문에서 잘 나타나있다. 따라서 엔트로피 확률론적 유속공식 유도를 위한 이론의 핵심 요약과 함께 본 논문에서 새롭게 유도된 공식에 대한 유도과정을 나타내었다.

Chiu의 확률론적 엔트로피 유속공식은 기본적으로 수리적 물리대개변수와 확률개념의 결합에서 출발한다. Chiu[5,6,7]의 논문에서 아래의 식 (5)을 제안하였다.

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln \left[ 1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] \quad (5)$$

여기서,  $u$ 는 2차원 좌표계  $\xi$ 에서의 등유속,  $u_{\max}$ 는 최대유속,  $M$ 은 엔트로피 파라미터,  $\xi_{\max}$ 는  $\xi$ 의 최대값,  $\xi_0$ 는 수로바닥에서 발생할 수 있는  $\xi$ 의 최소값을 의미하고 2차원 좌표계는 아래의 Fig. 2와 같다.

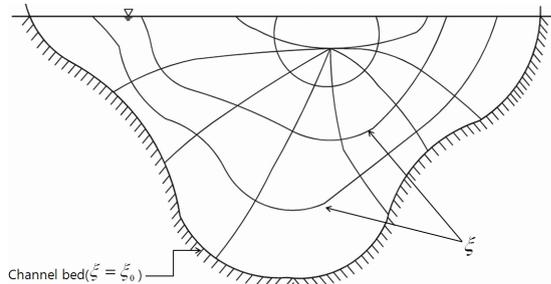


Fig. 2. The  $\xi$  coordinate system for the 2-D open channel[7,8]

유속확률밀도함수는 식 (6)과 같다.

$$p(u) = \exp(\lambda_1 - 1 + \lambda_2 u) = \exp(a_1 + a_2 u) \quad (6)$$

이 확률밀도함수를 엔트로피 제약요소인 식 (7)과 (8)에 대입하여 엔트로피 평균유속공식인 식(9)을 유도할 있다.

$$\int_0^{u_{\max}} p(u) du = 1 \quad (7)$$

$$\int_0^{u_{\max}} u p(u) du = \bar{u} = Q/A \quad (8)$$

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

위와 같은 기본적인 엔트로피 이론을 바탕으로 아래와 같이 새로운 마찰계수 산정공식을 유도하였다.

우선, 수로바닥의 평균전단응력은 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{\tau}_0 = \mu \left[ \frac{1}{h_{\xi_0}} \right] \left[ \frac{du}{d\xi} \right]_{\xi=\xi_0} \quad (10)$$

여기서  $\mu$ 는  $\bar{\tau}_0$ 는 평균바닥전단응력, 점성계수,  $h_{\xi_0}$ 는 scale 계수를 의미한다.

식(10)과 식(7)과 (8), 그리고 식(9)를 유도한 결과를 대입하여 정리하면 식(11)과 같게 된다.

$$\therefore e^{a_1} = \frac{\mu}{h_{\xi} \rho R_h S_f} = \frac{vg R_h S_f}{\bar{h}_{\xi}} \quad (11)$$

이러한 식 (11)을 식 (9)에 대입하여 정리하면 아래의 식 (12)와 같이 새로운 평균유속공식을 유도할 수 있다 [10].

$$\bar{u} = \frac{\bar{h}_{\xi} u_*^2 [Me^M (e^M - 1)^{-1} - 1]}{\nu (e^M - 1)} \quad (12)$$

이 공식을 마찰계수의 항으로 정리하면 최종적으로 개수로 마찰계수 산정공식인 식 (13)을 유도할 수 있다.

$$f = \frac{8\nu}{u D (Me^M - e^M + 1)(e^M - 1)^{-2}} \quad (13)$$

여기서,  $D$ 는 수심,  $M$ 은 엔트로피 파라미터,  $\nu$ 는 동점성계수,  $\bar{u}$ 는 평균유속을 의미한다. 즉 본 공식은 손쉽게 구할 수 있는 수리학적 매개변수를 바탕으로 언제든 지 정확한 마찰계수  $f$ 를 산정할 수 있는 장점을 가진다.

### 3. 실험데이터

유도된 공식의 정확성을 증명하기 위해서 사각단면을 가진 개수로에서 측정된 데이터를 바탕으로 마찰계수를 산정하고 그 결과를 Fig. 1의 결과와 비교하였다. 먼저 사각단면에서 측정된 데이터는 Song[22]에서 측정된 자료를 사용하였다. 유속측정은 Fig. 3과 같은 수로의 L1 지점에서 ADVP(Acoustic Doppler Velocity Profiler)를 사용하였으며, 폭은 0.6m, 길이는 16.8m, 높이는 0.8m의 제원을 가지고 있다. 바닥은 스틸, 벽면은 유리재질로서 매끈한 수로로 볼 수 있다. 25%, 0.5%, 1%로 바닥경

사 조건을 변화시키며 등류조건에서 총 3세트로 측정하였다.

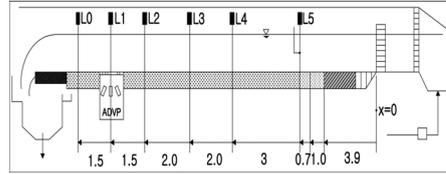


Fig. 3. The longitudinal section of the measurement open channel

### 4. 엔트로피 파라미터 M의 산정

식 (13)을 활용하기 위해서는 무엇보다도 엔트로피 파라미터  $M$ 의 산정이 필요하다. 실제로 엔트로피 파라미터  $M$ 의 산정은 다양한 논문에서 다양한 방법으로 연구가 이루어져 왔으나 대부분 경험 혹은 추정에 의존하였다. 그 이유는 대부분의 논문에서 엔트로피 파라미터를 산정하기 위해서 식 (5)와 식(9)를 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. Moramarco, T. et al.[17]의 논문에서는 Upper Tiver Riverbasin에서 측정된 평균유속과 최대유속의 데이터를 이용하여 식 (9)를 이용하여  $M$ 값을 산정하였고 이  $M$ 을 이용하여 식(5)에 대입하여 유속분포를 산정하는 연구를 수행한 바 있다. Moramarco, T. et al.[18] 논문에서는 Chiu의 이론과 Manning공식, Prandtl-von Karman 대수법칙을 대입 및 유도하여 하여  $\phi(M)$ 을 구하는 공식을 제안한 바 있으나 최대유속이 발생하는 지점과 하천바닥에서 유속이 0이 발생하는 가상의 거리  $y_0$ 를 명확히 산정하기 힘들다는 단점을 가지고 있다. 여기서  $y_0$ 는 대수법칙의 단점인 하상바닥을 0으로 대입할 때 발산한다는 약점을 보완하기 위한 가상의 거리이다.

따라서, 본 논문에서는 Choo et al.[9]에서 개발한 식 (12)를 통한 방법으로 엔트로피 파라미터  $M$ 을 산정하였다. 자세한 내용은 Choo의 논문에서 찾을 수 있으며 이 방법의 장점은 불확실한 최대유속을 사용하지 않고 언제든 지 그 하천의 엔트로피 파라미터를 구할 수 있다는 데에 있다.

각각 산정된 엔트로피 파라미터  $M$ 과  $Re$ 는 아래의 Fig. 4와 같은 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 엔트로피 파라미터  $M$ 은  $Re$ 가 증가하면 할수록 함께 커지는 특성을 보인다. 이를 통해 일반적으로 알고 있는 마찰계수  $f$ 와  $Re$ 의 특징인  $Re$ 가 증가할수록 그 값이 작아지는 특성과는 반대의 경향을 보임을 알 수 있었다.  $Re$ 의 값을 바탕으로 두 흐름은 난류 흐름임을 알 수 있다.

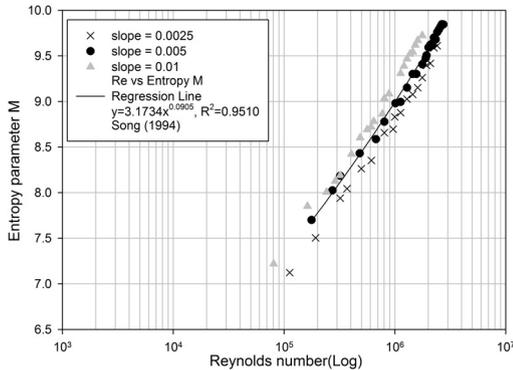


Fig. 4. The relationship of friction coefficient  $f$  and Reynolds number of the estimated open channel

### 5. 결과분석

위의 Fig. 4와 같이 산정된 엔트로피 파라미터  $M$ 을 식 (13)에 대입하여 개수로의 마찰계수  $f$ 를 산정하였다. 산정된  $f-Re$ 의 관계는 위의 Fig. 1과 같은 형식으로 아래의 Fig. 5와 같이 나타내었다.

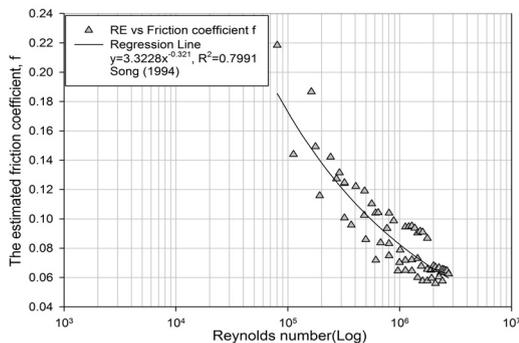


Fig. 5. The relationship of friction coefficient  $f$  and Reynolds number of the estimated open channel

마찰계수는  $Re$ 가 커지면 커질수록 그 값이 줄어드는 경향을 사각단면에서 동일하게 보여주고 있음을 알 수 있다. 그리고 아래의 Fig. 6에서는 반대로 마찰계수는 유량이 커지면 커질수록 그 값이 줄어드는 경향을 보여주고 있다. 이는 일반적인 수리학에서 매우 타당한 것으로 실제로 Manning의  $n$  값 역시 동일한 경향을 보여준다 [10].

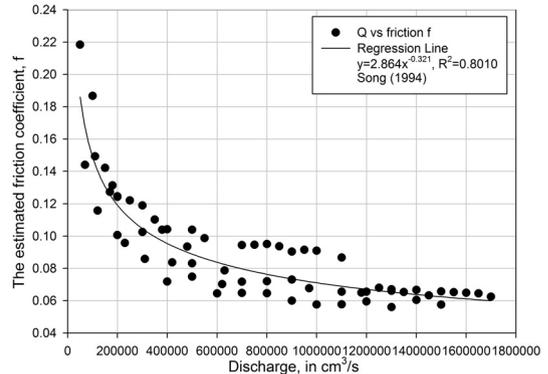


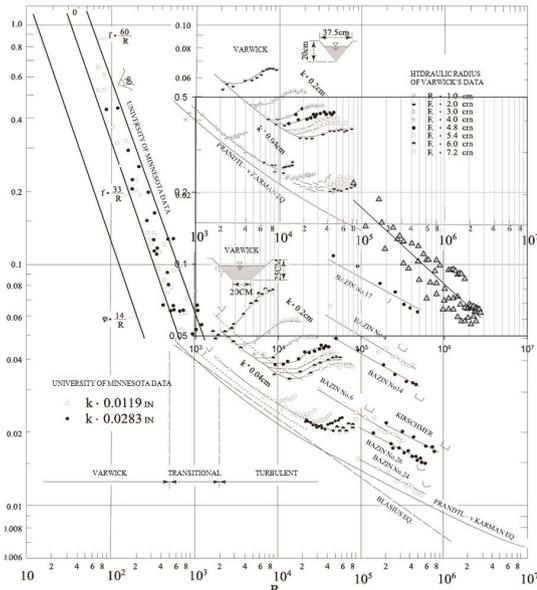
Fig. 6. The relationship of friction coefficient  $f$  and discharge rate of the estimated open channel

위의 결과들을 정리해보면 다음과 같이 요약할 수 있다. 엔트로피 파라미터  $M$ 은  $Re$ 에 비례하고 마찰계수는  $Re$ 와 유량에 반비례함을 알 수 있다.

이를 앞의 Fig. 1과 y축과 x축의 축척을 맞추어 겹쳐서 보면 아래의 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 Song의 사각단면에서 자료를 바탕으로 산정된 마찰계수의 값은 Fig. 5와 같이 삼각형 점 형상으로 표시하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 과거 경험적으로 측정된 마찰계수 값과 본 공식을 통해 산정된 마찰계수의 값이 적절하게 대응하고 있음을 알 수 있다. 즉, 본 공식을 통해 산정된 마찰계수의 값은 개수로 조건에서 경험적 매개변수가 아닌 이론적인 공식을 바탕으로 정확하게 산정할 수 있다는 의의를 가진다. 각각의 결정계수 및 회귀식은 아래의 Table 1과 같다.

**Table 1.** The regression line and R-square for the relationship between M, F, and Q

Division		Regression Equation	$R^2$
Entropy Parameter M and $Re$	Song (1994)	$y = 3.1734x^{0.0905}$	$R^2 = 0.951$
Friction factor $f$ and $Re$	Song (1994)	$y = 3.3228x^{-0.321}$	$R^2 = 0.7991$
Friction factor $f$ and Discharge Q	Song (1994)	$y = 2.864x^{-0.321}$	$R^2 = 0.801$



**Fig. 7.** The comparison between empirical and calculated friction coefficient

### 6. 결론

개수로에서 마찰계수  $f$ 의 산정은 그 중요성에도 불구하고 여전히 약 100여 년 전의 연구결과를 활용하고 있으며 그 물리적 해법의 난해성으로 인해 연구가 더딘 상태에 있다. 하지만 관수로와 마찬가지로 정확한 흐름의 해석을 위해서는 이러한 마찰계수가 정확히 산정되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 확률론적 엔트로피를 활용한 Chiu의 2차원 유속공식을 활용하여 새로운 마찰계수 산정공식을 제안하였다.

본 공식의 장점은 개수로에서 측정 혹은 산정이 어려운 에너지경사의 항을 소거하여 그 적용이 간단하면서도 이론적 근거를 바탕으로 매우 뛰어난 정확성을 보임에 있다. 등류 조건에서는 하상경사를 측정하면 이를 에너지 경사와 동일하게 볼 수 있으나 실제 하천 혹은 개수로 흐름에서는 대부분 부등류 혹은 부정류 흐름임을 알 수 있다. 사각단면에서 측정된 자료를 바탕으로 제안된

공식을 활용하여 엔트로피 파라미터 M과 마찰계수  $f$ 를 산정하였고 엔트로피 파라미터는  $Re$ 수에 비례하고 마찰계수는  $Re$ 수와 유량에 반비례함을 알 수 있었다. 거친 수로에서의 과거의 경험적 연구결과와 축적을 맞추어 비교한 결과 사각단면의 흐름에서 발생할 수 있는 범위 내로 적절한 마찰계수의 산정이 가능함을 보여주었으며 결정계수는 0.7991로 분석되었다.

따라서 다양한 단면형상과 실험실 수로 및 자연하천에서 측정된 데이터를 수집하여 지속적으로 본 연구가 수행된다면 본 공식을 통한 값이 개수로의 흐름해석 혹은 수리적 구조물 설계에 적극 활용될 것으로 판단된다.

### References

- [1] Bazin, H.E. "Recherches experimentales sur lecoulement de leau dans les canaux decouverts", Memoire presentes par divers savants al academie des sciences, Paris Vol. 19, 1865.
- [2] Bazin, H.E. "Etude d'une nouvelle formule pour calculer le debit des canaux decouverts" Memoire 41, Annales des ponts et chaussées, 7th series, Vol. 14, pp.20-70, 1897.
- [3] Blasius, H. Das "Ahnlichkeitsgesetz bei reibungsvorgangen in flussigkeiten" (The law of similitude for frictions in fluids), Forschungsheft des vereins deutscher ingenieure, No.131, Berlin, 1913. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-02239-9\\_1](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-02239-9_1)
- [4] Chezy, A. "Thesis on the velocity of the flow in a given ditch. des Ponts et Chaussées", Library in France, 847, Ms 1915, 1775.
- [5] Chiu, C.-L. "Three-dimensional open channel flow", Journal of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 104 No.8, pp.1119-1136, 1978.
- [6] Chiu, C.-L. "Entropy and probability concepts in Hydraulics", Journal of Hydraulic Engineering, 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))
- [7] 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.  
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))
- [8] Chiu, C.-L. "Velocity Distribution in open channel flows", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 115, No.5, pp.576-594. 1989.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1989\)115:5\(576\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:5(576))
- [9] 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 : pp. 247-256, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-012-1952-0>
- [10] Choo, T.H., Chae, S.K., Yoon, H.C., Choo, Y.M. "Discharge prediction using hydraulic characteristics of mean velocity equation", Environmental Earth Science, 71, pp. 675-683, 2014.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-013-2468-y>
- [11] Chow, V.T. "Open channel hydraulics", Mcgrow-Hill, Singapore, 1986.
- [12] Darcy, H. and H. Bazin, "Recherches Hydrauliques", Enterprises par M. H. Darcy, Imprimerie Nationale, Paris, 1865.
- [13] Ganguillet, E. and Kutter, W.R. "An investigation to establish a new general formula for uniform flow of water in canals and rivers", Zeitschrift des oesterreichischen ingenieur und architekten vereines, Vol. 21, No. 1, pp. 6-25; No. 2-3, pp. 46-59 1869.
- [14] Manning, R. "On the flow of water in open channels and pipes", supplement to 1889 paper, Trans. Inst, Civil Eng. Ireland,24, pp.179-207, 1895.
- [15] Manning, R. "On the flow of water in open channels and pipes", Trans. Inst, Civil Eng. Ireland,20, pp.161-195 1889.
- [16] Moody, L. F., "Friction factors for pipe flow", Transactions of the ASME, Vol. 66, 1994.
- [17] Moramarco T, Saltalippi C, Singh VP "Estimation of mean velocity in natural channel based on Chiu's velocity distribution equation", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 9, No.1, pp. 42-50, 2004.
- [18] Moramarco T and Singh VP "Formulation of the entropy parameter based on hydraulic and geometric characteristics of river cross sections" Journal of Hydraulic Engineering Vol. 15, No. 10, pp. 852 - 858, 2010.
- [19] Nikuradse, J. "Gesetzmässigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren" (Laws of turbulent flow in smooth pipes), Forschungsheft des Vereins deutscher Ingenieure, No. 356, Berlin, 1932.
- [20] Prandtl, L. "The mechanics of viscous fluids, in W.F. Durand (editor-in-chief):Aerodynamic Theory", Springer-Verlag, Berlin, vol.III, div. G, pp. 142, 1935.
- [21] Ryu HJ, Kim JH, Lee BH, Lee WH, Jang IS, H bk, "Choisin hydrography", Donghwa, 2007.
- [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.
- [23] Varwick, F. "Zur fliess formel fur offene kunstliche gerinne, These inedited", Dresdenuniversity. 1945.
- [24] von Kármán, T. "Mechanische Ähnlichkeit und turbulenz" (Mechanical similitude and tubulince), Proceedings of the 3d International Congress for Applied Mechanics, Stockholm, vol. I, pp. 85-93, 1930.
- [25] Yu, K.K. "Particle tracking of suspended- sediment velocities in open channel flow", Ph.D. thesis, Civil and environmental engineering, University of Iowa, 2004.

### 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>

댐, 수리수문, 하천, 방재

### 곽 길 신(Kwak kil Sin)

[정회원]



- 2002년 2월 : 밀양대학교 토목공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 부산대학교 산업토목학과 (공학석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

<관심분야>

수리수문, 하천

**윤 관 선(Gwan Seon Yun)**

[정회원]



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

<관심분야>

댐, 수리수문, 하천

---

**윤 현 철(Hyeon Cheol Yoon)**

[정회원]



- 2012년 2월 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 (공학박사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 생산기술연구소 박사후연구원

<관심분야>

방재, 수리수문, 하천