

엔트로피 이론 기반의 유사농도 인자 산정

김영식¹, 남윤창¹, 전해성¹, 전근학¹, 추연문^{2*}

¹부산대학교 사회환경시스템공학과

²부산대학교 생산기술연구소

Estimation of Sediment Concentration Factor based on Entropy Theory

Yeong-Sik Kim¹, Yoon-Chang Nam¹, Hae-Sung Jeon¹,
Kun-Hak Jeon¹, Yeon-Moon Choo^{2*}

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

²Research Institute of Industrial Technology, Pusan National University

요약 현재 자연 하천의 유사농도의 측정에 있어서 실제 측정은 기상 조건에 영향을 받으며, 기계적 한계로 인해 하천 바닥에 인접한 소류사 구간의 유사농도 측정값은 부유사 구간의 유사농도 측정값 보다 신뢰도가 낮다. 그리하여, 하천의 바닥농도는 이론식을 통해 산정되어왔으나, 기존 유사농도 계산 공식들의 바닥농도 산정값은 실측값에 비해 신뢰도가 낮고 서로 다른 공식 간의 차이는 여러 조건에 따라 천차만별이다. 따라서 하천의 바닥농도를 산정하기 위해 보다 신뢰성이 높은 공식이 요구되고 있다. 본 연구는 하천의 유사농도에 정보엔트로피이론을 적용하여 유사농도분포와 평균유사농도의 결정방법을 제시하고 평균유사농도와 바닥농도의 관계를 통해 바닥농도를 산정하는 방법을 제시하였다. 유사농도분포의 확률은 제약조건하에 계산된 최대 엔트로피에 의해 일정한 확률분포를 나타내게 되고, 이러한 관계에 근거하여 유사농도분포, 평균유사농도 그리고 바닥유사농도 간의 관계를 유도하고 측정 표본을 통해 바닥 유사농도를 산정할 수 있다. 본 연구의 이론 검증을 위해 과거 실험의 유사농도 측정값을 사용하여 유도된 유사농도분포와 평균유사농도 공식을 적용하였으며, 유도된 두 공식의 관계를 이용하여 대표 농도변수(EN : Equilibrium N)를 도출하였다. 대표 농도변수를 통해 산정한 점 농도는 실측값과 결정계수가 평균적으로 $R^2=0.924$ 의 높은 신뢰도를 보였다. 이를 통하여, 실제 하천의 부유사 구간과 소류사 구간의 유사농도의 전체 경향을 보다 쉽게 파악하고 평균유사농도와 바닥농도의 관계를 이용하여, 신뢰도가 확보된 바닥농도를 손쉽게 산정할 수 있다.

Abstract Current methods of measuring the sediment concentration of natural streams can be affected by weather conditions and have lower reliability in bed-load sections due to mechanical limits. Theoretical methods have to be used to solve this problem, but they have low reliability compared to the measured values and diverse results for the bed-load sediment concentration. This study proposes a new way to reliably determine the bed-load sediment concentration from the relation with theoretical depth-integrated concentration based on the informational entropy concept. Sediment distribution shows a uniform probability distribution under maximized entropy conditions under some constraints, so a function can be calculated for the sediment distribution and depth-integrated concentration. The parameters of a stream were estimated by a nonlinear regression method using the concentration data from a past experiment. Equilibrium N (EN) was estimated using the relation between two different formulas proposed in this study, which can ease the estimation of both the total sediment distribution and depth-integrated sediment concentration with high reliable results with an average R^2 of 0.924.

Keywords : Informational Entropy, Probability, Bed-Load Sediment Concentration, Depth-Integrated Concentration, Sediment Concentration Distribution

*Corresponding Author : Yeon-Moon Choo(Pusan Nat'l Univ.)

email: chooyean@naver.com

Received September 9, 2020

Accepted October 5, 2020

Revised September 28, 2020

Published October 31, 2020

1. 서론

하천공학에서의 유사농도는 유량과 함께 하천 유사량의 지표로서 총적하천의 수질 관리, 하상변동 예측, 저수지 퇴사량 추정, 유사 유출량 추정, 하도 계획과 설계, 유사조절 계획 수립 등에서 필수적인 역할을 한다. 유사량의 계산은 크게 직접 현장에서 측정하여 계산하는 방법과 이론적 공식을 통해 유도하는 방법이 있다. 현장 측정법은 부유사에 한해 높은 신뢰도를 가지지만 시간적, 경제적 비용이 비싸고 기상 조건에 영향을 받으며, 소류사 구간, 즉, 바닥 유사량 측정에 있어 기계적 한계를 가진다. 한편 유사량의 이론적 공식은 소류사 구간의 유사량 계산에선 Meyer-Peter-Muller[1], Rijn[2]공식이, 총유사량 계산에선 Engelund-Hansen[3], Yang[4], Browline[5]공식 등이 비교적 높은 신뢰도를 가지고 있다. 현재까지도 하천 유사량과 관련된 많은 공식이 제시되고 있지만, 이론적 공식은 현장에서의 검증이 어렵고 여러 조건에 의해 이론적 계산으로 도출된 유사량이 공식마다 천차만별이기 때문에 하천 환경에 따라 이론적 공식을 선택적으로 활용하여야 한다. 따라서 현장 측정의 한계성을 보완함과 동시에 하천 환경에 관계없이 높은 신뢰도를 가지는 이론적 공식 개발은 필연적이다.

한편, 최근 수리학과 수문학의 다양한 분야에서 가변적인 하천 인자를 산정하기 위해 확률 개념과 엔트로피 이론을 활용하고 있다. 해외에서는 수문 자료의 불확실성에 정보엔트로피 개념을 도입한 Chapman[6], 개수로 내의 점유속을 확률변수로 대입하여 2차원 유속분포와 평균유속을 산정한 Chiu [7-13], 하천 수계의 평균 고도를 정보엔트로피로 규명한 Fiorentino[14]이 있으며, 국내 연구에서도 하천 경사와 정보엔트로피를 이용한 하천 종단고도 결정[15], 지형특성인자 산정[16], 정보엔트로피 기반 등류 및 부등류의 전단응력 산정 [17]과 같이 활용 사례를 찾아볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 유사농도의 현장 측정법과 이론적 산정법의 한계점을 극복하기 위해 지점 유사농도를 확률변수로 대입하여 정보엔트로피 식을 나타내고 제약조건을 통하여 유사농도분포 곡선과 평균유사농도, 바닥농도를 산정하는 공식을 제안하였다. 그리고 공식의 효용성을 입증하기 위해 COLEMAN, N. L. [18-19] 수로 실험의 농도분포 자료를 사용하였다.

2. 공식 유도

정보의 내용을 최대화하는 이론을 Shannon(1948)이 최초로 제안하였다. 변량 x 와 관련된 정보 $I(x)$ 는 식 (1)와 같이 양으로 나타내며, 정보의 양을 제공한다. 즉 어떤 Event(states)와 관련된 불확실성(uncertainty)의 척도(a measurement)를 의미한다.

$$I(x) = \ln p(x) \quad (1)$$

따라서 모든 Event(states)에 대한 $H(x)$ 여 고려한다면, 정보 $I(x)$ 의 평균값은 식 (2)와 같이 정의된다. Shannon(1948)이 함수에 의한 엔트로피를 최초로 정의하였다.

$$\begin{aligned} H(x) &= - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \cdot I(x) dx \\ &= - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \cdot \ln p(x) dx \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $p(x)$, $\ln p(x)$ 는 차원이 없지만, dx 는 차원을 가지므로 $H(x)$ 는 dx 와 같은 차원이라는 점에 특히 주의해야 한다. x 의 범위에 따라 값은 -이다. 식(2)는 연속적인 상태변량 x 에 대한 확률밀도함수 $p(x)$ 라 하면, x 에 대한 불확실성을 나타내는 엔트로피를 최대화를 의미한다.

엔트로피를 최대화하려는 확률분포는, 알고 있는(취득된) 기본정보(지식)가 가지는 확률분포보다 더 큰 정보를 만드는 분포를 의미한다. 따라서 확률분포함수를 풀기 위해서는, 식(3)과 같이 변량 x 에 관하여 이용 가능한 정보인 평균값, 분산, 왜곡도 등과 같은 제약조건들을 이용하는 것이다.

$$\int_a^b \Phi_i(x, p) dx \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

따라서 엔트로피를 최대화하는 확률밀도함수 $p(x)$ 는 식 (4)와 같이 Method of Lagrange을 이용하면, 구할 수 있다.

$$\frac{\partial I(x, p)}{\partial p} + \sum_{i=0}^n \lambda_i \cdot \frac{\partial \phi_i(x, p)}{\partial p} = 0 \quad (4)$$

여기서 λ_i 는 Lagrange multipliers 이다.

따라서 위와 같은 엔트로피 개념을 유사농도에 적용한, 엔트로피 최대화는 식 (5)과 같다.

$$\begin{aligned} H(c) &= - \int_{c_D}^{c_0} p(c) \cdot I(c) dc \\ &= \int_{c_D}^{c_0} p(c) \cdot \ln p(c) dc \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $I(c) = -\ln p(c)$ 이다.

에 c 관하여 이용 가능한 정보인 평균값 등과 같은 아

래 제약조건들을 이용하는 것이다. 단, c_0 는 바닥농도, c_D 는 수표면 농도이다.

$$\int_{c_D}^{c_0} p(c)dc = 1 \tag{6}$$

$$\int_{c_D}^{c_0} c.p(c)dc = \bar{c} \tag{7}$$

특별히 위 식에서 주어진 독립적인 제약조건들을 함께 정리하면 식(8)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\int_a^b \Phi_i(c, p)dc \quad i = 1, 2 \tag{8}$$

따라서 엔트로피를 최대화하는 확률밀도함수 $p(c)$ 는 식 (9)와 같이 Method of Lagrange를 이용하면, 구할 수 있다.

$$\frac{\partial I(c,p)}{\partial p} + \sum_{i=1}^2 \lambda_i \frac{\partial \phi_i(c,p)}{\partial p} = 0 \tag{9}$$

여기서,

$$I(c,p) = p(c) \cdot \ln p(c) \tag{10}$$

$\phi_1 = p(c)$, $\phi_2 = c.p(c)$, 가 된다.

$$\frac{\partial \phi_1(c,p)}{\partial p} = 1 \tag{11}$$

$$\frac{\partial \phi_2(c,p)}{\partial p} = c \tag{12}$$

식(9)에 식(11)과 (12)을 대입정리하면 식 (13)가 된다.

$$-1 - \ln p(c) + \lambda_1 + \lambda_2 c = 0 \tag{13}$$

여기서 $\lambda_1 - 1 = a_1$, $\lambda_2 = a_2$ 라고 하고, 식(13)에 대입 정리하면 농도의 확률밀도함수 식(14)이 된다.

$$p(c) = e^{b_1 + b_2 c} \tag{14}$$

대부분의 하천 흐름에 적용하는 경우는 식 (15)와 같은 누가확률함수를 사용한다.

$$F(c) = \int_{c_D}^c p(c)dc = 1 - \frac{a}{A} \tag{15}$$

$$= 1 - \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} = 1 - \xi$$

여기서

$$\xi = \frac{y}{D-h} e^{1 - \left(\frac{y}{D-h}\right)}$$

로, D는 수심, h는 최대 유속구간으로 Chiu [7-13]가 제안한 크샤이 좌표계이며 예시는 다음 Fig. 1과 같다.

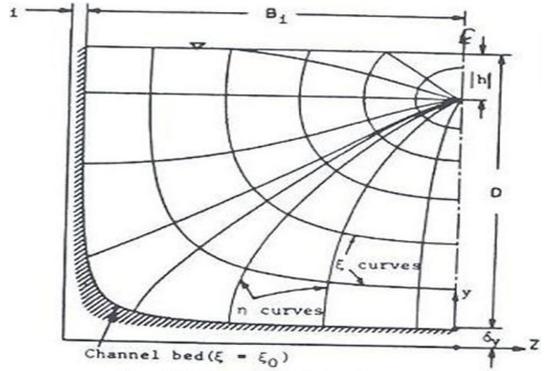


Fig. 1. $\xi - \eta$ coordinates in open-channel sections (Chiu, [7-13])

확률밀도 함수식(14)을 식(7)에 대입정리하면 식 (8)와 같이 된다.

$$c = \frac{1}{b_2} \ln \left[e^{b_2 c_D} + \frac{b_2}{e^{b_1}} \cdot (1 - \xi) \right] \tag{16}$$

확률밀도함수인 식(14)을 식(6)에 대입정리하면 식 (17)을 얻을 수 있다.

$$\frac{b_2}{e^{b_1}} = (e^{b_2 c_0} - e^{b_2 c_D}) \tag{17}$$

그리고, $N = b_2 \cdot c_0$ (통상 농도엔트로피 계수라고 함)라 하고, 수표면 농도 $c_D = 0$ 이라 가정할 때, 식(17)을 식(16)에 대입 정리하면 식(18)과 같고, 이를 Choo의 유사농도분포 공식이라 한다.

$$c = \frac{c_0}{N} \ln [e^N - (e^N - 1) \cdot (\xi)] \tag{18}$$

따라서 유사농도와 관련된 2개의 매개변수인 c_0 과h, 엔트로피 계수인 N 을 알면 유사농도분포를 구할 수 있다. 또한, 식(18)를 적분하면 식(19)과 같이 1차원 수심 평균유사농도를 구할 수 있다.

$$\bar{c}_V = c_0 \cdot \left(\frac{e^N}{e^N - 1} - \frac{1}{N} \right) \tag{19}$$

식(14)을 식(7)에 대입정리하면 2차원 평균유사농도 식인 식(20)가 된다. 유사농도와 관련된 2개의 매개변수인 c_0 , h와 엔트로피 계수인 N 을 알면 평균유사농도를 산정할 수 있다.

$$\bar{c} = \frac{c_0 \cdot (Ne^N - e^N + 1)}{N(e^N - 1)} \tag{20}$$

또한 이때 평균유사농도와 바닥유사농도의 비를 식

(21)와 같이 정의하고 이것을 $\Phi(N)$ 을 대표 농도변수 엔트로피 계수라 칭한다.

$$\frac{\bar{c}}{c_0} = \frac{Ne^N - e^N + 1}{N(e^N - 1)} = \Phi(N) \quad (21)$$

3. 매개변수산정

매개변수 산정 방법은 실측된 다수의 점 농도 자료를 이용하는 방법이다.

첫 번째로, 유사농도분포식인 식(18)에 실측한 농도 (c_1, \dots, c_n)과 이에 대응하는 수심(y_1, \dots, y_n)을 대입하여 매개변수인 바닥농도(c_0), h 와 N 을 비선형 회귀분석을 통해 산정한다.

한편, 평균유사 농도식(20)에서 유도한 c_0 를 식(22)에 대입하면 다음과 같다.

$$c = \frac{\bar{c}(e^N - 1)}{Ne^N - e^N + 1} \ln[e^N - (e^N - 1) \cdot (\xi)] \quad (22)$$

식 (22)에 농도(c_1, \dots, c_n)과 이에 대응하는 수심 (y_1, \dots, y_n)을 대입하여 매개변수인 평균농도(\bar{c}), h 와 N 를 직접 산정한다.

두 과정을 반복하여 얻은 각각의 바닥농도(c_0)와 평균농도(\bar{c})의 비를 구하고 최소제곱법을 통해 대표 농도변수 엔트로피 계수 $\Phi(N)$ 을 산정하고 $\Phi(N)$ 으로부터 엔트로피 계수 N 을 다시 도출한다. 식의 효용성을 증명하기 위하여 사용된 데이터는 Coleman[18-19]의 개수로 실험의 36회의 농도 실측자료를 사용하였는데 Coleman 실험은 400회 이상의 인용을 통해 신뢰도가 입증되었으며 대표적인 예시로 Sediment transport, part II: Suspended load transport [2]가 있다. 또한, 다른 개수로 실험보다 비교적 농도의 측정 횟수가 많고, 하상으로부터의 농도 측정 높이가 일정하여 분석이 용이하며, 유사농도가 비교적 저농도이기 때문에 안정적인 농도 분포를 이룬다. 따라서 본 연구의 자료로 채택하였다. 제안된 농도분포식과 평균농도식이 실측된 유사농도분포와 평균농도를 잘 표현하는지를 그래프에 도시하고 비교 분석하였고, 두 식의 관계로부터 $\Phi(N)$ 과 N 을 산정하여 실측값과 비교 분석하였다.

4. 적용

4.1 실측자료를 통한 바닥농도와 평균유사농도 산정

Coleman[18-19] 실험의 각 측정값의 부분은 Table 1, Table 2와 같다.

Table 1. Coleman data Run.2, Run.3

Run.	Height from Bed y(m)	Concentration c(m ³ /m ³)	Total Depth D(m)	
2	0.008	0.000850	0.171	
	0.012	0.000640		
	0.018	0.000520		
	0.024	0.000420		
	0.03	0.000370		
	0.046	0.000280		
	0.069	0.000240		
	0.091	0.000140		
	0.122	0.000081		
	0.137	0.000065		
	0.152	0.000050		
	0.162	0.000030		
	0.008	0.68000		0.172
	0.012	0.73800		
0.018	0.79500			
0.024	0.83600			
0.03	0.87000			
0.046	0.92200			
0.069	0.96300			
0.091	1.02500			
0.122	1.04800			
0.137	1.03900			
0.152	1.02800			
0.162	1.02000			

Table 2. Coleman data Run.3, Run4

Run.	Height from Bed y(m)	Concentration c(m ³ /m ³)	Total Depth D(m)	
4	0.008	0.66500	0.171	
	0.012	0.74000		
	0.018	0.80200		
	0.024	0.82900		
	0.03	0.86300		
	0.046	0.92200		
	0.069	0.96500		
	0.091	1.02300		
	0.122	1.04900		
	0.137	1.04800		
	0.152	1.03300		
	0.162	1.02400		
	0.008	0.66200		0.171
	0.012	0.71700		
0.018	0.78800			
0.024	0.81400			
0.03	0.85200			
0.046	0.91100			
0.069	0.96800			
0.091	1.02800			
0.122	1.03800			
0.137	1.04700			
0.152	1.03000			
0.162	1.02700			

위와 같은 데이터와 식 (18), 식 (22)의 매개변수의 비선형 회귀분석을 통해 실측값과 근사한 농도분포를 나타내는 곡선을 그리고, 바닥농도 c_0 , 평균농도 \bar{c} 를 산정한다. Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5는 바닥유사농도분포공식을 통해 나타낸 유사농도 분포이고, Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9은 평균 유사농도 공식에 의해 나타난 유사농도 분포이다.

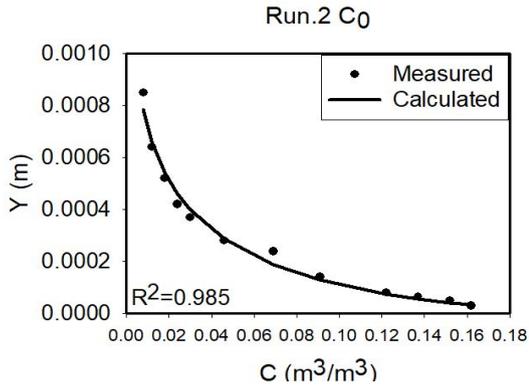


Fig. 2. Run.2 data and concentration function(c_0)

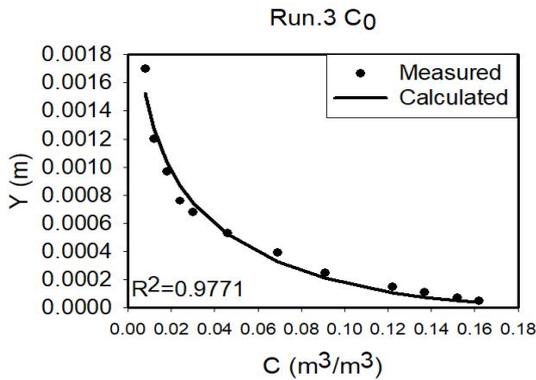


Fig. 3. Run.3 data and concentration function (c_0)

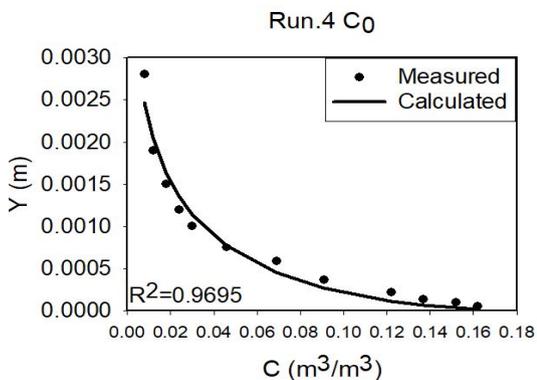


Fig. 4. Run.4 data and concentration function (c_0)

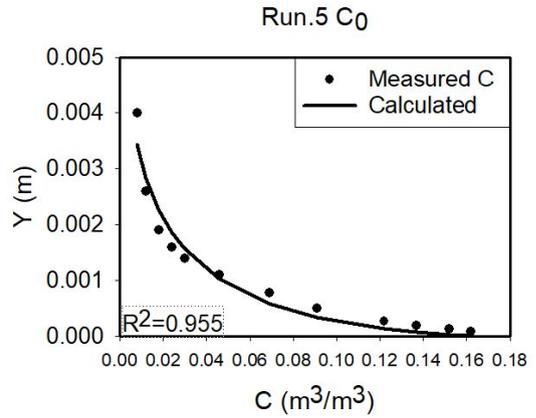


Fig. 5. Run.5 data and concentration function(c_0)

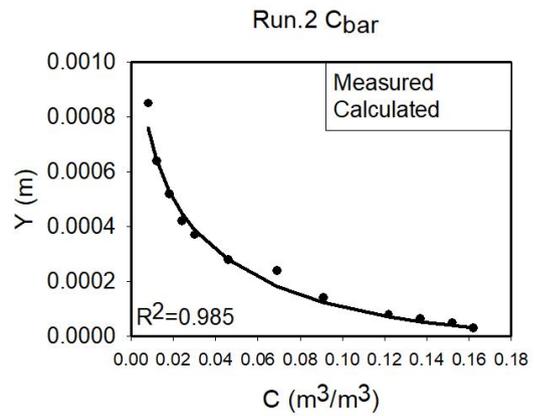


Fig. 6. Run.2 data and concentration function (\bar{c})

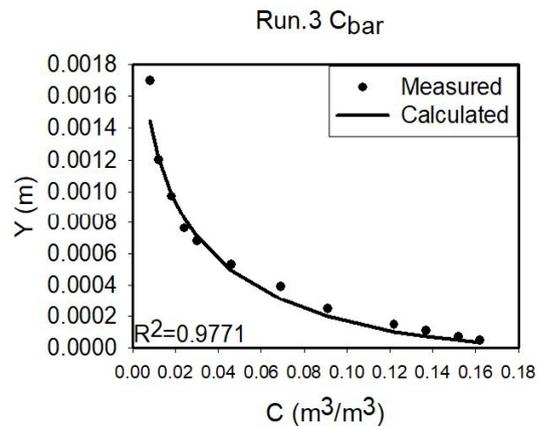


Fig. 7. Run.3 data and concentration function (\bar{c})

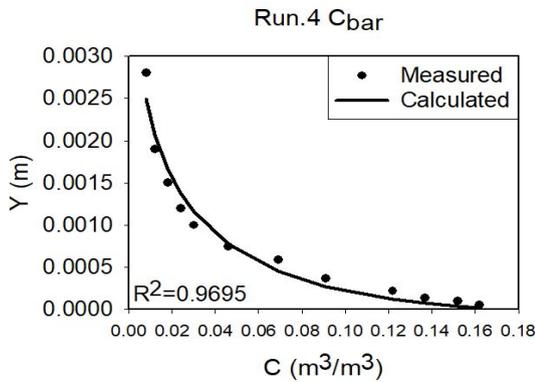


Fig. 8. Run.4 data and concentration function (\bar{c})

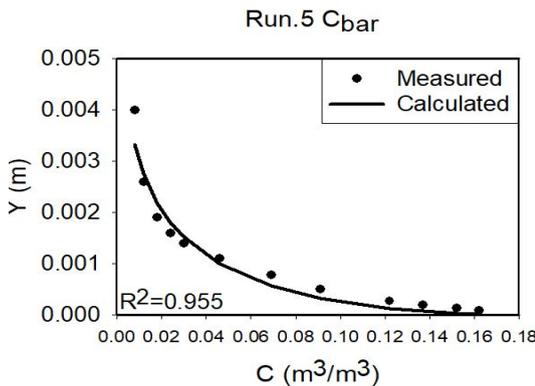


Fig. 9. Run.5 data and concentration function (\bar{c})

실제 측정값과 식 (18), 식 (22) 곡선의 비선형 회귀분석을 통해 매개변수를 산정하였을 때, 농도분포 이론 곡선은 위와 같이 높은 정확도를 보여준다. 정확도의 검증을 위하여 결정계수 R^2 를 이용하였는데, 같은 실험 측정값에서부터 도출된 바닥농도 c_0 의 유사분포 예측 곡선과 평균농도 \bar{c} 의 유사 농도 분포 예측곡선의 R^2 값이 모두 동일한 특징을 보였다. 또한 식 (18), 식(22)의 공통 매개변수인 h 값이 서로 유사하게 산출되었다.

한편 위 분석 결과에서 도출된 바닥농도 c_0 와 평균농도 \bar{c} 는 다음과 Table 3과 같다.

Table 3. Calculated bed-load concentration and depth-integrated concentration

Run.#	2	3	4	5
$c_0 (m^3/m^3)$	0.0029	0.0059	0.0102	0.0145
$\bar{c} (m^3/m^3)$	0.0003	0.0006	0.0011	0.0015

4.2 $\Phi(N)$ 과 대표 농도변수 N 산정

식(21)에서 식 (18), (22)로 산정한 바닥농도와 평균농도는 $\Phi(N)$ 만큼의 기울기를 가지며 선형 비례함을 알 수 있다. 따라서 모든 Coleman 데이터의 측정값을 통하여 바닥농도 c_0 와 평균농도 \bar{c} 를 산정한 뒤, 두 결과의 비를 나타내면 다음 Fig 10과 같다.

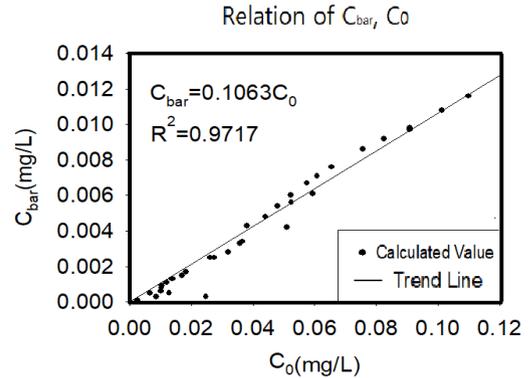


Fig. 10. Ratio between estimated c_n, \bar{c}

위의 그래프의 추세선의 기울기 0.1063으로, 이 값은 Coleman 실험에 사용된 수로의 고유한 $\Phi(N)$ 을 나타낸다고 할 수 있다. $\Phi(N)$ 이 1에 가까울수록 균일한 유사농도를 가진 하천이라 할 수 있다. 다음으로, 식 (21)의 N 과 $\Phi(N)$ 의 관계로부터 개수로의 대표 농도변수인 대표 농도변수 N 을 산정하면 아래 Table 4과 같다.

Table 4. $\Phi(N)$ and Equilibrium N of Coleman Flume

$\Phi(N)$	Equilibrium N
0.1063	-9.370

4.3 대표 농도변수 N 으로부터 바닥농도 c_0 와 평균농도 \bar{c} 산정

위 4.2에서 구한 대표 농도변수 N 을 식 (18)과 (22)에 다시 대입하여 매개변수 N 을 고정한다면, 매개변수의 개수가 두 개(c_0, h 또는 \bar{c}, h)로 줄어들게 되며, 식 (18)과 (22)의 결과의 관계가 아래 Table 5와 같이 명확해진다.

Table 5. Parameters determined by equilibrium N

Run.#	2	3	4	5
Equilibrium N	-9.370			
h	-0.0965	-0.0634	-0.0624	-0.0215
c_0	0.0029	0.0059	0.0102	0.0145
\bar{c}	0.0003	0.0006	0.0011	0.0015

위의 Table 5와 Table 3의 c_0 와 \bar{c} 를 비교하였을 때 동일한 것을 확인할 수 있다. 따라서 대표 농도변수 N 은 식 (18), (22)을 모두 만족하며 실험 회차에 상관없이 결과를 얻을 수 있는 Coleman 수로의 대표 농도변수이다.

4.4 평균농도 실측값과 이론값 비교

Coleman 데이터의 실측 평균농도와 본 연구를 통해 산정된 예측 평균농도를 비교한 그래프는 아래 Fig. 11과 같다.

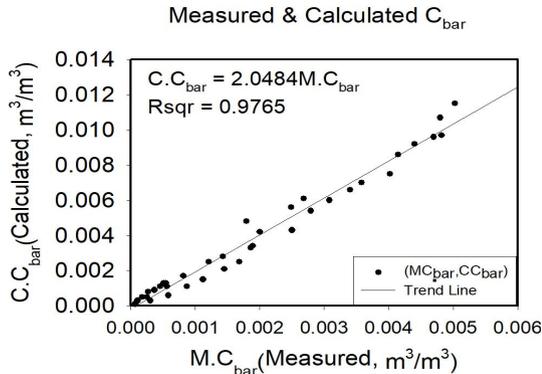


Fig. 11. Ratio of Measured and Calculated \bar{c} 's

Fig. 11에서 나타난 추세선은 측정된 평균유사농도와 공식을 통한 이론값이 $R^2 = 0.9765$ 의 높은 신뢰도를 나타내며 2.0484배의 일정한 비율을 나타냄을 보여준다. 이는 본 연구의 이론적 곡선이 Coleman 자료의 부유사 지점의 측정 농도 자료를 합리적으로 반영하여 실측이 불가능한 소류사 지점의 농도분포를 추가적으로 산정하였기 때문에 본 연구 이론의 평균농도가 측정된 평균농도와 일정한 실수 배를 나타낸다고 추정할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서 이론적인 방법을 통한 신뢰도 높은 하천 바닥농도와 평균농도를 산정하기 위해 확률 엔트로피 기반의 농도분포공식과 평균농도 공식을 제안하였다. 특정 하천 고유의 농도 인자인 대표 농도변수 N 의 개념을 도입하여 두 공식의 관계를 명료하게 하였다.

이전 바닥농도산정에 관한 여러 이론을 살펴보면, 하상에서부터 농도측정의 한계지점의 높이를 기준으로 부유사 구간과 소류사 구간을 구별하는 방식으로 이론적인 농도 공식을 유도하였다. 하지만 본 연구에서는 농도측정의 한계지점을 고려하지 않고 농도측정 가능한 구간의 표본을 통해 전체 농도분포를 예측하였으며 유속 부분에서 이미 그 신뢰성과 효용성이 입증된 Chiu의 엔트로피 공식 개념이 적용된 점이 앞선 이론들과 차별된다.

본 연구의 이론을 입증하기 위하여 Coleman[18-19]의 개수로 실험의 실측된 농도분포와 평균농도 자료를 사용하였다. 본 연구의 이론을 통하여 나타난 농도분포 곡선은 실측값과 비교하였을 때, 결정계수가 평균 $R^2 = 0.9238$ 의 높은 정확도를 나타내었다. 따라서 본 연구의 엔트로피 이론을 기반으로 한 농도분포 해석이 합리적임을 알 수 있다.

다음으로, 본 연구의 결과의 타당성을 증명하기 위해 평균농도의 이론값과 실측값을 비교하는 과정에서, 대표 농도변수 N 산정 후의 평균농도 이론값이 실측값의 2.0484배라는 사실과 이론값과 실측값의 관계가 $R^2 = 0.9765$ 의 매우 높은 신뢰도를 나타냄을 통하여 본 연구의 이론이 실측값을 기반으로 실제 측정이 불가능한 소류사 지점의 농도 또한 합리적으로 예측하였고, 실측된 평균농도의 한계점을 보완의 가능성을 나타낸다. 실측 장비의 정밀도가 향상되어 실제 측정 불가능영역의 높이가 0에 수렴할 때, 실측 평균농도가 본 연구의 이론값에 수렴한다면, 본 연구이론의 효용성이 입증될 것임을 기대할 수 있다.

본 연구의 이론을 통해 대표 농도변수 N 을 산정하고 비교적 실측이 간편한 평균유사농도의 측정을 통해 바닥 유사농도를 산정할 수 있고, 이론적인 평균유사농도 산정 공식에 의해 실측 평균 유사농도의 한계점을 보정할 수 있다. 따라서 추후 본 연구결과를 활용한다면, 하천의 유사량을 더욱 간편하고 정확하게 산정할 수 있을 것으로 판단되며 나아가 직접 측정이 어려운 수중 오염물질과 침전물 등의 이동량과 퇴적량 산정에 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] Meyer-Peter, E., Müller, R. "Formulas for Bed-Load transport", *IAHSR 2nd meeting, Stockholm*, appendix 2, 1948
- [2] Leo C. van Rijn, "Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, Issue 10, October 1984
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:10\(1431\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431))
- [3] Engelund, F., Hansen, E., "A monograph on sediment transport in alluvial streams", *Technical University of Denmark Østervoldgade 10, Copenhagen K.*, 1967
- [4] Yang, C. T., "Incipient Motion and Sediment Transport" *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 99, Issue 10, Pg. 1679-1704, 1973
- [5] Chapman, T. G., "Entropy as measure of hydrologic data uncertainty and model performance.", *J. of Hydrol.* 187, pp. 111-126 1986
DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90079-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90079-X)
- [6] Chiu, CL, "Computation of 3-D flow and shear in open channels" *J. Hydraul. Eng* 109 : 1424 ~ 1440, 1983
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:11\(1424\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:11(1424))
- [7] Chiu, CL, "Structure of 3-D flow in rectangular open channels" *J. Hydraul. Eng.* 112 : 1050 ~ 1067, 1986
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1986\)112:11\(1050\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:11(1050))
- [8] Chiu, CL, "Entropy and probability concepts in hydraulics", *J. Hydraul. Eng.* 113 : 583 ~ 599, 1987
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1987\)113:5\(583\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1987)113:5(583))
- [9] Chiu, CL, "Entropy and 2-D velocity distribution in open channels", *J. Hydraul. Eng.* 114 : 738 ~ 756, 1988
DOI: <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.635889>
- [10] Chiu, CL, "Application of entropy concept in openchannel flow study" *J. Hydraul. Eng* 117 : 615 ~ 628, 1991
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1991\)117:5\(615\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:5(615))
- [11] Chiu, CL, "Application of probability and entropy concepts in pipe-flow study", *J. Hydraul. Eng.* 119 : 742 ~, 1993
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1993\)119:6\(742\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:6(742))
- [12] Chiu, CL, "Maximum velocity and regularities in open-channel flow", *J. Hydraul. Eng.* 128 : 390 ~ 398, 2002
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:4\(390\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:4(390))
- [13] Chiu, CL, "Probabilistic approach to modeling of velocity distributions in fluids flow", *J. Hydraul. Eng.* 316 : 28 ~ 42, 2006
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.04.011>
- [14] Fiorentino, M., Claps P. and Signh, V. P., "An Entropy-based Morphological Analysis of River Basin Networks." *Water Resour, Res* Vol, 29, No.4, pp. 1215-1224, 1993
DOI: <https://doi.org/10.1029/92WR02332>
- [15] Cho Y. S., Lee D. K., Kim H., J. Min W., "Determination of Stream Longitudinal Elevation from Entropy", *Korean Society of Civil Engineers Academic conference*, 2003.10.2142-2147
- [16] M. W. Jeon, D. G. Lee, "Estimation of Stream Geomorphological Characteristics Based on the Informational Entropy", *Journal of Wetlands Research*, Vol.11, No.2, pp.89~98, August 2009
- [17] Choo Y. M, Choo T. H, Yang D. H, Kim J. H "The Estimation of Shear Stress in Uniform and Nonuniform Flow by the Entropy Concept", *Journal of Wetlands Research*, VOL19, NO.2, pp202~210, 2017
DOI: <https://doi.org/10.17663/JWR.2017.19.2.202>
- [18] COLEMAN, N. L. "Velocity profiles with suspended sediment." *J. Hydr. Res., IAHR*, 19(3), 211-229. 1981.
DOI: <https://doi.org/10.1080/00221688109499516>
- [19] COLEMAN, N. L. "Effects of suspended sediment on the open-channel distribution." *Water Resources Research*, AGU, 22(10), 1377-1384. 1986.
DOI: <https://doi.org/10.1029/WR022i010p01377>
- [20] CIOFFI.F. and GALLERANO.F., "Velocity and concentration profiles of solid particles in a channel with movable and erodible bed." *J. Hydr. Engr., ASCE*, 129(3), 387-401. 1991.
DOI: <https://doi.org/10.1080/00221689109498441>
- [21] Choo T. H., Jeong I. J., Chae S. K., Yoon H. C., Son H. S., "A study on the derivation of a mean velocity formula from Chiu's velocity formula and bottom shear stress", *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8, 6419-6442, 2011
DOI: <https://doi.org/10.1080/00221689109498441>

김 영 식(Yeong-Sik Kim)

[정회원]



- 2020년 8월 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 수료

<관심분야>

토목공학, 수공학, 하천공학

남 윤 창(Yoon-Chang Nam)

[준회원]



- 2017년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 토목공학전공 학사과정

<관심분야>

토목공학, 수공학

추 연 문(Yeon-Moon Choo)

[정회원]



- 2018년 2월 : 고려대학교 건축사 회환경공학과 (공학박사)
- 2018년 2월 ~ 2018년 9월 : 고려대학교 방재연구소 연구교수
- 2018년 10월 ~ 2020년 8월 : 부산대학교 BK21+사업단 계약교수
- 2020년 9월 ~ 현재 : 부산대학교 생산기술연구소 연수연구원

<관심분야>

토목공학, 수공학, 정보엔트로피이론

전 해 성(Hae-Sung Jeon)

[정회원]



- 2019년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

<관심분야>

토목공학, 수공학

전 근 학(Kun-Hak Jeon)

[정회원]



- 2020년 2월 : 부산대학교 산업대학원 토목공학전공 (공학석사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

<관심분야>

토목공학, 수공학