

하천 지형인자의 확률론적 산정 방식 연구

추연문¹, 마우한², 박상호², 서종철², 김윤구^{2*}

¹부산대학교 생산기술연구소

²부산대학교 사회환경시스템공학과

A Research on the Probabilistic Calculation Method of River Topographic Factors

Yeon-Moon Choo¹, Yun-Han Ma², Sang-Ho Park², Jong-Chal Sue², Yoon-Ku Kim^{2*}

¹Research Institute of Industrial Technology, Pusan National University

²Dept. of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

요약 1960년대 이후 경제발전을 위한 하천 개수사업, 도시화에 따른 소하천의 복개 등으로 많은 하천이 오염되고 파괴되었다. 지금까지의 연구는 측량된 하천 지형인자를 이용해 하천을 분석한 연구가 많았으나, 홍수 시와 같이 유량이 급격히 변하는 경우에는 측량이 쉽지 않다. 또한, 이전까지의 연구는 주로 하천의 횡단면에 대한 연구가 많아 하천 종단면에 대한 정보가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 정보엔트로피 이론을 이용하여 하천 유역에 대한 평균 하천 경사, 하천 경사, 하천 종단고도를 실시간으로 산정할 수 있는 식을 제시하였으며, 충청북도 지방하천 기본계획에서 얻은 달천 유역과 부산 온천천, 동천 기본계획에서 얻은 하천 특성인자 실측 자료와 비교를 통해 적용성을 분석하였다. 이를 위해 정보엔트로피 이론에 실측 자료를 이용하여 비선형 회귀분석을 이용해 매개변수를 산정한 후 하천별 종단고도 엔트로피 식을 산정하였으며, 평균 하천 경사를 산정하였다. 본 연구에서 제시한 식의 적용성을 R^2 로 분석한 결과, R^2 가 모두 0.96이상의 값으로 나타나 하천 특성인자를 산정하는데 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있을 것으로 보인다.

Abstract Since the 1960s, many rivers have been polluted and destroyed due to river repair projects for economic development and the covering of small rivers due to urbanization. Many studies have analyzed rivers using measured river topographic factors, but surveying is not easy when the flow rate changes rapidly, such as during a flood. In addition, the previous research has been mainly about the cross section of a river, so information on the longitudinal profile is insufficient. This research used informational entropy theory to obtain an equation that can calculate the average river slope, river slope, and river longitudinal elevation for a river basin in real time. The applicability was analyzed through comparison with measured data of a river's characteristic factors obtained from a river plan. The parameters were calculated using informational entropy theory, nonlinear regression analysis, and actual data. The longitudinal elevation entropy equation for each stream was then calculated, and so was the average river slope. All of the values were over 0.96, so it seems that reliable results can be obtained when calculating river characteristic factors.

Keywords : Informational Entropy, Mean River Slope, River Slope, Nonlinear Regression Analysis, Longitudinal Elevation

*Corresponding Author : Yoon-Ku Kim(Pusan Nat'l Univ.)

email: kidandy@kwater.or.kr

Received September 9, 2020

Accepted October 5, 2020

Revised September 25, 2020

Published October 31, 2020

1. 서론

하천의 횡단면에 대한 연구가 많이 진행된 반면, 종단면에 대한 연구가 많이 진행되지 않아 종단면에 대한 정보가 충분하지 않다. 종단고도 및 하천 경사는 직접 측량하기 힘들며 특히 유량이 급격히 변하는 때에는 측량에 위험이 따른다. 하지만 측량기술의 발전으로 라이더(Light Detection And Ranging)를 통해 손쉽게 하천 경사, 하천 종단고도 등의 자료를 취득할 수 있게 되었으며, 이를 통해 수치표고모델(Digital Elevation Model)을 제작하기 용이해졌다. 그러나 라이더를 통해 획득한 데이터들을 이용해 수치표고모델을 제작해 실측값과 비교해보았을 때, 무시할 수 없을 정도의 오차를 보인다.[1] 이에 따라 오차를 최소화하면서 지형인자 데이터를 획득할 수 있는 방법으로 엔트로피이론을 적용하였다.

2. 연구동향

근래 하천을 분석하는 방법으로 확률 통계 개념인 엔트로피(entropy)와 확률의 개념이 많이 쓰이고 있으며, 본 논문에서 연구한 하천 종단고도 산정 방식 또한 엔트로피의 최대화에 의해 유도할 수 있다. Lienhard(1964)는 Jaynes(1957)가 제시한 최대 엔트로피 식의 개념[2]을 이용하여 배수유역의 무차원 단위 수위도를 통계학적인 방법으로 유도하였다. Wilson(1970)에 의해 엔트로피 개념이 과학적인 학문으로 연구되었으며[3], Leopold와 Langbein(1962)는 하천의 거동을 연구하기 위해 엔트로피 개념을 처음 적용하였다.[4] 이후, Yang(1971)은 하천 평균고도법칙을 물리적 엔트로피개념을 이용하여 유도하였고,[5] Singh와 Fiorentino(1992)의 정보 엔트로피 개념의 적용 범위를 넓혔다.[6] Chapman(1986)은 수문학적 자료의 불확실성에 대해서 정량적 분석을 위해 정보 엔트로피 개념을 이용하였다.[7] Chiu(1987)는 정보 엔트로피 개념을 도입하여 2차원 유속공식을 산정하였으며, 최대엔트로피 법칙에 대한 제약조건들을 만족하는 유속 확률밀도함수를 산정했다.[8 ~ 10] Fiorentino(1993)은 하천종단면을 정보엔트로피와 유역 평균 고도 사이의 관계를 규명함으로써 산정하였으며, 하천종단면을 실측값과 비교하였다.[11, 12] 최근에는 Mirauda(2017)와 Kundu(2018)이 개수로에서 발생하는 dip 현상이 발생하는 위치를 엔트로피 모델을 이용하여 분석하였다.[13, 14]

엔트로피 개념이 과학적인 학문으로 많이 연구되었으나 이를 이용하여 하천 종단면에 대해 연구한 사례는 많지 않다. 본 연구에서는 Chiu의 방식과 유사한 개념을 이용하여 하천 경사, 평균 하천 경사, 하천 종단고도를 산정하는 식을 제시하였다. 최대 엔트로피 이론에 따라 엔트로피 매개변수를 산정하고 이를 이용해 파괴 이전의 하천 종단고도를 산정하여 하천 복원 모형을 본 논문에서 연구하고자 한다.

3. 이론적 배경

3.1 비선형 회귀분석

통계학에서 종속변수와 독립변수의 관계를 설명하기 위해 상관 관계를 모델링하는 회귀분석을 사용한다. 비선형 회귀분석은 비선형 예측 함수를 사용해 회귀식을 모델링하며, 알지 못하는 매개변수는 데이터로부터 추정하는데, 이 결과 만들어진 식을 회귀 모델이라고 한다. 일반적으로 회귀분석의 경우 잔차의 제곱합을 최소화시키는 매개변수를 구하는 것이 기본 방식인데, 비선형 회귀분석의 경우, 오차를 수학적 식으로 표현하는 것이 불가능하며, 반복적인 방법에 의해서만 구할 수 있다. 보통 최소제곱법(least square method)을 사용해 회귀 모델을 세운다.

회귀 모델의 목적이 해석이 아닌 예측일 경우, 비선형 회귀분석을 이용한다. 이는 비선형 모델은 복잡한 패턴을 가지는 데이터에 대해서도 모델링할 수 있기 때문이다. 따라서 하천 경사 및 하천 종단고도를 산정하여 하천 종단면을 예측하기 위한 본 논문에서는 비선형 회귀분석을 이용하였다.

3.2 엔트로피 이론

자연현상은 엔트로피가 증가하는 방향으로 진행되므로, 엔트로피 식을 통해 자연현상을 설명할 수 있다. 수리학적 관점에서 하천 경사, 하천 고도 등도 최대엔트로피 법칙을 이용하여 표현할 수 있다. 시스템의 특성을 정량화할 수 있는 물리적 엔트로피에 포함되는 열역학 엔트로피, 통계학적 엔트로피, 그리고 시스템의 모형을 구축하는 정보 엔트로피로 세 가지가 있다.

수리학적 변수의 확률분포함수는 특정의 방법으로 변수의 엔트로피를 최대화시킴으로써 결정할 수 있으며, 물리적인 관점에서 볼 때 하천종단면의 최대화된 엔트로피는 제약조건하에서 일정한 하천종단면의 확률분포를 만든다. 따라서, 임의의 하천종단면과 이에 상응하는 엔트

로피의 확률 법칙은 일반적으로 제약조건에 달려있으며, 엔트로피에 근거한 접근방법의 가장 중요한 점은 주어진 문제에 대해 어떻게 제약을 할 것인지를 결정하는 것이다.

연속적인 상태변량 x 에 대한 확률밀도 함수를 $p(x)$ 라 하면 엔트로피 H 는 식 (1)과 같이 정량적으로 표현된다.

$$H = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \ln p(x) dx \quad (1)$$

식 (1)로 정의된 엔트로피 H 는 상태변량 x 의 불확실성 또는 임의성을 나타내며, $p(x) \cdot dx$ 는 상태변량 x 와 $x + dx$ 사이의 확률을 나타낸다. 제약조건식으로서는 상태변량 x 의 평균치 \bar{x} 를 나타내는 식 (2)와 확률밀도 함수의 적분을 나타내는 식 (3)이 사용된다.

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} x p(x) dx \quad (2)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1 \quad (3)$$

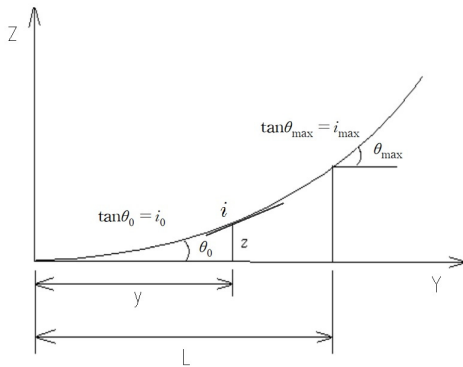


Fig. 1. Stream longitudinal Section Elevation

Fig. 1은 하천의 종단면도를 나타내며, 초기점으로부터 임의의 수평거리가 y 인 지점에서의 고도를 z 라하고 하천경사를 i 라 한다. 이때 초기점의 경사는 $\tan \theta_0 = i_0$ 이며 종점 L 에서의 경사는 $\tan \theta_{\max} = i_{\max}$ 이다. 하천유역을 하천 경사 i 인 시스템으로 생각하고 식 (1)에서 시스템의 상태변수 x 를 하천 경사 i 로 정의하면 유역의 엔트로피는 확률로써 정의할 수 있다. $p(i)$ 를 하천 경사 i 인 유역의 확률밀도 함수라 하면 하천유역의 엔트로피 H 는 식 (4)와 같다.

$$H = - \int_{i_0}^{i_{\max}} p(i) \ln p(i) di \quad (4)$$

첫 번째 제약조건식으로는 식 (2)의 상태 변량 x 대신 하천 경사 i 를 사용하여 나타낸 식 (5)이며 두 번째 제약

조건식은 일반 확률의 정의를 사용한 식 (6)이다. 엔트로피를 최대화함으로써 하천 경사 i 에 대한 확률밀도 함수 $p(i)$ 를 구할 수 있으며, $p(i) \cdot di$ 는 상태변량 i 의 확률로서 식 (6)과 같다.

$$\bar{i} = \int_{i_0}^{i_{\max}} i p(i) di \quad (5)$$

$$\int_{i_0}^{i_{\max}} p(i) di = 1 \quad (6)$$

제약조건식 (5)와 (6)에 미정계수법(method of undetermined coefficients)을 이용하면 정보의 합 I 는 식 (7)과 같이 나타나며, I 를 최대화하는 확률밀도 함수 $p(i)$ 는 식 (8)의 미분방정식을 풀어서 구할 수 있다.

$$\int_{i_0}^{i_{\max}} p(i) di + \int_{i_0}^{i_{\max}} i p(i) di - \int_{i_0}^{i_{\max}} p(i) \ln p(i) di = I \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial p(i)} (-p(i) \ln p(i) + \lambda i p(i) + \lambda_1 p(i)) = 0 \quad (8)$$

여기서, λ 와 λ_1 은 Lagrange 승수(multiplier)이다. 식 (8)을 확률 $p(i)$ 로 미분하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있으며, 확률밀도함수 $p(i)$ 는 식 (10)과 같다.

$$-1 - \ln p(i) + \lambda i + \lambda_1 = 0 \quad (9)$$

$\lambda_1 - 1 = b_1$ 라 두고 $\lambda = b_2$ 라고 하고 식을 정리하면 다음과 같다.

$$p(i) = e^{b_1 + b_2 i} \quad (10)$$

b_1 을 구하기 위해 식 (10)의 확률밀도함수 $p(i)$ 를 제약조건식 (6)에 대입하면 식 (11)이 되며, 따라서 Lagrange 승수 b_1 은 식 (12)와 같이 결정된다.

$$\int_{i_0}^{i_{\max}} p(i) di = \int_0^{i_{\max}} p(i) di - \int_0^{i_0} p(i) di = \frac{e^{b_1}}{b_2} (e^{b_2 \cdot i_{\max}} - e^{b_2 \cdot i_0}) = 1 \quad (11)$$

$$e^{b_1} = \frac{b_2}{e^{b_2 i_{\max}} - e^{b_2 i_{\min}}} \quad (12)$$

식 (10)의 확률밀도함수 $p(i)$ 에 b_1 을 소거하기 위하여 식 (12)의 b_1 과 경사 엔트로피인 $M_{\max} = b_2 i_{\max}$ 과 $M_0 = b_2 i_0$ 을 대입적용하면, 확률밀도함수 $p(i)$ 는 식 (13)과 같다.

$$p(i) = e^{b_1 + b_2 \cdot i} = \frac{b_2}{e^{M_{\max}} - e^{M_0}} \cdot e^{b_2 \cdot i} \quad (13)$$

3.2.1 하천 평균 경사 공식 유도

식 (5)의 하천 평균 경사 \bar{i} 에 식 (10)의 확률밀도함수 $p(i)$ 를 대입하면 식 (14)와 같다.

$$\bar{i} = \int_{i_0}^{i_{\max}} i e^{b_1 + b_2 i} di = e^{b_1} \int_{i_0}^{i_{\max}} i e^{b_2 i} di \quad (14)$$

계산상의 편의를 위하여 식 (14)의 $\int_{i_0}^{i_{\max}} i e^{b_2 i} di$ 를 적분하고 경사엔트로피인 $M_{\max} = b_2 i_{\max}$ 과 $M_0 = b_2 i_0$ 을 대입정리하면 식 (15)과 같다.

$$\begin{aligned} \int_{i_0}^{i_{\max}} i e^{b_2 i} di &= \int_0^{i_{\max}} i e^{b_2 i} di - \int_0^{i_0} i e^{b_2 i} di \\ &= \frac{1}{b_2^2} (M_{\max} e^{M_{\max}} - M_0 e^{M_0} - e^{M_{\max}} + e^{M_0}) \\ &= \left(\frac{i_{\max} + i_0}{M_{\max} + M_0} \right)^2 \times \\ &\quad (M_{\max} e^{M_{\max}} - M_0 e^{M_0} - e^{M_{\max}} + e^{M_0}) \end{aligned} \quad (15)$$

식 (14)에 식 (15)를 대입하면 하천 평균경사 \bar{i} 는 식 (16)으로 나타낼 수 있으며, 식 (16)에 식 (12)의 b_1 을 대입하면 식 (17)과 같다.

$$\bar{i} = \frac{e^{b_1}}{b_2^2} (M_{\max} e^{M_{\max}} - M_0 e^{M_0} - e^{M_{\max}} + e^{M_0}) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \bar{i} &= \frac{(i_{\max} + i_0)}{(M_{\max} + M_0)} \\ &\quad \times \frac{(M_{\max} e^{M_{\max}} - M_0 e^{M_0} - e^{M_{\max}} + e^{M_0})}{(e^{M_{\max}} - e^{M_0})} \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)을 정리하면 식 (18)과 같다.

$$\bar{i} = (i_{\max} + i_0) \Phi(M_{\max}, M_0) \quad (18)$$

여기서,

$$\Phi(M_{\max}, M_0) = \frac{1}{(M_{\max} + M_0)} \times \frac{(M_{\max} e^{M_{\max}} - e^{M_{\max}}) - (M_0 e^{M_0} - e^{M_0})}{(e^{M_{\max}} - e^{M_0})}$$

이다.

식 (18)의 하천 평균경사 \bar{i} 는 초기점 경사 i_0 , 종점 경사 i_{\max} , 경사 엔트로피 매개변수인 M_{\max}, M_0 에 의해 결정된다.

3.2.2 하천 경사와 하천 종단고도 공식 유도

$$\int e^{b_2 \cdot i} \cdot di = \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{e^{b_1}} \int dy \quad (19)$$

식 (19)를 적분하면 식 (20)를 얻으며, 적분상수를 구하기 위하여 $y=0$ 일 때 $i=i_0$ 이므로 적분상수 $C = \frac{1}{b_2} e^{M_0}$ 가 되며, 하천 경사 i 로 정리하면 식 (21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e^{b_2 \cdot i} = \frac{b_2}{L \cdot e^{b_1}} \cdot y + e^{M_0} \quad (20)$$

$$i = \frac{1}{b_2} \ln \left[\frac{y}{L} \cdot \frac{b_2}{e^{b_1}} + e^{M_0} \right] \quad (21)$$

b_1, b_2 을 소거하기 위하여 식 (12)의 b_1 을, $b_2 = \frac{M_{\max} + M_0}{i_{\max} + i_0}$ 를 식 (21)에 대입하여 정리하면 하천 경사 i 는 식 (22)와 같다.

$$i = \frac{i_{\max} + i_0}{M_{\max} + M_0} \ln \left[\frac{y}{L} (e^{M_{\max}} - e^{M_0}) + e^{M_0} \right] \quad (22)$$

임의의 수평거리 y 에서 하천종단고도가 z 일 때 임의의 하천경사 i 는 $i = \frac{dz}{dy}$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 임의의 하천경사 i 를 dz 에 대해 정리하여 식 (22)에 대입하면 식 (23)과 같다.

$$dz = \left(\frac{i_{\max} + i_0}{M_{\max} + M_0} \right) \times \ln \left[\frac{y}{L} (e^{M_{\max}} - e^{M_0}) + e^{M_0} \right] dy \quad (23)$$

하천 종단고도 z 를 구하기 위하여 식 (23)를 적분하면 식 (24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} z &= \left(\frac{i_{\max} + i_0}{M_{\max} + M_0} \right) \left(\frac{L}{e^{M_{\max}} - e^{M_0}} \right) \times \\ &\quad \left\{ \left(e^{M_0} + (e^{M_{\max}} - e^{M_0}) \frac{y}{L} \right) \times \right. \\ &\quad \left. \left[\ln \left\{ e^{M_0} + (e^{M_{\max}} - e^{M_0}) \frac{y}{L} \right\} \right] \right. \\ &\quad \left. - \left(e^{M_0} + (e^{M_{\max}} - e^{M_0}) \frac{y}{L} \right) + c \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

여기서 c 는 적분상수로서 수평거리 $y=0$ 이면 하천종단고도 $z=0$ 이므로 $c = e^{M_0} - M_0 e^{M_0}$ 이 되어 하천종단고도 z 는 식 (25)와 같다.

$$\begin{aligned} z &= \left(\frac{i_{\max} + i_0}{M_{\max} + M_0} \right) \left(\frac{L}{e^{M_{\max}} - e^{M_0}} \right) \times \\ &\quad \left(\left(e^{M_0} + (e^{M_{\max}} - e^{M_0}) \frac{y}{L} \right) \ln \left(e^{M_0} + (e^{M_{\max}} - e^{M_0}) \frac{y}{L} \right) \right. \\ &\quad \left. - \left(e^{M_0} + (e^{M_{\max}} - e^{M_0}) \frac{y}{L} \right) + e^{M_0} - M_0 e^{M_0} \right) \end{aligned} \quad (25)$$

4. 실제 하천에서의 식 적용

본 연구에서는 위에 제시한 평균 하천경사 공식으로 구한 이론값과 실측값을 비교·분석하였다. 하천 종단고도는 신뢰성이 있다고 판단되는 충청북도 지방하천정비 기본계획과 부산광역시 온천천, 동천 하천정비 기본계획에서 하천 종단면도를 획득하여 사용하였으며, 본 연구에서 제시한 식을 적용한 대상하천과 대상하천의 초기점 경사 i_0 와 종점경사 i_{max} 는 Table 1과 같다.

Table 1. Stream Slope

stream	i_{max}	i_0
Oncheon River	1.1×10^{-3}	1.015×10^{-2}
Dong River	0.9×10^{-3}	1.625×10^{-2}
Gam River	2.3×10^{-3}	2.19×10^{-2}
Ingyeong River	2.6×10^{-3}	1.28×10^{-2}
Dongjin River	3.15×10^{-3}	1.025×10^{-2}
Eumseong River	4.05×10^{-3}	1.73×10^{-2}
Oga River	6.95×10^{-3}	1.655×10^{-2}
Sukmundong River	0.9×10^{-3}	2.835×10^{-2}
Sulwoon River	6.15×10^{-3}	2.36×10^{-2}

4.1 실측치를 이용한 매개변수 산정

하천 종단면도의 실측치를 토대로 하천 종단고도 z 를 구하는 식에 적용하여 실측된 하천 종단고도의 비선형 회귀분석을 통해 이론적 하천 종단고도의 오차제곱합이 최소가 될 때의 매개변수를 산정하였으며, 산정된 각 하천의 매개변수 값은 Table 2와 같다. 계산된 각 하천의 매개변수를 하천 평균경사를 구하는 식 (17)에 대입하여 계산한 하천 평균 경사 \bar{i} 와 충청북도 지방하천정비 기본계획과 부산광역시 온천천, 동천 하천 기본계획에 나와 있는 실측된 하천 평균 경사 \bar{i} 를 비교한 결과는 Table 3과 같다.

Table 2. Parameters

stream	M_{max}	M_0
Oncheon River	-1.738	-0.250
Dong River	-1.760	0.155
Gam River	-2.667	-0.548
Ingyeong River	-6.225	-5.016
Dongjin River	2.671	1.016
Eumseong River	1.193	0.357
Oga River	-1.909	-0.868
Sukmundong River	0.020	0.004
Sulwoon River	-1.796	-0.380

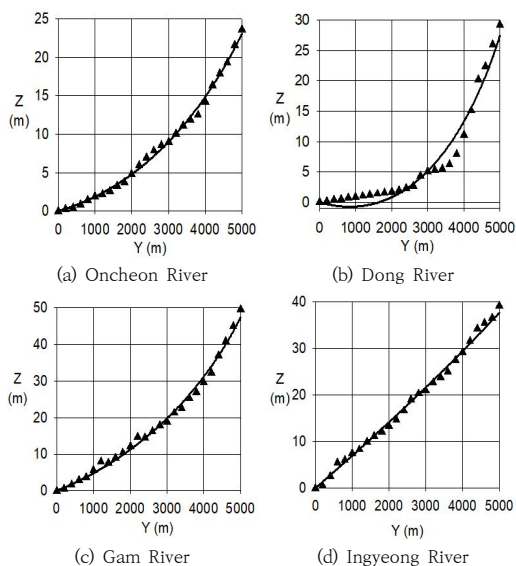
Table 3. Relative Errors of Mean Stream Slope

stream	measured	predicted	relative error
Oncheon River	0.0047	0.0046	1.951
Dong River	0.0058	0.0055	5.939
Gam River	0.0164	0.0095	42.231
Ingyeong River	0.0078	0.0075	3.790
Dongjin River	0.0083	0.0075	10.036
Eumseong River	0.0119	0.0115	3.710
Oga River	0.0222	0.0109	50.498
Sukmundong River	0.0144	0.0147	1.743
Sulwoon River	0.0130	0.0127	2.513

4.2 하천 종단고도

실제 하천의 종단고도 측정값과 제시된 식의 비선형 회귀분석을 통하여 지형학적 인자인 매개변수들을 각각 구할 수 있으며, 이를 통해 하천별 하천 종단고도 엔트로피 식을 산정할 수 있다. 식을 이용해 산정한 하천 종단고도를 실측치와 비교했을 때 동천천 R^2 값이 0.9985로 가장 높았고, 동천 R^2 값이 0.9650으로 가장 낮았다. 식으로 나타낸 하천별 종단면 그래프는 다음과 같다.

식을 이용해 나타냈을 때 R^2 값이 0.9650~0.9985로 나타난 것으로 보아, 본 연구에서 제시한 식은 실제 하천 종단고도를 산정하는 데 의미가 있는 것으로 판단된다.



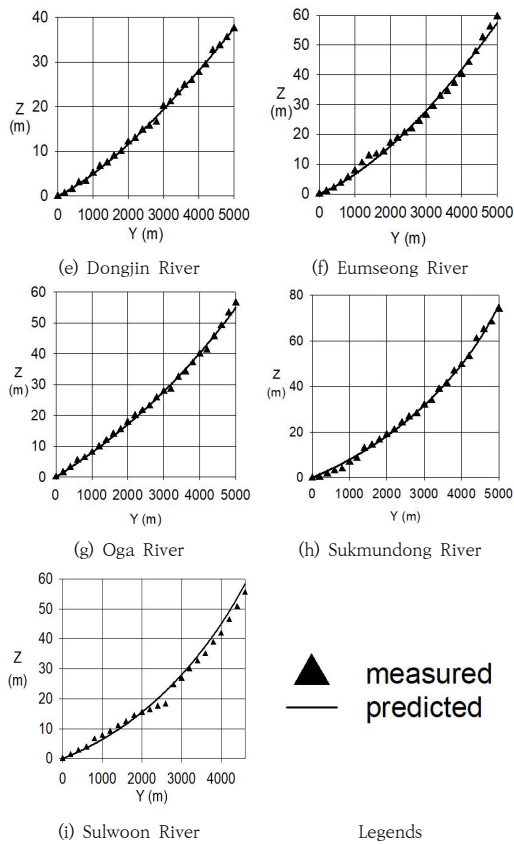


Fig. 2. Longitudinal Elevation ((a)~(i))

Table 4. R^2 Value by River

stream	R^2
Oncheon River	0.9970
Dong River	0.9650
Gam River	0.9942
Ingyeong River	0.9957
Dongjin River	0.9985
Eumseong River	0.9950
Oga River	0.9980
Sukmundong River	0.9975
Sulwoon River	0.9952

5. 결론

지금까지는 측량 결과를 기반으로 하천을 분석한 연구가 많았으나, 홍수와 같은 재해 시, 즉 측량이 불가능한 상황엔 많은 자료를 얻을 수 없다는 단점이 있다. 이러한 상황에도 측정이 간편하고 신뢰도 있는 정보를 얻기 위한 방법으로 본 연구에서는 정보 엔트로피 이론을 이용

하였다. 또한, 기존의 연구에서는 매개변수 하나에 따른 하천 종단고도의 변화 경향에 대해 연구한 반면, 본 연구에서는 식으로부터 매개변수를 두 개 산정하여 기존의 연구보다 더 정확하게 하천 특성인자를 산정할 수 있었다. 본 연구에서 정보 엔트로피 이론을 이용하여 하천 평균경사, 하천 경사 및 하천 종단고도 산정방법을 제시하였고, 제시된 하천 종단고도 식을 이용하여 달천유역 내, 부산 관내 실측된 하천 평균 경사와 하천 종단면도를 토대로 하천특성을 나타내는 매개변수를 결정하였으며 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 논문에서 제시한 식의 정확도 검증은 SPSS 및 SYSTAT으로 비선형 회귀분석을 통해 얻은 R^2 을 이용하였으며, R^2 값이 0.9650~0.9985로 나타나 본 논문에서 제시한 식은 이론적으로 타당하며, 실제 하천 적용이 유의미할 것으로 판단된다.
- 2) 동천의 경우 산정된 식의 결과에서 다른 하천들에 비해 오차를 크게 보이며, 종단고도가 음수로 산정되는 원인에 대해 향후 연구해 볼 필요성이 있다.
- 3) 엔트로피 이론에 기반을 둔 Chiu의 유속 분포 공식에 착안하여 유도한 하천 평균경사, 하천 경사 및 하천 종단고도를 산정하는 식을 실제 하천에 적용해본 결과, 식을 통해 산정한 하천 종단고도는 실측치와 매우 유사하게 나타났으며, 실측치와 잘 맞는 결과를 보이는 것으로 보아 제안된 식은 신뢰도 높은 식으로 볼 수 있다.
- 4) 본 논문에서 제시한 하천 종단고도를 산정하는 식의 M_{max} 와 M_0 는 하천의 고유한 매개변수이므로 한 번 매개변수를 산정하면 파괴되기 이전의 하천의 종단면도를 획득할 수 있으며 이 종단면도는 신뢰성 있는 결과로 볼 수 있다. 또한 40년, 또는 100년에 걸친 하천 기본계획에 실측된 자료를 이용하여 하천의 고유 매개변수를 산정하면 더욱 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 보인다.
- 5) 본 연구에서 제시한 식을 이용하여 M_{max} , M_0 를 산정하면 실측된 i_0 , i_{max} 를 통해 하천 유역의 한 점에서의 경사, 종단고도를 손쉽게 산정할 수 있다.
- 6) 본 논문에서 제시한 식을 통해 얻은 하천 종단면도를 이용하여 훼손된 하천을 개발 이전의 하천 종단고도 및 경사로 복원하는 데 쓰일 것으로 보인다.
- 7) 본 논문에서 제시한 방법을 이용하여 하천 평균 경사, 하천 경사, 하천 종단고도 외에 다른 하천 특성인자들도 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] S. M. Han, T. S. Park, "The comparative analysis of LiDAR data and actual measurement data", *Proceedings of Korean Society for Geospatial Information Science*, pp.72~77, September 2009
- [2] Jaynes, E. T., "Information theory and statistical mechanics", *Phys. Rev.* 106, 620~630, 1957
DOI : <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.106.620>
- [3] Wilson, A. G., "The use of the concept of entropy in system modeling", *Oper. Res. Q.*, Vol. 21, No. 2, 247~265, 1970
- [4] Leopold, L. B., Langbein, W. B., "The concept of entropy in landscape evolution", *U.S. Geol. Surv. Prop.* 500-A, 1962
DOI : <https://doi.org/10.3133/pp500a>
- [5] Yang, C. T., "Potential Energy and Stream Morphology", *Water Resour. Res.*, Vol. 7, No. 2, 311~322, 1971
DOI : <http://dx.doi.org/10.1029/WR007i002p00311>
- [6] Singh, V. P., Fiorentino, M., "A historical perspective of entropy application in water resources", edited by Singh and Fiorentino, Kluwer, Boston, Mass., 21~61, 1992
DOI : http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-2430-0_2
- [7] Chapman, T. G., "Entropy as measure of hydrologic data uncertainty and model performance", *J. of hydrol.*, 85, 111~126, 1986
DOI : [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90079-X](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(86)90079-X)
- [8] Chiu, C. L., "Entropy and probability concepts in hydraulics", *J. Hydraul. Eng.*, ASCE 113 (5), 583~600, 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))
- [9] Chiu, C. L., "Entropy and 2-D velocity distribution in open channels", *J. Hydraul. Eng.* 114 (7), 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))
- [10] Chiu, C. L., "Velocity distribution in open channel flow", *J. Hydraul. Eng.* ASCE 115 (5), 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))
- [11] Fiorentino, M., Claps, P. and Singh, V. P., "An Entropy-based Morphological Analysis of River Basin Networks," *Water Resour. Res.*, Vol. 29, No. 4, 1215~1224, 1993
DOI : <http://dx.doi.org/10.1029/92WR02332>
- [12] Claps, P., Fiorentino, M., Oliveto, G., "Informational entropy of fractal river networks", *J. of hydrol.*, 187, 145~156, 1996
DOI : [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03092-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03092-2)
- [13] Kundu, S., "Prediction of velocity-dip-position at the central section of open channels using entropy theory", *J. Appl. Fluid Mech.* 10, 221~229, 2017
DOI : <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jafm.73.238.26403>
- [14] Mirauda, D., Pannone, M., de Vincenzo, A., "An entropic model for the assessment of stream-wise velocity dip in wide open channels" *Entropy*, 20, 69, 2018.
DOI : <https://doi.org/10.3390/e20010069>
- [15] 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
- [16] T. H. Choo, C. Y. Ok, S. J. Je, S. K. Lee, "A Study on the Real-Time Discharge Measurement System", *The Korea Contents Association*, Vol. 5, No.1, pp.10~13, June 2007
- [17] H. J. You, D. S. Kim, S. K. Yang, "Development of GIS-based Method for Estimating and Representing Stream Slopes Along the River Network", *Journal of the Environmental Sciences*, Vol.21, No.6, pp.725~738, June 2012
DOI : <https://doi.org/10.5322/jes.2012.21.6.725>
- [18] J. M. Byun, Y. B. Seong, "Comparison Analysis of Methods for Smoothing the Stream Profiles Extracted from Digital Elevation Models and Suggestion of a New Smoothing Method", *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol.49, No.3, pp.339~356, June 2014
- [19] K. T. Kim, Y. S. Choi, H. J. Lee, "Comparison and Examination of the Calculating Hydrological Geographic Parameters Using GIS", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol.43, No.1, pp.25~39, January 2010
DOI : <https://doi.org/10.3741/jkwra.2010.43.1.25>
- [20] Moramarco, T., Singh, V. P., "Formulation of the entropy parameter based on hydraulic and geometric characteristics of river cross sections", *J. Hydrol. Eng* 15, 852, 2010
DOI : [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000255](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000255)

추 언 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

마 윤 한(Yun-Han Ma)

[준회원]



- 2016년 3월 ~ 현재 : 부산대학교
건설융합학부 학사과정

<관심분야>

토목공학, 수공학

김 윤 구(Yoon-Ku Kim)

[정회원]



- 2020년 8월 : 부산대학교 사회환
경시스템공학과 박사과정 수료

<관심분야>

토목공학, 수공학, 하천공학

박 상 호(Sang-Ho Park)

[정회원]



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

<관심분야>

토목공학, 수공학

서 종 철(Jong-Chal Sue)

[정회원]



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

<관심분야>

토목공학, 수공학