호우 태풍 내습시 미계측유역 유출량산정을 위한 엔트로피 매개변수 산정에 관한 연구

Estimation of Entropy Parameters for Estimating Runoff at Ungauged Watersheds During Heavy Rain and Storms

추연문* · 김성률** · 이재화*** · 권창현****

Choo, Yeonmoon*, Kim, Seongryul**, Lee, Jaehwa***, and Gwon, Changheon****

Abstract

The formula for calculating the average flow rate using entropy is not complicated and exhibits straightforwardness. However, for the accurate estimation of the entropy value 'M' of a river, a limit must be calculated by computing the average ratio; this is achieved by the pre-measurement of several maximum and average flow rates over a long period. Therefore, this study proposes an equation for calculating the M-value using only the topographic characteristics of the watershed, and not the hydraulic factors of the river. Herein, a formula has been developed using multiple linear regression analysis for two water level stations located at the Nakdong River area. The R^2 values were found to be 0.9468 and 0.8236. Consequently, it will be more convenient in the future to estimate the amount of runoff from unmeasured basins using this novel model.

Key words : Entropy, Mean Velocity, Hydrogeology, Runoff

요 지

엔트로피를 활용한 평균유속 공식은 매우 간편하게 평균유속을 산정하고 이를 통해 유량을 산정할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 하천의 엔트로피 M값을 정확하게 산정하기 위해서는 오랜기간 여러 번의 최대유속과 평균유속의 사전측정을 통해 평균적인 비율 계산을 통해 산정해야 하는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 하천의 수리학적 인자가 아닌 유역의 지형학적 특성만을 이용해서 엔트로피 매개변수인 M값 산정공식을 제안하였다. 낙동강 권역의 2개 수위관측소를 대상으로 다중선형회귀 분석을 통한 산정공식의 개발 결과 R^2 값이 0.9468, 0.8236으로 나타났으며, Discrepancy Ratio를 통한 정확도 검증결과 -0.14639에서 0.06881까지로 매우 높은 정확도를 나타내었다. 향후 이를 활용하여 미계측 유역에서의 유출량을 더욱 간편하게 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 엔트로피, 평균유속, 수문지형학, 유출량

1. 서 론

수자원 분야에서 이·치수 및 구조물의 설계를 위해서는 하천유량의 정확한 추정은 매우 중요하며 필수적인 요소이

다. 따라서 우리나라에서는 매년 수문조사 보고서를 발행하며 수위-유량관계곡선식을 제시하고 이를 활용하여 유량을 추정, 제시하고 있다.

국내외에서 유량 및 유속 계산을 위하여 엔트로피를 활용

*정회원, 부산대학교 BK21+사업단 계약교수(E-mail: chooyean@naver.com)

Member, Contract Professor, Brain Korea 21 Plus, Pusan National University

**부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

Ph.D Candidate, Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University

***부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

Master's Course, Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University

****교신저자, 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정(Tel: +82-51-510-7654, Fax: +82-51-513-9596, E-mail: ckdgjs13@naver.com)

Corresponding Author, Member, Master's Course, Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University

한 연구가 다양하게 이루어졌는데, Chiu (1987)는 수리학에 엔트로피를 접목시켜 평균유속을 산정하는 방법에 대한 제안을 하였으며, 이를 시작으로 Ardiçlioğlu et al. (2007)은 엔트로피 개념을 기초하여 자연하천에서의 유출 및 전단응력의 분포에 대한 추정을 실시하였다. Moramarco and Singh (2010)은 Manning의 식과 최대유속에 대한 방정식을 결합하여 한천 단면의 기하학적 유압특성과 엔트로피의 상관관계에 대해 연구하였으며, Ammari and Remini (2010)은 엔트로피 개념을 이용하여 알제리 북부의 4개 하천에 대하여 유출과 수위 및 흐름 패턴에 대한 산정방법을 제안하였다. Moramarco et al. (2013)은 엔트로피를 기반으로 자연하천에서의 수심의 분포 추정에 관한 연구를 수행하였고 Greco et al. (2014)은 낮은 수심에서 엔트로피에 대한 조도계수의 의존도를 분석하여 기울기 및 침수방정식을 제안하였다.

국내에서는 Lee and Lee (2003)는 유역의 특성인자와 관측 자료를 이용하여 하도형성 유량을 산정하고 강터유량과 수리기하 특성간의 관계를 분석하였으며, Yang et al. (2005)은 영산강과 섬진강을 대상으로 수문지형적 관점에서 관측지점에 대한 적정여부와 유량측정 및 산정방법에 대한 검토를 실시하였다. Kim and Choi (2009)는 회전식 유속계와 ADCP의 유속측정을 비교 및 분석하여 유속 측정에 대한 검증 및 적용에 관한 연구를 실시하였으며, Lee and Kwon (2010)은 쌍치 수위관측소를 대상으로 RMA2 모형으로 수면곡선 모의를 통해 기존의 수위-유량 관계곡선을 재 작성하였다.

그러나 이러한 수위-유량관계곡선이 성립하기 위해서는 수위와 유량이 항상 1:1의 관계를 유지한다는 기본 가정을 전제로 두고 있다. 이와 같은 단일 수위-유량 관계는 정상류에서만 발생하고, 실제 하천의 홍수와 같은 부정류 흐름에서는 홍수수문곡선의 상승부와 하강부의 기울기, 조도계수, 하상경사 등 흐름에 영향을 주는 수리학적 특성인자들에 의해 수위-유량 사이의 일대일 관계가 성립하지 않는다. 즉, 수위와 유량 사이만의 관계를 이용하기 때문에 해당 하천 지점의 지형이나, 조도, 경사 등 수리적인 특성을 반영하지 못하므로 오차의 가능성을 잠재하고 있다. 따라서 정확한 유량의 측정을 위해서는 실시간의 정확한 수위 및 유속 측정이 필요하나 수위의 경우 비교적 측정이 쉬우나 유속의 경우 빠르고 정확한 측정이 매우 어려운 실정이다. 이를 위하여 Chiu (1987, 1988, 1989)는 확률론적 엔트로피 개념을 도입한 2차원 유속공식을 활용하여 유도한 평균유속공식을 제안하였다. 제안된 공식은 에너지경사, 동점성계수, 동수반경, 중력가속도 등 수리적인 특성인자를 잘 반영할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 낙동강 권역의 2개 수위관측소의 과거 데이터를 분석하여 호우 등 급격하게 유량이 증가하여 직접적인 측정이 어려운 경우에 실시간으로 유량을 산정할 수 있도록 Chiu의 평균유속 공식에서 중요한 매개변수로 활용되는 M을 하천의 수위, 해발고도 등 손쉽게 취득이

가능한 지형학적 인자만을 활용하여 빠르고 간편하게 산정하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 연구대상지역

본 연구에서는 평균유속 공식의 엔트로피 매개변수 M을 산정하기 위하여 과거 3개년의 자료를 활용하였다. 이를 위하여 낙동강 지류중 하나인 금호강에 위치한 대구시의 안심교 수위관측 자료와 경주에 위치한 형산강의 서천교 수위 관측소의 자료를 활용하였다(Fig. 1).

안심교가 위치한 금호강의 경우 단면형상이 균일한 단단면이고 하상은 주로 호박돌과 굵은 자갈로 이루어져 있어 저수로의 단면변화가 크게 발생하지 않는다. 형산강에 위치한 서천교의 경우 복단면 형태의 하천형상을 이루고 있으며, 하상은 주로 자갈과 모래로 이루어져 있으나 하류에 위치한 보의 통제에 의하여 단면변화는 크게 발생하지 않는 지점이나, 하류에서 지천이 유입되고 인근에 농업용수 취수시설이 위치하고 있다.

(a) Daegu Ansimgyo

(b) Gyeongju Seocheongyo

Fig. 1. Water Level Station

2.2 평균유속공식

Chiu (1987)는 Eq. (1)과 같이 확률론적 엔트로피 공식을 평균유속의 산정에 활용한 평균유속 공식을 제안한 바 있다.

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

여기에서 u 는 유속을 의미하며, ξ 는 공간적 좌표 ($0 \leq \xi \leq 1$)의 범위로 ξ_0 는 수로 경계층에서 발생하는 ξ 의 최솟값을, $\xi_{\max}$ 는 ξ 의 최댓값을 의미하고 M은 엔트로피

Fig. 2. $\xi-\eta$ of Open Channel
(Chiu, 1988, 1989)

매개변수를 의미한다(Fig. 2).

여기서 Choo(1990)는 공간적 좌표의 범위를 대신하여 수심과 엔트로피 매개변수를 응용한 Eq. (2)와 같은 K (M)을 활용하여 Eq. (3)과 같은 평균유속 공식을 제안하였다.

$$K(M) = \varnothing(M) \cdot M = \frac{(Me^M - e^{M+1})}{(e^M - 1)} \quad (2)$$

$$u = \frac{\bar{u}}{K(M)} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{y - y_0}{y_{\max} - y_0} \right] \quad (3)$$

이와 같이 현재까지 제시된 엔트로피를 활용한 평균유속 공식에서 매개변수인 엔트로피 M은 매우 중요하게 작용하며 이를 매우 간편하게 취득 가능한 지형학적 인자만으로 산정하게 된다면 매우 손쉽게 유속의 산정이 가능할 것으로 판단된다.

2.3 다중선형회귀분석

다중선형회귀모형은 두 개 이상의 설명변수들을 사용하여 반응변수를 예측하는 선형모형이다. 반응변수를 y , 설명변수집합을 $X = (x_0, x_1, \dots, x_p)$, $x_0 = 1$, 그리고 회귀계수를 $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p)$ 라고 하면, 반응변수는 설명변수와 회귀계수 사이의 선형결합에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p + \epsilon \quad (4)$$

Eq. (4)에서 β_0 은 절편을, $\beta_1, \dots, \beta_p$ 는 각 설명변수에 대응되는 회귀계수를 의미한다. ϵ 는 모형에 의해 설명되지 않는 오차(error)로써 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따른다고 가정한다. 회귀계수 $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p)$ 는 다음의 오차제곱합을 최소화하도록 추정된다.

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_p x_{ip}))^2 \right] \quad (5)$$

Eq. (5)의 오차제곱합을 최소화하는 회귀계수의 추정량은 $\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y$ 와 같이 구해지고, $\hat{\beta}$ 로부터 오차분산의 추정량은 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-p-1} \sum_{i=1}^n (y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{i1} + \dots + \hat{\beta}_p x_{ip}))^2 \quad (6)$$

개별 회귀계수의 추정량 $\hat{\beta}_j$ 는 설명변수 x_j 가 한 단위 증가할 때 반응변수의 기댓값의 증가량을 의미하며, 대표본 하에서 평균이 β_j 이고 분산이 $(X^T X)^{-1}_{ii} \times \sigma^2$ 인 정규분포를 따른다. 이러한 $\hat{\beta}_j$ 의 확률분포를 이용하여 귀무가설 $H_0: \beta_j = 0$ 에 대한 가설검정을 실시할 수 있다. 귀무가설을 기각하면 해당 설명변수가 반응변수에 대해 유의한 영향력을 미친다고 할 수 있고, 반대의 경우에는 유의하지 않은 설명변수라고 판단할 수 있다.

다중선형회귀모형은 일부 설명변수가 범주형 변수일 때에도 문제없이 사용될 수 있다. 범주형 변수에 대해서 “범주 개수 - 1” 개만큼 해당 범주면 1, 아니면 0의 값을 갖는 지시변수(indicator variable)를 생성하여 수치형 변수로 사용한다. 또한 이러한 지시변수들은 다른 수치형 변수들과 곱 연산을 하여 상호작용효과(interaction effect)를 나타내는 설명변수를 추가로 생성할 수 있다. 특정 범주형 변수에 대한 지시변수와 상호작용효과 변수를 설명변수로 추가함으로써 하나의 학습된 모형으로부터 범주 별로 다양한 선형 패턴을 갖는 모형을 표현하는 것이 가능하다. 이러한 방법은 특별한 경우에 해당 범주형 변수의 자료를 범주 별로 분리하여 회귀모형을 추정한 것과 같은 결과를 보일 수 있다.

3. 엔트로피 산정

3.1 변수의 선정 및 구간 분류

본 연구에서는 엔트로피M의 산정식 개발을 위한 독립변수의 선정에 위하여 BIC 기법을 통해 독립변수를 선정하였다. BIC 기법이란 모델별 잔차와 변수의 개수로 MSE를 추정하는 방법으로 변수의 개수가 일종의 벌점의 형태로 작용하며, 그 식은 Eq. (7)과 같다. 모델의 잔차에 대한 값이기 때문에 BIC값이 작을수록 더 정확한 모델로 볼 수 있다.

$$BIC = n \times \ln \left(\frac{SSE}{n} \right) + (p+1) \ln(n) \quad (7)$$

이때 n 은 표본의 수이며, p 는 변수의 수, SSE는 모델이 가지는 오차이다.

또한 개발하는 모델의 예측력 평가를 위하여 수집된 데이터의 개수를 기준으로 하여 학습구간과 예측구간으로 분류를 하여 엔트로피 산정식의 개발을 진행하였다. 학습구간과 예측구간의 분류는 일반적으로 데이터의 60~70%를 기준으로

로 분류하게 되는데 본 연구에서는 2016년과 2017년의 자료를 학습구간으로 활용하고 2018년의 자료를 예측구간으로 활용하였다.

3.2 엔트로피 매개변수 선정

엔트로피를 산정하기 위한 매개변수들의 선정은 현재 수위관측소에서 측정하고 있는 자료들 중 지형학적으로 유속과 관계되어 변화하는 인자만을 선정하여 수면폭, 윤변, 해발고도, 유역면적으로 설명변수를 선정하였다. 이중 해발고도는 낙동강 권역에서의 상·하류 지점 및 수위상태를 의미하고 유역면적은 유출량으로 인한 유역의 엔트로피 값의 변동을 설명할 수 있을 것으로 판단된다.

오픈소스 프로그램으로 통계 또는 데이터마이닝에 많이 활용되는 R Studio를 이용하였으며, ‘leps’ 패키지를 이용하여 변수분석을 실시하였다. 이를 통해 산정한 각 관측소별 회귀계수는 Table 1과 같다.

Table 1. Calculation of Regression Coefficient and Prediction Power

	Daegu	Gyeongju
Intercept	-104.200	-92.645
p	0.626	0.823
B	-0.619	-0.808
EL	3.340	3.651
A	-0.012	-0.029
R ²	0.9856	0.9438

여기서 Intercept는 회귀식의 상수항으로 나타나는 y절편을 의미하며, P, B, EL, A, 는 각각 윤변, 수면폭, 해발고도 및 유역면적을 의미한다.

이때 Table 1의 회귀계수를 적용하는 식의 원형은 Eq. (8)과 같으며, Table 2는 회귀계수를 적용한 엔트로피 산정 모델이다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p + \epsilon \quad (8)$$

여기서 β_0 는 산정된 회귀계수 중 Intercept를 의미하며, $\beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p + \epsilon$ 은 각각의 독립변수를 의미한다.

Table 2. Entropy Estimation Function

	Estimation Function
Daegu	-104.2+0.6258P-0.619B+3.340EL-0.012A
Gyeongju	-92.645+0.823P-0.808B+3.651EL-0.029A

산정된 식과 관측자료를 활용한 엔트로피 값의 비교 결과

다음의 Figs. 3 및 4와 같이 나타났다. Fig. 3은 대구 안심교의 실제 관측된 엔트로피 값과 본 연구에서 제안하는 식을 통해 산정한 엔트로피의 비교 그래프이고, Fig. 4는 경주 서천교에 대한 비교 그래프이다.

Fig. 3. Entropy Comparison Graph in Daegu Ansimgyo

Fig. 4. Entropy Comparison Graph in Gyeongju Seocheongyo

그래프를 보게 되면 대구에 위치한 안심교와 경주시의 서천교 모두 R²값이 높고 엔트로피의 값이 일정한 범위에서 높은 유사도를 보이는 것을 확인할 수 있다.

3.3 정확도 검증

본 연구에서 제안하는 엔트로피 산정공식의 정확도 검증을 위하여 실제 관측자료와 비교를 실시하여 그 차이를 분석하였다. 수위관측소의 지점에 따라 대구와 경주로 비교를 하였고 이를 위하여 Discrepancy Ratio를 사용하여 정확도 검증을 실시하였다. Discrepancy Ratio는 통계학적 분석방법으로 실측 엔트로피와 산정공식을 이용한 엔트로피의 비에 상용 log를 취하는 방법으로 Eq. (9)와 같다.

$$\log\left(\frac{\text{estimated } f}{\text{measured } f}\right) = \text{constant} \quad (9)$$

각각의 계산된 상수를 오름차순으로 정리한 다음 구간별 백분율로 나타낸 방법으로 0 보다 크면 과다산정, 0 보다 작으면 과소산정을 의미한다.

산정된 엔트로피와 관측을 통한 엔트로피의 비교는 Figs. 5와 6과 같다. 제안식을 이용하여 산정한 엔트로피의 Discrepancy Ratio 결과가 모두 0 가까이 분포되며 대구 안심교의 경우 0.15에서 -0.03의 범위로 과소산정의 경향을 보이거나 0에 매우 가깝게 분포되는 것을 확인할 수 있으며, 경주 서천교의 경우 -0.15에서 0.05의 범위로 분포하며 과다산정의 경향이 있으나 전체적으로 0에 매우 가깝게 분포되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5. Discrepancy Ratio Graph in Daegu Ansimgyo

Fig. 6. Discrepancy Ratio Graph in Gyeongju Seocheongyo

4. 결 론

본 연구에서는 엔트로피를 활용한 평균유속 공식에서 가장 중요한 인자인 엔트로피 매개변수를 지형적 조건에 따라 산정하는 공식을 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 식은 수면 폭, 해발고도 등의 간단한 지형적 조건만으로 손쉽게 중요한 매개변수인 엔트로피의 값을 구할 수 있으며, 실측 데이터와의 비교를 통한 정확도 검증결과 R^2 값이 대구 안심교 수위관측소의 경우 0.9468, 경주 서천교의 경우 0.8236으로 매우 높은 유사도를 보이는 것을 확인하였다. 또한 오차분석 기법인 Discrepancy Ratio를 분석한 결과 대구 안심교의

경우에서는 -0.04595에서 0.02412의 범위값을 가지고 경주 서천교 수위관측소에서는 -0.14639에서 0.06881의 범위값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 본 연구에서 제안하는 식의 정확도가 높은 것을 확인할 수 있다.

향후 본 연구에서 제안하는 엔트로피 산정공식의 활용을 통하여 미계측 유역에서의 엔트로피를 손쉽게 구할 수 있고 이를 활용하여 하천의 평균유속 및 유출량을 보다 간편하게 산정 가능할 것으로 기대된다. 또한 본 제안식에 대한 지속적인 연구를 통해 하천 인근에 설치된 구조물 및 지천의 합류를 고려하게 된다면 향후 하천의 변동을 고려한 정확하고 신속한 유출량 및 유속 산정이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술사업단의 지원을 받아 수행된 연구임[MOIS-재난-2015-05].

References

- Ammari, A., and Remini, B. (2010). Estimation of Algerian rivers discharges based on Chiu's equation. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 3, No. 1, pp. 59-65.
- Ardiclioglu, M., Atabay, S., and Omran, M. (2007). Estimation of discharge and shear stress distribution in natural channels based on entropy concept. *Proceedings of 32nd IAHR Congress*, Venice, Italy.
- Chiu, C.L. (1987). Entropy and probability concepts in hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 5, pp. 583-599.
- Chiu, C.L. (1988). Entropy and 2-D velocity distribution in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 7, pp. 738-756.
- Chiu, C.L. (1989). Velocity distribution in open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 5, pp. 576-594.
- Choo, T.H. (1990). *Estimation of energy momentum coefficients in open channel flow by Chiu's velocity distribution equation*. Master's thesis, University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA, USA.
- Greco, M., Mirauda, D., and Plantamura, A.V. (2014). Manning's roughness through the entropy parameter for steady open channel flows in low submergence. *Procedia Engineering*, Vol. 70, pp. 773-780.
- Kim, E.S., and Choi, H.I. (2009). Verification and application of velocity measurement using price meter and ADCP. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 9, No. 3, pp. 101-106.

- Lee, H.C., and Lee, E.T. (2003). A study on the channel forming discharge estimation and the hydraulic geometry characteristics of the alluvial stream. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 5, pp. 823-838.
- Lee, J.J., and Kwon, H.H. (2010). A basic study of stage-discharge rating stabilization at the Ssang-chi gauging station. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 1B, pp. 81-87.
- Moramarco, T., Corato, G., Melone, F., and Singh, V.P. (2013). An entropy-based method for determining the flow depth distribution in natural channels. *Journal of Hydrology*, Vol. 497, pp. 176-188.
- Moramarco, T., and Singh, V.P. (2010). Formulation of the entropy parameter based on hydraulic and geometric characteristics of river cross sections. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 852-858.
- Yang, H.K., Choi, H.C., and Kim, J.H. (2005). River discharge estimation by specific discharge measurement. *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 40, No. 3, pp. 274-284.

Received	October 11, 2019
Revised	October 15, 2019
Accepted	November 18, 2019