

자갈하상하천에서 등가조도 산정에 관한 연구

A Study on Equivalent Roughness Estimations in Gravel Bed Stream

이신재*, 박상우**, 장석환***, 최계운****, 전병호*****

Sin Jae Lee, Sang Woo Park, Suk Hwan Jang, Kye Woon Choi, Byung Ho Jun

요 지

본 연구는 자갈하상하천에서 하상에 분포하는 입자에 작용하는 전단력을 이용하여 등가조도를 산정할 수 있는 모형을 개발하였다. 등가조도는 기존의 연구들처럼 경험적으로 특정입도에 의해 산정하지 않고 하상에 분포하는 각 입자에 작용하는 입자 전단력을 산정하고, 하상 평균전단력과의 관계로서 산정하였다. 입자 전단력은 항력을 통해 산정하였으며, 이때 항력계수는 입자의 돌출 높이를 고려할 수 있도록 하였다. 또한 입자에 부딪히는 평균유속은 수치적분을 통해 입자의 돌출 높이에 따라 가변성을 고려할 수 있도록 식으로 제시하였다. 단위면적당 입자 전단력과 하상 평균 전단력과의 관계를 통해 등가조도의 함수로서 식을 제시한 후 수치해석방법의 하나인 증분 탐색 범을 통해 등가조도를 산정할 수 있도록 하였다. 그리고 산정된 등가조도를 이용하여 수위-유량관계 및 흐름저항매개변수를 산정하여 적정성을 검토하였다.

핵심용어 : 등가조도, 입자 전단력, 항력, 항력계수, 평균유속높이

1. 서 론

흐름저항은 하상의 입자, 식생, 하상형상, 하도형태 등에 의해 발생하는데, 안정된 자갈하상하천에서는 대부분 흐름저항이 하상에 돌출된 입자에 의해 발생한다고 할 수 있다. 하상에 분포하는 입자에 의한 조도는 입자의 분포와 크기에 주요하게 관련되는데, 자연하천의 하상에 분포하는 입자는 비균일하기 때문에 등가조도를 산정하여 흐름저항 해석을 수행하게 된다. 지금까지의 등가조도에 대한 기존 연구들은 대부분 특정입도와 상수와의 관계인 경험적 방법으로 등가조도를 산정하였으며, 각 연구마다 사용된 입도 및 상수가 많은 편차를 보이고 있다. 이러한 이유는 실험 또는 야외 측정의 범위가 한정적이고, 또한 하상에 분포하는 입도분포의 특성이 상이하기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 하상특성이 다른 하천에서 이러한 경험적 방법의 적용은 흐름해석 결과에 많은 오차를 유발하게 되므로, 하상에 분포하는 입자의 크기 및 분포특성이 다른 하천에서도 적용이 가능한 등가조도의 산정 방법이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 자갈하상하천에서 등가조도를 특정입도에 의해 산정하지 않고, 각 하상에 분포하는 입자의 입도분포특성을 고려할 수 있도록 해석적인 방법에 의해 산정할 수 있는 수치모형을 개발하였다. 모형은 각 입자의 돌출높이를 고려할 수 있도록 Martin(2003)이 제시한 항력계수 식을 이용하였으며, 또한 평균유속이 작용하는 높이 역시 본 연구에서 수치적분을 이용하여 돌출높이에 따라 가변성을 갖도록 식을 제시하여 이를 이용하였다. 모형은 하상 평균전단력과

* 정회원·유량조사사업단 영산강그룹 부그룹장 E-mail : lsj@kict.re.kr

** 정회원·서남대학교 토목공학과 교수 E-mail : psw0232@seonam.ac.kr

*** 정회원·대진대학교 토목공학과 교수 E-mail : drjang@daejin.ac.kr

**** 정회원·인천대학교 토목환경시스템공학과 교수 E-mail : kyewoon@incheon.ac.kr

***** 정회원·육군사관학교·토목환경학과 명예교수 E-mail : bhjun@kma.ac.kr

입자전단력과의 관계를 통해 등가조도를 산정할 수 있는 모형을 개발하였는데, 이때 수치해석 방법으로는 충분 탐색법이 적용된다.

모형을 통해 산정된 등가조도의 적정성 검토는 등가조도를 흐름모형에 적용하여 수위-유량관계도의 작성 및 흐름저항 매개변수(조도계수 n , Chezy 계수 C , 마찰계수 f)를 산정하여 관측된 값과의 비교를 통해 검토하게 된다.

2. 적용이론

2.1 입자의 전단력

정상동류의 흐름에서 하상의 단면 평균전단력(τ_0)은 자유수면과 평행하게 위치한 물기둥에 작용하는 힘의 균형을 고려함으로써 유도되는데, 힘의 균형은 물기둥에 작용하는 중력의 흐름방향의 분력과 경계면의 마찰력인 단면 평균전단력과의 균형으로서 식 (1)과 같다. 즉 이 의미는 흐름저항이 하상의 표면마찰에 의해서만 발생한다면 식 (2)와 같이 단면 평균전단력은 경계면에서 마찰력을 발생시키는 단위 면적당 구성하고 있는 입자에 의한 전단력과 같다고 할 수 있으며, 입자 전단력(τ_g)은 식 (2)와 같이 항력(F_D)으로 산정할 수 있다.

$$\tau_0 = \rho g R s_0 \quad (1)$$

$$\tau_0 = \tau_g = F_D = C_D \frac{\pi D^2}{4} \frac{\rho u_m^2}{2} \quad (2)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, R 은 경심, s_0 는 하상경사, D 는 입자의 직경으로 입도분석을 통해 산정할 수 있다. 그리고 C_D 는 항력계수, u_m 은 입자에 부딪히는 평균유속이다.

2.2 항력계수

항력계수 C_D 는 입자의 형상마다 다른 값을 갖게 되는데, 완전난류흐름에서는 구형의 경우 0.5의 값을 가지게 된다(Coleman, 1967). 실제 하상에 분포하는 입자는 입자 전체가 노출되지 않고 일부분만 노출되어 흐름저항에 영향을 준다. 따라서 본 연구에서는 입자의 상대돌출 H/D (relative protrusion)에 대한 항력계수 C_D^* 를 Martin(2003)이 입자의 상대돌출 H/D 를 고려하여 제시한 식 (3)을 이용하여 산정하였다.

$$C_D^* = 0.54 (1 - \exp(-2.6 \frac{H}{D})) \quad (3)$$

여기서 H 는 직경 D 를 갖는 입자가 하상표면으로부터 돌출높이다. 실제 하천에서 하상에 분포하는 입자들은 입자의 전체가 흐름에 돌출된 것이 아니라 일부분만 돌출된다. 하지만 실제 하천에서 모든 입자의 돌출높이를 측정하는 것은 불가능한 일이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 평균적인 의미로 입자의 돌출높이를 $0.5D$ 로 간주하였으며, 이 때 유속이 0이 되는 높이 $k_s/30$ 를 고려하면 상대돌출 H/D 는 식 (4)와 같다.

$$\frac{H}{D} = \frac{0.5D - \frac{k_s}{30}}{D} \quad (4)$$

식 (2)에 상대돌출의 함수인 항력계수 C_D^* 를 대입하면 개개의 입자에 대한 단위면적당 항력 또는 전단력 τ' 을 식 (5)와 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\tau' = C_D^* \frac{\rho u_r^2}{2} \quad (5)$$

2.3 입자에 작용하는 유속분포 및 평균유속

하상의 입자는 돌출높이에 따라 형상이 구형, 반구 등 여러 형상으로 변하기 때문에 평균유속이 작용하는 높이 y_m 도 변하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 입경 D 를 갖는 입자에 작용하는 항력에 대해 수치적분을 통해 돌출높이에 따른 평균유속이 작용하는 높이 y_m 을 산정하였다. 그림 1은 입경 D 를 갖는 입자의 미소단면에 작용하는 항력을 나타내는 그림이다.

입자의 전체 투영단면적에 작용하는 항력 F_D 는 식 (6)과 같이 각 미소단면에 작용하는 항력 dF_D 를 식 (3.11)과 같이 적분함으로서 산정하며, 이는 입자의 전체 투영단면적 A_g 에 평균유속 u_m 이 작용할 때의 항력 F_D 와 같다.

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho u_m^2 A_g = \int dF_D = \int C_D \frac{1}{2} \rho u_y^2 dA_g = \int C_D \frac{1}{2} \rho u_y^2 2r \cos \theta dy \quad (6)$$

입자 전체 투영단면적 A_g 에 작용하는 평균유속 u_m 이 작용하는 높이 y_m 은 돌출높이에 따른 항력 F_D 를 식 (6)에 의해 계산하고, 이에 대응하는 평균유속 u_m 의 작용높이를 거친하상에서의 유속분포식을 이용하여 산정하였다. 그 결과 입자의 상대돌출 H/D 에 따라 평균유속이 작용하는 높이 y_m 은 표 1과 같다.

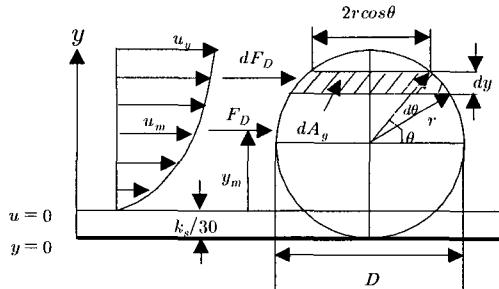


그림 1. 입자의 미소단면에 작용하는 항력

표 1 입자의 상대돌출에 대한 평균유속 높이

H/D	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6
y_m/H	0.448	0.414	0.396	0.385	0.379
H/D	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
y_m/H	0.375	0.377	0.382	0.398	0.450

표 1의 값에 대해 회귀분석(regression analysis)을 통해 상대돌출(H/D)의 함수로 식을 만들고, 하상으로부터 유속이 0이 되는 높이 $k_s/30$ 를 더하면 식 (7)과 같다.

$$y_m = [0.490 - 0.538 \frac{H}{D} + 0.704 (\frac{H}{D})^2 - 0.213 (\frac{H}{D})^3] \times H + \frac{k_s}{30} \quad (7)$$

따라서 입자에 작용하는 평균유속은 거친하상에서의 유속분포식에 대입하면 식 (8)과 같다.

$$\frac{u_y}{u^*} = 5.75 \log \left(\frac{30y}{k_s} \right) \Rightarrow \frac{u_m}{u^*} = 5.75 \log \left(\frac{30y_m}{k_s} \right) \quad (8)$$

2.4 등가조도 산정을 위한 수치해석 방법

등가조도는 하상의 단면 평균전단력과 단위면적당 입자 전단력의 관계로서 산정된다. 하상의 단면 평균전단력과 단위면적당 입자 전단력을 같게 놓으면 식 (9)와 같다.

$$\rho g R s_0 = C_D \frac{\rho}{2} \left[u^* 5.75 \log \left(\frac{30y_m}{k_s} \right) \right]^2 \quad (9)$$

식 (9)에서 우변의 전단속도 u^* 는 $\sqrt{g R s_0}$ 이므로 이를 제곱하여 양변의 $\rho g R s_0$ 를 소거하면, 식 (9)는 식 (10)과 같이 등가조도 k_s 의 함수로 표현할 수 있다.

$$f(k_s) = C_D \frac{1}{2} \left[5.75 \log \left(\frac{30y_m}{k_s} \right) \right]^2 - 1 = 0 \quad (10)$$

식 (10)은 하나의 입자에 대한 값이 아니고 다양한 입경을 가진 단위면적당 분포하는 각 입자에 대한 함수이기 때문에 직접적으로 해를 찾을 수 없다. 따라서 본 연구에서는 수치해석 방법 중 충분 탐색법을 이용하여 등가조도 k_s 를 산정할 수 있도록 하였다. 충분 탐색법은 $f(k_s)$ 값이 0이 되는 k_s 값을 초기의 k_{s1} 값에서부터 직접 대입하고, 충분 감소율을 적용하여 해를 찾아내는 방법이다.

3. 모형의 적용

3.1 등가조도 산정

본 연구에서는 제안된 모형을 적용하고 그 적정성에 대해 검토하고자 섬진강의 곡성, 구례, 남원지점에서 등가조도를 산정하고 적정성을 검토하였다. 표 2는 세 지점의 하상토를 채취하여 분석한 결과 및 본 연구에서 제안된 모형을 통해 등가조도를 산정한 결과이다. 세 지점 모두 등가조도는 최대입경보다 큰 값이 산정되었다.

표 2 하상토 특성값 및 등가조도

지점	유효입경 (D_{10})	D_{15}	중앙입경 (D_{50})	D_{60}	균등계수 (D_{60}/D_{10})	D_{84}	등가조도 k_s (mm)
곡성	42mm	45mm	50mm	60mm	1.33	75mm	205.9
구례	1.3mm	17mm	38mm	45mm	34.6	65mm	212.9
남원	0.93mm	1.2mm	55mm	70mm	76.3	110mm	181.6

3.2 등가조도 적정성 검토

등가조도 산정모형의 적정성을 검토하기 위해 섬진강의 세 지점에 대해 Wark 등(1990)이 제시한 1차원 흐름모형인 식 (11)를 이용하여 수위-유량관계도를 작성하고, 실측된 수위-유량자료와 비교 검토하여 그 적정성을 판단하였다.

$$g y S_r - \frac{B_s f q^2}{8 y^2} + \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon \frac{\partial q}{\partial x}) = 0 \quad (11)$$

여기서 y 는 측방분포한 흐름깊이, S_r 는 마찰경사로 본 연구에서는 하상경사를 이용하였다. ε 는 측방분포한 와점성계수, x 는 측방좌표이다. 그리고 B_s 는 하상단면의 횡방향의 경사표면과 종방향 경사표면을 고려하여 전단응력을 구하기 위한 계수이다. 그리고 f 는 측방분포한 Darcy-Weisbach의 마찰계수로서 Hey(1979)는 식 12와 같이 제시하였는데, 본 연구에서는 식 12의 k_s 를 각 지점에 대해 표 2의 값을 이용하였다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log \left(\frac{aR}{k_s} \right) \quad (12)$$

여기서 a 는 하도의 단면형상 수정계수로써 식 (13)과 같으며, y_{max} 는 흐름 최대깊이이다.

$$a = 11.1 \left(\frac{R}{y_{max}} \right)^{-0.314} \quad (13)$$

식 11를 이용하여 세 지점에 대해 수위-유량관계도를 작성하면 그림 2와 같다. 곡성지점의 경우 관측값과의 절대평균오차는 2.21%, 구례지점은 2.51%, 남원지점은 7.82%로서 10%이내의 오차를 보여 본 연구의 모형에 의해 산정된 등가조도의 적정성을 판단할 수 있었다.

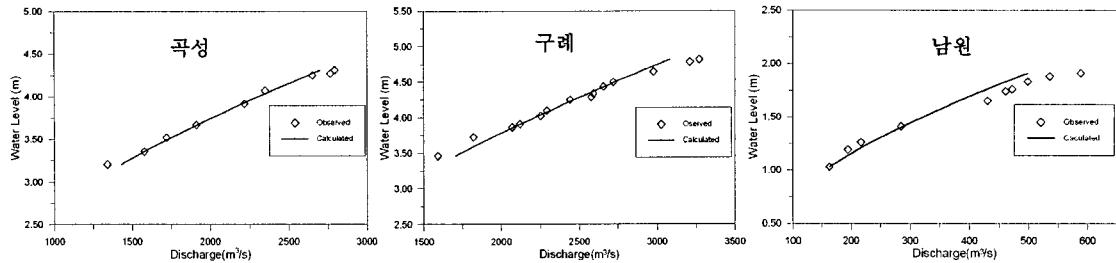


그림 2. 수위-유량관계도

또한 흐름저항 매개변수를 등가조도를 이용하여 산정한 결과는 표 3과 같으며, 관측된 자료를 이용하여 산정한 흐름저항 매개변수와 절대평균오차가 세 지점 모두 관측된 자료를 통해 산정된 값과 크지 않아 산정된 등가조도의 적정성을 확인할 수 있었다.

표 3 흐름저항 매개변수 산정결과

곡성				구례				남원					
관측값			계산값	관측값			계산값	관측값			계산값		
<i>f</i>	<i>C</i>	<i>n</i>											
0.0508	39.3	0.0307	0.0481	40.4	0.0299	0.0508	39.3	0.0307	0.0481	40.4	0.0299		
0.0495	39.8	0.0307	0.0467	41.0	0.0298	0.0495	39.8	0.0307	0.0467	41.0	0.0298		
0.0470	40.8	0.0301	0.0459	41.3	0.0298	0.0470	40.8	0.0301	0.0459	41.3	0.0298		
0.0455	41.5	0.0299	0.0449	41.8	0.0297	0.0455	41.5	0.0299	0.0449	41.8	0.0297		
0.0425	42.9	0.0291	0.0442	42.1	0.0297	0.0425	42.9	0.0291	0.0442	42.1	0.0297		
0.0410	43.8	0.0288	0.0436	42.4	0.0297	0.0410	43.8	0.0288	0.0436	42.4	0.0297		
0.0409	43.8	0.0289	0.0434	42.5	0.0297	0.0409	43.8	0.0289	0.0434	42.5	0.0297		
0.0380	45.4	0.0280	0.0428	42.8	0.0297	0.0380	45.4	0.0280	0.0428	42.8	0.0297		
0.0355	47.0	0.0272	0.0422	43.1	0.0297	0.0355	47.0	0.0272	0.0422	43.1	0.0297		
절대 평균오차			0.00411	1.68	0.00123	절대 평균오차			0.00327	1.68	0.00112		
						절대 평균오차					0.01051	2.73	0.00238

4. 결 론

본 연구의 등가조도 산정모형은 등가조도를 기존의 연구들에서와 같이 특정입도에 의해 경험적으로 산정하지 않고 하상토의 입도분석자료를 이용하여 하상에 분포하는 각 입자의 둘출높이를 고려한 항력계수 및 평균유속높이를 모형에 적용함으로써 흐름저항을 발생시키는 입자의 유효단면적에 대한 등가조도를 산정할 수 있는 모형을 개발하였다. 따라서 본 모형은 하상의 입도분포특성을 고려할 수 있기 때문에 하상 특성이 다른 하천에 대해서도 적용이 가능한 모형이라 할 수 있다. 그리고 모형에 의해 산정된 등가조도를 이용하여 수위-유량관계도 및 흐름저항 매개변수를 산정한 결과 10% 이내의 오차를 보여 적정성을 판단 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 이신재(2007), 자갈하상하천에서 등가조도 산정을 위한 모형개발, 박사학위논문, 서남대학교.
2. Hey, R.D. (1979). Flow Resistance in Gravel-Bed Rivers, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 105(4), 365-379.
3. Martin, V. (2003). Hydraulic Roughness of Armoured Gravel Beds : the Role of Grain Protrusion. Ph.D. dissertation, University of British Columbia.