

국내 중소하천에서 총 유사량 산정 공식의 민감도 분석

Sensitivity Analysis of Total Sediment Load Formulas
in Midsize River in Korea

이진휘*, 최성욱**

Jinhwi Lee, Sung-Uk Choi

1. 서 론

하천 유사는 유역 유사유출량과 하도 내에서 침식된 유사와 혼합되어 발생한다. 하천의 침식 및 퇴적에 따른 홍수범람, 이수 및 치수 기능 저하 등 유사에 의한 피해를 최소화하기 위해서는 유사의 거동에 대한 연구가 수행되어야 한다. 총 유사량 공식을 실제 하천에 적용하여 유사량을 산정할 때 필요한 입력 변수들을 정확히 실측하는 것은 굉장히 어려운 일이다. 특정 하천 구간에서 각 측정 지점에 따라 입자의 분포와 경사 등이 변화하므로 유사량 산정 공식이 특정 변수에 민감한 경우 작은 측정오차에도 유사량 산정에 큰 오차가 발생하게 된다. 따라서 입력 변수에 대한 민감도 분석을 위해 유량과 하상경사, 입자크기가 유사량 산정에 미치는 영향을 확인해야 한다.

2. 지배방정식

2.1 흐름 모형

본 연구에서 흐름모형은 Knight and Shiono (1990)이 제시한 유량 횡분배 모형 (lateral distribution method)으로 아래의 지배방정식을 해석하면 수심적분된 횡방향 유속을 얻을 수 있다. 이는 식 1과 같으며 이차류에 의한 영향은 고려되지 않았다.

$$ghS_x = \frac{gn^2}{h^{1/3}} B_g U^2 - h \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (1)$$

여기서, h 는 수심, U 는 수심평균 유속, B_g 는 기하학적 인자 ($= \sqrt{1+S_x^2+S_y^2}$), S_x 와 S_y 는 각각 종방향과 횡방향 하상경사, n 은 조도계수, ε_y 는 수심적분된 횡방향 와점성 계수로 식 2와 같다.

$$\varepsilon_y = \chi_y U_* h \quad (2)$$

여기서, χ_y 는 무차원 횡방향 와점성 계수로 일반적인 개수로 흐름에 사용되는 0.16을 사용하였다.

2.2 총 유사량 공식

(1) Engelund-Hansen 공식

Engelund-Hansen (1967)은 총유사량 산정 공식을 식 3과 같이 제시하였다.

* 연세대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정 · E-mail : guyjinh@yonsei.ac.kr

** 정희원 · 연세대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 · E-mail : schoi@yonsei.ac.kr

$$\frac{q_t}{\sqrt{RgD_{50}}D_{50}} = \frac{1}{C_f} 0.05(\tau^*)^{5/2} \quad (3)$$

여기서 D_{50} 은 중앙입경, τ^* 는 무차원 전단응력, C_f 는 표면마찰항력과 형상항력을 합한 항력 계수이다.

(2) Brownlie 공식

Brownlie (1981)은 1,000개 이상의 실험과 실측자료를 회귀하여 제시한 식으로 다음과 같다.

$$C_s = 7,115c_f \left(\frac{U}{\sqrt{RgD_{50}}} - F_{g0} \right)^{1.978} S^{0.6601} \left(\frac{R_h}{D_{50}} \right)^{-0.3301} \quad (4a)$$

$$F_{g0} = 4.596(\tau_c^*)^{0.5293} S^{-0.1045} \sigma_g^{-0.1606} \quad (4b)$$

$$\tau_c^* = 0.22Re_p^{-0.6} + 0.06 \times 10^{(-7.7Re_p^{-0.6})} \quad (4c)$$

여기서, Re_p 는 입자 레이놀즈 수 ($= \sqrt{RgD}D/\nu$), σ_g 는 입자의 기하 표준편차, c_f 는 상수로 실험수로에서 1, 실제하천은 1.268을 적용한다.

(3) Yang 공식

Yang (1979) 공식은 단위 수류력을 변수로 하여 유사량 자료를 이용한 회귀식을 식 5와 같이 제시하였다.

$$\begin{aligned} \log(C_s) = & 5.165 - 0.153 \log\left(\frac{v_s D_{50}}{\nu}\right) - 0.297 \log\left(\frac{u_*}{v_s}\right) \\ & + \left\{ 1.780 - 0.360 \log\left(\frac{v_s D_{50}}{\nu}\right) - 0.480 \log\left(\frac{u_*}{v_s}\right) \right\} \log\left(\frac{US}{v_s}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, v_s 는 입자침강속도, ν 는 동점성계수이다.

(4) Ackers-White 공식

Ackers와 White (1973)은 무차원 유사량 이동 수 (mobility number)를 이용하여 유사농도를 계산하였다.

$$C_s = 10^6 c \frac{\rho_s}{\rho} \frac{D_{50}}{R_h} \left(\frac{U}{u_*} \right)^n \left(\frac{F_{gr}}{A_{aw}} - 1 \right)^m \quad (6a)$$

$$F_{gr} = \frac{u_*^2}{\sqrt{RgD_{50}}} \left[\frac{U}{\sqrt{32 \log(10R_h/D_{50})}} \right]^{1-n} \quad (6b)$$

여기서, ρ_s 는 입자의 밀도, F_{gr} 은 유사량 이동 수이다. 식 6의 c,n,m 그리고 A_w 는 무차원 입자 직경 D_{gr} 의 함수이다.

(5) Karim 공식

Karim (1998)은 339개의 실측자료와 608개의 실험자료에 대한 회귀분석 식을 simpler power relation으로 식을 간편화 시켰다.

$$\frac{q_t}{\sqrt{gRD_{50}}D_{50}} = 0.00139 \left(\frac{U}{\sqrt{gRD_{50}}} \right)^{2.97} \left(\frac{u_*}{v_s} \right)^{1.47} \quad (7)$$

3. 기법의 적용

유사량 산정 공식의 적용대상 하천은 낙동강의 북부에 위치한 국내 중소 하천인 내성천이다. 내성천의 유역면적은 1,153.1 km², 유로 연장은 108.2 km이며 평균 하상경사는 1/600

이다. 유량이 4 cms에서 최대 200 cms로 흐르는 중소 하천이며, 유사량 및 수리량 측정 지점은 내성천의 상류에 위치한 석포교이다. 채취된 하상토의 입자직경 0.5~4.0 mm 내 비교적 조립질의 모래로 이루어져 있고 측정된 평균 수면경사는 0.00025이다 (건설교통부, 1992). 그림 1은 석포교 지점의 하천단면과 최대 유량 266 cms 일 때의 횡방향 유속 및 단위폭당 유량 분포를 나타낸 것이다. 홍수기 석포교의 최대 유속은 약 1.1 m/s이며 이때의 수심은 2.3 m이다. 하상단면은 단단면 형태를 보이며 유속 및 단위폭당 유량도 횡방향으로 균일하게 분포한다. 흐름 모의에 필요한 조도계수를 검정하기 위해 실측 유속과 유수단면적을 계산된 값과 비교하였고 조도계수는 0.05로 결정하였다.

4. 민감도 분석

하천에서 총 유사량은 유량과 하상경사, 하상토의 크기 등에 영향을 받는다. 따라서 이러한 변수들이 총 유사량에 미치는 영향을 알아보기 위해 5가지 대표적 총 유사량 공식을 이용하여 민감도 분석을 수행하였다. 그림 2는 각 공식의 입력변수에 대한 민감도를 나타낸 그림이며 총 유사량 산정 공식으로 계산된 유사량은 입력변수에 따라 변화량이 상이하게 나타났다. 민감도 분석은 입력변수를 10% 증감시켰을 때 유사량 변화의 크기를 확인하는 방법으로 수행하였다. EH 공식과 YA 공식, KA 공식은 유량의 변화에 따른 유사량 변화율이 16% 정도이며 BR 공식은 17%, AW 공식은 20%의 변화율을 보였다. 경사에 대해서는 AW 공식이 25%로 가장 민감하였고 EH 공식, BR 공식, YA 공식이 약 17%, KA 공식은 15%의 변화율을 보였다. 한편 유량 및 경사와 유사량은 비례관계에 있으나 입자 직경에 대해서는 반비례 관계를 가지는 것을 알 수 있다. 입자 직경에 대한 민감도에서 AW는 33%의 큰 변화율을 보인 반면 YA 공식은 둔감한 반응을 보였다.

5. 결 론

본 연구에서는 내성천의 석포교 지점에 유량 횡분배법을 이용하여 횡방향 수심적분된 유속을 계산하였고 총 유사량 공식을 통해 산정된 유사량으로 입력변수의 변화에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 제시된 모든 공식은 유량 변화대비 유사량이 17% 정도 더 크게 변화하였으며 경사에 대해서도 18% 정도의 더 큰 변화를 보였다. 특히 AW 공식은 25%의 변화율을 가진다. 입자 직경에 대해서는 AW 공식을 제외한 나머지 공식은 크게 민감하지 않은 것으로 나타났으며 YA 공식은 큰 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 유사량 공식은 유량과 경사에 민감하며 특히 경사의 민감도가 더 큰 것으로 나타났다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업 (08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부. (1992). 댐 설계를 위한 유역단위 비유사량 조사·연구.
2. Ackers, P., and White, W. R. (1973). "Sediment transport: New approach and analysis." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 99(11), 2041-2060.
3. Brownlie, W. R. (1981). "Prediction of flow depth and sediment discharge in open

- channels.”, Report No. *KH-R-43A*, Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, CA.
4. Engelund, F. and Hansen, E. (1967). “A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams.”, Teknisk Vorlag, Copenhagen, Denmark, 1967.
 5. Karim, F. (1998). “Bed material discharge prediction for nonuniform sediment”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 124(6), 597-604.
 6. Shiono, K. and Knight, D.W. (1990). “Mathematical models of flow in two or multi stage straight channels”. *Proceedings of International Conference on River Flood Hydraulics*, edited by W.R. White, Wallingford Paper G1, 229-238.
 7. Yang, C. T. (1979). “Unit stream power equations for total load.” *Journal of Hydrology*, 40, 123-138.

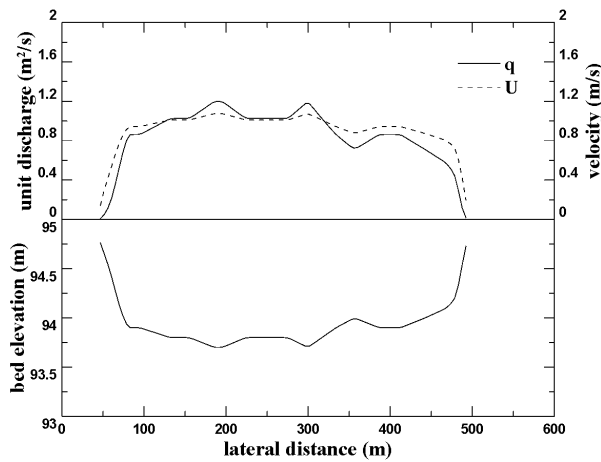


그림 1. 하천단면과 유량 및 유속의 횡방향 분포

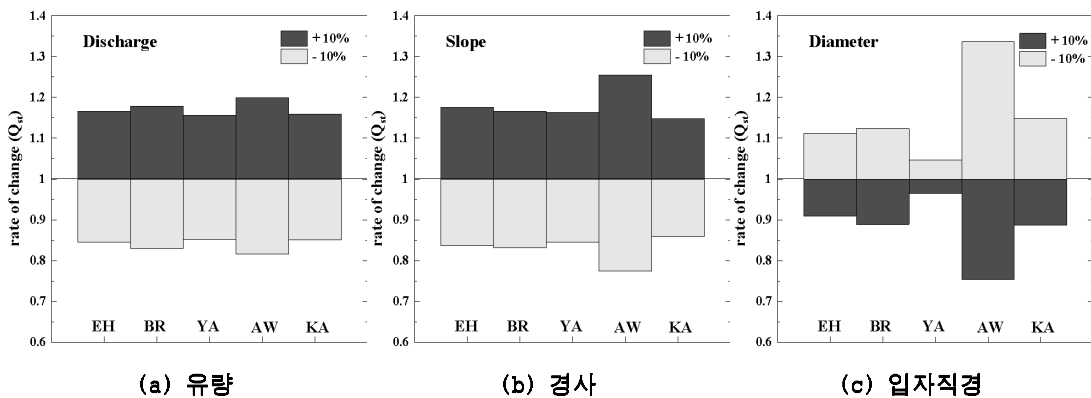


그림 2. 입력변수에 대한 민감도 분석