

유량 횡분배법을 이용한 소류사량 예측

Prediction of Bedload Transport using Lateral Distribution Method

최성욱*, 이진휘**
Sung-Uk Choi, Jinhwi Lee

요 지

본 연구에서는 실제 하천에서 유사량을 산정하기 위해 유량의 횡분배법을 활용하는 방법을 제시하였다. 유량의 횡분배법은 Shiono and Knight (1990)가 제안한 방법으로, 하천의 한 측점에서 유량 및 수위가 결정된 경우 지배방정식의 해석을 통하여 횡방향으로 단위 폭 당 유량과 수심적분 유속을 구하는 방법이다. 제안된 방법을 Camenen et al. (2012)의 측정 자료에 적용하였다. Camenen et al. (2012)은 Slovakia의 Danube River에서 basket type bedload sampler를 이용하여 Gabčíkovo 발전소 하류 지점에서 소류사를 채취하였다. 유량 횡분배법에 의해 계산된 수리량에 기초하여 modified Meyer-Peter and Muller 공식 (Wong and Parker, 2006)과 Camenen and Larson (2005)공식을 이용하여 횡방향 소류사 분포와 총 소류사량을 계산하였다. 제시된 소류사량 산정 기법을 Danube River의 소류사 측정 자료를 통해 검증하였다.

핵심용어: 소류사, 유사이동, 유량 횡분배법, Meyer-Peter and Muller 공식, Camenen and Larson 공식

1. 서 론

수자원개발 및 하천수질에 대한 문제가 부각됨에 따라 유사의 이동에 대한 정확한 측정과 예측에 대한 연구가 중요해지고 있다. 일반적으로 하천에서 소류사량은 총 유사량의 약 5-20%를 차지하며 유사이동에 대한 정확한 예측을 위해서는 소류사량 공식 선정이 중요하다. 본 연구에서는 실제 하천에서 유사량을 산정하기 위해 유량 횡분배법과 소류사량 산정 공식을 이용하여 유량 및 유사량 예측을 위한 방법을 제시하였다. 유사량을 산정하는데 유량의 횡분배법을 이용하면 하도의 기하학적 특성에 의한 흐름 분배를 고려하므로 횡방향으로 수심의 변화가 크거나 유심부가 잘 발달한 하도에서 기존의 1차원 방법에 비해 더 정확한 예측을 할 수 있다.

2. 지배방정식

2.1 유동 모형

Shiono and Knight (1990)는 등류 상태 개수로 흐름에 대해 레이놀즈 방정식을 수심 적분하여 다음 식을 제시하였다.

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

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

$$g S + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho H \epsilon_{yx} \frac{\partial U}{\partial y} \right) - \tau_b = \Gamma \quad (1)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, H 는 수심, S_0 는 하상경사 (= 수면경사 = 에너지선 경사), $\overline{\epsilon_{yx}}$ 은 수심 적분한 난류점성계수, U 는 수심 적분한 유속, τ_b 는 하상전단응력, 그리고 Γ 는 이차류의 영향을 나타내는 항이다. 위의 식에서 하상전단응력을 Darcy-Weisbach의 마찰계수 f 를 이용해서 표현하면 하상전단응력과 난류점성계수는 각각 다음과 같다.

$$\tau_b = \frac{\rho f U^2}{8} \quad (2)$$

$$\overline{\epsilon_{yx}} = \lambda U_* H = \lambda H \left(\frac{f}{8} \right)^{1/2} U \quad (3)$$

여기서 λ 는 무차원 와점성계수, U_* 는 전단속도이다. 또한, 이차류에 의한 항 Γ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma = \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_0^y \rho u v dz \right) \quad (4)$$

여기서 \bar{u} 와 \bar{v} 는 각각 시간 평균된 종방향 및 횡방향 유속을 나타낸다. 본 연구에서는 $\Gamma=0$ 으로 이차류에 대한 영향은 고려하지 않는다.

2.2 소류사량 산정

소류사량은 단위 폭 당 유사입자의 체적흐름률로 정의되며 소류사량에 대한 무차원 수인 Einstein 소류사 수 (bedload number)는 다음과 같이 정의된다.

$$q_b^* = \frac{q_b}{g D D} \quad (5)$$

1948년에 제시된 Meyer-Peter and Muller (MPM) 공식은 하상형상이 없는 하도에서의 소류사 공식을 제시하였는데, 최근 Wong (2003)은 자료를 다시 분석하여 다음과 같이 수정된 공식을 제시하였다.

$$q_b^* = 4.93(\tau^* - \tau_c^*)^{1.6}, \quad \tau_c^* = 0.047 \quad (6)$$

혹은

$$q_b^* = 3.97(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2}, \quad \tau_c^* = 0.0495 \quad (7)$$

한편, Camenen and Larson (2005)는 소류사량 산정 공식을 식 (8) 과 같이 제시하였다.

$$q_b^* = 12(\tau^*)^{1.5} \exp - 4.5 \left(\frac{\tau_c^*}{\tau^*} \right), \quad \tau_c^* = 0.055 \quad (8)$$

τ^* 는 Shields 수로 표면마찰에 의한 저항력을 나타내며 표면마찰에 의한 수심을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\tau^* = \frac{\tau}{\rho g R D} = \frac{\rho C_f U^2}{\rho g R D} \quad (9)$$

여기서 R 은 입자의 수중단위중량, C_f 는 마찰계수로 Keulegan 공식으로부터 얻어진다.

$$\left[\frac{1}{\kappa} \ln \frac{H_s}{K_s} \right]^{-2} \quad (10)$$

여기서 n 는 von Karman 상수, d_j 는 하상 입자에 의한 표면마찰이 부담하는 수심, K_s 는 유효조도높이이다.

4. 입도분포 효과

입도분포 효과를 고려하기 위해 소류사를 크기에 따라 범위를 나누어서 계산할 수 있는데, 각 입자의 초기거동을 구분하기 위해 임계 전단응력을 각 입자에 따라 다르게 적용하여야 한다. 모래는 자갈 아래에 위치하여 유수에 의해 작용하는 전단력이 감소하며, 자갈은 유수에 직접 노출되어 전단력이 증가한다. 이를 반영하기 위해 차폐효과 계수를 사용하는데 Ferguson et al. (1989)과 Wilcock and Crowe (2003)은 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$k_{s,j} = \tau_c \left(\frac{d_j}{d_{50}} \right)^b \quad (11)$$

여기서 $0 < b \leq 1$ 이며 Ferguson et al. (1989)는 $b = b_{er} = 0.12$ 를 제시하였고 Wilcock and Crowe (2003)은 $b = b_{wc} = 0.67/[1 + \exp(1.5 - d_j/d_{50})]$ 를 제시하였다.

5. 기법의 적용

적용대상 하천은 슬로바키아에 있는 Danube 강으로 Gavcikovo의 수력발전소 하류 구간이다. 소류사는 basket type bedload sampler를 이용하여 채취되었으며 하상토는 5-22 mm의 범위를 가진다. 중앙입경은 9 mm로 중간과 굵은 자갈에 해당한다. Danube River의 평수량은 $950 \text{ m}^3/\text{s}$, 홍수위 유량은 $4,750 \text{ m}^3/\text{s}$, 하상경사는 0.0002이며 폭이 약 350 m 정도이다. 유량 횡분배법에 적용할 조도계수를 결정하기 위해 각 유량에서 실측된 평균 유속과 횡방향 유량분배법을 통해 계산된 평균 유속을 비교하였다. 여러 조도계수를 비교해 본 결과 조도계수가 0.026에서 실측자료와 가장 잘 맞았다. 그림 1 은 최고 유량인 4,743 cms일 때의 단위 폭 당 유량과 유속이며 수심이 가장 깊은 곳에서 유량이 가장 많이 흘러간다. 이차류 (secondary currents)를 고려하지 않기 때문에 유량 변화에 대해 최대 유량 발생점은 변하지 않는다.

그림 3 과 그림 4 는 Danube River에 적용한 소류사량 산정기법에 따른 단위 폭 당 소류사량 분포이며 각각 modified MPM공식과 CL공식에 대한 계산결과이다. Camenen et al. (2006)에 제시된 유효조도높이 $k_s = 2.0d_{90}$ 을 사용하였다. modified MPM공식은 Duboys type으로 한계 Shields 수 이상에서 계산이 가능하므로 좌안의 소류사량만 산정되었다. 반면 CL공식은 Exponential type으로 우안에서의 소류사량도 계산이 가능하다. 그림 5 는 유량변화에 따른 소류사량을 CL공식을 이용하여 계산한 결과와 측정된 자료를 비교한 것이다. 실측값과의 상대오차는 0.41로 제시된 소류사 산정기법이 실측치와 유사하게 산정하는 것으로 나타났다. 1차원 모의는 전체적으로 낮게 예측하였으며 입도분포 효과 고려시 소류사량이 약 15%정도 감소하는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 유량 횡분배법을 이용하여 실제 하천에서의 소류사량을 산정하기 위한 방법을 제시하였다. 소류사량 산정기법을 Slovakia의 Danube River에서 측정된 소류사 측정자료를 통해 검증할 수 있었다. 유량횡분배법을 이용하여 하도 단면의 각 지점에 평균유속, 단위폭당 유량 등

을 계산하였고 modified MPM공식과 CL공식을 이용하여 횡방향 소류사 분포를 계산하였다. 모의된 소류사량의 횡분포가 측정자료의 분포와 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. modified MPM 공식을 사용하는 경우 임계 Shields수 이하에서는 소류사가 발생하지 않으나 CL공식은 소류력이 작은 지점에서 소류사량 산정이 가능하여 실측된 소류사량의 횡방향 분포와 유사하게 계산되었다. CL공식을 이용하여 유량 변화에 따른 소류사량과 실측값을 비교하였다. 1차원 모의기법은 실측값에 비해 전체적으로 과소 산정하였고 저유량에서 큰 오차를 보였으나 유량 횡분배법을 이용한 소류사량 산정기법은 실측치과 유사하게 나타났다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업인 “하천에서 유사이동 및 하상변동 예측을 위한 3차원 수치모형의 개발 (11기술혁신C04)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Camenen, B., Holubova, K., Lukac, M., Le Coz, J., and Paquier, A. (2011). Assessment of Methods Used in 1D Models for Computing Bed-Load Transport in a Large River: The Danube River in Slovakia. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 137(10), 1190-1199.
2. Ferguson, R., Prestegard, K., and Ashworth, P. (1989). Influence of sand on hydraulics and gravel transport in a braided gravel bed river. *Water Resources Research*, 25(4), 635-643.
3. 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.
4. Wilcock, P. R., Crowe, J. C. (2003). Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 120-128.

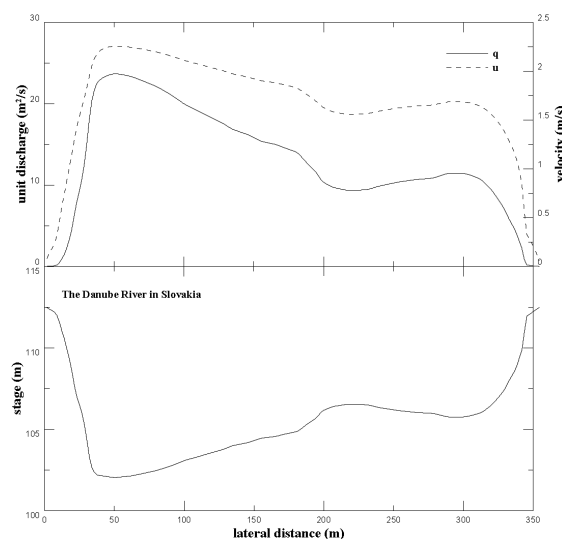


그림 1. Danube River의 단면과 유속 및 단위 폭 당 유량 분포

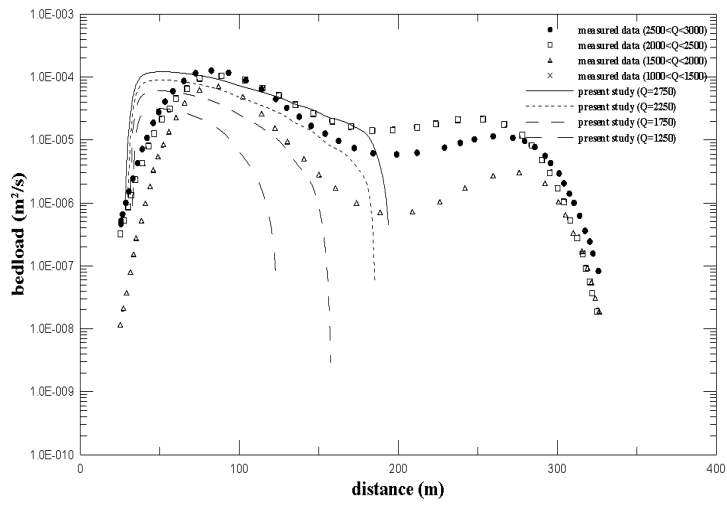


그림 2. 단위 폭 당 소류사량 분포 (MPPM)

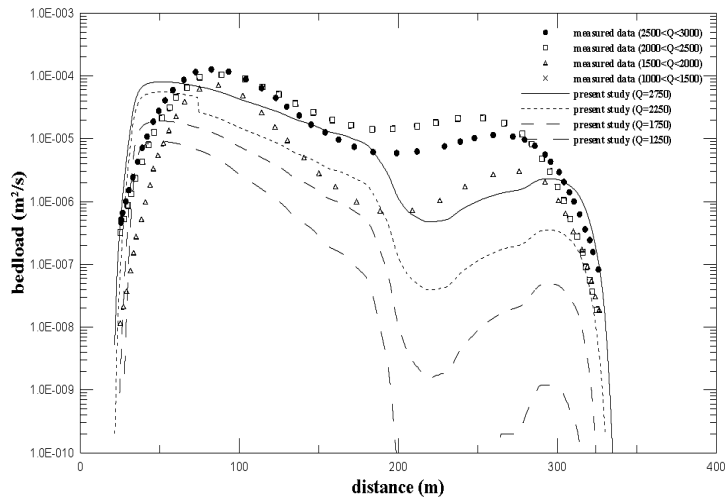


그림 3. 단위 폭 당 소류사량 분포 (CL)

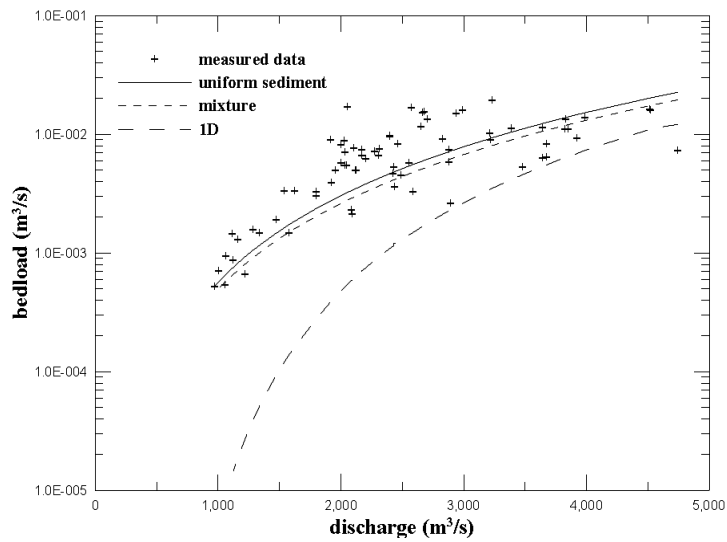


그림 4. 유량 변화에 따른 소류사량 산정 결과