

준설 웅덩이의 발달과정 모의

Numerical Simulations of Evolution of Mining-Pit

최성욱*, 최성욱**
Sung-Uk Choi, Seongwook Choi

요 지

하천에서의 골재 채취는 일시적으로 홍수위를 낮추는 순기능도 있지만 하천형태학적으로 좋지 않은 영향을 줄 수도 있다. 하천에서 골재 채취로 인한 준설웅덩이의 회복에 필요한 시간 혹은 과정은 공학적으로 매우 중요하다. 본 연구에서는 시간에 따른 준설 웅덩이의 발달 과정을 모의할 수 있는 수치모형을 제시하였다. 제시된 수치모형은 준정류 가정에 기초하는데, 이는 흐름은 정상류이고 하도가 변하는 특성시간이 흐름에 비해 길다고 가정하는 것이다. 총유사량 공식으로 Engelund and Hansen (1967) 공식과 Ackers and White (1973) 공식을 이용하여 수치실험을 실시하였다. Engelund and Hansen 공식을 사용하였을 때, Parker (2004)에 제시된 준설 웅덩이의 퇴메움 과정을 정량적으로 유사하게 모의하는 것으로 나타났다. 제시된 모형의 적용성을 검토하기 위하여 선행 실내실험에 적용하였다. 전반적으로 준정류모형이 준설 웅덩이의 퇴메움과 전과과정을 잘 모의하는 것으로 확인되었다. 그러나 수치모형이 두부침식 현상을 잘 재현하지 못하여 재퇴적 이후의 하상파를 과소 산정하는 것으로 나타났다.

핵심용어: 준설 웅덩이, 퇴메움, 준정류모형, 퇴적, 하상파

1. 서론

인류는 건설산업에 필요한 모래 및 자갈 등 골재를 하천에서 조달하여 왔다. 준설을 통한 골재 채취는 골재 조달과 같은 경제적 효과 외에도 홍수시 수위를 낮추는 순기능이 있다. 그러나 하상저하 (degradation), 하도불안정 (stream instability), 하구 확대 (enlargement of river mouth) 등의 하천형태학적 악영향이 발생할 수 있다. 특히, 특정 구간의 하상저하로 인하여 두부침식이나 하상저하의 전과로 인해 준설구간에서 떨어진 곳에서도 하천횡단 관로와 교각 및 제방의 기초가 유수에 노출되어 붕괴로 이어질 수 있다. 따라서 준설로 인하여 생성된 웅덩이의 발달과정을 수리학적으로 검토하는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 준설 웅덩이가 발달되는 과정을 준정류 모형을 이용하여 모의하고 전과과정을 확인하며 그 적용성을 확인하였다.

2. 지배방정식

2.1 준정류 모형

하상변동속도가 크지 않을 경우 유동방정식에서 시간항을 무시할 수 있게 된다. 이를 준정류

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

** 연세대학교 대학원 토목환경공학과 석박사통합과정 · E-mail : csu1220@hotmail.com

모형(quasi-steady model) 이라고 하고 이 모형의 지배방정식인 연속방정식, 운동량방정식 그리고 하상토 보존방정식 (Exner 방정식)은 각각 다음과 같다.

$$= H \quad (1)$$

$$U \frac{dU}{dx} = -g \frac{d}{dx} (\eta + H) - C \frac{U^2}{H} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{1}{1 - \lambda_p} \frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (3)$$

여기서 q 는 단위 폭 당 유량, U 는 수심평균유속, H 는 수심, x 는 흐름방향 거리, η 는 하상고, C_f 는 하상저항계수, t 는 시간, λ_p 는 공극률, g 는 중력가속도, q_s 는 단위 폭 당 유사량이다.

준정류모형은 수면경사가 크게 변하고 하상변동이 크게 발생하는 한계류 근처의 흐름에 의한 하상변동에는 적용하기 어려우나 준정류 가정을 사용하지 않는 경우 장기하상변동모의에 시간적 제약이 크기 때문에 현재까지도 준정류모형은 유효하게 사용되고 있다 (Fasolato et al., 2011). 유동의 미분방정식으로부터 값을 얻기 위하여 Newton-Raphson방법을 이용하였다 (Fread and Harbaugh, 1971).

2.2 유사량 산정

Exner 방정식에서 유사량을 산정하기 위한 공식은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 총 유사량 산정공식인 Engelund and Hansen (1967) 공식을 이용하였다. 유사량 산정 공식은 다음과 같다.

$$q_s = \frac{0.05}{C_f} (\tau^*)^{5/2} RgD_{50} D_{50} \quad (4)$$

여기서 D_{50} 은 하상토 대표입경이고, R 은 수중단위중량, 그리고 무차원 전단응력 τ^* 는 다음과 같다.

$$\tau^* = \frac{\tau_b}{\rho RgD_{50}} \quad (5)$$

위의 식에서 하상 전단응력은 다음 식으로부터 계산하였다.

$$\tau_b = \rho C_f U^2$$

흐름저항계수 (C_f)는 다음과 같은 Manning-Strickler 공식을 이용하였으며, 유효조도높이 (k_s) 산정을 위해서 $k_s = \alpha D_s$ (여기서 $\alpha = 3$)를 이용하였다 (Garcia, 1999).

$$C_f = \left[8.1 \left(\frac{h}{k_s} \right)^{1/6} \right]^{-2} \quad (6)$$

3. 준설 웅덩이 발달

3.1 수치실험

시간에 따라 준설 웅덩이가 발달되는 과정은 그림 1에 제시하였다. 생성된 준설 웅덩이는 상단 부로부터 발생하는 퇴메워짐과 하단부에서 발생하는 침식의 전파가 시간에 따라 지속되며 초기 준설 웅덩이가 전부 메워져도 침식이 하류로 전파된다.

준정류모형이 그림 1과 같은 발달과정을 제대로 모의하는지 보기 위하여 Parker (2004)가 제시

한 준설 웅덩이 되메움 현상 모의조건을 이용하여 수치실험을 하였다. 폭이 275 m이고 경사가 0.0001인 하도에 유량 1,650 m³/s가 흐르며, 하상토 중앙입경은 0.35 mm, 유효조도높이는 3 mm이다. 이에 대한 등류수심 6.2 m를 전 구간에 설정한 후 길이 2 km에 10 m 깊이의 준설 웅덩이가 생성된 것으로 하였다. 또한 상류단에서는 평형 유사량이 공급되는 것으로 하였다.

Engelund and Hansen (1967) 공식을 사용하여 모의한 결과는 그림 2에 제시하였다. 시간이 경과함에 따라 상단에서 되메움이 발생하고 하단에서 침식이 발생하여 이것이 전파되는 것을 볼 수 있다.

그림 3은 같은 조건에서 다양한 유사량 산정 공식에 의해 계산된 12년 후의 준설 웅덩이의 발달 상태이다. 각종 유사량 산정공식을 비교하기 위하여 총유사량 산정공식인 Engelund and Hansen (1967)과 Ackers and White (1973) 공식을 사용하였고, 소류사 산정공식인 Wong and Parker (2006)가 제시한 수정 Meyer-Peter and Muller 공식에 의한 결과를 제시하였다. 그림에서 Parker (2004)의 계산결과는 e-book에 제시된 것으로서, 소류사 산정공식 Ashida-Michiue 공식과 부유사 산정을 위한 Wright and Parker (2004)가 제시한 연행함수와 Rouse 분포를 가정을 이용한 계산 결과이다. 그림에서 Engelund and Hansen (1967) 공식을 사용한 경우 Parker의 계산결과와 매우 유사하며 Ackers and White 공식의 경우 준설 웅덩이의 되메움이 빨리 진행되고 수정 Meyer-Peter and Muller 공식의 경우 되메움이 늦게 진행됨을 확인할 수 있다. 각각의 공식에 의해 산정된 단위 폭 당 유사량은 3.29×10^{-5} (Ackers and White 공식), 1.92×10^{-5} (Engelund and Hansen 공식), 5.98×10^{-6} (수정 Meyer-Peter and Muller 공식) m²/s이다.

3.2 실내실험

모형의 적용성을 검토하기 위하여 본 연구에서 제시한 준정류 모형을 Lee et al. (1993)의 선행 실내실험에 적용하였다. 유량은 0.031 m³/s이고, 수로의 길이와 폭은 각각 17 m와 0.6 m, 대표입경의 크기는 1.4 mm으로 굵은 모래이며, 공극률은 0.4, 기울기는 0.0009이고 경계조건수심은 0.103 m이다. 입자 레이놀즈수는 210으로 Shields Regime Diagram에 의하면 하상토는 부상하지 않고 대부분 소류사 형태로 이동할 것으로 예측된다. 그림 4(a)와 (b)에 Lee et al. (1993) 실험 조건에서 2시간 과 5시간 후의 모의된 준설 웅덩이의 종단면을 실험 관측치와 함께 제시하였다. 전반적으로 준정류모형이 시간에 따라 발달하는 준설웅덩이의 모양을 잘 모의하는 것으로 나타났다.

그림 4 (a)를 보면 실험자료와 비교해 보았을 때 상류측에서 발생하는 두부침식이 상류로 전파되는 과정을 전혀 모의하지 못하고 하류단의 침식량을 과소산정하는 것을 볼 수 있었다. 그림 4 (b)에서 시간의 경과에 따른 모의결과와 실험자료의 차이가 심해지는 것을 볼 수 있는데, 이는 매우 급한 하상경사로 인한 상승류와 하강류발생을 준정류모형이 전혀 모의하지 못하여 소류력을 과소산정하게 되는 결과로 판단된다.

4. 결과

본 연구에서는 준정류모형의 준설 웅덩이의 발달과정 모의에 대한 적용성을 수치실험과 실내 실험의 관측치를 이용하여 확인하였다. 상류로부터 되메워지는 양상은 잘 모의하지만 상류에 발생하는 두부침식을 잘 모의하지 못하고 하류의 침식량을 과소산정하는 것을 확인하였다. 이는 준정류모형이 이차류 효과를 반영하지 못하는 것으로 고려된다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업 (08기술혁신 F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Ashida, K. and M. Michiue, 1972, Study on hydraulic resistance and bedload transport rate in alluvial streams, Transactions, JSCE, Vol. 206, pp. 59-69.
2. Engelund, F. and E. Hansen (1967). *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*, Technisk Vorlag, Copenhagen, Denmark.
3. Fread, D.L. and Harbaugh, T.E. (1971). Open-channel profiles by Newton's iteration technique. *Journal of Hydrology*, Vol. 13, No. 1, pp. 70-80.
4. Garcia, M.H. (1999). Chapter 6. Sedimentation and erosion hydraulics, *Hydraulic Design Handbook* (edited by L. Mays), McGraw-Hill, New York, NY.
5. Lee, H.-Y., Fu, D.-T., and Song, M.-H. (1993). Migration of rectangular mining pit composed of uniform sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 1, pp. 64-80.
6. Lee, H.-Y. and Hwang, S.T. (1994). Migration of backward facing step. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 120, No. 6, pp. 693-705.
7. Parker, G. (2004). *Id sediment transport morphodynamics with applications to rivers and turbidity currents*, e-book (http://vtchl.uiuc.edu/people/parkerg/morphodynamics_e-book.htm).
8. Wright, S. and Parker, G. (2004). Flow resistance and suspended load in sand-bed rivers: Simplified stratification model. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 8, pp. 796-805.
9. Wong, M. and Parker, G. (2006). Reanalysis and correction of bed-load relation of Meyer-Peter and Muller using their own data. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 11, pp. 1159-1168.

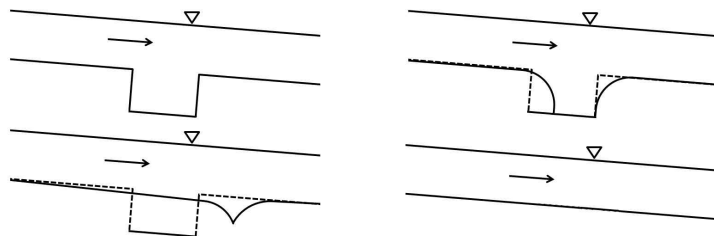


그림 1. 준설 웅덩이 발달 과정

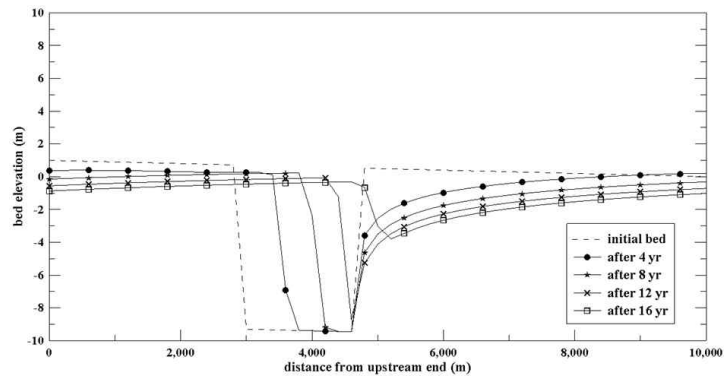


그림 2. 준설 웅덩이의 전파 과정 (E & H Method)

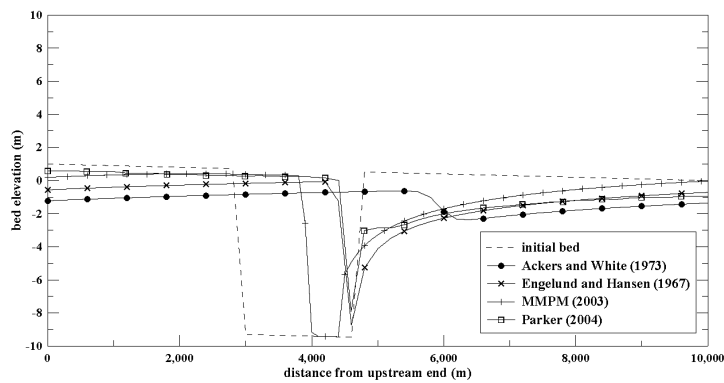
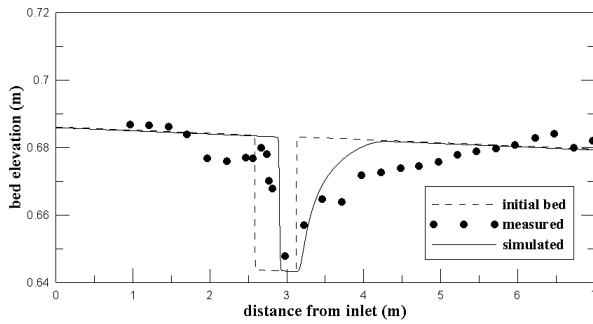
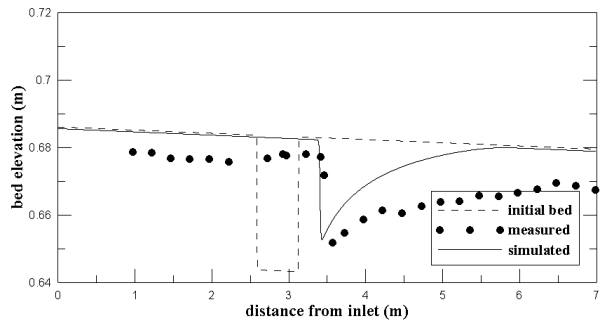


그림 3. 다양한 유사량공식을 이용한 준설 웅덩이 전파



(a) after 2 hour



(b) after 5 hour

그림 4. 준설 웅덩이 전파의 실측치와 수치모의결과 비교