大 韓 土 木 學 會 論 文 集
第32卷 第1B號・2012年 1月
pp. 53 ~ 57

준정류모형을 이용한 하천의 준설 웅덩이 발달 모의

Numerical Simulations of Developing Mining Pit using Quasi-Steady Model

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

Abstract

This study presents a numerical model that is capable of simulating the evolution of mining pit in a stream. The numerical model is based on the quasi-steady assumption that the flow is steady with time-dependent morphological change. This hypothesis is valid due to the fact that the stream morphology changes over a long period compared with the time of flow change. Before applications, numerical experiments are carried out with two total load formulas such as Engelund and Hansen's (1967) and Ackers and White's (1973). It is found that the use of Engelund and Hansen's formula reproduces evolution of mining pit best compared with simulated profiles in Parker (2004). Then, the model is applied to two laboratory experiments in the literature. In general, the numerical model simulates properly the evolution of mining pit in laboratory open-channels. However, it is found that the model does not reproduce head-cutting, propagating upstream, and under-estimates the wave of the bed, propagating downstream, after finishing the re-fill of the mining pit.

Keywords : *mining pit, quasi-steady model, sediment transport, total load, stream morphology*

요 지

본 연구에서는 하천에서 준설 웅덩이의 발달과정을 모의할 수 있는 수치모형을 제시하였다. 제시된 수치모형은 준정류 가정에 기초하는데, 이는 흐름은 정상류이고 하상은 시간에 따라 변한다고 가정하는 것이다. 준정류 모형은 흐름에 비해 하도변형이 장기간에 걸쳐 진행된다는 사실에 근거한다. 총유사량 공식으로 Engelund and Hansen 공식과 Ackers and White 공식을 이용하여 수치실험을 실시하였다. Engelund and Hansen 공식을 사용하였을 때, Parker(2004)에 제시된 준설웅덩이의 되메움 과정을 정량적으로 유사하게 모의하는 것으로 나타났다. 제시된 모형의 적용성을 검토하기 위하여 선행 실내실험에 적용하였다. 전반적으로 준정류 모형이 실험수로에서 웅덩이의 발달과정을 잘 모의하는 것으로 확인되었다. 그러나 수치모형이 웅덩이 상류측으로 전파되는 두부침식 현상을 재현하지 못하며, 되메움 이후 하류로 전파되는 하상파를 과소 산정하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 준설 웅덩이, 준정류 모형, 유사이동, 총유사량, 하도형태

1. 서 론

수 세기동안 인류는 건설산업에 필요한 모래 및 자갈 등 골재를 하천에서 조달하여 왔다. 하천에서의 골재 채취는 홍수시 수위를 낮추는 순기능도 있지만 하천형태 및 환경/생태학적으로 치명적인 영향을 줄 수 있다(Kondolf, 1994; 1997).

하천형태학적으로 하천에서 골재 채취로 인해 하상저하(degradation), 하도불안정(stream instability), 하구 확대(enlargement of river mouth) 등이 발생할 수 있다. 특별히, 하상저하로 인해 하천횡단 관로와 교각 및 제방의 기초가 유수에 노출되어 붕괴로 이어질 수 있다. 하도 준설로 인해 하구가 확대되는 경우 염수의 내륙 침투가 증가하기도 한다.

하천에서 골재채취로 인한 환경/생태학적 영향은 더욱 심각하다. 골재채취는 수생 및 연안 서식처를 파괴하며, 하상저하로 인해 낮아진 수위는 지하수위까지 낮추게 된다. 이로 인하여 하천 생물의 예비서식처 감소, 부착종의 교란, 1차생산성 감소, 섭식기회(feeding opportunity) 감소 등을 유발하게 된다. 따라서 준설 웅덩이에 의한 제반 영향을 살펴보기 위하여 준설로 인하여 만들어진 웅덩이 발달과정을 수리학적으로 검토하는 연구가 선행되어야 한다.

Lee and Hwang(1994)은 하상에서 발달하는 계단형 단차(backward-facing step)의 변형과 이동을 해석하기 위하여 확산방정식을 제시하였고 실험을 통해 적용성을 검토하였다. Cao and Pender(2004)는 천수방정식 형태의 유동방정식과 하상토보존방정식을 해석하여 하상 준설 및 유사공급에 따른 하상 및 유동 변화를 모의하였다. Cao and Pender는

*정회원 · 교신저자 · 연세대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 (E-mail : schoi@yonsei.ac.kr)
**연세대학교 대학원 토목환경공학과 석박사통합과정 (E-mail : csu1220@hotmail.com)

수치모의를 통하여 충적하도에서 하상준설은 상류 방향으로 하상하강을 유도하며 준설량이 하류의 하상상승 및 하강에 미치는 영향을 검토하였다. 장창래(2010)는 수심적분 형태의 2차원 수치모형을 이용하여 준설로 인한 웅덩이의 거동을 수치모의 하였고 이를 실내실험 결과와 비교하였다. 하상경사가 급할수록 웅덩이가 빨리 되메워지며 이후 하류로 이동하는 속도도 빠른 것을 확인하였다. Chen *et al.*(2010)은 2차원 수심적분 형태의 지배방정식을 수치해석 하여 준설 웅덩이의 되메움 현상을 모의하였다. Chen 등은 되메움 과정에 국부평형 가정(local equilibrium assumption)이 적용되지 않는다고 주장하였으며 수치해석을 통하여 비평형 모형의 민감도를 분석하였다. 최성욱과 최성욱(2011)은 저수지 퇴사 및 배사에 의한 하상변동 현상을 모의하기 위하여 준정류모형을 제시한 바 있다.

준설 웅덩이에 관한 공학적인 관심 사항은 되메움 메카니즘을 규명하는 것이다. 즉, 상류에서 이동하는 유사에 의해 웅덩이가 어떠한 형태로 발달하며 원상태로 회복되는 것을 밝히는 것이다. 이와 관련하여 되메움에 소요되는 시간 및 완전 회복 여부, 그리고 상하류 하도에 미치는 영향 등이다.

Fig. 1에 시간에 따른 준설 웅덩이의 발달과정에 관한 개요도를 제시하였다. 처음에 직사각형 모양의 준설 웅덩이는 시간의 경과에 따라 웅덩이의 상단부가 유사로 다시 메워지며 하단부는 침식되어 그 영향이 하류부로 전파된다. Fig. 1(c)에서와 같이 원래의 웅덩이는 다시 매워져도 하상의 파형은 진폭이 줄어가며 하류로 전파된다.

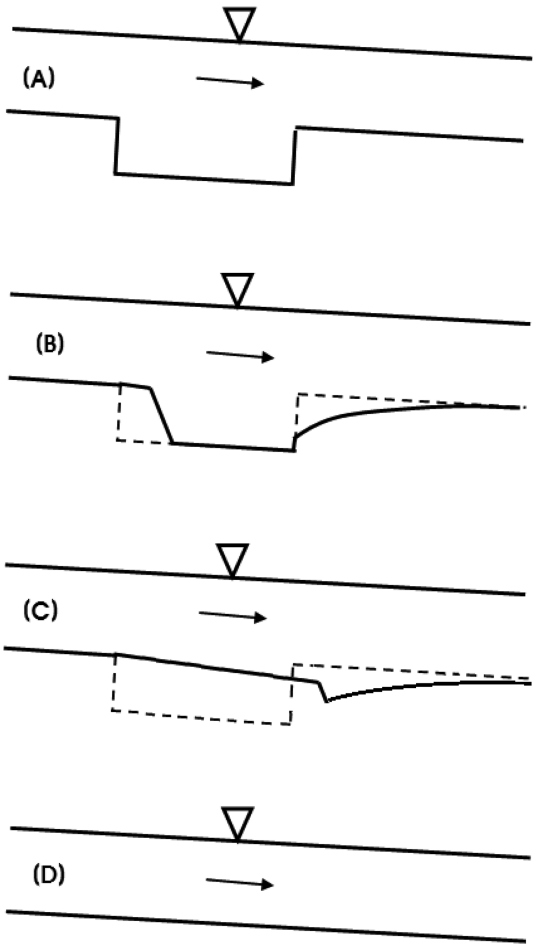

Fig. 1 Schematic Sketch of Time-Evolution of Mining Pit

본 연구에서는 준정류모형을 이용하여 준설로 인한 웅덩이의 발달 과정을 모의하고 모형의 적용성을 파악하고자 한다. 이를 위하여 적절한 유사이동 공식을 선정하고, 두 가지 선행 실내실험에 적용하였다.

2. 지배방정식

2.1 준정류 모형

유수에 의한 하도형태의 변화를 모의하는 경우, 유동에 비하여 하도변화에 대한 특성시간이 매우 길기 때문에 유동방정식에서 시간에 따른 변화를 무시할 수 있다. 이를 준정류모형(quasi-steady model) 이라고 하며(최성욱과 최성욱, 2012), 유동에 관한 연속방정식과 운동량방정식 그리고 하상토보존방정식(혹은 Exner 방정식)은 각각 다음과 같다.

$$q = UH \tag{1}$$

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

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda_p}\frac{\partial q_t}{\partial x} \tag{3}$$

여기서 t와 x는 각각 시간 및 흐름방향 거리로서 독립변수이며, q는 단위폭당 유량, U는 수심평균유속, h는 수심, g는 중력가속도, η는 하상고, C_f는 하상저항계수, λ_p는 공극률, 그리고 q_t는 단위 폭 당 총유사량이다.

준정류모형은 급변류 혹은 한계류(혹은 한계류에 근접한 흐름)에 의한 하상변동에는 적용하기 어렵다. 특히, 한계류에 의한 하상변동 시 흐름과 하상변동의 특성속도가 비슷한 것으로 알려져 있다. 준정류 가정을 하지 않고 부정류 모형을 해석하는 경우 장기하상변동을 모의하는데 시간적인 제약으로 적합하지 않으므로 요즘에도 준정류모형은 많이 사용되고 있다(Fasolato *et al.*, 2011).

유동에 관한 지배방정식을 해석하기 위하여 Newton-Raphson방법을 이용하여 전체 구간의 수심과 유속을 계산하였다(Fread and Harbaugh, 1971). Exner 방정식의 경우 하상고와 유사량의 차분을 위하여 엇갈린 격자를 이용하였고, 시간 미분항은 전방차분법을 공간 미분항은 후방차분법을 이용하여 차분식을 구성하였다.

2.2 총유사량 산정

식 (3)의 총유사량 q_t를 산정하기 위하여 본 연구에서는 Engelund and Hansen(1967) 공식과 Ackers and White(1973) 공식을 검토하였다. Engelund and Hansen에 의한 총유사량 산정 공식은 다음과 같다.

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

여기서 무차원 전단응력 τ^*는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau^* = \frac{\tau_b}{\rho RgD_{50}} \tag{5}$$

위의 식에서 하상 전단응력은 다음 식으로부터 계산하였다.

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

흐름저항계수 (C_f)는 다음과 같은 Manning-Strickler 공식

을 이용하였으며, 유효조도높이 (k_s) 산정을 위해서 $k_s = \alpha D_s$ (여기서 $\alpha = 3$)를 이용하였다(Garcia, 1999).

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

한편, Ackers and White 공식은 Engelund and Hansen 공식과는 달리 유사량을 단위 유량의 농도함수로 산정하는 방법이다. Ackers and White에 의한 총유사량 산정공식은 다음과 같다.

$$q_t = \frac{1}{R+1}\frac{C_s}{1-C_s}q_w \tag{7}$$

여기서 농도함수 (C_s)는 다음 식으로부터 산정할 수 있다.

$$C_s = \frac{R+1}{\hat{H}}C_f^{-n/2}C_{aw}\left(\frac{\sqrt{\tau^*}C_f^{(n-1)/2}\left(\frac{1}{\sqrt{32}\log_{10}(10\hat{H})}\right)^{1-n}}{A_{aw}} - 1\right)^m \tag{8}$$

위 식의 $\hat{H}$는 H/D_{50}이고, n과 m과 A_{aw}와 C_{aw}는 입자 레이놀즈수 Re_p의 함수이다(Ackers and White, 1973).

3. 모형의 적용

3.1 수치실험

준정류모형을 Parker(2004)에 제시된 준설 웅덩이 되메움 현상 모의조건에 적용하였다. 폭이 275 m이고 경사가 0.0001인 하도에 유량 1,650 m^3/s가 흐르며, 하상토의 중앙입경은 0.35 mm로서 중간 크기의 모래에 해당하고 유효조도높이는 3 mm이다. 하도 전구간의 흐름조건은 등류 상태로서 수심 6.2 m이며, 준설로 인해 깊이 10 m, 길이 2 km의 웅덩이가 만들어 졌다고 가정하였다.

Fig. 2는 시간에 따라 발달하는 준설웅덩이의 형태를 도시한 것이다. 수치모의에서 총유사량은 Engelund and Hansen (1967) 공식을 사용하였다. 시간이 경과함에 따라 준설 웅덩이의 상류측이 유사로 인해 메워지며, 약 16년이 경과한 후에서 기존 웅덩이는 모두 메워지나 기존 웅덩이에 의한 하상 파형이 형성되어 하류로 전파되는 것을 알 수 있다. 모의결과 웅덩이 상류하상이 서서히 하강하는 것은 상류단에서 유사가 공급되지 않는 것으로 가정하였기 때문이다. 전반적으로 Fig. 1에 제시된 준설 웅덩이의 발달과정을 수치모형이 잘 모의하는 것으로 판단된다.

Fig. 3는 다양한 유사량 공식에 의해 계산된 12년 후의 준설 웅덩이의 모양을 제시하였다. 총유사량 공식으로는 Engelund and Hansen(1967) 공식과 Ackers and White (1973) 공식을 사용하였고, 비교를 위하여 Wong and Parker(2006)가 제시한 수정 Meyer-Peter and Muller 공식에 의한 결과를 제시하였다. 그림에서 Parker(2004)의 계산결과는 e-book에 제시된 것으로서, Ashida-Michiue 공식을 이용하여 소류사량을 산정하였고 Wright and Parker(2004)가 제시한 연행함수와 Rouse 분포를 가정하여 부유사량을 계산한 결과이다.

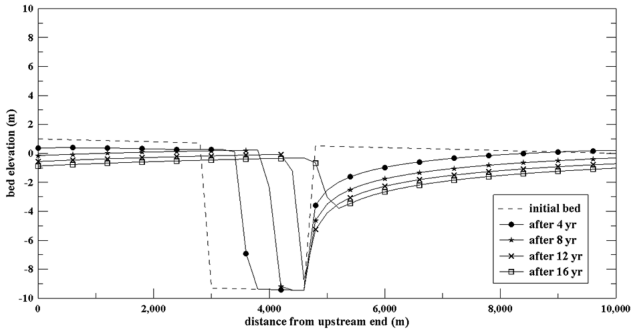

Fig. 2 Development of Mining Pit with Time (Engelund & Hansen Method)

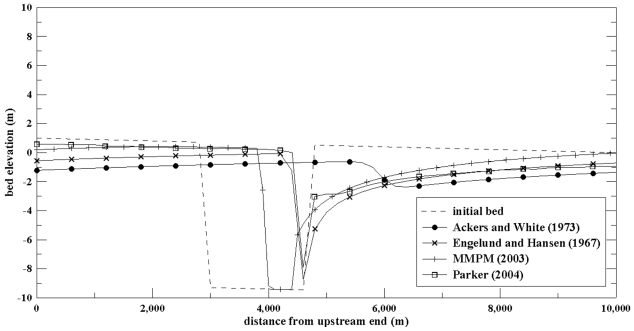

Fig. 3 Comparison of Mining Pits simulated using Various Total Load Formulas

그림에서 Engelund and Hansen 공식을 사용한 경우 Parker의 계산결과와 매우 유사하며 Ackers and White 공식의 경우 준설 웅덩이의 되메움이 빨리 진행됨을 확인할 수 있다. 정량적으로 각각의 공식에 의해 산정된 단위 폭 당 유사량 q_t는 3.29×10^{-5} (Ackers and White 공식), 1.92×10^{-5} (Engelund and Hanse 공식), 5.98×10^{-6} (수정 MPM 공식) m^2/s이다. 따라서 Engelund and Hansen 공식을 기준으로 할 경우, 수정 MPM 공식에 의한 소류사량은 총유사량의 약 30%를 차지한다. 또한, 동일한 기준에서, 동일한 크기의 웅덩이를 메우는데 필요한 시간은 Ackers and White 공식을 사용하는 경우 약 58% 그리고 소류사만을 고려하는 경우 321%의 시간이 소요되는 것으로 나타났다.

3.2 실내실험 적용

모형의 적용성을 검토하기 위하여 본 연구에서 제시한 준정류 모형을 Lee *et al.*(1993)과 장창래(2010)의 선행 실내실험에 적용하였다. 각각의 실험조건은 Table 1에 제시하였다. 표에 제시된 자료에 근거하여 무차원 하상전단응력으로 정의되는 Shields수를 계산해 보면 Lee *et al.*(1993) 실험과

Table 1. Experimental Conditions

Exp	Q (m^3/s)	B (m)	L (m)	D (mm)	λ_p	s.g.	S_0	Water depth at sluice gate(m)	Re	Fr
Lee *et al.* (1993)	0.031	0.6	17	1.4 (Coarse Sand)	0.4	2.65	0.0009	0.103	38,442	0.50
Jang (2010) Run-2	0.015	0.9	12	1.2 (Coarse Sand)	0.4	2.64	0.0025	0.034	15,496	0.85

장창래(2010) 실험 각각 0.040과 0.043으로 비슷한 소류력이 작용하고 있음을 알 수 있다. 또한, 입자 레이놀즈수는 각각 210과 170으로 Shields Regime Diagram에 의하면 하상토는 부상하지 않고 대부분 소류사 형태로 이동할 것으로 예측된다.

Lee *et al.*(1993)의 실험수로는 길이 17 m, 폭 0.6 m의 개수로에 직경 1.4 mm의 균일한 모래를 두께 약 0.15 m 층으로 포설하였다. 상류단으로 부터 약 9.5 m지점에 길이 0.54 m, 깊이 0.04 m의 웅덩이를 만들어, 유사이동에 의해 웅덩이가 채워지는 모습을 관찰하였다.

장창래(2010)는 Lee *et al.*(1993)의 실험과 비슷하게 길이 12 m, 폭 0.9 m의 개수로에 20 cm 두께의 모래층을 포설하였다. 상류로부터 5 m 떨어진 지점에 길이 1 m, 폭 0.5 m, 깊이 0.1 m의 웅덩이를 만들고, 일정한 유사를 공급하며 웅덩이가 채워지는 모습을 관찰하였다. Lee *et al.*의 실험과 비교하여 장창래 실험에서 웅덩이의 폭은 전체 수로 폭 0.9 m 중 0.5 m 이다. 이로 인하여 장창래 실험의 경우 벽 부근에서 2차원 흐름 효과가 발생할 수 있을 것으로 기대된다.

Lee *et al.*(1993)의 실험에서는 상류단에서의 유사공급이 없었으나, 장창래(2010)의 실험에서는 상류단에서 $q_t = 2.60 \times 10^{-6}$ m^2/s의 유사를 공급하였는데, 이는 Engelund and Hansen 공식에 의한 평형유사량(2.76×10^{-6} m^2/s)보다 작은 값이다. 실험에서 상류단의 유사공급은 개수로 상류측의 침식 방지를 위한 것으로 추측된다.

Fig. 4(a)와 (b)에 Lee *et al.*(1993) 실험 조건에서 2시간과 5시간 후의 모의된 준설 웅덩이의 종단면을 실험 관측치와 함께 제시하였다. 전반적으로 준정류모형이 시간에 따라 발달하는 준설웅덩이의 모양을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 특히, 상류에서 이동하는 유사로 인한 웅덩이의 되메움 과정이 잘 모의되는 것으로 확인되고 있다.

그림에서 실험 자료를 살펴보면 2시간 후의 상류측 하상으로부터 두부침식이 발생하여 유입부로부터 약 1.75 m까지 진행되었으며, 5시간 후에는 두부침식 선단이 모의구간을 벗어나 상류로 전파된 것으로 보인다. 그러나 준정류모형은 이와 같은 두부침식에 의한 하상변동을 모의하지 못하는 것으로 나타났다. 준설웅덩이 하류부도 웅덩이가 메워지면서 파형이 하류로 전파되는데, 2시간 후 실험에 의한 파형은 유입부로부터 약 6 m에 위치하나 수치모의에 의한 결과는 약 4 m로서 준정류모형이 웅덩이 하류부의 침식을 과소 산정하는 것으로 확인되었다. 이러한 경향은 5시간 후에 더욱 두드러지게 나타나고 있는데, 이는 실험규모에 따른 3차원 효과로 보인다. 즉, 실내실험에서 하상의 급격한 변화로 인해 하향류가 발생하고 이로 인해 수류의 소류력이 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 5(a)와 (b)에 장창래(2010)의 실험조건에서 2시간과 3시간 후의 하상고를 각각 도시하였다. 전반적으로 수치모형이 준설웅덩이의 되메움 현상을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 수치모의에서 상류단 하도에 퇴적이 발생하는 것은 유사공급량이 평형유사량을 초과하기 때문으로 보인다. 한편, 실험자료에 의하면 웅덩이 상류측에서 초기 하상저하 현상이 발생하는데 이는 유사공급량이 평형유사량보다 적기 때문이다. 또한 3시간 후에 웅덩이 상류단에 발생하는 두부침식은 전과 동이하게 준정류모형이 모의하지 못하는 것으로 나타났다. 그리고 웅덩이 하류측의 과다한 퇴적은 실험에서 웅덩이의 폭을 제한하였기 때문에 발생하는 3차원효과로 보인다.

Lee *et al.*(1993)과 장창래(2010)의 실험에서 등류조건의 단위폭 당 평형유사량은 식 (4)에 의하면 각각 1.43×10^{-6} m^2/s와 1.70×10^{-6} m^2/s이다. 이를 이용하여 웅덩이를 메우는데 소요되는 시간을 계산하면 각각 4.12 hour와 16.33 hour이다. 수치모의에 의해 웅덩이가 메워지는 시간은 각각 3.37 hour와 7.10 hour로 Lee *et al.*의 실험은 대략 유사하

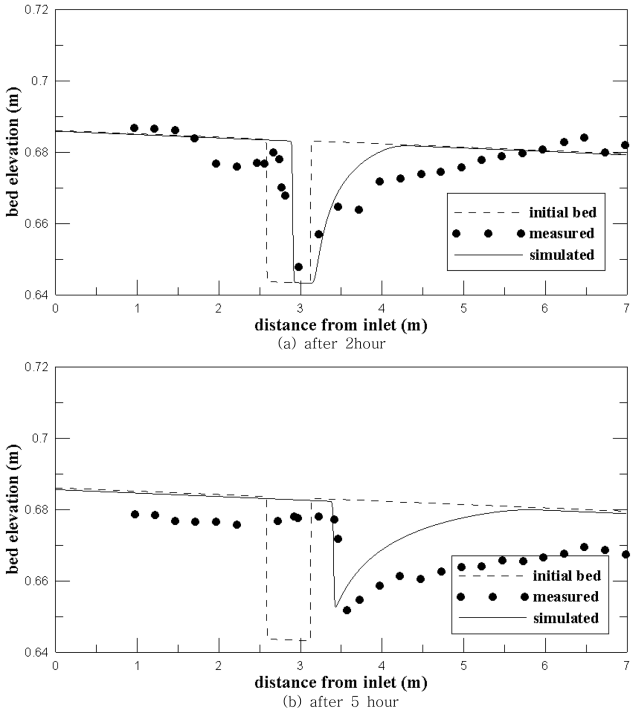

Fig. 4 Simulated and Measured Mining Pits (Lee *et al.*'s (1993) Exp.)

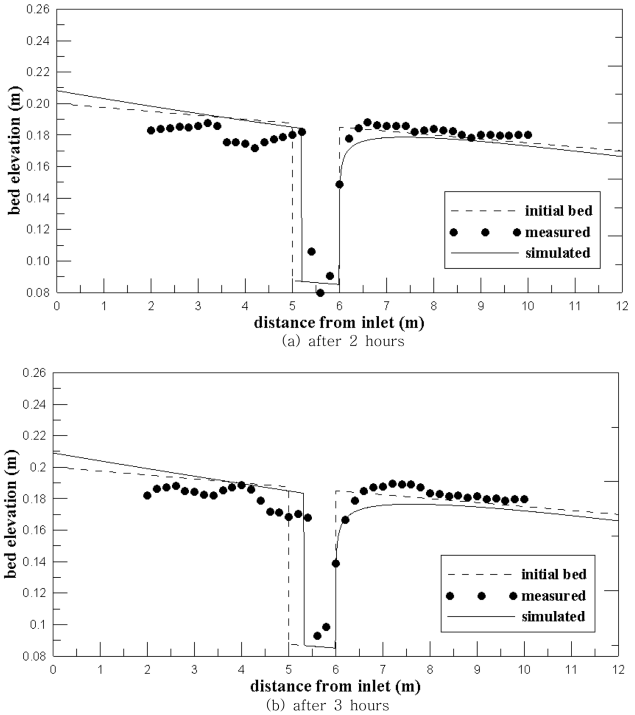

Fig. 5 Simulated and Measured Mining Pits (Jang's (2010) Exp.)

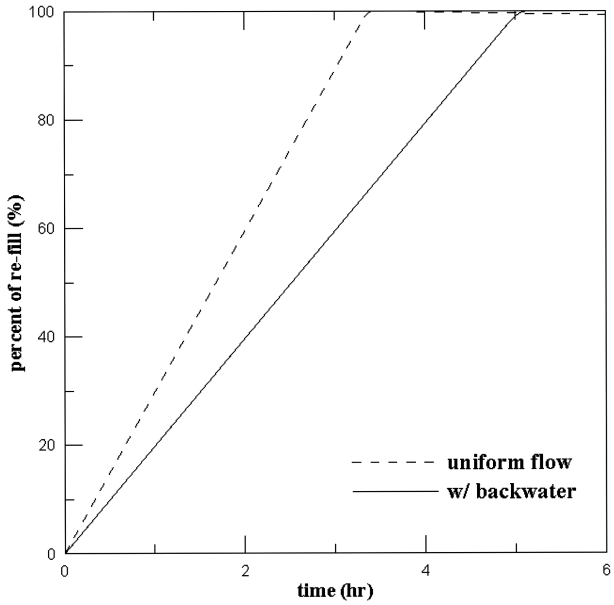

Fig. 6 Re-fill Percentage of Mining Pit with Time

나 장창래의 실험의 경우 매우 조속히 진행되는데 이는 유사공급에 의해 흐름조건이 변화하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 6에는 배수효과가 웅덩이의 되메움에 미치는 영향을 도시하였다. 즉, 그림의 세로축은 유사이동에 의해 되메워 지는 웅덩이의 체적을 초기 체적으로 나눈 것으로 되메움의 진행정도를 나타낸다. 그림에서 점선은 Lee *et al.*의 실험조건을 재현한 것이고 실선은 하류조건으로 수심을 10% 증가시켜 배수효과를 부가한 것이다. 그림에 의하면 등류상태에서 약 3.5 hr 이후 웅덩이가 전부 메워지는데, 하류단에 10% 수심이 증가되는 경우 약 5.3 hr 이후 웅덩이가 메워지는 것을 알 수 있다. 이는 배수효과에 의해 하상의 소류력이 감소하여 유사이동에 의한 되메움을 지연시키기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 하천에서 준설로 인하여 만들어진 웅덩이의 발달과정을 모의하기 위하여 준정류모형을 제시하였다. 준정류모형은 유동방정식 및 하상토보존방정식으로 구성되며, 유동은 정상류로 가정하고 하상토보존방정식은 시간에 대한 변동성을 포함시키는 해석모형이다. 하천에서의 하상변동은 유동에 비해 장기간에 걸쳐 진행되므로 준정류모형의 가정이 타당한 것으로 알려져 있다.

일반적으로 하천에 준설로 인하여 웅덩이가 만들어지면, 상류에서 유입되는 유사로 인하여 상류측 웅덩이가 메워지며 되메움 과정이 종료되면서 웅덩이의 영향이 파형으로 하류로 전파된다. 등류상태에서 하상에 직사각형 웅덩이가 있는 경우 준정류모형이 이와 같은 과정을 잘 모의하는 것으로 나타났다.

준정류모형에서 총유사량을 산정하기 위하여 Engelund and Hansen(1967) 공식과 Ackers and White(1973) 공식을 비교하였는데, Engelund and Hansen(1967) 공식에 의한 결과가 Parker(2004)에 제시되어 있는 결과와 유사한 것으로 나타났다.

제시된 모형의 적용성을 살펴보기 위하여 Lee *et al.* (1993)과 Jang(2010)의 실내실험 조건에 적용하였다. 전반적으로 수치모형이 웅덩이의 발달과정을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 그러나 웅덩이의 상류측 되메움 과정에서 발생하는 두부침식 현상은 재현하지 못하며 되메움 이후 발생하는 하상파형을 과소 산정하는 것으로 확인되었다.

감사의 글

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

참고문헌

장창래(2010) 수치모의를 이용한 준설하천의 웅덩이 적응에 관한 연구, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권 제10호, pp. 921-932.

최성욱, 최성욱(2012). 저수지 퇴배사 모의를 위한 준정류 모형, **한국수자원학회논문집** (심사중).

Cao, Z. and Pender, G. (2004). Numerical modeling of alluvial rivers subject to interactive sediment mining and feeding, *Advances in Water Resources*, Vol. 27, pp. 533-546.

Ackers, P. and White, W.R. (1973). Sediment transport: new approach and analysis, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 99, No. 11, pp. 2041-2060.

Chen, D., Acharya, K., and Stone, M. (2010). Sensitivity analysis of nonequilibrium adaptation parameters for modeling mining-pit migration. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 136, No. 10, pp. 806-811.

Engelund, F. and Hansen, E. (1967). *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*, Technisk Vorlag, Copenhagen, Denmark.

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.

Garcia, M.H. (1999). Chapter 6. Sedimentation and erosion hydraulics, *Hydraulic Design Handbook* (edited by L. Mays), McGraw-Hill, New York, NY.

Kondolf, G.M. (1994). Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 28, pp. 225-243.

Kondolf, G.M. (1997). Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, Vol. 21, No. 4, pp. 533-551.

Lee, H.-Y., Fu, D.-T., and Song, M.-H. (1993). Migration of rectangular mining pit composed of uniform sediments. J*ournal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 1, pp. 64-80.

Lee, H.-Y. and Hwang, S.T. (1994). Migration of backward facing step. J*ournal of Hydraulic Engineering*, Vol. 120, No. 6, pp. 693-705.

Parker, G. (2004). *1d sediment transport morphodynamics with applications to rivers and turbidity currents*, e-book (available at http://vtchl.uiuc.edu/people/parkerg/morphodynamics_e-book.htm).

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.

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.

(접수일: 2012.1.2/심사일: 2012.1.5/심사완료일: 2012.1.7)