

저수지 퇴배사 모의를 위한 준정류모형

A Quasi-Steady Model for Sedimentation and Flushing of Reservoirs

최 성 욱* / 최 성 욱**

Choi, Sung-Uk / Choi, Seongwook

Abstract

This paper presents a quasi-steady model for numerical simulations of reservoir sedimentation and reservoir flushing. The quasi-steady model is based on the assumption that the flow is steady with time-dependent stream morphology change. This is reasonable because stream morphology changes over a long period, while the flow changes rapidly. The proposed model is first applied to two laboratory experiments for reservoir sedimentation. The channel is shown to be adjusted to new sediment supply at the upstream by changing both the flow depth and slope. Simulated water surface and bed profiles compare favorably to measured data. The model is also applied to reservoir flushing. Good agreement between simulated and measured data is not obtained due to time variation of outflow generated to facilitate the flushing in the experiment. Finally, relationships for equilibrium flow depth and bed slope are proposed and tested through numerical experiments.

Keywords : quasi-steady model, reservoir sedimentation, reservoir flushing, sediment transport, equilibrium flow depth, equilibrium bed slope

요 지

본 논문에서는 저수지 퇴사 및 배사현상을 모의하기 위한 준정류 모형을 제시하였다. 준정류 모형은 하상은 시간에 따라 변하지만 유동은 정상류라는 가정에 기초한다. 이것은 유동에 비해 매우 장기간에 걸쳐 하도형태가 변하기 때문에 타당하다. 개발된 모형을 저수지 퇴사에 관한 실내실험에 적용하였다. 수치계산을 통하여 상류측에서 공급되는 유사량에 따라 하도의 수심 및 하상경사가 조정되는 것을 보였다. 수치모의에 의한 수위와 하상고가 실험결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 또한, 모형을 저수지 배사 현상에 관한 선행 실험 조건에 적용하였다. 이 경우에는 배사를 촉진시키기 위해 실험에서 부정류를 발생시켰기 때문에 준정류 모형에 의한 모의결과가 관측자료와 잘 일치하지 않는 것을 확인하였다. 마지막으로, 유사공급에 따른 평형 수심과 하상경사에 관한 공식을 제시하였으며 수치실험을 통하여 이를 검증하였다.

핵심용어 : 준정류 모형, 저수지 퇴사, 배사, 유사이동, 평형수심, 평형하상경사

1. 서 론

20세기에 수자원의 확보를 위해 댐을 건설하는 것이

중요했다면, 21세기에는 동일 목적으로 댐의 기능 즉 저수용량을 유지시키는 것이 화두라고 하겠다. 이는 댐을 개발할 만한 적지는 이미 개발이 완료되었으며 여러 가지

* 교신저자, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (email: schoi@yonsei.ac.kr)

Corresponding Author, Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Yonsei University, 134 Shinchon-dong, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea.

** 연세대학교 대학원 토목환경공학과 석박사통합과정 (email: csu1220@hotmail.com)

환경문제로 말미암아 추가로 댐을 건설할 수 있는 나라가 많지 않기 때문이다.

Morris et al. (2007)에 의하면 전 세계적으로 각국의 댐은 저수지 퇴사에 의해 매년 1% 정도 저수용량이 줄어든다고 보고하고 있다. 우리나라도 류태상 등(2010)에 따르면 담수 후 20년 이상된 9개 댐의 경우, 지난 10년간의 퇴사량이 346백만 m^3 으로 현재 건설 중인 부항댐과 화북댐 저수량의 6~7배에 해당된다고 한다. 또한, 대형댐의 경우 비사량이 91년 $114 m^3/km^2/yr$ 에서 06년에는 $616 m^3/km^2/yr$ 으로 5.4배나 증가한 것으로 보고되고 있다. 이와 같은 자료는 우리나라의 댐도 이제 저수지 퇴사문제에서 자유롭지 못할 것을 예견하게 해준다.

일반적으로 하류에 댐이 있는 하도에서 하류방향으로 갈수록 배수효과에 의해 수심이 증가하게 되며 이에 따라 유속은 감소하게 된다. 이때 하상의 전단응력은 대략 유속의 제곱에 비례하므로 댐에 가까워질수록 소류력이 줄어든다. 또한, 하류로 갈수록 정수압이 증가하여 하상토의 이동이 어려워진다. 따라서 상류에서 이동한 유사는 댐체 부근에 퇴적되는데, 이것이 저수지 퇴사현상의 핵심 메카니즘이다.

Fig. 1은 저수지 퇴사현상에 의해 댐체 상류부에 퇴적된 삼각주 혹은 델타의 개요도이다. 그림에서와 같이 삼각주는 급한 경사면을 선단부로 하류방향으로 이동하는데, 삼각주의 선단부를 foreset이라고 하고 삼각주에 의해 새로 형성된 하상을 topset이라고 한다. 한편, 선단부 하류 하상은 bottomset이라 하며 세립토로 구성된 얇은 층이 형성된다.

저수지 퇴사현상을 해결하여 저수지의 생애주기를 연장하는 공학적 방법으로는 준설 및 배사를 들 수 있다. 준설의 경우 주변수체의 탁도를 증가시켜 수질을 악화시키는 단점이 있고, 배사의 경우 국내에는 따로 배사문이 설치된 댐이 많지 않기 때문에 적용하기 곤란하다. 그러나 최근 국내에 새로 신설되는 보의 경우 배사문을 설치하여 퇴사에 대응하고 있는 추세이다.

댐의 퇴적토를 배사시키는 방법은 크게 두 가지로 분류된다. 먼저, 저수지를 비워서 배사시키는 방법(empty flushing)과 저수상태에서 수문을 개방하여 배사시키는 압력배사(pressure flushing)가 있다. 전자는 물의 수요가 적을 때 저수지를 비워 일반 하천 흐름과 유사한 상태에서 퇴적토가 씻겨 내려가도록 유도하는 방법이다. 저수지를 비우는 방식은 홍수기에 큰 유량을 발생시켜야만 효율적인 배사가 가능하다. 압력배사는 다시 수문방류를 통해 배수곡선(M1곡선)을 M2곡선으로 하강시키는 방법과 배수곡선을 유지시키면서 방류에 의한 국부적인 소류력의 증가효과만을 기대하는 방식으로 구분할 수 있다. 수위하강을 할 경우 급격히 증가하는 소류력 증가에 상당한 효과를 볼 수 있으나, 대규모 저수지에는 적용하기 어렵다. Table 1에 각각의 배사방법에 대한 특징과 주요 사항을 정리하였다.

하천에서의 하상변동에 관한 수치해석 연구는 약 30년 전부터 시작되었다. 대표적인 연구로 Vreugdenhil and de Vries (1967)와 Krishnappan (1985)을 들 수 있다. 이들은 유동과 하상의 파속이 크게 다르다는 사실에 기초하여 유동과 하상토보존방정식을 분리해석 하였다. 이후 급변류

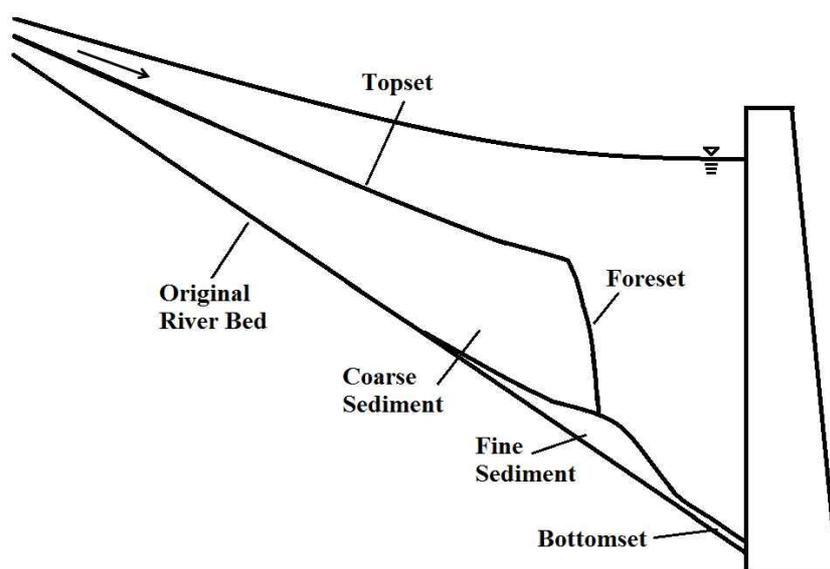


Fig. 1. Schematic Figure of the Typical Profile of a Reservoir Delta (Cantelli et al., 2004)

Table 1. Type of Reservoir Flushing

	저수지를 비우는 배사	압력배사
방법	수위를 배사관 근처까지 하강	- 수위하강 배사: 수면을 M2 곡선으로 배사 - 수위 유지 배사: 배수구간 수위를 유지시키는 배사
효율	일반적으로 홍수기 시행이 효율적	일반적으로 수위하강을 동반할 때 효율적
비고	자연상태의 하천흐름과 유사	소규모 저수지에 적합

혹은 천이류에 의한 하상변동을 모의하기 위하여 부정류 방정식을 직접 해석하는 모형도 제시되었는데, 대표적인 연구로 Holly and Rahuel (1990)과 Kassem and Chaudry (1998)를 들 수 있다. 유동에 대한 정상류 가정을 하지 않는 이들 모형은 많은 계산량 때문에 장기적인 하도변형 문제에 적용하기 어려운 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 Fasolato et al. (2011)은 국부적인 하도 구간에 정류 가정을 하는 모형을 제시하였다.

본 연구에서는 저수지에서 발생하는 퇴배사 현상을 모의하기 위한 1차원 준정류 모형을 제시하였다. 준정류 가정에 근거한 수치모형을 구축하여 선행 수치실험에 적용하였고, 모의 결과를 실험 관측치와 비교하여 수치모형의 적용성을 확인하였다. 모의된 결과로부터 상류측에서 공급되는 유사량에 따라 하도가 수심 및 하상 경사를 조정하는 과정을 설명하였고, 평형상태에서의 수심 및 하상경사를 구하는 공식을 제시하였다. 수치실험을 통하여 공식의 검증을 수행하였다.

2. 기본 이론

2.1 지배방정식

저수지 유동에 관한 지배방정식은 1차원 부정류에 관한 수심적분 형태의 연속방정식과 운동량방정식으로 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - C_f \frac{U^2}{H} \tag{2}$$

여기서, t 는 시간, x 는 흐름방향 거리, H 는 수심, U 는 수심평균유속, g 는 중력가속도, η 는 하상고, C_f 는 하상저항계수이다. 본 연구에서는 하상저항계수를 산정하기 위하여 Manning-Strickler 공식을 이용하였다. 한편, 유수에 의한 하상변동을 고려하기 위한 하상도 보존방정식(Exner 방정식)은 다음과 같다.

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

여기서, λ_p 는 공극률, q_t 는 단위 폭 당 총유사량이다.

2.2 지배방정식의 정규화

이동상 조건하의 평형상태를 생각해 보자. 하상경사가 S_0 일 때 수심과 유속은 각각 h_0 와 U_0 이며 이때 유사량은 q_{t0} 라고 가정하자. 평형상태에서의 물리량을 이용하여 지배방정식을 정규화 시키기 위해서 다음과 같은 변수를 도입한다.

$$\begin{aligned} H &= h_0 \tilde{h}; \quad U = U_0 \tilde{U}; \quad \eta_d = h_0 \tilde{\eta}_d; \quad q_t = q_{t0} \tilde{q}_t; \\ x &= h_0 \tilde{x}; \quad t = \frac{h_0}{U_0} \tilde{t} \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, 특성길이와 특성속도로 h_0 와 U_0 가 각각 사용되었으며 tilde는 무차원량을 의미한다. 위의 관계로부터 유동의 특성시간은 h_0/U_0 임을 알 수 있다. 또한, 운동량방정식으로부터 다음과 같은 관계를 유도할 수 있다.

$$\eta_0 = \eta_u - S_0 x \tag{5}$$

$$C_f U_0^2 = g h_0 S_0 \tag{6}$$

이를 이용하여 지배방정식을 정규화 시키면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \tilde{h}}{\partial \tilde{t}} + \frac{\partial \tilde{U} \tilde{h}}{\partial \tilde{x}} = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial \tilde{t}} + \tilde{U} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \tilde{x}} = -Fr_0^{-2} \left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{\eta}_d}{\partial \tilde{x}} \right) + C_f \left(1 - \frac{\tilde{U}^2}{\tilde{h}} \right) \tag{8}$$

$$\frac{\partial \tilde{\eta}_d}{\partial \tilde{t}} = -\epsilon \frac{\partial \tilde{q}_t}{\partial \tilde{x}} \tag{9}$$

여기서,

$$\epsilon = \frac{1}{1-\lambda_p} \frac{q_0}{U_0 h_0} = \frac{1}{1-\lambda_p} \frac{q_0}{q_0} \quad (10)$$

따라서 ϵ 은 유사량과 유량의 비로 표현되며 대부분의 하천에서 매우 작은 값을 갖는다.

2.3 준정류 모형

Parker (2004)는 홍수기 Minnesota River의 경우 $\epsilon = 0.0004$ 임을 보였다. 이는 하천에서 유동이 변하는 동안 하상은 즉각적으로 변화하지 않는 것을 의미한다. 유동에 대한 특성시간은 h_0/u_0 이므로, 하천형태학적인 특성시간은 $h_0/(\epsilon u_0)$ 임을 쉽게 보일 수 있다. 이는 하천형태학적인 변화에 필요한 시간은 유동이 변하는 시간에 비해 매우 길다는 것을 의미한다. 따라서 하상변동에 관한 하천형태학적인 무차원 시간을 다음과 같이 정의하면,

$$t^* = \epsilon \tilde{t} = \epsilon \frac{U_0}{h_0} t \quad (11)$$

위의 식을 Eqs. (7)~(9)에 대입하면 천수방정식에서 시간에 대한 미분항을 무시할 수 있게 되며 이를 준정류 모형(quasi-steady model)이라고 한다. 준정류 모형의 연속방정식과 운동량방정식은 각각 다음 식과 같다.

$$q = UH \quad (12)$$

$$U \frac{dU}{dx} = -g \frac{d}{dx} (\eta + H) - C_f \frac{U^2}{H} \quad (13)$$

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 준정류 모형은 많이 사용되고 있다(Fasolato et al., 2011).

유동에 관한 지배방정식을 해석하기 위하여 Newton-Raphson법을 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. 1차원 수로의 격자의 크기는 각 실험수로의 길이에 따라 0.2~0.5m로 설정하였고 하상의 변동을 적용시키는 시간의 간격은 실험의 실행 시간에 따라 1~10초 간격으로 설정하였다.

3. 모형의 적용

제시된 모형의 적용성을 파악하기 위하여 저수지 퇴사에 관한 Soni et al. (1980)과 Hotchkiss and Parker (1991)의 실내실험에 적용하였으며, 배사에 관해서는 Lai and Shen (1996)의 실험에 적용하였다. 각각의 실험 조건은 Table 2에 제시된 바와 같다.

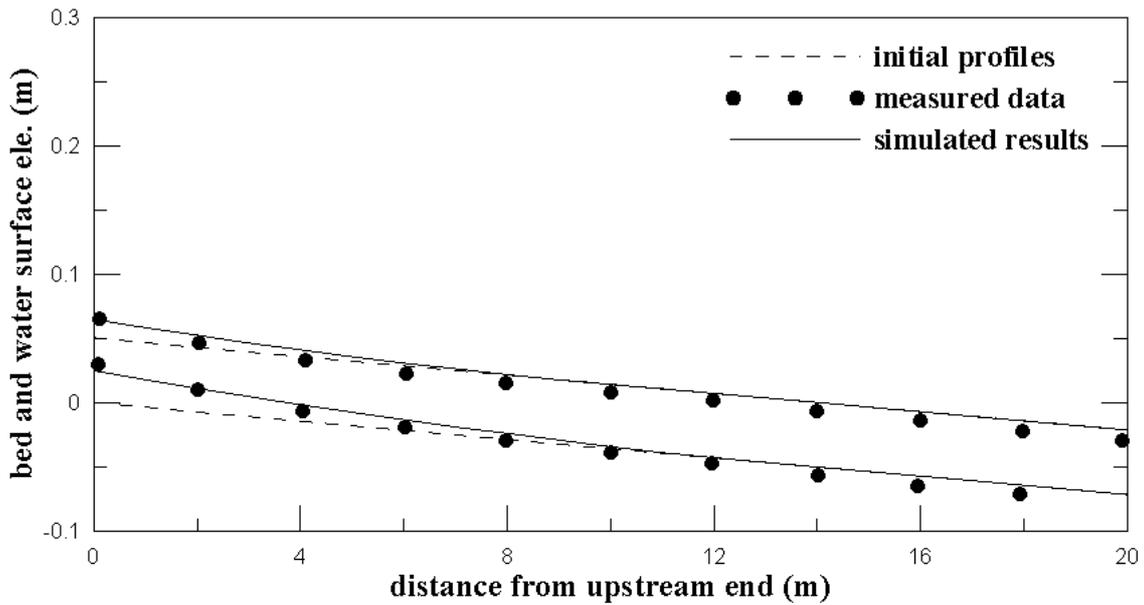
3.1 저수지 퇴사 모의

Table 2에 의하면 저수지 퇴사에 관한 Soni et al. (1980)과 Hotchkiss and Parker (1991)의 실험 모두 비슷한 수리조건 하에 실시되었음을 알 수 있다. 그러나 Soni et al.의 실험에 비해 Hotchkiss and Parker (1991) 실험에서 입자의 크기는 두 배 이상이며 입자의 운동성을 높이기 위해 비중이 작은 파쇄된 호두껍질을 사용한 특징이 있다. 그러나 입자의 특성속도(\sqrt{RgD})는 각각 0.072와 0.048 m/s로서 비슷한 것을 알 수 있다.

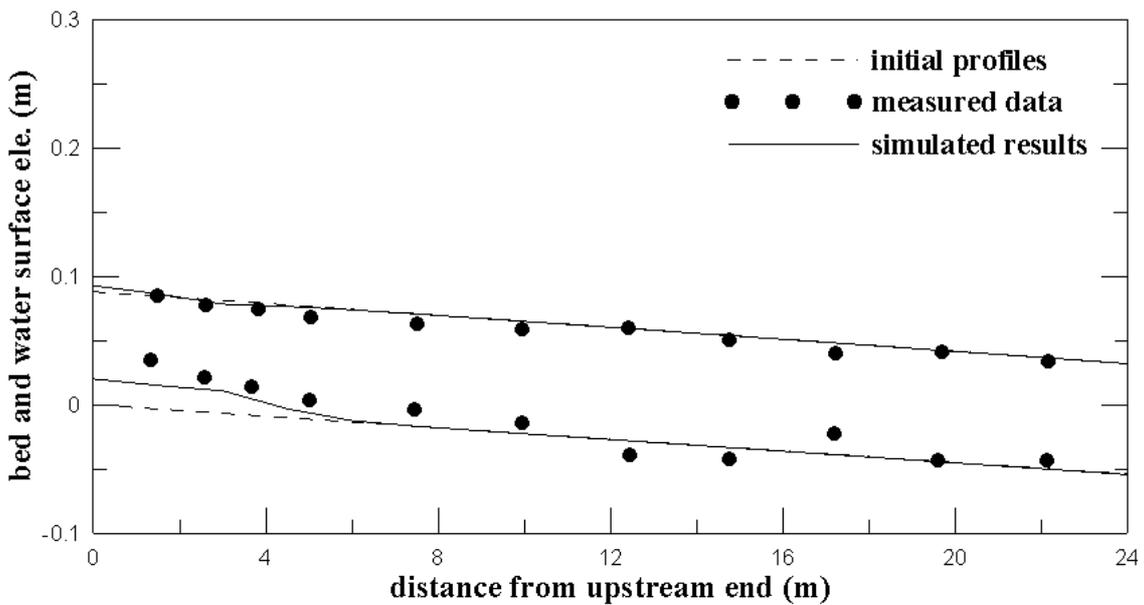
Soni et al. (1980)과 Hotchkiss and Parker (1991)의 실험은 시작하기 전 수로의 하상고가 더 이상 변하지 않는 평형상태가 되도록 특정한 유량과 유사량을 공급한 점은

Table 2. Experimental Conditions of Reservoir Sedimentation and Reservoir Flushing

Exp	Q (m ³ /s)	B (m)	L (m)	D (mm)	λ_p	s.g.	S	H at gate (m)	Sediment feed rate (kg/min)	
Soni et al. (1980)	Run 1	0.004	0.2	30	0.32	0.4	2.65	0.00356	0.05	4.454
	Run 4	0.007	0.2	30	0.32	0.4	2.65	0.00225	0.086	4.704
Hotchkiss and Parker (1991)	0.003	0.15	12	0.67	0.53	1.35	0.0017	0.175	0.185	
Lai and Shen (1996)	0.00487	2.44	9	1.25	0.53	1.39	0	0.07	0	



(a) after 40 min. (RUN1)



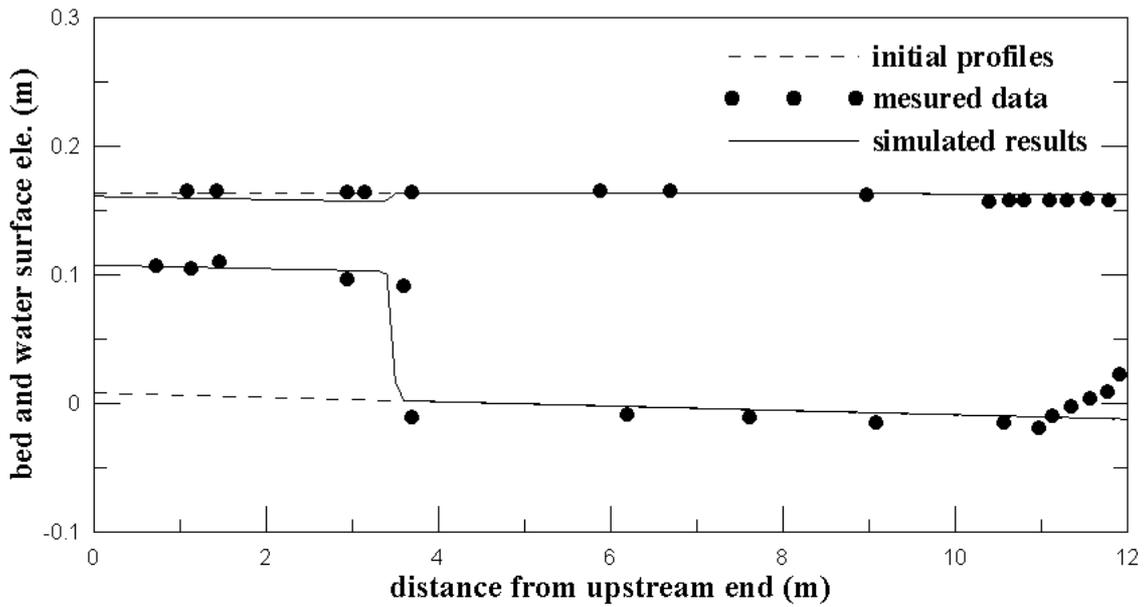
(b) after 30 min. (RUN4)

Fig. 2. Bed and Water Surface Profiles in Soni et al.'s Experiments

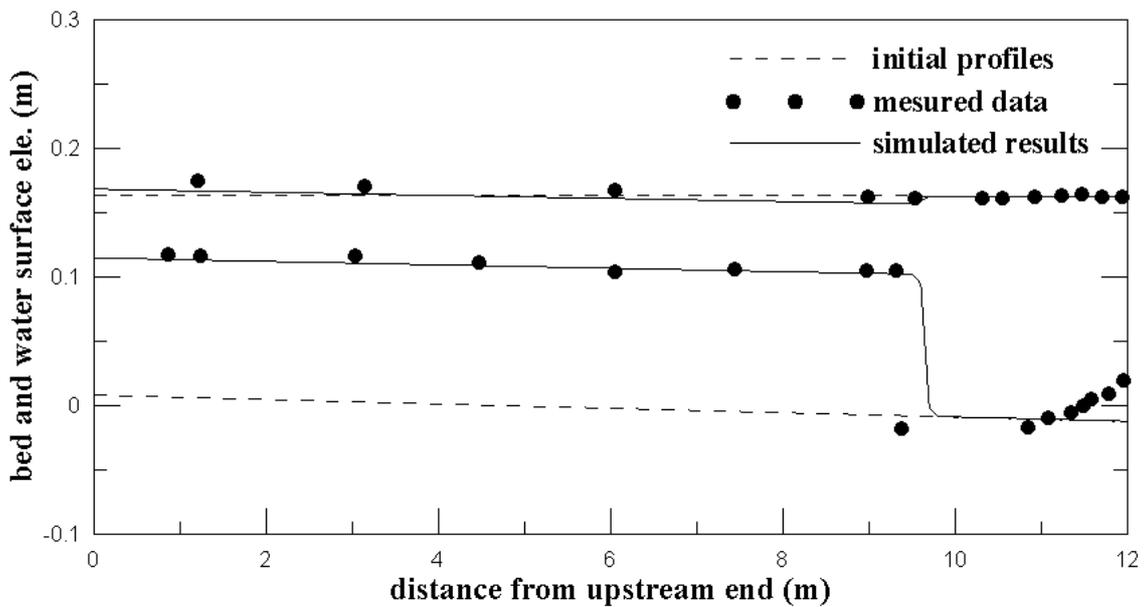
동일하다. 그러나 퇴사를 유도하기 위하여 Soni et al. 실험의 경우 공급 유사량을 증가시켰고, Hotchkiss and Parker의 경우 수심을 약 3배로 증가시켜 두 실험은 이 점에서 큰 차이를 보이게 된다. Hotchkiss and Parker 실험의 경우 실험시작 후 약 7시간동안 1시간 간격으로 퇴사에 의한 하상변동을 측정하였고, 퇴사에 의한 새로운 평형상태에 도달할 때 까지 실험을 계속하였으며, 폭이 넓어졌을 때의 하상변동을 보기 위하여 하류부에서 길이 1.5m의 확폭 구간을 수문 지점까지 설치하였다.

Figs. 2(a) and 2(b)는 Soni et al. (1980)의 RUN 1과 RUN4 실험에서 각각 40 min과 30 min 후의 수면과 하상을 도시한 것이다. Soni et al.은 등류상태에서 실험을 통하여 평형유사량을 구하였고, 하상에 퇴적을 유도하기 위하여 평형유사량의 4배를 상류단에서 공급하였다. Soni et al.은 평형유사량을 단순히 다음과 같은 유속의 함수로 제시하였다.

$$q_t = \alpha V^3 \quad (14)$$



(a) after 1 hr.



(b) after 7 hr.

Fig. 3. Bed and Water Surface Profiles in Hotchkiss and Parker's Experiments

여기서, $\alpha=0.00145$, $\beta=5.0$ 이고 Eq. (14)에 의한 총유사량의 단위는 m^2/sec 이다. Fig. 2에 실측치와 계산결과를 함께 제시하여 비교하였다. RUN1의 경우 상류단의 유사공급으로 인하여 상류부 하상(0~7m 사이 구간)에 유사의 퇴적이 진행되는 것을 알 수 있다. 모의결과가 실측결과와 잘 일치하며, 상류부의 하상상승으로 인해 수위도 동반하여 상승하는 것으로 나타났다.

RUN4의 경우 상류측의 유사공급으로 인해 0~5m 사이 구간에 퇴적이 진행되는 것으로 나타났다. 하상변동

및 유동에 관한 특성시간의 비인 ϵ 의 값에 대해 살펴보면 RUN1과 RUN4의 경우 각각 0.012와 0.00076으로 서로 비슷하나 RUN1의 하상변동이 더 빠르게 진행될 것으로 예상된다.

Figs. 3(a) and 3(b)는 Hotchkiss and Parker (1991)의 실험에서 각각 1시간과 7시간 후 수치모의된 수면과 하상을 도시한 것이다. 비교를 위하여 실측 자료를 함께 제시하였다. 대체적으로 모의결과가 실측 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

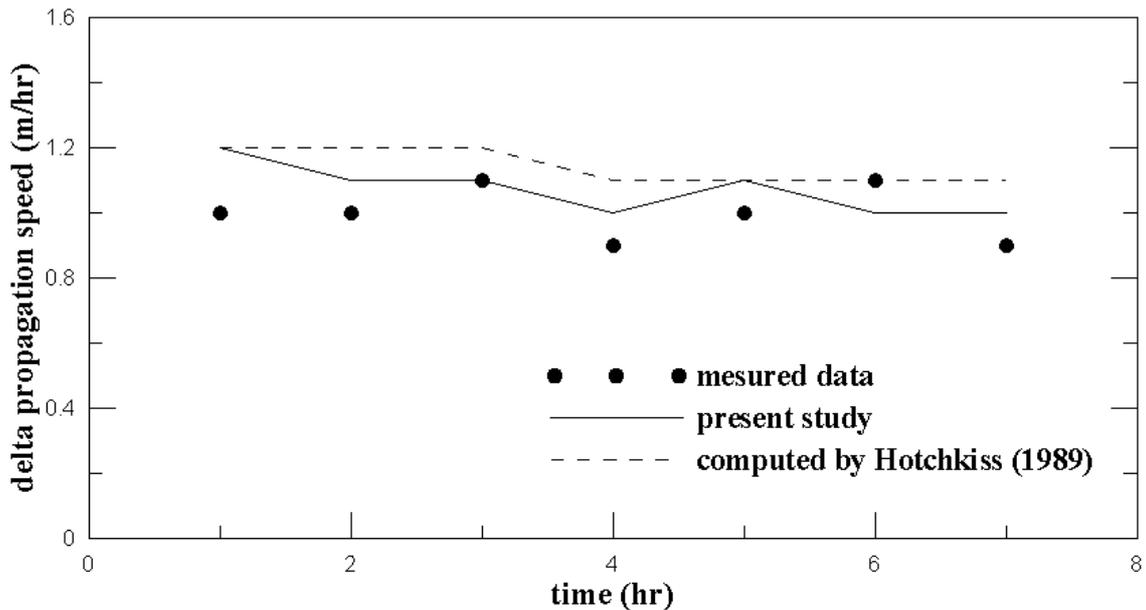


Fig. 4. Speed of Delta Propagation in Hotchkiss and Parker's Experiments

Fig. 3에서는 Soni et al.의 실험과는 달리 하상에 삼각주가 형성되어 하류로 전파되는 것을 알 수 있다. 이는 유입부의 평균유속이 작아 공급되는 유사량에 비해 유사 이동량이 작기 때문이다. 따라서 유사 퇴적에 의해 삼각주가 형성되고, 이에 의해 수심이 작아져 평균유속이 커지게 된다. 이렇게 형성되는 삼각주는 공급 유사량과 이동하는 유사량이 같아질 때까지 계속 두께가 증가하게 된다. 한편, 그림에서 하류부의 하상이 올라가는 것은 실제 실험에서 사용된 수로의 폭이 증가하여 유속이 감소하였기 때문이다.

Fig. 4에는 Hotchkiss and Parker (1991)의 실험에서 모의된 삼각주의 전파속도를 실측치와 함께 도시하였다. 비교를 위하여 Hotchkiss (1989)의 계산 결과도 함께 제시하였다. 일반적으로 유사공급에 의해 삼각주는 거의 일정한 속도로 하류방향으로 전파되는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 모의된 삼각주의 전파속도는 약 1.1 m/hr로 실측치와 Hotchkiss (1989)에 의한 계산 결과 사이에 위치하는 것을 확인할 수 있다.

3.2 저수지 배사 모의

Lai and Shen (1996)은 수위하강에 의한 배사현상을 관찰하기 위하여 실내실험을 실시하였다. 실험수로의 규모와 유량조건은 Table 2에 제시된 바와 같다. Lai and Shen (1996)은 Hotchkiss and Parker (1991)의 실험과 마찬가지로 파쇄된 호두껍질을 사용하였으나, 입자직경의 중앙값이 2배이고 하폭은 10배 이상으로 넓은 수로에서 실험

하였다. 실험에서 초기조건은 수문을 조절하여 원하는 수심에서 유입 유량과 유출 유량이 동일하도록 하였다. 실험 시작 후 수문조작을 통하여 유량을 크게 증가시켰다가 최대 유량 발생 이후 서서히 감소시키면서 배사를 진행시켰다. 준정류모형은 부정류를 재현하지 못하므로 수치모의에서 시간 적분된 유량(Q=0.07 cms)을 사용하였는데, 이와 같은 유량의 변동성이 배사 예측의 정확도에 영향을 미칠 것으로 보인다.

Fig. 5는 Lai and Shen (1996)의 실험에서 배사 시작 30분 후의 수면과 하상을 도시한 것이다. 실험 자료에 따르면 변화하는 유량의 영향에 따라 큰 하류부분이 많이 침식되며, 상대적으로 유출 유량의 영향이 작은 상류부분은 비교적 침식량이 적은 것을 알 수 있다. 수치모의에 의한 결과는 상류측부터 침식이 진행되는데, 이로 인하여 상류측의 하상고는 과소 산정하며 하류측은 과대 산정하는 것으로 나타났다.

4. 하도 조정

3절에서 제시된 모형의 적용을 통하여 시간에 따른 유량의 변동성이 크지 않은 경우 준정류 모형이 저수지의 퇴배사 현상을 적절히 모의하는 것을 확인하였다. 즉, 수리학적 조건에 따라 평형을 이루는 유사량이 결정되는데, 상류에서 공급되는 유사량이 평형유사량과 다른 경우 하도 조정(stream adjustment)이 진행된다. 하상의 조정 과정은 수심 혹은 하상경사의 변화를 통해 유속이 변하여

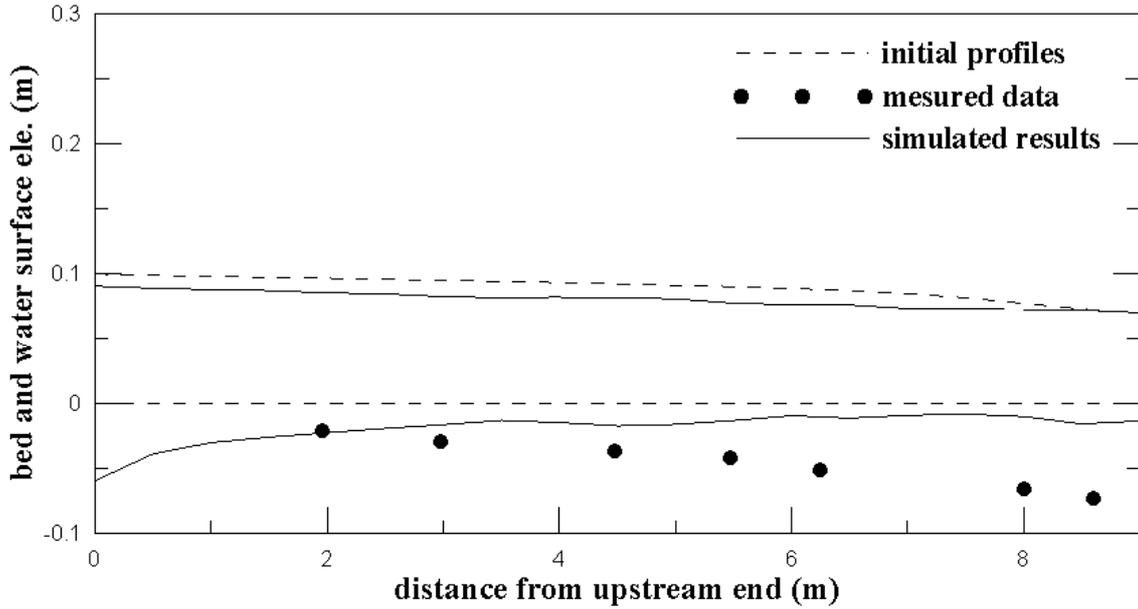


Fig. 5. Bed and Water Surface Profiles in Lai and Shen's Experiments

하상전단 응력을 변화시킨다. 하도조정을 통하여 하천의 유사이동량이 상류측 공급량(q_{t0})과 동일하게 되면서 하천은 평형상태에 도달하며 이때의 수심(h_E)과 하상경사(S_E)는 각각 다음과 같다.

$$h_E = \left[\frac{\frac{1}{k_s^3} Q^2}{\left\{ 65.61gRD_s B^2 \left(\frac{q_{t0}}{3.97D_s \sqrt{gRD_s}} \right)^{\frac{2}{3}} + \tau_c^* \right\}} \right]^{\frac{3}{7}} \quad (15)$$

$$S_E = \frac{Q^2 k_s^{1/3}}{65.61gB^2 h_E^{10/3}} \quad (16)$$

여기서, B는 수로의 폭이고 k_s 는 유효조도높이를 나타낸다. 위의 식을 유도하는데 있어 소류사만을 고려 할 경우, 다음 수정 MPM 공식(Wong and Parker, 2006)을 이용할 수 있다.

$$q_{bE} = 3.97(\tau^* - \tau_c^*)^{1.5} \quad (17)$$

여기서, 무차원 전단응력은 다음과 같이 정의되며, 이의 임계치는 $\tau_c^* = 0.0495$ 이다.

$$\tau^* = \frac{\tau_b}{\rho g R D_s} \quad (18)$$

위의 식에서 하상 전단응력은 다음 식으로부터 계산하였다.

$$\tau_b = \rho C_f U^2 \quad (19)$$

Eq. (19)에서 흐름저항계수(C_f)는 다음과 같은 Manning-Strickler 공식을 이용하였으며, 유효조도높이(k_s) 산정을 위해서 $k_s = \alpha D_s$ (여기서 $\alpha = 2.5$)를 이용하였다(Garcia, 1999).

$$C_f = \left\{ 8.1 \left(\frac{H}{k_s} \right)^{1/6} \right\}^{-2} \quad (20)$$

Eqs. (15) and (16)에 제시된 평형수심과 평형경사를 검증하기 위하여 수치실험을 실시하였다. Hotchkiss and Parker (1991)의 실험조건에서 평형상태에 도달한 후의 상태를 수치모의의 초기조건으로 설정하였다(Figs. 6 and 7에서 t=0일 때 하상 참조). 평형상태의 수심 및 경사는 0.053m와 0.00128이며, 이는 Eqs. (15) and (16)에 의한 산정결과로서 수치모의 결과와 거의 일치한다. 이후 상류에서 공급되는 유사량을 조절하여 이를 절반 혹은 두 배로 하였을 경우 하상 및 수면의 변화 상태를 모의하였다.

Fig. 6은 Hotchkiss and Parker (1991)의 실험에서 평형상태에 도달한 후 유사량을 두 배로 증가시켰을 경우 시간에 따른 하상 및 수면의 변화를 도시한 것이다. 상류로부터 퇴적이 진행되며, 형성된 델타가 하류 방향으로 진행되는 것을 확인할 수 있다. 이는 증가된 유사공급량에 따라 흐름 및 하도가 평형상태 만족시키고자 수심을 줄여가고 하상경사를 증가시키는 과정으로 해석할 수 있다. 최종적으로 형성된 수심 및 하상경사는 각각 0.045m와

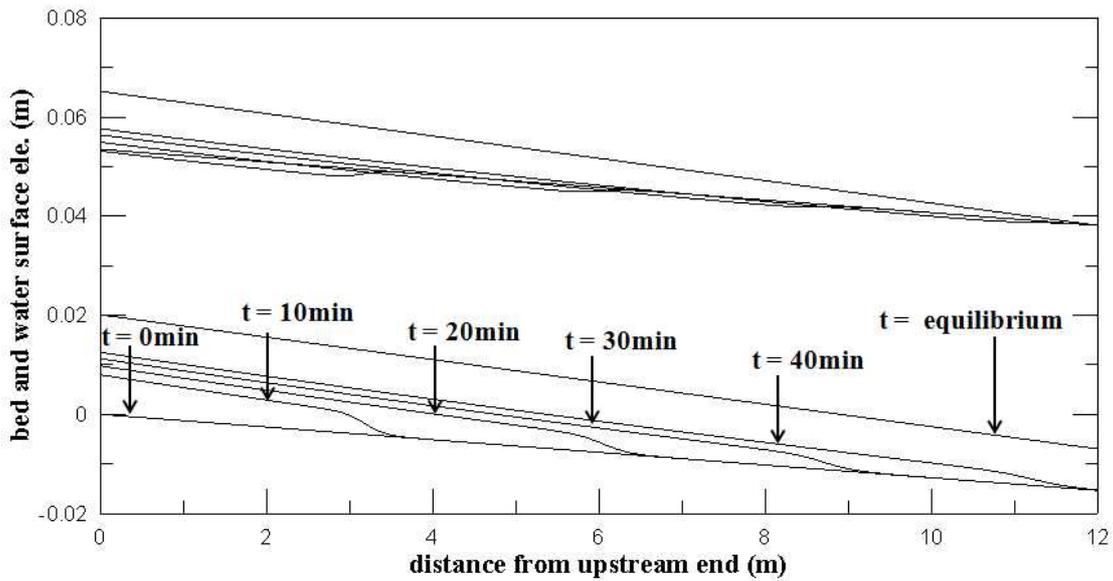


Fig. 6. Adjustment of Flow Depth due to Sediment Overload

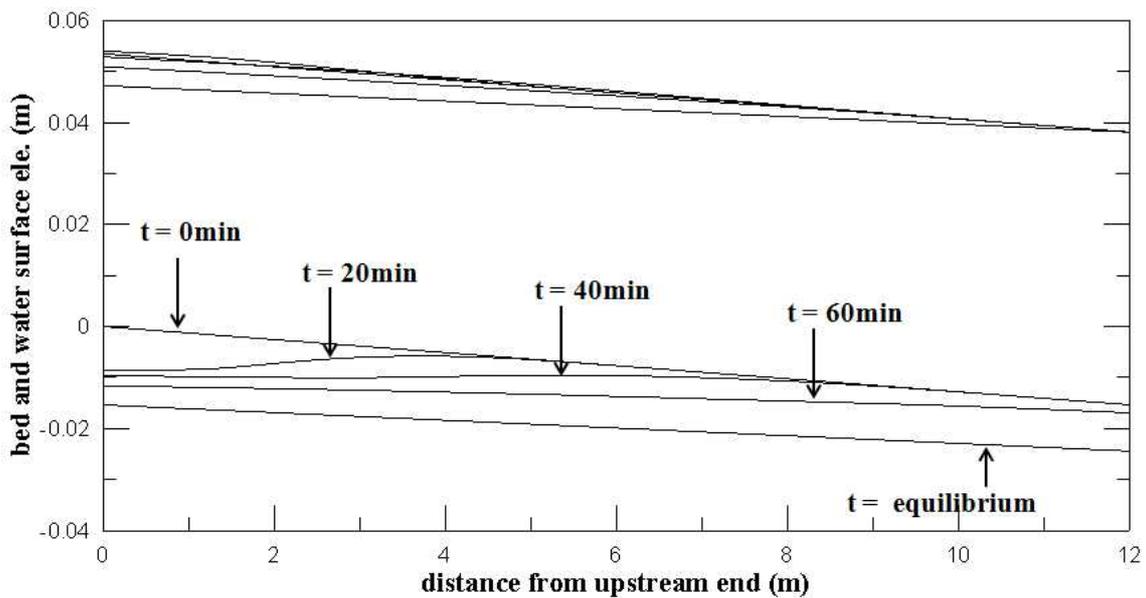


Fig. 7. Adjustment of Bed Slope due to Small Sediment Load

0.00226로서, 이는 Eqs. (15) and (16)에 의한 값과 제시된 유효숫자까지 일치하는 결과이다. 새로운 유사공급량에 대해 수심은 약 15% 감소하였으며 하상경사는 약 77% 증가하였는데, 이는 늘어난 유사공급량이 수심과 하상경사의 조정으로 하상전단응력을 증가시킨 것으로 파악된다. 삼각주의 평균 전파속도는 약 0.05 m/s로서 장파의 파속(0.72 m/s)의 약 0.07배에 해당한다. 삼각주의 전파속도는 하류로 갈수록 조금씩 느려지는데, 이는 전체 하상경사를 서서히 조정해가는 과정에서 발생하는 현상이다.

동일한 초기조건 하에 상류에서 유사량을 절반만 공급

하였을 때 시간에 따른 하상과 수면의 변화를 Fig. 7에 제시하였다. 새로운 유사량에 하도가 적응하고자 상류측부터 하상이 침식되어 그 영향이 하류로 전파되어가는 것을 확인할 수 있다. 이는 줄어든 유사량에 따라 흐름 및 하도가 하상전단응력을 증가시키기 위해 수심을 증가시키고 경사를 줄여가는 과정이다. 새로운 평형상태에서의 수심 및 하상경사는 0.063 m와 0.00076으로 각각 19%의 증가 및 40%의 감소를 보였는데, 주로 하상경사를 변화시켜 하상전단응력을 조정하였기 때문이다.

5. 결론

하도에서 유사이동에 의한 하상변동은 유동에 비하여 장기간에 걸쳐 진행되므로 해석시 유동현상의 비정상성을 무시할 수 있다. 이에 근거한 유동 및 하도변형 해석 모형을 준정류 모형이라고 한다. 본 논문에서는 저수지 퇴사 및 배사현상 모의를 위한 준정류 모형을 제시하였다.

제시된 모형을 저수지 퇴사현상에 관한 선행 실험 실험에 적용하였다. Soni et al. (1980)의 저수지 퇴사실험에 적용하였을 때, 상류측 과도한 유사공급으로 인하여 상류로부터 퇴사가 진행되어 하상경사가 증가하는 것으로 나타났다. Hotchkiss and Parker (1991)의 실험 적용시, 역시 과도한 상류측 유사공급으로 인하여 수심이 줄어드는 과정에 삼각주가 형성되어 하류로 전파되는 것을 모의하였다. 두 실험의 모의 결과 준정류 모형에 근거한 수치모형이 저수지 퇴사현상을 적절히 모의하는 것으로 나타났다.

저수지 퇴적도의 배사현상을 모의하기 위하여 제시된 준정류모형을 Lai and Shen (1996)의 실험에 적용하였다. 실험에서 유량의 변동성으로 인하여 관측된 하상고와 모의된 결과 사이에 차이가 있음을 확인하였다.

이상과 같은 모형의 적용을 통하여, 상류에서 유사량 공급이 변할 경우 하도는 물리적 조정과정을 거치게 되는 것을 확인하였다. 즉, 상류 공급유사량이 평형유사량에 비해 과도한 경우 하도는 하상전단응력을 증가시키기 위하여 수심을 감소시키고 하상경사를 증가시킨다. 반면에, 상류 공급유사량이 평형유사량에 미달인 경우, 하도는 수심을 증가시키고 하상경사를 완화시킨다. 이와같이 상류측 공급유사량에 따른 평형수심과 평형하상경사 산정공식을 제시하고 수치모의를 통해 이를 검증하였다.

감사의 글

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

참고문헌

류태상, 윤용진, 이규탁(2010). 기존 댐 생애주기 연장사업 및 저사댐 소개. **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제 43권, 제 4호, pp. 84-88.

- Cantelli, A., Paola, C., and Parker, G. (2004). Experiments on upstream migrating erosional narrowing and widening of an incisional channel caused by dam removal. *Water Resources Research*, AGU, 40(WO 3304).
- Fasolato, G., Ronco, P., Langendoen, E.J., and Di Silvio, G. (2011). Validity of uniform flow hypothesis in one-dimensional morphodynamic models. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 137, No. 2, 183-195.
- 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. (1999). Chapter 6. Sedimentation and erosion hydraulics. *Hydraulic Design Handbook*. (edited by L.W. Mays), McGraw Hill, NY.
- Holly, F.M., and Rahuel, J.L. (1990). New numerical/physical framework for mobile bed modeling. Part I: Numerical and physical principles. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 28, No. 4, pp. 401-416.
- Hotchkiss, R. (1989). Reservoir sedimentation and sediment sluicing: Experimental and numerical analysis. Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, the University of Minnesota, Twin City, MN.
- Hotchkiss, R., and Parker, G. (1991). Shock fitting of aggradational profiles due to backwater. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 9, pp. 1129-1144.
- Kassem, A., and Chaudry, M. (1998). Comparison of coupled and decoupled numerical models for alluvial channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 8, pp. 794-802.
- Krishnappan, B. (1985). Modelling of unsteady flows in alluvial streams. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 2, pp. 257-266.
- Lai, J.S. and Shen, H.W. (1996). Flushing sediment through reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 34, No. 2, pp. 237-255.
- Morris, G.L., Annandale, G., and Hotchkiss, R. (2007). Chapter 12. Reservoir Sedimentation, *Sedimentation Engineering* (edited by M.H. Garcia), American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
- Parker, G. (2004). 1d sediment transport morphodyna-

mics with applications to rivers and turbidity currents, e-book.

Soni, J.P., Garde, R.J., and Ranga Raju, K.G. (1980). Aggradation in stream due to overloading. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 106, No. 1, pp. 117-132.

Vreugdenhil, C.B., and de Vries, M. (1967). Computations of non-steady bedload transport by a pseudo-viscosity method. Delft Hydraulics Laboratory Publica-

tion No. 45, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, The Netherland.

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.

논문번호: 11-115	접수: 2011.10.20
수정일자: 2011.12.29/2012.01.09	심사완료: 2012.01.09