



Experimental analysis of the sedimentation processes in the movable weir by changing the channel slope considering weir operation

Lee, Kyung Su^a · Jang, Chang-Lae^{b*}

^aNational Disaster Management Institute, Ministry of the Interior and Safety

^bDepartment of Civil Engineering, Korea National University of Transportation

Paper number: 18-037

Received: 6 June 2018; Revised: 28 June 2018; Accepted: 28 June 2018

Abstract

This study investigates the sediment processes the Improved-pneumatic-movable weir through laboratory experiments considering changing channel slopes. Experimental results show that the delta migrates towards the weir and the delta height increases as time passes. Moreover, as the delta approaches the weir, the delta migration speed decreases. As the dimensionless delta location increases, the effective height of dimensionless delta and the dimensionless reservoir capacity increases. Therefore, under the same slope conditions, the sediment deposition volume of the delta is small as the channel slope is mild. This means that the channel slope affects the development of the delta in the upstream of the Improved-pneumatic-movable weir. At the beginning of the experiment, the foreset slope is mild. However, the foreset slope of the delta increases with water depth as the delta migrates downstream. Moreover, as the slope is mild, the ratio of delta front length to delta height is close to 1, and the dimensionless delta height and the dimensionless delta migration speed decrease. As the delta height increases, the water depth, the velocity approaching to the weir and the delta migration speed decrease.

Keywords: Delta, Channel slope, Movable weir, Reservoir sedimentation, Sediment processes

가동보 운영 및 하상경사 변화에 의한 보 상류 퇴사과정의 실험적 분석

이경수^a · 장창래^{b*}

^a행정안전부 국립재난안전연구원, ^b한국교통대학교 토목공학과

요 지

본 연구에서는 실내실험을 통하여 개량형 공압식 가동보를 대상으로 수로경사 변화를 고려한 유사의 수리학적 발달 과정을 분석하였다. 분석결과 보에 의하여 형성된 델타는 시간이 증가함에 따라 하류로 이동하며, 델타높이(h_d)는 증가하였다. 또한 보에 도달 할수록 흐름이 약해지면서 델타의 이동속도(S_D)는 감소하였다. 무차원 델타 위치(x_D/x)가 증가할수록 무차원 델타의 유효높이(h_d/h_w)와 무차원 저수지 용량($V_{x,D}/V_x$)이 증가하였다. 따라서 동일한 조건에서 수로경사(i)가 완만할수록 델타의 퇴적량(Q_s)이 감소하게 되며, 델타의 체적($V_{x,D}$) 발달에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 통수 초기 델타의 전면경사가 완만하며, 델타가 하류로 이동할수록 델타의 전면경사는 증가하였다. 또한 수로경사(i)가 완만할수록 델타의 전면부 길이 비($h_d/\Delta S$)는 1에 가까워지고, 무차원 델타의 높이(h_d/h)와 무차원 델타의 이동속도(S_D/V_0)가 감소하였다. 델타의 높이(h_d)가 증가할수록 수심(h)은 감소하였으며, 보에 접근하는 유속(V_0)과 델타의 이동속도(S_D)도 감소하였다.

핵심용어: 델타, 가동보, 저수지 퇴사, 퇴사거동, 수로경사

*Corresponding Author. Tel: +82-43-841-5183
E-mail: cljang@ut.ac.kr (C.-L. Jang)

1. 서론

최근 보 상류에 흐름정체로 인한 수질악화 등 환경문제와 토사퇴적으로 인한 용수공급 기능상실, 홍수피해 발생 등이 수, 치수문제로 인하여 고정보를 철거하고 가동보를 설치하고 있다. 댐 및 보와 같은 하천을 횡단하는 수리구조물에 의해 배수(backwater)의 영향에 의하여 수심이 깊고 유속이 느려지는 곳에서 상류에서 유입되는 유사에 의하여 급격하게 퇴적되어 형성된 지형이나 그 형태를 델타(delta)라고 한다(Morris and Fan, 1997). 델타의 종방향 지형은 굽은 유사 입자로 퇴적된 정상퇴적층(Topset bed), 급경사면을 형성한 전부퇴적층(Foreset bed), 실트나 가는 입자가 퇴적된 저부퇴적층(Bottomset bed)로 형성된다. Toniolo and Parker (2003)는 저수지 내 형성되는 델타에 의하여 저류용량이 연간 1% 정도 감소한다고 하였다. Morris and Fan (1997)은 코스타리카의 Loiza 저수지를 대상으로 HEC-6모형을 이용하여 1963년부터 1990년까지 28년간의 하상을 예측하였다. 또한 델타의 퇴적양상 및 입경별 퇴사량을 실측치와 비교하여 모형의 적용성을 검증하고, 저수지 퇴사로 연간 약 1.2%의 저수지 유효용량의 손실이 발생한다고 하였다. 이처럼 보 상류에 토사가 퇴적되면 저류용량이 감소하여 본래 기능이 상실할 뿐만 아니라 하상이 상승하게 되면서 홍수위 상승으로 인하여 하천범람을 일으킬 수도 있게 된다. 보 하류에는 상류에서 공급되는 유사의 차단과 보를 월류하는 흐름의 유수력에 의하여 보 하류에서 침식과 퇴적이 반복되면서 하천교란을 일으키고 수리구조물의 안전을 위협하게 된다. 따라서 보 설계 시 장기적으로 퇴적 토사를 적절히 예측하고, 주기적인 조사를 통하여 퇴사 과정과 분포 등을 분석하여 보 운영 조건개선 등의 기준 마련이 필요하다.

보 상류에 퇴적된 유사의 관리방안을 수립하기 위해서는 델타의 퇴적 메커니즘을 규명해야 한다. 댐 및 저수지 상류의 토사 퇴적을 예측하기 위해서 물리적 모형실험, 실측을 통한 실증적 연구방법과 수치해석 방법이 활용되고 있다. Wright and Coleman (1974)은 미국 Mississippi 강에서 현장조사를 통해 Distal bar, Bar back, Bar crest, Bar front로 하천 델타를 분류 하였고, Soni *et al.* (1980)와 Hotchkiss and Parker (1990, 1991)는 수리실험과 수치해석을 수행하여 1차원 수치모형의 적용성을 검증하였다. Ashida *et al.* (1987, 1988, 1989)는 델타의 형성과정과 델타의 상단(top)의 변화를 연구하기 위하여 실험을 수행 하였다. Lee *et al.* (2013)은 보 상류에서 유사의 변화 및 퇴적 메커니즘 분석을 위하여 낙동강 상류에 설치된 낙단보와 상주보를 중심으로 2차원 하상변동 수치모형인 CCHE2D를 이용하였다. 모의결과 상주보와 낙단보 상류에

서 유사가 포착되어 하상고가 최대 2.0 m까지 상승하는 것으로 나타났다. Kim and Shin (2013)은 1차원 하상변동 모형인 HEC-RAS를 이용한 유사와 하상토 입도분포를 고려하여 저수지 상류 퇴사과정에 대한 장기모의를 하였다. 분석결과, 통수초기에 퇴적량이 많았으나 시간이 지날수록 저수지 용량이 감소하는 특징을 모의하는 등 델타의 시공간적인 분포와 퇴사과정 분석에 대한 적용성을 확인하였다. 그러나 이들 연구에서는 다양한 수리학적 조건을 고려한 델타의 형성 과정에 대하여 정량적으로 제시하지 못하고 있다.

최근에 Lee and Jang (2018)은 실내실험을 통하여 개량형 공압식 가동보를 대상으로 보의 기립각도 변화를 고려한 델타의 발달 과정에 대한 수리학적 특성을 다양한 무차원 변수들을 통해 정량적으로 파악하였으며, 동일한 수로경사일 때 보의 높이가 클수록 델타의 발달을 억제할 수 있는 효과가 큰 것으로 나타났다. 저수지 퇴사는 유역으로부터 생성되는 유사량, 이송능력, 퇴적형태 등에 따라 변화되는 매우 복잡한 과정을 거쳐 이루어진다. 특히 하천의 특성, 빈도별 홍수량, 저수지의 지형적 특성 및 운영, 응집능, 밀도류, 그리고 토지이용 변화에 따라 주로 영향을 받으며 사수역, 포착률, 유입수문곡선, 유입 유사량, 유사특성 등을 고려하여 분석해야 한다(Julien, 1995).

따라서 본 연구에서는 국내 중·소하천에 가장 많이 설치되어 있는 개량형 공압식 가동보(Improved-pneumatic-movable weir, IPM weir)를 대상으로 실내실험으로 하도경사의 변화를 고려하여 보 상류에서 유입되는 토사의 퇴사 거동을 분석 하였다.

2. 실험조건 및 방법

2.1 실험조건

하도의 경사 변화에 따른 개량형 공압식 가동보 상류에서 퇴사거동 분석을 위하여 실험 장치는 Lee (2018)에서 가동보의 유량계수 개발 및 퇴사거동 분석 연구를 수행한 가변형 경사수로를 이용하였다(Fig. 1). 수로바닥에는 흐름에 의해 발생하는 하상 세굴로 수로 바닥이 노출되지 않도록 0.12 cm 두께로 모래를 포설하였다. 하상토 입경(d_m)은 주문진 균일사로 중앙입경 0.8 mm를 사용하였다(Fig. 2). 고정상 하상과 이동상 하상의 경계에서 국부세굴이 발생하는 것을 방지하기 위하여 상류 유입구에서 일정하게 유사를 공급하였다. 실험 조건은 Table 1에서 보여주는 것처럼 보의 높이(H)는 0.15 m ($\alpha = 25^\circ$)로 고정된 상태에서 수로경사(i)를 1/100, 1/150, 1/200 조건으로 실험을 수행하였다. 유량(Q)은 유사가 이동

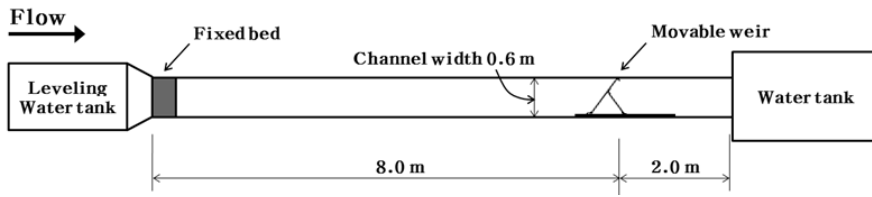


Fig. 1. Plan of experimental equipment (Lee, 2018)



Fig. 2. Experiment channel

Table 1. Hydraulic conditions for experiments

Cases	Channel slope	Q (m ³ /s)	α (°)	W (cm)	d_m (mm)
Run-1	1/100	0.003	25	15.0	0.8
Run-2	1/150	0.003	25	15.0	0.8
Run-3	1/200	0.003	25	15.0	0.8

하여 델타가 형성될 수 있는 조건을 갖추도록 0.003 m³/s로 결정 하였다. 이때 수로경사(i)는 공급되는 유량에 의하여 유사가 이동할 수 있도록 충분한 소류력(tractive force)이 발생할 수 있도록 예비실험을 통해 결정 하였다. 그러나 부유사가 발생하지 않아야 하고, 소규모 하상파인 사륜(ripple)도 발생하지 않아야 한다. 또한 보에 의하여 발생하는 배수(backwater)의 영향을 고려하여 가동보는 수로의 하류로부터 2.0 m 지점에 설치하였다(Fig. 1).

Fig. 3은 개량형 공방식 가동보 상류에서 유사가 퇴적되어 델타가 발달하는 개념도이다. W 는 위어높이(cm), α 는 보의

기립각도(°), x 는 위어 마루에서 수로입구까지의 거리(m) 즉, 저수지 총 길이, h_0 는 모래의 포설 깊이(m), h_w 는 위어높이(W)와 모래의 포설 깊이(h_0)의 차인 유효 델타높이(cm), h 는 델타가 형성된 지점에서의 수심(cm), x_D 는 델타의 발달지점, V_1 , V_0 , V_2 는 각각 델타가 형성된 상류 1.0 m 지점에서 유속(cm/s), 델타가 형성된 지점에서 유속(cm/s), 델타가 형성된 하류 1.0 m 지점에서 유속(cm/s)이다(Fig. 3). Fig. 4는 델타 발달구조를 나타낸다. h_d 는 델타의 높이(cm), S_b 는 델타의 전면부(foreset) 까지의 길이(cm), S_t 는 델타의 상단(topset) 길이(cm), ΔS 는 델타 전면부의 수평방향 길이(cm) 즉, S_b 와 S_t 의 차이다(Lee, 2018).

2.2 실험방법

델타의 이동특성을 분석하기 위하여 실험은 보의 기립각도복조건, 그리고 델타의 발달과정의 상호작용을 고려하여 상류에서 퇴적층의 이동, 퇴적구간 등에 대한 델타의 영향 등

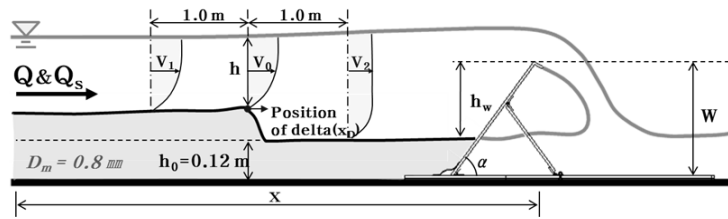


Fig. 3. Scheme for delta development mechanism of IPM weir (Lee, 2018)

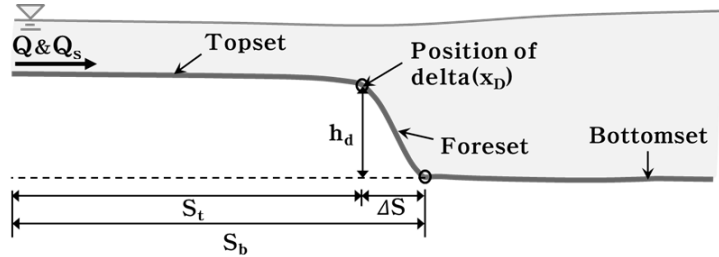


Fig. 4. Typical structure of delta (Lee, 2018)

을 분석하였다. 각 실험마다 30 min 간격으로 ± 0.1 mm의 정밀도를 가지는 전자식 point gauge를 이용하여 수심, 하상고의 변화, 델타의 높이를 측정하였다. 측정범위는 수로의 입구 부분 0 m 지점부터 7 m 지점까지 종방향으로 0.5 m 간격, 횡방향은 중앙부(center) 1개 지점만 측정하였으며, 델타가 형성된 지점의 수심과 델타높이를 측정하였다. 측정인력은 측정자 2명, 기록자 1명이 하였고, 그 밖에 유사공급 1명, 실험총괄 및 관찰자 1명 총 5명이 실험을 진행하였다. 이때, 실험을 중단하고 측정한다면 펌프를 재가동시켰을 때 상류에서 물이 공급되면서 델타형상의 급속한 변형으로 인해 유효한 데이터를 얻을 수 없기 때문에 실험 중 델타 지점부터 상류 방향으로 측정하였다. 실험 중에 유속측정은 수심이 얇고 수로의 폭이 좁아 유속계를 이용하여 유속측정이 곤란하기 때문에 영상처리 기법을 이용하여 유속을 측정하였다. 영상처리 기법을 이용한 유속측정은 디지털카메라(Compact camera WB350F)를 이용하여 일정한 시간간격의 정지이미지를 추출하여 이미지 내의 추적 입자(particle)의 이동거리를 시간간격으로 나누어 표면유속을 측정하였다. 이때 추적 입자는 스티로폼을 $5 \times 5 \times 5$ mm로 제작하였으며, 추적 입자의 이동거리를 정확하게 측정하기 위해서 5×5 cm 크기의 격자로 구성된 격자망을 제작하였다. 시간간격에 따른 이미지 추출을 위하여 디지털카메라의 셔터의 노출시간은 1/10초로 설정하였다. 또한 카메라 촬영 각도에 의한 원근상 왜곡을 보정하기 위하여 수로 양안에 4개의 기준점을 선정하고 촬영된 이미지 보정을 통해 이미지에 대한 왜곡을 수정하였다(Lee, 2018).

3. 분석결과

Fig. 5는 Run-2에서 시간에 대한 델타의 종단변화를 보여주고 있다. 델타는 통수 초기에 보에 의하여 형성된 배수(backwater)의 영향이 끝나는 지점에서 형성되었으며, 시간이 증가함에 따라 일정한 형상을 유지한 상태로 하류로 이동하였다(Figs. 5 and 6). Run-1과 Run-2의 경우에는 통수 후 각각 300 min, 740 min에 델타가 보에 도달하여 실험을 종료하였다. 그러나 Run-3의 경우에는 720 min에 보까지의 거리 6.945 m 중 델타가 보에까지 도달하지 못하고 4.29 m 지점에서 실험을 종료하였다(Table 2).

Fig. 7은 각 실험조건 별 시간에 따른 델타의 이동속도(S_D , cm/min)의 변화이며, 델타 형성 초기 30 min인 구간을 제외하고 동적평형상태에 가까워진 통수 후 60 min의 결과이다. 실험초기에 S_D 는 3.90~14.33 cm/min에서 60 min에 1.47~1.93 cm/min로 감소하였으며, 180 min에는 1.0 cm/min이하로 감소하였다. 델타는 시간이 지나면서 보에 도달하고 유속과 델타의 이동속도가 감소하였다. 델타의 평균 이동속도는 Run-1에서 2.3 cm/min로 가장 크게 나타났으며, Run-2에서 0.72 cm/min이고, Run-3에서 0.60 cm/min로 나타났다. 수로경사(i)가 1/100인 Run-1에서 S_D 는 평균 2.3 cm/min이고, i 가 1/150조건인 Run-2에서 S_D 는 평균 0.94 cm/min로 59% 감소하였다. i 가 1/200조건인 Run-3의 S_D 는 평균 0.60 cm/min로 37% 감소하였다(Table 2).

Fig. 8은 각 실험조건에 대하여 시간에 따른 델타의 높이(h_d) 변화를 보여주고 있다. 분석결과 h_d 는 시간이 지날수록

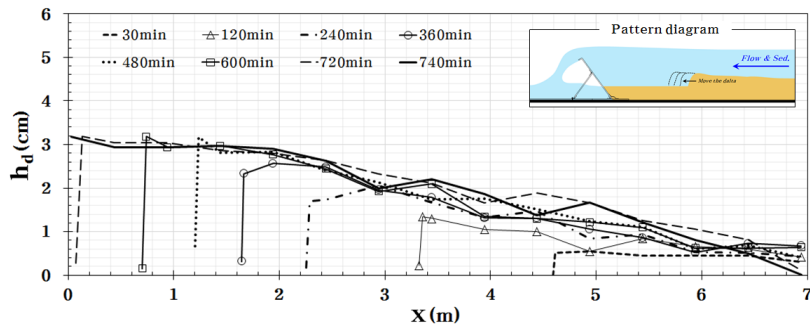


Fig. 5. Longitudinal changes of bed with time for Run-2

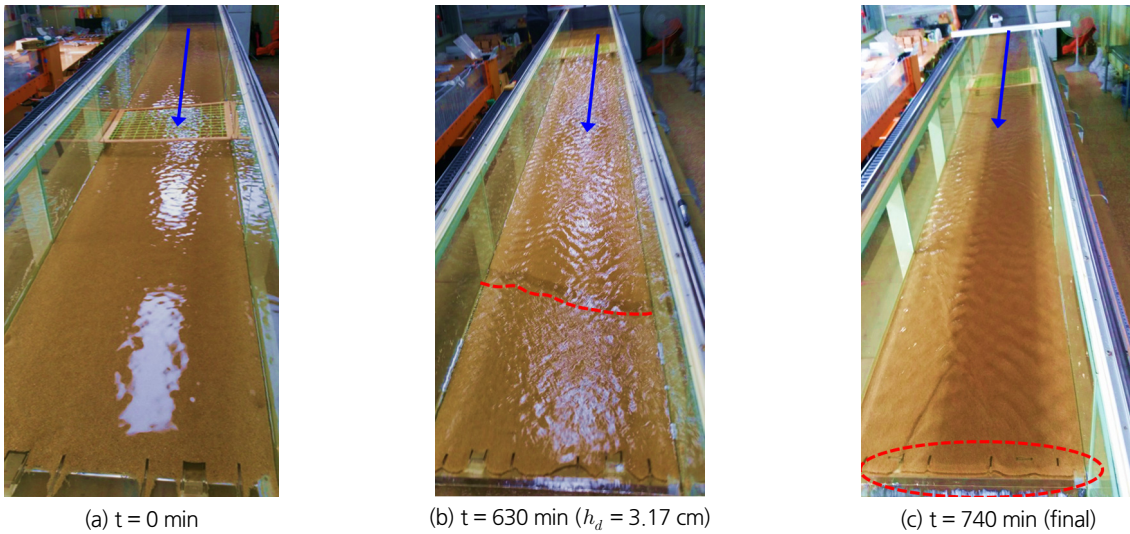


Fig. 6. Delta migration with time for Run-2

Table 2. Results for ratio of reservoir total length (S_t/x) to delta location for each run

Case	Channel slope	Q (m ³ /s)	α (°)	W (cm)	h_w (cm)	Run times (min)	S_t/x	S_D (cm/min)
Run-1	1/100	0.003	25	15.0	3.0	300	6.945/6.945	2.315
Run-2	1/150	0.003	25	15.0	3.0	740	6.945/6.945	0.939
Run-3	1/200	0.003	25	15.0	3.0	720	4.290/6.945	0.596

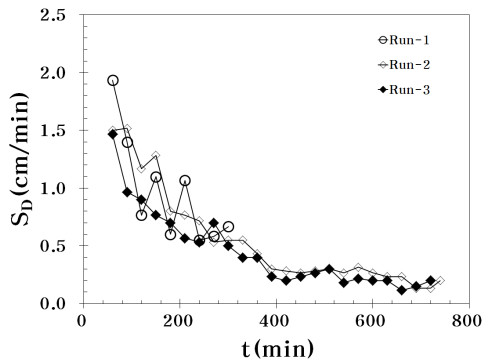


Fig. 7. Variation of delta migration speed (S_D) with time (t)

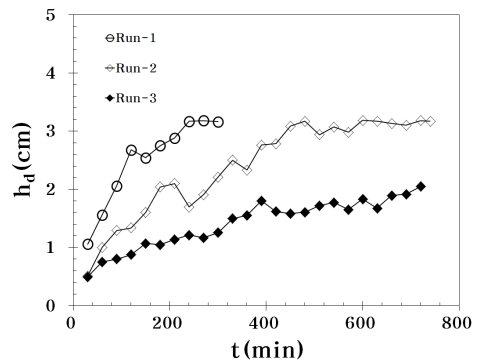


Fig. 8. Variation of delta height (h_d) with time

보에 도달하면서 위어높이(W)와 모래의 포설 깊이(h_0)의 차인 유효 델타높이(h_w)에 가까워지는 것으로 나타났다. Run-1의 경우에는 실험이 진행된 이후 300 min 후에 델타가 보에 도달하였으며, h_d 는 270 min부터 h_w 인 3.0 cm를 유지하였다. Run-2의 경우에는 실험이 진행된 이후 740 min 후에 델타가 보에 도달하였으며, h_d 는 450 min부터 3.0 cm 이상을 유지하였다(Fig. 10). Run-3은 통수 720 min 까지 진행되었지만 델타는 보에 도달하지 못했으며, h_d 는 통수 720 min 일 때 최대 2.047 cm였다. Run-3의 경우에는 Run-1과 보의 높이(W)는 같고 수로경사가 1/200으로써 Run-1의 수로경사보다 2배 완만하다. 따라서 델타의 발달에는 수로의 경사에 의해 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 실제 하천에서 댐 및 보의 규모, 형태와 유역면적, 고도, 하천경사 등이 델타의 발달조건에 지배적인 인자가 될 것으로 판단된다.

Fig. 9는 각 실험 조건 별 델타의 높이(h_d)에 따른 델타의 이동속도(S_D)의 변화를 보여주고 있다. 델타는 보가 설치된 지점에 접근할수록 h_d 는 증가하였으며, S_D 는 감소하였다. h_d 는 보에 의해 발달이 억제되고 h_w 은 감소하였다. Fig. 10은

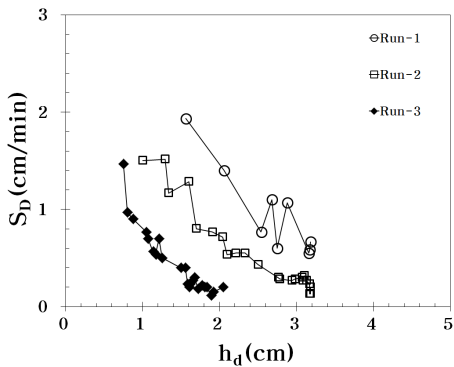


Fig. 9. Variation of delta migration speed (S_D) for delta height (h_d)

Run-2조건에 대하여 시간에 대한 h_d 의 변화를 과정을 보여주고 있다.

델타의 위치와 규모 등 공간적 분포를 정량적으로 파악하기 위해서, 가장 중요한 변수는 델타가 형성된 위치와 높이, 체적 등이다. 수로의 경사변화에 따른 델타의 발달과정을 파악하기 위하여 무차원 델타의 위치와 저수지의 수명을 의미하는 무차원 저수지 용량을 분석하였다. 무차원 델타의 위치, 무차원 저수지 용량, 무차원 델타의 높이와 무차원 델타의 유효 높이는 다음과 같이 정의된다.

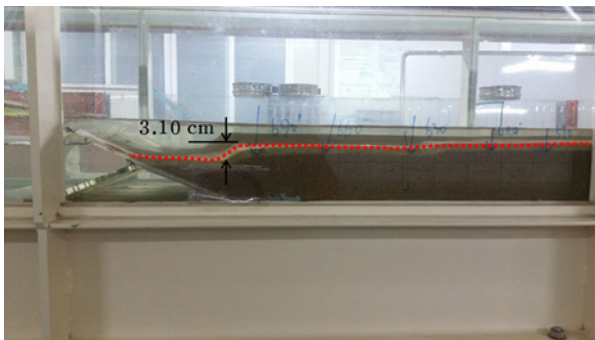
$$\text{무차원 델타의 위치} = \frac{x_D}{x} \tag{1}$$

$$\text{무차원 델타의 유효높이} = \frac{h_d}{h_w} \tag{2}$$

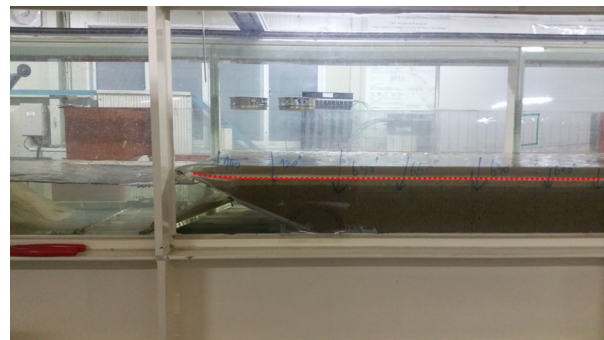
$$\text{무차원 저수지 용량} = \frac{V_{xD}}{V_x} \tag{3}$$

$$\text{무차원 델타의 퇴적량} = \frac{Q_s}{V_x} \tag{4}$$

여기서, V_{xD} 는 델타의 체적(cm^3), V_x 는 저수지 총 체적(cm^3), Q_s 는 델타의 퇴적량(cm^3/s)이다. Fig. 11은 시간(t)에 따른 무차원 델타 위치(x_D/x)의 변화를 보여주고 있다. Run-1에서 델타의 발달은 x_D/x 가 0.62 지점에서 시작되었으며, Run-2의 경우 델타의 발달은 x_D/x 가 0.25 지점에서 시작되었으며, Run-3는 x_D/x 가 0.17 지점에서 시작되었다. α 가 25도로 일정한 조건에서 수로경사(i)가 완만할수록 저수지 용량이 커지면서 유사 이동이 흐름에 의해 제한을 받는다.



(a) $t = 690 \text{ min}$ ($h_d = 3.10 \text{ cm}$)



(b) $t = 740 \text{ min}$ (final)

Fig. 10. Delta height with time for Run-2

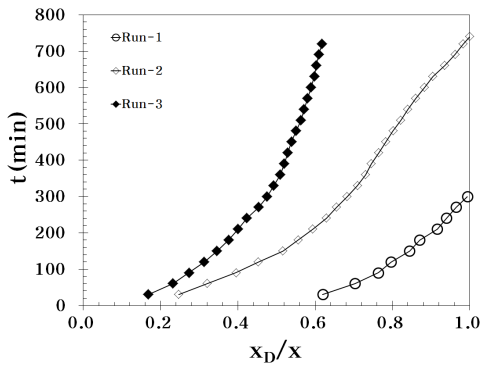


Fig. 11. Variation of dimensionless delta location (x_D/x) with time (t)

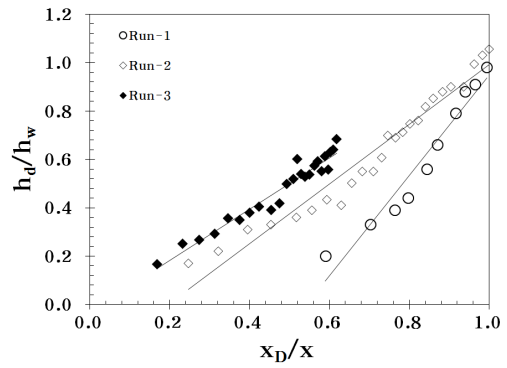


Fig. 12. Variation of effective height of dimensionless delta (h_d/h_w) for dimensionless delta location (x_D/x)

Fig. 12는 무차원 델타 위치(x_D/x)에 대한 무차원 델타의 유효높이(h_d/h_w)의 변화를 보여주고 있다. Run-1에서 통수 초기 x_D/x 는 0.59인 지점에서 h_d/h_w 가 0.20이며, x_D/x 가 1.0인 지점에서 h_d/h_w 는 0.98이다. Run-2와 Run-3의 경우에는 통수초기 x_D/x 가 각각 0.25, 0.17인 지점에서 h_d/h_w 가 0.17로 동일하였다. 그러나 x_D/x 가 1.0인 지점에서 h_d/h_w 는 각각 1.06, 0.68이다. 따라서 x_D/x 가 1.0에 가까울수록 즉, 델타가 보에 근접할수록 h_d/h_w 이 큰 것으로 나타났다. 보에 의하여 형성된 델타가 시간이 증가함에 따라 하류로 이동하며, 델타의 높이(h_d)는 델타의 유효높이(h_w)에 근접하였다.

Fig. 13은 무차원 델타 위치(x_D/x)와 무차원 저수지 용량 (V_{xD}/V_x)의 변화를 보여주고 있다. Run-1의 경우 x_D/x 가 0.62인 지점에서 V_{xD}/V_x 는 0.004이었으며, x_D/x 가 1인 지점에서 0.026까지 증가하였다. 이것은 통수초기에서 실험종료 시까지 저수지 용량이 2.2%감소한 것을 의미한다. Run-2의 경우에는 V_{xD}/V_x 가 0.0007에서 0.0206까지 증가하여 저수지 용량이 1.99% 감소하였다. Run-3의 경우에는 x_D/x 가 0.17인 지점에서 V_{xD}/V_x 는 0.0005로 시작하여 x_D/x 가 0.62인 지점에서 0.0077까지 증가하였으며, 저수지 용량은 0.72% 감소하였다(Fig. 11 and Table 3). 따라서 동일한 조건에서 수로경사(i)가 완만할수록 V_{xD}/V_x 가 감소하였으며, V_{xD} 발달에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. Fig. 14는 무차원 델타 위치(x_D/x)에 대한 무차원 델타의 퇴적량(Q_s/V_x)의 변화를

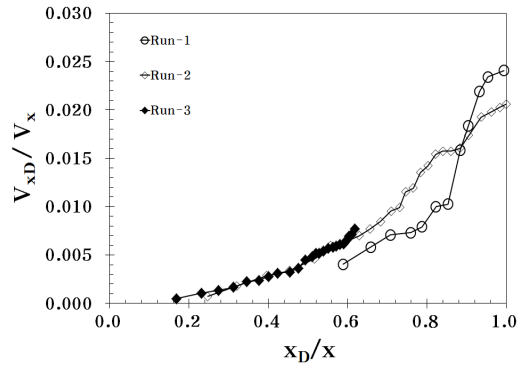


Fig. 13. Variation of delta volume (V_{xD}) for dimensionless delta location (x_D/x)

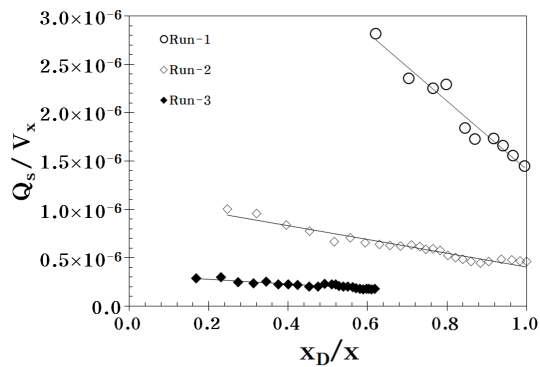


Fig. 14. Variation of dimensionless sediment deposition for dimensionless delta location (x_D/x)

Table 3. Results for delta volume (V_{xD}) and ratio of reservoir total length (x_D/x) to delta location for each run

Case	V_x (cm ³)	Initial			Final		
		x_D/x	V_{xD} (cm ³)	V_{xD}/V_x	x_D/x	V_{xD} (cm ³)	V_{xD}/V_x
Run-1	5,388,194	0.62	21,743	0.0040	1.0	140,760	0.0260
Run-2	6,518,126	0.25	4,599	0.0007	1.0	134,246	0.0206
Run-3	6,843,110	0.17	3,474	0.0005	0.62	52,690	0.0077

보여주고 있다. x_D/x 가 증가할수록 Q_s/V_x 은 감소하였다. 동일한 조건에서, 수로경사(i)가 완만할수록 델타 퇴적량(Q_s)은 감소하는 것으로 나타났다.

보로 유입하는 흐름은 보에 가까워짐에 따라 점차 유속이 줄어들고 그에 따라 난류도 약해져서 유사이송 능력이 줄어든다. 이때 델타의 전면(foreset)은 경사가 급하여 토사의 수중안식각(submerged angle of repose)을 이루게 되며, 그 길이가 짧아진다. 이러한 특징을 분석하기 위하여 델타의 전면부 길이비와 무차원 델타의 이동속도를 분석하였다.

$$\text{델타의 전면부 길이비} = \frac{h_d}{\Delta S} \tag{5}$$

$$\text{무차원 델타의 이동속도} = \frac{S_D}{V_0} \tag{6}$$

$$\text{무차원 델타의 높이} = \frac{h_d}{h} \tag{7}$$

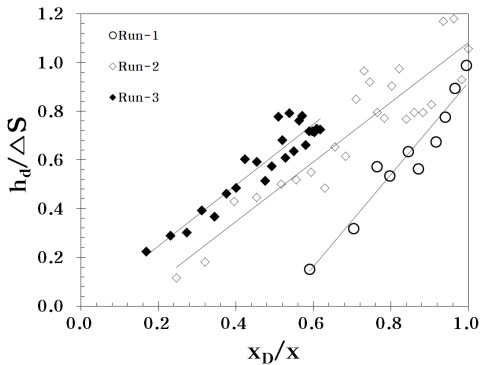


Fig. 15. Variation for ratio of delta height and delta front length ($h_d/\Delta S$) for Dimensionless delta location (x_D/x)

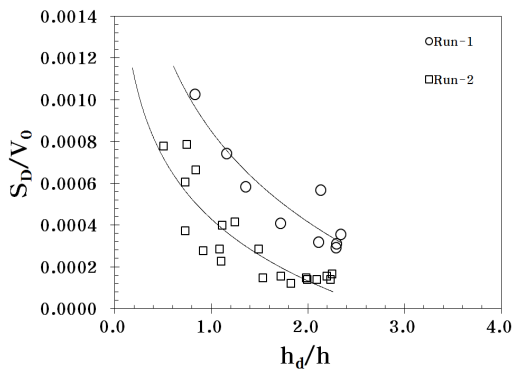


Fig. 16. Variation for Dimensionless delta migration speed (S_D/V_0) for Dimensionless delta height (h_d/h)

Fig. 15는 무차원 델타 위치(x_D/x)와 델타의 전면부 길이비($h_d/\Delta S$)의 변화를 보여주고 있다. x_D/x 가 증가할수록 $h_d/\Delta S$ 가 함께 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 통수초기 델타의 전면경사(foreset slope)는 완만하며, 델타가 하류로 이동할수록 델타의 전면경사는 증가하였다. 수로경사(i)가 완만할수록 일정한 간격으로 $h_d/\Delta S$ 가 증가하였다. 따라서 수로경사(i)가 완만할수록 $h_d/\Delta S = 1$ 에 가깝다. Fig. 16은 무차원 델타의 높이(h_d/h)와 무차원 델타의 이동속도(S_D/V_0)의 변화를 보여주고 있다. 동일한 조건에서 수로경사(i)가 완만할수록 h_d/h 와 S_D/V_0 가 감소하고, h_d/h 가 증가할수록 S_D/V_0 는 감소하였다. 델타의 높이(h_d)가 증가할수록 수심(h)은 감소하였으며, 델타가 형성된 지점에서의 유속과 델타의 이동속도(S_D)도 감소하였다.

4. 결론

본 연구에서는 실내실험을 통하여 개량형 공압식 가동보를 대상으로 수로의 경사변화를 고려한 유사의 수리학적 발달 과정을 파악하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 보에 의하여 형성된 델타는 시간이 증가함에 따라 하류로 이동하며, 델타의 높이(h_d)는 증가하였다. 또한 보에 도달할수록 흐름이 약해지면서 델타의 이동속도(S_D)는 감소하였다.
- 2) 수로경사(i)가 완만할수록 무차원 델타의 높이(h_d/h)와 무차원 델타의 이동속도(S_D/V_0)가 감소하였다. 델타의 높이(h_d)가 증가할수록 수심(h)은 감소하였다.
- 3) 무차원 델타 위치(x_D/x)가 증가할수록 무차원 델타의 유효높이(h_d/h_w)와 무차원 저수지 용량(V_{x_D}/V_x)이 증가하였다. 그러나 무차원 델타의 퇴적량(Q_s/V_x)은 감소하였다. 따라서 동일한 조건에서 수로경사(i)가 완만할수록 델타의 퇴적량(Q_s)이 감소하게 되며, 델타의 체적(V_{x_D}) 발달에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이것은 시간이 증가할수록 델타의 이동과 함께 저수지 용량이 감소하는 것을 의미한다.
- 4) 무차원 델타 위치(x_D/x)와 델타의 전면부 길이비($h_d/\Delta S$)는 통수초기 델타의 전면경사가 완만하며, 델타가 하류로 이동할수록 델타의 전면경사는 증가하였다. 수로경사(i)가 완만할수록 $h_d/\Delta S = 1$ 에 가깝다.

본 연구의 결과는 댐 및 보 상류의 퇴사관리를 위한 운영조건의 개선 및 기준마련 등에 참고가 될 것으로 기대하며, 향후 부유사와 혼합사의 거동이 고려된 보 상류 퇴사과정에 관한 연구가 필요할 것이다. 또한 가동보 상류의 퇴적을 저감시키고 보 하류에서 국부적인 세굴을 저감할 수 있도록 하도관리와 관련된 연구가 지속적으로 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신C02)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- Ashida, K., Sawai, K., and Shieh, C. L. (1987). "A study on the delta formation process in a laterally wide basin-laboratory study of delta formation caused by bed load." *Annals of Disaster Prevention Research Institute*, Vol. 30, B-2, pp. 475-491.
- Ashida, K., Sawai, K., and Shieh, C. L. (1988). "A study on the delta formation process in a laterally wide basin-laboratory study of the influence on the delta formation process associated with suspended load and longshore current." *Annals of Disaster Prevention Research Institute*, Vol. 31, B-2, pp. 477-487.
- Ashida, K., Sawai, K., and Shieh, C. L. (1989). "A study on the delta formation process in a laterally wide basin-simulation of the development of delta with/without channels on its plain." *Annals of Disaster Prevention Research Institute*, Vol. 32, B-2, pp. 553-570.
- Chang, H. H. (1982). "Fluvial hydraulics of deltas and alluvial fans." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 108, No. 11, pp. 1282-1295.
- Hotchkiss, R. (1990). *Reservoir sedimentation and sluicing: experimental and numerical analysis*. University of Minnesota, Project Report, No. 304.
- Hotchkiss, R. H., and Parker, G. (1991). "Shock fitting of aggradational profiles due to backwater." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 9, pp. 1129-1144.
- Julien, P. Y. (1995). *Erosion and sedimentation*. Cambridge University Press, NY, USA.
- Kim, D. G., and Shin, K. G. (2013). "Long-term simulation of reservoir sedimentation considering particle-size distributions of suspended sediment and bed materials." *Journal of Korea Water Resource Association*, No. 46, No. 1, pp. 87-97.
- Lee, K. S. (2018). "Development of discharge coefficient of movable weir and analysis of the sediment processes upstream from the weir." Ph.D. dissertation, Korea National University of Transportation, pp. 64-68.
- Lee, K. S., and Jang, C.-L. (2018). "Analysis of the sediment processes of the movable weir through the laboratory experiments: focusing on the change of standing angle of weir." *Journal of Korea Water Resource Association*. Vol. 51, No. 9 (Accepted : 30 July 2018).
- Lee, K. S., Jang, C.-L., Son, K. I., and Hwang, M. H. (2013). "Numerical analysis of the sediment pass-through from the Sangju weir and the Gumi weir by using CCHE2D." *Journal of Korean Society on Water Environment*, No. 29, No. 6, pp. 813-824.
- Mahmood, K. (1987). *Reservoir sedimentation: impact, extent and mitigation*. Technical Paper No. 71, The World Bank, Washington D.C.
- Morris, G. L., and Fan, J. (1997), *Reservoir Sedimentation Handbook*. McGraw-Hill, NY, pp. 10.1-10.5.
- Soni, J. P., Ranga Raju, K. G., and Garde, R. J. (1980). "Aggradation in streams due to overloading." *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 106, No. 1, pp. 117-132.
- Toniolo, H., and Parker, G. (2003). "1D numerical modeling of reservoir sedimentation." *Proceedings IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Barcelona, Spain, pp. 457-468.
- Wright, L. D., and Coleman, J. M. (1974). "Mississippi river mouth processes: Effluent dynamics and morphologic development." *The Journal of Geology*, Vol. 82, No. 6, pp. 751-778.
- Yang, C. T., and Ahn, J. (2009). *Xiaolangdi reservoir scouring and silting mechanism and numerical simulation study*. Yellow River Engineering Consulting Company, China.