



Experimental analysis of the sedimentation processes by variation of standing angle in the improved-pneumatic-movable weir

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: 18-036

Received: 6 June 2018; Revised: 12 July 2018 / 30 July 2018; Accepted: 30 July 2018

Abstract

This study investigates the hydraulic characteristics and the delta development processes in the improved-pneumatic-movable weir by considering the standing angle of the weir through laboratory experiments. The delta migration speed decreases rapidly with time. As the ratio of delta height to water depth increases, the dimensionless delta migration speed decreases at the delta point. Therefore, the water depth decreases as the delta height increases. Although the delta volume is large due to the effective height of the delta, the delta migration speed and sediment deposition decreases because of the backwater effect on the delta. On the same bed slope condition, the larger the weir height, the larger the delta volume and the ratio of delta height to delta front length is close to 1.0. The delta development could be suppressed when the weir is high. Therefore, the condition that the weir is high has the suppressing effect on the delta developments.

Keywords: Delta, Movable weir, Reservoir sedimentation, Sediment processes, Standing angle of weir

실내실험에 의한 가동보 기립각도 변화에 대한 토사의 퇴적 과정 분석

이경수^a · 장창래^{b*}

^a행정안전부 국립재난안전연구원, ^b한국교통대학교 토목공학과

요 지

본 연구에서는 실내실험을 통하여 개량형 공압식 가동보를 대상으로 보의 기립각도를 고려한 유사의 퇴적과 델타의 발달 과정을 파악하였다. 가동보 상류에서 유입되는 유사는 배수의 영향으로 유속이 느려지면서 퇴적이 되고 델타가 형성되며 하류로 이동하였다. 각 실험조건에 대하여 시간에 따른 델타의 이동속도는 델타는 시간이 지나면서 현저하게 감소하고, 보에 접근하였다. 무차원 델타의 높이(h_d/h)가 증가할수록 무차원 델타의 이동속도(S_D/V_0)는 감소하였다. 따라서 델타의 높이(h_d)가 증가할수록 수심(h)은 감소하였다. 델타의 유효높이(h_w)가 크기 때문에 델타의 체적($V_{x,D}$)은 증가하지만 배수(backwater)의 영향을 받아 델타의 이동속도(S_D)와 퇴적량은 감소하였다. 수로 경사가 일정할 때, 보의 높이(W)가 클수록 델타체적($V_{x,D}$)이 증가하고, 델타의 전면부 길이비($h_d/\Delta S$)는 1에 가깝다. 같은 유량조건인 경우에 가동보의 기립 각도가 가장 클 때, 시간당 델타의 퇴적량(Q_s)은 가장 작았다. 따라서 보의 높이(W)가 클수록 델타의 발달을 억제할 수 있는 효과가 크다.

핵심용어: 델타, 가동보, 저수지 퇴사, 퇴적 특성, 보의 각도

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

1. 서론

하천에 이수기능을 확보하기 위하여 하천을 횡단하여 고정보가 설치되었으나 보 상류에 토사가 퇴적되어 하천의 연속성이 단절되고 홍수 시 통수능력 감소로 인한 제방붕괴 및 침수피해 등 치수적으로 문제를 일으키고 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 기존의 고정보를 철거하고 가동보를 설치하고 있다. 그러나 가동보 설치로 인한 수리학적 특성에 대하여 거의 파악되고 있지 않다. 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. 하천에서 댐 및 보에 의해 형성된 저수지는 델타에 의하여 저류용량이 감소하고, 유효수명뿐만 아니라 편익(benefits)을 제한하게 된다(Graf, 1984; Fan and Morris, 1997). Mahmood (1987)와 Toniolo and Parker (2003)에 의하면 저수지 내 유사의 퇴적은 저류용량을 연간 1%정도 감소시키는 것으로 파악하였다. Yang and Ahn (2011)은 미국 Missouri 강에 위치한 Lewis and Clark 저수지를 대상으로 50년의 장기 하상변동 모의를 한 결과, 저수지 저장용량이 초기에 비해 약 21% 감소되는 것으로 파악하였다. 보 하류에는 상류에서 공급되는 유사의 차단과 보를 통과하는 유속에 의해서 침식과 퇴적이 반복되면서 흐름 및 하도의 불안정과 수리구조물의 안전을 위협하게 된다. 따라서 보 설계 시 장기적으로 퇴적 토사를 예측하고, 주기적인 퇴적량 조사를 통하여 퇴사 과정과 분포 등을 분석하고 보 운영 조건의 개선이나 배사 등 적극적인 대책 마련이 요구된다.

보 상류에 퇴적된 유사, 델타의 관리방안을 수립하기 위해서는 델타의 거동 메커니즘을 규명해야 한다. 보 상류의 토사 퇴적을 예측하기 위해서 실측 데이터를 분석하는 경험적 방법과 수치해석 방법이 활용되고 있다. 국외의 델타와 관련된 연구 중에서 Wright and Coleman (1974)은 Mississippi 강에서 현장조사를 통해 델타의 형태를 분류하였고, Soni *et al.* (1980)와 Hotchkiss and Parker (1990, 1991)는 실험과 수치모의를 수행하여 1차원 수치모형의 적용성을 검증하였다. Chang (1982)는 델타의 수리학적 특성을 연구하기 위하여 소류력에 대한 이론적 검토를 하였다. Ashida *et al.* (1987, 1988, 1989)는 실내실험을 통하여 델타의 형성과정과 델타 상부(top)의 변화를 연구하였다. 국내 연구에서 Lee *et al.* (2013)은 보 상류

에서 유사의 변화 및 퇴적 메커니즘 분석을 위하여 낙동강 상류에 설치된 낙단보와 상주보를 중심으로 2차원 하상변동 수치모형인 CCHE2D를 이용하였다. Cho and Kang (2013)는 사연댐 상류의 퇴사량 조사를 통해 1965년부터 2013년까지 48년간 약 1.65 m의 퇴적이 발생하였고, 2차원 수치모형을 통해 50년 뒤 약 4.4 m의 퇴적이 발생할 것으로 예측하였다. 그러나 이들 연구에서는 델타의 발생조건과 발달과정에 대하여 분석하지는 않았다. 현재까지 국내에서 델타와 관련된 연구는 주로 댐 및 보 상류의 하상변동, 그리고 구조물 주변에서의 세굴 및 퇴적 분야에 국한되어 실험 및 수치모의 연구가 수행되어 왔으며 저수지내 델타의 형성과정에 대하여 정량적으로 제시하거나 델타의 발달 메커니즘 분석에 관한 연구는 매우 제한적이었다. 저수지 퇴사는 유역으로부터 생성되는 유사량, 이송능력, 퇴적형태 등에 따라 변화되는 매우 복잡한 과정을 거쳐 이루어진다. 특히 하천의 특성, 빈도별 홍수량, 저수지의 지형 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 Lee *et al.* (2014)와 Lee *et al.* (2016)에서 연구한 국내 중, 소하천에 가장 많이 설치되어 있는 개량형 공압식 가동보(Improved-pneumatic-movable weir, IPM weir)를 대상으로 실내실험을 수행하여 보의 기립각도의 변화를 고려한 보 상류에서 토사의 퇴적과정을 분석하였다.

2. 실험조건 및 방법

2.1 실험조건

델타의 이동특성을 분석을 위한 실험은 하류 수심의 영향이 상류에 미치는 영향을 고려하기 위하여 Lee *et al.* (2014)와 Lee *et al.* (2016)이 개량형 공압식 가동보를 대상으로 하천에서 평·갈수기를 고려한 자유흐름(free flow)과 홍수기를 고려한 잠김흐름(submerged flow) 특성 분석을 위해 연구한 실험 수로를 이용하였다(Fig. 1). 고가수조에서 모래로 채워진 이동상 경사수로에 물이 유입 될 때, 유입구에서 국부세굴이 발생하므로 고가수조의 물이 이동상 초기 수로로 물을 유도하고 유입구에서 국부세굴이 발생하지 않도록 고정상 수로를 목재로 제작하여 수밀성을 확보하였다. 이때 하상토는 중앙입경(d_m)이 0.8 mm인 주문진 여과사를 사용하였다. 수로 바닥에는 흐름에 의해 발생하는 하상 세굴로 수로 바닥이 노출되지 않도록 0.12 m 두께로 모래를 포설하였다. 고정상 하상과 이동상 하상의 경계에서 국부세굴이 발생하는 것을 방지하기

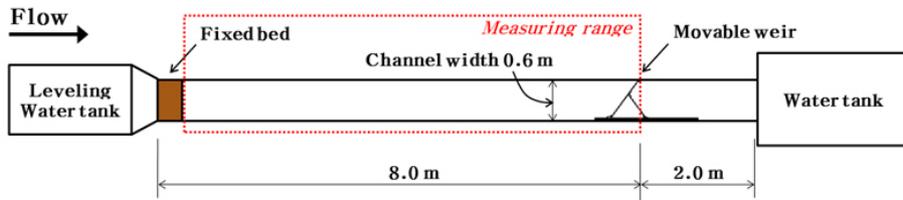


Fig. 1. Plan of experimental equipment (Lee, 2018)

Table 1. Experimental hydraulic conditions

Cases	α (°)	W (cm)
Run-1	25	15.0
Run-2	30	16.1
Run-3	35	19.0

위하여 상류 유입구에서 일정하게 유사를 공급하였다. 실험은 수로경사(i)가 고정된 상태에서 보의 높이(W)의 변화를 준 조건으로 실험을 수행하였다(Table 1). 본 실험을 위하여 적용된 수리학적 조건은 실험 중 유사가 표면장력으로 인하여 흐름과 달리 독립적으로 이동하거나 부유되지 않아야 하며, 하상에서 사면(ripple)이 발생되지 않을 조건을 충분히 만족시켜야 한다. 따라서 공급되는 유량(Q)과 위어높이(W)와의 상호작용 등을 고려하기 위하여 수로경사(i)를 1/50, 1/75, 1/100, 1/200, 1/300로 변화시켜가며 예비실험을 실시하고 유사가 이동할 수 있는 충분한 소류력(tractive force)이 발생하여 델타가 형성될 수 있는 조건을 갖추도록 Q 는 $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$, i 는 1/100으로 결정하였다. 또한 보에 의하여 발생하는 배수(backwater)의 영향이 고가수조까지 미치지 않는 조건을 만족시키기 위하여 가동보는 수로의 하류로부터 2.0 m 지점에 설치하였다(Fig. 1).

Fig. 2는 개량형 공압식 가동보 상류에서의 델타 발달 개념도를 보여주고 있다. 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(cm), h_w 는 위어높이(W)와 모래의 포설 깊이(h_0)의 차(cm), h 는 델타지점의 수심(cm), x_D 는 델타의 발달지점, V_1, V_0, V_2 는 각각 델타가 형성된 상류 1.0 m 지점에서의 유속(cm/s), 델타가 형성된 지점에서의 유속(m/s), 델타가 형성된 하류 1.0 m 지점에서의 유속(cm/s)이다(Fig. 2). Fig. 3은 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.

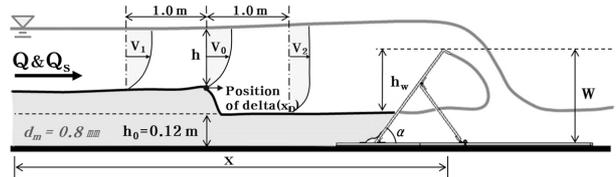


Fig. 2. Scheme for delta development mechanism of IPM weir (Lee, 2018)

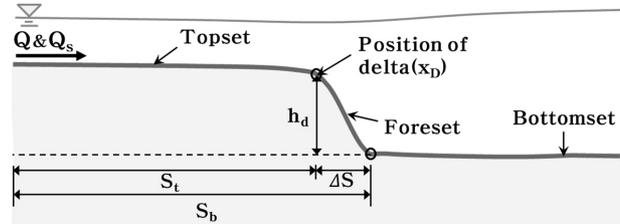


Fig. 3. Typical structure of delta (Lee, 2018)

2.2 실험방법

델타의 이동특성 분석을 위한 실험은 보의 기립 및 도복조건과 델타의 발달과정의 상호작용을 고려하여 보 운영조건에 의한 상류에서 퇴적면적의 이동, 델타의 이동속도, 퇴적구간 등 델타의 수리학적 영향인자들을 분석하였다. 각 실험마다 30 min 간격으로 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 의 정밀도를 가지는 전자식 point gauge를 이용하여 수심, 하상의 변화와 델타의 높이를 측정하였다. 측정범위는 수로의 입구부분 0 m 지점부터 7 m 지점까지 종방향으로 0.5 m 간격, 횡방향은 중앙부(center) 1개 지점만 측정하였으며, 델타가 형성된 지점의 수심과 델타높이를 측정하였다. 실험 중 유속측정은 수심이 얇고 수로의 폭이 좁아 유속계를 이용한 유속측정이 곤란하기 때문에 영상처리기법을 이용하여 유속을 측정하였다. 영상처리기법을 이용한 유속측정은 디지털카메라(Compact camera WB350F)를 이용하여 일정한 시간간격의 정지이미지를 추출하여 이미지 내의 추적 입자(particle)의 이동거리를 셔터의 노출시간으로 나누어 표면유속을 측정하였으며, 다음 Eq. (1)과 같다.

$$v = \frac{s}{\Delta t} \tag{1}$$

여기서, v 는 표면유속(m/s)이며, s 는 추적 입자의 이동거리(m)이다. Δt 는 카메라 셔터의 노출시간(s)이다. 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.

3. 실험결과 및 분석

Fig. 4는 각 실험조건에 대하여 시간에 따른 델타의 종단변화를 보여주고 있다. 델타는 통수 초기에 보에 의하여 형성된 배수(backwater)의 영향이 끝나는 지점에서 형성되었다. 이것은 배수위 경계에서 수심이 깊어지면서 흐름의 단면적이 증가하고 유속이 급격히 감소하기 때문에 델타의 발달을 촉진시키는 것이다. 즉, 보에 의한 영향으로 상류(upstream)에 수면변화가 시작되는 지점에서 유사이송 능력이 크게 감소하여 델타가 발달되기 시작하였다. 델타는 시간이 증가함에 따라 일정한 형상을 유지한 상태로 하류로 이동하였다. Fig. 5는 실험중 촬영한 Run-1에 대한 사진이다. Run-1과 Run-2에서는 통수 후 각각 300 min, 360 min에 델타가 보에 도달하여 실험이 종료되었다. 그러나 Run-3의 경우에는 630 min에 보까지의 거리 6.945 m 중 델타가 보에까지 도달하지 못하고 4.0 m 지점에서 실험이 종료되었다(Fig. 4 and Table 2).

Fig. 6은 각 실험조건별 측정된 유속의 평균값이다. 수로로 유입하는 흐름은 유속이 32.66~35.34 cm/s으로 평균 34.06 cm/s이며 보에 가까워짐에 따라 점차 유속이 줄어들면서 23.90~27.58 cm/s으로 평균 25.62 cm/s까지 감소하였다. 시간(t)에 따른 델타의 이동속도(S_D , Delta migration speed, cm/min)의 변화는 시간이 지날수록 감소하며 동적평형상태(Dynamic equilibrium stage)에 가까워졌다(Fig. 6). Fig. 6은 델타 형성 초기인 30 min인 구간을 제외하고 동적평형상태에 가까워진 $t = 60$ min 이후의 결과이다. S_D 는 60 min에 1.43~1.93

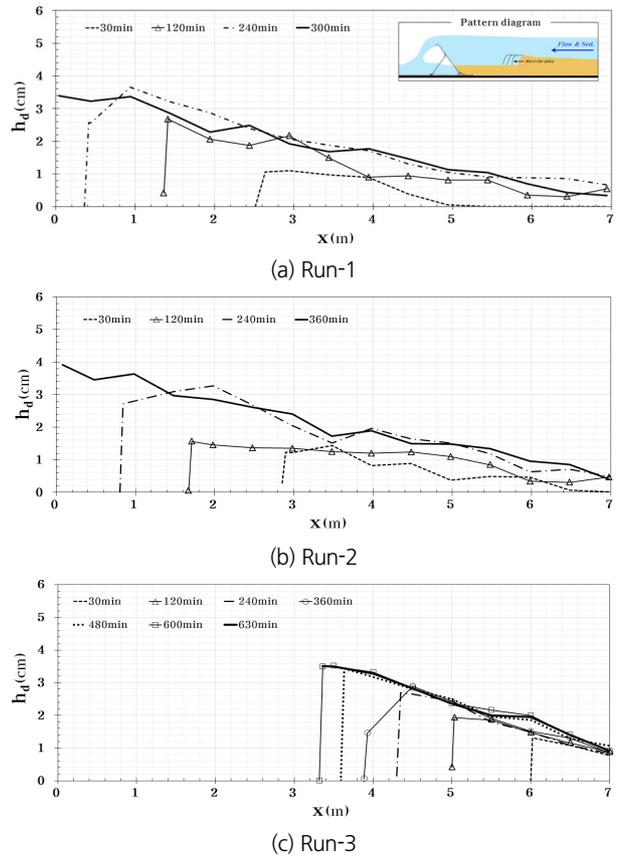


Fig. 4. Longitudinal section of delta according to time for each experimental condition

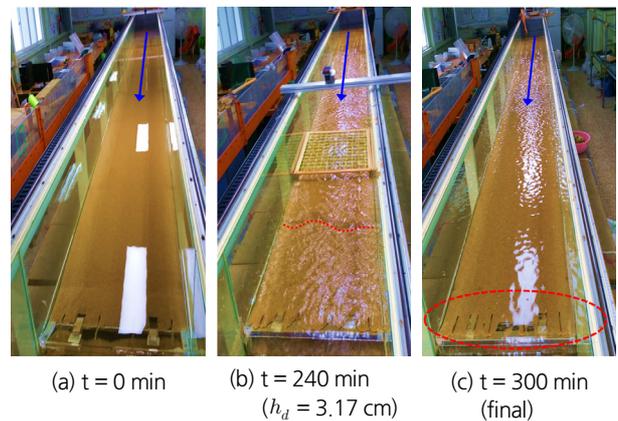


Fig. 5. Delta migration with time for Run-1

Table 2. Ratio of reservoir total length (S_l/x) to delta location for each run

Cases	Slope	Q (m ³ /s)	α (°)	W (cm)	h_w (cm)	Runtimes (min)	S_l/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	1/100	0.003	30	16.1	4.1	360	6.945/6.945	1.929
Run-3	1/100	0.003	35	19.0	7.0	630	4.000/6.945	0.635

cm/min로 감소하였으며, 180 min에는 1.0 cm/min이하로 감소하였다. 델타는 시간이 지나면서 보에 도달하고 유속이 감소하면서 S_D 도 감소하였다. 각 실험조건 별로 S_D 는 실험진행 30 min에 Run-1이 14.33 cm/min로 가장 크게 나타났으며, Run-2가 13.62 cm/min, Run-3이 3.29 cm/min 순으로 나타났다. 평균 S_D 는 Run-1이 2.3 cm/min로 가장 크게 나타났으며, Run-2가 1.88 cm/min, Run-3이 0.61 cm/min로 나타났다. 보의 각도(α)가 25°인 Run-1보다 α 가 30°인 Run-2의 S_D 는 평균 2.3 cm/min에서 1.93 cm/min으로 17% 감소하였다. α 가 35°인 Run-3의 경우 S_D 는 평균 0.64 cm/min로 Run-2 보다 67% 감소하였다(Fig. 7 and Table 2).

Fig. 8은 각 실험조건에 대하여 시간에 따른 델타의 높이 (h_d) 변화를 보여주고 있다. h_d 는 시간이 지날수록 보에 도달하면서 위어높이(W)와 모래의 포설 깊이(h_0)의 차인 유효 델타높이(h_w)에 가까워지는 것으로 나타났다. Run-1의 경우 h_d 는 $t=270$ min부터 h_w 인 3 cm를 유지하였다. Run-2의 경우 h_d 는 $t=270$ min부터 3.6 cm 이상을 유지하였다. Run-3의 경우에는 통수 780 min 까지 진행되었지만 델타는 보에 도달하지 못했으며, h_d 는 통수 540 min 일 때 최대 3.817 cm이다.

Run-3은 Run-1과 Run-2의 조건에서 수로경사(i)는 같지만 보의 높이(W)가 19.0 cm로 각각 4 cm, 2.9 cm이 높다. 따라서 델타의 발달은 보의 높이에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

각 실험 조건 별 델타의 형성높이(h_d)에 따른 델타의 이동속도(S_D)의 변화에서는, 델타는 보가 형성된 지점에 접근할수록 h_d 는 증가하였으며, S_D 는 감소하였다(Fig. 9).

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.

$$\text{무차원 델타의 위치} = \frac{x_D}{x} \tag{2}$$

$$\text{무차원 델타의 유효높이} = \frac{h_d}{h_w} \tag{3}$$

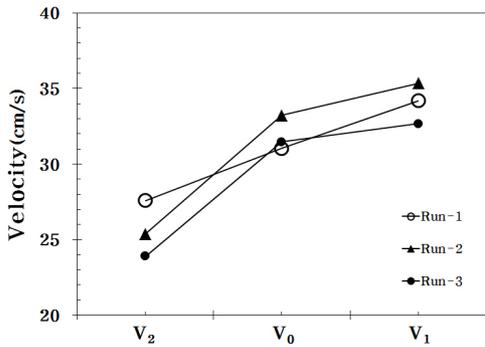


Fig. 6. Averaged velocity for each experimental condition

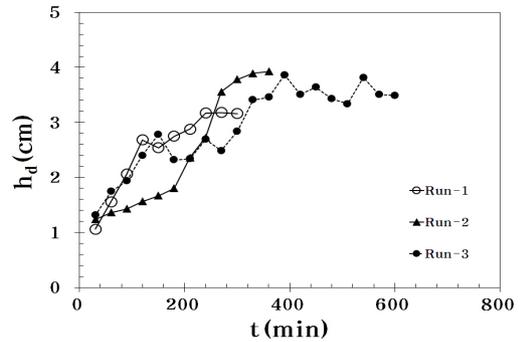


Fig. 8. Variation of delta height (h_d) with time (t)

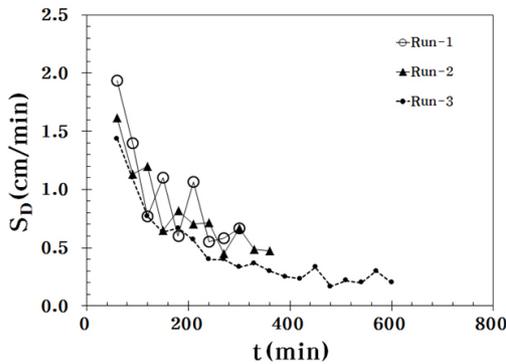


Fig. 7. Variation of delta migration speed (S_D) with time (t)

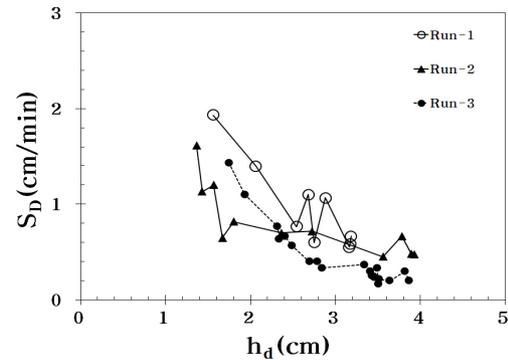


Fig. 9. Variation of delta migration speed (S_D) for delta height (h_d)

$$\text{무차원 저수지 용량} = \frac{V_{xD}}{V_x} \tag{4}$$

$$\text{무차원 델타의 퇴적량} = \frac{Q_s}{V_x} \tag{5}$$

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. 10은 시간(t)에 따른 무차원 델타의 위치(x_D/x)의 변화를 보여주고 있다. Run-1에서 델타는 $x_D/x = 0.62$ 지점에서 발달하기 시작하였으며, Run-2에서는 $x_D/x = 0.59$ 지점에서 발달하기 시작하였다. Run-3의

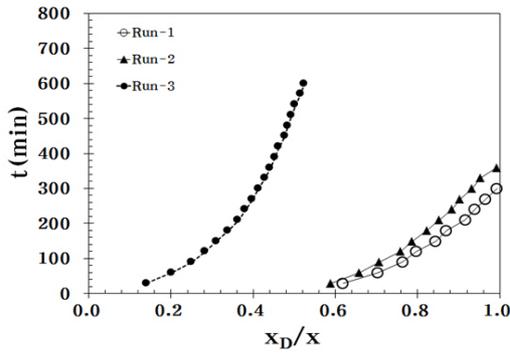


Fig. 10. Variation of dimensionless delta length (x_D/x) with time (t)

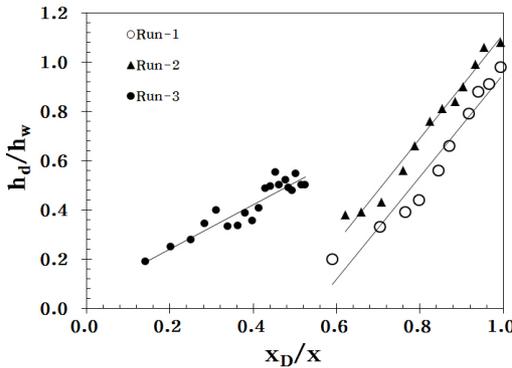


Fig. 11. Variation for ratio of delta height and delta effective height (h_d/h_w) for dimensionless delta length (x_D/x)

경우에는 $x_D/x = 0.14$ 지점에서 델타의 발달이 시작되었다 (Table 3). 수로경사(i)가 1/100으로 일정한 조건일 때 Run-1 과 Run-2의 경우에는 저수지의 3/5 지점에서 델타가 형성되면서 델타가 보에 도달하는 지점은 Run-3의 경우와 큰 차이를 보였다.

Fig. 11은 x_D/x 에 대한 무차원 델타의 유효높이(h_d/h_w)의 변화이다. 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. 12는 x_D/x 와 무차원 저수지 용량(V_{xD}/V_x)의 변화이다. 분석결과, 보의 높이(W)가 증가할수록 저수지 총 체적(V_x)은 증가하며, x_D/x 이 증가할수록 V_{xD}/V_x 는 증가하였다. 또한 보의 높이(W)가 증가할수록 V_{xD}/V_x 는 감소하였다. 실험조건별로 실험초기에 V_{xD}/V_x 는 각각 0.0040, 0.0036, 0.0006이었으며, 실험이 종료되었을 때 V_{xD}/V_x 는 각각 0.0241, 0.0185, 0.0062으로 나타났다(Table 3). 델타위치와 저수지총길이의 비(x_D/x)에 대한 무차원 델타의 퇴적량(Q_s/V_x)의 변화에서는 x_D/x 가 증가할수록 Q_s/V_x 은 감소하였다(Fig. 13). 따라서 동일한 조건에서 보의 높이(W)가 증가할수록 델타 퇴적량(Q_s)은 감소하며, 델타의 발달에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

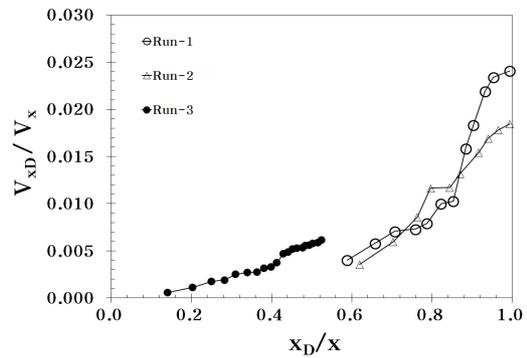


Fig. 12. Variation of dimensionless reservoir Volume (V_{xD}/V_x) for dimensionless delta location (x_D/x)

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	21,740	0.0040	1.0	140,760	0.0241
Run-2	7,624,310	0.59	27,348	0.0036	1.0	129,786	0.0185
Run-3	12,982,448	0.14	7,738	0.0006	0.52	79,930	0.0062

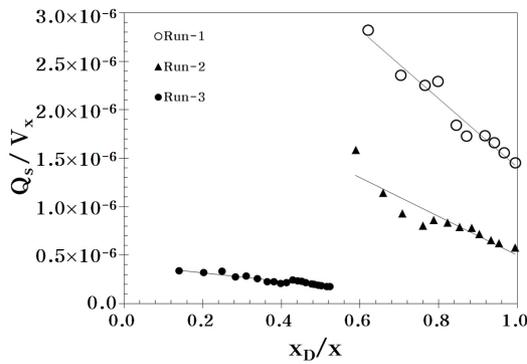


Fig. 13. Variation of dimensionless sediment deposition for dimensionless delta location (x_D/x)

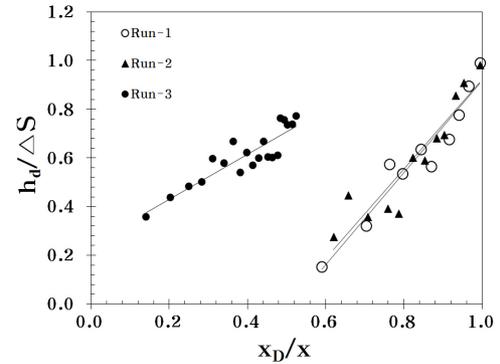


Fig. 14. Variation for ratio of delta height and delta front length ($h_d/\Delta S$) for dimensionless delta location (x_D/x)

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

$$\text{델타의 전면부 길이비} = \frac{h_d}{\Delta S} \quad (6)$$

$$\text{무차원 델타의 이동속도} = \frac{S_D}{V_0} \quad (7)$$

$$\text{무차원 델타의 높이} = \frac{h_d}{h} \quad (8)$$

Fig. 14는 x_D/x 와 델타의 높이와 델타의 전면부 길이 비 ($h_d/\Delta S$)의 변화를 보여주고 있다. x_D/x 가 증가할수록 $h_d/\Delta S$ 가 함께 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 통수초기 델타의 전면 경사(foreset slope)는 완만하며, 델타가 하류로 이동할수록 델타의 전면경사는 증가하였다. Run-1과 Run-2에서 x_D/x 에 따른 $h_d/\Delta S$ 의 변화는 비슷한 경향을 보이지만, Run-3의 경우에는 보의 높이(W)에 급격하게 영향을 받아 수심이 상대적으로 깊고 델타의 전면경사는 완만한 것으로 나타났다. Fig. 15는 델타의 높이와 수심의 비(h_d/h)와 델타의 이동속도와 델타지점에서의 유속의 비(S_D/V_0)의 변화를 보여주고 있다. 동일한 조건에서 보의 각도(α)가 증가할수록, 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, 델타의 이동속도(S_D)도 감소하였다.

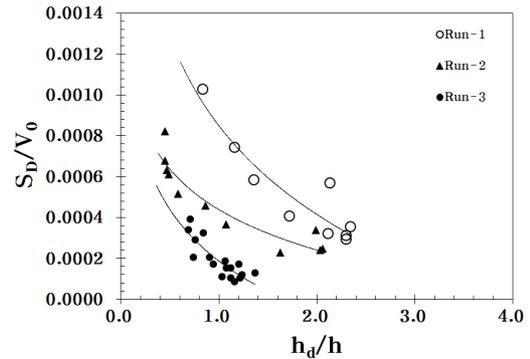


Fig. 15. Variation for dimensionless delta migration speed (S_D/V_0) for dimensionless delta height (h_d/h)

4. 결론

본 연구에서는 개량형 공압식 가동보를 대상으로 실내 실험을 수행하여 보의 기립각도의 변화를 고려한 상류에서 토사의 퇴적과정을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 델타가 보에 도달할수록 델타의 이동속도(S_D)도 감소하였다. 델타의 높이(h_d)는 보에 근접할수록 증가하였다. 또한 무차원 델타의 높이(h_d/h)가 증가할수록 무차원 델타의 이동속도(S_D/V_0)는 감소하였다. 따라서 델타의 높이(h_d)가 증가할수록 수심(h)과 델타의 이동속도(S_D)는 감소하였다.
- 2) 델타는 시간이 증가함에 따라 하류로 이동하며, 델타의 높이(h_d)는 델타의 유효높이(h_w)에 근접하였다. 또한 보의 높이(W)가 클수록 델타의 전면부 길이비($h_d/\Delta S$)는 1에 가깝다. 즉, 델타의 유효높이(h_w)가 클수록 델타의 전면경사는 완만하였다.

3) 보의 높이(W)가 증가할수록 델타의 유효높이(h_w)가 크기 때문에 저수지 총 체적(V_x)은 증가하지만, 배수(backwater)의 영향을 흐름이 약해지면서 델타의 이동속도(S_D), 시간당 델타의 퇴적량(Q_s)은 감소하였다. 이것은 동일한 수로경사(i)일 때 보의 높이(W)가 클수록 델타의 발달을 억제할 수 있는 효과가 큰 것을 의미한다.

본 연구의 결과는 댐 및 보 상류의 퇴사관리를 위한 운영조건의 개선 및 기준마련 등에 참고가 될 것으로 기대하며, 향후 다양한 가동보의 운영조건과, 부유사와 혼합사의 거동이 고려된 보 상류 퇴사과정에 관한 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12 기술혁신C02)과 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2017R1D1A1B03032083)을 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*, 30, B-2, 475-491 (in Japanese).
- 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*, 31, B-2, 477-487 (in Japanese).
- 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*, 32, B-2, 553-570 (in Japanese).
- Chang, H. H. (1982). "Fluvial hydraulics of deltas and alluvial fans." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 108, No. 11, pp. 1282-1295.
- Cho, H. J., and Kang, H. S. (2013). "Effects of control of dam sedimentation by a hydraulic structure in a reservoir." *Journal of Korea Water Resource Association*, No. 46, No. 12, pp. 1157-1167.
- Fan, J., and Morris, G. (1992). "Reservoir sedimentation. I: Delta and density current deposits." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 3, pp. 354-369.
- Graf, W. H. (1984). "Storage losses in reservoirs." *Water Power and Dam Construction*, Vol. 36, No. 4, pp. 37-40.
- Hotchkiss, R. and Parker, G. (1988). *Reservoir sediment sluicing - Laboratory study*. Hydraulic Engineering, pp. 1073-1078.
- Hotchkiss, R. and Parker, G. (1990). "Laboratory modelling of reservoir sedimentation and sluicing: scale considerations." *Proceedings International Conference on Physical Modelling of Transport and Suspension*, ASCE, pp. 14B.25-14B.30.
- 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.
- 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., Jang, C.-L., and Lee, N. J. (2016). "Analysis of submerged flow characteristics of the improved-pneumatic-movable weir through the laboratory experiments." *Journal of Korea Water Resource Association*, No. 49, No. 7, pp. 615-623.
- Lee, K.S., Jang, C.-L., Lee, N.J., and Ahn, S.J. (2014). "Analysis of Flow Characteristics of the improved-pneumatic-movable weir through the Laboratory Experiments." *Journal of Korea Water Resource Association*, No. 47, No. 11, pp. 1007-1015.
- 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*, ASCE, 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.