



Numerical simulation of turbidity currents intruding into a reservoir

Choi, Seongwook^a · Ban, Chaewoong^a · Choi, Sung-Uk^{b*}

^{ab}Department of Civil & Environmental Engineering, Yonsei University

Paper number: 16-104

Received: 23 December 2016; Revised: 2 March 2017 / 3 March 2017; Accepted: 3 March 2017

Abstract

This study proposes a numerical model which is able to simulate turbidity currents intruding into a reservoir and resulting sediment depositions. The proposed model is applied to laboratory experiments by Toniolo and Schultz (2005), and propagation of turbidity currents, morphological change, and trap of suspended sediment are simulated. It is simulated that the turbidity current after plunging at the foreset of the model delta, propagates along the bottom. The thickness of the turbidity current increases significantly after being blocked by the dam, and this effect is propagated in the upstream direction. In addition, it is simulated that the foreset moves in the downstream direction due to both the bedload and suspended load and the thickness of the bottom set increases due to the suspended load. It is found that the height of the intake affects the thickness of the turbidity current and the location of the internal hydraulic jump. The impact of the height of the intake on the trap efficiency is not clear in the experimental results, however, overall trap efficiency is predicted quite successfully by the model. Also, sensitivity analysis is carried out, and the results indicates that the particle size affects the trap efficiency most.

Keywords: Turbidity current, Plunging, Propagation, Sediment trap efficiency, Depth-averaged model

저수지로 유입되는 부유사 밀도류의 수치모의

최성욱^a · 반채웅^a · 최성욱^{b*}

^a연세대학교 대학원 토목환경공학과, ^b연세대학교 공과대학 토목환경공학과

요 지

본 연구에서는 저수지에 유입된 부유사 밀도류에 의해 유사가 포집되는 현상을 모의하기 위한 수치모형을 제시하였다. 개발된 모형을 Toniolo and Schultz (2005)의 실내 실험에 적용하여, 부유사 밀도류의 전파, 하도형태의 변화, 그리고 댐에 의한 유사의 포집현상을 모의하였다. 삼각주 전면층에서 침강된 밀도류가 빠르게 댐까지 전파된 후, 댐에 의해 차단되고 두께가 증가되어 상류로 영향을 전파하는 일련의 과정을 모의하였다. 또한, 소류사와 부유사에 의해 저수지 삼각주에서 전면층이 전진하고, 부유사에 의해 기저층의 두께가 상승하는 현상을 잘 모의하였다. 댐 취수구의 높이에 따른 밀도류의 최대 두께와 내부 도수 발생 위치를 확인하였다. 유사 포집 효율은 수치모형으로 실험 결과의 값을 적절히 모의하였으나, 실험의 한계로 인해 댐 취수구의 높이와 포집 효율과의 관계는 찾아볼 수 없었다. 수치모의 결과를 이용하여 유사 포집 효율의 민감도 분석을 수행한 결과 부유사의 입자 크기가 포집 효율에 가장 민감하게 작용하는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 부유사 밀도류, 침강, 전파, 유사 포집 효율, 층적분 모형

1. 서 론

우리나라는 몬순기후의 영향으로 홍수기에 하천에서 큰

유량이 발생하며, 이로 인해 유사량이 증가하게 된다. 홍수기 하천에서 유입된 탁수는 저수지에서 부유사로 인하여 밀도류로 발달되고, 그 과정은 Fig. 1과 같이 침강(plunging), 전파(propagation), 차단(blocking), 역전파(back propagation), 그리고 담수(ponding) 상태로 구분할 수 있다. 부유사가 저수지로 유입되면 침강이 발생하면서 밀도류 형태로 저수지의

*Corresponding Author. Tel: +82-2-2123-2797
E-mail: schoi@yonsei.ac.kr (S.-U. Choi)

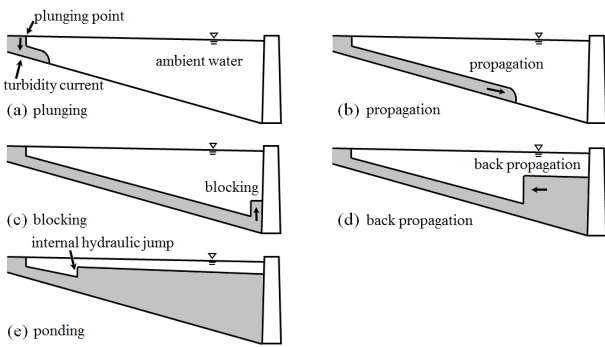


Fig. 1. Schematic sketch of development of turbidity current in reservoir

하류로 전파된다. 부유사 밀도류는 수온으로 성층화된 대형 저수지가 아닌 경우 하층밀도류(underflow) 형태로 전파되며, 댐에서 바로 배출되지 않으면 댐에 의해 차단된다. 진로가 차단된 부유사 밀도류는 댐체 근처에서 두께가 증가되며 이 영향이 상류방향으로 전파되고, 부유사 밀도류의 두께가 전반적으로 증가되며 내부 도수가 발생한다. 이후 밀도류의 유입과 움직임이 거의 정체된 부유사의 침사 및 퇴적으로 인해 밀도류의 두께가 유지된다. 정체된 부유사 밀도류는 수질 악화, 유사에 포함된 인에 의한 부영양화 발생, 유사의 퇴적에 의한 저수지의 저수용량 감소 등의 문제를 발생시킨다(Morris and Fan, 1997; Julien, 2010).

장기적인 관점에서 부유사 밀도류에 의한 부유사 퇴적은 저수지 전체 퇴사에 상당한 부분을 차지하기 때문에(Morris and Fan, 1997), 이를 처리하는 것은 저수지의 유지 및 관리를 위해 매우 중요하다. 이를 위해 저수지의 상류에 침사용 저수지를 건설하여 부유사를 상류에서 차단해 저수지에 밀도류 발생을 줄일 수 있다. 그 외에도 저수지 설계시 취수구를 중층이나 하층에 위치시켜 유입된 밀도류가 바로 배출시키는 경우도 있다. 대형 저수지에서 수온으로 성층화된(thermally stratified) 경우, 선택적 취수 시설(selective withdrawal structure)을 설치하여 취수구의 높이를 상황에 맞게 조절하기도 한다. 침사뎀을 설계하기 위해서는 유사의 포집 효율(trap efficiency, TE)이 높도록 설계해서 저수지에 유입되는 유사량을 감소시켜야 하며, 반대로 저수지에서는 포집 효율이 낮도록 설계해서 유입되는 유사가 빠르게 배출되도록 해야 한다. 이를 수리학적으로 분석하기 위해서는 밀도류에 대한 이해가 필수적이다.

포집 효율에 대하여 많은 해외 연구자들이 연구를 수행하였다. Brown (1943)은 유역 면적과 저수지 체적의 비율이 포집 효율에 가장 큰 영향을 주는 인자인 것을 설명하며 이에 대한 관계식을 제시하였다. Churchill (1948)은 저수지의 용량,

유입량, 유속, 그리고 지체시간(detention time)이 포집 효율에 미치는 영향을 분석하였고, 지체시간과 저수지 내 유속의 비율로 나타낸 지수와 포집 효율에 대한 관계식을 제시하였다. Brune (1953)은 미국의 44개 저수지를 분석하여 저수지 크기, 매년 유사의 유입량, 그리고 지체시간이 포집 효율에 미치는 영향을 조사하였고, Churchill과는 달리 저수지의 크기와 포집 효율에 대한 관계식을 제시하였다. 그리고 많은 연구자들이 Churchill이나 Brune의 관계식을 분석하여 개선된 식을 제시하였다(Gill, 1979; Heinemarm, 1981; Siyam, 2000; Lewis et al., 2013). Toniolo and Schultz (2005)는 댐 취수구의 높이에 따른 포집 효율과 퇴적된 유사 분포의 변화에 대한 실험을 수행하였다. Revel et al. (2015)은 포집 효율에 영향을 줄 수 있는 인자들을 제시하고, 실내 실험을 통해 각 인자들이 포집 효율에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 위와 같이 포집 효율에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으나 밀도류의 수치모의를 통해 밀도류의 침강, 전파, 그리고 포집의 과정을 전부 수행하여 분석한 사례는 거의 없는 상황이다.

본 연구의 목적은 저수지에 유입되는 부유사 밀도류의 전파와 이에 따른 저수지의 유사 포집 현상을 모의하는 것이다. 이를 위하여 유한차분법에 근거한 수치모형을 제시하였으며 Toniolo and Schultz (2005)의 실내 실험 자료에 모형을 적용하여 적용성을 확인하였다. 또한, 저수지의 포집 효율에 영향을 미치는 인자를 조사하여 취수구의 높이, 부유사 입자의 크기, 유량, 그리고 부유사 농도에 따른 민감도를 분석하였다.

2. 지배방정식

2.1 하천 흐름 모형

하천에서 부유사를 포함한 수체가 저수지에 유입되면서 강된 후 부유사 밀도류의 형태로 흐르기 때문에, 먼저 저수지와 하천의 흐름에 대한 해석이 필요하다. 이를 위해 하천의 1차원 준정류 모형을 사용하였으며 지배방정식은 다음과 같다.

$$q_w = U_f h_f \tag{1}$$

$$U_f \frac{\partial U_f}{\partial x} = -g \frac{\partial}{\partial x} (h_f + \eta) - C_z^{-2} \frac{U_f^2}{h_f} \tag{2}$$

여기서 q_w 는 단위 폭 당 유량, h_f 는 하천의 수심, U_f 는 하천의 평균 유속, x 는 주 흐름방향 위치, g 는 중력가속도, η 는 하상고, 그리고 C_z 는 Chezy 계수이다. 여기서 계산된 값들은 부유

사 밀도류의 침강점을 계산할 때 사용된다. 또한, 모래와 같이 입자가 큰 경우 부유하지 않고 소류사 형태로 이송되므로, 이를 계산하기 위해 다음과 같은 Engelund and Hansen (1967)의 유사량 산정공식을 이용하였다.

$$q_b = 0.05 \frac{U_f^5}{C_z^3 R_b^2 g^2 d_b} \quad (3)$$

여기서 q_b 는 소류사량, R_b 는 소류사의 수중비중, 그리고 d_b 는 소류사의 대표입경이다. 소류사에 의한 하상변동은 Exner 방정식을 이용하였으며, 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{1}{1 - \lambda_b} \frac{\partial q_b}{\partial x} \quad (4)$$

여기서 λ_b 는 소류사가 퇴적된 하상토의 공극률이다.

2.2 밀도류 모형

부유사 밀도류는 흘러갈 때 상층 경계면에서 주변수체와 혼합되며 물 연행 (water entrainment)이 발생한다. 그러나 밀도류가 댐에 도달하고 담수되면 상층 경계면과의 혼합은 거의 사라지며 부유사 밀도류의 입자가 침강하게 된다. 이를 고려했을 때 부유사 밀도류의 1차원 층적분 모형은 다음과 같이 구성된다.

$$\frac{\partial \hat{h}}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{U}\hat{h})}{\partial x} = (1 - \delta)e_w \hat{U} - \delta \hat{v}_s \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\hat{U}\hat{h})}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{U}^2\hat{h})}{\partial x} + \delta \hat{U}\hat{v}_s = - \frac{1}{2} R_0 \frac{\partial(\hat{C}\hat{h}^2)}{\partial x} - R_0 \hat{C}\hat{h} \frac{\partial \hat{\eta}}{\partial x} - \hat{u}_*^2 \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\hat{C}\hat{h})}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{U}\hat{C}\hat{h})}{\partial x} = - \hat{v}_s r_o \hat{C} \quad (7)$$

Eqs. (5) and (6)은 각각 밀도류 유체의 질량보존방정식과 운동량보존방정식이고 Eq. (7)은 밀도류 부유사의 질량보존 방정식이다. 여기서 t 는 시간, h 는 밀도류층의 두께, U 는 밀도류의 평균 속도, C 는 부유사의 평균 농도, R_s 은 부유사의 수중 비중, u_* 는 전단속도, 그리고 v_s 는 부유사의 낙하속도이다. 위 첨자($\hat{\cdot}$)와 아래첨자($_0$)는 각각 무차원화된 변수와 유입부의 변수를 의미한다. 모든 변수들은 유입부의 변수들을 이용해 무차원화하였다($\hat{x} = x/h_0$, $\hat{t} = tU_0/h_0$, $\hat{h} = h/h_0$, $\hat{U} = U/U_0$,

$\hat{C} = C/C_0$, $\hat{\eta} = \eta/h_0$, $\hat{u}_* = u_*/U_0$, $\hat{v}_s = v_s/U_0$). e_w 는 물의 연행계수, r_o 는 밀도류의 바닥 근처 농도에 대한 형상계수, 그리고 Ri_0 는 유입부의 Richardson 수($Ri = R_s g C h / U^2$)이다. δ 는 담수된 부유사의 침사에 대한 매개변수로, 밀도류가 사류로 이동하는 경우 0을, 상류로 이동하는 경우 1을 사용한다. 부유사 밀도류에 의해서 발생하는 하상변동을 고려하기 위해서 다음과 같은 Exner 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial \hat{\eta}}{\partial t} = \frac{1}{1 - \lambda_s} \hat{v}_s r_o C_0 \hat{C} \quad (8)$$

여기서 λ_s 는 부유사가 퇴적된 하상토의 공극률이다.

2.3 폐합 문제

Eqs. (5)~(8)을 통해 \hat{h} , \hat{U} , \hat{C} , $\hat{\eta}$ 를 계산하기 위해서, 4개의 식을 사용하지만 그 외에도 e_w , u_* , 그리고 r_o 와 같은 미지수들이 남아있는 폐합 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 기존에 제시된 경험식들을 사용하였다. 물의 연행계수인 e_w 는 Parker et al. (1987)이 제시한 관계식을 이용하였으며 다음과 같다.

$$e_w = \frac{0.00153}{0.0204 + Ri_0 (\hat{C}\hat{h} / \hat{U}^2)} \quad (9)$$

무차원 전단속도 \hat{u}_* 는 무차원 평균 속도를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{u}_*^2 = c_D \hat{U}^2 \quad (10)$$

여기서 c_D 는 하상전단계수로 본 연구에서는 Choi and Garcia (1995)가 사용한 0.01을 사용하였다. 형상계수 r_o 는 Garcia and Parker (1989)가 제시한 범위의 1-2에서 입자크기에 따라 다르게 사용하였다.

3. 수치해석 방법

3.1 이동경계

본 모형에서는 밀도류의 전파를 모의하기 위해서 이동경계조건을 사용하였다. 이동경계조건을 적용하기 위해 Landau 변환(Crank, 1984)을 이용하였다. Landau 변환에서는 이동경계조건을 구현하기 위해서 위치와 시간에 대한 계산영역을

각각 새롭게($x^* = \hat{x}/\hat{s}$, $\tau = \hat{t}$) 정의한다. 여기서 \hat{s} 는 시간에 따라 전파되는 밀도류의 유입부에서 선단부까지의 거리(s)를 유입부의 밀도류의 두께로 무차원화한 값이다. \hat{U} 와 \hat{C} 를 계산하기 위해 새로운 변수를 정의하고($\hat{q} = \hat{U}\hat{h}$, $\hat{\phi} = \hat{C}\hat{h}$), 새로운 계산 영역에서 Eqs. (5)~(8)을 적용하면 다음과 같이 변형된다.

$$\frac{\partial \hat{h}}{\partial \tau} = \frac{1}{\hat{s}} \left(x^* \hat{s} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x^*} - \frac{\partial \hat{q}}{\partial x^*} \right) + \frac{0.00153 \hat{q} \hat{h}}{\sqrt{0.0204 + R_{i_0} (\hat{\phi} \hat{h}^2 / \hat{q}^2)}} (1 - \delta) - \delta \hat{v}_s \quad (11)$$

$$\frac{\partial \hat{q}}{\partial \tau} = \frac{1}{\hat{s}} \left\{ x^* \hat{s} \frac{\partial \hat{q}}{\partial x^*} - \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\hat{q}^2}{\hat{h}} + \frac{R_{i_0}}{2} \hat{\phi} \hat{h} \right) \right\} + \frac{R_{i_0} \hat{\phi}}{\hat{s}} \frac{\partial \eta}{\partial x^*} - c_D \frac{\hat{q}^2}{\hat{h}^2} - \delta \frac{\hat{q}}{\hat{h}} \hat{v}_s \quad (12)$$

$$\frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \tau} = \frac{1}{\hat{s}} \left\{ x^* \hat{s} \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial x^*} - \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\hat{\phi} \hat{q}}{\hat{h}} \right) \right\} - \hat{v}_s r_o \frac{\hat{\phi}}{\hat{h}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \hat{\eta}}{\partial \tau} = \frac{x^* \hat{s}}{\hat{s}} \frac{\partial \hat{\eta}}{\partial x^*} + \frac{\hat{v}_s}{1 - \lambda} r_o C_0 \frac{\hat{\phi}}{\hat{h}} \quad (14)$$

여기서 \hat{s} 는 밀도류의 무차원 전파 속도이다. 위의 Eqs. (11)~(14)를 사용하면 절점의 수를 유지하면서 밀도류의 전파 양상을 모의할 수 있다.

3.2 경계조건 및 초기조건

지배방정식이 하천 영역의 흐름에 대한 방정식과 밀도류에 대한 방정식으로 나뉘어지므로 각각에 대한 경계조건을 고려해야 한다.

3.2.1 하천 영역

하천 영역의 경계조건으로 단위 폭 당 유량, 소류사 유입량, 그리고 부유사 유입량은 상류단에서 각 적용대상에 따라 제시된 값을 사용하였고, 수위는 하류단에서 제시된 값을 사용하였다.

3.2.2 밀도류 영역

밀도류는 침강, 전파, 담수가 발생하므로 각각에 대한 경계조건이 필요하다. 밀도류의 침강에 대하여 하천수가 밀도류로 침강하는 위치, 침강시의 수심, 유속, 농도는 Parker and Toniolo (2007)가 제시한 방법을 사용하였다. 하천에서부터

저수지로 유입되는 지점의 위치와 그 지점에서 수심을 각각 s_s 와 h_s 라고 하면, 침강점의 위치는 s_p 는 다음 식을 이용해 계산할 수 있다.

$$s_p = s_s + \frac{h_{fp} - h_s}{S_a} \quad (15)$$

여기서 S_a 는 저수지 유입부의 경사이고 h_{fp} 는 침강점 직상류의 수심이다. h_{fp} 는 밀도 프루드 수(Fr_{dp})를 이용해 얻으며, 이는 다음과 같다.

$$h_{fp} = \left(\frac{q_w^3}{R_s g q_s Fr_{dp}} \right)^{1/3} \quad (16)$$

Fr_{dp} 는 Parker and Toniolo (2007)가 제시한 그림을 이용해 계산한다. 여기서 매개변수 γ 와 침강점 직하류의 밀도 프루드 수(Fr_{dd})는 각각 다음과 같다.

$$U_{tp} h_{tp} = q_w (1 + \gamma) \quad (17)$$

$$Fr_{dd} = \frac{q_w^3}{R_s g q_s h_{tp}} \quad (18)$$

여기서 U_{tp} 와 h_{tp} 는 각각 침강점 직하류에서 밀도류의 속도와 두께이다. γ 의 값은 각 실험자료마다 교정을 수행하여 얻는 것으로 되어있으나, Parker and Toniolo (2007)는 저수지 유입부의 경사가 급해 밀도 프루드 수가 높을 경우 $\gamma=0$ 으로 제시하였다. 여기서 얻어지는 h_{tp} 와 U_{tp} 는 밀도류가 전파될 때 유입부 경계조건으로 사용된다. 밀도류가 하류로 전파될 때 선단부에서 \hat{h} , \hat{q} , 그리고 $\hat{\phi}$ 의 값은 보외법 (extrapolation)을 사용하여 계산하였으며, $\hat{\eta}$ 는 이동된 선단부에서의 하상자료를 사용하였다. 또한 선단부의 \hat{U} 는 \hat{s} 로 설정하였다. 밀도류가 하류단에 도달하게 되면 밀도류의 하류단의 상층 경계면 높이가 취수구보다 낮을 경우 차단이 발생하는데, 이때는 하류단의 유속을 0으로 한다. 밀도류의 상층 경계면 높이가 취수구보다 높으면 댐에 있는 취수구를 통해 유출되는 경우와 댐을 월류하는 경우로 나뉜다. 각 경우에 따라 베르누이 방정식을 이용한 Eqs. (19) and (20)으로 얻는 유속을 경계조건으로 사용한다.

$$\hat{q}_e = \sqrt{\{(h - h_e) + (h_f - h_e) \gamma_w / \gamma_t\} 2g + U_{ud}^2 h_b / U_0 h_0} \quad (19)$$

$$RgCh = 1/2U_c^2 + RgCh_e \tag{20}$$

여기서 h_e 는 취수구의 높이 혹은 월류시의 댐체의 높이, γ_w 는 물의 단위중량, γ_t 는 밀도류의 단위중량, U_{ud} 는 댐 직상류에서 밀도류의 유속, U_e 는 취수구에서 밀도류의 유속, 그리고 h_b 는 취수구의 크기다. 밀도류가 수로의 취수구에 도달하는 경우 \hat{s} 의 값을 0으로 하고 취수구 경계조건을 적용하였다.

3.3 수치모의 기법

밀도류는 강한 이류(highly-advective flow) 특성을 보이므로 이를 모의할 수 있는 적절한 계산기법이 필요하다. 특히 선단부나 도수영역처럼 급격한 변화를 보이는 구간을 모의할 때는 오버슈트(overshoot)나 언더슈트(undershoot)가 흐름 전체에 미치는 영향을 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 모형에 QUICKEST 기법과 ULTIMATE 제한자를 사용하여 Eqs. (11)~(13)의 이류항을 계산하고 오버슈트와 언더슈트를 제한하였다. 자세한 사항은 Choi and Choi (2017)에 제시하였다.

4. 모형의 적용

본 연구에서는 저수지로 유입된 밀도류가 댐에 의해 포집되는 것을 모의하기 위해 Toniolo and Schultz (2005)의 실내 실험자료를 모형의 적용대상으로 선정하였다. 실험자료에 모형을 적용하여 모의 결과를 실험 결과와 비교하고 분석하였다. Toniolo and Schultz (2005)는 실내 실험을 통해 하천에서

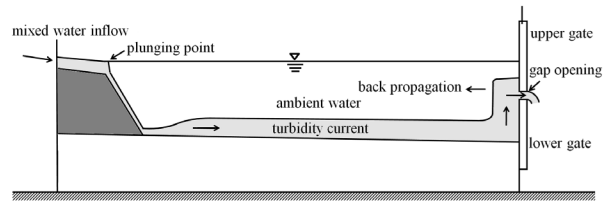


Fig. 2. Schematic sketch of laboratory experiment for ponded turbidity current (Toniolo and Schultz, 2005)

소류사에 의해 형성된 삼각주의 발달과 댐에 의해 포집된 부유사의 침사를 재현하였으며 사용된 수로의 개요도는 Fig. 2와 같다. 취수구의 높이에 따른 침사 효율에 대해 분석하였으며, Exp. 1은 아래의 수문만 이용하여 월류되는 수로를, Exp. 2~5는 위와 아래의 수문을 조작하여 댐 취수구를 만들었으며 자세한 사항은 Table 1과 같다. 각 실험에서 실험 수행시간, 유량, 그리고 유사량의 차이는 수로에서 장기간 일정한 수위와 유량을 유지시키기 위해 조절된 것이다. 부유사 밀도류에 대한 모형의 검증은 Choi and Choi (2017)에서 수행하였으므로 본 논문에서는 별도의 검증 절차를 포함시키지 않았다.

4.1 저수지에 유입된 부유사 밀도류의 발달 과정

저수지에 유입된 부유사 밀도류가 침강, 전파, 그리고 담수 과정을 분석하기 위해서 모형을 실험조건에 적용시켜 모의 결과를 관찰하였다. Fig. 3은 모형을 Exp. 3에 적용하고 시간에 따른 밀도류의 두께, 속도, 그리고 농도의 변화를 도시한 것이다. 부유사 밀도류에서 발생한 퇴적이 흐름 구조에 큰 영향을 주지 않으므로 부유사 밀도류의 두께의 변화를 보기 위하여 고정상 조건(fixed bed condition)으로 수치모의하였다.

Table 1. Experimental conditions (Toniolo and Schultz, 2005)

data	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5
q_w (m ² /s)	0.0033	0.0033	0.0035	0.0035	0.0035
q_b (m ² /s)	1.31×10^{-5}	1.31×10^{-5}	1.31×10^{-5}	1.31×10^{-5}	1.31×10^{-5}
q_m (m ² /s)	7.75×10^{-5}	8.16×10^{-5}	8.30×10^{-5}	8.18×10^{-5}	8.12×10^{-5}
d_b (μm)	260	280	280	280	280
d_s (μm)	36	38	36	37	38
h_e (m)	0.41	0.11	0.21	0.31	0.38
h_b (mm)	over-spill	2	2.25	2.5	3
t_1 (min)	18	18	16	19	15
t_2 (min)	20	17	18	17	14
t_3 (min)	20	17	18	18	20
t_{max} (min)	58	52	52	54	49
S_0	0.017				
h_{dam} (m)	0.47				

Fig. 3(a)를 보면 급경사에 의해 곧바로 침강이 발생하였고, 이 때 밀도류의 두께는 0.025 m로 계산되었다. 그림에서는 침강점에서 밀도류가 급강하하는 것처럼 보이지만 실제로는 밀도류가 전파되면서 급경사 구간의 경사에 의해 두께가 급히 작아진 것이다. 급한 경사에서 하류로 이동한 부유사 밀도류가 급경사 구간을 지나 완경사 구간에 들어가면서 밀도류의 두께가 크게 증가된다. 벽에 의해 차단된 부유사 밀도류는 전파를 끝내며 밀도류의 질량 보존에 의해 하류단의 밀도류 두께를 증가시키게 된다. 두께가 증가된 부유사 밀도류가 상류(subcritical flow)로 전환되어 상류방향으로 영향을 전파시키며 도수가 발생된다. 부유사 밀도류의 상층 경계면이 취수구에 도달하더라도 취수구의 두께가 2 mm밖에 되지 않기 때문에 전부 유출되지 않는다. 따라서 상층 경계면의 높이가 취수구 높이 이상으로 상승하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3(b)의 전반적인 양상을 보면 하류단에 도달한 유속이 급감하며 상류로 전파되는 모습을 볼 수 있는데, 밀도류의 상층 경계면이 취수구에 도달하지 못하면 유속이 0이 되어 밀도류의 두께가 빠르게 증가하는 것을 예상할 수 있다. 이후에도 상류의 빠른 유속과 하류의 느린 유속의 차이에 의해 지속적으로 부유사 밀도류의 두께가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한

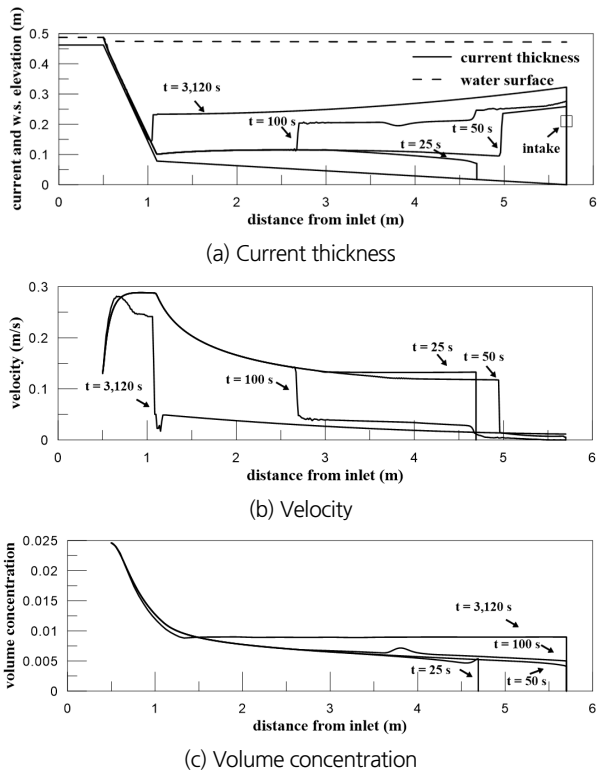


Fig. 3. Development of ponded turbidity current (Exp. 3, fixed bed)

취수구까지 도달한 후에도 유출량이 적기 때문에 초기에는 유속이 지속적으로 감소되는 것을 볼 수 있다. 평형상태에 도달한 후에는 완경사 구간의 유속 경사가 일정한 것을 보인다.

Fig. 3(c)를 보면 시간이 경과됨에 따라 농도가 증가하는 모습을 보인다. 이것은 유입량에 비해 유출되는 밀도류의 양이 적기 때문이며, 정체된 유사의 침사에 의해 밀도류의 두께가 감소하는 현상 때문으로 판단된다. 시간이 충분히 경과하면 유입되는 유사량과 유출되는 유사량, 퇴적되는 유사량이 평형상태에 도달하면서 완경사 구간의 농도가 거의 일정하게 유지된다.

4.2 취수구 위치에 따른 밀도류의 영향

저수지에서 댐 취수구의 위치 및 유출 형태에 따른 밀도류와 퇴적 양상을 보기 위해 모형을 각 실험에 적용하여 모의 결과를 분석하였다. Fig. 4는 모형을 각각의 실험에 이동상 조건(movable bed condition)으로 적용하고 초기 하상고, 최종 하상고, 그리고 밀도류의 최종 상층 경계면 높이를 도시한 것이다. Fig. 4의 각 그림을 보면 소류사와 부유사의 퇴적에 의해 급경사 구간의 삼각주가 전진하고, 완경사 구간의 하상고가

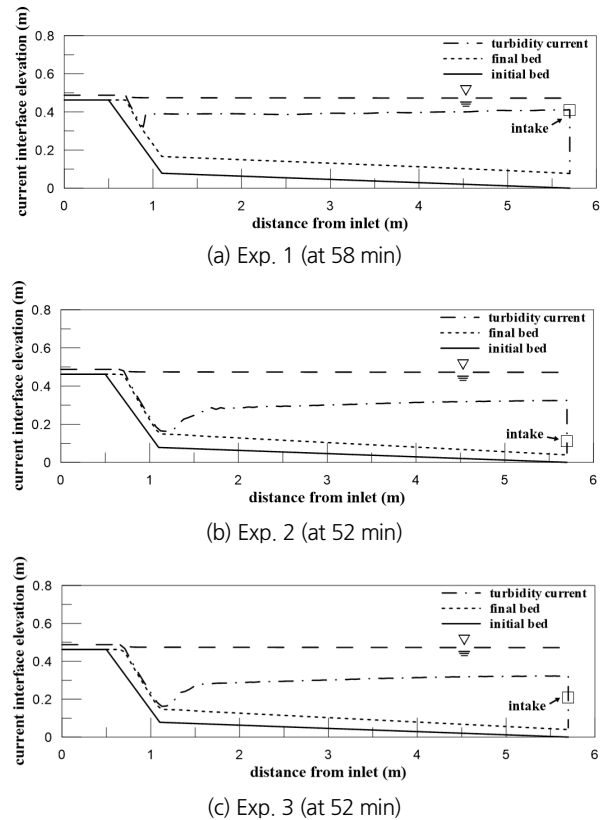
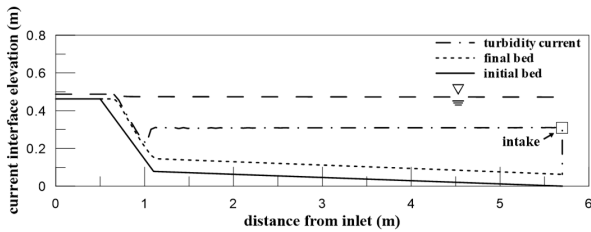
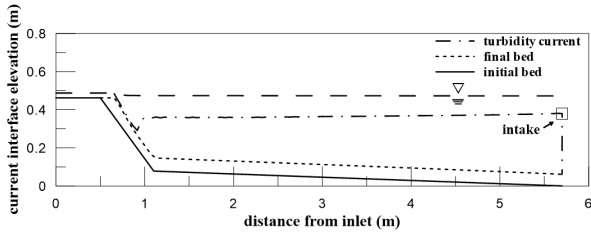


Fig. 4. Sediment depositions due to ponded turbidity currents for different intake conditions



(d) Exp. 4 (at 54 min)



(e) Exp. 5 (at 49 min)

Fig. 4. Sediment depositions due to ponded turbidity currents for different intake conditions (Continue)

상승하는 것을 볼 수 있다. 소류사의 경우 급경사 구간인 0.5 m에서 1.3 m까지 퇴적되었으며, 부유사의 경우 급경사와 완경사 구간인 0.9 m에서 하류단까지 퇴적되었다. 취수구의 높이가 낮은 경우 밀도류 상층 경계면의 높이가 취수구 이상으로 상승하지만 취수구의 높이가 일정치 이상일 경우 완경사 구간에서 밀도류 상층 경계면의 최대 높이는 취수구의 위치가 되는 것을 보인다. 또한 취수구의 위치가 높으면 내부 도수가 더 상류에 가까운 곳에서 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 취수구의 위치가 높으면 밀도류의 두께가 증가하기 때문이다.

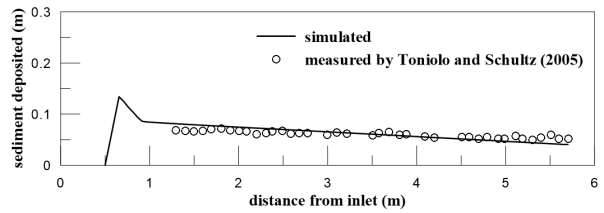
Fig. 5는 각 실험이 종료된 시간에 완경사 구간에서 유사의 퇴적된 두께를 모의 결과와 실측치와 비교한 것이다. 모형이 완경사 구간에서 퇴적 두께를 전반적으로 잘 예측하는 것을 볼 수 있다. 모의 결과를 보면, 취수구의 위치가 높을수록 퇴적되는 하상 경사가 급해지는 양상을 보이거나 실험 결과에선 이런 모습을 찾아보기 힘들다.

4.3 취수구 위치에 따른 저수지의 포집 효율

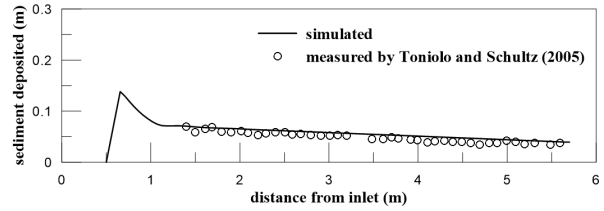
취수구의 높이에 따른 댐의 포집 효율을 비교하기 위해 유출된 유사의 총량을 계산하고 실측치와 비교하였다. 포집 효율은 다음과 같다.

$$TE(\%) = \frac{M_d}{M_i} \times 100 \quad (21)$$

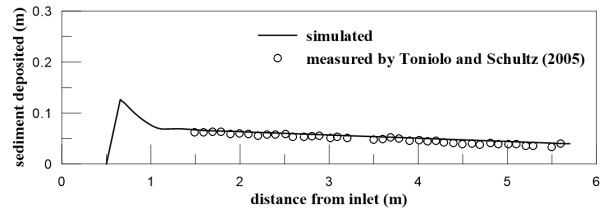
여기서 M_d 는 퇴적된 유사량이고 M_i 는 유입된 유사량이다. Fig. 6은 유사의 총 유입량과 그에 따른 유사의 총 퇴적량을



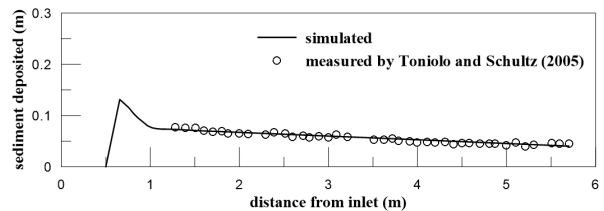
(a) Exp. 1 (at 58 min)



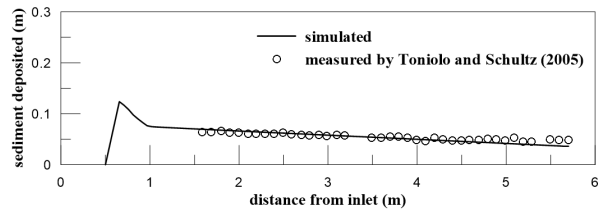
(b) Exp. 2 (at 52 min)



(c) Exp. 3 (at 52 min)



(d) Exp. 4 (at 54 min)



(e) Exp. 5 (at 49 min)

Fig. 5 Comparison between computed and measured sediment depositions

모의한 결과를 도시한 것이며, Table 2는 실측치와 비교한 결과이다. Table 2를 보면 Exp. 1을 제외하고 약 3~5% 정도의 오차로 모형이 포집 효율에 대해 잘 예측한 것을 볼 수 있다. Exp. 1에 적용한 모의 결과가 오차가 큰 것은 실제 부유사 밀도류는 계산된 상층 경계면의 높이보다 조금 더 높은 위치에 저농도의 부유사층을 가지고 있기 때문에 월류하면서 이 층의 부유사가 유출되었기 때문으로 생각할 수 있다. 실측치나 모의 결과를 분석해 보면 취수구의 높이에 따른 포집 효율의 관

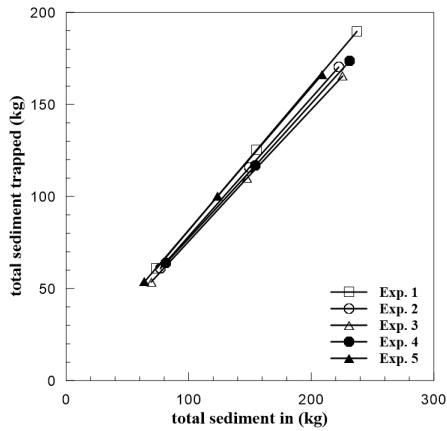


Fig. 6. Computed total sediment in vs. sediment trapped (different intake heights)

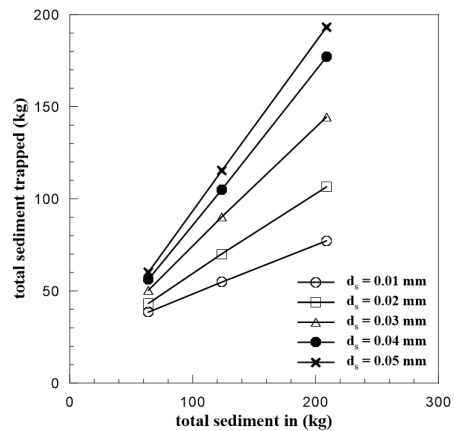


Fig. 7. Computed total sediment in vs. sediment trapped (Different suspended sediment particle sizes)

Table 2. Simulated and measured trap efficiency of Toniolo and Schultz's (2005) experiments

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5
Measured	70.2%	81.6%	80.1%	78.1%	84.7%
Simulated	78.8%	76.6%	74.5%	75.0%	79.6%

계를 결정하기 어려운데, 이것은 취수구의 두께가 실험마다 다르기 때문으로 고려된다. 따라서 포집 효율에 대한 더 많은 고찰이 필요하다.

5. 포집 효율

Revel et al. (2015)은 포집 효율에 대한 선행 연구를 분석하고 댐에 퇴적된 유사량의 무게에 대한 영향인자로 다음과 같은 값을 제시하였다.

$$W_s = f(\mu, \rho, \rho_s, d_s, R, Q_i, t_i, C, S, V_R) \quad (22)$$

여기서 μ 는 물의 점성계수, ρ 와 ρ_s 는 물과 부유사의 밀도, Q_i 는 유입된 유량, t_i 는 유입시간, S 는 여수로 길이, 그리고 V_R 은 저수지의 부피이다. 여기서 입자의 크기, 유량, 농도를 조절하여 포집 효율이 가장 높게 계산된 Exp. 5에 적용하여 포집 효율의 변화를 분석하였다.

Fig. 7은 입자의 크기를 0.01 mm에서 0.05 mm로 변화시켰을 때, 유사의 총 유입량과 그에 따른 유사의 총 퇴적량을 모의한 결과를 도시한 것이다. 입자의 크기에 따른 침강속도는 Dietrich (1982)의 관계식을 사용하여 계산하였다. 입자의 크기가 커짐에 따라 유입량에 따른 퇴적량이 크게 증가하는 것

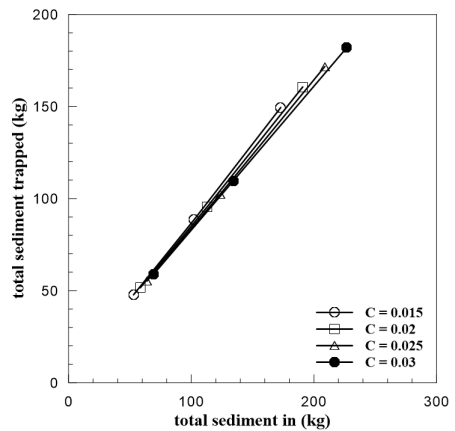


Fig. 8. Computed total sediment in vs. sediment trapped (Different concentrations)

을 볼 수 있다. 이는 부유사 입자의 크기가 작을수록 부유사의 퇴적량이 감소되고, 밀도류의 두께가 증가하므로 유출되는 밀도류의 양이 증가하기 때문이다.

Fig. 8은 부유사의 농도를 0.015에서 0.03으로 변화시켰을 때, 유사의 총 유입량과 그에 따른 유사의 총 퇴적량을 모의한 결과를 도시한 것이다. 농도가 증가하더라도 포집 효율의 변화는 거의 없는 것을 알 수 있다. 이것은 부유사의 농도의 증가에 따라 퇴적량이 증가되지만 유입량도 거의 비슷하게 증가되기 때문이다. 농도에 의해 흐름 구조가 크게 변화되지는 않으며, 농도가 크기 때문에 정수압이 증가되기 때문에 유출량이 약간 증가하여 포집 효율이 감소되는 모습을 보인다.

Fig. 9는 유량을 0.0008 m³/s에서 0.0012 m³/s로 변화시켰을 때, 유사의 총 유입량과 그에 따른 유사의 총 퇴적량을 모의한 결과를 도시한 것이다. 유량이 증가함에 따라 유입량에 따른 퇴적량이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 농도의 증가와

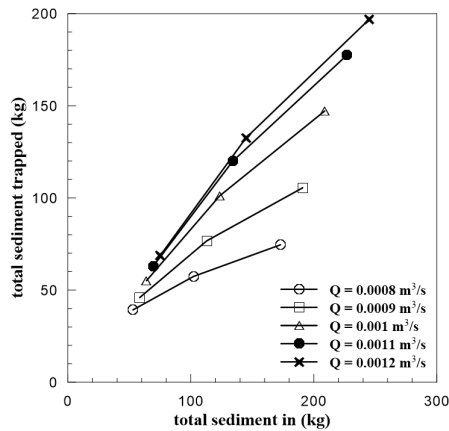


Fig. 9. Computed total sediment in vs. sediment trapped (Different discharges)

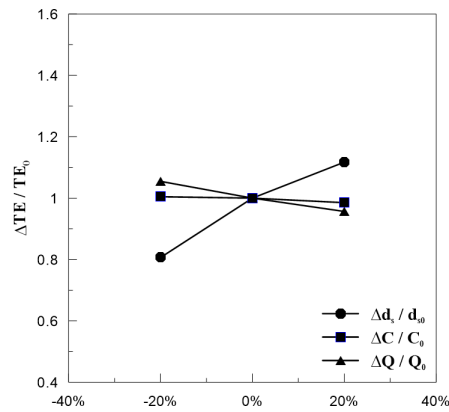


Fig. 10. Sensitivity analysis of trap efficiency

마찬가지로 유량이 증가되면 유입되는 유사량과 퇴적량 둘 다 증가되지만, 유량이 증가하면서 밀도류의 두께가 증가하기 때문에, 기존에 비해 많은 양의 유사가 유출되어 포집 효율이 감소되는 것이다.

각 인자들의 포집 효율에 대한 민감도를 분석하여 Fig. 10에 도시하였다. 부유사 입자의 크기, 부유사의 농도, 그리고 유량을 각각 -20%와 20%로 변화시켜 포집 효율에 대해 분석하였다. 포집 효율은 부유사 입자의 크기의 변화에 가장 민감하게 변동되고, 농도의 변화에는 매우 적은 수준의 반응을 보였다. 따라서 부유사 밀도류의 흐름 구조가 포집 효율에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 저수지에 유입된 부유사 밀도류가 저수지

에 포집되거나 유출되는 과정을 해석할 수 있는 수치모형을 제시하였다. 제시된 모형을 저수지 삼각주의 표면층, 전면층, 기저층, 그리고 취수구가 있는 댐으로 구성된 Toniolo and Schultz (2005)의 실내 실험에 적용하였다. 모형의 적용 결과를 통해 저수지에서 부유사 밀도류의 수중 전파 및 담수의 양상, 댐 취수구의 높이에 따른 부유사 밀도류의 두께와 유사의 퇴적, 그리고 댐 취수구의 높이에 따른 부유사 밀도류의 포집 효율에 대해 분석하였다.

수치모형이 부유사 밀도류의 침강, 전파, 그리고 댐에 의한 담수 현상을 안정적으로 잘 모의하였다. 부유사를 가지고 있는 하천수가 전면층의 급한 경사 때문에 표면층 끝 지점에서 바로 침강되는 것을 확인하였다. 또한, 침강된 부유사 밀도류가 표면층의 급한 경사에 의해 매우 작은 두께와 빠른 속도로 하류에 전파되는 것을 확인하였다. 부유사 밀도류가 기저층의 하류단에 도달해 유속이 0이 되고, 밀도류 두께가 증가해 상류로 그 영향이 전파되는 양상을 모의하였다. 밀도류의 두께가 증가한 후에도 댐 취수구에서 유출량이 적기 때문에 지속적으로 두께가 증가하고, 기저층 구간 전체에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 부유사 밀도류가 저수지 안에서 담수되기 때문에 시간의 경과에 따라 부유사 농도가 점차 증가되며 기저층 구간 전체의 농도가 거의 일정해지는 모습을 보였다.

수치모형이 저수지 삼각주에서 부유사 밀도류와 소류사에 의해 전면층이 전진하는 현상을 잘 모의하였다. 저수지 하류단에 있는 댐 취수구의 높이가 높을수록 부유사 밀도류의 최대 두께가 증가하며, 상층 경계면 높이의 증가에 의해 내부도수 발생 위치가 상류 쪽에 존재하는 것을 확인하였다. 수치모형이 부유사의 퇴적에 의해 발생한 기저층의 퇴적 두께를 실측결과와 유사하게 잘 모의하였다. 수치모형에서는 댐 취수구의 높이가 높을수록 퇴적 경사가 증가하는 양상을 보이나 실험에서는 그런 양상을 보이지 않았다.

저수지 하류단의 댐 취수구의 높이가 다르더라도 부유사 밀도류의 포집 효율이 유사한 값을 가진다. 이것은 실험에서 댐 취수구가 높아질 때 마다 수위를 유지하기 위해 댐 취수구의 크기를 증가시켜 유출량이 증가하였기 때문으로 판단된다. 유사의 포집 효율에 대하여 모의 결과와 실측결과가 월류가 발생한 Exp. 1을 제외하고 약 4~5%의 차이를 보였다. 댐 취수구의 높이와 부유사 밀도류의 포집 효율에 대한 연관성을 찾을 수 없는 문제가 있으며, 이는 댐 취수구의 높이에 따라 취수구의 크기가 다르기 때문으로 보인다. 포집 효율에 대하여 부유사의 입자 크기, 농도, 그리고 유량의 민감도를 분석한 결과 부유사의 입자 크기가 포집 효율을 가장 민감하게 변화시키며 농도는 거의 변화시키지 않는 것을 확인하였다. 이것

은 부유사의 입자 크기가 클수록 상류에서 대부분 퇴적되기 때문이며, 농도가 증가하면 유입량과 퇴적량이 거의 비슷하게 비례해서 증가하기 때문에 효율이 변화하지 않는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2014 R1A2A1A11054236549).

References

- Brune, G. M. (1953). "Trap efficiency of reservoirs." *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Vol. 34, No. 3, pp. 407-418.
- Brown, C. B. (1943). "Discussion of sedimentation in reservoirs." *Proceeding of American Society of Civil Engineers*, Vol. 69, No. 6, pp. 1493-1500.
- Choi, S., and Choi, S.-U. (2017). "A numerical simulation of propagating turbidity currents using the ULTIMATE scheme." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 1, pp. 55-64.
- Choi, S.-U., and Garcia, M. H. (1995). "Modeling of one-dimensional turbidity currents with a dissipative-Galerkin finite element method." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 5, pp. 623-648.
- Churchill, M. A. (1948). Discussion of "Analyses and use of reservoir sedimentation data" by L.C. Gottschalk. *Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference*, Denver, Colorado, Washington, pp. 139-140.
- Crank, J. (1984). *Free and moving boundary problems*. Clarendon Press, Oxford, 425.
- Dietrich, E. W. (1982). "Settling velocities of natural particles." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 6, pp.1626-1682.
- Engelund, F., and Hansen, E. (1967). *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*, Technisk Vorlag, Copenhagen, Denmark.
- Garcia, M., and Parker, G. (1989). "Experiments on hydraulic jumps in turbidity currents near a canyon-fan transition." *Science*, Vol. 245, No. 4916, pp. 393-396.
- Gill, M. A. (1979). "Sedimentation and useful life of reservoirs." *Journal of Hydrology*, Vol. 44, No. 1, pp. 89-95.
- Heinemarm, H. G. (1981). "A new sediment trap efficiency curve for small reservoirs 1." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 17, No. 5, pp. 825-830.
- Julien, P. Y. (2010). *Erosion and sedimentation*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 371.
- Lewis, S. E., Bainbridge, Z. T., Kuhnert, P. M., Sherman, B. S., Henderson, B., Dougall, C., Cooper, M., and Brodie, J. E. (2013). "Calculating sediment trapping efficiencies for reservoirs in tropical settings: a case study from the Burdekin Falls Dam, NE Australia." *Water Resources Research*, Vol. 49, No. 2, pp. 1017-1029.
- Morris, G. L., and Fan, J. (1997). *Reservoir sedimentation handbook*, McGraw-Hill, New York.
- Parker, G., Garcia, M., Fukushima, Y., and Yu, W. (1987). "Experiments on turbidity currents over an erodible bed." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 25, No. 1, pp. 123-147.
- Parker, G., and Toniolo, H. (2007). "Note on the analysis of plunging of density flows." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 6, pp. 690-694.
- Revel, N. M. T. K., Ranasiri, L. P. G. R., Rathnayake, R. M. C. R. K., and Pathirana, K. P. P. (2015). "Estimation of Sediment Trap Efficiency in Reservoirs-an Experimental Study." *Engineer: Journal of the Institution of Engineers*, Sri Lanka, Vol. 48, No. 2, pp. 43-49.
- Siyam, A. M. (2000). *Reservoir Sedimentation Control*. Ph.D. Thesis, University of Bristol, England.
- Toniolo, H., and Schultz, J. (2005). "Experiments on sediment trap efficiency in reservoirs." *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, Vol. 10, No. 1, pp. 13-24.