

Three-dimensional numerical modeling of sediment-induced density currents in a sedimentation basin

3차원 수치모의를 통한 침사지에서의 부유사 밀도류 해석

An, Sang Do^{1*} · Kim, Gi-Ho¹ · Park, Won Cheol²

안상도^{1*} · 김기호¹ · 박원철²

K-water Nakdong River Integrated Operations Center Manager¹, Director General · K-water Overseas Business Dept. Director General

¹한국수자원공사 낙동강통합물관리센터 과장*, 센터장 · ²한국수자원공사 해외사업처장

Abstract : A sedimentation basin is used to remove suspended sediments which can cause abrasive and erosive wear on hydraulic turbines of hydropower plants. This sediment erosion not only decreases efficiency of the turbine but also increases maintenance costs. In this study, the three-dimensional numerical simulations were carried out on the overseas hydropower project. The simulations of flow and suspended sediment concentration were obtained using FLOW-3D computational fluid dynamics code. The simulations provide removal efficiency of a sedimentation basin based on particle sizes. The influence of baffles on the flow field and the removal efficiency of suspended sediments in the sedimentation basin has been investigated. This paper also provides the numerical simulations for sediment-induced density currents that may occur in the sedimentation basin. The simulation results indicate that the formation of density currents decreases the removal efficiency. When a baffle is installed in the sedimentation basin, the baffle provides intensive settling zones resulting in increasing the sediments settling. Thus the enhanced removal efficiency can be achieved by installing the baffle inside the sedimentation basin.

Key words : Density currents, Settling efficiency, Sedimentation basin, CFD

주제어 : 밀도류, 침사효율, 침사지, 전산유체역학

1. 서론

히말라야 입접 국가들은 히말라야 만년설에 힘입어 풍부한 수력자원을 갖고 있으며, 깊고 가파른 경사지와 협곡이 즐비하여 대규모 수력발전소의 잠재력이 매우 크다고 평가 받고 있다. 이러한 히말라야 산맥에 인접한 네팔, 파키스탄에서는 이미 소수지만 수력발전소가 건설되어 운영되고 있으며, 최근 수력발전소 건설이 증가 하고 있는 추세이다. 그러나 대부분의 히말라야 산맥의 유역은

토사유출이 많으며, 급한 하상 경사로 인해 유사 이동이 극심하여 현재 운영 중인 수력발전소에 여러 문제를 야기하고 있다. 수력발전소의 발전 원수에 일정량 이상의 유사가 포함되면, 수차의 마모를 유발시켜 터빈의 효율과 안전에 악영향을 미치게 된다. 이는 빈번한 터빈의 교체와 과도한 유지비 상승을 초래하여 결국 수력 개발사업의 수익성을 저하시키게 된다. 따라서 원수에 포함된 유사 제거를 위해 침사지 (sedimentation basin)를 설치하게 되며, 대부분의 유입 유사는 침사지를 거치면서 중력에 의한 침강으로 제거되어진다.

침사지의 규모는 유사입자가 침사지를 통과하

* Received 9 November 2012, revised 15 May 2013, accepted 14 June 2013.

* Corresponding author: Tel : +82-51-200-2526 Fax : +82-51-200-2520 E-mail : sdan99@kwwater.or.kr

기 위해 걸리는 통과시간과 입자의 침강시간이 동일하도록 결정되며 (Fig. 1), 입자의 침강시간은 Stokes 법칙에 의해 계산된다. 통과시간은 침사지에 한번 가라앉은 입자의 재부상을 방지하기 위한 한계 제한유속과 설계유량에 의해 결정된다 (Camp, 1946). 기존에 설치되어 운영 중인 많은 수리구조물에서는 침사지내 처리해야 할 최소 입경을 0.2 mm ~ 0.3 mm로 제시하고 있으며, 부유사 입자의 원활한 침강을 위해서 침사지내 적정 유속이 유지되도록 침사지 전체 단면적이 통수단면적이 되도록 침사지 규모를 결정하였다.

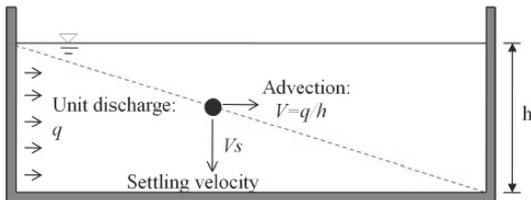


Fig. 1. The trajectory of a particle settling in a horizontal flow sedimentation basin and all particles settle completely. In an ideal flow condition, the dimensions of the sedimentation basin can be determined.

그러나 이러한 일반적인 접근법은 실트와 같은 세립자 유사를 다량 포함한 원수가 침사지내 유입시 발생될 수 있는 밀도류에 의한 난류 확산 효과를 고려하지 않은 이상적으로 밀도가 균일한 흐름을 대상으로 하고 있다. 따라서 히말라야 유역의 경우처럼 고농도의 유사가 빈번히 발생하는 지역에서 계획 중인 수력발전소는 침사지내 밀도류 형성이 유사 침강에 미치는 영향을 필히 검토하여야 한다. Pradhan (2004)는 히말라야 산맥에 건설된 대부분의 수력발전소 침사지들은 0.2 mm 이상을 처리대상 입경으로 설계되었음에도 불구하고, 매년 우기 때 마다 수차에 심각한 마모가 발생되고 있으며 이는 우기시 최대 60,000 ppm에 근접하는 고농도의 유사유입으로 인한 침사지 효율 저하에 기인한다고 평가하였다. 우효섭 (2001) 역시 침사지의 설계시 고농도 유입유사로 인해 형성되는 밀도류에 대한

검토가 필요하다 제시하였다.

수치모의에 의한 침사지 또는 침전지에 대한 연구는 흐름의 유속장만을 해석하는 모의가 과거에는 주류를 이루었으나, 최근연구에는 흐름 유속장과 함께 입자의 거동을 고려한 해석이 활발히 진행되고 있다. 이길성과 김상훈 (2004)은 범용 CFD 모형인 FLUENT이용하여 침전지에서의 흐름특성을 파악하였으며, 입자추적기법 (particle tracking)을 활용하여 침전효율을 평가하였다. 이들은 실제 침전지에서는 유입수에 포함된 다량의 부유사와 지내 체류하고 있던 물과의 온도차에 의하여 밀도류가 발생 될 수 있으며 이에 대한 연구 필요성을 언급하였다. 김대근 등 (2010)은 범용 CFD 코드 FLOW-3D의 입자추적 기법을 이용하여 침사지내에서의 흐름양상과 침사효율을 검토하였다. 침사효율을 평가는 유사입자 27,000개를 투입하여 침사지에 침강하는 입자의 백분율로 침사효율을 평가하였다. 또한 배플 (baffle)의 설치위치 및 형태에 따른 침사효율을 분석하였으며, 수치해석결과 양방향 배플을 설치할 경우 침사효율이 가장 높으므로 제시하였다. Yoon and Lee (2000)는 장방향 침전지에 대하여 일방향 배플설치에 따른 침전효율을 분석하였으며, 배플의 수중길이는 전체 수심의 약 0.4배일 때 최대의 침전처리 효율을 확인하였다. 또한, 건설교통부 (1997)에서는 2차원 수치모델링을 통해, 최대 침전효율 확보를 위한 배플의 수중길이는 전체 수심의 약 0.4배 ~ 0.55배가 적합하며, 설치 위치는 유입구로부터 침전지 길이의 0.25배 ~ 0.55배의 지점이 가장 좋은 침전효율을 제공한다고 제시하였다. Heydari 등 (2013)은 침사지에 설치된 배플의 각도를 변화시켜 침전효율에 미치는 영향을 평가하였으며, 바닥으로부터 60°도 기울어져 설치될 경우 최대의 처리효율을 확보할 수 있다 제시하였다.

현재까지 대부분의 수치모형실험에서는 침전효율을 예측하기 위하여 입자추적기법을 적용하였다. 그러나 입자추적기법을 활용한 접근은 과

도한 컴퓨터 메모리 용량과 오랜 계산시간이 요구된다. 따라서 대부분의 원형스케일의 해석대상에 적용하기에는 적용 가능한 입자수의 제한을 갖게 된다. 또한 한계조건에 따른 하상에서의 유사 재부상, 확산, 그리고 밀도류 형성 등을 재현하기에는 한계를 갖고 있다.

본 연구에서는 침사효율을 평가하기 위해 주로 활용한 입자추적기법과는 달리, 부유사 확산-이송 모형을 기반으로 유사의 침강과 재부상을 모의할 수 있는 FLOW-3D의 유사모형을 이용하였다. 또한, Boussinesq 가정을 적용하여 고농도의 세립자의 유사 유입에 따른 밀도류의 형성을 재현하여 밀도류의 형성이 유사침강에 미치는 영향을 검토하였다. 수치모형의 적용은 현재 건설 중인 해외 수력발전소를 대상으로 하였으며 침사효율을 높이기 위해 계획된 배플(baffle)의 설치효과를 평가하였다.

2. 수치모형의 개요

2.1 지배방정식

본 연구에서 사용한 CFD 코드인 FLOW-3D는 연속방정식과 3차원 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식을 지배방정식으로, 그리고 유사 농도의 흐름은 이송-확산방정식을 기반으로 침사지내 비정상 유동을 모의하게 된다. 부력 흐름 해석을 위해서는 유사농도에 의한 밀도의 변화가 운동량 방정식에서 오로지 중력항에만 영향을 미친다는 Boussinesq 가정을 적용하였다 (Flow-3D, 2007). 직교좌표계에서 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) + g_i \frac{\rho - \rho_r}{\rho_r} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} - \overline{u_i \phi} \right) \quad (3)$$

여기서 u_i 는 직각좌표계 (x, y, z)에서의 평균유

속성분; t 는 시간; ρ_r 는 기준 밀도; p 는 총압력; ν 는 유체의 동점성계수 (Kinematic viscosity); $-\overline{u_i u_j}$ 는 레이놀즈응력; ϕ 는 평균 스칼라 값; Γ 는 스칼라 ϕ 의 분자확산계수; $-\overline{u_i \phi}$ 는 스칼라 ϕ 의 난류 흐름률; 그리고 ρ 는 농도의 함수로 정의되는 유체의 밀도이다. 또한 여기서 문자위에 표시된 가로줄 ($\overline{\quad}$)은 난류변동성분의 평균값을 의미한다.

식(3)은 유사나 온도와 같은 스칼라장 (scalar field)을 풀어주며 밀도의 변화에 기여하게 된다. 이러한 밀도의 변화는 Boussinesq 가정에 의해, 식 (1)에서는 오로지 부력항 (buoyancy term)에만 영향을 미치게 된다. RANS 모형은 난류에 의해 식 (1)과 식 (3)에 각각 $\overline{u_i u_j}$ 와 $-\overline{u_i \phi}$ 추가항을 갖게 된다. $\overline{u_i u_j}$ 는 난류에 의해 유도된 운동량 흐름률을 의미하며 레이놀즈 응력항이라 알려져 있다. 레이놀즈 응력항은 Boussinesq 난류 동점성 이론에 의해 다음과 같이 정리된다.

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4)$$

여기서 ν_t 는 난류 동점성계수; δ_{ij} 는 Kronecker delta; 그리고 k 는 난류운동에너지 (kinetic energy)이다. 식 (3)에서, $-\overline{u_i \phi}$ 는 난류로 유도된 스칼라 흐름률이며 다음과 같이 표현된다.

$$-\overline{u_i \phi} = \Gamma_t \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \quad (5)$$

여기서 Γ_t 는 스칼라 ϕ 의 난류확산계수이며, $\Gamma_t = \nu_t / Sc_t$ 의 관계를 갖고 있으며, 여기서 Sc_t 는 난류 Schmidt 수이다. RANS 지배방정식의 종결문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 Renormalization-group (RNG) $k-\epsilon$ 모형을 적용하였다.

2.2 유사모형

FLOW-3D 유사모형에서는 유사의 영역을

퇴사 (packed sediment)와 유사 (suspended sediment)의 두 가지 농도영역으로 나누며, 침강 (drifting)과 부상 (lifting)으로 유사의 거동을 모사하게 된다. 유사는 경계조건에서 유입되거나 퇴적된 토사층의 침식으로부터 발생하며, 압력차에 의해 유체와 함께 이송하게 된다. 퇴사 (packed sediment)는 주변의 토사입자와 고정되어 이송되지 않는 상태를 의미하며, 하상과 유체의 접촉면에서 침식이 발생하면 퇴사는 유사 가 되어 비로소 이동이 가능하고, 유사 가 유체의 흐름 상태에 의해 침식보다 더 빠르게 하상으로 침강하면 퇴사가 되며, 이 상태에서 유체의 흐름은 정지한다. 즉 항력계수 (drag coefficient)가 투수성이 0인 지역에서 무한하도록 하도록 가정된다.

유체 평균 점성 (mean fluid viscosity)는 유사에 의해 높아지며, 토사가 차지하는 부피비가 점착성 토사율 ($f_{s,CO}$, cohesive sediment fraction)에 도달할 때까지 증가한다. 점착성 토사율 이상으로 토사농도 (f_s)가 증가하면, 유체의 점성은 증가하지 않고, 토사 입자들끼리 뭉쳐서 고체처럼 거동하기 시작한다. 이러한 고체와 비슷한 거동은 다공성 매체 (porous median)를 통과하는 유체의 흐름에서와 같이 운동량 방정식에 선형 항력항을 추가하여 예상할 수 있으며, 점성은 다음 식과 같이 계산된다.

$$\mu^* = \mu_f \left[\frac{1 - \min(f_s, f_{s,CO})}{f_{s,CR}} \right]^{-1.55} \quad (6)$$

여기서 μ_f 는 유체의 분자 점성 (fluid viscosity); μ^* 는 혼합물의 평균 점성, 그리고 $f_{s,CR}$ 는 한계토사율 (critical sediment fraction)이다. 본 연구에서는 문헌에서 제시한 $f_{s,CO}=0.25$ 와 $f_{s,CR}=0.65$ 를 적용하였다 (FLOW-3D 2007).

입자의 침강속도 (ω_s)는 부력과 유체의 항력 (drag force)의 평형관계에서 산정할 수 있으며, 다음과 같이 산정된다.

$$\omega_s = \frac{f_L d_s^2}{18\mu} \frac{\nabla P}{\rho} (\rho_s - \rho_w) \quad (7)$$

여기서, d_s 는 유사평균입경; μ 는 물의 점성계수 (dynamic viscosity); $\nabla P/\rho$ = mechanical potential gradient, 유체의 자유표면 주위에서는 중력가속도 g 로 대체; $\bar{\rho}$ 는 혼합유체의 밀도; ρ_s 는 유사 입자의 밀도; ρ_w 는 유체의 밀도; f_L 는 유체가 차지하는 체적비이다.

침강에 의해 퇴적된 하상으로부터의 부유사의 부상 (lifting)은 하상 소류력이 하상표면의 전단저항을 초과할 경우 발생하며, 균일입경 하상에서 입자를 하상에서 부상시키기 위해 요구되는 최소의 소류력 (한계 소류력)은 한계 Shields parameter (τ_{*c})을 통해 다음 식과 같이 나타내고 있다.

$$\tau_{*c} = \frac{\tau_c}{g(\bar{\rho} - \rho_s) d_s} \quad (8)$$

여기서, τ_c 는 하상에서 토사입자를 부상시키는 최소 전단력 (한계 소류력)이며, 유사입경 (d_s) 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm에 대한 한계 Shields parameter (τ_{*c})는 각각 0.085, 0.048, 0.04를 적용하였다 (Julien, 1998). 하상의 전단력 (τ)이 한계 소류력보다 큰 지점에서는 하상으로부터 유사 가 이탈되어 부유사로 이송된다. 반면에 하상 전단력이 한계 소류력 보다 작으면 부유사는 침강에 의해 계속해서 퇴적하게 된다. 전단속도 (shear velocity, $\sqrt{\tau/\rho}$)는 경계층에서 표면마찰에 의한 전단 유속 값이며, 퇴적층 표면에서 떨어져 나가는 입자의 비율은 초과전단력 $\sqrt{(\tau - \tau_c)/\rho}$ 에 비례하게 된다. 이렇게 재부상하는 입자의 양력 속도 (u_l)는 다음 식으로 계산된다.

$$u_l = \alpha n_s \sqrt{\frac{\tau - \tau_c}{\rho}} \quad (9)$$

여기서, n_s 하상 퇴적층에 수직 벡터; α = 세굴 침식률에 관한 경험적인 매개변수 (≈ 1.0)이다. 부유사의 거동은 입자의 침강 (drifting)과 부상 (lifting)을 이송-확산방정식에 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} + u \cdot \nabla c_s = I \nabla^2 c_s - u_l \cdot \nabla c_s - w_s \cdot \nabla c_s \quad (10)$$

여기서 c_s = 부유사농도이다.

수치계산격자 셀 (i, j, k)에서 n 시간의 최종 밀도 (ρ_{ijk}^n)는 유사의 농도의 함수로 아래와 같이 계산된다.

$$\rho_{ijk}^n = \rho_{ijk}^{n-1} \left[1 + (G-1) \frac{V_{s_{ijk}}^n}{V_{ijk}^n} \right] \quad (11)$$

여기서 $V_{s_{ijk}}^n$ 는 셀 (i, j, k)에 있는 입자의 부피이며, 아래 Fig. 2와 같이 침강과 바닥에서의 재부상으로 각각의 계산시간에 재산정되어진다. V_{ijk}^n 는 셀 (i, j, k)에 있는 총 유체의 부피이며, G 는 입자의 비중 (specific gravity)이다.

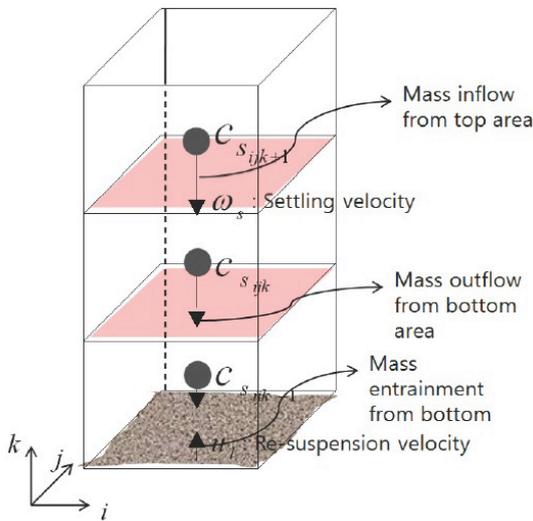


Fig. 2. Schematic of the concentration change resulting from particle deposition and re-suspension in cell (i, j, k).

3. 수치모형의 적용

3.1 적용대상

본 연구의 대상은 파키스탄의 이슬라마바드 북동쪽 120 km 지점 Kunhar강에 설치예정인 유역변경식 수력발전소의 침사지이다. 이곳에 흐르는 하천유량은 빙하로 덮인 해발 4,800 m 지역으로부터 유입되는 다량의 유사를 포함하고 있다. 최근 30년간의 관측치에서는 우기시 최대

10,000 ppm 부유사 농도가 측정되었다. 측정된 d_{50} 는 대략 0.01 ~ 1.0 mm의 범위였으며 모래 33 %, 실트 46 %, 점토 21 %의 구성비를 보여주고 있다 (Star Hydropower Ltd., 2007). 따라서 발전 터빈으로 유입되는 고농도의 부유사를 효과적으로 제거하여 터빈 손상을 방지할 수 있는 침사지가 계획되었으며, 그 제원은 Fig. 3과 같다.

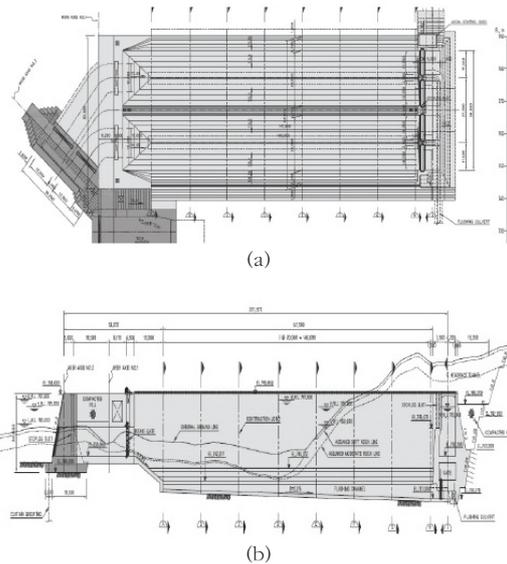


Fig. 3. Sedimentation basin: (a) plan view; (b) longitudinal section.

설계유량은 153.0 m³/s로 두 개의 침전지로 구성되어 있으며, 폭은 23.0 m, 높이는 26.7 m, 길이는 140 m로 계획되었다. 운영수위는 EL. 760 ~ 765 m로 계획되었으며, 처리해야 할 유사의 최소입경은 히말라야 유역 인근에 설치되어 운영되고 있는 수력발전소의 사례를 참

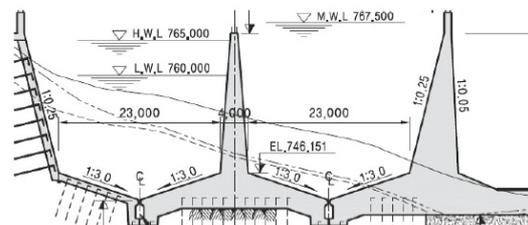


Fig. 4. Typical cross section of the sedimentation basin.

고하여 0.2 mm를 대상으로 하였고, 밀도는 균 일한 2,650 kg/m³로 가정하였다. 침사지내 퇴 적된 유사는 침전지 하부에 수직형 플러싱 채널 을 통하여 웨어 하류로 방류되도록 설계되었다. 설계된 침사지의 대표단면은 Fig. 4와 같다.

3.2 경계조건 및 수치모의 케이스

본 연구에서는 폭은 23.0 m, 높이는 26.7 m, 길이는 140 m의 침사지 2개의 영역에 대해 CAD 프로그램을 이용하여 해석 영역을 솔리드 형상화하였다(Fig. 5). 수치모델링을 위한 격자 는 구축된 침사지 한 지의 형상에 대하여 수위 EL. 765 m 까지 120(x)개×40(y)개×90(z)개 의 총 432,000개 사각형 격자 (cell)를 구성하였 는데, 배플에 의해 유속의 변화가 심한 곳은 격 자수를 늘려 구성하였다. 우측 유입부에는 침사 지 한 지의 설계유량 76.5 m³/s가 유입하는 조 건을 설정하였으며, 좌측 유출부에는 최저 운영 수위인 EL. 760.0 m를 경계조건으로 설정하였 다. 침사지의 바닥과 측벽 등의 구조물은 no-

slip 경계조건을 부여하였으며, 속도변화가 큰 경계층 부근은 벽 함수 (wall function)를 적용 하여 효율적인 계산이 되도록 하였다. No-slip 경계층의 난류에너지 및 난류에너지 소산율은 다음의 경계조건으로 설정된다.

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{c_\mu}} , \quad \epsilon = \frac{u_*^3}{\kappa y_o} \quad (12)$$

여기서 u_* 는 경계면에서의 마찰속도; c_μ 는 상 수 (=0.085); κ 는 von Kármán계수; 그리고 y_o 는 유속이 산정된 지점으로서 경계면으로부터의 수직거리이다. 공기층의 윗면, 즉 모의영역 상부 에는 대칭경계조건 (Symmetry 조건)을 부여하 였다. 초기조건으로는 밀도가 998 kg/m³으로 균 일한 20 °C의 물이 운영수위인 EL. 760.0 m 까지 침사지에 채워져 있는 것으로 설정하였다.

본 연구에서는 고농도의 세립 부유사 혼입에 따른 밀도류의 형성을 재현하여 유사 크기별 침 강에 미치는 영향을 평가하였으며, 또한 침사효 율을 높이기 위해 검토되고 있는 배플 설치에 따 른 침사효율의 변화를 평가하였다. 본 연구에서 수행한 수치모형 실험케이스는 Table 1과 같다.

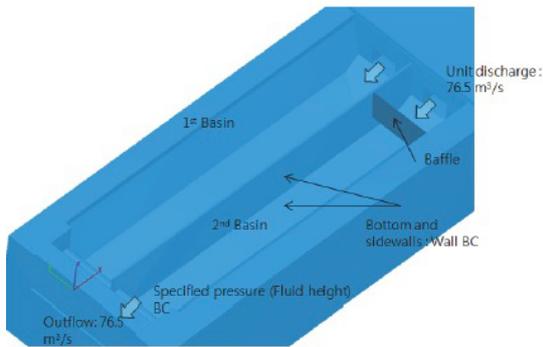


Fig. 5. Computational domain and boundary conditions for the simulation of the sedimentation basin.

4. 수치모의 결과

4.1 밀도류 형성이 없는 침사지 모의 결과

침사지내 유입수가 대부분 큰 입자의 부유사 로 구성된 경우, 유입수와 침사지내 물은 밀도차 가 없다고 가정할 수 있다. 이 경우 침사지내 유 입되는 유사 입자의 운동은 흐름과 입자의 운동 사이에서 발생하는 항력과 입자에 작용하는 중 력 등 입자에 작용하는 외력과 입자의 관성력간

Table 1. Simulation cases.

Simulation case	Inflow concentration(kg/m ³)	Particle size d _s (mm)	Uniform density flow		Sediment driven density flow	
			without baffle	with baffle	without baffle	with baffle
1	1.0	0.10	CASE 1	CASE 1-1	-	-
2	"	0.20	CASE 2	CASE 2-1	CASE (B)2	CASE (B)2-1
3	"	0.30	CASE 3	-	-	-

의 상호 관계를 기술하는 운동방정식에 의해 결정될 수 있다. 그러나 유사입자 (농도)의 움직임에 따른 유체의 밀도변화를 고려하지 않아 운동량방정식 (식 1.)에서 부력항은 생략된다. Fig. 6는 부유사 입경 0.1 mm, 농도 1.0 kg/m³로 구성된 유입수가 침사지내 유입시 부유사의 거동과 유속분포를 보여주고 있다. 취수구를 통해 침사지로 유입된 흐름은 침사지 유입직후 유입부에서 약 0.75 m/s 내외의 고유속을 형성하고 있으나, 침사지 중반이후에는 중앙부에 편중된 유속이 대체로 완화되고 있다. 침사지로 유입된 부유사는 유입부에서는 편중된 유속으로 인하여 중앙으로 집중되어 이송되나 시간이 경과됨에 따라 침강, 퇴적하는 양상을 보여준다. 그러나 입자가 작아 상당부분 부유 상태로 유출구를 통해 침사지를 벗어나고 있다. Fig. 7는 부유사 입경 0.2 mm에 대한 해석으로 침사지로 유입된 부유사는 이번에도 유입부에서 편중된 유속으로 인하여 중앙으로 집중되어 이송되고 있

다. 그러나 부유사 입자가 상대적으로 커서 침강이 빨라지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8에서는 침사지내 유입수의 초기 부유사 농도와 일부 침사지를 벗어나 유출되는 농도를 보여주고 있다. 여기서 유입수의 농도는 1.0 kg/m³로 동일하게 설정하였으며, 입경은 0.2 mm와 0.1 mm를 대상으로 하였다. 부유사 제거효율은 유입수의 농도와 유출부로 배출되는 농도의 비율로 평가하였으며, 유출부의 농도는 계산 시간 동안의 유출부 총 방류량에 포함되어 유출되는 총 유사량의 비율을 계산하여 C₀로 규정하였다. 침사지 처리효율 곡선은 부유사 입경별 침사지 표면부터 바닥까지의 침강되는 시간 (t*)를 계산하여 시간을 입경별 각각의 t*으로 무차원화한 후 무차원 시간 (T/t*)에 따른 제거 효율을 비교, 도시하였다. 입경별 침강 시간 (t*)은 자연모래의 입경별 계산된 침강속도를 이용하였다 (Julien, 1998). 수치해석 결과, 본 연구 대상 침사지는 설계 입경 0.2 mm에 대해서는 유

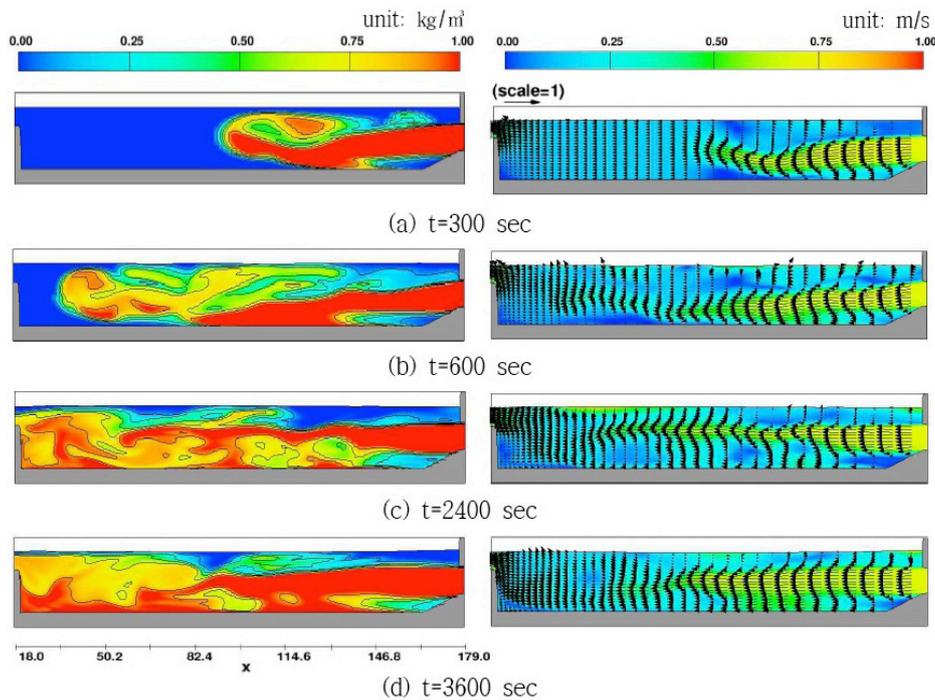


Fig. 6. Numerical simulation for Case 1 ($d_p=0.1$ mm, concentration 1.0 kg/m³) where left figures show temporal evolution of concentration and right figures show velocity profiles. Contours, ranging from 0 to 1.0 kg/m³ in increments of 0.25 kg/m³, were made.

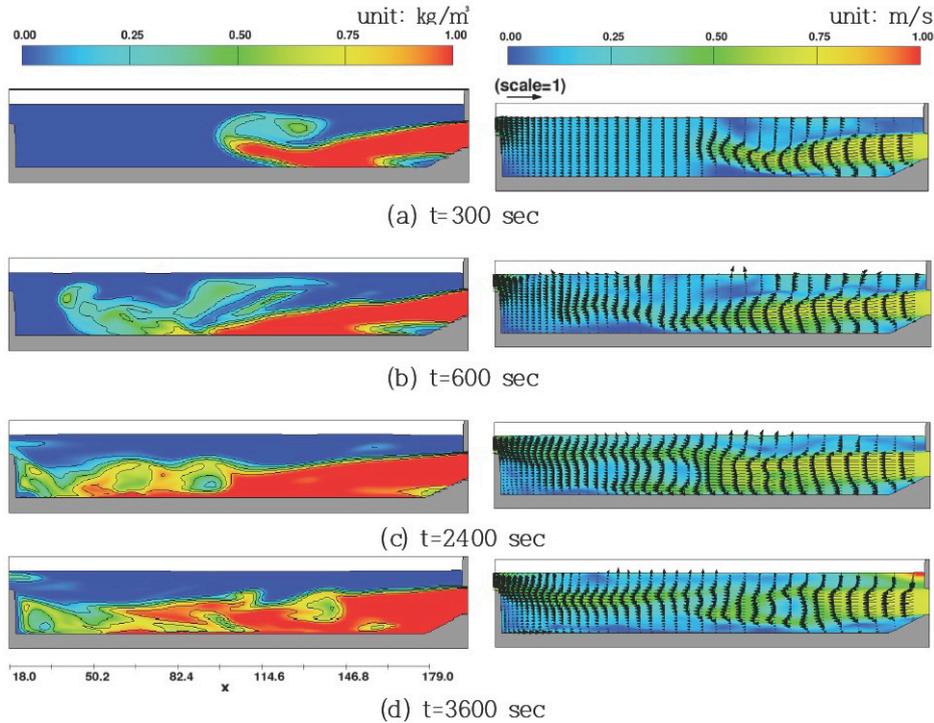


Fig. 7. Numerical simulation for Case 2 ($d_s=0.2$ mm, concentration 1.0 kg/m³) where left figures indicate temporal evolution of concentration and right figures show velocity profiles. Contours, ranging from 0 to 1.0 kg/m³ in increments of 0.25 kg/m³, were made.

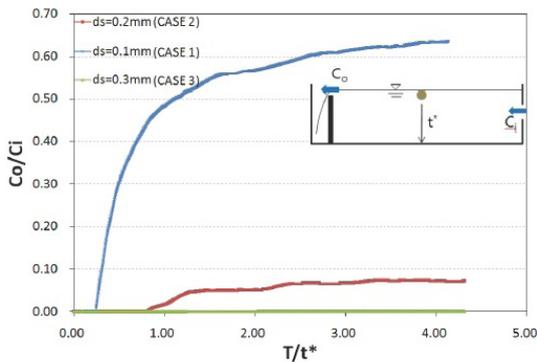


Fig. 8. Sediments removal efficiency curve (C_o/C_i) for each particle size as a function of dimensionless time. C_i is the incoming sediment concentration from the inlet. C_o is the sediment concentration of water flowing out of the sedimentation basin. t' is the settling times for each particle size to settle from the water surface to the bottom of the settling basin.

입 부유사의 약 93 % ($C_o/C_i=0.07$)를 침사지내에서 침강시킬 수 있는 처리효율을 보여 주었다. 반면에 설계 입정보다 작은 0.1 mm에 대해서는 약 37 % ($C_o/C_i=0.63$)만을 침사지내에서 침강시킬 수 있는 것으로 해석되었다.

배플설치에 따른 흐름과 부유사의 거동 해석 결과는 아래 Fig. 9에서 제시된다. 설계단계에서 계획된 배플은 유입구에서 20 m 떨어진 곳에 위치하며, 수중내 위치는 EL. 753 m ~ 760 m 로, 총 7 m의 높이로 계획되었다. 취수구를 통해 침사지로 유입된 흐름은 침사지 유입부 근처에 설치된 배플에 의해 바닥으로 유도된다. 배플 통과지점 인근유속은 통수단면적의 축소로 인하여 약 0.75 m/s 내외의 고유속을 형성하고 있으나, 배플 통과후 흐름은 통수단면적의 급확대로 인하여 배플 설치전 보다 상대적으로 균일화된 유속분포를 보여주고 있다. 배플 설치로 인해 유입수는 바닥으로 유도되며, 따라서 좀 더 신속한 침강으로 인한 향상된 부유사 제거효율을 보일 것으로 예측되었다. 수치해석결과 입경 $d_s=0.1$ mm에 대해서는 배플 설치전보다 처리효율이 높았으며, 약 40 % ($C_o/C_i=0.60$) 처리효율을 보여주었다. 그러나 $d_s=0.2$ mm에 대한 수치해석 결과는 배플 설치전보다 근소하게 적은 약 91 %

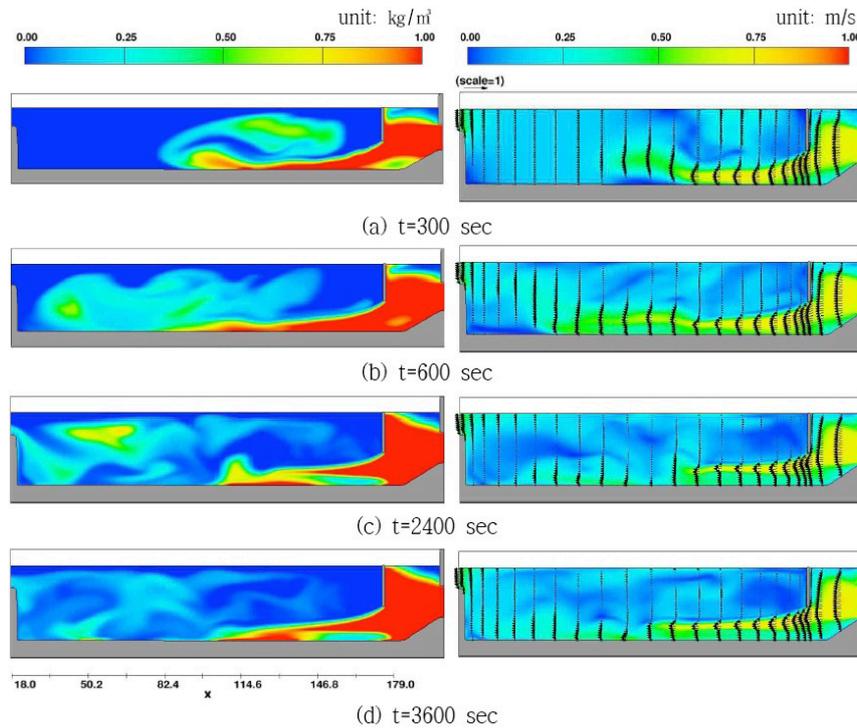


Fig. 9. Numerical simulations for CASE 2-1 ($d_s=0.2$ mm, concentration 1.0 kg/m³). The simulations were carried out with a baffle installation which can increase sediments settling. Left figures show temporal evolution of concentration and right figures show velocity profiles.

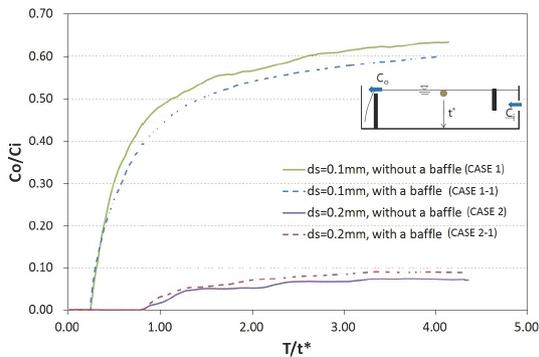


Fig. 10. The effect of baffle installation on the sediments removal efficiency curve. The sediment inflows were assumed to consist of only large size particles that can not create density currents.

($C_o/C_i=0.09$)의 처리효율을 보여 주었다 (Fig. 10). 이는 입경이 적은 경우 배플 설치로 인해 흐름이 바닥으로 집중되었고 따라서 실제 입자의 침강거리가 저하되어 침사지 효율 개선에 크게 영향을 미치었다고 볼 수 있다. 입경이 커짐에 따라 ($d_s=0.2$ mm) 침강속도는 더욱 증가하여,

배플 설치로 흐름이 바닥으로 집중되는 구간인 침사지 선입부에 상대적으로 많은 양의 부유사가 퇴적하게 된다. 그러나 침사지 선입부에는 배플 설치로 고유속이 바닥으로 집중되는 구간으로 이미 퇴적 부유사의 재부상이 상당히 증가하게 된다. 따라서 입경이 커짐에 따라 침사지 처리효율을 높이기 위한 배플 설치의 효과는 설치 전과 비교하여 그리 크지 않다고 판단된다.

4.2 밀도류 형성에 따른 침사지 모의결과

본 연구대상인 히말라야 산맥의 유역의 경우는 매년 우기시 고농도의 유사가 빈번히 발생하는 지역으로, 침사지 유입수는 다량의 세립자 (점토, 실트)의 부유사를 다량 포함하게 된다. 따라서 이러한 경우 침사지내 밀도류가 발달 할 수 있으며, 이러한 밀도류 형성은 입자의 부력침강을 유도하며 밀도류 형성이 없는 침사지내 흐름

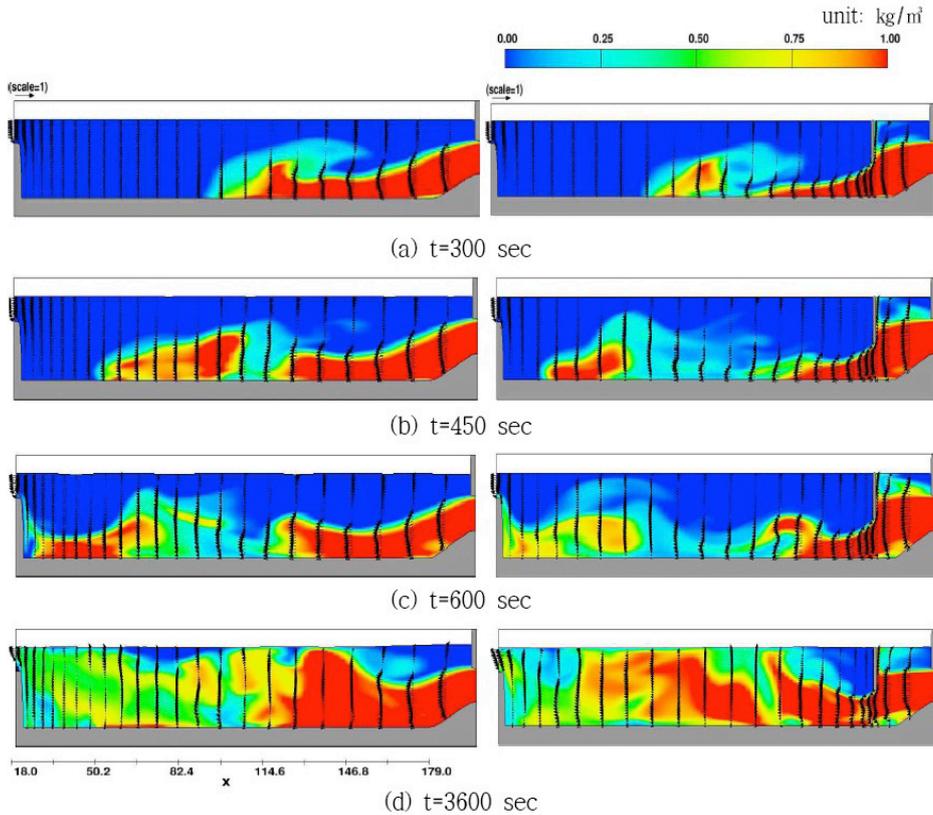


Fig. 11. Numerical simulation for sediment-induced density currents ($d_s=0.2$ mm, concentration 1.0 kg/m³). Left figures indicate the results for the CASE (B)2 and right figures show the results for the CASE (B)2-1.

과 비교하여 거동양상이 달라질 수 있다. Fig. 11 은 부유사 입경 0.2 mm, 농도 1.0 kg/m³로 구성된 유입수가 침사지내 유입시 부유사 밀도류 형성과 거동을 보여주고 있다. 또한, 배플 설치에 따른 부유사 거동 변화를 함께 도시하였다. 본 연구의 수치모형은 취수구를 통해 침사지로 유입된 유입수가 부유사의 농도와 주변수역과의 밀도차에 의해 발생하는 밀도류를 잘 구현하였다. 또한, 일반적인 부유사 밀도류의 형상은 실내시험에서도 관찰되었듯 (Shin, 2004) 주변 수역을 헤쳐 나가는 선단부 (front head)와 뒤에서 쫓아오는 몸체부 (body)로 이루어지게 되는데, 본 수치해석 결과에서도 이러한 밀도류의 형상을 매우 잘 구현하고 있다.

온도나 용질에 의해 유도된 밀도류는 일반적으로 부력을 보존하여 상당한 거리에 걸쳐 선단

부와 몸체부를 형성하면서 흘러가는 것과는 달리 부유사 밀도류는 부유사의 퇴적이나 바닥으로부터의 부유사 재부상으로 인해 부력 흐름이 영향을 받게 된다. 일반적으로 하상 경사가 증가할수록 난류에 의한 재부상이 부력 흐름을 증가시키며 이로 인해 밀도류의 전파속도는 증가하며 증가된 밀도류의 전파속도로 인해 하상으로부터의 부유사 재부상은 더욱 가속화하게 된다. 이러한 밀도류의 자기가속 순환과정으로 인해 형성된 사례로는 해저협곡 (submarine canyon)이 있다. 반대로 경사가 완만한 경우 부유사의 퇴적이 상대적으로 커 밀도류가 진행할수록 퇴적으로 밀도류의 부력 흐름률은 지속적으로 저하되어, 결국 밀도류는 소멸하게 된다. Fig. 11 (b, c)에서는 부유사의 침강으로 인해 밀도류의 몸체 (body)부분 일부가 소멸되는 현상

을 잘 보여주고 있다.

부력흐름을 고려한 부유사 밀도류 선단의 전파속도는 비부력 흐름과 비교하였을 때 상대적으로 빠른 유속을 보여주고 있으며, 따라서 좀 더 신속히 침사지 유출부로 이동하는 양상을 보여주고 있다. 배플 설치시 배플 설치로 많은 부유사 침강이 발생되며, 이로 인해 좀 더 빠른 밀도류의 소멸을 유도하게 되며, 결국 침사지내 부유사 처리효율이 증가시키는 역할을 하게 된다. Fig. 12에서는 배플 설치 전후 침사지의 부유사 처리효율을 비교하였으며, 배플 설치가 부유사 처리효율을 높이는 것을 잘 보여주고 있다.

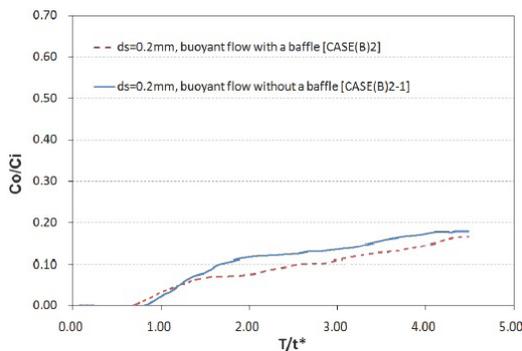


Fig. 12. The effect of baffle installation on the sediments removal efficiency when sediment-induced density currents occur. The particle size d_s is 0.2 mm with concentration 1.0 kg/m^3 .

5. 결론

본 연구에서는 침사효율을 평가하기 위해 부유사 확산-이송 모형을 기반으로 유사의 침강과 재부상을 모의할 수 있는 FLOW-3D의 유사모형을 적용하였으며, 고농도의 유사 세립자의 유입에 따른 밀도류의 형성과 부유사의 부력침강을 재현하였다. 수치모형의 적용은 현재 설계중인 해외 수력발전소를 대상으로 하였으며 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구 대상 침사지는 설계 입경 0.2 mm에 대해서는 유입 부유사의 약 93% ($C_o/C_i = 0.07$)를 침사지내에서 침강시킬 수 있는 처리효율을 보여 주었다. 반면에 설계 입

경보다 작은 0.1 mm에 대해서는 약 37% ($C_o/C_i = 0.63$)만을 침사지내에서 침강시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

- 2) 배플 (baffle)의 설치시 입경이 $d_s = 0.2 \text{ mm}$ 이상인 경우에는 처리효율 개선효과가 미미한 것으로 해석되었으나, 입경이 작아지면서 침사지의 부유사 처리효율을 높이는 것으로 해석되었다. 따라서 배플의 설치시 고농도의 유사입자가 다량 유입시 빠른 세립자의 침강을 촉진하여 침사지의 침사효율을 높일 것이라 예측된다.
- 3) 부유사 밀도류는 밀도류가 형성되지 않는 비부력 일반흐름에 비해 상대적으로 빠르게 침사지 유출부로 이동하는 양상을 보여주고 있다. 배플 설치시 신속한 부유사 침강과 밀도류의 소멸을 유도하게 되고 결국 침사지의 침사효율을 향상시키는 것으로 분석되었다.

참고문헌

건설교통부 (1997) *침전지에서의 부유물질 경감에 관한 연구보고서*, 한양대학교, pp. 83.

김대근, 김성만, 박원철 (2010) 수치모의를 통한 침사지에서의 흐름 및 침사효율 해석, *상하수도학회지 논문집* 24(6), pp. 713-722.

이길성, 김상훈 (2004) 입자추적기법을 이용한 침전지의 효율 평가, *한국수자원학회 논문집* 37(4), pp. 293-304.

우효섭 (2001) 하천수리학, pp. 695-696, 청문각, 서울.

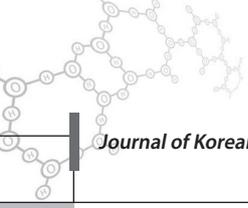
Camp, T.R. (1946) Sedimentation and the design of settling tanks, *J. Hydraul. Eng. (ASCE)* 111, pp. 895-936.

FLOW-3D (2007) *User guide and manual release 9.3*, pp.120, Flow Science Inc, NM.

Heydari, M.M and Bajestan, M.S., Kashkuli, H.A. and Sedghi, H. (2013) The Effect angle of baffle on the performance of settling basin, *World Appl. Sci. J.* 21(6), pp 829-837.

Julien, P.Y. (1998) *Erosion and Sedimentation*, pp.118, Cambridge University Press, New York, pp. 118.

Pradhan, P.M.S. (2004) *Improving sediment*



- handling in the Himalayas*. pp. 1-6, OSH Research, Nepal.
- Shin J.O., Dalziel S.B., and Linden P.F. (2004) Gravity currents produced by lock exchange, *J. Fluid Mech.* **521**, pp. 1-34.
- Star Hydropower Ltd, (2007) *The feasibility Study for Patrind Hydropower Project, Islamabad*, pp. 4-18, Pakistan.
- Yoon T.H., and Lee S.O. (2000) Numerical modeling of sedimentation basins with baffle, *J. Civil Eng. (KSCE)*, **4**(4), pp. 227-232.