

## 점착성, 비점착성 부유사 모형에 대한 Schmidt 수의 영향 Effect of Schmidt Number on Cohesive and Non-cohesive Sediment Suspension Modeling

변 지 선\* / 손 민 우\*\*

Byun, Ji-sun / Son, Minwoo

### Abstract

This study aims to investigating the effect of Schmidt number ( $\sigma_c$ ) on sediment suspension and hydrodynamics calculation. The range of  $\sigma_c$  is also studied based on the flux Richardson number ( $Ri_f$ ) and gradient Richardson number ( $Ri_g$ ). Numerical experiments are carried out by 1 dimensional vertical model. Both cohesive and non-cohesive sediments are tested under the conditions of pure current and oscillatory flow. The turbulence damping effect due to sediment suspension is examined considering  $\sigma_c$  as a constant for the damping effect. The results of this study show the consistent effect of  $\sigma_c$  on sediment suspension regardless of hydrodynamic condition. It is also found that the model overestimates the flow velocity and turbulent kinetic energy when the damping effect is not considered. Under the conditions of  $Ri_f$  and  $Ri_g$  causing density stratification, it is known that the vertical mixing of sediment is reasonably calculated in the range of  $\sigma_c$  from 0.3 to 0.5.

**keywords** : schmidt number, richardson number, cohesive sediment, turbulent diffusion

### 요 지

본 연구는 Schmidt 수( $\sigma_c$ )에 따른 부유사의 부유 거동 변화 및 흐름 특성의 변화를 살펴본 후, 그에 따라 계산된 성층 흐름의 척도가 되는 Flux Richardson 수( $Ri_f$ )와 Gradient Richardson 수( $Ri_g$ )를 근거로 타당한  $\sigma_c$ 의 범위를 산정하는 것을 목적으로 수행되었다. 부유사의 종류를 점착성 유사와 비점착성 유사로 구분하였으며 진동 흐름과 흐름 조건을 가정하고 1차원 연직 수치 모형을 이용하여 수치 실험을 수행하였다. 이 과정에서  $\sigma_c$ 가 난류 감소효과와 관계되는 상수인 것에 근거하여 부유사의 존재로 인한 난류 감소효과 고려 여부에 따른 흐름 특성의 변화를 살펴보았다. 그 결과, 흐름 조건에 관계없이  $\sigma_c$ 의 크기에 따라 부유 거동이 일관된 경향을 나타내는 것이 확인 되었으며 난류 감소효과를 고려하지 않는 경우 유속 및 난류 에너지가 과대 산정 되는 결과가 나타났다. 부유로 인한 성층화 조건을 형성하는  $Ri_f$  및  $Ri_g$ 의 범위에 기초하여 결과를 분석하고  $\sigma_c$ 가 0.3에서 0.5의 범위에 해당될 때 성층 흐름 내 유사의 수직 혼합이 유효하게 계산 된다는 결론이 도출되었다.

**핵심용어** : Schmidt 수, Richardson 수, 점착성 유사, 난류 확산

\*충남대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (e-mail: popo3501@cnu.ac.kr)

Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

\*\*교신저자, 충남대학교 공과대학 토목공학과 조교수 (e-mail: mson@cnu.ac.kr, Tel: 82-42-821-5676)

Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

## 1. 서 론

하천에서의 유동 조건이 유사의 이동을 위한 초기 조건을 만족하면 유사는 하상을 따라 이동하거나 부유되어 운반되기 시작 한다. 운동을 시작한 유사는 유사 입자 자체의 관성과 유수의 에너지에 따라 운동 형식이 결정된다. 하상에서 가까운 곳에서 전동(Rolling), 활동(Sliding), 도약(Jumping)과 같은 운동을 하는 유사를 소류사(Bed-Load)라 하며 주로 난류에 의한 확산으로 부유와 침강을 하며 이동하는 유사를 부유사(Suspended-Load)라 한다. 그러나 총 유사 중 소류사와 부유사를 구분하는 일은 흐름 및 하상 조건에 따라 다양하기 때문에 쉽지 않다(Yang, 2003).

부유사의 이동은 이송과 확산 과정을 통해 지속적으로 발생하며 이송-확산 방정식으로 모형화된다. 이송-확산 방정식은 난류가 충분히 발달된 흐름에서 평균 흐름 방향으로의 이송을 의미하는 항과 무작위한 난류 및 분자운동에 의한 확산을 의미하는 항으로 구성된다. 이 중, 난류에 의한 확산, 즉 난류확산은 농도 경사의 1차 미분 항에 비례한다는 가정과 확산의 강도를 정량화하는 확산계수를 결정하여 구성한다. 이송-확산 방정식에서 난류 확산계수는 와점성계수와 Schmidt 수( $\sigma_c$ )의 비로써 정의한다.  $\sigma_c$ 란 유사 부유를 야기하는 난류의 특성과 관계되는 상수로써 난류로 인한 부유과정에서 와점성계수와 비를 결정하여 유사의 확산정도를 나타낸다.  $\sigma_c$ 가 감소할 때 난류 운동 에너지의 강도가 증가하며 부유사의 확산이 활발해지는 것이 수치 실험을 통하여 알려진 바 있다(Son., 2009; Amoudy et al., 2005). Toorman (2003)은 난류가 충분히 발달된 흐름조건을 가정하고 평균 입경( $D_{50}$ )의 크기가 135  $\mu\text{m}$ 와 230  $\mu\text{m}$ 인 점착성을 띠지 않는 매우 가는 입자에 대하여 수치 실험을 수행하였다. 수치 실험결과는 Cellino (1998)가 3차원 수로에서 측정한 유속 및 농도 분포의 실측값을 이용하여 검증되었다. 실측치와의 검증을 통해 비점착성 유사의 경우 수면에서 충분히 떨어진 곳에서는 수위에 따라 Richardson 수(Ri)가 변하지 않으며 일정한 값(0.25)을 갖는다는 결론을 도출하였으며 이때  $\sigma_c$ 가 0.7로 일정하다고 주장하였다. Ri는 유체 내 유사 또는 밀도차가 유발하는 밀도 경사에 의해 발생한 부력 효과와 유체의 관성으로 인한 성층화의 안정성을 나타내는 정도를 의미하며(Miles, 1961), 켈빈-헬름홀츠(Kelvin-Helmholtz) 불안정성에서는 서로 다른 두 층 사이의 경계에 존재하는 파의 주파수로부터 계산되는 수로 경계면의 불안정한 정도를 나타낸다(Benoit and Beckers, 2011). Ri는 계산

상의 편의를 위해 Ri보다는 Gradient Richardson 수( $Ri_g$ )와 Flux Richardson 수( $Ri_f$ )의 개념을 이용하는 것이 일반적이다.  $Ri_g$ 는 성층 흐름의 안정성을 나타내는 척도로서 어떤 교란이 증가하여  $Ri_g$ 의 값이 임계값을 초과하는 경우에 성층 흐름이 파괴된다고 정의한다.  $Ri_g$ 의 임계값은 일반적으로 0.25를 적용하고 있다(Winterwerp and van Kesternen, 2004; Howard, 1961; Kundu, 1990; Miles, 1961; Thorpe, 1971).  $Ri_f$ 는 성층 흐름 조건 하에서 수직방향 혼합의 효율성을 나타내는 척도이며 부력의 생성과 파괴의 비로 정의된다. 레이놀즈의 유추법(Reynolds' Analogy)을 적용하면  $Ri_g$ 는  $Ri_f$ 에  $\sigma_c$ 를 곱하여 얻어진다(Winterwerp and Kesternen, 2004). Turner (1973)는  $Ri_f$ 의 값이 임계값을 초과하는 경우 난류 전단 흐름이 파괴되며  $Ri_f$ 의 임계값이 실험결과를 근거로 0.05에서 0.3의 범위에 존재하고 임계값의 평균은 0.15라 주장하였다. 이는 Tennekes and Lumley (1994)에서 계산된 0.2의 값과도 유사하다.

Yoon and Kang (2005)은 개수로에서의 난류 흐름조건을 가정하고 유체입자와 유사입자사이의 상호작용을 고려하는  $k-\omega$ 모형을 적용하여 비점착성 유사의 거동을 살펴보았다. Yoon and Kang (2005)의 연구에서는 Wilcox (1988)에서 제안된  $\sigma_c(0.5)$ 를 수치 실험에 적용하였으나 이에 대한 근거는 언급하지 않았다. 다만 유사 입자의 크기와 농도분포 사이에는 상관관계가 존재하며, 이를 그래프에 도식화 하였을 때 그래프의 기울기가  $\sigma_c$ 의 크기에 따라 달라진다고 주장하였다. Lees (1981)는 실제 연구 대상지역에서 얻어진 실측값들을 적용하여 비점착성 유사의 부유농도와  $\sigma_c$ 의 관계를 회귀 식으로 제안하였다. Amoudy et al. (2005)은 1차원 연직 수치 모형을 이용하여 높이에 따른 유사의 부유농도를 계산하고 Ribberink and Al-Salem (1995)의 실험결과와 비교하였다. 그 결과, 보다 실측치와 유사한 모의를 위해서는 유사의 부유 높이에 따라  $\sigma_c$ 를 가변적으로 적용하는 것이 바람직하다고 주장하였고 부유 높이에 따라 부유농도가 달라지는 것을 토대로 유사의 농도에 따른  $\sigma_c$ 에 대한 모형을 개발하였다. 개발된 모형을 통해 계산된 부유사의 부유특성은 더 나은 결과를 보였으나 이는 실험실 실험과의 비교 결과이며 유사의 특성 또한 비점착성 유사로 한정되어있다. 일반적인 연구 사례를 살펴보면  $\sigma_c$ 는 1보다 작다는 것을 알 수 있으나(Olsen and Stokseth, 1995; Celik and Rodi, 1988; Galland et al., 1997; Wu et al., 2000), Winterwerp (2006)은 실험결과를 통해  $\sigma_c$ 를 2.0으로 적용하였을 때 실측치와 더 유사한 결과를 모의한다고 주장하였다. Winterwerp (2006)

은 난류 흐름에서의 점착성 유사와 비점착성 유사 사이의 상호작용을 고려한 모형을 이용하여, 간섭침강 효과를 포함하는 Ri를 새로이 개발하고 유사의 농도를 기준으로 수치 실험을 수행하였다. 수치모의의 결과는 Cellino and Graf (1999)가 측정한 실측치와 비교 및 분석되었으며 실측치를 이용해 계산된  $\sigma_c$ 의 평균값인 2.0을 적용한 모의 결과가 보다 우수하다는 점이 발견되었다. 또한  $\sigma_c$ 를 상수가 아닌 Ri에 따른 함수로 고려하여야 한다는 점도 주장하였다. 하지만 van Rijn (1984)은 연구결과를 통해 난류 흐름에서 유사 입자의 원심력은 유체 입자의 원심력보다 커야하기 때문에  $\sigma_c$ 는 1보다 작은 값을 가져야 한다는 상반되는 내용을 주장하였다. 이상의 연구 사례는 비점착성 유사를 대상으로 하며 점착성 유사의 경우에 대한  $\sigma_c$ 의 적용 사례로는 Son and Hsu (2011a)와 Hsu and Hanes (2009)의 연구 등이 있으며 0.5와 1.0의 값을 적용하였다. 여기서 점착성 유사란 비점착성 유사에 비해 1차 입자(Primary Particle)의 크기가 작아 1차 입자간의 점착력이 중요한 역할을 하는 유사를 말한다. 점착성 유사는 비점착성 유사에 비해 크기가 작아 입자의 전자기적 점착력의 영향을 무시할 수 없으므로 점착력으로 인해 입자들은 서로 응집하는 동시에 입자들 간의 충돌에 의하여 파괴되는 과정을 거친다. 이러한 응집과 파괴가 지속되는 일련의 과정을 응집현상(Flocculation Process)이라 한다. 점착성 유사는 응집과정을 통해 일차입자보다 크기가 크며 수십 개에서 수천 개의 일차입자와 물의 덩어리인 플럭(Floc)을 형성하게 된다. 크기와 밀도가 고정적인 값을 가지는 비점착성 유사의 경우와 달리 플럭은 응집과정으로 인해 그 크기와 밀도가 지속적으로 변한다. 플럭의 크기 및 밀도 변화가 중요한 이유는 입자 크기의 제곱 및 입자와 유체의 밀도 차에 비례한다고 가정하는 Stokes 법칙에 따른 침강 속도가 지속적으로 변화하고 유사의 부유 특성이 달라지기 때문이다. 반면 비점착성 유사는 입자의 크기와 밀도가 항상 일정하다고 가정되기 때문에 Stokes 법칙을 적용하여 유사의 침강속도를 계산할 때 유사의 침강속도 역시 일정한 값을 갖는다.

과거의 연구들을 살펴본 결과에 따르면  $\sigma_c$ 는 유사의 부유 및 난류와 관련된 매우 중요한 계수임을 알 수 있으나  $\sigma_c$ 에 대한 연구가 미흡한 실정이며  $\sigma_c$ 를 상수로 가정 후 널리 이용되는 값을 적용하여 연구를 수행하는 것이 확인된다. 또한 특정 지역에서 관측된 실측값을 통해 개발된  $\sigma_c$ 에 대한 회귀식을 다양한 흐름 조건에 대하여 보편적으로 적용하기에는 무리가 있다고 판단된다. 따라서  $\sigma_c$ 에 따른 난류 변화로 인한 흐름 특성 변화 및 부유 거동의 변화

에 대한 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 수치 실험을 통하여 점착성 유사와 비점착성 유사를 대상으로  $\sigma_c$ 에 따른 부유사의 부유 거동 및 흐름 특성의 변화를 살펴본다. 응집 현상으로 인하여 점착성 유사와 비점착성 유사의 부유특성이 다른 경향을 나타내므로 유사의 특성을 구분한 연구가 필요하다. 2장에서는 유사의 거동을 모의하기 위해 이용한 1차원 수치 모형에 대해 살펴보고 3장에서 점착성 유사와 비점착성 유사에 따라 다르게 나타나는 유사의 부유특성 및  $\sigma_c$ 에 따른 결과를 분석한다. 4장에서는 분석한 결과를 토대로 전체 수치 실험에 대한 결론을 도출한다.

## 2. 유사의 응집과정 및 이동에 대한 1차원 연직 수치 모형

### 2.1 플럭을 형성하는 응집과정의 모형화

본 연구에서는 점착성 유사의 응집과정을 모형화하기 위해 플럭의 구조를 프랙탈 기하학을 통해 이해한다. Khelifa and Hill (2006)은 플럭 내부를 일차입자가 얼마나 조밀하게 채우고 있는가를 의미하는 프랙탈 차원을 지수법칙으로 표현하였다.

$$F = \alpha \left( \frac{D}{d} \right)^\beta \quad (1)$$

Eq. (1)에 나타난  $D$ 는 플럭의 직경이며  $d$ 는 일차입자의 직경이다. 본 연구에서는  $d$ 가 4  $\mu\text{m}$ 의 크기를 가진다고 가정한다.  $\alpha$ 는 일반적으로 3.0의 크기를 가지며  $\beta$ 는 Eq. (2)로 계산된다.

$$\beta = \frac{\log(F_c/3)}{\log(D_{fc}/d)} \quad (2)$$

여기서,  $F_c$ 와  $D_{fc}$ 는 각각 2.0과 2,000  $\mu\text{m}$ 가 일반적으로 이용되며(Khelifa and Hill, 2006; Son and Hsu, 2008; Son and Hsu, 2009) 만약 일차입자의 크기와 플럭의 크기가 같은 경우의  $F$ 는 3.0, 플럭이 성장하여  $D_{fc}$ 에 가까워질수록 2.0의 값을 갖게 된다. Eqs. (1) and (2)를 통해 계산된 프랙탈 차원을 이용하여 플럭의 밀도를 계산하면 Eq. (3)과 같다(Kranenburg, 1994).

$$\rho_f - \rho_w = (\rho_s - \rho_w) \left( \frac{D}{d} \right)^{F-3} \quad (3)$$

$$\phi_f = \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_f - \rho_w} \right) \phi_s \quad (4)$$

여기서,  $\rho_f$ 와  $\rho_s$ 는 플럭과 일차입자의 밀도이며  $\rho_w$ 는 유체(물)의 밀도이다.  $\phi$ 는 전체 유체의 단위 체적 내에서 입자가 차지하는 부피인 부피 농도를 뜻하는데  $\phi_f$ 는 유사의 점착성으로 인해 형성된 플럭이 단위부피 내에서 차지하는 플럭의 부피농도를 의미하며  $\phi_s$ 는 플럭의 형성 유무와 관계없이 적용되는 유사 알갱이(일차입자)의 부피농도를 의미한다. 이와 같이 두 종류의 부피농도의 개념을 적용하는 이유는 일차입자의 개념이 중요한 경우와 플럭의 개념이 중요시 되는 경우를 구분하여 적용하기 위함이다(Son, 2009).

Son and Hsu (2009)는 점착성 유사의 응집과 파괴가 서로 경쟁적인 관계를 유지하면서 응집과정이 지속된다고 가정하고 가변적 항복강도 개념을 적용하여 점착성 유사의 응집 모형을 개발하였다.

$$\frac{dD}{dt} = \frac{Gd^\beta}{\beta \ln \frac{D}{d} + 1} \left( \frac{ck_A'}{3\rho_s} d^{F-3} D^{-F+4-\beta} - \frac{k_B'}{3} \left( \frac{\mu G}{B_1} \right)^q d^{-p+2qF/3} D^{1-\beta+2q(3-F)/3} (D-d)^q \right) \quad (5)$$

여기서,  $c$ 는 유사의 질량 농도,  $\mu$ 는 유체(물)의 점성계수이다.  $G$ 는 난류의 소산매개변수로 유사 입자들 사이에서 충돌이 발생하는 빈도를 나타내는 개념으로 이해된다.  $k_A'$ 와  $k_B'$ 은 상수로서 각 실험의 조건에 따라 보정된다.  $p$ 와  $q$ 는 실험 상수이며 Winterwerp (1998)은 각각 0.5와 1.0의 값을 제안하였다.  $B_1$ 은 플럭의 파괴된 평면에 존재하는 일차입자들의 점착력을 모두 더해 플럭의 단면적으로 나눈 값으로 플럭이 파괴되는 항복강도를 구하는 과정에서 이용되는 수이다(Son and Hsu, 2009).

## 2.2 흐름 특성 및 유사 이동의 모형화

본 논문에서는 난류가 충분히 발달한 비압축성 유체의 흐름을 가정하며 부피 농도의 바닥면 경계조건으로 동일한 크기의 입자가 가지는 최대의 Space-Filling 농도인 0.63을 이용한다. 유체의 운동량 방정식은 Euler-Euler 이 상방정식으로부터 얻어지며 Eqs. (6) and (7)에 의해 계산된다(Son and Hsu, 2011a).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_w(1-\phi_s)} \frac{\partial \tau_{xz}^w}{\partial z} + \frac{(s_s-1)\phi_s}{1-\phi_s} g \sin \alpha_s \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho_w(1-\phi_s)} \frac{\partial \tau_{yz}^w}{\partial z} \quad (7)$$

$p$ 는 유체의 압력,  $s_s$ 는 유사의 상대 비중,  $g$ 는 중력가속도,  $\alpha_s$ 는 하상의 기울기를 나타낸다.  $\tau_{yz}^w$ 와  $\tau_{xz}^w$ 는 유체의 전단응력을 의미하며 Eqs. (8) and (9)를 통해 계산된다.

$$\tau_{xz}^w = \rho_w (\nu + \nu_t) \frac{\partial u}{\partial z} \quad (8)$$

$$\tau_{yz}^w = \rho_w (\nu + \nu_t) \frac{\partial v}{\partial z} \quad (9)$$

$\tau_{xz}^w$ 는  $x$ 축에 수직으로  $z$ 방향을 향하는 유체의 전단응력을 의미하고,  $\tau_{yz}^w$ 는  $y$ 축에 수직으로  $z$ 방향을 향하는 유체의 전단응력을 의미한다. Eqs. (8) and (9)에 포함된  $\nu$  ( $=\mu/\rho$ )는 물의 동점성계수이며  $\nu_t$ 는 난류에 의한 와점성계수(혹은 난류점성계수)이다. 유체의 점성계수와 와점성계수의 합을 유효 점성계수라 한다. 와점성계수는 Eq. (10)을 통해 얻는다.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} (1-\phi_f) \quad (10)$$

Eq. (10)의  $C_\mu$ 는 실험적 상수로 0.09값을 가지며  $k$ 와  $\varepsilon$ 은 난류 운동에너지와 난류 에너지의 소산율을 의미한다.  $1-\phi_f$ 는 전체 유체 내에서 난류에 의한 와점성계수를 계산하기 위하여 플럭이 차지하는 부피만큼의 영향을 배제하기 위한 항이라 이해된다. 플럭의 크기만큼을 계산에서 제외해야 하는 이유는 플럭 내에 존재하는 유체에서는 난류가 발생하지 않는다는 가정을 적용하였기 때문이다.  $k$ 와  $\varepsilon$ 은 Eqs. (11) and (12)로 계산 된다(Son and Hsu, 2011a).

$$(1-\phi_f) \frac{\partial k}{\partial t} = \nu_t \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial (1-\phi_f)k}{\partial z} \right] - (1-\phi_f)\varepsilon + (s_s-1)g \frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial \phi_s}{\partial z} \quad (11)$$

$$(1-\phi_f) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial (1-\phi_f)\varepsilon}{\partial z} \right] - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} (1-\phi_f) + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} (s_s-1)g \frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial \phi_s}{\partial z} \quad (12)$$

Eqs. (11) and (12)에 포함된 Schmidt 수( $\sigma_c$ )를 제외한  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $C_{\varepsilon 3}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ 은 모두 수치 계산 과정에서의 상수이다. Eqs. (11) and (12)에서  $\sigma_c$ 가 포함된 마지막 항은 유사입자의 농도차이로 인한 난류 감소효과(Damping Effect)을 나타내는 항으로 높이에 따른 농도 경사( $\partial \phi_s / \partial z$ )가 항

상 음의 값을 가지므로  $\sigma_c$ 가 증가할 때 난류 감소영향을 나타내는 항은 감소하며  $k$ 와  $\varepsilon$ 은 증가한다. 각 수치 상수에 대한 내용은 Table 1에 정리하였다.

일차입자의 부피 농도를 계산하는 지배방정식은 Eq. (13)이며 이송-확산 방정식으로서 일차입자의 부피농도와 침강속도의 곱으로 플럭의 침강을 나타내는 항과 확산을 통해 부유가 발생하는 과정을 나타내는 항으로 구성된다(Son and Hsu, 2011a).

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \phi_s W_s + \frac{\nu_t + \nu}{\sigma_c} \frac{\partial \phi_s}{\partial z} \right) \quad (13)$$

여기서, 유효 점성계수와  $\sigma_c$ 의 비로 나타낸 항이 확산계수를 의미한다.  $W_s$ 는 유사의 침강속도로 Eq. (14)와 같이 Stokes 법칙과 입자간 간섭효과를 고려하여 계산된다.

$$W_s = \frac{1}{18\mu} (\rho_f - \rho_w) g D^2 (1 - \phi_f)^4 \quad (14)$$

Stokes 방정식은 무한 유체에서 단일 구형 입자의 침강속도를 계산하기 위한 식으로 입자간의 간섭효과를 고려하지 않는다. 따라서 유체 내 입자들의 상호작용 또는 벽면과 입자들의 상호작용과 같은 것들을 침강 거동에 포함시키는 것을 간섭침강 효과라 하며  $(1 - \phi_f)^4$ 은 이러한 간섭효과를 나타낸다.

이상에서 설명된 모형은 Ems/Dollard 하구부에서 측정된 부유사 실측치와의 비교를 통해 검증되었다(Son and Hsu, 2011a). 또한, 흐름조건과 유사한 12시간 주기의 조류 조건에 적용되어 부유사의 이동량 특성을 분석하는 연구와(Son and Hsu, 2011b)와 7초 내외의 주기를 가지는 2차 Stokes 파랑 형태의 비대칭 진동흐름 조건에서 점착성, 비점착성 유사의 이동방향이 가지는 특성 연구(Son and Lee, 2013)에서도 이용되었다.

### 3. 모형의 적용 및 결과 분석

#### 3.1 모의 조건

본 연구에서는 점착성 유사와 비점착성 유사를 대상으로 하며 흐름 조건을 주기를 가지는 진동 흐름(Oscillatory Flow)과 유속의 크기와 방향이 일정한 흐름(흐름, Current)으로 구분하여 수치 실험을 수행하였다. 두 경우

모두 하나의 크기가 4mm인 격자를 적용하여 총 2.0m 높이의 계산영역을 구성하였다. 비점착성 유사의 입자 크기는 매우 가는 모래에 해당되는 100  $\mu\text{m}$ 로 가정하였으며 일차입자의 크기는 4  $\mu\text{m}$ 를 적용하였다. 일차입자와 비점착성 유사의 밀도로는 널리 이용되는 2,650  $\text{kg/m}^3$ 을 가정하였다(Son and Hsu, 2011a). 일반적으로 점착성 유사는 비점착성 유사에 비해 부유가 활발하므로 유사의 종류에 따라 각기 다른 평균 유속 및 한계소류력 조건을 적용하였다. 점착성 유사의 경우 흐름에서는 수심 평균된 유속( $u_{min}$ )이 0.15 m/s가 되도록 보정하였고 진동 흐름에서는 주기( $T$ )가 7s이며 최대 유속( $u_{max}$ )의 크기가 흐름의 수심 평균된 유속과 동일한 값을 가지도록 적용하였다. 진동 흐름의 유속은 파형의 형태가 완벽하게 대칭을 이루는 Sine파형을 가정 및 적용하였으며 시간에 따른 유속은 Eq. (15)와 같다.

$$u(t) = u_{max} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (15)$$

유속이 동일하더라도 흐름과 진동 흐름에서 유사의 퇴적 또는 부유를 결정하는 흐름의 유사 운반 능력은 다르며, 흐름에서의 유사 운반 능력이 더 크다. 따라서 부유사의 부유 거동을 비교 및 분석하고자 할 때 한계소류력( $\tau_c$ )의 크기를 흐름과 진동 흐름에서 동일한 값을 적용하는 것은 타당하지 않다고 판단된다. 흐름 및 진동 흐름에서 한계소류력의 크기는 수심 평균된 농도의 크기가 동일하도록 0.03 kPa과 0.14 kPa을 각각 적용하였다. 또한 비점착성 유사의 경우 유사 입자의 밀도, 크기 및 침강 속도가 점착성 유사에 비해 큰 값을 가지므로 유속의 크기를 0.45 m/s로 가정하였다. 점착성 유사의 응집과 관련된 매개변수는 Table 2에 정리하였으며 실험 조건은 Table 3에 나타내었다.

Fig. 1은 진동 흐름조건에 따른 유속 변화를 나타낸 그림이며 점착성 유사인 경우와 비점착성 유사의 경우에 각각 최대 유속의 크기가 0.15m/s, 0.45m/s인 것이 확인된다.  $\sigma_c$ 의 크기는 0.1 단위로 변화시키며 그에 따른 흐름 특성 및 부유 거동의 변화를 살펴보았다.

#### 3.2 모의결과 및 분석

##### 3.2.1 유사의 부유거동 변화

Table 3에서 제시된 흐름 조건 중 점착성 유사의 유속

Table 1. Numerical Coefficients Adopted for  $k$ - $\varepsilon$  Equations (Son and Hsu, 2011a)

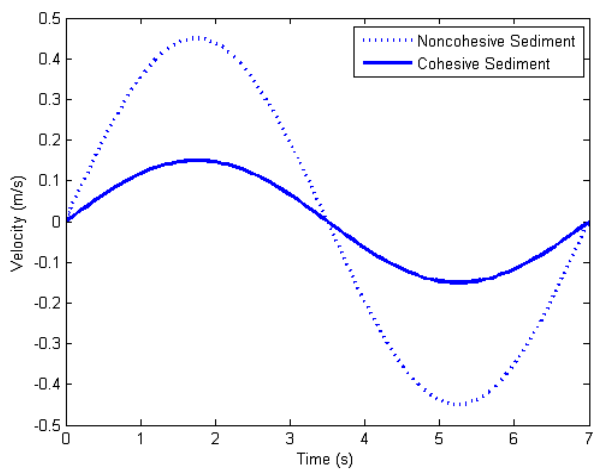
| Coefficient | $C_{\varepsilon 1}$ | $C_{\varepsilon 2}$ | $C_{\varepsilon 3}$ | $\sigma_k$ | $\sigma_\varepsilon$ |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|----------------------|
| Value       | 1.44                | 1.92                | 0.00                | 1.00       | 1.30                 |

**Table 2. Empirical Parameters of Flocculation Models**

| Parameter | $k_A'$  | $k_B'$                | $p$ | $q$ | $B_1$                  |
|-----------|---------|-----------------------|-----|-----|------------------------|
| Value     | 64.4770 | $4.82 \times 10^{-4}$ | 1.0 | 0.5 | $2.63 \times 10^{-14}$ |

**Table 3. Conditions of Numerical Experiments**

| Flow Condition   | Cohesiveness         | Flow Velocity (m/s) | $\tau_c$ (kPa) | Depth-Averaged Concentration (g/l) |
|------------------|----------------------|---------------------|----------------|------------------------------------|
| Current          | Cohesive Sediment    | $u_{min}=0.15$      | 0.020          | 0.0496                             |
|                  | Noncohesive Sediment | $u_{min}=0.45$      | 0.164          |                                    |
| Oscillatory Flow | Cohesive Sediment    | $u_{max}=0.15$      | 0.140          | 0.0142                             |
|                  | Noncohesive Sediment | $u_{max}=0.45$      | 0.390          |                                    |



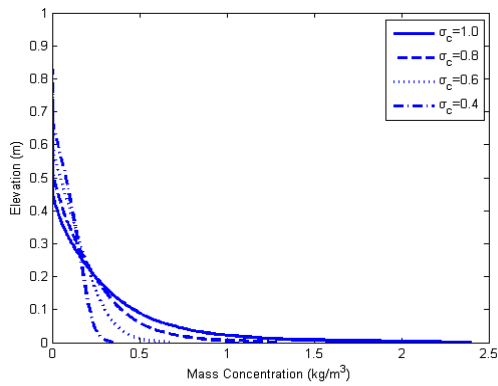
**Fig. 1. Velocity of Oscillatory Flow Condition**

을 기준으로 계산영역 2m에 대하여 레이놀즈수를 계산해보면 약  $3.0 \times 10^5$ 의 값을 가진다. 따라서 난류가 충분히 발달된 흐름으로 판단되며 비점착성 유사의 경우에는 유속이 더 큰 값을 가지므로 이 경우 또한 난류가 충분히 발달하였다고 가정한다.

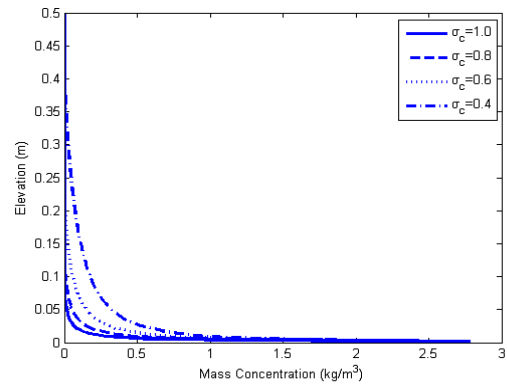
Fig. 2는  $\sigma_c$ 의 변화에 따른 유사의 부유 거동의 변화를 나타내는 것으로 질량 농도의 연직 분포를 나타낸다. Fig. 2에서 실선, 파선, 점선, 일점쇄선은 각각  $\sigma_c$ 의 값이 1.0, 0.8, 0.6, 0.4일 때의 결과이다. Figs. 2(a) and 2(b)는 각각 흐름 조건에서 점착성 유사 및 비점착성 유사의 질량농도 연직 분포를 나타내며 Figs. 2(c) and 2(d)는 진동 흐름 조건에서 점착성 유사 및 비점착성 유사의 질량농도 연직 분포를 나타낸다. Figs. 2(a) and 2(c)를 통해 점착성 유사의 경우  $\sigma_c$ 가 감소할수록 유사의 부유가 활발하게 계산되는 것을 확인할 수 있다. 또한 흐름 조건의 경우,  $\sigma_c$ 가 1.0에서 0.4로 감소할 때 부유 높이가 약 23cm 정도 증가하

는 것을 확인할 수 있다. 그러나 수심 평균된 유사의 농도를 통해 부유사량을 계산해 본 결과,  $\sigma_c$ 가 감소할 때 총 부유되는 부유사의 양은 감소하는 것으로 나타났다. Figs. 2(b) and 2(d)에 나타난 비점착성 유사의 경우  $\sigma_c$ 가 감소할수록 부유가 활발하며 부유사의 양 또한 증가하는 일관된 경향이 나타난다. 이와 같이  $\sigma_c$ 의 감소에 따라 부유가 활발해지는 것은  $\sigma_c$ 가 Eq. (13)에서와 같이 확산 항에서 분모로 포함되어 확산 계수의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

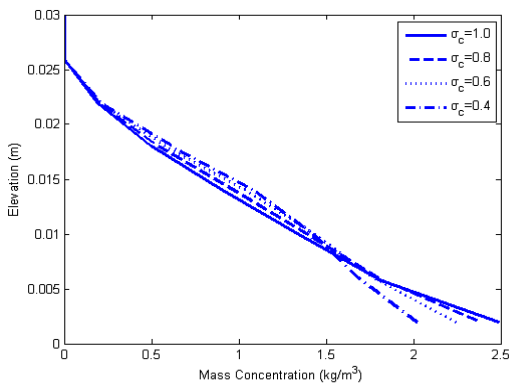
Fig. 3은  $\sigma_c$ 가 0.3이고 점착성 유사와 비점착성 유사의 수심 평균된 유사의 농도가 동일한 경우에 대해 질량 농도 연직 분포를 흐름 조건 별로 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 흐름조건에 따른 결과이고 Fig. 3(b)는 진동 흐름조건에 의한 결과이다. 이때 수심 평균된 질량 농도는 각각 49.6 mg/l과 14.2 mg/l이다. Fig. 3을 통해 유사의 점착성 유무로 인한 부유 거동의 차이를 살펴볼 수 있다. 점착성 유사와 비점착성 유사의 하상 농도가 다른 이유는 적용한 한계소류력의 크기 차이에 의한 결과라 판단된다. Fig. 3(a)에서 비점착성 유사에 비해 점착성 유사의 부유 높이가 약 10cm 더 높으며 따라서 확산이 더 활발한 것이 확인된다. 반면 Fig. 3(b)는 비점착성 유사의 경우에 부유 높이가 더 높고, 유사의 확산 정도는 거의 동일한 것이 확인된다. 그러나 이는 진동 흐름의 질량 농도 계산과정에서 평형에 도달한 진동 흐름의 한 파장을 평균하여 얻어진 결과이기 때문이라 판단된다. 가는 모래의 입자크기는 100  $\mu\text{m}$ 로 일정한 반면 점착성 유사의 경우 크기와 밀도가 지속적으로 변화한다.  $\sigma_c$ 가 0.3일 때 플럭의 평균된 크기와 밀도는 각각 31.36  $\mu\text{m}$ 와 2.038  $\text{kg/m}^3$ 으로 비점착성 유사의 경우에 비해 모두 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 Fig. 3(a)에서 점착성 유사가 비점착성 유사에 비해



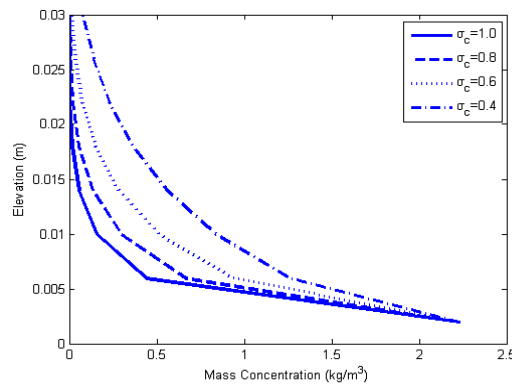
(a) Current - Cohesive Sediment



(b) Current - Noncohesive Sediment

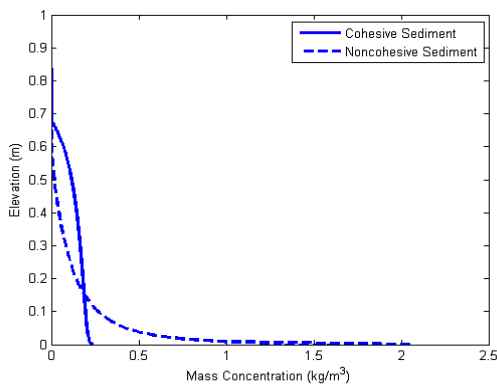


(c) Oscillatory Flow - Cohesive Sediment

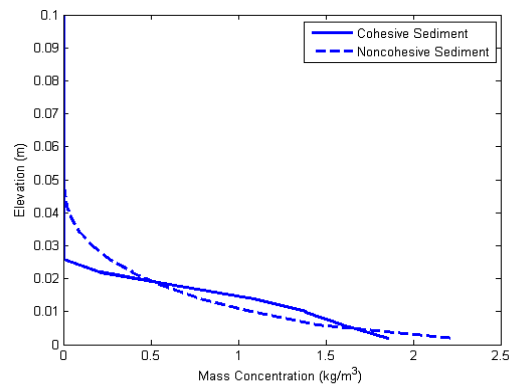


(d) Oscillatory Flow - Noncohesive Sediment

Fig. 2. Vertical Profile of Calculated Mass Concentration



(a) Current



(b) Oscillatory Flow

Fig. 3. Comparison of Mass Concentration between Cohesive Sediment and Non-cohesive Sediment under the Condition of  $\sigma_c=0.3$

부유되는 높이가 약 10 cm 정도 더 높으며 부유가 활발한 이유는 이에 따른 결과라고 생각된다. Figs. 2 and 3을 통해 흐름의 종류에 관계없이  $\sigma_c$ 의 감소 또는 증가에 따라 부유사의 부유 거동이 동일한 경향이 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서  $\sigma_c$ 에 따른 부유 거동의 변화가 흐름으로

인한 특성이 아님이 확인된다.

### 3.2.2 $\sigma_c$ 변화에 따른 플럭의 성장과 침강속도

흐름 및 진동 흐름에서  $\sigma_c$ 의 변화에 따라 유사 입자의 집착성으로 인한 플럭의 크기 성장에 어떠한 영향이 나타

나는지를 살펴보았다. 이를 위해  $\sigma_c$ 에 따른 수심 평균된 플럭의 크기와 플럭의 크기 제곱에 비례하며 유사한 연직 부유를 결정하는 침강 속도의 변화를 Fig. 4에 나타냈으며  $\sigma_c$ 변화에 따른 플럭 크기의 연직 분포를 Fig. 5에 나타내었다. Figs. 4(a) and 4(b)는 흐름 조건에서의 결과를 Figs. 4(c) and 4(d)는 진동 흐름조건에서의 결과를 나타낸다. Fig. 4(a)는  $\sigma_c$ 에 따른 수심 평균된 플럭의 크기이다. 이 결과를 통해 선형 비례가 성립한다고 할 수는 없으나,  $\sigma_c$ 가 증가할수록 수심 평균된 플럭의 크기가 증가하는 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있다.  $\sigma_c$ 는 이송-확산 방정식의 확산계수에 포함되는 계수이나 Eqs. (11) and (12)의 마지막 항에서 나타나듯 난류 감소효과에도 포함된다. Fig. 4(a)에 따르면  $\sigma_c$ 의 크기가 증가할수록 부유사의 양이 증가하는 것이 확인되는데, 이에 따라 플럭의 응집이 증가하는 것으로 플럭 크기의 증가 이유를 생각해 볼 수 있다. Figs. 4(b)는 Fig. 4(a)의 계산결과를 토대로 산정된 플럭의 침강속도를 나타낸 그림으로 Stokes법칙에 따르면 침강속도는 크기의 제곱에 비례한다. 따라서 플럭의 크기와 동일한 경향이 관측되는 것을 확인할 수 있다. Figs. 4(c) and 4(d)는 진동 흐름조건 중  $\pi/2T$ 위상

에 해당할 때의 수심 평균된 플럭의 크기와 침강 속도를 계산한 결과이다.  $\sigma_c$ 가 증가할수록 수심 평균된 플럭의 크기는 감소하며 침강속도 또한 이로 인해 감소하는 것이 확인된다. Fig. 5는  $\sigma_c$ 의 변화에 따른 플럭 크기의 연직 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 5(a)는 흐름조건에서의 결과이다. Fig. 5(a)의 결과에 따르면  $\sigma_c$ 가 증가할수록 유사하게 최대 부유하는 높이는 낮아지며 최대 부유 높이에서의 플럭 크기는 감소하는 것이 확인되고 이러한 경향은 Fig. 4(a)와도 일치한다. 진동 흐름 조건의 경우에는 한주기( $T$ )의  $\pi/2T, \pi/T, 3\pi/2T, 2\pi/T$ 의 위상에 해당하는 플럭 크기의 연직 분포를 Fig. 5(b)부터 Fig. 5(e)를 통해 나타냈다. 진동 흐름의 경우에도  $\sigma_c$ 가 증가할수록 최대 부유높이에서 플럭의 크기가 증가하는 흐름과 동일한 경향이 확인되거나 부유높이 차이는 흐름 조건에서 만큼 크지 않다. 각 위상별 흐름 특성으로는  $\pi/2T$ 와  $3\pi/2T$ 는 흐름의 유속이 방향은 반대이나 0.15m/s로 가장 큰 값을 가질 때이며  $\pi/T$ 와  $2\pi/T$ 는 유속이 0m/s일 때이다.

### 3.2.3 $\sigma_c$ 와 난류 감소효과

위에서 언급된 바와 같이  $\sigma_c$ 는 난류 감소효과와 관계 되

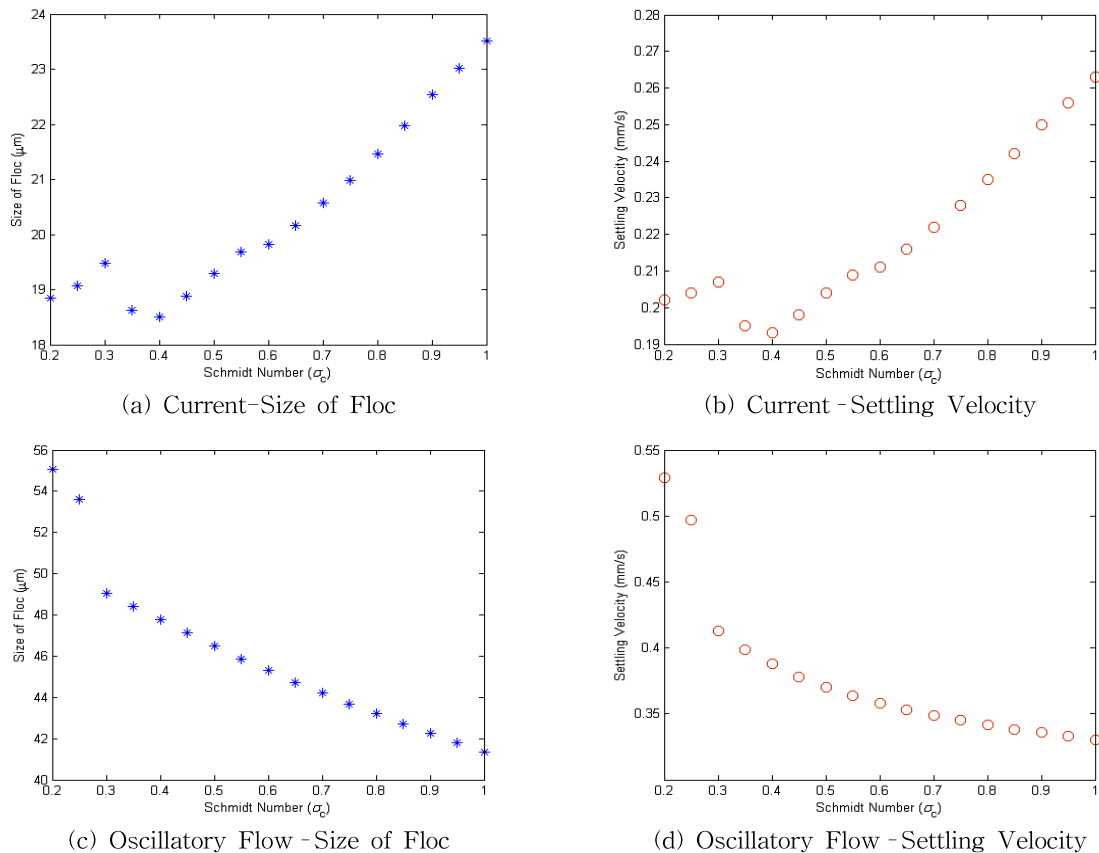


Fig. 4. Change of Floc Size and Settling Velocity according to Schmidt Number



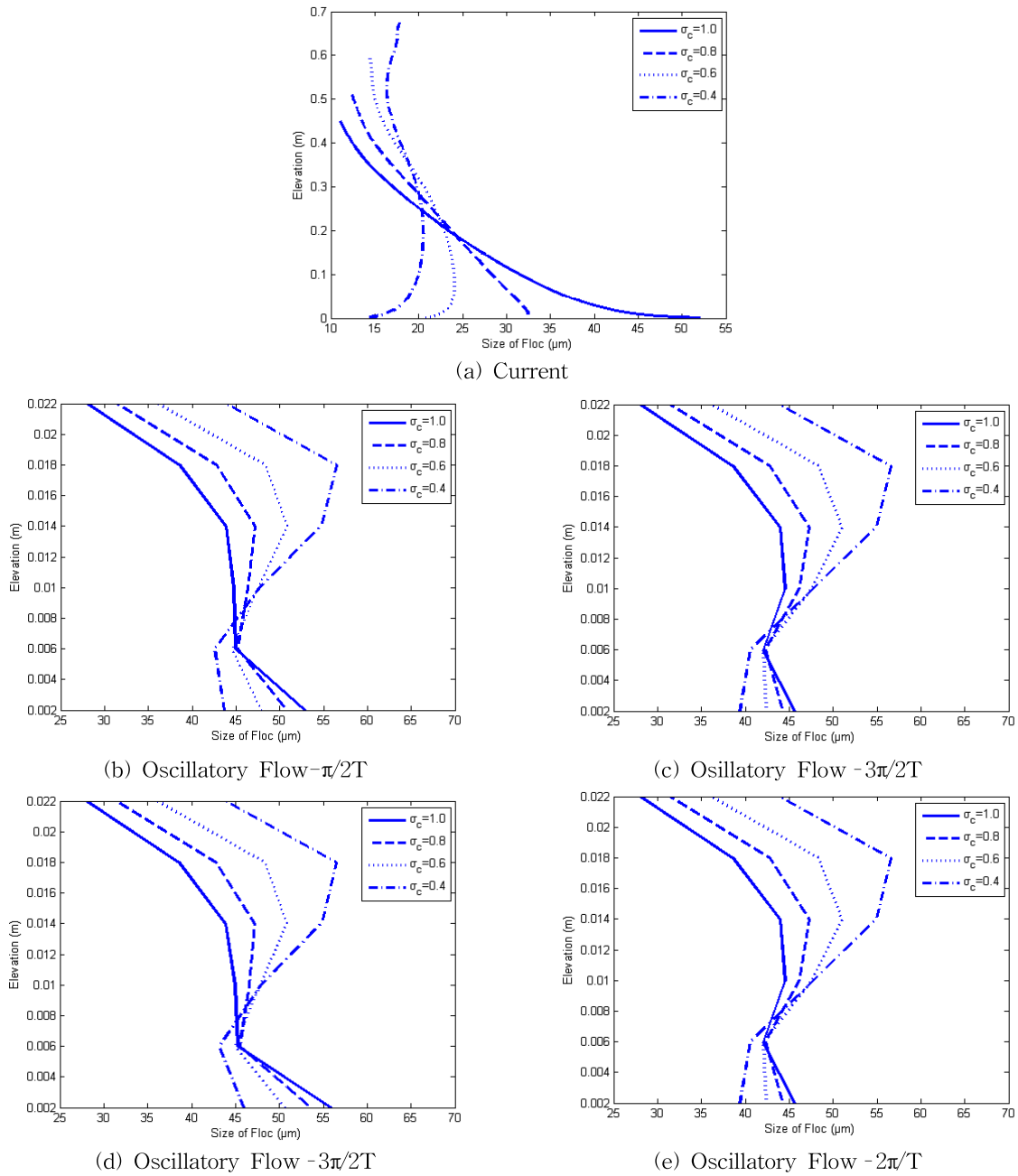


Fig. 5. Size of Floc under the Condition of Oscillatory Flow

는 상수이다. 난류 감소효과란 유사 존재로 인해서 난류의 구조가 변화하는 것을 의미한다. 즉 유사의 밀도성층화 현상에 의해 난류의 감소효과가 나타난다. 난류 감소효과를 고려하지 않을 경우 농도와 유속의 연직 분포가 과대 산정되는 것이 확인된 바 있다(Winterwerp, 2001; van Rijn, 2007). 따라서 난류 감소효과를 고려하는 경우(Damping Effect On, DEN)와 고려하지 않는 경우(Damping Effect off, DEF), 흐름 조건하에서 점착성 유사에 대해 난류 구조의 변화를 살펴보았다. Fig. 6은 난류 감소효과를 고려 여부

및  $\sigma_c$ 에 따른 유속과 난류 강도의 연직 분포를 나타낸다. 이 때, 난류 강도는 일반적으로 적용되는 난류 에너지 제곱근을 평균 유속으로 나누지 않은 난류에너지 제곱근의 결과를 도시하였다. 난류 에너지의 생성과 소멸은 연속적으로 발생하는데 생성과 소멸을 지속하기 위해서 필요한 에너지 공급은 유속 경사를 통해서 레이놀즈 분해요소 중 평균 흐름의 에너지로부터 공급된다. 따라서 Fig. 5(a)에서 나타나듯 난류 감소효과를 고려할 경우 약 1.4m부터 수면으로 가까워질수록 유속경사가 0에 가까워지는 구간

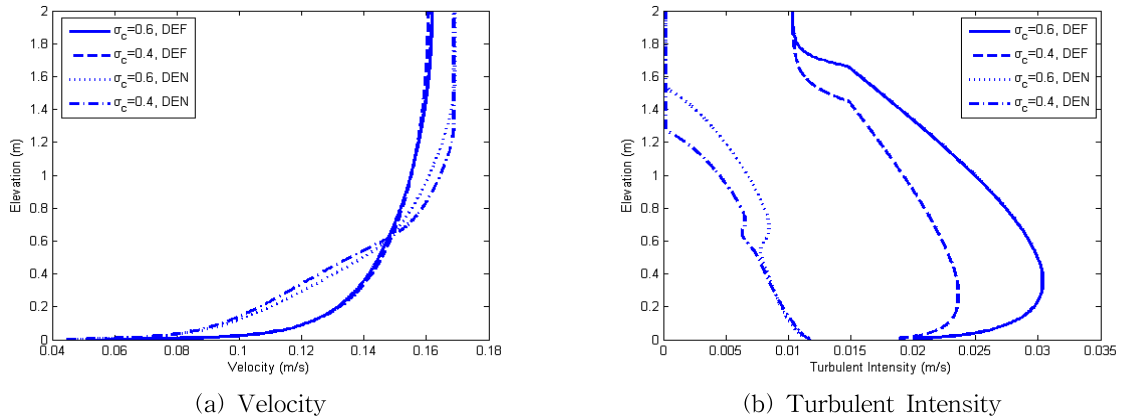


Fig. 6. Effect of Damping Consideration on Velocity and Turbulence Intensity Calculations

이 나타나는데 이는 Fig. 5(b)에서 난류강도가 0으로 계산되는 구간과 일치하는 것이 확인된다. 앞서 언급된 바와 같이 난류 감소효과를 고려하지 않을 경우 Fig. 5(a)에서 유속의 연직 분포가 과대 산정되는 것이 본 연구결과에서도 나타나며 이로 인해 난류 에너지도 큰 값을 갖는 것이 Fig. 5(b)에서 확인된다. 또한 Fig. 5(a) 및 Fig. 5(b)를 통해  $\sigma_c$ 가 증가할 때 유속과 난류 에너지가 증가하는 경향이 나타나며 이는 Eqs. (11) and (12)로부터 예측되는 결과와도 일치한다. Fig. 6(b)로부터 난류 감소효과를 고려 여부에 따라 난류 강도의 연직 분포가 매우 다른 경향을 띠는 것이 확인된다. 약 0.6m부터 0.8m를 보면 난류 감소효과를 고려하지 않는 경우 일관되게 강도가 감소하는 경향이 나타나지만 난류 감소효과를 고려하는 경우 변곡점이 나타나는 것이 확인된다. 이러한 현상의 원인으로 유사의 밀도성층화에 의한 난류 감소효과를 생각해 볼 수 있다. 점착성을 띠는 부유사의 이동 과정에서는 층이 둘로 나뉘는 밀도성층화 현상이 나타나는데 대부분의 부유사는 아래층에 존재한다. 이 때 층 경계에서 유체 층의 유사 운반 능력이 감소할수록(유속이 감소할수록) 난류로 인한 수직혼합은 현저하게 감소한다. 이러한 혼합의 감소는 난류의 붕괴와 연직 농도 분포의 파괴를 가져오며 일반적으로 붕괴는 수면부터 진행된다. 이러한 예측을 검증하기 위하여  $\sigma_c$ 가 0.4인 경우와 0.6인 경우에 대하여 각각 높이에 따른  $Ri_g$ 를 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 여러 문헌 조사 결과에 따르면  $Ri_g$ 가 임계값인 0.25를 초과할 때 성층 흐름이 파괴되며  $\sigma_c$ 가 0.6에 해당하는 경우 약 0.13m부터 0.251값을 가지며 성층 흐름이 파괴된 것이 확인된다. 이와 같이 성층흐름의 척도로서  $Ri$ 가 이용되며  $Ri$ 의 형태 중 하나인  $Ri_g$ 를 계산하기 위해서는 정밀한 분해능을 가지는 기기로 유속과 밀도의 동시

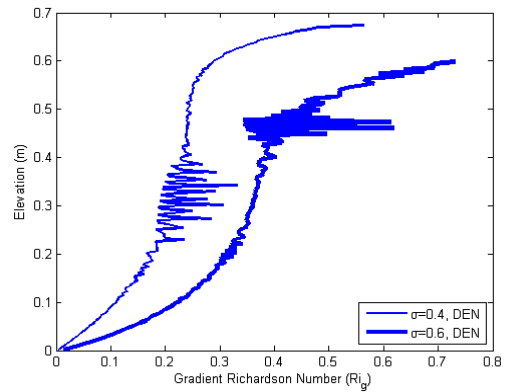
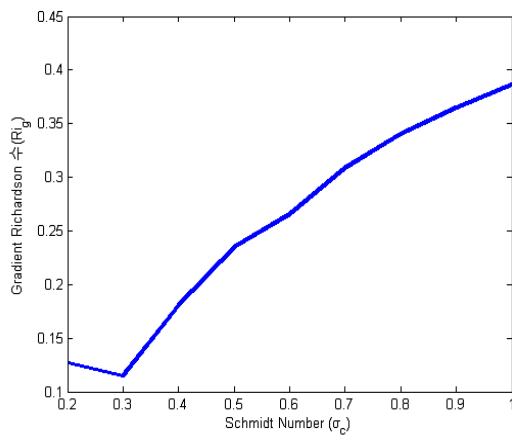


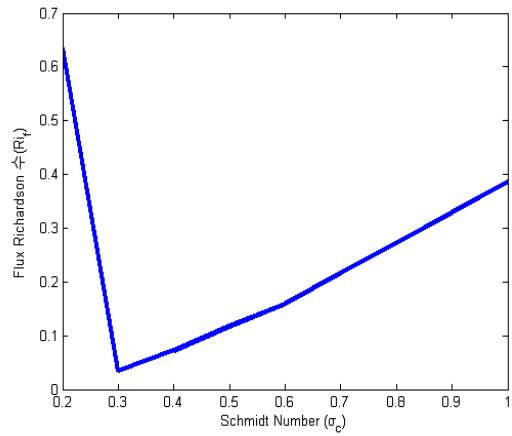
Fig. 7. Calculated Gradient Richardson Number

측정이 요구되기 때문에  $Ri_g$ 가 일반적으로 더 많이 이용된다. Fig. 8은 수치 실험결과로 산정된  $Ri_g$ 의 및 레이놀즈 유추법을 적용하여 계산된  $Ri_g$ 를  $\sigma_c$ 변화에 따라 나타낸 그림이다. 점착성 유사의 부유 거동에서 밀도성층화 현상이 유지되기 위하여  $Ri_g$ 가 임계값을 넘지 않아야 하며  $\sigma_c$ 가 0.5보다 작은 값을 가질 때 이를 만족하는 결과가 도출되었다(Fig. 8a). 또한 흐름이 성층화된 조건 하에서 부유사의 수직 혼합이 발생 및 유효하기 위해서는  $Ri_g$ 가 임계값인 0.3보다 작아야 한다(Townsend and Ellison, 1970). 따라서 밀도 성층화현상이 나타나는 상태에서 부유사의 수직 혼합이 유지되기 위한  $\sigma_c$ 는 약 0.3부터 0.5의 범위를 가지는 것이 확인된다.

점착성 유사와 동일하게  $\sigma_c$ 가 0.6과 0.4일 때 각각 난류 감소효과 고려여부에 따른 영향을 살펴보기 위해 수행한 실험에서 비점착성 유사의 경우에는  $\sigma_c$ 의 변화에 따른  $u$  및  $k$ 의 변화는 관찰할 수 없었으며 난류 감소효과 고려 여부에 따른 차이만 나타났다(Fig. 9). 비점착성 유사의 경우에 대한  $\sigma_c$ 의 변화에 따른  $u$  및  $k$ 는 본 논문에서 나타내지 않았다.



(a) Gradient Richardson Number



(b) Flux Richardson Number

Fig. 8. Variation of Richardson Number according to Schmidt Number

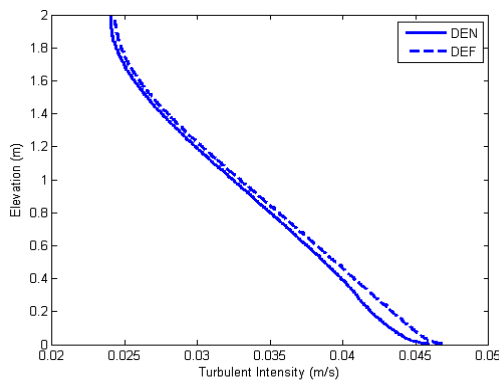


Fig. 9. Variation of Turbulent Intensity under the Condition of  $\sigma_c = 0.5$  (Noncohesive Sediment)

#### 4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는  $\sigma_c$ 에 따른 부유사의 부유 거동 및 흐름 특성 계산의 변화를 살펴본 후, 그에 따라 나타나는  $Ri_f$ 와  $Ri_g$ 를 기준으로 하여 타당한  $\sigma_c$ 의 범위를 산정하는 것을 목적으로 수행되었다. 본 연구결과로부터  $\sigma_c$ 에 따라 유사의 부유 거동 계산이 확연히 변화하며 그로 인해 흐름 특성 계산 역시 다른 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 먼저, 부유 거동 측면에서는 유사의 점착성 여부 또는 흐름의 종류와는 관계없이  $\sigma_c$ 가 작아질수록 유체 내에서 유사가 부유 되는 높이가 증가하는 모의결과를 보였다. 그러나 수심 평균된 질량 농도를 이용하여 총 부유량을 산정하는 경우에는  $\sigma_c$ 의 변화에 따른 부유의 감소와 증가가 점착성 여부에 의해 정반대 경향으로 나타나는 것을 발견하였다. 점착성 유사의 성층 흐름조건에서 수직 혼합이 유효하기 위한 기준으로  $Ri_f$ 와  $Ri_g$ 에 따른  $\sigma_c$ 의 유효 범위를 산정하였다. 여

기서 성층 흐름이란, 점착성 유사의 경우 유속이 감소로 인하여 퇴적되는 유사는 단단한 하상을 구성하지 않고 흐름은 유체 층과 유체-유사(Fluid mud) 두개의 층으로 분리되는 것을 말한다. 이 때 유체 층의 유사 운반 능력이 감소할수록 층의 경계에서 난류로 인한 수직 혼합은 현저하게 감소된다. 이러한 혼합의 감소는 난류 구조의 파괴를 가져오며 Townsend and Ellison (1970)에 따르면  $Ri_f$ 가 임계값인 0.3을 초과할 때부터 진행된다. 그러나 Figs. 7 and 8에서 도시한 것과 같이 본 연구에서 수행한 여러  $\sigma_c$ 에 따른 결과를 통해  $\sigma_c$ 가 0.5보다 작을 때 성층 흐름조건에서의 수직 혼합이 유효한 것으로 확인하였다. 본 연구의 결과를 통해  $\sigma_c$ 가 난류의 구조 및 유사의 부유 계산에 큰 영향을 미치는 상수임이 다시 한 번 확인되며  $\sigma_c$ 에 따라 부유 및 흐름 특성 계산이 크게 변하는 것을 알 수 있다. 그러나 이번 연구에서 계산된  $Ri_f$ 와  $Ri_g$ 는 레이놀즈의 유추법이 성립한다는 가정을 전제로 하며 분석 역시 제한된 수치 실험 하에서의 결과를 근간으로 한다. 따라서  $\sigma_c$ 가 0.5보다 작을 때 성층 흐름이 유효하다는 것을 일반화하기에는 무리가 있다. 따라서  $\sigma_c$ 가 향후의 연구에서는 수행 조건에 따라 달리 적용되어야 하는 것을 확인하는 것이 본 연구의 목적이 되며 본 연구에서 도출된 결과는 향후 실제 실험결과 또는 현장측정을 통한 검증이 필요하다. 본 장의 첫 번째 단락에서 언급된 점착성 여부에 따른 총 부유량의 상반된 경향 역시 이전 연구결과에서는 찾아볼 수 없었던 새로운 사실로 추후에 이에 대한 보다 심도 있는 연구가 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 충남대학교의 2011년도 학술연구비(신임교

수정착금) 및 2014년도 한국연구재단 일반연구자지원사업(No. NRF-2011-0010749)의 지원을 받아 수행되었음.

## References

- Amoudry, L., Hsu, T.-J., and Liu, P.L.-F. (2005). "Schmidt number and near-bed boundary condition effects on a two-phase dilute sediment transport model." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, No. C9, pp. C09003.
- Benoit, C.-R., and Beckers, J.-M. (2010). Introduction to geophysical fluid dynamics: physical and numerical aspects. Elsevier.
- Celik, I., and Rodi, W. (1988). "Modeling suspended sediment transport in nonequilibrium situations." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No. 10, pp. 1157-1191.
- Cellino, M. (1998). *Experimental study of suspension flow in open channels*. Ph.D. dissertation, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, France.
- Cellino, M., and Graf, W. (1999). "Sediment-laden flow in open-channels under non-capacity and capacity conditions." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 5, pp. 455-462.
- Galland, J.-C., Laurence, D., and Teisson, C. (1997). *Simulating turbulent vertical exchange of mud with a reynolds stress model*. Proceedings of the 4th nearshore and estuarine cohesive sediment transport conference INTERCO'94, John Wiley & Sons, allingford, UK, ed. T.N. Burt, W.R. Parker and J. Watts, pp. 439-448.
- Howard, L.N. (1961). "Note on a paper by J.W.Miles." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 10, pp. 509-512
- Hsu, T.-J., and Hanes, M. (2004). "Effects of wave shape on sheet flow sediment transport." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, No. C5, pp. C05025.
- Khelifa, A., and Hill, P.S. (2006). "Models for effective density and settling velocity of flocs." *Journal of Hydraulics Research*, Vol. 44, No. 3, pp. 390-401.
- Kranenburg, C. (1994). "The fractal structure of cohesive sediment aggregates." *Estuarine Coastal Shelf Science*, Vol. 39, No. 6, pp. 451-460.
- Kundu, P.K. (1990). Fluid mechanics. Academic Press, San Diego.
- LEES, B.J. (1981). "Relationship between eddy viscosity of seawater and eddy diffusivity of suspended particles." *Geo-Marine Letters*, Vol. 1, No. 3-4, pp. 249-254.
- Miles, J.W. (1961). "On the stability of heterogeneous shear flows." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 10, No. 4, pp. 496-508.
- Olsen, N.B., and Stokseth, S. (1995). "Three-dimensional numerical modeling of water flow in a river with large bed roughness." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 571-581.
- Ribberink, J.S., and Al-Salem, A. (1995). "Sheet flow and suspension of sand in oscillatory boundary layers." *Coastal Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 205-225.
- Son, M. (2009). Flocculation and transport of cohesive sediment. Ph.D. dissertation, University of Florida, Gainesville, Florida, United States.
- Son, M., and Hsu, T.-J. (2008). "Flocculation model of cohesive sediment using variable fractal dimension." *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 8, No. 1, pp. 55-71.
- Son, M., and Hsu, T.-J. (2009). "The effect of variable yield strength and variable fractal dimension on flocculation of cohesive sediment." *Water Research*, Vol. 43, No. 14, pp. 3582-3592.
- Son, M., and Hsu, T.-J. (2011a). "The effects of flocculation and bed erodibility on modeling cohesive sediment resuspension." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, No. C3, pp. C03021.
- Son, M., and Hsu, T.-J. (2011b). "Idealized study on cohesive sediment flux by tidal asymmetry." *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 11, No. 2, pp. 183-202.
- Son, M., and Lee, G.-h. (2013). "On effects of skewed and asymmetric oscillatory flows on cohesive sediment flux: Numerical study." *Water Resources Research*, Vol. 49, No. 7, pp. 4409-4423.
- Tennekes, H., and Lumley, J.L. (1994). A first course in turbulence, The MIT press.
- Thrope, S.A. (1971). "Experiment on the instability of stratified shear flows: Miscible fluids." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 46, No. 2, pp. 299-319.
- Toorman, E. (2003). *Validation of macroscopic modeling of particle-laden turbulent flows*. Proceedings 6th

- Belgian National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Gent.
- Turner, J.S. (1973). Buoyancy effects in fluids, Cambridge University Press.
- Van Rijn, L.C. (1984). "Sediment transport, Part II: Suspended load transport." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, No. 11, pp. 1613-1641.
- Van Rijn, L.C. (2007). "Unified View of Sediment Transport by current and waves. II: Suspended Transport." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 6, pp. 668-689.
- Wilcox, D.C. (1988). "Reassessment of the scale determining equation for advanced turbulence models." *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 26, No. 11, pp. 1299-1310.
- Winterwerp, J.C. (1998). "A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 36, No. 3, pp. 309-326.
- Winterwerp, J.C. (2001). "Stratification effects by cohesive and noncohesive sediment." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. C10, pp. 22559-22574.
- Winterwerp, J.C. (2002). "On the flocculation and settling velocity of estuarine mud." *Continental Shelf Research*, Vol. 22, No. 9, pp. 1339-1360.
- Winterwerp, J.C. (2006). "Stratification effects by fine suspended sediment at low, medium, and very high concentrations." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, No. C5, pp. C05012.
- Winterwerp, J.C., and van Kesteren, W.G.M. (2004). Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment. Elsevier.
- Wu, W., Rodi, W., and Wenka, T. (2000). "3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126, No. 1, pp. 4-15.
- Yang, C-T. (2003). *Sediment transport theory and practice*. McGraw-Hill.
- Yoon, J.-Y., and Kang, S.-K. (2005). "A numerical model of sediment-laden turbulent flow in an open channel." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 233-240.

|                        |                  |
|------------------------|------------------|
| 논문번호: 14-046           | 접수: 2014.06.11   |
| 수정일자: 2014.07.21/07.21 | 심사완료: 2014.07.21 |