우수관로 슬러리 이송에 따른 난류 전단경계층 검토

Review of Turbulent Shear Boundary Layer by Soil Slurry Transfer in Pipe

송양호* · 윤린** · 이정호***

Song, Yang Ho*, Yun, Rin**, and Lee, Jung Ho***

Abstract

In the classification of the slurry transportation processes, sediment has been mostly classified as suspended sediment flowing with fluid or sediment sank to the bottom of riverbed, though there have been few cases of clarifying the boundary of the two phenomena. A boundary layer is a major factor in determining the capability of transferring sediment. In case of discharges flowed into sewer pipes, most of them flow into as a mixture fluid and soil slurry based on the occurrence of rainfall, and show characteristics of turbulent flows. In this study, an analysis model capable of predicting soil slurry flows within actual sewer pipes based on a numerical analysis model, and proposed a method of estimating boundary layers in the sediment flow. To verify the analysis model, the volume fractions in the pipes were compared based on cases of similar studies. To review the process of transferring sediment, the velocity field and volume fraction by flow conditions including slurry inside of pipes was studied. Based on the result, criteria on the formation of a shear boundary layer were expressed as for figural style by using shear velocity rates and settling velocity rate of particles in pipes.

Key words : Slurry, Boundary Layer, Transportation, Numerical Analysis, Shear Velocity, Settling Velocity

요 지

슬러리의 이송과정은 대개 유체와 함께 흘러가는 부유사나 하상 저면에 가라앉은 퇴적물로 분류되지만 두 현상의 경계를 명확히 구분한 사례는 드물다. 경계층은 퇴적물의 이송능력을 판단할 수 있는 중요 요소이다. 우수관거 내부로 유입되는 유출량의 경우 대부분 강우 발생에 따른 토사 슬러리와와 혼합물의 형태로 유입되며 난류흐름 조건을 갖는 특징을 갖는다. 본 연구에서는 수치해석 모형을 바탕으로 실제 우수관로 내 토사 슬러리의 흐름을 예측할 수 있는 분석모형을 수립하고 퇴적물 흐름의 경계층 추정방법을 제안하였다. 분석모형을 검증하기 위해 유사 실험연구 사례를 토대로 관 내부에서의 체적농도를 비교하였다. 퇴적물의 이송과정을 검토하고자 대상유량 조건별 슬러리를 포함한 관 내부의 유속장과 체적농도를 살펴보았다. 결과를 토대로 관 내부 전단유속과 입자의 침강속도를 활용하여 전단경계층 형성에 대한 기준을 수식적으로 표현하였다.

핵심용어 : 슬러리, 경계층, 이송, 수치해석, 전단유속, 침강속도

1. 서 론

우수관거 내부 슬러리 흐름은 이송 · 침전 및 퇴적의 세 가지 현상학적으로 구분할 수 있다. 이송과정의 명확한 정의는 고체로 된 입자 알갱이들이 우수관거를 타고 유체와

함께 원활히 흘러가는 것을 의미한다. 이송현상은 수자원공학의 수리 · 수문학적 해석에 있어 중요한 과정이고 실제 주변에서 일어나는 현상이다. 대개 퇴적물의 이송은 하천, 저수지와 관계배수를 비롯한 과정에서 일어나며 해양환경과 같은 분야에서도 주로 발생한다. 이송현상은 물리학적 ·

*정회원, 한밭대학교 건설환경공학과 박사과정(E-mail: hanbat@outlook.com)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University

**정회원, 한밭대학교 기계공학과 교수

Member, Professor, Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University

***교신저자, 정회원, 한밭대학교 건설환경공학과 교수(Tel: +82-42-821-1612, Fax: +82-42-821-1589, E-mail: leejh@hanbat.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University

화학적·생물학적으로 접근하는 복잡한 현상에 속한다. 현행 국내 우수관로 설계에 있어 관 내 퇴적물의 침전을 방지하기 위한 최소 설계유속을 규정하고 있다. 그러나 퇴적물의 거동에 초점을 두고 실제적인 거동을 규명한 연구는 미흡하다고 할 수 있으며, 유지관리 측면에 있어 반드시 필요하다. 관련 연구나 설계기준 마련을 위해 뒷받침하는 이론 및 분석적 근거가 필요한 현실이다.

많은 연구자들이 슬러리 이송에 대해 관심을 갖고 한계유속(critical values of velocity)을 이용하여 관계식을 제안하거나 임계값을 제시하여 이송·침전 현상에 대해 정량화 하는 연구 결과들을 제안하였다. 이러한 연구들은 퇴적물 이송현상 예측에 중요한 역할을 했다. 더불어 하상에서의 침식을 예측함으로써 수로 설계에 있어서도 퇴적물을 일정 고려함으로써 통수능 검토에도 많은 도움이 되었다. Einstein(1942), Meyer-Peter and Müller(1948), Brown(1950), Engelund and Hansen(1967), Ackers and White(1973), Van Rijn(1993) 등 많은 연구들이 하상에서의 퇴적물의 흐름을 정의하려고 노력했다. 일반적으로 기존에 제안된 모든 모델들은 일정한 유동에서 균일한 직경을 갖는 비 점착성 입자에 대해 상대적으로 유사한 결과를 제공하였다. 그러나 하천을 대상으로 한 연구결과들이 주를 이루며 우수관거 내부 흐름에 대한 연구를 통해 제시된 결과는 부족하다.

기존에 제안된 하천에서의 경험적 공식을 우수관로의 수리학적 특성에 맞게 수정하면 적용이 가능하다. 하지만 정작 중요한 것은 내부 흐름 특성이다. 우수관거 내부 흐름은 하천의 흐름과 전혀 다른 특성을 가지므로 기존의 모델을 활용할지라도 정확한 예측은 다소 무리가 있다. 더불어 대부분의 우수관거는 침전물이 발생하지 않는 상태를 유지하기 위해 유속이나 전단응력을 고려하여 설계한다. 하지만 설계의 기준은 대개 일관된 값을 고려하여 설계된다.

본 연구에서는 토사 슬러리를 고려한 2상유동(two-phase flow) 해석을 바탕으로 관 내부에서의 유동현상을 검토하였다. 관련 선행 연구로는 Song et al.(2017a), Song et al.(2017b)는 우수관로 내 토사 슬러리의 흐름에 대한 연구를 진행하였다. 다만, 본 연구에서는 이송과정 동안 침전이 발생한 이후에 나타나는 흐름의 경계층을 검토하고자 한다. 흐름의 경계층을 구분함에 있어 중요한 요소는 전단유속과 응력이다. 침전에 따른 퇴적은 결국 관 저면의 하상전단응력이 퇴적물 이동에 대한 한계전단응력 보다 작은 경우에 발생한다. 즉, 하상이나 벽면 근처에서는 매우 큰 전단응력이 발생하는데 이 힘을 견딜 수 있는 충분한 전단강도를 갖는 퇴적물만이 하상에 쌓여 침전층을 형성한다고 볼 수 있다.

본 연구는 기존의 Song et al.(2017b)이 제안한 연구 결과를 활용하였다. 우수관로 내부로 유입 가능한 토사 슬러리를 고려하여 유입 조건을 변화시켜 이송과정에서 발생하는 침전현상을 검토하고 발생 가능한 흐름의 경계층을 검토하는 것에 목적이 있다. 더불어 토사 슬러리를 고려한 2상유동

의 관측 및 해석의 어려움으로 인해 연구결과가 드물어 해당 부분이 본 연구에서 검토하고자 하는 연구목표이다. 그러한 이유로 본 논문의 2상유동 해석의 조건을 다양하게 설정하였다. 분석조건은 2장 3절에 명시하였다.

2. 계산방법 및 해석조건

2.1 수치해석 방법

본 연구에서는 ANSYS-FLUENT Workbench 13.0으로 수치해석을 진행하였다. 고체입자인 토사 슬러리와 유체로 구성된 2상유동 해석에는 Euler-Euler 모델을 적용하였다. Euler-Euler 모델은 수많은 입자들의 움직임을 표현할 때 입자를 개별적으로 추적하는 것이 아니라 분산된 흐름의 형태를 표현하므로 다상유동의 모델링에 주로 사용된다. 해석 과정에서 각 상들은 개별적으로 처리되며 각 단계마다 모든 상들을 결합한 하나의 보존 방정식이 도출된다. 각 상들 사이의 결합은 압력 및 상간의 운동량 교환 계수를 통해 이루어진다. 결국 서로 다른 상이라 하더라도 전체 체적농도의 합은 1로 일정함을 유지해야 한다. 결국 2개의 연속적인 상을 갖는 2상유체 모델로써 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k U_k) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k U_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k U_k U_k) = -\alpha_k \nabla P + \alpha_k \nabla \tau_k + \alpha_k \rho_k g_k + S_k = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k U_k) = 0 \quad (3)$$

여기서 ρ 는 상의 밀도, U 는 평균 속도의 장, P 는 상들의 평균 압력이다. 아래 첨자 k 는 k 번째 연속 위상을 가리킨다. 분산된 각 상들의 방정식은 주어진 계산 Mesh의 셀 내부에서 평균되어 대표값을 얻게 된다. 분산된 각 상을 하나의 연속체로 표현하기 위해서는 높은 체적농도가 요구되며, 따라서 해당 방법은 밀도나 농도가 높은 상을 포함한 유동해석에 적합하다(Jeong, 2009).

2.2 분석모델의 검증

본 연구에서는 Matousek(1997)의 1.4~2.0 mm의 토사 입자들에 대한 실험적 결과를 토대로 동일한 제원을 반영하여 본 연구에서의 수치해석 결과를 대조하였다. 다음의 Fig. 1은 우수관 내부에 1.4~2.0 mm의 입자가 26%의 체적농도 및 2.5~3.0 m/s의 유속조건에서의 이송과정에 대한 해석결과이다. 모델링을 통해 도출된 결과의 흐름이 상단부분 일치한다. 결과적으로 검증에 적용된 두 가지 유속 조건의 변화에 대해 체적농도에 따른 내부 분포가 동일한 경향성을 나타내므로 해석을 위한 난류모형의 검증이 이루어졌다 판단하였다.

(a) Verification result of 2.5m/s flow condition

(b) Verification result of 3.0m/s flow condition

Fig. 1. Verification Results with Matousek(1997) Experimental Study

2.3 수치해석 조건

본 연구에서는 직경 0.6m, 관 연장 10 m의 원형 우수관로를 140,000개의 격자망 구성을 통해 모사하였고, 동일한 유입조건에서 계산효율이 높은 2차원 모델로 해석을 수행하였다. 토사 슬러리 혼합물의 유입유속, 혼합물 중 토사의 체적농도 및 토사의 입자크기를 변수로 선정하여 각각의 변화 조건에 따른 전체 63개 조건에 대해 혼합물의 유속과 입자 분포를 비교·검토하였다. 다음의 Table 1은 해석 대상으로서 유입되는 유체와 토사 슬러리 혼합물의 물성값 및 해석 경계조건을 나타낸다.

Table 1. Basic Information of Analysis Parameters

Classification	Fluid-soil interaction modelling in pipe
Pipe specification	- 0.6m(D) × 10m(L)
Mesh specification	- Generate 140,000 grid
Applied models and flow condition	- Euler-Euler Model - Standard k-ε Model - Turbulent Flow
Pipe inlet condition	- Inlet velocity condition(m/s): 1.0, 2.0, 3.0 - Inlet volume fraction condition(%): 10, 30, 50
Fluid property	- Density(kg/m ³): 998.2 - Kinematic viscosity: 0.001003 Pa·s
Soil slurry property	- Density(kg/m ³): 2,650 - Soil diameter(mm): 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 15.0, 20.0

Fig. 2. Conduit Mesh and Boundary Condition (Song et al., 2017b)

3. 우수관거 내부 슬러리 혼합물의 흐름 특성

3.1 우수관거 내부 토사 슬러리 혼합물의 유동 특성

관 저면에서 발생하는 침전층의 형성은 이송과정에 있어 전단경계층 형성에 중요한 원인이며 시설물의 유지관리가 가능한 주요 참고사항이 된다. 하천이나 하구의 침식이나 바람, 공기의 흐름에서 입자의 이송에 대한 연구에 사용되는 주요 매개변수에는 전단유속을 활용한다.

경계층은 전단유속의 상대적인 값에 따라 분류되며 해당 값을 초과하는 힘을 갖는 입자들에 의해 퇴적층을 형성하고 나머지의 경우 이송과 침전층을 구성하게 된다. 이때 침전된 토사 슬러리 이송과정에 영향을 미치는 중요한 요소는 유동 저항(flow resistance)이다. 퇴적물은 관 저면에서 침전되어 유동 저항을 증가 시키며 통수단면적을 감소시킨다 (Fig. 3).

Liu(1998)와 Butler et al.(2004)은 우수관거 내부에서의 침전물의 이동은 3가지 기본 단계를 포함한다고 언급하였다. 부상(entrainment), 이송(transport) 그리고 퇴적(sedimentation)으로 정의하였다. 세 가지 분류에 따른 전단특성을 표현하면 다음의 Fig. 4와 같다. 이때 경계층의 두께는 일정하지 않으며 전체 흐름구간의 대부분이 난류영역에 속한다.

Raudkivi(1998)는 Fig. 4와 같은 흐름의 경계층을 수치적으로 표현하고자 유동과정 중 경계층의 구분이 관 저면에서 발생하는 전단유속(u_*)와 입자의 침강속도(v_s)의 상대적인 크기에 의존함을 Table 2를 통해 제안하였다.

Fig. 4와 Table 2를 연관지어 서술하면 입자간 점성력이 작용하여 관 저면을 벗어나지 않고 입자가 이동하는 층을 bed load layer로 정의한다. 퇴적층 상단부로 경계층에 해당하며 큰 난류응력의 작용으로 인해 퇴적된 입자들이 이송과 침전에 따른 이동이 활발히 발생하는 지역을 transition layer로 정의하였으며, 이후 대개 난류응력만이 작용하여 이송과정을 포함하는 층을 wash load layer 및 suspended load layer로 구분하였다.

Table 2. Mode of Sediment Transport (Raudkivi, 1998)

Condition	Sediment transport status
$v_s/u_* < 0.6$	■ Particle travel in suspension
$0.6 < v_s/u_* < 2.0$	■ Particle travel in saltation
$v_s/u_* > 2.0$	■ Particle travel as bed load

유동에 대한 마찰저항이 작거나 없기 때문에 이송 과정에서 입자들의 침강속도 역시 작은 값을 갖는다. 따라서 완전한 난류흐름으로써 난류응력이 존재한다. 관거의 흐름방향을 기준으로 전단응력이 상단부를 향하여(유속이 0이 되는 구간) 선형적으로 감소하며, 유체와 고체입자의 격한 혼입이 발생하는 구간이다. 와류나 소용돌이가 발생하나 대개 해당 구간에서의 유속은 일정한 것이 특징이다. 이처럼 토사 슬러리의 이송과정에 많은 흐름 경계층이 존재한다. 대표적으로 구분하였지만 명확히 체계를 구분하는 것은 불가능하다.

전단유속과 하상의 전단응력은 실제로 침전물을 동반하고 이송하는 힘을 의미한다. 임계 값(임계 경계 전단 응력 또는 임계 침식 속도)은 침전물 이동이 불가능한 한계 조건으로 항복이 시작되는 전단응력(운동 한계점)의 값이다. 하상의 거칠기의 경우 바닥에 쌓인 퇴적물 입자의 크기에 따라 값이 산정되며, 유속분포의 변화와 퇴적물의 이송 능력에 영향을 미친다.

결과적으로 침강속도는 유체 역학적 힘이 입자에 가해짐으로써 입자의 이동에 영향을 미치고 이에 따른 경계층의

Fig. 3. Change of Flow Velocity Profile Due to Sedimentation Layer

Fig. 4. Classification of the Flow Layer According to the Shear Stress Characteristics

형성을 의미한다. 난류 흐름조건에서 유속이 증가하면 입자에 작용하는 힘의 크기가 임계값을 초과하면서 관 저면의 퇴적된 입자가 다시 일정한 속도로 동반된다. 임계 조건에서의 관내 전단 응력이 침전물 이동 속도를 지배함을 의미함으로써 유속 의존성이 매우 강하다는 것을 나타낸다.

3.2 우수관로 내 유동 경계층 검토

본 연구에서는 관수로 내 토사의 이동에 대해 유동흐름의 경계층을 검토하고자 한다. 혼탁된 유체의 이동과정에서 경계층을 결정할 수 있는 주요 특성은 흐름과정에서 토사 슬러리의 관 내부 수직 분포와 바닥 경계면에서의 전단유속이다. 전단유속은 관 저면으로 침전되는 토사 슬러리를 재부상과정에 의해 부유시키는 역할을 하며, 이때의 체적농도의 특성에 기인하여 원활한 이송 또는 재 침강과정을 유도한다. 따라서 침전층의 영향으로 인한 전단유속을 검토함으로써 관 저면에서의 전단유속의 변화량을 측정하였다. 결국 이러한 전단유속의 변화량은 운동에너지의 변화량을 의미한다.

전단유속의 경우 일정 단면에서 흐르는 유속분포를 가정할 때, 아래의 식으로 근사치 추정이 가능하다. 다만, 하상 근처에서 상대적으로 얇은 층($z/H < 0.2$)을 설명하는데 주로 쓰이는 벽의 법칙(Law of the Wall)을 토대로 산정이 가능하다.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (4)$$

여기서 u 는 하상을 기준으로 상부 거리 z 에 대한 평균유속, z_0 는 유속의 변화가 찾아들어 0이 되는 하상으로부터의 거리, u_* 는 유동전단속도, κ 는 카르만 상수(Von Karman's constant)이며 약 0.41로 적용된다(Nezu and Rodi, 1985; Nezu and Nakagawa, 1994).

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} = \rho g \sin \theta (h - y) \quad (5)$$

결국 관 저면의 경계에서 일어나는 연속적인 속도의 증가에 따른 변화량을 반영함으로써 이송·침전과정 동안의 전단유속과 전단응력을 산정하게 된다. 다만 임의의 산정지점에서 y 가 불연속적으로 증가한다면 위 Eq. (5)에서 언급된 $\partial u / \partial y$ 는 무한히 증가한다. 결국 유속의 변화가 잦아드는 지점에서의 전단응력이 한계전단응력으로 정의할 수 있다. 위의 식에서 비례상수 μ 를 유체의 점성계수(viscosity)라고 부르는데, 전단력은 유체가 관 내부를 흘러갈 때 유체의 유속으로 인한 관 벽에 생긴 마찰저항력을 관 단면적에 대해 고려한 값이다. 결국 이 마찰저항력은 유속에 비례하고 관 단면적에 반비례하는데 이를 전단율 또는 전단응력의 개념으로 사용하고자 표현한 것이다.

다음의 Fig. 5의 결과는 1.0 mm의 토사 입자를 고려하였을 때 관 벽에서의 전단유속의 분포를 대표 나열하였다. 해석과정동안 관 저면에서 수렴된 변화 값을 갖는 것을 볼 수 있으며 관 벽으로부터 일정 거리 이격된 이상에서는 전단유속의 변화가 없어 결국 전단마찰이 관 저면에서 강하게 작용하지만 관 중심부까지는 미치지 않음을 가리킨다.

본 연구에서는 수치해석 결과를 활용하여 관 저면의 얇은 층에 대한 전단유속을 산정하였다. 전단유속(u_*)과 입자의 침강속도(v_s)는 다음의 Eq. (6)으로 정리되며 이어 다음의 Eq. (5)의 관계를 통해 산정이 가능하다.

$$v_s = \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{1/3} \left(\frac{g d_p}{C_D} \right)} \quad (6)$$

여기서 $(\rho_s - \rho) / \rho$ 는 유체 내부에서의 퇴적물의 비중(submerged), ρ_s 는 퇴적물의 밀도(kg/m^3), ρ 는 물의 밀도(kg/m^3), g 는 중력가속도(m/s^2), d_p 는 입자의 직경(m) 그리고 C_D 는 항력계수를 의미한다. 항력계수의 경우 입자의 자유운동정도에 따라 다르지만 일반적으로 난류흐름에서는 0.44에 수렴하는 값을 가지므로 별도의 산정 없이 고정된 값을 취하였다. 위의 Eq. 6을 활용하여 본 연구에서 반영할 입자의 침강속도를 산정하였다. 먼저 입자의 수중단위 중량의 경우 $[(\rho_s - \rho) / \rho]^{1/3} = \text{약 } 1.182$ 의 값을 갖는다. 이후 $(g d_p / C_D)$ 에서

Fig. 5. Shear Velocity Representative Result of 1.0 mm Diameter Soil Slurry

입자 크기별로 산정하면 다음의 Table 3과 같다. 그리고 Table 4의 전단유속의 변화구간을 토대로 전체 63개 조건에 대한 전단경계층 검토 결과를 Table 5에 나타내었다.

Table 3. Settling Velocity by Particle Size

Soil diameter (d_p , mm)	gd_p / C_D	Settling velocity (v_s)
0.5	0.011	0.115
1.0	0.022	0.162
3.0	0.067	0.281
5.0	0.111	0.363
7.0	0.156	0.429
15.0	0.334	0.629
20.0	0.446	0.726

산정된 결과를 살펴보면 기존의 Raudkivi(1998)가 제안한 결과의 경우 약 2.0 보다 큰 값일 때 대부분의 퇴적물이 관 저면에 침전된 상태를 나타내고 있다. 즉 이송현상이 발생하지 않고 저면에 고착되었음을 가리킨다. 하지만 본 연구에서 고려한 우수관거의 경우 평균적으로 1.0 미만의 값에서 퇴적의 경향성이 두드러지게 나타났다. 이후에 급격한 전단유속의 변화된 값이 0.2~0.9를 나타낸 것으로 보아 해당 층이 입자의 도약에 따른 이송·침전이 반복되는 층으로 구성되었으며 부분적으로 부유 된 퇴적물 이동 현상이 나타났다. 0.2의 값 미만의 값들 사이에는 전단유속의 변화가 잦아들어 결국 현탁상태로 부유하여 흘러가는 것으로 나타났다. 결과를 종합하여 관 내부 전단유속을 활용하여 경계층을 형성에 대한 기준을 Table 6에 수식적으로 표현하였다.

Table 4. Shear Velocity Result Using Two-phase Flow Analysis

d_p (mm)	u_* (Shear velocity)								
	1.0 m/s			2.0 m/s			3.0 m/s		
	10% v/f	30% v/f	50% v/f	10% v/f	30% v/f	50% v/f	10% v/f	30% v/f	50% v/f
0.5	0.0156	0.0220	0.0213	0.0168	0.0180	0.0182	0.0479	0.0499	0.0498
1.0	0.0241	0.0241	0.0217	0.0346	0.1087	0.0332	0.0602	0.0647	0.0627
3.0	0.0544	0.0424	0.0446	0.0400	0.0375	0.0369	0.0646	0.0690	0.0704
5.0	0.0610	0.0642	0.0673	0.0673	0.0509	0.0673	0.0467	0.0540	0.0525
7.0	0.0730	0.0730	0.0639	0.0714	0.0730	0.0682	0.0630	0.0789	0.0797
15.0	0.1124	0.1124	0.1207	0.0961	0.1045	0.1080	0.1010	0.1010	0.1113
20.0	0.1247	0.1394	0.1322	0.1310	0.1247	0.1285	0.1259	0.1334	0.1346

Table 5. Result of Shear Boundary Layer Using Numerical Analysis Result (v_s / u_*)

Load	d_p	Velocity								
		1.0m/s condition			2.0m/s condition			3.0m/s condition		
		v/f								
		10%	30%	50%	10%	30%	50%	10%	30%	50%
0.5 mm	Bed	1.14	1.32	1.23	0.92	0.86	0.84	0.81	0.77	0.76
	Suspended	0.12	0.11	0.11	0.15	0.15	0.17	0.19	0.20	0.20
	Wash	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
1.0 mm	Bed	1.22	1.22	1.17	1.02	1.03	1.03	0.91	0.87	0.88
	Suspended	0.12	0.12	0.12	0.10	0.10	0.10	0.18	0.18	0.19
	Wash	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04
3.0 mm	Bed	1.27	1.31	1.28	1.05	1.07	1.07	1.00	1.05	1.03
	Suspended	0.14	0.15	0.16	0.12	0.12	0.12	0.10	0.10	0.10
	Wash	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
5.0 mm	Bed	1.20	1.06	1.20	0.98	0.98	0.89	0.91	1.09	0.99
	Suspended	0.14	0.15	0.18	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11
	Wash	0.04	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
7.0 mm	Bed	0.78	1.27	1.19	1.05	0.98	0.90	0.87	1.02	0.78
	Suspended	0.11	0.13	0.13	0.12	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11
	Wash	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05
15.0 mm	Bed	0.70	0.62	0.61	0.68	0.69	0.66	0.65	0.70	0.73
	Suspended	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.12	0.12	0.13
	Wash	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
20.0mm	Bed	0.66	0.60	0.62	0.48	0.52	0.49	0.59	0.58	0.61
	Suspended	0.12	0.11	0.11	0.12	0.12	0.14	0.12	0.11	0.12
	Wash	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05

결국 우수관로 내부 슬러리의 흐름특성에 대하여 전단유속 (u_*)와 침강속도(v_s)의 값을 사용하여 하상에서의 입자의 이송과 정지 상태를 쉽게 구분할 수 있는 지표가 되며, 입자별 이송에 따른 경계층의 예측이 가능하다.

Table 6. Classification of Sediment Boundary Layer (In this study)

Condition	Sediment transport status
$v_s/u_* < 0.04$	■ Particle travel in wash load
$0.04 < v_s/u_* < 0.13$	■ Particle travel in suspension
$0.13 < v_s/u_* < 0.91$	■ Particle travel in saltation
$v_s/u_* > 0.91$	■ Particle travel as bed load

본 연구에서 제안된 결과는 우수관거로 유입되는 다양한 유입 조건에 대한 해석결과를 토대로 추정하였다. 입자의 크기를 주요 매개변수로 하여 침강속도를 반영하였기 때문에 관 내 침전층에서의 침전물 이동 현상을 나열하였다. 본 연구에서 제안한 경계층 검토 연구의 주된 이점은 토사 슬러리가 낮은 체적농도 조건에서도 이송을 위한 경계층의 두께를 예측할 수 있을 뿐만 아니라 다량의 토사 슬러리가 이송되는 높은 체적농도의 조건에서도 이송과정에 따른 경계층을 예측할 수 있다는 것이다. 더불어 기존 제안식들이 갖는 하천에서의 값과 달리 우수관거에 적용할 수 있다는 특징을 갖는다. 이후에도 개선된 연구를 통해 본 연구에서 제안한 경계층 모델과 실제 우수관 내부에서 나타나는 현상을 계측을 통해 오차를 비교 할 경우 보다 합리적인 연구방법이 될 것으로 판단된다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 이송 · 침전 현상이 발생하는 관거 내부에서 난류구조를 파악하고 토사 슬러리의 이송 · 침전의 영향을 검토하기 위해 수치해석을 실시하였다. 난류모델을 고려하였으며 유속, 체적농도의 변화에 대한 전단유속을 검토하였다. 이를 토대로 우수관로 내부 슬러리 이송에 대한 난류 전단경계층을 구분하는 새로운 방법론을 제시하였다. 먼저, 퇴적특성을 갖는 관수로에서 유사의 체적농도에 의한 항력으로 유속분포가 전반적으로 약화되었으며 침전에 따른 관 내 유속경사가 커짐을 확인하였다. 둘째, 전단유속의 경우 하상 경계면 부근에서 값을 산정할 경우 큰 값을 형성하여 이를 전반적인 기율기의 형태를 반영하여 추정하였다. 둘째, 경계층의 구분은 관 내 유속장 검토를 바탕으로 전단유속과 입자크기별 침강속도간의 관계로 표현하였다. 셋째, 관 내 평균유속과 체적농도에 대한 조건별 결과가 유사한 경향을 따르는 점에 착안하여, 침강속도와 전단유속의 상관관계를 평균화하였다. 본 연구에서 결정한 전단경계층의 매개변수는 기존 Raudkivi(1998)의 연구에서 제시된 매개

변수의 범위에 포함된다. 즉, 본 연구에서 제안한 기법이 신뢰할 수 있는 결과를 나타내는 것을 확인하였다. 그러나 본 연구에서 제안한 결과는 단지 강우 초반에 다량의 토사 슬러리가 유입되는 상황을 고려한 결과에 불과하다는 한계를 갖는다. 따라서 보다 다양한 호우사상에 대한 적용을 통해 제안된 방법론의 검증이 필요할 것으로 판단된다. 나아가 본 연구에서 제안한 결과들의 평가를 위해서는 실제 관로시스템의 자료와 강우-유출 모델과 비교하여 검증되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임[MOIS-재난-2015-03].

References

- Ackers, P., and White, W.R. (1973) Sediment Transport: New Approach and Analyses. *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 99, No. HY11, pp. 2041-2060.
- Brown, C.B. (1950) Sediment Transport. *Engineering Hydraulics*, Wiley.
- Butler, D., May, R., and Ackers, J. (2004) Self-Cleansing Sewer Design Based on Sediment Transport Principles. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 7, p. 723.
- Einstein, H.A. (1942) Formular for the Transportation of Bed Load. *Transportation ASCE*, Paper 2140, Vol. 170, pp. 561-573.
- Engelund, F., and Hansen, E. (1967) A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. *Technical University of Denmark Ostervoldgade 10*, Copenhagen K, Denmark.
- Jeong, Y.K. (2009) *Evaluation of Condensation and Indoor Thermal Environment in Winter Depending on Outdoor Supply Vent Configurations*. Master's thesis, Kookmin University, Korea.
- Liu, Z. (1998) *Sediment Transport*. Publication Report, Aalborg University, Denmark.
- Matousek, V. (1997) *Flow Mechanism of Sand-Water Mixtures in Pipelines*. Ph.D. thesis, Delft University, Netherlands.
- Meyer-Peter, E., and Müller, R. (1948) Formulas for Bed-Load Transport, *IAHSR 2nd Meeting, Appendix 2*. Stockholm, Sweden, pp. 39-64.
- Nezu, I., and Nakagawa, H. (1994) Turbulence in Open-Channel Flows. *Journal of Hydraulic*

- Engineering*, Vol. 120, No. 10, pp. 1235-1237.
- Nezu, I., and Rodi, W. (1985) Experimental Study on Secondary Currents in Open Channel Flow. *Proceedings 21st congress of IAHR*, Vol. 2, pp.115-119.
- Raudkivi, A.J. (1998) *Loose Boundary Hydraulics*. 4th Edition, CRC Press.
- Song, Y.H., Yun, R., Yoo, D.G., and Lee, J.H. (2017) Study on Prediction Formula of Sedimentation in Urban Sewer. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 2, pp. 269-275.
- Song, Y.H., Yun, R., Yu, J.Y., Gong, S.C., and Lee, J.H. (2017) Development of Correlations for Critical

- Tractive Force Estimation using Two-Phase Flow Analysis in Sewer Conduit. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 5, pp. 311-320.
- Van Rijn, L.C. (1993) *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*, Vol. 1006, Amsterdam: Aqua publications.

Received	December 13, 2017
Revised	December 14, 2017
Accepted	December 18, 2017