물-토사 혼합물의 관 내 슬러리 유동특성에 대한 수치적 연구

A Numerical Study on the Flow Characteristics of Water and Soil Slurry in Pipe

송양호* · 윤린** · 이정호***

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

Abstract

This study described the phenomena of transport and sedimentation of soil slurry flowed in storm sewers from the perspective of numerical analysis. There have been some research cases reviewing the characteristics of flows inside of storm sewers. Most existing researches have performed experiments and analyses based on a flow of single fluid in conduits. However, this study tried to interpret such a flows as a two-phase flow by taking into account soil slurry, and it also tried to deduce results on the change of flow velocity and volume fraction, as well as characteristics of sedimentation to study the tendency of transport and sedimentation inside of the conduits. In addition, it should be necessary to produce theories and analytical basis which can support design criteria for sedimentation inside of conduits based on the analysis of internal flows in storm sewers. Because of difficulties in observing and interpreting two-phase flows made of soil slurry, there have been few studies on this subject, the objective of this study was to examine this part. Accordingly, in case of soil slurry flowed into real manholes, this study reviewed the characteristics of flows generated inside of conduits by reflecting the rate of flow caused by outflow and that of inflow occurred in mixed forms. This study also checked the scope of impact of discharge capacity caused by sedimentation occurred inside of conduits, and improved the already proposed prediction model of critical sediment depth within storm sewers. When comparing with the proposed model, it was confirmed that this new model showed higher correlation ratio.

Key words : Numerical Analysis, Soil Slurry, Transport, Sedimentation, Two-phase Flow, Discharge Capacity

요 지

본 논문은 수치 해석적 관점에서 우수관거로 유입되는 토사 슬러리 이송·침전 현상에 대하여 기술하였다. 본 연구에 앞서 우수관거에 내부 흐름에 대하여 유동특성을 검토한 연구사례가 존재한다. 기존 연구들의 경우 관로 내 단일 유체의 흐름을 고려한 실험 및 해석을 진행하였다. 그러나 본 연구에서는 토사 슬러리를 고려한 2상유동 해석을 진행하였고 관 내부에서의 이송·침전 경향을 검토할 수 있는 유속과 체적분율의 변화와 퇴적 특성에 대한 연구결과를 도출하고자 하였다. 더불어 우수관거 내부 유동해석을 바탕으로 향후 관로 내 퇴적에 대한 설계기준을 뒷받침하는 이론 및 분석적 근거가 필요한 현실이다. 토사 슬러리를 고려한 2상유동의 관측 및 해석의 어려움으로 인해 연구결과가 드물어 해당 부분이 본 연구에서 검토하고자 함이 연구목표이다. 따라서 실제 맨홀로 유입되는 토사 슬러리의 경우 유출에 따른 유량과 혼합된 형태로 유입되는 것을 반영하여 관 내부에서 발생하는 유동특성을 검토하였다. 관 내부에서 발생하는 퇴적에 따른 통수능의 영향정도를 살펴보고 기존에 제안된 우수관로 내 임계 퇴적고 예측모델을 개선하였다. 기존 제안된 모델과의 비교 결과 더 높은 상관율을 갖음을 확인하였다.

핵심용어 : 수치해석, 토사 슬러리, 이송, 침전, 2상유동, 통수능

*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

1. 서 론

과거부터 지속적으로 도심지 풍수해 방재 및 치수 예산이 투입되어 재해 예방 및 저감을 위한 많은 노력을 들였음에도 재해발생의 피해 규모와 유형이 증가하고 있다. 이는 현재까지 수립된 방재대책 등이 한계점을 갖고 있음을 의미하며, 재해에 취약한 요소를 면밀히 검토해 볼 필요가 있다. 이를 극복하기 위해서는 기존에 수립된 방재대책을 면밀히 살펴보고 실무에 적용하는데 있어서 개선점을 찾아내는 것은 매우 중요하다. 우수관로 대상의 슬러리 유동은 다양한 문제점을 갖고 있는데 슬러리 내 고체입자의 퇴적과 정체는 전체 시스템의 성능을 저하시키고 효율을 낮게 한다. 결국 우수관로 내 토사 및 유송잡물의 퇴적이 발생할 경우 월류 발생에 따른 침수 피해로 이어지므로 관로 내 토사 퇴적을 고려한 해석적 연구가 필요하다.

관로를 대상으로 한 슬러리 유동에 대한 해석적 연구는 기계, 반도체 등 다양한 산업분야에서 활용되고 있다. 관련 연구를 살펴보면 Kaushal et al.(2012), Capecelatro and Desjardins(2013) 그리고 Shang et al.(2013) 등은 미립자의 관로 내 슬러리 유동을 진행하였으며 해석적 연구결과와 실제 실험결과와 비교하였다. 해당 연구들의 결과를 살펴보면 이송과정 간 유체의 유동특성이 실험결과와 일치하였지만 입자를 고려한 슬러리 유동특성의 경우 체적농도에 따라 큰 차이가 있음을 확인하였다. 결국 이송과정동안 발생하는 퇴적의 문제로서 관 저면에 머무르는 입자체적에 따른 통수능의 문제를 야기한다. 퇴적현상을 고려한 연구사례를 살펴보면 Messa et al.(2014)과 Messa and Malavasi(2015)는 입자별 부유사 난류유속 분포에 대한 연구를 진행하였다. Parsi et al.(2017), Singh et al.(2017) 그리고 Zambrano et al.(2017)는 실험자료를 바탕으로 수치해석 모델을 검증한 이후 관 저면에서 퇴적이 발달되어 가는 과정을 검토하였다. 이러한 수치해석 연구들의 공통점은 퇴적에 대한 특성을 검토하기 위해 다상유동 해석을 진행하였다.

본 연구의 목적은 우수관거 내부에서 유체와 혼재된 상태로 흐르는 토사 슬러리에 대한 이송·침전과정을 해석 및 검토하는 것이다. 해석과정을 토대로 실제 현상을 예측할 수 있는 방법론을 구축하고자 한다. 우수관거 내부 통수능에 대한 해석과정에 토사 슬러리를 고려하여 내부 흐름 변화에 따른 퇴적의 영향에 미치는 관련 매개변수의 특성을 검토하고 결과를 활용하고자 하는데 그 당위성이 있다. 따라서 모델에 반영되어야 할 주요 고려사항은 관거 내 유체(물)와 고체(토사 슬러리)의 움직임이 보다 적절하게 구현되어야 하고 퇴적물의 이송 및 체적분율의 변화를 보다 정확하게 예측할 수 있어야 한다.

Song et al.(2017)는 이러한 우수관로 내 2상유동(two-phase flow) 해석을 통한 관로 내부에서 발생가능한 퇴적이고 예측 모델을 제안하였다. 그러나 Song et al.(2017)의 연구에서

제시하고 있는 관로 내 토사퇴적이고 예측 모델의 산정 방법은 유입구 유속조건을 바탕으로 결과도출이 이루어진다. 그러나 우수관로 시스템의 경우 연속적인 관로에 따른 내부 유속이 변화하고 더불어 슬러리를 함유하고 흐를 때 발생하는 유체 유속의 변화가 발생한다. 즉, 연속적인 관로시스템의 조건에서 관 내부 평균유속을 활용하여 예측 가능한 개선이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 관거 내부에서 발생하는 이송·침전의 흐름과정 조사와 퇴적에 미치는 영향을 면밀히 검토하여 기존 퇴적이고 예측모델을 개선하였다. 본 연구는 상용 전산유체해석 툴을 이용하여 슬러리의 속도와 고체입자의 체적분율, 그리고 직경을 변화시키며 관내 슬러리의 유동에 대한 해석적 연구를 진행하였고, 관내 슬러리의 안정적 이송을 위한 조건을 찾는 것을 목적으로 한다.

2. 관거 내 유사 이송·침전 수치해석 모델 구축

본 연구에서는 ANSYS-FLUENT를 이용하여 다음의 Fig. 1의 우수관거를 대상으로 수치해석을 진행하였다. 격자는 ANSYS-WORKBENCH 내부 격자형성 모델을 활용하였다. 상세 경계조건은 다음의 Table 1과 같다.

Fig. 1. Conduit Mesh (Song et al., 2017)

Table 1. Boundary Conditions for Analysis

Classification	Boundary conditions
Multiphase flow	■ Fluid(water)-Solid(soil)
Applied models and flows	■ Euler-Euler model ■ Standard k-ε model ■ Turbulent flow ■ Unsteady and turbulent
Inlet conditions	■ Inlet velocity ■ Inlet volume fraction ■ Soil diameter
Outlet condition	■ Freefall
Wall condition	■ Non-slip
Convergence	■ 0.001

2.1 난류모델

본 연구에서는 난류유동의 해석을 위해 현재까지 가장 범용적인 난류모델인 Launder and Spalding(1974)의 Standard

k-ε 모델을 사용하였다. Standard k-ε 모델은 레이놀즈 성분들을 계산하기 위해 난류운동에너지(k)와 이 에너지의 소산율(ε)에 관한 2개의 방정식을 부가적으로 계산하여 난류점성을 표현하는 모델이다. 유체입자들이 임의 축에 관하여 회전을 가질 때 발생하는 회전유동(rotational flow) 혹은 와동(vortex flow)의 예측이나 벽 근처 저 레이놀즈수 영역에 대한 해석은 다소 부정확한 것으로 알려져 있다. 그러나 기본적인 난류해석에 있어 수렴성이 뛰어나고 계산시간이 단축되는 장점으로 활용되고 있다.

난류모델은 기본적으로 난류전단응력과 유동 특성간의 선형 함수 관계를 가정한 Boussinesq 가정에 기반을 두고 있다. FLUENT 모형에서는 Reynolds stress 항을 분자점성에 의해 발생하는 전단응력과 같이 그 응력의 크기를 평균속도의 변형률(속도구배)에 비례한다고 가정한 다음의 Boussinesq 모델을 사용하였다(Schmitt, 2007). 이 항은 Boussinesq의 가정에 의한 Newton의 점성법칙과 유사한 난류점성계수의 개념을 반영하였으며 다음의 Eqs. (1)과 (2)를 바탕으로 평균적인 변형률의 관계를 제시하였다.

$$\overline{\tau_{ij}} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \overline{u_l}}{\partial x_l} \quad (1)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \sqrt{k} L = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2)$$

μ_t 는 난류점성계수 또는 와점성계수로 정의되며, 유체의 물성치가 아니라 난류의 상태에 의존하기 때문에 경험식으로부터 간단히 구하거나 또는 방정식으로 푸는 것으로 주어진 다. 여기서 $k = \overline{u_i u_j} / 2$ 는 난류운동에너지, δ_{ij} 는 i 와 j 두 개의 변수에 대해 정의된 함수 혹은 텐서(Kronecker delta)에 해당한다. Standard k-ε 모델을 이용해 유체의 유동을 해석할 경우에는 일반적인 이송방정식 외에 변수 k와 ε에 대한 두 개의 방정식을 각기 별도로 반영해야 한다. 각 방정식은 난류운동에너지 방정식과 난류운동에너지 소산 방정식이라 부르며, Two-equation 모델이라고도 쓰인다. C_μ 는 모델상수로 일반적으로 0.09 값을 사용한다.

모형 내 매개변수의 구성은 k와 ε에 대한 실험적 연구를 통해 측정된 자료를 적용하는 것이 가장 우선시 된다. 다만 본 연구는 모델링을 통해 현상에 대한 해석을 진행을 염두하고 있기 때문에 반영될 매개변수의 신뢰도 분석은 제외하였다. 따라서 매개변수 값의 범위 및 적용 근거가 필요하여 실험적으로 얻어진 매뉴얼에 제시된 기본 값을 반영하였다. Table 2에 제시된 매개변수는 균질 및 비균질 유동을 포함한 기본적인 난류의 전단 유동에 대해 잘 예측하는 것으로 보고되었으며, 벽 경계 및 자유 전단 흐름에 대해서도 상당히 높은 신뢰도의 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다. C_μ , $C_{\varepsilon 1}$ 그리고 $C_{\varepsilon 2}$ 은 실험에 의해 결정되어진 경험적인 상수이

며, δ_k 와 δ_ε 는 난류운동에너지와 소산율에 대한 난류 Prandtl number이다.

Table 2. Standard k-ε Model Parameters

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	δ_k	δ_ε
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

2.2 토사 슬러리 입자의 난류유동 현상 구현

유체와 뒤섞인 고체 입자의 흐름을 표현하기 위해서는 고체 입자의 특성을 정확히 수치모델로 구현해야 하며 정확한 해석결과를 도출해 내야 한다. 앞서 연속 방정식과 운동량 방정식 및 난류모델을 활용하여 기본 모델을 검토하였다. 여기에 추가적으로 항력 및 압력모델을 고려하여 관 내부의 전단 유속 및 응력과 같은 전단 흐름을 예측하고자 한다.

FLUENT 모형에서 제공하는 고체 입자의 점성과 항력을 표현하는 모델에는 Syamlal-O'Brien과 Gidaspow이 있다 (Syamlal and O'Brien, 1989; Gidaspow, 1994). 고체의 압력을 모사하는 방법으로 Lun-et-al, Syamlal-O'Brien 및 Ma-Ahmadi가 있다. 입자들의 방사형 분포 함수 모델은 밀도와 연관되며 입자들 간의 거리의 변형률을 함수로 표현하는 방법이다. Lun-et-al, Syamlal-O'Brien, Ma-Ahmadi 및 Arastoopour 모델이 있다(Lun et al., 1984).

고체 입자의 점성과 항력을 고려한 Gidaspow와 Syamlal-O'Brien의 경우 운동량 교환계수(β)를 정의하는 방법에 따라 구분된다. Gidaspow 모델은 다음의 Eqs. (3)~(5)를 통해 정리가 가능하다. ε는 체적분율을 나타내며, d_p 는 입자의 직경(m), u 는 각 상의 속도(m/s), C_D 는 항력계수를 나타낸다.

$$\varepsilon_s \leq 0.8; \beta = 150 \frac{(1-\varepsilon_s)^2}{\varepsilon_s} \frac{\mu_s}{(d_p)^2} + 1.75(1-\varepsilon_s) \frac{\rho_s}{d_p} |u_s - u_f| \quad (3)$$

$$\varepsilon_s > 0.8; \beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\varepsilon_s(1-\varepsilon_s)}{d_p} \rho_s |u_s - u_f| \varepsilon_s^{-2.65} \quad (4)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{R_e} [1 + 0.15(R_e)^{0.687}] & , R_e < 1,000 \\ 0.44 & , R_e > 1,000 \end{cases} \quad (5)$$

Syamlal-O'Brien의 모델은 다음의 Eqs. (6)~(10)을 통해 입자의 이동 및 충돌과정에서 발생하는 전단력에 대해 고려가 가능하다. 여기서 Δv 는 해석 과정에서 변화하는 에너지의 소산을 의미한다.

$$\beta = \frac{3}{4} \frac{\varepsilon_s \varepsilon_f \rho_f}{\Delta v_{r,s}^2 d_p} C_D \left(\frac{R_e}{\Delta v_{r,s}} \right) |u_s - u_f| \quad (6)$$

$$C_D = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{R_e / \Delta v_{r,s}}} \right)^2 \quad (7)$$

$$v_{r,s} = 0.5 \left(A - 0.06 R_e + \sqrt{(0.06 R_e)^2 + 0.12 R_e (2B - A) + A^2} \right) \quad (8)$$

$$\varepsilon_s \leq 0.85; A = \varepsilon_s^{4.14}, B = 0.8 \varepsilon_s^{1.28} \quad (9)$$

$$\varepsilon_s > 0.85; A = \varepsilon_s^{4.14}, B = 0.8 \varepsilon_s^{2.65} \quad (10)$$

고체가 받는 압력 모델의 경우 입자간의 물리적인 충돌 에너지 모두 고려한 Lun-et-al 모델이 가장 기본적으로 사용된다. Syamlal-O'brien 모델은 고체 입자상의 충돌에너지만을 반영한다. Ma-Ahamadi 모델은 물리에너지와 입자의 충돌에너지에 추가로 입자 간의 마찰 점성을 고려한다. 본 연구에서 적용한 모델은 Table 3의 Syamlal-O'brien 모델을 바탕으로 토사 슬러리의 이송·침전에 대한 분석을 실시하였다.

Table 3. Selected Turbulence Models for Analysis

Classification	Model	Selected
Drag Law and Solid Viscosity	■ Gidaspow	
	■ Syamlal-O'brien	○
Solid Pressure	■ Lun-et-al	
	■ Syamlal-O'brien	○
	■ Ma-Ahamadi	
Radial Distribution	■ Lun-et-al	
	■ Syamlal-O'brien	○
	■ Ma-Ahamadi	
	■ Arastoopour	
	■ Arastoopour	

3. 유동해석 결과 검토

본 연구에서는 관저 내부로 유입되는 토사 슬러리의 이송·침전 과정을 거쳐 통수능에 미치는 영향 및 범위를 검토하기

위한 분석을 진행하였다. 앞서 나열한 다양한 유입 조건에 따른 관 내 혼합물의 유속분포와 토사 슬러리의 체적분율 분포를 검토하였다. 이들 중 대표 1.0 mm의 결과를 나열하였다(Figs. 2~4).

관 내 토사 슬러리의 유속분포는 시간에 따라 지속적으로 변하고, 토사의 관내 분포에 따라 크게 영향을 받는다. 어느 특정 위치에서 토사가 다른 지역에 비해 높게 쌓이게 되면 그 부분의 유속을 증가시키게 되고, 이는 그 지역의 토사를 다시 이송시켜 또 다른 위치에서 토사의 관 내 높이를 최대가 되게 한다. 이와 같은 과정을 거치면서 우수관거의 유출방향으로 토사 슬러리의 임계 퇴적높이가 유출방향으로 이동하고 한꺼번에 다량의 토사 슬러리가 관을 빠져나가게 된다. Figs. 2~4의 (a)와 (b)의 관계를 토대로 토사의 유입 체적분율이 증가함에 따라 유속이 감소하는 것은 관 전체 단면에서 슬러리 농도가 클수록 유속증가가 둔화되며 입자의 분포 농도가 감소하는 상단부에서는 유속이 되레 증가하는 경향을 나타내는 현상과 직결된다.

토사의 관 내 체적분율 살펴보면 가장 높게 쌓이는 부분과 가장 낮게 위치하는 부분이 존재하고, 시간에 따라 가장 높게 쌓인 부분이 토출하는 경우와 가장 낮은 부분이 토출하는 경우가 각각 발생하게 된다. 관거의 유출구 방향으로의 유속분포를 살펴보면 유속분포가 포물선 형태로부터 크게 왜곡된 형태로 나타나게 되는데, 이는 반경방향으로 토사의 체적분율이 높은 위치와 낮은 위치에 따라서 크게 달라지고 길이방향에 따른 유속분포 또한 크게 달라진다. 토사 슬러리의 체적분율이 높은 구간일수록 혼합물 내 입자에 작용하는 상호작용력 및 입자의 점성증가로 인해 혼합물의 유속이 감소하고 체적분율이 낮은 경우에 혼합물의 이동 속도가 증가하게 된다.

입자의 크기가 증가할수록 입자에 작용하는 항력 및 중력의 증가로 인해 보다 큰 퇴적층 높이를 보이고 있다. 그리고 임계 퇴적층이 발생하는 위치는 입자크기가 작을수록 관거의 후단에 위치하게 된다. 다만, 특정 시간에 최고 퇴적층이 발생하는 위치는 모든 입자크기에 공통적으로 시간에 따라 관거의 후단으로 이동하게 된다.

Fig. 2. Distribution of 1.0mm Soil Particle Size and 10% Volume Fraction with 1.0m/s Condition

Fig. 3. Distribution of 1.0mm Soil Particle Size and 30% Volume Fraction with 2.0m/s Condition

Fig. 4. Distribution of 1.0mm Soil Particle Size and 50% Volume Fraction with 3.0m/s Condition

결과적으로 토사 슬러리의 입자 크기와 체적분율 증가에 따른 퇴적고의 증가는 명확히 나타났다. 관 내 상부에서는 유속이 증가하였고, 입자 크기가 증가할수록 경향이 두드러지게 나타났다. 이러한 관저 내 침전이라 함은 유사가 점성력에 의해 퇴적으로 발달되어가는 과정이라 할 수 있다.

4. 우수관로 내 퇴적고 예측모델의 개선

예측모델이 관 내부 흐름과정에서도 발생하는 퇴적현상에 어떤 영향을 미치는가에 대한 연구이다. 따라서 해당 방법론이 관저 내부의 통수능력을 잘 예측해야 하며, 복잡한 관점들을 보다 간결하게 산정 가능하도록 해야 한다. 앞서 Song et al.(2017)의 연구에서는 퇴적과 밀접한 상관관계인 유속, 토사 체적분율 및 입자 크기와 관 내부에 형성된 퇴적고를 고려한 예측모델을 제안하였다. 반영하고자 하는 매개변수가 퇴적고의 예측정확도에 얼마만큼의 대표성을 갖고 있는지 또한 각 독립적 매개변수가 개발 모델을 통해 유의미하게 퇴적고 예측이라는 종속변수에 영향을 미치는지를 연구하는 것이다.

다만 본 연구에서는 관 내부에서 토사 슬러리를 구성하는 입자크기, 농도 개념의 체적분율 그리고 평균유속이라는 매개변수가 상호작용 과정에서 발생하는 것으로 이러한 변수들에 대한 관계를 식의 형태로 제안하고자 한다. 퇴적고

예측모델 개선을 위하여 먼저 독립변수를 관내 평균유속, 토사의 유입 체적분율 그리고 입자의 크기로 구분하고 각 분석 결과별 임계 퇴적고를 관측하여 종속변수에 해당하는 퇴적고 높이에 대한 자료를 정리하였다. 해경 결과를 정리하면 다음의 Table 4와 같다.

검토 결과 토사 슬러리 입자 크기의 증가에 따라 퇴적고는 크게 변화하였다. 더불어 유체 내 토사의 체적분율의 관계에 따라 퇴적현상이 두드러지게 나타남을 확인하였다. 토사 슬러리가 10%의 체적분율로 유입된 경우 관저 내 발생 퇴적고가 관저 직경 대비 평균적으로 약 25% 정도로 산정되었다. 30% 농도의 경우는 약 57%로 나타났으며, 50%의 경우 약 86%로 관저의 통수불능 상태에 가깝게 나타났다. 체적분율 증가에 따라 퇴적현상이 두드러지게 증가하는 경향을 나타내었으나 본 연구에서 적용한 1.0~3.0 mm 직경의 토사 입자에 따라서는 뚜렷한 변화를 보이지 않는 것으로 분석되었다. 5.0 mm 직경 이상의 결과들은 대개 퇴적의 경향이 두드러지게 나타났으며 높은 체적분율의 조건의 경우 관저의 폐색을 나타내었다.

본 연구에서 분석된 결과를 바탕으로 관저의 실제 폐색은 퇴적된 토사의 평균 퇴적 높이가 아닌 토사의 퇴적이 가장 높이 도달한 위치에서 발생함을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 혼합물 내 토사의 체적분율의 분포를 조사하여 혼합물 내 토사의 체적분율이 eulerian 해석의 한계 체적분율인 63%

Table 4. Sedimentation Results in Pipe (y/D)

d_p (mm)	V/F (%)	Velocity(m/s)		
		1.0	2.0	3.0
0.5	10	0.104	0.063	0.044
	30	0.197	0.111	0.076
	50	0.288	0.130	0.104
1.0	10	0.160	0.053	0.047
	30	0.365	0.274	0.166
	50	0.884	0.284	0.217
3.0	10	0.053	0.676	0.370
	30	0.274	0.389	0.380
	50	0.284	0.944	0.759
5.0	10	0.047	0.758	0.671
	30	0.166	0.421	0.360
	50	0.217	0.971	0.938
7.0	10	0.533	0.741	0.790
	30	0.957	0.967	0.853
	50	0.972	0.969	0.971
15.0	10	0.616	0.806	0.760
	30	0.942	1.000	1.000
	50	0.976	0.971	0.934
20.0	10	0.629	0.552	0.518
	30	0.938	0.977	1.000
	50	0.967	0.966	1.000

이상인 값을 기준으로 총 63가지의 시뮬레이션 조건 내 토사의 가장 높은 위치를 각각 산출하였다. 그리고 토사의 퇴적높이와 본 시뮬레이션 조건인 혼합물의 유속, 토사 슬러리의 체적분율, 그리고 토사의 입자 크기와의 관계를 관계식으로 도출하고자 한다.

본 상관식 도출을 위해 비선형 다중변수 회귀분석을 수행하였고 시뮬레이션 조건들 중 입자속도와 입자크기는 입자크기를 기준으로 한 레이놀즈 수로 Eq. (11)과 같이 무차원화하였다.

$$R_e = \frac{\rho_f U d_p}{\mu} \quad (11)$$

부유하게 되는 최소 레이놀즈수는 Wen and Yu(1966)가 제시한 Eq. (11)을 활용하였다. Eq. (12)의 경우 최초 수직유동에 적용된 식이나, 본 연구와 같이 입자의 최대 지름대비 배관의 직경이 120배 큰 경우임을 고려하여 수평유동에도 Wen and Yu(1966)의 Eq. (12)를 적용하였다.

$$R_e = (1135.7) + 0.0408 Ar^{0.5} - 33.7 \quad (12)$$

제안 식은 유동입자(d_p)의 최소 유동화 속도를 기준으로 Reynolds equation(Eq. (13))과 Archimedes number를 활용하여 2상유체의 대류현상을 입자크기와 체적분율의 함수로 표현하였다(Eq. (14)). 여기서, ρ_f 와 μ 는 유동유체의 밀도와 점도를 나타낸다. U_{mf} 는 침강속도, g 는 중력가속도, ρ_s 는 토사 슬러리 입자의 밀도 등을 의미한다.

$$\theta_c = \tau_c = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho) g d_p}, \quad R_e = \frac{u_* d_p}{\nu} \quad (13)$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu^2} \quad (14)$$

퇴적이고 예측방식에 있어서 예측정확도는 관저 내 임계 퇴적 상황에 의해서 예측모델에서 나타나는 퇴적고를 산정하고 이를 실제 발생한 임계 퇴적고와 상호 비교하여 예측정확도를 산출하였다. 관내에서 발생하는 퇴적물의 통수단면에 대한 퇴적고를 예측하기 위한 식을 Eq. (15)와 같이 제시 하였다. 이때 관내 유속조건의 경우 관내 평균유속을 중심으로 하여 본 연구에서 제안한 식을 실제 수치분석 결과들과도 비교한 결과 상관계수가 0.892로 상응하는 결과로 이어졌다.

$$\frac{h}{D} = p_A \left(\exp \left[- \left(\frac{U}{U_{mf}} \right)^{p_B} \right] \right) \times p_C (\tan x^{p_D}) \quad (15)$$

Table 5. Parameters of the Prediction Model and Correlation Coefficient

Parameters		Correlation coefficient	
p_A	0.9200	R^2	0.892
p_B	0.0121		
p_C	0.7933		
p_D	1.9499		

최종 각 조건별 퇴적특성을 토대로 실제 본 연구에서 제안하고자 하는 퇴적이고 예측모델과의 결과를 비교하고자 한다. 연구를 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

앞선 결과에서 알 수 있는 바와 같이 수치해석을 통한 관 내 퇴적이고 관측 값과 본 연구에서 제안한 퇴적이고 예측모델을 통한 예측 값의 범위는 개개 경우에서 최소 0에서 최대 33% 정도로 나타났다. 본 연구에서 진행한 63개 조건을 통틀어 따져볼 때 평균적으로 10% 미만의 오차범위를 갖는 것으로 나타났다. 이와 같이 관 저면에 적게 퇴적이 발생한 상황에 대한 예측을 제외하고는 작은 오차를 보이고 있으므로 본 연구에서 제안한 퇴적이고 예측모델을 활용할 경우 향후 우수관저 내 통수능을 고려한 퇴적의 예측자료로 활용

할 수 있을 것이다. 다만, 더 정확한 예측모델을 얻기 위해서는 실제 관측값을 포함한 다양한 상황을 회귀분석에 적용하여 예측모델을 유도해내야 할 것이다.

Fig. 5. Correlation Result Using Sediment Prediction Model

5. 결론 및 고찰

본 연구는 수치해석 기법을 바탕으로 관 내부 슬러리의 유동특성에 대한 해석적 연구를 진행했으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 먼저 토사 슬러리 입자의 유입속도가 느리고, 입자의 직경이 크면 더 바닥으로 치우치며, 입자의 유입속도가 빠르고 입자의 직경이 작으면 더 많이 부유한 상태로 이동되는 것을 알 수 있다. 토사 슬러리 입자가 관 유입부 근처에 퇴적되면, 퇴적이 발생한 부근에서의 관 내 유속이 증가하고, 그에 따라 입구에 퇴적된 입자의 이송이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 유입되는 토사 슬러리의 속도가 느리고, 입자의 직경이 증가하면 퇴적되는 양이 많아지며, 그에 따라 슬러리의 안정적이 이송이 방해된다는 것을 파악할 수 있었다. 관 내 토사의 퇴적높이를 무차원화 하여 관 내 혼합물을 고려한 평균유속, 토사 슬러리의 체적분율, 그리고 토사의 입자크기와의 관계를 상관식으로 도출하였고 퇴적높이와 본 모델과의 선형 회귀분석 결과 상관계수(R^2)가 0.892로써 높은 상관율을 가지고 예측됨을 확인하였다.

관측 값과 예측정확도와의 관계를 분석함에 있어 어떠한 흐름에 결과를 획일화(규정)하는 것은 불가능하다. 모델링을 통한 결과가 실제 현상을 모두 대변하지는 않는다. 따라서 본 모델링에 앞서 검증을 실시하였고 분석과정에서 도출된 분석 경우의 수를 사용하게 되었다. 충분한 경우의 수가 반영된 것은 보다 나은 예측 값 도출에 따른 설계에 있어서 중요한 고려 요인이라 할 수 있다.

References

- Capecelatro, J., and Desjardins, O. (2013) Eulerian–Lagrangian Modeling of Turbulent Liquid–solid Slurries in Horizontal Pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 55, pp. 64-79.
- Gidaspow, D. (1994) *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions*. Academic press.
- Kaushal, D.R., Thinglas, T., Tomita, Y., Kuchii, S., and Tsukamoto, H. (2012) CFD Modeling for Pipeline Flow of Fine Particles at High Concentration. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 43, pp. 85-100.
- Launder, B.E., and Spalding, D.B. (1974) The Numerical Computation of Turbulent Flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 269-289.
- Lun, C.K.K., Savage, S.B, Jeffrey, D.J, and Chepuriniy, N. (1984) Kinetic Theories of Granular Flow: Inelastic Particles in Coquette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 140, pp. 223-256.
- Messa, G.V., and Malavasi, S. (2015) Improvements in the Numerical Prediction of Fully-suspended Slurry Flow in Horizontal Pipes. *Powder Technology*, Vol. 270, Part A, pp. 358-367.
- Messa, G.V., Malin, M., and Malavasi, S. (2014) Numerical Prediction of Fully-suspended Slurry Flow in Horizontal Pipes. *Powder Technology*, Vol. 256, pp. 61-70.
- Parsi, M., Kara, M., Agrawal, M., Kesana, N., Jatale, A., Sharma, P., and Shirazi, S. (2017) CFD Simulation of Sand Particle Erosion under Multiphase Flow Conditions. *Wear*, Vol. 376-377, Part B, pp. 1176-1184.
- Schmitt, F.G. (2007) About Boussinesq's Turbulent Viscosity Hypothesis: Historical Remarks and a Direct Evaluation of Its Validity. *Comptes Rendus Mécanique*, Vol. 335, No. 9-10, pp. 617-627.
- Shang, Z., Lou, Z., and Li, H. (2013) A Novel Lagrangian Algebraic Slip Mixture Model for Two- phase Flow in Horizontal Pipe. *Chemical Engineering Science*, Vol. 102, pp. 315-323.
- Singh, J. P., Kumar, S., and Mohapatra, S. K. (2017) Modelling of Two Phase Solid-liquid Flow in Horizontal Pipe using Computational Fluid Dynamics Technique.

- International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 31, pp. 20133-20137.
- 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.
- Syamlal, M., and O'Brien, T.J. (1989) Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed. *AIChE Symposium Series*, Vol. 85, No. 1, pp. 22-31.
- Wen, C.Y., and Yu, Y.H. (1966) A Generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity. *AIChE Journal*, Vol. 12, No. 3, pp. 610-612.
- Zambrano, H., Sigalotti, L.D.G., Klapp, J., Peña-Polo, F., and Bencomo, A. (2017) Heavy Oil Slurry Transportation through Horizontal Pipelines: Experiments and CFD Simulations. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 91, pp. 130-141.

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