Simulation of Soil Behavior due to Dam Break Using Moving Particle Simulation

Kyung Sung Kim* and Dong-Woo Park*

*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Tongmyong University, Busan, Korea

댐 붕괴에 의한 토양 거동 시뮬레이션

김경성* · 박동우*

*동명대학교 조선해양공학부

KEY WORDS: Moving particle simulation 입자법, Multiphase flow 다상유동, Soil behavior 지표면 토양 거동

ABSTRACT: A Lagrangian approach based computational fluid dynamics (CFD) was used to simulate large and/or sharp deformations and fragmentations of interfaces, including free surfaces, through tracing each particle with physical quantities. According to the concept of the particle-based CFD method, it is possible to apply it to both fluid particles and solid particles such as sand, gravel, and rock. However, the presence of more than two different phases in the same domain can make it complicated to calculate the interaction between different phases. In order to solve multiphase problems, particle interaction models for multiphase problems, including surface tension, buoyancy-correction, and interface boundary condition models, were newly adopted into the moving particle semi-implicit (MPS) method. The newly developed MPS method was used to simulate a typical validation problem involving dam breaking. Because the soil and other particles, excluding the water, may have different viscosities, various viscosity coefficients were applied in the simulations for validation. The newly developed and validated MPS method was used to simulate the mobile beds induced by broken dam flows. The effects of the viscosity on soil particles were also investigated.

1. 서 론

댐 붕괴에 의해 큰 파형을 가지는 유체는 심각한 강의 범람 및 구조물에 큰 피해를 줄 수 있다. 이에 따라 수리학을 연구하는 학자들로부터 이러한 ‘댐 붕괴’ 문제는 많은 이론적, 실험적, 그리고 수치적 방식으로 연구되어 왔다. ‘댐 붕괴’ 문제는 형태 및 경계조건의 단순함에도 불구하고 격렬한 자유표면에 기인한 비선형 유동으로 인해 해석에 어려움이 존재한다. 또한 ‘댐 붕괴’에 의한 유동은 유동자체의 해석 뿐 만 아니라 지표면의 토양 등의 물질들을 움직이게 하는 경우도 있으며, 토양 등의 물질과 함께 흐르는 유동은 구조물에 충격 시 환경과 기반 시설에 심각한 피해를 끼칠 수 있다. 이러한 문제들에 관한 연구는 오일러리안 기반의 격자를 사용한 전산유체역학 방식으로 연구가 수행되어 왔다. 격자를 이용한 일반적인 전산유체역학 방식은 댐 붕괴 등에 의한 대-변형에 기인한 자유표면의 격렬한 거동이나 부서짐을 Marker and cell 방식이나 Volume of fluid 방식으로 자유표면을 추적하고 구현하는 방식을 사용한다(Kim and

Chen, 2014). 그러나 이러한 방식은 날카로운 형태의 자유표면이나 분쇄와 같은 형태를 구현하기에는 어려움이 있어 비선형성이 강한 ‘댐 붕괴’에 기인한 유동 및 유동으로 인한 지표 토양의 거동 구현에는 어려움이 있다.

이러한 문제를 해결하고 앞서 언급한 대-변형에 기인한 자유표면 거동의 구현을 위해 최근 적용되는 방식으로는 라그랑지안 기법을 따르는 입자법이 대두되었다. 입자법은 각각의 이산화된 입자를 추적하고 물리량을 기록하는 라그랑지안 기법을 따르므로 자유표면을 포함한 경계면이 대-변형에 기인한 날카로운 경계를 형성하는 문제 및 분쇄를 구현하는데 있어 기존의 격자 기반의 방식에 비해 장점을 가진다. 이러한 입자법의 종류로는 Smoothed particle hydrodynamics(SPH) (Monaghan, 1994)과 Moving particle simulation(MPS)법이 (Koshizuka and Oka, 1996) 대표적이며, 이외에 사용하는 목적에 맞게 구성된 Dissipative particle dynamics(DPD)과 Lattice boltzmann method(LBM) 등이 있다. 초기 입자법의 발전시기에는 SPH법은 상태방정식으로 압력을 해석하는 기법을 사용하여 연산속도가 빠른 장점이 있었

Received 29 April 2017, revised 4 May 2017, accepted 30 October 2017

Corresponding author Dong-Woo Park: +82-51-629-1654, dwpark@tu.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

다. 그러나 포아송 방정식을 음적으로 해석하는 MPS와 비교하여 압력 진동 및 오차가 크다는 단점이 있었다. 현재는 MPS와 같은 방식의 압력 해법을 사용하는 Incompressible smoothed particle hydrodynamics (ISPH)법의 개발로 SPH법과 MPS법 간의 차이는 많이 사라졌다고 사료된다(Xu et al., 2009). 본 연구에서는 열거된 입자법 방식 중 MPS법을 사용하였다. MPS법은 SPH와 유사한 알고리즘을 가지고 있지만 SPH법에서는 입자의 물리량 분포를 연속함수로 근사한 뒤 이에 대한 구배 및 발산 등을 구하는 방식을 사용한다. 그러나 MPS법의 경우 입자간 상호작용을 함수화 한 방식을 이용하여 SPH법과는 차별을 두고 있다. 또한 MPS는 기존의 참고문헌들에서 ‘댐 붕괴’에 좋은 결과를 보여주고 있어 본 연구의 시뮬레이션 기법으로 선택하였다.

MPS법은 Koshizuka and Oka(1996)에서 처음 제안되었으며, Tanaka and Masunaga(2010)과 Lee et al.(2011)에서 압력해법을 위한 포아송 압력 방정식에 다항식 형태의 소스항과 자유표면 탐색 기법을 복수 조건 탐색기법으로 개량하며 초기 입자법에서 문제가 되어왔던 압력의 수치 진동을 개선하였다. 또한 초기 단상유동의 문제에 최적화되어 있던 MPS법은 Kim et al.(2014)에 의해 표면장력 모델, 유체-유체간 경계조건모델, 부력수정모델 등 다상유동 시 입자간 상호작용모델을 적용하여 다상유동 문제에 적합하도록 개발되어왔다. 고체 입자에 관한 MPS법의 연구는 Gotoh and Fredsoe(2000)에서 유체입자와는 다른 밀도를 가진 입자를 배치함으로써 연구되었으며, 다상 유체 등 급격한 밀도차가 생기는 입자 배치 시 이를 구현하는 기법 연구는 Khayyer and Gotoh(2013)에서 입자수밀도 평균화 방식을 채택하여 연구되었다.

본 연구에서는 댐 붕괴에 의해 발생한 유동이 지표의 토양을 교란시키는 문제를 시뮬레이션 하였다. 지표의 토양과 붕괴 유체간의 상호작용을 효과적으로 계산하기 위해 Kim et al.(2014)에서 제안한 다상유동형 MPS법을 채택하였으며, 2개의 상이 존재하고 입자간 물리량의 큰 차이가 없다고 판단되어 Khayyer and Gotoh(2013)에서 제안한 입자 물리량 평균화 방식은 배제하였다. 토양입자는 Janosi et al.(2004)에서 사용한 Polyethylene-oxide(PEO)를 사용하였으며 가두어진 유체를 격벽을 제거하여 붕괴 유동을 재현하는 방식을 사용하여 붕괴 유체에 의한 토양 거동의 시뮬레이션 수행하였다.

2. Moving Particle Simulation

완전한 라그랑지안 접근법을 따르는 비압축성 MPS법의 지배 방정식으로 연속방정식 식 (1)과 Navier-stoke 방정식 식 (2)를 사용한다.

$$\frac{D\rho}{Dt}=0 \quad (1)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt}=\frac{1}{\rho}\nabla P+\nu\nabla^2\vec{u}+\vec{g}+\rho\kappa\vec{n} \quad (2)$$

여기서 ρ 는 밀도, t 는 시간, P 는 압력, $\vec{u}$ 는 입자 속도, ν 는 동점성계수, ∇ 는 구배, ∇^2 는 라플라시안, $\vec{g}$ 는 중력가속도, σ 는

표면장력 계수, κ 는 경계면 곡률, $\vec{n}$ 은 경계면의 법선벡터를 의미한다. 지배방정식의 차분항은 라그랑지안 접근법을 따르는 입자법의 형태로 변환하여야 한다. 이를 위해 입자간 상호작용 모델을 적용한 구배모델, 확산모델, 그리고 비압축성모델을 사용하여 차분항을 계산할 수 있다. 식 (2)에서 좌변의 네 번째 항인 표면장력항은 경계면 입자에만 적용이 가능하도록 설정하였다. 입자법을 따르는 차분항에 관한 자세한 내용은 Kim et al. (2014)에서 찾을 수 있다.

MPS법의 장점으로서는 기인한 날카롭고 분쇄가 발생하는 자유 표면의 대-변형에 관한 모사가 가능하다는 점이다. 자유표면 모사를 위해서는 자유표면 경계조건을 만족시켜야 한다. 운동학적 자유표면 경계조건은 입자를 각각 추적함으로써 만족이 되며, 동역학적 자유표면 경계조건은 자유표면 입자에 대기압을 적용함으로써 만족시킬 수 있다. 이를 위해 높은 정도의 자유표면 탐색 기법이 필요하며, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 Lee et al.(2011)에서 제안한 다중 조건 형 자유표면 탐색 기법을 사용하였다. 다중 조건 형 자유표면 탐색기법은 다음과 같이 입자수 밀도의 크기를 이용하는 식 (3)과 주변입자의 물리적 개수를 이용하는 식 (4)를 사용한다.

$$n_i < \beta_1 n_0 \quad (3)$$

$$N_i < \beta_2 N_0 \quad (4)$$

여기서 n_i 는 입자수밀도로서 유체의 밀도에 대응되며, n_0 는 초기 입자 배치 시 입자수밀도, N_i 는 중심입자에 대한 주변입자 개수, N_0 는 초기 배치 시 유체 중에 잠겨있는 유체의 주변 입자의 개수, β_1 과 β_2 는 조건식 계수로서 임의의 상수이다. 본 연구에서는 Lee et al.(2011)에서 제안하는 조건식 계수 값인 $\beta_1=0.97$ 과 $\beta_2=0.85$ 를 사용하였다. 입자수밀도를 구하는 공식은 식 (5)에 나타나 있다.

$$n_i = \sum_{j \neq i} w(r_{ij}) \quad (5)$$

여기서 $w(r_{ij})$ 는 가중치함수이다. 가중치함수는 입자법이 가지고 있는 연속성 위배를 보완하는 함수로써, 중심입자에 대한 주변입자의 영향을 계산한다. 본 연구에서 사용된 가중치함수는 식 (6)을 이용하여 구한다.

$$w(r_{ij}) = \begin{cases} \left(1 - \frac{r_{ij}}{r_e}\right)^3 \left(1 + \frac{r_{ij}}{r_e}\right)^3 & 0 < r_{ij} \leq r_e \\ 0 & r_{ij} > r_e \end{cases} \quad (6)$$

여기서 $r_{ij}=(r_j-r_i)$ 이며, r_i 는 i 번째 입자의 위치, r_e 는 유효임계거리이다. 식 (6)에서 보이는 것과 같이 중심입자에서 멀어질수록 주변입자의 중심입자에 대한 영향력은 줄어들며, 임계유효거리를 벗어나면 주변입자가 중심입자에 끼치는 영향이 없음을 알 수 있다.

Fig. 1 Schematic of free surface particle searching

본 연구에서는 다상유동이 포함된 문제의 모사를 위해 자유 표면을 포함한 유체-유체간의 경계면 탐색 기법이 추가적으로 필요하다. 이를 위해 Lee et al.(2011)에서 제안된 다중조건형 자유표면입자 탐색 기법 중 첫 번째 조건인 식 (3)을 수정한 다중 조건형 경계입자탐색기법을 사용하였으며, 식 (7)과 같이 수정되었다.

$$\beta_3 n^0 < n_i < \beta_1 n^0 \quad (7)$$

여기서 β_1 은 식 (3)에서 사용된 값과 동일하며 같으며 β_3 은 수치실험을 통해 0.35로 설정되었다. 식 (7)에서 보이는 것과 같이 경계면으로 인식되기 위해서는 입자수밀도가 초기입자배치시의 입자수밀도보다 β_1 배 작으면서 β_3 배 큰 경우에만 인식이 될 수 있다. 이를 통해 파쇄 혹은 상이 다른 유체로 하나 혹은 아주 적은 수의 입자가 존재할 시 경계층을 형성하지 않게 되어 실질적인 경계면 탐색이 가능하다.

다상유동의 정도 높은 모사를 위해 사용된 입자간 상호작용 모델 중 표면장력 모델의 연산을 위해 기존의 입자수밀도외에 추가로 표면장력을 위한 입자수밀도를 추가하였다. 추가된 입자수밀도는 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} n_i^{st1} &= \sum_{j \neq i} w^{st1}(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \\ n_i^{st2} &= \sum_{j \neq i} w^{st2}(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 표면장력을 위한 가중치함수는 식 (9)를 이용하여 계산된다.

$$\begin{aligned} w^{st1} &= \begin{cases} 1 & (0 < r \leq r_e^{st}) \\ 0 & (r > r_e^{st}) \end{cases} \\ w^{st2} &= \begin{cases} 1 & (0 < r \leq r_e^{st} \text{ and } n_j^{st1} > n_i^{st1}) \\ 0 & (r > r_e^{st}) \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 r_e^{st} 는 표면장력을 위한 임계거리이며 수치실험을 통해 기본값을 초기입자거리의 1.3배로 설정하였다. 위의 새로이 추가된 표면장력계산을 위한 입자수밀도를 이용하여 경계면의 곡률을 식 (10)을 이용하여 계산할 수 있다.

(a) Model for curvature of interface

(b) Model for normal vector for interface

Fig. 2 Schematic models for surface tension

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{2}{r_e^{st}} \cos \left(0.5 \pi \frac{n_i^{st2}}{n_0^{st1}} \right) \quad (10)$$

여기서 R 은 곡률반경이며 n_0^{st1} 은 초기 입자배치에서의 표면장력을 위한 입자수밀도이다.

표면장력의 계산에 있어서 또 다른 요소는 경계면의 법선벡터이다. 입자법의 경우 개개의 입자가 물리량을 가지며 독립적으로 거동하기 때문에 Fig. 2(a)와 같이 경계면 입자를 인지한 후 이를 이용하여 법선벡터를 탐색하였다. Fig 2(b)에 나타난 바와 같이 중심입자로 설정된 경계면 입자와 임계거리 내 주변입자 중 경계면 입자로 인지된 입자간의 거리를 이용하여 입자간 상호 물리량을 파악하고 이를 합하여 법선 벡터를 구하고, 추후 합하여진 법선벡터를 절대값을 취한 값으로 나누어주어 단위법선벡터를 구하는 방식을 사용하였으며, 이는 아래의 식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{a}_i &= \vec{n}_x \sum_{j \neq i} x_n w^{st1}(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) + \vec{n}_z \sum_{j \neq i} z_n w^{st1}(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \\ n_i &= \frac{a_i}{|a_i|} \end{aligned} \quad (11)$$

또 다른 다상유동형 입자간 상호 모델은 부력수정모델이다. 입자법 중 MPS법에서는 주변입자의 영향을 가중치함수를 이용하여 계산하는 방식을 사용하고 있다. 그러나 가중치함수의 경우 전 방향 확산의 형태를 가지고 있기 때문에, 입자간 밀도차가 나는 경우 압력의 방향을 잘못 해석할 수 있는 여지가 있다. 이러한 문제는 부력수정항을 추가하는 방식으로 해결이 가능하다. 부력수정항은 압력구배로부터 입자의 속도를 구하는 단계에 추가된다. 본 연구에 사용된 부력수정항은 식 (12)와 같다.

$$\vec{u}_i^* = -\frac{\Delta t d}{\rho_i n^0} \quad (12)$$

$$\left[\sum_{j \neq i} \frac{P_j - P_i}{|r_j - r_i|} w(|r_j - r_i|) - \sum_{j \neq i} \frac{\vec{g}(\rho_j - \rho_i)(z_j - z_i)}{(r_j - r_i)^2} (\vec{r}_j - \vec{r}_i) C_B w(|r_j - r_i|) \right]$$

여기서 Δt 는 시간간격, d 는 시물레이션 모델의 차원, C_B 는 부력수정계수이다. 부력수정계수는 임의의 상수이며 본 연구에서는 수치실험을 통해 0.5로 설정되었다. 경계입자탐색모델과 표면장력모델, 부력수정모델의 자세한 내용과 검증은 Kim et al. (2014)에서 찾을 수 있다.

3. 수치해석 모델 및 결과

본 연구의 목표는 ‘댐 붕괴’에 기인한 유체의 격렬한 유동 생성 및 생성된 유동에 의해 지표면의 토양 거동 시물레이션이다. 본 연구를 효과적으로 수행하기 위해 검증을 시도하였으며, 검증에 사용된 문제 설정은 본 연구의 방향과 일치하며 입자법 중 MPS법의 검증에 대표적으로 사용되는 단일유체 ‘댐 붕괴’ 문제를 재현하였다. Fig. 3과 같이 길이 0.6m, 높이 0.4m인 2차원 수조의 좌측벽에 길이 0.15m, 높이 0.3m의 유체기둥을 설정하고 중력에 의해 자연발생적인 유동을 발생시키도록 설정하였다. 실험에는 존재하는 격벽의 이동은 빠른 상승이 수치 불안정성을 유발할 수 있다고 판단하여 시물레이션 상에서 격벽은 포함시키지 않았다. 사용된 유체 입자의 수는 총 45000개를 사용하였으며 초기 입자간 거리는 0.001m로 설정하였다. 사용한 시간간격은 0.0001초를 사용하였다.

Fig. 4는 Koshizuka et al.(1996)에서 수행한 ‘댐 붕괴’ 실험과 본 연구에서 개발된 MPS법을 이용한 수치 시물레이션 결과의 비교이다. 실험에 대한 시물레이션 결과 검증을 위해 유체입자의 밀도와 동점성계수는 각각 1000kg/m^3 과 $1.0 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 로 실험

Fig. 3 Schematic model for dam break problem

에서 사용한 것과 동일하게 설정하였다. Fig. 4에서 보이는 것과 같이 실험과 시물레이션 결과를 동일 시간에 대한 스냅샷을 비교하여 잘 일치함을 확인하였다.

일반적으로 입자기반 전산유체역학 기법에서 토양과 같은 고체입자는 유체입자에 비해 높은 밀도와 동점성계수를 설정하여 구현한다. 따라서 점성효과가 적절히 적용되었는지 확인하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 앞서 실험과의 비교를 통해 검증된 MPS법에 다양한 동점성계수를 설정하여 점성효과가 적절히 구현되는지를 확인하였다. 본 시물레이션에서 사용한 동점성계수는 Table 1에 나타나 있다. 밀도는 비교를 위해 앞서 설정한 시물레이션과 같은 1000kg/m^3 으로 동일하게 적용하였다. Fig. 5는 동점성계수를 달리한 경우들에 대해 같은 시간에서의 결과 비교를 나타낸다. Fig. 5의 비교에서 알 수 있는 것은 동점성계수가 높아짐에 따라 선단 형태가 뭉툭해지는 것을 확인할 수 있다. 이는 점성에 의한 진행방향으로의 속도 저항의 결과이다. 특히 Case A-VII과 같이 점성이 매우 높은 비-뉴토니안 유체인 경우 꿀 등의 경우와 같이 뭉쳐짐이 발생하는 것을 확인할

Viscosity	0.25 sec	0.50 sec	0.75 sec
Experiment results with water $\nu = 1.0 \times 10^{-6}$			
Numerical results $\nu = 1.0 \times 10^{-6}$			

Fig. 4 Comparison between Exp. and simulation

Table 1 Properties of particle for broken dam simulation

Case	A-I	A-II	A-III	A-IV	A-V	A-VI	A-VII
Density [kg/m^3]	1000						
Kinematic viscosity [m^2/s]	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-2}

Fig. 5 comparison of various kinematic viscosity

수 있으며 이를 통해 점성효과가 적절히 작용하고 있음을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 점성은 유동의 진행방향 속도에 대한 저항으로 볼 수 있다. 따라서 유속의 비교를 통해 점성 효과의 영향을 확인하였다. Fig. 6은 각각의 경우들에 대한 시뮬레이션 결과로서 세로축의 Z 는 선단의 위치, L 은 수조의 길이로

붕괴파의 전단면에서의 선단(Leading edge)의 위치변화를 수조 길이로 나눈 $[Z/L]$ 무차원수를, 가로축은 시간을 중력가속도를 수조길이로 나눈 값의 제곱근의 곱으로 $[t \times \sqrt{(2g/L)}]$ 시간에 대한 무차원수로 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보이는 것과 같이 점성이 높아짐에 따라 선단의 속도는 눈에 띄게 느려지는

Fig. 6 Comparison of the position change of leading edge

것을 확인할 수 있으며, 동점성계수가 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 이하가 되면 선단 속도는 수렴하는 모습을 보인다. 이를 통해 동점성계수가 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 이하인 경우 비점성유체로 가정할 수 있다.

앞선 비교를 통해 검증된 프로그램을 이용하여 본 연구의 목표인 격렬한 유동에 기인한 지표면의 토양 거동 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 7은 시뮬레이션을 위한 모델이다. 유동을 만드는 유체는 물로 설정하였으며 토양으로는 PEO모형을 이용하여 Janosi et al.(2004)에서 수행된 실험과 같은 조건을 설정하였다. 시뮬레이션에서 사용된 물과 PEO모형의 밀도는 각각 1000 kg/m^3 과 997 kg/m^3 을 사용하였으며 물과 PEO모형의 동점성계수는 각

Fig. 7 Schematic model for soil behavior simulation

Time	Experience	Simulation
$t=0.131\text{s}$		
$t=0.196\text{s}$		
$t=0.261\text{s}$		
$t=0.327\text{s}$		
$t=0.392\text{s}$		
$t=0.457\text{s}$		

Fig. 8 Comparison of soil behavior between Exp. and simulation

Table 2 Characteristics of particles

Case	B-I	B-II	B-III	B-IV	B-V
Density (water) [kg/m^3]	1000				
Density (soil) [kg/m^3]	1000				
Kinematic viscosity (Water) [m^2/s]	1.0×10^{-6}				
Kinematic viscosity (Soil) [m^2/s]	0.935×10^{-6}	1.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-3}

Fig. 9 Snapshot comparisons between experiment and simulations

각 $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 와 $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 를 사용하였다. 물의 입자개수는 57000개, PEO모델의 입자개수는 18000개를 사용하여 초기 입자간 거리를 0.001m로 설정하였다.

초기조건에서 물은 격벽에 의해 토양과 분리되어 있으며 격벽이 1.5m/s의 속도로 상승하면서 물이 붕괴된다. 붕괴로 인해 격렬한 유동이 생성되고 생성된 유동이 바닥에 깔려있는 PEO를 충격하게 된다. Fig. 8은 Janosi et al.(2004)의 실험의 결과와 동일한 시간에서의 시뮬레이션 결과이다. 앞서 검증에 위한 단일 유체의 ‘댐 붕괴’ 문제의 경우 격벽의 상승속도가 매우 빠르기 때문에 격벽의 상승에 의한 유동의 수치적 오류를 줄이기 위해 시뮬레이션에서는 격벽을 사용하지 않았다. 그러나 격렬한 유동에 의한 토양의 거동 시뮬레이션 문제에서는 격벽의 상승 속도가 상대적으로 낮기 때문에 격벽을 모델링하였다. 또한 PEO모델과 같이 점성이 낮은 경우는 격벽이 없는 상태에서는 선단이 하부를 미는 형태가 아닌 상부에서 무너져 내리는 형태가 나올 수 있어 수치적 오류가 발생할 가능성이 높다는 판단에 격벽을 사용하였다. Fig. 8에서 보여지는 것과 같이 시뮬레이션 결과가 실험과 유사함을 알 수 있다.

고체입자의 경우 유체와 혼합되면 진흙과 같이 비-뉴턴 유동을 가지는 형태가 될 수 있다. 비-뉴턴 유동은 점성이 매우 높은 유체의 유동으로써 앞서 단일 유체의 ‘댐 붕괴’ 문제에서 사용된 높은 동점성계수의 시뮬레이션 결과에서 보이는 것과 같다. 따라서 본 연구에서는 자갈 등의 경우를 상정한 PEO모델 뿐만 아니라 진흙 등에 대한 다양한 문제에 적용 가능성을 파악하고자 Table 2에 나타나 있는 토양 특성들의 경우에 대해 시뮬레이션 하였다. 이때 붕괴되는 유체는 물로 동일하게 적용하였다. Fig. 9는 각각의 경우에 대한 시뮬레이션 결과 비교이다.

앞서 단일 유체의 붕괴 시뮬레이션으로부터 예측할 수 있듯이 Case B-I~IV까지의 경우 낮은 동점성계수에 의해 점성의 영향이 크게 작용하지 않기 때문에 4개의 경우 모두 비슷한 양상을 보인다. 붕괴된 물 입자가 토양을 충격하게 되고, 붕괴 유체가 토양을 밀어 올리게 된다. 토양의 경우에 붕괴 유체에 의한 충격으로 권파의 형태를 띠게 된다. 권파의 형태로 발달되는 시각을 비교하면 높은 동점성계수에 의해 유동에 저항값이 높아져 발달 속도가 느려짐을 알 수 있다. 추가적으로 선단의 속도로 인해 유체의 충격에 의해 파형으로 발달하는 토양의 선단의 형태가 달라지는 것 역시 관찰되었다. 점성이 낮은 Case B-I과 B-II의 경우, 선단이 날카로운 형상을 지니며 그 끝(Tip)에서 갇아지는 형태가 보이나, 상대적으로 점성이 높은 Case B-III과 B-IV의 경우 상대적으로 뭉툭한 선단의 형상을 관찰할 수 있다. 이는 상대적으로 저하된 유속이 낮은 에너지를 가지게 되기 때문으로 파악된다. 또 다른 주목할 부분은 권파의 후류 부분의 에어포켓 부분이다. 점성이 높아질수록 유동의 속도에 저항하는 값이 커지게 되며 이에 따라 파의 진행속도 역시 저하된다. 저하된 유속에 의해 에어포켓의 크기가 점점 줄어들며, 이 후 점성이 높아지는 Case B-IV부터는 에어포켓이 보이지 않았다. 또한 상대적으로 점성이 높은 경우인 Case B-III과 B-IV의 경우는 Case B-I과 B-II의 경우에 비해 느린 것을 확인할 수 있다.

동점성계수가 $1.0 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ 인 비-뉴턴 유체로 가정할 수 있는 Case B-V의 경우 앞의 경우와는 다른 결과를 보인다. 먼저 붕괴

유체가 토양을 충격하였을 시 Case B-I~IV까지의 경우는 충격 에너지에 의해 토양 입자가 밀려올라가는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 동점성계수가 높은 Case B-V의 경우에는 유체가 토양을 밀어 올리지 못하고 토양을 넘어가는 유동을 보인다. 이는 토양입자의 동점성계수가 매우 높아 입자간 결속력이 높고, 이에 따라 붕괴유체가 토양을 크게 변형시키지 못하는 것으로 사료된다. 토양입자 위를 넘어간 유동은 토양입자 간 결속력이 상대적으로 낮은 상부의 입자와 혼합되어 유동을 만들어낸다. 그러나 그 크기가 앞서 수행된 Case B-I~IV에 비해서는 매우 작음을 알 수 있다.

다양한 점성계수를 가진 경우들을 비교한 결과 특이한 점은 Case B-III의 경우 동점성계수가 실험에서 사용된 PEO의 동점성계수보다 50배 높은 경우이지만 PEO와 같은 동점성계수를 사용한 Case B-I에 비해 실험결과와 더욱 유사함을 알 수 있다. 이는 PEO의 모델을 고체입자가 아닌 유체로 가정하였기 때문에 발생할 수 있는 문제로 사료된다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 입자기반 전산유체역학 기법 중 Moving particle semi-implicit 법을 이용하여 ‘댐 붕괴’에 기인한 격렬한 유동 생성 및 생성된 유동에 의한 지표면 토양의 거동을 시뮬레이션 하였다. 토양입자의 경우 상이 다른 유체입자를 가정하여 시뮬레이션하였으며 이를 위해 다상유동형 MPS법을 사용하였다. 사용한 다상유동형 MPS법은 Kim et al.(2104)의 방식을 채택하였으며, 다상유동을 위해 부력수정항, 표면장력항과 유체-유체 경계조건을 도입하였다. 검증을 위해 본 연구에서 개발된 다상유동형 MPS법을 본 연구의 목표 문제가 유사한 단상유체의 댐-붕괴 문제에 적용하였으며 동일 실험과의 비교를 통해 검증하였다. 또한 토양입자의 경우 점성이 다를 수 있음을 인지하여 단상유체의 댐-붕괴문제에 다양한 동점성계수값을 설정하여 시뮬레이션하고 그 결과를 비교하였다. 단상유체의 댐-붕괴문제에서 다양한 동점성계수를 적용하였을 시 점성의 물리적 의미인 유동속도에 대한 저항을 측정하여 점성항의 효과를 확인하였다. 점성이 높아질수록 붕괴유동의 속도가 저하됨을 선단의 위치변화를 비교하여 확인할 수 있었으며, Snapshot비교를 통해 점성의 높아짐에 따라 선단 형태가 뭉툭해짐을 확인하였다.

검증 이후 다상유동형 MPS법 프로그램을 이용하여 ‘댐 붕괴’에 기인한 격렬한 유동에 의한 토양의 거동을 시뮬레이션 하였다. 붕괴된 물로 가정된 유체는 격벽에 의해 막혀있으며, 격벽 넘어 토양입자를 배치하였다. 검증을 위한 토양입자는 Janosi et al.(2004)에서 사용된 PEO모델을 사용하였다. 격벽의 상승은 유체입자의 붕괴를 유발하였으며, 붕괴에 기인한 격렬한 유동은 토양을 충격하는 시뮬레이션을 수행하여 동일한 실험과 그 결과를 비교하였다. 붕괴에 기인한 유동은 토양입자를 충격하였으며 토양입자를 위로 밀어 올리는 형태의 유동을 발생시켰다. 유체와의 충격에 의해 움직인 토양입자는 유체의 형태와 비슷한 파형을 가졌고 그 형태는 권파의 형태를 띠었으며 이는 실험에서 관찰된 것과 유사하였다.

나아가 토양의 경우 진흙 또는 다양한 물체가 있을 수 있기

때문에 다양한 점성을 적용한 토양 입자를 배치하여 동일한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 설정으로는 물로 가정한 동일한 붕괴유체가 점성이 다른 토양입자를 충격하는 경우를 설정하였다. 비교결과 동점성계수가 $1.0 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ 이하인 경우 점성에 의한 유동저항이 크지 않아 아주 작은 발달 시간의 차이가 존재하였을 뿐 비슷한 시뮬레이션 결과를 확인할 수 있었다. 그러나 발달속도의 차이에 의해 토양입자의 점성이 높은 경우 충격에 의한 파의 선단형태가 뭉툭해짐을 확인할 수 있었으며, 이는 단산유체의 땀-붕괴문제 시뮬레이션에서 확인된 것과 같은 형태임을 알 수 있다.

토양입자의 동점성계수가 $1.0 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ 로 매우 높은 경우는 동점성계수가 상대적으로 낮은 경우와는 다른 결과를 보였다. 높은 점성으로 인해 붕괴유체의 충격에도 토양입자의 거동이 크지 않음을 확인할 수 있었으며, 붕괴유체가 토양입자를 충분히 밀어 올리지 못하고 그 위를 넘어가는 유동을 보였다. 이는 꿀 등의 비-뉴턴 유체위에 물 등의 유체를 흘려보내었을 때와 유사한 형태를 지님을 알 수 있다.

본 연구에서의 시뮬레이션 결과 비교를 통해 격렬한 유동이 생성되었을 시 그 유동과 충격하는 토양은 유동에 어느 정도 저항하지만 이 후 유동과 혼합되어 다상유동을 만들었다. 그리고 이는 같은 실험에서의 결과와 유사함을 알 수 있다. 그러나 다양한 물성치를 가진 토양의 거동을 위해 토양입자를 고체입자의 특성을 가진 형태로 구현하는 것은 매우 필요하며 이는 후속 연구를 통해 개발될 예정이다. 향후 후속 연구를 기반으로 ‘땀 붕괴’와 같은 격한 형태의 유동이 아닌 일반적인 형태의 유동에 의해 해저면이 교란되는 형태 등의 유체의 유동과 토양입자의 거동간의 문제를 해결할 수 있는 기반이 될 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2017학년도 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었습니다(과제번호/2017F033).

References

- Gotoh, H., Fredsoe, J.R., 2000. Lagrangian Two-phase Flow Model of the Settling Behavior of Fine Sediment Dumped into Water. *Coastal Engineering*, 2000, 3906-3919.
- Janosi, I.M., Jan, D., Szabo, K.G., Tel, T., 2004. Turbulent Drag Reduction in Dam Break Flows. *Experiments in Fluids*, 37(2), 219-229.
- Khayyer, A., Gotoh, H., 2013. Enhancement of Performance and Stability of MPS Mesh-free Particle Method for Multiphase Flows Characterized by High Density Ratios. *Journal of Computational Physics*, 242, 211-233.
- Kim, H.S., Chen, H. C., 2014. Three-Dimensional Numerical Analysis of Sediment Transport Around Abutment in Channel Bend. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(24), 21.
- Kim, K.S., Kim, M.H., Park, J.C., 2014. Development of Moving Particle Simulation Method for Multiliquid-Layer Sloshing. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 350165.
- Koshizuka, S., Oka, Y., 1996. Moving-particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid. *Nuclear Science and Engineering*, 123(3), 421-434.
- Lee, B.H., Park, J.C., Kim, M.H., Hwang, S.C., 2011. Step-by-step Improvement of MPS Method in Simulating Violent Free-surface Motions and Impact-loads. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(9), 1113-1125.
- Monaghan, J.J., 1994. Simulating Free Surface Flows with SPH. *Journal of Computational Physics*, 110.2, 399-406.
- Tanaka, M., Masunaga, T., 2010. Stabilization and Smoothing of Pressure in MPS Method by Quasi-compressibility. *Journal of Computational Physics*, 229(11), 4279-4290.
- Xu, R., Stansby, P., Laurence, D., 2009. Accuracy and Stability in Incompressible SPH(ISPH) Based on the Projection Method and a New Approach. *Journal of Computational Physics*, 228(18), 6703-6725.