



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

CFD-DEM 연계 모델 개발 및
세굴 현상에의 적용

Development of CFD and DEM coupled solver and its application to
scouring phenomenon



지도교수 박선호

2020년 8월

한국해양대학교 대학원

해양공학과
송성진

본 논문을 송성진의 공학박사 학위논문으로 인준함.

위원장 공학박사 최 경 식 (인)

위 원 공학박사 서 영 교 (인)

위 원 공학박사 박 선 호 (인)

위 원 공학박사 하 승 현 (인)

위 원 공학박사 도 기 덕 (인)

2020년 6월 29일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi

1. 서 론

1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	7

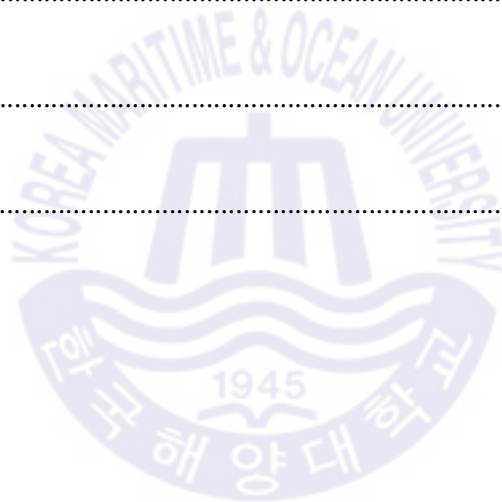
2. 계산 방법

2.1 이산요소법 지배 방정식	8
2.2 전산유체역학 지배 방정식	9
2.3 커널 기반 평균화 기법	12
2.4 항력 모델의 불륨비	13
2.5 소스 코드의 병렬화	13
2.6 CFD-DEM 연계 모델의 흐름도	17

3. 수치적 검증

3.1 단일 입자 침전	19
3.1.1 물에서 자유 낙하하는 모래 입자	19
3.1.2 물에서 자유 낙하하는 강체 구	25
3.1.3 물에서 자유 낙하하는 유리구슬	26

3.1.4 실리콘 오일에서 자유 낙하하는 나일론 공	28
3.2 안식각(Angle of Repose)	31
3.3 입자의 초기 운동	35
4. 해저파이프의 세굴 해석	
4.1 계산영역 크기, 경계조건 및 격자	37
4.2 수치해석 방법	39
4.3 파이프라인 주위 세굴 해석	39
4.4 CFD-DEM 연계 모델의 장점 및 제한	48
5. 결론	49
참고문헌	50
감사의 글	56



List of Tables

Table 3.1 Simulation conditions	20
Table 3.2 Settling velocity	25
Table 3.3 Test cases	29
Table 3.4 Velocity ratio (u_{\max}/u_{∞}) and C_A/E_p	30
Table 3.5 Simulation parameter in DEM solver	33
Table 3.6 Angle of results in dry condition	34
Table 3.7 Angle of results in wet condition	34
Table 4.1 Simulation conditions for pipeline scour	38
Table 4.2 Simulation parameters for DEM solver	40

List of Figures

Fig. 1.1 Vortex structure around offshore structures	2
Fig. 1.2 Numerical instability by grid dependency in settling velocity ..	5
Fig. 2.1 Example of particle information averaged over support region	11
Fig. 2.2 Data transfer between two processors	15
Fig. 2.3 Influence of data transfer between processors in settling velocity	16
Fig. 2.4 Flow chart of CFD and DEM coupled solver	17
Fig. 3.1 Description of single sphere settling in water	20
Fig. 3.2 Settling velocity for various bandwidths (b) and mesh size ratio ($\Delta x/d_p$)	22
Fig. 3.3 Drag model variables with DPVM	23
Fig. 3.4 Drag model variables with kernel-based averaging method ...	24
Fig. 3.5 Particle velocity-distance relationship for various C_A	26
Fig. 3.6 Influence for various added mass coefficients (C_A) with particle volume expansion coefficient (E_p) of 1.0	27
Fig. 3.7 Comparison of settling velocity for various E_p with $C_A=1.5$..	27
Fig. 3.8 Description of single sphere settling in silicon oil	29
Fig. 3.9 Settling velocity	30
Fig. 3.10 Experimental set up (Chen et al., 2015)	32
Fig. 3.11 Simulation set up in dry condition	33
Fig. 3.12 Simulation set up in wet condition	34
Fig. 3.13 Computational domain for incipient motion	36

Fig. 3.14 Incipient motion of particles	36
Fig. 4.1 Computational domain and boundary conditions	38
Fig. 4.2 Evolution of dimensionless scour depth (S/D)	41
Fig. 4.3 Evolution of bed profile (S/D)	42
Fig. 4.4 Evolution of dimensionless maximum scour depth (S/D)	42
Fig. 4.5 Fluid velocity magnitude contour (u_x/u_∞)	44
Fig. 4.6 Particle velocity (u_p)	45
Fig. 4.7 Particle drag force distribution (f_d)	46
Fig. 4.8 Total force (f)	47



Development of CFD and DEM coupled solver and its application to scouring phenomenon

Seong Jin Song

Department of Ocean Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

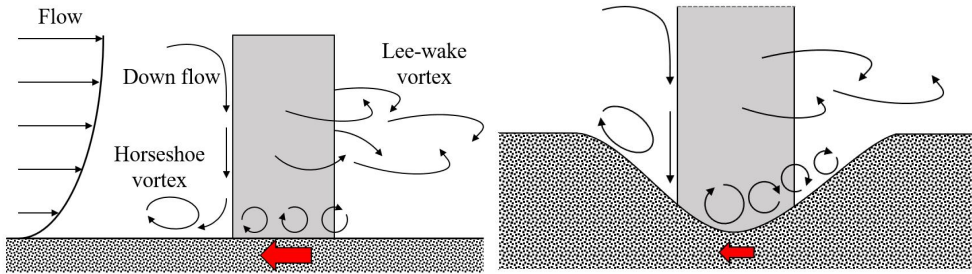
In this study, the Eulerian-Lagrangian approach was used to investigate the fluid flow and the behavior of sediment particles around a subsea pipeline exposed to a current. A solver was developed using the open-source libraries for computational fluid dynamics (CFD) and discrete element method (DEM). The solver used the averaging method based on the kernel function to overcome the grid dependency. To improve the accuracy of the drag force acting on the particle, a modified void fraction is presented in the drag model. The settling velocity of a single particle, the angle of repose, and the incipient motion of particles were simulated and compared with the experimental data to validate numerical methods. The ratio of the grid size to the particle size had no effect. This developed numerical solver was applied to a scour phenomenon around a subsea pipeline. The fluid flow around the subsea pipeline was analyzed and the motion of individual soil particles was tracked. It is possible to deepen the understanding of the scour phenomenon using the information on individual particles, which consider particle to particle interaction as well as the interaction between fluid and particles. Finally, the scour around the subsea pipeline was predicted and discussed.

KEY WORDS: Computational fluid dynamics (CFD, 전산유체역학); Discrete element method (DEM, 이산요소법), Euler-Lagrangian approach (오일러-라그랑지안 접근법), Kernel-based averaging method (커널기반 평균화 기법), Subsea Pipeline (해저 파이프라인); Scour phenomenon (세굴 현상)

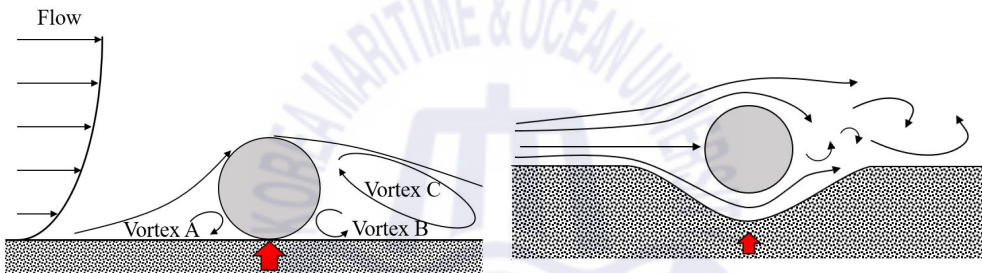
제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

수심 60 m 이하에 조성된 대부분의 해상풍력발전 단지는 고정식 구조물로 설치되어 있다. 이러한 고정식 해양구조물은 구조적 안정성과 비용적인 이유로 주로 근해에 설치되어 수명 기간 동안 한 곳에서 운용된다. 해상풍력발전기는 육상풍력발전기와 달리 해상기초구조물 및 해저파이프라인 포설에 따른 시공비용이 전체 공사비의 약 30~40%를 차지하고 있다. 따라서 고정식 해상풍력발전기의 설계 시 전반적인 비용 절감을 위한 최적화 설계와 수명 기간 동안 안정적인 운용을 위한 해상기초구조물과 해저파이프라인의 설치가 중요하다. 구조물이 해상에 배치되면 구조물은 해류와 파랑 흐름을 국부적으로 증가시킨다. 가속된 유체 흐름과 구조물의 상호작용으로 구조물 주위의 해저 입자가 유실되고 이로 인해 해저 지반이 침식되는 현상을 세굴이라 정의할 수 있다. 세굴을 일으키는 주요 인자는 구조물 주위에서 발생하는 와류구조이다. Fig. 1.1은 구조물로 인해 교란된 유체 흐름과 세굴을 보여준다. Fig. 1.1(a)에서 모노파일 주위에는 말굽형와(horseshoe vortex)와 배후류와(lee-wake vortex)가 발생한다. 모노파일 전면부에서 발생하는 하강류(down flow)에 의해 해저바닥에서 역류가 발생한다. 역류는 모노 파일로 접근하는 흐름(approach flow)을 만나 와류(vortex flow)가 형성된다. 와류로 인해 구조물 주위의 해저 지반 입자들이 침식되고 후류방향으로 수송 및 퇴적된다. Fig. 1.1(b)는 해저파이프라인 주위에서 발생하는 와류를 보여준다. 와류 A, B에 의해 해저파이프라인 바로 밑에 위치한 해저 지반 입자들이 유실된다. 해저 지반 입자들의 유실에 의해 구조물과 해저 지반 표면 사이에 간격이 발생한다. 넓어진 간격 사이로 집중된 유체 흐름에 의해 해저 지반 입자들이 후류방향으로 수송 및 퇴적된다. 구조물 후류 방향에 퇴적된 모래 사구는 배후류와에 의해 다시 침식 및 수송된다. 세굴에 의한 침식은 터빈에 작용하는 큰 전복 모멘트를 견뎌야 하는 해상기초구조물과 자유경간(free span)에 의한 굽힘 모멘트를 받는 해저파이프라인의 안정성을 저하시키는 원인이며, 궁극에는 구조 파괴를 유발할 수 있다. 이를 방지하기 위해 세굴 현상을 정확히 예측하는 것이 중요하다. Fig. 1.1에서 확인할 수 있듯이, 세굴을 예측하기 위해 구조물 주위에서 교란되는 유체 흐름과 해저 지반의 상호작용을 이해하는 것이 필요하다.



(a) scouring around monopile



(b) scouring around pipeline

Fig. 1.1 Vortex structure around offshore structures

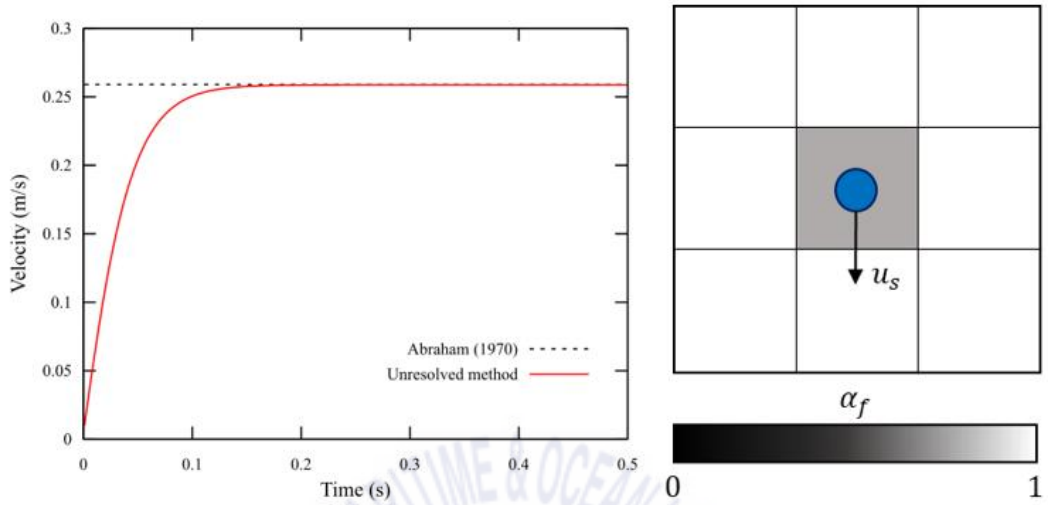
세굴이 발생하는 메커니즘을 이해하기 위해 많은 연구자들에 의해 실험적 연구와 수치적 연구가 지속적으로 수행되고 있다(Whitehouse, 1998; Sumer and Fredsoe, 2002; Dargahi, 1989; Mao, 1086; Chiew, 1991). 세굴 연구의 초기에 많은 연구자들은 다양한 환경 조건에서 모노파일과 파이프라인의 평형 세굴심을 예측하는 경험식을 제시하였다(Sumer et al., 1992; Sumer and Fredsoe, 2002). 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD)을 이용한 수치적 연구는 단상 유동 모델(single-phase flow model)과 이상 유동 모델이 있다. 단상 유동 모델은 유체 해석만 수행하여 구조물에 의해 교란된 유체 흐름을 정도 높게 모의한다. 구조물에서 충분히 떨어져 있는 바닥면에 작용하는 전단응력을 기준으로 구조물 주위에서 발생하는 상대 전단응력 계수를 계산하여 세굴심과 세굴 영역을 예측한다(Trygslund, 2015; Park et al., 2017).

그러나 단상 유동 모델은 해저 지반을 구성하는 토양의 영향을 고려하지 못한다. 유체 흐름에 의한 표사수송을 구현하기 위해 표사 수송 모델(sediment transport model)을 적용한 형태학적 모델(morphological model)과 전산유체역학을 결합하여 해저 지반의 형태학적 특성을 고려하였다(Roulund et al., 2005; Baykal et al., 2017). 형태학적 모델을 이용한 세굴의 예측은 정도 높은 결과를 나타내지만 유체 흐름에 의한 영향을 단방향으로 고려하기 때문에 해저 지반의 동적 특성을 전산유체해석에 반영하는데 어려움이 있다. 또한 경험적 매개변수에 의존하는 표사 수송 모델은 다양한 세굴환경에서 수치 모의하는데 제한이 있다. 이상 유동모델(two-phase flow model)은 유체와 지반을 직접 모델링하여 각각의 상을 해석하여 연계한다. 이상 유동 모델에는 Euler-Euler 접근법으로 유체와 입자의 유동을 연속체로 가정하여 해석하는 2 유체 모델(two-fluid model)이 있다. 해저 지반을 구성하는 입자의 운동은 토양의 농도 개념을 이용하여 고려하였다(Yeganeh-Bakhtiary et al., 2011; Mathieu et al., 2019). 2 유체 모델은 상대적으로 낮은 계산 비용으로 해저 지반을 모사할 수 있다. 반면에 해저 지반 입자의 운동을 농도 개념을 이용하여 모사하기 위해 보편적인 구성방정식이 요구되며 입자 크기의 정보를 나타내지 못하는 제한이 있다. 위의 기법들은 해저 지반과 유체 흐름의 상호작용을 고려하기 위해 경험적 매개변수가 필요하며 입자간의 상호작용을 고려하여 입자 크기의 정보를 제공할 수 없는 한계가 있다(Li and Tao, 2018).

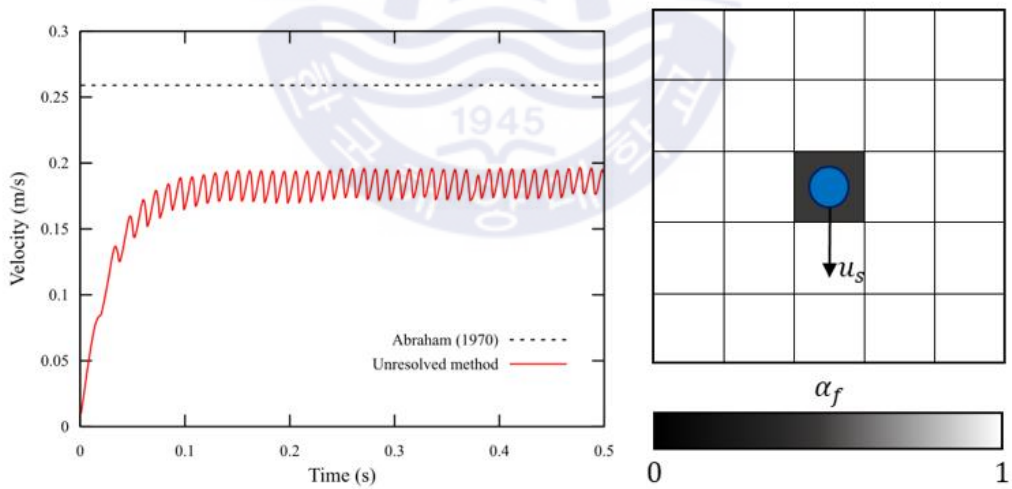
이산요소법(Discrete element method, DEM)은 입자 유동 수치 모의에서 가장 널리 사용되는 기법 중 하나이다. 이산요소법에서 입자의 거동은 입자들 간의 미소한 크기의 접촉을 허용하여 발생하는 반발력에 의해 계산된다. 이러한 방법은 입자의 정확한 거동을 해석할 수 있을 뿐만 아니라 간단한 충돌 모델을 이용한 많은 양의 입자를 처리할 수 있는 장점이 있다(Kloss et al., 2012; Zhu and Yu, 2004). 이산요소법은 과립성 유동(granular flow), 분말 역학(power mechanics) 그리고 암석 역학(rock mechanics) 등에서 침전과 관련된 공학적 문제를 해결하는데 효과적인 방법으로 사용되고 있다. 하지만 입자 수에 따른 계산 비용의 증가로 인해 큰 범위의 수치 모의해서 입자 크기의 상사성을 만족시키기 어렵다(Sakai and Koshizuka, 2009). 이산요소법은 개별 입자를 추적할 수 있고, 입자간의 상호작용을 고려할 수 있는

장점으로 인해 다양한 계산 방법과 연계하여 수행되고 있다(Zhu et al., 2007). CFD-DEM 연계 모델은 유체와 입자사이의 상호작용과 입자간의 상호작용을 고려할 수 있고, 수치적 효율성과 편의성 측면에서 다른 연계 모델보다 유리하다(Zhu et al., 2007). 최근에는 CFD-DEM 연계모델을 이용한 표사 수송과 세굴 연구가 진행되어 오고 있다(Hur and Jeon, 2011; Schmeekle, 2014; Sun and Xiao, 2016). Li and Tao (2018)는 CFD-DEM 연계 모델을 이용하여 길쭉한 모양의 교각 주변에서 발생하는 정적 국부 세굴을 해석하였고, Yeganeh-Bakhtiary et al. (2013)과 Yang et al. (2018)는 해저파이프라인 주변 세굴 특성을 해석하였다. 해저 지반을 구성하는 많은 양의 입자 수에 따른 계산 비용으로 인해 입자 크기를 증가시켜 수치 모의하였다. CFD-DEM 연계모델을 이용한 연구는 활발하나 확장된 입자 크기에 따른 격자 의존도로 인해 구조물 주위에서 교란된 유체 흐름을 정도 높게 예측하기 힘든 제한이 있다.

CFD-DEM 연계 모델은 resolved CFD-DEM 연계 모델과 unresolved CFD-DEM 연계모델로 구분할 수 있다. Resolved CFD-DEM 연계 모델에서 입자에 작용하는 유체력은 압력과 속도를 이용하여 계산된다. 전산유체해석에서 정밀한 유체 흐름을 얻기 위해 조밀한 격자가 필요하다(Uhlmann, 2005). 일반적으로 입자 크기에 대한 격자 크기가 1/10보다 작을 때 정확한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 큰 계산 비용으로 인해 작은 크기의 입자 유동에 적용이 제한된다(Vango et al., 2018). Unresolved CFD-DEM 연계 모델은 전산유체해석의 속도와 입자 파괴분율을 포함하는 경험적 항력모델을 사용한다. 정확한 항력을 얻기 위해 조밀한 격자가 요구되지 않는다(Kloss et al., 2012). 일반적으로 입자 크기에 대한 격자 크기가 3배 보다 클 때 정확한 결과를 얻을 수 있다(Peng et al., 2014). 따라서 unresolved CFD-DEM 연계 모델은 대량의 입자 유동 해석에 대해 효율적이다(Kloss et al., 2012; Askarishahi et al., 2018). 결과적으로 CFD-DEM 연계 모델은 입자 크기에 대한 격자 크기가 1/10보다 크거나 3배 보다 작을 때 유효한 결과를 나타내지 못하고, 이는 격자 의존도가 높다는 것을 의미한다. Unresolved CFD-DEM 연계 모델에서 입자의 이동을 고려하기 위해 각 격자(cell)에서 입자가 차지하는 파괴분율을 이용한다. Fig. 1.2는 격자 의존도에 따른 수치 불안정성을 단일 입자의 종단속도 예시를 통해 보여준다. 점선은 Abraham (1970)의 경험식을 이용한 종단속도 결과를 의미하고 실선은 unresolved CFD-DEM 연계 모델의 수치해석



(a) $\Delta x/d_p \approx 4$



(b) $\Delta x/d_p \approx 1$

Fig. 1.2 Numerical instability by grid dependency in settling velocity

결과를 나타낸다. Fig. 1.2의 오른쪽 삽화는 입자 크기에 대한 격자 크기 비에 따른 유체 영역의 부피분율(a_f)을 의미한다. Fig. 1.2(a)는 입자 크기에 대한 격자 크기가 4배 클 때 결과를 보여주며, 격자 크기가 입자 크기보다 충분히 클 때 수치 해석 결과는 Abraham (1970)의 경험식과 잘 일치하며 수치적으로 안정적이다. 반면에 격자 크기가 입자 크기에 근접할 때 수치적으로 불안정하며 중단속도 결과는 Abraham (1970) 경험식과 큰 차이가 나는 것을 Fig. 1.2(b)에서 확인할 수 있다. 입자를 포함한 격자에서 유체 영역의 부피분율(a_f)이 국부적으로 감소하며 주위 격자와의 부피분율(a_f)과 차이가 발생한다. 이때 격자 크기가 입자 크기와 가까워질수록 주위 격자와의 부피분율(a_f)의 차이가 커지면서 수치적 불안정성이 발생한다. 유체 영역의 부피분율(a_f)은 격자에서 입자 부피분율(a_p)로부터 결정된다.

입자의 부피분율(a_p) 계산방법에는 입자 중심 기법(Particle-centered method, PCM)과 분할된 입자 부피 기법(Divided particle volume method, DPVM)이 가장 널리 사용된다(Govina et al., 2012). 입자 중심 기법에서 입자의 부피는 입자 중심이 포함되어 있는 단일 격자에 입자의 부피가 온전히 고려된다. 이는 아주 간단한 접근법으로 격자 크기가 입자보다 매우 클 때 허용된다. 이와 달리, 분할된 입자 부피 기법에서 입자의 부피는 격자면(cell face)에 의해 분할된 부피만큼 고려된다. 분할된 입자 부피 기법은 여러 케이스에 대해 입자 중심 기법보다 더 합리적인 결과를 보여준다(Zhao and Shan, 2013). 그러나 두 방법 모두 격자 크기가 입자 크기에 근접하거나 더 작은 경우에는 수치 에러가 발생한다(Goniva et al., 2012; Jing et al., 2016). 균일하지 않은 격자나 다양한 크기의 입자에서 unresolved 기법은 정확도와 신뢰도 문제를 야기한다(Capecelatro and Desjardins, 2013; Wang et al., 2019; Askarishahi et al., 2018). Unresolved CFD-DEM 연계 모델에서 격자 의존도를 극복하기 위해 다양한 수치기법이 제시되고 있다(Wu et al., 2009; Zhu and Yu, 2002; Jing et al., 2016; Wang et al., 2018; Wu et al., 2009).

입자의 부피분율 계산을 위해 커널 함수가 적용된다(Capecelatro and Desjardins, 2013). 커널 함수는 입자완화 유체동역학(Smoothed particle hydrodynamics, SPH)와 같은 무격자법에서 입자 정보를 공간적으로 근사하기 위해 사용된다. 본 논문에서는

unresolved CFD-DEM 연계 모델의 격자 의존도를 극복하기 위해 커널 기반 평균화 기법을 적용하였다. 커널 기반 평균화 기법의 목적은 입자 부피를 전산유체해석 격자에 단조롭게 분포시키고, 격자 크기에 의존하지 않는 수치 안정성을 확보하는 것이다. 커널 기반 평균화 기법은 개별 입자의 물리량을 커널 함수를 통해 CFD 격자로 보간하고, CFD 해석을 위한 입자 물리량을 평균화 기법을 통해 근사화 한다(Sun and Xiao, 2015). 일반적으로 커널 함수로는 Gaussian 분포 함수(Glasser and Goldhirsch, 2001)와 Johnson's 분포 함수(Johnson, 1949)가 있다.

1.2 연구 목적

본 논문의 목적은 커널 기반 평균화 기법에 근거한 unresolved CFD-DEM 연계 모델을 개발하는 것이다. 커널 기반 평균화 기법을 통해 격자 의존도를 극복한다. 수치해석을 위해 소스코드가 공개되어 있는 라이브러리를 사용하였다. 입자해석인 DEM을 위해 LIGGGHTS(LAMMPS improved for general granular and granular heat transfer simulations)과 CFD해석을 위한 OpenFOAM이 사용되었다(Goniva et al., 2012). 커널 함수를 이용한 입자 부피분율 계산 코드를 추가하였고 이를 이용한 평균화 기법과 수정된 항력 모델에 대한 코드를 수정하였다. 커널 기반의 평균화 기법에 대한 병렬화 처리도 수행되었다. 두 번째 목적은 개발된 unresolved CFD-DEM 연계 모델을 파이프라인 주위에서 발생하는 세굴 현상에 적용하는 것이다. 확장된 입자 크기에 대한 격자 의존도를 극복한다. 입자간의 상호작용이 고려된 유체와 입자 상호작용 결과를 확인하여 세굴이 발생하는 메커니즘에 대한 이해를 확장한다.

제 2 장 계산 방법

2.1 이산요소법 지배 방정식

이산요소법의 기본 개념은 Cundal and Strack (1979)에 의해 제시되었다. 입자 간의 충돌은 linear spring-dashpot 모델로 단순화하였고, 입자의 운동은 뉴턴 제2법칙으로 나타낼 수 있다. 입자의 병진 운동에 대한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$m_p \frac{du_p}{dt} = \sum f_{p,p} + \sum f_{p,w} + m_p g + f_{p,f} \quad (2.1)$$

여기서, m_p 는 입자 질량, u_p 는 입자 병진속도, $f_{p,p}$ 와 $f_{p,w}$ 는 각각 입자와 입자 그리고 입자와 벽간의 충돌력, $m_p g$ 는 중력에 의한 힘, $f_{p,f}$ 는 입자에 작용하는 유체와 입자간 상호작용 힘을 나타낸다. 또한, 부가질량 힘과 basset force를 고려하기 위해 Guo (2011)의 부가질량 계수(C_A)를 적용하여 위의 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_p - \rho_f C_A) \frac{du_p}{dt} = \sum f_{p,p} + \sum f_{p,w} + \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_p - \rho_f) g + f_d \quad (2.2)$$

여기서, d_p 는 입자 지름, ρ_p 는 입자 밀도, ρ_f 는 유체 밀도, C_A 는 부가질량 힘과 basset force를 함께 고려하는 부가질량 계수, f_d 는 항력이다.

입자의 회전 운동은 다음의 식에 의해 지배된다.

$$I_p \frac{d\omega_p}{dt} = \sum T_t \quad (2.3)$$

여기서, I_p 는 입자의 관성모멘트, ω_p 는 입자 각속도, T_t 는 입자 또는 벽과의 충돌로 인해 발생하는 토크를 나타낸다.

2.2 전산유체역학 지배 방정식

유체 입자의 운동은 질량, 모멘텀 보존 방정식을 만족하며, 입자의 이동은 볼륨비 수송 방정식으로 묘사된다. 지배방정식은 아래와 같다.

$$\nabla \cdot u_f = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial (\alpha_f u_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f u_f u_f) = \frac{1}{\rho_f} (-\nabla p + \nabla \cdot (\alpha_f \tau_f) + \rho_f \alpha_f g + R_{f,p}) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \alpha_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f u_f) = 0 \quad (2.6)$$

여기서, α_f 는 유체 영역의 부피분율($\alpha_f = 1 - \alpha_p$ 여기서, α_p 는 단일 격자에서 입자가 차지하는 부피분율), u_f 와 p 는 각각 유체 속도와 압력, τ_f 는 유체 점성 응력, g 는 중력 가속도, $R_{f,p}$ 는 유체와 입자간 운동량 교환을 나타낸다. $R_{f,p}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{f,p} = K_{f,p} u_f - K_{f,p} \langle u_p \rangle \quad (2.7)$$

$$K_{f,p} = - \frac{|\sum f_{p,f}|}{V_c |u_f - \langle u_p \rangle|} \quad (2.8)$$

여기서, $K_{f,p}$ 는 유체와 입자간 상호작용 계수이고, $\langle u_p \rangle$ 는 격자 기반으로 평균화된 입자 속도이다. $f_{p,f}$ 는 입자에 작용하는 유체력을 나타낸다. 위 식에서, α_p , $\langle u_p \rangle$ 그리고 $f_{p,f}$ 는 입자 정보로부터 평균화를 통해 얻을 수 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_f = 1 - \frac{1}{V_c} \sum_{k=1}^{N_p} w_{p,k} V_{p,k} \quad (2.9)$$

$$\langle u_p \rangle = \frac{1}{\alpha_p V_c} \sum_{k=1}^{N_p} w_{p,k} u_{p,k} V_{p,k} \quad (2.10)$$

$$f_{p,f} = \frac{1}{V_c} \sum_{k=1}^{N_p} w_{p,k} (f_{d,k} + f_{b,k}) \quad (2.11)$$

여기서, N_p 는 단일 격자의 부피분율에 기여도가 있는 입자 수, $V_{p,k}$ 는 k 번째 입자 부피, V_c 는 단일 격자 부피를 나타낸다. $w_{p,k}$ 는 가중치이며, k 번째 입자가 단일 격자에 미치는 기여도를 의미한다. 가중치는 다양한 함수가 적용 가능하며 본 연구에서는 커널 함수를 이용하였다. $f_{p,f}$ 에서, 항력(f_d)과 부력(f_b)이 주요 상호작용 힘으로 고려되었다(Zhan and Shan, 2013). 항력(f_d)은 Di Felice (1994) 모델로 표현되었으며 항력 계수(C_d)는 Abraham (1970)의 경험식을 사용하였다. 항력(f_d)과 항력 계수(C_d)는 다음 식으로 계산된다.

$$f_d = \frac{1}{8} C_d \rho \pi d_p^2 \alpha_f^{-(\chi+1)} (u_f - u_p) |u_f - u_p| \quad (2.12)$$

$$C_d = \frac{24}{(9.06)^2} \left(\frac{9.06}{\sqrt{Re_p}} + 1 \right)^2 \quad (2.13)$$

$$\chi = 3.7 - 0.65 \exp \left[- \frac{(1.5 - \log Re_p)^2}{2} \right] \quad (2.14)$$

여기서, d_p 는 입자 지름, C_d 는 항력 계수로 입자 레이놀즈수의 함수로 나타낸다. $\alpha_f^{-(\chi-1)}$ 는 이웃 입자들의 존재를 고려한 전인자(prefactor)이다. χ 은 입자간의 영향을 고려한 항력 표현식이다. 개별 입자에 작용하는 항력은 입자 중심에서의 상대속도 ($|u_f - u_p|$)를 이용한다. 이때, 유체속도(u_f)는 각 격자에서 산정한 유체속도(u_f)를 대입하거나 입자 중심으로 보간(\tilde{u}_f)하여 개별 입자의 위치에서 항력을 산정한다. Re_p 는 입자 레이놀즈수이며

다음과 같이 표현된다.

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u_f - u_p|}{\mu} \quad (2.15)$$

본 논문에서는 각 입자 중심으로 전향 보간(forward interpolation)된 유체속도를 이용하여 입자에 작용하는 항력을 계산하였다(Xiao and Sun, 2011). 입자 중심에서 유체속도(\tilde{u}_f)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{u}_f = \sum_{m=1}^{N_c} w_{p,m} u_{f,m} \quad (2.16)$$

여기서, N_c 는 입자의 기여도가 있는 전체 격자를 포함한다. $u_{f,m}$ 은 격자 m 에서 계산된 유체속도이며, $w_{p,m}$ 은 격자 m 에서 산정된 입자의 가중치이다.

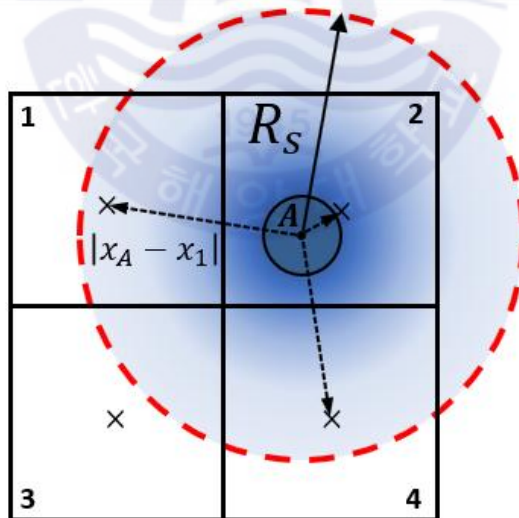


Fig. 2.1 Example of particle information averaged over support region (R_s)

2.3 커널 기반 평균화 기법

입자 지름이 격자 크기와 근접할 때 가우시안 커널 함수는 수치 해의 안정성과 정확도에 중요한 역할을 한다(Esteghamatian et al., 2018). 이론적으로 커널 함수를 이용한 입자 부피분을 계산 비용은 입자 수와 전체 격자수의 곱에 비례하여 증가한다(Xiao and Sun, 2011). 따라서 커널 함수는 계산 부담을 줄이기 위해 지원 영역 내에서 고려된다(Sun et al., 2009; Xiao and Sun, 2011). Fig. 2.1는 2차원 좌표계에서 4개의 격자와 단일 입자 "A"를 보여준다. 반지름 R_s 원은 입자 "A"의 지원 영역이다. 지원 영역의 중심은 입자 중심과 일치하고, 반지름(R_s)은 입자 지름에 비례하여 나타낼 수 있다($R_s = Kd_p$). K 는 상수이며 계산 비용과 정확도를 고려하여 입자 지름의 3배로 정하였다(Xiao and Sun, 2011). 반지름 (R_s)에 포함된 격자는 입자 "A"에 의해 영향을 받는다. 그 영향은 커널 함수를 이용한 입자의 가중치로 표시된다. 입자 "A"의 가중치(w_A)와 가우시안 커널 함수 ($g(x-x_m)$)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_{A,c} = \frac{g(x-x_c)V_c}{\sum_{m=1}^{N_c} g(x-x_m)V_m} \quad (2.17)$$

$$g(x-x_m) = \begin{cases} \frac{1}{(b\sqrt{2\pi})^3} \exp\left(-\frac{|x-x_m|^2}{2b^2}\right), & (|x-x_m| < R_s) \\ 0, & (|x-x_m| \geq R_s) \end{cases} \quad (2.18)$$

여기서, N_c 는 입자 "A"의 반지름 (R_s)에 있는 전체 격자수이다(Fig. 2.1에서 $N_c = 3$). 가우시안 커널 함수는 지원 영역 내에서 격자 중심과 입자 중심 간의 거리($|x-x_m|$)의 함수로 표현된다. b 는 커널 함수의 bandwidth를 의미하며 $b = kd_p$ 로 나타낼 수 있다. 커널 함수를 이용한 입자 가중치(w_A)는 다음의 정규화 조건을 만족한다(Zhu and Yu, 2002).

$$\sum_{m=1}^{N_s} w_{A,m} = 1 \quad (2.19)$$

식 (2.9), (2.10), (2.11)에서 커널 함수를 통해 결정된 입자 가중치를 이용하여 CFD 해석을 위한 입자 물리량을 근사한다.

2.4 항력 모델의 불륨비

Unresolved CFD-DEM 연계 모델에서 입자 크기에 대한 격자 크기 비에 따라 발생하는 수치 불안정성을 해결하기 위해 다양한 평균화 기법들이 제시되었다 (Capecelatro and Desjardins, 2013; Alobaid, 2015a, 2015b; Cheng et al., 2018). 공간적으로 분산된 입자의 가중치에 의해 입자 중심이 위치한 지역 격자에서 실제의 항력보다 상대적으로 과소평가되는 경우가 발생한다(Askarishahi et al., 2018). Ireland and Desjardins (2017)는 공간적으로 분산된 입자 분포에서 격자 크기 비에 대한 수치적 안정성을 확보하고 항력 예측의 정확도를 개선하기 위해 수정된 항력 예측 기법을 제시하였다. 본 논문에서는 항력 예측의 정확도를 개선하기 위해 수정된 부피분율($\tilde{\alpha}_f$)을 항력모델에 적용하였다. 수정된 부피분율($\tilde{\alpha}_f$)은 다음과 같다.

$$\tilde{\alpha}_f = 1 - \frac{V_p}{E_p \sum_{m=1}^{N_c} V_{c,m}} \quad (2.20)$$

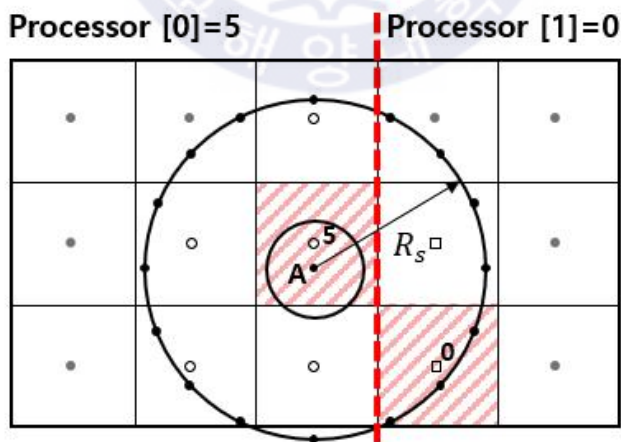
여기서, N_c , V_p 그리고 E_p 는 입자의 지원 영역 내에 포함된 전체 격자 수, 입자의 부피 그리고 입자 부피의 확장 계수를 각각 의미한다. E_p 가 1일 때, Bagherzadeh (2014)의 “big particle” 입자 부피분율 계산 기법과 동일하다. 수정된 부피분율($\tilde{\alpha}_f$)은 식 (2.12)에서 항력 예측을 위해 적용되었다.

2.5 소스코드의 병렬화

커널 기반 평균화 기법에서 입자의 가중치를 계산하기 위해 지원 영역 내에 위치한 이웃 격자를 정의하는 것이 필요하다. 입자의 지원 영역이 두 개 또는 그 이상의 계산 프로세서에 포함되어 있을 때, 입자의 가중치를 정의하기 위해 프로세서간의 정보

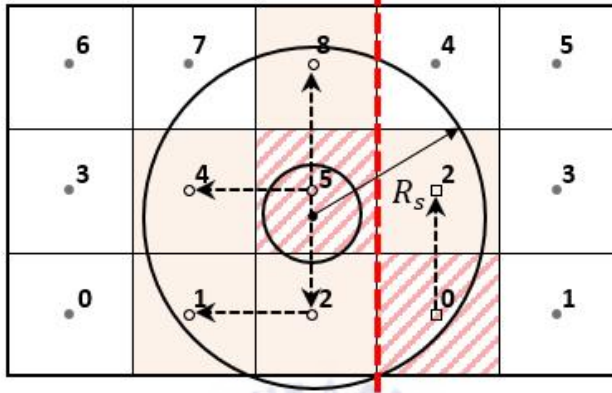
교환이 고려되어야 한다. Fig. 2.2는 입자의 지원 영역과 두 프로세서간의 경계를 보여준다. 빨간색 점은 두 프로세서간의 경계를 나타낸다. 지원 영역 내에 있는 격자 중에서, 프로세서 [0]에서의 격자 중심은 빈 원으로 표현되고, 프로세서 [1]에서의 격자 중심은 빈 사각형으로 표현되었다. 지원 영역 밖의 격자 중심은 음영으로 나타난다. 입자 "A"의 중심은 프로세서 [0]의 5번 격자에 위치해 있다. 입자 "A"의 CFD 격자로의 매핑은 아래의 순서로 수행되었다,

- (i) Fig. 2.2(a)에서 각 프로세서에서 입자 "A"의 지역 격자가 표시 되었다. 프로세서 [0]의 5번 격자와 프로세서 [1]의 0번 격자가 선택되었다.
- (ii) Fig. 2.2(b)에서 지원 영역 내의 하부 격자 리스트가 각 프로세서에 만들어진다. 프로세서 [0]의 하부 격자 리스트는 5, 1, 2, 4, 8이며, 프로세서 [1]의 하부 격자 리스트는 0과 2이다.
- (iii) Fig. 2.2(c)에서 하부 격자들 간의 정보 교환을 통해 각 프로세서에서 입자 "A"의 가중치가 계산된다.
- (iv) 가중치 ($w_{A,n}$)를 이용하여 $\alpha_p \langle u_p \rangle$ 그리고 f_d 의 계산이 수행된다.



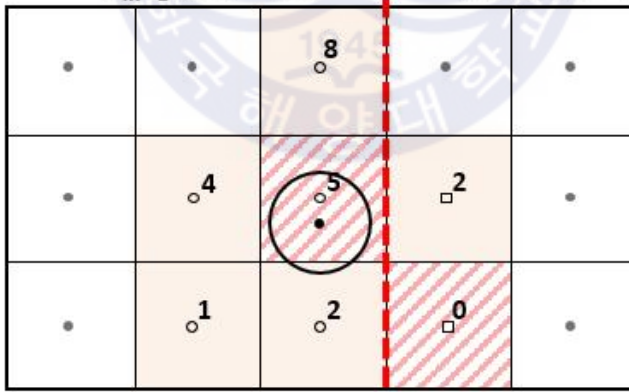
(a)

Processor [0]=5,1,2,4,8 Processor [1]=0,2



(b)

$$w_{A,n} = \frac{g(x_A - x_n)}{\sum_{m=1}^5 g(x_A - x_m)} \quad w_{A,n} = \frac{g(x_A - x_n)}{\sum_{m=1}^2 g(x_A - x_m)}$$



(c)

Fig. 2.2 Data transfer between two processors

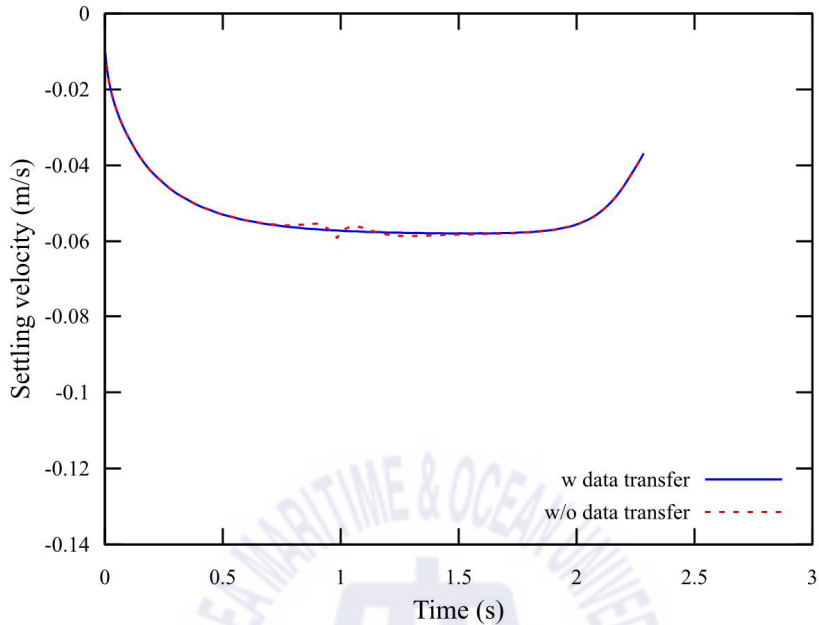


Fig. 2.3 Influence of data transfer between processors in settling velocity

Fig. 2.3은 지원 영역이 프로세서 경계를 포함하고 있을 때, 지원 영역 내에 있는 프로세서간의 데이터 교환 결과를 종단 속도 수치 모의를 통해 보여준다. Fig. 2.3에서 파란색 실선은 프로세서간의 데이터 교환이 작동할 때 결과이고, 빨간색 점선은 프로세서간의 데이터 교환이 작동하지 않을 때 결과를 나타낸다. 입자가 1초 부근에서 프로세서 경계를 지나간다. 프로세서간의 데이터 교환이 작동하지 않을 때 입자의 속도는 순간적으로 요동하는 것을 보여준다. 지원 영역이 프로세서 경계면을 통과할 때 지원영역 내에 위치한 지역 격자(N_c) 수가 감소하면서 식 (2.19)의 정규화 조건을 만족하기 위해 입자 가중치가 상대적으로 증가한다. 이로 인해 입자 중심이 위치한 지역 격자에서 유체 부피분율은 감소하면서 입자에 작용하는 항력이 증가하여 입자 낙하 속도가 일시적으로 감소한다. 반면에, 프로세서간의 데이터 교환으로 인해 지원 영역 내에 위치한 지역 격자수가 일정하며 입자에 작용하는 항력의 변화가 발생하지 않는다.

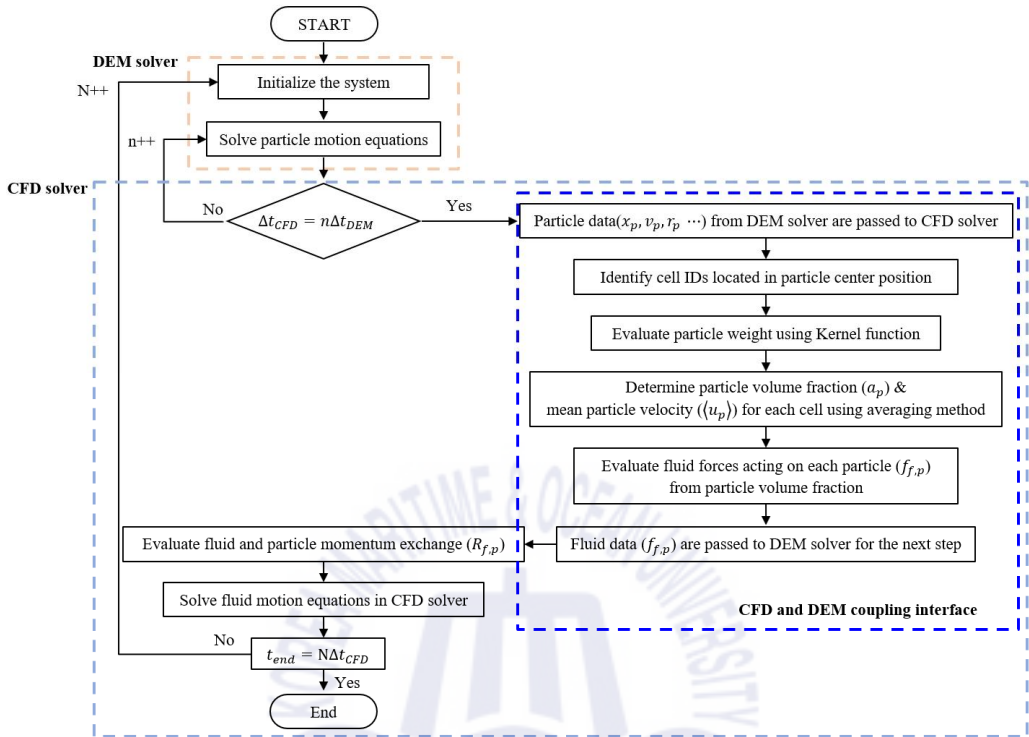


Fig. 2.4 Flow chart of CFD and DEM coupled solver

2.6 CFD-DEM 연계 모델의 흐름도

Fig. 2.4는 CFD-DEM 연계 모델의 흐름도를 나타낸다. CFD-DEM 연계 모델에서 이산요소해석과 전산유체해석이 순차적으로 진행된다. 각 해석 솔버에서 계산된 정보는 n 번의 연계 간격에서 정보 교환이 이루어진다. 먼저, 이산요소해석 솔버(Solver)에서 초기화된 정보를 바탕으로 입자 운동 방정식을 푼다. Unresolved CFD-DEM 연계 모델은 전산유체해석 시간 간격이 이산요소해석 시간 간격보다 큰 특징을 가지고 있다. 이산요소해석은 n 번의 반복 계산 후 해석 시간($n\Delta t_{DEM}$)이 전산유체해석 시간간격(Δt_{CFD})과 일치할 때 계산된 입자의 위치(x_p), 속도(v_p), 반지름(r_p) 정보를 전산유체해석 솔버로 넘겨준다. 전산유체해석 솔버에서는 입자 물리량을 근사하기 위해 입자 중심 좌표를 바탕으로 지역 격자 번호(cell ID)를 정의한다. 커널 함수를 이용하여

각 격자에서 입자 가중치를 식 (2.17)을 통해 정의한다. 다음은 식 (2.9)와 식 (2.10)에서 입자 부피분율(α_p)와 평균 입자 속도($\langle u_p \rangle$)는 평균화 기법을 통해 계산된다. 입자의 부피분율(α_p)과 격자 중심에서의 평균화된 입자 속도 ($\langle u_p \rangle$)를 이용하여 개별 입자에 작용하는 유체력($f_{p,f}$)을 식 (2.11)을 통해 계산한다. 계산된 개별 입자에 작용하는 유체력은 다음 시간 간격에서의 입자 거동을 해석하기 위해 이산요소해석 솔버로 넘겨준다. 근사된 입자 물리량과 이전 시간 단계에서의 유체 속도(u_f)를 바탕으로 전산유체해석 솔버의 운동량 방정식을 계산하여 유체 흐름을 계산한다. 위의 과정들이 최종 계산 시간에 도달할 때까지 N 번 반복된다.



제 3 장 수치적 검증

3.1 단일 입자 침전

개발된 unresolved CFD-DEM 연계 솔버에서 단일 입자에 작용하는 유체-입자 상호작용을 검증하기 위해 유체에서 낙하하는 다양한 고체 입자가 고려되었다.

3.1.1 물에서 자유 낙하하는 모래 입자

항력 모델을 검증하기 위해 물탱크에서 자유 낙하하는 모래 입자의 종단 속도가 고려되었다. 계산된 종단 속도는 Abraham (1970)의 경험식과 비교하였다. Fig. 3.1에서 볼 수 있듯이, 계산 영역 크기는 $25d_p$ 길이, $25d_p$ 폭 그리고 $75d_p$ 높이이다. 여기서, d_p 는 입자의 지름이고 격자 크기는 $dx = 1dp$ 이다. Table 3.1은 계산 조건을 보여준다. 모래 입자의 지름은 각각 0.125 mm, 0.25 mm, 0.5 mm, 1.0 mm, 2.0 mm이다. 물의 밀도와 점성은 각각 998.25 kg/m^3 와 1.002103Ns/m^2 이다. 각 입자 크기 별 종단 속도 레이놀즈수는 Abraham (1970)의 종단 속도를 기준으로 약 1~ 516에 해당한다. 입자는 초기 속도 없이 바닥면으로부터 $74d_p$ 높이에서 자유 낙하한다. bandwidth (b)와 격자 크기의 비($\Delta x/d_p$) 대한 영향을 조사하였다. 두 가지 격자크기 비 ($\Delta x/d_p = 1, 4$)에 대해 bandwidth는 $1d_p, 3d_p, 6d_p$ 를 고려하였다. Fig. 3.2에서 계산 결과는 DPVM 계산 결과와 Abraham (1970) 경험식과 비교하였다. 격자 크기 비 ($\Delta x/d_p$)가 4일 때, 커널 기반 평균화 기법이 DPVM 계산 결과 및 경험식과 잘 일치하는 것을 보여준다(Fig. 3.2(a)). 지원 영역(R_s)이 격자 크기보다 작기 때문에 bandwidth의 영향은 나타나지 않았다. Fig. 3.2(b)는 격자 크기 비 ($\Delta x/d_p$)가 1일 때 결과를 보여준다. 지원 영역(R_s)가 격자 크기보다 크기 때문에, bandwidth가 클수록 수렴된 결과를 보여준다. 수렴된 결과는 경험식과 잘 일치한다. DPVM의 결과에서 수치적 변동과 경험식과의 차이가 나타난다. 격자 크기가 입자 크기에 근접할 때, 유체 부피분율(α_f)이 정확하지 않기 때문이다. Fig. 3.3은 DPVM 결과를 항력 모델의 변수($C_d, \alpha_p, |u_f - u_p|, u_p, u_f$)에 대해 나타낸다. 항력 모델 변수는 두 격자 크기 비에 대해 다른 결과를 보여준다.

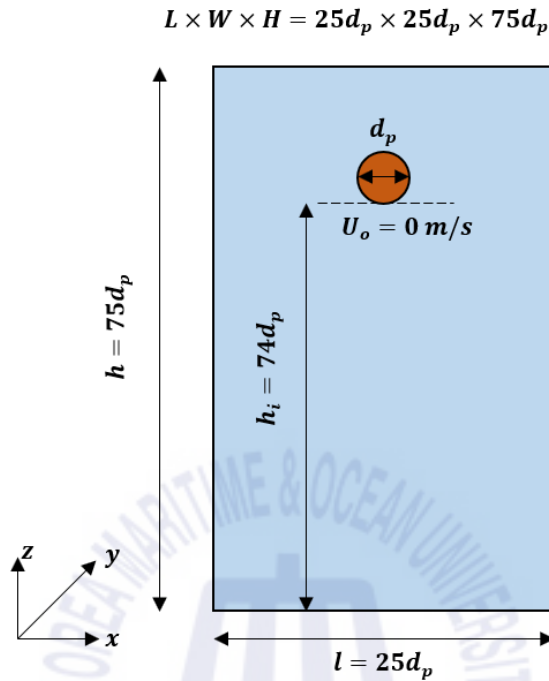


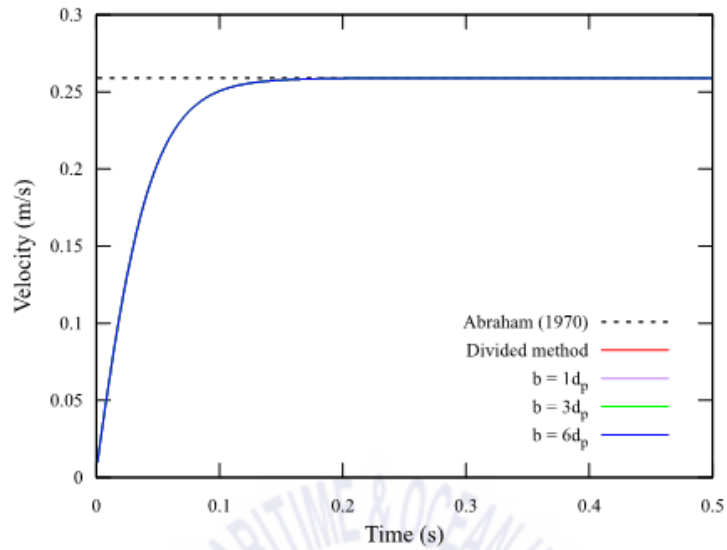
Fig. 3.1 Description of single sphere settling in water

Table 3.1 Simulation conditions

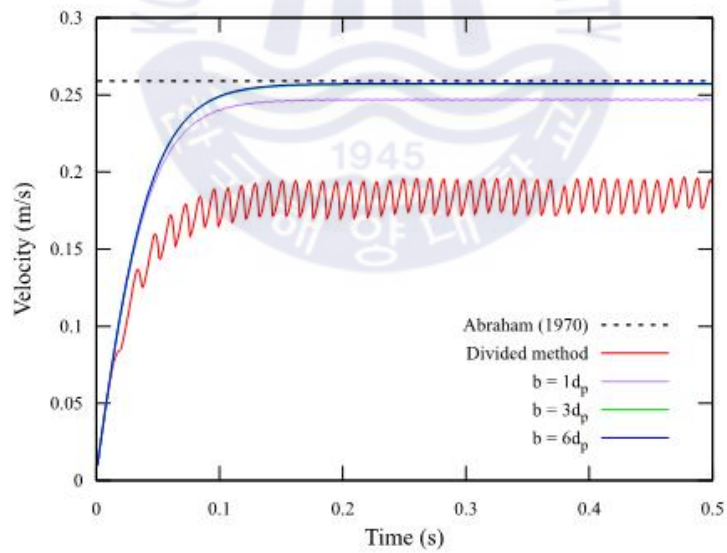
Case number	Diameter of particle (mm)	Density of sand (kg/m ³)	Density of water (kg/m ³)	Viscosity of water (Ns/m ²)	Reynold number (-)
1	2	2463	998.25	0.001002	516.1
2	1	2488	998.25	0.001002	146.5
3	0.5	2523	998.25	0.001002	33.7
4	0.25	2571	998.25	0.001002	7.8
5	0.125	2494	998.25	0.001002	1.3

Fig. 3.3(a)는 격자 크기 비가 4일 때 항력 모델의 변수를 보여준다. 격자 크기가 입자 크기보다 충분히 클 때 변수들은 안정적인 값을 보여준다. 격자 크기 비 1에서, 지역 격자의 유체 부피분율(α_f)이 큰 폭으로 변동하며 평균값이 감소하였다 (Fig. 3.3(b)). 지역 격자에서 유체 부피분율(α_f)은 격자 크기가 입자 크기에 근접할수록 감소한다. 이로 인해 입자 중심이 포함된 owner 격자와 주위 격자인 neighbor 격자의 유체 부피분율(α_f)의 차이가 발생한다. Neighbor 격자와 유체 부피분율(α_f)의 차이는 비연속적인 압력분포를 유발한다(Vango et al., 2018). Owner 격자에서 과소 예측된 유체 부피분율(α_f)은 유체 질량의 감소를 의미한다. 유체 질량이 국부적으로 감소한 owner 격자에서 유체 속도는 유체-입자 상호작용으로 인해 상대적으로 증가한다. 입자의 운동방향과 유체의 속도 방향이 같으므로 상대 속도는 감소하고 항력계수의 증가로 인해 입자의 종단속도는 감소한다. Fig. 3.3으로부터 격자 크기가 입자 크기에 근접할 때 부정확한 유체 부피분율(α_f)은 항력 모델에서 지역 격자의 유체 속도에 영향을 미친다. 이로 인해 입자가 격자 경계면을 통과할 때 낙하 속도가 변동한다(Wang et al., 2018; Peng et al., 2014). 반면에, Fig. 3.4는 커널 기반 평균화 기법 계산 결과가 격자 크기 비에 관계없이 항력 모델의 변수들이 안정적으로 계산되는 것을 보여준다. Fig. 3.4(b)에서 격자 크기가 입자 크기에 근접할 때 수치적 변동이 발생하지 않았다. 이는 입자의 부피가 neighbor 격자에 단조롭게 분포되어 owner 격자와의 유체 속도 차이가 미미하다는 것을 의미한다. 이러한 결과로부터, 지원 영역이 격자 크기보다 크고 $b > 3d_p$ 일 때 수치 안정성이 확보되고 격자 크기 비에 따른 영향을 최소화할 수 있다. 격자 크기 비 $\Delta x/d_p = 1$ 과 bandwidth는 $b = 6d_p$ 로 선정되었다.

Table 3.2은 입자 지름에 따른 종단 속도를 보여준다. 수치 모의 결과는 Abraham (1970) 경험식과 잘 일치함을 보여준다. 모래 입자 지름이 아주 작고 입자 레이놀즈수가 stokes유동에 근접할 때 항력이 과소 예측되었다(Ireland and Desjardins, 2017). 따라서 본 논문에서 적용한 항력 모델 표현식(Di Felice, 1994)과 항력 계수(Abraham, 1970)은 입자 지름이 0.25 mm 보다 크거나 같을 때 단일 입자에 대한 항력을 정확하게 예측한다.

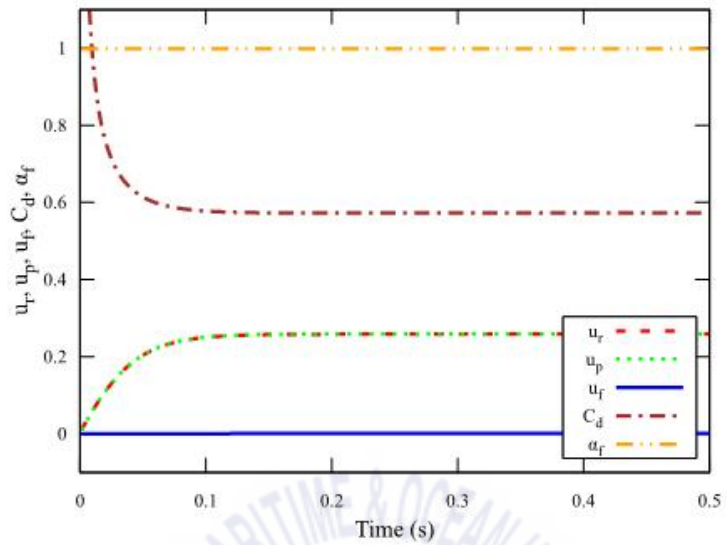


(a) $\Delta x/d_p = 4$

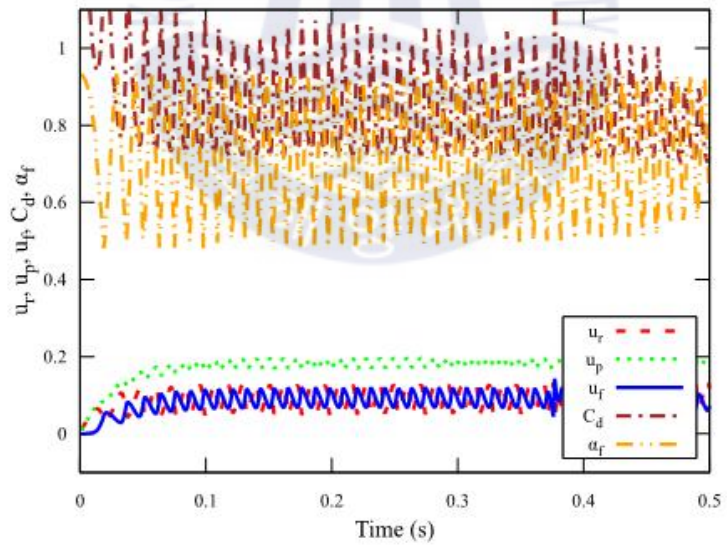


(b) $\Delta x/d_p = 1$

Fig. 3.2 Settling velocity for various bandwidths (b) and mesh size ratio ($\Delta x/d_p$)

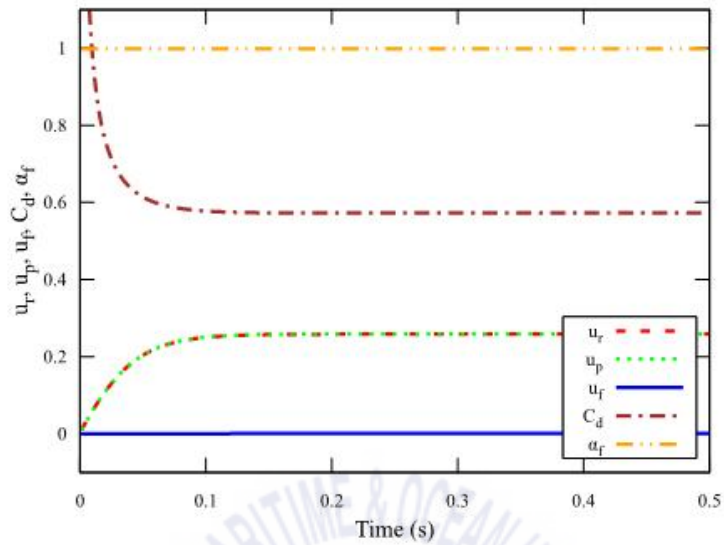


(a) $\Delta x/d_p = 4$

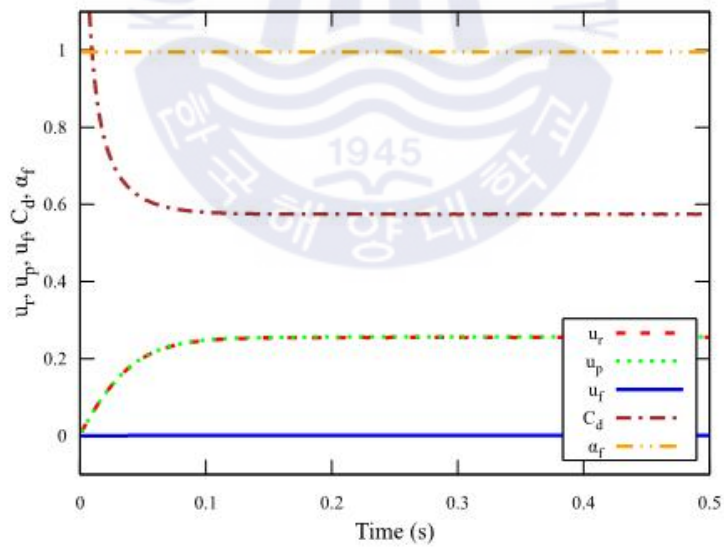


(b) $\Delta x/d_p = 1$

Fig. 3.3 Drag model variables with DPVM



(a) $\Delta x/d_p = 4$



(b) $\Delta x/d_p = 1$

Fig. 3.4 Drag model variables with kernel-based averaging method

Table 3.2 Settling velocity

Case number	Diameter of particle (mm)	Re (-)	Settling velocity (m/s)		Difference (%)
			Empirical formula (Abraham, 1970)	Present	
1	2	516.1	0.2590	0.2563	1.04
2	1	146.5	0.1480	0.1467	0.88
3	0.5	33.7	0.0742	0.0740	0.27
4	0.25	7.8	0.0313	0.0318	-1.60
5	0.125	1.3	0.0101	0.0109	-7.92

3.1.2 물에서 자유 낙하하는 강체 구

Guo (2011)는 정지된 구의 가속 낙하 운동을 고려하기 위해 부가질량 계수(C_A)를 도입하였다. 부가질량 계수는 낙하하는 입자의 부가질량 힘과 basset force를 포함한다. 부가질량 계수의 영향을 연구하기 위해 물에서 낙하하는 구가 연구되었다(Stokes, 1851; Oseen et al., 1927; Chester, 1969). 계산 영역은 115 mm 길이, 30 mm 폭 그리고 280 mm 높이이다. 입자의 지름과 밀도는 각각 3.18 mm와 7820 kg/m³이다(Allen, 1970). 물의 밀도는 1000 kg/m³이며 점성은 0.001 Ns/m이다. 입자는 정지된 상태에서 자유낙하 하며 종단 속도 레이놀즈수는 2440이다. Fig. 3.5는 3가지 부가질량 계수에 대한 계산결과를 보여준다. $C_A=2.0$ 는 입자 낙하 운동에 대해 실험결과와 가장 가까운 결과를 보여준다. $C_A=0.5$ 에서는 basset force가 무시되었거나 전이 구간에서 항력 예측의 오차로 인해 입자 속도가 과도 예측되었다(Guo, 2011).

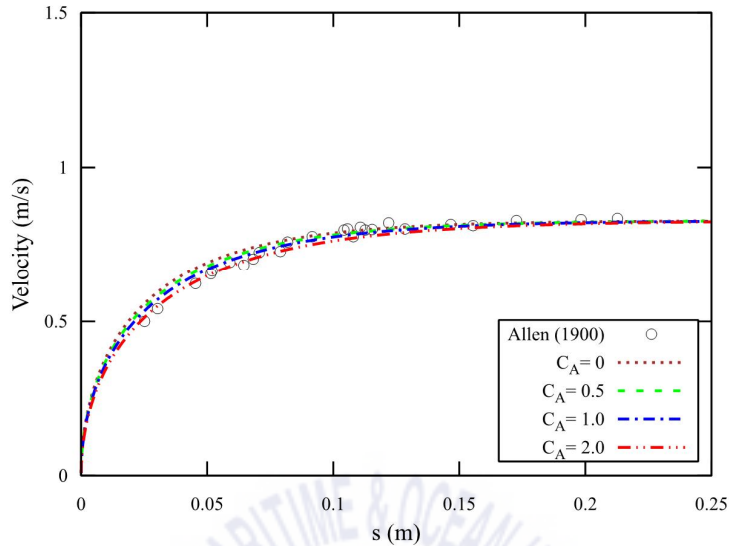


Fig. 3.5 Particle velocity-distance relationship for various C_A

3.1.3 물에서 자유 낙하하는 유리 구슬

부가질량 계수(C_A)와 입자 부피 확장 계수(E_p)의 종단 속도에 미치는 영향을 살펴보았다. 계산 영역은 1.25 m 길이, 1.25 m 폭 그리고 10 m 높이이다. 입자의 지름과 밀도는 각각 0.167 m, 2567.7 kg/m³이다. 물의 밀도는 1000 kg/m³이며 점성은 0.005416 Ns/m다. 입자는 초기속도 없이 바닥면에서 9 m 높이에서 자유 낙하하고, 종단 속도 레이놀즈수는 360이다(Mordant and Pinton, 2000).

Fig. 3.6는 E_p 가 1일 때, C_A 에 따른 계산 결과를 보여준다. $C_A=0$ 일 때, 과도 구간에서 부가질량과 basset force가 고려되지 않았기 때문에 입자 속도가 과도하게 예측된다. 부가질량 계수가 증가할수록, 입자 종단 속도는 Mordant and Pinton (2000)의 실험결과에 가까워진다. 정상 상태에서의 입자 종단 속도는 부가질량 계수와 관련이 없다. Fig. 3.7는 부가질량 계수가 1.5일 때, 입자 부피 확장 계수에 따른 영향을 보여준다. 입자 부피 확장 계수의 감소는 상대적으로 큰 입자를 나타낸다. 입자 부피 확장 계수가 감소할수록, 항력이 증가하여 입자 운동은 정상 상태에 더 빨리 도달한다.

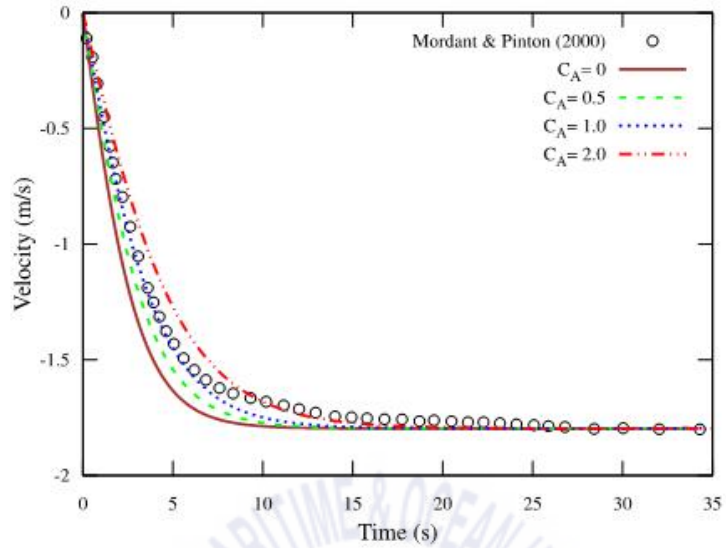


Fig. 3.6 Influence for various added mass coefficients with particle volume expansion coefficient (E_p) of 1.0

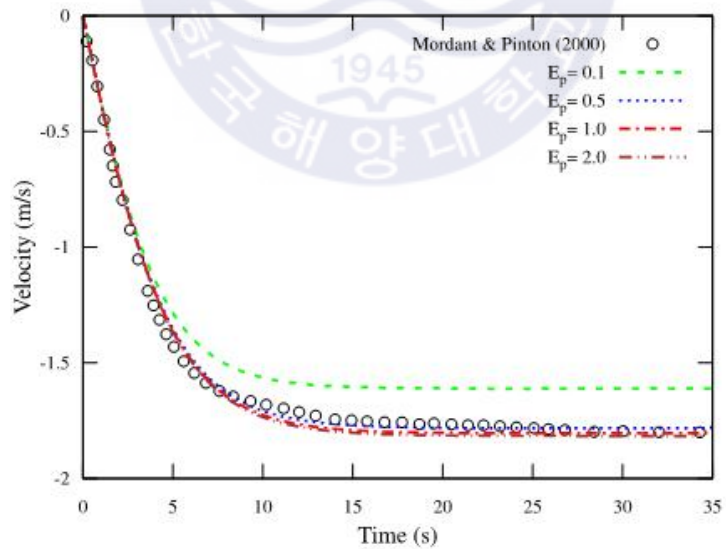


Fig. 3.7 Comparison of settling velocity for various E_p with $C_A=1.5$

3.1.4 실리콘 오일에서 자유 낙하하는 나일론 공

실리콘 오일로 채워진 사각튜브에서 낙하하는 나일론 공을 계산하였다(ten Cate et al., 2002). Fig. 3.8에서 볼 수 있듯이, 사각 튜브의 재원은 100 mm 길이, 100 mm 폭 그리고 160 mm 높이이다. 단일 구의 지름과 밀도는 각각 15 mm, 1120 kg/m^3 이다. 입자는 초기 속도 없이 바닥면에서 120 mm 높이에서 자유 낙하한다. Table 3.3에서 볼 수 있듯이, 수치계산은 4가지 종단 속도 레이놀즈수에 대해 수행되었다.

격자는 가로, 폭, 높이에 대해 각각 7,7,10개를 구성하였다. 입자 지름에 대한 격자 크기 비는 1에 근접한다. Fig. 3.9은 4가지 레이놀즈수에 대해 속도-시간 관계를 보여준다. 점선은 $C_A=2.0$ 과 $E_p=1.0$ 의 계산 결과, 실선은 C_A 와 E_p 에 대한 보정된 계산 결과를 나타낸다. Table 3.4는 대한 계산결과와 실험결과와의 오차를 나타낸다. 레이놀즈수가 작을수록 입자의 낙하 속도에 대해 과대 예측되는 경향을 보여준다. 가속 구간에서 속도가 과대 예측되는 것은 basset force와 시간 변화에 따른 추가적인 힘이 고려되지 못한 것을 의미한다. 점성 유동에서 입자와 유체의 밀도차가 작고, 레이놀즈수가 작을수록 비정상(unsteady) 항력과 basset force의 영향이 증가하는 것을 확인할 수 있다(Chang and Yen, 1998). 따라서 보정된 계산 결과에서 레이놀즈수가 작을수록 C_A 는 증가한다. 점성 유동에서 입자와 유체의 밀도차가 작고, 작은 레이놀즈수에서 입자가 주변 유체를 미치는 영향이 고려되어야 한다. 하지만 dilute flow에서 공간 필터링을 통한 입자의 항력은 상대적으로 작게 예측된다(Ireland and Desjardins, 2017; Gupta, 2015). 따라서 입자에 작용하는 항력이 감소하고 종단속도는 실험값보다 과대 예측되었다. 보정된 계산 결과에서 레이놀즈수가 작을수록 E_p 가 감소하는 것은 레이놀즈수가 작을수록 측면 벽과의 상호 작용으로 인해 입자는 더 큰 항력을 경험하기 때문이다(ten Cate et al., 2002; Alapati et al., 2015). 이는 LBM-DNS 수치 해석에서 레이놀즈수가 작을수록 증가된 항력을 고려하기 위해 수력학적 입자 반지름이 증가한 것과 유사하다(ten Cate et al., 2002; Alapati et al., 2015).

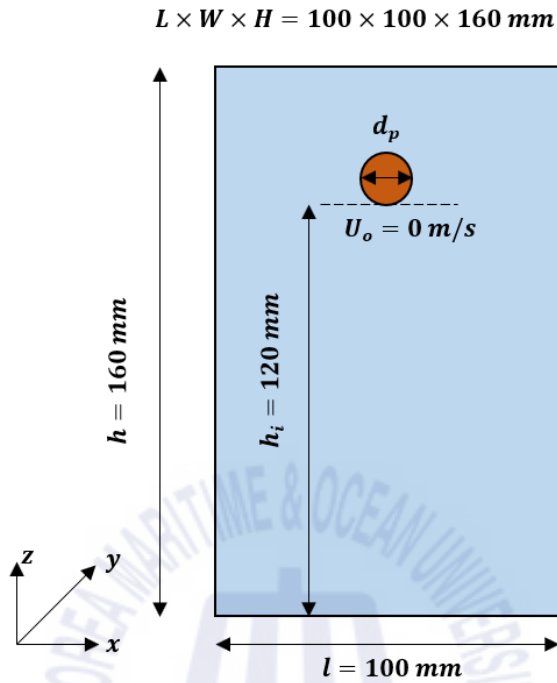


Fig. 3.8 Description of single sphere settling in silicon oil

Table 3.3 Test cases

Case number	Density of fluid (kg/m ³)	Density ratio (kg/m ³)	Viscosity of fluid (Ns/m ²)	Re (-)	$\frac{u_{max}}{u_{\infty}}$
1	970	970	0.00373	1.5	0.947
2	965	965	0.00212	4.1	0.953
3	962	962	0.00113	11.6	0.959
4	960	960	0.00058	31.9	0.955

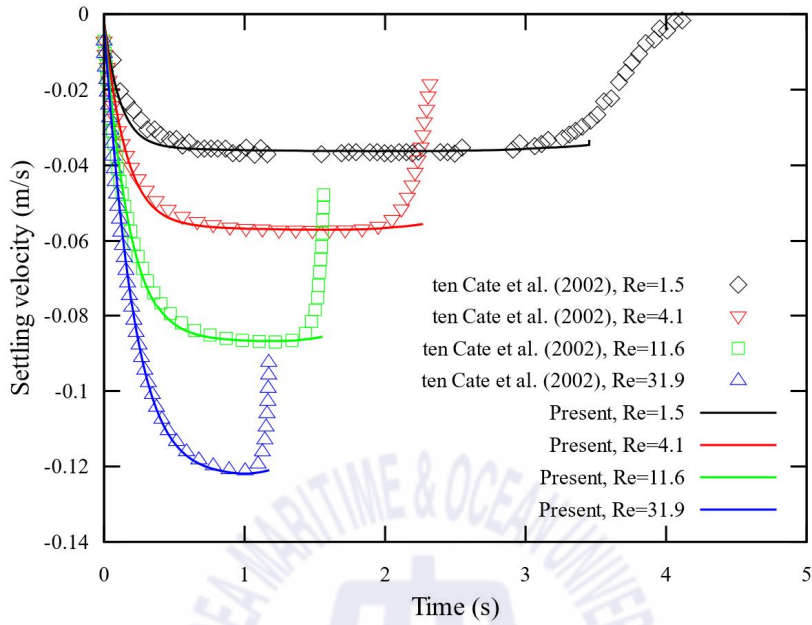


Fig. 3.9 Settling velocity

Table 3.4 Velocity ratio (u_{max}/u_{∞}) and C_A/E_p

		Velocity ratio (u_{max}/u_{∞}) and CA/E_p			
Case		1	2	3	4
Present		1.001 [2.0/1.0]	0.997 [2.0/1.0]	0.990 [2.0/1.0]	0.984 [2.0/1.0]
Present (w calibration)		0.943 [4.0/0.275]	0.949 [3.5/0.3]	0.955 [2.5/0.35]	0.949 [2.0/0.325]
EFD (ten Cate et al., 2011)		0.947	0.953	0.959	0.955
Difference (% of EFD)	w/o calibration	-5.69	-4.66	-3.22	-3.07
	w calibration	0.41	0.33	0.39	0.65

3.2 안식각(Angle of Repose)

안식각은 입상 재료의 고유 파라미터이며, 이는 큰 규모의 입자분포에서 내부 전단 저항 각도와 관련이 있다. 안식각은 밀집된 입자 분포와 관련되며 이산요소해석에서 마찰계수 대한 검증을 위해 선택되었다. 안식각에 대한 검증을 위해 hopper에 채워진 유리구슬이 배출되어 더미(pile)를 형성하는 수치 모의를 수행하였다. 수치 모의 결과는 Chen et al. (2015)의 실험 결과와 비교하였다. 수치 모의를 위한 baseplate와 hopper의 기하학적 치수는 Chen et al. (2015)의 실험과 동일하게 설정하였다. baseplate와 hopper의 기하학적 세부사항은 Fig. 3.10에 나타난다. 이산요소해석을 위한 입자 물성치는 Table 3.5에 나타난다. 수치 모의를 위한 입자 지름(d_p), 입자 밀도(ρ_p), 탄성 계수(E_p), 포아송 비(ν_p)는 제조사에서 제공된 값을 사용하였다(Chen et al., 2015). 입자의 마찰계수(coefficient of sliding friction)는 유리구슬의 미끄럼 테스트를 통해 측정되었고, 유리구슬에 대한 굴림 마찰계수(coefficient of rolling friction)는 아주 작다고 가정하였다(Zhou, et al., 2001). Fig. 3.11은 안식각 테스트를 위한 수치 모의를 보여준다. Hopper는 5 mm/s의 속도로 수직 방향으로 상승하면서 유리구슬은 중력에 의해 hopper 입구로부터 배출된다. Hopper는 입자의 충격으로 인한 구슬 더미의 안식각에 미치는 영향을 최소화하기 위해 구슬 더미의 최대 높이보다 조금 더 높은 위치(바닥으로부터 110 mm 높이)에서 정지한다. 수치 모의는 hopper에 채워진 유리구슬이 모두 배출될 때까지 진행되었다. Table 3.6에서 계산된 안식각은 실험 결과와 잘 일치하는 것을 보여준다. 안식각은 구슬 더미의 가장 높은 위치(H)와 baseplate 지름(D_b)를 이용하여 다음 같이 계산되었다(Chen et al., 2015).

$$\alpha = \frac{180}{\pi} \times \arctan\left(\frac{2H}{D_b}\right) \quad (3.1)$$

모래 입자의 안식각은 세굴공의 전면부 경사와 퇴적된 모래사구의 형태와 관련이 있다. 세굴 수치모의에서 해저 지반을 구성하는 입자는 실험과 동일하게 구성해야한다.

하지만 입자 수에 따른 계산 비용의 제한으로 이산요소해석은 입자 크기에 대한 상사성을 만족하기 어렵다(Sakai and Koshizuka, 2009). 따라서 세굴 실험의 균일하지 않은 모래 입자와 불균일한 크기의 입자분포를 고려하기 위해 마찰 계수에 대한 파라미터 연구를 통해 안식각을 결정하였다. Fig. 3.12는 안식각 테스트를 위한 수치 모의를 보여준다. 입자 지름은 1 mm이며, 일정한 크기로 분포하였다. 모래 입자는 고정된 hopper에서 중력에 의해 배출되어 baseplate에 모래 더미(sandpile)가 형성된다. Table 3.7은 마찰계수 0.6에서 구름 마찰계수에 대한 계산 결과를 보여준다. Wet 조건에서 모래 더미의 안식각은 구름 마찰계수에 비례하여 증가한다. 마찰계수와 구름 마찰계수가 각각 0.6, 0.1일 때 안식각은 32.12°를 나타내며 이는 Mao (1986)의 모래 입자 특성과 일치한다. 결과로부터, 세굴 수치 모의를 위한 마찰계수와 구름 마찰계수는 각각 0.6과 0.1이 사용되었다.

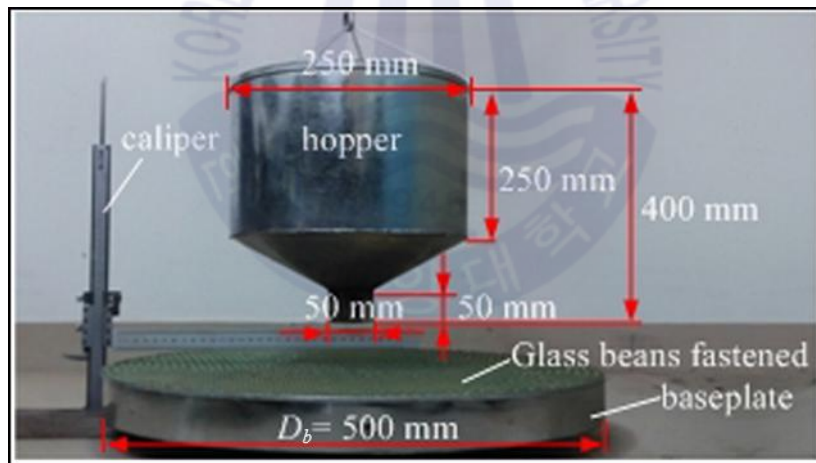


Fig. 3.10 Experimental set up (Chen et al., 2015)

Table 3.5 Simulation parameter in DEM solver

Properties	Value
Particle diameter d_p [mm]	5
Density ρ_p [kg/m^3]	2,500
Poisson's ratio ν_p	0.24
Young's modulus E_p [Mpa]	5.5×10^6
Coefficient of Restitution e	0.97
Coefficient of sliding friction μ	0.142
Coefficient of rolling friction R_μ	0.01
Number of particles filled in hopper	13,000

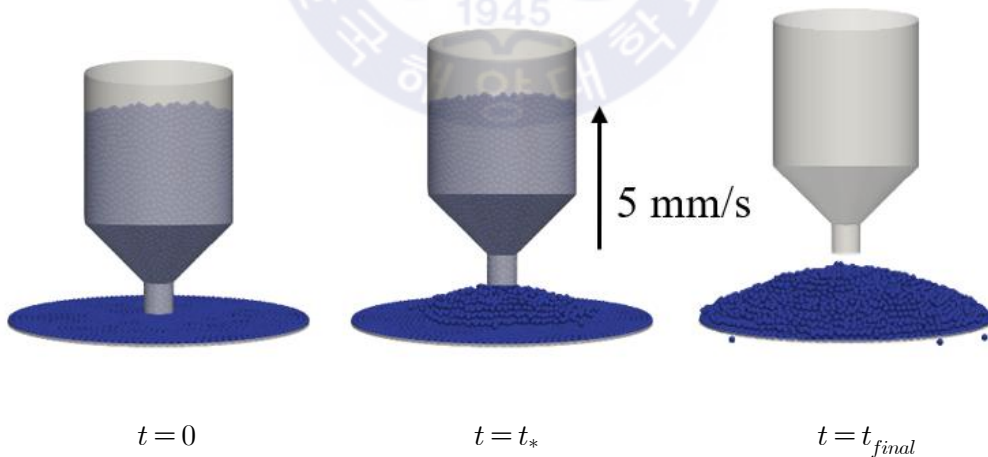


Fig. 3.11 Simulation set up in dry condition

Table 3.6 Angle of results in dry condition

	Present	Experimental (Chen et al.,2015)	Difference
α	22.49°	22.7°	0.9%

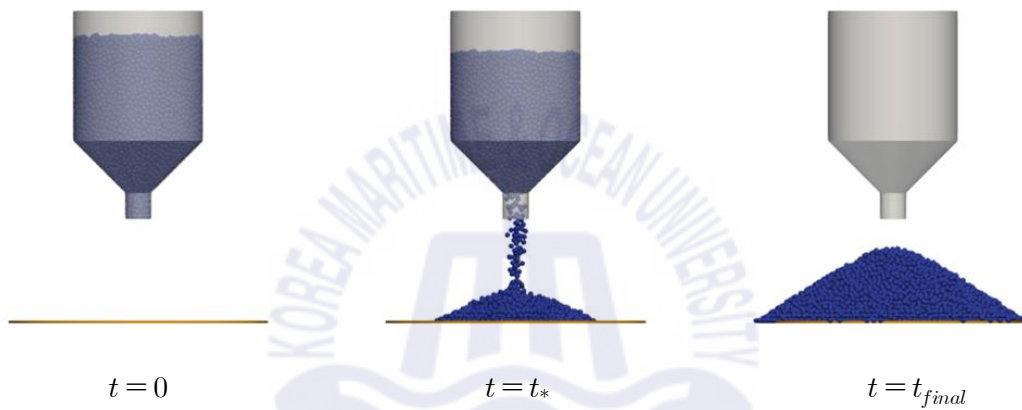


Fig. 3.12 Simulation set up in wet condition

Table 3.7 Angle of results in wet condition

	Sliding friction coefficient (μ)	Rolling friction coefficient (R_μ)	Angle of repose (α)
Present	0.6	0.01	26.38°
		0.04	29.06°
		0.07	30.49°
		0.1	32.12°

3.3 입자의 초기 운동

모래 입자의 초기 운동에 대한 검증을 수행하였다. 모래 입자의 초기 운동은 입자에 작용하는 유체력이 입자의 수중 무게와 입자 간의 저항력의 합보다 클 때 발생한다. 입자 초기 운동을 검증하기 위해 임계치 속도(v_c)를 사용하였다. 세굴은 입자 수송이 발생하는 임계 속도에 따라 clear-water 조건과 live-bed 조건으로 구분된다. 구조물로 접근하는 유속(approach flow)이 입자 수송이 발생하는 임계 속도보다 작을 때 구조물 주위에서 가속된 유체 흐름에 의해서 해저 지반의 침식이 발생한다. 반면에, 접근하는 유속이 임계 속도보다 크면 구조물에서 멀리 떨어져있는 원거리 영역에서 입자의 수송이 발생하여 세굴공에 입자의 유입이 발생한다. 세굴 조건에 따라 세굴의 특성은 다른 양상을 보인다. 따라서 입자의 수송이 발생하는 임계 속도에 대한 검증이 중요하다. 입자 수송이 발생하는 임계 속도에 대한 검증을 위해 Fig. 3.13의 계산 영역을 구성하였다. 지름 1 mm인 입자가 길이 4D, 폭 1D, 깊이 0.25D인 계산영역에 조밀하게 분포되어 있다. 여기서, D는 4장의 파이프라인 직경이다. 유체는 높이 4D의 입구 경계면에서 로그형 속도 분포로 유입되며, 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{u}{U_f} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(30 \frac{z}{k_s}\right) \quad (3.2)$$

여기서, z 는 해저 지반 표면으로부터 수직 거리를 의미하고, 등가거칠기(Nikuradse's equivalent sand roughness)인 k_s 는 $2.5d_p$ 로 나타내었고, κ 는 von Karman 상수를 의미한다. U_f 는 마찰 속도를 의미하고 $U_f = \kappa U_\infty / \ln(30\delta/k_s)$ 으로 정의된다(Trygslund, 2015). 여기서 U_∞ 는 유입 속도, δ 는 경계층 두께를 의미한다.

본 논문에서 사용한 CFD-DEM 연계기법은 입자 표면에 작용하는 유체력을 직접 계산하지 않고 격자 내에 위치한 입자 중심에서의 값들을 평균하여 격자 중심에서 유체력을 산정한다. 따라서 초기조건은 입자 표면 거칠기를 고려한 속도 분포를 사용하였지만 입자 중심에서 작용하는 유체력을 계산하여 입자의 초기 운동을 판단하였다. 입자의 초기 운동에 대한 검증을 위해 유입 속도와 임계치 속도의

비(V/V_c)를 계산하였다. 여기에서 V_c 는 깊이 방향으로 속도 분포를 평균한 값을 의미한다. Roulund et al. (2005)에서 임계 속도비 ($V/V_c=1.25$)를 통해 임계 속도는 0.92 m/s이다. Fig. 3.14은 유입 평균속도가 0.92 m/s일 때 입자 속도를 나타낸다. 유입 속도가 0.92 m/s에서 입자의 움직임이 발생하고 0.02 m/s의 속도로 수송이 일어나는 것을 확인할 수 있다.

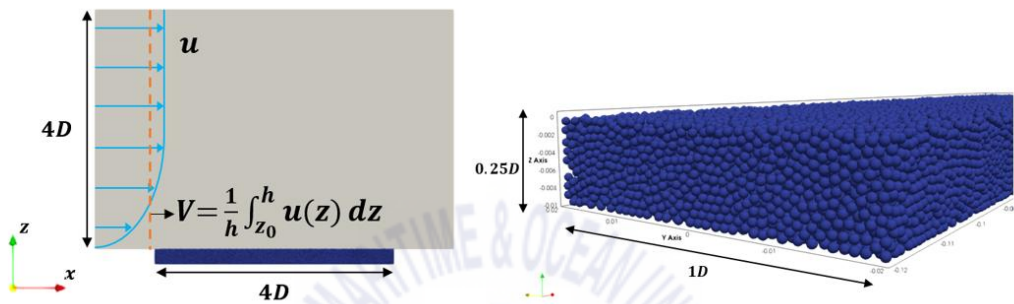


Fig. 3.13 Computational domain for incipient motion

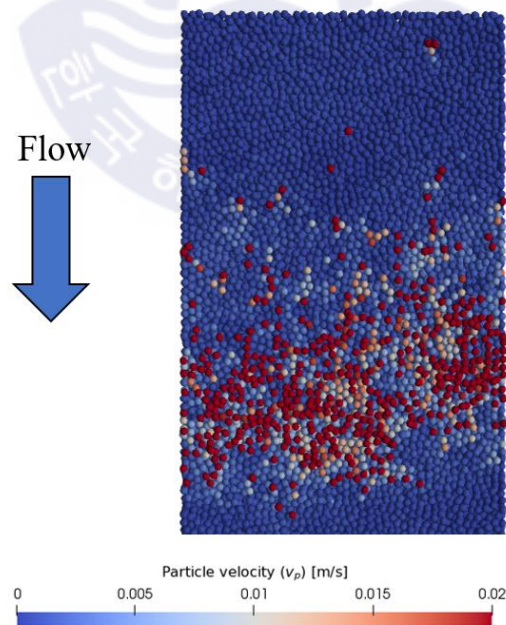


Fig. 3.14 Incipient motion of particles

제 4 장 해저파이프의 세굴 해석

4.1 계산영역 크기, 경계조건 및 격자

Fig. 4.1은 CFD-DEM 연계 해석이 적용되는 계산영역의 크기, 경계조건 보여준다. 전체 계산영역은 직사각형 형태이며 해저 지반에 해당하는 영역을 확장하여 구성하였다. 계산영역 전체 길이는 $17D$ 이며, 모노파일 중심에서 입구면 방향으로 $5D$, 출구면 방향으로 $12D$ 로 설정하였다. 수심은 $5D$ 이며, 해저 지반의 깊이는 $1D$ 로 계산하였다. 여기서, D 는 파이프라인 직경을 의미한다. 파이프라인은 해저 지반과의 간격 없이 놓여있고, 세굴 과정동안 고정되어 있다(Mao, 1986). 해저 지반을 구성하는 계산영역의 길이는 $15D$ 로 설정하였고, 파이프라인 중심으로부터 입구 방향과 출구 방향의 길이는 각각 $4D$ 와 $11D$ 이다. Table 4.1은 수치 모의 조건을 보여준다. 파이프라인 직경(D)은 0.05 m 이며, 파이프라인에 대한 레이놀즈수(Re_D)와 프루드수(Fr_D)는 각각 4.35×10^4 과 1.24 이다(Mao, 1986). 해저 지반을 구성하는 입자는 동일한 크기의 구 모양으로 나타내었고, 입자 지름(d_p)은 1 mm 이다. 입구면에서 속도, 난류, 체적함수는 Dirichlet조건, 압력은 Neumann조건으로 설정하였다. 출구면에서 속도, 난류, 체적함수는 Neumann조건으로 설정하였고, 압력은 Dirichlet조건으로 설정하였다. 입구면에서 유체 속도는 로그형 속도 분포를 나타내며, 평균 유입 속도는 0.87 m/s 이다(Mao, 1986). 수치적 안정성을 위해 유입 속도는 램프 구간($0 \sim 8\text{ s}$)에서 0 에서 0.87 m/s 까지 증가한다. 파이프와 바닥면은 no-slip 조건으로 고려하였다. 유체 해석은 2차원 흐름을 고려하였고, 입자 해석에서 중앙 단면은 주기적(periodic) 경계조건을 설정하여 3차원 계산을 적용하였다. 계산 영역의 폭은 216 mm 이다. Table 4.2는 DEM 해석을 위한 입자 물성치를 나타낸다. 해저 지반을 구성하는 입자는 약 10만 개 이다. 입자의 밀도는 2600 kg/m^3 이며, 마찰 계수와 구름마찰 계수는 각각 0.6 과 0.1 이다.

전산유체해석과 이산요소해석 시간 간격은 각각 $2 \times 10^{-4}\text{ s}$, $5 \times 10^{-6}\text{ s}$ 이다. 이는 이산요소해석 계산 간격의 40번째마다 전산유체해석과 이산요소해석 연계가 이루어진다는 것을 의미한다.

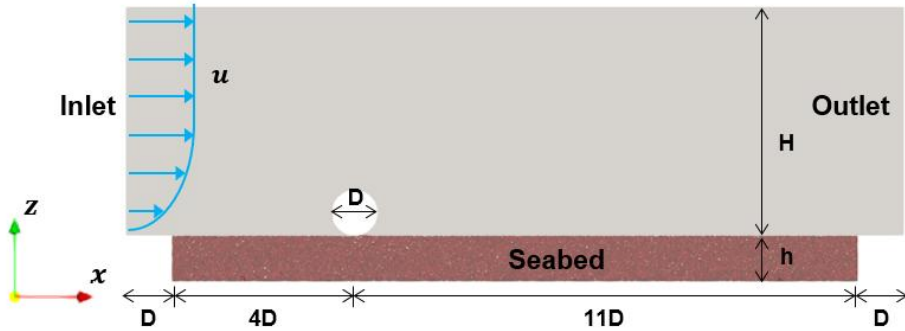


Fig. 4.1 Computational domain and boundary conditions

Table 4.1 Simulation conditions for pipeline scour

Description symbol [<i>unit</i>]	Present
Pipeline diameter D [m]	0.05
Water depth H [m]	0.25
Seabed depth h [m]	$1D$
Mean flow velocity \bar{U} [m/s]	0.87
$Re_D = \bar{U}D/\nu$	4.35×10^4
$Fr_D = \bar{U}/\sqrt{gD}$	1.24
Particle mean diameter d_p [mm]	1
Shields parameter θ	0.33(live-bed condition)

격자 생성은 OpenFOAM이 제공하는 자동 격자 생성 유틸리티인 BlockMesh와 SnappyHexMesh를 이용하여 비정렬 격자로 격자를 생성하였다. 유체 흐름과 해저 지반의 상호작용을 정확히 고려하기 위해 해저 지반 표면과 모노파일 주위에 상대적으로 격자를 밀집시켰다. 격자 크기는 입자 크기의 약 2배로 설정하였다.

4.2 수치해석 방법

질량보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 난류모델 방정식을 비압축성 기반 비정상 상태에서 계산하였다. 입자의 이동은 볼륨비 수송방정식으로 묘사된다. 대류 항은 TVD scheme에 limitedLinear로 차분을 적용하였고, 확산항은 중심 차분을 적용하여 계산하였다. 속도와 압력의 연성은 PISO(Issa, 1986) 알고리즘을 사용하였다. 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델(Launder and Spalding, 1974)을 사용하였다. 대수방정식의 수렴성을 증가시키기 위해 Algebraic Multi-Grid(AMG) 방법(Weiss, et al., 1999)을 사용하였고, Gauss-Seidel 반복 계산법을 사용하여 대수방정식을 계산하였다.

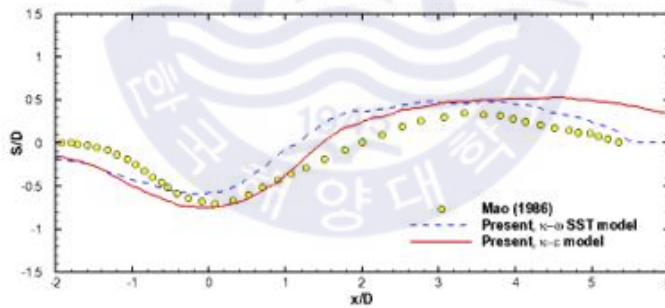
4.3 파이프라인 주위 세굴 해석

파이프라인 주위에서 발생하는 세굴의 과정은 3단계로 구분할 수 있다. (1) 세굴의 시작단계로(onset of motion), 강한 해류에 의해 파이프라인 주위에 압력 강하가 발생하여 파이프라인 아래의 토사가 유실된다. (2) 터널 침식 단계로(tunnel erosion), 파이프라인과 해저 지반 사이에 틈이 형성되어 파이프라인 밑으로 증가된 유체 흐름에 의해 틈이 확장된다. (3) 배후류 침식 단계로(lee-wake erosion), 파이프라인과 해저 지반의 간격이 충분히 크면 파이프라인의 후류에서 발달된 와류에 의해 세굴공의 하류 침식으로 이어진다(Sumer and Fredsoe, 2002). Mao (1986)는 다양한 유동 조건에서 실린더 주위에서 발생하는 세굴을 실험하였다. 본 논문에서는 개발된 unresolved CFD-DEM 연계 모델을 이용하여 파이프라인 주위 세굴을 수치 모의하고 Mao (1986)의 실험 결과와 비교하였다.

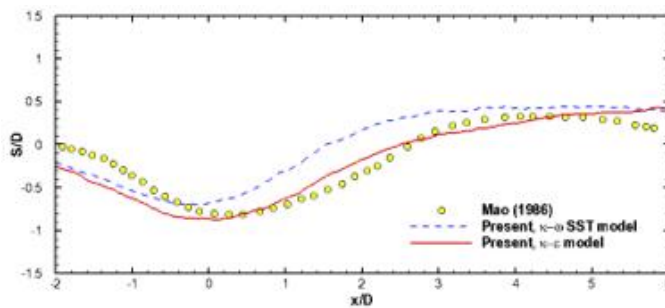
난류모델이 해저 지반의 높이 변화에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 4.2는 $t=11$ s, 18 s, 25 s에서 해저 지반의 높이 변화 결과를 Mao (1986)의 실험 결과와 함께 나타내었다. 난류 모델은 SST $k-\omega$ 난류 모델과 $k-\epsilon$ 난류모델을 고려하였다. SST $k-\omega$ 난류 모델은 세굴공의 깊이는 과소 예측되었고, 모래 사구는 과도 예측되었다. $k-\epsilon$ 난류모델의 계산 결과는 세굴공의 깊이와 모래 사구 형태가 실험 결과와 유사한 것을 보여준다. 결과로부터 $k-\epsilon$ 난류 모델이 파이프라인 주위 유동과 후류 유동에 의한 모래 입자의 수송을 잘 예측하는 것을 알 수 있다.

Table 4.2 Simulation parameters for DEM solver

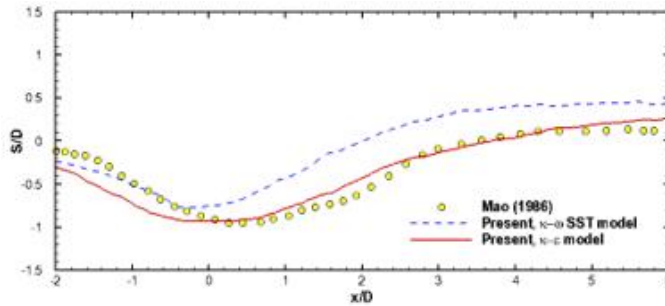
Spherical particles	
Number of particles	99,738
Density ρ_p [kg/m^3]	2600
Poisson's ratio ν_p	0.45
Young's modulus E_p [Mpa]	5×10^6
Coefficient of Restitution e	0.051
Coefficient of sliding friction μ	0.6
Coefficient of rolling friction R_μ	0.1
Computation condition	
CFD time step Δt_{CFD} [s]	2×10^{-4}
DEM time step Δt_{DEM} [s]	5×10^{-6}
CFD-DEM coupling step N_c	40



(a) $t = 11 s$



(b) $t = 18 s$



(c) $t = 25 \text{ s}$

Fig. 4.2 Evolution of dimensionless scour depth (S/D)

Fig. 4.3은 $k-\epsilon$ 난류모델의 결과를 시간 변화에 따른 세굴 발달을 보여준다. $T=5\text{s}$ 에서 세굴의 시작 발생한다. 세굴의 시작은 파이프라인 상류와 하류 사이의 큰 압력 차에 의해 유도된 침투류 (seepage flow)가 파이프라인 아래의 토사를 씻겨내면서 발생한다 (Chiew, 1990). 기존의 단상 유동(Liang et al., 2005) 또는 이상 유동 모델 (Yeganeh-Bakhtiary et al., 2011)에서는 세굴의 시작을 모사할 수 없으며, 파이프라인과 해저 지반 사이에 초기 간격이 요구된다. 세굴의 시작 이후로 퇴적 사구는 파이프라인 후류에 형성되고, 세굴공은 깊이와 너비 방향으로 확장된다. 이는 Mao (1986)의 실험 관측과 일치한다. 초기 단계에서 $S/D < 0.3$ 까지 터널 침식이 진행되며, 증가된 유체 흐름이 해저 지반과 파이프라인 사이로 유입된다. $S/D > 0.3$ 에서 배후류 침식이 발생하며 파이프라인 후류에서 발생하는 와류에 의해 퇴적물을 이동된다.

Fig. 4.4은 시간 발달에 따른 최대 세굴심을 보여준다. 수치 모의 결과는 Mao (1986) 실험 결과와 비교하였다. 수치 모의 결과는 $t=25 \text{ s}$ 이후에 평형 상태에 도달하게 되며 평형 세굴심은 실험 결과와 잘 일치한다. 세굴의 시작 이후 터널 침식 단계에서 세굴심의 변화율은 실험보다 가파르게 진행되었다. 이 차이는 초기 유동 조건의 차이로 기인한다. 수치 모의에서 유입 속도는 8초의 램프구간동안 0에서 0.87 m/s 까지 점진적으로 증가한다. 이는 일시적인 불안정성을 억제하기 위해 수치 모의에서 사용되는 절차이다(Lee et al., 2016; Zhang et al., 2015). 램프 구간에서 파이프라인 후류 발달이 완전하지 않은 상태에서 세굴의 시작이 지연되었다. 이로 인해 상대적으로 증가한 유입속도에 의해 터널 침식 발달이 가파르게 진행되었다(Yang et al., 2018).

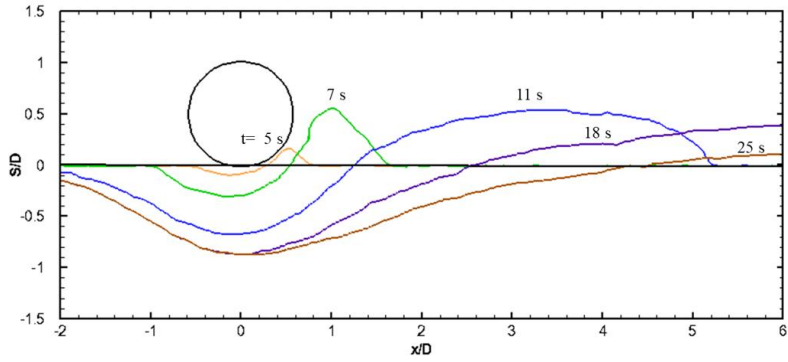


Fig. 4.3 Evolution of bed profile (S/D)

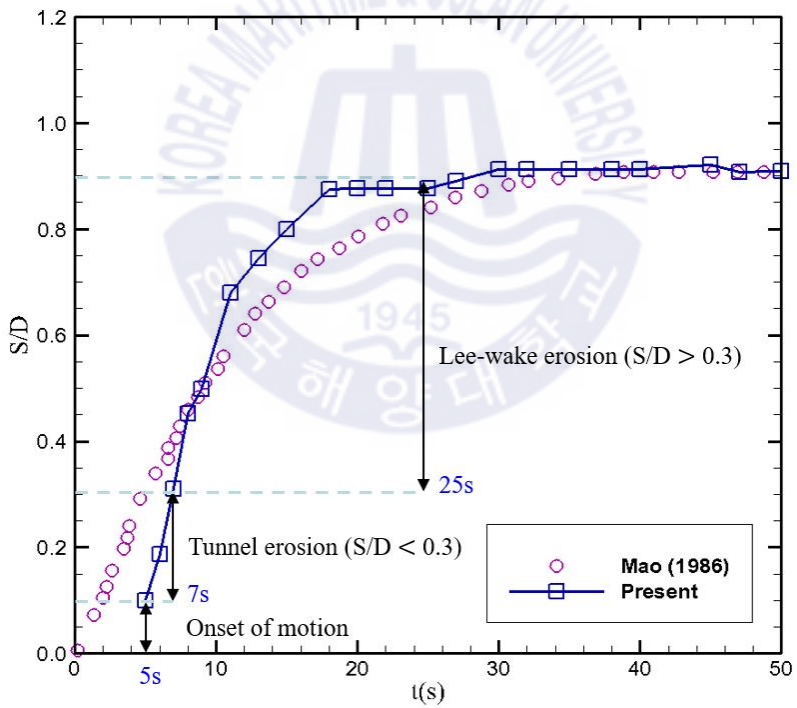


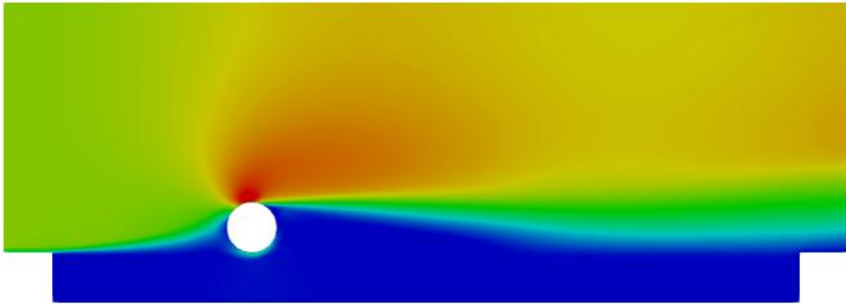
Fig. 4.4 Evolution of dimensionless maximum scour depth (S/D)

Fig. 4.5~4.7은 Fig. 4.4의 세굴 3단계 ($t=5$ s, 8 s 25 s)에 대한 결과를 보여준다. Fig. 4.5은 유체 속도의 분포를 평균 유입 속도 0.87 m/s로 무차원한 결과를 보여준다. 세굴이 시작 단계에서 파이프라인과 해저 지반 사이에 작은 틈이 발생하고 유속이 발생한다. 터널 침식 단계에서 작은 틈은 터널로 확장되며 유체 속도는 증가한다. 배후류 침식 단계에서 파이프라인 주위의 유동이 완전히 발달하면서 세굴공은 후류방향으로 발달한다.

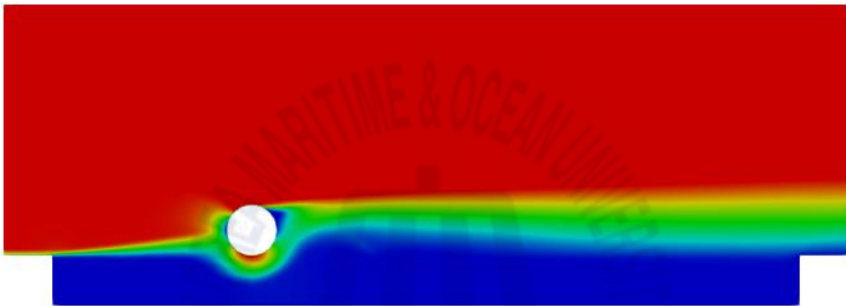
Fig. 4.6는 유체와 입자간의 상호작용으로 수송되는 개별 입자의 속도분포를 보여준다. 세굴 시작 단계에서 파이프라인 아래에 놓인 모래 입자가 움직이기 시작한다. 터널 침식 단계에서 파이프라인 아래의 강한 침식 작용으로 인해 상대적으로 많은 입자들이 수송된다. 배후류 침식 단계에서 파이프라인 아래의 유동이 충분히 발달하여 모래 입자의 수송이 감소한다. 반면에 파이프라인에서 멀리 떨어진 후류지역에서는 와류의 영향으로 퇴적된 모래 사구가 후류방향으로 침식된다.

Fig. 4.7은 입자에 작용하는 항력 분포를 보여준다. 입자에 작용하는 항력의 유속과 함께 발달한다. 세굴 시작 단계에서 파이프라인 아래의 해저 지반 층에 항력이 발생한다. 터널 침식 단계에서 항력은 파이프라인 아래와 퇴적 사구 전면에서 증가한다. 배후류 침식 단계에서 유동이 충분히 발달하여 해저 지반 층에 전반적으로 항력이 발생한다.

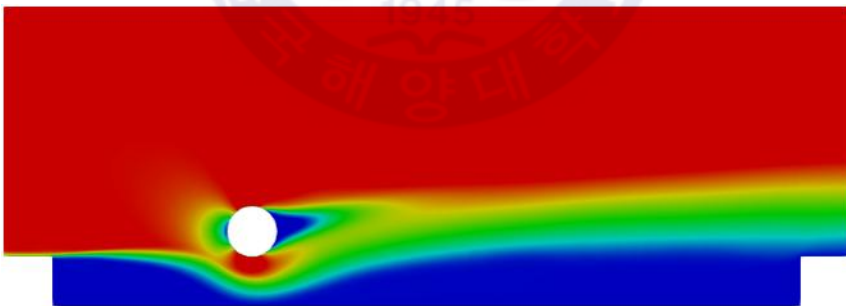
Fig. 4.8은 모래 입자간에 작용하는 전체 힘의 크기를 보여준다. 파이프라인 아래와 후류 영역에서 입자간의 상호작용은 터널 침식 단계에서 퇴적된 모래 사구가 후류 방향으로 이동할 때 가장 크다. Fig. 4.7의 터널 침식 단계에서 파이프라인 아래와 모래 사구의 전면에서 유속의 증가로 항력이 발생하는 것을 확인하였다. 항력의 증가로 침식된 입자들은 퇴적 되어 모래 사구를 형성하면서 입자간의 상호작용으로 인해 모래 사구는 후류 방향으로 이동한다. 개별적인 입자 수준에서 모래 이동에 대한 정보는 기존의 실험 및 수치 기법에서는 얻기 어려운 정보이지만, CFD-DEM 연계 모델을 이용한 해석은 단일 입자의 위치와 속도 그리고 작용하는 힘과 관련된 정보를 제공할 수 있다. 이러한 정보는 세굴 현상을 더 잘 이해하는데 중요하다.



(a) onset of motion



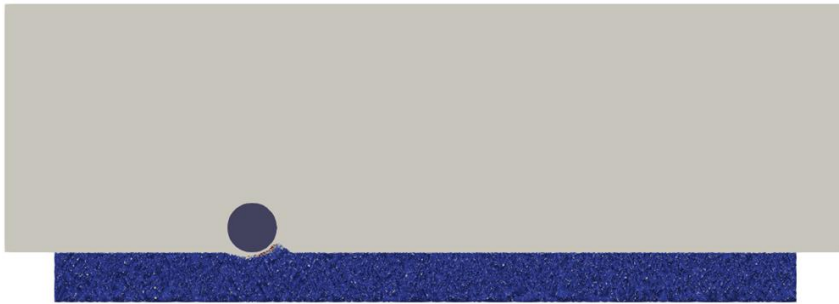
(b) tunnel erosion



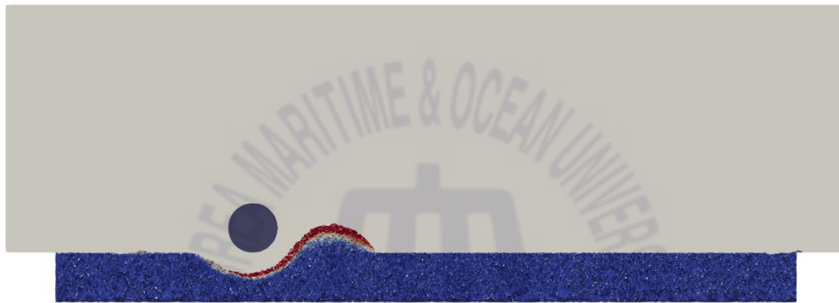
(c) lee-wake erosion



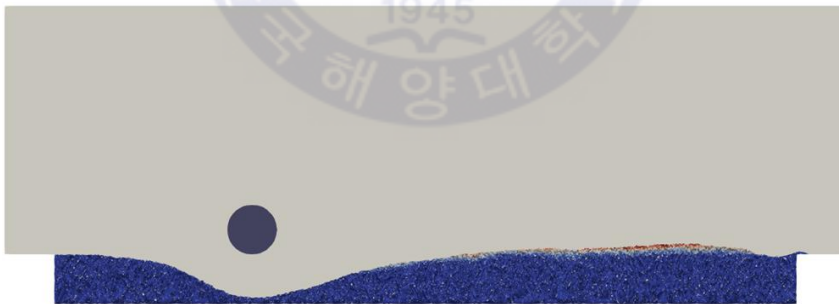
Fig. 4.5 Fluid velocity magnitude contour



(a) onset of motion



(b) tunnel erosion



(c) lee-wake erosion

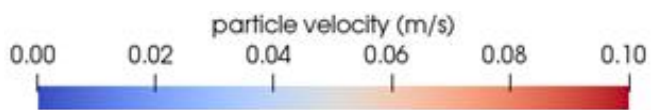
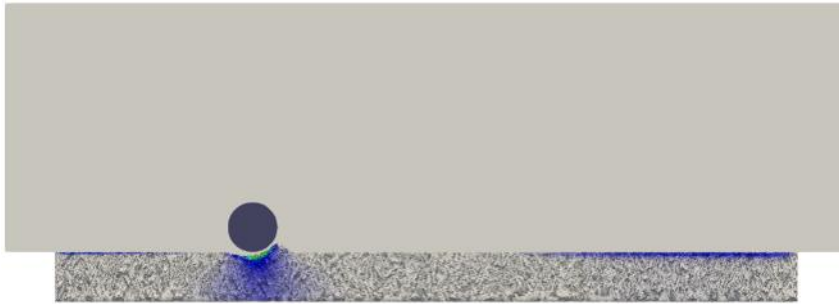
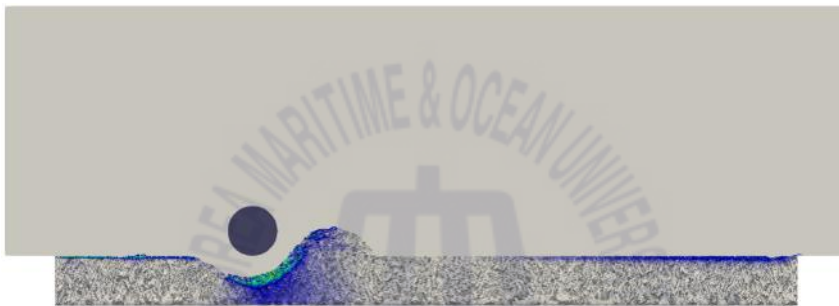


Fig. 4.6 Particle velocity (u_p)



(a) onset of motion



(b) tunnel erosion



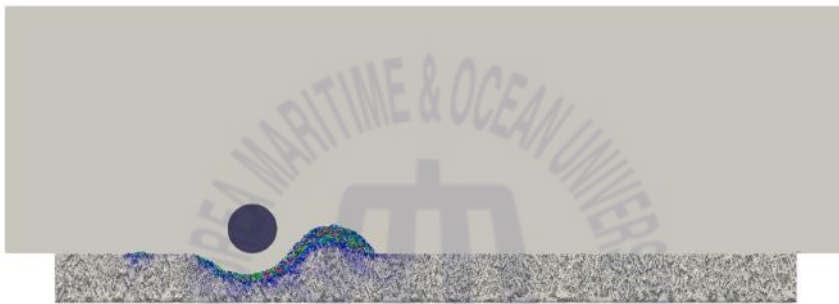
(c) lee-wake erosion



Fig. 4.7 Particle drag force distribution (f_d)



(a) onset of motion



(b) tunnel erosion



(c) lee-wake erosion



Fig. 4.8 Total force (f)

4.4 CFD-DEM 연계 모델의 장점 및 제한

해저파이프라인 주위에서 발생하는 세굴을 해석하기 위해 CFD-DEM 연계모델을 적용하였다. 파이프라인 주위 해저 지반은 시간 발달에 따라 3단계의 발달을 보여줬다. 세굴공의 전면부 경사는 실험 결과보다 낮게 예측되었다. 이로 인해 퇴적된 모래 사구의 형태도 초기 단계에서 실험 결과보다 과도 예측되었다. 이는 CFD-DEM 연계 모델의 제한으로 인해 발생한다. 입자 수에 비례하여 증가하는 계산 비용을 줄이기 위해 실제 실험 구간보다 입구 방향을 짧게 구성하였다. 수치 모의한 세굴은 live-bed 조건이며, 원거리 영역에서 수송되어 오는 입자들의 영향을 고려하지 않았다. 모래 입자의 형태와 크기를 단순한 구와 일정한 크기의 분포로 해저 지반을 구성하였다.

CFD-DEM 연계모델을 이용한 세굴 수치 모의는 개별 입자 운동을 해석하여 입자의 위치와 속도 그리고 작용하는 유체력을 확인할 수 있었다. 개별 입자 정보는 선행 연구의 수치 기법에서는 확인하기 어려운 정보이다. 또한, 유체와 입자간의 상호작용을 고려함으로써, 입자간의 상호작용이 자세히 고려된다. 이전의 선행 연구에서는 이러한 자세한 정보를 제공할 수 없으며 세굴이 진행되는 메커니즘 이해를 향상시킨다.

제 5 장 결론

본 논문은 커널 기반 평균화 기법에 근거한 unresolved CFD-DEM 연계모형을 개발하였다. 사용된 수치 모델은 소스코드가 공개되어 있는 OpenFOAM과 LIGGGHTS를 연계하였다. 개발된 CFD-DEM 연계 모델은 커널 기반의 평균화 기법을 적용하여 격자 의존도를 해결하였다. 입자에 작용하는 항력의 정확도를 개선하기 위해 항력 모델에 수정된 공극비를 제시하였다. 간단한 코드 수정이 필요하며 수정된 코드는 병렬 계산이 가능하다. 수치기법을 검증하기 위해 종단속도와 안식각 그리고 입자의 초기 운동을 계산하였다. 검증된 수치기법을 이용하여 해저파이프라인 주위에서 발생하는 세굴 현상에 적용하였다. 파이프라인 주위 유체 흐름을 해석하였고, 해저 지반을 구성하는 개별 입자의 운동을 추적하였다. 격자 크기 비에 대한 영향이 나타나지 않았다. 결과적으로 유체-입자 상호작용뿐만 아니라 입자간의 상호작용을 고려하여 개별 입자에 대한 정보를 제공함으로써 세굴 현상의 이해를 심화할 수 있다.

참고문헌

- Abraham, F.F., 1970. Functional dependence of drag coefficient of a sphere on Reynolds number. *The Physics of Fluids*, 13(8), 2194-2195.
- Alapati, S. et al., 2015. Simulation of sedimentation of a sphere in a viscous fluid using the lattice Boltzmann method combined with the smoothed profile method. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(2), 794198.
- Allen, H.S. 1900. L. The motion of a sphere in a viscous fluid. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 50(306), 519-534.
- Alobaid, F., 2015. A particle - grid method for Euler - Lagrange approach. *Powder Technology*, 286, 342-360.
- Alobaid, F., 2015. An offset-method for Euler - Lagrange approach. *Chemical Engineering Science*, 138, 173-193.
- Askarishahi, M. et al., 2018. Voidage correction algorithm for unresolved Euler - Lagrange simulations. *Computational Particle Mechanics*, 5(4), 607-625.
- Bagherzadeh, M., 2014. Modelling single particle settlement by CFD-DEM coupling method.
- Baykal, C. et al., 2017. Numerical simulation of scour and backfilling processes around a circular pile in waves. *Coastal Engineering*, 122, 87-107.
- Capecelatro, J. & Desjardins, O., 2013. An Euler - Lagrange strategy for simulating particle-laden flows. *Journal of Computational Physics*, 238, 1-31.
- Chang, T. J. & Yen, B.C., 1998. Gravitational fall velocity of sphere in viscous fluid. *Journal of engineering mechanics*, 124(11), 1193-1199.
- Chen, H. et al., 2015. Numerical investigation on angle of repose and force network from granular pile in variable gravitational environments. *Powder Technology*, 283, 607-617.
- Cheng, K. et al., 2018. A semi-resolved CFD-DEM model for seepage-induced fine particle migration in gap-graded soils. *Computers and Geotechnics*, 100, 30-51.

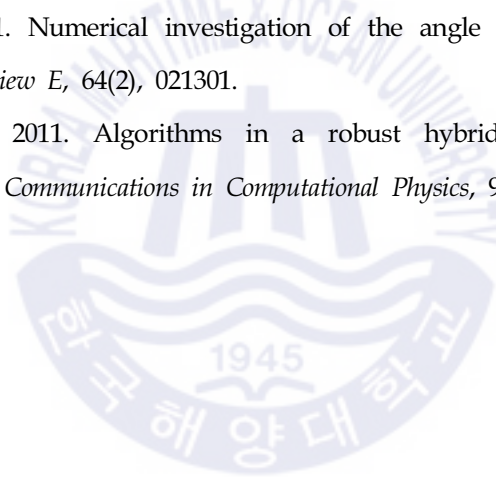
- Chester, W. et al., 1969. On the flow past a sphere at low Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 37(4), 751-760.
- Chiew, Y.M., 1990. Mechanics of local scour around submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(4), 515-529.
- Chiew, Y.M. 1991. Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(4), 452-466.
- Cundall, P.A. & Strack, O.D., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47-65.
- Dargahi, B., 1989. The turbulent flow field around a circular cylinder. *Experiments in Fluids*, 8(1-2), 1-12. <https://doi.org/10.1007/BF00203058>
- Di Felice, R., 1994. The voidage function for fluid-particle interaction systems. *International journal of multiphase flow*, 20(1), 153-159.
- Esteghamatian, A. et al., 2018. A stochastic formulation for the drag force based on multiscale numerical simulation of fluidized beds. *International Journal of Multiphase Flow*, 99, 363-382.
- Glasser, B.J. & Goldhirsch, I., 2001. Scale dependence, correlations, and fluctuations of stresses in rapid granular flows. *Physics of Fluids*, 13(2), pp.407-420.
- Guo, J., 2011. Motion of spheres falling through fluids. *Journal of Hydraulic Research*, 49(1), 32-41.
- Gupta, P., 2015. *Verification and validation of a DEM-CFD model and multiscale modelling of cohesive fluidization regimes*.
- Hur, D.S. & Jeon, H.S., 2011. Development of numerical model for scour analysis under wave loads in front of an impermeable submerged breakwater. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 31.
- Ireland, P.J. & Desjardins, O., 2017. Improving particle drag predictions in Euler - Lagrange simulations with two-way coupling. *Journal of Computational Physics*, 338, 405-430.
- Issa, R.I., 1986. Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by

- Operator-Splitting. *Journal of Computational Physics*, 62, pp.40 - 65.
- Jing, L. et al., 2016. Extended CFD - DEM for free surface flow with multi size granules, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 40(1), 62-79.
- Johnson, N.L., 1949. *Systems of frequency curves generated by methods of translation. Biometrika*, 36(1/2), pp.149-176.
- Kloss, C. et al., 2012. Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD - DEM. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 12(2-3), 140-152.
- Lauder, B. & Spalding, D., 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Energy*, 3, 269-289.
- Lee, C.H. et al., 2016. Multi-dimensional rheology-based two-phase model for sediment transport and applications to sheet flow and pipeline scour. *Physics of Fluids*, 28(5), 053305.
- Li, J. & Tao, J., 2018. CFD-DEM Two-Way Coupled Numerical Simulation of Bridge Local Scour Behavior under Clear-Water Conditions. *Transportation Research Record*, 2672(39), 107-117.
- Liang, D. et al., 2005. Numerical modeling of flow and scour below a pipeline in currents: Part II. Scour simulation. *Coastal engineering*, 52(1), 43-62.
- Mao, Y., 1986. *The Interaction Between a Pipeline and Erodible Bed*, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- Mathieu, A., Chauchat, J., Bonamy, C. and Nagel, T., 2019. Two-phase flow simulation of tunnel and lee-wake erosion of scour below a submarine pipeline. *Water*, 11(8), p.1727.
- Mordant, N. & Pinton, J.F., 2000. Velocity measurement of a settling sphere. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 18(2), 343-352.
- Oseen, C.W., 1927. *Neuere methoden und ergebnisse in der hydrodynamik*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft mb H.

- Park, S. et al., 2017. Parametric Study on Scouring around Suction Bucket Foundation. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 31(4), 281-287. <https://doi.org/10.26748/KSOE.2017.08.31.4.281>
- Peng, Z. et al., 2014. Influence of void fraction calculation on fidelity of CFD DEM simulation of gas solid bubbling fluidized beds. *AIChE Journal*, 60(6), 2000-2018.
- Roulund, A. et al., 2005. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Fluid Mechanics*, 534, 351-401.
- Sakai, M. & Koshizuka, S., 2009. Large-scale discrete element modeling in pneumatic conveying. *Chemical Engineering Science*, 64(3), 533-539.
- Schmeeckle, M.W., 2014. Numerical simulation of turbulence and sediment transport of medium sand. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(6), 1240-1262.
- Stokes, G.G., 1851. *On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums*, 9, 8. Cambridge: Pitt Press.
- Sun, R. & Xiao, H., 2015. Diffusion-based coarse graining in hybrid continuum - discrete solvers: Theoretical formulation and a priori tests, *International Journal of Multiphase Flow*, 77, 142-157.
- Sun, R. & Xiao, H., 2016. CFD - DEM simulations of current-induced dune formation and morphological evolution. *Advances in water resources*, 92, 228-239.
- Sumer, B.M. & Fredsøe, J., 2002. *The mechanics of scour in the marine environment*, 17. World Scientific Publishing Company, Singapore.
- Sumer, B. M. et al., 1992. Scour around vertical pile in waves. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 118(1), 15-31.
- Sun, J. et al., 2009. Numerical study of segregation using multiscale models. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 23(2), 81-92.
- Ten Cate, A. et al., 2002. Particle imaging velocimetry experiments and lattice-Boltzmann simulations on a single sphere settling under gravity. *Physics of Fluids*, 14(11), 4012-4025.
- Trygland, E., 2015. *Numerical Study of Seabed Boundary Layer Flow around Monopile and*

- Gravity-based Wind Turbine Foundations*. Master's Thesis, NTNU, Trondheim, Norway.
- Uhlmann, M., 2005. An immersed boundary method with direct forcing for the simulation of particulate flows. *Journal of Computational Physics*, 209(2), 448-476.
- Vångö, M. et al., 2018. Unresolved CFD - DEM modeling of multiphase flow in densely packed particle beds. *Applied Mathematical Modelling*, 56, 501-516.
- Wang, L. et al., 2018. Direct calculation of voidage in the fine-grid CFD - DEM simulation of fluidized beds with large particles. *Particuology*, 40, 23-33.
- Wang, Z. et al., 2019. A semi-resolved CFD - DEM approach for particulate flows with kernel based approximation and Hilbert curve based searching strategy. *Journal of Computational Physics*, 384, 151-169.
- Weiss, J.M. et al., 1999. Implicit Solution of Preconditioned Navier - Stokes Equations Using Algebraic Multigrid. *AIAA Journal*, 37(1), pp.29 - 36.
- Whitehouse, R., 1998. *Scour at marine structures: A manual for practical applications*. Thomas Telford, London.
- Wu, C.L. et al., 2009. Accurate void fraction calculation for three-dimensional discrete particle model on unstructured mesh. *Chemical Engineering Science*, 64(6), 1260-1266.
- Yang, J. et al., 2018. Numerical simulation of scour around a submarine pipeline using computational fluid dynamics and discrete element method. *Applied Mathematical Modelling*, 55, 400-416.
- Yeganeh-Bakhtiary, A. et al., 2011. Euler - Euler two-phase flow simulation of tunnel erosion beneath marine pipelines. *Applied Ocean Research*, 33(2), 137-146.
- Yeganeh-Bakhtiary, A. et al., 2013. Euler - Lagrange two-phase model for simulating live-bed scour beneath marine pipelines. *Journal of offshore mechanics and Arctic engineering*, 135(3).
- Zhang, Y. et al., 2015. Computational fluid dynamics - discrete element method analysis of the onset of scour around subsea pipelines. *Applied Mathematical Modelling*, 39(23-24), 7611-7619.
- Zhao, J. & Shan, T., 2013. Coupled CFD - DEM simulation of fluid - particle interaction

- in geomechanics. *Powder technology*, 239, 248-258.
- Zhou, Y.C. et al., 2001. Numerical investigation of the angle of repose of monosized spheres. *Physical Review E*, 64(2), 021301.
- Zhu, H.P. & Yu, A.B., 2002. Averaging method of granular materials. *Physical Review E*, 66(2), 021302.
- Zhu, H.P. & Yu, A.B., 2004. Steady-state granular flow in a three-dimensional cylindrical hopper with flat bottom: microscopic analysis. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37(10), 1497.
- Zhu, H.P. et al., 2007. Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments. *Chemical Engineering Science*, 62(13), 3378-3396.
- Zhou, Y.C. et al., 2001. Numerical investigation of the angle of repose of monosized spheres. *Physical Review E*, 64(2), 021301.
- Xiao, H. & Sun, J., 2011. Algorithms in a robust hybrid CFD-DEM solver for particle-laden flows. *Communications in Computational Physics*, 9(2), 297-323.



감사의 글

박사학위 논문을 마무리하며 뒤돌아보니 감사의 말을 드리고 싶은 분들이 많습니다. 가장 먼저, 학위 논문에 부족한 점을 언제나 세심하고 꼼꼼한 손길로 지적해 주시며 지도 편달을 아끼지 않으신 박선호 지도 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한, 바쁘신 가운데에도 학위 논문의 심사를 맡아주시고 진심 어린 조언을 해주신 심사 위원장 최경식 교수님, 심사위원 서영교 교수님, 하승현 교수님, 도기덕 교수님께 감사드립니다.

대학원 생활 동안 함께 했던 해양유체역학 실험실 선후배 여러분 감사드립니다. 연구에 대해 방향을 못 잡고 있을 때 따뜻한 격려와 조언을 해주신 상철형님, 부족한 선배인 저를 잘 따라와 주고 학위 논문 작성에 도움을 준 우영, 희찬, 조셉에게 고마운 마음을 전합니다. 석사 동기 효주, 성욱, 후배 해청, 기홍, 경현에게도 고맙다는 말을 전합니다. 같은 길을 걷어가면서 많은 자극과 힘이 되어준 OPEL 실험실 상우에게도 고마운 마음을 전합니다.

학부 2학년 때 해양구조물 실험실 문을 두드리지 않았다면 대학원 진학은 생각하지 못했을 것입니다. 자신감을 잃고 지칠 때마다 무한한 지지와 응원을 해준 병모형, 항상 용기를 준 용주형에게도 감사드립니다.

항상 저를 믿어주시고 묵묵히 응원해주시는 사랑하는 부모님과 든든한 우리 형에게도 큰 감사를 드리며 은혜에 보답할 수 있는 자랑스러운 아들, 동생이 되도록 하겠습니다.

이외에도 여기에 미처 적지 못하였지만 정말 많은 분들에게서 앞으로 나아갈 힘과 동기를 얻었습니다. 저도 그들에게 힘이 될 수 있는 존재가 될 수 있도록 하겠습니다. 저를 아끼고 격려해주신 모든 분들께 진심으로 감사드립니다.

2020년 6월

송성진 올림