

경계면 거칠기에 따른 입자유동체 경계면 응력 및 유동입자 분포

Boundary roughness effects on boundary stresses and flow particle distributions in granular flows

*#김형진¹

*#H. J. Kim(hjkim@krii.re.kr)¹

¹ 한국철도기술연구원 철도구조연구실

Key words : Granular flow, Soft particle, Discrete element method

1. 서론

입자유동에 대한 연구는 실험적, 이론적으로 과거부터 많이 수행되어 왔지만 개개의 입자특성을 파악하는 데는 상당한 제한이 있다. Macroscopic particle 개념을 적용한 DEM(discrete element method) 기법은 입자유동 시스템 내에 포함되는 모든 입자들의 물리적 특성의 계산이 가능하기 때문에 최근 들어 입자유동 특성 분석에 많이 활용되고 있다. 이러한 입자유동 특성을 전산 해석하기 위해 사용되는 입자 모델은 크게 Soft 입자 모델과 Hard 입자 모델로 나뉘는데 Hard 입자 모델은 입자들 간의 접촉이 순간적으로 일어나는 것을 전제로 하는 binary collision 개념을 사용하여 계산이 간편한 장점이 있지만 Soft 입자모델과 달리 시스템내에 입자 밀도가 높아질 경우 발생하는 복수 접촉 및 접촉에 의한 입자의 변형을 고려하지 못하는 단점이 있다. Walton⁽¹⁾, Kim⁽²⁾ 등은 Soft particle 모델을 사용하여 입자유동을 분석하였으며 시스템 체적 대비 입자의 체적비 변화에 따른 발생 응력 수준을 비교 분석하였다. Karion⁽³⁾ 등은 단일 및 두 종류의 디스크가 혼합된 입자유동 시스템의 유동해석을 수행하였다. Campbell⁽⁴⁾은 DEM을 이용, 균일 크기 입자들의 전단 입자유동을 분석하였는데 “연속 경계면 조건” 과 “일정 시스템 체적 조건”을 사용하였다. 이 연구에서 그는 중력을 배제한 상태에서 전단 유동 율(flow shear rate)과 SF(solid fraction) 이 발생응력에 미치는 영향을 분석하였다. Kim⁽⁵⁾은 크기가 다른 입자들이 혼재되어 있는 입자유동 시스템에서 입자비가 입자유동 시스템에서 발생하는 응력 및 유동 내 입자분포를 분석하였다.

2. 입자 유동체 모델

입자 유동 시스템에서 사용되는 입자 모델은 첫째는, 입자들 간의 충돌이 순간적으로 발생한다고 가정하는 Hard particle model 이 있는데 이 모델은 입자유동 시스템 내 유동입자들의 상호 Momentum 전달요인이 입자들 간의 충돌에 주로 기인하는 낮은 영역의 SF에서 적합하며 모델의 단순화로 계산시간을 줄일 수 있는 장점이 있는 반면 높은 영역의 SF에서 많이 발생하는 복수개의 입자 접촉 및 접촉으로 인한 입자들의 변형을 고려하기 어렵다는 문제가 있다. 두 번째는 입자들 간의 상호 접촉에 의한 입자의 변형 및 복수의 입자 접촉을 고려하여 입자 간 상호 작용력을 계산할 수 있는 Soft particle model로 유동시스템 내부에 입자의 밀도가 큰 높은 영역의 SF에서의 계산에 적합하지만 계산과정이 복잡하고 계산시간이 길다는 단점이 있다.

본 연구에서는 유동 시스템내의 입자들의 특성을 저 영역의 SF에서 고영역의 SF까지 분석하기 위해 Walton⁽¹⁾ 이 제안한 "soft particle model"을 사용하였다. 입자 유동 시뮬레이션을 위한 계산 셀은 정육면체로 이루어져 있으며 계산 셀의 상하방향 경계면은 반구형의 고정 입자들로 구성되어 있으며 좌우방향 경계면은 좌우방향으로 무한 크기의 계산 셀을 재현하기 위해 연속 경계면(periodic boundaries) 기법을 사용하였기 때문에 좌우방향으로는 경계면이 없는 구조로 되어 있다. 경계면의 거칠기는 경계면 입자의 기하학적 배열이나 경계면 입자의 크기, 경계면 입자들 간의 간격으로 조정하는 방법이 있으나 본 연구에서는 3종류의 경계면 입자의 크기를 사용하여 경계면의 거칠기를 조정하였다. 상,하 경계면은 설정된 계산 셀 내부에 존재하는 유동입자에 운동량을 전달하고 전단유동을 발생하기 위해 횡

방향(서로 반대방향)으로 일정속도를 가지고 이동한다. 입자유동 시뮬레이션에 사용된 유동입자는 크기가 같은 단일 종류 및 크기가 다른 두 종류의 입자가 혼재된 시스템이며 입자의 수는 계산 셀 체적 대비 입자체적의 비율(Solid fraction, SF)에 따라 조정된다. 입자들은 그 크기가 상대 비교된 것으로 유동입자는 2종류(1R, 0.5R) 이며 경계면 거칠기를 조정하기 위한 경계면 입자는 3종류(1R, 0.75R, 0.5R)가 사용되었다. 계산 셀의 크기는 12R×12R×12R이다.

Table 1 변수/기호 설명

변수	기호	범위
구형 유동 입자크기(반경)	R _f	R, 0.5R
반구형 경계면 입자크기(반경)	R _b	R, 0.75 R, 0.5 R
계산 셀 경계면 사이의 거리	H	H=12R
Restitution coefficient	e	0.8
경계면 속도(상하 반대방향으로 이동)	U	U, -U
Shear rate(입자 흐름의 전단 유동율)	SR(=2U/H)	SR=4
Solid fraction(입자 체적/계산셀 체적)	SF	최대 0.52 까지
Number ratio(작은입자 수/큰 입자 수)	NR	0, 1

3. 결과

경계면의 거칠기 및 입자 비(NR=0, 1), 입자 체적비(SF)에 따라 발생하는 응력의 변화는 Fig. 1에 표시하였으며 발생응력은 기존의 연구^(2,6)에서 많이 사용되는 방법인 발생응력을 입자밀도, 입자직경의 제곱 및 전단유동율의 제곱의 곱으로 나눠 무차원화 된 수치로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 3종류의 경계면 거칠기(Boundary particle: 경계면 입자=0.5R, 0.75R, 1R, 경계면 입자의 크기가 클수록 거친 경계면 입) 모두에서 높은 영역의 SF에서는 큰 입자들로만 구성된 시스템 (NR=0)에 비해 작은 입자들이 혼재되어 있는 시스템(NR=1) 경계면에서의 응력수준이 떨어지는 것으로 나타났으며 경계면이 거칠수록 발생응력은 더 크게 발생하는 것으로 나타났다.

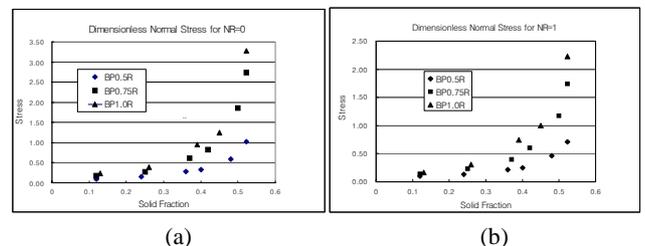


Fig. 1 Boundary stresses(normal) for various boundary roughness under the conditions of NR=0(a) and NR=1(b)

이러한 현상은 이전 연구⁽⁶⁾에서 파악한바와 같이 작은 입자와 큰 입자가 혼재되어 있는 거친 경계면(R_b>R)시스템에서는 높은 영역의 SF에서 작은 입자가 거친 경계면과 큰 입자사이에 위치하여 경계면의 거칠기를 상대적으로 부드럽게 하는 경향 때문으로 분석되며 경계면 입자의 크기를 줄여 경계면 자체를 부드럽게 하는 경우도 경계면에서의 발생응력이 현저히 저하되는 것으로 나타났다.

Fig. 2는 단일 크기의 입자로 구성된 전단 입자 유동체에서 높은 영역의 동일 SF 조건에서 경계면의 거칠기($R_b=0.5R, 0.75R, 1R$)에 따라 유동입자의 분포변화를 나타내는 것으로 거칠기가 클수록 경계면 주위의 입자가 경계면 사이에 위치하는 경향이 커지는 것을 알 수 있었으며 이는 경계면에 발생하는 응력에 지배적인 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

Fig. 3, 4, 5는 작은 입자($R_f=0.5R$) 및 큰 입자($R_f=R$)가 동일한 개수로 혼재되어 있는 시스템에서 경계면 입자의 크기가 각각 $R_b=0.5R, 0.75R, 1R$ 로 변화되어 경계면이 거칠게 되는 경우의 큰 유동입자(a) 및 작은 유동입자(b)의 분포를 각각 나타내고 있는 것으로 작은 입자가 큰 입자보다 경계면 가까이 위치하게 되는 것으로 나타났으며 이는 경계면 발생응력을 저하시키는 요인으로 분석되었다.

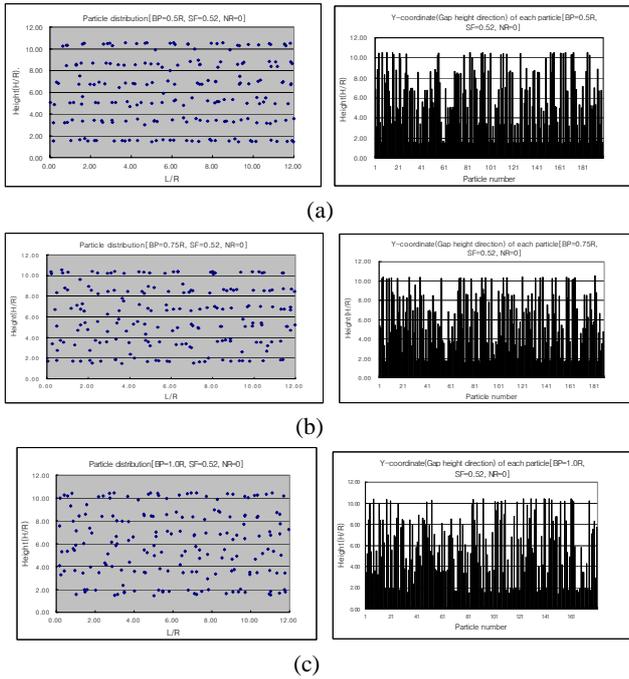


Fig. 2 Distributions and Y-coordinates of particles in mono sized particle systems for SF=0.52, $R_b=0.5R$ (a), $0.75R$ (b) and R (c), respectively

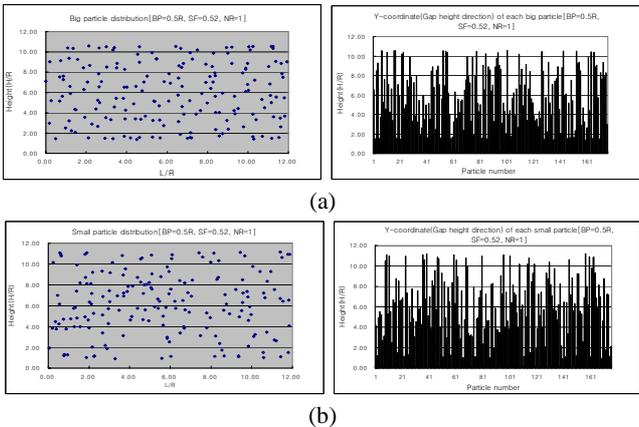


Fig. 3 Distributions and Y-coordinates of big(a) and small(b) particles in mixed particle systems for NR=1, SF=0.52 and $R_b=0.5R$.

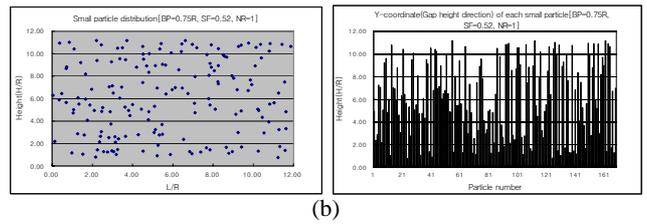
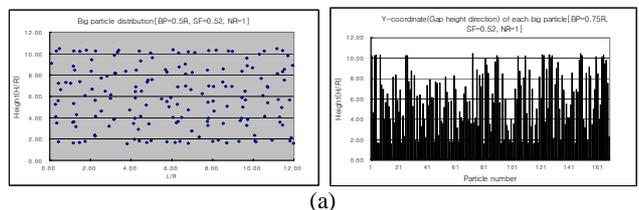


Fig. 4 Distributions and Y-coordinates of big(a) and small(b) particles in mixed particle systems for NR=1, SF=0.52 and $R_b=0.75R$.

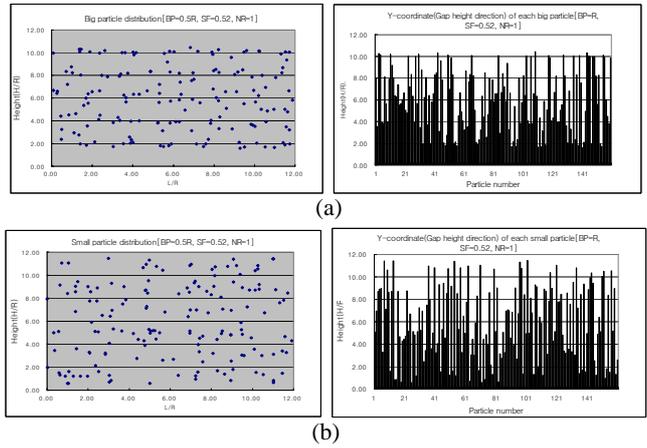


Fig. 5 Distributions and Y-coordinates of big(a) and small(b) particles in mixed particle systems for NR=1, SF=0.52 and $R_b=R$.

4. 결론

전단 입자 유동체 경계면의 발생응력은 경계면의 거칠기와 밀접한 관련을 가지며 높은 영역의 SF에서는 유동입자들의 체적의 함이 동일하더라도 큰 입자들만으로 구성된 시스템에 비해 작은 입자와 큰 입자들이 혼재되어 있는 경우는 경계면 주위의 작은 입자들이 경계면을 상대적으로 부드럽게 하여 경계면 응력 수준을 현저히 떨어뜨리며 경계면 자체를 부드럽게 하는 경우도 상당 수준 경계면 응력이 저하되는 것으로 나타났다. 또한, 거친 경계면의 경우 높은 영역의 SF에서는 경계면 입자를 중심으로 큰 입자들의 국부적 밀집(Clustering) 현상이 발견되었으나 경계면이 부드러워질수록 이러한 현상이 약화되었다.

참고문헌

- Walton, O. R., Braun, R. L., "Stress calculations for assemblies of inelastic spheres in uniform shear", *Acta mechanica* 63: 73-86, 1986
- Kim, H., Rosato, A., "Particle simulations of the flow of smooth spheres between bumpy boundaries", *Advances in micro-mechanics of granular materials*: 96. Elsevier science publishers, 1992
- Karion, A., Hunt, Melany L., "Wall stresses in granular Couette flows of mono-sized particles and binary mixtures", *Powder Technology* 109: 145-163, 2000
- Campbell, C. S., "Granular shear flows at the elastic limit, *J. Fluid Mech.* 465, 261-291, 2002
- 김형진, "경계면이 입자유동 내 복합 사이즈의 입자 동적 거동에 미치는 영향", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 761-762, 2008
- 김형진, "전단 입자유동체 경계면 응력 및 유동속도 profile 분석", 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, 587-588, 2008