

Binary mixture에서 입자크기 비가 유동에 미치는 영향 The effect of particle size ratios on flows of binary granular mixtures

*#김형진¹

*#H. J. Kim(hjkim@krri.re.kr)¹

¹ 한국철도기술연구원 철도구조연구실

Key words : Size ratio/diameter ratio, Discrete element method(DEM), Solid fraction(SF)

1. 서론

입자유동 모델링 및 시뮬레이션과 관련하여 기존에 수행된 많은 연구들은 주로 단일 크기의 입자를 포함하는 입자 유동체에 대하여 DEM(discrete element method) 기법을 활용하여 수행되어 왔으나 최근 들어 크기가 다른 입자들이 혼재되어 있는 입자 유동시스템의 유동 특성 분석에 대한 연구도 일부 진행되고 있다. 이러한 입자유동 특성 분석을 위해 사용되는 유동 입자 모델은 입자간의 복수 접촉(multiple contact)을 고려할 수 있고 입자간의 접촉으로 인해 발생하는 입자의 순간적 변형을 허용하는 Soft particle 모델과 입자들 간의 순간적 접촉을 전제로 하여 입자들 간의 접촉이 항상 1:1로 발생(binary contact)한다고 가정하는 Hard particle 모델이 있는데 유동시스템 체적 대비 유동 입자의 체적(Solid fraction, SF)이 커질 경우는 입자들 간의 접촉이 더욱 빈번히 발생하므로 전체 범위의 SF에서는 Soft particle 모델이 더 효용성이 있는 것으로 알려지고 있다[1].

Karion[1] 등은 DEM 기법을 이용, 마찰력이 있는 평평한 경계면 사이에서 유동하는 2차원 무중력 상태(gravity-free)의 전단 입자유동을 검토한바 있으며 이 연구를 통해 단일 그룹의 입자 유동시스템과 두 가지 그룹의 입자가 혼합된 유동시스템에서 각 그룹 입자의 크기 비 및 체적 비가 전단 유동 시스템 경계면 응력에 미치는 영향을 검토하였다. 이 연구에서 Karion 등은 동일한 SF라 하더라도 두 가지 크기의 입자가 혼재되어 있는 경우, 작은 입자들이 차지하는 체적이 증가 할수록(큰 입자가 차지하는 체적이 줄어들수록) 경계면에서 발생하는 응력의 크기는 줄어들고 경계면 부근에서 큰 입자가 위치할 가능성은 거의 없는 것으로 예측했다.

Iddir[2] 등은 운동역학 이론을 입자크기로 구분되는 2개 및 3개의 입자그룹이 혼재되어 있는 전단 입자 유동 시스템에 적용하여 유동특성을 분석하였는데 시스템 체적 대비 입자의 총 체적비(SF)가 동일하더라도 입자 그룹의 구성비에 따라 유동특성이 크게 영향을 받는 것으로 분석하였다. 즉, SF가 입자유동에 중요한 영향을 미치는 것은 사실이지만 크기가 다른 입자들이 서로 혼재되어 있을 경우, 입자의 크기 비 또한 입자 유동에 중요한 영향을 미치는 사실을 예측하였다. 이 연구를 통해서 Iddir 등은 동일한 SF의 경우, 큰 입자들로만 구성된 단일 입자그룹(mono sized particles) 유동시스템에서 가장 큰 응력이 발생하는 것으로 예측하였으며 2개의 입자 그룹이 혼재되어 있는 전단 입자 유동시스템에서 발생하는 응력은 작은 입자 대비 큰 입자의 입자크기 비(size ratio or diameter ratio)가 증가할수록 감소하는 것으로 예측하였다.

2. 전단 입자 유동 모델링 및 유동조건

본 연구에서는 3차원 구형 입자(smooth & non-cohesive spherical particles) 모델을 사용하였으며 순수한 입자유동의 특성을 분석하기 위하여 중력을 배제한 시스템 모델을 사용하였다. 유동입자는 크기가 같은 단일 종류 및 크기가 다른 두 종류의 입자가 혼재된 시스템이며 Walton[3]의 soft particle model을 사용하였다. 입자 유동 시스템의 크기는 가로×세로×높이가 각각 큰 입자 직경의 6배인 정육면체이다. 시스템의 상하방향 바닥 경계면에는 반구형의 고정 입자가 부착되어 일정속도를 가지고 서로 반대방향으로 움직인다. 이동하는 상하 경계면으로 인해 경계면과 내부 입자들 간의 상호 충돌이 발생하게 되는데 이는 내부 입자에 운동량이 전달되는 메카니즘이며 시스템의 측면

방향에는 연속 경계면(periodic boundaries) 기법이 사용되었다.

서로 크기가 다른 유동입자 그룹이 혼재된 시스템의 경우, 큰 입자의 크기는 고정시키고 작은 입자의 크기를 변화시키는 방법으로 유동입자의 크기 비를 변화시켜 크기 비의 변화가 유동 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 경계면에 부착되는 경계면 입자의 크기를 변화시켜 경계면의 거칠기를 조정하였다. 입자유동시스템의 크기는 고정되어 있으므로 해석에 사용되는 유동 입자의 수는 SF에 따라 조정된다.

Table 1 입자유동 조건

변수 및 기호	적용된 수치
유동 입자 반경, R_f	0.5R, 0.6R, 0.7R, 0.8R, 0.9R, 1R
경계면 입자 반경, R_b	0.5 R, 0.75R, 1R
상하 경계면 간의 거리, H	H=12R
입자의 Restitution coefficient, e	0.8
상하 경계면의 이동 속도, U	U, -U
입자 전단 유동율, SR	SR=(2U/H)=4

3. 전단 입자유동 특성 분석

전단입자 유동체에서 입자유동에 따른 발생응력은 입자 자체의 전단유동에 대한 변이(fluctuation) 운동과 관련된 streaming part(저 영역의 SF에서 지배적 영향을 미침)와 시스템 내에서 유동하는 입자들 간의 충돌/접촉과 관련된 collisional part(고 영역의 SF에서 지배적 영향을 미침)로 나누어진다고 알려져 있다[1]. Iddir[2]은 단일 크기의 입자로 구성된 유동시스템의 경우, 약 0.15 이상의 SF에서 collisional part가 더 큰 영향을 미치기 시작하는 것으로 예측한바 있다.

본 연구에서는 전단 유동시스템에서 발생하는 응력을 다양한 조건하에서 streaming(or kinetic) 및 collisional(or potential) part로 나누어 시뮬레이션을 수행하였으며 발생응력은 기존의 연구[2]에서와 같이 입자밀도×입자직경²×전단유동율²으로 나눠 무차원화 하였다(Fig. 1).

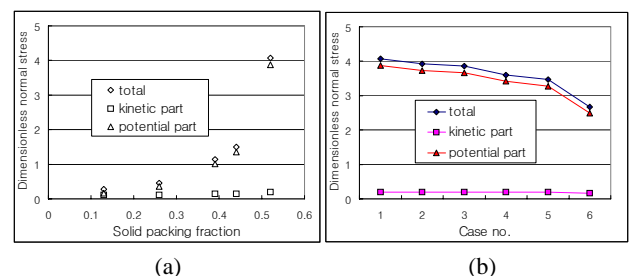


Fig. 1 (a) Dimensionless normal stresses with various SF for mono size particle mixture($R_f, R_b = 1R$), (b) Dimensionless normal stresses with fixed SF of 0.52 for the cases of several binary particle mixtures($R_b = 1R$, case 1 for $R_f=1R$ (180 mono sized particles), case 2 for $R_{f1}, R_{f2}=1R, 0.9R$ (160 and 27 particles, respectively), case 3 for $R_{f1}, R_{f2}=1R, 0.8R$ (160 and 38 particles, respectively), case 4 for $R_{f1}, R_{f2}=1R, 0.7R$ (160 and 58 particles, respectively), case 5 for $R_{f1}, R_{f2}=1R, 0.6R$ (160 and 93 particles, respectively) and case 6 for $R_{f1}, R_{f2}=1R, 0.5R$ (160 and 160 particles, respectively)

Fig. 1(a)에서 알 수 있듯이 단일 크기의 1개 그룹의 입자들만이 존재하는 입자 유동시스템에서의 경우, 0.13 이상의 SF에서 collisional part가 발생응력에 지배적 영향을 미치기 시작하는 것으로 나타났는데 이는 Iddir[2]이 예측한 값 약 0.15와 유사한 수치이며 이후 SF가 증가할수록 collisional part의 영향이 급속히 커져 전체 발생응력이 급속히 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 1(b)는 SF 및 큰 입자의 개수를 고정시키고 작은 입자의 크기를 조정하는 binary mixture 유동시스템의 유동 시뮬레이션 결과를 나타내고 있는데 Iddir[2]등이 예측한 바와 같이 작은 입자 그룹의 총 체적이 동일해도 작은 입자 대비 큰 입자의 크기비가 증가하면(즉, 크기 차가 커지면) 발생응력은 줄어드는 것으로 나타났다.

Fig. 2는 경계면 사이의 국부적 입자유동 거동을 분석하기 위하여 경계면에 평행하게 입자 유동 깊이를 12개로 나누어 설정한 각 layer에서의 국부적 SF 및 분포 입자 수의 평균치를 나타내는 것으로 시스템 전체의 SF(0.52) 및 큰 입자의 수(160개)를 고정시키고 작은 입자의 크기(0.5R ~ 0.9R) 및 수(27 ~ 160개)를 조정하는 binary particle mixture 시스템과, 결과 비교를 위해 mono particle mixture(180개)를 사용하였다. Fig. 2에 나타난바와 같이, 상하 경계면과 근접하는 1번 및 12번 layer에서 국부적 SF 및 입자 수가 현저히 줄어드는데 이는 해당 layer에 경계면 입자가 존재하여 상대적으로 유동입자가 위치할 가능성이 적기 때문에 발생하는 것이다. 경계면과 근접하는 layer에서 각 case별 국부적 SF 변화, 즉 해당 layer에 분포하는 유동입자의 체적 변화에 비해 분포되는 입자 수의 변화는 차이가 많이 발생하는데 이는 입자 크기 비(작은 입자에 대한 큰 입자의 직경 크기 비율)가 증가할수록 부피가 작은 입자가 경계면에 상대적으로 더 많이 분포하게 되기 때문이다. 중간 부분 layer에서는 입자 크기 비가 클수록 국부적 SF의 변화가 줄어드는 것으로 나타났는데 이는 작은 입자의 크기가 작아질수록 큰 입자사이의 공간을 메우기 용이하기 때문으로 분석된다.

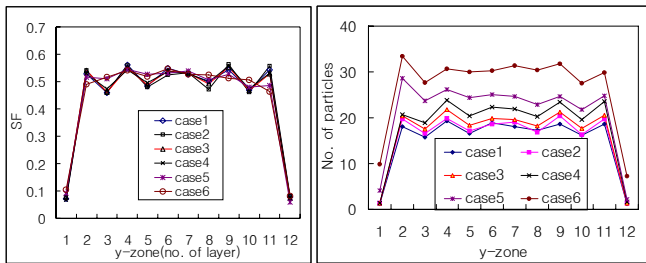


Fig. 2 Local SF and number of particles for each layer between bumpy boundaries with fixed SF of 0.52 for the cases of several binary particle mixtures($R_b = 1R$, case 1 for $R_f=1R$ (180 mono sized particles), case 2 for $R_{f1}, R_{f2}=1R, 0.9R$ (160 and 27 particles, respectively), case 3 for $R_{f1}, R_{f2}=1R, 0.8R$ (160 and 38 particles, respectively), case 4 for $R_{f1}, R_{f2}=1R, 0.7R$ (160 and 58 particles, respectively), case 5 for $R_{f1}, R_{f2}=1R, 0.6R$ (160 and 93 particles, respectively) and case 6 for $R_{f1}, R_{f2}=1R, 0.5R$ (160 and 160 particles, respectively))

Fig. 3(a)는 유동입자의 크기 및 전체 시스템의 SF를 1R 및 0.52로 고정시키고 경계면 입자의 크기를 1R, 0.75R, 0.5R로 각각 변화시킬 때 각 layer에서의 국부적 SF를 나타낸 것으로 상대적으로 거친 경계면인 1R의 경우, 경계면 입자 주변에 발생하는 유동입자들의 국부적 밀집(clustering) 현상[4]으로 부드러운 경계면(0.5R)의 경우보다 경계면 주변 layer에서의 국부적 SF가 낮게 나타났다. 또한, Fig. 3(a), (b)에서 알 수 있듯이 높은 영역의 SF인 0.52에서 경계면 입자의 크기가 작아질수록 경계면 주위 layer에서 입자들의 layering 현상(layer에서 층을 이뤄 배열)이 커지거나 경계면의

영향을 덜 받는 중간 layer에서는 이러한 현상이 약해지는 것으로 파악되었다.

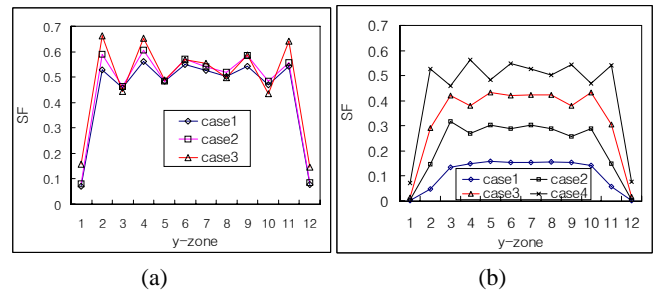


Fig. 3 (a) Local SF for each layer with fixed SF of 0.52 for various boundary conditions ($R_b, R_f=1R$ for case 1, $R_b, R_f=0.75R, 1R$ for case 2 and $R_b, R_f=0.5R, 1R$ for case 3), (b) Local SF for each layer for various SFs($R_b, R_f=1R$, case 1: SF=0.13, case 2: SF=0.26, case 3: SF=0.39, case 4: SF=0.52)

4. 결론

단일 크기의 1개 그룹의 입자들만이 존재하는 입자 유동시스템에서의 경우, 0.13 이상의 SF에서 collisional part가 발생응력에 지배적 영향을 미치기 시작하는 것으로 나타났으며 이후 SF가 증가할수록 collisional part의 영향이 급속히 커져 전체 발생응력이 급속히 커지는 것을 알 수 있었다. 또한, binary mixture 유동시스템에서 작은 입자 그룹의 총 체적이 동일해도 작은 입자의 크기를 조정하여 작은 입자 대비 큰 입자의 크기 비가 증가하면 발생응력은 줄어드는 것으로 나타났다.

경계면 근접 layer에서는 입자 크기 비가 증가할수록 부피가 작은 입자가 경계면에 상대적으로 더 많이 분포하며 중간 layer에서는 입자 크기 비가 클수록 국부적 SF의 변화가 줄어드는 것으로 나타났는데 이는 작은 입자의 크기가 작아질수록 큰 입자사이의 공간을 메우기 용이하기 때문으로 분석된다. 경계면이 거칠 경우, 경계면 입자 주변에서 발생하는 유동입자들의 국부적 밀집(clustering) 현상[4]으로 부드러운 경계면(0.5R)의 경우보다 경계면 주변 layer에서의 국부적 SF가 낮게 나타났다. 또한, 높은 영역의 SF인 0.52에서 경계면 입자의 크기가 작아질수록 경계면 주위 layer에서 입자들의 layering 현상(입자들의 층간 배열)이 커지거나 경계면의 영향을 덜 받는 중간 layer에서는 이러한 현상이 약해지는 것으로 예측되었다.

참고문헌

1. Karion, A., Hunt, Melany L., "Wall stresses in granular Couette flows of mono-sized particles and binary mixtures", Powder Technology, 109, 145-163, 2000
2. Iddir, H., Arastoopour, H., Hrenya, C. M., "Analysis of binary and ternary granular mixtures behavior using the kinetic theory approach", Powder Technology, 151, 117-125, 2005
3. Walton, O. R., Braun, R. L., "Stress calculations for assemblies of inelastic spheres in uniform shear", Acta mechanica, 63, 73-86, 1986
4. 김형진, "경계면 거칠기에 따른 입자유동체 경계면 응력 및 유동입자 분포", 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, 707-708, 2009