Binary 와 ternary granular mixture 거동에 관한 기초 연구
A basic study on the behavior of binary and ternary granular mixtures

*#김형진[1]
*#H. J. Kim(hjkim@krri.re.kr)[1]
[1] 한국철도기술연구원 주행추진연구실

Key words : Granular flow, Solid fraction(SF)

1. 서론

입자유동(granular flow)은 자연 상태에서나 산업계에서 흔히 발생되고 있는 것으로 많은 연구자들이 이러한 입자들의 유동 특성을 규명하기 위한 연구를 실험적, 이론적 방법을 이용하여 진행해오고 있으나 유동에 속하는 각 입자의 동적 거동 측정의 어려움 및 입자의 불규칙적 운동 특성으로 인해 지극히 제한적인 범위에서 연구를 수행하여 왔다. 또한, 전산기법을 활용한 입자 유동특성 분석 연구도 활발히 진행되고 있는데 현재까지 수행된 많은 연구들은 주로 단일 크기의 입자 유동체에 대하여 DEM(discrete element method) 기법을 적용하고 있다. 최근 들어 물성치(밀도)는 동일하지만 크기가 다른 입자들이 혼합된 입자 시스템의 유동 특성 분석에 대한 연구도 일부 진행되고 있다.

Arteaga[1] 등은 입자의 크기가 서로 다른 입자가 혼합되어 있을 때 입자유동이 입자분포에 미치는 영향을 연구하였으며 Karion[2] 등은 마찰력이 있는 두 경계면 사이에서 유동하는 동일 크기의 입자 그룹 및 두가지 크기의 입자가 혼합된 그룹에 대해 유동특성(2차원 유동 시스템)을 연구하여 입자의 크기 비 및 체적 비가 경계면에서 발생하는 응력에 미치는 영향을 검토하였는데 동일한 SF(Solid fraction, 2차원 시스템일 경우는 시스템 면적 대비 입자들의 총면적의 비, 3차원 시스템일 경우는 시스템 체적 대비 입자들의 총체적의 비)라 하더라도 두 가지 크기의 입자가 혼재되어 있는 경우, 작은 입자들이 차지하는 체적이 증가하면 경계면 응력의 크기는 줄어드는 것으로 예측했다. Iddir[3] 등은 운동역학 이론을 두종류 및 3종류 크기의 입자들로 구성된 유동시스템에 적용하여 유동특성을 분석하였는데 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 유동 시스템에서 발생하는 응력은 작은 입자 대비 큰 입자의 입자크기 비가 증가할수록 감소하는 것으로 예측하였다.

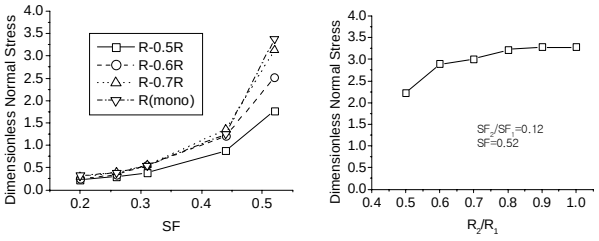
2. Binary 및 Ternary granular mixture 모델링 및 조건

전산 모델링을 위해 사용된 입자는 표면이 매끄러운 3차원 구형 입자모델이며 단일 크기로 구성된 mono-sized particle 그룹, 두종류 크기의 입자들로 혼합된 그룹(binary granular mixture), 3종류 크기의 입자들로 구성된 그룹(ternary granular mixture)을 검토하였으며 Walton[4]의 soft particle model을 사용하였다. 실제의 입자 유동 시스템은 무수히 많은 입자들로 구성된 시스템으로 전산해석 상 실제 시스템을 있는 그대로 재현하기는 불가능하므로 실제 시스템을 모사할 수 있는 연속 경계면(periodic boundary)을 지니는 해석 창(계산 셀, computational cell)을 사용하였으며 주로 사용된 계산 셀의 크기는 가로×세로×높이가 각각 큰 입자 직경의 6배인 정육면체이고 계산 셀의 크기가 유동시스템 내부의 입자 분포에 미치는 영향을 검토하기 위하여 큰 입자 직경의 8배인 계산 셀도 검토하였다. 계산 셀의 상하방향 바닥 경계면에는 반구형의 입자를 부착하여 표면을 거칠게 하였으며 내부 입자에 운동량을 전달하기 위해 일정속도를 가지고 서로 반대방향으로 움직이도록 하였다. 계산 셀의 측면은 실제 시스템을 모사할 수 있도록 연속 경계면을 사용하였다.

Binary granular mixture 및 Ternary granular mixture에서는 큰 입자의 크기를 고정하고 작은 입자의 크기를 변화시켜 입자의 크기 비를 조절하였다.

3. Binary 및 Ternary granular mixture 유동 특성

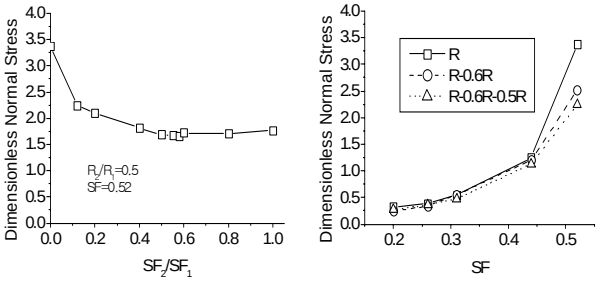
Fig. 1(a)는 binary mixture에서 큰 입자 및 작은 입자그룹에 속하는 입자들의 총 체적을 각 그룹별로 동일하게 유지한 조건($SF_t = SF_1 + SF_2$, $SF_1 = SF_2$, SF_1 = 큰 입자의 SF, SF_2 = 작은 입자의 SF, SF_t = 전체 입자의 SF)에서 SF_t 및 큰 입자와 작은 입자의 크기 비에 따른 경계면의 응력을 나타내고 있는데 발생응력은 기존의 연구[2]에서 나타낸바와 같이 입자밀도×입자직경^2×전단유동율^2 로 나누어 무차원화 하였으며 기존의 연구결과[2][3]와 같이 SF가 증가함에 따라 경계면 응력도 증가하였다. Fig. 1(a)에서 알 수 있듯이 높은 영역의 SF에서, 큰 입자들로만 구성된 단일그룹 입자 시스템의 경우 가장 큰 경계면 응력이 발생하였고 binary mixture에서는 입자간의 크기 차이가 가장 큰 R-0.5R(큰 입자의 반경 $R_1 = R$, 작은 입자의 반경 $R_2 = 0.5R$) 시스템에서 가장 작은 경계면 응력이 발생하였다. 그러나 입자간의 크기 차이나 SF_t가 작아질수록 이러한 현상이 둔화됨을 예측할 수 있었다. Fig. 1(b)는 전체 SF(SF_t) 및 두 입자그룹의 체적비(SF_2/SF_1)를 각각 0.52, 0.12로 고정시키고 입자 크기 비(R_2/R_1, R_1 = 큰 입자의 반경, R_2 = 작은 입자의 반경)를 변화시킬 때 경계면 응력의 변화를 나타낸 것으로 작은 입자그룹에 포함되는 입자의 크기가, 큰 입자그룹에 포함되는 입자의 크기와 차이가 큰 경우, 경계면 응력이 두드러지게 저하됨을 알 수 있었다.



(a) (b)

Fig. 1 (a) Dimensionless normal stresses for various SF_ts of binary granular mixtures(SF_2/SF_1=1, $R_b = R$, $R_{f1} = R$, $R_{f2} = 0.7R$, 0.6R, 0.5R), (b) Dimensionless normal stresses for various diameter ratios(R_2/R_1 = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, and 1(mono particle system)) with fixed SF ratio(SF_2/SF_1)of 0.12 under the condition of total SF_t($=SF_1+SF_2$) , 0.52 in binary granular mixtures.

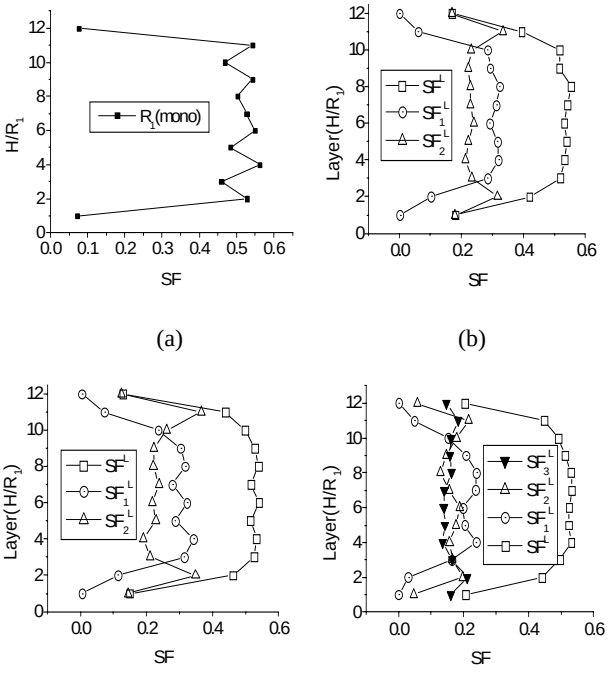
Fig. 2(a)는 binary mixture에서 큰 입자 및 작은 입자그룹의 SF 비(SF_2/SF_1)를 변화시키고 입자 크기 비(R_2/R_1) 및 SF_t를 각각 0.5, 0.52로 고정한 조건에서의 경계면 응력변화를 나타낸 결과이다. SF 비(SF_2/SF_1)가 0 인 경우는 큰 입자들로만 구성된 단일 입자그룹의 경우로, 가장 큰 경계면 응력이 발생하였으며 작은 입자들이 포함되기 시작하면서 SF 비가 약 0.5에 도달할 때 까지는 Karion[2] 등이 2차원 시스템에서 예측한바와 같이 경계면의 응력 감소 현상이 두드러지게 나타났다. Fig. 2(b)는 단일 입자그룹(R, $SF_t = SF_1$), 두종류 입자그룹(R-0.6R, $SF_1 = SF_2$, $SF_t = SF_1 + SF_2$), 3종류 입자그룹(R-0.6R-0.5R, $SF_1 = SF_2 = SF_3$, $SF_t = SF_1 + SF_2 + SF_3$) 시스템에서 SF_t 변화에 따른 경계면 응력의 변화를 나타낸 것으로 높은 영역의 SF_t에서는 Iddir[3] 등이 예측한바와 같이 R-0.6R-0.5R 시스템에서 가장 낮은 것으로 예측되었다.



(a) (b)

Fig. 2 (a) Dimensionless normal stresses for various SF ratios(SF_2/SF_1=0, 0.12, 0.2, 0.4, 0.5, 0.55, 0.58, 0.6, 0.8, 1) under the condition of fixed SF_t (0.52) and diameter ratio(R_2/R_1=0.5).
(b) Dimensionless normal stresses versus corresponding SF_t s for various granular mixtures(mono-sized(R), binary mixture(R-0.6R), ternary mixture(R-0.6R-0.5R))

Fig. 3은 국부적 입자 분포를 분석하기 위하여 경계면간의 간격을 12개의 layer로 나누고 각 layer에서의 국부적 SF의 평균치를 나타낸 것으로 (a)는 단일 입자그룹, (b)는 두개의 입자 그룹에서 큰 입자(R)와 작은 입자(0.5R)의 SF인 SF_1, SF_2 및 총 SF_t를, (c)는 두개의 입자 그룹에서 큰 입자(R)와 작은 입자(0.6R)의 SF인 SF_1, SF_2 및 총 SF_t를, (d)는 3개의 입자 그룹에서 큰 입자(R), 중간 입자(0.6R)와 작은 입자(0.5R)의 SF인 SF_1, SF_2, SF_3 및 총 SF_t를 나타낸 것으로 각 입자 그룹의 체적이 동일한 조건임에도 불구하고 작은 입자가 상대적으로 큰 입자보다 경계면(layer no. 1, 12)에 더 높은 비율로 분포하고 있음을 알 수 있다.

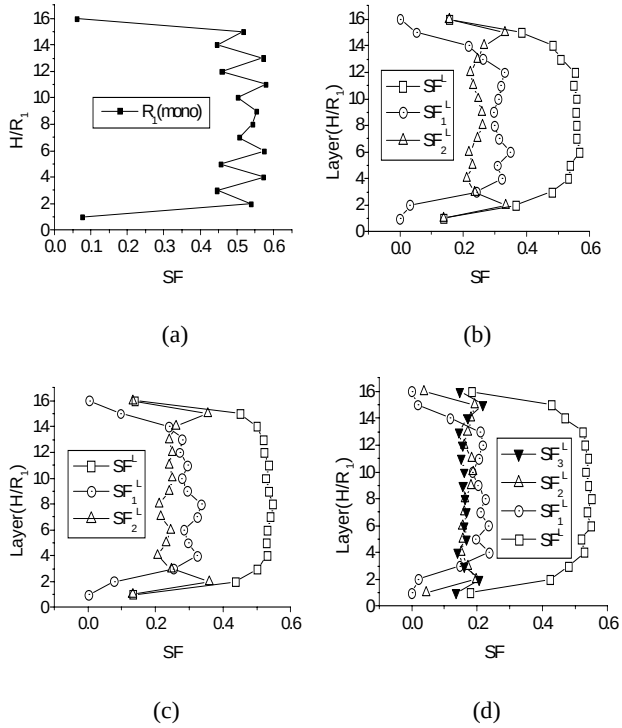


(a) (b)

(c) (d)

Fig. 3 Local SFs along with shear gap height H(=$12R_1$) for (a) mono-sized(R-mono) granular flow(SF_t=SF_1), (b) binary granular mixture(R-0.5R) (SF_1=SF_3, SF_t=SF_1+SF_3), (c) binary granular mixture(R-0.6R) (SF_1=SF_2, SF_t=SF_1+SF_2), (c) ternary granular mixture (R-0.6R-0.5R) (SF_1=SF_2=SF_3, SF_t=SF_1+SF_2+SF_3).

Fig. 4는 계산 셀의 크기를 큰 입자 직경의 8배로 확대하여 경계면간의 간격을 16개의 layer로 나누고 각 layer에서의 국부적 SF의 평균치를 나타낸 것으로 Fig. 3과 유사한 경향을 나타내어 계산 셀의 크기가 입자의 분포 패턴에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.



(a) (b)

(c) (d)

Fig. 4 Local SFs along with shear gap height H(=$16R_1$) for (a) mono-sized(R) granular flow, (b) binary granular mixture(R-0.5R), (c) binary granular mixture(R-0.6R), (c) ternary granular mixture (R-0.6R-0.5R).

4. 결론

높은 영역의 SF에서, 큰 입자들로만 구성된 단일그룹 입자 시스템의 경우 가장 큰 경계면 응력이 발생하였고 binary mixture에서는 입자간의 크기 차이가 크면 경계면 응력이 낮게 발생하였으나 입자간의 크기 차이나 SF가 작아질수록 이러한 현상이 둔화되었다. 큰 입자들로만 구성된 단일 입자그룹에 작은 입자들이 포함되기 시작하면서 SF 비가 약 0.5에 도달할 때 까지는 경계면 응력의 감소 현상이 두드러지게 나타났다. 단일 입자그룹(R), 두종류 입자그룹(R-0.6R), 3종류 입자그룹(R-0.6R-0.5R) 시스템의 경우, 높은 영역의 SF에서는 R-0.6R-0.5R 시스템에서 가장 낮은 경계면 응력이 예측되었으며 각 입자 그룹의 체적이 동일함에도 불구하고 작은 입자가 상대적으로 큰 입자보다 경계면에 더 높은 비율로 분포하고 있음을 알 수 있었으며 계산 셀의 크기가 입자의 분포 패턴에 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Arteaga, P., Tuzun, T., "Flow of binary mixtures of equal-density granules in hoppers-size segregation, flowing density and discharge rates", Chem. Eng. Sci. 45(1), 205-223, 1990
2. Karion, A., Hunt, Melany L., "Wall stresses in granular Couette flows of mono-sized particles and binary mixtures", Powder Technology, 109, 145-163, 2000
3. Iddir, H., Arastoopour, H., Hrenya, C. M., "Analysis of binary and ternary granular mixtures behavior using the kunetic theory approach", Powder Technology, 151, 117-125, 2005
4. Walton, O. R., Braun, R. L., "Stress calculations for assemblies of inelastic spheres in uniform shear", Acta mechanica, 63, 73-86, 1986