

# 경계면이 입자유동 내 복합 사이즈의 입자 동적 거동에 미치는 영향 Boundary effects on the dynamic behavior of multi-sized granular materials in a granular flow

\*#김형진<sup>1</sup>

\*#H. J. Kim(hjkim@krri.re.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국철도기술연구원 철도구조연구실

Key words : Dry granular flow, Solid fraction(SF), Discrete element method(DEM)

## 1. 서론

입자 및 분말은 산업계 등의 응용분야 및 학계 등의 기초연구 분야에서 광범위하게 연구되고 있으며 여러 형태의 제품으로도 사용되고 있다. 그러나 입자 유동내에 포함되는 개개의 입자 동적 특성은 실험을 통하여 정확하게 예측하기가 매우 어렵기 때문에 입자유동내의 개개의 입자 운동 메커니즘 중 많은 부분이 아직까지 완벽히 규명되지 않고 있는 실정이다. 그러므로 각각의 입자들의 운동특성, 즉 개개의 입자 위치나 속도, 운동궤적 등을 파악할 수 있는 입자 유동의 동적 모델링 기법은 입자유동장내에서 입자의 운동특성을 파악하는데 큰 도움이 될 수 있을 것으로 예측된다.

## 2. 입자유동 관련 기존연구

응집력이 없는 순수 입자유동(dry granular flow) 특히 빠른 속도로 이동하는 입자유동(rapid granular flow)에 대한 연구는, 이러한 입자의 흐름이 유체 및 고체의 유동특성을 지니고 있기 때문에, 많은 연구자들에게 큰 관심거리가 되어왔다. Bagnold<sup>(2)</sup>는 입자유동에 큰 영향을 미치는 입자들의 상호 충돌로 인한 작용력(inter-action forces)을 연구하기 위해 동심을 갖고 있는 두개의 실린더(concentric cylinders)를 회전시켜 실험을 수행하였으며 입자 유동에 의해 발생하는 응력은 입자유동의 전단 유동율(flow shear rate)의 제곱과 밀접한 관련이 있음을 관찰하였다. Jenkins<sup>(5)</sup> 등은 일정한 복원계수(coefficient of restitution)를 갖는 원형 디스크들 간의 비탄성 충돌(inelastic collisions) 모델 이론을 연구하였다. Hanes<sup>(4)</sup> 등은 서로 평행하고 울퉁불퉁(bumpy)한 경계면 사이의 공간에서, 원형 디스크들의 유동으로 경계면이 입자유동에 미치는 영향을 연구하였다. Augenstein<sup>(1)</sup> 등의 실험 연구도 입자유동에서 경계면이 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

또한, 입자유동 특성을 분석하기 위하여 수치 해석적 접근방법에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있는데 거시적(macroscopic) 개념의 입자유동 모델을 수립하기 위해 DEM(discrete element method) 기법이 폭 넓게 활용되고 있다. 이러한 거시적 개념의 입자유동 모델과 관련하여 Cundall<sup>(3)</sup>은 2차원의 입자를 사용하여 거시적 입자 상호작용의 기본특성을 연구하였다. Walton<sup>(10)</sup> 등은 입자들 간의 접촉이 일정시간 지속되어 복수의 접촉이 가능한 부드러운 입자(Soft particle) 모델을 사용하여 입자유동을 분석하였다. Kim<sup>(8)</sup> 등은 경계면의 거칠기와 경계면의 간극을 조절하여 입자유동을 시뮬레이션 하였으며 좁은 경계면 간극(입자 직경의 4배 간극)의 경우 넓은 경계면 경우와 달리 최대 입자 체적비(SF, Solid fraction, 유동입자들과 시스템 내 자유 유동공간의 체적 비) 부근 영역에서 내부의 유동입자가 경계면 사이에 끼어드는 현상(trapping)이 발생하면서 경계면 발생 응력이 갑자기 떨어지는 현상(stress drop)을 제시하였다. Karion<sup>(6)</sup> 등은 2차원의 단일 크기 및 두 가지 크기의 디스크가 혼합된 전단 입자유동(granular shear flow) 시스템을 DEM(Discrete element method)을 이용하여 경계면에서 발생하는 응력 수준을 예측하였으며 SF이 증가할수록 경계면 응력도 증가하는 것으로 나타났다. Campbell<sup>(7)</sup>은 무중력 상태에서 응집력(cohesionless)이 없는 입자유동 모델을 DEM 기법을 사용하여 입자 유동의 유형을 분석하였으며 입자 유동으로 인해 발생하는 응력이 전단 유동율(flow shear rate)의 제곱에 비례함을 제시하였다.

## 3. 입자유동 모델

본 연구에서는 입자들 간의 상호 충돌로 발생하는 접촉이 순간적으로 발생(instantaneous contact)하는 것이 아니라 일정시간 지속되는 연속적 접촉(continuous contact) 및 복수의 입자가 동시에 접촉하는 복합 접촉(multiple contact)을 고려하기 위하여 Walton<sup>(10)</sup>의 "soft particle model(spring latching model)"을 사용하였다. 본 연구의 주요 관심사는 순수한 입자들(Dry Granular Materials)만의 입자유동에서 입자의 크기와 입자가 접하고 있는 경계면의 거칠기가 전단 입자 유동이 발생할 경우 입자의 운동 특성에 미치는 영향을 고찰하는 것이다. 이를 위해 인위적인 계산셀(Computational Cell)을 구성하였으며 계산셀 내 입자의 균일 분포가 가능하고 계산셀 대비 입자들의 체적비(SF, solid fraction)의 조정 용이 및 기존 연구와의 비교를 위해 중력(gravity)을 배제하였다. 계산셀의 상하방향 경계면(upper/lower walls)은 반구형(semi-sphere)의 경계면 입자(boundary particles)가 부착된 sand paper형의 거친 표면을 지녔다. 실제의 입자유동이 발생하는 시스템과 비교할 때 계산셀은 입자의 크기와 갯수 측면에서 상당히 작은 시스템이므로 계산셀 좌우방향 경계면(lateral directions)을 무한길이의 시스템으로 재현하기 위하여 연속 경계면(periodic boundaries) 기법을 사용하였는데 이는 입자가 한쪽 측면 경계면을 통과하면 동일한 운동특성을 지니고 반대쪽 측면 경계면으로 재 진입하는 시스템이다. 상하방향 경계면은 경계면에 부착된 반구형 경계면 입자의 크기 및 공간 조절로 표면 거칠기를 조정하며 계산셀내에서 자유로이 이동 가능한 구형(sphere)의 내부입자와의 충돌로 내부입자에 운동량을 전달하기 위해 횡 방향으로 이동한다. 본 연구에서는 위에서 언급한 계산셀과 서로 다른 크기의 유동 입자를 사용하여 경계면 및 입자크기가 입자유동에 미치는 영향을 분석하였다.

## 4. 결과

Table 1 Parameters

Parameters	variation ranges
Shear Gap Height(H)	12R (particle radius), 12 y-layers
Wall condition	Bumpy(semi-sphere boundary particles)
Flow particle radius(R)	1.2R, R, 0.5R
Restitution coefficient(e)	0.8
Shear rate(SR=2U/H)	1, 4, 8 (U:wall velocity)
Solid fractions(SF)	From 0.06 to 0.52
Number ratio	From 1 to 10 (no. of small particles/no. of big particles)

경계면의 운동량 전달 메커니즘에 의해 발생하는 응력은 그림 1에 나타난 바와 같은데 다음과 같이 무차원화 하여 표시하였다. "무차원 응력 = 응력/(입자밀도 X 입자직경<sup>2</sup> X shear rate<sup>2</sup>)" 결과에서 알 수 있듯이 입자유동내의 발생응력은 입자 크기와 상관없이 SF 증가에 따라 증가하며 0.5 이상의 고(높은) 영역 SF에서는 응력 증가가 급격이 이루어짐을 알 수 있었고 발생응력은 Shear Rate의 제곱에 비례하는 것으로 나타났다. 고(높은) 영역 SF의 경우, 유동 내에 포함되는 입자의 반경차가 큰 R-0.5R 시스템(그 중에서도, 작은 입자가 차지하는 비율이 클수록)에서 가장 낮은 수준의 응력이 발생하였다. 이러한 결과가 발생하는 요인은 고 영역의 SF의 경우에는 거친 경계면 근처에서 상대적으로 작은 입자들이 큰 입자들보다 거친 경계면 사이의 공간에

끼어서 경계면과 같이 이동하는 경향이 크고(Fig. 2 참조) 이는 경계면 거칠기를 부드럽게 하는 효과가 있기 때문으로 분석된다. 이러한 현상은 입자유동시스템에서 크기가 다른 입자의 혼합율(Number ratio, NR)에 따른 입자 분포의 차이를 보면 명확해진다(Fig. 2). 즉, 동일한 SF에서 큰 입자 수가 감소하고 작은 입자의 수가 증가하는 경우(NR이 증가하는 경우), 작은 입자들이 거친 경계면과 큰 입자사이로 위치하게 되는 비율이 증가하게 되어 shear gap height(H) 사이 입자 분포 층의 배열이 차이가 나게 되어 상하 경계면 주위의 layer에 많은 입자들이 몰리는 현상(Fig. 3)이 발생하나 작은 입자의 수가 줄어들수록(NR이 감소하는 경우) 이러한 경향이 약화되는 것으로 나타났다.

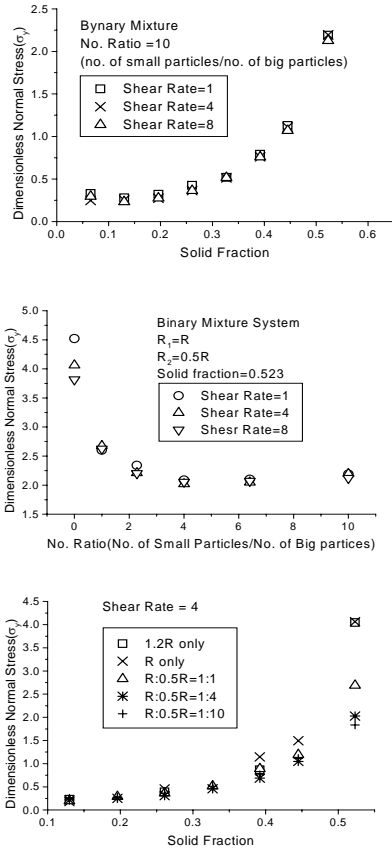


Fig. 1 Normal stresses for various solid fractions, shear rates, no. ratios and particle sizes. (Shear gap: 12R, restitution coeff.: 0.8)

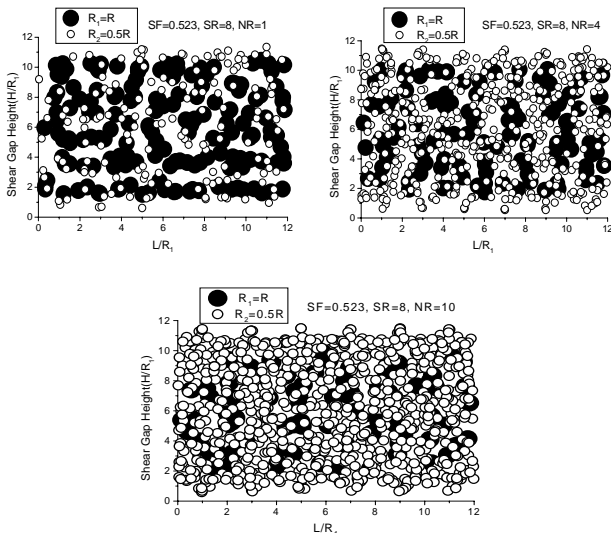


Fig. 2 Particle distributions of R/0.5R particle systems for various number ratios(Shear gap: 12R, e: 0.8)

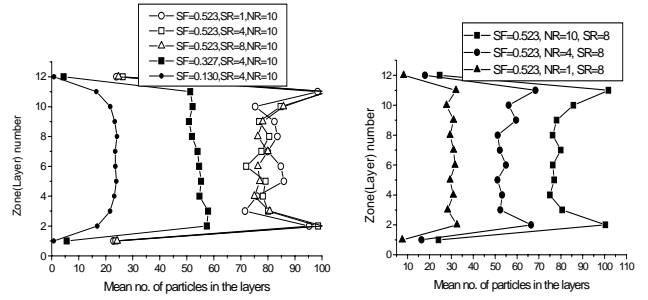


Fig. 3 Time averaged mean number of particles distributed in each y-layer for various PF, SR and NR.(Shear gap: 12R, Layer gap: 1R, e: 0.8)

### 5. 결론

고 영역의 SF에서는 상대적으로 작은 유동입자들이 거친 경계면 사이의 공간에 끼여들 가능성이 높게 되어 상대적으로 큰 입자들은 원래의 경계면과 접촉할 기회가 줄어들며 이는 경계면의 거칠기를 상대적으로 매끄럽게 만드는 효과가 있다. 즉, 같은 거칠기의 경계면과 SF 조건이라 하더라도 유동입자의 크기별 혼합율 정도에 따라 경계면 거칠기가 효과적으로 매끄럽게 될 수도 있다는 의미이며 이는 상대적으로 낮은 응력을 유발시키게 된다. 그러나 이러한 현상은 저 영역의 SF 이나 작은 크기의 입자들 수가 줄어들면 현저히 낮아지게 되는데 이것은 결국 경계면의 효과적 거칠기(effective roughness)와 발생응력이 밀접한 관련이 있기 때문이다.

### 참고문헌

1. Angenestein, D. A., Hogg, R., "An experimental study of the flow of dry powders over inclined surfaces", powder technology, 19, 205-215, 1978
2. Bagnold, R. A., "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid particles in a Newtonian fluid under shear". Proceedings of Royal Soc. London, A225, 49-63, 1954
3. Cundall, P. A., Strack, O. D. L., "A discrete numerical model for granular assemblies", Geotechnique 29, 47-65, 1979
4. Hanes, D. M., Jenkins, J. T., Richman, M. W., "The thickness of steady plane shear flows of circular disks driven by identical boundaries", J. Applied Mech. 110: 969-974, 1988
5. Jenkins, J. T., Richman, M. W., "Plane simple shear of smooth inelastic circular disks: the anisotropy of the second moment in the dilute and dense limits" J. Fluid Mech. 192: 313-328, 1988
6. Karion, A., Hunt, Melany L., "Wall stresses in granular Couette flows of mono-sized particles and binary mixtures", Powder Technology 109:145-163, 2000
7. Campbell, C. S., "Granular shear flows at the elastic limit, J. Fluid Mech. 465, 261-291, 2002
8. 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
9. Lun, C. K. K., Savage, S. B., Jeffrey, D. J., Chepurmy N., "Kinetic theories for granular flow : Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in General Flow Field", J. Fluid Mech. 140 : 223-256, 1984
10. Walton, O. R., Braun, R. L., "Stress calculations for assemblies of inelastic spheres in uniform shear", Acta mechanica 63: 73-86, 1986