

DEM(Discrete Element Method)을 기반한 재생골재 파쇄 및 모르터 박리 장치의 시뮬레이션 및 운전 특성 연구

이훈¹⁾, 조희찬¹⁾, 유명열²⁾

1) 서울대학교 지구환경시스템공학부, 2) 서울대학교 건축공학부

Analysis of a crusher for the production of recycled aggregates based on the DEM (Discrete Element Method)

Hoon Lee¹⁾, Hee Chan Cho¹⁾, Myong youl Yu²⁾

1)Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

2)Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul, Korea

1.서론

최근 우리나라의 경제성장에 따른 건설 수요 증가에 따라서 골재부존자원이 급격히 감소되어 자원 고갈에 따른 적절한 공급이 어려울 뿐 아니라 환경문제를 방지하기 위한 따른 환경규제 강화로 생산이나 공급에 어려움이 가중되고 있다. 이러한 문제점을 타개하기 위하여 재생 골재의 사용이 증가하기 시작했으나 현재는 저품질의 재생골재만이 생산되어, 노반재나 벽돌의 원료로 사용되고 있는 실정이다. 따라서 불규칙적인 입형이나 높은 흡수율 때문에 콘크리트 배합설계 및 관리상의 어려움을 유발시키고, 동결 용해 저항성을 떨어뜨려 콘크리트의 내구성 저하를 일으키는 원인이 될 수 있어 고품질의 원료로 재활용하기에는 큰 어려움이 있다¹⁾. 따라서 재생골재를 일정한 품질이상을 가질 수 있도록 개선하는 작업이 반드시 필요하다 하겠다.

본 연구에서는 기존의 임팩트 크러셔와 유사한 구조를 가지는 대구경 임펠러 두개를 이용하여 장비의 벽과 재생골재 입자 상호 충돌을 유도하여 입도를 낮추며 몰타르를 제거하는 장치를 개발하였다. 그러나 장비를 디자인하고 특성을 분석하는데 있어서 과거에는 경험식에 의한 시행착오를 거쳐 접근했던 것에 비하여 본 연구에서는 전산 모사 방법인 DEM(Discrete Element Method)를 이용하여 이를 수행하였다.

DEM은 최근 컴퓨터의 급속한 발달과 그것을 이용한 계산기술의 발전과 더불어 분쇄 장비 및 산업 전반에 걸쳐 영향을 끼친 모델중 하나로 1979년 Cundall과 Strack에 의해 제안된 수치 모델의 일종이다²⁾. 이를 이용한 장비의 시뮬레이션이 가능해졌고 각종 현상을 연구하는 방법으로써 중요한 역할을 하게 되었다. Mishra 와 Rajamani는 산업에서 가장 기본적으로 사용되는 볼밀에 DEM을 시도하였고³⁾ 이후 Inoue는 원심밀에 도입하였고⁴⁾ Cleary와 Moys⁵⁾는 그 밖의 여러 다른 분쇄매체 장비에 DEM을 적용시켜 DEM을 이용한 분쇄특성 연구를 시도하였다.

DEM은 입자들이 상호 작용을 하는 환경에서 각 입자들의 거동을 예측할 수 있는 방법으로, 매체 또는 입자를 이용하는 장비내의 거동을 파악 가능하기에 장비에 대한 미시적인 해석을 가능케 함으로써 장비 설계, 최적의 운전조건의 확립, 에너지 절감 등에 크게 기여할 수 있다. 따라서 이를 바탕으로 효과적인 장비 설계를 추구하였으며, 입자와 장비의 벽, 임펠러 등에서 발생하는 전단, 압축력을 분석하여 최적의 운전 조건을 고찰해 보았다.

2. 배경이론

DEM은 다수 입자운동을 미세 시간에 대하여 연산하여 움직임을 추론해내는 전산 모사기법으로, 인접 입자와의 접촉점으로부터 작용력을 계산하여 발생하는 힘으로부터 가속도를 얻고 이를 바탕으로 단위 시간에 대하여 입자의 좌표를 업데이트 시켜 전체적인 움직임을 완성하는 것이다. 입자간 충돌 시 발현하는 힘을 계산하는 과정은 Fig. 1과 같이 탄성을 나타내는 Spring과 완충을 나타내는 Dashpot을 병렬 연결한 Kelvin-Voigt 가상 모델을 이용해서 나타낼 수 있다⁶⁾. Fig. 1에서 (a)는 Spring에 의한 수직 강성계수 K_n 과 Dashpot에 의한 수직 완충계수 η_n 의 병렬연결로써 수직력을 표현하고 있으며 (b)는 (a)에 Slider를 직렬 연결하여 전단력을 나타내고 있다.

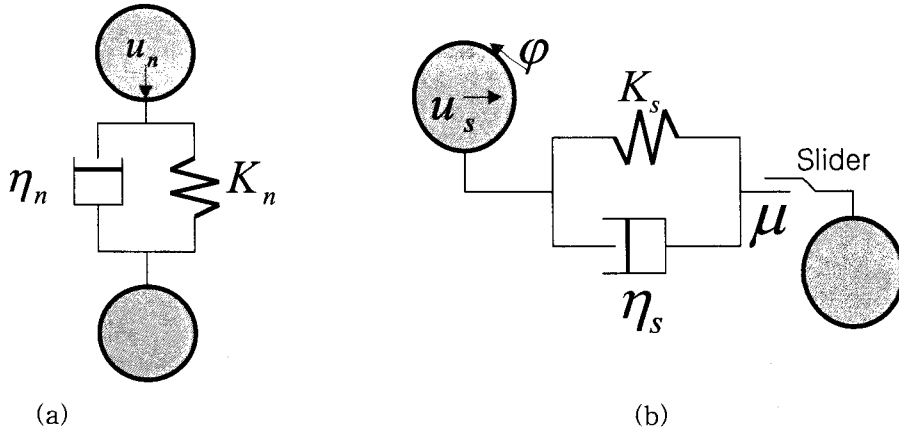


Fig. 1. Kelvin-Voigt contact model

(a), (b)의 모형은 수식으로 단위시간 Δt , 탄성계수 K 와 댐핑계수 η 를 이용하여 충돌시 법선 방향 변위 u 와 접선 방향 변위 v 및 회전변위 ϕ 로 각각 (2-1)과 (2-2)와 같이 간단히 표시 할 수 있다.

$$\text{Normal Force} : f_n = K_n \Delta u_n + \eta_n \frac{\Delta u_n}{\Delta t} \quad (2-1)$$

$$\text{Shear Force} : f_s = K_s \Delta (u_s + r\phi) + \eta_s \frac{\Delta (u_s + r\phi)}{\Delta t} \quad (2-2)$$

따라서 각각의 입자에 대해 발생하는 힘을 산정하고 뉴턴의 제2법칙에 근거하여 가속도-속도-변위를 차례로 산정하여 최종적인 임의의 시간에 입자 전체의 움직임을 완성한다.

3. 실험조건

투입되는 피드는 총 480개의 구형입자로 입도는 지름 10, 15, 20mm의 3종류이며 개수 백분율은 각각 68, 18, 14%로 구성되었다. 시뮬레이션 상수는 재생 골재와 유사한 특성을 반영하기 위하여 Table 1과 같은 조건으로 설정하였다. 또한 장비의 특성을 파악하기 위하여 운전조건은 장비의 특성을 가장 대표적으로 나타낼 수 있는 임펠러 길이 800, 1200, 1600mm와 회전속도 400, 550, 700rpm 각각 3종과 중앙 피드 제어용 슬릿 40, 60, 80mm 3종류로 총 27가지 조건을 설정하였다. 이를 단위시간을 10^{-6} 초

로 설정하여 3초 이상 분쇄 공정을 시뮬레이션 하여 발생하는 입자들의 움직임과 발생하는 충돌회수 및 힘의 분포등을 추적하였다.

Table 1. Parameters for simulation

Properties	Unit	Value
Iteration time	[s]	10-6
Poisson's ratio	[-]	0.3
Young's Modulus	[GN/m]	30
Particle Density	[g/cm ³]	2.5
Friction Coefficient	[-]	0.14
Restitution Coefficient	[-]	0.18

4. 실험결과

4.1 임펠러길이에 따른 효과

실험조건에 대하여 시뮬레이션을 하여 입자들의 움직임을 관찰한 결과 중 대표적으로 임펠러 길이에 따른 조건의 스냅 샷을 Fig. 2에 나타내었다. 분석 결과 임펠러의 길이가 길수록 임펠러에 의하여 반사되는 입자들의 산란각이 작아짐에 따라서 중앙의 슬릿을 통하여 낙하하는 입자와 충돌하는 확률이 커짐을 육안으로 확인하였다. 이는 입자의 상호 충돌을 유도하는 점에 있어서 긴 임펠러가 더욱 적합함을 의미하는 것이다. 이러한 직관적인 분석뿐 아니라 발현하는 힘의 분석에서도 장비의 특성을 효과적으로 파악할 수 있는데 이를 위하여 임펠러, 벽면, 입자 상호 충돌 발생 횟수를 힘의 크기에 대하여 Fig. 3에 도시하였다. 임펠러와 벽면의 충돌에서 회수 면에서 1600mm의 길이에서 증가함을 확인하였다. 또한 분포 면에서도 800mm의 임펠러에서는 좁은 형태의 입도를 보이는데 비하여 30KN 이하 까지 고른 분포를 보임을 확인하였다. 또한 입자 상호 관계를 나타내는 분포에서도 10KN 이하의 충돌이 발생하지 않는 800mm의 조건에 비하여 약 15KN 이상의 힘을 가지는 것도 20%이상으로 나타났으며 본 장비는 긴 임펠러에서 최적 조건임을 확인할 수 있었다.

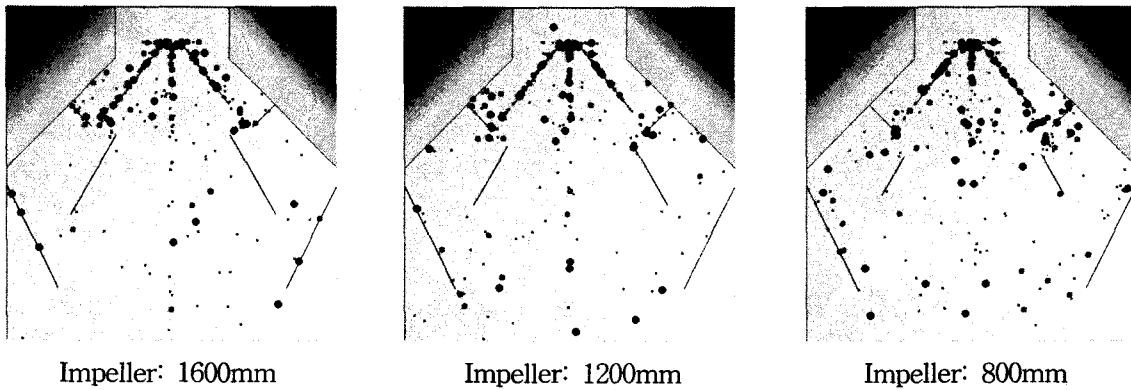


Fig. 2. Snapshots of apparatus operations with various length of impeller: 700rpm, slit 60mm

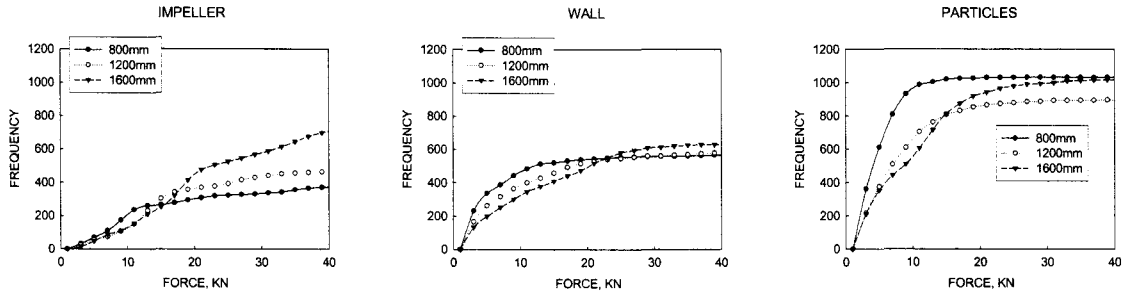


Fig. 3. Variation of frequency of the particles with various impeller length: 700rpm, slit 60mm

4.2 임펠러 회전 속도에 따른 효과

회전 속도에 따른 임펠러, 벽면, 입자 상호 충돌 발생 회수를 힘의 크기에 대하여 Fig. 4에 도시하였다. 벽면 충돌의 경우 낮은 400RPM의 회전 속도에서만 충돌 횟수가 적었을 뿐 전체적인 경우에서 충돌 회수는 회전속도에 영향을 주지 않았다. 그러나 발생하는 힘의 크기의 경우 높은 회전수의 경우 넓은 분포가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

4.3 슬릿 간격에 따른 효과

Fig. 5는 중앙 슬릿의 효과를 알아보기 위하여 각각 다른 40, 60, 80mm 슬릿 간격에 따른 충돌 발생 회수를 힘의 크기에 대하여 도시한 것이다. 분석 결과 슬릿 간격은 장비에 큰 영향을 주지 않은 것으로 나타났다. 이는 입자의 움직임 관찰에서도 공통적으로 나타났으며 임의의 한계 크기 이하의 슬릿에 서는 입자의 움직임과 힘의 분석 결과는 동일 할 것으로 생각 된다.

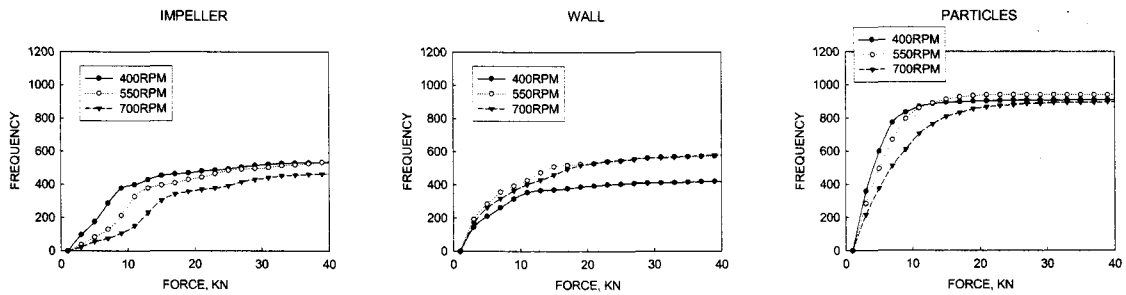


Fig. 4. Variation of frequency of the particles with various rotation speed: impeller 1200mm, slit 60mm

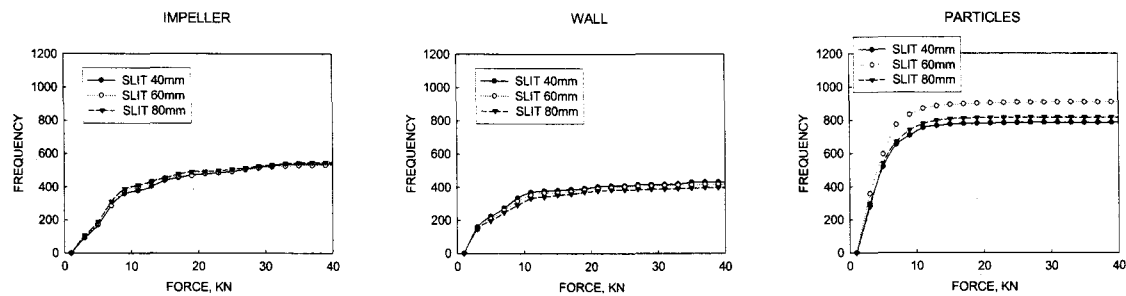


Fig. 5. Variation of frequency of the particles with various slit distance: 700rpm, impeller 1200mm

5. 결론

새롭게 고안된 몰타르 박리장치의 공정 시뮬레이션을 2D-DEM (Discrete Element Method)를 이용하여 성공적으로 수행할 수 있었다. 장비 내에서 발생하는 내부 벽과 임펠러 및 입자 상호간의 힘의 크기를 발생하는 회수에 따라 입도를 생성하여 효과적인 분석이 가능하였다.

시뮬레이션 분석 결과 임펠러의 크기가 증가할수록 입자의 반발되어 지는 각도가 작아지며 800mm 보다 1600mm에서 작인 각을 이루어 효과적인 입자 충돌이 많아지는 것을 육안으로 관찰할 수 있었으며 1600mm의 임펠러 길이 조건은 볼의 충돌 및 임펠러 충돌 입도에서에서 넓은 분포를 보인다. 임펠러 회전 속도에 따른 결과에서는 전체적인 충돌회수는 차이를 보이지 않지만 입도는 높은 힘에서도 고르게 분포하였으며 중앙 슬릿의 크기는 힘의 발현 형태 또는 회수에 있어서 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

6.참고문헌

1. 한국 골재 협회 (<http://www.aak.or.kr/>)
2. B.K. Mishra, 2003: *A review of computer simulation of tumbling mills by discrete element method_Part I-contact mechanics*, Int. J. Miner. Proc., 71, pp74.
3. R.K. Rajamani, B.K. Mishra, R. Venugopal, A. Datta, 2000: *Discrete element analysis of tumbling mills*, Powder Technology, 109, pp105-112.
4. Toshio Inoue, Katsunori Okaya, 1996: *Grinding mechanism of centrifugal mills - a simulation study based on the discrete element method*, Int. J. Miner. Proc., 44-45, pp425-435
5. P.W. Cleary, D. Hoyer, 2000: *Centrifugal mill charge motion and power draw- comparison of DEM prediction with experiment*, Int. J. Miner. Proc., 59, pp131-148.
6. 조희찬, 정석, 2005: *DEM을 이용한 Ball Mill과 Centrifugal Mill의 특성 연구*, 한국지구시스템공학 회지, 42(4), pp395