

이산요소법을 이용한 다단 임팩트 파쇄기 내 입자 거동 모사

유명열* · §이훈**

*제로에미션(주), **한국지질자원연구원

Simulation of Particle Behaviors within a Multi-stage Impact Crusher using Discrete Element Method

Myoungyuol Yu* and §Hoon Lee**

*Zero Emission Co., Ltd., Seoul 04415, Republic of Korea

**Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

요 약

건설폐기물 발생량은 매년 꾸준히 상승하고 있으며 재활용촉진 법이 제정되어있지만 콘크리트-시멘트페이스트 간의 단체분리 저하로 인해 높은 흡수율과 낮은 밀도로 순환골재 품질 기준에 제시되어 있는 콘크리트용 순환골재로서 사용되기 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 순환골재의 품위 향상에 필수적인 몰타르 제거를 위하여 다단형 임팩트 크러셔를 사용하였다. 장비의 특성을 분석하는데 있어서 전산 모사 방법인 DEM (Discrete Element Method)를 이용하여 영상 분석을 이용한 내부 입자의 거동 특징과, 투입 입자-장비의 각 부분에 발생하는 에너지의 스펙트럼을 분석하였다. 내부벽, 가이드 및 임펠러의 힘의 크기를 발생하는 횟수에 따라 스펙트럼을 생성하여 효과적인 분석이 가능하였다. 효과적인 분리현상을 발생시키기 위하여, 저에너지 그룹의 충돌 횟수(L)와 파분쇄를 발생시키는 고에너지 그룹의 충돌 횟수(H)의 비율을 토대로 회전속도 900RPM의 조건이 적절함을 확인하였다.

주제어 : 순환골재, 파분쇄, DEM, 임팩트 크러셔

Abstract

The amount of construction waste generated is steadily increasing every year, and the Law for Promotion of Recycling is enacted. However, it is difficult to use it as a recycled aggregate for concrete, which is presented in the quality standard of recycled aggregate with high water uptake and low density due to low separation of aggregate between concrete and cement paste. Therefore, in this study, a multi-stage impact crusher was used to remove mortar, which is essential for improving the quality of recycled aggregate. In analyzing the characteristics of the equipment, the spectrum of energy generated in each part between the particle and the equipment was calculated by using DEM. In order to generate an effective separation phenomenon, it was confirmed that the operation condition of 900 RPM was appropriate based on the ratio of the number of collisions (L/H) of the low energy group (L) to the number of collisions of the high energy group (H).

Key words : Recycled aggregate, Comminution, DEM, Impact Crusher

· Received : April 27, 2018 · Revised : May 29, 2018 · Accepted : June 8, 2018

§ Corresponding Author : Lee Hoon (E-mail: hoonlee@kigam.re.kr)

Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124, Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Korea

© The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

건설폐기물은 2016년 하루에 약 20만 톤이 발생하고 있으며, 국내에서 발생하는 폐기물 중 약 50%를 점유하고 있다¹⁾. 특히, 최근 도시 재개발/건축 및 환경 정비에 대한 수요가 증가함에 따라 기존의 건설된 SOC 및 주택의 해체가 증가하고 있으며, 이러한 구조물의 해체 공사 시 발생하는 막대한 양의 건설폐기물은 도시 및 주거환경 파괴의 주범이 되고 있다. 2016년도 환경부에서 발표한 전국폐기물 통계 처리 현황을 보면 건설폐기물의 발생량은 2011까지 감소추세를 그리다 이후 꾸준한 상승세로 전환되는 모습을 보이고 있다.

건설교통부에서는 건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률 제35조의 규정에 의거 건설폐기물의 재활용을 촉진하기 위한 순환골재 품질기준을 2005년 8월에 제정하여 폐콘크리트의 다양하고 폭넓은 활용을 권장하고 있지만 국내에서 폐콘크리트를 이용하여 생산되고 있는 순환골재의 경우 높은 흡수율과 낮은 밀도로 인해 순환골재 품질 기준으로 제시되어 있는 콘크리트용 순환골재로서 사용되기에 어려운 실정이다. 이는 콘크리트용 순환골재를 생산하기 위해 필수적으로 진행해야 하는 단계인 부차 시멘트 페이스트를 제거하기 위한 기술보다는, 파쇄기를 이용하여 단순히 충격 에너지를 가하는 방법을 주로 이용하여 콘크리트-시멘트페이스트 간의 단체분리 저하로 인한 효율감소가 주 원인으로 판단된다. 이러한 원인을 극복하기 위해 고품질 순환골재 생산을 위한 폐콘크리트 특성연구²⁾, 몰타르와 순환골재를 혼합하여 내구특성 연구³⁾, 표면처리를 통해 순환골재 품질 개선 연구⁴⁾ 등과 같은 연구가 많이 진행되었다. 그러나 기존 연구들은 단순한 물성 개선에 의한 실험실 규모의 연구가 대부분이며, 새로운 장비에 초점을 맞춘 연구는 미흡하였다. 이러한 신개념 장비의 효율성을 향상시키기 위해서는 새로운 장비의 운전조건 변화에 따른 특성을 분석해야 하는데, 이를 위하여 많은 시간과 실험 비용이 소모되며, 이러한 점을 개선하기 위한 모델링 기법의 사용은 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 DEM (Discrete Element Method)를 이용하여 새롭게 개발된 다단 임팩트 파쇄기의 전산모사를 수행하였다. DEM 모델은 입자들의 거동을 예측할 수 있는 물리기반의 전산모사 방법으로, 입자 기반의 장비 내부의 거동을 파악하는데 유용하게 사용된다. 이러한 장점으로 인해 1992년 Mishra⁵⁾에 의해 불밀의 분쇄매체 거동 예측을 위한 실험에 처음으로 사

용되었으며, 그 후 DEM을 사용한 입자의 파쇄 특성 및 장비 내부 입자 운동 특성 규명에 많은 연구들이 진행되었다. 콘크리트 골재 파손특성의 단체분리 거동⁶⁾, 탄화규소 세라믹의 파손 특성 및 분쇄 공정의 분쇄력 변화와의 관계⁷⁾, 탄화규소 세라믹의 미세가공 과정에서 의 파단 및 손상 모델링⁸⁾와 같이 콘크리트와 세라믹 입자의 파손특성에 대한 연구가 수행되었다. 또한 DEM을 활용하여 불밀 리프터 디자인에 따른 분쇄매체의 거동^{9,10,11)} 원심밀의 특성 연구^{12,13)}, 교반밀¹⁴⁾, 진동밀¹⁵⁾ 등과 같은 여러 가지 분쇄 장비 및 분쇄장비 내부 입자의 거동특성에 대한 연구도 동시에 진행되어왔다.

본 연구에서는 순환골재의 품위 향상에 필수적인 몰타르 제거를 위하여 다단형 임팩트 크러셔를 사용하였으며, 장비의 특성을 분석하는데 있어서 전산 모사 방법인 DEM (Discrete Element Method)을 통해 투입 입자-장비의 각 부분에 발생하는 에너지의 스펙트럼을 분석하였다. 이를 바탕으로, 순환골재의 품질기준에 적합하도록 파쇄 함과 동시에 콘크리트용 순환골재의 품질기준에 적합하도록 시멘트 페이스트만을 원골재의 손상을 최소화하면서 단체분리가 가능한 입자거동 및 에너지 스펙트럼 기반의 최적 시스템의 개발 가능성을 고찰해보고자 하였다.

2. 이론 및 전산모사

구성 입자간의 충돌에 의해 접촉점에 작용하고 있는 상호 작용력은 탄성과 더불어 비탄성적인 성질을 가지고 있다. 따라서 이것을 Fig. 1(a), (b)과 같이 탄성을 나타내는 스프링과 비탄성을 나타내는 댐퍼를 병렬 연결한 Kelvin-Voigt 가상 모델을 이용해서 나타낼 수 있다(Mishra, 2004). 일반적으로 DEM에서 입자가 다른 입자로부터 받는 힘의 크기는 수직 방향과 전단방향으로 나누어 생각할 수 있으며 Fig. 1에서 (a)는 스프링에 의한 수직 강성계수 K_n 과 대시포트에 의한 수직 완충계수 η_n 의 병렬연결로써 수직력을 표현하고 있으며 (b)는 수직력에 slider를 직렬 연결하여 전단력을 나타낸다.

$$\vec{f}_n = K_n u_n(t) \vec{n}(t) + \eta_n \vec{v}_n(t) \quad (1)$$

여기서 K_n 은 수직 강성계수, u_n 은 임의의 시간 t 에서 overlap이 발생하였을 때 수직방향의 성분을, 그리고 \vec{n} 은 두 입자사이의 수직방향 단위 벡터를 의미한다. 또한 η_n 은 수직방향의 완충계수를, \vec{v}_n 은 임의의 시간 t

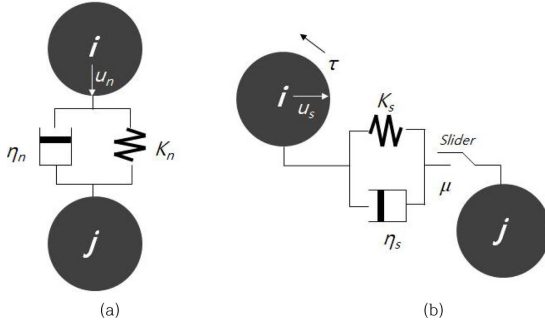


Fig. 1. Kelvin-Voigt contact model.

에서 상대 속도의 수직 성분을 나타낸다.

동시에 Fig. 1의 (b)는 입자간 상호 작용력의 전단 방향 성분을 나타내고 있다. (a)와 유사한 회로 형태에 마찰 작용을 표현하기 위한 slider가 추가로 연결되었다. 전단력은 전단 강성계수 K_s 와 시간 t 에서의 overlap의 전단 방향 성분 \vec{u}_s 및 전단방향 단위벡터, 전단방향 완충계수 η_s , 그리고 상대 속도의 전단 방향 성분 \vec{v}_s 으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{f}_s = K_s u_s(t) \vec{s}(t) + \eta_s \vec{v}_s(t) \quad (2)$$

$|\vec{f}_s|$ 가 최대 정지 마찰력 $\mu |\vec{f}_n|$ (μ : Coulomb 정지 마찰 계수) 보다 큰 경우에는 미끄러짐 현상이 발생하게 된다.

DEM 시뮬레이션에서 중요한 것은 현실적인 강성, 완충 계수를 설정하는 것이다. 본 연구에서 사용된 DEM 모델은 앞서 설명했던 것과 같이 linear-spring dashpot 모델로 강성 및 완충계수는 물질의 특성에 따라서 다르게 나타난다. 1999년 Misra와 Cheung은 다음과 같이 포아송 비와 영률을 이용하여 수직 강성계수를 계산하였다.

$$K_n = 0.094 E^* R^* \quad (3)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_A}{2G_A} + \frac{1-\nu_B}{2G_B}$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{2R_A} + \frac{1}{2R_B}$$

여기서 ν_A , ν_B 및 G_A , G_B 는 각각 두 물질의 포아송 비와 영률(N/m^2)이며, R_A , R_B 는 두 입자의 반지름이다. 또한 수직 완충계수는 다음과 같이 복원계수, ε 와 두 물질 질량 M_A , M_B 를 이용한 M^* 로 다음과 같이

Table 1. Simulation parameters (In-house code)

Properties	Unit	Value
Iteration time	[s]	1E-5
Poisson's ratio	[-]	0.3
Young's Modulus (Geometry)	[GN/m ²]	200
Young's Modulus (Particle)	[GN/m ²]	30
Density (Geometry)	[g/cm ³]	7.8
Density (Particle)	[g/cm ³]	2.5
Friction Coefficient	[-]	0.14
Restitution Coefficient	[-]	0.18
Total Simulation Time	[s]	10

설정하였다.

$$\eta_n = \frac{-\ln \varepsilon \sqrt{K_n M^*}}{\sqrt{\pi^2 + (\ln \varepsilon)^2}} \quad (4)$$

$$\frac{1}{M^*} = \frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}$$

위와 같은 관계식으로부터 물질의 특성값(영률, 포아송비)이 결정되면 입자의 입자 크기에 대해서 모델링 상수 K_n , η_n 을 결정할 수 있다. 대부분의 물질의 경우 이러한 영률과 포아송비는 알려져 있으며 stainless steel의 경우 영률 200 Gpa, 포아송비는 0.3이다. 따라서 입자의 물질로 구성된 입자에 대하여 식 (3, 4)를 이용하여 DEM 모델링 구현이 가능하다. 전단계수는 수직계수의 67% (0.33)를 설정하였으며 본 DEM 모사에 사용된 주요 상수는 Table 1과 같다.

3. 모사결과 및 토론

3.1. 장비의 가상화 (Visualization)

실제 장비와 모사실험에 사용되는 모델이 정확하게 일치 할 수 있도록 크기와 회전속도 및 세부사항을 3D로 적용하였으며, Fig. 2에 비교하여 도시 하였다. 장비의 구성은 크게 전체적인 1) 몸체와, 2) 5개의 회전하는 임펠러, 내부 물질 흐름을 도와주는 3)가이더 3가지로 구성 되어 있으며 각 부분의 제원 및 기타 정보를 Table 2에 나타내었다. 단일 몸체로 구성된 메인 바디는 3.6m의 높이에 1m의 폭을 가지고 있으며, 5개로 구성된 회전 임펠러와 고정 가이드로 구성되어 있다. 임

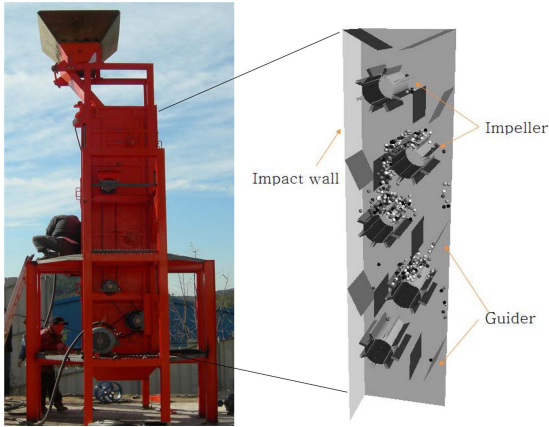


Fig. 2. Photo and visualization of multi-stage impact crusher.

펠러의 회전수는 800, 900, 1000 RPM이며, 시료는 분당 평균 50 mm 골재를 600 kg 투입하며, 이에 해당하는 전산 모사 조건으로 50 mm 입자를 초당 60개 정도 투입하게 된다.

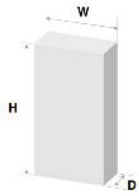
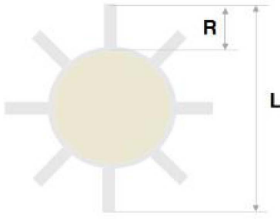
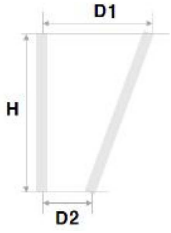
3.2. 영상 분석

모사된 영상분석 결과 Fig. 3(a)와 같이 최초 임펠러에서 가장 많이 입자가 벽면에 충돌됨을 확인할 수 있었다. 이는 해당 장비의 입자 공급을 담당하는 피더의 설계가 매우 타당함을 보여주며 위치가 최적점을 벗어나면 그만큼 투입 입자들이 임펠러에 효과적으로 접촉이 되지 않으며 실제로는 전체 4개의 임펠러가 있는 것과 같은 역할을 하게 되어 에너지 측면에서 비효율적이기 때문이다. 또한 최상위 임펠러를 제외한 하부 임펠러에서는 비교적 균일하게 입자들이 충돌되는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3(b)).

흥미로운 것은 낮은 임펠러 회전조건에서 일부 입자의 경우 1번 임펠러에 의해 피드 투입구 외부로 나가는 현상이 종종 발생하는데, 피드의 양을 늘리면 투입되는 입자에 의해 외부로 배출되는 것이 방해받기 때문에 해결 가능하였다.

각 임펠러 당 입자의 점유 비율을 결정하는 것은 입자의 흐름성과 효과적인 충돌을 관찰하는데 중요한 기초 자료가 된다. 이러한 입자의 단위 시간당 점유 비율

Table 2. Specification of impact crusher in this study

Parts	Component	Value
Machine Body	 H × W × D	3600 × 1000 × 600 (mm)
Impeller	 L × R # of imperllers Materials rotation speed	460 × 70 (mm) 5 Stainless steel
Guider	 H × D1 × D2 # of guiders Materials	360 × 230 × 170 (mm) 5 Stainless steel

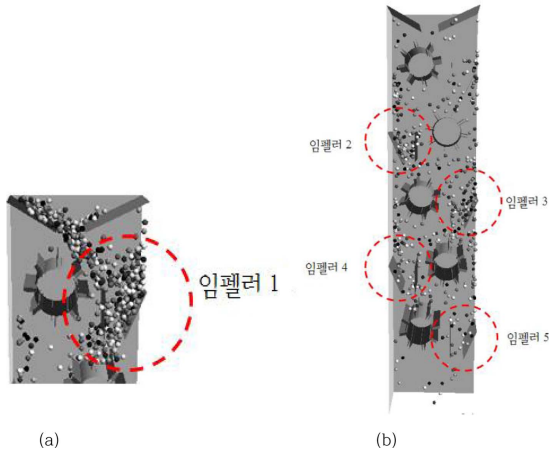


Fig. 3. Image analysis results of impact crusher.

을 각 임펠러에 대해서 정규화 시켜 Fig. 4에 도시하였다. 그림에서 보이듯이, 높은 회전속도에서 1번 임펠러에서의 체류시간 비율이 증가하는 것을 알 수 있다. 임펠러의 끝단의 원심가속도는 Rw^2 [m/s^2]로 정의되며 800, 900, 1000 RPM에서의 각가속도는 403, 510, 630 m/s^2 로 계산된다. 이렇게 빠른 가속도를 가지는 임펠러는 높은 에너지를 충돌 시 입자에 전달하며 이와 같은 에너지 확산현상이 입자의 체류를 증가시킨다. 역설적으로 각 임펠러에 대해 균일한 체류 시간을 가지기 위해서는 회전속도가 낮을수록 가능함을 Fig. 4에서 유추 가능하며, 그래프에서 가장 하단인 5번 임펠러의 경우 3% 정도의 점유율을 보이는 것으로 확인되었다. 그러나 매우 낮은 회전수의 경우 분쇄/박리에 필요한 에너지가 충분하지 않기 때문에 적절한 회전속도를 결정하

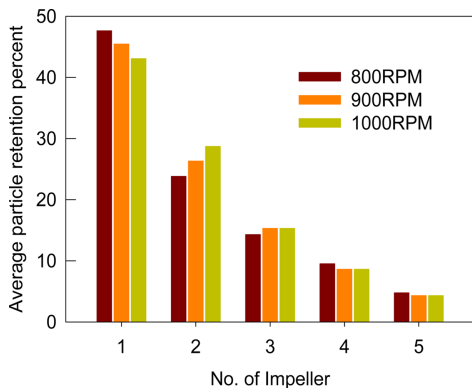


Fig. 4. Average particle retention ratio per impeller (normalized).

는 것은 매우 중요하다.

3.3. 에너지 분석

DEM분석은 단순한 영상이 아니라 장비에서 발생하는 다양한 에너지를 파악할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 충격 에너지의 경우 분쇄 입자에 가해지는 에너지의 정도를 확인할 수 있는 가장 효과적인 척도이며 이는 식 (2)를 사용하여 계산하였다.

$$E_{impact} = \frac{1}{2}m_{particle}(\Delta V)^2 \quad (2)$$

여기서 m 은 입자의 무게이며 ΔV 는 입자-평면 사이의 속도 차이이다. 이를 이용하여 발생하는 에너지를 1~256J까지 기하-스케일로 분류하여 에너지가 발생하는 양측 벽면, 임펠러, 가이드 벽면의 횡수를 분석하여 대표적인 임펠러 회전 속도 900 RPM 조건의 결과를 스펙트럼의 형태로 Fig. 5에 도시하였다. 임펠러에서 발생하는 총 횡수는 약 4400번이며 입자의 개수를 감안하면 평균적으로 장비 내부에서 약 8회 이상의 충돌이 발생한 것으로 확인되었으며, 이는 임펠러는 5개인데 비해 충돌된 입자가 다시 다른 벽면을 타고 재 충돌하여 도출된 결과라고 판단된다. 가이드 면의 경우 임펠러 조건보다 약 20% 이상 많은 충돌 횡수를 기록한 것으로 확인되었는데, 이는 입자가 임펠러에 의해 받은 에너지로 충돌하는 것 이외에 자유 낙하하면서 충돌하는 횡수도 측정되어 나온 결과라고 생각된다. 양측벽면의 경우 2600회로 임펠러와 가이드에 비해 상대적으로 낮은 충돌 분포를 보였다. 특히, 가이드와 양측벽면의 에너지 스펙트럼은 비교적 유사한 분포 형태를 가지는 것으로

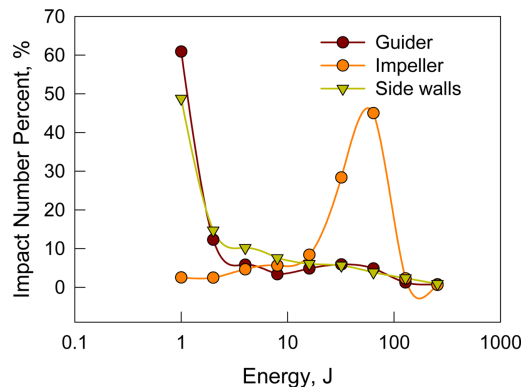


Fig. 5. Energy spectrum generated by equipment part (900 RPM).

Table 3. Distribution of collision frequency by each energy according to impeller rotation.

Energy, J	RPM		
	800	900	1000
~ 1	4096	4441	3945
1 ~ 2	1027	1109	1047
2 ~ 4	725	760	647
4 ~ 8	600	610	592
8 ~ 16	702	767	742
16 ~ 32	1576	1674	1727
32 ~ 64	2141	2298	2423
64 ~ 128	207	224	253
128 ~	84	88	106
Total	11158	11971	11482
L/H	1.28	1.29	1.11

나타났으며, 특히 저에너지 부분의 비율이 50~60% 정도로 나타나는 것은 입자의 낙하와 이동에 의해서 발생하는 것으로 판단된다. 임펠러의 경우 저 에너지 부분에서의 비율이 낮게 나타나며, 고에너지 부분에서 약 47%의 값으로 확인되었는데 이는 빠르게 회전하는 임펠러가 입자와 유효하게 충돌하고 있음을 보여주는 것으로 판단된다.

그러나 임펠러의해 입자에 가해지는 고 에너지는 박리현상보다는 폐 콘크리트의 파괴를 야기하여, 순환골재의 품위 향상에 필수적인 효과적인 몰타르 분리가 이루어지지 않을 것이라고 생각된다. 특히, 매우 높은 에너지 그룹(H) (>20J)은 파분쇄를 유도하는 것으로 판단되므로, 적은 에너지 발현 그룹(L) (<2J) 그룹과 비율 관계를 각 회전 조건별로 분석하여 Table 3에 도시하였다. 분석 결과 높은 RPM에서는 강한 에너지 발현이 높다는 것을 확인 가능하며, 저에너지/고에너지 충돌 횟수 비율(L/H)는 1.11 가장 낮은 수치를 보였다. 반면에 800, 900 RPM에서는 1.28, 1.29로 유사한 값을 보이나, 전체적인 저에너지 충돌 자체가 800 RPM의 조건이 900 RPM 조건 보다 3%가 낮은 충돌 횟수를 보여, 종합적인 최적의 임펠러 회전은 900 RPM으로 판단된다.

4. 결 론

새롭게 디자인된 다단 임팩트 크러셔의 공정 시뮬레

이션을 3D-DEM (Discrete Element Method)를 이용하여 성공적으로 수행할 수 있었다. 장비 내부에서 발생하는 내부벽, 가이드 및 임펠러의 힘의 크기를 발생하는 회수에 따라 스펙트럼을 생성하여 효과적인 분석이 가능하였다.

1) 영상 분석 결과, 임펠러의 각속도에 근거한 입자의 점유 시간은 높은 회전에서 발생하는 에너지가 입자의 체류 현상을 가속 시키며, 동시에 낮은 회전수는 각 임펠러의 입자 점유 시간을 균일하게 만드는 효과를 가지는 것을 확인하였다.

2) 입자-입자 또는 입자-지오메트리 사이의 충돌 에너지에 기반하여 각 임펠러 회전 속도에 따른 에너지 분포 스펙트럼을 분석하였다. 효과적인 박리현상을 도모하기 위하여 저에너지 그룹의 충돌 횟수(L)와 파분쇄를 발생시키는 고에너지 그룹의 충돌 횟수(H)의 비율(L/H)을 비교한 결과 임펠러 회전속도 900 RPM의 조건에서 가장 적합한 에너지 충돌 분포를 나타내는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원이 연구비를 지원하고 한국산업자원부가 추진하여 수행되었습니다(과제번호 20152520100640).

References

1. Ministry of Environment, 2016, Status of waste generation and disposal, pp.15-17.
2. Kim, K. H., Mun, M. W., Cho, H. C., and Ahn, J. H., 2010 : *A Study on the Liberation Characteristics of Waste Concrete for Production of High Quality Recycled Aggregate*, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 19(3), pp.52-61.
3. Kim, J. P., Lee, S. T., Jung, H. S., Park, K. P., and Kim, S. S., 2007 : *Durability of Mortar Matrix Replaced with Recycled Fine Aggregates*, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 16(6), pp.20-27.
4. Bae, J. S. and Kim, N. W., 2011 : *Properties of Concrete using Surface Treatment Recycled Aggregates and Steel Fibers*, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 20(1), pp.46-53.
5. Mishra, B. and Rajamani, R. K., 1992 : *The discrete element method for the simulation of ball mills*, Applied Mathematical Modelling, 16(11), pp.598-604.

6. Lee, H., Kwon, J. H., Kim, K. H., and Cho, H. C., 2008 : *Application of DEM model to breakage and liberation behaviour of recycled aggregates from impact-breakage of concrete waste*, Minerals Engineering 21(11), pp.761-765.
7. Jiang, S., Li, T., and Tan, Y., 2015 : *A DEM Methodology for Simulating the Grinding Process of SiC Ceramics*, Procedia Engineering, 102, pp.1803-1810.
8. Tan, Y., Yang, D., and Sheng, Y., 2009 : *Discrete element method (DEM) modeling of fracture and damage in the machining process of polycrystalline SiC*, Journal of the European ceramic society, 29(6), pp.1029-1037.
9. Lee, H. S., Lee, H., Kim, K. H., and You, K. S., 2017 : *Analysis of Grinding Energy Spectrum and Grinding Media Motion by Ball Mill Lifter Design*, J. KSMER, 54(6), pp.628-636.
10. Wang, M. H., Yang, R. Y., and Yu, A. B., 2012 : *DEM investigation of energy distribution and particle breakage in tumbling ball mills*, powder technology, 223, pp.83-91.
11. Bian, X., Wang, G., Wnag, H., Wnag, S., and Lv, W., 2017 : *Effect of lifters and mill speed on particle behaviour, torque, and power consumption of a tumbling ball mill: Experimental study and DEM simulation*, Minerals Engineering, 105, pp.22-35.
12. Cho, H. C. and Jeong, S., 2005 : *A Characteristic Study of Ball Mill and Centrifugal Mill using Discrete Element Method*, J. KSMER, 42(4), pp.393-402.
13. Cleary, P. W. and Hoyer, D., 2000 : *Centrifugal mill charge motion and power draw: comparison of DEM predictions with experiment*, International journal of mineral processing, 59(2), pp.131-148.
14. Sinnott, M., Cleary, P. W., and Morrison, R., 2006 : *Analysis of stirred mill performance using DEM simulation: Part 1—media motion, energy consumption and collisional environment*, Minerals Engineering, 19(15), pp.1537-1550.
15. Lee, H., Cho, H. C., and Kwon, J. H., 2010 : *Using the discrete element method to analyze the breakage rate in a centrifugal/vibration mill*, Powder Technology, 198(3), pp.364-372.



유 명 열

- 충남대학교 건축공학 공학사
- 서울대학교 건축공학 공학석사
- 서울대학교 건축공학 공학박사
- 현재 (주)제로에미션 관리이사

이 훈

- 현재 한국지질자원연구원 선광연구실 선임연구원