Resources Recycling
Vol. 31, No. 6, 2022, 36-43
https://doi.org/10.7844/kirr.2022.31.6.36
pISSN : 2765-3439 eISSN : 2765-3447

≫ 연구논문 ≪

막힘 방지 스프링 적용 스크린 운동 특성 분석을 통한 스크린 효율 개선 효과 분석

이한솔* · 유명렬** · §이훈***

*과학기술연합대학원대학교 자원공학과, **제로에미션, ***한국지질자원연구원

The Screen Efficiency Improving Effect Analysis by the Screen Motion Characteristic Analysis Applying Blockage Prevention Spring

Han-Sol Lee*, Myouing-yuol Yu and §Hoon Lee*****

**University of Science and Technology, 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Republic of Korea,*
***Zero Emission Co., Ltd., Seoul 04415, Republic of Korea*
****Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Republic of Korea*

요 약

순환골재 입도 분리를 위해 사용되는 일반적인 스크린은 막힘 현상으로 인해 함수 시료 처리가 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 기존 스크린의 분리 효율을 개선하기 위하여, DEM(Discrete Element Method) 기반의 모사 실험을 통해 스프링 기반의 추가 보조 진동 장치의 우수성을 판단하였다. 스프링 디자인에 따른 변위, 진폭 및 변형 각 분석을 통해 운동 특성을 확인하였으며, 이를 스크린에 적용하여 입자의 거동을 모사하였다. 입자 모사 결과, 스프링이 적용된 스크린의 물질 흐름 및 분리 효율은 각각 9.2 kg/s, 97 %로 나타났으며, 기존 스크린과의 비교를 통해 막힘 방지 스프링의 적용은 기존 스크린을 개선할 수 있음을 확인하였다.

주제어 : 진동체, 스크린, 이산요소, 순환골재, 전산모사

Abstract

The general screen used to separate the particle size of recycled aggregate has restrictions when dealing with moisturized materials because of the blockage phenomenon. Therefore, in this study, to improve the separation efficiency of the conventional screen, the excellence of additional vibrating device based on spring was decided by a simulation experiment based on the discrete element method (DEM). The motion characteristic was investigated by analyzing the displacement, amplitude, and strain angle based on the spring design. Further, the particle motion was simulated by applying spring motion. The material flow and separation efficiency of the screen applied spring were confirmed as 9.2 kg/s and 97 %, respectively. Consequently, the improvement in the screen applied with blockage prevention spring was confirmed by comparing with the conventional screen.

Key words : Vibrating Screen, Screen, Discrete Element Method, Recycled aggregate, Simulation

· Received : September 23, 2022 · Revised : October 25, 2022 · Accepted : November 7, 2022
§ Corresponding Author : Hoon Lee (E-mail : hoonlee@kigam.re.kr)
Resources Utiilize 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 중간처리 과정을 통해 도로 기층용, 콘크리트용, 노상용 등 다양한 순환골재로 재활용 할 수 있으며, 순환골재로 사용하기 위해서는 '건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률(제35조)'에 의거한 순환골재의 다양한 품질 기준을 만족해야한다[1-4]. 순환골재의 품질은 콘크리트로 만들기 위해 사용된 골재(자갈이라고 불리는 굵은골재나 모래라고 불리는 잔골재)에서 시멘트 페이스트를 분리하여 개선할 수 있으며[5-7], 순환골재로 생산하기 위한 중간처리 공정은 파 · 분쇄, 선별, 분급, 이송과 같은 복합공정으로 구성되어 있다[8]. 이 중 분급 공정은 순환골재 입도 품질기준을 달성하기 위한 필수적인 공정이며, 골재를 생산하기 위한 국외[9] 및 국내[10]에서는 진동체을 사용하고 있다.

일반적인 진동체은 진동부의 편심 플라이휠(flywheel)이 회전을 통해 스크린 덱(screen deck)에 진동을 발생시키는 것으로 대부분 유사한 구조를 가지고 있으며, 스크린의 각도 및 모양에 따라 수평 스크린(horizontal screen), 경사 스크린(inclined screen), 다중 경사 스크린(multi-slope screen), 그리즐리 스크린(grizzly screen) 등으로 구분할 수 있다. 그러나 기존 스크린은 시료가 완전 건조 상태가 아닌 함수된 조건의 시료들이 투입되면 막힘 현상이 발생하여 스크린의 분리 효율 및 처리량이 감소된다. 이를 해결하기 위해 스크린 경사판 기울기 조절[11], 분리 물질에 따른 최적 조건 선정[12], 스크린 디자인 개선[13] 등과 같이 분리 효율을 개선할 수 있는 다양한 방법이 모색되고 있으며, 지속적인 개선이 필요하다고 판단된다.

장비의 효율을 개선하기 위해 최적 디자인 및 조건 설정은 필수적인 요소이나, 실제 실험을 통해 최적 조건을 결정하는 것은 많은 시간과 비용이 소모된다. DEM 기반의 전산 모사 실험은 현장 실험의 단점을 보완할 수 있을 뿐만 아니라, 산업용 해머크러셔 최적화 및 내부 물질 흐름 분석[14,15], 볼밀 리프터에 따른 영향 연구[16,17], 공기 분급기 내부 분리 물질 거동 해석[18] 등 다양한 장비들의 최적화 연구에 적용되어 타당성을 입증 받았다.

스크린 막힘을 방지하기 위해서 기존 진동체에 추가적인 진동이 가해져야하기 때문에, 스크린 하부에 댐핑 스프링(damping spring) 이외에 추가적인 스프링을 적용하여 진동을 증폭시키고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 DEM 기법을 이용하여 막힘 방지 스프링을 적용하였다. 스프링 디자인에 따른 운동 형태와 투입되는 입자들의 물질 흐름 및 선별 효율을 분석하였으며, 도출된 결과를 통해 스크린 막힘 방지 스프링의 적용은 기존 스크린의 개선 가능성을 확인하였다.

2. DEM의 원리

DEM은 Hertz가 제안한 완전 탄성 모델의 결과로 입자의 충돌로 인해 생성된 상호 작용력을 이용하여 입자의 거동을 시뮬레이션 하는데 사용되는 컴퓨터 모델링이며, 입자간 충돌 시 접촉점에서의 상호 작용력은 탄성과 비탄성적 특징이 나타난다. 점탄성 재료를 모델링하는 방법은 선형 강성과 점성 감쇠를 조합하는 방식이 가장 널리 사용되며, Kelvin-Voigt 모델은 점탄성 재료를 모사할 수 있는 가장 대표적인 모델이다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1의 (a), (b)과 같이 탄성을 나타내는 스프링과 비탄성을 나타내는 댐퍼를 병렬 연결한 Kelvin-Voigt 모델을 적용하였다[19]. DEM은 입자가 다른 입자로부터 받는 힘의 크기를 수직 방향과 전단 방향으로 구분할 수 있기 때문에, Fig. 1의 (a)는 기본적인 Kelvin-Voigt 모델과 같이 강성계수인 K_n과 수직 완충계수η_n를 병렬 방식으로 연결하여 수직력을 나타냈으며, Fig. 1의 (b)는 전단력을 전단 강성계수인 K_s과 전단 완충계수η_s에 slider를 직렬방식으로 연결하여 나타냈다.

식 (1)의 $\vec{f_n}$은 임의의 시간 t에서 충돌이 발생하였을 때의 수직력을 나타내며, K_n은 수직 강성계수, u_n은 수직 방향 성분(좌표)을 나타내며, $\vec{n}$는 두 입자 사이의 수직방향 단위 벡터를 표현한다. η_n은 수직방향의 완충계수를

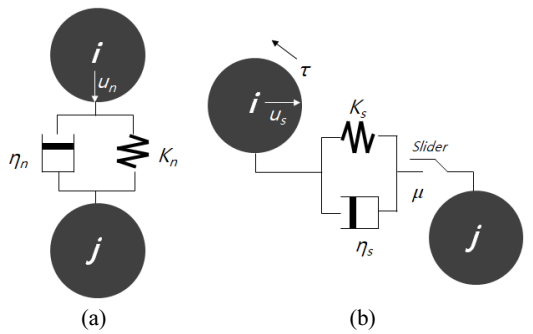


Fig. 1. The Kelvin-Voigt model (a) normal force, (b) shear force.

의미하며, $\vec{v_n}$은 임의의 시간 t의 상대 속도의 수직 성분을 나타낸다[20].

$$\vec{f_n} = K_n u_n(t)\vec{n}(t) + \eta_n \vec{v_n}(t) \quad (1)$$

또한, Fig. 1의 (b)는 마찰 작용을 표현하기 위한 slider가 추가로 연결되어 있으며, 식 (2)의 $\vec{f_s}$는 임의의 시간 t에서 충돌이 발생하였을 때의 전단력을 나타낸다. u_s은 전단방향 성분(좌표)을 나타내며, $\vec{s}$는 두 입자 사이의 전단방향 단위 벡터를 표현한다. 또한 η_s은 전단방향의 완충계수를 의미하며, $\vec{v_s}$은 임의의 시간 t의 상대 속도의 수직 성분을 나타낸다[20].

$$\vec{f_s} = K_s u_s(t)\vec{s}(t) + \eta_s \vec{v_s}(t) \quad (2)$$

식 (2)에서 나타난 $|\vec{f_s}|$가 최대 정지 마찰력$\mu|\vec{f_s}|$ (μ: Coulomb 정지 마찰 계수) 보다 큰 경우에는 미끄러짐 현상이 나타난다.

3. 실험방법

3.1. 시뮬레이션 실험 조건

본 연구에서는 산업 현장에서 가장 기본적으로 적용되는 경사 스크린을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, Fig. 2과 같이 45 × 80 cm 규격의 단위 스크린 24개로 스크린 덱을 구성하였다. 스크린 막힘 방지 스프링은 선별이 발생하지 않는 최상하부 8개의 단위 스크린을 제외한 나머지 12개의 스크린에 적용하였다.

또한, 본 연구에서 사용된 스크린 막힘 방지 장치 스프링은 스프링의 운동 특성 개선 여부를 파악하기 위해 Fig. 3과 같이 구성 물질에 따른 (A) 단일질량 스프링과 (B) 복합질량 스프링을 적용하였다. 단일질량 스프링은 총 50 cm 중 양 극단을 제외한 나머지 부분을 단위 셀로 나누어 구성하였으며, 복합질량 스프링은 단일질량 스프링의 단위 셀 보다 2~4배 질량의 큰 블록 셀 3종을 추가하여 구성하였다. 모사 실험은 오픈소스의 3D 컴퓨터 그래픽 제작 소프트웨어인 Blender Physics 3.3을 사용하였으며, 선별 입자를 적용하기 위해 Molecular Add-on 1.02를 보조적으로 활용하였다.

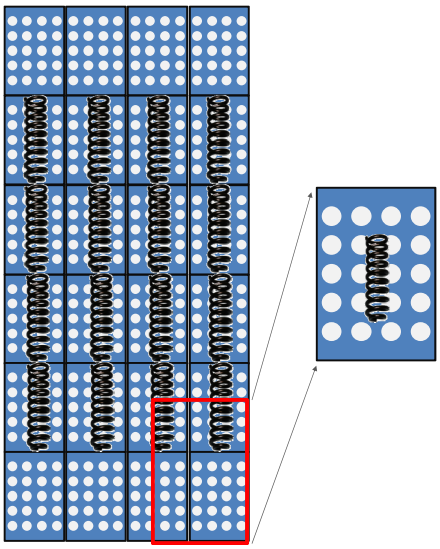


Fig. 2. DEM model of the blockage prevention installation screen.

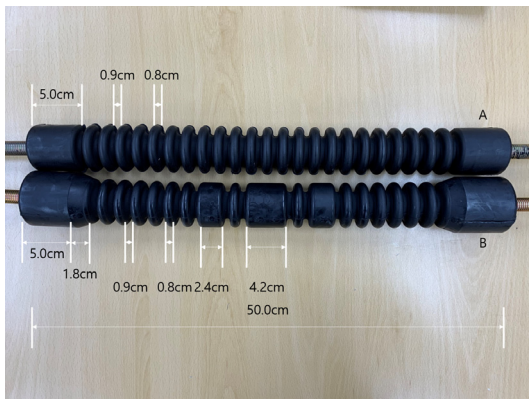


Fig. 3. The blockage prevention installation device spring ((A) mono mass (B) multi mass).

3.2. 시뮬레이션 접근법

본 연구에서는 스크린 막힘 방지 스프링과 투입 입자의 거동 특성을 각각 분석하기 위해서 Fig. 4와 같이 스프링과 입자 모델링으로 구분하여 시뮬레이션을 수행하였다. 스프링 모델링 단계에서는 구성 물질에 따라 적용된 스프링이 편심진동으로 발생시키는 진폭과 변위를 중점적으로 분석하고, 분석 결과를 통해 스프링의 물리적 운동 특성을 동일한 캠 장치로 변환하였다. 이후 캠 장치가 적용된 스크린에 입자를 투입하여 거동 특성을 확인하였다. 또한, 위 결과를 스크린 막힘 방지 스프링이 장착되지 않

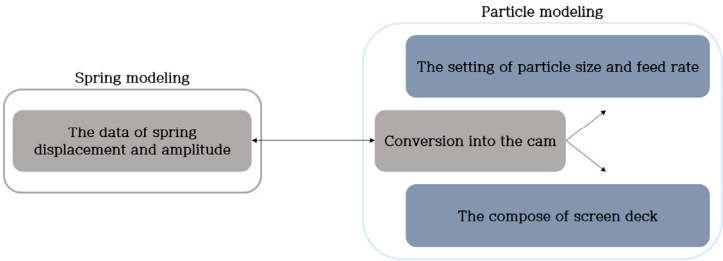


Fig. 4. The mimetic diagram of modeling approach method.

은 대조군의 입자 거동 특성 결과와 비교하여 개선점을 확인하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 스프링 모델링

4.1.1. 단일질량 스프링 모델링

앞서 3장에서 언급했던 것처럼, 본 연구에서는 스크린 막힘 방지 스프링과 입자의 운동 특성을 각각 파악하기 위해서 스프링과 입자 모델링을 구분하여 수행하였다. Fig. 5은 스프링 모델링에 적용된 단일질량 스프링을 나타내며, 실제 스프링(Fig. 3)의 모양 및 물리적 특성을 반영하였다. 단일질량 스프링 모델링 결과, 주파수 약 7.8 hz, 진폭 약 10.6 cm를 가지는 삼각함수 형태의 거동이 나타나는 것으로 확인되었다. 이에 따라, Fig. 6과 같이, 단일질량 스프링의 거동은 장축을 5.3 cm, 원심을 4.5 cm로 설정하여 7.8 hz의 주파수가 나타나도록 캠 장치로 전환하여 입자 모델링을 위한 스프링 운동으로 적용하였다.

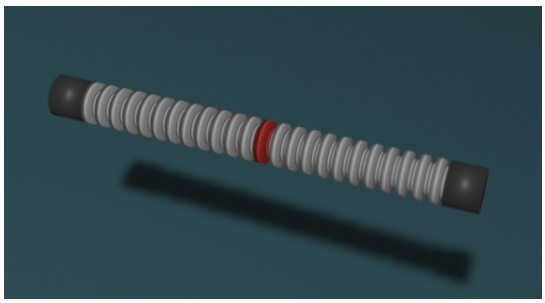


Fig. 5. The DEM model of blockage prevention unit spring.

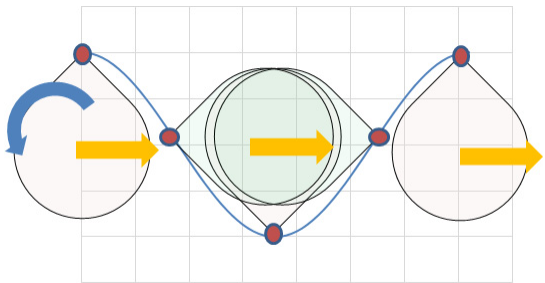


Fig. 6. A Schematic diagram of converting spring wave into the cam.

4.1.2. 단일질량 스프링 변형 각 분석

스크린 막힘 방지 장치를 적용하기 위해서, 스프링의 내구성은 매우 중요한 요인이다. 따라서 변형 취약점을 분석하기 위해 좌측 단위 셀부터 우측 단위 셀 까지 변형각(rad)을 측정하였다. 변형 각은 Kelvin-Voigt 모델의 tangential force 크기를 가늠할 수 있는 중요한 인자로 변형 각이 클수록 높은 변형 힘이 가해지는 것을 의미하며, 이는 스프링 변형 및 파손 발생 확률이 높아진다고 판단할 수 있다. Fig. 7은 최대 파동 조건에서의 단위 셀의 변형

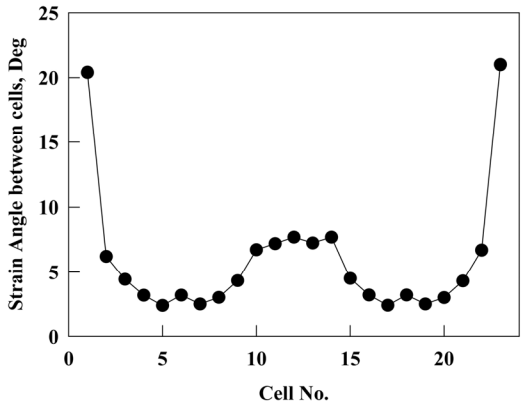


Fig. 7. The strain angle (γ) of spring in maximum wave condition.

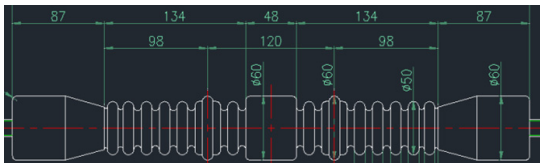


Fig. 8. The mimetic diagram of multi-mass blockage prevention spring.

각(γ)을 도시하였다. 변형 각은 양 극단에서 약 20°의 값을 갖는 것으로 나타났으며, 중앙으로 수렴할수록 감소하며, 스프링 운동의 특성으로 인해 10~14 번 단위 셀에서 약 7°의 값으로 증가되는 것으로 확인되었다. 이 결과를 통해 단일질량 스프링은 양극단의 내구성이 가장 취약한 것으로 나타났다.

4.1.3. 복합질량 스프링 시뮬레이션

단일질량 스프링의 진동 효율을 개선하기 위해 스프링의 디자인 및 구성 물질을 변경하였다. 복합질량 스프링은 Fig. 8과 같이 중앙 셀을 2.4 cm, 4.2 cm로 변경하여 단일질량 스프링 단위 셀 보다 2~4배의 질량을 가지며, 양극단은 변형 및 파손 가능성을 감소시키기 위해 2중으로 설계되었다, 복합질량 스프링 모델링 실험 결과, 주파수 약 6.7 hz, 진폭 약 8.0 cm를 가지는 것으로 분석되었다. 복합질량 스프링은 중앙 셀의 질량을 증가시켜 진동 운동의 효율을 증가시키려 하였지만, 중앙 셀의 과도한 질량으로 인해 파동의 형태가 무너지며 정상파가 생성되지 못하는 것으로 나타났다. 복합질량 스프링은 단일질량 스프링에 비해 주파수 및 진폭이 감소할 뿐만 아니라, 스크린에 원활한 파동형태가 전달되지 못하여 에너지 전달 효율이 낮을 것으로 판단되었다.

4.1.4. 복합질량 스프링 변형 각 분석

복합질량 스프링 또한 셀의 변형 취약점을 분석하기 위해 좌측 셀로부터 우측 셀 까지 단위 셀의 변형 각을 측정하여 Fig. 9에 나타냈으며, 단일질량 스프링과의 비교하였다. 단일질량 스프링 분석 결과와 유사하게 복합질량 스프링 또한 양극단에서 변형 및 파손에 가장 취약한 것으로 나타났다. 복합질량의 경우 변경된 셀의 질량이 증가로 인해 단일질량 스프링의 단위 셀보다 더 낮은 변형 각을 갖는 것으로 나타지만, 양극단의 변형 각이 약 27°로 나타났을 뿐만 아니라, 전체적인 변형 각이 증가한 것으로 나타나 단위 질량 스프링보다 변형 및 파손 가능성이 더 높을 것으로 나타났다. 또한 중앙의 복합질량 부분과 기본 셀이 만나는 6번, 10번 셀은 디자인 변경으로 인한 무게가 증가함에 따라, 파동에 의한 운동에너지가 증가하여 변형 각이 증가한 모습으로 나타났다. 따라서 스프링 운동 특성 및 변형 각 분석 결과를 통해 스크린 막힘 방지 스크린의 적용은 단일질량 스프링이 더 적절한 것으로 판단됐다.

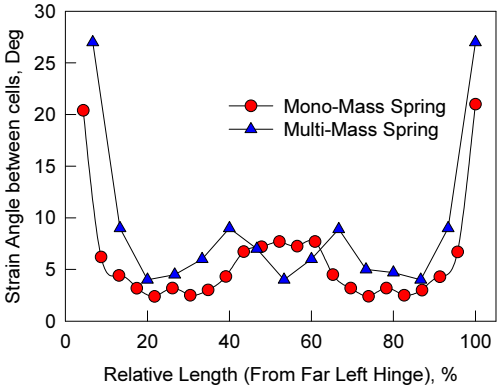


Fig. 9. The strain angle (γ) of mono-mass and multi-mass spring in maximum. wave condition.

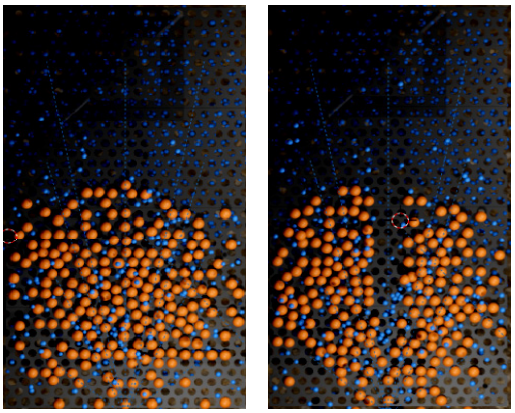
4.2. 입자 모델링

스크린 막힘 방지 스프링이 적용된 스크린 운동은 캠 장치로 전환되어, 입자 모델링에 적용되었다. 스크린 체크기의 지름은 12 mm이며, 입자의 거동 및 분리 효율을 확인하기 위해 큰 입자(황색) 1종(15 mm), 작은 입자(청색) 2종(8 mm, 7 mm)으로 모델링을 하였다. 입자는 호퍼를 통해 스크린으로 투입하였으며, 생성되는 입자의 조건은 Table 1와 같이 설정하였다. 입도분포는 정규분포로 설정하였으며, 큰 입자의 경우 14~16 mm 입자가 95 % 정도로 구성된다.

본 연구에서는 스크린 막힘 방지 스프링의 유무에 따른 입자 거동 특성을 파악하기 위해, 스프링 미설치 조건, 스프링(단일질량) 설치 조건으로 나누어 모델링을 진행하였으며, 영상분석 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 단위 frame은 0.01 s로 총 500 frame(5 s)의 모델링 결과를 특정 frame에 따라 비교하였다. 앞서 언급했던 것처럼, 스크린 상부에는 스프링이 적용되지 않았기 때문에 입자가 호퍼에서 낙하 후 1 s까지의 입자의 거동은 스프링 설치 및 미설치

Table 1. The condition of particles in the modeling

Type of particle		Standard size, mm	Standard deviation, mm	Number
C (Coarse)		15	0.5	516
F (Fine)	F (A)	8	0.5	1000
	F (B)	7	0.25	1000



(A) (B)

Fig. 10. The motion of particles classified by installation of the blockage prevention spring ((A): Non-Spring, (B): Spring, simulation time: 5 s).

조건의 차이가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이후 스프링 미설치 조건은 황색 입자들이 고르게 분포하여 일정한 속도로 하부로 이동하는 반면에, 스프링 설치 조건에서는 스프링에 의한 추가적인 진동이 계속 발생하기 때문에 스크린의 중앙에서 황색 입자가 양쪽으로 분리되는 거동이 나타난다. 이는 스프링이 입자의 거동에 영향을 미치는 것으로 확인되며, 입자의 분산성이 증가하는 것으로 판단된다.

4.2.1. 물질 흐름 분석

스크린 막힘 방지 스프링이 적용된 스프링과 기존 스크린 조건과 비교하여 스프링의 적용에 따른 입자의 흐름 개선 정도를 확인하였다. 먼저, 특정 입자의 시간에 따른 속도를 스프링 설치 유무 조건에 따라 비교 분석 하였다. Fig. 11은 각 조건에 따른 15 mm 임의의 황색입자 절대 속력을 비교한 그래프이다. 스크린 막힘 방지 스프링이 없는 조건에서는 입자의 속도가 투입 시점을 제외하면 균일한 진폭으로 발생하며, 스크린의 진동에 의해 일정한 속도로 거동하고 있는 것으로 나타났다. 스프링 설치 조

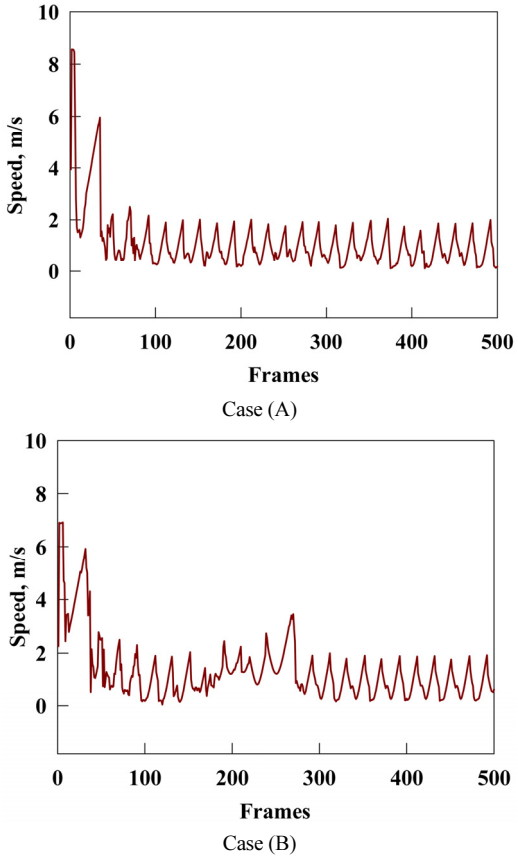


Fig. 11. The absolute speed analysis of random particle (Case (A): without spring, Case (B): with spring.

건의 경우 입자의 평균 속도는 증가하였으며, 스프링의 영향권에 진입한 2.0~3.5 s에서 운동 에너지가 증가하기 때문에 속도가 증가하는 것으로 나타났다.

또한, 전체 입자의 흐름을 파악하기 위해서 15 mm 입자의 단위 시간에 따른 이동 물질량을 확인하였으며, 3 s에서 5 s 사이의 황색 입자의 물질 흐름을 분석한 결과, 스프링 미설치 조건, 스프링 설치 조건에서 각각 522.0 kg/min, 552.0 kg/min으로 나타났다. 결과적으로 물질흐름 분석을 통해 스프링의 운동 에너지 전달로 인해 해당 입자의 물질 흐름이 약 5.4 % 개선되는 것으로 판단되었다.

4.2.2. 분리 효율 분석

스크린 막힘 방지 스크린 설치 유무에 따라 모델링된 장비들의 분리 효율을 파악하기 위하여 특정 시간에 대해 청색 입자 중 스크린을 통과한 입자들의 비율을 측정하였

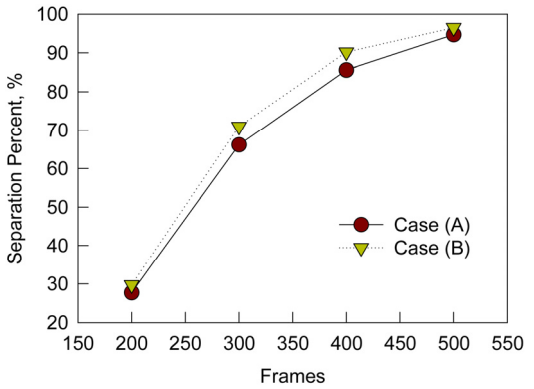


Fig. 12. The fine particle(blue, 7~8 mm) separation efficiency analysis results of Case (A) (Non-spring) and Case (B) (spring).

다(Fig. 12). 분리 초반에는 약 30.0 %로 스프링이 설치되지 않은 조건과 설치 조건 간 큰 차이가 발생하지 않았으나, 분리가 진행될수록 차이가 발생하여 최종적으로는 스프링 설치 조건, 스프링 미설치 조건 각각 94.0 %, 97.0 %로 스프링 설치 조건에서 분리 효율이 3.0 % 개선된 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서 모델링된 입자는 모사의 한계로 인해 함수 특성을 반영하지 못하였으며, 이로 인해 각 입자 간에 영향 점성이 적용되지 않았다. 실제 함수 물질을 스크린에 투입하면, 분리효율 차이로 인해 스프링 설치 조건에서 스크린 하부까지 전달되는 입자량이 감소된다. 이는 스크린을 이동하는 입자들의 선별에 영향을 미치며, 실제 분리 효율은 3.0 % 보다 더 차이가 발생될 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 DEM 기반의 모델링을 활용하여 스크린 막힘 방지 스프링이 적용된 스크린의 운동 특성을 분석하였다. 스프링의 디자인에 따라 단일질량 및 복합질량 스프링으로 구분하여 모델링하였으며, 각 조건에 따른 주파수 및 진폭을 분석하였다. 단일질량 스프링의 경우 주파수 7.8 hz, 진폭 10.6 cm로 확인되었으며, 복합질량 스프링의 경우 주파수 6.7 hz, 진폭 8.0 cm로 나타났다. 또한, 스프링의 변형 및 파손 가능성을 조사하기 위해, 최대 파형에서 발생하는 변형 각을 측정하였으며, 측정결과, 복합질량 스프링이 중앙 셀의 증가한 질량으로 인해 전반적으로 높은 값을 갖는 것으로 확인되었다. 결과적으로 스크린 막힘 방지 스프링은 단일질량 스프링이 더 적합함을 확인하였으며, 단일질량 스프링을 입자 거동 모델링에 적용하였다. 입자 모델링 결과 스프링이 설치된 조건에서 미설치 조건보다 물질 흐름 5.4 %, 분리 효율 3.0 %가 개선되는 것으로 조사됐다. 따라서 도출된 결과를 통해 스크린 막힘 방지 스프링의 적용은 기존 스크린의 개선 가능성이 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No.2022 03490003).

References

1. Raesun, P., Juseong, B., 2007 : An experimental research on the quality improvement of recycled aggregates using surface treatment method, KSCE Journal of Civil Engineering, 27(3), pp.421-426.
2. Seahyun, L,. 2005 : Policy of construction waste and recycled aggregates, pp.14-16, Magazine of the Korea Concrete Institute, Seoul.
3. Jaedong, J., Doheun, Lee, 2008 : A study for improvement of the testing methods for quality control of recycled aggregate, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 8(4), pp.105-114.
4. Gyeongsub, W., Jungho, K., Seahyun, L., et al., 2020 : A study on the quality properties when applying recycled aggregate concrete for the construction standard mitigation, Jorunal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 24(3), pp.63-69.
5. Daejoong, M., Wanjong, K., and Haksoo, K., 2010 : Improvement on the properties of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, (9), pp.117-124.
6. Wonyoung, C., Saehyun, L., and Seounghwan, K., 2017 : A comparative study on the quality of recycled aggregate for concrete by crushing method, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 5(2), pp.121-129.
7. Yongsun, H., Chunnam, P., 2015 : Quality improvement machine of Aggregates for concrete, pp.22-27, Magazine of RCR, Seoul
8. Chulsung, N., Jeongho, P., 2010 : Production facilities and

manufacturing technology of recycled aggregate, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 5(2), pp.15-20.
9. Lais, P., R., Pierluca, V., Carmenlucia, S.G.P., et al., 2017 : Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil, Journal of Cleaner Production, 151(10), pp.634-642.
10. Jaehyun, O., Misung, K., Heeduck, S., et al., 2008 : Recent status on the recycling or construction waste and research trends - The current situation of recycling technology for waste resources in Korea (4), The Korean Institute of Resources Recycling, 17(2), pp.16-29.
11. Byungyoung, M., Hyodong, B., Kwanghun, K., et al., 2008 : Vibration analysis of separation screen in a recycling plant of moisturized construction wastes, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 20(8), pp.526-533.
12. Standish, N., Bharadwaj, A. K., and Hariri-Akbari, G., 1986 : A study of the effect of operating variables on the efficiency of a vibrating screen, Powder Technology, 48(2), pp.161-172.
13. Guifeng, W., Xin, T., 2011 : Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation, Mining Science and Technology (China), 21(3), pp.451-455.
14. Błazej, D., Robert, K., 2022 : Industry Scale Optimization: Hammer Crusher and DEM Simulations, Minerlas, 12(2), pp.244-263.
15. da Cunha, E. R., de Carvalho, R. M., and Tavares, L. M., 2013 : Simulation of solids flow and energy transfer in a vertical shaft impact crusher using DEM, Minerlas Engineering, 43, pp.85-90.
16. Hansol, L., Kwanho, K., and Hoon, L., 2019 : Analysis of grinding kinetics in a laboratory ball mill using population-balance-model and discrete-element-method, Advanced Powder Technology, 30(11), pp.2517-2526.
17. Bian, X., Guoquang, W., Hongdi, W., et al., 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.
18. Chu, K., Chen, J., and Aibing, Y., 2016 : Applicability of a coarse-grained CFD–DEM model on dense medium cyclone, Minerlas Engineering, 90, pp.43-54.
19. Epaarachchi, J. A., 2011 : The effect of viscoelasticity on fatigue behaviour of polymer matrix composites, Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites, pp.492-513.
20. Mishra, B. K., Rajamani, R. K., 1992 : The discrete element method for the simulation of ball mills, Applied Mathematical Modelling, 16(11), pp.598-604.

이 한 솔

- 2019년 과학기술연합대학원대학교 자원순환공학과 공학석사
- 현재 과학기술연합대학원대학교 자원순환공학과 박사과정
- 당 학회지 제30권 5호 참조

유 명 렬

- 서울대학교 건축공학 공학박사
- 현재 (주)제로에미션 관리이사
- 당 학회지 제30권 5호 참조

이 훈

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용연구본부 책임연구원
- 당 학회지 제27권 3호 참조