지르코니아볼층 진동을 이용한 스파이스와 석회석 입자의 비중선별

유재경 · 이민지 · 김경환 · §유경근

한국해양대학교 에너지자원공학과

The Gravity Separation of Speiss and Limestone Granules Using Vibrating Zirconia Ball Bed

Jae Kyoung Yoo, Minji Lee, Gyeong Hwan Kim and §Kyoungkeun Yoo

Dept. of Energy & Resources Engineering, Korea Maritime and Ocean University

요 약

이 연구에서는 1 mm의 지르코니아볼(5.6 g/cm³)층을 진동시켜 스파이스(6.74 g/cm³)와 석회석(2.7 g/cm³) 입자가 지르코니아볼층을 매체로 비중선별이 가능한지 조사하였다. 진동세기를 18 Hz부터 26 Hz까지 변화시켜 스파이스와 석회석의 입자개수 증가에 따른 부유율과 분리효율을 분석하였다. 진동 중 지르코니아볼은 용기내부를 순환하며, 스파이스는 지르코니아볼과 함께 가라앉지만 석회석 입자는 지르코니아볼 표면에 잔존하였다. 스파이스와 석회석의 입자 개수가 증가할수록 입자가 가라앉는 경로에 정체현상이 발생하여 입자가 가라앉는 속도가 감소하며, 스파이스 입자와 겹쳐진 석회석 입자가 같이 가라앉는 현상도 발생하였다. 따라서 입자개수가 증가할수록 스파이스와 석회석의 분리효율은 감소하나, 진동세기가 증가하면 정체현상이 해소되어 분리효율이 증가하는 현상이 관찰되었다. 특히 각 3개의 입자를 투입한 경우 22 Hz에서 100 %의 분리효율이 관찰되어 건조공정이 요구되지 않는 건식 비중선별 공정이 가능한 것이 확인되었다.

주제어 : 비중선별, 스파이스, 석회석, 지르코니아볼, 진동볼층

Abstract

In the present study, gravity separation of speiss (6.74 g/cm³) and limestone (2.7 g/cm³) was investigated using a vibrating 1 mm-zirconia ball (5.6 g/cm³) bed as a medium. The floating ratio and separation efficiency with increasing the number of speiss and limestone granules were examined by changing the vibration frequency from 18 Hz to 26 Hz. During the vibration, the zirconia balls circulate inside the vessel, and the speiss granules sink with the zirconia balls, but limestone granules remain on the surface of the zirconia ball bed. As the number of particles of speiss and limestone granules increased, it was observed that the granules were congested in the path of the granule sinking, so the rate of particle sinking decreased, and that limestone granules overlapping with the speiss granule also sunk. Therefore, the separation efficiency decreases with increasing the number of granules, but when the vibrational frequency increases, there is no more congestion and the separation efficiency increases. When each of the three particles was added, a separation efficiency of 100% was achieved at 22 Hz, which indicates that a dry gravity separation process that does not require a drying process is possible.

Key words : gravity separation, speiss, limestone, zirconia ball, vibrating ball bed

· Received : May 4, 2020 · Revised : June 9, 2020 · Accepted : June 18, 2020

§ Corresponding Author : Kyoungkeun Yoo (E-mail : kyoo@kmou.ac.kr)

Department of Energy and Resources Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Youngdo-gu, Busan 49112, 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

TSL (Top Submerged Lance) 공정은 Ausmelt법과 ISAMELT™법이 있으며 원통형인 노(Furnace)에 위로 부터 랜스(lance)를 넣어 연료와 산소부화 공기 등을 공급 하는 방식으로 산업 부산물 등을 처리하는데 매우 유효한 공정이다¹⁾. 아연의 습식제련공정에서는 원료인 섬아연광 (ZnS, sphalerite)의 정광을 배소한 후 배소광(ZnO)을 침 출하여 분리정제공정을 거쳐 아연금속을 생산한다²⁾. 침 출공정에서 발생하는 합철 침출잔사 등의 공정부산물을 TSL 공정에서 처리하는데, 철 등의 불순물은 슬래그로, 귀금속 및 구리는 스파이스로 회수한다. 스파이스 배출시 슬래그가 혼입되는 경우가 있는데, 슬래그의 주 성분인 철은 이후 구리회수공정 등에서 품질저하의 문제를 발생 시킬 수 있으므로 철저한 분리가 필요하다.

비중선별은 밀도가 서로 다른 물질이 점성유체(주로 물) 내에서 외력(주로 중력)을 받으면 비중(밀도)차에 의 해 서로 다른 침강속도를 나타내는데 이 원리를 이용하여 분리하는 공정이다^{3,4)}. TSL 공정에서 슬래그와 스파이스 는 비중차에 의해 분리되기 때문에 슬래그가 혼입된 스파 이스로부터 슬래그 성분을 분리하는 것은 비중선별로 가 능하리라 생각된다. 비중선별은 매체로 물을 사용하기 때 문에 비중선별공정 후 건조 공정이 필수적이다. 따라서 물을 사용하지 않는 건식 비중선별공정의 개발이 요구되 고 있다.

진동입자층(vibrating particle bed) 중 입자의 거동을 예측하기 위한 연구가 다수 수행되어 왔다. 대표적인 거 동은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 대류이동(convection) (Fig. 1(a))과 브라질넛 효과(Brazil nut effect) (Fig. 1(b))로서 진동 중에 입자는 용기내를 순환하며, 밀도가 동일한 경 우 큰 입자가 작은 입자 위에 위치하게 된다는 내용이다⁵⁾. 그러나 진동층을 구성하는 입자보다 무거운 입자는 진동 층의 하부에 위치하게 되는 역 브라질넛 효과(reverse Brazil nut effect)도 보고되었다⁶⁾. 이와 같은 역 브라질넛 효과를 이용하여 재활용에 적용하고자 하는 연구가 모의 알루미늄과 마그네슘 블록을 이용하여 진행되어 분리효율이 100%에 이르는 것이 보고되었다^{7,8)}.

본 연구에서는 스파이스와 슬래그를 분리하기 위해 지 르코니아볼 진동층을 이용한 비중선별 공정을 조사하였 다. 스파이스와 슬래그 입자의 형상과 색이 비슷하기 때

Fig. 1. Convection and 'Brazil nut effect' during vibrating the ball bed.

문에 구별을 용이하게 하기 위해 슬래그 대신 석회석 입자 를 사용하였다. 진동수(vibrational frequency)와 입자 투 입개수를 변화시켜 석회석과 스파이스 입자의 부유율 (floatating ratio)과 분리효율(separation efficiency)을 평 가하여 스파이스와 석회석 입자의 분리거동을 조사하였다.

2. 실험방법

스파이스는 국내 아연제련공장에서, 그리고 석회석은 국내 단양 소재 광산에서 확보하였다. 시료는 모두 적절한 크기로 파쇄한 후 직경 1 mm의 지르코니아볼을 이용 해 스파이스와 석회석 입도의 영향을 조사하여 15 mm × 5 mm × 5 mm 크기의 스파이스와 석회석 입자가 분리실 험에 사용되었다. 스파이스, 석회석, 지르코니아볼의 밀도 는 피크노미터를 이용해 측정되었으며, 각각 6.74 g/cm³, 2.7 g/cm³, 5.6 g/cm³이었다. 진동용기는 내경이 8 cm, 높 이가 13 cm였으며, 진동층(지르코니아볼)의 높이를 5 cm 로 한 후, 각 입자를 지르코니아볼층 위에 놓은 후 실험을 시작하였다. 체질용의 진동기를 이용하였으며, 진동세기 는 18 Hz에서 26 Hz로 조절하여 진동을 가하였다. 상기 에서 설명한 바와 같이 지르코니아볼은 진동 중 순환하기 때문에 진동세기에 따른 순환주기를 별도의 실험을 통하 여 측정하였다. 즉, 따로 표시를 한 지르코니아볼이 어느 시간이 흐른 후 제자리로 돌아오는지 측정한 후, 이의 1/2 이 되는 시간을 각 진동세기의 선별실험시간으로 정하였 다. 실험 후 진동볼층 상부에 남아있는 입자개수를 확인 하여 스파이스와 석회석의 부유율(floating ratio, F)을 계 산하였다^{7,8)}.

Table 1. The effect of granule size on the separation of speiss and limestone

Size	0.85 mm	0.85 mm - 1.18 mm	1.18 mm - 2 mm	2 mm - 5 mm
Success/fail	×	×	×	○
5 mm - 10 mm	10 mm - 15 mm	15 mm - 20 mm	20 mm - 25 mm	+ 25 mm
○	○	○	×	×

$$F(\%) = (N_{float}/N_{all}) \times 100 \quad (1)$$

여기서, F , N_{float} , N_{all} 와 각각 부유율, 진동실험 후 지르코니아볼층위에 남은 입자 개수, 진동실험에 투입된 총 입자 개수를 나타낸다. 모든 분리실험은 5회 실시하고, 5회 부유율의 평균으로 값을 나타내었다. 스파이스와 석회석의 부유율을 이용하여 다음과 같이 분리효율(separation efficiency, S)을 계산할 수 있다^{7,8)}.

$$S(\%) = (F_{LS} \times (100 - F_{SP}))^{1/2} \quad (2)$$

여기서, S , F_{LS} , F_{SP} 는 각각 분리효율, 석회석 입자의 부유율, 그리고 스파이스 입자의 부유율을 나타낸다.

3. 실험결과 및 토론

TSL 고정에서 스파이스를 회수할 때 슬래그가 혼입되는 경우에도 스파이스와 슬래그는 순차적으로 배출되기 때문에 파분쇄에 의해 단체분리가 가능하여 비중선별 적용이 가능하다. 기존 연구에 의하면 볼층을 구성하는 볼의 크기와 분리대상 시료 크기의 비가 중요한 실험요소 중 하나이다⁹⁾. 따라서 볼층을 구성하는 지르코니아볼의 크기를 1 mm로 고정된 후, 스파이스와 석회석 시료크기를 변화시켜 예비 분리실험을 수행한 후, 분리경향이 나타나는지를 Table 1에 정리하였다. 실험결과 약 2 mm - 20 mm의 크기에서 분리되는 경향이 확인되어 최종적으로 15 mm × 5 mm × 5 mm의 스파이스와 석회석 입자를 준비하여 분리실험에 사용하였다.

기술한 바와 같이 진동 중 용기내의 볼은 순환하는 경향을 나타내며⁵⁾, 본 연구에서는 각 진동세기(vibrational frequency)에 따른 진동주기를 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. 진동세기가 증가할수록 볼이 1 순환하는데 필요한 시간은 급격히 감소하며, 대체적으로 지르코니아볼보다 밀도가 적은 석회석은 지르코니아볼층 위에 잔존하고,

Fig. 2. Time for 1 cycle in the function of vibrational frequency.**Table 2.** Time for half cycle in the function of vibrational frequency

Vibrational frequency	18 Hz	20 Hz	22 Hz	24 Hz	26 Hz
Time for half-cycle	62 sec	26 sec	10 sec	8 sec	7 sec

Fig. 3. Speiss and limestone granules on the zirconia ball bed (a) before and (b) after vibration test.

스파이스는 지르코니아볼과 함께 표면으로부터 사라진다. 따라서 1/2 순환하는 시간을 각 진동세기의 실험시간으로 하여 Table 2에 정리하였고, 이후 분리실험에 적용하였다.

Fig. 3에 지르코니아볼층의 진동을 이용한 스파이스와 석회석 입자 분리 결과의 예를 나타내었다. 실험전(Fig. 3(a)) 지르코니아볼층 위에 각 1개씩 스파이스와 석회석 입자를 놓고, 진동실험 후(Fig. 3(b)) 볼층 위에는 석회석

Fig. 4. The floating ratios of speiss and limestone granules ((a) 1 ea, (b) 3 ea, (c) 5 ea, (d) 7 ea, and (e) 9 ea) in the function of vibrational frequency using zirconia ball bed.

입자만이 남아있는 것이 관찰 가능하다. 스파이스와 석회석 입자의 개수를 각각 1개, 3개, 5개, 7개, 9개를 지르코니아볼 층 위에 놓고, 진동세기를 18 Hz – 26 Hz조절하여 실험을 진행한 후 스파이스와 석회석의 부유율 결과를 Fig. 4과 Fig. 5에 나타내었다. 즉, 스파이스와 석회석 입자 3개씩 놓으면 총 6개의 입자가 지르코니아볼층 위에 위치하게 된다.

Fig. 4(a)는 스파이스와 석회석 입자 1개씩 이용한 분리실험 결과를 나타내었으며, Fig. 3에 나타난 바와 같이 실험 후 석회석 입자는 볼층 위에 남고, 스파이스는 가라앉는다. Fig. 4(a)에서 알 수 있듯이 진동세기에 관계 없이 모든 실험에서 분리가 가능함을 나타낸다. Fig. 4(b)부터 Fig. 4(e)는 입자 개수를 증가시키며 실험한 결과이다. 당 실험에서 사용한 진동기는 좌우로 진동을 발생시키며 입

자는 벽으로 이동한 후 가라앉은 입자는 벽을 따라 하부로 이동하는 지르코니아볼과 함께 가라앉는다. 이 때 주로 스파이스 입자가 지르코니아볼과 함께 가라앉아 입자층 표면으로부터 사라지지만 이동에 의해 스파이스 입자와 석회석 입자가 겹치는 경우, 석회석 입자가 스파이스 입자와 함께 가라앉는 현상도 관찰되었다. 또한 입자가 증가하면 가라앉는 경로의 정체에 의해 스파이스 입자가 가라앉는 속도가 늦어지는 현상도 관찰되었다.

Fig. 5에 각 진동세기실험에서 입자 개수에 따른 스파이스와 석회석의 부유율을 나타내었으며, Fig. 5(a)부터 Fig. 5(e)까지 진동세기가 18 Hz부터 26 Hz까지의 분리 실험결과를 나타낸다. 모든 결과에서 입자 개수가 증가함에 따라 석회석의 부유율이 감소하는 것을 알 수 있으며, 이는 상기에서 설명한 바와 같이 스파이스 입자와 겹치면

Fig. 5. The floating ratios of speiss and limestone granules in the function of number of granules with various vibrational frequency (a) 18 Hz, (b) 20 Hz, (c) 22 Hz, (d) 24 Hz, and (e) 26 Hz) using zirconia ball bed.

서 가라앉았기 때문으로 생각된다. 이에 비해 Fig. 5(a)에서 스파이스의 부유율은 입자개수가 증가하면서 증가하며, 이 역시 상기에 설명한 바와 같이 입자가 가라앉는 경로에 정체되면서 표면에 잔존하는 스파이스 입자 개수가 증가한 것이 원인으로 파악된다. Fig. 5(c)부터 Fig. 5(e)에서는 입자개수와 상관없이 스파이스의 부유율은 매우 낮게 나타나는데, 이는 진동세기가 증가하며 정체현상이 해소된 것이 원인으로 생각된다. Fig. 5(b)에서 스파이스의 부유율은 증가후 감소하는데, 이는 정체현상에 의해 부유율(표면에 잔존하는 개수)이 증가하나 석회석입자가 가라앉으며 정체현상이 해소되는 것이 이후 부유율 감소의 원인으로 생각된다.

Fig. 6에 스파이스와 석회석의 분리효율을 진동세기에 따라 나타내었다. 입자를 각 1개씩 사용한 경우 모든 경우

Fig. 6. The separation efficiency in the function of vibrational frequency.

에서 100%의 분리효율을 나타내었으며, 각 3개의 입자를 사용한 경우 22 Hz의 진동세기 조건에서 100%의 분리효율을 나타내었다. 진동세기가 증가함에 따라 분리효율이 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 상기에서 기술한

Fig. 7. The separation efficiency in the function of number of speiss and limestone granules.

바와 같이 진동세기가 증가함에 따라 정체현상이 해소되면서 스파이스 입자가 하부로 이동한 것이 원인이다. Fig. 7에 스파이스와 석회석의 분리효율을 입자 개수에 따라 나타내었다. 입자 개수가 증가함에 따라 분리효율이 감소하는 경향이 뚜렷이 나타나며, 이는 상기에 기술한 바와 같이 입자경로에서의 입자 정체현상, 그리고 석회석 입자가 스파이스 입자와 함께 가라앉는 현상이 원인으로 생각된다. 따라서 입자 개수가 증가할 때는 충분한 진동세기로 정체현상을 해소할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

TSL 공정에서 배출되는 슬래그와 스파이스 혼합물의 선별공정 개발을 위해 슬래그를 대체해서 석회석과 스파이스 분리 실험을 진행하였고, 기존 물을 사용하여 건조가 필요한 비중선별을 대체하기 위해 진동충을 이용한 분리공정을 개발하였다.

1 mm의 지르코니아볼을 매체로 하여 진동세기를 18 Hz부터 26 Hz까지 증가시켜 입자개수 증가에 따른 스파이스와 석회석의 부유율과 분리효율을 분석하였다. 진동 중 지르코니아볼은 용기내에서 대류현상을 나타내며, 스파이스는 지르코니아볼과 함께 가라앉는 현상이 나타났다. 스파이스와 석회석의 입자 개수가 증가할수록 가라앉는 입자의 경로에 정체현상이 발생하여 입자가 가라앉는 속도가 감소하며, 스파이스 입자와 겹쳐진 석회석 입자가 같이 가라앉는 현상도 발생하였다. 따라서 입자개수가 증가할수록 스파이스와 석회석의 분리효율은 감소하나, 진

동세기가 증가하면 정체현상이 해소되어 분리효율이 증가하는 현상이 관찰되었다. 특히 각 3개의 입자를 투입한 경우 22 Hz에서 100 %의 분리효율이 관찰되어 건조공정이 요구되지 않는 건식 비중선별 공정이 가능한 것이 확인되었다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원 위탁연구사업의 지원으로 수행되었습니다. 지원해주신 관계자분께 감사드립니다.

References

1. Sohn, H., 2019 : Current Status of Zinc Smelting and Recycling, Journal of Korean Institute of Resources Recycling, 28(5), pp.30-41.
2. Choi, S., Nguyen, T.T., Yoo, K., 2018 : Ni Cementation Followed by Magnetic Separation for Recovery of Unreacted Zn from by-products of Zn Smelting Process, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 55(2), pp.121-126.
3. Lee, S., Yoo, K., 2019 : Current Status of the Technical Development for Recover Mineral Resources on the Moon, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 56(6), pp.665-675.
4. Ito, M., Takeuchi, M., Saito, A., et al., 2019 : Improvement of hybrid jig separation efficiency using wetting agents for the recycling of mixed-plastic wastes. J. Mater. Cycles Waste Manag., 21, pp.1376-1383.
5. Kudrolli, A. 2004 : Size separation in vibrated granular matter. Rep. Prog. Phys., 67, pp.209-247.
6. Hong, D.C. 2001 : Quinn, P.V.; Luding, S. Reverse Brazil nut problem: competition between percolation and condensation. Phys. Rev. Lett., 86, p.3423.
7. Itoh, S., Tsujita, K., Morishige, T., et al., 2018 : The Effect of Vibration Condition for Magnesium Dry Gravity Sorting by Vibrating Particulate Bed. Mater. Sci. Forum., 941, pp. 1535-1539.
8. Morishige, T., Tsujita, K., Murasa, S., et al., 2015 : Magnesium Sorting by Vibrating Particulate Bed from Mixed Metal Scrap. Mater. Trans., 56, pp.1756-1758.

유재경

- 한국해양대학교 에너지자원공학 공학사
- 현재 한국해양대학교 에너지자원 공학과 석사과정 재학중
- 현재 에코프로 지이엠 대리

이민지

- 한국해양대학교 에너지자원공학과 공학사

김경환

- 한국해양대학교 에너지자원공학과 공학사

유경근

- 한양대학교 자원공학과 공학사
- 한양대학교 자원공학과 공학석사
- Hokkaido University 공학박사
- 한국지질자원연구원 선임연구원
- 현재 한국해양대학교 에너지자원 공학과 교수