

습식사이클론을 이용한 광물찌꺼기의 정밀분급과 탈수

김종걸 · *유경근 · 최홍일* · 최의규* · 박제현* · Richard Diaz Alorro**

한국해양대학교 에너지자원공학과
*한국광해관리공단 광해기술연구소

**Curtin University Department of Metallurgical and Mineral Engineering

Fine Particle Classification and Dewatering of Tailing Using Hydrocyclone

Jonggeol Kim, *Kyoungkeun Yoo, Hongil Choe*, Uikyoo Choi*, Jayhyun Park*
and Richard Diaz Alorro**

Department of Energy and Resources Engineering, Korea Maritime and Ocean University

**Institute of Mine Reclamation Technology, Mine Reclamation Corporation*

***Department of Metallurgical and Mineral Engineering, Curtin University*

요 약

광물찌꺼기의 효율적인 활용을 위하여 부유선별공정에서 배출되어 1차 분급된 시료를 대상으로 정밀분급을 실시하였다. 0.1 MPa - 0.3 MPa의 주입압력(공급유량)과 5% - 15%의 광액농도 조건에서 2인치 습식사이클론을 이용하여 분급시험을 진행한 결과, 주입압력 (공급유량)이 감소할수록 광액농도가 증가할수록 분리입도는 증가하였다. 광액농도 5%와 주입압력 0.3 MPa의 조건에서 overflow와 underflow의 평균입도는 각각 6.56 μm 와 55.45 μm 를 나타내었다. 분급효율은 광액농도를 증가시키거나 주입압력을 감소시킬수록 이상적인 분급효과에 근접하였다. 광액농도가 증가할수록 탈수효과는 증가하며, 주입압력에 따른 변화는 크지 않았다. 광액농도 15 %와 주입압력 0.3 MPa의 조건에서 underflow의 함수율은 27.9%로 나타났다.

주제어 : 습식사이클론, 광물찌꺼기, 탈수, 정밀분급

Abstract

Fine particle classification was performed using products obtained from primary classification process after flotation for efficient application of tailing. The cut size increased with decreasing input pressure from 0.1 MPa to 0.3 MPa and increasing pulp density from 5% to 15% using 2-inch hydrocyclone. The median sizes of overflow and underflow were 6.56 μm and 55.45 μm , respectively at 0.3 MPa with 5% pulp density. The imperfection became closed to ideal separation with increasing the pulp density and decreasing the input pressure. The water content decreased with increasing the pulp density, but the effect of input pressure could be ignored. The water content of underflow was 27.9% at 0.3 MPa with 15% pulp density.

Key words : hydrocyclone, tailings, dewatering, fine particle classification.

· Received : June 29, 2015 · Revised : July 14, 2015 · Accepted : July 27, 2015

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

Department of Energy and Resources Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Taejong-ro 727, Youngdo-gu, Busan, 606-791 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

광물찌꺼기(광미, tailings)는 선광공정에서 정광을 생산하고 남은 폐기물 또는 부산물을 통칭하며 주로 광미담에 적치되는 방식으로 처분된다.^{1,2)} 국내 폐광산은 2009년 기준으로 1,357개소(석탄광 제외)에 이르며, 광물찌꺼기 적치량은 약 1억톤으로 집계하고 있다.³⁾ 국내 168개소의 후·폐금속 광산에 대한 정밀조사를 실시한 결과, 104개 광산에서 오염기준을 초과한 것으로 보고되어 광물찌꺼기에 대한 적절한 처리가 요구되고 있다.³⁾ 국내에서는 한국광해관리공단에서 기술개발 및 광해방지 사업을 진행하여 광물찌꺼기의 잠재적 위험성을 저감시키기 위한 노력을 진행해왔다.

광물찌꺼기의 처리방법은 오염원 격리, 정화기술에 의한 처리, 갭내 충전에 의한 처리, 재활용 기술적용으로 대별할 수 있다.⁴⁾ 이 중 재활용 기술을 적용할 경우, 중금속 성분을 광물찌꺼기로부터 원천적으로 제거 가능하여 잠재적 오염 우려의 해소가 가능하다. 광물찌꺼기로부터 중금속 성분을 제거할 경우 다량의 점토성분이 발생하게 되며, 이를 활용하는 연구도 다수 수행되어 왔다.⁴⁾ 비금속 성분을 활용하기 위한 요소 중 입자크기는 중요한 인자이며, 정밀분급을 위한 기술이 요구되어 왔다.

습식사이클론(hydrocyclone)은 원심력을 이용하여 입자의 침강속도를 가속하여 입자와 입자를 분리하는 분급 또는 입자와 액체를 분리하는 탈수 용도로 활용하는 장치다.⁵⁾ 특히 미립자를 취급할 때 매우 효과적이며, 처리용량에 비해 설치면적이 작고 동력이 적게 드는 장점이 있다. 습식사이클론의 처리가능 입도는 주로 사이클론 내경에 의해 결정되며, 이외에 주입구의 직경, 상부 배출구인 vortex finder의 직경, 하부배출구인 apex valve의 직경, 사이클론의 높이 등이 분급성능에 영향을 미치며, 운전조건으로서 광액농도, 주입유량, 압력손실(pressure drop)이 알려져 있다.

본 연구에서는 국내 금속광산에서 75 μm 이하의 크기로 1차 분급된 시료를 대상으로 2인치 습식사이클론을 이용한 분급실험을 실시하였다. 광액농도와 주입압력을 조절한 주입유량을 변수로 하여 분급실험을 실시하고, overflow와 underflow의 입도분포를 조사하였으며, 이를 분급성능곡선으로 나타내어 분급효과를 검증하였다. 또한 overflow와 underflow 각각의 함수율을 측정하여 탈수효과 또한 조사하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 시료는 국내 D광산의 선광공정에서 배출된 광물찌꺼기이며, 현장에서 20인치 습식사이클론으로 분급된 overflow 시료를 사용하였다. 분급실험에 사용된 습식사이클론시스템은 2인치 습식사이클론을 장착하였으며, Fig. 1에 분급시스템의 모식도를 나타내었다. 광액농도가 조절된 시료를 탱크에 넣은 후 펌프를 가동시키면 현탁액은 습식사이클론으로 이동하게 되며, 이 때 바이패스관의 밸브를 조절하여 습식사이클론에 공급되는 현탁액의 양을 조절하게 된다. 습식사이클론에 공급되는 양은 압력계를 통하여 정량화할 수 있다. overflow와 underflow로 분급된 시료는 탱크로 낙하하여 재순환되는 시스템이며, 조건을 부여하고 5분 후 overflow와 underflow의 시료를 각각 채취하여 분석을 실시하였다. 입도분석은 Microtrac사의 S3500 입도분석기를 사용하여 분석하였고, 함수율은 Sartorius사의 MA 150 수분측정기를 사용하여 측정하였다.

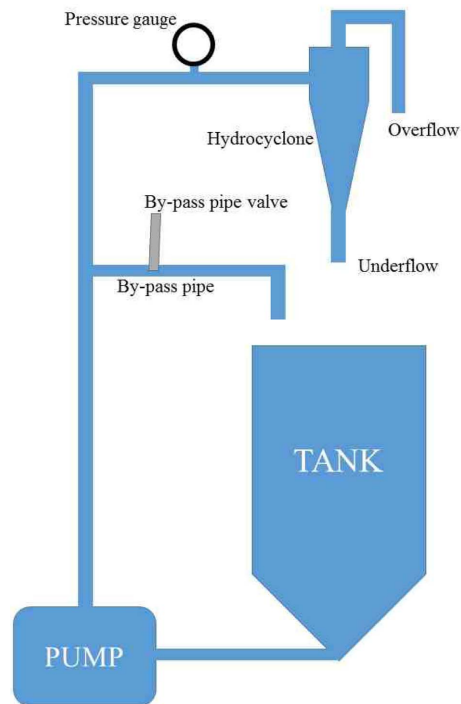


Fig. 1. Schematic diagram of hydrocyclone classification system.

3. 실험결과 고찰

본 연구에서 사용한 시료를 채취한 국내 D광산에서는 광물찌꺼기를 다음과 같은 공정을 통해 처리한다. 우선 20인치 습식사이클론을 사용하여 분급을 실시하며 이 때 분리입도(cut size)는 75 μm 정도이다. Underflow 산물은 75 μm 이상의 입자를 포함하며, 탈수 스크린 공정을 거쳐 최종적으로 25% 전후의 함수율 상태로 광물찌꺼기 창고에 적재된다. Overflow 산물은 75 μm 이하의 입자를 포함하며, 침강조와 필터프레스를 거쳐 최종 산물로 적재된다. 당 연구에서는 20인치 습식사이클론의 overflow 산물에 대해 정밀분급을 실시하여 침강조와 필터프레스에 대한 부하를 줄이고 좀 더 다양한 사이즈로 분급된 산물을 얻기 위해 실시되었다.

Fig. 2에 원시료와 2인치 습식사이클론을 광액농도 15%, 주입압력 0.1 MPa로 운전하여 얻은 산물의 입도 분포를 나타내었다. 원시료의 일부 입자는 80 μm에 소량 분포하고 있으나 대부분 75 μm 이하 입자에 분포하여 현재 운영 중인 20인치 습식사이클론 분급이 적절히 수행되었던 것을 알 수 있다. 당 실험에서 2인치 습식사이클론으로 실험한 결과로부터 overflow 산물과 underflow 산물의 입도분포에서 겹치는 구간과 양이 15.56 μm - 26.16 μm에서 7%에 불과해 분급이 비교적 잘 이루어진 것을 알 수 있었다.

Fig. 3과 Fig. 4에 광액농도 5%에서 15%까지, 주입압력을 0.1 MPa에서 0.3 MPa까지 조절하여 분급한 시료의 overflow와 underflow 평균입도(median diameter, d_{50})를 각각 나타내었다. 일반적으로 습식사이클론의 운전조건을 조정함에 따라 분리입도의 조절이 가능하며, 광액농도는 분리입도에 비례하나 압력손실 (pressure

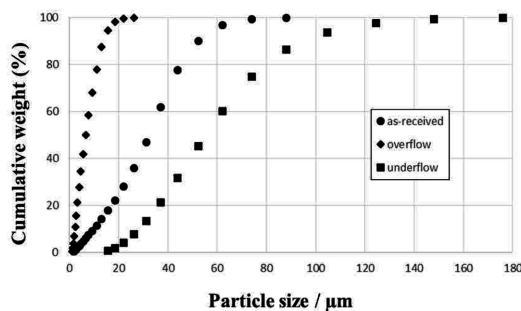


Fig. 2. The particle size distribution of as-recieved sample and products obtained at 0.1 MPa with 15% pulp density using 2-inch hydrocyclone.

drop)과 유량은 분리입도에 반비례하는 것으로 알려져 있다. 분리입도가 증가하는 것은 overflow로 배출되는 양이 증가하여 overflow와 underflow의 평균입도가 증가하는 것을 의미한다. Fig. 3와 4에서 알 수 있듯이 overflow와 underflow 산물 모두 주입압력(공급유량)이 증가할수록, 광액농도가 감소할수록 분리입도가 감소하는 것을 알 수 있으며, 광액농도 15%, 주입압력 0.1 MPa의 조건에서 overflow와 underflow의 평균입도는 각각 6.56 μm과 55.45 μm이나, 광액농도 5%, 주입압력 0.3 MPa의 조건에서 overflow와 underflow의 평균입도는 각각 3.89 μm과 24.91 μm로 습식사이클론의 분리이론과 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에 5% 광액농도의 조건에서 수행한 2인치 습식사이클론 분급실험의 결과를 주입압력에 따라 트롬프 곡선으로 나타내었다. 10%와 15%의 광액농도 조건에서 동일한 작업을 반복한 후, 다음 식에 의해 분급효율을 평가하였다.

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}} \quad (1)$$

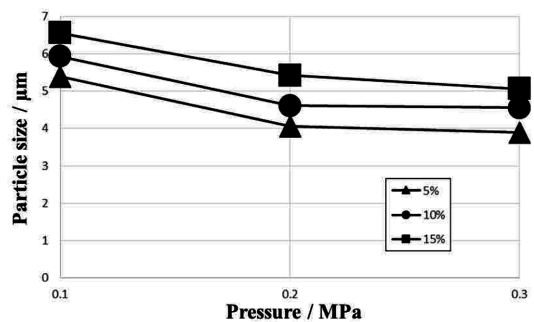


Fig. 3. The median diameters of overflow products with pulp density and input pressure.

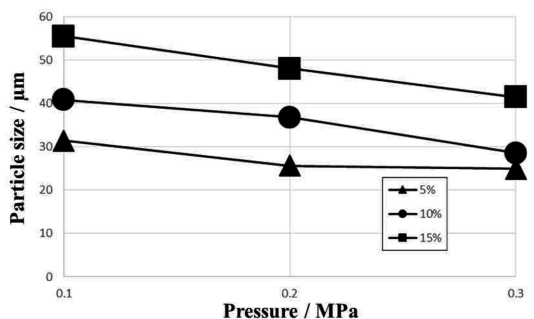


Fig. 4. The median diameters of underflow products with pulp density and input pressure.

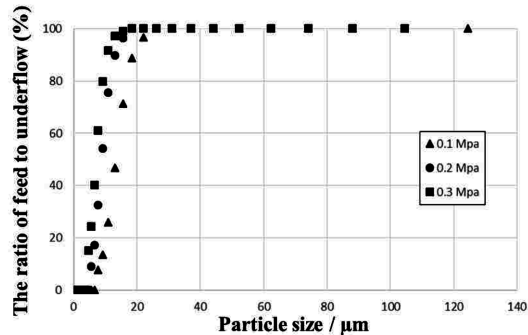


Fig. 5. Tromp curves of hydrocyclone products with input pressure at 5% pulp density.

여기서 I_n 는 분급효율 (imperfection)이다.¹⁾ 트롬프곡선에 의해 분석된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 식에서 알 수 있듯이 75%와 25% 통과입도의 차이가 작을수록 이상적인 분급에 가까운 것으로 평가될 수 있으며, Fig. 6에서 광액농도를 증가시킬수록, 그리고 주입압력을 감소시킬수록 분급효율의 수치가 감소하여 이상적인 분급효율에 근접하고 있는 것을 나타내고 있다.

당 연구에서는 습식사이클론을 사용하여 분급효율 뿐만 아니라 탈수효율도 분석하였다. 2인치 습식사이클론 분급 후 underflow의 함수율을 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. 광액농도가 증가할수록 탈수효과가 큰 것을 알 수 있으며, 5%의 광액농도에서는 주입압력이 증가할수록 함수율이 감소하여 탈수효과가 현저하나 10%와 15%의 광액농도에서는 함수율의 변화가 크지 않았다. 2인치 습식사이클론을 사용하여 광액농도 15%, 주입압력 0.3 MPa의 조건에서 수행한 결과 underflow의 함수율은 27.9%를 나타내었다.

4. 결 론

선광공정에서 배출된 광물찌꺼기를 1차 분급한 시료를 대상으로 정밀분급을 실시하여 분급 및 탈수실험을 진행하였다. 5% - 15%의 광액농도와 0.1 MPa - 0.3 MPa의 주입압력 조건에서 분급시험을 진행한 결과, 주입압력 (공급유량)이 증가할수록 광액농도가 감소할수록 분리입도는 감소하는 경향을 나타내었다. 광액농도 5%와 주입압력 0.3 MPa의 조건에서 overflow와 underflow의 평균입도는 각각 6.56 μm와 55.45 μm이었다. 분급효율은 광액농도를 증가시키거나 주입압력을 감소시킬수록 분급효율의 수치가 감소하였다. 탈수효과를 분석

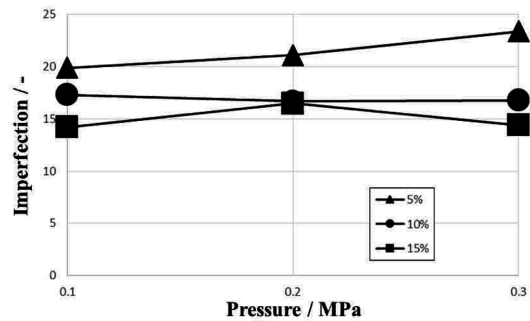


Fig. 6. Imperfection with pulp density and input pressure.

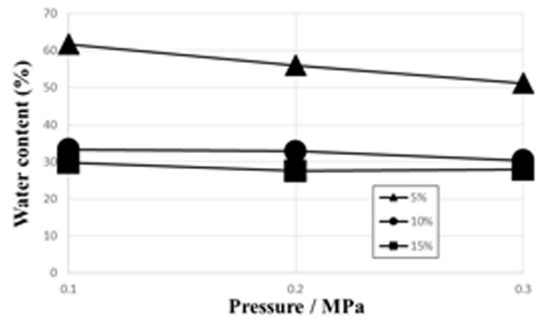


Fig. 7. Water content in underflow product with pulp density and input pressure.

한 결과 광액농도가 증가할수록 탈수효과는 증가하며, 주입압력에 따른 변화는 크지 않았다. 광액농도 15%와 주입압력 0.3 MPa의 조건에서 underflow의 함수율은 27.9%로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 한국산업기술평가관리원 기술료지원사업의 지원에 의해 수행되었습니다. 당 연구를 지원해주신 관련자분들께 감사드립니다.

References

1. Wills, B. A. and Napier-Munn, T. J., 2006: Wills' Mineral Processing Technology, Seventh edition, pp. 214, 400-408, Butterworth-Heinemann publication, Amsterdam, Netherlands.
2. Kelly, E. G. and Spottiswood, D. J., 1982: Introduction to Mineral Processing, Second edition, pp. 390-393, John

Wiley & Sons Inc., New York, USA.

3. MIRECO, 2013: The Development of Advanced Recycling Technologies for Tailing; Final Report, pp. 1-2.
4. Kwon, H. and Nam, K., 2013: Mine Hazards Reclamation

Engineering, 2ed, pp. 338-375, Donghwa Technology Publishing Co., Kyoung-gi, Korea.

5. Bradley, D., 1965: The Hydrocyclone, pp. 41-62, Pergamon Press, London, UK.



김 종 걸

- 한국해양대학교 에너지자원공학과 학사
- 현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 석사과정



유 경 근

- 한양대학교 자원환경공학과 학사
- 한양대학교 자원환경공학과 석사
- 일본 Hokkaido University 박사
- 현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 부교수



최 홍 일

- 강원대학교 지구시스템공학과 학사
- 과학기술연합대학원대학교 자원순환공학 석사
- 현재 한국광해관리공단 광해기술연구소 연구원



최 의 규

- 한양대학교 자원환경공학과 학사
- 한양대학교 자원환경공학과 석사
- 현재 한국광해관리공단 광해기술연구소 연구원



박 제 현

- 한양대학교 자원환경공학과 학사
- 한양대학교 자원환경공학과 석사
- 한양대학교 자원환경공학과 박사
- 현재 한국광해관리공단 광해기술연구소 연구원



Richard Diaz Alorro

- 필리핀 MSU-IIT 학사
- 일본 Hokkaido University 석사
- 일본 Hokkaido University 박사
- 현재 호주 Curtin University Lecturer