건식정제에 의한 견운모광의 품위향상연구

조건준·김윤종*·박현혜**·조성백†

한국지질자원연구원 비금속활용연구실, *(주)동진산업 동진기술연구소, **엔자이텍(주)

Improvement in Grade of Sericite Ore by Dry Beneficiation

Keon-Joon Cho, Yun-Jong Kim*, Hyun-Hae Park** and Sung-Baek Cho†

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Gwahang-no 92, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea.

*Technology Research Center, Dong-Jin Industry Co., Ltd, Geumam-ri 1118-4, Donggi-myeon, Okcheon-gun, Chungbuk, 373-831 Korea.

**ENZYTech, 1690-10, Shinil-dong, Daeduk-gu, Daejeon, 306-230 Korea.

(2009년 3월 23일 접수 : 2009년 4월 1일 최종수정 : 2009년 4월 7일 채택)

Abstract A study on the dry beneficiation of sericite occurring in the Daehyun Mine of the Republic of Korea region as performed by applying selective grinding and air classification techniques. Quartz and sericite occurred in the raw ore as major components. The results of liberation using a ball mill and an impact mill showed that the contents of R_2O were increased while SiO_2 was decreased in proportion to decreasing particle size. According to the XRD, XRF analysis and the EDS of SEM analysis, the ball mill gave a better grade product in R_2O content than the impact mill when the particle size was the same. When the raw ore was ground by the impact mill with a rotor speed 57.6 m/sec and then followed by 15,000rpm classification using an air classifier, the chemical composition of the over flowed product was 49.65wt% SiO_2 , 32.15wt% Al_2O_3 , 0.13wt% Fe_2O_3 , 10.37wt% K_2O , and 0.14wt% Na_2O . This result indicates that the R_2O contents were increased by 49.5% compared to that of the raw ore. From these results described above, it is suggested that hard mineral such as Quartz little ground by selective grinding using impact mill whereas soft mineral such as sericite easily ground to small size. As a result of that hard minerals can be easily removed from the finely ground sericite by air classification and the R_2O grade of thus obtained concentrate was improved to higher than 10wt% which can be used for ceramics raw materials.

Key words sericite, selective grinding, air-classification, beneficiation.

1. 서 론

결정구조학적으로 판상결정구조를 갖는 점토광물은 그 가치 및 효용도를 살펴볼 때 국내에 부존하고 있는 천연광물 중 기술적, 경제적 측면에서, 향후 집중적으로 관련 기술을 확립하고 지속적으로 시장을 개척해 나가야할 대상 중 하나라고 할 수 있다.

견운모(sericite)는 점토광물의 한 종류로서 인편상의 결정으로 이루어진 은백색이며 견사광택을 가지는 미세한 분말로서, 보통 백운모(muscovite)와 유사한 화학조성을 가지며, 결정구조 또한 백운모와 유사하다. 견운모의 견사광택특징을 살려 미분체로 가공하여 화장품, 안료, 도료 등 정밀화학공업분야, 절연체를 중심으로 하는 전기·전자공업 및 제지공업 등에서 다양한 기초소재의 원료로

서 이용되는 중요한 광물자원으로 알려져 있다¹⁾. 이러한 견운모는 강력한 해쇄기(scrubber)를 이용하여 해쇄 후 침강법을 이용한 수비 또는 공기분급에 의해 미분체를 제조하는 것이 일반적이다. 수비법은 선별효율은 뛰어나다는 장점을 가지고 있으나, 매체로써 물을 사용하기 때문에 수μm 정도의 미립의 점토광물을 탈수, 건조, 해쇄 등 복잡한 공정을 거쳐야 한다는 단점이 있다.^{2,3,4)}

이와 같은 습식 공정의 문제점들을 해결하기 위하여, 습식 공정에 비해 공정이 매우 경제적이거나 간단한 단계 분리와 분급기술을 이용한 건식 정제기술이 최근에 점토광물의 정제에 이용되어 실용화 되고 있다.⁵⁾

건식 정제기술에서 가장 우선시되어야 할 사항은 불순광물과 유용광물의 단계분리(libération)에 있다. 단계분리 공정에서 보편적으로 사용되는 방법은 두 광물이 서로 분리될 수 있을 정도로 입도 축소(size reduction)를 하는 것이다. 본 연구에서는 견운모원광의 단계분리를 위한 입도 축소를 위하여 볼 밀(ball mill)과 임팩트 밀(impact

†Corresponding author
E-Mail : sbcho@kigam.re.kr (S.-B. Cho)

mill)을 사용하여 분쇄를 하여 분쇄기 종류에 따른 단체 분리 특성을 비교하고자 하였다. 볼 밀은 철재 원통내에 분쇄 매체(media)로 볼을 장입하여 회전하는 원통의 내벽을 타고 상승하던 볼이 낙하하는 과정에서 볼과 볼 또는 볼과 원통 사이에 위치하는 광립에 충격을 가하여 입자를 미립화 시키는 분쇄 메커니즘(mechanism)을 갖는 분쇄기이다. 이에 비하여 임팩트 밀의 분쇄 메커니즘은 급광기로부터 공급되는 광석은 분쇄실에 내장된 해머형태의 분쇄매체와의 순간적인 충돌에 의하여 입자의 미립화가 일어나게 된다. 피분쇄물에 가해지는 에너지의 양은 분쇄매체의 선속도에 따라 달라진다. 즉, 분쇄매체의 선속도를 증가시키면 피분쇄물에 가해지는 외력 역시 증가되어 필요에 따라 분쇄매체의 선속도 조절을 통하여 분쇄능을 조절할 수 있는 분쇄기이다.^{2,3,4)}

불순광물 제거를 위하여 분쇄된 건운모 미분체를 공기 분급기를 사용하여 건식분급을 실시하였다. 유체에 의한 입자의 분급은 분리하고자 하는 입자에 작용하는 여러 가지 힘의 균형을 이용하여 입자의 침강속도 차이, 혹은 입자궤도의 차이로서 입자분리를 행하는 조작이다. 이때 적용되는 작용하는 힘으로는 중력, 원심력, 부력, 관성력, 유체의 저항력과 정전기력, 자력, 마찰력, 부착력 등으로 알려져 있다. 입경 분리를 위한 분급 조작에서는 보통 중력과 원심력을 주로 사용하고 있으나, 경우에 따라서는 정전기력 등도 고려할 필요가 있다. 실제의 분급조작에서는 이러한 힘이 단독 혹은 조합의 형태로서 사용되고 있으며 일차원의 운동(수직 유형의 중력분급기)을 이용한 것과, 중력장을 이용(수평유형중력분급기)하거나 원심력을 이용(원심력형 분급기)하기도 한다⁵⁾. 수평 혹은 수직형으로 장착한 rotor의 원심력을 이용하여 분급하는 경우 입자에 작용하는 주된 힘은 원심력과 유체의 저항력이다.

유체중의 입자에 작용하는 중력이나 원심력 등은 입자의 성질 즉 입경의 세제곱에 비례하며, 동시에 유체의 저항력은 입자의 투영단면적 즉, 입경의 제곱에 비례하며, 입자 레이놀즈 수에 의해 정해지는 저항계수에 비례한다. 또한 그 저항계수는 층류영역으로 난류영역에 대해 입자경의 -1제곱부터 0제곱에 비례한다는 사실로부터 결국 유체에 의한 저항력은 입경의 1~2제곱에 비례하게 된다. 즉, 유체중의 입자는 이들 두 가지의 힘을 합한 힘의 형태로서 거동을 나타내게 되며, 이 합력은 입경에 의해 변화하게 되는 것이다. 이 거동의 입경 의존성에 의해, 입경에 의한 분리 즉, 분급기는 분급기의 회전수가 증가할수록 미립자를 회수 하고, 회전수가 감소할수록 조립자를 회수하여 분급이 가능하게 되는 것이다.^{2,3,4)}

이때 원심력은 유체의 강제 소용돌이에 의해 부여되는 방식이지만 실제로는 회전 rotor를 외부에서 구동함으로써 강제 소용돌이를 만들어 내는 방법이므로 구조가 다소 복잡해지고, 동력도 들지만 분급정밀도가 뛰어나기 때문에

널리 사용되고 있다. 최근에 세라믹스 등의 신소재를 중심으로 한 분야에서 입도조절이 필요로 하는 경우가 크게 증가함에 따라 이용도가 급속히 증가하고 있다. 또 소형의 기종에서는 sub-micron 분급도 가능한 것으로 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 경제적인 건운모광의 품위 향상 공정을 개발하기 위하여 볼 밀과 임팩트 밀을 이용한 건식 단체분리 특성을 규명하고, 분쇄 및 정밀 공기분급 공정이 건운모광의 품위향상에 미치는 영향에 대해 알아보고자 하였다.

2. 실험 방법

일반적으로 각종 타일이나 위생도기제조 시 가소성원료로 사용되는 건운모는 소성온도를 고려하여 $R_2O(K_2O + Na_2O)$ 품위가 9wt%이상의 것을 사용하는 것으로 알려져 있다.⁴⁾ 본 연구에서는 세라믹가소성원료로서 고품위 R_2O 건운모 정광을 얻기 위하여 건식방법으로 단체분리와 공기 분급법을 적용하여 실험을 수행하였다.

2.1 시료준비 및 원광의 특성

시료는 경북 봉화군 소재 대현광산에서 채취한 건운모질 납석을 사용하였다. 먼저 현장에서 채취된 원광을 자연 건조를 하였다. 자연 건조된 원광을 Jaw crusher를 사용하여 1차 파쇄한 다음 Cone crusher를 사용하여 2차 파쇄 하여 입도를 3 mm 이하로 조절하였다. 1, 2차 파쇄된 원광으로부터 시료 채취기를 이용하여 일정량씩 채취한 원광을 실험용 시료로 사용하였다.

또한 조암광물 특성을 규명하기 위하여 XRD(X-ray diffraction: XRD, X-pert MPD Philips, Netherlands) 분석과 연마편과 원광으로 박편을 제작하여 편광현미경 관찰을 하였다. 또한 조암광물의 화학적 특성을 검토하기 위하여 XRF(X-Ray Fluorescence: XRF, MFX-2100, Shimadzu, Japan)를 이용한 정량분석을 실시하였다.

2.2 단체분리 및 분급실험

본 연구에서 사용하는 건운모는 세라믹의 가소성 원료로서 이용되고 있으며, 건운모 품위는 일반적으로 R_2O 품위를 기준으로 결정되는 것으로 알려져 있다. 따라서 원광 중 R_2O 품위 향상을 위한 최적의 단체분리조건을 볼 밀과 임팩트 밀을 이용하여 비교 검토하였다. 실험에 사용한 볼 밀은 알루미늄 재질의 밀과 볼을 사용하였으며, 포트는 직경이 200 mm이고, 내용적은 7600 ml이며, 그 임계회전수(critical speed)는 91rpm이다. 실험 조건은 기초 실험결과 미립화가 가장 잘 이루어지는 조건인 볼($\phi 30$ mm) 장입량을 7.6 kg, 시료장입량을 500 g으로 고정하고 분쇄시간을 달리 조절하여(60분, 80분, 100분,

Fig. 1. Flowchart of beneficiation process.

120분) 효과적인 단체분리가 가능한 분쇄시간을 규명하였다. 이때 볼밀의 회전수는 80rpm이었다.

또한 임팩트 밀(Impact mill:100 UPZ, Alpine, Germany)의 분쇄매체선속도를 각각 달리하여 생산된 분쇄산물을 비교 검토하였다. 실험에서 사용된 임팩트 밀은 햄머 밀과 유사하지만 분쇄기 하단에 grid가 없으며 충격과 외벽에 다시 부딪혀 2중으로 분쇄가 가능하다. 이 때, 임팩트 밀의 분쇄매체(plate beater) 선속도는 94.3 m/sec(18,000rpm)까지 조절이 가능하다. 하지만 분순광물의 미립화 방지를 위하여 선속도를 26.2 m/sec(5,000rpm), 36.6 m/sec(7,000rpm), 47.1 m/sec(9,000rpm), 57.6 m/sec(11,000rpm), 68.1 m/sec(13,000rpm)으로 각각 변화시키면서 석영과 견운모의 분리 상태를 확인하고자 하였다.

볼 밀과 임팩트 밀의 분쇄산물은 공기 분류기(Zigzag Classifier:100MZR, MULTY-PLEX Zigzag, Alpine Co.

Fig. 2. XRD pattern of raw.

Germany)를 이용하여 분급회전수 15,000rpm, 13,000rpm, 11,000rpm, 9,000rpm, 7,000rpm, 5,000rpm, 3,000rpm으로 분급하였다.

이렇게 볼 밀과 임팩트 밀로 분쇄되어 분급된 각 산물의 입도 변화를 광산란식 입도분석기(Particle size analyzer : Mastersizer 2000, Malvern Co. England)를 사용하여 입도를 측정하였다. 또한, XRF분석, XRD분석 그리고 주사전자 현미경 (SEM:Scanning Electron Microscope, SM-35080, JEOL Co. Japan) 관찰 및 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy, SM-35080, JEOL Co. Japan) 분석을 행하여 각각의 분쇄산물의 특성을 평가하였다(Fig. 1).

3. 결과 및 고찰

3.1 원광의 특성

원광에 대한 XRD분석 결과를 Fig. 2에 나타내었으며, 원광의 주 구성광물은 석영(quartz)과 견운모(sericite)로 조암광물은 비교적 단순함을 알 수 있었다. 주 구성광물과

Fig. 3. Microphotographs of sericite ore. (a) Quartz, Muscovite (b) Muscovite, Sericite, Opaque mineral. [Abbreviations : Qz=Quartz, Mu=Muscovite, Se=Sericite, OP=Opaque mineral]

Table 1. Sericite ore's chemical compositions of raw

Chemical composition (wt%)					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Ig.loss
65.60	21.39	0.67	6.84	0.19	3.29

불순광물의 동정을 위해 연마편과 박편을 제작하여 편광 현미경 관찰한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 원광은 대부분이 굵은 석영입자 사이에 미립의 건운모가 분포하고 있음을 관찰할 수 있었다.

XRF분석결과 화학분석품위는 65.60wt%SiO₂, 21.39wt%Al₂O₃, 0.63wt%Fe₂O₃, 6.84wt%K₂O, 0.19wt%Na₂O 이었다(Table 1). 원광의 화학성분 중 R₂O품위는 7.03wt%로 세라믹 가소성원료로서 비교적 낮은 수준을 나타냈다. 주 구성광물인 석영은 경도가 높고 마모성이 우수한 특성으로 인하여 미립화에 커다란 장애원인이 될 것으로 예상되어, 대현건운모 원광을 세라믹원료로서 적합한 미립화 및 R₂O 품위향상을 위하여 석영입자의 제거가 필수적인 것임을 판단하게 되었다.^{1,2,3,4)}

3.2 볼밀 분쇄 및 분급실험결과

Fig. 4는 볼 밀을 이용하여 분쇄시간을 80분 분쇄 후 공기 분급한 결과이다. 15,000rpm(O/F)분급산물의 평균입도(D₅₀)는 2.64 μm이었으며, 회수율은 20.76wt%였다. XRF 분석결과 50.85wt%SiO₂, 31.54wt%Al₂O₃, 0.64wt%Fe₂O₃, 10.05wt%K₂O, 0.14wt%Na₂O로 나타났다. 그 중 R₂O와 Fe₂O₃의 함량은 원광에 비하여 각각 44.97%, 1.04%증가한 것으로 나타났다. 이와 달리 SiO₂의 함량은 원광에 비하여 22.49% 감소한 결과로 나타났다. 또한 3,000rpm-(U/F)분급산물의 평균입도(D₅₀)는 65.72 μm이었으며, 그리고 회수율은 23.37wt%이었다. XRF분석결과 71.60wt%SiO₂,

Fig. 4. Yield and chemical compositions of beneficiation samples for ball mill at milling time 80min after air classified. **Fig. 5.** A Experimental conditional and chemical compositions for ball mill after air classified at 7,000rpm(O/F) and 9,000rpm(O/F).

17.19wt%Al₂O₃, 0.80wt%Fe₂O₃, 5.16wt%K₂O, 0.13wt%Na₂O로 나타났다. 그 중 SiO₂와 Fe₂O₃의 함량은 원광보다 각각 9.14%, 26.44% 증가한 것으로 나타났다. 이와 달리, R₂O의 함량은 원광에 비하여 약 24.73% 감소한 결과로 나타났다. 이러한 결과는 굵은 산물에 석영 등 분순광물이 미립자에 건운모가 회수되었기 때문이다.³⁾

이러한 원인으로 분쇄시간이 60분, 80분, 100분 그리고 120분으로 증가면 15,000rpm(O/F)분급산물의 R₂O와 Fe₂O₃의 함량은 원광에 비하여 증가하는 경향이 나타났으며, SiO₂의 함량은 원광에 비하여 감소하는 경향으로 나타났다. 또한, 3,000rpm(U/F)분급산물의 XRF분석결과 SiO₂와 Fe₂O₃의 함량은 원광보다 증가한 경향으로 나타났고, 이와 달리 R₂O의 함량은 원광에 비하여 감소하는 경향으로 나타났다.

Fig. 5에서 볼 밀의 분쇄시간이 60분일 때, 7,000rpm-(O/F)그리고 9,000rpm(O/F)의 분급산물의 R₂O품위는 각각 9.29wt% 그리고 9.60wt%로 나타났다. 즉 볼 밀의 분쇄시간이 60분인 7,000rpm(O/F)의 분급산물부터 R₂O 품위가 9wt% 이상의 품위를 나타냈으며, 분쇄시간이 80분의 분급산물 또한 7,000rpm(O/F)의 분급산물부터 R₂O 품위가 9wt% 이상의 품위를 나타내었다. 그러나 분쇄시간이 100분일 때, 7,000rpm(O/F) 그리고 9,000rpm(O/F)의 분급산물의 R₂O품위는 각각 8.94wt% 그리고 9.44wt%로 나타났다. 즉 볼 밀의 분쇄시간이 100분인 9,000rpm(O/F) 분급산물부터 R₂O품위가 9wt% 이상의 품위를 나타내었으며, 분쇄시간이 120분인 분급산물 또한 9,000rpm(O/F) 분급산물부터 R₂O품위가 9wt% 이상의 품위로 나타났다. 볼 밀을 분쇄매체로 사용하여 R₂O품위가 9wt% 이상의 고품위 건운모를 얻기 위하여 건식 정제 실험한 결과 볼

Fig. 6. Yield and chemical compositions of beneficiation samples for impact mill at 57.6 m/sec after air classified.

밀의 분쇄시간을 증가시키면 공기분급기의 회전속도 또한 증가시켜야 하며, 이때 회수율이 낮아짐을 알 수 있었다. 이상의 실험결과로부터 R₂O품위가 9wt%이상이면 회수율이 가장 좋은 조건은 분쇄시간 80분으로 선택 분쇄 후 7,000rpm(O/F)분급산물인 것으로 나타났다. 이때 회수율은 47.83wt% 이었다.

3.3 원광의 임팩트 밀 분쇄산물

Fig. 6은 임팩트 밀을 이용하여 선속도 57.6 m/sec로 분쇄한 산물에 대한 XRF분석결과이다. 15,000rpm(O/F)분급산물의 평균입도(D₅₀)는 2.25 μm이었으며 그리고 회수율은 11.1wt%였다. XRF분석결과 49.65wt%SiO₂, 32.15wt%Al₂O₃, 0.13wt%Fe₂O₃, 10.37wt%K₂O, 0.14wt%Na₂O로 나타났다. 그 중 R₂O품위의 함량은 원광의 R₂O품위보다 49.5% 증가한 것으로 나타났다. 이와 달리 SiO₂와 Fe₂O₃의 품위는 원광에 비하여 각각 24.31%, 0.11% 감소한 수치로 나타났다. 이와 달리 3,000rpm(U/F)분급산물은 평균입도(D₅₀)는 76.64 μm이었으며 그리고 회수율은 45.9wt%였다. XRF분석결과 74.22wt%SiO₂, 15.7wt%Al₂O₃, 0.17wt%Fe₂O₃, 4.63wt%K₂O, 0.1wt%Na₂O로 나타났다. 그 중 SiO₂와 Fe₂O₃의 품위는 원광보다 각각 13.14%, 0.24% 증가한 것으로 나타났다. 이와 달리 R₂O의 품위는 원광에 비하여 32.72% 감소한 결과로 나타났다. 이러한 결과는 볼 밀 분쇄 후 분급실험결과와 같이 굵은 산물에는 석영 등 분순광물이 회수되고 그리고 미립자에는 견운모가 회수되기 때문이다.³⁾

이러한 원인으로 임팩트 밀의 선속도가 26.2 m/sec, 36.6 m/sec, 47.1 m/sec, 57.6 m/sec, 그리고 68.1 m/sec로 증가시키며 분쇄할수록 15,000rpm(O/F)분급산물의 R₂O의 품위는 원광의 R₂O보다 증가하는 경향을 보였으며, SiO₂

Fig. 7. A Experimental conditional and chemical compositions for impact mil after air classified at 3,000rpm(O/F) and 5,000rpm(O/F).

와 Fe₂O₃의 품위는 원광에 비하여 감소하는 경향으로 나타났다. 이와 달리 3,000rpm(U/F)분급산물의 XRF분석결과 SiO₂와 Fe₂O₃의 품위는 원광보다 증가하는 경향으로 나타났으며, 이와 달리 R₂O의 품위는 원광에 비하여 감소하는 경향으로 나타났다.

Fig. 7에서 임팩트 밀의 선속도가 26.2 m/sec일 때, 3,000rpm(O/F) 그리고 5,000rpm(O/F) 분급산물의 R₂O품위는 각각 8.68wt%와 9.53wt%로 나타났다. 즉 임팩트 밀의 선속도가 26.2 m/sec와 47.1 m/sec, 36.6 m/sec 그리고 68.1 m/sec일 때는 5,000rpm(O/F)분급산물로부터 R₂O 품위가 9wt%이상으로 나타났다.

Fig. 8. Relationship of mean particle size of sample yield by ball mill and impact mill of R₂O grade for various ball mill's milling time and impact mill's rotor speed.

이와 같이 임팩트 밀을 분쇄매체로 사용하여 R_2O 품위가 9wt% 이상의 고품위 견운모를 얻기 위하여 건식 정제 실험한 결과, 임팩트 밀의 선속도를 증가시키면 비교적 낮은 공기분급기의 회전속도(5,000rpm)에서 R_2O 품위가 9wt%이상의 견운모를 얻을 수 있었다. 이 때, 임팩트 밀로 단체분리시 R_2O 품위가 9wt%이상이면서 회수율이 가장 좋은 조건은 선속도 57.6 m/sec로 선택분쇄 후 3,000rpm(O/F)분급산물인 것으로 나타나고, 이때의 회수율은 54.1wt% 이었다.

3.4 볼 밀과 임팩트 밀의 분쇄특성비교

볼 밀의 분쇄시간에 따른 분쇄산물과, 임팩트 밀의 선속도에 따른 분쇄산물을 입도별 R_2O 품위를 비교해 본 결과 Fig. 8에서 나타난 것과 같이 분급산물 모두 입도가 작아질수록 R_2O 의 품위는 높은 것을 확인할 수 있었다. 그러나 두 분쇄산물의 평균입도가 $3\mu m$ 로 같을 때 임팩트 밀의 분쇄산물의 R_2O 품위는 10.5%였고, 볼밀의 분쇄산물의 R_2O 품위는 9.9%였다. 즉 임팩트 밀의 R_2O 품위 향상율이 볼밀에 비해 높다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9는 볼밀과 임팩트 밀로 분쇄한 평균입도($D_{50}=10\mu m$)가 동일한 산물의 XRD분석결과를 나타낸 것이다. 볼밀로 분쇄한 산물의 석영에 의한 회절피크는 임팩트 밀의

Fig. 9. XRD pattern of product with $10\mu m$ in mean particle size by ball mill and impact mill.

분쇄 산물에 비해 뚜렷하게 나타났다. 이와는 반대로 임팩트 밀로 분쇄한 산물의 견운모에 의한 회절 피크는 볼 밀로 분쇄한 산물에 의한 견운모 회절 피크가 더 뚜렷하게 나타났다.

그리고 Fig. 10과 Fig. 11은 분쇄산물의 평균입도($D_{50}=$

Fig. 10. SEM image and EDS mapping images of particles with $10\mu m$ in mean particle size by ball mill. (a) SEM image, (b) Si EDS mapping, (c) Al EDS mapping, (d) K EDS mapping.

Fig. 11. SEM image and EDS mapping images of particles with 10 μm in mean particle size by impact mill. (a) SEM image, (b) Si EDS mapping, (c) Al EDS mapping, (d) K EDS mapping.

10 μm)가 동일한 볼 밀과, 임팩트 밀의 분쇄산물의 SEM과 EDS를 이용한 면(plane) 분석 결과이다. 볼 밀과 임팩트 밀의 분쇄산물에 대한 EDS분석결과를 살펴보면 SiO_2 가 전체적으로 높은 밀도로 분포하고 있음을 보여주고 있으나, 부분적으로 SiO_2 의 밀도가 낮은 곳은 건운모의 밀도가 높게 나타났다. 그러나 임팩트 밀의 분쇄산물의 EDS분석결과 K_2O 의 밀도는 볼밀의 분쇄산물보다 높은 밀도로 분포되어 있음을 알 수 있었다.

위의 결과들에 대한 원인은 단체분리과정 중 석영과 건운모의 분쇄가 일어나면서 볼 밀로 분쇄한 경우는 광물의 경도에 관계없이 일정한 입도 이하로 건운모와 동시에 석영의 분쇄가 일어나게 되어 R_2O 정제효율이 낮아지기 때문이다. 반면 임팩트 밀은 선속도를 증가하면서 피분쇄물에 가해지는 외력 역시 증가되어 필요에 따라 분쇄매체의 선속도 조절을 통하여 분순광물인 경질인 석영의 분쇄는 줄이고 연질인 건운모를 분쇄하여 R_2O 정제효율을 조절이 가능하기 때문이다.^{6,7)}

따라서 원광으로부터 건운모 건식정제에 필수적인 선택분쇄에 효과적인 분쇄기기는 일반적으로 가장 많이 쓰이는 볼 밀이 아닌 임팩트 밀임을 알 수 있었다.

4. 결 론

볼밀과 임팩트 밀을 이용한 분쇄 및 분급 기술에 의하여 건운모 건식정제를 위한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 원광의 XRD분석 및 편광현미경 관찰한 결과, 주 구성광물은 석영과 건운모임을 알 수 있었다.
2. 단체분리를 위한 볼 밀의 분쇄시간과 임팩트 밀의 선속도가 증가함에 따라서 R_2O 의 품위와 미립자 생성율은 증가되었다.
3. 볼 밀과 임팩트 밀의 분쇄산물에 대한 분급과정에서 미립자로 갈수록 R_2O 품위가 증가하였다. 이러한 원인은 석영이 선택분쇄 및 분급과정에서 굵은 상태로 남고 분급과정에서 굵은 입자(U/F)로 회수되기 때문이다.
4. R_2O 품위가 9wt%이상이면 회수율이 가장 좋은 조건은 볼 밀을 사용할 때 분쇄시간 80분으로 선택분쇄 후 7,000rpm(O/F)분급산물로 회수율이 47.83wt%로 나타났으며, 그리고 임팩트 밀을 사용할 때 선속도 57.6 m/sec(11,000rpm)로 선택분쇄 후 3,000rpm(O/F)분급산물로 회수율은 54.1wt%로 나타났다.

5. 볼 밀과 임팩트 밀로 분쇄한 산물의 SEM그리고 SEM의 EDS를 이용한 면 분석한 결과, 볼 밀에 의한 분쇄 후 분급한 산물 보다 비교적 많은 양의 견운모가 임팩트 밀로 분쇄 후 분급한 산물에 분포되어있음을 확인할 수 있었다. 따라서 원광으로부터 견운모 건식정제에는 볼 밀보다는 임팩트 밀이 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 기관목적사업(기관고유임무형)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. P. W. Harben, The Industrial Minerals Handy Book - A Guide to Markets, Specifications, & prices, 3rd ed., p.306, Industrial Minerals Information Services, UK, (1999).
2. S. B. Cho, S. B. Kim and K. J. Cho, J. Miner. Soc. Kor., **17**(2), 68 (2004).
3. S. B. Kim, S. B. Cho, W. T. Kim and S. D. Yoon, J. Miner. Soc. Kor., **18**(1), 19 (2005).
4. J. I. Yang, H. Y. Shin, S. K. Hwang and K. H. Bae, J. Miner. Soc. Kor., **10**(2), 29 (1997).
5. B. A. Wills, Mineral Processing Technology, 3rd ed., p.629, Pergamon Press, Oxford, New York, (1985)
6. W. J. Bronkala, Magnetic Separation, In : Mineral Processing Plant Design, 2nd ed., (ed., A. L. Mular and R. Bhappu), Society of Mining Engineers, Littleton, Colorado, (1980).
7. J. Sordon and D. D. Eberl, Min. Soc. Am. Rev. Miner., **13**, 495 (1984).