

선택분쇄 및 공기분급에 의한 일라이트의 정제기술 연구

A Study on the Beneficiation of Illite by Selective Grinding and Air Classification

김 상 배 (Sang-Bae Kim)¹ · 조 성 백 (Sung-Baek Cho)^{1,*} · 김 완 태 (Wan-Tae Kim) ·
윤 성 대 (Sung-Dae Yoon)²

¹한국지질자원연구원 자원활용소재연구부

(Minerals & Materials Processing Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, Kajung-dong 30,
Yusong-ku, Daejeon, Korea 305-350)

²동창일라이트(주)

(Dong Chang Illite Inc., Young-dong gun, ChungBuk province, Korea)

요약: 선택분쇄 및 분급 기술에 의한 영동지역에 산출하는 일라이트에 대한 정제연구를 수행하였다. 원광의 주 구성광물은 석영과 일라이트이며, 황철석과 심아연석, 황동석 등과 같은 황화광물들이 소량 수반된다. 습식 해쇄 후 체가름 결과, 미립자로 갈수록 Al_2O_3 , K_2O 함량 및 강열감량은 높아지며, SiO_2 함량은 낮아졌으며, Fe_2O_3 의 함량은 굵은 입자가 다소 낮았으나 입도에 관계없이 비교적 균일하게 나타났다. 단체분리를 위한 충격식 분쇄기의 분쇄매체의 선속도가 증가함에 따라 미립자 생성율은 증가되었으며, 분급과정에서의 미립자 회수율 역시 증가되었다. 분쇄매체의 선속도를 57.6 m/sec로 조절하여 선택분쇄 후 최적의 조건으로 분급하면 정제산물을 76.16 wt% 정도 생산할 수 있었다. 정제산물의 화학조성은 SiO_2 70.13%, Al_2O_3 19.40%, Fe_2O_3 1.62%, K_2O 5.20%, Ig.loss 2.77%이었다. 본 연구에서 사용한 정제공정은 비금속 광물의 정제와 입도조절 공정을 동시에 행할 수 있는 유용한 기술임을 알 수 있었다.

주요어 : 일라이트, 선택분쇄, 공기분급, 정제

ABSTRACT : A study on the beneficiation of illite occurring in Youngdong province is performed with applying selective grinding and air classification techniques. Quartz and illite are occurred as major components, and sulfide minerals such as pyrite, chalcopyrite are associated as minor components. The result of sieving test shows that contents of Al_2O_3 , K_2O and ignition loss are increased, whereas SiO_2 is decreased with particle size decrease. Fe_2O_3 content is almost same in all the particle size range but slightly lower at coarse particles. The yield of fine particles is increased with increasing rotor speed in both grinding stage and air classification stage. When the selective grinding and air classification are carried out at optimal condition, yield of the concentrate is 76.16 wt.%. The chemical compositions of the concentrate are SiO_2 70.13%, Al_2O_3 19.40%, Fe_2O_3 1.62%,

*교신저자: sbcho@kigam.re.kr

K₂O 5.20% and ignition loss 2.77%. The beneficiation process developed in the current study is very effective method which purification and particle size control can be achieved simultaneously.

Key words : illite, selective grinding, classification, beneficiation

서 언

비금속 광물들은 모두 가공과정을 거쳐 중간 제품으로서의 분체로 이용되거나 분체 자체가 최종제품의 형태로(久保輝一郎, 1982) 요업, 시멘트, 유리, 철강, 내화물, 제지, 페인트, 플라스틱, 화장품, 고무, 농약, 의약, 식품, 석유 화학공업, 반도체 산업 등에 주로 사용되고 있다. 산업원료나 각종 산업의 충전재로 사용되는 광물 자원은 천연에서 산출되는 상태로 이용할 수 있는 것은 거의 드물며, 대부분이 최종 제품의 규격에 맞게 처리과정을 거쳐 이용되고 있다. 각종 산업용 충전재로 사용되는 비금속 광물 미분체의 주된 사용 목적은 최종 제품의 기계적 강도 등의 물리적 성질 개량, 또는 원가 절감하기 위한 것이었다. 그러나 나노산업(NT) 및 생물산업(BT) 등 각종 산업이 발달함에 따라 제품의 종류 및 용도가 다양해지고, 규모가 커짐에 따라 그 기반이 되는 원료소재의 수요가 증가하고 있을 뿐 아니라 기능성도 다양해지고 있다. 일라이트는 4 μm 이하 입자 크기로서 비팽창성을 보이고, 이팔면체이면서 알루미늄이 풍부한 운모같은 광물이라고 정의하였다(Srodon, Eberl, 1984). 일라이트는 기본적으로 두 개의 사면체 층 사이에 한 개의 팔면체 층이 들어가 결합하는 2:1구조를 가진다. 팔면체 층은 결합구조 내 양이온 자리 3개 중에서 2개만 양이온으로 채워지는 이팔면체(dioctahedral) 구조가 특징이다. 따라서 일라이트의 기본적인 구조는 백운모와 매우 흡사하다고 볼 수 있다. 그러나 화학적으로 볼 때, 일라이트는 백운모에 비하여 K⁺와 Al의 함량이 적은 반면 Si는 더 풍부하다. 그리고 흔히 Mg²⁺와 Fe를 포함한다. 층간의 K⁺는 불규칙적으로 들어가기 때문에 층간 결합력은 백운모보다는 약하다. 일라이트 광물은 현재까지 수 처리제, 토양개량제 등을 중심으로 사용되어 왔으나(추창오, 2001), 근래 들어 산업폐수 처리를 비롯한 환경분야(오재현, 김미성, 1991), 사료 보조제(하홍민 외, 2001), 정수용, 제지, 섬

유, 의약품, 비누, 화장품 등 광범위하게 활용되고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 고급 소재 원료로 사용이 가능한 고품위 광석의 부존은 한정되어 있는 상태이다.

본 연구에서는 원광 중에 혼입되어 품위를 저하시키고 미립화에 장애요인이 되는 석영 등 불순광물을 건식 선택 분쇄 및 분급방법에 의하여 제거하고자 하였다. 일라이트와 같은 점토 광물의 정제기술은 사용되는 매질에 따라 건식 또는 습식 기술로 분류된다. 습식 기술은 선별 효율은 물론이고 실수율도 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나 습식 기술은 처리공정에 용수가 필요하며, 산물이 탈수, 건조, 탈수 등 시설비 처리비 상승요인이 많아 건식 방법으로 처리하는 추세이다. 따라서 본 연구에서는 일라이트 광물의 건식 정제를 위하여 조암광물 간의 경도 차이를 이용한 선택 분쇄 및 분급기술을 개발하고자 하였다.

이론적 배경

단체분리

물리적 정제기술에서 가장 우선되어야 할 사항은 불순광물과 유용광물의 단체분리(liberation)에 있다. 단체분리 공정에서 보편적으로 사용되는 방법은 두 광물이 서로 분리될 수 있을 정도로 입도를 축소(size reduction) 하는 것이다. 이를 위하여 기존의 선광공장에서는 볼 밀(ball mill) 또는 룯드 밀(rod mill)을 사용하여 습식으로 마광하는 것이 보편적이었다. 이러한 마광기는 광석과 맥석의 물리적 특성을 고려하지 않고 일정한 입도 이하로 무차별적으로 입도를 축소시키는 특성이 있다. 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 미립화 시키는 분쇄 메카니즘(mechanism)을 가지는 마광기로

석영과 같이 경질의 광물 역시 효율적으로 미립화가 이루어지고, 룯드 밀은 볼 대신에 원통형 철재 막대기를 장입하여 회전하는 원통 상부에서 낙하하는 룯드의 충격력에 의하여 입도축소가 이루어진다. 이러한 마광기는 마광능력이 강력하여 광물의 경도에 관계없이 일정한 입도 이하로 마광이 일어나게 된다. 또한 룯드 밀은(이강문, 1995) 선행으로 작용하는 룯드 사이에 광립이 위치하여 입도축소가 이루어진다. 따라서 룯드 밀의 경우 본 연구에서 제거하고자 하는 석영 등 비교적 굵은 상태로 산출되는 불순광물을 우선적, 선택적으로 미립화 시키는 현상이 나타게 된다. 따라서 기존에 사용하던 마광기는 본 연구에서 개발하고자 하는 선택분쇄와는 상반되는 형태의 단체분리가 이루어져 결과적으로 선별효율을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 마광능력이 저조한 충격식 분쇄기를 사용하고자 하였다. 충격식 분쇄기의 분쇄 메카니즘을 살펴보면 급광기로부터 공급되는 광석은 분쇄실에 내장된 함마형태의 분쇄매체와의 순간적인 충돌에 의하여 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 조절하게 된다. 따라서 일라이트에 함유되어 있는 석영, 황철석과 같은 경질의 불순광물은 분쇄가 일어나지 않고 건조과정에서 단단하게 굳어진 형태의 미립의 점토광물 선택분쇄가 가능한 정도의 선속도를 유지하면서 충격식 분쇄기를 운용하면 불순광물과 유용광물의 단체분리가 효율적으로 이루어지게 된다. 분쇄매체의 선속도는 원료광물의 특성이 상이하므로 단체분리시키고자 하는 광석의 특성을 고려하여 결정하여야 할 것이다.

공기분급

유체에 의한 입자의 분급은 분리하고자 하는 입자에 작용하는 여러 가지 힘의 균형(balance)을 이용하여 입자의 침강속도 차이, 혹은 입자궤도의 차이로서 입자분리를 행하는 조작이다. 이때 적용되는 입자 및 작용하는 힘으로는 중력, 원심력, 부력, 관성력, 유체의 저항력과 정

전기력, 자력, 마찰력, 부착력 등으로 알려져 있다. 입경의 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 수직 유형의 중력분급기와 같이 일차원의 운동을 이용한 것과, 중력장을 이용(수평유형중력분급기 등)하거나 원심력을 이용(원심력형 분급기)하기도 한다.

수평 혹은 수직형으로 장착한 rotor의 원심력을 이용한 분급하는 경우 입자에 작용하는 주된 힘은 원심력과 유체의 저항력이다. 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. 이 방식은 폭 넓은 분급범위(0.5~100 μm), 고성능, 높은 처리량 등의 특징을 가지고 있어 최근에 세라믹스 등의 신소재를 중심으로 한 분야에서 입도조절을 필요로 하는 경우가 크게 증가함에 따라 이용도가 급속히 증가하고 있다. 또 소형의 기종에서는 sub-micron 분급도 가능한 것으로 알려져 있다.

이론적인 분리 한계 입자경 D_{th} 는

$$D_{th} = \left[\frac{18\mu u}{\omega^2 r \rho_p} \right]^{1/2}$$

(μ : 공기의 점성계수, u : 분급장에서 안쪽으로 향하는 공기속도, ρ_p : 입자의 진밀도, ω : 분급로터의 회전 각속도)

로 표현된다. 그러나 이 식은 정상상태를 나타낸 식이며, 실제로는 정상상태에 도달하기 전에 분급작용을 받을 때도 있으므로, 위 식의 계산 결과가 실제와 다를 경우도 있다. 또한 분급성에 영향을 미치는 분체물성으로서의 입자의 밀도, 입자형상, 응집성 등을 들 수 있다.

유체중의 입자에 작용하는 중력이나 원심력 등은 입자의 성질 즉 입경의 세제곱에 비례하며, 동시에 유체의 저항력은 입자의 투영단면적 즉, 입경의 제곱에 비례하며, 입자 레이놀스수에 의해 정해지는 저항계수에 비례한다. 또한 그 저항계수는 층류영역으로부터 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, 분급이 가능하게 되는 것이다.

시료 및 실험방법

실험에 사용된 일라이트 시료는 충북 영동군 소재 동창 일라이트 광산에서 산출되는 원광을 사용하였다. 광물학적 특성 분석을 위하여 외관상으로 확실히 구분되는 특징적인 부분을 중심으로 연마편과 박편을 제작하여 편광현미경으로 관찰하였다. 원료광물의 주구성광물의 분석은 X-선회절분석(XRD, X-pert MPD Philips, Netherlands)으로 조사하였으며, X-선형광분석(XRF, MFX-2100, Shimadzu, Japan)을 이용하여 화학분석을 행하였다. 채취된 광석은 100 ± 5 °C drying oven에 넣어 건조 후 조 크러셔를 사용하여 1차 파쇄 후 큰 크러셔를 사용하여 2차 파쇄하여 3 mm크기 이하로 준비하였다. 원광석 중에 함유된 불순광물과의 단체분리를 위하여 충격식 분쇄기(Impact mill, 100ZMR, Alpine, Germany)의 분쇄매체 선속도를 변화시켜 미립자(-400 mesh) 생성율을 달리 조절하면서 분쇄 실험을 수행하였다. 분급실험은 공기 분급기를 사용하여 분쇄된 산물의 일정 양을 취하여 1차로 평균 입도 $5.5 \mu\text{m}$ 을 기준으로 이 보다 미세한 미립자를 회수하고, 굵은 입자를 다시 공기 분급기에 투입하여 $7 \mu\text{m}$ 을 기준으로 분급, 미립자를 회수하는 방법으로 평균 입도 $10 \mu\text{m}$ 까지 분급 실험을 진행하였다. $10 \mu\text{m}$ 보다 굵은 입도의 분급은 가능하지만 이 보다 굵은 입자에는 일라이트의 분포가 거의 없을 것으로 판단되어 더 이상 굵은 입자의 분급은 진행하지 않았다. 회수된 각 산물은 X-선형광분석에 의한 화학성분분석, X-선회절분석, 그리고 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope: SEM) 관찰 및 EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) 분석을 행하여 특성을 평가하였다.

결과 및 고찰

원광의 특성 평가

원광에 수반되는 조암광물의 확인을 위한 X-선회절 분석 결과를 그림 1에 나타내었다. 원광석에 함유되어 있는 주 구성광물은 석영과 일라이트(illite)로 나타났다. 석영은 미립의 불규칙한 결정들이 집합체를 이루어 산출되며, 일라이트는 기질부를 형성하고 있다(그림 2). 주 구성광물인 석영은 경도가 높고 마모성이 우수한 특성으로 인하여 미립화에 커다란 장애원인이 될 것으로 판단되어 본 연구에서는 석영의 제거가 필수적인 것으로 판단되었다. 주 구성광물은 석영과 일라이트이지만 그 외 소량 수반광물을 확인하기 위하여 연마편과 박편에 대한 편광현미경을 관찰하여 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 현미경 관찰 결과, 주 구성광물 이외에 황철석(pyrite)과 섬아연석(sphalerite), 황동석(chalcopyrite)이 소량 수반됨을 알 수 있었다. 황철석은 미세한 입자부터 비교적 굵은 입자까지 다양하게 분포하고 있다. 커다란 결정상태로 산출되는 황철석 내에는 황동석과 섬아연석이 내부성장하고 있다(그림 2). 또한 현미경으로 명확한 구분은 곤란하였으나 미세한 균열을 따라 산화철 광물이 채워져 있다. 또한 원광의 화학분석 결과, 원광의 주 화학성분은 SiO_2 74.57 wt%, Al_2O_3 16.30 wt%, Fe_2O_3 1.57 wt%, K_2O 4.33 wt%, Na_2O 0.55 wt%, 강열감량 2.37 wt%로 SiO_2 와 Fe_2O_3 의 함량이 비교적 높은 것으로 나타났다. 이는 석영의 함유량이 높고, 황화광물과 산화철 광물에서 유래된 결과이다.

체가름 실험 결과

현미경 관찰 결과, 일라이트는 미립자로 분포하는 반면 석영 등 불순광물은 비교적 굵은 상태로 분포함을 확인하였다. 특히, 산출상태에 따라서는 어느 한 종류의 광물이 일정한 입도에 분포되기도 한다. 본 실험에서는 경질의 불순광물의 입도분포 상태를 확인하기 위하여 체가름 실험을 수행하였다. 입도분포에 따른 화학성분의 품위변화를 조사하기 위하여 3 mm 크기 이하로 파쇄된 원광석을 실험실 규모의 습식 해쇄기(scrubber)에 광액농도 50% solids로

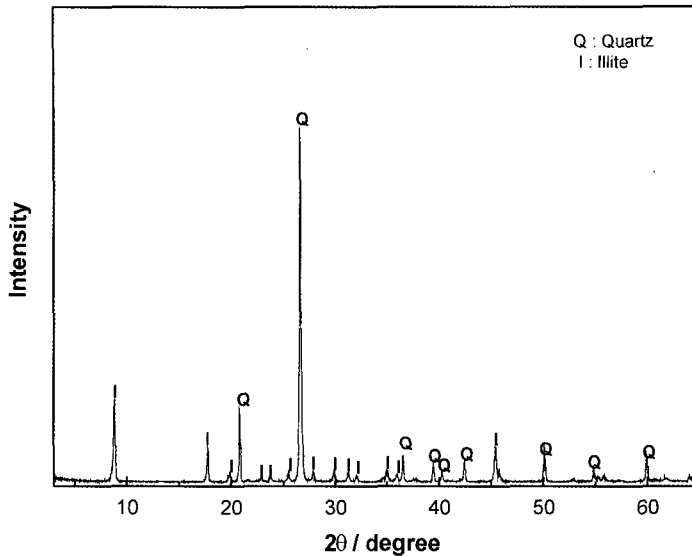


Fig. 1. XRD pattern of illite head ore.

조절하여 10분간 해쇄한 후 Tyler standard sieve 를 사용하여 습식 체가름 후 각 산물에 대하여 탈수 및 건조하여 중량비 및 화학성분 품위와 특징적인 입도의 산물을 대상으로 조암광물을 분석하여 그 결과를 다음 표 1과 그림 3에 각각 기재하였다.

표 1에 나타낸 것처럼 체가름 한 시료에 대해 입도를 분석한 결과, 단순한 해쇄방법에 의한 단체분리 또는 미립화는 어려운 것으로 나타났다. 즉, +20 mesh 산물이 44.83 wt%로 상당히 많은 분포를 나타내고 있었으며, 이 산물의 화학성분 품위는 SiO₂ 81.95%, Al₂O₃ 11.16%, Fe₂O₃ 1.38%로 SiO₂ 품위가 높아 굵은 입자에 석영이 많이 분포함을 유추 가능하였다. 또한 각 산물에 대한 광학현미경 관찰 결과, 굵은 입자에는 산화철 보다는 황철석으로 인한 철분이 대부분으로 확인되었다. 그림 3에 나타낸 결과로부터 입도가 작아짐에 따라 SiO₂ 함량은 점차 감소하고 Al₂O₃와 K₂O 함량이 점차 높아지는 경향은 미립인 일라이트의 함량이 많아짐을 나타낸다. 그리고 Fe₂O₃ 함량이 미립으로 갈수록 높아지는 경향을 나타내는데, 이것은 미립의 철산화물에 의한 것으로 유추된다. 미립자 중 -400 mesh 산물의 분포율은 10.54 wt%에 불과하였으나 품위는 SiO₂ 57.73%, Al₂O₃ 27.62%, K₂O 7.50%, 강열감량 4.15%로 나타나 미립자에 일

라이트가 집중적으로 농축됨을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 그림 4 및 그림 5의 X-선회절 분석 결과에서도 확인이 가능하였다. 즉, +20 mesh 산물의 X-선회절 패턴인 그림 4에서 석영 피크 강도(intensity)는 일라이트 피크 강도에 비하여 상당히 높게 나타난 반면 -400 mesh 산물의 X-선회절 패턴인 그림 5에서는 석영 피크 강도는 상당히 감소되어 나타남이 확인되었다. 이러한 결과는 정제과정에서 석영 등 경질의 불순광물의 분쇄가 이루어지지 않을 정도의 외력을 가해서 불순광물과 일라이트를 단체분리 시킨 후 분급 기술을 적용하여 입도 분리하는 단순한 기술을 적용하여도 일라이트의 정제에 커다란 효과를 기대할 수 있다는 것을 나타내는 것이다.

단체분리 및 분급실험 결과

단체분리는 입자가 미세할수록 효과적으로 이루어진다. 그러나 미세하게 분쇄하기 위하여 투입되는 에너지가 증가되고 경질의 불순광물의 미립화로 인하여 분급과정에서 분립 및 선별효율이 저하되는 원인이 되기도 한다. 따라서 분쇄매체의 선속도를 달리하면서 석영과 같은 경질 광물은 분쇄되지 않고, 일라이트와 같은 연질의 광물만이 분쇄되도록 선택분쇄한 후 선

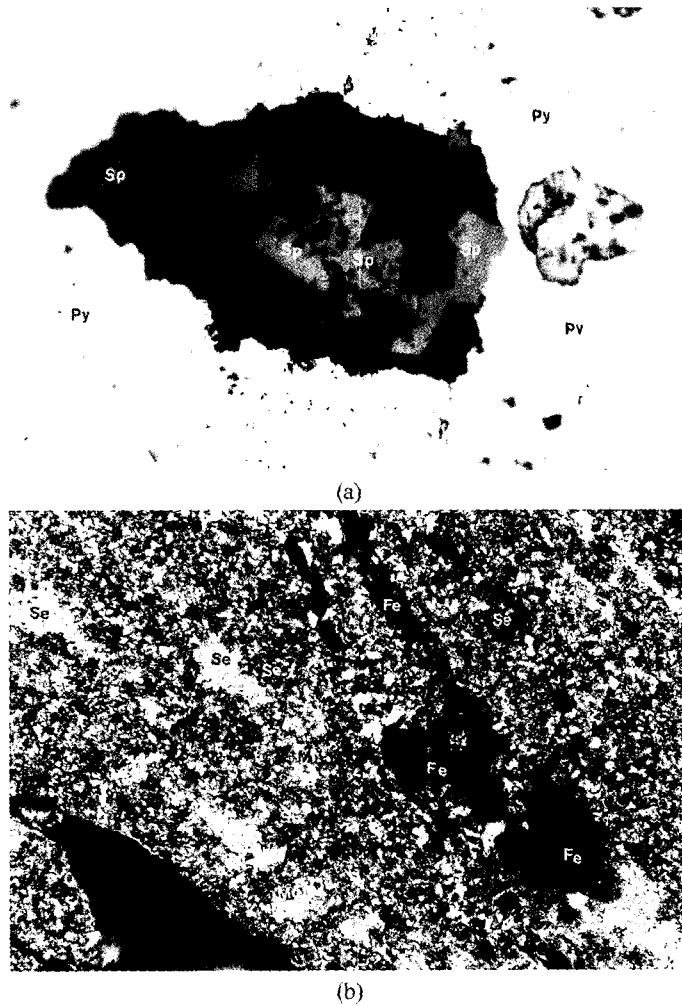


Fig. 2. Microphotographs of illite head ore (a:×100, under reflected microscope, b:×100, under polarized microscope, cross nicol). Abbreviations : Sp = sphalerite, Py = pyrite, Ch = chalcopyrite, Se = illite, Mu = muscovite, Fe = Fe-oxide.

택분쇄 산물에 대하여 각 입도별로 분급하여 분급된 산물의 화학성분 품위를 조사하였다. 표 2는 분쇄매체의 선속도를 26.2 m/sec로 조절하여 선택분쇄한 산물에 대한 분급실험 결과이다. 선택분쇄한 산물의 -400 mesh 크기의 입자 분포율은 50 wt% 수준이었다. 체가름 실험에서도 알 수 있듯이 입자크기에 따라 화학성분의 품위가 상이하게 나타나므로 분급 입도(평균 입도를 기준으로 표기함)를 달리하면서 실험을 진행하였다.

실험결과, 공기분급기 회전수를 15,000 rpm

수준으로 조절하여 분급하면 미립자의 최대입도는 20 μm , 평균 입도는 5.5 μm 수준이었으며, 회수율은 34.02 wt%이었다. 이 산물의 화학성분은 SiO_2 62.38%, Al_2O_3 24.61%, Fe_2O_3 1.71%, K_2O 6.77%, 강열감량 3.52%로 원광에 비하여 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 품위가 50% 이상 향상된 것으로 나타났다. 이러한 원인은 석영은 선택분쇄 및 분급과정에서 굵은 상태로 남고 분급과정에서 굵은 입자(U/F)로 회수되기 때문이다. 즉, 미립자로 일라이트가 회수되는 현상을 증명하는 결과이다. 즉, 입자가 굵어질수록 SiO_2 함

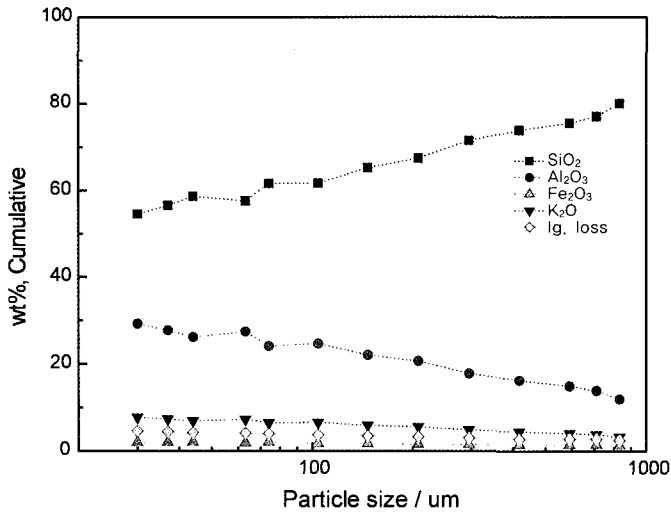


Fig. 3. Variations in chemical compositions of ore with its size fraction.

Table 1. Result of sieving test for illite head ore

Particle size (mesh)	Yield (wt%)	Composition (%)					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	lg.loss
+20	44.83	81.95	11.16	1.38	3.00	0.51	1.70
20/25	3.10	79.20	13.11	1.53	3.57	0.41	1.77
25/30	4.13	77.72	14.12	1.52	3.83	0.44	1.96
30/35	7.64	76.04	15.50	1.48	4.19	0.48	1.99
35/48	8.26	73.63	17.07	1.57	4.63	0.49	2.27
48/65	7.23	69.58	19.89	1.65	4.96	0.57	3.06
65/100	3.93	67.38	21.48	1.78	5.36	0.61	3.06
100/150	5.17	64.81	23.46	1.78	5.90	0.66	3.11
150/200	0.83	63.29	24.10	2.09	6.21	0.64	3.36
200/250	1.65	62.05	24.65	1.86	6.75	0.71	3.69
250/325	1.45	60.82	25.36	2.11	6.90	0.68	3.79
325/400	1.24	59.05	26.73	2.06	7.11	0.71	4.06
-400	10.54	57.73	27.62	1.99	7.50	0.70	4.15
Ore	100.00	74.57	16.30	1.57	4.33	0.55	2.37

량은 높아지고 Al₂O₃와 K₂O 함량은 낮아지는 현상을 확인 할 수 있었다. 가장 굵은 입자로 회수되는 평균입도 10 μm 산물의 화학성분 품위는 SiO₂ 84.19%, Al₂O₃ 9.80%, Fe₂O₃ 1.43%, K₂O 2.44%, 강열감량 1.44%로서 나타났으며, 현미경 관찰 결과 대부분이 석영으로 확인되었다. Fe₂O₃의 함량은 미립자일수록 높아지는 경향이 나타났으며, 현미경 관찰 결과 굵은 입자에는 황철석이 상당량 분포하여 철 함량에 영향을 미치는 것으로 확인되었으며, 미립자에는

황철석 보다는 철 산화물에 의하여 철 품위가 높아지는 것으로 사료된다.

다음 표 3은 충격식 분쇄기 분쇄매체의 선속도를 36.6 m/sec로 조절하여 선택분쇄한 산물을 동일한 방법 및 조건으로 분급한 결과이다. 분쇄매체의 선속도 증가로 분쇄력이 향상되어 미립자 생성율이 증가됨을 표 3의 결과로부터 알 수 있었다. 미립자 분포율이 높아짐으로서 일부 불순광물도 미립화가 진행되어 미립자로 분포하기 때문이다. 따라서 동일한 크기를 기준으로

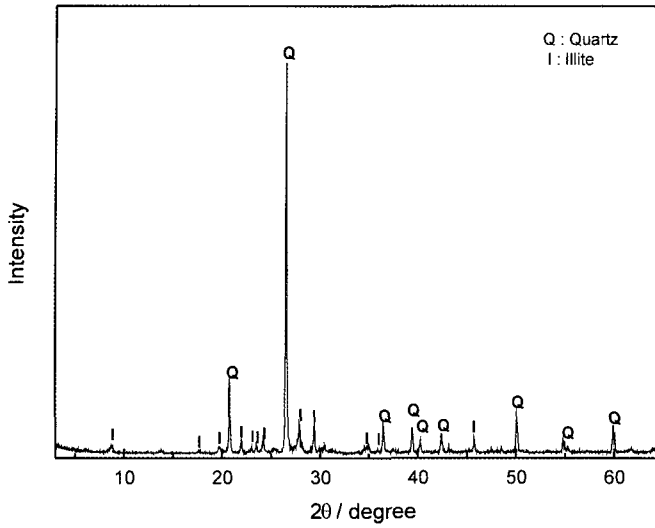


Fig. 4. XRD pattern of particles larger than 20 mesh.

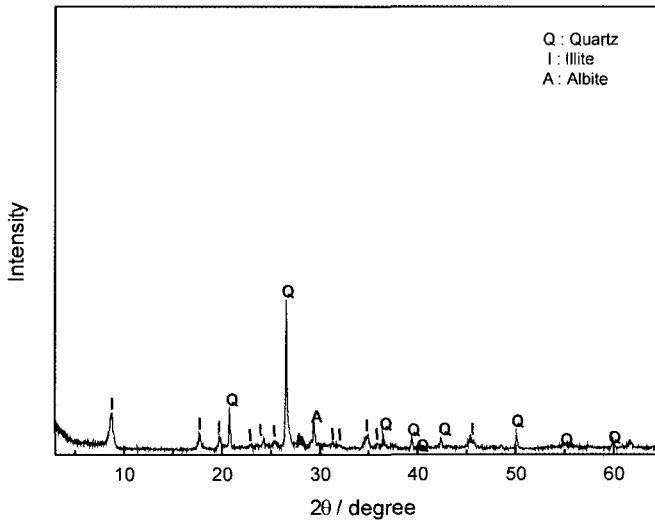


Fig. 5. XRD pattern of particles smaller than 400 mesh.

분급하여도 미립자 회수율은 34.02%에서 39.28%로 높아졌으나 불순광물의 미립화로 인하여 Al_2O_3 나 K_2O 함량은 다소 낮아짐을 확인하였다. 평균 입도 $5.5 \mu m$ 을 기준으로 분급하여 미립자로 회수한 산물의 회수율은 39.28 wt%이었으며, 화학성분은 SiO_2 64.64%, Al_2O_3 23.02%, Fe_2O_3 1.81%, K_2O 6.21%, Ig.loss 3.06%로 나타났다. 평균 입도 $10 \mu m$ 산물의 철분은 Fe_2O_3 1.35%으로 다소 낮아짐을 알 수 있었다. 이러한 원인은 굵은 산물로 분리되는 입자 중에 함

유되어 있던 함철 점토광물의 미립화로 분급과정에서 미립자로 회수되기 때문에 상대적으로 굵은 입자의 Fe_2O_3 함량이 낮아진 것으로 판단되었다.

이상의 결과들에 의하면 분쇄매체의 선속도에 따라 미립자 생성율이 달라지며, 미립자 생성율에 따라 분급산물의 품위변화가 나타남을 확인하였다. 선속도가 빨라짐에 따라 미립자 회수율은 증가되지만 Al_2O_3 등 일라이트 함량에 의하여 변화되는 화학성분 품위는 점차 낮아짐

Table 2. Yield and chemical compositions of purified samples with selective grinding and air classified at 26.2 m/sec

Mean particle size (μm)	Yield (wt%)	Chemical compositions (%)					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Ig.loss
larger than 10	51.21	84.19	9.80	1.43	2.44	0.40	1.44
10	4.43	72.59	17.59	1.48	4.68	0.61	2.67
9	3.50	69.25	19.74	1.64	5.26	0.65	3.03
8	2.60	67.81	20.61	1.75	5.47	0.67	3.12
7	4.24	66.77	21.36	2.00	5.75	0.66	3.04
5.5	34.02	62.38	24.61	1.71	6.77	0.74	3.52
Ore	100.00	74.57	16.30	1.57	4.33	0.55	2.37

Table 3. Yield and chemical compositions of purified samples with selective grinding and air classified at 36.6 m/sec

Mean particle size (μm)	Yield (wt%)	Chemical compositions (%)					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Ig.loss
larger than 10	44.25	84.45	9.65	1.35	2.48	0.4	1.61
10	5.17	74.22	16.42	1.48	4.34	0.58	2.61
9	4.02	71.16	18.39	1.63	4.88	0.61	2.9
8	3.32	70.05	19.22	1.7	5.12	0.63	2.88
7	3.96	70.26	19.17	1.72	5.08	0.63	2.68
5.5	39.28	64.64	23.02	1.81	6.21	0.69	3.06
Ore	100.00	74.57	16.30	1.57	4.33	0.55	2.37

Table 4. Yield and chemical compositions of purified samples with selective grinding and air classified at 57.6 m/sec

Mean particle size (μm)	Yield (wt%)	Chemical compositions (%)					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Ig.loss
larger than 10	19.68	89.11	6.15	1.38	1.48	0.30	1.07
10	4.16	87.06	7.55	1.62	1.84	0.37	1.17
9	4.28	83.55	9.48	1.75	2.38	0.42	1.93
8	3.43	81.84	10.71	1.75	2.73	0.45	2.01
7	4.33	79.22	12.64	1.66	3.27	0.47	2.18
5.5	64.12	67.99	20.98	1.60	5.66	0.66	2.91
Ore	100.00	74.57	16.30	1.57	4.33	0.55	2.37

을 확인하였다. 그러나 일라이트 함량이 다소 낮아지더라도 실제 조업에 있어서 회수율도 매우 중요한 인자이다. 따라서 미립자 회수율 향상을 위하여 분쇄매체의 선속도를 57.6 m/sec로 조절하여 선택분쇄 후 분급실험 한 결과를 다음 표 4에 나타내었다. -400 mesh 크기의 산물의 생성율이 80 wt% 수준으로 분쇄매체의 선속도 36.6 m/sec에 비하여 미립자가 급격히 증가되었다. 선택분쇄과정에서 미립자 생성율이 높아진 것과 유사하게 분급과정에서 미립자 회수율이 상당히 증가함을 알 수 있었다. 평균 입

도 5.5 μm 을 기준으로 분급하여 미립자로 회수한 산물의 회수율은 64.12 wt%이었으며, 화학성분 품위는 SiO₂ 67.99%, Al₂O₃ 20.98%, Fe₂O₃ 1.60%, K₂O 5.66%, 강열감량 2.91%로서 나타났으며, 10 μm U/F 산물의 회수율은 19.68 wt%, 화학성분의 품위는 SiO₂ 89.11%, Al₂O₃ 6.15%, Fe₂O₃ 1.38%, K₂O 1.48%, 강열감량 1.07%로 나타났다.

그림 6과 그림 7은 평균입도 10 μm 산물과 5.5 μm 산물의 X-선회절 분석 결과를 각각 나타낸 것이다. 그림 6의 평균입도 10 μm 산물의

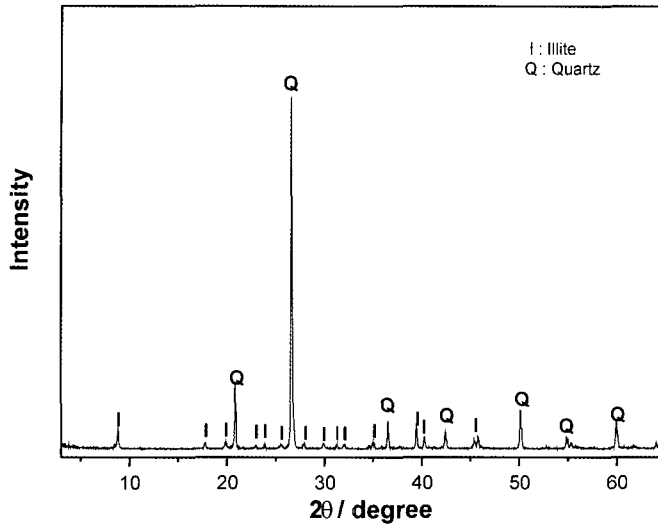


Fig. 6. XRD Pattern of product with mean particle size of 10 μm .

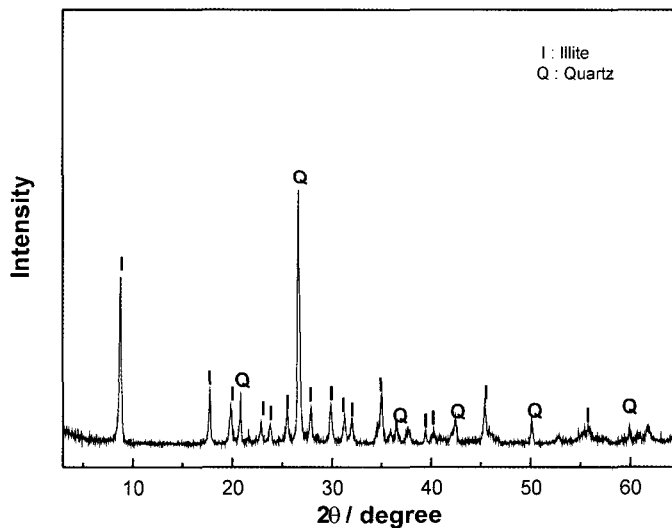


Fig. 7. XRD Pattern of product with mean particle size of 5.5 μm .

석영에 의한 회절 피크는 뚜렷하게 높은 반면 일라이트의 회절 피크는 미미한 정도로 나타나 화학성분 분석 결과를 입증하고 있다. 즉 미립자에는 일라이트 함량이 높아 Al_2O_3 , K_2O , 함량 및 강열감량이 높은 반면 SiO_2 의 함량은 낮게 나타나는 것이다. 이에 비해 그림 7의 평균입도 5.5 μm 인 미립자의 X-선회절 패턴에서는 석영의 피크 강도가 감소하고 일라이트에 의한 피크 강도가 증가하여 일라이트가 미립자로 많이

회수되고 있음을 알 수 있었다.

다음 그림 8과 그림 9는 각각 그림 6과 그림 7에 나타난 동일한 산물의 SEM과 EDX를 이용한 면(plane) 분석 결과이다. 그림 8의 평균입도 10 μm 산물의 구성광물을 보면, 석영이 주로 분포하고 있으며, 황철석이 일부 분포하여 충격식 분쇄기에 의하여 이러한 경질의 광물은 분쇄가 잘 이루어지지 않으며, 굵은 상태로 분포하기 때문에 분급과정에서 굵은 산물로 회수되

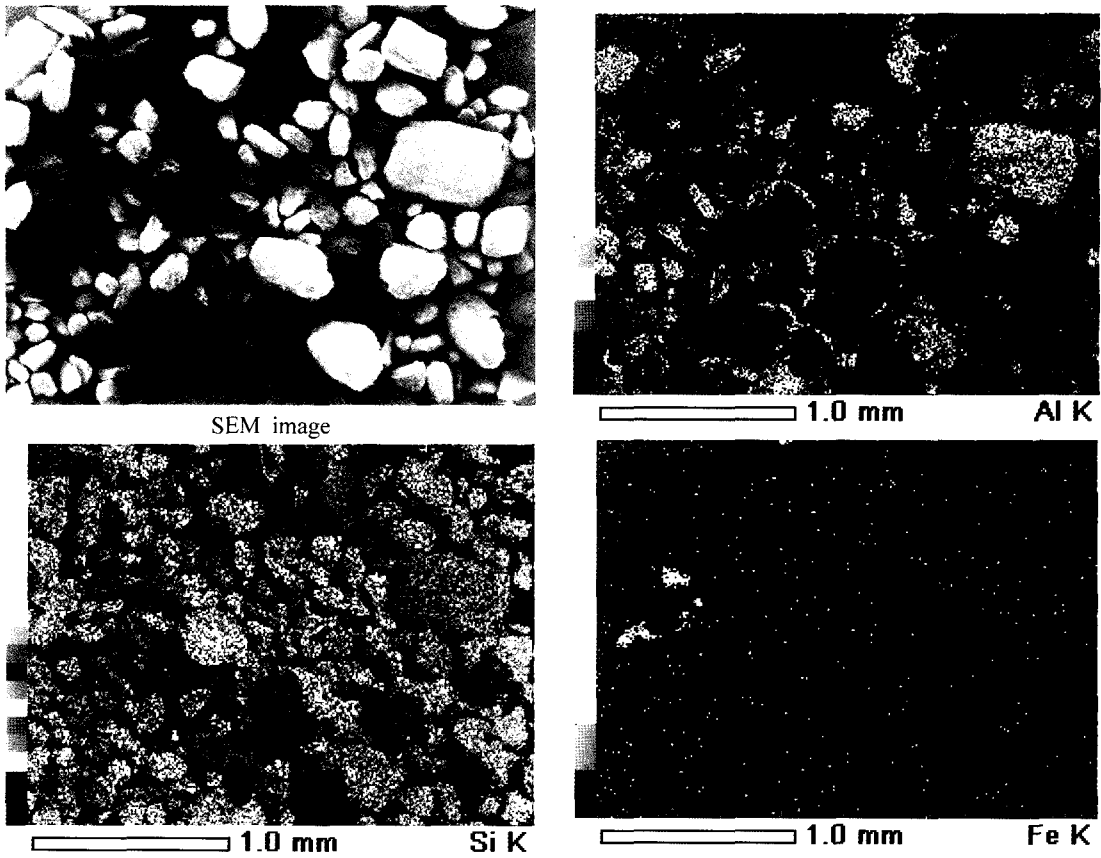


Fig. 8. SEM image and EDS mapping images of particles with mean particle size of 10 μm .

어 일라이트의 건식 정제가 가능케 되는 것을 보여주고 있다. 또한 입도별로 SEM 관찰한 결과, 입자 크기가 가늘어 질수록 석영과 황철석의 분포율은 점차 감소하게 됨을 알 수 있었으며, 가장 작은 입자인 그림 9의 평균입도 5.5 μm 산물의 SEM 사진은 주로 일라이트 입자로 구성되어 있으며, 일부 미립의 석영이 분포함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 구성광물의 경도 및 비중 등 물리적 특성을 이용하여 단체 분리 및 분급기술을 적용하여 건식 방법으로 일라이트의 정제가 가능함을 입증하는 결과이다. 화학성분 품위를 종합해보면 분쇄매체의 선속도를 증가시켜 선택분쇄하면 굵은 산물에 분포하던 비교적 단단한 상태의 일라이트와 일부 석영 등이 미립화가 진행되어 미립자로 회수되기 때문에 굵은 산물과 미립자 공히 Al_2O_3 함량은 낮아지고 SiO_2 함량은 높아지는 현상이 발생하였다. 따라서 미립자의 품위를 고려하여 선

택분쇄기 종류 및 선택분쇄조건의 조절이 필수적인 것으로 판단되었다. 결론적으로 건식 선택분쇄 및 분급 기술에 의하여 정제하는 기술의 장점은 회수코자 하는 제품의 특성을 고려하여 선택분쇄 정도와 분급입도 조절이 간편하고 탈수, 건조 등 습식 공정에서의 문제점을 완전히 해결할 수 있는 기술로 판단된다.

정제산물의 회수

선택분쇄 및 분급에 의하여 각 입도별로 산물을 회수하였다. 이러한 산물은 회수코자 하는 정제산물의 품위와 실수율을 고려하여 분급점을 조절할 필요가 있을 것이다. 따라서 다음 표 5에는 일반적인 산업용 충전재로 사용되는 평균입도 9 μm 을 기준으로 분급하여 정제산물과 광미로 회수하는 경우를 가정하여 정리한 결과이다. 즉, 분쇄매체의 선속도를 57.6 m/sec로 조

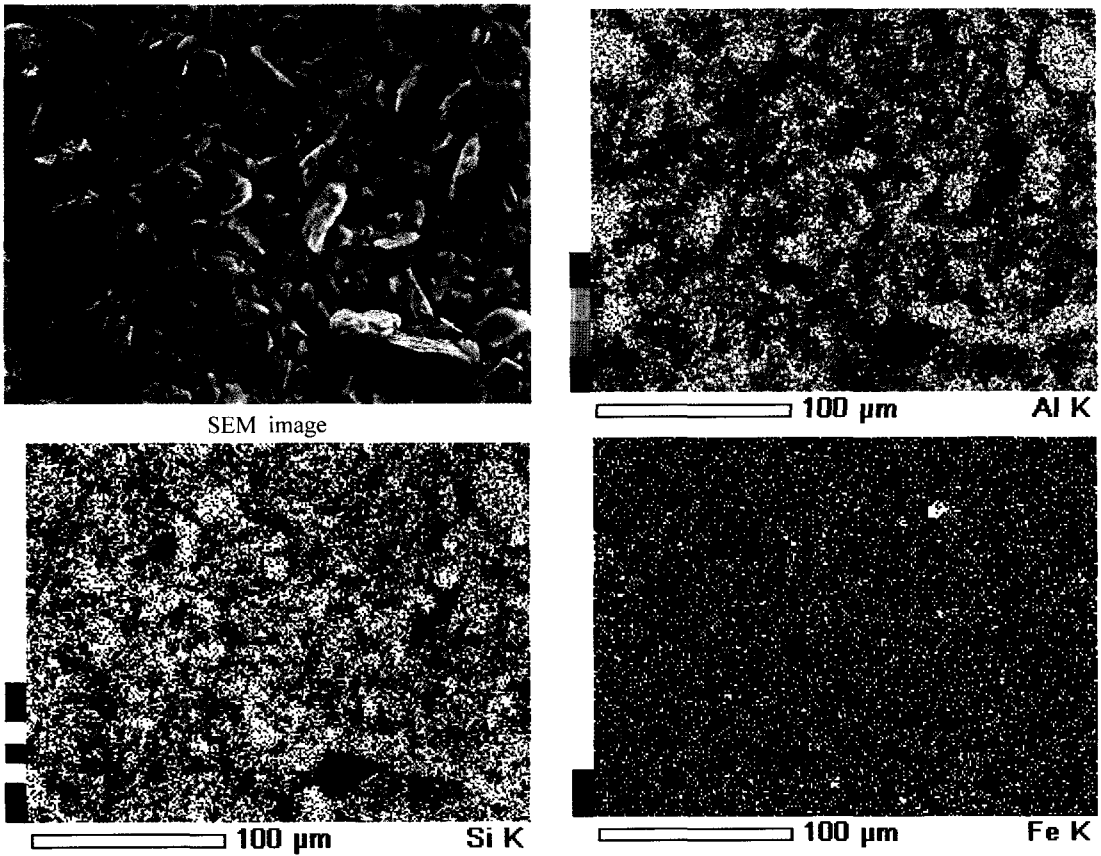


Fig. 9. SEM image and EDS mapping images of particles with mean particle size of 5.5 μm .

Table 5. Yield and chemical compositions of final products

Product	Yield (wt%)	Chemical compositions (%)					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Ig.loss
Concentrate	76.16	70.13	19.40	1.62	5.20	0.63	2.77
Tail	23.84	88.75	6.39	1.42	1.54	0.31	1.09
Ore	100.00	74.57	16.30	1.57	4.33	0.55	2.37

절하여 선택분쇄 후 평균입도 9 μm 를 기준으로 분급하면 화학조성 SiO₂ 70.13%, Al₂O₃ 19.40%, Fe₂O₃ 1.62%, K₂O 5.20%, 강열감량 2.77%의 정제산물을 76.16% 정도 생산이 가능할 것으로 예측 가능하다. 정제산물을 회수하고 나머지 광미는 23.84% 정도이며, 광미의 화학조성은 SiO₂ 88.75%, Al₂O₃ 6.39%, Fe₂O₃ 1.42%, K₂O 1.54%, 강열감량 1.09% 정도로 예상된다. 이러한 결과는 회수코자 하는 정제산물의 품위와 생산을 등을 고려하여 선택분쇄 정도와 분급점의 조절로 원하는 정광의 생산이 가능함을 제시하는

결과이다. 또한 비금속 광물의 활용에는 미립화와 입도조절이 필수적인데, 본 연구결과는 정제와 입도조절 공정을 겸하는 기술임을 알 수 있다.

결론

선택분쇄 및 분급 기술에 의하여 건식 방법으로 일라이트 정제를 위한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 광석의 광물감정 결과, 주 구성광물은 석영과 일라이트이며, 소량 수반광물로는 황철석,

섬아연석, 황동석 등이다.

2) 습식 해쇄 후 체가름 결과, 미립자로 갈수록 Al_2O_3 , K_2O 함량 및 강열감량은 높아지며, SiO_2 함량은 낮아졌으며, Fe_2O_3 의 함량은 굵은 입자가 다소 낮았으나, 입도에 관계없이 비교적 균일하게 나타났다.

3) 단체분리를 위한 충격식 분쇄기의 분쇄매체의 선속도가 증가함에 따라 미립자 생성율은 증가되었으며, 분급과정에서의 미립자 회수율 역시 증가되었다.

4) 분쇄매체 선속도를 57.6 m/sec로 조절하여 선택분쇄 후 평균입도 5.5 μm 을 기준으로 분급하면 미립자 회수율은 64.12 wt%이었으며, 화학성분은 SiO_2 67.99%, Al_2O_3 20.98%, Fe_2O_3 1.60%, K_2O 5.66%, 강열감량 2.91%이었다. 이에 비해 평균입도 10 μm 산물의 회수율은 19.68 wt%, 화학성분은 SiO_2 89.11%, Al_2O_3 6.15%, Fe_2O_3 1.38%, K_2O 1.48%, Ig.loss 1.07%로 나타났다. 이는 원광에 비해 석영이 급격히 증가되고 일라이트가 감소된 결과이다.

5) 분쇄매체의 선속도를 57.6 m/sec로 조절하여 선택분쇄 후 평균입도 9 μm 를 기준으로 분급하면 SiO_2 70.13%, Al_2O_3 19.40%, Fe_2O_3 1.62%, K_2O 5.20%, 강열감량 2.77%인 정제산물을 76.16 wt% 정도 생산이 가능할 것으로 예측 가능하다. 이는 평균입도 9 μm 를 기준하여 분급된 결

과에 비해 일라이트의 증가와 석영의 감소가 더욱더 진행된 결과이다. 정제산물을 회수하고 나머지 광미는 23.84 wt% 정도이며, 품위는 SiO_2 88.75%, Al_2O_3 6.39%, Fe_2O_3 1.42%, K_2O 1.54%, 강열감량 1.09% 이었다. 광미는 거의 석영과 소량의 일라이트, 산화철 및 황화철 광물로 구성된다.

6) 시험된 결과에 의하면 선택분쇄후 평균입도 9 μm 를 기준한 분급이 회수율 향상 및 불순 광물의 제거효율이 가장 높은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 오재현, 김미성 (1991) 영동산 일라이트에 의한 산업 폐수 처리. 한국자원공학회지, 28, 168-173.
 이강문 (1995) 광물처리공학. 464p, 반도출판사.
 추창오 (2001) 일라이트의 광물학적 특성과 그 응용. 광물과 산업, 14(2), 29-37.
 久保輝一郎 (1982) 분쇄이론과 응용. 丸善.
 하홍민, 김재황, 김삼철, 김영민, 고영두 (2001) 육성·비육돈에 대한 일라이트의 첨가급여 효과. 동물자원지, 43(5), 663-670.
 Srodon, Eberl (1984) Illite. Micas. Reviews in Mineralogy, 13, 495-544.

2004년 12월 10일 원고접수, 2005년 3월 16일 게재승인.