

분쇄방식 및 분쇄율이 고령토 광물의 건식 정제에 미치는 영향

Effect of Grinding Method and Grinding Rate on the Dry Beneficiation of Kaolin Mineral

김 상 배 (Sang Bae Kim) · 최 영 윤 (Young Yoon Choi) ·
조 성 백 (Sung Baek Cho) · 김 완 태 (Wan Tae Kim)*

한국지질자원연구원 자원활용소재연구부
(Minerals and Materials Processing Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30,
Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea)

요약 : 볼 밀과 임팩트 밀의 분쇄율에 따른 단체분리(선택적 분쇄)와 공기 분급에 의한 고령토 광물의 정제특성을 조사하였다. 원광석을 볼 밀과 임팩트 밀로 분쇄하여 325 mesh 이하 미립자의 생성율을 유사하게 조절하였으며 미립자에 대한 화학성분을 분석함으로써 선택적 분쇄 특성을 조사하였다. 분쇄된 시료는 공기 분급기를 사용하여 미립자와 굵은 입자로 분리하고 각 산물에 대한 화학조성분석을 통하여 분쇄 방식에 따른 정제효과를 비교하였다. 볼 밀과 임팩트 밀 모두 분쇄율이 높아질수록 미립자의 고령토 품위는 낮아지는 경향을 나타내었다. 특히 볼 밀의 경우에서 석영, 장석과 같은 불순광물의 혼입으로 인해 미립자의 불순물 함량이 높아짐을 알 수 있었다. 볼 밀의 경우 공기 분급기의 분급점을 43 μm 로 하면 정광의 생산율은 66.2 wt%이었으며 철성분 제거율은 5.3%, 칼슘성분 제거율은 34.6%로 나타났다. 반면 임팩트 밀을 사용하여 동일한 조건으로 분쇄 후 분급한 산물의 정광 생산율은 64.4 wt%이며 철성분 제거율은 34.2%, 칼슘성분 제거율은 67.6%, 티탄성분 제거율은 25.0%를 나타내어 임팩트 밀의 경우가 불순물의 제거에 우수한 결과를 보였다.

주요어 : 고령토광물, 정제, 단체분리, 분쇄, 분급

ABSTRACT : The characteristics of beneficiating kaolin mineral by liberation (selective grinding) and air classification have been investigated, comparing the grinding rates of ball mill and impact mill. The ore was ground using a ball mill and a impact mill to evaluate the grindability of the two grinding methods based on the constant production amount of fine particles in size less than 325 mesh. Then, the fine product was further separated into two fractions using an air-classifier and each fraction was chemically analyzed to compare the beneficiation efficiency of the two grinding methods. The chemical grade of kaolin mineral decreased as increasing the grinding rate of both the mills, particularly in the case of ball mill because of overgrinding impurities such as quartz and feldspar. In the case of the ball milling, the fine fraction less than 325 mesh was air-classified at a cutting point of 43 μm . The production rate of the air-classified concentrate was found to be 66.2 wt%, removing 5.3% of Fe_2O_3 and 34.6% of CaO. Under the same conditions mentioned above with the impact mill, the production rate of the air-classified concentrate was 64.4 wt%, removing 34.2% of Fe_2O_3 , 67.6% of CaO and 25.0% of TiO_2 . Therefore, our results indicate that impact mill is superior to ball mill in terms of impurity removal.

*교신저자: kimwt@kigam.re.kr

Key words : kaolin mineral, beneficiation, liberation, grinding, classification

서 언

카올린 광물은 산업원료로서 매우 중요한 위치를 점하고 있다. 카올린 광물의 가장 고전적인 용도는 세라믹 분야로의 활용으로 근래 들어 제지용 코팅제나 충전재, 고무, 살충제, 의약품, 촉매, 흡착제 등의 원료 소재로 활용되고 있다 (Mako *et al.*, 2006; N. J. Saikia *et al.*, 2003). 카올린 광물은 장석이 지표에서 풍화되어 분해 또는 열수작용을 받아 생성되기 때문에 생성되는 정도 및 모양의 종류에 따라 조성광물과 화학성분이 달라지는 특성을 나타낸다. 순수한 카올린 광물($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)는 백색이며, 화학조성은 SiO_2 46.54%, Al_2O_3 39.50%, H_2O 13.96%의 조성을 가진다 (Grimshaw, R. W., 1971). 여기에 철분이나 티탄을 함유하는 불순물이 존재하면 색상을 떨어뜨리고, 칼슘 성분이 함유되면 가소성을 저하시키는 것으로 알려져 있다. 채광된 카올린 광물은 생성기원이나 퇴적환경에 따라 다르지만 일반적으로 석영(Quartz), 티탄철석(Ilmenite), 금홍석(Rutile), 황철석(Pyrite), 장석(Albite) 등을 함유하게 된다. 이러한 불순물들은 카올린 광물의 특성을 결정지으며, 최종 용도에 영향을 미친다. 일반적으로 함철광물은 산화철이나 수산화철이 수반되지만 때때로 황철석, 티탄철석이 수반되는 경우도 있으며, 백운모(Muscovite)가 함유되는 경우도 있다 (Malden, P. *et al.*, 1967). 카올린 광물의 정제는 단순한 체질, 습식 자력선별 (Shoumkov, S. *et al.*, 1987; Tsunematsu *et al.*, 1989; Maurya *et al.*, 1990), 수비(Otsuka *et al.*, 1982) 부유선별법 (Greene *et al.*, 1961; Yamanaka *et al.*, 1986), 옥살산이나 염산을 이용한 침출 (Veglio, F. *et al.*, 1996) 등 여러 가지 물리, 화학적 방법에 의하여 정제되고 있다.

국내에는 약 1천만톤 이상의 카올린 광물이 부존되어 있는 것으로 알려져 있으나 (산업자원부, 2006) 결정구조(주로 침상결정) 및 불순물의 영향으로 용도에 제약이 많은 상태이다. 특히 모양의 미 풍화로 인한 장석(주로 사장석)질 불순물과 흑운모, 산화철 등의 함철광물 혼입이 많아 (손연수 외, 1985) 별도의 정제과정을 거치지 않고는 고급 원료로 사용이 곤란하다 (Thompson *et*

al., 1984). 따라서 고품위가 요구되는 원료로의 사용을 위해서 또는 새로운 용도개발을 위해서도 국내 광석의 특성에 맞는 경제적인 정제기술의 개발이 시급한 과제로 대두되고 있다. 카올린 광물의 정제기술은 주로 습식 공정이며 습식 공정한 경우 탈수, 건조는 물론이고 용수, 폐수처리 등 원가상승 요인이 많아 산업화를 저해하는 요인이 되고 있다.

물리적 정제기술의 경우 유용광물과 무용광물간의 분리, 즉, 단체분리(liberation)가 효율적으로 이루어져야 생산율 및 실수율 측면에서 우수한 선별성적을 얻을 수 있다 (김상배 외, 2005). 따라서 본 연구에서는 정제 현장에서 널리 사용되는 볼 밀과 임팩트 밀을 사용하여 미립자 생성율을 달리하면서 단체분리를 위한 건식 분쇄 후 이를 다시 공기 분급기를 사용하여 카올린 광물이 많이 농축된 미립의 정광과 불순광물이 많이 농축된 굵은 광미를 분리하여 그 결과를 평가함으로써 효율적인 단체분리를 위한 분쇄기 선정 및 분쇄율을 규명하여 카올린 광물의 건식 정제 가능성을 제시하고자 하였다.

시료 및 실험방법

실험에 사용된 시료는 경남 산청지역에서 산출되는 백색 카올린 광물로서 15 wt% 정도의 수분을 함유하고 있었다. 시료의 건조를 위하여 $100 \pm 5^\circ\text{C}$ 상태의 공기 순환식 건조기 내에서 수분함량 3 wt% 정도가 되도록 충분히 건조시켰다. 건조된 시료는 조 크러셔(Jaw crusher) 및 콘 크러셔(Cone crusher)를 사용하여 3 mm 크기 이하로 파쇄하여 실험용 시료로 사용하였다. 원광석의 특성분석을 위하여 X-선 회절분석(XRD, X-pert MPD Philips, Netherland), X-선 형광분석(XRF, MFX-2100, Shimazu, Japan), 광학현미경 감정 등을 통해 조암광물의 종류 및 정량분석, 화학성분 그리고 조암광물의 산출상태를 확인하였다. 또한 원광석을 구성하는 광물 입자의 크기에 따른 품위의 변화를 관찰하기 위하여 습식 체가름 실험을 수행하였다. 체가름 실험을 위하여 25%의 고체 농도를 유지하면서 해쇄기(Scrubber)를 사용하여 20분 동안 해쇄한 후 표준체(Tyler

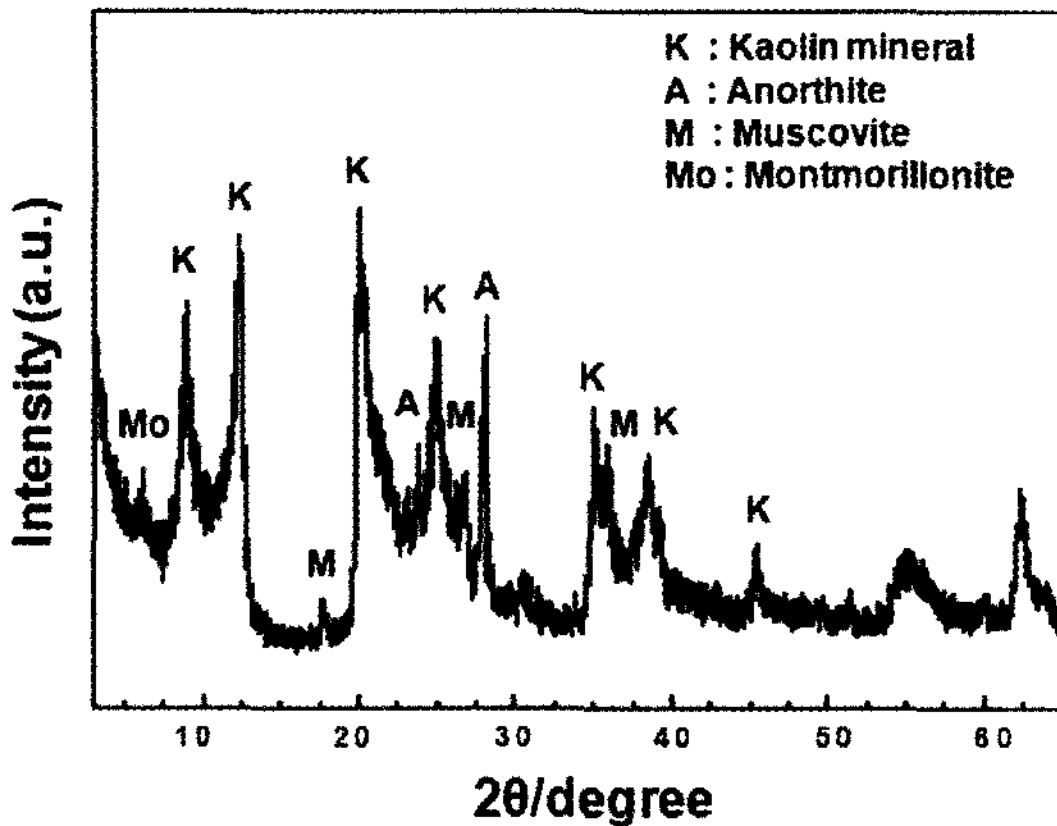


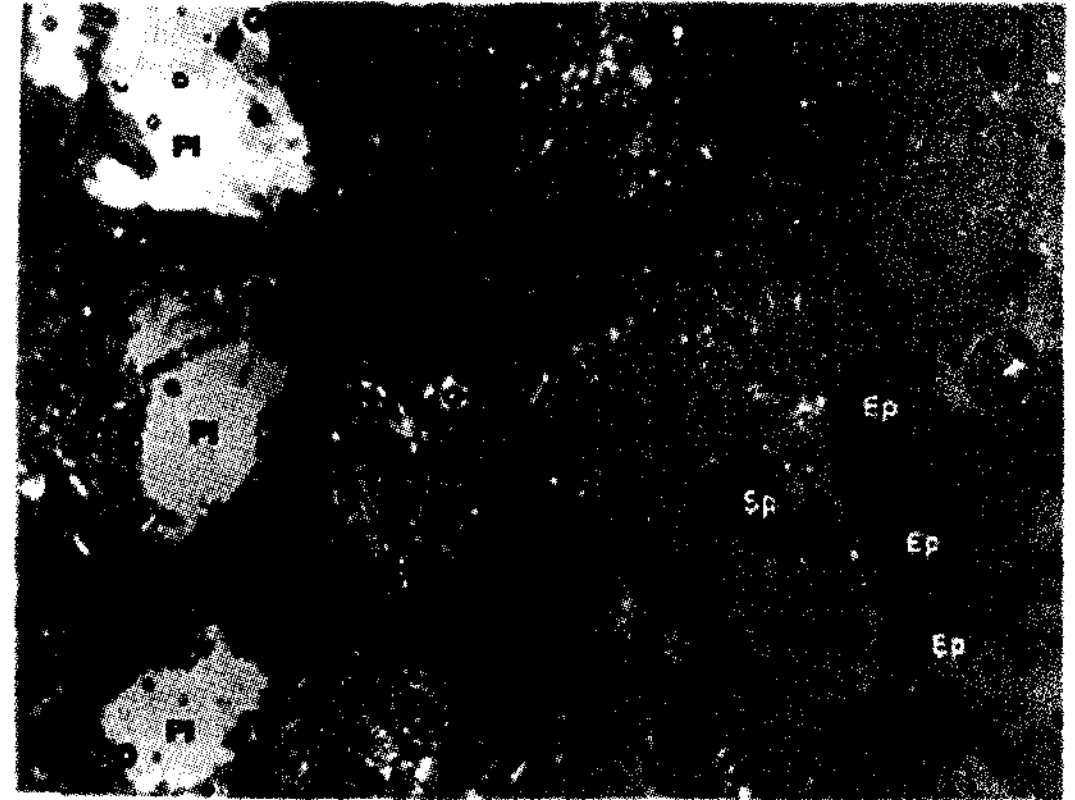
Fig. 1. X-ray diffraction pattern of raw ore.

standard sieve)를 사용하여 습식 체질하여 탈수 후 충분히 건조하고 입도별 분포율과 정량분석을 행함으로써 입도분리에 의한 화학성분의 품위변화 경향을 조사하였다. 유용광물과 불순광물의 단체분리를 위하여 실험실 규모의 충격식 분쇄기(Fine impact mill, 100 UPZ, Hosokawa Alpine, Germany)와 알루미나 재질의 볼 밀(Ball mill)을 사용하여 각각 분쇄매체의 주속(Peripheral velocity)과 분쇄시간을 조절하여 325 mesh 이하 크기의 미립자 생성율을 유사하게 조정된 후 분쇄실험을 수행하여 분쇄기 종류에 따른 선택분쇄 효과를 조사하였다. 임팩트 밀의 분쇄매체 주속은 26.2, 36.1, 47.1 m/sec로 조절하였다. 실험에 사용된 볼 밀의 규격은 200 × 200 mm 크기이며 알루미나 재질의 직경 30 mm 크기의 볼을 50 v/v%로 장입하여 입계속도의 75% 수준인 76 rpm에서 5, 8, 13 min 분쇄하였다. 분쇄된 산물 중에 혼합되어 있는 불순광물의 제거를 위하여 공기 분급기를 사용하였다. 분급실험은 공기 분급기(Air classifier, 100 MZR, Alpine, Germany)를 사용하여 최대 입도(d_{97})를 43, 25, 17 μm 로 조절하여 분급하여 각 산물의 생산율 및 정량분석을 통하여 불순물에 의한 품위변화 특성을 조사함으로써 선택분쇄 및 분급에 의한 정제 효과를 조사하였다.

결과 및 고찰

원료의 특성 평가

그림 1은 시료의 X-선 회절 분석 결과로 카올



Pl: Plagioclase, Sp: Sphene, Ep: Epidote, cross nicol ×65

Fig. 2. Optical micrograph of raw ore.

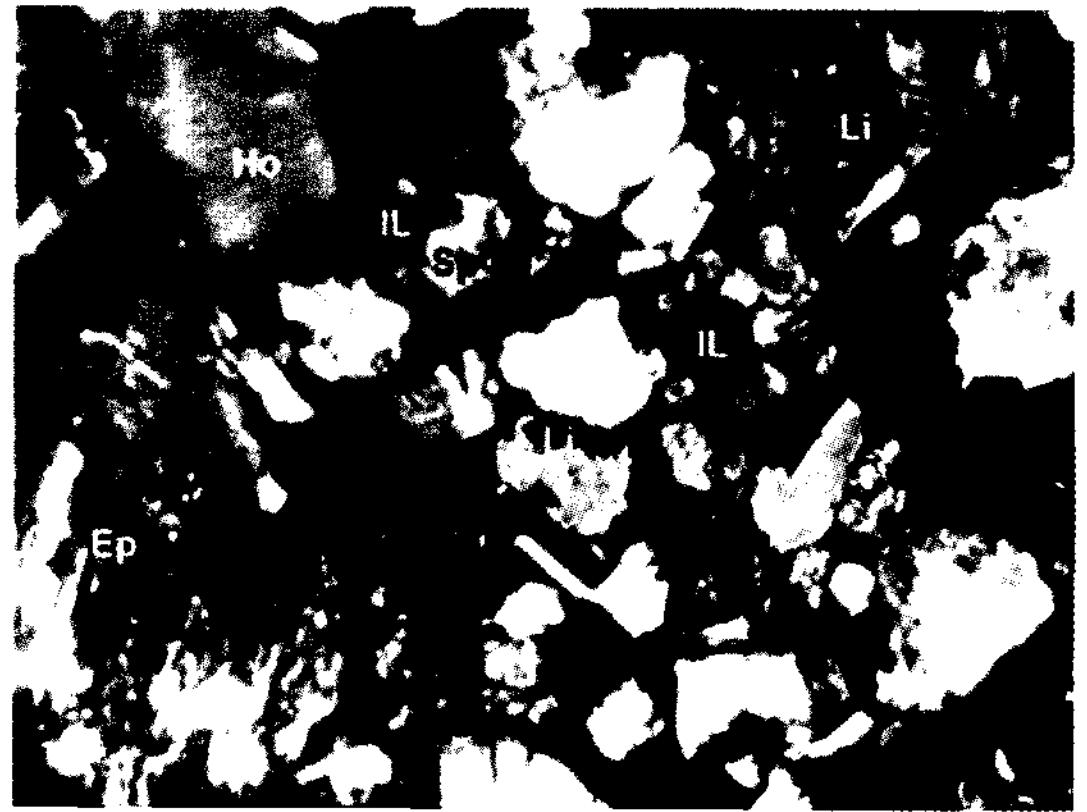
린 광물이 주를 이루고 있으며 그 외에 몬모릴로나이트(Montmorillonite), 사장석(Anorthite), 백운모 등이 관찰되었다. 조성 광물의 함량은 카올린 광물 $55.3 \pm 0.70\%$, 사장석 $26.3 \pm 0.62\%$, 백운모 $18.0 \pm 0.64\%$, 몬모릴로나이트 $0.4 \pm 0.04\%$ 이었으며 화학 조성은 SiO_2 44.98%, Al_2O_3 36.21%, Fe_2O_3 1.14%, CaO 3.61%, TiO_2 0.16%, LOI 12.42%로 나타나 비교적 고품위 광석임을 알 수 있었다(이수정 외, 2008). 조암광물의 산출상태를 확인하기 위한 현미경 관찰 결과를 그림 2에 나타내었다. 원광에 소량 수반되는 함철 불순광물은 자력선별기를 사용하여 분리하였으며 현미경 관찰 결과를 다음 그림 3 및 4에 나타내었다. 현미경 관찰 결과, 주 구성광물은 침상의 할로사이트(Halloysite)이며 사장석 계열에 속하는 회장석과 조장석 등이 관찰되었다. 사장석은 비교적 굵은 상태로 산출되며 독립된 형태의 티탄석(Sphene)과 굵은 입자의 녹염석(Epidote)도 확인되었다.

자력선별기를 통해 분리된 철산화물은 갈철석(Limonite)과 적철석(Hematite)이었으며, 티탄철석과 금홍석이 혼재함을 알 수 있었다. 또한 티탄철석은 대부분 티탄석에 둘러 싸여져 있는 형태로 관찰되었다. 석영은 단독으로 산출되기도 하지만 미량이며 착색광물로는 녹니석(Chlorite)과 녹염석이 있으며 일부 각섬석(Hornblende)도 확인되어 수반광물의 종류가 매우 다양함을 알 수 있었다.



R: Rutile, Il: Ilmenite, cross nicole ×65

Fig. 3. Optical micrograph of raw ore.



Ho: Horblend, cross nicole ×65

Fig. 4. Optical micrograph of raw ore.

Table 1. Chemical composition of the fractionated particles of raw ore

Fracture (mesh)	Dist. (wt%)	Composition (%)								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	LOI
+16	1.58	46.33	32.12	1.94	6.89	0.30	0.50	0.74	0.40	11.15
16/28	1.84	46.65	31.39	1.74	9.58	0.25	0.44	1.38	0.41	8.53
28/35	2.63	47.15	31.12	1.26	11.59	0.19	0.33	1.93	0.30	6.50
35/48	4.47	46.94	31.59	1.08	11.45	0.19	0.31	2.01	0.24	6.55
48/65	2.90	46.42	31.94	1.16	10.77	0.23	0.32	1.85	0.28	7.37
65/100	5.00	45.91	32.68	1.26	9.57	0.29	0.36	1.66	0.26	8.46
100/150	4.47	45.43	33.04	1.50	8.41	0.39	0.45	1.45	0.28	9.40
150/200	5.53	44.83	34.82	1.54	5.31	0.46	0.57	1.04	0.21	11.53
200/250	5.26	44.78	35.67	1.51	3.84	0.49	0.65	0.85	0.18	12.31
250/325	3.68	44.50	36.35	1.37	2.65	0.47	0.68	0.72	0.14	13.37
-325	62.64	44.54	37.86	0.99	1.20	0.30	0.67	0.54	0.11	14.04
Total	100.00	44.98	36.21	1.14	3.61	0.32	0.60	0.85	0.16	12.42

체가름 실험 결과

표 1은 원광석의 입도별 성분분석 결과를 나타낸 것이다. 이는 원광석에 대한 광물감정 결과 수반광물의 종류 및 크기가 매우 다양함을 알 수 있었으므로 원광석을 입도별로 분리하여 입도분포에 따른 화학성분의 변화를 조사하여 불순광물이 비교적 많이 농축되는 입도를 규명하고자 하는 것이다.

체가름 실험결과 325 mesh 이하의 산물의 양이 62.64 wt%로 비교적 많으며 화학조성은 SiO₂

44.54%, Al₂O₃ 37.86%, Fe₂O₃ 0.99%, CaO 1.20%, TiO₂ 0.11%, LOI 14.04%로 원광에 비하여 철성분 및 칼슘성분 등의 불순물의 함량이 낮아지는 경향을 보였다. 그러나 이보다 굵은 입자의 경우는 상이한 결과를 보이는데 16 mesh 보다 굵은 입자는 SiO₂ 46.33%, Al₂O₃ 32.12%, Fe₂O₃ 1.94%, CaO 6.89%, TiO₂ 0.40%, LOI 11.15%로 원광에 비하여 철성분 및 칼슘성분의 함량이 높음을 알 수 있었다. 체가름 결과 37.36 wt%에 해당하는 325 mesh 이상의 산물의 화학조성은 SiO₂ 45.71%, Al₂O₃ 33.44%, Fe₂O₃

Table 2. Chemical composition of the fractionated particles according to the peripheral velocity of impact mill

Fracture (mesh)	Dist. (wt%)	Chemical composition (wt%)									Peripheral velocity (m/sec.)
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	LOI	
+325	38.7	46.07	34.23	1.42	7.34	0.35	0.52	1.33	0.22	8.68	26.2
-325	61.3	44.29	37.46	0.96	1.26	0.30	0.65	0.55	0.12	14.78	
+325	33.6	46.23	33.97	1.40	7.53	0.37	0.52	1.39	0.23	8.50	36.1
-325	66.4	44.35	37.35	1.01	1.63	0.29	0.64	0.58	0.12	14.41	
+325	28.2	46.67	33.51	1.40	7.98	0.35	0.50	1.42	0.24	8.15	47.1
-325	71.8	44.32	37.27	1.04	1.89	0.31	0.64	0.63	0.13	14.10	

1.39%, CaO 7.65%, TiO₂ 0.24%, LOI 9.70%로 미립자에 비하여 화학조성상의 불순물의 함량이 상당히 높아 단순히 체질에 의해서도 정제가 가능함을 알 수 있었다.

분쇄실험 결과

자연에서 산출되는 광물은 유용광물과 무용광물을 동시에 함유하는 미분리 입자(Locked particle)들이 대부분이다. 이러한 입자들을 파쇄 및 분쇄조작을 통하여 무용광물을 효과적으로 분리할 수 있는 조건의 부여 즉, 단체분리를 이루는 정도까지의 분쇄를 적절하게 수행하는 것이 필수적이다.

일반적으로 광석을 파·분쇄할 경우에는 결정의 입자 경계면에서 깨어져 분리가 일어나는 intergranular liberation과 경계면과는 관계없이 입자 내에서 무차별하게 깨어지는 transverse liberation이 있다. Transverse liberation의 경우는 분쇄과정에서 불순 광물 역시 미립화가 이루어져 분급과 같은 품위 향상기술의 적용에 많은 제약을 받는다. 이는 분급에 의한 정제기술은 대상 입자의 크기 및 비중에 절대적인 영향을 받기 때문이다. 따라서 유용광물의 효과적인 분리를 위해서는 사용하는 파쇄기와 분쇄기가 어떠한 기전(Mechanism)에 의하여 파쇄 및 분쇄가 이루어지는지를 고려하여 장비를 선정하는 것이 중요하다. 광물입자의 효과적인 단체분리를 위해서는 광물을 구성하고 있는 단일 결정입자의 경계면이 분리되는 intergranular liberation, 즉 선택적 분쇄

를 유도하는 장비의 선정과 투입 에너지를 조절하는 것이 바람직하다.

최근 고체입자의 파쇄 및 분쇄에 사용되고 있는 장비는 종류나 규격면에서 매우 다양하다. 본 연구에서는 주 분쇄 기전이 충격력이지만 가해지는 에너지의 양이 상대적으로 적은 임팩트 밀과 실제 광물의 정제 현장에서 널리 사용되는 강력한 분쇄기인 볼 밀을 사용하여 단체분리를 위한 분쇄실험을 수행하였다. 효율적인 정제를 위하여 임팩트 밀은 주속을 적절하게 조절하였으며 볼 밀은 분쇄시간(투입에너지)를 조절하였다. 이와 같은 분쇄조건의 조절을 통하여 원광에 포함된 경도가 높은 장석이나 석영과 같은 불순광물은 굵은 입자로 남게 하고, 경도가 낮은 고령토 입자만을 선택적으로 미립화시키는 선택적 분쇄를 유도하기 위하여 노력하였다.

임팩트 밀의 주속을 달리하여 분쇄한 산물의 평가를 위해 325 mesh 체를 사용하여 습식으로 체가름하였으며 각각의 분포율 및 화학성분 분석 결과를 표 2에 기재하였다. 분쇄매체의 주속을 26.2 m/sec로 하여 분쇄한 경우 325 mesh 이하의 산물의 생성율은 61.3 wt%이었으며 성분 분석 결과는 SiO₂ 44.29%, Al₂O₃ 37.46%, Fe₂O₃ 0.96%, CaO 1.26%, TiO₂ 0.12%, LOI 14.78%로 나타났다. 이와는 달리 굵은 산물의 경우는 SiO₂ 46.07%, Al₂O₃ 34.23%, Fe₂O₃ 1.42%, CaO 7.34%, TiO₂ 0.22%, LOI 8.68%로 미립산물에 비하여 불순물이 상대적으로 많이 포함되어 있음을 알 수 있었다. 분쇄매체의 주속을 36.6 m/sec로 증가시켜 분쇄하면 325 mesh 이하의 산물은

Table 3. Chemical composition of the fractionated particles according to the grinding time of ball mill

Prod.	Yield (wt%)	Composition (%)									Grinding time (min.)
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	LOI	
+325	38.1	45.72	34.78	1.39	6.67	0.36	0.67	1.41	0.23	9.55	5
-325	61.9	44.53	37.09	0.99	1.72	0.30	0.56	0.51	0.12	14.19	
+325	32.9	45.31	34.84	1.28	6.40	0.36	0.53	1.53	0.23	9.83	8
-325	67.1	44.82	36.88	1.07	2.24	0.30	0.63	0.52	0.13	13.69	
+325	28.0	45.06	35.21	1.19	5.63	0.37	0.46	1.72	0.22	10.52	13
-325	72.0	44.95	36.60	1.12	2.82	0.30	0.65	0.51	0.14	13.16	

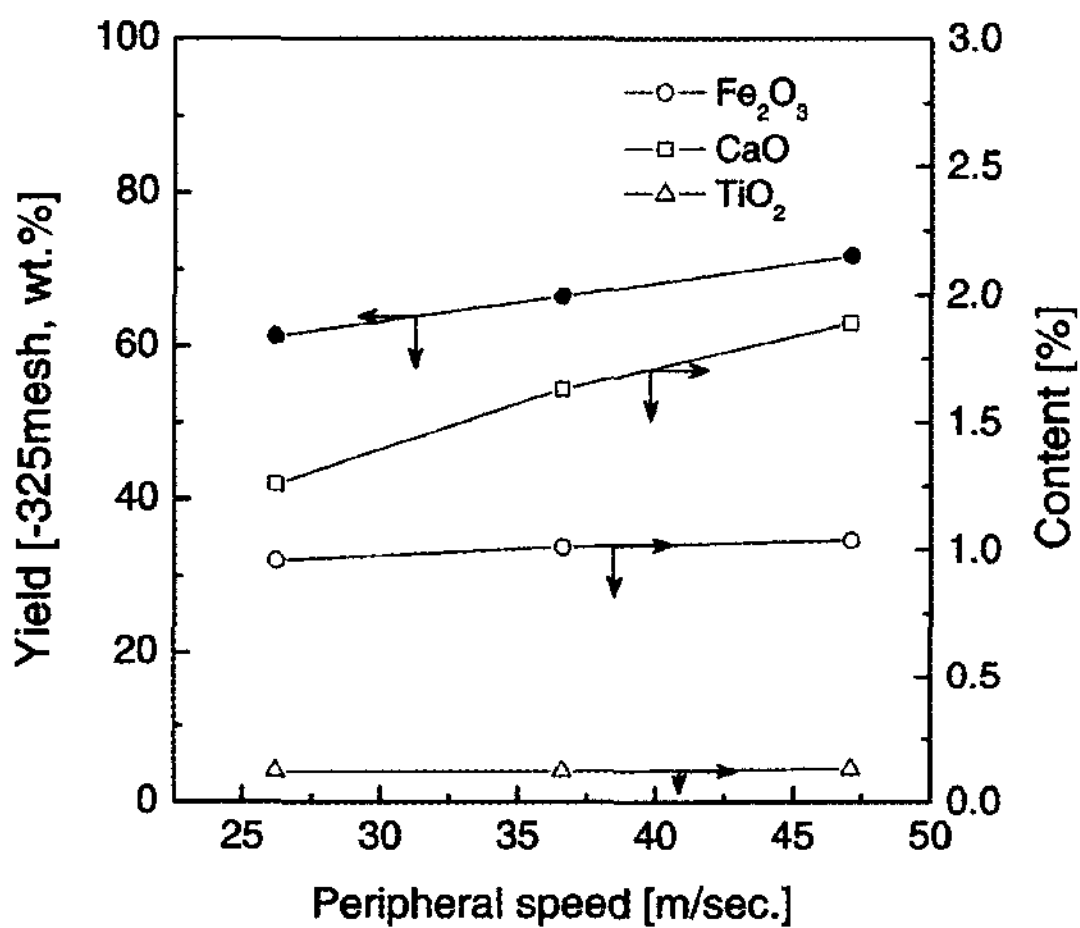


Fig. 5. Yield and contents of impurities of -325 mesh fraction as a function of peripheral speed of impact mill.

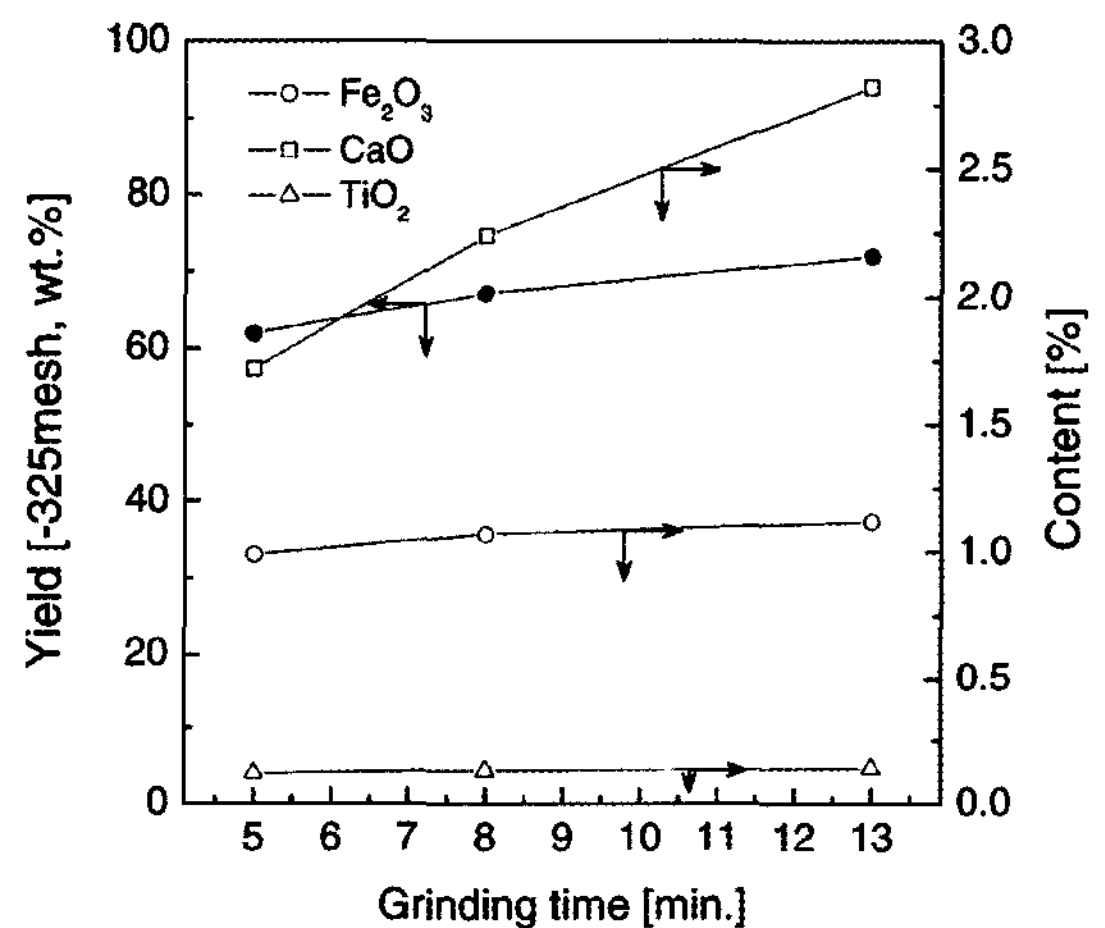


Fig. 6. Yield and contents of impurities of -325 mesh fraction as a function of grinding time of ball mill.

66.4 wt%로 증가되어 주속을 증가시키에 따라 분쇄율이 향상되면서 부분적으로 불순물의 미립화가 더 진행되어지는 것으로 나타났다. 또한 주속을 47.1 m/sec로 증가시키면 325 mesh 이하의 산물의 생성율은 71.8 wt%까지 증가되었다. 이와 같이 임팩트 밀의 주속의 증가에 따라 미립자의 생성율은 증가되었으며 불순광물의 미립화에 의해 고령토 광물의 품위가 저하되는 결과를 확인하였다. 325 mesh 이하의 고령토 광물의 품위를 결정하는 화학조성상의 인자는 철성분, 칼슘성분 및 티탄성분의 함량으로 주속의 변화에 따른 각 성분의 함량 변화를 그림 5에 나타내었다. 철 성분의 경우 주속이 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 보였으며 칼슘성분의 경우는 철 성분에

비해 변화량에 보다 큼을 알 수 있었다. 그러나 티탄성분의 변화량은 미미하였다.

표 3은 볼 밀의 분쇄시간을 5, 8, 13 min으로 변화시키면서 분쇄한 시료에 대한 체가름 실험 결과이다. 분쇄시간 5 min의 경우 325 mesh 이하의 산물의 생성율은 61.9 wt%이었으며 분쇄시간을 연장하면 325 mesh 이하의 산물의 생성율은 증가되었으나 불순광물로부터 기인하는 Fe₂O₃, CaO, TiO₂ 등의 함량은 그림 6과 같이 증가하는 경향을 보였다. 결과적으로 고령토 광물은 분쇄를 통해 325 mesh 이하의 미립자로 농축되었음을 확인할 수 있으며 분쇄효과는 임팩트 밀을 사용한 경우에서 분쇄된 미립자가 불순광물의 영향을 받는 화학조성상의 함량이 낮음을 볼 때 볼

Table 4. Chemical composition of the products obtained by impact mill according to the maximum cutting point

Cutting point (μm)	Prod.	Dist. (wt%)	Chemical composition (wt%)								
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	LOI
17	C-1	34.09	43.95	38.79	0.61	0.83	0.23	0.62	0.64	0.11	14.67
	Tail	65.91	45.51	36.21	1.14	3.61	0.37	0.59	0.84	0.16	12.42
25	C-2	49.57	44.16	38.40	0.68	0.94	0.25	0.64	0.61	0.11	14.54
	Tail	50.43	45.78	34.06	1.59	6.23	0.48	0.55	1.06	0.21	10.33
43	C-3	64.37	44.29	37.94	0.75	1.17	0.36	0.64	0.50	0.12	14.45
	Tail	35.63	46.23	33.09	1.84	8.01	0.39	0.51	1.45	0.25	8.75

밀에 비하여 고령토 광물의 선택적 분쇄에 효과적임을 확인할 수 있었다. 이는 미립자의 생성율이 증가함에 따라 불순광물 역시 미립화가 진행되는 결과로 판단할 수 있었다.

분급실험 결과

분급은 분체 입자에 작용하는 여러 가지 힘의 균형을 이용하는 입자분리 방식으로 주로 입자의 침강속도 및 체적의 차이 등을 이용하는 분리 조작이다. 분급조작은 중력, 원심력, 부력, 관성력, 유체의 항력, 자력, 정전기력, 마찰력 등 여러 가지 입자에 미치는 힘을 이용하여 이루어진다. 분체의 물성은 분급의 성능에 많은 영향을 미치는데 주로 중력이나 원심력 등은 입자에 작용하는 입자의 크기와 밀도에 비례한다.

따라서 광물입자의 특성 차이를 이용하면 분급 조작에 의하여 광물의 종류별, 입자 크기별 분리가 가능함을 예측할 수 있다. 특히 몇 가지의 광물이 혼재된 광석으로부터 임의의 광물만을 효과적으로 분리하기 위해서는 우선 분쇄조작을 통해 단체분리도가 우수한 분체를 제조한 후 각각의 조성광물의 물리적 특성차를 이용한 분리조작을 가하면 분리효과를 한층 향상시킬 수 있을 것이다. 원광석에 대한 현미경 관찰 결과로부터 본 연구의 대상 시료에 함유된 불순광물들 중에는 고령토 광물과 비중과 크기의 차이를 나타내고 있는 불순광물의 종류가 많음을 알 수 있었다. 이러한 불순광물의 물리적인 차이는 정밀 공기

분급 기술을 이용함으로써 불순광물만을 효과적으로 분리 가능할 것으로 예측할 수 있다. 특히 본 연구에서는 미립화 경향이 뚜렷한 고령토 광물의 특성을 감안하여 건식 방법으로 분급함으로써 건조, 탈수, 해쇄 등과 같은 습식 공정의 후처리에 따른 문제점을 해소하고자 하였다.

분급실험은 임팩트 밀의 주속을 36.1 m/sec로 하여 분쇄한 시료와 볼 밀을 사용하여 8 min 동안 분쇄한 시료를 대상으로 하여 원심력 차이를 이용한 공기 분급기를 사용하였다. 본 연구에서는 분급기의 분급점을 각각 17, 25, 43 μm로 하였으며 분리되는 미립의 정광을 각각 Conc.-1, -2, -3로 나타내었으며 굵은 산물은 Tail로 표기하였다.

표 4는 분급의 결과를 정리한 것으로 임팩트 밀의 주속을 36.1 m/sec로 분쇄 후 17 μm을 기준으로 분급하여 회수된 Conc.-1의 생산율은 34.09 wt%, 화학조성은 SiO₂ 43.95%, Al₂O₃ 38.79%, Fe₂O₃ 0.61%, CaO 0.83%, TiO₂ 0.11%로 나타났다. 이와 같은 결과를 원광 대비 제거율로 계산하면 철성분 46.5%, 칼슘성분 77.0%, 티탄성분 31.3%로 나타났다. 분급점을 25 μm로 하여 분리한 Conc.-2의 생산율은 49.57 wt%, 화학조성은 SiO₂ 44.16%, Al₂O₃ 38.40%, Fe₂O₃ 0.68%, CaO 0.94%, TiO₂ 0.11%이었다. 또한 분급점을 43 μm로 변화시켜 분리한 경우의 생산율은 64.37 wt%, 화학조성은 SiO₂ 44.29%, Al₂O₃ 37.94%, Fe₂O₃ 0.75%, CaO 1.17%, TiO₂ 0.12%로 원광 대비 제거율 철성분 34.2%, 칼슘성분

Table 5. Chemical composition of the products obtained by ball mill according to the maximum cutting point

Cutting point (μm)	Prod.	Dist. (wt%)	Chemical composition (wt%)								
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	LOI
17	C-1	33.21	44.57	37.72	0.90	1.64	0.23	0.68	0.61	0.12	13.85
	Tail	66.79	45.18	35.46	1.26	4.59	0.37	0.60	0.97	0.18	11.71
25	C-2	48.29	44.69	37.54	1.00	1.76	0.25	0.70	0.63	0.13	13.68
	Tail	51.71	45.27	34.97	1.28	5.34	0.39	0.56	1.05	0.19	11.24
43	C-3	66.20	44.80	37.09	1.08	2.36	0.27	0.72	0.66	0.14	10.75
	Tail	33.80	45.34	34.49	1.27	6.06	0.42	0.44	1.22	0.21	10.75

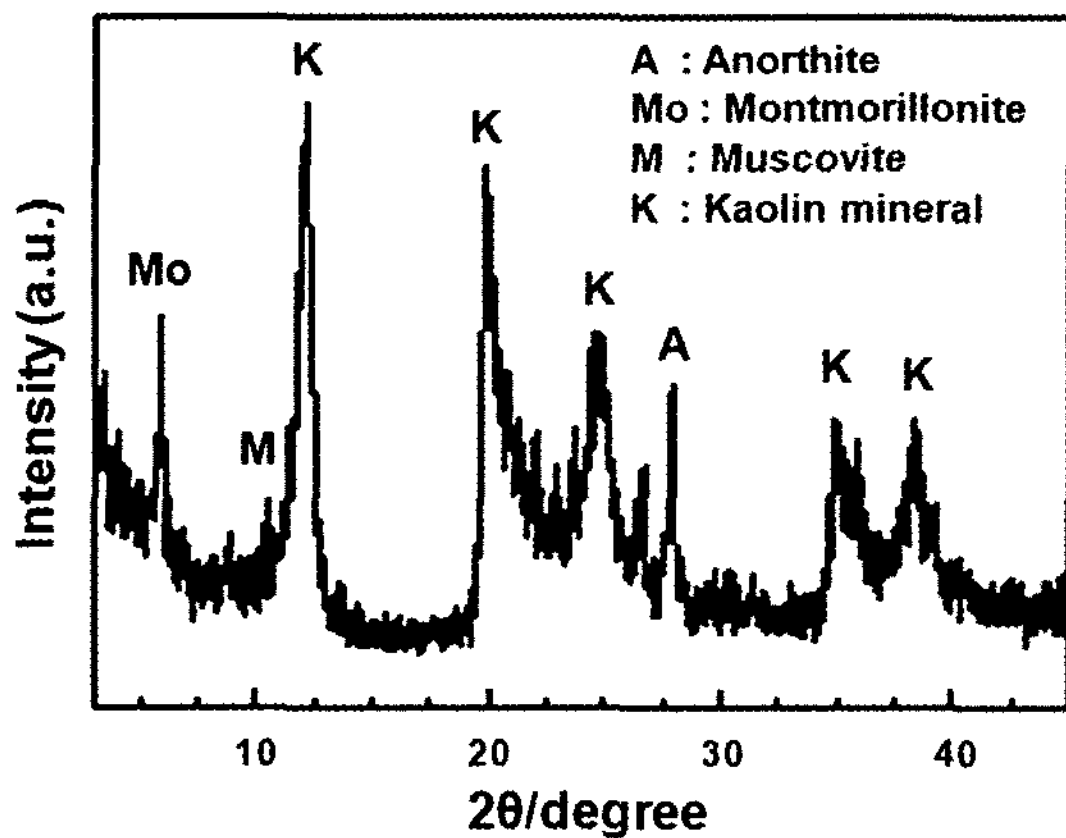


Fig. 7. XRD pattern of the Conc.-3.

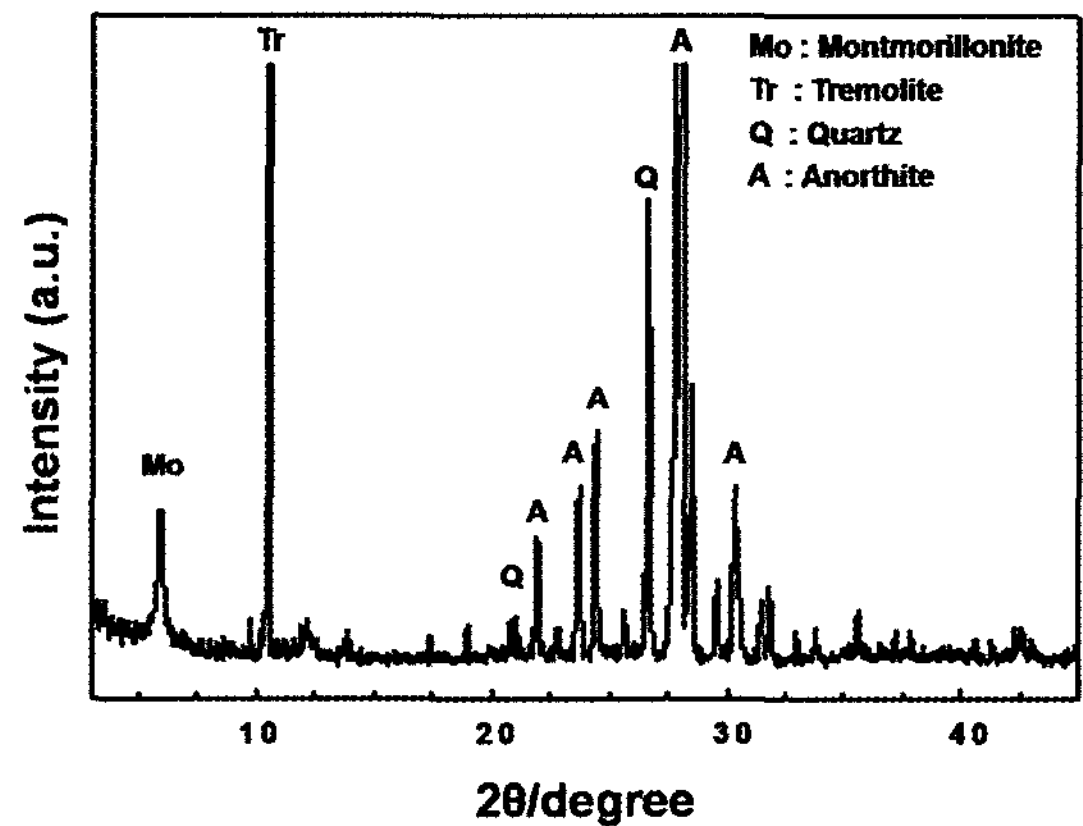


Fig. 8. XRD pattern of the Tail.

67.6%, 티탄성분 25.0%를 나타내 미립의 정광 생성율이 증가할수록 철성분 및 칼슘성분 제거율은 감소하여 정제효율이 다소 낮아지는 결과를 나타내었다. 그러나 임팩트 밀을 사용하여 원광을 분쇄하고 이를 다시 분급함으로써 고령토 광물을 정제할 수 있는 가능성은 확인한 결과로 판단할 수 있었다. 표 5는 볼 밀을 사용하여 원광을 분쇄한 후 이를 분급한 결과로 볼 밀의 분쇄 시간 8 min, 분급점 17 μm을 기준으로 분급한 Conc.-1의 경우 생산율은 33.2 wt%이었으며, 화학조성은 SiO₂ 44.57%, Al₂O₃ 37.72%, Fe₂O₃ 0.90%, CaO 1.64%, TiO₂ 0.12%로 각 성분의 제거율을 철성분 19.64%, 칼슘성분 54.57%, 티탄성분 25.0%로 나타났다. 한편 43 μm을 기준으로 분급한 Conc.-3의 정광 생산율은 66.2 wt%이며,

SiO₂ 44.80%, Al₂O₃ 37.09%, Fe₂O₃ 1.08%, CaO 2.36%, TiO₂ 0.14%의 조성을 가지는 정광 생산이 가능하며 제거율을 각각 철성분 5.3%, 칼슘성분 34.6%를 나타내었다.

화학분석 결과로부터 임팩트 밀을 사용하여 분쇄한 후 이를 분급하여 미립의 고령토 광물의 정광을 회수하면 불순광물의 혼입에 의해 정광의 품위가 저하됨을 알 수 있으며 이는 분리된 Conc.와 Tail의 주 구성광물을 확인함으로써 명확히 할 수 있다. 그림 7과 8은 임팩트 밀의 주속을 36.1 m/sec로 하여 분쇄하고 이를 분급하여 분리한 Conc.-3와 Tail의 XRD 결과로 Conc.-3의 주 구성광물은 카올리나이트, 사장석, 백운모, 몬모릴로나이트 등으로 대부분 카올리나이트가 주를 이루며 그 외는 비교적 소량 혼입되어 있음을

알 수 있었다. 이에 반하여 Tail의 경우는 사장석이 주로 나타났으며, 그 외 석영, 투각섬석 (Tremolite), 몬모릴로나이트 등이 관찰되어 불순 광물의 상당량이 Tail로 분리됨을 확인하였다. 실험 결과로부터 유용광물과 불순광물의 선택적 분리가 가능한 분쇄기 및 분쇄조건을 규명하여 분쇄한 후 건식 분급을 통해 미립의 고령토 광물을 회수한다면 상당한 정제효과를 거둘 수 있는 것으로 확인되었다. 특히 본 공정에 의하여 회수된 정광은 칼슘성분의 제거율이 77% 수준에 달하여 세라믹 원료로서 요구되는 주요한 물성인 가소성을 확보하는데도 큰 효과가 있을 것으로 판단된다. 현재 고령토 광물과 같은 미립의 점토광물의 정제는 습식 공정 위주로 개발되고 있다. 습식 공정은 건식 공정에 비하여 선별효율이 우수한 것으로 알려져 있으나 각 산물의 탈수, 건조 및 해쇄 등 후처리 공정이 복잡하여 경제적인 어려움이 수반되는 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점의 해결을 위하여 본 연구에서 시도된 건식 공정은 고령토 광물에 혼입되는 불순광물 제거에 상당한 효과가 있음을 확인하였으며 분쇄기 종류 및 투입에너지를 적절히 조절함으로써 고령토 광물의 건식 정제가 가능함을 알 수 있었다. 또한 분쇄장치 및 분쇄율을 적절하게 조절한다면 습식 공정의 후처리로 인한 문제점을 해소함으로써 향후 고령토 광물 이외의 비금속 광물의 정제에도 응용 가능한 공정으로 기대된다.

결 론

기존의 습식방법에 의한 고령토 광물의 정제 공정의 문제점을 보완하여 고령토 광물의 활용성 증대 및 부가가치 향상을 위하여 선택적 파·분쇄, 정밀 분급기술 등을 도입하는 새로운 개념의 건식 방법에 의한 정제특성을 연구하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 원광의 주 구성광물은 카올리나이트, 사장석, 백운모, 몬모릴로나이트 등이었으며 화학조성은 SiO_2 44.98%, Al_2O_3 36.21%, Fe_2O_3 1.14%, CaO 3.61%, TiO_2 0.16%, LOI 12.42%이었다.

2) 수반광물로는 티탄석, 녹염석, 갈철석, 적철석, 티탄철석, 녹니석, 녹염석 등이며 일부 각섬석도 확인되어 수반광물의 종류가 매우 다양한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

3) 임팩트 밀과 볼 밀을 사용하여 미립자 생성

율을 유사하게 조절하여 325 mesh 이하의 산물의 화학성분을 조사한 결과 임팩트 밀이 볼 밀에 비하여 선택적 분쇄에 효과적임을 알 수 있었다.

4) 선택적 파·분쇄를 위해 임팩트 밀의 주속을 조절하여 분쇄함으로써 불순광물의 일 지수의 차이를 이용하는 단계분리도의 향상이 가능하였으며 분급기의 분급점을 정밀하게 조절함으로써 입도와 비중 차이를 이용하는 정제 결과를 얻을 수 있었다.

5) 임팩트 밀의 주속 36.1 m/sec, 분급기의 분급점 17 μm 에서 회수된 Conc.-1의 생산율은 34.09 wt%이었으며 불순광물로부터 기인하는 화학조성은 Fe_2O_3 0.61%, CaO 0.83%, TiO_2 0.11%로 철성분 제거율 46.5%, 칼슘성분 제거율 77.0%, 티탄성분 제거율 31.3%를 보였다. 그러나 분쇄율이 증가되거나 분급 입도가 굵어지면 불순광물의 혼입에 의해 정광의 품위가 저하됨을 알 수 있어 단계분리를 위한 분쇄 기술의 중요성을 확인할 수 있었다.

6) 국내 고령토 광물의 성인과 수반 불순광물의 특성에 따라 다소 차이는 있으나 선택적 파·분쇄, 정밀분급 공정을 적용하는 건식 정제 방법은 고령토 광물의 품위향상에 유용한 기술임을 알 수 있었다. 본 연구에 의해 시도된 건식 정제 기술을 국내 광물자원의 고부가가치화 처리에 적용한다면 경제적 또는 공정상의 어려움으로 인해 활용이 부족했던 습식 공정의 단점을 보완하는 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

참고문헌

- 김상배, 조성백, 김완태, 윤성대 (2005) 선택분쇄 및 공기 분급에 의한 일라이트의 정제기술 연구, 한국광물학회, 18(1), 19-31.
- 산업자원부, 2006년도 광산물 수급현황.
- 손연수, 이용선 외 (1985) 고령토의 종합활용 기술개발, 과학기술처, 28-33.
- 이수정, 서용재 (2008) 카올리나이트와 혼합된 할로이 사이트의 정량분석, KIGAM Bulletin, 12(1), 63-76.
- Greene, E.W. and Duke, J.B. (1961) Selective froth flotation of ultrafine minerals of slimes, Trans. SME/AIME, 223, 191-204.
- Grimshaw, R.W. (1971) Physics and Chemistry of clay, 4th ed., Ernest Bern, London, ISBN : 0510-47701-7.
- Mako. E., Senkar. Z., Kristof. J., and Vagvolgyi. V (2006) Surface Modification of Mechanochemically

- Activated Kaolinites by Selective Leaching, *J. of Colloid and Interface Science*, 294, 362-370.
- Malden, P. and Meads, R. (1967) Substitution by iron in kaoline, *Nature (London)*, 215, 844-846.
- Maurya, C.B. and Dixit, S.G. (1990) Effect of pH on the high gradient magnetic separations of kaolin clays, *Int. J. Mine. Process*, 28(4), 190-207.
- Saikia, N.J. *et al.* (2003) Characterization, beneficiation and utilization of a kaoline clay from Assam, India, *Applied Clay Science*, 24, 93-103.
- Otsuka, N. and Hayashi, T. (1982) Application of sedimentation process by D. C. field to refinement of ceramic raw materials, *NENDO KAGAKU*, 22(4), 192-201.
- Shoumkov, S., Dimitrov, Z., and Brakalov, L. (1987) High gradient magnetic treatment of kaolin, *Interce-ram*, 36(6), 26-28.
- Thompson, T.D. (1984) Utilization of Ion- Exchange Resin in the Processing of Kaoline, U. S. Pat No : 4451440.
- Tsunematsu, K. *et al.* (1989) Dispersion and coagulation properties of IRIKI kaolin clay and its purification by high gradient magnetic separation, *Shigen to Sozai*, 105(12), 939-943.
- Veglio, F., Passariollo, B., Yoro, L., and Marabini, A.M. (1996) Development of a bleaching process for a kaolin of industrial interest by oxalic, ascorbic and sulphuric acids: preliminary study using statistical methods of experimental design. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 35, 1680-1687.
- Yamanaka, S. *et al.* (1986) Preparation and properties of titania pillared clay, *Master. Chem. Phys.* 17(1-2) 87-101.
-
- 접수일(2008년 4월 23일), 수정일(1차 : 2008년 5월 13일), 게재확정일(2008년 5월 14일)