

## 화강암 석재 가공 슬러지의 재활용

이성오 · 국남표 · 임영빈 · 신방섭

전남대학교 공과대학 자원공학과

### The Recycling of Sludge from Granite Stone Cutting and Polishing.

Sung-Oh Lee, Nam-Pyo Kook, Young-Bin Lim and Bang-Sup Shin

Dept. of Mineral and Energy Eng., Chonnam National University

#### 요 약

화강암 석재가공 공장의 절단 및 연마공정시 발생하는 슬러지를 재활용하기 위해 광물학적 조사 및 화학분석을 실시하였으며, 철분 및 불순물등의 제거 실험을 위한 습식 하드로싸이클론 및 고구배자력선별 실험을 실시하였다.  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 함량은 각각 70.9%, 13.6%이었으며, 요업 및 산업원료로 사용하는데 있어서 백색도를 저하시키는 불순물인  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  함량은 2.52%로 비교적 많았으며,  $\text{TiO}_2$ 함량은 0.29%이었다. 하이드로싸이클론 실험결과 슬러지의 양은 100~150 g/l, Underflow Nozzle의 크기는 2.0~2.5 mm, 압력은 1.2~1.6 kg/cm<sup>2</sup>의 조건에서 -37  $\mu\text{m}$  입도 85%를 얻을 수 있었다. 고구배자력실험결과 10,000가우스에서  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 는 0.65%,  $\text{TiO}_2$ 는 0.07%인 비자착산물을 얻을 수 있었으며, 분산제로 Sodium tripolyphosphate를 사용한 결과 탈철에 효과적이었다. 슬러지 산물의 물리적인 특성은 백색도 68.5%, 수축율 13.4%, 비표면적 3.0812 m<sup>2</sup>/g 로 나타났다.

#### ABSTRACT

This study was carried out to remove the iron and impurities using hydrocyclone and HGMS for recycling of sludge from the granite stone cutting and polishing industry in the basic of chemical analysis and mineralogical investigation. This sludge consist of 70.9%  $\text{SiO}_2$ , 13.6%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and it also contained 2.52% of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and 0.29% of  $\text{TiO}_2$  as a main impurities to decrease the whiteness.

As the result of hydrocyclone experiment, it was very good condition that are 100~150 g/l of sludge amount, 2.0~2.5 mm of underflow nozzle size, and 1.2~1.6 kg/cm<sup>2</sup> of pressure for 85% sludge product with the -37  $\mu\text{m}$  size.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiO}_2$  contents by treatment of HGMS were decreased with 0.65% and 0.07% each at 10,000gauss of magnetic field strength, and addition of Sodium tripolyphosphate as a dispersant was effected to get low grade  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiO}_2$  concentrate. Physical properties of this stone sludge product were showed 68.5% of whiteness, 13.4% of firing shrinkage and 3.0812 m<sup>2</sup>/g of specific surface area.

#### 1. 서 론

우리나라는 전국토의 약 25%가 화강암으로 구성되어 있으며, 일본에 화강암을 처음 수출한 70년대 이후부터 채석기술 및 가공기술이 발전되기 시작하여 현재에는 석재 가공업체만 해도 약 930여개 업체나 된다.<sup>1)</sup> 그러나 가공업체에서 제품생산과 더불어 발생하는 분진, 소음, 그리고 석재폐수 및 부유물질(슬러지)은 환경오염 및 공해를 초래하고 있다.

석재산업은 석재가공분야와 채석분야로 나누어지며, 채석분야는 쇄골재부분을 포함하고 있다. 주로 건축 재료로 사용되는 석재가공품은 건축경기의 호황에 더불어 연간 평균 약25% 증가로 급신장을 보여 왔다. 석재가공공장에서 발생하는 슬러지의 양은 가공제작에 투입되는 원석의 1/3정도로 추정되고 있으며, 소비되는 물의 양도 석재 최종 제품의 20~30배로써, 실로 많은 양의 부산물이 발생함을 알 수 있다. 하지만 국내의 석재가공공장은 아주 영세하고, 소규모적으로 전국에 난

립되어 있기 때문에 슬러지의 처리에는 상당히 어려움을 지니고 있다.

석재 슬러지는 1987년 노동부<sup>3)</sup> 고시가 있기 전까지는 특정폐기물로서 공해유발업종으로 분류되어 왔으나, 지금은 일반 폐기물로 분류되어 다소 처리규정이 완화된 상태이지만 이들을 전량 매립하고 있는 실정을 감안한다면 이들의 활용은 매우 중요하다.

지금까지 석재 슬러지에 대한 연구는 국내의 경우 석재산업의 공해방지를 위한 연구로 단순히 석재폐수로부터 탁도와 부유물질의 응집에 관한 기초연구<sup>4)</sup>에 불과한 반면, 외국의 경우 대리석 석재의 폐수와 슬러지를 재활용하기 위해 단순 침전하여 물을 재사용하는 방법과 슬러지의 품위향상을 꾀하기 위하여 부선방법을 조합하는 방법에 대한 연구<sup>5)</sup>가 있으며, 석재 폐석과 슬러지를 이용한 타일제조를 실시하고 있다. 전량 매립하고 있는 석재 슬러지를 물리적인 처리를 실시하여 오염원료 및 산업재료로 재활용하기 위한 연구를 행함으로써 석재업체가 겪고 있는 슬러지 처리 문제점을 해결하고 석재산업의 부가가치를 향상시키는 기대효과를 가져올 수 있을 것이다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 실험에 사용한 시료는 화강암 석재 슬러지(광주 직할시 광산구 소촌공단에 위치한 (주)삼도석재)로서 침전물 상태로 10여 곳에서 1~2kg씩을 채취하여 이를 혼합한 후 분취하여 사용하였다. Fig. 1은 본 시료를

채취한 석재가공공장의 공정도를 나타낸 것이다. 원석을 절단과 연마공정을 거쳐 최종 석재가공품을 만들고 있으며, 이때 발생하는 석재의 부산물은 가공전 원석의 약 30%에 해당하며, 이중 상당량이 슬러지로 발생하여 침전조에서 응집제와 반응하여 슬러지로 되고, 물은 재순환하여 사용하고 있다.

2.2. 실험방법

본 실험은 모두 한국표준시험법에 준하여 실시하였으며, 시료로 사용한 화강암 석재슬러지(이하 슬러지라 함.)는 실험에 사용하기에 적당한 양으로 분취되어, 먼저 화강암석재가 가지고 있는 광물학적인 특성과 화학적인 성분을 측정하기 위하여 화학분석을 하였다. 화강암 원석이 가지는 성분 및 연마공정에서 불순물로 첨가된 연마사, 이수 및 연마기 마모성 철분등의 불순물을 분리 제거하기 위하여, 일반적으로 광물을 정제하는 방법중 하나인 고구배자력선별을 실시하여 자성의 크기에 따라 산화철 및 자성물질을 제거하였다<sup>5,6)</sup>. 슬러지의 활용을 위해 하이드로싸이클론을 이용하여 오염원료로서의 사용에 적당한 슬러지 입도를 분리 회수하였고, 또한 불순물을 제거하고자 실시하였다<sup>7-9)</sup>. 하이드로싸이클론에 의해 분급된 37 $\mu$ m 이하의 입자를 대상으로 입도분석기를 이용하여 미립자의 분포도를 측정하고 이를 소성하는 물성실험과 백색도 측정을 실시하였다. Fig. 2는 실험과정을 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

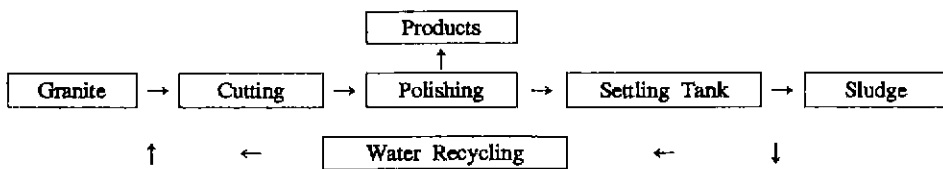


Fig. 1. Process of granite stone cutting and polishing.

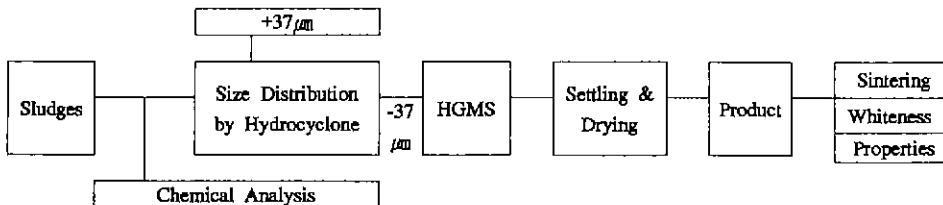


Fig. 2. Flow chart of experimental procedure

**Table 1.** Size distribution and chemical analysis of granite sludges.

Size (mesh)	Wt.%	Cum. Wt.%	Chemical composition (%)							
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
+140	3.40	3.40	68.2	13.9	3.75	2.56	0.98	4.64	2.98	0.43
-140/+200	4.18	7.58	70.3	12.8	4.01	2.14	0.86	4.15	3.15	0.45
-200/+270	7.18	14.8	70.9	13.1	3.60	2.15	0.31	3.89	3.26	0.42
-270/+400	4.64	19.4	71.0	12.4	3.48	2.24	0.84	4.05	3.35	0.42
-400	80.6	100.0	71.0	13.7	2.24	1.98	0.55	4.31	3.74	0.26
Cal'd head	100.0		70.9	13.6	2.52	2.03	0.57	4.27	3.64	0.29

**3.1. 화학조성 및 광물학적 특성**

본 실험에 사용한 시료를 U.S. standard sieve를 사용하여 입도분석을 실시한 다음, 석재 슬러지의 입도 분포를 알아보고, 각 입도별로 화학분석을 실시한 결과를 Table 1에 나타냈다.

석재 슬러지는 대부분 100 mesh(149 μm)를 통과하는 미립자이며, 극미립자인 -400 mesh(37 μm)가 80.6%로 매우 많이 함유하고 있는 아주 미세한 입자로 이루어져 있음을 알 수 있었다. 따라서 슬러지를 산업용 원료로 사용하기 위하여 조립인 +400 mesh를 하이드로싸이클론을 이용하여 상호 분리한 후 -400 mesh를 이용하여 활용 특성을 구명하였다. 화학조성을 살펴보면 SiO<sub>2</sub>가 70.9%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 13.6%로 주 구성성분이고, 장석질도석으로 사용하는데 기준조건인 R<sub>2</sub>O(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)는 7.91%로 비교적 높으나, 이는 장석에 석영이 어느 정도 함유되어 있기 때문으로 석영을 분리함으로써 장석의 특성을 향상시킬 수 있다. 그러나 본 슬러지의 입도 분포로 보아 미립자가 너무 많이 함유되고 있기 때문에 석영과 장석의 분리<sup>10)</sup>에 널리 사용되고 있는 부유선별 방법의 적용은 대단히 어렵다고 사료된다. 그리고 도자기 및 타일용으로 사용하는데 있어서 백색도를 저하시키는 주 불순물인 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 2.52%로 비교적 많이 함유하고 있어 제거가 필요함을 알 수 있으며, TiO<sub>2</sub>는 0.29%정도 함유하고 있다. 그러나 요업원료로 적용하는데에는 티탄이 철분보다 3배정도 강력한 색상을 띄우는 것으로 알려져 있기 때문에<sup>11)</sup> 티탄의 제거도 매우 중요하다. Fig. 3은 석재 슬러지의 X-선 회절분석 결과이다. 슬러지의 주 구성광물이 석영, 장석, 운모로 이루어져 있는 화강암의 전형적인 X-선 회절피크를 나타내는 것으로 보아 본 슬러지는 화강암에서 발생한 것임을 알 수 있다. 그리고 입도가 작아짐에 따라 운모의 피크가 적어짐을 알 수 있는데 이는 비교적 조립질로 운모가 함유되어 있고, 입자가 작아짐에 따라 상대적

**Table 2.** Size analysis and distribution of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> of sample.

Size (mesh)	Wt.%	Cumul. Finer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		TiO <sub>2</sub>	
			Assay	Dist.	Assay	Dist.
+140	3.40	100.0	3.75	5.06	0.43	4.59
-140/+200	4.18	96.6	4.01	6.65	0.45	6.33
-200/+270	7.18	92.4	3.60	10.3	0.42	10.3
-270/+400	4.64	85.2	3.48	6.43	0.42	9.39
-400	80.6	80.6	2.24	71.6	0.26	70.3
Cal'd head	100.0		2.52	100.0	0.26	100.0

으로 석영과 장석의 함유량이 점차 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 운모류는 파쇄 공정에서 이들이 지니고 있는 판상구조 때문에 다른 광물보다 분쇄되지 않고 조립질로 존재하기 쉬워, 화강암으로부터 운모를 제거할 때 체질에 의한 제거도 가능하다고 한다<sup>12)</sup>. 따라서 조립자와 미립자의 분리에 널리 사용되고 있는 하이드로싸이클론을 사용할 때 약간의 운모류의 제거도 가능하리라 사료된다.

Table 2는 각 입도에서 주 불순물인 철분과 티탄분의 분포도를 나타낸 것이다. -400 mesh산물이 전체의 80.6%를 차지하고 있으며, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 TiO<sub>2</sub>가 각각 71.6%, 70.3%로 대체로 주 불순물인 철분과 티탄분의 함량이 비교적 조립질 입도분포에 비해서 많이 함유하고 있음을 알 수 있다.

**3.2. Hydrocyclone에 의한 조립 및 불순물의 분리 제거**

하이드로싸이클론에 의한 미분의 슬러지인 37 μm이하 슬러지입자를 효과적으로 회수하기 위해, 먼저 체분리를 실시하여 조립분인 210 μm의 이상의 입자를 선분리하였다. 그리고 하이드로싸이클론 장치내의 슬러지

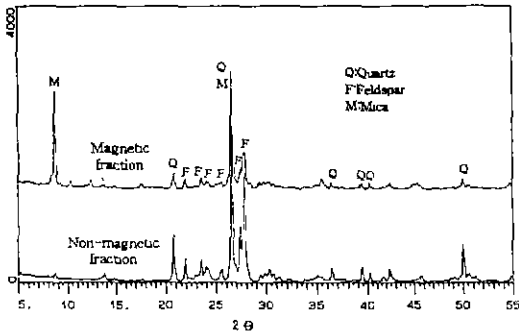


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of the samples according to size distribution.

혼합 탱크내에 50~250 g/l의 슬러지를 증류수와 혼합하여 사이클론을 통과하지 않고 5분 동안 자체 순환시켜 슬러지가 잘 분산되도록 교반시킨 후, 압력, 슬러지농도 및 underflow nozzle의 직경을 상호 변화시키면서 overflow와 underflow량을 계산하여 처리용량을 측정하였다.

Fig. 4는 슬러지농도를 150 g/l로, underflow nozzle의 직경을 2.0 mm로 고정하고 inlet압력을 0.6~2.1kg/cm<sup>2</sup>로 변화시켜 실험한 결과이다. 사이클론의 형태가 동일할 때 압력이 높아지면 underflow의 solid양, 처리용량 및 수율은 모두 증가하였다. 압력의 증가는 슬러지의 공급속도의 증가를 의미하므로 사이클론 내부의 회전운동을 가속하여 조립분과 미립분의 분리를 촉진시켜 처리시간을 단축하게 된다. 이 결과에서 최적조건은 1.2~1.6kg/cm<sup>2</sup> 범위였고 이때의 처리용량은 5~6 l/min, underflow의 슬러지양은 12~16%, 수율은 85~89%이었다.

Fig. 5는 슬러지의 농도를 150 g/l, inlet 압력을 1.5 kg/cm<sup>2</sup>로 고정하고 underflow nozzle의 직경을 1.5~3.5 mm로 바꾸어 가면서 overflow 및 underflow nozzle로 통과된 슬러지의 양과 수율 및 처리용량을 계산한 결과를 나타낸 것이다. 이 결과 underflow nozzle의 직경이 커질수록 처리용량과 underflow 되는 슬러지의 고체농도는 증가하지만 수율은 감소하였다. 따라서 적절한 underflow nozzle의 직경은 2.0~2.5 mm이었으며 이때의 처리용량은 5~6 l/min, underflow의 슬러지 고체의 양이 16~20% 그리고 수율은 86~90%이었다.

Fig. 6은 underflow nozzle의 직경을 2.0 mm, inlet 압력을 1.5 kg/cm<sup>2</sup>로 고정하고 슬러지의 농도를 50~250 g/l로 변경하여 실험한 결과이다. 슬러지의 농도의 증가는 점도와 마찰계수를 증가시키므로 사이클론 내부

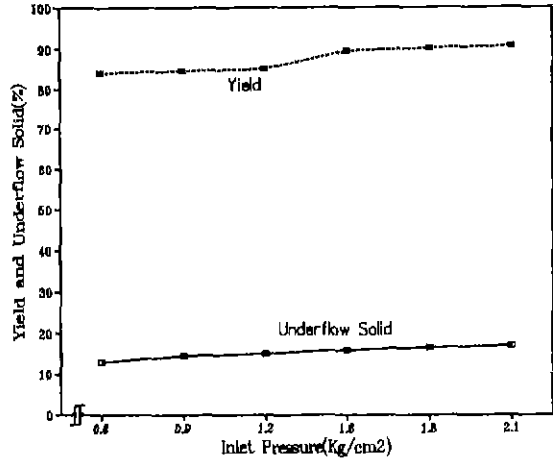


Fig. 4. The treatment efficiency of sludges according to the change of inlet pressure. (Solid concentration : 150 g/l. Underflow nozzle : 2.0 mm)

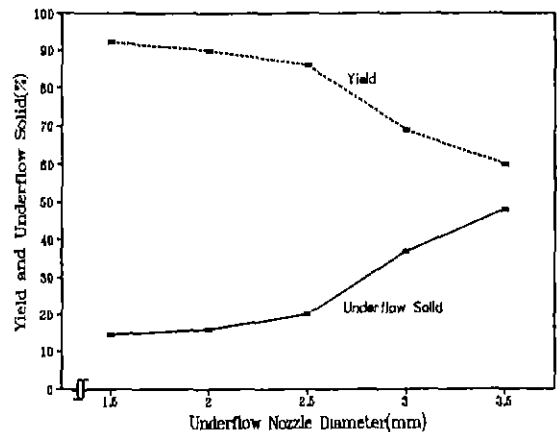


Fig. 5. The treatment efficiency of sludges according to the change of underflow nozzle diameter. (Solid concentration : 150 g/l. Inlet pressure : 1.5 kg/cm<sup>2</sup>)

에서의 회전력과 분리효율을 저하시켰다. 슬러지의 농도가 증가함에 따라 underflow의 슬러지의 양은 증가하고 처리용량과 수율은 감소하였으며, 200 g/l 이상에서는 분리가 잘되지 않아 효율이 급격히 감소하였다. 슬러지의 농도가 낮을수록 분리효율이 좋아지고 처리시간이 짧아지는데 처리량과 수율을 고려할 때 100~150 g/l의 범위가 적절하였고, 이때의 처리용량은 5.5~6 l/min, underflow의 슬러지의 양은 14~16%, 그리고 수율은 85~90%이었다.

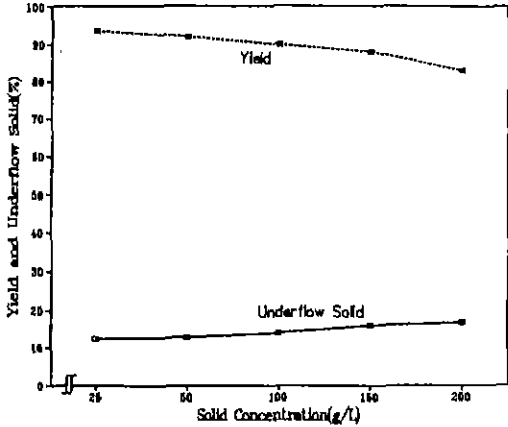


Fig. 6. The treatment efficiency of sludges according to the change of solid concentration. (Underflow nozzle : 2.0 mm. Inlet pressure : 1.5 kg/cm<sup>2</sup>)

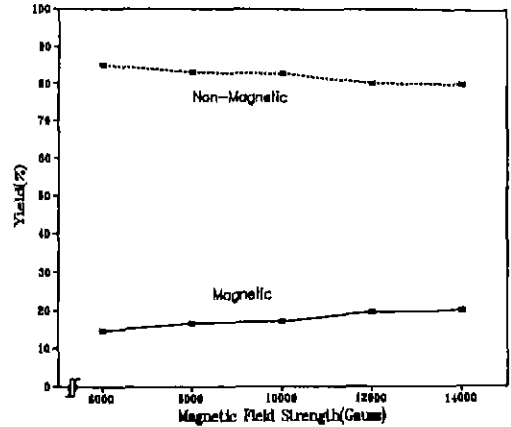


Fig. 8. The Wt.% of non-magnetic products and magnetic products using HGMS.

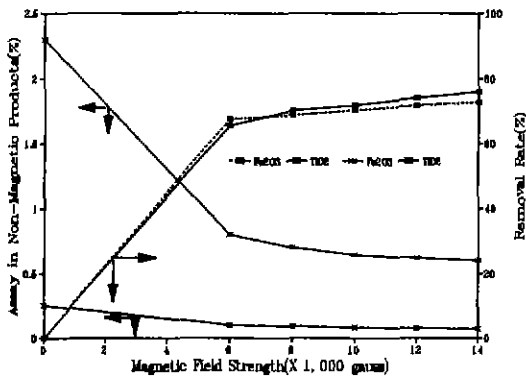


Fig. 7. The influence of magnetic field strength using HGMS.

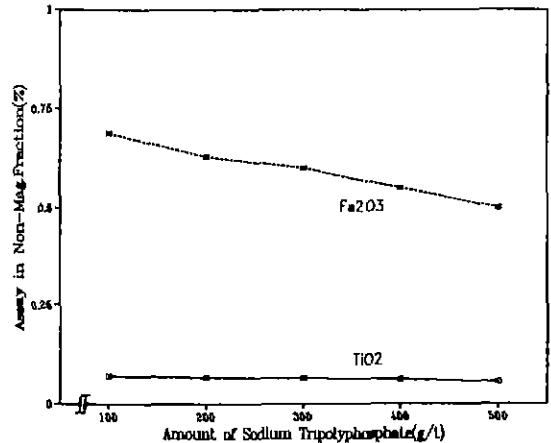


Fig. 9. The removal efficiency of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> according to the addition of sodium tripolyphosphate using HGMS (M.F.S. : 10,000 gauss).

### 3.3. 고구배자력시험

#### 3.3.1. 자력의 세기에 대한 효과

고구배자력시험에 있어서 matrixes를 무엇을 사용하는가에 따라 탈철 및 탈티탄효율이 차이가 있다. 일반적으로 미립자의 경우 matrixes는 steel ball과 steel wire를 주로 사용하고 있다. 그러나 본 시험에 사용한 고구배자력선별기는 matrixes로 steel ball를 사용한 경우가 steel wire를 사용한 경우보다 효율적이었다는 실험결과<sup>10)</sup>를 토대로 matrixes는 steel ball를 사용하여 실험하였다. 자력의 세기를 6,000 gauss에서 14,000 gauss까지 변화시키면서 화강암 석재 슬러지로부터 고구배자력선별기로 탈철 및 탈티탄 제거실험 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 자력의 세기가 증가함에 따라 비

자착산물(정광)중의 철분과 티탄분의 함량이 슬러지로부터 낮아짐을 볼 수 있으며, 10,000 gauss의 경우 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 0.64%, TiO<sub>2</sub>는 0.07%로 오염원료 사용하기에는 철분의 함량이 다소 높게 나타남을 볼 수 있으며, 제거율은 약 80% 정도로 나타났다. 10,000 gauss이상으로 자장의 세기를 증가하여도 티탄의 제거는 거의 일정한 반면에 철분은 다소 더 감소하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 본 슬러지 처리의 경우 자장의 세기는 8,000~10,000gauss가 적당하리라 생각된다.

Fig. 8은 자장의 세기를 달리하면서 고구배자력선별

하여 얻은 자착산물과 비자착산물의 무게비를 나타낸 것이다. 자장의 세기가 증가함에 따라 자착산물이 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이때 자착산물의 제거율은 약 15~20% 정도이며, 비자착산물(정광)의 회수율은 80~85%로 나타났다. 따라서 고구배자력선별을 통하여 회수한 정광이 요업원료등으로 재활용된다고 한다면 경제적인 가치뿐만 아니라 슬러지의 매립량을 15~20%로 줄일 수 있고, 또한 이는 골재 및 콘크리트 혼화제로도 사용될 수 있을 것이다.

3.3.2. 분산제의 효과

미립자를 고구배자력선별할 때에 자선효율을 향상시키기 위해서는 미립자들이 잘 분산되어 있어야 한다. 따라서 이러한 분산을 효율적으로 도와주기 위하여 분산제<sup>13, 14)</sup>를 사용한다. 일반적으로 요업원료에서는 해교제로도 알려져 있는 Sodium hexametaphosphate[Na<sub>6</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>], Sodium silicate[NaSiO<sub>3</sub>], Sodium tripolyphosphate[Na<sub>3</sub>P<sub>3</sub>O<sub>10</sub>], Starch[C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>]등을 주로 사용하고 있다. 본 시료도 미립자인 -400 mesh를 상당량 지니고 있기 때문에 분산제에 대한 효과가 상당하리라 사료된다. 따라서 본 실험에서는 요업원료의 분산제로 널리 사용하고 있는 Sodium tripolyphosphate의 첨가량을 달리하면서 자장의 세기를 10,000 gauss로 고정하고 고구배자력선별한 결과를 Fig. 9에 나타냈다. 분산제의 사용량이 증가함에 따라 티탄의 제거에는 별 영향을

주지 못하고 있으나, 철분의 제거는 상당히 향상됨을 볼 수 있다. 이는 석재 절단시 절단톱이 석재의 마찰에 의해 발생하는 미립의 철분이 함유되어 있기 때문이라 생각된다.

3.3.3. 자착산물과 비자착산물의 특성

10,000 gauss로 고구배자력선별한 자착산물과 비자착산물(정광)의 광물학적특성을 조사하기 위하여 X-선 회절분석 결과를 Fig. 10에 나타냈다. 비자착산물의 경우 주로 운모의 피크는 거의 감소함과 동시에 석영과 장석의 피크 크기는 크게 증가하고 있음을 보여주고 있어 비자착산물은 석영과 장석으로 이루어져 있는 반면에, 자착산물은 운모의 피크를 강하게 나타내고 있음을 볼 수 있다. 따라서 고구배자력선별기에 의하여 화강암 석재 슬러지의 함철 및 함티탄 광물을 제거함과 동시에, 철분을 포함한 판상구조를 가지는 운모도 함께 제거가 됨을 알 수 있다. 일반적으로 비금속광물 선별정제에서 운모 및 함철광물을 분리하는데 고구배자력선별과 부유선별을 실시하고 있으나, 본 석재 슬러지의 경우 미립자가 많이 분포하기 때문에 부유선별은 부적합하다고 할 수 있다.

Table 3은 이들 자착산물과 비자착산물(정광)을 화학분석한 결과이다. 비자착산물의 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 0.64%, TiO<sub>2</sub>는 0.07%임에 불구하고, 자착산물은 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 11.6%, TiO<sub>2</sub>는 1.36%를 나타내고 있다. 그리고 석영의 주 구성성분인 SiO<sub>2</sub>가 비자착산물에서 74.1%로 자착산물의 52.2%보다 많이 함유하고 있는 것과, 장석의 품위를 결정하는 R<sub>2</sub>O(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)성분의 함유량도 비자착산물이 자착산물보다 다소 많이 함유하고 있음을 볼 수 있다. 이는 X-선회절 분석의 결과와 일치하는 것으로 고구배자력선별을 통하여 얻은 비자착산물(정광)은 석영과 장석이 주 구성광물로 티탄의 함유량은 매우 양호하다. 또한 철분의 함유량을 보다 더 낮추기 위해서는 고구배자력선별을 반복하여 정선하고 산처리를 병행할 수도 있으나 경제적인 문제를 고려해야 할 것이다. 석재 슬러지가 가지고 있는 가소성의 부족을 보충하기 위한 적절한 보조 요업원료의 혼합을 통하여 가소성을 증가시키면 충분히 사용이 가능하리라 사료된다. 그리고

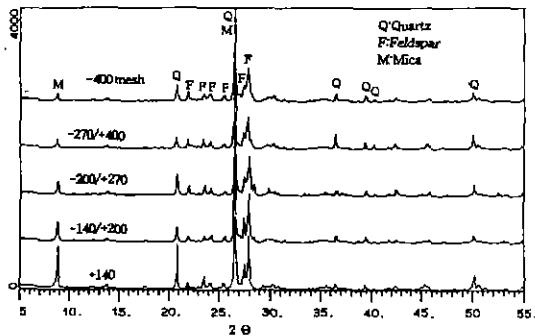


Fig. 10. X-ray diffraction patterns of the sludge products obtained by HGMS treatment.

Table 3. Chemical analysis of the sludge products obtained by HGMS treatment.

(M.F.S. : 10,000 gauss)

Composition, Wt.%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
Non-magnetic products	74.2	13.7	0.64	1.83	0.17	4.30	3.82	0.07
Magnetic products	52.2	12.9	11.6	3.00	2.51	4.13	2.77	1.36

Table 4. Physical properties of sludge products at final treatment.

Samples	Firing shrinkage(%)	Whiteness(%)	Specific surface area(m <sup>2</sup> /g)	Specific gravity(g/ml)
		13.4	68.5	3.0812

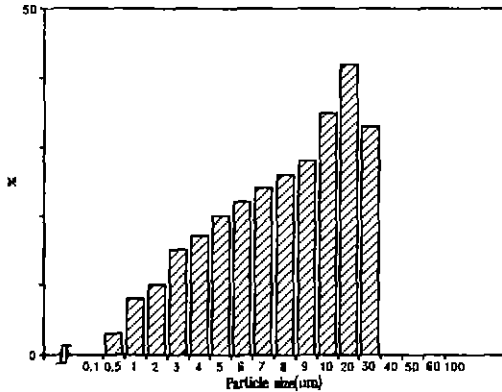


Fig. 11. Particle size distribution of sludge products.

비교적 조립질로 함유되어 있는 운모류와 함철 및 함탄 광물을 제거한다면 슬러지의 입도분포가 좀더 극미립자화되고 색상도 향상되기 때문에 이를 고무나 플라스틱 충전제 등으로 활용하기 위한 연구가 보다 더 필요하리라 사료된다.

3.4. 슬러지 특성

산업용 충전제 광물로 사용하기 위한 분말은 화학적 및 물리적인 특성이 매우 중요하다. 특히 광물 충전제는 용적을 증가 시키고 충격강도를 높이거나 열적 안정성을 증가시키기 위해 첨가된다. 충전제 선택 기준은 평균 입자의 크기, 표면적, 중량, 경도, 밝기, 오일흡착 능력등이 요구 된다. Fig. 11은 석재 슬러지의 하이드로싸이클론에 의해 입도분리된 산물의 입도분포 결과를 나타낸 것이다. 입자는 대체로 10~20μm 범위에 주로 분포하고 있으며 평균입자는 12.5μm 이다. 제지용으로 사용되는 일반적인 충전제가 원하는 입도분포의 경우 10μm 이상 입자가 10%, 2μm 이하 입자가 30~50%이며, 플라스틱용으로 사용되는 활석의 경우 평균 1~1.5μm 이다<sup>15)16)</sup>. 이와 비교할 때 본 산물은 다소 큰 입자 크기를 나타내고 있다. 또한 비표면적값은 3.0812m<sup>2</sup>/g 이었으며, 하이드로싸이클론으로 처리한 슬러지의 백색도는 58.5%, 하이드로싸이클론 및 고구배자력선별에 의해 처리된 슬러지는 68.5%로 백색도가 향상됨을 나타냈다. Table 4는 석재슬러지 최종처리산물(정광)의 물리적인 성질의 결과를 나타낸 것이다.

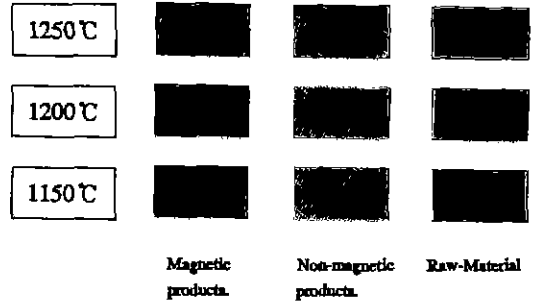


Fig. 12. Properties of sludge products according to the sintering temperatures.

3.5. 소성실험

Fig. 12는 석재 슬러지를 산물을 자작산물과 비자작산물로 분류하여, 50mm 원형몰드에 시료 약 25g을 넣은 다음 프레스로 일정 압력으로 성형하여, 소성온도를 각각 1150, 1200, 1250°C로 달리하면서 소성하여 소성산물의 색상을 비교 관찰하였다. 소성 조건은 승온속도 10°C/min이며, 최종온도에서 1시간 유지한 다음 상온까지 노내에서 자연 냉각시킨 결과이다. 석재 슬러지는 많은 양의 불순물을 함유한 슬러지이므로 하이드로싸이클론 및 고구배자력선별을 실시하여 분리 제거한 시편이 훨씬 좋은 색상을 나타냄을 볼 수 있었다.

4. 결 론

화강암 석재 슬러지의 재활용을 위한 실험결과 다음과 같은 결론은 얻을 수 있었다.

1. 화강암 석재 슬러지는 석영, 장석, 운모를 주요 구성광물로 함유하고 있으며, 석재가공 공정 및 칩전 과정에서 소석회 투여로 인하여 많은 철분등의 불순물을 함유하는 슬러지로, 400mesh 이하의 미립자가 전체의 약 80%를 차지하고 있다.
2. 하이드로싸이클론 실험결과 슬러지의 양이 100~150g/l, underflow nozzle의 직경은 2.0~2.5mm, inlet 압력 1.2~1.6kg/cm<sup>3</sup>의 조건에서 37μm이하의 입자를 효과적으로 85%정도 분리할 수 있었다.
3. 탈철 및 탈탄을 위한 고구배자력선별시험에서는 자력의 세기가 증가함에 따라 제거율이 증가하였으며

10,000gauss에서 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 0.64%, TiO<sub>2</sub>는 0.07%인 비자착 최종산물을 약 82% 얻을 수 있었다.

4. 자착산물에는 운모가 상당량 함유되어 있고, 비자착산물은 석영과 장석이 주성분이었으며, CaO, Na<sub>2</sub>O의 성분이 다소 높은 것은 슬러지 응집 침전 과정에서 소량의 소석회 첨가에 기인한다.

5. 미립자인 37 $\mu$ m 이하의 평균입도는 12.5 $\mu$ m 이며, 비표면적은 3.0812m<sup>2</sup>/g, 비자착 슬러지의 백색도는 68.5%, 수축율 13.4%로 나타났다.

6. 화강암 석재 슬러지의 소성시험 결과 1250 $^{\circ}$ C에서 보다 좋은 색상의 산물을 얻을 수 있었다.

**참고문헌**

1. 대한광업진흥공사 : "석재입체 지역별 분포현황", (1989).
2. 노동부 · "유해물질의 허용농도 노동부 고시", 제86-45호 48, 50, 51, (1987)
3. 이상권, 김윤복 : "석재산업의 재해 및 공해방지를 위한 기초연구", 한국자원공학회지, Vol.29, No.5, p.57~64, (1992).
4. Shaw-Bing Wen, Hok-Shung Liu. "On the recycling of water, recovery and utilization of scrap powers of dimension stone cutting industry", proceedings of the EARTH '91, p.11~15, (1991).
5. Junji Iwasaki et al. : "High gradient magnetic separation of fine paramagnetic materials", The research of resources processing, Japan, 24, p.127~134, (1967).

6. Tsunematsu Kinne et al. : "Mineralogical properties of iriki kaolin-clay and its purification by high gradient magnetic separator", J. of MMI of Japan, 103, p.309~314, (1987).
7. Trawinski. H. : "Theory, applycation, and practical operation of hydrocyclones", Eng. & Mining Journal, Sept., p.115~127, (1976).
8. Weyher. L and Lovell. H.L. : "The response of parameter variation in the hydrocyclone processing". Soci. of Mining Eng., Dec., p.333~340, (1966).
9. Lynch. A. J. et al. : "The influence of hydrocyclone curves", International Journal of Mineral Processing, 1, p.173~181, (1974)
10. K. H. Rao and K. S. E. Forssberg : "Solution chemistry of mixed cationic/anionic collectors and flotation of feldspar from quartz", /- International Mineral Processing Congress, May 23-28, p.837~843, (1993).
11. 신방섭외 4인 · "도석의 고품위화 정제기술에 관한 연구 -고구배자선기에 의한 정제에 관한 연구", 한국자원공학회지, Vol.27, No.3, p.184~192, (1990)
12. Hiroki Yoysumoto et al : "The Crushing of granite and the separation, of mica in granite", The research of resources processing, Japan, 37, p.3~8, (1990).
13. J. S. Reed · "Introduction to the principles of ceramic processing", John Wiley & Sons, p.132~151, (1988).
14. 韓國動力資源研究所 : "資源活用研究(I)", p51~105, (1984).
15. Mineral Science and Industry : Vol.5, No.2, p 15-17, (1992).
16. Mineral Science and Industry : Vol.1, No 2, p.40-42, (1989).