

全州— 金屬鑛山 廢鑛尾의 活用 方案 研究†

鄭洙福* · 蔡泳培* · 玄鍾泳** · 金亨錫* · 尹聖文***

*韓國地質資源研究院 資源活用素材研究部, **(株)에코파트너스, ***鑛害防止事業團

Utilization of Mine Tailings from the Jeonju-II Mine†

Soo-Bok Jeong*, *Young-Bae Chae*, Jong-Yeong Hyun**, Hyung-Seok Kim* and Sung-Moon Yoon***

*Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, **Eco-partners Inc., ***Mine reclamation Corporation

요 약

전주일 광산 광미는 SiO₂의 함유량이 높고, 유해 중금속 성분의 함유량이 적은 특성을 갖고 있다. 본 연구에서는 이러한 광미를 각종 산업원료로 재활용할 수 있는 가능성을 알아보았다. 광미는 세라믹스 소결체의 원료로 사용한 결과, 색도 및 색상, 소성수축률, 흡수율 등에서 우수한 물성을 보였다. 보통포틀랜드시멘트 원료 중 실리카 성분으로 조합 원료의 2.59%까지 사용이 가능하였다. 광미를 조립물과 미립물로 분리하여 조립산물은 건조 시멘트 모르타르 원료로, 미립산물은 역청 포장용 채움재로 사용한 결과, 두 시료 모두 환경 위해성이 없고 KS 규격에 적합한 물성을 나타내었다.

주제어 : 광미, 활용, 소결체, 시멘트, 골재, 충전제

Abstract

The Jeonju-II mine tailings contain large quantities of SiO₂ and Al₂O₃ and lesser quantities of metallic components. In this study, we studied about the possibility of using mine tailings as a raw material in various industries. it was found that the sintered mine tailings had a good quality in every respect such as chromaticity, firing shrinkage and water absorption etc. Therefore if can substitute clay mineral in the ceramic industry. Also it can substitute about 2.94% of the raw materials of ordinary portland cement. We can use the coarse tailing as the fine aggregate for the ready-mixed mortar; and the fine tailing, as the filler for the bituminous paving mixture; because both products were not only suitable for Korea industrial standard in quality, but also environmentally harmless.

Key words : mine tailing, utilization, ceramic body, cement, aggregate, filler

1. 서 론

국내 산업분야의 급격한 발달에 따라 자원 소모량은 증가일로에 있으며, 이와 비례하여 자원의 부족현상이 심화되고 있다. 이와 더불어 각종 산업에서 발생되는 폐기물에 의한 환경오염 등이 심각한 사회문제로 제기되고 있다. 폐자원의 재활용은 환경오염 문제를 극소화하고 자원을 재활용할 수 있다는 면에서 이러한 여러 가지 문제점을 해결할 수 있는 최선의 방법이라 할 수 있다.

국내에는 휴폐광된 금속광산이 1,000여 개소에 달하며, 적치된 광산 폐기물량이 약 1억톤에 이르는 것으로 조사 보고되고 있다¹⁾. 최근 전국적으로 산재된 광산폐기물은 각종의 광해문제를 발생시켜 지역 주민의 민원과 환경파괴의 원인물질이 되고 있는 사례가 급증하면서, 정부 및 지자체 등에서는 이에 대한 상황을 분석하고 적절히 대처하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다²⁾.

국내에서는 최근까지 금속광산 광미의 처리 방법으로 주로 차단 매립 방법이 시행되어져 왔으나, 선진 외국에서는 광산 가행 중에 발생된 폐기물에 대해서는 재활용 방안 및 처리 지침을 수립하여 최우선적으로 유용자원의 회수 및 재활용 방안을 강구하고, 최종적으로 발생되는 폐기물만을 환경적인 안정화 처리 및 매립방법

† 2006년 10월 24일 접수, 2007년 1월 8일 수리

*E-mail: cyb@kigam.re.kr

을 시행하고 있다³⁾.

광산 폐기물의 재활용 처리 방법은 처리시설의 투자비 및 처리기간이 비교적 장기간 소요되지만, 환경오염원을 원천적으로 제거할 수 있고 미 이용자원의 자원화에 의한 자원 확보는 물론 지역 민원의 해결, 광해 방지 비용의 절감, 토지의 효율적 이용 등 많은 효과를 기대할 수 있다⁴⁾.

또한 국내·외 광물 자원의 수요급등으로 인하여 가격이 상승하고 있는데 반하여 새로운 광산 개발 여건은 환경보호 등의 요구로 인하여 과거보다 매우 불리하게 전개되고 있다. 따라서 미 이용되거나 폐기되고 있는 광산폐기물의 재활용 여건은 과거보다는 매우 양호한 상황이라 판단된다.

본 연구에서는 현재 약 60만톤 정도가 적치되어 있는 것으로 조사⁵⁾된 전주일 금·은 광산 광미에 의하여 발생될 수 있는 여러 가지 광해문제를 해결하기 위한 일환으로서, 광미의 직접적인 활용 방안 및 광미로부터 분리·선별되는 유가자원을 산업 원료소재로 활용하기 위한 기초연구 및 실제 적용 분야에서의 이용 가능성을 검토하였다.

2. 시료의 특성 및 실험방법

2.1. 시료의 특성

전주일 광산 광미에 대하여 ICP(JY-38, Jobin-Yvon, France) 및 XRF 분석(XRF-1700, Shimadzu, Japan)을 통하여 화학 성분 조성을 조사하였으며, XRD 분석(Pillips X'pert MPD, Phillips, USA)을 실시하여 구성광물을 확인하였다. 또한 토양오염 공정시험법(SEPAK, Soil Environment Preservation Act of Korea), 폐기물 공정 시험법(KSLP, Korea Standard Leaching Procedure), TCLP 시험법(TCLP, Toxicity Characteristics Leaching Procedure)에 의한 광미의 환경 위해성을 평가하였다⁶⁻⁸⁾.

Table 1은 전주일 광산 광미의 화학성분 조성으로, SiO₂ 85.77 wt.%, Al₂O₃ 4.48 wt.%, Fe₂O₃ 1.11 wt.%,

Table 1. Chemical compositions of the sample

Chemical compositions: non-metal (wt.%), metal (ppm)									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	lg.loss	
85.77	4.48	1.11	2.47	0.53	1.58	<0.03	0.18	2.61	
F	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Mn	
7,900	6.5	<1	60	35	23	141	71	2,100	

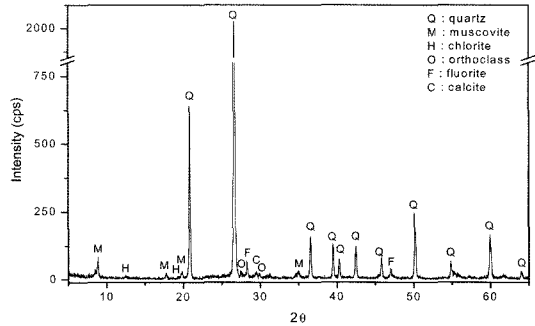


Fig. 1. XRD patterns of the sample.

CaO 2.47 wt.%가 함유되었으며, 금속성분으로는 Mn 2,100 ppm, Cr 60 ppm, Cu 35 ppm, Ni 23 ppm, Zn 141 ppm, Pb 71 ppm 등이 함유되어 여타 금속광산 광미보다 SiO₂의 함유량이 높은 반면, 금속성분의 함유량이 낮은 특성을 나타내었다.

Fig. 1은 광미의 구성광물을 확인하기 위한 X선 회절 분석 결과로, 석영(quartz), 녹니석(chlorite), 백운모(muscovite), 사장석(orthoclase), 형석(fluorite) 광물 등으로 구성된 것으로 나타났다. Table 1에서 전주일 광산 광미에는 여타 광미와는 상이하게 불소(F)성분이 약 1.0% 정도 함유되는 특성을 나타내었는데, 이는 XRD 분석 결과에서 알 수 있는 바와 같이, 형석 광물(fluorite)에서 기인된 것으로 추정된다.

Table 2는 토양오염 공정시험법에 의한 토양오염도 검사와 폐기물 공정 시험법(KSLP), 그리고 미국에서 오염물질의 이동성을 측정하여 유해물질을 판정하는 기준인 TCLP 시험법을 병행하여 용출시험을 실시한 결과를 함께 나타낸 것이다.

토양오염도 조사에서 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 납(Pb), 크롬(Cr), 니켈(Ni)은 AAS(Perkin Elmer 3100), 비소(As)와 아연(Zn)은 ICP-AES(Perkin Elmer Optima 5300DV)로, 수은(Hg)은 FIAS-AAS(Perkin Elmer FIAS 400)로 분석하였고, 불소(F)와 시안(CN)은 IC(ICS-3000)로 분석하였다. 토양오염도 조사 결과, 비소(As) 오염도가 6.6 ppm으로 우려기준을 초과하였으며, 불소의 오염도가 7,800 ppm으로 대책기준을 초과하는 것으로 나타났다. 그러나 불소 성분은 토양오염 공정시험법에서 토양에 함유된 불소를 CaF₂ 화합물로 만든 후 CaF₂에 함유된 불소를 분석하였기 때문에 시료에 함유된 형석이 모두 분석된 것으로 볼 수 있다. 국내 폐기물 공정 시험법에 의한 용출시험에서는 기준이 되는 모든 시험항목에 있어 유해폐기물 기준을 초과하지 않았으며, 불소

Table 2. Leaching results of the sample

method	Sorting	Chemical compositions (ppm)									
		Cu	Pb	Zn	Ni	Cr ⁶⁺	Cd	As	Hg	F	CN
SEPAK*	results	11.0	26.5	88.3	11.7	0.0	0.1	6.6	<0.05	7,800	<0.05
	warning standard	50	100	300	40	4	1.5	6	4	400	2
	countermeasure standard	125	300	700	100	10	4	15	10	800	5
KSLP**	results	<0.02	<0.03	<0.01	<0.03	<0.03	<0.01	<0.001	<0.001	1.52	<0.005
	leaching criteria	3.0	3.0	-	-	1.5	0.3	1.5	0.005	-	1.0
TCLP***	results	0.12	<0.03	0.58	<0.03	<0.03	0.01	0.004	<0.001	<1.0	<0.005
	leaching criteria		5.0			5.0	1.0	5.0	0.2		

SEPAK*: Soil Environment Preservation Act of Korea

KSLP**: Korea Standard Leaching Procedure

TCLP***: Toxicity Characteristics Leaching Procedure

(F)의 경우도 1.52 ppm이 용출되는 특성을 나타내었다. 또한 TCLP 시험법에 의한 용출시험에서도 유해폐기물의 판정기준이 되는 성분들이 규제치 이하로 용출되었다.

이와 같이 전주일 광산 광미는 주로 비금속광물들로 구성되어 있고, 금속성분의 함유량이 적기 때문에 중금속의 용출량이 아주 적어 환경적으로 비교적 안정된 물질인 것으로 평가되었다.

2.2. 실험방법

전주 일광산 광미에 대하여 Table 1의 화학성분조성, Fig. 1의 구성광물, Table 2의 중금속 용출특성 등을 고찰한 결과, 환경적으로 비교적 안정된 물질로 평가되었다. 따라서 광미에 대하여 별도의 무해화 처리 없이 광미 자체를 산업 원료소재로의 이용했을 경우의 특성을 검토하였다.

광미의 활용 분야는 현재 산업 전반에 이용되고 있는 원료소재들에 대한 분석을 실시하여 광미의 특성을 활용할 수 있는 용도 중에서 원료의 사용량이 방대하고 지속적인 사용이 예상되는 분야를 선정하였다.

전주일 광산 광미는 선광과정에서의 유용광물 회수를 위하여 파쇄분쇄 과정을 거친 산물로서 입자크기가 미세하고, 석영, 운모류, 점토류의 광물들로 구성되어 있으므로, 광미를 별도의 처리 없이 건조와 혼합과정거친 후 세라믹스 원료, 시멘트 부 원료 등으로의 이용특성을 고찰하였다.

또한 광미를 분급 처리(ATP 50, Alpine Co., germany)하여 200 mesh 이상의 조립산물과 200 mesh 이하의 미립 산물로 분리하여, 조립산물은 콘크리트용 기초재

료인 건조 시멘트 모르타르(KS L 5220)⁹⁾의 잔골재로, 미립산물은 역청재료인 역청 포장용 채움재(KS F 3501)¹⁰⁾로의 적용성 테스트를 실시하여 이용 가능성을 검토하였다. 이 과정에서는 분급에 의하여 분리되는 조립산물과 미립산물에 대하여 폐기물 공정 시험법(KSLP)과 TCLP 시험법을 병행하여 용출시험을 실시하여 활용시의 환경 위해성을 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 세라믹스 원료로의 활용 특성

광미를 세라믹스 분야로 활용하기 위하여 세라믹스 소결체 제조용 원료로서 광미의 활용특성과 세라믹스 소결체 제조에 미치는 영향 등을 조사하였다.

소성 점토벽돌이나 점토타일 등에 사용되는 점토 배합토는 가소성을 담당하는 성분(점토류), 용제 역할을 담당하는 성분(장석류) 그리고 골격을 유지하는 성분(석영류)으로 구성되는데, 전주일광산 광미 경우 세라믹스 원료의 소결에 필요한 점토, 규석, 장석질이 모두 함유되어 있는 특성을 갖고 있다.

본 실험에서는 국내 A사에서 세라믹스 소결체의 제조 원료로 사용되는 점토 배합토를 사용하였으며, 점토 배합토와 광미의 화학성분 조성은 Table 3과 같다. 점토 배합토의 경우 SiO₂ 58.33 wt.%, Al₂O₃ 24.22 wt%로 SiO₂/Al₂O₃ 비가 2.4정도였고, 광미는 SiO₂/Al₂O₃ 비가 19.1정도를 나타내었다.

시험편은 점토배합토와 광미의 특성을 고려하여 점토 배합토만을 사용한 것과 광미의 첨가량을 5, 10, 20, 30,

Table 3. Chemical compositions of the samples for the ceramic raw materials

Sample	Chemical compositions (wt.%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Igloss
clay mixture	58.33	24.22	2.86	5.70	0.57	1.44	1.52	0.49	5.07
mine tailing	85.77	4.48	1.11	2.47	0.53	1.58	<0.03	0.18	2.61

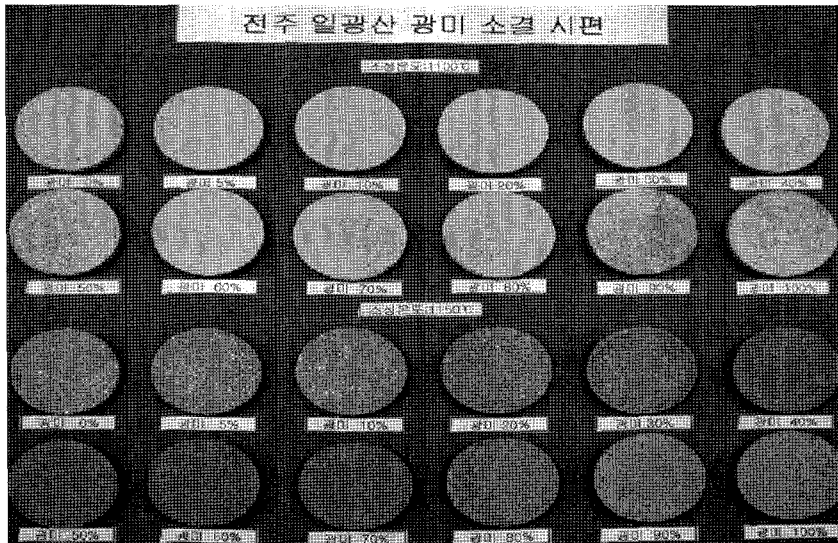


Fig. 2. Photography of firing body as a function of additional ratio of mine tailing at various temperature.

40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 wt.%로 증가시켜 원료들을 균질하게 혼합한 후, 소결체의 성형, 건조 및 소성 공정을 거쳐 제작하였다.

성형공정에서는 혼합된 시료를 30g 취하여 수분 함유량이 7 wt.%가 되도록 혼합하여 직경이 50 mm의 금형에 시료를 충전한 다음, 유압식 프레스를 사용하여 1,000 kg/cm²로 가압성형 하였다. 이때 얻어진 성형 시험편은 크랙발생을 방지하기 위하여 60°C로 3시간 동안 1차 건조한 후 105°C에서 24시간 동안 2차 건조를 실시하였다. 건조된 시험편은 중량 및 치수를 측정한 다음, 전기로에서 승온속도를 5°C/min으로 고정하여 1,100°C와 1,150°C에서 2hr 동안 소성한 다음 로내에서 방냉하였으며, 제조된 시험편의 외관은 Fig. 2와 같다.

제조된 시험편에 대해서는 색도 및 색상, 소성수축률, 흡수율 등 제반물성을 조사하였는데, 광미의 첨가량에 따른 소성 시험편의 색상은 spectrophotometer(CM2002, Minolta, Japan)를 사용하여 명도지수인 Lightness와 색도지수인 Redness/Greenness 및 Yellowness/Blueness를 이용하는 표색계인 CIE L*a*b* 표색계로 나타내었다.

소성온도에 따른 소성 시험편의 소성수축률은 소성 전과 소성 후 시험편의 부피를 측정하여 의해 계산하였으며, 흡수율은 KS L 4201의 기준에 의하여 측정하였다.

Fig. 3은 1,150°C에서 점토 배합도에 광미의 첨가량을 변화시켜 성형한 시험편을 2시간 소성하였을 때, 각

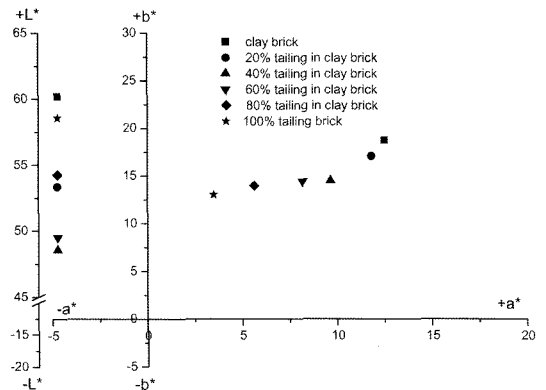


Fig. 3. Colour change of firing body as a function of additional ratio of mine tailing at 1,150°C for 2hr.

소결체의 색채를 CIE L*a*b* 표색계로 나타낸 것이다. 색도지수인 redness(+a*)는 점토배합토만을 원료로 사용된 소성 시험편의 경우 12.47을 나타내었으나, 광미의 첨가량이 증가할수록 redness(+a*)는 감소하여 광미만으로 제조된 소결편의 경우 3.49였다. 그리고 yellowness(+b*)는 점토배합토만으로 제조된 소성 시험편의 경우는 18.76에서 광미만으로 제조된 소결편의 경우 13.97로 감소하였다. 또한 명도지수인 lightness(+L*)는 점토배합토만으로 제조된 소결 시험편의 경우 60.21를 나타내었으나, 광미를 40 wt.% 첨가할 경우 48.57로 감소되어 가장 밝은 색상을 나타내었으며, 광미의 첨가량이 증가되면 lightness(+L*)값도 증가하여 광미만으로 제조된 소결편의 경우는 58.57을 나타내었다.

이상과 같이 점토 배합토에 광미를 첨가하면 점토 배합토만으로 제조된 세라믹스 소결체에 비하여 밝은 색상을 나타내어, 점토배합토의 일부를 광미로 대체할 경우 소결체의 색을 밝은 색상으로 조절이 가능한 것으로 평가되었다. 현재 세라믹스 분야에서는 밝은 계통의 색상이 선호되고 있어, 이러한 색상 발현을 위하여 값비싼 각종 안료나 철분 함유량이 적은 고품위의 백토가 사용되고 있다. 따라서 광미의 사용은 점토성분의 대체뿐만 아니라, 색상 조절제로의 사용되는 각종 안료나 백토의 사용량을 절감시킬 수 있을 것으로도 기대된다.

Fig. 4는 점토 배합토에 광미의 첨가량을 변화시킨 시험편을 1,150°C에서 2시간 소성하였을 때의 각 소결체의 소성수축률을 측정된 결과이다. 광미의 첨가량이 증가할수록 소성수축률이 감소하는 경향을 나타내었는데, 이러한 현상은 광미의 경우 점토 배합토에 비해 용

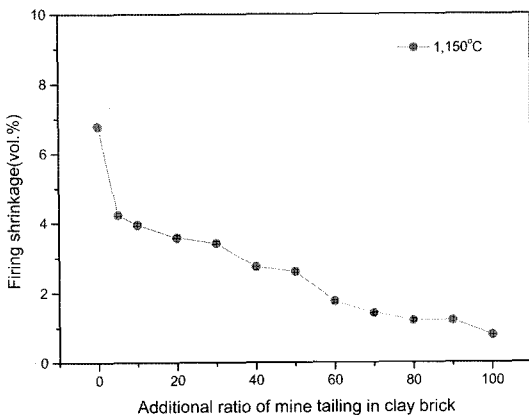


Fig. 4. Firing shrinkage of firing body as a function of additional ratio of mine tailing at various temperature.

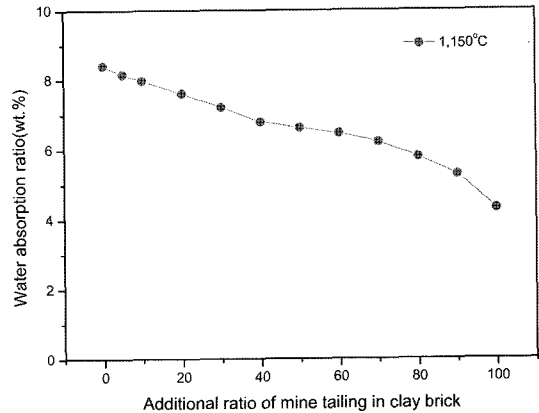


Fig. 5. Water adsorption of firing body as a function of additional ratio of mine tailing at 1,150°C for 2hr.

접이 높은 석영광물이 많이 함유되었기 때문에 시험편의 골격 유지에 도움이 되기 때문인 것으로 추측되었다.

이와 같이 점토 배합토에 광미를 첨가할 경우 소성수축율의 감소현상을 나타냈는데, 소성 수축율이 낮을수록 실제 점토벽돌 제품 제조시 제품의 크기조절이 유리한 것으로 알려져 있다.

Fig. 5는 점토 배합토에 광미의 첨가량을 변화시켜 제조된 시험편을 1,150°C에서 2시간 소성하였을 때의 소결체의 흡수율을 측정된 결과인데, 광미의 첨가량이 증가될수록 흡수율이 감소되는 경향을 나타내었다. KS L 4201의 세라믹스 소결체의 흡수율 규정에서 1종 점토벽돌의 경우 10% 이하가 요구되고 있는데, 광미를 첨가한 시험편 모두 10% 이하를 나타내어 1종 점토벽돌 품질기준에 적합함을 확인할 수 있었다.

이상과 같이, 전주 일광산 광미를 세라믹스 소결체 제조용 원료로 활용하기 위하여 점토배합토에 광미를 첨가하였을 때 세라믹스 소결체에 미치는 영향 등을 조한 결과, 광미의 첨가에 의하여 소결체의 색상이 밝아지는 등 다양한 색상 발현이 가능하였으며, 또한 소성수축율 및 흡수율이 감소되고 압축강도의 증가가 예상되는 등 여러 가지 장점을 갖는 것으로 평가되었다. 따라서 전주 일광산 광미의 경우 현재 세라믹스 원료로 사용되고 있는 기존 점토광물의 대체는 물론 고급 세라믹스 원료소재로의 활용도 가능할 것으로 기대된다.

3.2. 시멘트 부 원료로의 활용 특성

전주일 광산 광미는 Table 1과 같이 SiO₂와 Al₂O₃가 주성분으로, 현재 시멘트 제조 분야에서 실리카 및

Table 4. Chemical composition of raw materials

Raw material	Chemical compositions (wt.%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Ig.loss
Limestone	10.50	1.93	0.92	45.64	2.20	0.06	1.05	37.93
Shale	72.34	10.66	3.77	0.41	0.36	0.02	1.71	10.26
Converter slag	16.59	10.53	31.45	36.67	7.55	0.04	0.08	0.09
Fly ash	51.35	27.43	6.90	6.44	1.02	0.05	0.80	3.34
Spent Foundry Sands	85.03	4.90	4.33	0.95	0.47	0.93	0.58	2.83
Mine tailing	85.77	4.48	1.11	2.47	0.53	<0.03	1.58	2.61

알루미나 원으로 사용하고 있는 셰일, 폐주물사, fly ash 등과 유사한 화학 성분 조성을 갖고 있다. 따라서 광미를 보통 포틀랜드시멘트(OPC, Ordinary Portland Cement) 원료로 활용할 경우 제반 특성을 고찰하였다.

Table 4는 현재 B시멘트 회사에서 보통 포틀랜드시멘트 클링커를 제조하기 위하여 사용하고 있는 석회석, 혈암(셰일), 폐주물사, 전로슬래그, fly ash 등과 시료로 사용된 광미의 화학성분조성을 나타낸 것이다. 석회석은 CaO 45.64 wt.%, SiO₂ 10.50 wt.%, 혈암(셰일)은 SiO₂ 79.81 wt.%, Al₂O₃ 11.22 wt.%, 폐주물사는 SiO₂ 85.03 wt.%, Al₂O₃ 4.90 wt.%, Fe₂O₃ 4.33 wt.%, 전로슬래그는 Fe₂O₃ 31.45 wt.%, CaO 36.67 wt.%, SiO₂ 16.59 wt.%, fly ash는 SiO₂ 51.35 wt.%, Al₂O₃ 27.43 wt.%의 화학성분 조성을 나타내었다.

이들 조합 원료 중 광미와 혈암(셰일)은 SiO₂, Al₂O₃의 함유량이 다소 차이를 보이지만, 대체로 유사한 성분 조성을 갖기 때문에 혈암 대체 원료로 광미의 사용이 가능할 것으로 판단되어 이에 대한 특성을 고찰하였다. 현재 B시멘트 회사에서 적용하고 있는 modulus 값

인 석회포화도(LSF, Lime Saturation Factor) 91.0, 규산율(SM, Silica Modulus) 2.60, 철율(IM, Iron Modulus) 1.60의 배합 조건으로 각 원료들을 혼합하여 클링커를 제조하여 기준 시료(plain)로 설정하였다. 그리고 기준 시료와 동일한 modulus 조건으로 혈암 대신 광미를 조합 원료에 혼합하였을 때의 조합 원료의 배합비 및 성분 등을 비교하여 시멘트 원료로서의 광미 활용 가능성을 검토하였다.

Table 5는 조합 원료 중 SiO₂ 원으로 각각 혈암(셰일)과 광미를 사용하였을 때의 조합 원료들의 배합비를 비교하여 나타낸 것이다. 혈암을 사용할 경우 3.77%의 혈암이 필요하고 Al₂O₃ 원으로 플라이 애쉬가 3.89% 정도가 요구되지만, 광미를 조합 원료로 사용할 경우에는 혈암(셰일)을 첨가하지 않고 광미를 조합 원료의 2.59% 정도까지 사용이 가능한 것으로 평가되었다. 그러나 광미에 함유된 철분 및 알루미나의 양이 혈암보다 적기 때문에 전로 슬래그 및 플라이 애쉬의 혼합량이 각각 0.16%, 1.04% 정도 증가되는 것으로 나타났다.

Table 6은 Table 5와 같이 혼합한 조합 원료의 화학

Table 5. Mixing ratio of raw materials for clinker

	Mixing ratio (wt.%)				
	Limestone	Shale	mine tailing	Converter slag	Fly ash
Plain	89.70	3.77	0	2.64	3.89
Mine tailing	89.68	0	2.59	2.80	4.93

Table 6. Chemical composition of the mixed materials for clinker

	Chemical composition (wt.%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Ig. loss
Plain	14.55	3.44	2.15	42.05	2.22	0.06	1.08	34.44
Mine tailing	14.61	3.46	2.16	42.23	2.24	0.06	1.07	34.16

Table 7. Chemical and mineral composition of the synthesized clinker by Bogue's equation

	Chemical composition (wt.%)							Mineral composition (wt.%)			
	Plain	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Plain	22.20	5.25	3.28	64.14	3.39	0.09	1.65	52.36	24.23	8.37	9.98
Mine tailing	22.20	5.25	3.28	64.14	3.41	0.09	1.62	52.36	24.23	8.37	9.98

성분 조성을 나타낸 것으로, 혈암(셰일)과 광미를 사용한 조합 원료 모두 동일한 modulus 값을 적용하였기 때문에 조합 원료의 화학 성분도 거의 유사한 것으로 분석되었다.

Table 7은 합성 가능한 클링커의 예상 화학 성분 분석치를 Bogue식에 대입하여 클링커의 주요 광물의 함유량을 계산한 결과이다. 클링커의 MgO 함유량은 KS 규정치인 5% 이하로 존재하였으며, 기준시료(셰일 첨가)와 광미첨가 시료를 각각 조합 원료로 사용하여 제조한 클링커 광물의 함유량은 두 시료 모두 C₃S가 52.36%, C₂S가 24.23%, C₃A가 8.37%, C₄AF가 9.98% 정도 함유되어 전형적인 보통 포틀랜드시멘트 클링커의 광물 조성을 나타내었다. 이는 조합 원료의 modulus(LSF, SM, IM)값이 동일하였기 때문인 것으로 추측되었다.

결과적으로 광미에는 시멘트의 주요 성분 중 하나인 SiO₂ 성분이 다량으로 함유되어 있기 때문에 기존의 시멘트 회사에서 SiO₂ 대용으로 각각 사용하고 있는 혈암(셰일)을 전혀 사용하지 않고 단지 석회석, 전로 슬래그, fly ash, 광미만으로도 충분히 시멘트 클링커의 제조가 가능한 것으로 평가되었다.

이상과 같이 전주 일광산 광미에 대한 보통포틀랜드시멘트의 원료로의 활용 가능성 평가 실험 결과, 광미는 시멘트 분야에서 규산질 원료사용하기에 적합한 성분 조성을 갖고 있으며, 조합 원료의 약 2.59%까지 사용이 가능한 것으로 평가되었다.

3.3. 콘크리트 및 역청재료로의 활용 특성

전주일 광산 광미는 Table 1과 Fig. 1에서와 같이 SiO₂ 성분의 함유량이 높고 주로 석영광물로 구성되어 있으며, 선광과정에서 유용광물 회수를 위하여 파분쇄된 산물로 입자크기가 매우 미세한 특성을 갖고 있다.

본 연구에서는 이러한 광미의 특성을 활용하기 위하여 광미에 대하여 분급을 실시하여 200 mesh 이상의 조립산물과 200 mesh 이하의 미립 산물로 분리한 후, 조립산물은 건설재료인 건조 시멘트 모르타르(KS L 5220) 용도로, 미립산물은 역청재료인 역청포장용 채움재(KS F 3501) 로의 적용성 테스트를 실시하였다.

Table 8은 분급산물들의 산출물 및 화학성분을 나타낸 것인데, 조립산물로 약 32 wt.% 정도가 산출되었으며, 이 산물은 SiO₂ 함유량이 91.35 wt.%를 나타내었다. 미립산물로는 약 68 wt.% 정도가 분리되었는데, 이 산물은 조립산물에 비하여 SiO₂ 품위가 낮은 반면 Al₂O₃, Fe₂O₃ 품위가 높은 특성을 나타내었다.

Table 8에서와 같이 분급 공정에 의하여 분리된 조립 및 미립 산물에는 중금속 성분들이 미량 함유되어 있기 때문에, 이들 산물에 대하여 폐기물 공정 시험법 및 TCLP 시험법에 의한 중금속 용출 실험을 실시하여 산업원료소재로 활용할 경우의 환경 안정성을 평가하였다.

Table 9는 분급산물의 중금속 용출시험 결과인데, 폐기물 공정 시험법에 의한 용출 시험에서는 조립산물과 미립산물 모두 중금속 성분이 전혀 용출되지 않아 환경적으로 매우 안정된 산물임을 확인할 수 있었다. TCLP

Table 8. Yield and chemical composition of each fraction separated by air classifier

	Yield (wt.%)	chemical composition (non-metal: wt.%, metal: ppm)							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
		As	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Mn
Coarse fraction	32.02	91.35	2.71	0.25	1.78	0.29	0.96	<0.03	0.13
		4.8	<1	58	21	42	86	18	1,400
Fine fraction	67.98	83.48	5.32	1.52	2.71	0.65	1.86	<0.03	0.20
		7.3	<1	91	47	40	177	106	2,600

Table 9. Leaching results and leaching criteria of each fraction separated by air classifier

product	method	Chemical compositions (ppm)								
		Cu	Pb	Zn	Ni	Cr ⁶⁺	Cd	As	Hg	CN
Coarse fraction	KSLP	<0.02	<0.03	<0.01	<0.03	<0.03	<0.01	<0.001	<0.001	<0.005
	TCLP	0.07	<0.03	0.28	0.03	<0.03	0.01	0.002	<0.001	<0.005
Fine fraction	KSLP	<0.02	<0.03	<0.01	<0.03	<0.03	<0.01	<0.001	<0.001	<0.005
	TCLP	0.09	<0.03	0.60	<0.03	<0.03	0.01	0.002	<0.001	<0.005
Leaching criteria	KSLP	3.0	3.0	-	-	1.5	0.3	1.5	0.005	1.0
	TCLP		5.0			5.0	1.0	5.0	0.2	

Table 10. The results of application test and KS standard for ready-mixed mortar

Properties		Results	KS standard (KS L 5220)			
			Spray plastering	Normal plastering	Hardened plastering	Ground plastering
Compress strength (N/mm ²)	7 day	14	over 6	over 7	over 8	over 14
	28 day	22	over 9	over 10	over 11	over 21
Capillary water absorption (wt%)		76	over 75	over 70	over 70	over 65
Air content (vol%)		15	-	under 27	under 27	under 27
Sand content (wt%) (residue of 0.15 mm sieve)		72	under 75	under 78	under 82	under 78
Maximum sand size (mm) (standard sieve)	5.6 mm	100	-	-	-	-
	6.7 mm	100	-	-	-	-

법에 의한 용출 시험에서도 유해 폐기물의 판정기준이 되는 Pb, Cr, Cd, As, Hg, 성분의 용출량이 아주 미미한 특성을 나타내어 조립 및 미립산물 모두 환경적으로 매우 안정된 산물임을 확인할 수 있었다. 따라서 조립 및 미립 산물 모두 산업 원료소재로 이용하는 데에는 환경 위해성 문제는 대두되지 않을 것으로 평가되었다.

건조 시멘트 모르타르(Dry ready mixed cement mortar)는 미장 조적 또는 바닥 재료로 사용되는 건축 재료로서 시멘트와 혼합하여 제조되는 것으로, 일반소비자 또는 공사현장에서 단지 물만 섞어 작업할 수 있도록 한 것이다(KS L 5220). 이러한 건설 재료는 국토개발과 산업화에 따라 수요가 급증하고 있으나, 국토보전 및 환경보호 등으로 인하여 가채량이 급격히 감소되고 있으므로, 수요에 대처하기 위해서는 대체 재료의 개발이 시급한 실정이다. 광미를 분급하여 분리되는 조립산물에 대하여 건조 시멘트 모르타르로의 활용 가능성을 검토하기 위한 적용성 테스트 결과는 Table 10과 같다. 조립산물을 이용한 모르타르의 압축강도는 7일

14 N/mm², 28일 22 N/mm²을 나타내어 KS 규격을 만족하였으며, 보수성, 공기량, 모래의 함량 및 입도분포 등에서도 KS 규격에 적합한 품질 규격을 나타내었다.

분급 조작에 의하여 분리되는 미립산물은 입자크기가 200μm 이하로 매우 미세하므로 이러한 특성을 활용할 수 있는 공업용 충전제로의 활용이 가능성을 평가하기 위하여, 역청 포장용 채움재(아스콘 채움재)로의 적용성 테스트를 실시하였다. 역청 포장용 채움재는 아스콘(역청) 사용량의 5~10 wt.% 정도가 사용되므로 국내 아스콘 생산량 약 2,000만톤/년을 기준으로 하면, 채움재의 수요량은 100~200만톤에 달하는 방대한 규모로 추정된다.

광미에서 분리·선별한 미립 산물에 대하여 아스콘 채움재 규격에 필요한 물성을 조사하였는데, 분석 결과는 Table 11과 같다. 미립산물에는 유기물 및 덩어리진 입자들이 포함되지 않고, 입도분포는 300 μm 통과분이 100%, 수분의 함량은 0.3 wt.%였으며, 아스콘 시편을 제작하여 측정한 소성지수는 5.3, 침수팽창 값은 1%, 흐름시험 값은 26%, 박리 저항성 1/4 이하, 비중 2.73 등으로 역청 포장용 채움재로의 적합한 물성을 나타내

Table 11. The results of application test and KS standard with the filler for bituminous paving mixture

Test item		Result	KS standard (F 3501)
Particle size	Weight percentage passed sieve (%)	600 µm	100%
		300 µm	100%
		150 µm	97%
		75 µm	94%
Specific density		2.73	over 2.5
Moisture content (%)		0.3%	under 1.0%
Flow test (%)		26%	under 50%
Inundation expansion (%)		1%	under 3%
Plastic index		5.3	under 6
Excoriation resistance		under 1/4	under 1/4

었다.

이상과 같이 광미를 입자크기별로 조립과 미립으로 분리하여 건설재료나 공업용 충전재 등으로 이용할 경우, 품질기준에 문제점이 없을 것으로 판단되었다. 광미를 건설재료나 역청 포장용 채움재 등은 수요처가 전국 각지에 분포되어 있고, 사용량도 방대하므로 광미의 특성상 대량 처리에 의해 다량의 산물들이 산출되어도 전량 소비가 가능할 것으로 기대된다.

4. 결 론

진주일 광산 광미에 대하여 효율적인 처리방법을 모색하기 위하여 물리·화학적 특성을 고찰한 결과 비교적 환경적으로 안정된 상태이고, 산업원료 소재로 이용이 가능할 것으로 예측되어 이들 산물에 대하여 활용 방안을 검토한 결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 진주일 광산 광미를 별도의 처리 없이 세라믹스 원료 및 시멘트 부원료로의 활용 가능성을 검토한 결과, 세라믹스 원료로의 적용 실험에서 여러 가지의 우수한

물성들이 관찰되어 고급 세라믹스 원료로의 이용이 가능할 것으로 판단되었다. 또한 시멘트 부원료로 이용할 경우 현재 시멘트 분야에서 실리카 및 알루미늄 원으로 사용하고 있는 혈암(세일)의 대체가 가능할 것으로 평가되었다.

2. 광미를 분급 처리하여 조립 산물과 미립 산물로 분리하여 조립 산물은 건설재료인 건조 시멘트 모르타르 원료, 미립산물은 역청 포장용 채움재로 적용성 실험을 실시한 결과, 두 산물 모두 환경 위해성이 없고 KS 규격에 적합한 물성을 나타내어 건설재료나 공업용 충전재료의 활용가능성이 매우 높은 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. 광해방지사업단, 2006: http://www.kmrc.or.kr/pr/k_sub2.asp
2. 정명채, 2002: 광산개발에 의한 환경오염 현황, 2002년 광해방지정책 및 기술 심포지움, 한국지질자원연구원, pp. 37-53.
3. Salomons, W. and Forstner, U., 1998: *Environmental management of solid waste*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Now York.
4. 채영배, 정수복, 윤평란, 1999 : 금광산 폐광미로부터 유가자원 회수에 관한 연구, 한국리싸이클링 학회지, 8(3), pp. 37-42.
5. 정영욱 외, 2006: 진주일광산 광미 및 침출수 처리방안 연구, 광해방지사업단, 7(5), pp. 623-631.
6. 환경부, 2000: 폐기물공정시험방법.
7. 환경부, 2002: 토양오염공정시험방법.
8. U.S. EPA, 1986: *Test methods for evaluation solid waste-physical/chemical methods. SW-864*, 3rd, Ed., Office of solid Waste and Emergency Response.
9. 한국공업규격, 2003: 건조 시멘트 모르타르 (KS L 5220).
10. 한국공업규격, 2003: 역청 포장용 채움재 (KS F 3501).

鄭 洙 福

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부 책임연구원
- 당 학회지 14권 4호 참조

蔡 泳 培

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부 책임연구원
- 당 학회지 14권 4호 참조

玄 鍾 泳

- 현재 (주)에코파트너스 기술연구소 소장
- 당 학회지 14권 4호 참조

金 亨 錫

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부
선임연구원
- 당 학회지 13권 3호 참조



尹 聖 文

- 고려대학교 지구환경과학과 공학사
- 고려대학교 지구환경과학과 공학석사
- 현재 광해방지사업단 토양복원팀

學會誌 投稿 安內

種 類	內 容
論 說	提案, 意見, 批判, 時評
展望, 解説	現況과 將來의 견해, 研究 技術의 綜合解説, Review
技 術 報 告	實際的인 試驗, 調查의 報告
技術, 行政情報	價値있는 技術, 行政情報를 간결히 解説하고, comment를 붙인다.
見 聞 記	國際會義의 報告, 國內外的 研究 幾關의 見學記 등
書 評	
談 話 室	會員相互의 情報交換, 會員 自由스러운 말, 階霜 등
Group 紹介	企業, 研究幾關, 大學 등의 紹介
研究論文	Original 研究論文으로 本 學會의 會誌에 掲載하는 것이 適當하다고 보여지는 것

수시로 원고를 접수하오니 많은 투고를 바랍니다.