

상동중석광산 광미의 순환자원화를 위한 특성 조사

정문영*, 정명채*, 최연왕**

세명대학교 자원환경공학과*, 세명대학교 토목공학과**,

Investigation on the Properties of Tailings from the Sangdong W Mine for the Recycling

Jung Moon Young*, Jung Myung Chae*, Choi Yun Wang**

Dept. of Earth resource & Environmental Geotechnics Engineering*, Dept. of Civil Engineering**, Semyung University

1. 서론

국내에는 금속광산(906개), 석탄광산(379개) 및 비금속광산(1173개)을 포함하여 총 2,500개소의 크고 작은 광산들이 산재되어 있으며, 이들 중에서 약 80%가 휴광 또는 폐광된 광산이지만 휴/폐광 이후 적절한 환경복원시설을 설치하지 않아 주변 생태계가 위협받고 있다. 특히 폐금속 광산에서는 과거 채광이나 선광 등의 광산 활동으로 인하여 배출된 광산폐기물(폐석과 광미)이 광산주변에 그대로 방치되어 있어 집중강우나 강풍에 의해 광산하부로 이동·분산되어 주변의 농경지와 수계의 환경오염이 발생되고 있다(정명채, 2002). 이러한 광산폐기물의 처리방법은 폐기물을 토양, 지표수, 지하수 등으로부터 차단하고 발생하는 침출수는 유해성분을 분리·제거하여 무해화하는 위생매립처리방법과 폐기물을 재활용하는 방법으로 대별할 수 있다. 첫 번째 처리방법은 폐기물을 차단 매립함으로써 무해화시킬 수 있다는 장점은 있으나 매립장 부지의 활용이 어렵고 차단 매립재의 수명에 따라 일정기간이 경과한 후에는 재 안정화시켜야 하며, 침출수를 무해 처리하는데 지속적으로 비용이 소요된다는 단점이 있다. 즉 오염원의 제거가 근본적으로 이루어지지 않는 한 계속 환경문제가 발생할 소지가 있다는 점이다. 이에 반해 광산폐기물을 순환자원으로 재활용할 수만 있다면 환경도 보전하고 광물자원의 수명도 연장시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 광산폐기물의 재활용법은 물질회수법과 물질전환법으로 대별할 수 있는데, 각각의 장단점을 가지고 있다(정문영·최연왕, 2002). 금속광산폐기물의 경우 금·은 등 귀금속뿐만 아니라 유용한 비금속광물이 포함되어 있어 이를 회수함으로써 국내 광물자원의 부족분을 일부 충당할 수 있고 광산폐기물의 양을 감소시킴으로써 광해를 근원적으로 해소하고 광해방지사업 비용을 원천적으로 절감할 수 있다(채영배 등, 1999). 그러나 물질회수법은 유가물질의 회수 차원에서 볼 때 경제적으로 유리하나 이 역시 폐기물 전량을 재활용할 수 없을 뿐만 아니라 유가물질회수공정에서 2차 오염물질이 발생할 수 있다는 문제점이 내포되어 있다. 따라서 광미 그 자체를 순환자원화 하는 방안으로 시멘트부원료, 세라믹소재원료, 건설소재원료 등 다양한 물질전환법이 연구되고 있다(최연왕·정문영, 1998 ; 진호일 등, 2000).

이에 본 연구에서는 국내에 방치되어 있는 금속광산 폐기물의 처리방안과 향후 광산지역 환경오염방지사업의 정책방향 설정 및 국내 금속광업의 활성화에 일조를 하고자 금속광산 폐기물 중 최대의 양이 적치되어 있는 심도별 상동중석광산 광미의 물리적·화학적 특성,

광물학적 조성, 중금속 용출 특성 및 분쇄 특성을 파악하고 이를 고부가가치의 순환자원으로 재활용하는 방안을 제시하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 실험재료

본 연구를 위해 약 400만톤이 적치된 상동중석광산 구광미장에서 21m 심도로 총 6개 지역의 시추를 실시하였다. 획득한 수직시추코어를 실험실에서 1.5m 간격으로 상중하 3개씩 총 240개의 코어형태로 시료를 채취하여 사용하였다.

2.2. 실험방법

상동중석광산 광미의 입도분포도 분석은 영국 Malvern社의 Mastersizer S를 이용하여 실시하였다. 광미의 구성광물 및 화학성분을 확인하기 위하여 각각 X-선회절분석(네덜란드 Philips社의 PW3710)과 화학습식분석을 실시하였다. 광미의 흡열반응과 발열반응이 일어나는 온도와 중량감소 파악하기 위해 TG-DTA(Rheometric 사, STA-1660)분석을 실시하였다. 이때의 실험조건은 승온온도 10℃/min. 공기분위기, α -Alumina를 표준시료로 하여 측정하였다. 한편 광미의 중금속 용출특성을 알아보기 위하여 국내폐기물용출시험법(KSLT)에 따른 용출시험과 분쇄특성을 알아보기 위하여 교반밀을 사용한 습식분쇄도 실시하였다. 이때의 분쇄조건은 볼장입량 0.5, 시료장입량 0.85, 분쇄속도 700rpm, 슬러리 농도 50vol%, 그리고 분산제인 PEI를 슬러리 무게기준으로 4.0%첨가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

1) 입도분포

Table 1과 Table 2는 상동중석광산 구광미 적치장에 대한 위치 및 심도별 광미시료의 입도분석 결과이다. 상동광산 광미는 중석 원광석이 미분쇄 및 부유선광 과정을 거친 후 폐기된 불규칙 형상의 세립질로써 적치장의 위치와 심도에 따라 입도범위에 차이는 있으나, 심도별 median경(d_{50})은 평균 10~30 μm 이었다. 심도가 깊어질수록 광미의 median경은 작아지는 경향이 있으며, 특히 심도 18.0m 이하에서는 median이 약 8 μm 인 미립자로 존재하고 있음을 알 수 있었다. 한편 광미적치장의 배수구가 있는 광미덤으로부터 광미가 유입되었던 방향으로 갈수록 미세한 입자의 함유율이 점차 증가하는 경향이 있다. 상동중석광산 광미는 대부분 실트(silt : 200#~5 μm)이하의 성분이고 자갈(gravel:>10#)성분은 전혀 없고 모래(sand : 10#~200#)성분도 극히 적으므로 골재로만 사용하기는 어렵다. 따라서 광미를 일련의 분급공정과 분쇄공정을 거치면 다공성 무기질 담체용 출발원료로 사용할 수 있을 것이다.

2) 화학성분

Table 2는 상동광산 구광미 적치장에 대한 심도별 광미시료의 습식화학분석 결과이다. 광미의 화학성분은 심도별로 조금씩 차이는 있으나 SiO_2 50%, Al_2O_3 와 Fe_2O_3 는 각각 13% 정도였다. 특히 CaO가 약 11%정도 함유되어 있는 것은 사장석(plagioclase)계열인 아노르다이트($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)와 연구지역의 모암인 석회석이 존재하기 때문이다(Table 3 참조). 한편 강열감량은 6%정도였다.

Table 1 Particle size distribution of tailings in the old pond of Sangdong W Mine

Sampling depth(m)	Diameter (μm)	Sampling site						Average (μm)
		BH 1	BH 2	BH 3	BH 4	BH 5	BH 6	
1.5m	d ₁₀	0.51	1.02	0.97	6.22	8.19	1.83	3.12
	d ₅₀	5.41	11.22	11.49	50.39	67.43	25.76	28.61
	d ₉₀	16.38	43.56	47.00	116.22	179.20	125.35	87.95
6.0m	d ₁₀	0.57	0.79	0.71	6.37	4.80	0.85	2.34
	d ₅₀	6.17	8.57	7.30	37.01	41.06	8.57	18.11
	d ₉₀	32.99	47.98	34.30	109.74	127.55	31.37	63.98
10.5m	d ₁₀	0.80	0.89	0.76	1.22	2.36	5.89	1.98
	d ₅₀	10.19	11.40	7.78	14.05	35.19	55.42	22.33
	d ₉₀	40.50	49.34	28.61	59.97	125.80	124.58	71.46
15.0m	d ₁₀	0.61	0.55	0.36	1.15	3.77	13.98	3.40
	d ₅₀	6.54	5.29	8.49	14.81	47.50	118.93	33.59
	d ₉₀	25.90	25.43	18.97	58.81	126.71	270.60	87.73
18.0m	d ₁₀	0.59	0.80	0.70	0.72	1.03	0.59	0.73
	d ₅₀	5.80	7.93	6.50	7.34	12.79	6.71	7.84
	d ₉₀	23.15	28.78	20.88	23.09	57.44	27.65	30.16
21.0m	d ₁₀	-	0.49	0.62	0.75	1.05	0.54	0.69
	d ₅₀	-	4.81	6.25	10.25	12.72	5.63	7.93
	d ₉₀	-	14.52	21.11	59.88	50.22	17.02	32.55

Table 2 Chemical compositions of tailings in the old pond of Sangdong W Mine

Sampling Depth	Compositions (wt.%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig-loss
1.5m	50.12	12.30	14.80	10.63	2.62	1.17	6.25
6.0m	50.82	14.88	12.00	9.48	2.42	1.21	6.83
10.5m	49.26	12.90	13.52	12.06	2.02	1.06	6.90
15.0m	52.88	11.42	12.64	11.20	2.42	1.28	5.99
18.0m	48.40	13.86	13.56	11.49	1.81	1.27	7.13
Average(wt.%)	50.29	13.07	13.30	10.97	2.25	1.19	6.62

3) 광물학적 특성

Fig. 1은 XRD분석 결과로서, 광미내에는 석영(quartz : SiO₂), 방해석(calcite : CaCO₃), 녹니석(chlorite), 엘바이트(albite: NaAlSi₃O₈), 아노르다이트(anorthite: CaAl₂Si₂O₈), 캐올리나이트(kaolinite: Al₂Si₂O₅(OH)₄), 코디에라이트(cordierite: Mg₂Al₄Si₅O₁₈), 엔스테타이트(enstatite: MgSiO₃) 등이 함유되어 있는 것으로 파악되었다. 또한 Table 3은 Rietvelt method를 적용한 TOPAS program을 이용하여 X-선 회절자료로부터 구한 구성광물의 함량이다. 구성광물은 심도에 따라 다소 차이는 있으나 주 구성광물인 석영 45%, 녹니석 15%, 코디에라이트 14%, 그리고 아노르다이트 16% 등이 함유되어 있으며 부 구성광물로는 엘바이트, 캐올리나이트, 엔스테타이트, 방해석 등이 소량 함유되어 있음을 확인하였다.

4) 열중량분석

Fig. 2는 온도의 상승에 따라 광미의 흡열반응과 발열반응이 일어나는 온도와 중량감소 파악하기 위해 실시한 TG-DTA분석결과이다. 600°C이하의 온도에서 광미의 중량감소가 일어나는 것은 광물에 존재하는 흡착수와 결정수가 제거되기 때문이다. 700°C이상에서 중량감소가 일어나는 것은 광미내에 함유되어 있는 방해석의 탈탄산반응에 의한 것으로 판단된다.

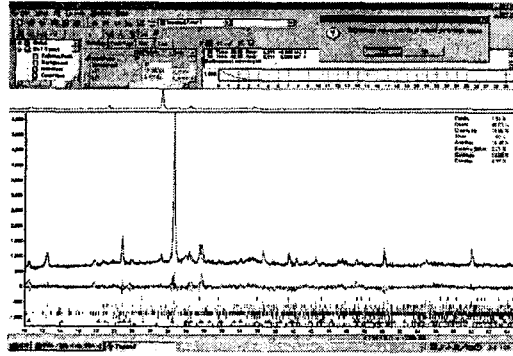


Fig. 1. XRD pattern of tailings in the old pond of Sangdong W Mine.

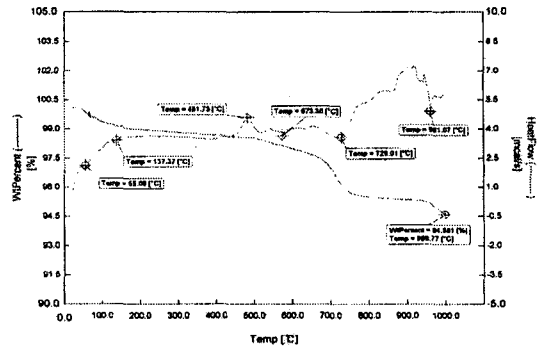


Fig. 2. TG-DTA pattern of tailings in the old pond of Sangdong W Mine.

Table 3 Mineral quantity of tailings in the old pond of Sangdong W Mine

Sampling Depth	Mineral quantity (wt.%)							
	calcite	quartz	chlorite	albite	anorthite	kaolinite	cordierite	enstatite
1.5m	1.51	45.03	16.68	1.08	16.42	2.21	12.09	4.97
6.0m	2.11	41.29	17.08	1.47	18.24	1.59	13.22	5.01
10.5m	2.12	50.35	11.35	1.97	14.57	1.00	13.61	5.03
15.0m	1.09	45.86	14.90	0.01	16.94	1.71	16.26	3.22
18.0m	2.56	43.79	16.39	1.90	14.48	1.90	14.96	4.05
average(wt.%)	1.70	45.63	15.00	1.13	16.54	1.62	13.79	4.55

5) 중금속 용출 특성

Table 4는 광미의 유해성 여부를 알아보기 위하여 폐기물공정시험법에 규정되어 있는 KSLT에 따라 분석한 결과로서 그의 중금속 용출량은 폐기물 관리법 시행규칙의 환경기준값 보다 낮았다. 따라서 광미 자체를 물질전환법에 의해 재활용하는데는 문제가 없다고 판단된다.

Table 4. Concentration of heavy metals leached from tailings in the old pond of Sangdong W Mine

Heavy metals	Pb	Cu	As	Cd	Cr ⁺⁶	Hg
standard(mg/l)	3	3	1.5	0.3	1.5	0.005
conc. of heavy metal in leachate(mg/l)	0.259	0.045	0.120	0.038	-	-

6) 분쇄 특성

Fig. 3과 Fig. 4는 분쇄시간에 따른 광미의 입도분포 및 median경의 변화를 나타낸 그래프이다. 일반적으로 무기질 다공성 담체를 제조하기 위해서는 출발원료의 입평균도가 3~5 μm정도, 슬러리 점도는 80~2,000cp가 적당하다고 알려져 있다(이민용, 2002). 따라서 상동중석광산 광미로 다공성 담체를 제조하기 위해서는 교반밀로 2시간이상 분쇄하여야만 가능함을 알 수 있었다.

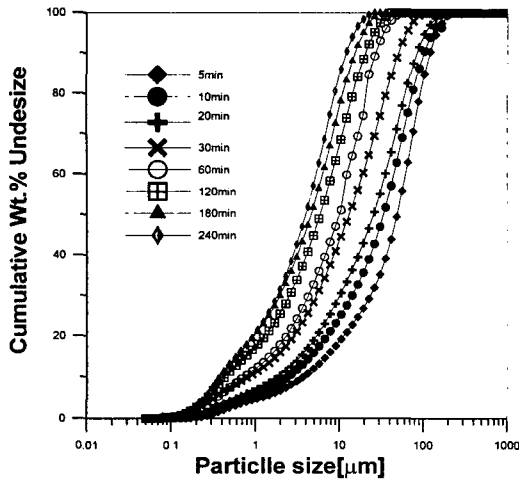


Fig. 3. Particle size distribution of tailings as a function of wet grinding time. (pulp concentration. : 50vol%)

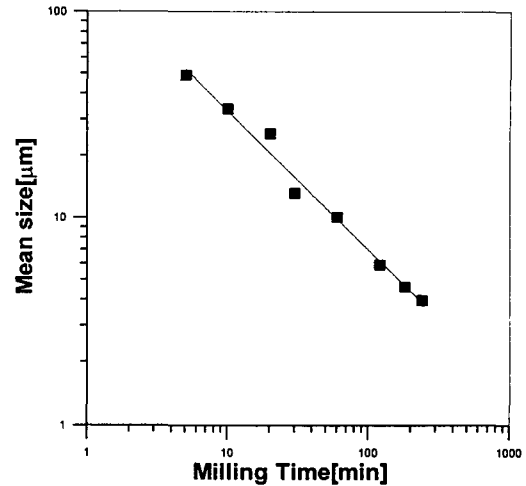


Fig. 4. Median diameter as a function of grinding time. (pulp concentration. : 50vol%)

4. 결론

상동중석광산 광미의 순환자원화 방안을 모색하기 위해 그의 물리적·화학적 특성, 광물학적 조성, 중금속 용출 특성 및 분쇄특성 등을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 광미의 중금속 용출량은 환경기준값 보다 낮게 측정되었다. 따라서 광미 자체를 물질전환법에 의해 재활용하는데는 문제가 없다고 판단된다.
- 2) 광미의 화학적, 광물학적 특성은 심도별 큰 차이가 없고 median경(d_{50})은 평균 10~30 μm 으로 그 자체를 시멘트 부원료, 자기충진 콘크리트의 대체 혼화재 등으로 사용할 수 있으나 고부가가치의 다공성 담체를 제조하기 위해서는 교반밀로 2시간이상 분쇄하여야만 가능함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구사업의 특정기초연구지원(R01-2002-000-00357-0)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 이민용, 2002, 메조포러스한 나노소재의 벌크소재화 기술, 제27회 자원활용·소재 워크샵, 한국지질자원연구원, pp.39~50
- 정명채, 2002, 광산개발에 의한 환경오염 현황, 2002 광해방지 정책 및 기술심포지움, 한국지질자원연구원, p.37-53.
- 정문영, 최연왕, 2002, 상동광산 광미의 특성과 재활용 방안, 제 6회 폐기물처리 및 재활용 워크샵, pp. 112~127
- 진호일, 민경원, 연구석, 정영옥, 2000, 광산폐기물과 폴리머를 이용한 Liner 개발에 관한 연구, 자원환경지질, 33권 2호, pp.139~146
- 채영배, 정수복, 윤평란, 1999, 금광산 폐광미로부터 유가자원회수에 관한 연구, 한국자원리사이클링, Vol. 8, No. 3, pp.37~42
- 최연왕, 정문영, 1998, 중석광 폐광미를 활용한 콘크리트 특성에 관한 연구, 한국자원공학회지, 제35권, pp.90~95