

폐광산 폐석에 의한 환경오염 저감기술 개발 기초 연구

고주인, 지상우, 이현석, 전용원*, 강희태*, 김선준

한양대학교 지구환경시스템공학과, (재)자원산업연구원* (21zzal@hanmail.net)

<요약문>

To evaluate the potential capacity of mine wastes in the production of heavy metal containing acid water, samples from depths of 0, 30 and 60cm were collected and analyzed. The waste from surface showed the lowest pH which indicates the oxidation of wastes and the capacity of contamination of the area around the waste file. And the lower pH values of leachate of the wastes through the leaching tests with pH controlled water(3, 4, 5) may indicate that minerals producing the acidity still exist. Reduction of sulfur contents in wastes after the leaching test well fit to the increased contents of iron oxide.

key word : coal mine, mine wastes, remediation technique

1. 서론

국내에는 900여개의 금속광산과 380여개의 석탄광산 및 1,200여개의 비금속광산을 포함하여 총 2,500여개소의 크고 작은 광산들이 있으며, 이들 중에서 약 80%가 휴광 또는 폐광된 광산으로서 적절한 환경복원시설이 설치되지 않아 주변 생태계가 위협을 받고 있다. 이들 광산에서는 과거의 광산활동으로 인하여 배출된 광산폐기물(폐석, 광미, 광석광물, 광산폐수 등)이 광산 주변에 그대로 방치되어 있어 집중 호우나 강풍에 의해 하부로 분산되어 광산하부의 농경지와 수계의 환경오염을 계속적으로 일으키고 있다(정명채, 2002). 국내 석탄광은 갱내채굴로 노천채굴에 비하여 실제 훼손면적은 적은 편이나, 개발하기 위해 설치한 시설물과 채굴하는 과정에서 부수적으로 나오는 많은 폐석들이 산림 훼손을 일으키는 주요한 원인이 되어왔다. 하지만 현재 폐광지역의 복구공사가 미흡할 뿐만 아니라 복구가 이루어졌다해도 갱내수만을 처리하는 시설만을 설치하여 운영중이며, 폐석을 이용한 사방공사가 되었을 뿐 폐석이나 광미에서 발생하는 침출수의 처리는 전무한 상태이다.

본 연구는 광산폐기물(폐석 및 광미)이 환경에 미치는 영향을 파악하고, 이러한 문제를 효율적이며 경제적으로 처리할 수 있는 방안을 모색하고자 현재 개발 또는 적용중인 광산폐기물의 처리방안에 대하여 살펴보고, 폐탄광 폐석에 대한 지구화학적, 광물학적인 분석을 통하여 폐석에 의한 환경오염 유발 가능성과 오염물질의 발생정도를 예측하여 향후 광산폐기물에 의한 환경오염을 저감하는 기술을 개발하는데 기초 자료를 마련하고자 하였다.

2. 광산폐기물의 처리 방법

폐광산 복원기술로는 크게 오염확산방지기술과 분리 및 정화기술로 나눌 수 있다. 이중 기술의 난이도 및 적용성에 비추어 오염확산방지기술이 현재 가장 많이 이용되고 있으며, 향후 자원 고갈에 따라 광미와 같이 유용성분이 다량 함유된 폐기물이 자원화되었을 때 오염확산방지기술은 이 자원을 이용할 수 있다는 장점이 있다(이기철, 1999).

1) 오염확산 방지기술

오염확산 방지기술 중 현재 주로 사용되고 있는 기술은 고분자인 방수재(HDPE)를 이용한 매립기술과 고화재를 이용한 복토기술 등이 있다. 이 두 가지 기술은 모두 복토와 식재 이용을 포함하고 있다.

복토는 폐석, 폐석적치장, 경석장 녹화공사에서 가장 중요한 요인으로 좋은 흙으로 충분한 양의 객토(묘목식재용 : 30×30(cm))와 복토(약 30cm)를 해야한다(우보명, 2000). 식재(Vegetation)는 식물 뿌리의 호흡과 heterotrophic soil bacteria의 활동으로 폐석 내 CO₂가 증가하게 되어 T. ferrooxidans와 같은 bacteria가 살기 어렵게 되고, 표면에서의 바람에 의한 침식, 물에 의한 침투를 방지한다(Ledin and Pederson, 1996). 이 밖에도 산소를 차단하는 방법으로 dry cover를 사용하거나, 물 속에 광산폐기물을 침수시키는 기술(최정찬, 1996), Active leaching, Inhibition of leaching bacteria, Support of certain microbes 등의 기술(Ledin and Pederson, 1996)이 사용되고 있다.

2) 분리 및 정화 기술

Lime, fly ash, blast furnace slag, portland cement, silicates 같은 물질을 첨가하여 pH를 높여서 중금속의 용해도를 감소시키는 기술로 때로는 유기물인 우분 혹은 가축분뇨를 사용하기도 한다(Ledin and Pederson, 1996). 국내에서는 석회석을 이용한 중화법(정명채, 1999) 및 석회암편을 이용한 폐석 처리 연구(이진국, 1998)가 진행되었다.

3. 실험 방법

연구를 위해 2003년 6월 강원도 정선군 소재 삼척탄좌 정암광업소의 폐석적치장에서 폐석시료를 채취하였다. 시료는 광미적치장 지표부와 심도 30cm, 60cm 지점에서 각각 채취되었다. 채취된 시료는 바람이 잘 통하는 곳에서 상온으로 건조 시켰다. 각 지점에서 채취된 잘 건조된 폐석을 10mesh 이하로 채질하여 시료 10g과 탈이온수 25ml를 1시간(진폭 10cm로 분당 100회)정도 혼탕시키고 10분간 방치한 후 pH를 측정하였다. 또한, 지표부 시료를 이용하여 용출실험 전과 후를 비교하였다. 용출실험에 사용한 반응용액은 analytical grade로 질산을 탈이온수에 적당량 첨가하여 pH를 3.0, 4.0, 5.0으로 준비하였다. 용출실험은 반응용액과 시료의 양이 1:10의 비율로 혼합하였으며, 24시간 동안 실온에서 교반하였다. 용출된 용액의 중금속 함량은 기초과학지원연구원 부산분원의 ICP-AES를 이용하여 분석 하였다. 용출실험 전, 후의 폐석은 100mesh 이하로 분쇄하여 기초과학지원연구원 서울분원의 XRF와 EA(elemental analyzer), 한양대학교 공동기기원의 XRD로 분석하였다. 또한 연마편으로 제작하여 반사현미경과, SEM/EDS로 폐석의 조직변화를 관찰하였다.

4. 실험 결과

1) 심도별 폐석의 pH 변화

광미적치장에서 심도별로 채취한 폐석을 이용하여 pH를 측정된 결과, 광미적치장의 지표부에서 채취한 폐석의 pH가 가장 낮게 조사되었다. 또한 심도 60cm에서 채취한 폐석에서 가장 높은 pH가 측정되었다. Table 1에서 보여지듯이 지표에 방치된 폐석이 물과 산소에 노출된 산화환경에서 산화작용을 일으켜 주변 토양 및 수질을 오염시키고 있다는 것을 알 수 있다. 하부로 내려가면서 pH가 높아지고는 있으나 강우나 바람에 의해 산화된 표면이 유실되면 또다시 하부의 폐석이 지표부로 노출되면서 산화가 진행될 우려가 있다.

Table 1. 광미적치장내 폐석의 심도별 pH

	Surface(0cm)	Under 30cm(-30cm)	Under 60cm(-60cm)
pH	3.22	6.61	6.82

2) 용출실험 결과

광미적치장에 그대로 방치된 폐석이 환경에 미치는 영향을 조사하기 위하여 용출실험을 실시하였다. 지표에서 산화가 진행된 폐석과 인공 산성비(pH 3.0, 4.0, 5.0)의 용액을 이용하여 용출실험한 결과, 반응용액의 pH가 떨어지는 것을 볼 수 있었다(Table 2). 이는 반응용액에 산도를 증가시킬 수 있는 폐석 내의 광물의 존재를 의미한다(이평구 외, 2003). 폐석내에 존재하던 오염물질이 어느 정도 용출되어 나오는지를 분석하기 위하여 용출실험에 사용된 용액에 대해 ICP-AES를 이용하여 금속이온인 Fe, Al, Mn 및 Cu, Zn, Cd, Pb, As과 같은 독성 중금속 성분의 함량을 분석 중에 있다.

Table 2. 폐석 용출실험에 따른 pH의 변화

	pH 3.0 + 폐석(24h)		pH 4.0 + 폐석(24h)		pH 5.0 + 폐석(24h)	
	용출전	용출후	용출전	용출후	용출전	용출후
pH	3.0	2.98	4.0	3.52	5.0	3.58

3) XRF 및 EA 분석 결과

용출실험 전 폐석과 용출실험 후 폐석의 성분 및 조성의 변화를 조사하기 위하여 EA와 XRF 분석을 실시하였다. EA 분석결과 용출실험 전에 폐석내 황(S) 성분이 0.46%였다가 용출 후에 0.23~0.27%로 낮아졌다(Table 3). 이는 산성비와 반응하였을 때 폐석내 황성분이 다량 용출될 수 있음을 나타내준다. 다른 성분의 조성변화가 거의 없었던 점으로 볼 때 용출에 의해 pH가 낮아졌던 것은 황성분의 용출에 의한 것임을 알 수 있으며, XRF분석 결과에서 Fe₂O₃의 함량이 3.173% 높았던 바 폐석내에 황철석 또는 백철석이 존재하여 산도를 발생시키는 것으로 생각된다(Table 4).

Table 3. 반응용액의 pH의 변화에 따른 폐석내 EA 분석결과(단위: %)

	폐석	pH 3.0 + 폐석(24h)	pH 4.0 + 폐석(24h)	pH 5.0 + 폐석(24h)
	용출전	용출후	용출후	용출후
N	0.32±0.01	0.35±0.00	0.36±0.01	0.38±0.00
C	10.47±0.01	10.73±0.02	10.82±0.02	10.68±0.01
H	0.73±0.01	0.68±0.01	0.69±0.00	0.66±0.01
S	0.46±0.01	0.23±0.02	0.24±0.01	0.27±0.04
O	3.79±0.08	3.36±0.02	3.34±0.02	3.03±0.03

Table 4. 폐석 XRF 분석결과(단위: %)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	L.O.I
폐석	45.734	25.426	3.173	-	0.142	0.487	5.768	0.151	0.131	0.939	7.301

4) 반사현미경 및 SEM/EDS, XRD 분석 결과

용출실험 전 폐석과 용출실험 후 폐석의 광물 및 조직의 변화를 조사하기 위하여 반사현미경 및 SEM/EDS, XRD 분석을 실시하였다. 반사현미경과 SEM/EDS 분석에서는 용출전 시료와 용추후 시료 모두에서 비슷한 광물과 조직을 보여주었으며 별다른 차이를 발견할 수 없었다.

XRD 분석결과에서는 다소 차이를 보이고 있었다. 용출실험을 거친 폐석 시료에서는 2차 산화광물과, 철 황산염 광물이 더 높게 나타나고 있었다. 하지만, 반응용액의 pH에 따른 차이는 발견할 수 없었다. 모든 시료에서 나타나는 광물로는 석영, 흑운모, 백운모 순으로 우세하게 나타났고, Armalcolite (FeMgTi₄O₁₀), Gibbsite(Al(OH)₃), Melanterite(FeSO₄ (H₂O)₇), Anglesite(PbSO₄)와 같은 2차 산화광물이 존재하였다. 또한, 소량의 Pyrite(FeS₂), Marcasite(FeS₂), Pyrrhotite(FeS)와 같은 철 황산염광물이 존재하였다.

5. 결론

별다른 처리 없이 방치되어 있는 광산 주변의 광미장 및 폐석장은 광산폐수와 함께 점 오염원으로 부각되고 있다. 용출실험에서 볼 수 있듯이 폐석적치장의 폐석들은 강우와 반응하여 다량의 산도를 발생시킬 수 있으며, 강우에 의해 새로운 표면이 노출되면서 지속인 오염원으로 작용할 수 있다. 폐석에 의한 오염물질 발생 가능성과 발생량의 예측은 향후 오염방지 대책을 세우는데 중요한 기초자료로 이용될 수 있을 것이다.

6. 참고문헌

- 1) 정명채, 2002, 토양계에서 중금속의 이동과 확산, 지질 환경재해 및 복원기술 공동학술 심포지엄, pp.73-82
- 2) 우보명, 2000, 廢炭鑛地의 山林毀損地復舊 및 廢石流失防止對策에 관한 研究, 농업생명과학연구 제 4권, pp.226-231
- 3) 이기철 외, 1999, 금정광산 주변 토양의 중금속 오염현황 및 그 처리 방안, 한국토양환경학회지, Vol. 4, No.1 pp.25-34
- 4) Ledin, M. and Pedersen, K. 1996, The environmental impact of mine wastes - Roles of microorganisms and their significance in treatment of mine wastes, Earth-Science Reviews 41, pp.67-108
- 5) 최정찬, 1996, 폐탄광 일대의 지질 환경오염과 광해복구, 대한 자원환경지질학회 추계학술여행 학술강연, pp.26-47
- 6) 정명채, 1999, 휴/폐광 금은광산 주변의 토양오염조사와 복구시스템 연구, Econ. Environ. Geol. Vol. 32, No. 1, pp.73-82
- 7) 이진국 외, 1998, 광산폐석의 효과적 처리를 위한 지화학적 연구, 한국토양환경학회지, Vol. 3, pp.31-44

- 8) 이평구 외, 2003, pH 변화에 따른 광미와 오염된 토양에 함유된 중금속 용출특성, 한국지하수토양 환경학회, 춘계학술대회, pp.141-144

7. 사 사

이 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호:3-5-1)에 의해 수행되었다.