

폐각류를 이용한 산성광산배수의 중화 및 금속이온 제거

김주용¹⁾ · 전효택²⁾

1. 서론

휴·폐광된 광산, 특히 지하 석탄광 채굴적과 폐석 더미로부터 나오는 산성광산배수(Acid Mine Drainage, AMD)에 의한 수질오염 문제는 1990년대 중반 이후 상당히 심각하게 대두되기 시작하였다. 산성광산배수는 대기중에 노출된 황화광물이 산소 및 물과 반응하여 산화되면서 형성되며, 낮은 pH, SO_4^{2-} 를 비롯한 Fe, Al, Mn 등 금속함량이 높은 것이 특징이다(Sengupta, 1993). 최근의 조사 결과에 따르면 국내의 경우 152개의 탄광에서 하루에 4만 8천여 톤의 광산배수가 배출되고 있다(배봉구, 1996). 따라서 폐탄광에서 유출되는 갱내 산성배수로 인한 오염을 사전에 방지하기 위해 효율적이고 종합적인 대처방안의 수립이 시급히 요청되고 있다. 국내 대부분의 폐탄광들은 오지에 존재하여 동력이나 관리자가 없는 실정이며, 폐탄광의 환경관리부담 및 재원조달의 어려움으로 광산배수 처리 대책을 수립하고 시행하는 행정기관에서는 경제적이면서 효율적이고 반영구적인 자연정화식 처리방식에 관심을 가지면서 일부 탄광에 이를 도입해 왔다. 자연정화식 처리방식에서는 pH를 높이기 위한 ALD나 SAPS의 기질물질로 값이 싸며 구하기가 쉬운 석회석을 주로 사용하고 있다. 하지만 석회석은 침전물에 의해 표면이 코팅되면 중화능력이 급격히 떨어진다는 단점을 가지고 있으며, 이의 보완을 위해 최근에는 석회석을 대체할 수 있는 지질물질의 활용 가능성에 대한 연구들이 이루어지고 있다.

본 연구에서는 굴껍질 등과 같은 폐각류가 주로 석회질로 구성되어 있으며 이들의 대부분은 폐기된다는 사실을 감안하여 국내의 자연정화식 처리시스템에 주로 사용되는 중화제인 석회석을 대체할 수 있는 물질로 폐각류의 사용가능성과 현장에의 적용가능성을 평가하고자 하였다.

2. 산성광산배수의 처리를 위한 중화제의 선정

본 연구를 위해 강원도 강릉시 강동면 임곡리에 위치한 영동탄광에서 발생하는 갱내수와 폐석침출수를 1997년 8월과 1998년 3월에 채취하였다. 영동탄광에서 발생하는 산성광산배수는 4 이하의 낮은 pH, 수 천 mg/l의 높은 SO_4 함량, 100 mg/l 이상의 Fe 함량 등이 특징적이며, Ni, Cu 및 Zn 등과 같은 중금속 함량도 높은 것으로 보고된 바 있다(전효택 등, 1998). 본 연구에 사용된 폐각류는 굴껍질과 바지락껍질이며 비교를 위해 석회석과 선별하소돌로마이트를 사용하였다.

주요어 : 산성광산배수, 폐각류, 중화, 중금속

- 1) 광주과학기술원 환경공학과
- 2) 서울대학교 지구환경시스템공학부

3. 중화제의 성능 평가

실험 1 : 중화제를 분쇄했을 때의 정화능력

현장에의 적용 가능성을 배제한 채 반응성을 최대한 높이기 위해 -10 ~ +200 mesh의 입도로 분쇄한 네 가지의 중화제 200 g과 원수(영동탄광 갱내수) 800 ml를 1 l의 비이커에 넣고 1분간 유리막대로 교란시킨 후 18시간동안 반응시켰으며, 반응시간에 따라 pH, conductivity의 변화와 주 제거 대상 원소인 Fe, Al, Mn, Cu, Zn, Ni 및 Co 함량의 변화를 측정하였다. 또한 반응이 완료된 후의 acidity와 alkalinity를 측정하였다.

시간별 pH의 변화를 살펴 보면 네 중화제 모두 시간이 지남에 따라 꾸준히 증가하여 18시간이 지난 후에는 굴껍질, 바지락껍질 및 석회석이 6.9의 pH를, 선별하소돌로마이트가 7.8의 pH를 나타내 강산성의 원수(pH 2.4)가 중성의 영역까지 중화되었다. 주된 제거대상 원소인 Fe, Al 및 Mn의 함량 변화를 살펴 보면 Fe와 Al의 경우 원수에서 각각 247.6과 108.0 mg/l의 함량을 보이던 것이 반응이 시작된 이후 2시간 이내 모든 중화제에서 0.1 mg/l 이하로 거의 100% 제거되는 것으로 나타났다. 독성 중금속 원소 역시 시간이 지남에 따라 함량이 감소하였으며, 알칼리도 없이 1,870 CaCO₃ mg/l의 산도만 존재하던 원수가 18시간 동안의 반응 후 모든 중화제에서 산도가 없어지고 알칼리도가 크게 증가한 것으로 나타났다.

실험 2 : 중화제를 분쇄하지 않았을 때의 정화능력

폐각류가 자연정화식 처리시스템의 중화제로 사용될 경우를 고려해 분쇄시키지 않은 원형 그대로의 네 가지 중화제를 직경 10 cm, 높이 30 cm인 원통형의 아크릴 반응조에 3 l 이상의 부피로 채운 후 실험 1에서 사용한 것과 동일한 원수(영동탄광 갱내수)로 공극을 3 l의 부피까지 채워 18시간동안 반응시켰다. 반응시간에 따라 pH, conductivity, DO의 변화와 Fe, Al, Mn, Ca, Mg, Na, K, Si, Cu, Zn, Ni 및 Co 함량의 변화를 측정하였다. 또한 반응이 완료된 후의 acidity와 alkalinity, 그리고 음이온의 함량을 측정하였다.

시간별 pH의 변화를 살펴 보면 원수에서 2.4의 값을 보이던 것이 4시간까지는 비교적 빠르게 증가하다가 이후 완만하게 증가하여 18시간이 경과한 후에는 석회석에서 6.1, 굴껍질에서 6.3, 바지락껍질에서 6.8, 그리고 선별하소돌로마이트에서 8.7의 순으로 높아졌다. 반응 종료 후의 산도와 알칼리도의 값을 살펴 보면 원수에서 1,870 CaCO₃ mg/l의 값을 보이던 산도가 18시간 후에는 네 중화제에서 모두 없어졌으며, 원수에서는 존재하지 않았던 알칼리도는 18시간 후 굴껍질에서 432, 바지락껍질에서 640, 석회석에서 468, 선별하소돌로마이트에서 375 CaCO₃ mg/l로 높은 값을 보였다. Fe와 Al은 굴껍질, 바지락껍질 및 선별하소돌로마이트의 경우 반응 시작 후 1시간 이내에 1 mg/l 이하로 99% 이상 제거되며, 석회석의 경우 3시간 경과 후에야 1 mg/l 이하로 함량이 감소해 다른 중화제에 비해 제거 속도가 느린 것으로 나타났다. 이는 pH와 Ca 함량의 증가 폭이 폐각류에 비해 작음을 고려할 때 석회석의 용해속도가 폐각류에 비해 느린 때문으로 판단된다. 중금속 원소인 Cu, Zn, Ni 및 Co 역시 원수에 비해 반응이 완료된 후에서의 함량이 낮아 반응이 진행되면서 제거되는 것으로 나타났으며, 선별하소돌로마이트에 의해 가장 많이 제거되고 전반적으로 석회석의 제거 효율이 가장 낮다.

실험 3 : 현장 적용을 고려한 모형조 실험

이 실험에서는 아크릴 모형조를 제작해 원수를 일정 유량 지속적으로 흘려 보내면서 중화제와 반응시킬 때의 결과를 관찰하고자 하였다. 폭 15 cm, 높이 15 cm, 길이 100 cm의 아

크릴 모형조 2개를 제작해 이 중 전체 길이의 70 cm를 중화조로, 그리고 20 cm를 침전조로 구성하였으며, 원수가 유입되어 중화조로 들어가기 전의 10 cm 구간은 원수 내의 침전물을 퇴적시키기 위한 침전조로 활용하였다. 이때 침전조 1과 중화조, 그리고 중화조와 침전조 2 사이의 칸막이는 하부개방 구조로 하였다. 중화제로는 굴껍질과 바지락껍질을 사용하였으며, 원수의 유량은 시간당 0.5 l로 하였다. 실험에 사용한 원수는 1997년 8월과 1998년 3월에 채수한 영동탄광의 갱내수와 폐석침출수를 혼합한 것이며, 침전조 2를 거쳐 배출수가 나오기 시작한 직후부터 2시간씩 1 l를 40시간동안 시간별로 채수하여 수질변화를 측정하였다. 측정항목은 실험 2와 동일하다.

시간에 따른 pH의 변화를 살펴 보면 강산성의 원수(pH 2.6)에 비해 첫 배출수에서 두 폐각류 모두 7.0내외의 중성으로 중화되었으며 이후 40시간까지 일정한 값을 보인다. 원수에서 291.4 mg/l의 값을 보였던 Fe는 모든 배출수에서 99% 이상 제거되고 있으며, 원수에서 108.9 mg/l였던 Al은 굴껍질을 거친 배출수의 일부에서 15.1과 21.2 mg/l로 다소 높은 값을 보이나 이를 제외하면 95% 이상 제거되며 특히 바지락껍질을 거친 배출수에서는 99% 이상 제거되고 있다. 원수에서 1,400 CaCO₃ mg/l의 값을 보였던 산도는 모든 배출수에서 0의 값을 보이며, 원수에 존재하지 않던 알칼리도의 경우 굴껍질을 거친 배출수에서는 142~202 CaCO₃ mg/l의 범위에서 시간 경과에 따라 감소하며, 바지락껍질을 거친 배출수에서는 310~380 CaCO₃ mg/l로 시간 경과에 따라 증가하였다.

4. 결 론

굴껍질과 바지락껍질을 산성광산배수와 정제된 상태에서 반응시킨 실험 1과 2에서 반응 후 6시간 내에 pH가 6.0 이상으로 복구되며, Fe와 Al의 함량이 99% 이상 제거되었으며, 특히 실험 2에서 중화조를 중화제로 충전하였을 때 폐각류의 경우 공극률이 높으면서도 정화능력은 석회석에 비해 떨어지지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 폐각류가 산성광산배수의 자연정화식처리시스템에 가장 많이 사용되는 중화제인 석회석을 대신할 수 있는 물질로 평가되어졌다. 현장적용을 고려한 실험 3에서도 배출수의 수질이 산도는 없어지고 142~380 CaCO₃ mg/l 범위의 알칼리도를 보이며, pH는 7.0 내외로 복구되었다. 또한 Fe, Al 및 중금속 함량이 크게 감소하였으며, 중화조간의 하부개방 구조의 칸막이가 정화능력 향상에 크게 기여하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 배봉구, 1996, "석탄합리화사업단의 광해복구 및 환경개선 사업활동", 대한자원환경지질학회 추계학술대회 논문집 : 폐탄광 일대의 지질환경오염과 광해복구, 대한자원환경지질학회, pp.2-15.
2. 전효택, 김주용, 최시영, 1998, "폐석탄광 주변 지구화학적 환경의 중금속 오염 평가 : 강릉탄전 임곡천 일대를 중심으로", 자원환경지질, Vol.31, pp.499-508.
3. Sengupta, M., 1993, "Environmental impacts of mining: Monitoring, Restoration, and Control", Lewis publishers, p.494.