

광물찌꺼기에 함유된 오염물질의 안정화를 위한 표면 차폐재의 성능 평가

김영규¹ · 정명채^{1*} · 김종열² · 김유성² · 이진수³ · 박관인³

¹세종대학교 공과대학 에너지자원공학과, ²(주)소암컨설턴트, ³한국광해관리공단 광해기술연구소

Evaluation of Surface Water-preventing Materials on Stabilization of Contaminants in Tailings

Young Kyu Kim¹ · Myung Chae Jung^{1*} · Jung Yul Kim² · Yoo Sung Kim²
Jin-Soo Lee³ · Kwan In Park³

¹Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University

²Soam Consultant

³Institute of Mine Reclamation Technology, Mine Reclamation Corporation

ABSTRACT

This study examined evaluation on stabilization of major and trace elements in tailings by various surface water-preventing materials. Six columns were filled with tailings of the Sinlim mine, then covered with tailings only, compacted soils, clay, soil-bentonite mixture, pozzolan and bentonite mat. After injection of artificial rain water, the leachate was sampled with times (3, 6, 9 and 12 pore volume) and analysed for major (Ca, Na, Mg, K) and trace elements (As, Cd, Cu, Pb, Zn) by ICP-AES. With exception to pozzolan type, the pH values of leachate from the other types became stabilized from 5.5 to 7.5, and EC (electric conductivity) of leachate from them decreased with times. For the pozzolan type, however, the pH and EC of leachate increased with time due to its alkalinity producing system. Concentrations of most major and trace elements in leachate decreased and stabilized with time. Consequently, soil-bentonite mixed cover shows the best ability of water-preventing and reducing mobility of elements in tailings site.

Key words : Column test, Heavy metals, Surface water-preventing materials, Stabilization, Tailings

1. 서 론

휴 · 폐광산에 적치된 광물찌꺼기나 폐석 등과 같은 광산폐기물에는 다양한 종류의 유해성 물질을 함유하고 있으며, 이들은 산성배수 및 중금속이 함유된 침출수 발생, 유실에 의한 주변 토양과 수계오염, 비산에 의한 대기오염 등 다양한 형태의 광해를 일으킨다(Jung and Thornton, 1996; 정명채 외, 2004). 그동안 환경부와 지식경제부(한국광해관리공단)에서 폐금속광산 개황조사 및 정밀조사를 수행한 결과를 정리한 자료(정명채 · 정문영, 2006)에 의하면, 전체 광산의 과반수에 가까운 지역에서 비소와 중금속이 환경기준을 초과하였으며, 이들 중에서 일부는 복

구사업이 시급한 것으로 조사된 바 있다. 이에 한국광해관리공단에서는 오염이 심각한 광산에 대해 연차적으로 광해방지사업을 추진하고 있으며, 다양한 광해방지공법이 적용되고 있지만 광산폐기물의 처리방법으로는 주로 차폐재를 활용한 격리 · 저장, 고형화 · 안정화, 토양세척, 식물정화, 동전기정화, 반응벽체를 이용한 오염물질의 제거 등이 있다(지한구, 2005; Kim et al., 2005; 현재혁 · 김민길, 2007; 이진수 외, 2008; Kim and Jung, 2011). 이들 기술 중에서도 광산폐기물을 주변 토양, 지하수, 지표수 및 산성비 등으로부터 차단 · 격리시키는 차단 매립방식은 다른 공법에 비해 경제적이면서도 시공이 용이하여 가장 많이 시행되고 있다. 하지만 이 기술은 광물찌꺼기

*Corresponding author : jmc65@sejong.ac.kr

원고접수일 : 2011. 7. 29 심사일 : 2011. 8. 12 게재승인일 : 2011. 8. 15

질의 및 토의 : 2011. 10. 31 까지

적치장의 차단 또는 매립을 통하여 오염물질을 격리할 수는 있지만 오염물질의 근원적인 처리 방법으로는 그 효율이 낮은 편이다(정명채, 2002; 정명채·정문영, 2006). 최근에는 이러한 단점을 보완하고 경제성과 효율성을 갖는 다양한 처리기술의 경제성 분석을 통해 최적의 처리시스템에 대한 연구가 수행된 바 있으며(이동길 외, 2008), 새로운 기술 개발을 위해 다각적인 연구가 진행되고 있다. 그 중에서도 오염물질의 이동도 저감을 위한 안정화 물질을 활용한 안정화공법과 시멘트 또는 포졸란 등을 이용하여 광물찌꺼기를 고화시켜 오염물질의 확산을 최소화하는 고형화공법이 개발되고 있다(Jang and Kim, 2000; 지한구, 2005; Choi et al., 2009; Kim and Jung, 2011).

국내뿐만 아니라 외국에서도 고형화·안정화 기술의 적용이 매우 활발하게 연구되고 있다(Dutre and Vandecasteele 1998; Bothe and Brown, 1999; Bose and Sharma 2002; Jakubick et al. 2003; Singh and Pant, 2006). 특히 Singh and Pant(2006)는 포틀랜드시멘트, 비산재, 폴리머 등이 비소와 일부 중금속의 고형화에 매우 우수하다는 결과를 얻은 바 있다. 하지만 대부분의 연구는 실험실 규모로 광물찌꺼기 또는 오염토양의 고형화와 안정화 적용성을 검토한 결과이며, 이를 현장에 직접 활용하기에는 경제성, 효율성 및 시공성 등 다양한 변수가 있어 다소 어려움이 있다.

특히 현장의 광물찌꺼기를 포함한 광산폐기물의 특성에 따라 그 적용 방법도 다양하게 접근해야 하며 주로 비소와 중금속을 포함한 미량원소의 처리에 초점을 두고 있으므로 안정화에 의한 Ca, Na, Mg, K 등을 포함한 주성분원소의 특성에 대한 연구는 다소 부족한 편이다. 더불어 현재 국내에서 광물찌꺼기 적치장의 복원을 위해 적용된 차폐공법은 환경부에서 적용하고 있는 유해폐기물에 대한 차단공법을 그대로 준용하고 있으며, 광산오염 실태 및 그에 대한 관리지침에 대한 연구를 진행한 바 있으나 광물찌꺼기차폐공법에 대한 기존 폐기물 표준 차폐공법 및 적용 사례만 열거하였을 뿐 다양한 차폐공법에 대한 실험적 연구를 진행하여 광물찌꺼기 적치장에 적합한 차폐공법을 제시하지 못하고 있는 실정이다.

따라서 이 연구에서는 광물찌꺼기 적치장의 효율적인 차폐방안을 모색하기 위하여 폐기물매립장에서 차수재로 많이 쓰이는 점토, 토양-벤토나이트혼합토, 포졸란(소석회 + 광물찌꺼기), 벤토나이트매트 등의 차폐재를 선정하여 차폐의 효율을 검토하고 인공강우(증류수)에 의한 차폐층 하부로 유출된 침출수의 주성분 및 미량원소의 농도변화를 상호 비교함으로써 물리적 및 화학적인 차폐재의 성능

을 종합적으로 비교하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 광산현황

이 연구에서는 강원도 원주시 신림면 신림리에 소재하는 신림광산의 광물찌꺼기를 대상으로 차폐재를 활용한 안정화 실험을 수행하였다. 제43345호(신림지적 제96호)로 등록된 신림광산은 금과 은을 대상으로 개발되었으며, 지리좌표로 동경 128°05'35", 북위 37°14'42"에 위치한다. 과거 개발 이후 휴광상태였다가 1987년부터 재개발되어 상갱부터 하3갱까지 개설하여 1일 30톤 규모의 부유선광장을 기동한 바 있지만 2004년에 광업권이 소멸되었다. 광산 부근의 지질은 선캄브리아기의 흑운모편마암류, 복운모화강편마암 및 고생대 석회암 등으로 구성되어 있으며, 편마암류의 주구성 광물로는 석영, 정장석, 사장석, 흑운모, 백운모 등이며 흑운모와 백운모는 거의 유사한 양으로 분포하고 있다. 그리고 소규모로 분포하는 석회암은 결정질 및 석회규산염암의 암상을 보인다(대한광업진흥공사, 1987; 김세현 외, 1996).

2.2. 실험방법

광물찌꺼기 적치장의 차폐성능 비교를 위해 광물찌꺼기형(tailings type), 다짐토형(compact soil type), 점토형(clay type), 포졸란형(pozzolan type), 토양-벤토나이트혼합토형(soil-bentonite mixture type), 벤토나이트매트형(bentonite mat type) 등 6개를 선정하였다. 우선, 이들 물질의 투수성을 확인하기 위하여 변수위 측정법을 이용한 투수계수를 측정하였다. 또한, 현장 적용을 목적으로 고안된 이들 6가지의 공법을 실험실에서 모사하기 위하여 칼럼실험을 수행하였으며, 각각의 규격은 Fig. 1에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 $\Phi 8 \text{ cm} \times 24 \text{ cm}$ 의 원형 아크릴 칼럼에 광물찌꺼기를 채운 후, 그 위에 다양한 차폐재를 채우고 다짐봉을 이용하여 부피 대비 20%를 다졌으며 각 칼럼장치에 pH 5.5~6.0의 인공강우(증류수)를 주입하였다. 일반적으로 인공강우의 주입은 완전히 물로 채우는 연속식과 단계별로 강우를 투입하는 방법이 있다. 이 연구에서는 여름의 우수기를 모사하기 위하여 인공강우(증류수)를 연속 주입하여 침출수를 채수하였으며, 이후 갈수기를 고려하여 인공강우를 주입한 이후 3일간 방치시켜 침출수를 채수한 이후 인공강우를 재주입하였다. 차폐형태에 따라 오염 물질의 용출 및 확산을 알아보기 위해 채수된 침출수는 3, 6, 9 및 12 pore volume별로 침출된

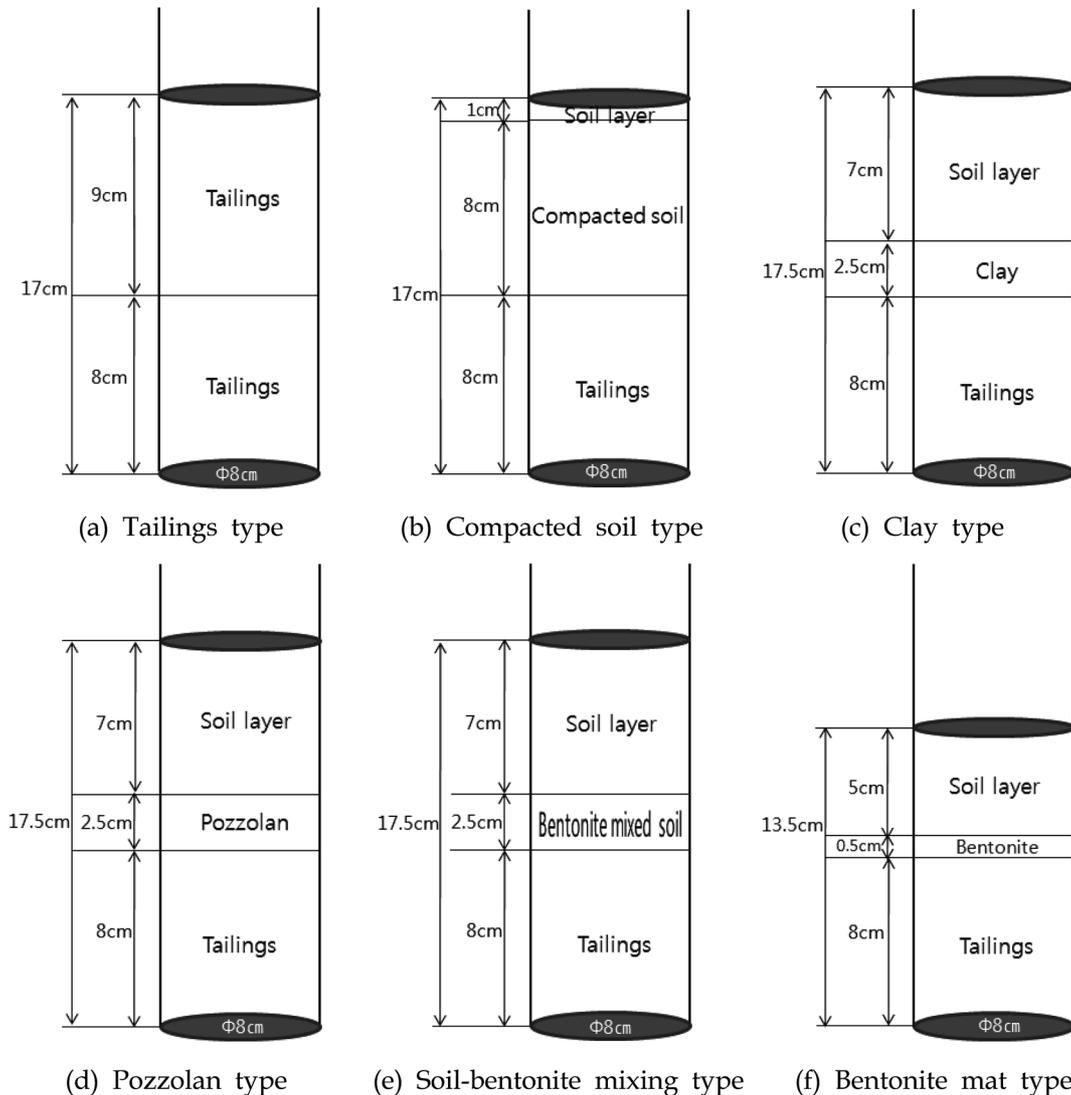


Fig. 1. Schematic diagrams for six columns tested in this study.

용액의 pH(Thermo Orion 250)와 전기전도도(EC, Thermo Orion 115A+)를 채수 즉시 측정하였다. 침출수의 화학분석을 위해 60 mL를 채취하여 농질산을 첨가한 후 분석 전까지 4°C로 냉장보관 하였으며, 이후 유도분극플라즈마 원자흡광분광도계(ICP-AES)를 이용하여 주성분원소(Ca, Mg, Na, K)와 미량원소(Cd, Cu, Pb, Zn, As)를 분석하였다.

2.3. 차폐재의 특징

광물찌꺼기는 상당히 오랜 기간 동안 지질학적으로 형성된 광물로부터 경제적 가치를 지닌 물질을 회수하는 선광과정에서 발생된다. 그러므로 선광과정에서 제거되지 못한 다양한 유독성 물질이 그대로 잔존되어 있어 광산 주

변의 주요한 오염원으로 작용하고 있다. 물론 모든 광물찌꺼기에서 다량의 오염물질이 검출되는 것은 아니지만 국내의 많은 광물찌꺼기에서 비소와 유독성 중금속이 검출된 바 있다(장암 외, 1999; 정명채 · 정문영, 2006). 이 연구에서는 신림광산의 광물찌꺼기를 대상으로 실험을 수행하였으며, 광물찌꺼기를 왕수로 추출한 전함량분석 결과를 Table 1에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 토양환경보전법의 2지역(임야, 대지, 잡종지 등)에 대한 토양환경기준을 적용하면, 구리는 우리기준인 500 mg/kg을 초과하고 있으며, 비소, 카드뮴, 납, 아연 등은 대책기준을 초과하였다. 이는 광물찌꺼기의 오염도가 매우 높은 것을 시사해준다. 이와 더불어 pH값도 3.3으로서 유해성 중금속의 용해도가 높을 개연성이 있어 적절한 처리가 요구된다.

Table 1. The paste pH and chemical compositions of tailings from the Sinlim mine

Mine	Paste pH	Chemical composition (mg/kg)				
		As	Cd	Cu	Pb	Zn
Sinlim	3.3	1,340	750	788	2,750	2,570

Table 2. General properties of bentonite used in this study

Sample ID	Unit	LF-12
Form	-	Ca-Activated
Moisture	%	8.8
Cation exchange capacity	meq/100 g	70
Free swell	ml/2 g	12
pH value		9.5~10.5
Bulk density		about 0.8 (Real density \approx 2.3)
Granularity		200 mesh 80% under size (75 μ m)

이 실험에서 사용된 차폐재 중에서 다집토는 연구대상 지역인 강원도 원주시 신림면 주변에서 쉽게 채취할 수 있는 사질토를 이용하였다. 이 연구의 목적이 현장 적용성 평가를 위하여 실험실 규모로 축소한 결과의 도출에 있으므로 향후 현장성을 고려하여 가능한 현장에서 확보할 수 있는 재료를 활용하고자 하였다.

일반적으로 점토는 지름 0.002 mm 이하의 입자 크기를 갖는 입자상 물질로서, 차폐재로 많이 활용되고 있다. 물론 현장에서는 양질의 점토가 분포하는 경우에는 이를 이용하면 고유의 흡착성과 높은 양이온교환능력(cation exchange capacity, CEC)에 의해 침출수 내 오염물질을 자체적으로 정화할 수 있지만, 통상적인 매립지에 적용되는 차폐재의 표준 투수계수인 1×10^{-7} cm/s 이하의 성능을 갖는 것을 확보하기는 어렵고 연약지반에서는 차폐재로 활용하기 위한 작업성이 떨어지는 단점이 있다(현재혁 · 김민길, 2007). 이 실험에 사용한 점토는 광산 인근에서 확보한 것이며, 체걸음을 통해 미립의 점토성 토양만을 사용하였다.

벤토나이트는 대부분 스멕타이트군 점토광물로 구성된 일종의 변질광물로서 높은 양이온교환능력과 흡착능력, 수화-팽윤특성 및 낮은 투수성 때문에 매립장의 차수재, 방사성폐기물처분장의 인공방벽재료, 지하연속벽/지하차수벽 시공, 시추 이수, 그라우팅의 주입재료 등 다양한 분야에서 활용되고 있다(전용원 외, 1997). 이번 실험에서는 광산주변에서 채취한 복토재에 질량비로 20% 벤토나이트를 혼합한 토양-벤토나이트혼합형과 100% 벤토나이트를 활용한 벤토나이트매트형 등 2종류의 칼럼실험에 활용되었으며, 사용된 벤토나이트의 물리화학적 특성을 Table 2에 요약하였다. 즉, 벤토나이트의 팽윤도에 따라 가격의 편차

가 크지만 실험실 모사 결과 저팽윤도를 갖는 저가의 벤토나이트로도 충분히 차폐능력이 확인되어 이를 사용하였다.

포졸란반응에 이용되는 소석회(Ca(OH)₂)는 고형화안정화 첨가제로서 많이 사용하고 있으며, 산성광산배수(AMD)의 중화처리재로도 많이 이용되었다(이민희 외, 2005). 또한 우리나라에서 손쉽게 구할 수 있기 때문에 안정화뿐만 아니라 모르타르, 회반죽벽, 포틀랜드 시멘트 등의 건축용과 표백제, 침전제 등의 공업용으로도 많이 이용되고 있다. 이 연구에 활용된 포졸란공법은 광물찌꺼기에 함유된 실리카와 알루미늄 성분이 소석회와 반응하여 포졸란 반응을 일으켜 고형화가 발현되도록 하는 것으로서 포졸란만으로는 수경성을 갖지 않지만, 물에 용해되어 있는 소석회와 상온에서 서서히 반응하여 물에 녹지 않는 불용성 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H gel)이나 칼슘알루미늄에이트 수화물(C-A-H gel)을 형성하여 그 조직을 더욱 치밀하게 만들기 때문에 효과적인 고형화제로 이용되고 있다(이진수 외, 2008). 이번 연구에서는 이진수 외(2008)이 제안한 방법을 기초로 광물찌꺼기에 소석회를 중량대비 11% 혼합한 후, 함수비를 20%로 하여 28일 양생하여 차폐와 안정화 능력을 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 차폐재별 투수시험 결과

인공강우(증류수)를 주입하여 실내모형실험을 실시한 결과, 시간이 지남에 따라 투수계수는 낮아지는 경향을 보였다(Fig. 2). 즉, 초기의 안정화 기간에는 차폐재에 따라 $2 \sim 8 \times 10^{-4}$ cm/s 수준에서 시작하여 인공강우를 지속적으로 주입하면서 점차 안정화되면서 대부분의 차폐층에서

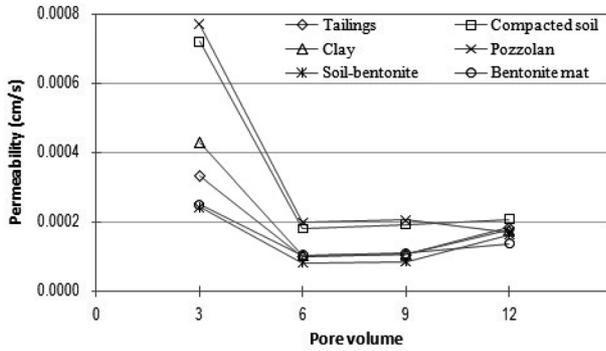


Fig. 2. Variation of permeability of various water-preventing materials.

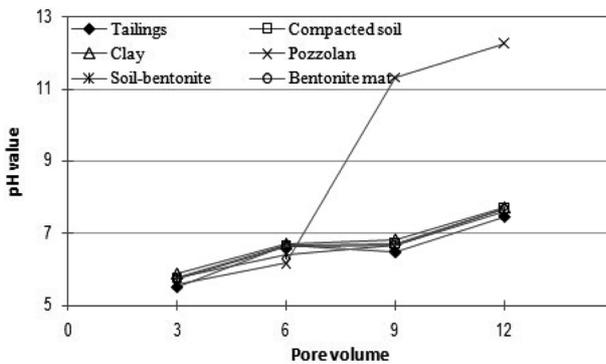


Fig. 3. Variation of pH values in effluents from the Sinlim mine tailings treated by various water-preventing materials.

$1 \sim 2 \times 10^{-4}$ cm/s 수준으로 낮아졌다. 물론 칼럼실험을 수행하면서 다짐에 따라 투수계수는 가변적인 요소가 되겠지만 부피대비 20% 수준으로 다짐을 한다면 비교적 낮은 투수계수를 획득할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2. 침출수의 pH 변화

일반적으로 As, Se, Mo 등과 같이 산화염으로 존재하는 경우를 제외하고는 대부분의 중금속의 용해도 또는 이동도는 산성 산화환경에서 높고 알칼리성 환원환경에서는 이동도가 제한된다(Bowen, 1979; Alloway, 1995, 전효택 외, 1997). 인공강우를 주입한 후 각 차폐처리시스템에서 침출수의 pH를 측정된 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 초기의 3 pore volume에서는 대부분의 처리시스템에서 5.5 전후의 pH값을 보이다가 주입량이 증가함에 따라 안정화가 이루어지면서 pH값이 7.5 전후에서 일정하게 유지되었다. 다만, 시멘트화 반응과 유사한 포졸란 반응에서는 수산화칼슘의 용출이 발생하는 기작에 의해 다량의 알칼리성 물질에 의한 pH의 급격한 상승을 확인하였다. 최종적으로 12 pore volume에서는 pH값이 약 12로서 매우 높은 수준으로 나타나 포졸란 반

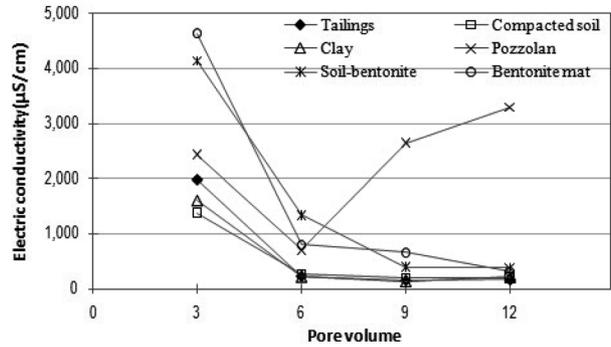


Fig. 4. Variation of electric conductivity (EC) values in effluents from the Sinlim mine tailings treated by various water-preventing materials.

응을 확인할 수 있었다. 하지만 이러한 pH의 상승은 오염물질의 안정화에 기여하기 보다는 비소 등의 물질의 재용출이 가능한 수준이므로 차폐제로서는 우수하지만 안정화를 위해서는 pH값의 근원적인 조절이 필요할 것으로 판단된다.

3.3. 전기전도도의 변화

인공강우를 주입한 후 침출수의 전기전도도의 변화를 Fig. 4에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 pore volume이 증가함에 따라 포졸란형을 제외한 모든 칼럼에서 전기전도도가 감소되는 경향을 보였다. 각 차폐제별로 보면, 초기에는 벤토나이트매트형과 토양-벤토나이트에서 높은 전기전도도를 나타냈는데 이는 이번에 사용된 벤토나이트는 칼슘활성화형(Ca-activated form)으로서 물과 반응하면 칼슘을 포함한 양이온이 다량 배출되기 때문이다. 이에 대한 세부적인 사항은 이후에 논의되는 주성분원소의 함량변화에 상술되어 있다. 이외의 차폐제에서는 포졸란형에서 초기에 높은 전기전도도가 나타났으며 이 역시 포졸란반응에 관여한 수산화칼슘의 용해에 기인하는 것으로 판단된다. 이외의 처리에서는 대부분 광물찌꺼기형보다 낮은 전기전도도를 보였다. 전기전도도의 변화에서 특이한 사항은 포졸란형의 변화로서 시간이 지나면서 증가되는 형태를 보였다. 즉, 실험 초기에 상대적으로 낮은 전기전도도(2,300 µS/cm)를 나타내지만, 시간이 지남에 따라 증가하여 실험종료 시점인 12 pore volume에서는 3,200 µS/cm로 높아졌다. 이러한 결과는 pH의 상승과도 유관한 것으로서 포졸란 고화체내의 수산화칼슘과 중탄산염의 용출로 인한 것으로 판단된다.

3.4. 주성분원소별 농도 변화

총 6종류의 차폐시스템을 이용하여 인공강우 주입 이후

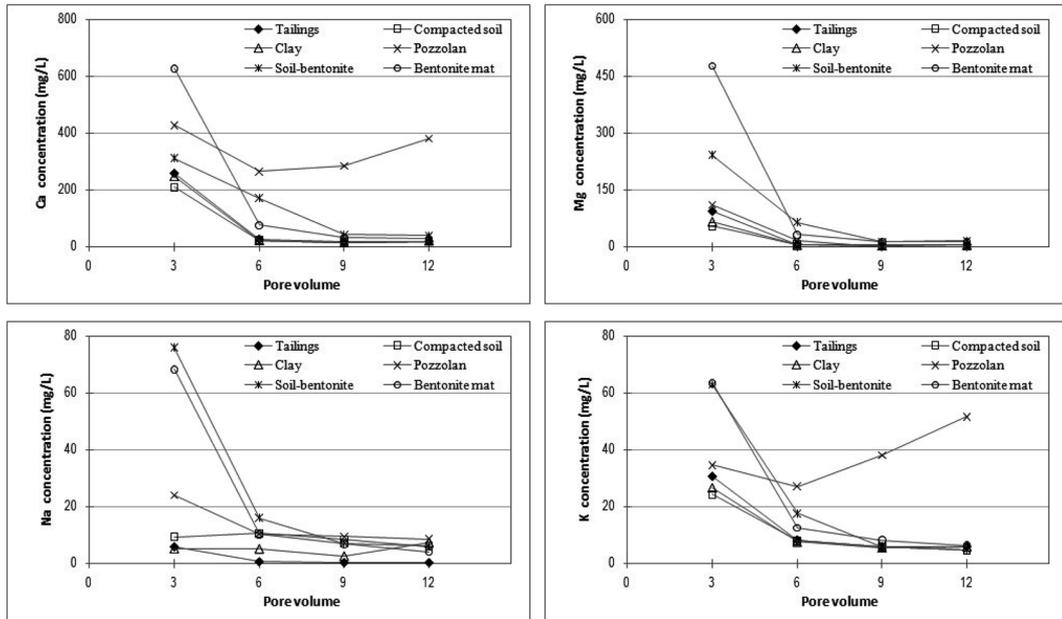


Fig. 5. Variation of Ca, Mg, Na and K concentrations in effluents treated by various water-preventing materials.

침출수의 양이온분석 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 Ca의 경우 벤토나이트형의 초기 함량이 다른 종류에 비해 높은 수준이었다. 이는 이번에 사용한 벤토나이트가 칼슘활성화형이기 때문에 나타나는 현상으로서 토양에 벤토나이트를 11% 혼합한 토양-벤토나이트혼합토형에서도 다량의 칼슘이 검출되어 이러한 현상을 확인할 수 있었다. 물론 평운도가 좋고 고가인 천연나트륨형 벤토나이트도 있지만 이번 연구의 사전조사에 따르면 가격대비 투수성을 검토한 결과 저가의 벤토나이트로도 충분한 차수성을 확인하였기에 이 실험에서는 저평운성 벤토나이트를 이용하였으며, 시간이 지남에 따라 주성분 원소의 농도가 감소되어 안정화가 적절히 이루어지는 것으로 조사되었다. 이외에는 포졸란에서 수산화칼슘의 첨가에 따른 농도의 증가가 나타나는 특성을 확인할 수 있었다.

시간에 따른 원소의 저감과 안정화를 가장 잘 보여주고 있는 것은 마그네슘이었다. 그림에서 보듯이 벤토나이트에 일부 함유된 Mg이 시간에 따라 급격히 감소되는 경향을 확실히 보여주고 있다. 이와 더불어 다른 차폐형에서도 침출수의 Mg이 시간에 따라 감소되어 12 pore volume에서는 10 mg/L로 감소되는 경향을 뚜렷이 보여주고 있다. 이는 안정화에 의한 효과를 적절히 나타내주는 지시자로 활용할 수 있다.

Na 역시 Mg과 유사하게 시간에 따른 변화를 적절히 보여주고 있다. 마그네슘과는 순서에서 차이가 있지만 토

양-벤토나이트혼합토와 벤토나이트매트형 모두 초기에는 다량의 Na이 검출되었다가 12 pore volume으로 가면서 10 mg/L 전후로 낮아지고 있다. 또한, 포졸란형에서 초기보다 낮아지는 경향을 보이지만 다른 처리시스템은 전체적으로 Na 농도의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

K의 경우는 Ca과 유사한 형태를 보였다. 즉, 포졸란형을 제외하고는 초기의 K이 점차 시간에 따라 감소되어 실험 종료 시점인 12 pore volume에서는 대부분 5 mg/L 전후로 낮아졌다. 하지만 포졸란의 경우는 약간의 편차는 있지만 전체적으로 큰 변화 없이 유사하거나 후반에 다소 증가되는 경향을 보였다. 이에 대한 정확한 원인을 파악하기에는 매우 어렵지만 Ca과의 공존성에 기인하는 것으로 유추할 수 있다.

3.5. 미량원소별 농도변화

총 6가지의 처리시스템에서 용출되는 침출수의 미량원소 분석 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 우선, As의 경우는 전체적으로 0.04 mg/L 이하로 검출되어 광물찌꺼기 원시료에 함유된 1,340 mg/kg에 비해 매우 낮은 수준으로 용출되고 있음을 알 수 있다. 이는 각 처리시스템별로 원시료 대비 약 $1\sim3 \times 10^{-5}$ 정도로 격감된 것으로 안정화의 효율이 매우 높은 것을 알 수 있다. 하지만 다점토형과 점토형의 경우 시간이 지남에 따라 비소의 용출이 증가되는 양상을 보이고 있어 이들 차폐층은 비소의 안정화에는 큰 장점이 없는 것으로 조사되었다. 또한, 포졸란형에서는

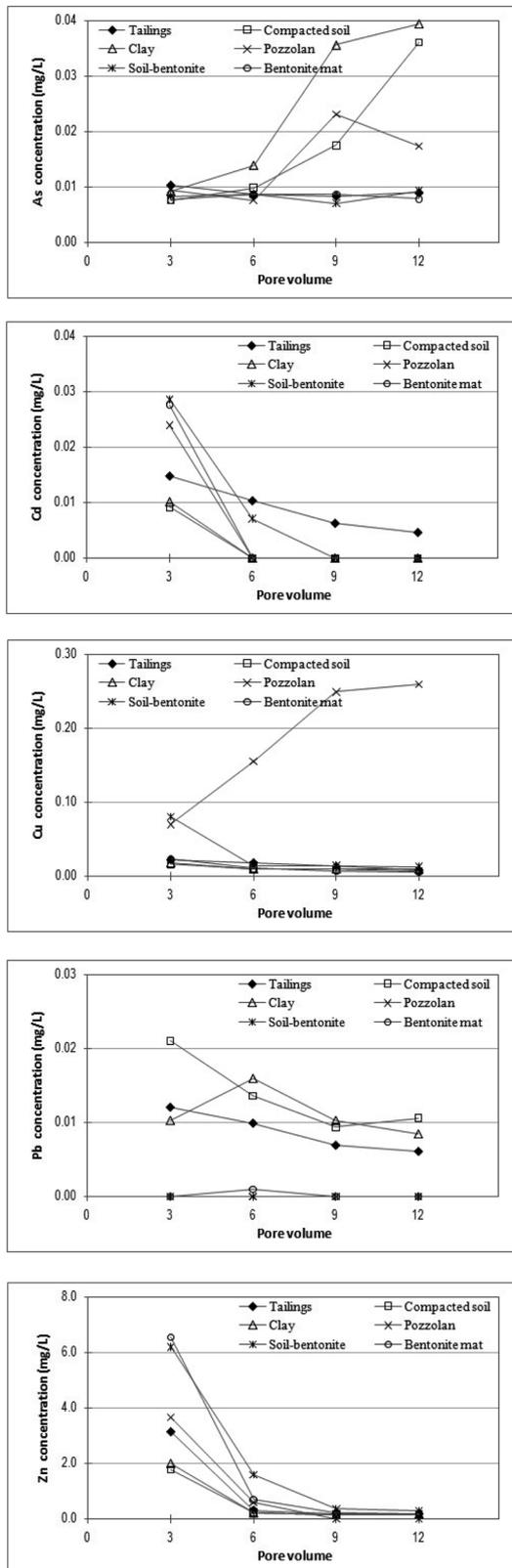


Fig. 6. Variation of As, Cd, Cu, Pb and Zn concentrations in effluents treated by various water-preventing materials.

일부 As의 상승은 pH의 급증에 따른 비소의 용해도 증가가 주요한 원인으로 평가된다. 이에 비해 토양-벤토나이트형과 벤토나이트매트형은 침출수의 비소 농도가 매우 안정적으로 나타나 우수한 차폐층 및 안정화 물질로 평가된다.

카드뮴의 경우 원시료에서는 750 mg/kg이 검출되었지만 초기단계인 3 pore volume에서 최대 0.03 mg/L 수준으로 검출되었다가 이후 검출한계 이하로 검출되어 대부분 안정화가 이루어졌음을 확인할 수 있었다. 특히, 벤토나이트형의 경우 초기 농도에 비해 함량의 저감이 두드러지게 나타나 효율성이 높음을 확인할 수 있었다.

원시료에서 토양환경기준의 우려기준을 초과한 788 mg/kg이 검출된 Cu의 경우, 초기에 포졸란형과 토양-벤토나이트형은 0.08 mg/L 수준, 이외의 처리는 0.02 mg/L 수준으로 매우 낮았다. 이는 안정화에 의한 Cu의 용출 저감과 더불어 지화학적으로 낮은 이동성에 따라 용출되어 나오는 함량도 낮은 것으로 판단된다. Alloway(1995)에 의하면 구리는 유기물과의 친화성이 높은 원소이지만 광물찌꺼기와 같은 무기물질에는 유기물함량이 매우 낮아 이들에 의한 영향이 낮은 것도 낮은 구리 용출의 원인으로 판단된다. 다만 포졸란형에서 일부 농도의 증가로 최종인 12 pore volume에서는 0.25 mg/L이 검출되기도 하였지만 수질환경기준인 1 mg/L 보다는 낮은 수준이다.

납의 경우 원시료인 광물찌꺼기에는 토양환경기준의 대책기준을 초과하는 2,750 mg/kg이 검출되었음에도 침출수에서는 대부분 0.02 mg/L 이하로 검출되어 안정화가 매우 잘 이루어졌음을 알 수 있다. 물론 Pb 역시 Cu와 유사하게 지구화학적으로 이동도 또는 용해도가 낮은 원소이므로 침출수에 함유되는 농도도 낮을 수 있지만 광물찌꺼기에 함유된 다량의 농도에 비하면 매우 낮은 수준으로 검출되어 안정화에 의한 효과임을 확인할 수 있다. 물론 광물찌꺼기만을 포함한 칼럼에서도 낮은 수준으로 검출되는 것을 보면 안정화와 저용출 특성이 공존하는 결과로 해석할 수 있다.

Zn의 경우 원시료에서는 2,570 mg/kg이 검출되었지만 침출수에서는 벤토나이트형 처리시스템에서 최대 6.5 mg/L가 검출되었다. 초기에는 벤토나이트형과 포졸란형에서 광물찌꺼기형에서보다 높은 농도의 아연이 검출되었지만 시간이 지남에 따라 감소하여 최종처리 시점에는 대부분 0.5 mg/L 이하로 검출되었다. 아연은 카드뮴과 더불어 지구화학적으로 용해도 또는 이동도가 높은 원소로 알려져 있으므로(전효택 외, 1997), 토양 농도의 약 0.25% 수준으로 비교적 높은 용출능을 보였다. 하지만 최종 단계에

서는 안정화에 의한 결과로 침출수에서 원시료 대비 5×10^{-3} 수준으로 낮아지는 안정화 효과를 확인하였다.

지금까지의 주성분 및 미량원소의 처리시스템별 저감 또는 안정화 효과를 종합적으로 비교하면 투수성의 제어와 시간대별로 원소들의 저감능력은 벤토나이트형에서 높은 효율을 보였다. 특히 100% 벤토나이트를 이용한 벤토나이트매트형보다는 토양-벤토나이트혼합토형에서 그 효율이 높음을 확인하였다. 이외에도 포졸란형은 원소에 따른 편차가 크지만 안정화에는 비교적 높은 수준으로 평가되어 그 활용성의 제고가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 광물찌꺼기 현장 차폐구조 pilot 실험장에서 구축된 6가지 차폐공법을 실내실험규모로 축소시켜 칼럼으로 제작한 후 인공강우(증류수)를 주입하여 pore volume별로 침출수의 화학적 변화를 알아보았으며, 본 연구를 통하여 얻는 결과는 다음과 같다.

1) 인공강우를 주입한 후 침출수의 pH를 측정할 결과 시간이 지날수록 pH가 상승하여 중성에서 안정화되는 것을 확인하였다. 다만, 포졸란형에서는 수산화칼슘의 용출에 의한 pH의 급상승을 확인하여 향후 이의 제어를 위한 적절한 양의 적용이 고려되어야 한다.

2) 대부분의 차폐층에서 시간이 지날수록 침출수의 전기전도도는 감소하는 경향을 나타냈다. 처리시스템의 초기에는 알칼리성물질의 형성 또는 양이온의 용출 등으로 인해 전기전도도가 높아지지만 이후에는 이들 물질이 안정화 단계를 통해 낮아지는 형태를 확인하였다. 다만 포졸란형의 경우 수산화칼슘의 용출에 의해 pH의 상승과 더불어 전기전도도도 일부 증가되는 형태를 확인하였다.

3) 침출수에 대한 주성분원소의 시간대별 함량변화는 전형적인 감소형을 보였다. 특히, 6개의 차폐시스템 모두에서 Mg와 Na는 매우 적절한 안정화를 보였다. 다만, 수산화칼슘과의 반응에 의해 포졸란형의 침출수는 Ca의 함량이 시간에 따라 증가되는 양상을 보였으며, K 역시 유사한 형태를 보였다.

4) 미량원소의 경우도 원시료인 광물찌꺼기에 함유된 농도에 비해 매우 낮게 용출되어 안정화에 따른 침출수 내의 농도 감소와 안정화를 확인하였다. 다만, 다짐토형과 점토형의 경우 시간에 따라 비소 농도가 증가되어 낮은 안정화 효율이 관찰되기도 하였지만 다른 원소들은 대부분 매우 낮은 용출율을 보여 차폐제에 의한 안정화가 효율적으로 일어났음을 판단할 수 있다.

5) 적용된 6종의 차폐시스템을 종합적으로 비교하면 효율과 비용적인 측면에서 토양-벤토나이트혼합토형이 가장 적절한 오염물질 저감 및 안정화 기술로 판단되며, 일부 시료에서 포졸란형도 안정화에 좋은 효과를 보였다.

사 사

이 연구는 한국광해관리공단의 연구과제인 “광물찌꺼기 차폐공법 개발”의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김세현, 최상훈, 최영천, 1996, 신림광산의 천연수성 은-금 광화 작용, 한국자원공학회지, 33(4), 274-281.
- 대한광업진흥공사, 1987, 한국의 광상 (금, 은편), 제10호, 서울, p. 1013.
- 이동길, 송원경, 정영욱, 정명채, 임길재, 윤석호, 권현호, 2008, 광미처리장의 최적 처리방안 선정을 위한 경제성 분석 연구, 한국지구시스템공학회지, 45(6), 663-672.
- 이민희, 이에선, 송니인, 2005, 소석회와 탄산칼슘을 이용한 매립장 주변 중금속오염 지하수 정화, 자원환경지질, 38(3), 273-283.
- 이진수, 박제현, 박주현, 2008, 광물찌꺼기 고형화 처리를 위한 포졸란공법의 현장적용성 평가, 광해방지기술, 2(1), 91-101.
- 장암, 최용수, 김경웅, 김인수, 1999, 폐금속광산의 광미에 존재하는 중금속 특성, 한국환경공학회지 21(1), 41-51.
- 전용원 전호택, 정명채 등, 1997, 지구자원과 환경, 서울대학교출판부, 서울, p. 492.
- 전호택, 김종대, 김옥배, 민경원, 박영석, 윤정환, 1997, 응용지구화학, 서울대학교출판부, 서울, p. 380.
- 정명채, 2002, 광산개발에 의한 환경오염 현황, 2002 광해방지 정책 및 기술심포지움, 한국지질지연연구원, p. 37-53.
- 정명채, 정문영, 최연왕, 2004, 국내 휴/폐광 금속광산 주변의 중금속 환경오염 평가, 자원환경지질, 37(1), 21-33.
- 정명채, 정문영, 2006, 국내 휴폐금속광산의 환경오염 평가 및 향후 관리 방안, 한국지구시스템공학회지, 43(5), 383-394.
- 지한구, 2005, Column test를 통한 중금속 저감효율 및 고형화/안정화 적용가능성 방안 연구, 세명대학교 대학원 석사학위 논문, p. 21-23.
- 현재혁, 김민길, 2007, 폐기물 매립지 차수재 및 복토재의 신기술 동향, 대한환경공학회지, 29(1), 3-7.
- Alloway, B.J., 1995, Heavy Metals in Soils, 2nd ed, Blackie Academic&Professional, London, p. 368.
- Bose, P. and Sharma, A., 2002, Role of iron in controlling spe-

- ciation and mobilization of arsenic in subsurface environment, *Water Research*, **36**, 4916-4926.
- Bothe Jr., J.V. and Brown, P.W., 1999, Arsenic immobilization by calcium arsenate formation, *Environmental Science and Technology*, **33**, 3806-3811.
- Bowen, H.J.M., 1979, *Environmental Chemistry of the Elements*, Academic Press, New York, p. 333.
- Choi, W.-H., Lee, S.-R., and Park, J.-Y., 2009, Cement based solidification/stabilization of arsenic-contaminated mine tailings, *Waste Management*, **29**, 1766-1771.
- Dutre, V. and Vandecasteele, C., 1998, Immobilization mechanism of arsenic in waste solidified using cement and lime, *Environmental Science and Technology*, **32**, 2782-2787.
- Jakubick, A., McKenna, G., and Robertson, A.M., 2003, Stabilisation of tailings deposits. Ontario, Canada: International Experience. *Mining and the Environment III*, Sudbury. 25-28 May, p. 1-9.
- Jang, A. and Kim, In. S., 2000, Solidification and stabilization of Pb, Zn, Cd and Cu in tailing wastes using cement and fly ash, *Minerals Engineering*, **13**, 1659-1662.
- Jung, M.C. and Thornton, I., 1996, Heavy metal contamination of soil and plants in the vicinity of lead-zinc mine, Korea, *Applied Geochemistry*, **11**, 53-59.
- Kim, J.-W. and Jung, M.C., 2011, Solidification of arsenic and heavy metal containing tailings using cement and blast furnace slag, *Environ. Geochem. Health*, **33**, 151-158.
- Kim, S.O., Kim, W.S., and Kim, K.W., 2005, Evaluation of electrokinetic remediation of arsenic-contaminated soils. *Environ. Geochem. Health*, **27**, 443-453.
- Singh, T.S. and Pant, K.K., 2006, Solidification/stabilization of arsenic containing solid wastes using Portland cement, fly ash and polymeric materials, *Journal of Hazardous Materials*, **131**, 29-36.