

심층혼합기동체 차수벽을 이용한 중금속 오염물질의 이동 제어 Containing Heavy Metal Contaminants Using Soil-Cement Column Barrier

정문경¹⁾, Moonkyung Chung, 천찬란²⁾, Chan Lan Chun, 이주형³⁾, Juhjung Lee, 김강석⁴⁾, Kangsuk Kim

¹⁾ 한국건설기술연구원 수석연구원, Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology

²⁾ 미네소타주립대 박사과정, PhD Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Minnesota

³⁾ 한국건설기술연구원 연구원, Researcher, Korea Institute of Construction Technology

⁴⁾ 한국건설기술연구원 연구원, Researcher, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : Laboratory experiments were performed to understand physical properties of soil-cement column under the influence of acidic flow including metal contaminants and its retaining capacity against metal migration. The contaminant used in this study was nitric acid with Cu and Cd. The Permeability of soil-cement column decreased when pH of the column began to drop below 12. Decreases in pH led to significant reduction of compressive strength of clayey soil-cement specimen, while relatively marginal reduction for sandy soil-cement specimen. The metal contaminants did not leachate from soil-cement column until pH of soil-cement dropped below 7~8 for Cu and 9~10 for Cd. Metal contaminants were precipitated and trapped inside the soil-cement column at pHs higher than those mentioned as verified with metal analysis and visual inspection. This indicated that soil-cement column not only performs well as a cut-off wall, but also helps alleviating the level of contamination of the surrounding environment.

Key words : contaminant barrier, soil cement column, acid, permeability, precipitation

1. 서 론

국내의 광산은 약 1900개소에 달하며, 이 중 금속광산의 90%는 휴·폐광산인데 적절한 환경복원시설이 없어 주변환경과 생태계에 악영향을 미치고 있다(박용하, 1994). 이들 폐금속 광산에서의 환경오염에 대한 연구는 국내의 경우 1990년대 들면서 활성화되고 있는 추세이며, 여기에는 오염된 지역의 주민들에 대한 위해도 연구도 포함된다(이진수, 2003). 지하수를 통해 오염물질이 주변지반으로 이동, 확산되는 것을 막기 위한 일종의 방법에는 연직 차수벽이 있으며, 지반개량체를 지반에 투입하고 기계적으로 혼합하여 기동체를 연속적으로 형성하는 심층혼합공법은 대표적인 연직 차수벽 공법 중의 하나이다.

심층혼합기동체가 오염차단벽으로서 제기능을 발휘하기 위해서는 기동체의 구성물질과 주변 환경의 물질간의 적합성이 유지되어야 한다. 휴·폐광산의 주변의 지하수는 중금속을 함유하고 있는 산성배수이다. 광미 및 토양내 중금속은 다종 다양한데, 이 중 Mn, Ti, Cu, Pb의 용해성 염은 시멘트의 setting 시간을 변화시키며 물리적 강도를 크게 저하시킨다고 보고되었으며 그 중 Zn, Cu, Pb가 가장 심하다(EPA, 1998). 또한 폐광산의 갱내수나 침출수와 같이 낮은 pH의 오염물질이 시멘트가 주성분인 심층혼합기동체와 오랜 기간동안 접촉하면 고화체를 파손시킬 가능성도 있다.

본 연구에서는 soil-cement를 근간으로 하는 심층혼합기동체가 이와 같은 오염지역의 차수벽으로서 성능을 효율적으로 발휘하는지 평가하기 위하여 실험연구를 수행하였다.

2. 실험방법

Soil-cement 기동체를 모사한 공시체를 제작하여 오염물질을 투과시키는 실험을 수행하였다. 공시체는 모래질 흙과 점토질 흙을 이용한 2종류이며, 각각 직경 5 cm, 길이 10 cm의 원주형 공시체를 3개씩 제작하였다. 모래의 경우 통일분류법으로 SP로 분류되며 200번체 통과율이 1.7%, D_{10} 이 0.17mm였다. 점토질 흙은 CL로 분류되며, 200번체 통과율이 75.4%, 액성한계가 35.2%, 소성지수가 12.0%였다. 보통 포틀랜드 시멘트를 기동체 조성용 지반개량제로 사용하였다. 혼합량은 모래공시체의 경우 220 kg/m^3 공시체이고 점토공시체의 경우 150 kg/m^3 이며, 물 시멘트 비는 1:1.5였다.

휴·폐광산 주변의 중금속을 함유하는 산성배수를 실험실에서 재현하기 위해 pH 4의 질산을 바탕용액으로 하였다. 중금속 물질로 구리와 카드뮴을 선택하였고, 그 농도는 각각 100 ppm과 50 ppm이다. 이 농도는 배출허용기준치보다 30~50배 큰 값이지만 국립환경연구원에서 조사한 휴·폐광산 갭내수의 중금속 농도를 보면 배출허용기준치를 초과한 지역에서는 중금속의 농도가 기준치보다 5~100배 정도 높게 나타났다(이민호, 2002). 이 조사결과에서 측정된 중금속 농도 중 최대치를 실험에서 사용하였다.

그림 1과 같은 화학물질을 침투액으로 사용하는 시험기를 제작하여 공시체에는 구속압력을 주고 침투액은 입구와 출구의 압력을 조절함으로써 투수시험을 시행하였다. 점토공시체와 모래공시체 모두 3개 중 2개는 바탕용액이 pH 4인 질산용액으로 실험을 시작하여 중간에 1% 질산용액으로 바꾸어 수행되었고, 나머지 하나는 pH 4 용액으로 시작부터 종료시까지 같은 농도가 지속되었다. 바탕용액의 농도가 바뀌어도 중금속의 농도는 변하지 않아 유입되는 중금속의 양은 일정했다. 용출액의 pH와 함유된 중금속의 농도를 측정하였다. Perkin Elmer사의 AAnalyst 100 Spectrometer를 이용해 중금속 농도 측정하였다. 실험이 끝난 후 공시체를 분해하여 표면세척과 시편 코팅 과정을 거친 후 HITACHI S-4100 장비로 SEM 촬영을 하여 실험 전후의 내부구조를 관찰하였다.

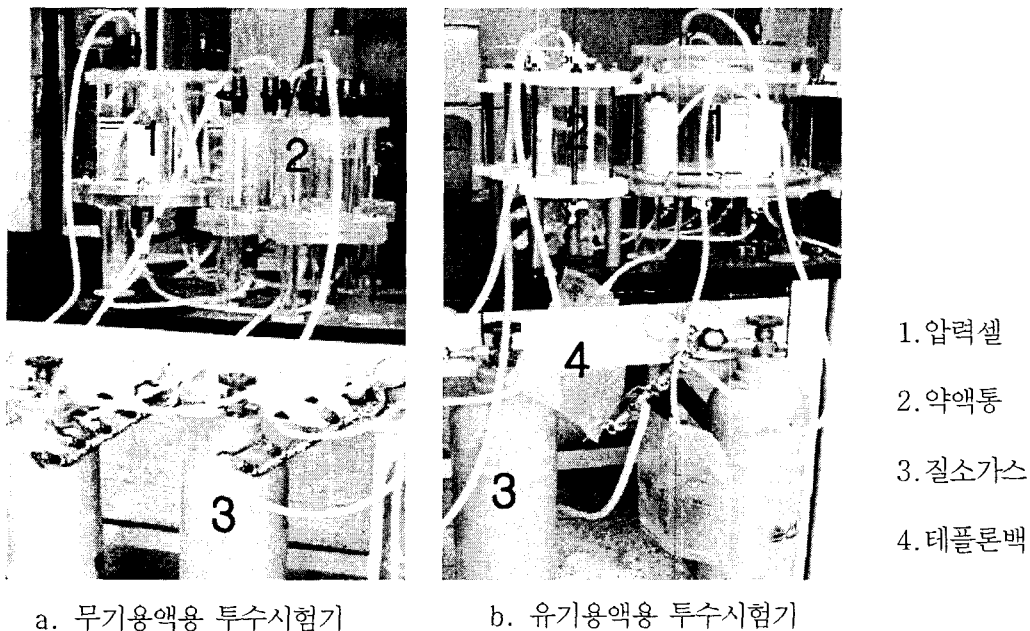


그림 1. 화학실험용 투수시험기의 사진

3. 결과

3.1. 물성변화

표 1에 중금속 오염물질을 이용한 투수시험의 조건과 실험결과를 정리하였다. 투수계수와 pH의 변화는 점토공시체와 모래공시체의 경우를 각각 그림2와 그림 3에 나타내었다. 투수시험 과정에서 바탕용액인 질산이 계속해서 공시체를 통과함으로써, 공시체가 제작되었을 당시 12 이상의 초기 공시체 내부 pH 값이 어느 시점부터 떨어지기 시작하였다. 이 현상은 점토공시체의 경우 25~30 간극부피(pore volume)만큼 침투액이 통과한 후 발견되었다. 한편 투수계수는 pH가 12이상을 유지하고 있는 시점까지 초기치와 유사하거나 다소 감소하다, pH가 12이하로 떨어진 시점에서 다소 증가하여 초기치 수준까지 상승하는 추세를 보였다. 모래공시체의 경우 pH가 12미만으로 떨어지는 시점은 시편에 따라 편차가 있지만 35~73 간극부피에 해당하였다. 투수계수는 pH가 12미만으로 들어선 시점 이후에는 급격히 감소하였다.

공시체의 일축압축강도를 측정하고 산과 접촉하지 않은 대조군과 비교하였다. 모래공시체의 경우 공시체 제작후 28일간 습윤양생을 거쳐 Ca(OH)₂ 용액에 70일과 140일 동안 담가둔 공시체의 강도와 비교해 볼 때 큰 변화가 없었다. 공시체 내부의 pH가 12 이하로 떨어지면 시멘트 및 시멘트 수화물이 용해되는 것으로 보고되어(Shi and Stegemann, 2000), 공시체를 통과한 용출액의 pH가 중성영역으로 내려갈 때까지 투수시험이 지속된 HM-S2와 HM-S3의 경우에는 공시체 구성성분이 상당히 용출되어 강도도 저하될 것으로 예상하였으나 그렇지 않았다.

점토공시체의 경우에는 모래공시체와 달리 pH가 12 이하로 떨어진 공시체(HM-C2과 HM-C3)에서는 대조군의 강도 기준 약 1/5 수준으로 일축압축강도가 감소하였다. HM-C1의 경우 투수시험이 pH가 12 이상일 때 종료되었는데 예상할 수 있었던 것과 같이 대조군의 강도보다 작기는 하였지만 크게 다르지는 않았다.

표 1. 중금속 용액에 의한 공시체 조건 및 실험 결과

시료이름		(1) 밀도 (g/mL)	(2) 투과 액 양 (mL)	(3) 투수시험 기간 (일)	(4) 일축압축강도 (kPa)	(5) Qu , 140 days (kPa)	(6) Qu , 140 days (kPa)
모래공시체	HM-S1	1.87	5211	65	2563	2229±399	2604±544
	HM-S2	1.84	1978	217	2692		
	HM-S3	1.90	4106	217	2101		
점토공시체	HM-C1	1.56	2712	82	705	822±63	971±59
	HM-C2	1.58	4412	138	131		
	HM-C3	1.62	5410	138	91		

[주] (1) 밀도는 공시체 제작후 측정된 값.

(2) 모래공시체의 간극부피(pore volume)는 120 mL, 점토공시체는 50 mL

(3) 투수시험에 사용된 공시체는 실험 전 28일간 습윤양생 되었음.

(4) 일축압축강도는 투수시험이 종료된 후 측정하였음.

(5), (6) 공시체를 제작하여 28일간 습윤양생후 Ca(OH)₂ 용액에 70일 및 140일간 보관 후 측정치

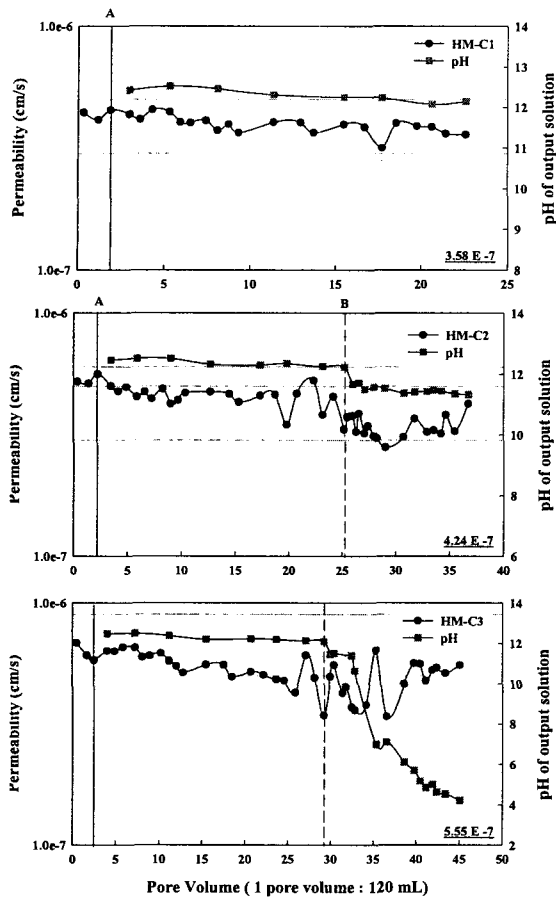


그림 2. 점토공시체의 투수계수 및 pH 변화

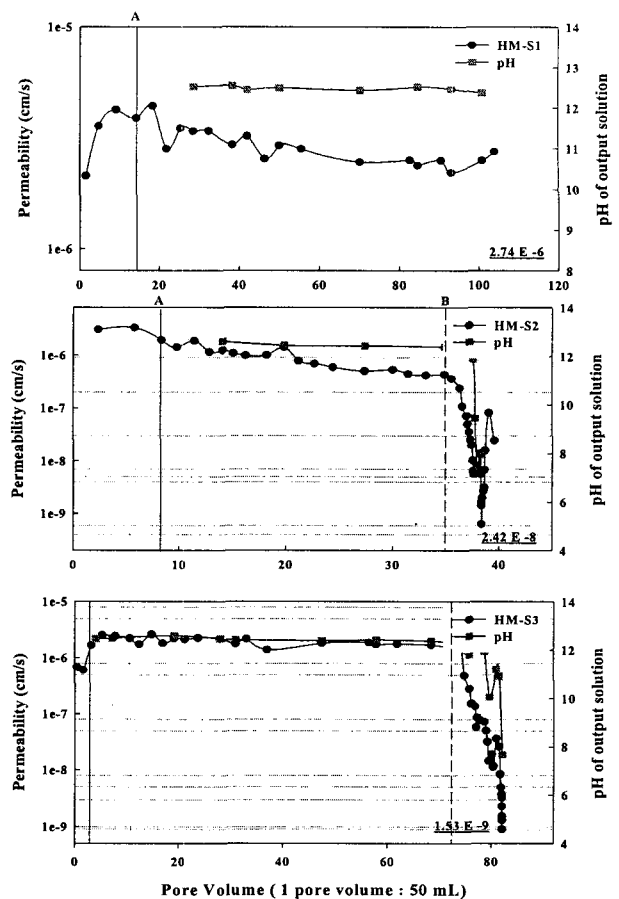


그림 3. 모래공시체의 투수계수 및 pH 변화

3.2 Soil-cement에서 중금속 용출 및 제어 특성

Soil-cement column이 중금속 오염물질을 얼마나 제어할 수 있는지 알아보기 위해 유출수 내의 카드뮴과 구리의 농도를 모니터링 하였다. 공시체 HM-C3에 대한 중금속 농도변화를 그림 4에 나타내었다. 공시체를 통과한 용액의 양인 pore volume에 대해 카드뮴과 구리의 농도변화를 유출수의 pH 변화와 비교한 결과, pH가 일정치 이하로 떨어져야 유출수에서 중금속을 확인할 수 있었다.

구리의 경우 유출수의 pH가 7~8이하에서, 카드뮴은 유출수의 pH가 9~10에서 검출되기 시작했다. 기존의 연구와 비교해 보면(Park and Bachelor, 2002), 본 연구에서 중금속이 검출되는 유출수의 pH는 중금속을 함유하고 있는 폐기물을 시멘트로 고화·안정처리하였을 때 중금속이 용출되는 pH에 거의 일치함을 알 수 있다. 특정 pH 이상의 유출수에서는 유입된 중금속이 모두 공시체내에서 침전형태로 바뀌며 유출수와 함께 나오지 못해 유출수에서 중금속이 검출되지 않았다. HM-C3외의 다른 공시체에서는 유출수의 pH가 10이하로 떨어지지 않았기 때문에 수집된 모든 유출수에서 중금속이 전혀 검출되지 않았다. 결국 soil-cement column이 산성폐수에 의해 영향을 받지 않는 한 대부분의 중금속은 공시체 내에 침전형태로 바뀌어 soil-cement column 내에 남게된다. 이러한 현상은 투수시험 후에 촬영한 HM-S1 공시체의 사진을 보면 공시체 내의 표면에 침전된 중금속으로 추정되는 물질을 직접 확인할 수 있다. 그림 5는 모래공시체에 푸른색의 구리가 침전된 것을 보여준다.

중금속 용액을 통과한 공시체에 대한 SEM 결과는 그림 6에 정리하였고 이 때 분석한 시료는 HM-S1과 HM-C3이다. 중금속이 용해된 용액이 질산용액이기 때문에 SEM 결과가 산성오염물을 통과한 것과 유사한 것으로 관찰된다. HM-S1은 낮은 농도의 질산용액을 사용하여 산성용액에 대한 영향이

미치기 전 상태인 반면, HM-C3는 고농도의 질산용액을 투과시켜 공시체의 시멘트 성분이 거의 다 용출된 상태이다. HM-S1은 유출수의 pH가 12이상을 유지한 것이고 HM-C3는 유출수의 pH가 3이하까지 떨어진 상태이다. 이러한 이유 때문에 HM-S1에서는 상당량의 수화물과 1~2 μm 의 에트링가이트가 관찰되고 게다가 직경이 2~3 μm 인 원형입자를 관찰할 수 있다. 이 원형입자가 중금속 용액 외에 다른 공시체에서는 관찰되지 않은 점으로 보아 중금속이 공시체 내의 높은 pH에서 침전된 것으로 추정된다. 그에 비해 HM-C3은 공시체 내부가 산성영역으로 치환되었기 때문에 에트링가이트를 포함한 수화물과 중금속 모두를 관찰할 수 없었고 위의 산성오염물을 투과시킨 결과와 거의 일치한다. 결국 중금속용액이 soil-cement column에 미치는 영향은 산성용액의 영향에 의해 좌우되는 것을 확인할 수 있었다.

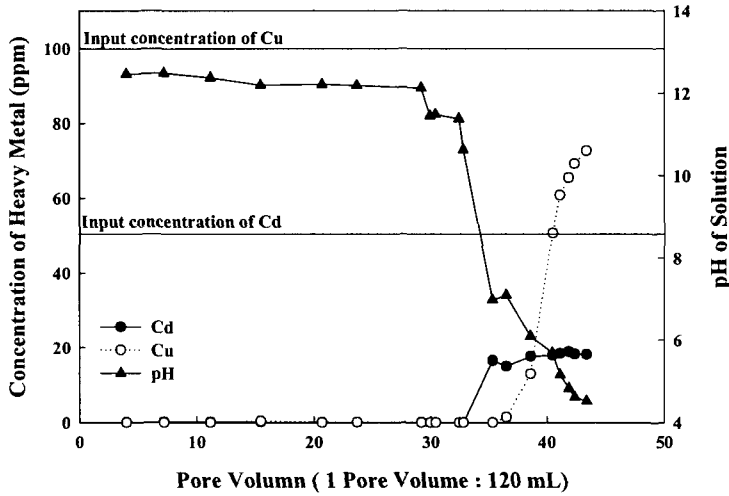


그림 4. 유출수의 중금속 농도 변화

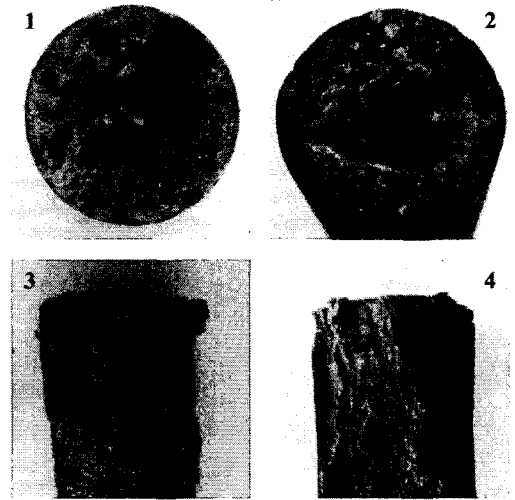


그림 5. 중금속이 침전된 모래공시체의 사진 (1, 3 : 모래공시체 바닥면, 쪼개진 면, 2, 4 : 점토공시체 바닥면, 쪼개진 면)

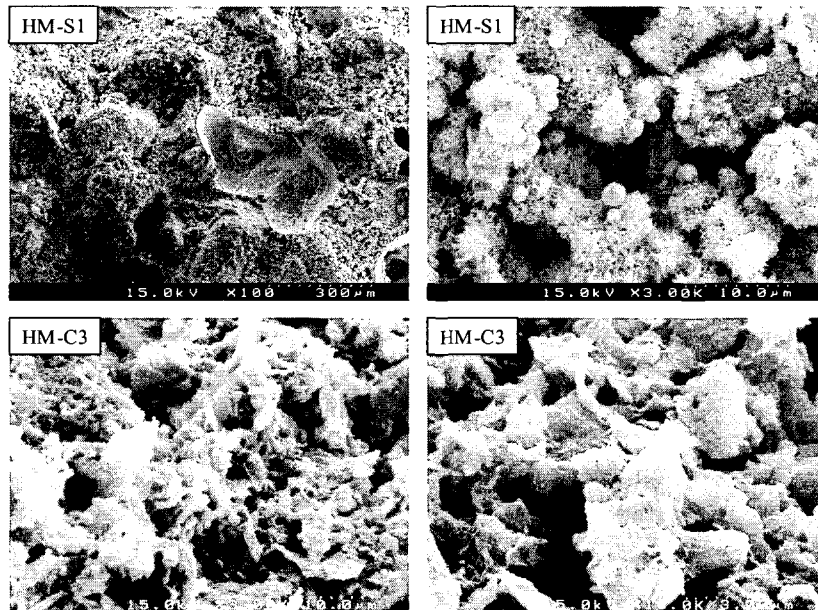


그림 6 중금속 용액으로 투수실험한 공시체들(HM-S1, HM-C3)의 SEM 결과

5. 결론

휴·폐광산과 같이 산성배수로 오염된 지역에서 차수벽으로 사용되는 심층혼합공법에 의한 기둥체의 오염물질 제어 특성과 오염물질과의 반응으로 인한 기둥체의 물성변화를 실험적으로 연구하였다. 본 연구의 주요한 몇가지 결론은 다음과 같다.

중금속 용액이 심층혼합기둥체에 미치는 영향은 중금속이 포함되지 않은 산성용액이 미치는 영향과 유사하였다. 용액에 포함된 중금속이 독자적으로 soil-cement column의 투수계수와 일축압축강도에 영향을 미치는 것이 아니라 중금속을 포함한 산성물질이 영향을 미치는 것이다. 심층혼합기둥체 내부가 알카리 환경을 유지하면 알카리 환경에서 침전하는 중금속들은 외부로 유출되지 않고 차수벽 내부에 머물게 되며 오염물질의 이동을 지연시키는 결과를 낳게 된다. 이러한 점은 중금속에 대해서는 심층혼합기둥체가 차수벽으로서의 역할과 함께 오염저감의 효과까지 기대할 수 있다는 것을 말한다.

참고문헌

1. 박용하 (1994), 휴·폐광된 금속광산 지역의 오염 관리대책, 한국환경기술개발원 연구보고서 RE-14.
2. 이민효 (2002), “휴·폐광산 금속광산지역 중금속 오염”, <http://www.me.go.kr>
3. 이진수 (2003), “폐광산 지역의 위해성 평가”, 제5회 토양환경오염의 예방과 복원공법에 관한 심포지엄, 2003.2.14 경원대학교, 경기도, pp. 26-38.
4. Park, J.Y. and Batchelor, B. (2002), A Multi-Component Numerical Leach Model Coupled with a General Chemical Speciation Code, Water Research. Vol. 36(1), pp156-166
5. Shi, C. and Stegemann, J.A. (2000), “Acid Corrosion Resistance of Different Cementing Materials”, Cement and Concrete Research, 30, pp. 803-808.
6. U.S. Environmental Protection Agency (1998), Evaluation of Subsurface Engineered Barriers at Waste Sites, Report EPA-542-R-98-005, Cincinnati, Ohio, USA.