

소석회(Ca(OH)₂)와 탄산칼슘(CaCO₃)을 이용한 매립장 주변 중금속 오염지하수 정화

송나인 · 이예선 · 이민희*

부경대학교 환경지질학과

Remediation Process by using Lime and Calcium Carbonate for Heavy Metal Contaminated Groundwater Originated from Landfills

Nain Song, Yesun Lee and Minhee Lee*

Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

Coagulation and precipitation process by using lime(Ca(OH)₂) and calcium carbonate (CaCO₃) were applied to remove heavy metals from groundwater in laboratory scale. From results of batch tests, by the addition of 0.3 wt.% lime, more than 90% of As and Mn were removed and 75-80% of Cd and Zn were removed by using 0.5 wt.% of lime. Removal efficiency of Pb almost reached 100% with only 0.1 wt.% of calcium carbonate and more than 93% of Cd were removed by the addition of 1.0 wt.% of calcium carbonate. Pilot scale column experiments were performed to remove heavy metals in the separation process of precipitated floc to supernatant after the coagulation/precipitation. For lime as a coagulant, more than 99% of As were removed from artificial groundwater and removal efficiencies of Cd, Mn, and Zn were over 80%. By using calcium carbonate, more than 95% of Cd and Pb were removed in column experiment. Fe and Mn contaminated groundwater taken from a real landfill site, Ulsan was used for the column experiment and more than 99% of Fe and Mn were removed by the addition of 1 wt.% lime in column experiment, suggesting that the coagulation/precipitation process by using lime and calcium carbonate have a great possibility to remove heavy metals from contaminated groundwater.

Key words : coagulation, heavy metal, groundwater, lime, calcium carbonate

소석회(Ca(OH)₂)와 탄산칼슘(CaCO₃)을 응집제로 이용한 화학적 응집/침전법으로 지하수로부터 중금속을 제거하는 실내 실험을 실시하였다. 비소(As), 카드뮴(Cd), 망간(Mn), 납(Pb), 아연(Zn)으로 오염시킨 인공오염수로부터 중금속을 제거하는 배치 실험 결과, 소석회를 이용한 경우, As과 Mn의 제거 효율은 0.3 wt.% 소석회 첨가만으로 90% 이상을 나타내었으며, Cd와 Zn의 경우 0.5 wt.% 첨가 시 약 75-85%의 제거 효율을 나타내었다. 탄산칼슘을 첨가한 경우 소석회 첨가에서 제거율이 비교적 낮았던 Pb의 제거율이 매우 높게 나타나 0.1 wt.%의 첨가만으로 거의 100%를 제거할 수 있었으며, Cd의 제거율도 소석회보다 높게 나타나 1.0 wt.% 첨가시 93%이상의 제거율을 나타내었다. 그러나 As, Mn, Zn의 제거율은 약 30-50% 정도로 낮게 나타났다. 대형 칼럼 반응조를 이용한 중금속 제거 실험에서는, 응집제를 오염지하수에 첨가한 후 응집제의 확산 유도와 응집제와 응집할 입자간의 접촉을 위해 급속 교반하였으며, 교반으로 인해 성장된 플럭(floc)의 침전을 유도하여 상등액과 침전입자를 분리함으로써 오염지하수로부터 중금속을 제거하였다. 소석회를 첨가한 칼럼실험의 경우, 앞서의 배치실험 결과와 같이 As는 1wt.%의 소석회 첨가에 의해서 침전 30분 이후에 99%이상의 제거 효율을 나타내었다. Cd, Mn, Zn도 80-85%의 제거효과를 나타내어 높은 제거 효율을 나타내었으나, Pb의 제거 효율은 배치 실험의 결과와 같이 낮아 약 40%내외를 유지하였다. 소석회 침전 슬러지를 재활용하여 중금속 제거 실험을 반복 실시한 결과도 As, Mn, Cd에 대해서는 침전 슬러지 재활용 2회까지 평균 90%이상의 높은 제거율을 나타내었으며, Zn에 대해서는 70%내외의 제거율을 나타내었다. 탄산칼슘을 이용한 칼럼실험에서는 Cd와 Pb의 경우 제거 효율이 높아, 침전 후 30분 이내에 95%이상이 제거되었다. Zn은 57%의 제거율을 나타내었으며, As와 Mn은 제거율이 낮아 약 40%정도가 제거되었다. Fe와 Mn의 농도가 매우 높은 울산지역의 실제 매립장의 오염지하수를 대상으로 1wt.%의 소석회를 이용한 칼럼

*Corresponding author: heelee@pknu.ac.kr

실험 결과, 두 원소 모두 96%이상의 제거율을 나타내어 소석회를 이용한 응집/침전법의 중금속 오염지하수 정화 효율이 매우 뛰어난 것으로 나타났다.

주요어 : 소석회, 탄산칼슘, 응집, 침전, 지하수오염

1. 서 론

인간은 사회생활과 산업 활동에 의해 필연적으로 폐기물을 생산하게 되어, 대도시 주변에는 생활 및 산업 폐기물 매립장의 크기와 수가 늘어가고 있다(환경부, 2003a; 2004). 현재 매립이 종료된 우리나라의 폐기물 매립장은 1,200여개소가 있는 것으로 조사되었으며(환경부, 2003b), 이들 종료 매립장에서 발생하는 침출수는 매립장 시설의 미비와 관리 부족으로 제대로 처리되지 못하여, 매립장 주변 토양은 물론 인근 지역의 지하수들을 심각하게 오염시키고 있는 실정이다(김동우 등, 2001; 오석영과 전효택, 1996; 이기화 등, 1996; 이정식 등, 1994; 정상용 등, 1997; 정하익과 김상근, 2000). 또한 위생매립이 이루어진 경우라 할지라도, 매립장 하부 차수벽의 균열이나 차수시설의 노후화 등에 의해 많은 위생매립장에서 침출수가 누출되고 있는 것으로 보고되고 있다. 지하수의 특성상 다른 오염원과 비교할 때 유동성이 커서, 단시간 내에 넓은 지역을 오염시킬 수 있으나 이미 오염된 지하수를 정화하는 데는 현실적으로 막대한 경비와 시간이 요구되며 그 정화효율은 매우 낮다(이재원 등, 1999; 손호웅 등, 2000). 따라서 오염된 지하수를 빠른 시간 내에 처리하여 더 이상의 오염 확산이 일어나지 않도록 방지하는 정화 체계의 확립은 매립장 주변 환경을 보존하기 위해서 필수 불가결한 과정이다. 현재 연구가 진행 중인 매립장의 침출수 관리대책은 매립지 주변에 연직차단벽을 불투수층까지 설치하여, 발생침출수는 양수 후 지상에서 처리하는 방안, 매립지 둘레에 일정 깊이까지 트렌치를 설치하여 지하수면 부근의 농도가 높은 부분만 채집하여 처리하는 방안, 매립지 복토층의 투수계수를 낮추어서 우수 침투량을 작게 함으로써 발생 침출수량을 작게 하는 방안, 양수정을 설치하여 오염운(plume)이 확산되지 못하게 적극적으로 오염지하수를 양수하는 방안 등이 있다(구자공과 윤석표, 1993).

본 연구는 매립장 주변부에서 침출수의 누출에 의해 발생하는 중금속 오염 지하수에 대한 효과적이고 경제적인 정화공정 개발을 목적으로 하고 있으며, 연구결과들은 전국에 산재해있는 매립장 주변 오염지하수 정

화공정설계에 중요한 자료를 제공하고, 저유소 및 공장 지대 폐기물 관리지역으로부터 유출되는 침출수에 의해 오염된 지하수 정화에도 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 수행된 실험은 소석회($\text{Ca}(\text{OH})_2$)와 탄산칼슘(CaCO_3)을 응집제로 이용하여 지하수내 중금속을 응집/침전과정("sweep floc" process)으로 제거하는 화학적 처리방법의 정화 효율을 규명하는 것으로, 실내실험을 통하여 얻어진 제거방법과 공정 조건들은 실제 매립장 주변 오염 지하수 정화에 적절하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다(송나인 등, 2004; 방미란 등, 1998; 박영구 등, 2004; 환경부, 1997).

2. 실험 방법 및 내용

매립장에서 생성되는 침출수는 매립되는 물질과 성상에 따라 매우 다양한 물질로 이루어져 있어서, 침출수의 성분에 따라 지하수 오염물질이 달라지나, 국내 매립장 주변부에서 높은 농도를 나타내는 대표적 중금속 오염물질은 철(Fe), 망간(Mn), 비소(As), 카드뮴(Cd), 납(pb), 아연(Zn)등이며, 본 연구에서는 분말 소석회와 탄산칼슘을 이용한 응집/침전방법으로 이들을 지하수로부터 제거하는 실내실험을 실시하였다. 먼저 중금속을 증류수에 일정량 스파이크한 인공오염수를 대상으로 배치실험과 대형 칼럼실험을 실시한 후, 실제 매립장주변 오염지하수를 이용하여 중금속을 제거하는 대형 칼럼실험을 실시하였다.

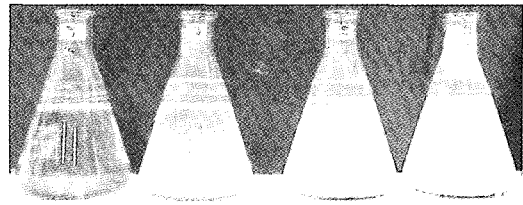
2.1. 소석회와 탄산칼슘을 이용한 중금속 제거 배치 실험

Ca계열 화합물이며, 가격이 저렴한 소석회와 탄산칼슘을 응집/침전제로 이용한 중금속 제거 배치실험을 실시하였다. 소석회와 탄산칼슘은 폐수처리 무기응집제로 사용되어왔을 뿐 아니라, 중금속 오염 토양으로부터 중금속 용출을 낮추는 토양안정화제로서 효과가 좋은 것으로 알려져 있다(이민희 등, 2004).

오염수에 소석회와 탄산칼슘을 첨가하여 급속교반을 실시하여 응집/침전을 유도한 후, 침전 후 시간별로 오염수의 상등액을 채수하여 중금속 농도, pH와 TDS의 변화를 측정하였다. 오염수는 먼저 중금속 표준용액

((주)아나팍스, AAS 표준용액)을 이용하여 As, Cd, Mn, Pb, Zn을 증류수에 스파이크하여 오염수의 농도를 각각 0.5, 0.1, 3.0, 2.0, 1.0 mg/L로 적정하여 사용하였으며, 인공 오염수의 중금속 농도는 지하수 생활용수 허용치의 10배를 넘지 않는 농도로 설정하였다. 오염수 1 L를 삼각플라스크에 담은 후 분말형태의 소석회(순도 95%이상, Yakuri pure chemical Co.)나 탄산칼슘(순도 99%이상, Shinyo pure chemical Co.)을 0.1, 0.3, 0.5, 1.0wt.%씩 각각 첨가하고 자석교반기를 이용하여 10분간 급속교반을 한 후 침전이 일어나게 하였다. 침전 후 0, 0.5, 1, 2, 3, 5, 8, 12시간에 상부 1.5cm 위치에서 유리피펫을 이용하여 상등액을 20 mL씩 채수하였다. 채수한 용액은 AAS(PerkinElmer, AAnalyst 200)을 이용하여 중금속 농도를 분석하였고, Isteck 회사제품의 측정기(815PDC)를 이용하여 pH와 TDS를 측정하였다. 침전 12시간 후 상등액을 전량 채수하여 조립질 모래를 이용한 급속여과를 실시하였고, 이때의 모래여과칼럼 통과유속은 58.8 mL/min이었다. 급속여과에 이용한 모래는 US Silica Company의 F-35 Ottawa sand(평균입경 0.5 mm)를 체가름한 0.425 mm 이상의 모래를 약산으로 세척하여 건조한 후 직경 50 mm인 유리칼럼(Kimble/Kontes, Chromaflex column)에 80 mm 높이로 충전하여 이용하였다. 모래여과 후 최종 배출용액은 AAS를 이용하여 중금속 농도분석을 실시 하였다. Fig. 1은 소석회와 탄산칼슘을 첨가하여 교반한 후 응집/침전이 이루어진 오염수를 나타낸다.

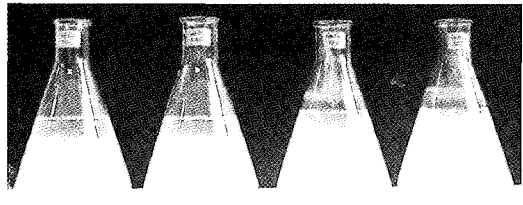
증류수에 중금속을 스파이크하여 제조한 인공오염수는 실제 매립장 주변 지하수와는 물리/화학적 성질이 다르기 때문에, 실제 오염지하수를 대상으로 중금속 제거 배치실험을 반복하여 실시하였다. 실험에 이용된 지하수를 채취한 매립장은 경남 양산시에 위치한 OO위생 매립장으로 1995년 9월부터 양산시와 사설 폐기물 매립회사가 생활폐기물과 사업장폐기물을 혼합하여 매립하여 왔다. 본 매립장은 침출수가 매립장구역 밖으로 유출되어 우수관 출구 하단부로 침출수가 유출되고 있었으며, 지형적으로 가장 저지인 계곡을 따라 하부로 이동되어 매립장 주변의 지하수를 오염시키고 있는 것으로 나타났다(한국지하수토양환경학회, 2003). 실험에 이용된 지하수는 침출수 처리장으로부터 약 30 m 떨어진 우수 배출 관로 주변에 설치된 지하수관정으로 부터 채수하였다. 채수한 지하수 내의 중금속 농도를 분석해본 결과 지하수 생활용수 기준치 이하로 나타나 오염물 정화 실험을 실시하기에는 매우 낮은 농도여서, As, Cd, Cr, Pb를 채수한 지하수에 추가로 스파이크하



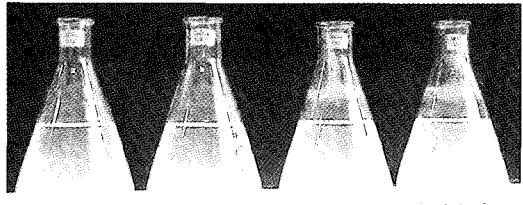
(a) 1 hour precipitation with Ca (OH)₂



(b) 5 hours precipitation with Ca (OH)₂



(c) 1 hour precipitation with CaCO₃



(d) 5 hours precipitation with CaCO₃

Fig. 1. Photograph of batch test with 0.1, 0.3, 0.5, 1 wt.% of Ca(OH)₂ and CaCO₃ (coagulant amount added increases from left to right).

여 일정한 중금속 농도를 유지하게 한 후, 소석회와 탄산칼슘을 첨가하여 중금속을 제거하는 실험을 실시 하였다. 매립장 주변 지하수 관정에서 채수한 지하수에 As, Cd, Cr, Pb를 표준용액을 이용하여 각각 약 1 mg/L되게 오염시킨 후, 삼각플라스크에 200 mL씩 오염시킨 지하수를 정량하여 담은 후 정해진 양만큼의 응집제를 첨가하고 자석교반기를 이용하여 10분간 급속 교반시켰다. 교반 후 침전물을 제거한 상등액의 중금속 농도는 부경대학교 공동실험실습관 내의 ICP-OES(PerkinElmer, Optima 3300XL)를 이용하여 측정

하였다. 첨가한 소석회와 탄산칼슘의 양은 오염수의 0.1, 0.3, 0.5, 1.0 wt.% 이었다.

2.2. 소석회와 탄산칼슘을 이용한 중금속 제거 칼럼 실험

앞서 실시한 배치실험을 바탕으로 하여 실내 파일럿 규모의 대형 칼럼실험을 실시하였다. 중금속 제거 실험을 위해 이용된 반응조는 자동교반을 위한 회전모터, 교반축, 측면의 시료채취용 밸브, 하부 슬러지 침전을 위한 경사 장치와 슬러지 배출용 밸브를 장착한 대형 아

크릴 원통으로 제작되었으며, 지름은 240 mm이고 높이는 345 mm로 처리용량은 약 16.8 L이다. 증류수에 (주)아나팍스의 AAS용 표준용액을 이용하여 As, Cd, Mn, Pb, Zn을 함께 스파이크하여 오염수로 이용하였으며, 오염수의 농도는 지하수 생활용수 기준치를 기준으로 As는 10배, Cd와 Mn은 10배, Pb은 20배, Zn은 1배에 해당되는 0.5 mg/L(As), 0.1 mg/L(Cd), 3 mg/L(Mn), 2 mg/L(Pb), 1.5 mg/L(Zn)로 하였다. 반응조에 인공 오염수 15 L를 채운 후 균일한 혼합을 위해 110 rpm으로 10분간 교반을 하였다. 응집제는 배치실

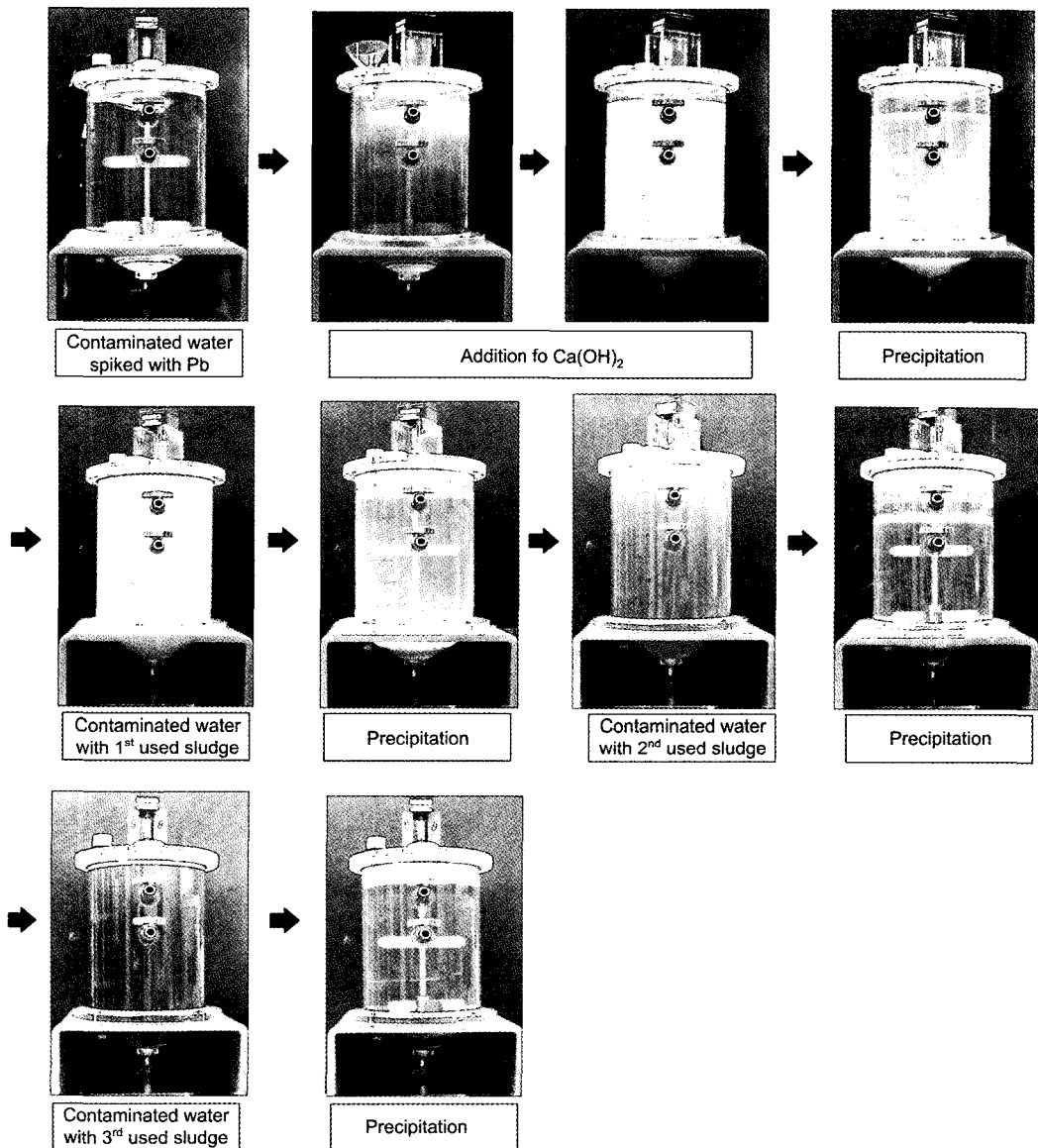


Fig. 2. Photograph of column experiment with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ for As, Cd, Mn, Pb and Zn spiked water.

험 결과로부터 제거효율이 가장 높은 1 wt.%를 반응조에 첨가하였다. 첨가한 응집제가 오염수와 완전한 혼합이 이루어지게 하기위해 첨가할 양을 정량한 다음 소량의 오염수를 이용하여 응집제를 용해시켜 용액상태의 응집제를 반응조에 주입하였다. 응집제 첨가 후 110 rpm으로 10분간 교반시켜 충분한 혼합을 유도한 후 정치시켜 플럭(floc) 입자들을 침전시켰다. 침전 후 30, 60분, 120분에 상등액을 채수하였으며, 상등액은 1 L씩 채수하여 조립질 모래여과 칼럼을 통과시켰다. 침전 120분 후 반응조 내의 용액과 침전 슬러지를 분리하여, 분리한 슬러지를 새로운 오염용액에 다시 첨가하는 침전 슬러지 재활용 실험을 3회 실시하였다. 반응조 실험에서 채수한 시간별 상등액과, 상등액을 모래여과한 최종 처리수의 중금속 농도를 AAS로 분석하였으며, 동시에 pH와 TDS도 측정하였다. Fig. 2는 소석회를 응집제로 이용한 칼럼 실험 과정을 나타낸다.

2.3. 매립장주변 실제 중금속 오염 지하수 정화 칼럼실험

인공 오염수를 이용한 중금속 제거 칼럼 실험 결과를 바탕으로, 실제 매립장에서 오염된 지하수를 채수하여 소석회를 응집제로 이용한 중금속 제거 칼럼 실험을 실시하였다. 실험에 이용된 실제 지하수는 울산광역시 울주군 온산화학단지 내에 위치한 △△폐기물 매립장에서 채수하였다. △△매립장은 총 매립용량 185,922 m³으로, 반입된 폐기물을 1차 소각처리한 후 매립하는 방식으로 폐기물을 처리하는 지정폐기물매립장이다. 본 실험에 이용한 오염지하수는, 지대가 낮은 매립장 바닥부의 지하수를 배제할 수 있도록 설치한 매립장 바닥부 차수층 하부면의 지하수배제관에서 펌프

시설을 이용하여 채수하였다. 채수한 지하수(배제수)의 색도, 악취, 중금속 농도로 판단할 때, 매립장 주변의 우수 또는 지하수가 지하침투과정에서 매립물 및 침출수와 접촉하여 오염되어 있음을 알 수 있었다. 오염지하수의 중금속의 농도를 분석해본 결과, Cd는 0.02 mg/L, Fe은 34.76 mg/L, Mn은 22.53 mg/L 그리고 Pb은 0.63 mg/L이었으며, Zn은 0.9 mg/L로 나타나, Zn을 제외한 Cd, Fe, Mn, Pb의 농도가 지하수 생활용수 기준치를 초과하였으며, 특히 Fe와 Mn의 농도는 기준치의 약 116배와 75배를 초과하는 것으로 나타나, 지하수 배제시설에서 채수한 실제 오염지하수를 이용한 칼럼 실험에서는 Fe와 Mn에 대한 제거 효율을 측정하였다. 실험방법은 앞서 인공오염수를 대상으로 실시되었던 칼럼실험 방법과 동일하며, 1.0wt.%의 소석회를 응집제로 사용하였다(Fig. 3).

3. 결과 및 토의

3.1. 소석회와 탄산칼슘을 이용한 중금속 제거 배치 실험 결과

중류수에 중금속을 스파이크한 인공오염수를 이용한 중금속 제거 배치실험 결과는 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 소석회를 첨가한 경우 As와 Mn은 0.3 wt.% 첨가만으로 침전 1시간 이후부터 상등액내 중금속 제거율이 90%이상을 나타내었으며, 0.5 wt.% 첨가시 침전후 0.5시간에서 95%이상의 제거율을 나타내어 소석회의 As와 Mn의 제거효율이 매우 높은 것으로 나타났다. Cd과 Zn의 제거효율은 As와 Mn의 제거율보다는 낮았으나, 소석회의 첨가량 증가에 따라 제거율이 높아져, 0.5 wt.% 소석회 첨가시 약 75-85%의

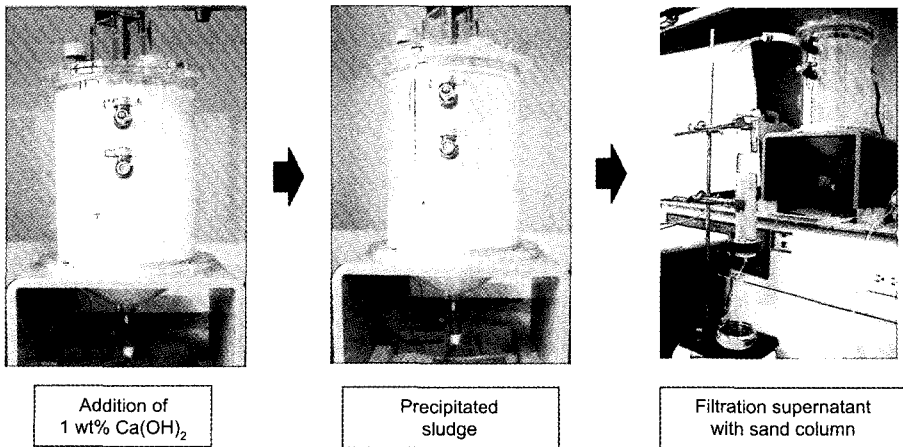


Fig. 3. Photograph of column experiment with Ca(OH)₂ for real contaminated groundwater.

Table 1. Results of batch test with the addition of 0.1, 0.3, 0.5 and 1wt.% Ca(OH)₂ for heavy metal removal.

Ca(OH) ₂ (wt.%)	Settlement time (hr)	As		Cd		Mn		Pb		Zn		pH	TDS (mg/L)
		Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)		
0.1	Spike	0.42	-	0.10	-	2.95	-	2.11	-	0.80	-	3.96	-
	0	0.49	-	0.10	0.0	2.64	10.5	2.05	2.9	0.68	14.7	11.39	1009.9
	0.5	0.30	29.3	0.07	33.3	1.56	47.1	1.74	17.6	0.28	64.7	11.37	1.5×10 ³
	1	0.21	50.6	0.05	48.1	1.04	64.6	1.74	17.6	0.34	57.6	11.36	998.9
	2	0.14	67.7	0.05	55.6	0.74	74.9	1.68	20.6	0.33	59.1	11.34	1.42×10 ³
	3	0.17	59.6	0.03	66.7	0.67	77.2	1.74	17.6	0.27	66.5	11.31	1094.7
	5	0.13	68.2	0.03	70.4	0.52	82.5	1.55	26.5	0.13	84.1	11.28	698.7
	8	0.16	61.4	0.03	66.7	0.48	83.6	1.55	26.5	0.24	69.4	11.28	448.3
	12	0.20	52.1	0.03	66.7	0.45	84.8	1.55	26.5	0.24	70.0	11.23	3.03×10 ³
	filtration	0.00	99.8	0.01	63.4	0.00	100.0	0.00	100.0	0.00	98.0	-	-
	0	0.50	-	0.11	-	2.74	7.0	1.93	8.8	0.77	3.8	11.81	6.68×10 ³
	0.5	0.05	88.2	0.03	66.7	0.26	91.2	1.80	14.7	0.20	75.3	11.74	6.08×10 ³
1	0.04	91.0	0.03	70.4	0.20	93.3	1.86	11.8	0.21	73.8	11.64	5.55×10 ³	
2	N.D.	N.D.	0.03	70.4	0.17	94.2	1.80	14.7	0.21	73.8	11.62	6.12×10 ³	
0.3	0.03	94.0	0.03	70.4	0.20	93.3	1.86	11.8	0.19	76.8	11.57	5.98×10 ³	
5	0.02	94.6	0.03	74.1	0.17	94.2	1.61	23.5	0.18	77.1	11.56	6.40×10 ³	
8	0.02	95.5	0.03	74.1	0.13	95.6	1.86	11.8	0.20	75.6	11.54	5.37×10 ³	
12	0.02	95.3	0.03	74.1	0.16	94.7	1.86	11.8	0.19	76.5	11.55	3.84×10 ³	
filtration	0.00	98.5	0.02	15.2	0.01	94.5	0.00	100.0	0.11	40.2	-	-	
0	0.47	-	0.11	-	1.02	65.5	1.86	11.8	0.74	7.6	12.05	6.91×10 ³	
0.5	0.02	95.1	0.03	70.4	0.07	97.7	1.24	41.2	0.07	91.5	12.08	6.59×10 ³	
1	0.02	94.9	0.03	74.1	0.15	95.0	1.55	26.5	0.11	86.8	11.99	5.92×10 ³	
2	0.02	96.0	0.03	74.1	0.11	96.2	1.49	29.4	0.10	87.6	11.98	5.89×10 ³	
0.5	0.02	95.9	0.03	74.1	0.12	95.9	1.61	23.5	0.12	85.0	11.99	6.34×10 ³	
5	0.01	96.6	0.03	74.1	0.12	95.9	1.55	26.5	0.08	89.7	11.98	6.11×10 ³	
8	0.01	96.7	0.03	74.1	0.11	96.2	1.68	20.6	0.13	83.2	12.00	5.95×10 ³	
12	0.01	97.8	0.02	77.8	0.10	96.5	1.68	20.6	0.14	82.4	11.99	6.15×10 ³	
filtration	0.00	99.7	0.02	-	0.01	91.8	0.00	100.0	0.11	19.7	-	-	
0	0.36	14.6	0.07	33.3	1.20	59.4	1.49	29.4	0.74	7.6	12.06	6.56×10 ³	
0.5	0.03	92.1	0.03	66.7	0.19	93.6	1.80	14.7	0.09	89.1	12.02	4.61×10 ³	
1	0.02	96.1	0.03	70.4	0.03	98.8	1.24	41.2	0.04	94.7	12.05	5.77×10 ³	
2	0.01	97.8	0.03	66.7	0.02	99.4	1.18	44.1	0.07	91.5	12.05	6.35×10 ³	
0.1	0.01	98.3	0.03	70.4	0.02	99.4	1.18	44.1	0.06	92.6	12.09	4.73×10 ³	
5	0.00	99.6	0.03	74.1	0.02	99.4	1.18	44.1	0.05	92.9	12.07	5.62×10 ³	
8	0.00	99.5	0.03	74.1	0.02	99.4	1.12	47.1	0.06	93.5	12.07	3.84×10 ³	
12	0.00	99.4	0.03	74.1	0.02	99.4	1.18	44.1	0.06	92.6	12.07	4.37×10 ³	
filtration	0.00	99.3	0.03	1.1	0.01	50.8	0.00	100.0	0.11	-	-	-	

*Con. : Concentration, *R.E. : Removal Efficiency, *N.D. : Lower than detection limit

Table 2. Results of batch test with the addition of 0.1, 0.3, 0.5 and 1 wt.% CaCO₃ for heavy metal removal.

Ca(OH) ₂ (wt.%)	Settlement time (hr)	As		Cd		Mn		Pb		Zn		pH	TDS (mg/L)	
		Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)			
Spike														
		0.42	0.4	0.10	0.4	2.95	0.4	2.11	0.4	0.94	0.4	3.96		
0.1	0	0.41	3.1	0.08	22.2	2.45	16.7	1.24	41.2	0.68	27.7	7.99	355.7	
	0.5	0.31	27.1	0.09	14.8	2.64	10.2	0.25	88.2	0.84	10.3	7.84	356.8	
	1	0.30	28.2	0.08	18.5	2.65	9.9	0.12	94.1	0.84	10.6	7.94	330.5	
	2	0.29	31.8	0.08	22.2	2.63	10.8	0.00	100.0	0.84	10.6	7.84	335.0	
	3	0.24	42.1	0.08	22.2	2.62	11.1	0.00	100.0	0.84	11.2	7.83	327.9	
	5	0.25	41.8	0.08	22.2	2.59	12.0	0.00	100.0	0.81	13.5	7.87	337.2	
	8	N.D.	N.D.	0.08	25.9	2.58	12.3	0.00	100.0	0.75	20.6	7.92	337.6	
	12	0.24	43.8	0.06	37.0	2.53	14.0	0.00	100.0	0.70	25.3	8.16	300.3	
		filtration	0.20	14.4	0.03	47.6	2.53	0.3	0.00	-	0.25	64.9		
		0	0.40	4.5	0.06	37.0	2.17	26.3	1.06	50.0	0.56	40.7	7.94	372.4
		0.5	0.30	28.2	0.03	74.1	2.32	21.3	0.12	94.1	0.52	45.0	8.27	375.7
		1	0.39	6.4	0.02	77.8	2.37	19.6	0.00	100.0	0.66	29.7	8.07	378.9
	2	0.37	11.2	0.02	81.5	2.33	20.8	0.00	100.0	0.68	27.4	7.94	367.2	
	3	0.31	25.4	0.02	81.5	2.30	21.9	0.00	100.0	0.60	36.5	8.07	351.2	
	5	0.31	26.8	0.02	81.5	2.28	22.5	0.00	100.0	0.59	37.6	8.21	375.0	
	8	0.27	35.4	0.02	81.5	2.32	21.3	0.00	100.0	0.57	39.7	7.85	382.7	
	12	0.29	31.5	0.02	81.5	2.31	21.6	0.00	100.0	0.62	33.8	8.03	374.4	
	filtration	0.29	-	0.03	-	2.26	2.1	0.00	-	0.21	67.0			
0.3	0	0.56	-	0.08	25.9	1.79	39.2	1.49	29.4	0.68	27.4	7.66	429.8	
	0.5	0.44	-	0.02	85.2	2.02	31.3	0.12	94.1	0.48	48.8	7.71	370.4	
	1	0.34	18.7	0.01	88.9	2.06	30.1	0.06	97.1	0.51	45.3	7.77	375.2	
	2	0.29	31.8	0.01	88.9	2.02	31.3	0.00	100.0	0.48	49.4	7.69	378.8	
	3	0.29	30.7	0.01	92.6	1.96	33.3	0.00	100.0	0.37	61.2	8.00	378.6	
	5	0.28	32.6	0.01	88.9	1.97	33.0	0.00	100.0	0.51	45.6	7.71	389.5	
	8	0.29	32.3	0.01	88.9	1.95	33.9	0.00	100.0	0.47	50.0	7.74	379.7	
	12	0.30	28.7	0.01	88.9	1.93	34.5	0.00	100.0	0.45	51.8	7.83	387.7	
		filtration	0.29	4.3	0.01	-	1.97	-	0.00	-	0.16	63.8		
		0	0.43	-	0.05	51.9	0.90	69.6	0.75	64.7	0.37	60.4	7.72	359.9
		0.5	0.28	33.5	0.01	88.9	1.34	54.7	0.00	100.0	0.27	71.8	7.67	412.7
		1	0.31	26.8	0.01	92.6	1.33	55.0	0.00	100.0	0.25	73.5	7.86	359.2
	2	0.26	38.2	0.01	92.6	1.33	55.0	0.00	100.0	0.23	75.6	7.74	372.5	
	3	0.24	42.4	0.00	96.3	1.32	55.3	0.00	100.0	0.21	77.6	7.75	386.5	
	5	0.31	25.9	0.01	92.6	1.28	56.4	0.00	100.0	0.22	76.2	7.81	391.7	
	8	0.28	34.3	0.01	92.6	1.29	56.1	0.00	100.0	0.21	77.6	7.76	386.3	
	12	0.31	25.7	0.01	92.6	1.27	57.0	0.00	100.0	0.20	78.8	7.75	381.9	
	filtration	0.29	6.1	0.01	34.0	1.33	-	0.00	-	0.10	48.3			

Table 3. Results of removal efficiency for contaminated groundwater in batch test (As, Cd, Cr and Pb spiked).

coagulant added (wt.%)	As		Cd		Mn		Pb		pH	Eh	
	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)			
groundwater	0.05		0		0.01		0.02		6.46	284	
spiked groundwater	0.95		0.44		0.45		0.25				
Ca(OH) ₂	0.1	0.07	92.2	0	99.3	0.02	96.6	0.02	93.3	13.3	11.3
	0.3	0.08	92.1	0	99.5	0.02	96.4	0.02	93.3	13.57	15.2
	0.5	0.09	91.1	0	99.5	0.02	96.2	0.02	93.3	13.6	10.9
	1	0.08	91	0	99.5	0.02	95.7	0.02	93.3	13.67	8.2
spiked groundwater	1.72		0.86		0.93		0.85		3.98	493.3	
CaCO ₃	0.1	1.18	31.4	0.14	83.2	0.07	92.3	0.02	97.8	6.98	304.9
	0.3	1.15	33.2	0.02	98.3	0.06	93.7	0.02	97.6	4.58	292.8
	0.5	1.19	30.7	0.01	99.1	0.03	96.6	0.02	97.6	7.81	291.9
	1	1.06	38.3	0.01	99.4	0.02	98.1	0.02	97.8	8.04	303.1

제거 효율을 나타내어 소석회와 Cd와 Zn 제거 효율도 높은 것으로 나타났다. 다만 Pb의 경우 0.5 wt.%의 소석회 첨가에 의해서 약 20%의 제거율을 나타내었고, 1.0 wt.% 첨가에 의해서 약 44%의 비교적 낮은 제거율을 나타내었다. 그러나 침전 12시간 후 상등액을 모래여과칼럼에 통과시키면서 처리수내 잔류했던 Pb는 거의 모두 제거되어 모래여과 후 Pb의 제거율은 100%를 나타내었다. 처리수내 잔류하였던 As, Zn들도 대부분 제거되었으며, 다만 Cd의 모래여과 제거효율은 크게 높지 않은 것으로 나타났다(Table 1).

탄산칼슘을 첨가한 경우 소석회 첨가에서 제거율이 비교적 낮았던 Pb의 제거율이 매우 높게 나타나 0.1 wt.%의 첨가만으로 거의 100%를 나타내었으며, Cd의 제거율도 소석회보다 높게 나타나 0.3 wt.% 탄산칼슘 첨가시 80%이상의 제거율을 나타내었고, 1.0 wt.% 첨가시 93%이상의 제거율을 나타내었다. 그러나 As, Mn, Zn의 제거율이 낮게 나타나 0.5 wt.% 첨가시 약 30-50%의 비교적 낮은 제거율을 나타내었다. 모래여과칼럼을 통과한 용액에서는 Zn의 제거율만이 약 30% 정도 증가하였으나, As, Cd, Mn에 대해서는 제거율의 증가를 거의 나타내지 않았다. 소석회 0.1 wt.% 첨가만으로도 오염수의 pH는 11이상을 나타내었으나, 탄산칼슘 첨가의 경우 첨가량에 관계없이 오염수의 pH는 7.7~8.0을 유지하였다. 배치실험 결과소석회와 탄산칼슘의 제거율은 중금속의 종류에 따라 다르게 나타났으며, 따라서 오염지하수내 중금속 종류에 따라 적절한 응집제와 응집제의 첨가량이 결정되어야 할 것으로 판단되었다.

매립장 주변 오염지하수에 중금속을 스파이크한 오염수를 이용한 배치실험 결과는 Table 3에 나타내었다.

소석회를 이용한 경우, As, Cd, Cr, Pb 모두에서 0.3 wt.% 첨가만으로 92% 이상의 제거 효율을 나타내어 매우 높은 제거효율을 나타내었으며, 탄산칼슘첨가의 경우 As의 제거율이 약 30%로 낮게 나타났으나, 나머지 중금속에 대해서는 소석회와 비슷한 제거율을 나타내었다. 증류수에 중금속을 스파이크한 인공오염수를 이용한 배치실험보다 실제 오염지하수에 중금속을 스파이크한 오염수를 이용한 배치실험에서 중금속 제거율이 대체로 높게 나타났는데, 이러한 결과는 실제 지하수내 존재하는 중금속의 일부가 지하수내 부유물질이나 콜로이드들과 함께 존재하여, 소석회나 탄산칼슘이 응집제로 첨가되는 경우 응집/침전 효과에 의해 제거됨으로서 오염수로부터 중금속 제거율이 높게 나타나는 것으로 판단되었다.

3.2. 소석회와 탄산칼슘을 이용한 중금속 제거 칼럼 실험 결과

소석회의 칼럼실험과정인 Fig. 2에서 보이는 것처럼 교반 후 시간이 경과함에 따라 첨가한 소석회의 물리적인 혼합/침전과정에서 발생하는 공침현상에 의해 오염수내 중금속들이 오염수로부터 분리되었으며, 소석회를 이용한 칼럼 실험의 결과는 Table 4과 5에 나타내었다. 소석회를 첨가한 반응실험의 경우, 앞서의 배치실험결과와 같이 As는 1 wt.%의 소석회 첨가에 의해서 침전 30분 이후에 99%이상의 제거 효율을 나타내었다. Cd, Mn, Zn도 80-85%의 비교적 높은 제거효과를 나타내었으나, Pb의 제거 효율은 배치 실험의 결과와 같이 낮아 약 40%내외를 유지하였다. 침전 슬러지를 재활용하여 제거 실험을 실시한 결과도 As, Mn, Cd에 대해서는 침전 슬러지 재활용 2회까지 평균

Table 4. Results of column experiment with 1 wt.% Ca(OH)₂ for As, Cd, Mn, Pb and Zn removal.

Sample	As		Cd		Mn		Pb		Zn		pH	TDS (mg/L)
	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)		
Spike	0.44		0.11		3.30		2.10		1.14		2.26	865
1 wt.% Ca(OH) ₂	0.00		0.03		2.26		2.10		0.66		11.94	7.43×10 ³
Ca(OH) ₂ addition	0.00	99.3	0.02	80.6	0.61	81.4	1.15	45.5	0.18	84.4	12.03	7.43×10 ³
30min	0.00	99.3	0.02	83.9	0.60	81.9	1.34	36.4	0.15	86.5	12.23	7.31×10 ³
60min	0.00	99.3	0.02	83.9	0.61	81.4	1.40	33.3	0.17	85.5	11.98	7.36×10 ³
120min	0.00	99.3	0.02	83.9	0.61	81.4	1.40	33.3	0.17	85.5	11.98	7.36×10 ³
Spike	0.38		0.12		3.26		2.17		1.15		2.19	810
1st sludge	0.02		0.15		3.97		2.29		1.44		11.78	7.12×10 ³
30min	0.00	99.5	0.00	97.0	0.12	96.4	1.34	38.2	0.23	79.9	11.93	7.09×10 ³
60min	0.00	99.7	0.01	90.9	0.14	95.7	1.66	23.5	0.33	71.7	12.42	7.08×10 ³
120min	0.00	99.7	0.01	87.9	0.12	96.4	1.46	32.4	0.19	83.7	12.44	7.1×10 ³
Spike	0.37		0.11		3.32		2.10		1.14		2.32	810
2nd sludge	0.04		0.25		5.87		2.10		1.69		12.35	4.91×10 ³
30min	0.01	97.3	0.02	84.4	0.41	87.6	1.53	27.3	0.47	59.0	12.35	5.48×10 ³
60min	0.00	99.5	0.01	87.5	0.29	91.4	1.34	36.4	0.34	70.7	12.34	5.30×10 ³
120min	0.00	99.7	0.01	93.8	0.10	96.8	1.46	30.3	0.38	66.5	12.20	5.30×10 ³
Spike	0.40		0.11		3.26		2.29		1.17		2.19	830
3rd sludge	0.35		0.31		7.53		2.74		2.04		8.13	295
30min	0.16	60.7	0.03	7.42	1.21	63.0	0.51	77.8	0.22	81.3	7.50	279
60min	0.16	60.4	0.02	83.9	0.89	72.6	0.38	83.3	0.18	84.8	7.62	285
120min	0.16	61.2	0.02	83.9	0.91	72.0	0.38	83.3	0.20	83.1	7.98	285
Spike	0.36		0.11		3.25		2.23		1.16		2.19	827
4th sludge	1.05		0.40		8.09		4.33		2.69		2.85	340
30min	0.85	-	0.40	-	5.99	-	1.59	28.6	2.68	-	2.88	387
60min	0.87	-	0.40	-	5.53	-	1.21	45.7	2.67	-	2.87	382
120min	0.85	-	0.40	-	5.26	-	1.15	48.6	2.68	-	2.92	360

*'-': Removal efficiency is lower than 0.1%

Table 5. Results of sand column filtration with 1wt.% Ca(OH)₂ for As, Cd, Mn, Pb and Zn removal in column experiment.

	As		Cd		Mn		Pb		Zn		
	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	
1wt.% Ca(OH) ₂ addition	30min	0.00	100.0	0.01	94.6	0.02	99.3	0.32	84.7	0.05	95.5
	60min	0.00	100.0	0.00	96.4	0.03	99.2	0.66	68.5	0.10	91.1
	120min	0.00	100.0	0.01	94.6	0.04	98.8	0.58	72.5	0.02	98.5
1st sludge recycle	30min	0.00	100.0	0.01	95.2	0.02	99.6	1.50	34.8	0.28	80.8
	60min	0.00	100.0	0.01	93.2	0.02	99.5	1.39	39.4	0.38	73.9
	120min	0.00	100.0	0.01	93.2	0.02	99.5	1.50	34.8	0.49	66.2
2nd sludge recycle	30min	0.00	100.0	0.00	96.5	0.03	99.0	1.07	49.2	0.34	69.9
	60min	0.00	99.7	0.00	96.5	0.02	99.5	1.30	38.0	0.51	55.7
	120min	0.00	100.0	0.01	93.9	0.01	99.6	1.56	25.8	0.61	46.6
3rd sludge recycle	30min	0.12	69.4	0.00	100.0	0.04	98.8	0.00	100.0	0.00	99.7
	60min	0.10	74.9	0.00	100.0	0.03	99.1	0.00	100.0	0.00	99.9
	120min	0.11	73.6	0.00	100.0	0.04	98.7	0.00	100.0	0.00	99.8

Table 6. Results of column experiment with 1wt.% CaCO₃ for As, Cd, Mn, Pb and Zn removal.

Sample	As		Cd		Mn		Pb		Zn		pH	TDS (mg/L)
	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)	Con. (mg/L)	R.E. (%)		
Spike	0.59	0.02	0.02	3.16	2.16	2.16	1.22	1.22	2.50	1170.2	2.50	1170.2
	0.49	0.01	0.01	1.67	0.69	0.69	0.70	0.70	7.22	528.4	7.22	528.4
1wt.% CaCO ₃ addition	30min	0.34	41.8	0.00	100.0	0.10	38.3	0.10	95.5	57.0	7.25	621.4
	60min	0.36	38.8	0.00	100.0	0.00	37.9	0.00	100.0	58.0	7.28	630.8
1st sludge recycle	Spike	0.55	0.02	3.17	2.06	2.06	1.21	1.21	2.47	1125.1	2.47	1125.1
	0.73	0.02	0.02	2.99	2.35	2.35	1.15	1.15	7.35	583.4	7.35	583.4
2nd sludge recycle	30min	0.38	31.2	0.00	88.9	0.10	0.8	0.10	95.2	12.5	7.23	611.3
	60min	0.39	29.7	0.00	88.9	0.00	0.8	0.00	100.0	14.7	7.12	613.8
3rd sludge recycle	Spike	0.52	0.02	3.21	2.16	2.16	1.20	1.20	2.58	1314.2	2.58	1314.2
	0.78	0.03	0.03	3.16	3.14	3.14	1.38	1.38	7.12	592.3	7.12	592.3
1st sludge recycle	30min	0.33	36.2	0.01	66.7	0.10	-	0.10	95.5	-	6.98	595.5
	60min	0.36	31.2	0.01	72.2	0.10	-	0.10	95.5	-	6.98	599.3
2nd sludge recycle	Spike	0.47	0.02	3.22	2.16	2.16	1.21	1.21	2.65	1306.8	2.65	1306.8
	0.76	0.03	0.03	3.34	3.73	3.73	1.41	1.41	6.80	583.1	6.80	583.1
3rd sludge recycle	30min	0.38	18.5	0.01	26.3	0.29	-	0.29	86.4	-	6.73	571.3
	60min	0.44	5.7	0.01	26.3	0.29	-	0.29	86.4	-	6.76	569.4

* : Removal efficiency is lower than 0.1%

Table 7. Results of the column experiment with Ca(OH)₂ for real contaminated groundwater.

	Fe		Mn		pH	TDS (mg/L)
	Con. (mg/L)	R.F (%)	Con. (mg/L)	R.F (%)		
Real groundwater	34.55		22.39		6.53	1.18×10 ⁴
Supernatant (sfter precipitation)	1.1	96.8	0.09	99.6	12.17	1.43×10 ⁴
Sand column filtration	1.14	96.7	0.09	99.6	12.21	1.72×10 ⁴

90%이상의 높은 제거율을 나타내었으며, Zn에 대해서는 70%내외의 제거율을 나타내었다. 다만 Pb는 슬러지 재활용 3번째 실험을 제외하고는 약 30%의 낮은 제거율을 나타내었다. 상등액을 급속모래여과한 경우, As, Cd, Mn은 95%이상의 제거율을 나타내었다(Table 5). 소석회를 이용한 칼럼실험 결과, 오염수와 반응한 소석회가 물리적 공침에 의해 중금속을 제거하는 경우, 중금속별 제거율이 다르게 나타나며, 요구되는 소석회 첨가량이 달라, 오염지하수내 중금속별 단계적이고 체계적인 제거 공정실험이 필요할 것이라고 판단되었다. 소석회의 첨가로 오염수의 pH는 약 12까지 상승하였으나, 슬러지 재활용 3회부터는 약 7로 감소하였다. 처리수의 이러한 pH 감소는 중금속 제거율 감소 현상과 일치하여, 소석회를 이용한 중금속 제거과정에서는 오염수의 pH를 높게 유지하는 것이 매우 중요할 것으로 판단되었다.

탄산칼슘을 이용한 칼럼 실험 결과는 Table 6에 나타내었다. Cd와 Pb의 경우 제거 효율이 높아, 침전 후 30분 이내에 95%이상이 제거되었다. Zn은 57%의 제거율을 나타내었으며, As와 Mn은 제거율이 낮아 약 40%정도가 제거되었다. 침전 슬러지 재활용 실험에서는 Cd와 Pb는 재활용 횟수가 증가함에 따라 제거율은 낮아졌으나, 재활용 2회까지 지하수 생활용수 기준치 이하를 나타내었다. As, Mn, Zn은 슬러지 재활용에 따른 제거율이 매우 낮아 이들 중금속 제거에는 탄산칼슘 슬러지 재활용은 어려울 것으로 판단되었다. 탄산칼슘을 첨가하는 경우, 오염수의 pH는 6-7을 유지하였으며 TDS의 경우 플러킹 형성시킨 경우는 1000 mg/L 이상을 나타내었으나 침전이 이루어진 후에는 500-600 mg/L로 절반정도 감소하였다.

3.3. 소석회를 이용한 실제 중금속 오염 지하수 정화 칼럼실험 결과

울산광역시 울주군 온산화학단지 내에 위치한 △△ 폐기물매립장의 오염지하수를 대상으로 소석회 1%를 첨가하여 실시한 칼럼실험 결과는 Table 7에 나타내었다. 칼럼 실험결과 Fe 제거율은 96%, Mn 제거율은 99%이상을 나타내어, 1%의 소석회 첨가만으로 실제

오염 지하수로부터 Fe와 Mn을 효과적으로 제거할 수 있었다.

4. 결 론

매립장에서 유출되는 침출수에 의해 중금속으로 오염된 매립장 주변 오염지하수 정화를 위하여, 소석회와 탄산칼슘을 이용한 화학적 처리공정 실내실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 소석회와 탄산칼슘을 응집제로 이용하여 As, Cd, Mn, Pb, Zn으로 오염된 인공오염수로부터 중금속을 제거하는 배치 실험 결과, 소석회를 이용한 경우, As와 Mn의 제거 효율은 0.3 wt.% 첨가만으로 90% 이상을 나타내었으며, Cd와 Zn의 경우 0.5 wt.% 소석회 첨가 시 약 75-85%의 제거 효율을 나타내었다. 탄산칼슘을 첨가한 경우 소석회 첨가에서 제거율이 비교적 낮았던 Pb의 제거율이 매우 높게 나타나 0.1wt.%의 첨가만으로 거의 100%를 나타내었으며, Cd의 제거율도 소석회보다 높게 나타나 1.0 wt.% 첨가시 93% 이상의 제거율을 나타내었다.

(2) 중금속제거를 위한 대형 칼럼실험의 경우, As는 1 wt.%의 소석회 첨가에 의해서 침전 30분 이후에 99%이상의 제거 효율을 나타내었다. Cd, Mn, Zn도 80-85%의 높은 제거 효율을 나타내었으나, Pb의 제거 효율은 배치 실험의 결과와 같이 낮아 약 40% 내외를 유지하였다. 소석회 침전 슬러지를 재활용하여 중금속 제거 실험을 실시한 결과도 As, Mn, Cd, Zn에 대해서는 높은 제거율을 나타내어 침전 슬러지의 재활용이 가능할 것으로 판단되었다.

(3) 탄산칼슘을 응집제로 이용한 칼럼 실험에서는, Cd와 Pb의 제거 효율이 높아, 침전 후 30분 이내에 95% 이상이 제거되었다. Zn은 57%의 제거율을 나타내었으며, As와 Mn은 제거율이 낮아 약 40%정도만 제거되었다. As, Mn, Zn은 침전 슬러지 재활용의 제거율도 매우 낮아, 이들 중금속 제거를 위한 탄산칼슘 슬러지의 재활용은 어려울 것으로 판단되었다.

(4) Fe와 Mn의 농도가 매우 높은 실제 오염지하수를 대상으로 1%의 소석회를 이용하여 제거하는 칼럼

실험 결과, 두 원소 모두 96% 이상의 제거율을 나타내었다.

사 사

이 논문은 2004년도 한국과학재단의 지원 (R05-2003-000-10869-0)에 의하여 연구되었음. 본 논문을 세심하게 심사하여준 부산대학교 함세영 교수님과 지질자원연구원 이평구 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- 구자공, 윤석표 (1993) 불량매립지에서의 지하수 오염 특성과 환경오염 방지 방안. KGS '93 Conference of Environmental Geotechniques and Reclamation, p. 28-44.
- 김동우, 박성원, 이재영, 이평구 (2001) 불량폐기물 매립지의 오염에 관한 고찰. 한국지하수토양환경학회지, 6권, p. 31-38.
- 박영구, 박준석, 홍성주 (2004) 소석회를 이용한 광산폐수 처리. 한국폐기물학회, 춘계학술연구회 발표논문집, p. 531-534.
- 방미란, 임봉수, 배병욱 (1998) 고탁도시 소석회 투입방법에 따른 정수장 응집제의 효율 평가. 대한상수도학회지, 12권, p. 107-117.
- 손호웅, 우남철, 김지수, 성익환, 이대하, 정교철, 함세영, 이희석 (2000) 응용지하수학. 시그마프레스, p. 494.
- 송나인, 김인수, 이민희 (2004) 무기응집제를 이용한 중금속오염 지하수 정화 연구. 지질학회지(심사중).
- 오석영, 전효택 (1996) 폐기물 매립지 주변의 지하수 오염과 오염물질의 지연 특성. 한국지하수토양환경학회지, 3권, p. 37-49.
- 이기화, 권병두, 정호준 (1996) 난지도 매립장 전기·전자 탐사. 한국지하수토양환경학회지, 3권, p. 95-100.
- 이민희, 이정산, 차종철, 최정찬, 이정민 (2004) 토양 세척법과 석회를 첨가한 토양 안정화 공법을 이용한 폐광산주변 비소 오염 토양 및 하천 퇴적토 복원. 자원환경지질, 37권, p. 121-131.
- 이정식, 변종각, 조광명 (1994) 도시쓰레기 매립지 침출수의 오존처리. 한국물환경학회. 1994년도 학술연구발표회 요지집, p. 49-55.
- 이재원, 김재영, 박준범 (1999) 매립장 침출수로 오염된 지반 정화를 위한 반응벽체 기법 소개. 대한토목학회지, 47권, p. 33-47.
- 정상용, 권해우, 이강근, 김윤영 (1997) 부산 석대 폐기물 매립지 일원의 수질 환경. 한국지하수토양환경학회, 4권, p. 175-184.
- 정하익, 김상근 (2000) 폐기물매립지 주변 토양 및 지하수 오염도 조사 및 분석. 한국지하수토양환경학회, 2000년 춘계학술발표회, p. 116-119.
- 한국지하수토양환경학회 (2003) 유산폐기물매립장 침출수 누출원인조사 연구용역보고서, pp 216.
- 환경부 (1997) 수처리제 개발(국내수질에 적합한 고분자 응집제), pp 113.
- 환경부 (2003a) 2002 기준 전국 사용종료 매립지 현황, pp 56.
- 환경부 (2003b) 2003년 생활폐기물 처리시설 설치계획, pp 280.
- 환경부 (2004) 2003 기준 전국 사용중인 생활폐기물매립 시설 설치 운영현황, pp 78.

2005년 2월 8일 원고접수, 2005년 5월 12일 게재승인.