

## Fe-loaded zeolite로 충전된 투수성 반응벽체를 이용한 지반 내 Cd과 Cr(VI)의 동시제거: 모형 토조 실험

### Simultaneous Removal of Cd and Cr(VI) in the Subsurface Using Permeable Reactive Barrier Filled with Fe-loaded Zeolite: Soil Box Experiment

이 성 수<sup>1</sup> Rhee, Sung-Su  
이 승 학<sup>2</sup> Lee, Seung-Hak  
박 준 범<sup>3</sup> Park, Jun-Boum

#### Abstract

A pilot-scale model test was performed to estimate the availability of new material, Fe-loaded zeolite, as the filling material in permeable reactive barrier (PRB) against the contaminated groundwater with both Cd and Cr(VI). Aquifer was simulated by filling up a large scale soil tank with sands, and mobilizing the water flow by the head difference of water level in both ends of the tank. Then, the mixture of concentrated Cd and Cr(VI) solution was injected into the aquifer to form a contaminant plume, and its behavior through Fe-loaded zeolite barrier was monitored. The test results showed that Fe-loaded zeolite barrier successfully treated the contaminant plume containing both Cd and Cr(VI) and that the immobilized contaminants in the barrier were not desorbed or released. The results indicated that the Fe-loaded zeolite could be a promising material in PRBs against the multiple contaminants with different ionic forms like Cr(VI) and Cd.

#### 요 지

반응벽체 기법을 이용해 지하수내 6가 크롬( $\text{CrO}_4^{2-}$ )과 카드뮴( $\text{Cd}^{2+}$ )을 동시 제거할 경우, 새로운 반응물질인 Fe-loaded zeolite의 적용성을 평가하기 위해 파일럿 규모의 모형 토조 실험을 수행하였다. 이를 위해, 폭 2.5m, 길이 3m, 높이 1.3m의 크기를 가지는 토조를 모래로 채우고, 양단에 수두차를 주어 지하수 흐름을 유도함으로써 대수층을 묘사하였다. 이후 6가 크롬과 카드뮴을 포함한 용액을 대수층에 주입하여 오염운을 발생시키고, 지속적인 모니터링을 통해 Fe-loaded zeolite로 구성된 모형 반응벽체의 오염운 정화거동을 관찰하였다. 실험결과, Fe-loaded zeolite로 구성된 반응벽체는 6가 크롬과 카드뮴 오염운을 효과적으로 제거하며, 반응벽에 고정화된 오염물은 재탈착/유출되지 않음을 알 수 있었다. 이를 통해 Fe-loaded zeolite는, Cr(VI)과 Cd과 같이 서로 다른 이온 형태를 가진 무기 오염 물질로 동시에 오염된 지하수 정화에 반응벽체를 적용함에 있어 효과적인 충전물질이 될 수 있다는 결론을 도출하였다.

**Keywords** : Fe-loaded zeolite, Heavy metal, Permeable reactive barrier, Simultaneous removal, Soil box experiment

1 정회원, 서울대학교 공학연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Seoul National Univ. Engrg. Research Institute)

2 정회원, 한국과학기술연구원 환경본부 물환경연구센터 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Water Environment Center, Environment Division, Korea Institute of Science and Technology)

3 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environ. Eng., Seoul National Univ., junbpark@snu.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

크롬은 금속제련 과정이나 합금제조 공정에 사용되는 중금속으로 도시 산업화 지역의 지하수에서 주로 발견되는 음이온성 무기 오염물질이다(Melitas et al. 2001). 크롬은 일반적인 지하수 조건에서 6가 상태( $\text{CrO}_4^{2-}$ )로 존재하고 인체 내로 흡수될 경우 간 및 신장장애, 내출혈, 호흡장애 등을 유발할 수 있어 미환경청(U.S EPA)은 크롬에 대한 먹는 물 수질 기준을  $0.05\text{mg/L}$  이하로 규정하고 있다. 카드뮴( $\text{Cd}^{2+}$ )은 금속 제련 공정에 사용되는 중금속으로 도시 산업화 지역의 지하수에서 주로 발견되는 양이온성 무기 오염물질이다. 카드뮴은 인체 내로 흡수될 경우 폐 및 신장 기능 장애 등을 유발할 수 있는 독성물질로 미환경청은 카드뮴의 먹는 물 수질 기준을  $0.005\text{mg/L}$  이하로 규정하고 있다. 크롬과 카드뮴은 그 사용 용도가 유사하기 때문에 도시 산업화 지역의 중금속 처리 시설에서 함께 배출될 수 있고, 따라서 이들에 의한 지하수의 동시 오염 가능성이 매우 높다고 할 수 있다. 실제로 뉴욕의 롱아일랜드 중금속 생산 공장에서 발생한 크롬과 카드뮴이 주변 대수층을 오염시키고 지하수를 통해 3000ft의 거리를 이동하였다는 사실이 보고되기도 하였다(Geophysics study committee et al., 1984).

반응벽체(Permeable Reactive Barriers, PRBs) 기법은 최근 세계적으로 가장 큰 관심을 모으고 있는 지하수 현장정화기술 중 하나이다. 반응벽체 기술의 적용에 있어 가장 중요한 사항은 지하수 내 오염물질의 특성을 고려하여 적절한 반응성을 가지는 충전 물질을 선택하는 일이다. Lee et al.(2004)은 지하수 내에서 서로 다른 이온 형태로 존재하는 중금속 오염물을 반응벽체 기법으로 효과적으로 동시 제거하기 위해 Fe-loaded zeolite라는 새로운 반응물질을 개발한 바 있다. Fe-loaded zeolite는 카드뮴과 같은 양이온성 무기 오염물질에 대해 이온 교환능을 가지는 제올라이트를 기본물질로 하고, 이에 6가 크롬 등 음이온성 무기 오염물질에 환원능을 가지는 영가 철( $\text{Fe}(0)$ )을 화학적으로 결합시킨 물질로, 회분식 실험을 통해 카드뮴과 6가 크롬의 동시제거에 탁월한 효과가 있음이 보고된 바 있다(이승학 외, 2004).

본 연구에서는 대형 토조를 이용해 3차원 지하수 흐름을 모사하고자 하였고 지하수를 따라 흘러가는 오염원이 반응벽체를 통과하면서 그 농도가 저감되어 정화되는 양상을 분석하고자 하였다. 또한 실제 현장에서 가

장 많이 시공되고 있는 반응벽체 형태인 'Funnel and Gate' 반응벽체의 오염물질 제거 효율을 검토하고자 하였다. 이를 위해 Fe-loaded zeolite로 충전된 반응벽체를 대형 토조에 설치하고 3차원 지하수 흐름을 구현한 이후, 카드뮴과 6가크롬을 동시 주입하여 3차원 오염운을 형성하고 Fe-loaded zeolite로 충전된 "Funnel and Gate" 반응벽체로 통과시키며 오염 지하수의 동시 정화 효과를 평가하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 Fe-loaded zeolite의 제작

본 실험에 사용된 Fe-loaded zeolite의 제작은; 1) 원재료인 제올라이트 표면에 붙어있는 분진을 제거하기 위한 세척 과정, 2) 이가 철( $\text{Fe}(II)$ ) 용액 내에서 제올라이트를 교반하여 이가 철이 제올라이트 구조 내로 흡수되도록 유도하는 과정, 3) 제올라이트 표면에 남은 이가 철 용액을 린스하는 과정, 4)  $\text{NaBH}_4$  용액과 2가 철을 흡수한 제올라이트를 교반하여 이가 철을 영가 철로 환원시키는 과정, 5) 물질 표면에 존재하는 여분의 화학용액을 린스하는 과정, 6) 물질 내에 발생시킨 영가 철의 산화를 최소화하기 위해 진공 상태에서 건조하는 과정을 포함한다(이승학 외, 2004).

파일럿 규모의 모형 토조 실험에 필요한 대량의 Fe-loaded zeolite는 대형 제조 장치를 이용해 제작하였다. 이 장치는 Fe-loaded zeolite의 제작에 필요한 일련의 과정들을 연속적으로 진행할 수 있게 설계되었으며 1회 제작을 통해 약 50kg의 물질을 생산할 수 있다. 사용된 제올라이트는 포항 일대의 W사에서 구입하였으며 반응벽체 내부의 충분한 투수성을 확보하기 위해 3~7mm 크기의 입경을 가지는 재료를 사용하였다. 제조 과정 중에 사용된  $\text{FeCl}_2$  및  $\text{NaBH}_4$ 는 공업용 순도를 가진 화학물질을 사용하였고, 이를 통해 제작된 Fe-loaded zeolite는 실험실 규모에서 제작된 물질과의 비교 실험을 통해 그 반응성이 크게 떨어지지 않음을 확인하였다.

### 2.2 실험 장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 모형 토조의 모식도이다. 토조는 크게 5부분으로 이루어져 있는데, Fig. 1(a)의 왼쪽에서부터 유입수조부(inlet-water section), 모래 토조

부(sand section), 유출수조부(outlet-water section), 임시 저장조(temporary-water storage section), 그리고 순환용 저장기(feedback-water reservoir)가 그것이다. 유입/유출 수조부와 모래 토조부를 포함하는 토조 본체는 토압 및 수압에 견디기 위해 섬유강화 플라스틱(fiber-reinforced plastic)으로 제작되었고 그 외부를 동일 재질의 빔으로 보강하였으며, 내부는 화학적인 흡착과 기타 화학반응을 최소화하기 위해 흡착과 부식에 내구성을 가지는 도료로 피복하였다. 모래 토조부의 내부 크기는 너비 2.5m, 길이 3m, 깊이 1.3m이고 토조 본체 내부의 크기는 너비

2.5m, 길이 4m, 깊이 1.3m이다.

모래 토조부 내부의 지하수 흐름은 유입수조부와 유출수조부의 수두 차를 일정히 유지하여 형성시켰다. 이를 위해 유입수조부에 전자 센서를 설치하여 일정한 수위를 유지하였으며 유출수조부에는 개폐가 가능한 밸브를 높이별로 설치하여 일정한 수위를 유지시켰다. 모래 토조부로의 지하수 흐름을 균일하게 하고 유출면에서의 모래 유실을 방지하기 위해 토조부와 수조주의 경계면에 자갈층을 설치하였으며, 모래와 자갈의 경계면에서는 스테인리스 망(1.5 X 1.5mm 크기)을 설치하였

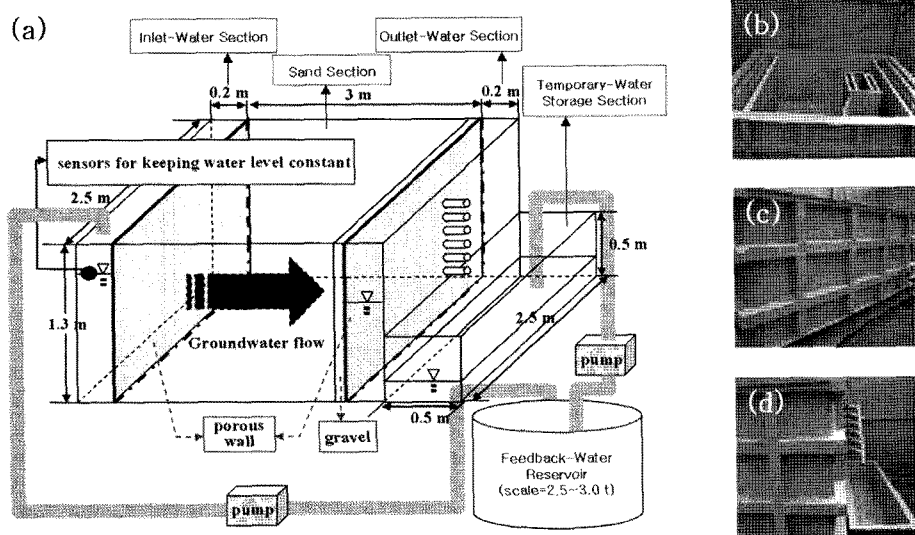


Fig. 1. Pilot-test tank used in this study: (a) schematic diagram of overall facility, (b) plan view before filling sands, (c) side view, (d) effluent view

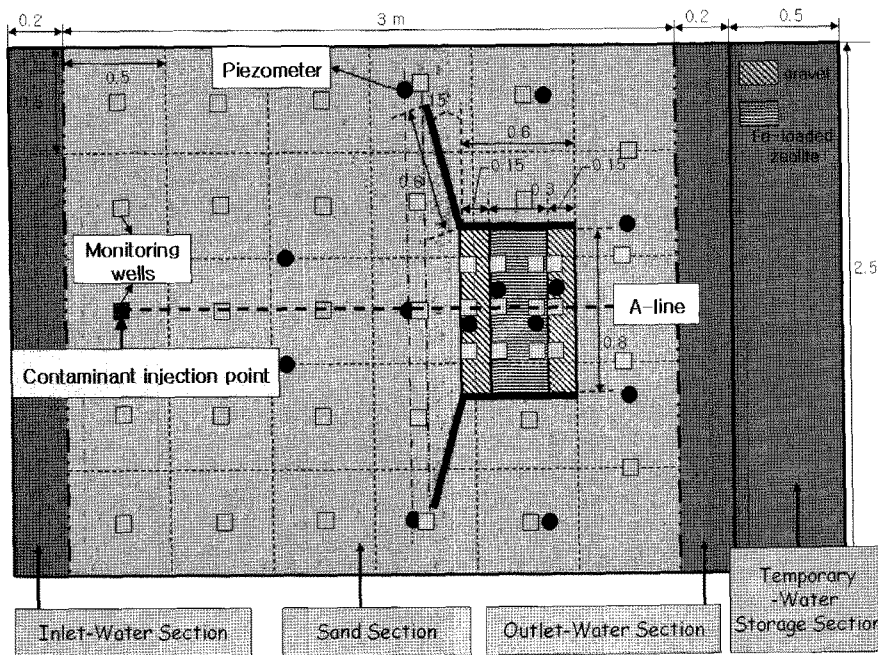


Fig. 2. Locations of permeable reactive barrier and monitoring wells in soil box

다. 모래 토조부로부터 나오는 유출수는 임시 저장조에 저장한 뒤, Fe(total), Cd, Cr(total)의 농도를 측정하여 측정 한계치 이하인 경우 순환용 저장기에 주입해 재사용하였다.

Fig. 2는 모래 토조부 내에 설치된 반응벽체와 관측정의 위치를 나타낸다. 본 실험에 사용된 반응벽체는 'Funnel and Gate' 형식으로 'Funnel'과 'Gate'의 틀은 섬유강화 플라스틱으로 제작하였고 토조부 바닥면과 반응벽체 사이는 실리콘 재질의 접착제로 접합시킨 뒤 흡착과 부식을 막아주는 도료로 피복하였다. 'Funnel'의 각도와 길이는 유입되는 지하수의 유속/유량 및 'Gate'로 빠져나가는 지하수의 유속/유량에 따라 일반적으로 설계하게 된다(Painter, 2005). Starr와 Cherry(1994)는 'Funnel' 간의 각도가 180° 일 때 'Funnel and Gate' 형식의 반응벽체가 가장 많은 영역의 지하수를 처리할 수 있지만 지하수의 유향이 변할 경우를 대비하여 180° 보다 작은 각을 가지게 설계해야 한다고 제안하였다. 현재까지의 연구에서는 'Funnel' 간의 최적각이 제시되어있지 않아 본 연구에서는 150°의 각을 가지도록 설계하였고, 'Funnel'의 길이는 오염운을 포획할 수 있도록 60cm로 설계하였다. 'Gate'의 경우 Fe-loaded zeolite가 위치할 층 앞뒤로 자갈층을 두어 반응구간 내로의 지하수 유입과 유출을 원활히 하고, 유입농도가 상이한 오염운이 반응구간으로 진입하기 전에 균질하게 섞일 수 있도록 하였다. 또한, 기존의 회분식 실험에서 보고된(이승학 외, 2004), Fe-loaded zeolite가 Cr(VI)을 완전히 제거하는데 필요한 20 시간의 반응시간을 확보하기 위해, 계획된 지하수 유속(0.3m/day)을 고려하여 Fe-loaded zeolite 층의 두께를 30cm로 설정하였다.

Fig. 3은 모래 토조부 내에 설치된 수두 측정을 위한 관측정과 오염물질의 농도 측정을 위한 관측정을 나타낸다. 수두 측정을 위한 관측정은 피에조미터(piezometer)

의 삽입을 용이하게 하기 위해 내경이 2.5cm 인 PVC 관으로 제작하였으며, 하단으로부터 0.1m 구간까지 0.1mm 너비의 슬릿을 내어 모래 토조부 바닥으로부터 0.4m 높이에 설치하였다(Fig. 3(a)). 오염물질의 농도 측정을 위한 관측정은 오염물질 흡착을 최소화하기 위해 내경이 1mm 이하인 테플론 관을 단단한 파이프(내경 3.3cm)에 깊이별로 부착하여 지면으로부터 0.3, 0.6, 0.9m 깊이의 지하수 샘플을 채취할 수 있도록 설치하였다(Fig. 3(b))

### 2.3 실험 방법

토조 내부의 정해진 위치에 모래, 자갈 및 Fe-loaded zeolite를 채워넣었다. 반응벽체 내부에는 Fe-loaded zeolite를, 외부에는 모래를 각각 채워넣었으며 자갈을 지하수의 유입/유출부에 설치하여 벽체 전체로의 균질한 지하수 흐름을 유도하였다. 모든 매질들은 동일한 높이를 가지도록 바닥면에서 0.3m 높이까지 모래와 자갈로 채우고, 관측정을 미리 정해진 지점에 위치시킨 뒤 1.2m 높이까지 모래와 자갈을 마저 채웠다. 채워진 매질이 동일한 다짐 정도를 가지도록 일정 높이로 채운 후 동일한 다짐에너지를 주는 과정을 반복하였다. 이때 사용된 모래는 입경 0.1~2.5mm, 비중 2.61g/cm<sup>3</sup>이었으며, 정수 두 투수 시험결과 투수계수 1.4 X 10<sup>-2</sup>cm/s였다. 자갈의 경우 입경은 5~11mm이고 투수계수는 0.1cm/s였다. 모래 토조부를 채우는 과정 동안 'Gate' 내부의 반응구간에 케이슨(caisson)을 두어 틀 내로의 재료 유입을 막고 'Gate' 내부에 설치된 스테인리스 망의 훼손을 방지하였다. Fig. 4는 조성된 모래 토조부의 모습을 보여준다. 이후 반응구간의 케이슨 내부에 Fe-loaded zeolite를 1.2m 높이까지 포설하고 케이슨을 제거한 뒤 공기의 유입을 최소화하기 위해 반응벽체 상부에 비닐 시트를 씌웠다.

토조 조성 후, 유입수조부에 수돗물을 채워 토조부의

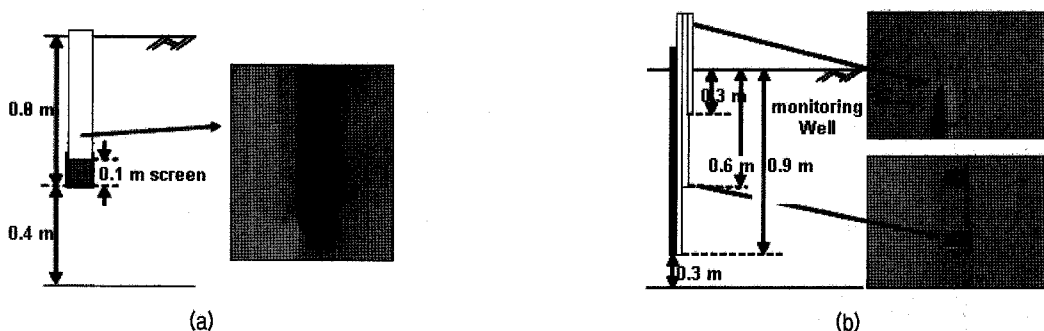


Fig. 3. Schematic diagrams of: (a) monitoring well for water level and (b) monitoring well for contaminant

포화를 시작하였다. 이때 모래 토조부 내 지하수의 평균 침투 유속을 0.3m/day로 형성시키기 위해, 모래의 투수계수를 고려하여 유입부의 수위는 바닥면으로부터 1.06~1.08m로, 유출부의 수위는 1.05m로 설정하였다. 이후 평균 침투 유속은 시간당 유출수량을 주기적으로 측정하여 확인하였다. 모래 토조부 내 지하수 흐름을 정상 상태(steady-state)로 유지하기 위해 8일 동안의 포화 과정을 거쳤고, 주기적으로 지하수 수위를 조사하였다.

모래 토조부의 포화가 완료된 후 점 오염원(point source contamination)에 의한 오염 현상을 묘사하기 위해 Fig. 3에 표시된 관측정 위치의 0.6m 깊이에서 3mL/min의 유량으로 Cr(VI)과 Cd를 주입하였다. 초기 4일 동안은 1mM의 Cd과 1mM의 Cr(VI)을 포함하는 오염액을 주입하였으며, 5일째부터는 10mM의 Cd과 1mM의 Cr(VI)을 이후 2주간 주입하였다. 오염물질 주입 기간 동안 연동식 펌프를 이용하여 각 관측지점으로부터 약 10mL의 지하수 샘플을 채취하였다. 채취된 지하수 샘플에 대해 원자 흡광 광도계(AAS, Vario 6®, Analytik Jena AG.

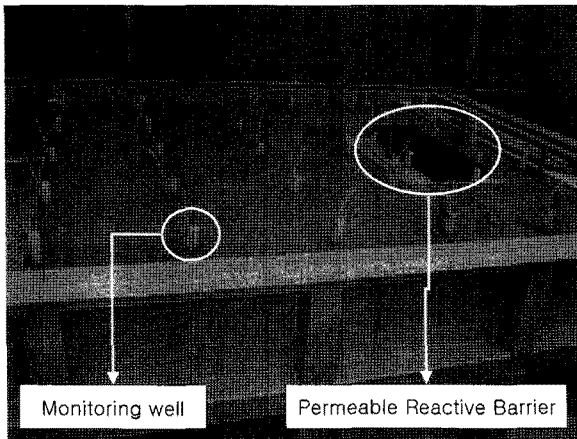


Fig. 4. Soil box after sand/gravel filling and monitoring well installation

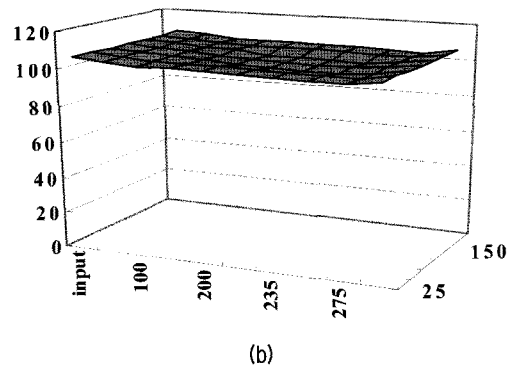
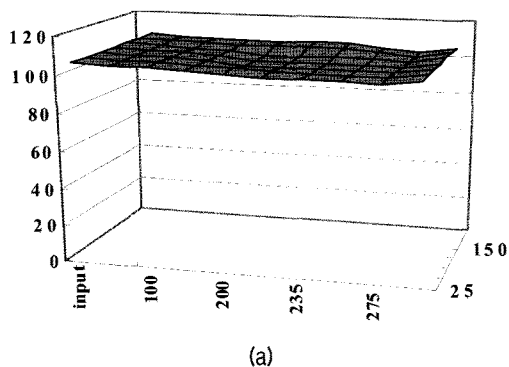


Fig. 5. Distribution of groundwater level in the tank: (a) on the 2nd day, (b) on the 22nd day after starting saturation

Germany)를 이용해 Cd과 Cr(total)의 농도를 측정하였고 유출수의 pH를 측정하였다.

오염물질 주입 시점으로부터 16일이 지난 다음 오염물질의 주입을 멈추고 모형 토조 내에 형성된 오염원의 거동을 이후 2주간 관측하였다. 또한, 반응벽체에 흡착된 오염물질의 재탈착 가능성을 확인하기 위해 유출수에서의 오염물질 농도를 지속적으로 관측하였다.

### 3. 결과 및 토의

시간당 유출량을 측정하여 모형 토조 내 평균 지하수 유속을 계산한 결과, 0.37m/day(범위: 0.25~0.48m/day)임을 알 수 있었다. Fig. 5는 포화 2일째 및 22일째 토조 내부에 형성된 지하수위 측정결과를 나타낸다. 이를 통해 전체 실험 기간을 걸쳐 지하수 수위는 일정하게 유지됨을 확인하였다. 또한 전체 실험 기간을 걸쳐 유출수의 pH는 6정도로 거의 일정한 것으로 나타났다.

오염물질 주입 후 2일이 지난 시점에서도 Cd의 농도는 모든 관측지점에서 관찰되지 않았다. 이는, 모형 토조를 채운 모래의 Cd 실내흡착실험을 통해 토조 내 모래가 Cd을 일정량 흡착하기 때문임을 알 수 있었다. 따라서 실험 5일째부터는 카드뮴의 농도를 10mM로 증가시켜서 1mM의 Cr(VI)과 함께 주입하였다.

Fig. 6의 (a)와 (c)는 Fig. 3의 A선을 따라 오염물질 주입지점으로부터 0.5m 떨어진 관측정의 0.3m 깊이에서 측정한 Cr(VI)과 Cd의 농도 변화를 나타내고, (b)와 (d)는 반응벽체 유입 직전 관측정의 0.3m 깊이에서 측정한 Cr(VI)과 Cd의 농도 변화를 나타낸다. 이를 통해 펄스(pulse) 형태로 동시에 주입된 Cr(VI)과 Cd이 모래 토조부 내 지하수를 따라 반응벽체 방향으로 흘러가고 있음이 확인되었고 Cd은 Cr(VI)에 비해 이동 속도가 느림

을 알 수 있었다.

Fig. 7과 8은 오염물질 주입 후 12일이 지난 시점과 주입을 멈춘 후 17일(오염물질 주입 후 34일)이 지난 시

점에서 Cr(VI)과 Cd의 토조 내 수직 및 수평 분포를 각각 나타낸다. 이를 통해 동시에 주입된 Cr(VI)과 Cd은 오염원의 형태로 지하수에 존재하고 반응벽체로 이동

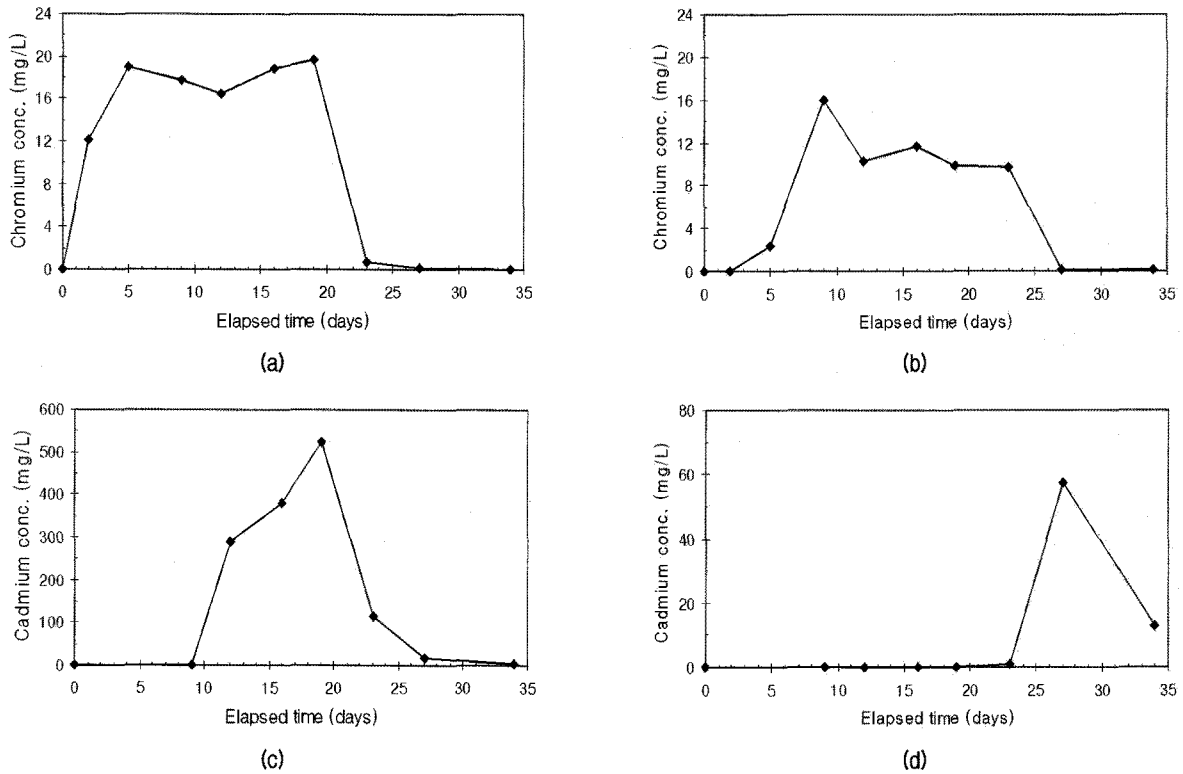


Fig. 6. Concentrations of contaminants through A-line (Fig. 3) at 0.3 m depth: (a) Cr(VI) concentration at 0.5 m away from contaminant injection well, (b) Cr(VI) concentration at 1.5 m away from contaminant injection well (in front of PRB), (c) Cd concentration at 0.5 m away from contaminant injection well, (d) Cd concentration at 1.5 m away from contaminant injection well (in front of PRB)

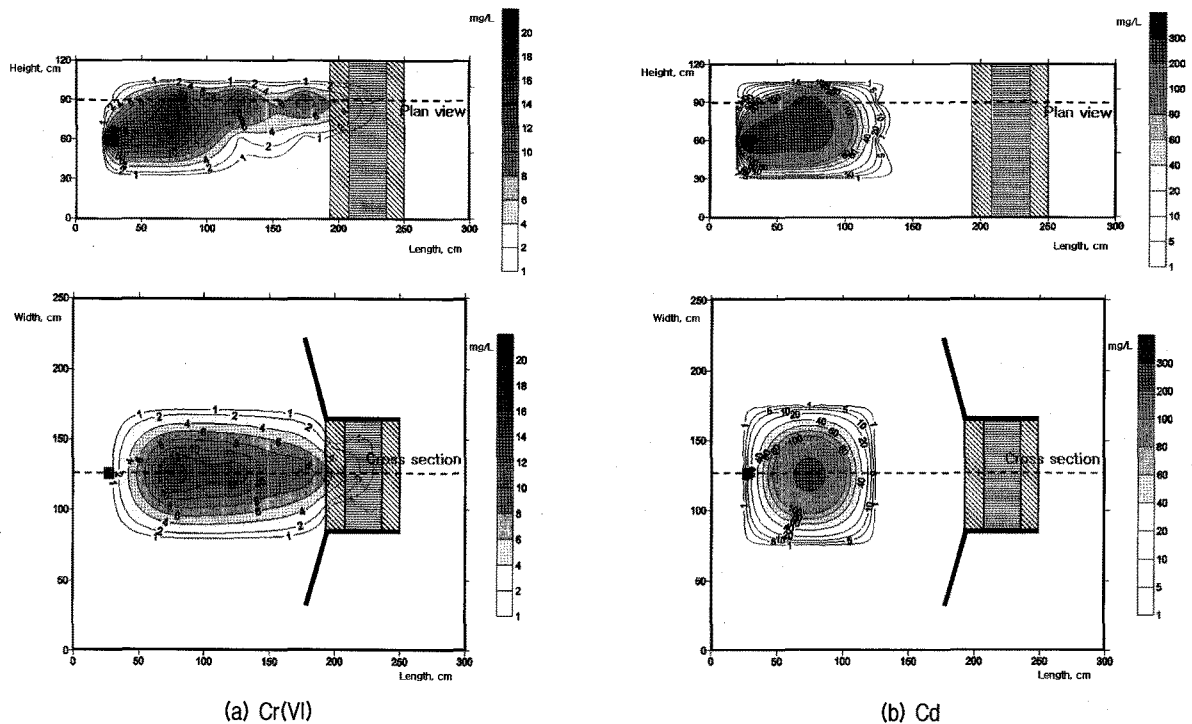


Fig. 7. Cr(VI) and Cd distribution on the 12th day after contaminant injection

됨을 알 수 있다. 또한 실험 종료 시점인 34일째에는 토조 내 형성된 Cr(VI) 오염원이 완전히 제거되었음을 확인할 수 있었다. Cd의 경우, 느린 이동속도로 인해 실험 종료시점에도 최대 10mg/L의 농도가 대수층(모래 토조부)에서 검출되었으나 주입을 통해 형성된 Cd 오염원의 97% 이상이 반응벽체 내로 유입되며 제거되었음을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 Fig. 2의 A선을 따라, 'Gate' 구간의 0.3m 깊이에서 측정된 Cr(VI)과 Cd의 농도 변화를 나타낸다. 반응벽체 내 자갈층으로 유입되는 Cr(VI)의 농도는 오염물질 주입 후 12일째 6mg/L로부터 16일째 8mg/L로 증가하였고 오염물질 주입을 멈춘 후 7mg/L(오염물질 주

입 후 19일째)에서 검출 한계 이하(오염물질 주입 후 34일째)로 감소하였다. 반응벽체로 유입된 Cr(VI)은 반응벽체의 Fe-loaded zeolite층을 지나면서 그 농도가 감소되어 유출부 자갈층에서는 Cr(VI)의 농도가 검출 한계치 이하로 나타났다. 이는 Cr(VI)이 Fe-loaded zeolite 층을 지나면서 Fe-loaded zeolite 내에 존재하는 영가 철에 의해 환원적 침전 반응을 거쳐 제거되기 때문이다(이승학 외, 2004). Cd은 오염물질 주입 기간 동안은 벽체내로 유입되지 않았으나 오염물질 주입을 멈춘 후 20mg/L(오염물질 주입 후 19일째)에서 8mg/L(오염물질 주입 후 34일째)의 초기농도로 유입되었으며, 유입된 Cd은 Fe-loaded zeolite 층을 지나면서 그 농도가 감소함을 알 수 있었다.

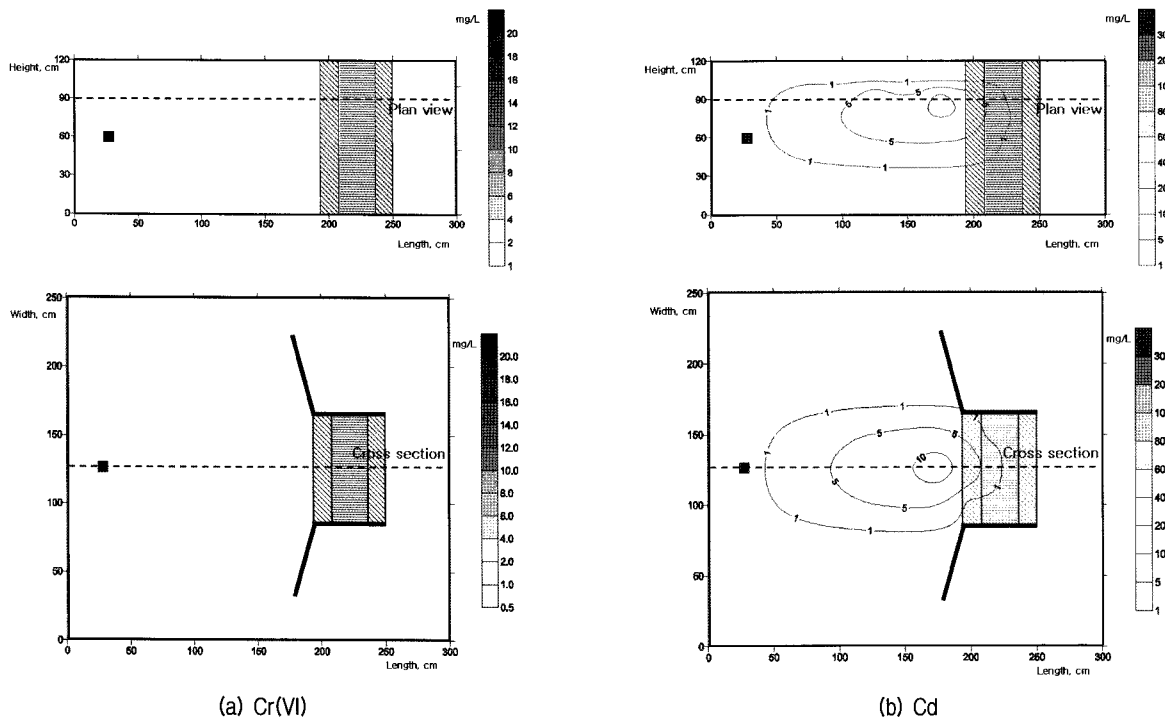


Fig. 8. Cr(VI) and Cd distribution on the 17th day after stopping contaminant injection (on the 34th day after contaminant injection)

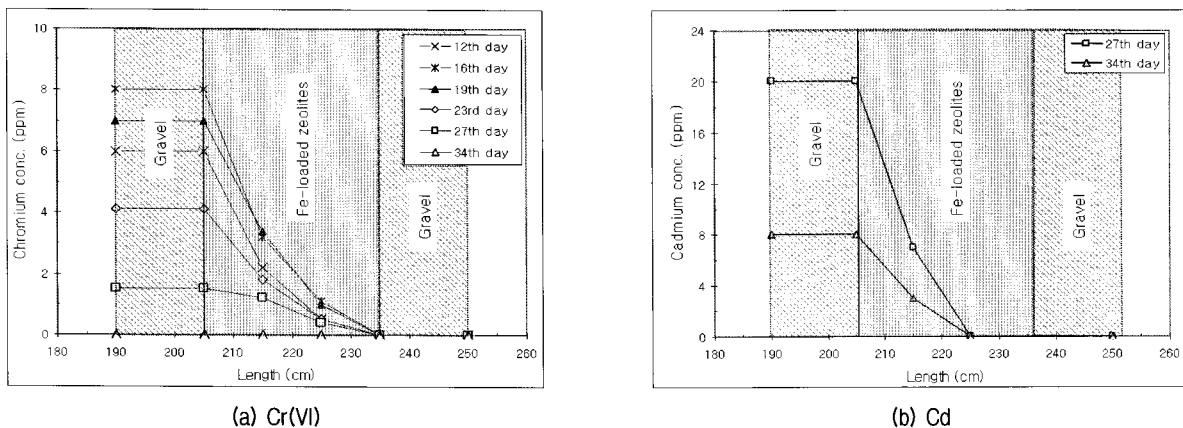


Fig. 9. Concentration of chromium and cadmium in the barrier at 0.3 m depth

이는 Fe-loaded zeolite가 가진 양이온 교환능에 의해 유입된 지하수내 Cd가 흡착 제거되기 때문으로 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

파일럿 규모로 제작된 Fe-loaded zeolite 반응벽체를 이용해 지하수 상에 양이온 형태로 존재하는 중금속 오염물질인 Cd와 음이온 형태로 존재하는 중금속 오염물질인 Cr(VI)을 동시 제거하는 모형 토조 실험을 수행하였다. 실험 결과, 점오염원 형태로 일정 시간 동안 동시에 주입된 Cr(VI)과 Cd은 토조 내 3차원 지하수 흐름을 따라 오염원의 형태로 퍼진 후 “Funnel & Gate” 형태의 반응벽체를 통과하면서 흘러들어가는 양상이 확인되었다. Fe-loaded zeolite로 충전된 반응벽체로 흘러들어간 Cr(VI)과 Cd은 그 농도가 모두 검출 한계치 이하의 값을 가짐이 확인되었고 시간이 지남에 따라 토조 내에 존재했던 Cr(VI)과 Cd은 지하수를 따라 반응벽체로 흘러들어가며 반응하여 30일 이후에는 모두 사라짐이 확인되었다. 따라서 본 연구를 통해 기존 회분식 실험이나 컬럼 실험에서 확인할 수 없었던 3차원 지하수 이동과 오염물질의 오염원 형태의 이동 양상을 확인할 수 있었으며 Fe-loaded zeolite로 충전된 “Funnel & Gate” 형태의 반응벽체의 효율을 직접적으로 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 서울대학교 SIR BK21(안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단의 연구비 지원 및 2007년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2007-D00254)으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참고 문헌

1. 이승학, 이광현, 명동일, 박준범 (2004), ZanF를 이용한 카드뮴(Cd)과 6가 크롬(VI)의 동시 제거, 2004년 한국지하수토양환경학회 총회 및 춘계학술발표회, 한국지하수토양환경학회, pp.143-146.
2. Geophysics study committee (1984), Geophysics research forum, Commission on physical sciences, mathematics, and resources, National Research council, Groundwater contamination, National Academy Press, Washington D. C.
3. Lee, S., Lee, K., and Park, J. (2004), “Pb and Cr(VI) removal using Fe-loaded zeolite”, *Korean Society of Environ. Eng.*, Vol.9, No.6, pp.249-255.
4. Melitas, N., Moscos, O. C., and Farrel, J. (2001), “Kinetics of soluble chromium removal from contaminated water by zerovalent iron media : corrosion inhibition and passive oxide effects”, *Environ. Sci. Technol.*, Vol.35, pp.3948-3953.
5. Painter, B. D. M. (2005), “Optimisation of permeable reactive barrier systems for the remediation of contaminated groundwater”, Ph.D. Thesis, Lincoln University.
6. Park, J., Lee, S., Lee, J., and Lee, C. (2002), “Lab scale experiments for permeable reactive barriers against contaminated groundwater with ammonium and heavy metals using clinoptililite”, *J. Hazard. Mater.*, Vol.95, pp.65-79.
7. Starr, R. C. and Cherry, J. A. (1994), “In situ remediation of contaminated groundwater: the funnel and gate system”, *Ground Water*, Vol.32, pp.465-476.

(접수일자 2010. 6. 22. 심사완료일 2010. 9. 7)