

투수성 반응벽에 의한 오염지하수 복원효과 분석

Clean-up of Contaminated Groundwater by Permeable Reactive Barrier

정하익¹⁾, Ha-Ik Chung, 김상근²⁾, Sang-Keun Kim

¹⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Dept. of Civil Eng, KICT

²⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Dept. of Civil Eng, KICT

SYNOPSIS : It has become interested in the concept of permeable barriers for the containment and/or destruction of contaminated groundwater. The purpose of these trench-like barriers is to provide in situ capture and possibly destruction of the contaminant while preserving groundwater flow to uncontaminated zones. For instance, a trichlorethylene(TCE) plume may be contained by a permeable in which reactive iron reduces TCE to ethylene and ethane, compounds which can be easily biodegraded. The objective of this research is to examine the feasibility of using zero-valent iron as a clean-up media in permeable reactive barrier system. A series of laboratory column tests are performed. The concentration of influent and effluent water and the rate of clean up are analysed from these test results. The experimental result shows that the majority of the contamination in groundwater is removed in the reactor. And it shows the corresponding increase in the concentration of chloride ions through the reactor. Results from this study indicate that permeable reactive barrier containing admixtures of zero-valent iron and other materials can effectively clean up groundwater contaminated with organic compounds.

Key words : contamination, groundwater, reactive, permeable, barrier, wall, remediation

1. 서론

오염지하수의 현장복원기법에는 오염지하수의 흐름을 차단하는 불투수성 차단벽(impermeable barrier)과 오염지하수를 통과시켜 오염물질을 물리화학적으로 제거하는 투수성 반응벽(permeable reactive barrier)이 있다. 투수성 반응벽은 일명 고투수성 반응벽(high permeability reactive wall)이라고도 하며, 이는 오염지하수를 완전히 차단하는 것이 아니라 오염수를 통과시키면서 오염수내의 오염물질을 거르는 작용을 한다. 투수성 반응벽의 운영은 지반굴착 후 투수성 및 흡착성 재료로 뒷채움을 실시하여 오염지하수를 통과시키는 절차로 한다. 투수성 반응벽은 현장에서 보통 깔대기 & 수문시스템(funnel and gate system)으로 설치된다. 불투수벽(깔대기)은 오염지하수의 흐름방향과 대각선으로 설치되어 지하수를 일정한 방향으로 유도하고, 반응처리셀(수문)은 흐름방향과 직각으로 설치되어 오염지하수를 통과시켜 오염지하수내의 오염물질을 흡착제거한다. 투수성 반응벽은 비위생매립지 및 오염지하수의 복원사업에 적용될 수 있다. 투수성 반응벽의 재료로는 철, 침전제, 수착제, 환원제, 석회, 분쇄된 조개껍질, 활성탄, 녹사(greensand), 제오라이트, 이온교환수지, 페타이어 등이 사용된다.

본 연구에서는 오염지하수의 복원을 위하여 투수성 반응벽의 국내 적용효과를 검토하였다. 이를 위하여 투

수성 반응벽체를 모사하는 실내모형시험을 실시하였다. 지하수는 인공적으로 TCE(trichloroethene)로 오염을 시켰다. 지하수의 오염물질인 TCE를 제거하기 위한 투수성 반응재료로는 0가 철(Fe^0)을 사용하였다. 본 실험에서는 반응벽 뒷채움재료로 Fe^0 와 모래가 혼합된 재료를 사용하였다. 모형시험시에 pH, TCE 및 Cl의 농도를 측정하였다. 오염지하수를 투수성 반응벽을 통과시킨 결과 지하수내의 TCE 농도는 감소하고 Cl 농도는 증가하는 것으로 나타났다. 실내모형시험을 통하여 수 시간 이내에 지하수내의 TCE가 대부분 제거되는 효과를 얻을 수 있었다.

2. 투수성 반응벽의 개념

투수성 반응벽은 그림 1과 같이 고투수성 반응벽(high permeability reactive wall)이라고도 하며, 이는 오염지하수를 완전히 차단하는 것이 아니라 오염수를 통과시키면서 오염수내의 오염물질을 거르는 작용을 한다. 투수성 반응벽의 시공방법은 슬러리월 차단벽과 비슷하나 굴착시 슬러리로서 생폴리머와 물의 혼합물을 사용한다. 슬러리 굴착 후 투수성 및 흡착성 재료로 뒷채움을 실시한다. 투수벽은 시간이 지나감에 따라 포화되고 오염물질이 충전되기 때문에, 재료의 흡착능력과 기간에 따라 필요시 재료를 교체해 주거나 재활성화하는 작업이 요구되는 경우가 있다.

투수성 반응벽은 보통 그림 2와 같이 깔대기 & 수문시스템(funnel and gate system)으로 현장에 설치된다. 여기에서 불투수벽(깔대기)은 오염지하수의 흐름방향과 대각선으로 설치하여 지하수를 일정한 방향으로 유도하고, 반응처리셀(수문)은 흐름방향과 직각으로 설치하여 오염지하수를 통과시켜 오염지하수내의 오염물질을 흡착제거하는 역할을 한다.

투수성 반응벽의 뒷채움 재료로는 철, 침전제, 수착제, 환원제, 석회, 분쇄된 조개껍질, 활성탄, 녹사(greensand), 제오라이트, 이온교환수지, 페타이어 등이 있다. 석회는 산성 지하수를 중성화할 필요성이 있는 경우에 사용될 수 있다. 또한 이것은 카드뮴, 철, 그리고 크롬과 같은 금속을 제거하는 데에도 효과적이다. 분쇄 조개껍질은 석회와 동일한 화학적 특성을 가지고 있는데 조개껍질을 쉽게 구할 수 있는 해안지역에서는 매우 용이한 방법이 될 수 있으며 석회와 같이 산성 지하수를 제어하는데 사용될 수 있다.

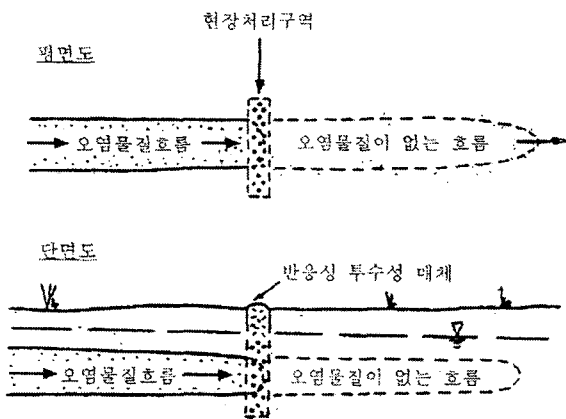


그림 1. 투수성 반응벽의 측면도

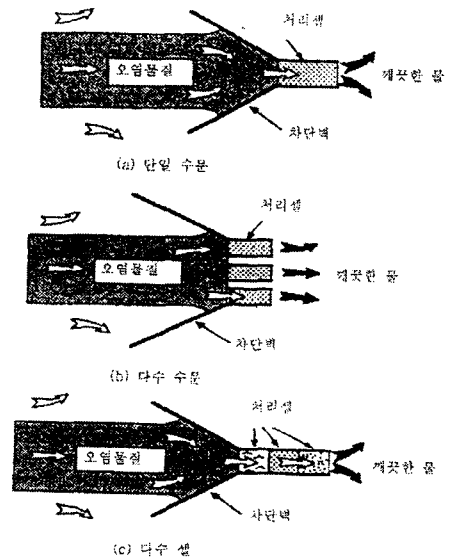


그림 2. 투수성 반응벽의 평면도

활성탄은 유기물질로 오염된 지하수를 제어하는데 사용이 될 수 있으며 이것은 매우 고가이기 때문에 경제적이지는 못하다. 녹사는 대서양연안 평원에 많이 분포하는데 이는 중금속 흡착 능력이 좋은 것으

로 보고되었다(Spolharic과 Crawford, 1979). 오염현장 주변에 녹사퇴적층 등이 있는 경우, 투수성 처리상의 흡착재료로 사용한다면 매우 경제적인 복원작업이 될 것이다. 제오라이트와 합성이온교환수지는 중금속의 제거에 매우 효과적이지만 수명이 짧고 고가이며 재활성화(reactivation) 하는데 문제가 있기 때문에 경제적인 면에서 적용성이 적다.

3. 실내 모형실험 방법

3.1 실내모형실험 장치

본 연구에 사용된 투수성 반응벽 실험시험의 개요도 및 장치를 그림 3 및 그림 4에 나타내었다. 반응기는 내경이 6 cm이고 높이가 약 20 cm(유효 용적 1.13 L)인 원통형으로서 제작되었다. 반응기 상단 및 하단부에는 모래를 채워 유입수와 유출수의 흐름을 원활하게 하였으며 그 사이에 철분(30%) 및 모래(70%)를 충분히 혼합한 물질을 높이 10cm 정도 되도록 채워 TCE의 농도를 감소하게 하였다. 유입수는 미량 정량펌프(cole-parmer)를 이용하여 하루에 약 1.44 L 정도의 주입속도로 유입시켰다.

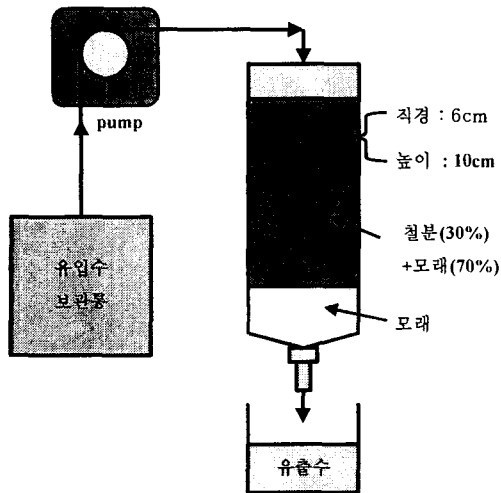


그림 3. 투수성 반응벽 실내모형실험 개요도

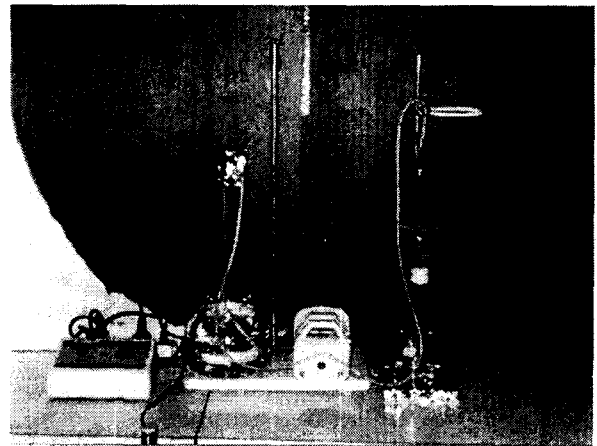


그림 4. 투수성 반응벽 실내모형실험 장치

3.2 실내모형실험 방법

본 연구의 처리대상인 TCE의 경우, 물에 대한 용해도가 매우 낮기 때문에 1g/L의 stock solution 1 L를 약 12시간 이상 교반시켜 완전히 용해시킨 다음 이를 희석하여 실험하였다. 시료 채취는 반응조에 유입수가 충분히 흡착되어 유출수가 발생하는 시점을 0 hr로 하여 초기에는 10 min 간격으로 채취하였고 1시간 이후에는 2~3 hr 간격으로 채취하였다. 채취한 유출수는 즉시 pentane을 이용하여 추출하였는데, 이 때 시료와 pentane의 추출비는 3 : 1로 혼합하였다.

또한 TCE의 휘발성과 흡착에 의한 손실을 방지하기 위하여 추출용기로 6 ml vial을 이용하였으며 마개는 GC syringe를 쉽게 꽂을 수 있는 고무막으로 밀봉하였다. 추출된 시료는 약 150 rpm 속도로 5시간 이상 교반시킨 후 1시간 이상 정치시켜 물과 용매를 완전히 분리시킨 다음 GC 분석하였다. GC 분석 조건은 다음과 같다. 그 밖의 염소이온 농도와 pH도 분석하였다.

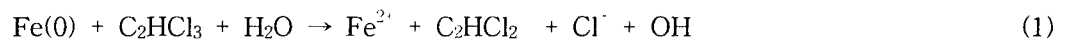
4. 실내 모형실험 결과분석

4.1 유출수의 TCE 및 염소이온 농도

폐수의 종류 및 배출원에 따라 TCE의 농도는 수 ppb 미만에서 수십 ppm 이상까지 매우 다양한 농도로 배출되기 때문에 본 보고서에서는 일반적으로 지하수나 폐수 중에서 가장 타당하게 존재할 것으로 생각되는 TCE 농도 10 ppm에 대하여 농도 변화를 분석, 평가하였다.

그림 5는 반응조 유출수의 TCE 및 염소이온의 농도를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 초기 유출수의 TCE 농도는 약 9.69 mg/L이며 염소이온 농도는 1.04 mg/L로 나타났다. 이는 처음 Stock solution 10 ppm을 제조하여 반응기 내로 주입하는 과정에서 TCE의 일부가 휘발되거나 모래와 철에 의해 흡착되어 약 3.1% 정도가 감소된 것으로 생각되어진다. 따라서 실제 초기 제거 TCE 농도는 9.69 mg/L이다. 반응시간별 유출수에 남아있는 TCE의 농도를 살펴 보면, 대부분의 TCE 값이 반응 1시간 내에 농도가 급격히 감소되다가 2시간 후에는 약 1.53 mg/L로 94.5%의 TCE가 제거된 것을 볼 수 있다. 이후 반응 24시간 후에는 TCE의 농도가 0.03 mg/L로 99.7%의 매우 높은 제거율을 보였다.

이에 반하여 염소이온 농도는 반응 초기에 급격히 증가하다가 2시간 후에는 약 3.22 mg/L로 나타났으며 24시간 후에는 3.41 mg/L로 나타났다. 이는 TCE가 Fe(0)와 반응하여 환원되어 전자를 얻으면서 염소이온(Cl⁻)을 내놓기 때문에 TCE의 농도가 감소할수록 염소이온 농도가 증가한 것을 볼 수 있다. 이에 대한 관계식을 나타내면 다음과 같다.



4.2 유출수의 pH

다음 그림 6은 유출수의 pH 값을 나타낸 그림이다. 반응시간에 따른 pH의 변화를 살펴보면 염소이온의 농도 곡선과도 매우 유사하게 나타났다. 초기 pH의 농도는 약 5.3였으며 반응 2시간 후에는 5.89까지 증가하였다. 이후 반응 24시간이 지난 후에도 pH의 값은 크게 변하지 않았다. 이는 TCE와 철이 서로 산화-환원 반응을 일으킨 동시에 TCE의 용매제인 H₂O이 수산화기(OH⁻)로 바뀌면서 OH⁻의 이온이 증가하여 pH의 값이 증가한 것이다. 이에 대한 관계식을 나타내면 다음과 같다.



4.3 TCE의 제거율

그림 7은 TCE의 제거율에 관한 것으로 실제 실험 초기 농도치인 TCE 9.69 mg/L의 제거율을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 실험 시작 30분 후에 이미 약 57.5%의 제거율을 보였으며 1시간 후엔 67.6%, 반응 2시간 후엔 84%의 높은 제거율을 보이고 있다. 반응 24시간 후엔 제거율 99.7%를 보여 거의 모든 TCE가 완전분해되었음을 알 수 있다.

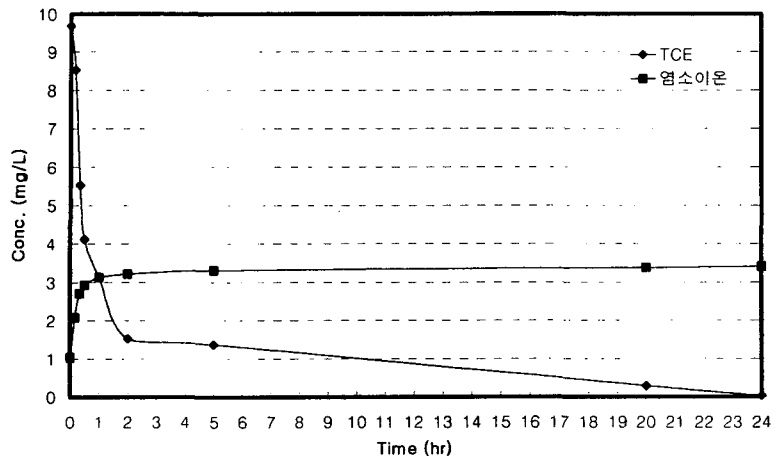


그림 5. 유출수의 TCE 및 염소이온 농도

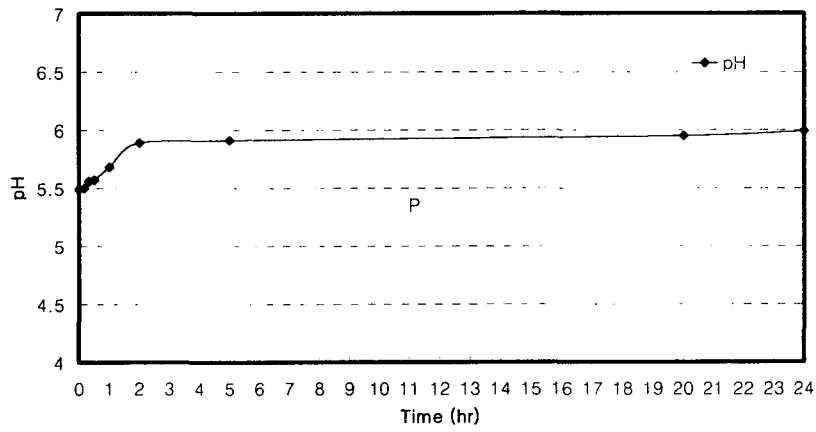


그림 6. 유출수의 pH

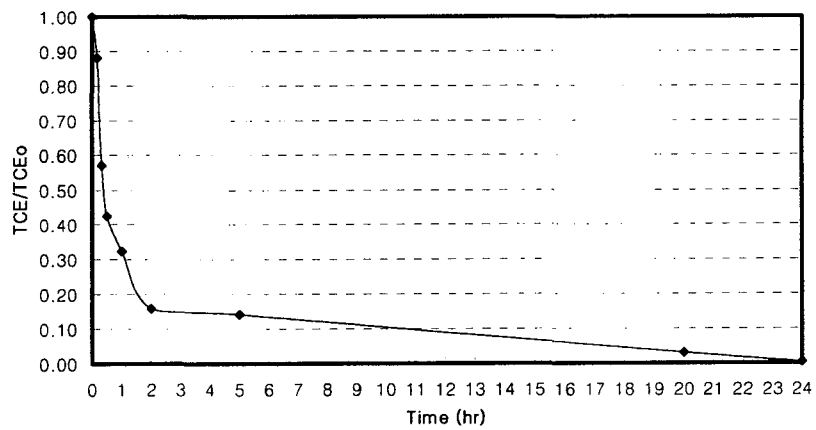


그림 7. TCE의 제거율

5. 결론

- 1) 투수성 반응벽에 대한 실내모형시험 결과, 반응매체를 0가 철로 하는 경우 24시간 경과 후에 TCE의 제거율이 99.7%가 되었다.
- 2) 투수성 반응벽에 의하여 오염지하수내의 거의 모든 TCE가 완전하게 분해·제거되는 것으로 나타나 오염지하수내의 유기물질을 제거하는데 매우 효과적인 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 정하익 외 2인(1995), 오염지반 및 지하수 정화기술에 관한 연구, 한국건설기술연구원.
2. 정하익(1994), 오염지반 및 지하수의 정화기술, 한국건설기술연구원, 건설기술정보, 통권 133호, pp.22-26.
3. 정하익(1996), 사용종료 매립지의 오염물질 차단 및 정화기술, 사용종료 매립지의 안정화에 관한 국제 세미나, 대한지하수환경학회.
4. 정하익(1998), 지반환경공학, 도서출판 유림
5. 한국건설기술연구원(1998), 위생매립지 건설 및 비위생매립지 복원기술.
6. Avogadro, A. and Ragaini, R.C.(1993), Technologies for environmental cleanup: soil and groundwater, Kluwer Academic Publishers.
7. Bedient, P.B., Rifai, H.S., Newell, C.J.(1994), Groundwater contamination, PTR Prentice Hall.
8. Delleur, J.W.(1998), The handbook of groundwater engineering, CRC press.
9. US Army Corps of Engineering(1997), Design guidance for application of permeable barriers to remediate dissolved chlorinated solvents.
10. US EPA(1999), Field application of in situ remediation technologies: Permeable reactive barriers.