

## 동전기정화 및 투수성반응 복합기술에 의한 오염지반의 복원

### Remediation of contaminated soil by the coupled technique of electrokinetic method and permeable reactive method

정하익<sup>1)</sup>, Ha Ik Chung, 이명호<sup>2)</sup>, MyungHo Lee

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원, Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Dept., Korea Institute of Construction Technology

<sup>2)</sup> 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 토질공학연구실 연구교수, Research Associate, Dept. of Civil & Environment Hanyang Univ.

**SYNOPSIS :** This paper presents preliminary laboratory investigations on the electrokinetic (EK) remediation coupled with permeable reactive barrier (PRB) system. Atomizing slag was adopted as a PRB reactive material for remediation of groundwater contaminated with inorganic and/or organic substances. A series of laboratory experiments were performed with variable conditions such as (i) type of contaminant, (ii) applied electric field strength, (iii) processing time, and (iv) the application of PRB system. From the preliminary investigations, the coupled technology of EK with PRB system would be effective to remediate contaminated grounds without the extraction of pollutants from subsurface due to the reactions between the reactive materials and contaminants.

**Key words :** Electrokinetics, Permeable reactive barrier, Groundwater, Decontamination, Atomizing slag

## 1. 서론

납, 톱, 비소, 아연, 카드뮴, 구리, 수은 등의 중금속 오염물질들은 용해성(solubility)으로 인해 지반 내에서의 이동성(mobility)이 증가하게 되어 자연환경과 인간의 건강에 심각한 악영향을 줄 수 있다. 오염지반의 정화를 위한 기법으로 중금속이 이동할 수 없게 격리시키거나(isolation), 중금속의 이동성을 약화시키거나(immobilization), 유독성을 감소시키거나(toxicity reduction), 오염지반으로부터 추출해내는(extraction) 등 지금까지 여러 기법들이 개발되어왔다. 그림 1은 원위치 동전학적 처리기법(in situ electrokinetic soil processing)의 모식도를 나타낸다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 동전학적 정화기법은 비교적 신공법으로, 오염된 지반에 일련의 전극봉(electrode rods)을 설치하여 직류전류를 공급함으로써 지반 내에 존재하는 오염물질들을 전기영동(electrophoresis), 전기삼투(electroosmosis) 및 동전기적 이동(electromigration) 등의 효과로 분리해서 추출해내는 방법을 말한다. 동전학적 정화기법은 수리적 인(hydrodynamic) 기법으로 정화가 불가능한 투수성이 낮은 지반에도 적용할 수 있어서 특히 효과적이다.

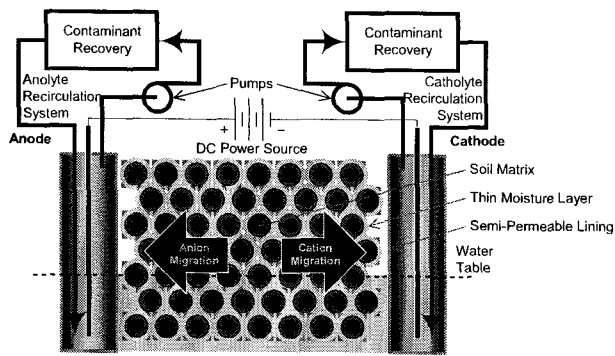


그림 1. In Situ Electrokinetic Soil Processing

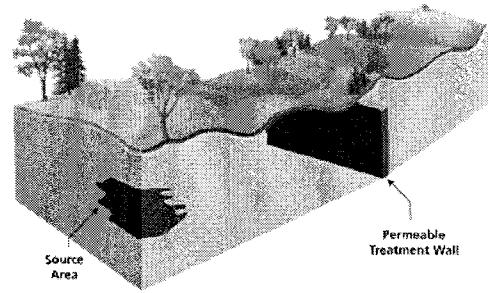


그림 2. In Situ Permeable Reactive Barrier

그림 2는 투수성반응벽체(Permeable Reactive Barrier)의 모식도를 나타낸다. 투수성반응벽체는 대체로 장시간에 걸쳐서 오염원을 정화시키는 기법 중 하나로, 오염된 지하수의 정화에 사용된다. 투수성 반응벽체는 오염된 지하수의 이동경로에 설치함으로써 흐름에 따라 오염물질이 반응벽체를 통과하면서 분해되어 무해한 물질로 치환되게 된다. 따라서 본 연구에서는 동전학적 정화기법에 반응벽체의 장점을 복합적으로 적용함으로써 투수성이 낮은 오염된 점토지반의 정화 가능성에 대해 조사하였다. 그림 3은 동전학적 정화기법에 반응벽체를 복합적으로 적용한 예를 모식적으로 보여준다. 그림 3(a)는 원위치 동전학적 정화처리의 모식도를 보여주는데, 양전하를 띤 오염물질은 직류전류를 공급함에 따라 양극으로부터 음극방향으로 이동하게 되며 따라서 이동된 오염물질은 음극부근에서 펌프로 추출하게 된다. 그러나 그림 3(b)와 같이 음극부근에 반응벽체를 설치하게 되면 양극으로부터 이동된 오염물질은 음극 부근에 설치된 반응벽체를 통과함으로써 분해될 것이며, 결국 음극부근에서 오염물질을 추출할 필요가 없게 될 것이다.

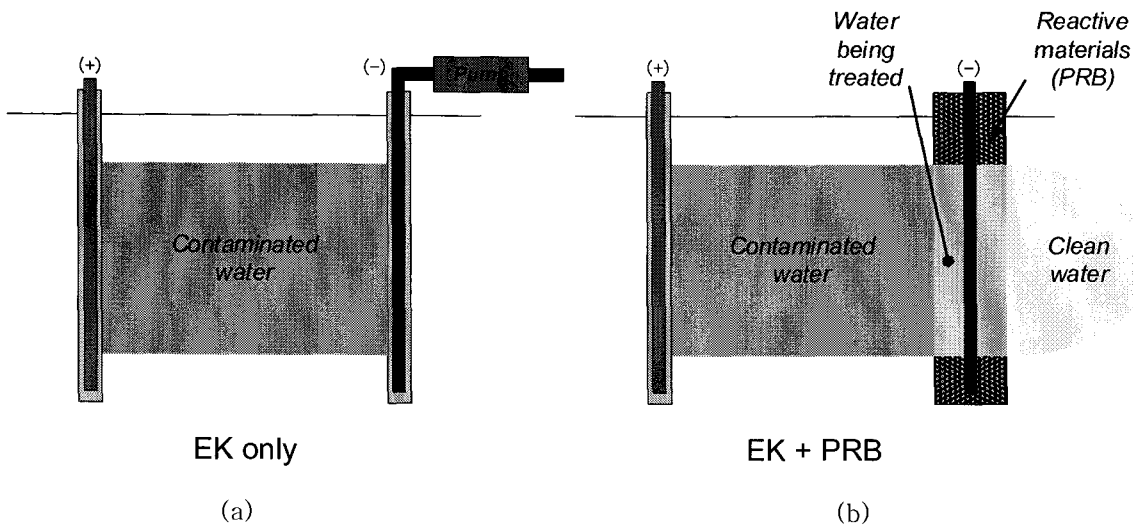


그림 3. Proposed In Situ Electrokinetic Remediation and Permeable Reactive Barrier System

## 2. 실험방법

실험에 사용된 시료는 김포공항 주변에서 채취된 점토시료를 사용하였다. 시료의 물리화학적 성질은 표 1에 나타낸 바와 같다. 본 실험에서는 반응벽체에 주로 사용되어 온 ZVI 또는 Zeolite에 비해 가격이 비교적 저렴한 오토마이징 슬래그(atomizing slag)를 반응물질(reactive material)로 사용하였다. 오

토마이징 슬래그의 물성치는 표 2에 나타낸바와 같다.

표 1. Physicochemical properties of natural Kimpo clay

Parameter	Kimpo Clay
Specific gravity	2.58
Percent finer than #200 sieve	90.0
pH	6.5 ~ 7.1
Liquid limit (%)	32.8
Plastic limit (%)	22.5
Organic matter content (%)	6.74
Compositions of various oxides: 13.97% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 69.20% SiO <sub>2</sub> , 2.17% Na <sub>2</sub> O, 4.30% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 1.61% MgO, 1.35% TiO <sub>2</sub> , 0.95% CaO, and 2.41% K <sub>2</sub> O	

표 2. Material properties of atomizing slag

	Specific Gravity	Hardness (Hv)	Absorption (%)	Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	uniformity	Water content (%)
slag	3.54	500 ~ 700	0.1	223	1.22	0.79 ~ 0.98

본 실험에 사용된 실험장치는 그림 4에 나타낸 바와 같다. 동전학적 정화장치는 크게 시료를 넣을 수 있는 박스형 아크릴 셀, 흑연전극 및 직류전원으로 구성되어있다. 박스형 아크릴 셀 (100 mm × 100 mm × 100 mm)은 양단에 전극을 설치할 수 있는 칸막이(compartment)로 분리되어있다. 전극재료로는 흑연판을 사용하였고, 반응벽체와 동전학적 정화기법을 동시에 적용할 경우, 음극부근에 오토마이징 슬래그를 설치하였다.

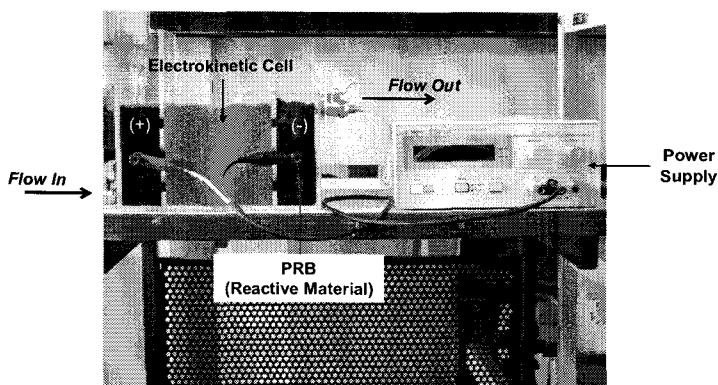


그림 4. Experimental setup for EK remediation with PRB system

초기농도 약 300 mg/L의 카드뮴 용액 및 TCE 용액을 준비한 뒤, 김포점토와 혼합하였다. 오염된 점토시료에 약 2 V/cm의 직류전압경사를 공급하였다. 동전학적 정화처리 중, 반응벽체의 효과를 조사하기위한 실험조건은 표 3에 나타낸바와 같다.

표 3. Testing Conditions

Operating system	Initial concentration	Voltage gradient	Reactive material
EK only	TCE (300 mg/L)	2 V/cm	None
EK with PRB system	TCE (300 mg/L)	2 V/cm	Atomizing slag
EK only	Cd (300 mg/L)	2 V/cm	None
EK with PRB system	Cd (300 mg/L)	2 V/cm	Atomizing slag

### 3. 실험결과 및 고찰

그림 5(a)에서 볼 수 있듯이, 배출수의 TCE 농도는 실험초기 증가하다가 감소함을 알 수 있다. 동전학적 처리에 의한 TCE 농도는 동전학적 처리와 반응벽체를 복합적으로 적용했을 때 보다 높게 나타났음을 알 수 있다. 따라서 TCE 농도분포의 차이는 동전학적 처리에 의해 양극에서 음극방향으로 전기삼투에 의해 이동된 오염물질(TCE)이 반응벽체를 통과하면서 분해되었음을 추측할 수 있다(즉, TCE 농도분포의 차이는 반응벽체에 사용된 반응물질이 TCE와 화학적 반응에 의해 생겼음을 알 수 있다).

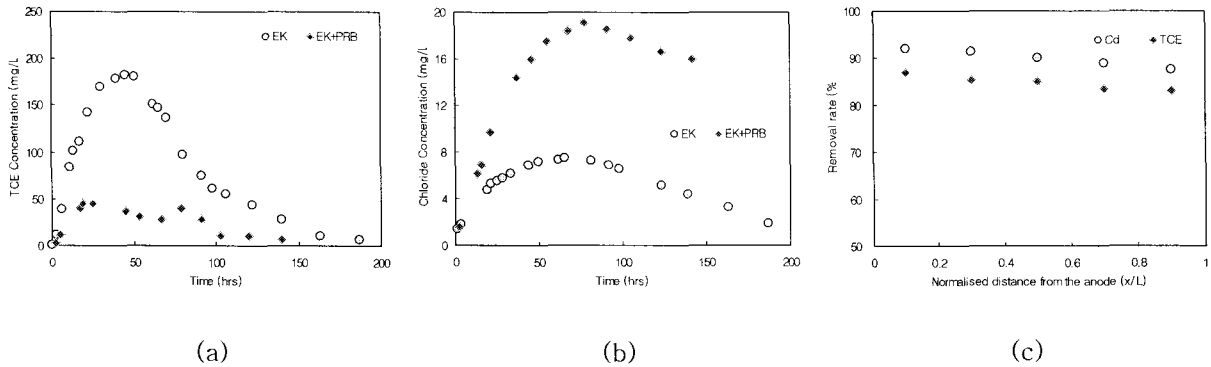


그림 5. TCE and chloride concentration and Removal rate of TCE and Cd from soil specimen

그림 5(b)는 배출수로부터 측정된 염소이온(chloride ion)의 농도변화를 보여준다. 염소이온농도는 동전학적 처리와 반응벽체를 복합적으로 적용했을 때 크게 나타났으며, 이는 PRB의 반응물질과 TCE가 반응하여 분해되었음을 의미한다. 그림 5(c)는 오염된 시료로부터 카드뮴과 TCE의 제거효율을 보여준다. 카드뮴과 TCE의 평균 제거효율은 약 90%로 대체적으로 우수하였다. 카드뮴의 경우, 제거효율이 TCE보다 다소 높은 이유는 카드뮴이 양전하를 띄고 있기 때문에 전기삼투(electroosmosis)에 의한 효과에 동전기적 이동(electromigration)의 효과가 가산되었기 때문이라고 사료된다.

### 4. 결론

동전학적 처리에 관한 예비실험을 수행한 결과, 투수성이 낮은 오염된 점토지반의 정화를 위해 동전학적 처리기법과 투수성반응벽체를 복합적으로 적용하면 효과적이라고 사료된다.

### 참고 문헌

1. Acar, Y.B., A. Alshwabkeh, 1993, "Principles of Electrokinetic Remediation", Environmental Science and Technology, vol.27, No. 13, pp 2638.
2. U.S. EPA, 1995, "In-situ Remediation Technology Status Report: Treatment Walls", EPA/542/K-94/004.