

구리로 오염된 카올린의 Electrokinetic 기법에 의한 정화시 전류밀도 변화에 따른 제거효율 특성

김정환 · 이명호* · 한상재* · 김수삼**
중앙대 박사과정 · 중앙대 생산공학연구소 연구원*
중앙대 건설환경공학과 교수**

I 서론

지반 오염문제를 해결하기 위해 지반조건과 경제성을 고려하여 환경기준치 이내로 오염도를 저감시킬 수 있는 정화기술개발이 필요한 실정이며, 이를 위해 새로운 기법과 기술들이 소개되고 있다. 이런 관점에서 현재 사용되고 있는 기술의 한계를 보완할 수 있으며 세립토 지반에서도 적용할 수 있는 새로운 정화기술 개발에 관한 연구가 필요한 실정이다. 원위치 정화 기법 중 전기삼투와 이온 이동현상을 이용하여 투수성이 매우 낮은 점성토 지반으로부터 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있는 방법으로 “E/K정화처리” 기법이 활발히 연구 중에 있다(Acar et al. 1996).

본 연구에서는 이러한 E/K 기법을 이용하여 구리로 오염된 카올린에 대해 일정 전류조건에서 실험을 실시하고 전류의 변화에 따른 구리 이온의 제거효과와 그 제거 메카니즘을 검토하여 효율적인 구리제거 방안을 찾고자 한다.

II 이론적 배경

포화된 점토에 전압 경사가 적용된다면 그로 인한 현상은 크게 전기삼투(Electroosmosis)와 이온이동(Electromigration)으로 구분할 수 있으며, 이들 현상에 의한 이온 i 의 이동은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$J_i = u_i^* \theta c_i \nabla(-E) + (c_i K_e) \nabla(-E) \tag{1}$$

여기서 u_i^* 는 유효 전기이동속도, θ 는 간극률, K_e 는 전기삼투 투수계수, c_i 는 간극수에서의 이온 i 의 농도($c_i = \frac{C_i}{\theta}$, C_i 는 전체 흙시료의 체적에 대한 농도), J_i 는 이온 i 의 흐름 그리고 $\nabla(-E)$ 는 전압경사이다. 이 때 속도를 $V_i = J_i / \theta S c_i$ (S : 시료의 단면적)라고 규정하면 식 (1)로부터 다음과 같은 식이 제시된다. Alshwabkeh와 Acar(1996)에 따르면 이동은 주로 이 두 메카니즘에 의해 지배받는다.

$$V_i = (u_i^* + \frac{K_e}{\theta}) \nabla(-E) \tag{2}$$

[연락처] (우) 156-756 서울특별시 동작구 흑석동 221 중앙대학교 공과대학 지반환경개량연구소
Tel. : 02-820-5259, Fax. : 02-816-8987, E-mail : geokjh@hanmir.com

III 실험재료 및 방법

1. 실험재료

실험에서 사용된 시료는 미국의 The Feldspar Corporation에서 생산된 EPK Kaolinite로 그 주요 특성은 Table 1.에 제시되어 있다.

Table 1. Characteristic of EPK Kaolinite(<http://www.zemexcorp.com/feldspar/epk.html>)

Characteristic	Data
Kaolinite content(% by weight)	97
Specific gravity	2.65
Average particle size(μm)	1.36
Cation exchange capacity(meq/100g of dry soil)	4.5
LOI(Loss of Ignition)(%)	13.91
pH	5.8
Specific surface area(g/cm^2)	24.25

2. 실험방법

구리로 오염된 kaolinite 시료는 질산구리($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, 1몰의 분자량 241.6)를 비이온수 1ℓ에 1.90g을 넣어 500ppm의 질산구리용액을 만들고 840ml의 용액을 1200g의 카올린과 섞어 함수비가 70%이고 350mg/kg(1.102meq/100g)으로 오염된 카올린을 조성하였다. 이러한 농도는 본 시료의 CEC가 4.5meq/100g임을 고려할 때 대부분의 구리이온이 흡착되어 자유수에는 존재하지 않는 것으로 예상된다. 이렇게 조성된 시료를 Fig. 1과 같이 탄소전극이 설치된 전극수조가 있는 길이 25cm, 면적 20cm²의 cell에 넣고 시료의 안정화를 위해 하루 동안 방치한 후 전극에 일정한 직류 전류를 가하여 실험을 실시하였다. 실험조건은 Table 2.에 제시되어 있다.

Table 2. Summary of Testing Condition

Parameter	Test1	Test2
Current(mA)	1	3
Area(cm^2)	20	20
Length(cm)	25	25
Duration(hr)	334	203
Current density	0.05	0.15
Total charge(amp-hr)	0.334	0.609
Total charge/unit volume of soil(amp-hr/ m^3)	668	1218
Porosity of the specimen	0.64	0.64
Initial Cu(II) concentration ($\mu\text{g}/\text{g}$ of dry soil)	350	350

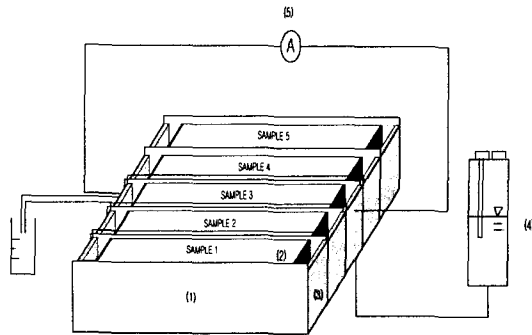


Fig. 1 Schematic diagram of Electrokinetic cell

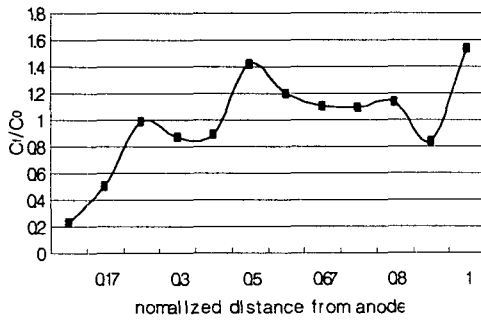
IV 실험 결과

1. 실험 종료 후 구리이온의 분포

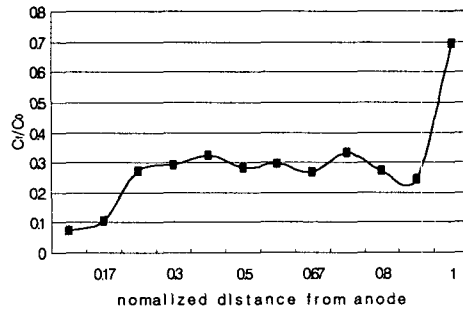
Fig. 2는 적용된 전류에 따른 최종 구리이온의 분포를 도시한 것이다. (a)는 약 15일 동안 1mA의 전류를 일정하게 주어 구리이온을 제거한 시험으로 아직까지 구리이온이 음극으로 거의 유출되지 않고 시료 내에 분포한 경향을 보여주고 있다. 실제 시료에 가해진 단위 체적당 전하량은 668amp-hr/ m^3 으로 (b) 그림에서 제시된 3mA를 적용하여 오염물을 제거한 경우보다 적은 양의 전하량이 적용된다. 실제 3mA를 약 10일 동안 가한 결과 약 70%의 오염물이 음극으로 추출되었다.

Table. 2 Cu(II) Mass balance in specimens

Description	Total amount of Cu(II)	
	Test 1	Test 2
Specimen initial mass (mg)	420	420
Specimen final mass (mg)	413.64	121.07
Removal mass (mg)	6.36	261.62
Specimen final/Specimen initial	0.98	0.28



(a) Test1(applied 1mA)



(b) Test2(applied 3mA)

Fig. 2 Concentration ratio profiles across specimens

2. 시험 종료후의 pH 분포

Test1과 Test2에 있어서 실제 단위체적당 공급된 전하량의 크기가 Test2의 경우가 거의 두배에 가까운 양이 공급되었지만 실제 시료 내의 pH는 거의 일정한 경향을 나타내었다. 시료 내의 pH 크기는 초기 값보다 작게 나타났으며 이것은 산전선이 빠르게 이동하여 일어나는 현상이다. 이 때 시료 전체에 대한 pH 분포는 전류의 크기에 상관없이 거의 일정한 기울기로 변화되고 있다.

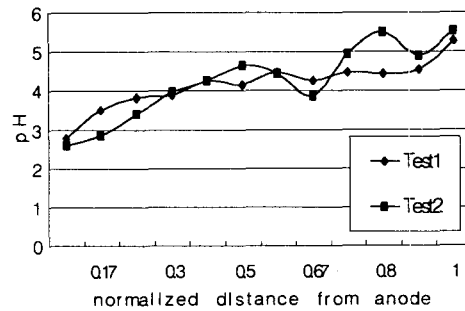


Fig 3. pH profiles across cell after test

3. 시간에 따른 전압분포의 변화

Fig 4에 제시된 것처럼 실험 초기에는 두 실험 모두 음극과 양극에서 전압경사가 거의 일정한 경향을 나타내었다. 이는 실험 초기에는 시료 내의 구리이온과 pH의 분포가 균질하게 분포하기 때문이다. 하지만 시간이 경과함에 따라 전압경사가 양극 부분에서는 초기 상태의 기울기와 유사하지만 음극 쪽에서는 급한 기울기를 나타낸다. 이것은 실험과정 중 음극부분에서 균열이 발생했는데 그에 의한 영향으로 저항이 증가하여 음극 부분에서 급격한 전압경사의 변화가 발생하는 것으로 추측되며 Fig. 3에서 알 수 있듯이 pH 변화에 따른 산전선과 염기전선의 충돌로 인한 중성화로 유발되는 전압경사의 변화는 미미한 것으로 판단된다. 또한 실제 구리이온의 이동은 시료 내에 적용되는 전류밀도 크기에 따른 전압의 크기에 의존함을 추측할 수 있다. 즉, 3mA를 적용하여 구리이온을 제거한 경우 1mA를 적용한 경우보다 상대적으로 오염물의 이동이 원활하게 일어났음을 알 수 있다.

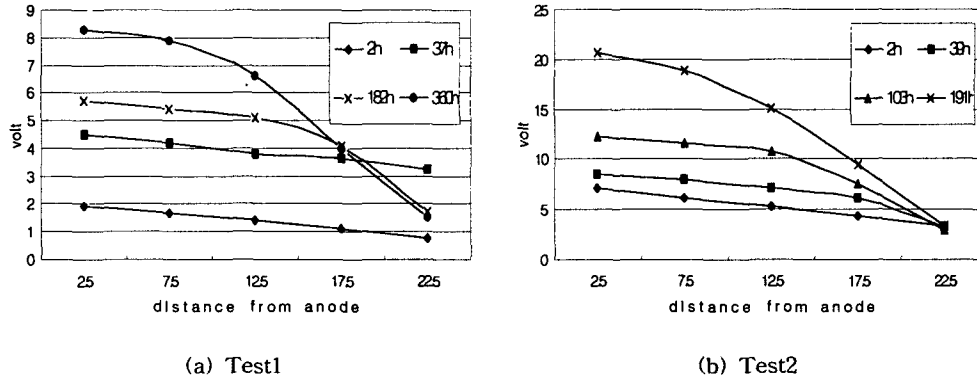


Fig 4. Volt profile across cell

V 분석 및 고찰

1mA와 3mA를 사용하여 각각 15일과 10일 동안 CEC이하의 농도에 구리이온으로 오염된 점토를 사용하여 실험을 실시하였다. 그 결과 1mA의 전류를 적용한 경우에는 구리이온의 이동이 시료 내에서는 이루어졌지만 음극으로의 유출은 발생하지 않았다. 하지만 3mA를 가한 경우에는 약 70% 정도의 구리이온의 추출되었다. 이는 실험 동안에 발생하는 전압의 크기가 1mA의 경우에는 시료 전체에 작용한 최대 전압경사가 0.4V/cm밖에 되지 않아 이온의 이동이 활발하게 일어나지 않은 것으로 추측된다. 그러나 시료 내의 pH는 6이하로 구리이온의 탈착은 충분히 이루어졌을 것으로 판단된다. 3mA의 전류를 일정하게 가했을 경우에는 최대 0.8V/cm의 전압경사가 가해져 탈착된 구리이온의 이동이 활발하게 이루어졌다. 이 때 주목할 만한 사항은 오직 0.1pore volume의 유량만이 발생했음에도 불구하고 오염물의 제거가 활발하게 일어난 점이다. 이는 금속이온의 이동이 전기삼투보다는 이온이동 현상에 의해 주로 지배를 받으며 그로 인하여 구리오염물의 제거가 발생한 것으로 판단된다.

VI 결론

1. 구리로 오염된 카올린을 일정전류 조건을 적용하여 실험한 결과 구리이온의 제거가 가해지는 전류 밀도의 크기에 따라 큰 영향을 받았다.
2. 그 때 시료 전체에 발생하는 전압 경사의 크기에 따른 이온이동 현상이 중금속을 제거하는 주요 메카니즘임을 알 수 있었다.

높은 전류밀도를 적용하여 오염된 지반을 정화할 경우 소비되는 에너지가 과도하게 발생하기 때문에 최적의 효율을 구현하기 위해서는 적절하게 전류를 조절해야 할 것으로 판단되기 때문에 전류밀도 변화에 따른 실험이 있어야 할 것으로 사료되며 중금속 제거량과 에너지소비량을 함수로한 설계기법 개발이 추가적으로 연구되어야 할 것으로 생각된다.

VI 참고 문헌

1. J. Hamed, Y. B. Acar, R. J. Gale, (1991). J. Geotech. Engrg. Div., ASCE. Vol 117, 241
2. A. N. Alshawabkeh, Y. B. Acar, (1996). J. Geotech. Eng. 122(3), 186
3. <http://www.zemexcorp.com/feldspar/epk.html>