

동전기-펜턴 공정에서 phenanthrene 제거에 대한 전해질 이온세기의 영향

박지연 · 김상준 · 이유진 · 양지원*

한국과학기술원 생명화학공학과

Effect of ionic Strength of Electrolyte on Phenanthrene Removal in Electrokinetic-Fenton Process

Ji-Yeon Park · Sang-Joon Kim · You-Jin Lee · Ji-Won Yang*

Department of Chemical & Biomolecular Engineering, KAIST

ABSTRACT

Characteristics of phenanthrene removal in an electrokinetic (EK)-Fenton process were investigated in a viewpoint of concentration and ionic strength of electrolytes. When three kinds of electrolytes (NaCl, KH_2PO_4 , and MgSO_4) were used, the increase in electrolyte concentration caused the decrease of electrical potential gradient. The increase of electrical conductivity was due to the increase of ionic concentration in soil. The decrease of accumulated electroosmotic flow (EOF) with increase in electrolyte concentration was due to the decrease of zeta potential. The removal efficiency was in proportion to accumulated EOF which depended on ionic strength. Total energy expenditure without electrolyte was 10-30 times higher than its with 0.5 M electrolyte. The lower removal efficiency was caused by the lower energy expenditure with 0.5 M one. An effective EK-Fenton process was determined from considering the removal efficiency and the energy expenditure, simultaneously.

Key words : Electrokinetic-Fenton process, Electrolyte, Ionic strength, Hydrogen peroxide

요 약 문

동전기-펜턴 공정에서 전해질의 농도와 이온세기가 공정효율에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 세 가지 전해질(NaCl, KH_2PO_4 , MgSO_4)을 대상으로 전기삼투유량의 변화와 phenanthrene의 분해율을 살펴보았다. 전해질의 농도가 증가할수록 낮은 전압경사를 나타냈는데, 이는 전해질의 농도 증가에 따라 토양 내의 이온 농도가 증가하여 전도도가 증가하였기 때문이다. 전해질의 농도가 증가할수록 전기삼투유량은 감소하였는데, 이는 전해질의 농도가 증가할수록 제타포텐셜과 확산이중층의 두께가 감소함으로써 전기삼투유량이 감소하였기 때문이다. 전기삼투유량은 전해질의 종류에 따라 차이가 거의 없었으며, 이온의 세기에 주로 의존하였다. 높은 전기삼투유량에서는 과산화수소와 오염물의 잦은 접촉기회에 기인하여 높은 제거율을 나타내었다. 총 전력소비량은 전해질이 첨가되지 않았을 경우가 0.5 M 일 때보다 약 10-30배 높았다. 0.5 M의 경우 낮은 전력소비량을 나타내었지만, 낮은 전기삼투유량에 기인하여 제거율이 낮게 나타났다. 동전기-펜턴 공정의 최적 전해질 농도 결정시 전력소비량과 제거율을 복합적으로 고려하는 것이 바람직하다.

주제어 : 동전기-펜턴 공정, 전해질, 이온세기, 과산화수소

*Corresponding author : jwyang@kaist.ac.kr

원고접수일 : 2004. 6. 29 게재승인일 : 2005. 2. 11

질의 및 토의 : 2005. 10. 31 까지

1. 서 론

원위치(*in-situ*)로 오염물의 제거하는 대부분의 기술들(토양세척, 생물학적 처리, 토양증기추출 등)은 모래와 같이 수리전도도가 높은 토양의 정화에는 쉽게 적용될 수 있지만, 세립토와 같은 저투수성 토양에서는 공정의 적용에 어려움이 있다. 이를 극복할 수 있는 방법으로 제안되고 있는 동전기 공정(electrokinetic process)은 오염된 매체에 전극을 통하여 소량의 전류를 공급함으로써 전기삼투(electroosmosis), 전기이동(electromigration) 및 전기영동(electrophoresis)과 같은 전기/화학적 이동현상에 의해 중금속 이온이나 기타 오염물질을 이동·분리·회수하는 기술이다(Lagemen, 1993; Acar and Aloschwabkeh, 1993; Acar et al., 1995 Lee and Yang, 2000; Ko et al., 2000; 이현호 외, 1999) 포화된 토양에 전류가 가해지면 확산이중층 내의 양이온들이 음극을 향하여 이동하면서 공극수를 함께 이동시키는데 이를 전기삼투라고 한다. 이때 전기삼투유량, $q_e(\text{cm}^3/\text{sec})$ 는 Helmholtz-Smoluchowski의 경험식으로부터 다음과 같이 정의된다.

$$q_e = k_e i_e A = k_i I = \frac{k_e}{\sigma} I \quad (1)$$

여기에서 $k_e(\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec})$ 는 전기삼투계수, $i_e(\text{V}/\text{cm})$ 는 전위경사, $A(\text{cm}^2)$ 는 시료의 단면적, $k_i(\text{cm}^3/\text{ampsec})$ 는 전기삼투 물이동 효율, $I(\text{amp})$ 는 전류 그리고 $\sigma(\text{siemens}/\text{cm})$ 는 전극을 가로지르는 토양의 겔보기 전도도이다. 이 식으로부터 전기삼투유량은 전류에 비례하며 같은 조건의 토양에 대하여 저항이 일정한 경우에는 전압에 비례하여 증가한다는 것을 알 수 있다.

또한 모세관에서의 전기삼투유량은 제타포텐셜과 점도, 유전율의 관계로써 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$q_e = v_{EOF} A = \zeta \left(\frac{\epsilon_b}{\eta} \right) i_e A \quad (2)$$

여기서 $v_{EOF}(\text{cm}/\text{sec})$ 는 전기삼투유속, $\zeta(\text{V})$ 는 제타포텐셜, ϵ_b 는 전해질 용액의 유전율, η 는 전해질 용액의 점도이다. 즉, 전기삼투유량은 제타포텐셜에 비례하고, 점도에 반비례한다.

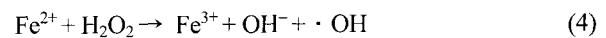
확산이중층의 두께에 따라서 전기삼투유량이 영향을 받게 되는데, 일반적으로 확산이중층의 두께가 증가할수록 전기삼투유량도 증가하게 된다. 확산이중층의 두께는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$H = \left[\frac{\epsilon_0 D k T}{2 n_0 e^2 v} \right]^{1/2} \quad (3)$$

여기서 H 는 확산이중층의 두께, ϵ_0 는 진공시의 유전율, D 는 유체의 유전상수, $k(1.38 \times 10^{-16} \text{ erg}/\text{K})$ 는 Boltzman 상수, $T(\text{K})$ 는 절대온도, n_0 는 전해질 농도, $e(1.6 \times 10^{-19} \text{ coulomb})$ 는 단위 전하량, v 는 공극수내 양이온의 원자기이다. 즉, 전해질의 농도가 증가할수록 확산이중층의 두께가 감소하고, 따라서 전기삼투유량도 감소한다는 것을 알 수 있다.

토양 내에 전기경사가 가해지면 이온물질이 자신의 전하특성에 따라 음이온은 양극으로, 양이온은 음극으로 이동하게 되는데 이를 전기이동이라 한다. 또한 전기영동은 주어진 전기장에 의하여 점토 슬러리, 콜로이드, 유기복합물, 마이셀과 같은 대전된 입자가 자신이 가지고 있는 전하와 반대방향으로 이동하는 현상이다(Acar and Alshwabkeh, 1993; Acar et al., 1995; 정하익, 1998).

동전기-펜턴 공정(Electrokinetic-Fenton process)은 전기삼투현상에 의해 과산화수소를 토양 내로 이동시켜 산화 반응을 일으킴으로써 유류오염물을 분해하는 방법으로, 2가 철과 과산화수소의 반응을 통하여 강력한 산화제인 OH 라디칼을 발생시키는 펜턴 공정과 과산화수소와 오염물의 균일한 이동을 야기시키는 동전기 공정과의 결합을 통하여 높은 제거율을 기대할 수 있다(Yang and Long, 1999; Yang and Liu, 2001). 동전기-펜턴 공정에서 OH 라디칼의 생성은 다음과 같은 반응에 의하여 일어나게 된다(Teel et al., 2001; Watts and Dilly, 1996.)



이와 같은 반응을 통하여 생성된 OH 라디칼은 강력한 산화제이기 때문에, 대부분의 유류오염물질들과 빠르게 반응하여 직접적인 산화분해를 일으킨다.

동전기-펜턴 공정은 대부분의 오염물을 결국 물과 이산화탄소로 분해시키므로 기존 기술에 비해 환경친화적이라 할 수 있으며, OH 라디칼의 강력한 산화분해와 전기/화학적인 이동성 향상에 의하여 비교적 짧은 시간을 요하는 경제적인 공정이다. 또한 물질의 이동이 어려운 저투수성 토양에서도 공정 적용이 가능하며, 원위치 공정으로 운전이 간편하여 비용 또한 절감할 수 있다는 장점이 있다.

동전기-펜턴 공정을 통한 유류오염물의 제거는 대부분 전기삼투현상에 의한 과산화수소의 이동과 오염물과의 접촉에 의존하므로, 본 연구에서는 동전기-펜턴 공정에 사용된 전해질의 종류, 농도 및 이온세기에 따른 여러 가지 동전기적 현상들을 관찰함으로써 본 공정의 적용에 있어서 전해질의 역할을 이해하고자 하였다.

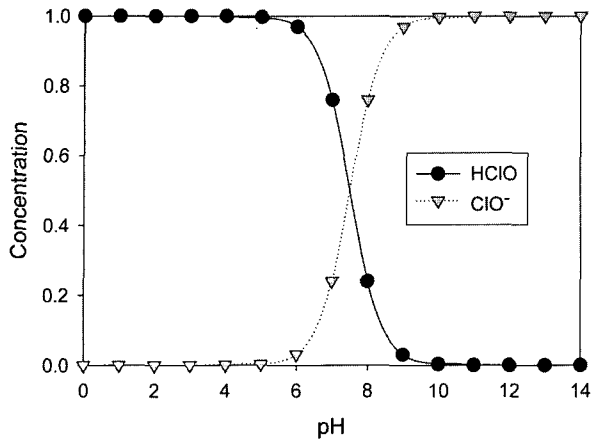


Fig. 1. pH diagram of HClO-ClO⁻.

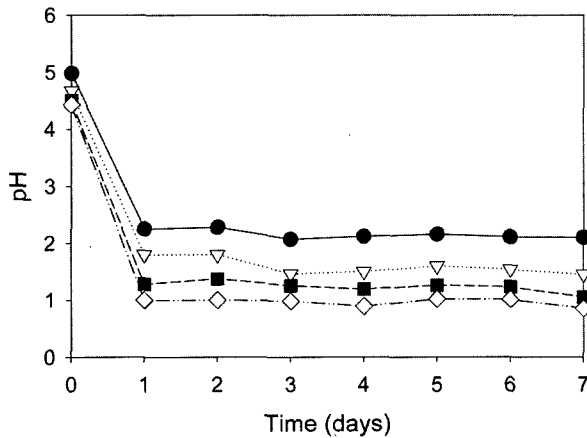


Fig. 2. pH profile of NaCl anolyte (●: 0 M, ▽: 0.005 M, ■: 0.05 M, ◇: 0.5 M).

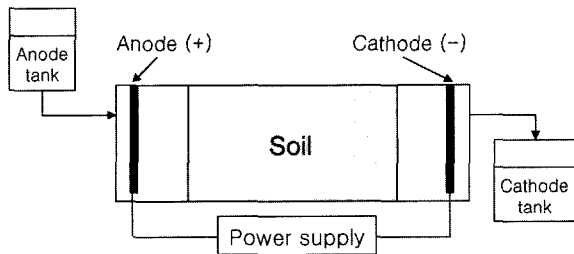


Fig. 3. Schematic diagram of test cell for EK-Fenton process.

2. 실험방법

2.1. 실험재료

실험에 사용된 오염물질은 PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons)의 하나인 phenanthrene (Sigma 사)이다. 토양시료는 덕유 세라믹스에서 구입한 인도네시아 카올린으로 325 mesh의 체를 통과한 입자만을 사용하였다. Phenanthrene으로 오염된 토양을 인위적으로 제조하기 위

해서, phenanthrene-아세톤 용액을 토양과 혼합한 후 아세톤을 증발시키고, 토양 입자의 표면에 흡착되지 않고 토양 내의 공극에 존재하는 phenanthrene을 제거하기 위하여 물로 여러 번 세척한 후 건조시켰다. 이는 동전기-펜턴 공정의 운전 중에 세척효과에 의한 오염물의 제거를 배제하기 위해서였다. 제조된 토양시료의 초기 오염농도는 약 500 mg phenanthrene/kg dry soil이었다. 양극으로 공급되는 전해질 용액은 세 가지의 전해질 NaCl, KH₂PO₄, MgSO₄ (각각 0, 0.005, 0.05, 0.5 M)를 사용하여 35% 과산화수소 용액(Junsei)을 10%로 희석함으로써 제조되었다. 선택된 세 가지 전해질 중에서, NaCl과 KH₂PO₄는 1가를 나타내며, MgSO₄는 2가의 나타낸다. NaCl의 음이온인 Cl⁻는 양극에서의 전극반응에 의해 Cl₂가 되고, 5 이하의 pH에서는 대부분이 HClO의 형태로 존재한다 (Fig. 1과 2) (Stoner and Cahen, 1982).

2.2. 실험장치

반응기는 길이 30 cm, 높이 4 cm, 너비 4 cm인 직육면체 형태이고, 양쪽 끝에 각각 10 cm 씩을 양극과 음극 전극조로 사용하였다(Fig. 3). 양극 전극조로 주입된 과산화수소 용액이 전기삼투흐름에 의해 토양 내 공극을 통과하여 음극 전극조에서 일정 수위 이상이 되면 밖으로 배출되어 음극 탱크에 모이도록 하였다. 길이 10 cm인 가운데 부분에 증류수와 혼합된 오염토양을 채우고, 토양시료의 양쪽 끝에 전극을 설치하여 이로부터 전원이 공급되도록 하였다. 전극은 전극조 내의 물 속에 설치하여 직접 토양 시료에 접촉되지 않도록 하였다. 전극은 4 cm × 4 cm × 0.8 cm인 탄소전극을 사용하였다. 이는 금속 전극이 양극 전극으로 사용되었을 경우 양극 전극조에서 발생하는 과산화수소의 분해 현상을 막기 위해서였다. 전극조와 토양이 접촉하는 부분은 유리섬유로 된 여과지(Whatman 사)를 두어서 토양 시료가 전극조로 유입되는 것을 막고, 과산화수소에 의해 여과지 자체가 분해되는 것을 방지하였다. 전원공급기는 최대 280 V까지 전압 공급이 가능한 직류 전원공급기를 사용하였으며, 10 mA (0.63 mA/cm²)의 정전류 조건하에서 7일간 조업되었다.

2.3. 실험조건 및 분석방법

토양 내의 철의 양을 측정하기 위하여, 토양 5 g을 3.3 M HNO₃ 50 mL에 넣고 48시간 동안 교반한 후 AAS (Atomic Absorption Spectrophotometry, Perkin Elmer 사, Model HGA-600 Spectrometer)로 분석하였다. HNO₃에 의해 인도네시아 카올린으로부터 약 40 mg/kg dry

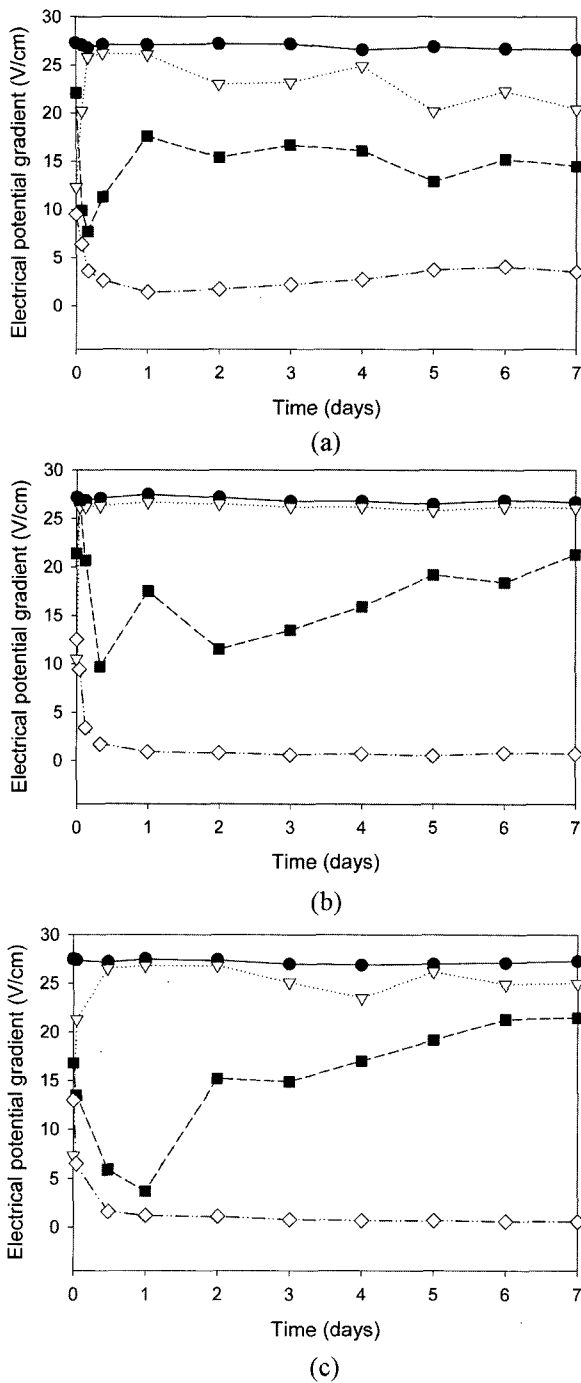


Fig. 4. Electrical potential gradient (a) NaCl, (b) KH₂PO₄, (c) MgSO₄ (●: 0 M, ▽: 0.005 M, ■: 0.05 M, ◇: 0.5 M).

soil의 철이 추출되었으며, 추가적인 철 촉매의 주입 없이도 충분한 펜턴반응이 발생하였다. 공정 중에는 반응기 내의 전압 변화와 전기삼투유량이 측정되었다. 실험 종료 후 각각의 토양 시료를 6개의 조각으로 등분하여 건조시킨 후 토양 내에 잔존하는 phenanthrene 농도를 분석하였다.

토양 1 g과 메탄올 10 mL를 혼합하여 24시간 동안 교반한 후 254 nm의 파장에서 C₁₈ Symmetry Column을 사용하여 HPLC (High Performance Liquid Chromatography, Waters 사)로 정량하였다. Eluent는 acetonitrile(Merck 사)과 3차중류수를 85:15의 비율로 혼합하여 제조하였으며, 펌프의 유속은 1 mL/min이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전압경사

Fig. 4는 전해질의 종류 및 농도에 따른 전압경사의 변화를 나타낸다. 세 가지 전해질에 대하여, 같은 전해질 농도에서는 비슷한 경향을 나타내었다. 전해질의 농도가 증가할수록 낮은 전압경사를 나타냈는데, 이는 전해질의 농도가 증가할수록 토양 내의 이온의 농도가 증가하여 전도도가 증가하고, 저항이 감소하였기 때문이다. 전해질이 첨가되지 않고 증류수만 공급된 경우에는, 28 V/cm의 높은 전압경사가 7일간 유지되었다. 반면, 0.05 M의 전해질이 사용되었을 경우 초기에 전압경사가 감소하였다가 다시 증가하여 일정해지는 경향을 보였다. 이는 전류가 공급됨에 따라 이온이 토양 내로 유입되어 전도도가 증가하였다가, 전기삼투와 전기이동 현상에 의해 이온이 유출수를 통하여 빠져나가 토양 내의 이온 농도가 다시 감소하여 전도도가 감소하였기 때문이다. 나중에 일정해지는 것은 양극으로부터 공급되는 이온의 공급속도와 토양 시스템 밖으로 빠져나가는 이온의 배출속도가 비슷해져서 토양 내의 이온의 농도 변화가 적어져 전도도가 일정해졌기 때문이다. 0.05 M의 전해질 농도에서 NaCl과 KH₂PO₄의 경우 1일 후부터 전압경사가 증가된 값을 가지는 반면, MgSO₄의 경우 2일 후부터 증가된 값을 나타내었다. 이는 NaCl과 KH₂PO₄가 1가인데 비하여 MgSO₄는 2가이므로, 같은 몰농도(M)에서 MgSO₄가 다른 전해질보다 높은 이온세기(ionic strength)를 나타내어, 낮은 전압경사가 다른 것보다 긴 기간 동안 유지된 것으로 사료된다. 그러나 시간이 지남에 따라 토양 내에 많은 이온들이 생성, 이동, 배출되므로, 3일 이후에는 비슷한 경향을 보이고 있다. 0.5 M 조건에서는 모든 경우에 3 V/cm 이하의 매우 낮은 전압경사를 나타내었다.

3.2. 전기삼투유량

7일간의 조업기간 동안 측정된 전기삼투유량은 Fig. 5와 같다. 세 가지 전해질에 대하여 공통적으로 전해질 농도가 0.005 M일 경우 전기삼투유량이 가장 높았고, 농도

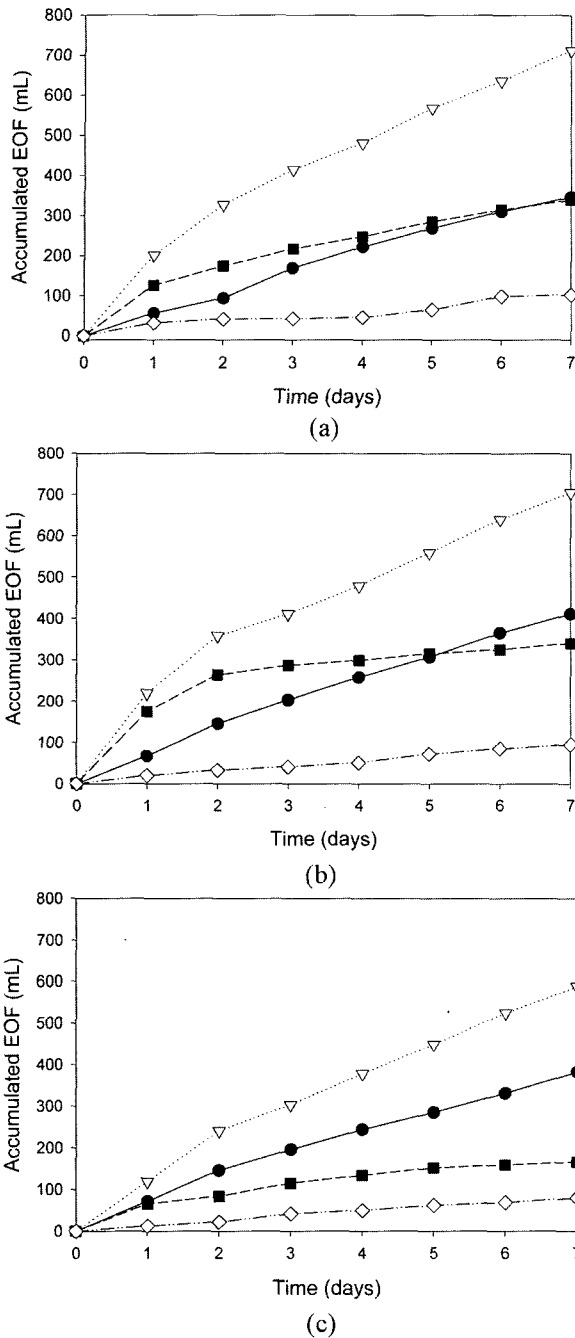


Fig. 5. Accumulated electroosmotic flow (a) NaCl, (b) KH₂PO₄, (c) MgSO₄ (●: 0 M, ▽: 0.005 M, ■: 0.05 M, ◇: 0.5 M).

가 0.5 M일 때 가장 낮은 전기삼투유량을 나타내었다. 즉, 전해질의 농도가 증가할수록 전기삼투유량은 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 전해질 농도가 증가할수록 제타포텐셜이 감소하고 이에 따라 전기삼투유량도 감소하는 일반적인 경향과 일치하였다. 또한 전해질 농도가 증가할수록 전압경사가 감소하여 Helmholtz-Smoluchowski 식에 의해 전기삼투유량도 함께 감소한 것이다. 전해질이

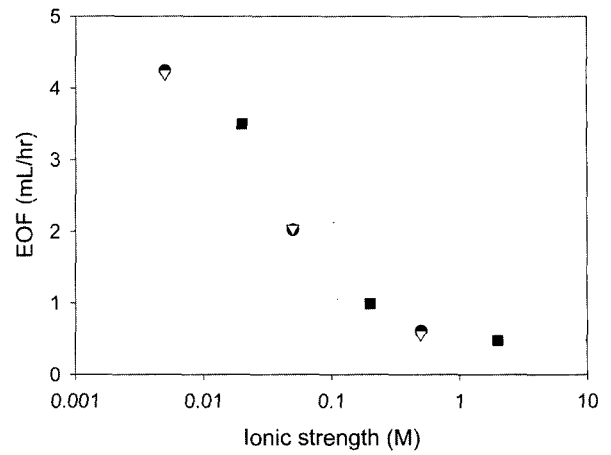


Fig. 6. Average electroosmotic flow rate (●: NaCl, ▽: KH₂PO₄, ■: MgSO₄).

첨가되지 않은 경우에는 0.005 M의 전해질을 사용한 경우보다 낮은 전기삼투유량을 나타냈다. 이는 전기삼투흐름이 다량의 양이온의 이동에 기인한 공극수의 이동현상 이므로, 전해질이 첨가되지 않은 경우가 전해질이 첨가된 경우보다 이온의 농도가 상대적으로 적었기 때문이다. 그러나 전해질의 농도가 더 증가하면 전해질이 첨가되지 않은 경우보다 오히려 전기삼투유량이 감소하게 된다. 그러므로 이온 농도의 증가에 따라 공극수의 운동량이 증가하여 전기삼투유량이 증가하는 현상과 제타포텐셜이 감소하여 전기삼투흐름이 감소하는 현상을 함께 고려해야 한다. NaCl과 KH₂PO₄의 경우 0.05 M일 때의 전기삼투유량이 전해질이 첨가되지 않은 경우와 비슷한 값을 나타냈으며, MgSO₄의 경우는 더 적은 값을 나타냈다. 이는 Mg의 원자가가 +2이므로 식(3)에서 확산이중층의 두께가 다른 전해질보다 얇고 따라서 제타포텐셜도 작았기 때문이다. 세 가지 전해질에서 모두 0.5 M에서 전기삼투유량이 급격히 감소하여 공극수의 흐름이 원활하지 않아 제거율의 감소가 예상되었다.

7일간의 평균 전기삼투유량(mL/hr)을 전해질의 이온세기에 따라 나타내었다(Fig. 6). MgSO₄의 경우 2가이므로 이온세기는 몰농도의 4배에 해당된다. 식(3)에서 확산이중층의 두께는 $(n_0 v^2)^{1/2}$ 에 반비례하고, 이 값의 제곱은 양이온과 음이온의 원자가가 동일한 전해질의 이온세기와 같은 의미를 가진다. 즉, Fig. 6은 식(3)으로부터 이온세기와 확산이중층, 즉 전기삼투유량의 관계를 나타낸 것이다. 전해질의 이온세기가 증가할수록 평균 전기삼투유량은 감소하였다. 전기삼투유량은 전해질의 농도가 높게 증가하면, 오히려 전해질이 첨가되지 않은 경우보다도 전기삼투유량이 감소하게 되므로 적절한 전해질 농도를 결정하는 것이

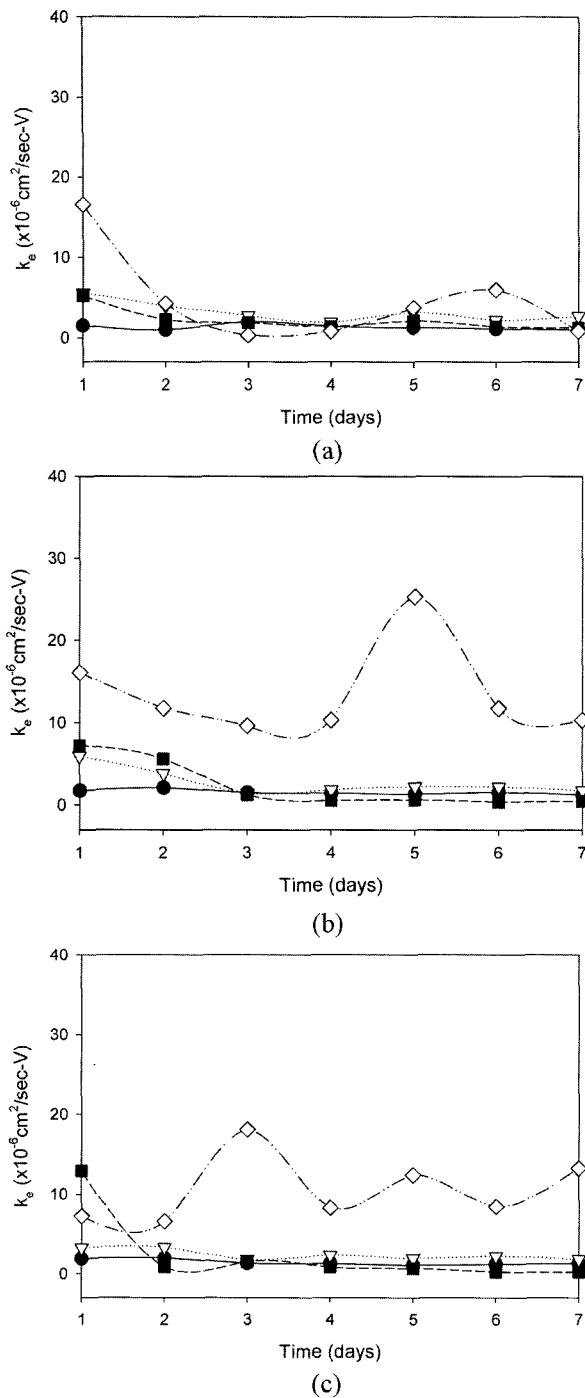


Fig. 7. Change of electroosmotic coefficient of permeability (a) NaCl, (b) KH_2PO_4 , (c) MgSO_4 (\bullet : 0 M, ∇ : 0.005 M, \blacksquare : 0.05 M, \diamond : 0.5 M).

중요하다. 전해질의 종류에 따른 전기삼투유량의 차이는 관찰되지 않았다. 따라서 전기삼투유량이 전해질의 종류에 관계없이 이온의 세기가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있었다.

음극 전극조로부터 발생된 전기삼투유량을 이용하여 전기삼투현상과 전압의 관계를 나타내는 상수인 k_e (coefficient of electroosmotic permeability)를 계산하였다(Fig. 7). 0.5 M의 전해질이 첨가되었을 경우 가장 높은 k_e 를 나타내었는데, 이는 전압경사가 매우 낮았기 때문이다. KH_2PO_4 와 MgSO_4 의 경우는 0.5 M에서 10×10^{-6} ~ $25 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec-V}$ 사이의 높은 값을 보인 반면, NaCl의 경우에는 초기에만 $17 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec-V}$ 의 높은 값을 보이다가 감소하는 경향을 보였다. 이는 0.5 M에서 NaCl의 전압경사가 1-4 V/cm 사이로 다른 전해질이 1 V/cm 이하인 것에 비하여 조금 높았기 때문이다. 0.5 M NaCl에서 다른 것보다 조금 높은 전압경사를 보인 것은 전해질의 음이온인 Cl^- 가 전극반응에 참여하여 Cl_2 로 되면서 용액 내의 이온 농도가 감소하였기 때문인 것으로 사료된다. 전해질 농도가 증가할수록 전기삼투유량이 감소하는 반면, 단위 전압 및 면적에서의 유량을 의미하는 k_e 값은 0 M, 0.005 M, 0.05 M 사이에서 큰 차이를 나타내지 않았지만 전체적으로 전해질의 농도가 증가할수록 k_e 가 증가하는 경향을 나타내었다. 즉, 단위 전압 및 면적당 전기삼투유량의 발생 효율(k_e)은 전해질의 농도가 높아져서 전도도가 증가하고 저항이 감소하여 전류의 흐름이 원활하게 되었을 때 큰 폭으로 증가하는 경향을 보인 것이다.

3.3. Phenanthrene 제거율과 전력소비량

실험 종료 후 각각의 실험에 대한 총 전기삼투유량과 phenanthrene 제거율을 Table 1에 나타내었다. Fig. 8은

Table 1. Removal efficiency of phenanthrene and energy expenditure

Electro-lyte	Concentration (M)	Accumulated EOF (mL)	Removal efficiency (%)	Energy expenditure (kWh)
NaCl	0	346	92.4	0.452
	0.005	712	96.7	0.389
	0.05	339	92.1	0.253
	0.5	102	59.2	0.0476
KH_2PO_4	0	411	97.0	0.452
	0.005	705	98.4	0.440
	0.05	340	89.7	0.271
MgSO_4	0	382	89.6	0.456
	0.005	587	90.2	0.428
	0.05	166	62.2	0.253
	0.5	80	48.7	0.0158

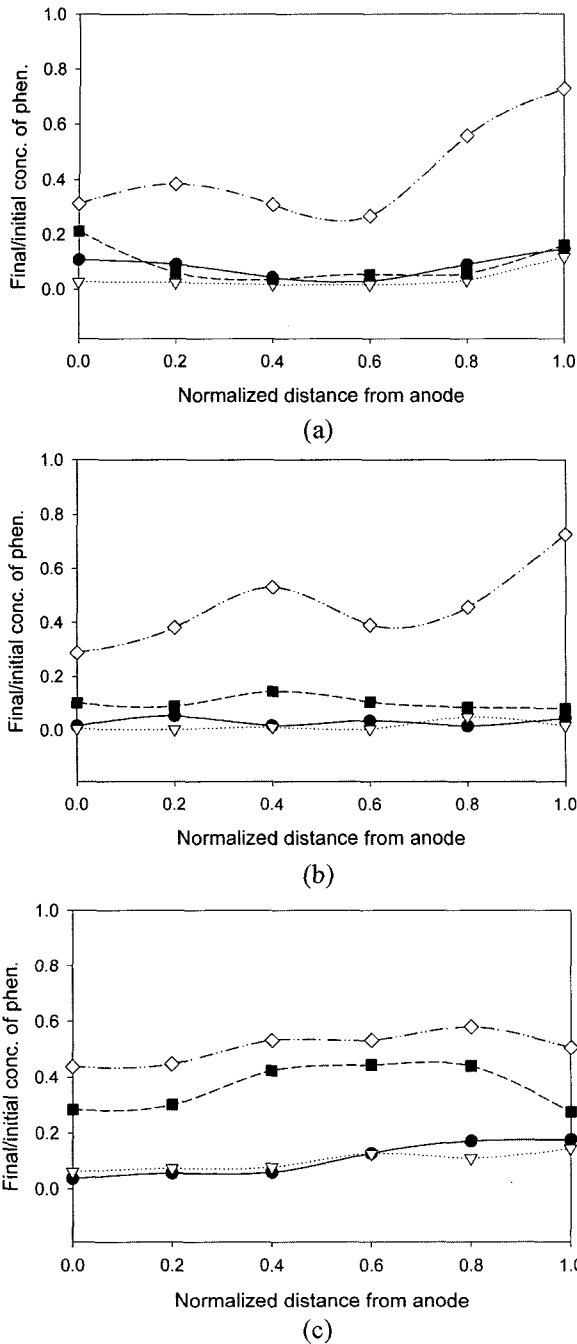


Fig. 8. Content of phenanthrene in soil at the end of operation (a) NaCl, (b) KH_2PO_4 , (c) MgSO_4 (●: 0 M, ▽: 0.005 M, ■: 0.05 M, ◇: 0.5 M).

일주일 후 토양 내에 잔존하는 phenanthrene의 분포를 나타낸다. 양극에서 음극에 걸쳐 고른 오염물 분포를 나타내고 있어, 전기삼투효율이 원활하였다는 것을 보여준다. Phenanthrene 중간산물의 형성은 관찰되지 않았다(양지원 외, 2004.) 과산화수소가 주입되지 않고 0.005 M KH_2PO_4 만 전해질로 사용된 예비실험에서는 8.13%의 제거율을 보

이고 있어, 펜틴반응에 의한 제거율 상승효과를 확연히 확인할 수 있었다. 10%의 과산화수소 용액이 공급된 동전기-펜틴 실험에서 대략 350 mL 이상의 누적전기삼투유량이 되면 이미 90% 이상의 제거율을 보이기 때문에 그 이상의 전기삼투유량의 증가는 제거율의 증가에 큰 영향을 끼치지 못하였다. 즉, 사용된 과산화수소의 농도에 따라 그 사용량을 최소화할 수 있는 최적의 전기삼투유량이 존재한다는 것을 알 수 있었다. 전기삼투유량이 가장 적게 나타난 각 전해질의 0.5 M 농도에서는 60% 이하의 낮은 제거율을 보이고 있다. 따라서 동전기-펜틴 공정에서는 과산화수소 용액과 오염물의 효율적인 접촉과 관계된 전기삼투유량이 제거율에 중요한 요소임을 알 수 있었다.

7일간의 총 전력소비량 또한 계산되었다(Table 1). 전력소비량은 전해질의 농도가 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 전해질이 첨가되지 않았을 경우에 0.452-0.456 kWh의 값을 나타냈으며, 0.5 M일 때는 0.0158-0.0476 kWh의 값을 나타내어 약 10-30배의 차이를 보이고 있다. 전력소비량은 동전기-펜틴 공정의 경제적인 측면에 해당되므로 전해질의 농도가 높을수록 전력소비량이 낮아 경제적인 측면에서 유리하다. 하지만 높은 전해질 농도는 오염물의 제거율에 있어 낮은 전기삼투유량에 기인하여 낮은 제거율을 나타내므로, 전력소비량과 제거율의 관계를 동시에 고려하여 최적의 전해질 조건을 결정하여야 한다.

4. 결 론

동전기-펜틴 공정에 사용된 전해질의 특성에 따른 전기삼투유량의 변화와 phenanthrene의 최종적인 분해율을 관찰함으로써 동전기-펜틴 공정의 적용에 있어서 전해질의 역할을 살펴보았다. 결과적으로, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 세 가지 전해질 NaCl , KH_2PO_4 , MgSO_4 에 대하여, 전해질의 농도가 증가할수록 낮은 전압경사를 나타냈다. 이는 전해질의 농도가 증가할수록 토양 내의 이온 농도가 증가하여 전도도가 증가하였기 때문이다.
- 2) 전해질의 농도가 증가할수록 전기삼투유량은 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 전해질의 농도가 증가할수록 제타포텐셜과 확산이중층의 두께가 감소함으로써 전기삼투유량이 감소한 것이다. 전해질의 종류에 따른 전기삼투유량의 차이는 관찰되지 않았으며, 전기삼투유량은 이온 세기로 증감의 경향을 나타낼 수 있었다.

3) 전기삼투유량이 높은 경우에 제거율이 높게 나타났다. 이는 제거율이 과산화수소와 오염물의 효율적인 접촉을 의미하는 전기삼투유량에 의존하였기 때문이다. 350 mL 이상의 누적전기삼투유량이 되면, 90% 이상의 phenanthrene 제거율이 관찰되었다. 따라서 과산화수소의 농도를 고려하여 그 사용량을 최소화할 수 있는 최적의 전기삼투유량을 결정하여야 한다.

4) 총 전력소비량은 전해질이 첨가되지 않았을 경우에 0.452-0.456 kWh의 값을 나타냈으며, 0.5 M일 때는 0.0158-0.0476 kWh의 값을 나타내어 약 10-30배의 차이를 보이고 있다. 0.5 M의 경우 낮은 전력소비량으로 인해 경제적 측면에서는 유리하지만, 낮은 전기삼투유량에 기인하여 낮은 제거율을 보이고 있다. 따라서 전력소비량과 제거율의 관계를 동시에 고려하여 최적의 전해질 농도를 결정할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 국가지정연구실사업과 차세대 핵심환경기술 개발사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

양지원, 박지연, 김상준, 이유진, 기대정, 2004, 동전기-펜턴 공정을 이용한 phenanthrene 오염토양의 정화, *J. of KoSSGE*, **9**(1), 47-53.

이현호, 백기태, 양지원, 1999, 동전기 정화기술을 이용한 kaolinite-white O에서의 납 제거, *J. of KSEE*, **21**(9), 1751-1760.

정하익, 1998, *지반환경공학*, 유림, 서울, p. 608-634.

Acar, Y.B. and Alshawabkeh, A.N., 1993, Principles of electrokinetic remediation, *Environ. Sci. Technol.*, **27**(13), 2638-2647.

Acar, Y.B., Gale, R.J., Alshawabkeh, A.N., and Marks, R.E., 1995, Electrokinetic remediation: Basics and technology status, *J. of Hazardous Materials*, **40**, 117-137.

Ko, S.O., Schlautman, M.A., and Carraway, E.R., 2000, Cyclodextrin-enhanced electrokinetic removal of phenanthrene from a model clay soil, *Environ. Sci. Technol.*, **34**, 1535-1541.

Lageman, R., 1993, Electroreclamation, *Environ. Sci. Technol.*, **27**(13), 2648-2650.

Lee, H.H. and Yang, J. W., 2000, A new method to control electrolytes pH by circulation system in electrokinetic soil remediation, *J. of Hazardous Materials*, **B77**, 227-240.

Stoner, G.E. and Cahen, G.L., 1982, The mechanism of low frequency a.c. electrochemical disinfection, *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, **9**, 229-243.

Teel, A.L., Warberg, C.R., Atkinson, D.A., and Watts, R.J., 2001, Comparison of mineral and soluble iron Fenton's catalysts for the treatment of trichloroethylene, *War. Res.*, **35**(4), 977-984.

Watts, R.J. and Dilly, S.E., 1996, Evaluation of iron catalysts for the Fenton-like remediation of diesel-contaminated soils, *J. of Hazardous Materials*, **51**, 209-224.

Yang, G.C.C. and Liu, C.Y., 2001, Remediation of TCE contaminated soils by in-situ EK-Fenton process, *J. of Hazardous Materials*, **B85**, 317-331.

Yang, G.C.C. and Long, Y.W., 1999, Removal and degradation of phenol in a saturated flow by in-situ electrokinetic remediation and Fenton-like process, *J. of Hazardous Materials*, **B69**, 259-271.