

전기동력학 기술을 이용한 시설재배지 토양 염류제거 실증 연구

이유진*[†] · 최정희* · 심성주* · 하태현** · 이현구**

*한국전기연구원 전지연구센터
642-120 경남 창원시 성산구 불모산로 10번길 12
**한국전기연구원 전기추진연구센터
642-120 경남 창원시 성산구 불모산로 10번길 12
(2013년 9월 2일 접수, 2013년 10월 21일 수정본 접수, 2013년 10월 29일 채택)

A Field Study on Electrokinetic Removal of Salts from Greenhouse Soil

You-Jin Lee*[†], Jeong-Hee Choi*, Seong-Ju Sim*, Tae-Hyun Ha** and Hyun-Goo Lee**

*Battery Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute,
12 Bulmosan-ro 10 Beon-gil, Seongsan-gu, Changwon-si, Gyeongnam, 642-120 Korea
**Electric Propulsion Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute,
12 Bulmosan-ro 10 Beon-gil, Seongsan-gu, Changwon-si, Gyeongnam, 642-120 Korea
(Received 2 September 2013; Received in revised form 21 October 2013; accepted 29 October 2013)

요 약

본 연구에서는 높은 농도의 염류가 집적된 시설재배지 토양의 제염을 위해 전기동력학적(EK) 기술을 적용한 과일 텃 규모(2×3×0.2 m³, W×L×D)의 실증시험을 실시하였다. 실험 전 토양의 전기전도도(EC)는 약 9 dS/m였으며, 토양 내 주요 염류는 Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ 이온이었다. 2주간의 EK 처리 후 토양의 EC는 실험 전에 비해서 52% 감소하였으며, 이 중 대부분은 초기 1주일 이내에 제거되었다(47%). 이는 주로 Na⁺와 Cl⁻의 제거에 의한 것으로 보이며, 주요 염류 이자 토양에 대해 높은 흡착능을 가지는 Ca²⁺와 SO₄²⁻ 이온은 상대적으로 제거율이 낮았다. EK 실험이 진행되는 동안 토양의 온도는 전류의 세기에 따라 증가하여 최대 50 °C까지 증가하였다. 따라서 작물이 재배 중인 토양의 원위치 EK 적용을 위해서는 토양의 온도 상승을 제한하기 위해 전류를 조절할 필요가 있다. 결론적으로 EK 기술을 이용하여 경작 중이거나 휴경 중인 시설재배지 토양의 원위치 염류 제거가 가능할 것으로 판단되며 효율적인 탈염을 위해서는 적절한 운전 전략이 요구된다.

Abstracts – A pilot-scale electrokinetic (EK) separation field test (2×3×0.2 m³, W×L×D) was performed in a greenhouse to remove salts from saline soil. Initially, the greenhouse soil had high electrical conductivity (EC), about 9 dS/m, and contained mainly Ca²⁺, Cl⁻ and SO₄²⁻ ions. After 2 weeks of EK treatment, the soil EC was reduced to 52% compared with its initial value. The EC reduction was mostly achieved within the first week (47%) due to removal of Na⁺ and Cl⁻ ions, but ions with a high adsorption capacity such as Ca²⁺ and SO₄²⁻ ions were difficult to be removed. During the EK test, the soil temperature increased and it reached around 50 °C at some regions. For in situ application to soils in cultivation, the current should be controlled to limit increases in temperature, especially near the cathodes. In conclusion, the in situ EK technique is feasible for the restoration of saline greenhouse soils in or no cultivation and an appropriate strategy is necessary for more effective remediation.

Key words: Soil Restoration, Electrical Conductivity (EC), Electromigration, Salinity

1. 서 론

우리나라 시설재배지 및 간척지 토양의 고농도 염류에 의한 인한 직, 간접적 피해의 심각성이 알려지면서, 이에 대한 대책을 수립해야

할 필요성이 제기되었다[1]. 일반적으로 시설재배지에서는 고수입을 목적으로 채소나 꽃을 연속적으로 재배하기 때문에 과량의 비료를 사용하는 경우가 많으며 이로 인해 높은 농도의 염류가 토양에 집적 된다. 이는 작물의 수량 감소 및 품질 악화, 토양물리성 악화, 미생물 상의 이상, 지하수 오염 등의 문제점을 유발한다. 이러한 염류집적 문제를 해결하기 위해서 농가에서는 토양을 교환하거나 담수를 이용하여 배수를 시키는 등의 농경적 제염법을 동원하고 있으나 제염 효과가 오래 지속되지 않거나 장기간의 휴경이 불가피하여 이를 효과적으로 해결할 수 있는 방법이 필요한 실정이다[2].

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: youjinlee@keri.re.kr

[‡]이 논문은 KAIST 양지원 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

전기동력학(Electrokinetics, EK) 기술은 무기물, 유기물 및 복합 오염물질로 오염된 토양에 대해 원위치(in situ)에서 효과적으로 정화를 실시할 수 있는 오염토양 복원기술이다. 이 기술은 토양에 전극을 설치하고 낮은 전류밀도의 전기를 인가함으로써 물과 용해된 오염물질을 제거할 수 있는데 이때 오염물질의 이동방향을 조절할 수 있고 전력소모량이 적으며 다른 공법으로 처리할 수 없는 낮은 투수성의 세립질 토양에서도 효과적으로 적용 가능한 장점을 가진다[3-5].

최근에는 이러한 전기동력학 기술을 시설재배지 토양의 염류 제거에 적용하려는 다양한 시도가 이루어지고 있다[6-11]. Cho et al, [6,7]은 실험실 규모의 EK 실험을 통해 시설재배지 토양의 주요 염류인 Na^+ , Cl^- , NO_3^- 등이 대부분 제거됨을 확인하여 EK 기술이 효과적인 제염기술임을 보였다. 그리고 NO_3^- 를 제거하기 위해 EK 기술과 생물학적인 처리방법을 결합한 연구도 발표되었다[8]. 또한 본 연구진은 파일럿 규모의 선행 연구를 통해 질소비료가 과량으로 시비된 토양에서 EK 기술을 이용해 NO_3^- 이온을 제거하였으며 전극 배치의 영향과 전력소모량에 대한 연구를 통해 EK 기술을 이용한 토양 제염의 현장 적용 가능성을 확인한 바 있다[10]. 그러나 이를 현장에 적용하기 위해서는 전류나 전압, 운전기간 등의 공정변수에 대한 고려와 설계 요소에 대한 실증 연구가 필요하다.

또한 EK 기술은 작물 재배 중에도 시설재배지에 적용하여 토양의 염류를 제거할 수 있는 장점을 가지는데, 이 경우 재배 중인 작물이 EK 처리에 의한 토양의 pH 변화나 온도 상승에 의해 생장이 저해되지 않도록 이를 모니터링해야 할 필요가 있다. 일반적으로 EK 처리를 위해 토양에 전류를 인가하게 되면 토양의 저항에 의해 열이 발생하게 되고 이는 전류의 세기가 클수록 증가한다[12,13]. 토양의 온도가 높으면 수분이 증발할 뿐만 아니라 뿌리에도 직접적인 피해를 주어 작물의 생육이 불량해지고 품질이 악화된다. 따라서 EK 처리에 의해 작물의 생장이 영향을 받지 않도록 인가 전류를 조절해야 하므로 낮은 전류밀도로 전원을 인가하여 장기간 지속적으로 처리하는 것이 바람직하다. 그러나 재배환경에 따라서는 작물의 휴경기에 높은 전류밀도로 EK 처리를 실시하여 단기간에 염류를 제거하는 것이 필요한 경우도 있다.

따라서 본 실험에서는 비교적 높은 전류밀도를 인가한 EK 실증 실험을 실시하여 처리기간에 따른 염류제거 효율 및 토양 온도 변화를 관찰하여 EK 기술의 현장 적용 시에 필요한 설계 가이드라인을 제시하고자 하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2-1. 실증시험장 및 토양

EK 기술을 이용한 염류 제거 실증시험을 수행하기 위해 높은 농

Table 1. Soil properties of the testing area

Soil Characteristics	Zone 1		Zone 2	
	Top	Bottom	Top	Bottom
Particle size distribution, %				
Gravel (>2 mm)			19.8	
Sand (50~2,000 um)			32.0	
Silt (2~50 um)			39.5	
Clay (<2 um)			8.7	
pH	7.1	7.0	7.9	7.5
Moisture, %	25.7	25.6	25.6	25.2
EC, dS/m	9.2	6.4	9.2	3.5
Ion concentration, mmol/kg soil				
Na^+ (exchangeable)	522	301	530	661
Ca^{2+} (exchangeable)	4,071	3,920	4,983	4,097
K^+ (exchangeable)	283	266	326	289
Mg^{2+} (exchangeable)	754	404	588	305
Cl^-	1,220	600	1,075	392
SO_4^{2-}	4,257	1,938	2,954	633
NO_3^-	518	141	566	38

도의 염류가 다년간 집적된 것으로 조사된 경상남도 창원시 의창구 대산면에 위치한 국화 시설재배지에 실증시험장을 구축하였다. 약 10,000 m²의 시설재배지 내에 염류 집적 정도가 심하고 효과적인 전력 공급이 가능한 지역을 선정하여 2개의 두둑(Zone 1과 Zone 2)을 포함하는 폭 2 m, 길이 3 m의 구역에 대해 EK 실증시험을 실시하였다(Fig. 1).

실험 대상 구역의 토양 특성은 Table 1과 같다. 실증시험장의 토양은 자갈 19.8%, 모래 32.0%, 실트 39.5%, 점토 8.7%로 구성되어 있었으며 가장 큰 토양 입자는 1 cm를 넘지 않았다. 토양 염류 농도는 토양의 전기전도도(Electrical conductivity, EC)를 측정함으로써 알 수 있는데, 일반적으로 토양의 EC가 2 dS/m 이하일 때 작물이 염류의 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다[14]. 그러나 본 실증시험장의 토양 EC는 이보다 훨씬 높아서 상층의 경우 9 dS/m인 것으로 나타났으며, 주요 염류는 Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- 등이었다.

2-2. EK 실험 구성 및 방법

EK 실험을 위해서 각 두둑을 따라 3쌍의 Fe plate(1 m×0.2 m×5 mm, L×W×T)를 매설하였으며 전류누설을 최소화하고 주변시설물에 의한 영향을 줄이기 위해 2개의 두둑에 대칭으로 양극과 음극을 배치하였다(Fig. 1). 실증시험장의 토양의 경우 염류는 주로 깊이 0~10 cm의 상층에 분포되어 있으므로 깊이 20 cm 이내의 토양을 대상으로 EK 처리를 실시하고자 하였다. 본 실험에서는 각 쌍의 전극에 별도의 채

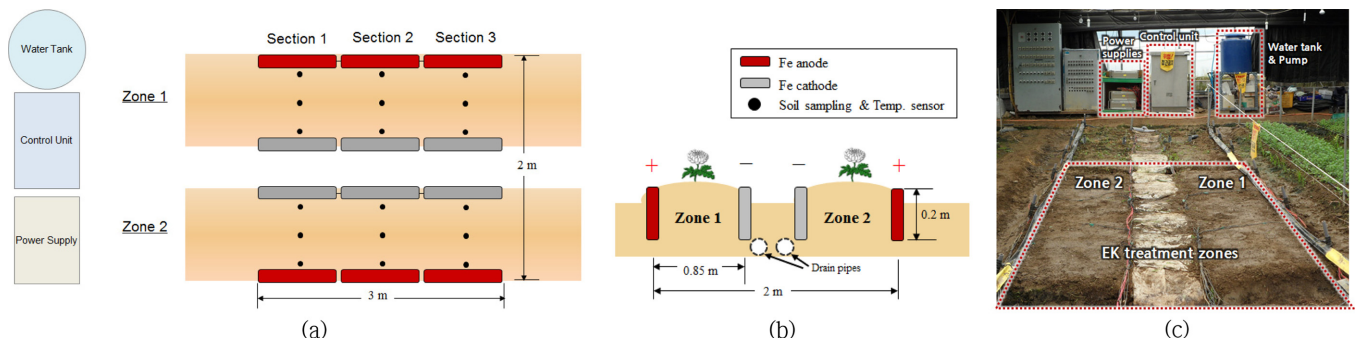


Fig. 1. Schematic and picture of the EK test site: (a) plan and (b) side views, and (c) field site view.

널을 통해 DC 전원장치(DAP-15010, 다우나노텍)를 Pulse 전원(200 kHz, 듀티비 1:1)으로 변환하여 공급하였으며 각 전극 쌍에 의한 처리 구역을 Section 1, 2, 3으로 표현하였다.

실험이 진행되는 동안 토양의 수분함량을 일정하게 유지하기 위해 실증시험 대상 구역에 매일 일정량의 수돗물을 분무하였으며 가운데 위치한 고랑 아래에 유공판(직경 5 cm)을 매설하여 전기삼투흐름에 의해 음극방향으로 형성된 유출수를 배출하였다.

EK 실험 중 각 전극에 흐르는 전류와 전압을 데이터 수집장치(Keithley 2750, Keithley Instruments Inc., USA)를 통해 매 10분 간격으로 측정하였다. 또한 Fig. 1(a)에서 표시한 것과 같이 각 전극 쌍 사이에 3개의 thermocouple(PT100, Technox Inc.)을 일정 깊이로 삽입하여 시간에 따른 토양의 온도변화를 위치별로 조사하였다.

실험 초기, 1주일 경과 후, 그리고 2주일 경과 후에는 각 전극 사이에서 위치별로 토양 시료를 채취하여 처리기간별 이온농도를 측정하였다. 이때 시료채취를 위해 직경 2.5 cm의 토양 샘플러를 이용하였으며 20 cm 깊이로 시료를 채취하여 분석에 이용하였다. 토양 시료는 깊이에 따라 2등분하여 “상층”과 “하층”으로 분류하여 토양 EC, pH, 수분함량, 양이온(Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+})과 음이온(Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-})의 농도를 측정하였다. 양이온의 경우, 염류 피해를 유발하는 이온은 물에 쉽게 용해되는 치환성 양이온이므로 이를 대상으로 분석을 진행하였다. 자세한 분석방법은 이전 논문에 기술한 것과 동일하다[13].

3. 결과 및 고찰

3-1. 전압 및 전류 변화

실험 기간 동안 전극 사이의 전압은 65 V 정도로 일정하게 유지되었으며 이때의 전류 변화는 Fig. 2와 같다. 14일 동안 전류값은 시간에 경과함에 따라 점차 감소하였는데, 각각의 양극과 음극에 흐르는 전류를 측정해 본 결과, 각 전극을 통해 흐르는 전류가 전극에 따라 차이를 보였다. 이는 초기에 토양 내 이온분포가 균일하지 않고 주변 시설물에 의한 영향도 있기 때문인 것으로 보인다. 현장 적용 시에는 금속재질의 주변 시설물로 누설되는 전류가 상당할 것으로 보이며 이에 대한 대책이 필요할 것으로 생각된다.

시간이 지남에 따라 전류의 세기는 서서히 감소하여, 초기에 3~5 A로 흐르다가 실험 종료 시에는 2~3 A로 감소하였다. 이와 같이 전류가 감소하는 것으로부터 토양 내 이온이 이동하여 저항이 증가했음을 알 수 있다.

3-2. 토양 온도 변화

실험이 진행되는 동안 각 전극 쌍의 양극, 가운데, 음극 부분에 온도 센서를 설치하고 토양의 온도를 측정하여 Fig. 3과 같은 결과를 얻었다. 토양의 온도는 전류의 세기와 직접적인 관련이 있는데, 더 많은 전류가 흐를수록 열이 발생하여 온도도 상승하게 된다. 본 실험에서는 이전의 실증 실험에 비해 높은 전류를 인가했기 때문에 토

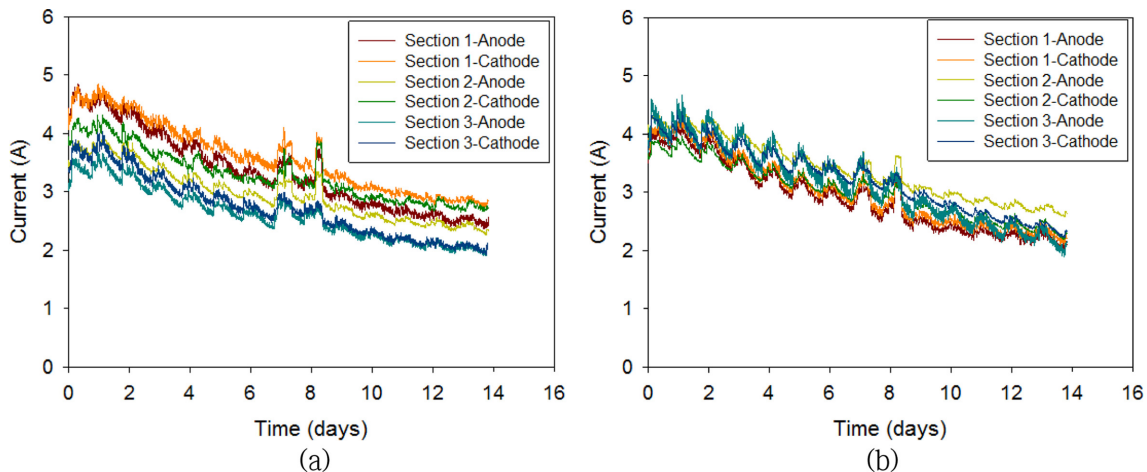


Fig. 2. Change in applied current with time: (a) Zone 1 and (b) Zone 2.

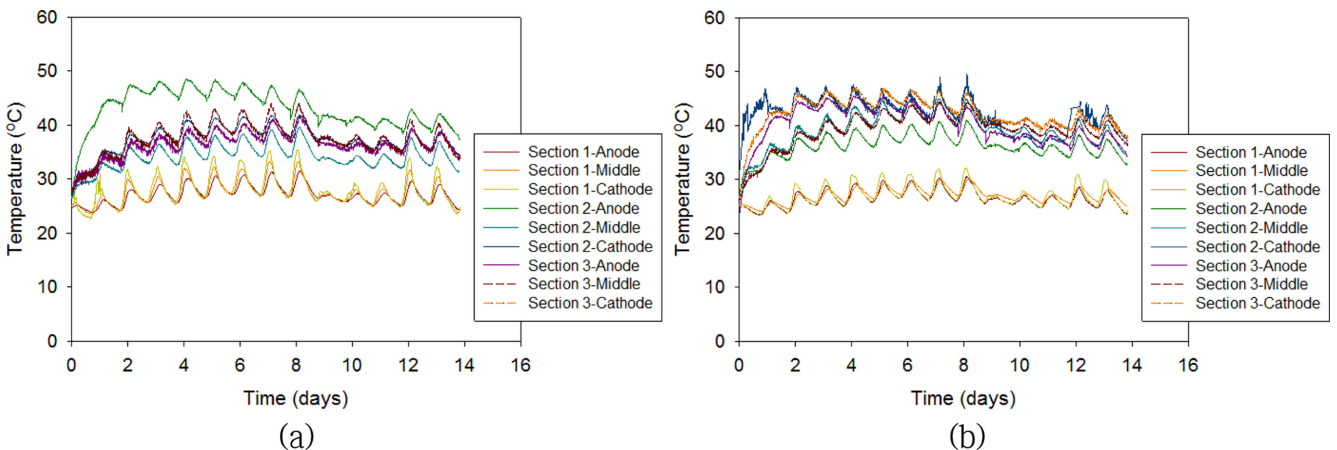


Fig. 3. Change in soil temperature with time: (a) Zone 1 and (b) Zone 2.

양의 온도도 최대 50 °C까지 상승하였다. 일반적으로 30 °C 이상의 온도에서는 작물의 생리대사에 이상이 생겨 정상적인 생육을 하지 못하므로 토양 온도를 모니터링하면서 EK 처리를 실시하거나 이와 같이 높은 전류를 공급하기 위해서는 반드시 휴경기에 EK를 적용해야 할 것으로 보인다.

토양의 온도는 전극의 위치에 따라 차이는 있으나 대체로 음극 주변이 양극이나 가운데 보다는 더 높은 것으로 나타난다. 이는 음극 주변의 저항이 높은 것을 의미하는데, 이러한 원인은 음극 주변에서의 pH 상승으로 인해 침전 등이 형성되기 때문으로 여겨진다[13].

3-3. 토양 pH 분포

Fig. 4는 실험대상 영역 중 상층의 초기 pH 및 EK 처리 1주일 후, 2주일 후의 토양 pH 변화를 보여준다. 실험 초기 토양의 pH는 상층과 하층 전체 평균 7.4이었으며 일부 가장자리를 제외하고는 토양의 깊이나, 위치와 관계없이 균일한 분포를 보였다. 2주간 토양에 높은

전류를 인가하여 EK 처리를 실시한 후에도 pH 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 양극 주변에서 일부는 5~6 정도로 낮아지고 음극 주변에서는 8까지 상승하였으나 pH 경사가 심하지는 않았다. 따라서 본 실험의 경우 비교적 높은 전류를 사용하는 경우에도 토양의 pH 변화에 따른 토성 변화나 작물 피해는 크게 고려하지 않아도 될 것으로 보인다. 그러나 pH 완충능력이 낮은 토양의 경우, pH 변화에 의한 영향도 함께 모니터링해야 할 것으로 판단된다.

3-4. 토양 EC 분포

Fig. 5에는 실험대상 영역 중 상층의 초기 및 EK 처리 1주일 후, 2주일 후의 토양 EC 변화를 나타내었다. 실험 초기 토양 상층의 EC는 6.3~11.9 dS/m의 분포를 보였으며 평균 9.2 dS/m로서 높은 염류 집적도를 보였다. 하층의 EC는 위치에 따라 3.3~8.0 dS/m, 평균 4.9 dS/m로서 높은 편이었으나 상층의 절반 수준으로서 하층보다는 상층의 염류 농도가 높았다. 따라서 본 연구에서는 주로 상층에서의 EC와 이온 농도 분포에 대해 다루었다.

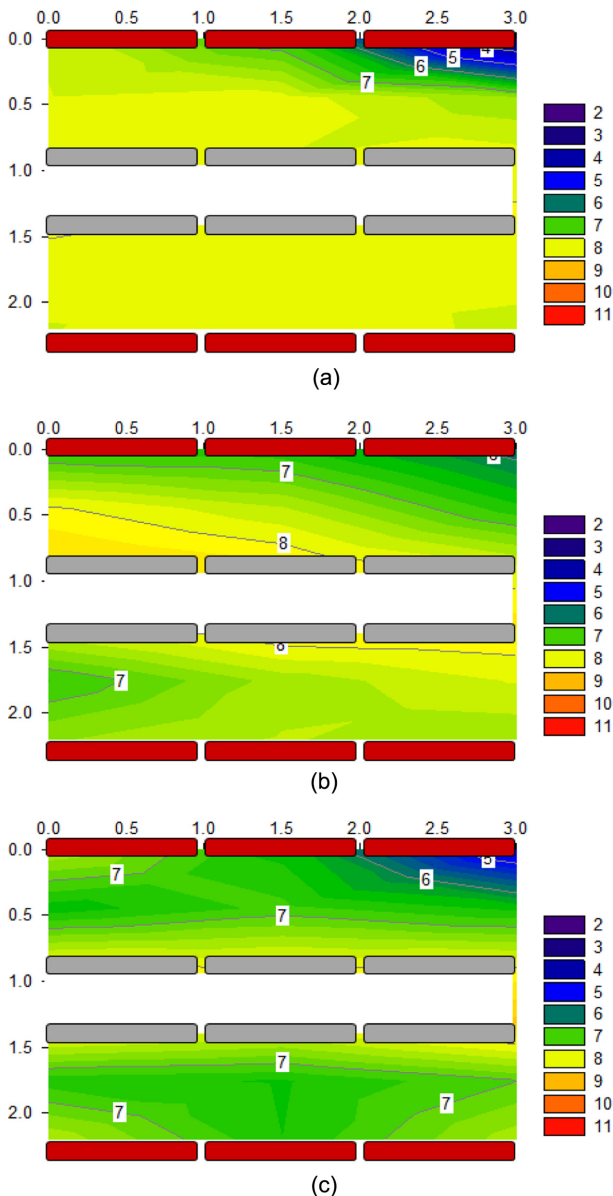


Fig. 4. Change in soil pH distribution: (a) before EK treatment, (b) after 1 week, and (c) after 2 weeks.

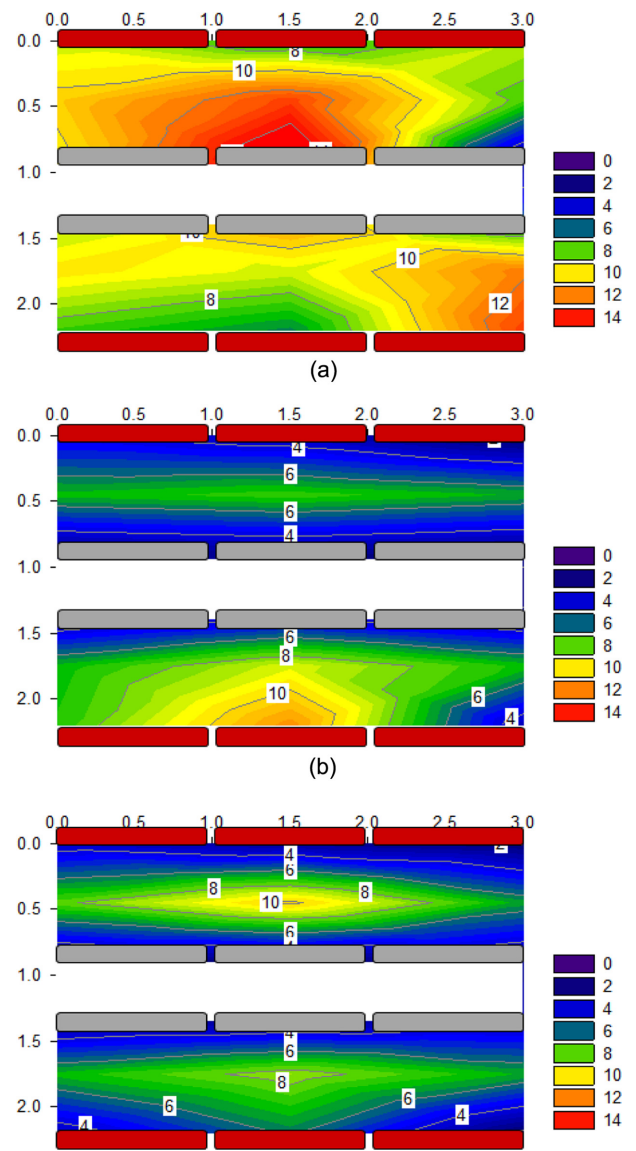


Fig. 5. Change in soil EC distribution: (a) before EK treatment, (b) after 1 week, and (c) after 2 weeks.

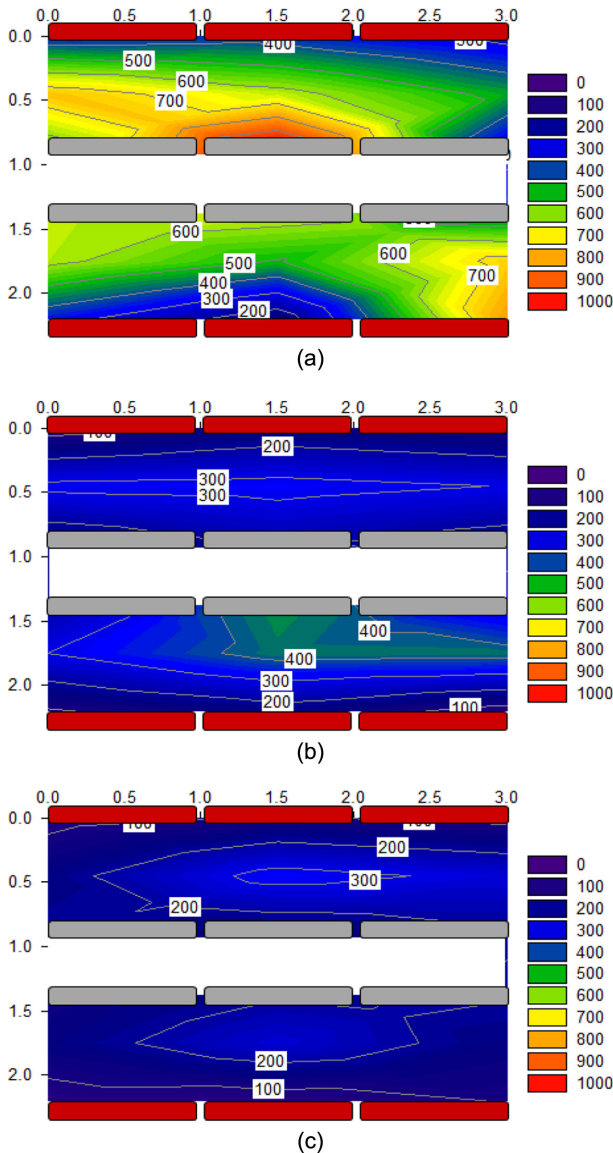


Fig. 6. Change in Na^+ ion distribution: (a) before EK treatment, (b) after 1 week, and (c) after 2 weeks.

EK 처리 1주일 후, 초기에 비해 EC가 상당히 저감된 것을 확인할 수 있었는데 특히 전극 주변에서부터 EC가 확연히 감소하였다. Zone 2 보다는 Zone 1에서 더 빨리 제거가 이루어졌는데 이는 지형적인 차이 때문인 것으로 생각된다. 2주일 후에는 Zone 2에서도 제거가 이루어져 Zone 1과 유사한 분포형태를 보였다. 그러나 두둑의 가운데에는 여전히 EC가 높은 편이었다.

3-5. 양이온 분포

Fig. 6과 Fig. 7은 EK 처리 시간에 따라 주요 양이온인 Na^+ 와 Ca^{2+} 의 농도 분포(상층)를 보여준다. Na^+ 이온은 실험 초기에 평균 500 ppm의 농도로 분포하였는데 1주일 경과 후 상당부분이 제거되었으며 2주일 후에는 300 ppm 이하로 낮아졌다. 특히 양극 주변에서는 100 ppm 이하의 낮은 농도로 잔존하였는데 이는 Na^+ 이온이 토양 공극수에 용해되어 전기이동에 의해 양극에서 음극 방향으로 쉽게 이동될 수 있기 때문으로 판단된다[15].

Ca^{2+} 이온의 경우에는 초기 농도가 상층 평균 4,500 ppm로서 양

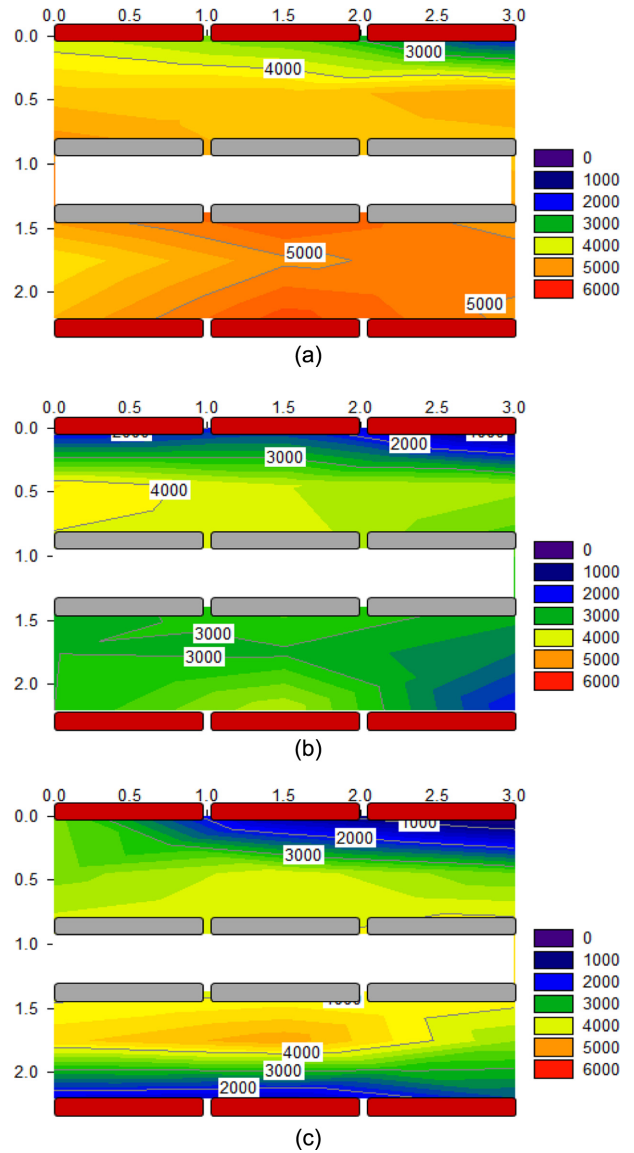


Fig. 7. Change in Ca^{2+} ion distribution: (a) before EK treatment, (b) after 1 week, and (c) after 2 weeks.

이온 중 가장 높은 농도로 존재했으며 Zone 1 보다는 Zone 2에서의 농도가 더 높았다. EK 처리 결과, Na^+ 와 유사하게 양극 주변에서부터 제거되기 시작하여 양극에서는 낮고 음극에서는 높은 농도 경사를 관찰할 수 있었다. 이러한 농도 경사는 2주일 처리 후에는 뚜렷이 나타났는데, 양극 주변에서는 1,000 ppm 음극 주변에서는 여전히 4,000 ppm 이상의 높은 농도를 보였다. 이와 같이 Ca^{2+} 이온은 이온 이동의 증거만 나타났을 뿐 Na^+ 이온과는 달리 농도가 크게 감소하지는 않았는데, 이는 Ca^{2+} 이온이 토양에 쉽게 흡착되거나 침전을 형성하여 제거가 쉽지 않기 때문인 것으로 생각된다[13].

3-6. 음이온 분포

주요 음이온인 Cl^- 와 SO_4^{2-} 이온의 농도분포(상층)를 처리 기간에 따라 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타내었다. Cl^- 이온은 초기에 위치에 따라 차이는 있으나 평균적으로 1,150 ppm의 농도로 존재하였는데, EK 처리 1주일 후에 대부분이 제거되었으며 2주일 후에는 전 영역에서 300 ppm 이하로 잔존하여 높은 제거율을 보였다. 그러나 SO_4^{2-}

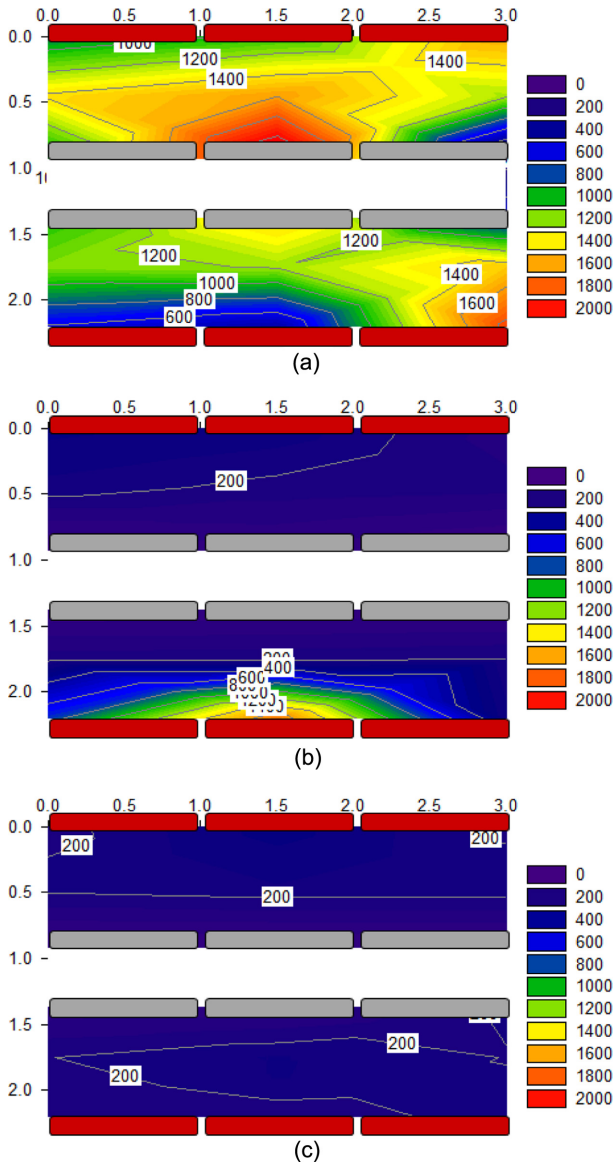


Fig. 8. Change in Cl⁻ ion distribution: (a) before EK treatment, (b) after 1 week, and (c) after 2 weeks.

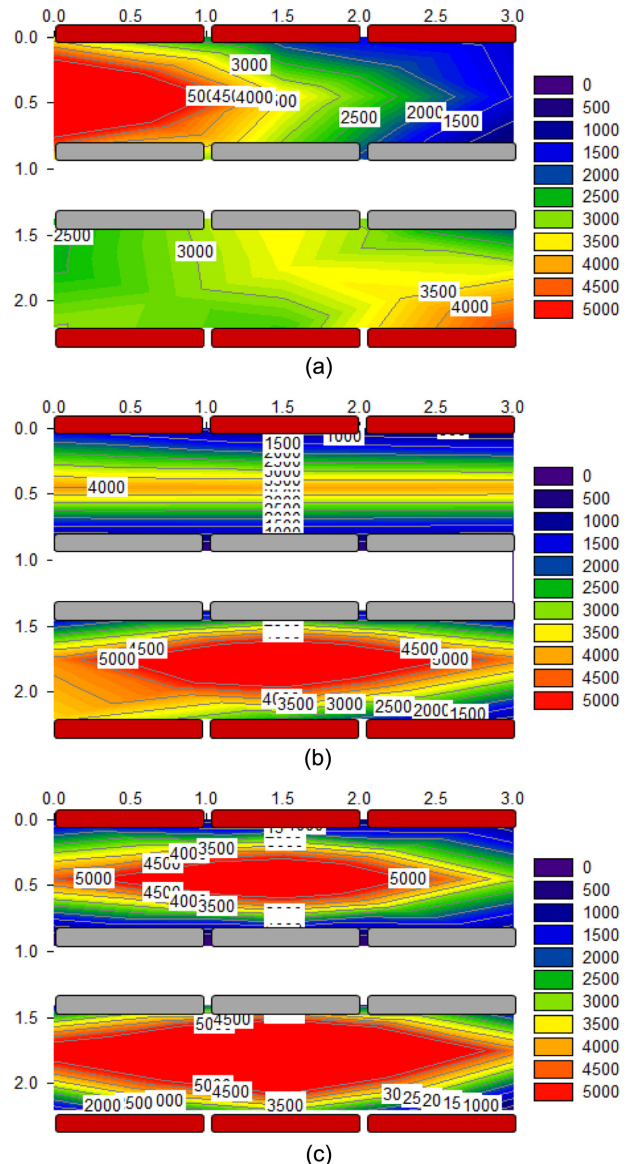


Fig. 9. Change in SO₄²⁻ ion distribution: (a) before EK treatment, (b) after 1 week, and (c) after 2 weeks.

Table 2. Removal efficiency of EC and ions after EK treatment

		1 week later				2 weeks later			
		Zone 1		Zone 2		Zone 1		Zone 2	
		Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom
EC	dS/m	4.1	3.1	5.8	3.6	4.4	3.6	4.5	2.8
	Removal(%)	56	52	37	(4)	53	43	51	19
Na ⁺	mg/kg	195	116	263	179	170	96	147	95
	Removal(%)	63	61	50	73	67	68	72	86
Ca ²⁺	mg/kg	3,031	2,545	2,937	2,180	3,087	3,058	3,341	2,974
	Removal(%)	26	35	41	47	24	22	33	27
Mg ²⁺	mg/kg	397	165	570	274	467	204	600	287
	Removal(%)	47	59	3	10	38	50	(2)	6
K ⁺	mg/kg	212	176	256	228	220	188	242	201
	Removal(%)	25	34	21	21	22	29	26	31
Cl ⁻	mg/kg	157	68	370	124	156	86	172	77
	Removal(%)	87	89	66	68	87	86	84	80
NO ₃ ⁻	mg/kg	0	12	136	52	2	10	3	4
	Removal(%)	100	91	76	(34)	100	93	100	89
SO ₄ ²⁻	mg/kg	1,625	1,071	2,530	1,363	1,953	1,433	2,783	1,355
	Removal(%)	75	(31)	54	(209)	54	26	6	(114)

이온은 Cl^- 이온과 달리 쉽게 제거되지 않고 높은 농도로 잔류하였다. EK 1주일 처리 후에 전극 주변 영역에서는 농도가 조금씩 감소하였으나 두둑의 가운데에 높은 농도로 축적되는 경향을 보였는데, 이러한 현상은 2주일 후에 더욱 심화되었다.

3-7. 처리기간별 제거율 비교

Table 2에는 2주간의 EK 실증실험에서의 주요 이온과 EC 제거율을 처리 기간별로 정리하였다. 높은 전류를 인가한 실증실험에서 EK를 1주일 간 적용한 결과, 토양 상층에서 47%의 EC가 저감되었다. 이때 주요 염류인 Na^+ 와 Cl^- 의 제거율은 각각 56%와 77%로 나타났다. 이러한 결과는 1주일 이하의 단기간 EK 처리에 의해서도 상당량의 염류가 제거될 수 있음을 의미한다. SO_4^{2-} 이온의 경우 상층에서의 제거율이 1주일 후에는 64%였으나 2주일 후에는 30%로 오히려 낮아졌는데 이는 SO_4^{2-} 이온의 축적이 더 심해졌기 때문으로 여겨진다. 높은 전류를 인가한 경우 농도경사와 토양 내 이온축적이 심해지는 것을 관찰할 수 있었는데 제거율을 높이기 위해서는 이를 해결하는 방안이 필요할 것으로 생각된다.

2주일 후 토양 상층의 평균 EC 저감율은 52%로서 1주일간의 추가 적용에 의해 제거율이 5% 정도 높아졌다. 이는 대부분의 토양 염류가 실험초기 1주일 동안 제거되고 그 이후에는 이온의 이동이 서서히 진행됨을 의미한다. 따라서 높은 농도로 집적된 염류를 제거할 때는 단기간에 EK를 적용하여 수일 내에 상당부분의 염을 제거한 뒤 자연저감을 시키는 것도 하나의 효과적인 제염 전략이 될 수 있을 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 2주간의 실증시험을 통해 EK 기술을 이용한 시설 재배지 토양의 염류제거 효과를 확인하였다. EK 처리를 통해 염류가 높은 농도로 축적된 토양 상층의 EC는 평균적으로 1주일 후 47%, 2주일 후에는 52% 감소하였는데 이는 EK 기술이 1~2주간 휴경 기간 동안 효과적으로 염류를 제거할 수 있는 기술임을 증명하는 결과이다. 또한 휴경을 하지 않고 작물이 재배 중인 시설재배지에 대해서도 토양 온도를 모니터링하거나 전류의 세기를 제어함으로써 작물에 영향을 미치지 않고 EK 제염 기술을 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 염류 제거율을 높이기 위해서는 토양에 대한 흡착능이 높은 Ca^{2+} 와 SO_4^{2-} 이온의 제거율을 높이기 위한 처리 방안이 필요하며, 효율적인 제염을 위해서는 EK 처리 기간과 인가 전류의 세기 조절 등의 운전 전략이 요구된다.

감 사

본 연구는 지식경제부 일반사업(과제번호 12-12-N0201-06)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Lee, S. B., Lee, C. H., Hong, C. O., Kim, S. Y., Lee, Y. B. and Kim, P. J., "Effect of Organic Residue Incorporation on Salt Activity in Greenhouse Soil," *Korean J. Environ. Agric.*, **28**, 397 (2009).
2. Ravindran, K. C., Venkatesan, K., Balakrishnan, V., Chellappan, K. P. and Balasubramanian, T., "Restoration of Saline Land by Halophytes for Indian Soils," *Soil Biol. Biochem.*, **39**, 2661(2007).
3. Acar, Y. B. and Alshawabkeh, A. N., "Principles of Electrokinetic Remediation," *Environ. Sci. Technol.*, **27**, 2638(1993).
4. Probstein, R. F. and Hicks, R. E., "Removal of Contaminants from Soils by Electric Fields," *Science*, **260**, 498(1993).
5. Shi, S., Cho, S. H., Lee, Y. H., Yun, S. H., Woo, J. J. and Moon, S. H., "Desalination of Fish Meat Extract by Electrodialysis and Characterization of Membrane Fouling," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**, 575(2011).
6. Cho, J. M., Kim, K. J., Chung, K. Y., Hyun, S. and Baek, K., "Restoration of Saline Soil in Cultivated Land Using Electrokinetic Process," *Sep. Sci. Technol.*, **44**, 2371(2009).
7. Cho, J. M., Park, S. Y. and Baek, K., "Electrokinetic Restoration of Saline Agricultural Lands," *J. Appl. Electrochem.*, **40**, 1085(2010).
8. Choi, J. H., Maruthamuthu, S., Lee, H. G., Ha, T. H. and Bae, J. H., "Nitrate Removal by Electro-bioremediation Technology in Korean Soil," *J. Hazard. Mater.*, **168**, 1208(2009).
9. Jayasekera, S. and Hall, S., "Modification of the Properties of Salt Affected Soils Using Electrochemical Treatments," *Geotech. Geol. Eng.*, **25**, 1(2007).
10. Lee, Y. J., Choi, J. H., Lee, H. G., Ha, T. H. and Bae, J. H., "Pilot-scale Study on in situ Electrokinetic Removal of Nitrate from Greenhouse Soil," *Sep. Purif. Technol.*, **79**, 254(2011).
11. Xu, H., Chen, W., Wang, C., Chen, B. and Yang, J., "An Enhanced Electrokinetic Remediation of Saline Lands by Sludge Layer," *J. Food Agric. Environ.*, **10**, 709(2012).
12. Choi, J. H., Lee, Y. J., Lee, H. G. and Ha, T. H., Bae, J. H., "Removal Characteristics of Salts of Greenhouse in Field Test by in situ Electrokinetic Process," *Electrochim. Acta*, **56**, 63(2012).
13. Lee, Y. J., Choi, J. H., Lee, H. G. and Ha, T. H., "Electrokinetic Remediation of Saline Soil Using Pulse Power," *Environ. Eng. Sci.*, **30**, 133-141(2013).
14. Cardon, G. E., Davis, J. G., Bauder, T. A. and Waskom, R. M., "Managing Saline Soils," Colorado State University Extension (2011). Available at: <http://www.ext.colostate.edu/pubs/crops/00503.html>.
15. Luo, Q., Zhang, X., Wang, H. and Qian, Y., "Mobilization of Phenol and Dichlorophenol in Unsaturated Soils by Non-uniform Electrokinetics," *Chemosphere*, **59**, 1289(2005).