

## 펄스동전기법과 연속처리동전기법을 이용한 점토성-사질토의 탈수화 효율 비교

### Comparison of Improving Dewatering Process at Clay-Sandy Soil based on Pulse-Electrokinetic Technology and Continuous-Electrokinetic Technology

신 상 희<sup>†</sup>

Sanghee Shin

Received: January 6<sup>th</sup>, 2014; Revised: January 21<sup>st</sup>, 2014; Accepted: February 18<sup>th</sup>, 2014

**ABSTRACT** : Pulse electrokinetic technology is proposed for improving the dewatering-process from clay-sandy soil. Proposed electrokinetic technology is to be the dewatering process due to fluid movement of current flow for the stability of clay-sandy soils. Samples produced in this study were completed to verify the proposed performance for 7 days by gradually increasing the pressure to the final pressure of 30 psi (2.11 kgf/cm<sup>2</sup>) through the compression process. In this study, pulse electrokinetic treatment and conventional continuous electrokinetic treatment are tested and observed, respectively. The condition of continuous electrokinetic treatment is a continuous process during 48 hours. And the condition of pulse electrokinetic treatment system is to interrupt the power three times for 48 hours, every 8 hours. These treatments are that the voltage gradient is 3 V/cm. As a result, the efficiency of pulse electrokinetic is similar to the continuous electrokinetic. The power consumption efficiency of pulse electrokinetic is better than continuous electrokinetic.

**Keywords** : Electrokinetic technology, Pulse-electrokinetic technology, Clay-sandy soil, Dewatering, Soil stability

**요 지** : 펄스동전기법은 점토성-사질토에서 탈수화 공정을 효율적으로 진행하기 위해 제안되었다. 제안된 동전기법은 점토성-사질토에서 토양 안정성의 증진을 위해 전류 흐름에 따르는 유체의 이동에 의한 탈수화 공정을 진행하는 것이다. 제안된 동전기법의 성능을 확인하기 위해 제작된 샘플은 총 7일간에 점진적으로 압력을 증가시켜 30 psi(2.11 kgf/cm<sup>2</sup>)의 최종압력으로 압축과정을 거쳐 완성되었다. 기존의 연속적인 처리와 펄스방식으로 처리하는 공정을 비교하여 각각의 특성을 관찰하였다. 각각의 테스트는 48시간 동안 3 V/cm의 전압 경사 조건으로 연속적인 처리공정과 48시간 동안 총 8시간씩 3회에 걸쳐 전기를 차단하는 펄스방식으로 진행하였다. 그 결과, 펄스방식의 효율이 연속처리방식의 효율과 비슷한 것으로 나타났고 펄스방식이 연속처리방식보다 전력소비가 약 50 % 감소로 그 경제성을 입증하였다.

**주요어** : 동전기법, 펄스동전기법, 점토성 사질토, 탈수화, 토양안정화

## 1. 서 론

동전기(electrokinetic)를 이용한 연구는 세계 2차 대전 이후로 시작되어 그 역사가 깊고 현재까지 여러 분야에 적용되어 사용하고 있다. 특히 토양의 안정화를 위한 다양한 연구가 진행되었고 탈수화 공정은 그 안정성을 부여하기 위한 하나의 연구로 자리를 잡았다. Casagrande는 다양한 특성을 지니고 있는 토양에서 동전기를 이용한 탈수의 가능성을 보여주며 이를 적용하는 연구를 진행하였다(Casagrande, 1937, 1947). Casagrande와 Winterkorn 및 다른 연구자들은 토목

공학, 토질 역학에 관련한 연구를 통해 토양의 전기적 처리의 목적 및 효과를 집중적으로 연구하였다(Casagrande, 1937, 1947; Winterkorn 1947, 1955; Shin, 2013; Shin et al., 2013). 탈수화 공정을 응용한 연구는 Ambah와 Chilingar에 의해 진행되었고 토양 속에 존재하는 석유를 회수하는 석유고차회수법(enhanced oil recovery)연구와 함께 병행되었다(Ambah et al., 1964; Chilingar et al., 1964). 특히 Chilingar는 동전기를 이용한 석유고차회수법(electrical enhanced oil recovery)의 사용을 위해 동전기법에서 가장 경제적인 부분인 전력의 소비를 줄이기 위한 저전력의 메커니즘을 구성하

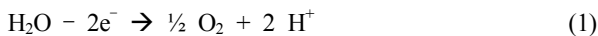
<sup>†</sup> Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction and Technology (Corresponding Author : [scott@kict.re.kr](mailto:scott@kict.re.kr))

였고, 또한 여러 가지 조건으로 구성된 다양한 실험을 실시하였다(Chilingar et al., 1964, 1965, 1968). Pamukcu는 산업 단지 지역 중 유류로 오염된 토양을 복원 방법으로, 동전기를 이용한 점토질 토양에서 탄화수소를 제거하는 연구를 수행하였다(Pamukcu et al., 1997, 2004). 이러한 동전기법을 이용한 처리연구는 일반적으로 토양을 복원할 때 사용되는 스팀 생성기, 압축기, 유체 펌프, 위해 물질 저장 탱크와 같은 부대 시설을 추가적으로 요구하지 않아 저비용으로 처리 및 석유를 회수할 수 있고, 점토질과 같은 투수계수가 낮은 매질에서 이온 성분의 물질들을 추출할 수 있으며 토양을 탈수할 수 있는 중요한 기술 중 하나이다. 미국의 캘리포니아와 캐나다에서 전기적 석유고차회수법을 이용한 현장 크기의 실험은 성공적으로 이루어진 바 있다(Wittle et al., 2011). Shin은 공정의 효율을 증가시키기 위하여 동전기법을 사용하면서 추가적으로 양극에 산성 용액을 주입하는 연구를 진행하였다(Shin et al., 2013).

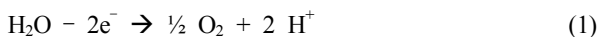
본 연구에서 동전기법을 이용하여 고염도(40,000 ppm)인 해안가 점토성-사질토를 대상으로 펄스-동전기를 기반으로 하여 탈수화 적합성을 조사하고 기존의 연속처리방식과 펄스 처리방식간의 효율차이를 확인하는데 그 목적을 두고 있다.

## 2. 이론적 배경

일반적인 동전기법의 물리화학적 반응공정은 전압비율에 따라 결정된 직류 전류(Direct Current)에 의해 진행된다. 양극에서는 수소이온(H<sup>+</sup>)과 기체 산소가 발생하고 음극에서는 수산화 이온(OH<sup>-</sup>)과 수소 가스가 생산된다.



Eq. (1)과 Eq. (2)는 물의 전기분해 후 양극과 음극에서 진행된 화학적 구성을 나타내고 있다. 40,000 ppm의 고농도의 해수에서는 Eq. (3)과 같이 산소가스와 수소이온이 발생하는 양극에서 염소가스를 추가적으로 발생한다.



Helmholtz-Smoluchowski의 식으로부터 전류에 의한 유속을 유도하면 Eq. (4)와 같이 정리할 수 있다. 동전기법에서의 제타포텐셜 ( $\xi$ )은 전기비율에서 결정되는데 이는 Eq.

(4)에서 자세히 살펴볼 수 있다.

$$v_e = \frac{\xi DE}{4\pi\eta} \quad (4)$$

$$Q_e = \frac{A\xi DE}{4\pi\eta} \quad (5)$$

여기에서  $v_e$  = 동전기의 유속,  $Q_e$  = 동전기에 의한 유량,  $A$  = 샘플의 단면적,  $D$  = 유전율,  $\xi$  = 제타포텐셜,  $E$  = 포텐셜의 변화 값, 그리고  $\eta$  = 유체의 점성을 나타낸다. Eq. (4)에서 제타포텐셜( $\xi$ )은 전기가 흐르는 지역뿐만 아니라 유체 속에서 이온의 농도와 pH에 따라서 다양하게 나타난다. 그러므로 샘플 테스트 중 동전기적 거동은 상수로 정의할 수 없다(Probstein & Hicks, 1993).

또한 특정지점의 총 유량은 Eq. (6)에서 나타낸 것처럼 수력학 요소와 동전기적 요소의 합으로 표현할 수 있다(Shin et al., 2012; Shin et al., 2013).

$$q_t(x) = q_h(x) + q_e(x) \quad (6)$$

$q_t(x)$ 는 총 유량,  $q_h(x)$ 는 수력학에 관련한 모든 유량의 합,  $q_e(x)$ 는 동전기적인 흐름에 관련한 총 유량이다.  $q_h(x)$ 와  $q_e(x)$ 를 정량적으로 살펴보면 Eq. (7), Eq. (8)과 같다.

$$q_h(x) = A k_h \mu^{-1} \frac{dp}{dx} = A k_h \mu^{-1} \nabla p \quad (7)$$

$$q_e(x) = A k_e \mu^{-1} \frac{d\phi}{dx} = A k_e \mu^{-1} \nabla \phi \quad (8)$$

$A$ 는 유체의 흐름 방향에 따른 단면적,  $k_h$ 는 유체 흐름 방향의 다공성매질의 투수계수,  $k_e$  동전기 투수계수  $\mu$ 는 유체의 점성을 나타낸다.  $\frac{dp}{dx}$ 는 일정한 지점  $x$ 의 유체 흐름 방향의 압력 변화이고,  $\phi$ 는 전기적 영역에 존재하는 포텐셜이다.

Eq. (7), Eq. (8)을 다시 정리하면 Eq. (9)가 된다.

$$\frac{q_t - q_h}{q_h} = \frac{k_e \nabla \phi}{k_h \nabla p} \quad (9)$$

Eq. (9)는 수력학 유량과 동전기학 유량을 비율로 표시한 것이고, 제타-포텐셜과 2가 이온상수 그리고 포텐셜차의 원리를 설명할 수 있다.

Fig. 1은 동전기법을 암석이나 투수계수가 낮은 점토성 매질에 적용할 경우 석유나 같은 유동성 물질 또는 이온 물질들의 이동방향을 묘사한 그림이다. 중앙(III)에는 유체의

흐름이 양극(Anode) 방향에서 음극(Cathode) 방향으로 진행되며, 유동형 이중층(II)과 비유동층(I)으로 암석이나 투수 계수가 낮은 점토 매질의 표면과 내부를 각각 나타내고 있다(Shin et al., 2012; Shin, 2013; Shin et al., 2013).

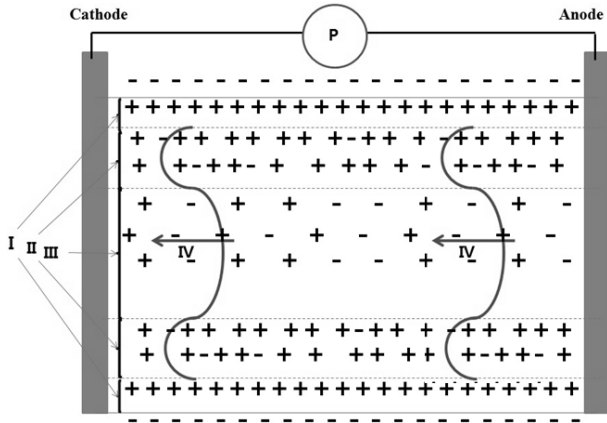


Fig. 1. Schematic diagram of electrokinetic double layer (I: Immobile Double Layer, II: Mobile Double layer, III: Free water, IV: Velocity Profile) as envisioned by the authors. Solid curved line – velocity profile in a capillary. P = D.C. current power supply. Rock is negatively charged (Shin et al., 2012; Shin, 2013; Shin et al., 2013).

### 3. 연구지역

연구지역은 아랍에미리트(UAE)의 수도 아부다비 인근 석유정제소의 점토성-사질토를 대상으로 실험을 실시하였다. 수도인 아부다비 지역은 아랍에미리트 석유매장량의 약 97%를 가지고 있으며 내수를 위한 석유정제시설을 보유하고 있다. 정유정제시설 인근 해안가는 지리적으로 사막과 인접하고 있고, 일반적인 바다의 평균염분농도는 35,000 ppm이지만 이 지역의 해수염분농도는 40,000 ppm으로 고농도라 할 수 있다. 샘플링 지역의 정유정제시설 인근이라 이미 오염되어 조개들은 이미 폐사한 상태였다. 이러한 이유로 채집된 샘플은 조개껍데기와 같은 큰 고형물질을 포함하고 있었기 때문에 10 mm 체로 미리 제거한 후 실험용 샘플을 제작하였다. 지역의 위치는 동경 54° 29' 33.96", 북위 24° 25' 24.75" 지역 인근이다.

### 4. 실험구성 및 결과

#### 4.1 실험 구성

본 실험에서 사용된 샘플은 길이 30 cm, 직경 3.81 cm

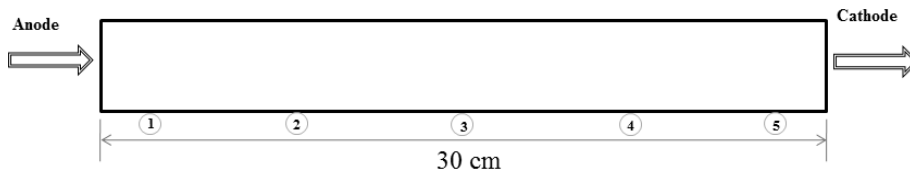


Fig. 2. Schematic diagram for sampling points

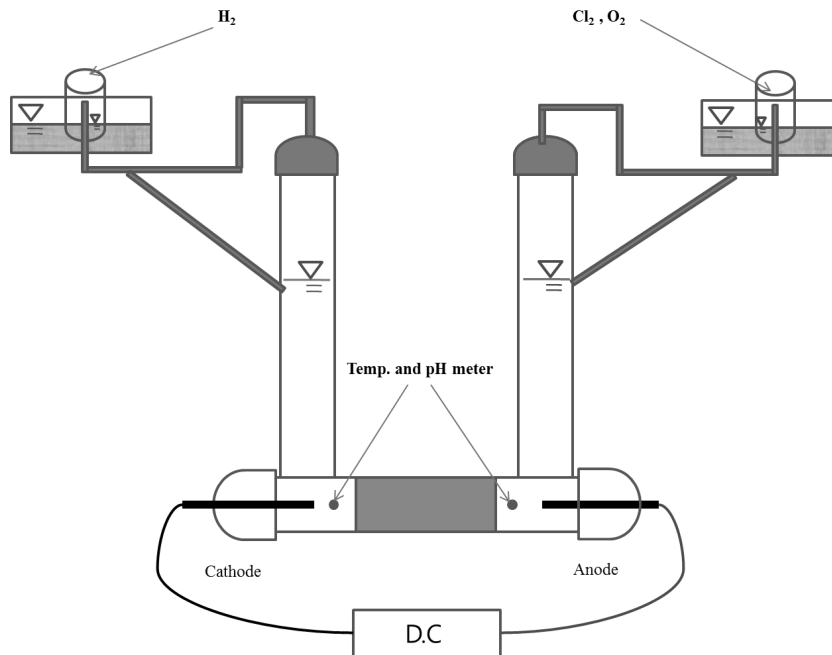


Fig. 3. Apparatus used in electrical enhanced oil recovery of clay component contaminated with oil from offshore sediments (Shin et al., 2012; Shin, 2013; Shin et al., 2013)

(1.5인치)로 제작되었다. 샘플은 압력을 서서히 7일간 증가시켜 최종 압력이 30 psi(2.11 kgf/cm<sup>2</sup>)가 되도록 압축하였다. 실험을 시작하기 전 토양의 샘플을 채취하여 초기 함수비(water content) 값을 측정하고 실험 후 토양의 탈수 정도를 확인하기 위해 Fig. 3에 부여한 번호의 위치에서 가운데 지점인 3번 부근에서 샘플을 채취한 후 토양의 함수비를 측정하였다(Shin et al., 2012; Shin, 2013; Shin et al., 2013)

본 실험은 Fig. 4에서 묘사된 모형을 통하여 진행되었다. 실험 테스트는 48시간 동안 3 V/cm의 전압 경사 조건으로 한 연속적인 처리 공정과 48시간 동안 총 8시간씩 3회에 걸쳐 전기를 차단하는 펄스방식으로 진행하였다. 발생하는 가스는 안전한 배기가스 포집 시설에서 수집한 후 완전 배출하였다.

Fig. 5에서 보여지는 것처럼 연속처리방식은 48시간 지속적으로 샘플에 전류가 흐르는 것을 나타내고 있으며 Fig. 6은 펄스처리방식으로 48시간 중 3회씩 8시간 간격으로 전류의 흐름을 보여준다.

#### 4.2 실험 결과

본 실험에서는 동전기법을 이용한 점토성-사질토에서 연속처리방식과 펄스처리방식으로 처리한 각각의 측정된 결과를 나타내었다. Fig. 5는 실시된 두 개의 실험에서 실험

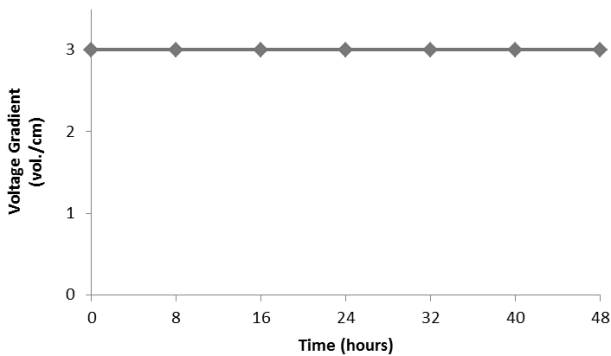


Fig. 4. Comparison time (hours) vs. voltage gradient (vol./cm) at continuous electrokinetic treatment during 48 hours

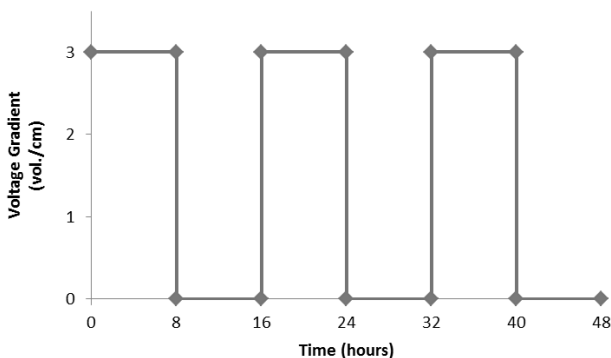


Fig. 5. Comparison time (hours) vs. voltage gradient (vol./cm) at pulse electrokinetic treatment during 48 hours (with three 8 hours interruption)

전후의 함수비를 측정된 결과 값이다.

실험 시작 전 샘플의 무게는 펄스방식의 경우 약 1,142.4 g이고 연속처리방식의 경우 약 1,075.73 g으로 함수비는 두 샘플이 각각 42 %로 측정되었다. 48시간 후 측정된 함수비는 펄스방식의 경우 31 %이며 연속처리 방식의 경우 약 30 %로 나타났다. 결과적으로 각 샘플의 함수비를 비교하여

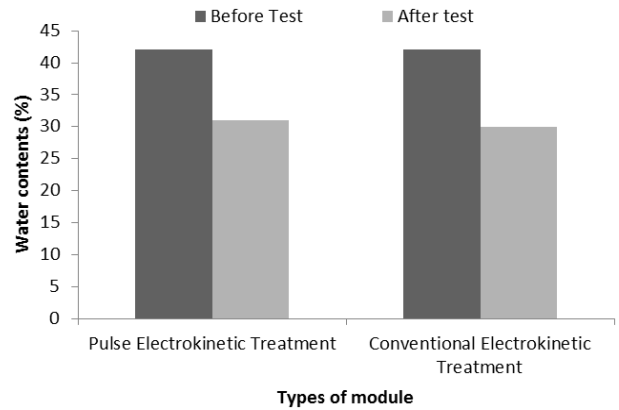


Fig. 6. Comparison between pressured module and non-pressured module with water contents

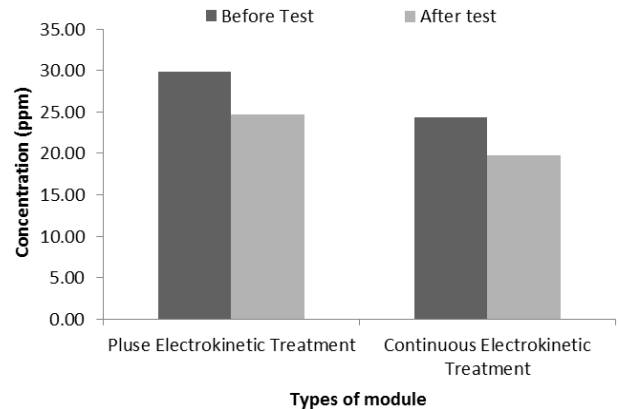


Fig. 7. Chromium (Cr) concentration at pulse electrokinetic treatment and continuous electrokinetic treatment after 48 hours with 3 V/cm

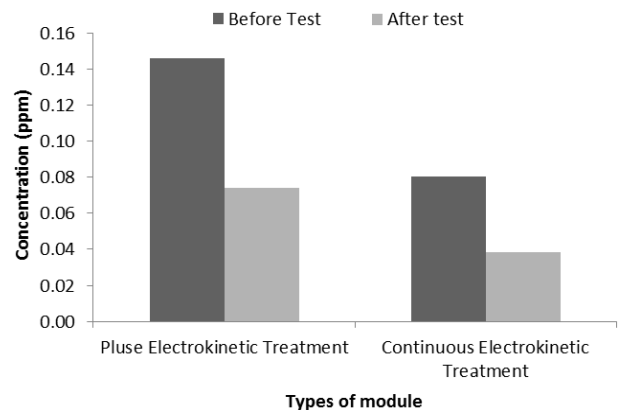


Fig. 8. Cadmium (Cd) concentration at pulse electrokinetic treatment and continuous electrokinetic treatment after 48 hours with 3 V/cm

볼 때 펄스처리방식의 처리보다 연속처리방식이 약 1 % 정도 높게 나타났다.

샘플의 실험 후 처리 효율을 보기 위해 Cr과 Cd의 농도 변화를 측정하였다. 펄스처리방식의 샘플 내 Cr의 초기 농도는 약 29.83 ppb이며 Cd의 경우 0.146 ppb였다. 펄스방식으로 처리한 샘플 내 Cr는 약 24.72 ppb로 17.13 % 제거되었고 Cd은 약 0.074 ppb로 약 49.36 %가 제거되었다. 연속처리방식의 샘플 Cr의 초기 농도는 약 24.35 ppb이며 Cd의 경우 0.08 ppb였다. 연속처리방식으로 처리한 샘플내의 Cr는 약 19.76 ppb로 18 % 제거되었고 Cd은 약 0.039 ppb로 약 51.99 %가 제거되었다.

## 5. 결 론

본 연구는 동전기를 펄스방식으로 샘플에 주입하여 전력 소비를 낮추어 경제성향상에 도움될 수 있는 가능성을 보여주었다. 샘플내 함수비의 변화와 Cr과 Cd의 농도 변화는 실험 전 제시한 탈수화 공정에 대한 비교·분석 자료로 사용되었다. 함수비는 48시간 후 측정된 결과 펄스처리방식과 연속처리방식의 차이는 약 1 %로 연속처리방식이 약간 높았으나 샘플의 크기를 비교해볼 때 그 차이는 미비한 것을 알 수 있었다. 함수량과 샘플의 질량으로 계산된 각각의 샘플에서의 유속은 펄스처리방식의 경우 26.25 cm/day이며 연속처리방식의 경우 26.96으로 측정되었다. 전력사용량을 비교해볼 때 펄스처리방식은 총 24시간 동안 전원을 차단하였기 때문에 연속처리방식에서 사용된 전력량의 1/2만을 소비한 것으로 나타났으므로 펄스처리방식의 경제성이 입증되었다. 샘플의 실험 후 처리 효율을 보기 위해 Cr과 Cd의 농도 변화에서 펄스방식의 샘플 Cr의 17.13 %, Cd은 약 49.36 %가 제거되었다. 연속처리방식의 샘플 Cr의 18 %가 제거되었고 Cd은 약 51.99 %가 제거되었다. 각기 다른 방식으로 제거된 중금속의 효율과 함수비와의 관계를 살펴보면 Cr의 경우 0.87 %, Cd의 경우 2.63 %로 연속처리방식이 펄스방식보다 처리능력이 조금 높게 나왔다. 동일한 시간에 전력 소비의 차이를 두어 동전기법에서 가장 문제점으로 대두되는 전력소비를 줄여 토양의 안정화를 위해 토양의 탈수화 공정을 도입하고 부가적으로 토양에 있는 오염물질을 제거할 수 있는 하이브리드형 공법으로 연구에 의미를 가지고 있다. 요약하면, 48시간 동안에 전력소비를 줄이기 위해 펄스방식으로 전력을 차단해도 유속변화에 따른 함수비의 차이가 미비하며 그 변화에 따른 샘플 내에 이온물질의 제거율 또한 큰 차이가 없었다는 것을 알 수 있었다. 해안지역 샘플을 대상으로 연구하였지만 향후 점토지역과 점토성-사질토 지역을 대상으로 오염물질 제거 및 토양 안정화를 위

한 탈수화 공정으로 사용될 수 있으며 in-situ 방식으로 모든 공정이 진행되기 때문에 환경친화적이며 토양환경의 피해를 최소화할 수 있을 것이다.

## References

1. Ambah, S. A., Chilingar, G. V. and Beeson, C. M. (1964), Use of direct electrical current for increasing the flow rate of reservoir fluids during petroleum recovery, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 3, No. 1, pp. 8~14.
2. Casagrande, I. L. (1937), Full scale experiment to increase bearing capacity of piles by electrochemical treatment, *Bautechnique*, Vol. 15, No. 1, pp. 14~16.
3. Casagrande, I. L. (1947), The application of electro-osmosis to practical problems in foundations and earthworks, H.M. Stationery Office, 15 p.
4. Chilingar, G. V., Adamson, L. G., Armstrong, R. A. and Beeson, C. M. (1964), Soils stabilized through electroosmosis, *Southwest Builder and Contractor*, Vol. 145, No. 24, pp. 100~102.
5. Chilingar, G. V., Adamson, L. G., Rieke, H. H. and Gray, R. R. (1968), Electrochemical treatment of shrinking soils, *Engineering Geology*, Vol. 2, No.3, pp. 197~203.
6. Chilingar, G. V., Amba, S. A. and Beeson, C. M. (1965), Application of electrokinetic phenomena in civil engineering and petroleum engineering, *Annals of the New York Academy of Science*, Vol. 118, No. 14, pp. 585~602.
7. Pamukcu, S., Weeks, A. and Wittle, J. K. (1997), Electrochemical extraction and stabilization of selected inorganic species in porous media, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 55, No. 1~3, pp. 305~318.
8. Pamukcu, S., Weeks, A. and Wittle, J. K. (2004), Enhanced reduction of Cr (VI) by direct electrical current in a contaminated clay, *Environmental Science Technology*, Vol. 38, No. 4, pp. 1236~1241.
9. Probst, R. F. and Hicks, R. E. (1993), Removal of contaminants from soils by electric fields, *Science*, Vol. 260, No. 5107, pp. 498~503.
10. Shin, S. H. (2013), Application for improving resource recover at clay-sandy soil based on electrokinetic technology, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 14, No. 10, pp. 5~9 (in Korean).
11. Shin, S. H., Chilingar, G. V., Haroun, M., Ghosh, B., Meshkati, N., Pamukcu, S., Wittle, J. K. and Badawi, M. A. (2012), The effect of generated chlorine gas on electroremediation of heavy metals from offshore muds, *Journal of Environmental Protection*, Vol. 3, No. 5, pp. 363~373.
12. Shin, S. H., Chilingar, G. V., Haroun, M., Wittle, J. K., Meshkati, N., Pamukcu, S., Jeoung, J. H. and Koo, H. B. (2013), Electrokinetics technology to improve acidizing of carbonate reservoir rocks, *Journal of Environmental Protection*, Vol. 4, No. 4A, pp. 1~3.
13. Winterkorn, H. F. (1947). Fundamental similarities between electro-osmosis and thermo-osmosis, *Proc. 27th Annual Meeting, HRB*, pp. 443~455.
14. Winterkorn, H. F. (1955), The science of soil stabilization, *HRB Bulletin* Vol. 108, pp. 1~24
15. Wittle, J. K., Hill, D. G. and Chilingar, G. V. (2011), Direct electric current oil recovery (EOR) - a new approach to enhancing oil production, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 33, No. 9, pp. 805~822.