

## **알루미늄 전극의 용출에 따른 해성점토의 개량에 관한 실험적 연구** **A Experimental Study on Improvement of Marine Clay through the Electrolytic Leaching Effect in Aluminum Electrode**

김종윤<sup>1)</sup>, Jong-Yun Kim, 윤명석<sup>2)</sup>, Myung-Suk Yun, 정승용<sup>3)</sup>, Seung-Yong Jung, 김수삼<sup>4)</sup>, Soo-Sam Kim

- 1) 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 박사과정, Doctor's Course, Dept of Civil & Environmental Engineering, Univ. of Hanyang (danykim90@ihanyang.ac.kr)
- 2) 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 석사과정, Master's Course, Dept of Civil & Environmental Engineering, Univ. of Hanyang
- 3) 지구환경전문가그룹 대표이사, President, Expert Group for Earth and Environment Co. Ltd
- 4) 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept of Civil & Environmental Engineering, Univ. of Hanyang

**SYNOPSIS :** In this study, aluminum electrodes were put in marine clay which was taken from the south coast in Korea to increase the undrained shear strength by inducing the densification and cementation between clay particles and precipitates which were developed by electric decomposition in an electrode. To raise the cementation rate and reduce treatment time, high electric current (2.5A) was applied in each electrode at a semi-pilot scale soil box with marine clay. After the tests, the undrained shear strength was measured at designated points using a static cone penetration test device and sampling was conducted simultaneously in order to measure water content, pH and electric conductivity which would be the key for configuring the cementation effects indirectly. In the results of electric decomposition in aluminum electrode, the measured shear strength was increased considerably compared to the initial shear strength because of the cementation effect between iron ions and soil particles.

**Key words :** Electric decomposition, Aluminum electrode, Marine clay, Undrained shear strength

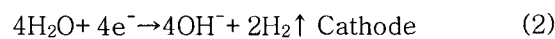
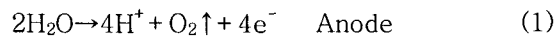
### **1. 서 론**

최근 들어 세립토 지반의 지반공학적인 특성을 개선시키기 위한 방법 중 하나로서 동전기 현상을 이용한 지반개량 공법이 새로이 대두되고 있다. 이러한 동전기 현상에는 전기삼투(양극에서 음극으로 간극 유체가 이동하는 현상), 전기영동(음으로 대전된 흙 입자가 양극으로 이동하는 현상) 그리고 이온이동(간극유체 내 존재하는 이온의 이동)등의 현상 등이 있으며, 본 연구에서는 알루미늄 전극의 용출에 의한 이온의 이동현상을 이용하여 지반의 강도를 증진시키고자 하였다. 현재까지 알려진 바에 따르면, 해성점토에 대해 동전기 전기장을 적용시킬 경우, 철 산화물과 탄산염 침전은 시료 내부의 고밀도화 효과를 유발하며, 이러한 불규칙한 결합이 고결재 역할을 하여 흙 입자 사이의 결합을 더욱 강화된다는 사실이 제시되었다(Quigley,1980; Mitchell, 1993). 또한 시료 내부에 충분한 양의 알루미늄 수산기가 존재하거나 알루미늄 이온이 침전물을 형성할 경우, 몬모릴로나이트와 같은 점토의 특성이 변화하여 고결재 효과가 유발될 수 있음이 보고된 바 있다(Gray & Schlocker, 1969). 따라서 본 연구에서는 해성점

토의 강도를 증진시키기 위해 인위적으로 알루미늄 전극을 삽입한 후, 고전류의 직류전원을 공급함으로써 알루미늄 전극의 이온 용출에 의한 알루미늄 침전물의 고결화 효과를 검토하였다.

## 2. 전기분해 고결의 원리

해성점토에 인위적으로 철과 알루미늄 전극을 삽입한 후, 직류전기장을 적용시키면, 간극수의 전기분해가 발생한다. 이로 인해 양극(+)에서는 산화반응(oxidation reaction)에 기인한 산소기체와 수소이온(H<sup>+</sup>)이 방출되고, 음극(-)에서는 환원반응(reduction reaction)에 의한 수소기체와 수산화 이온(OH<sup>-</sup>)이 방출된다(Acar and Alshawabkeh, 1993).



또한 해성점토의 간극수에는 염화나트륨(NaCl)이 다량 용해되어 있으므로 전기분해에 의해 이온화된 나트륨이온(Na<sup>+</sup>)과 염소이온(Cl<sup>-</sup>)은 각각 이온이동에 의해 반대극으로 이동한다. 따라서 양극(+)은 가수분해에 의한 수소이온(H<sup>+</sup>)과 이온이동에 의한 염소이온(Cl<sup>-</sup>)이 존재하며, 음극(-)은 수산화이온(OH<sup>-</sup>)과 나트륨이온(Na<sup>+</sup>)이 결합된 형태로 존재하게 된다.

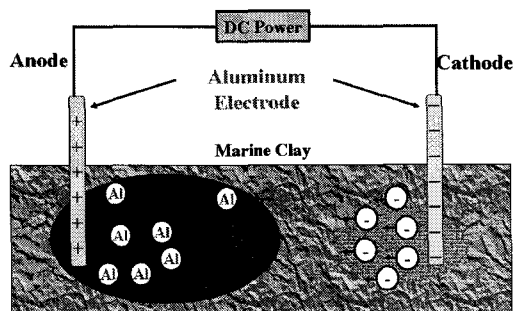
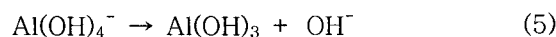
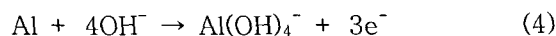


그림 1. 알루미늄 전극의 전기분해의 원리

그림 1은 알루미늄 전극의 전기분해 원리를 도식적으로 나타낸 것으로서 직류전기장을 적용시킬 경우, 물의 가수분해에 의한 산이온(H<sup>+</sup>)과 수산화이온(OH<sup>-</sup>)의 영향으로 인해 양(+)극과 음(-)극은 각각 다른 반응이 발생한다. 양(+)극과 같이 낮은 pH가 형성되는 구간에서는 식(3)과 같이 알루미늄 전극은 간극수의 전기분해에 의한 수소이온 보다 이온화 경향이 크므로 산화반응이 유발되어 금속 알루미늄 전극에서 알루미늄 이온이 용탈되는 과정이 발생하며, 음(-)극부와 같이 pH가 매우 높은 구간에서는 식(4)~(5)와 같이 수산화알루미늄 침전물과 수산화이온(OH<sup>-</sup>)이 발생하게 된다(심은기, 1999).



위의 반응식에 의하여, 양(+)극에서 용탈된 3가 알루미늄 이온(Al<sup>3+</sup>)은 이온이동에 의해 음극부로 이동 중에 간극수 내의 용존 산소와 결합하여 산화알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 침전물을 형성하고, 이러한 침전물은 지반 내 간극을 채우는 고밀도화 작용과 고결화 작용을 동시에 유발시킨다. 또한 음(-)극에서 발생된 수

산화이온(OH<sup>-</sup>)은 이온이동에 의해 양극방향으로 이동하며, 양(+ )극에서 용탈된 알루미늄 이온과 결합하여 수산화물을 형성한다. 이때, 침전된 알루미늄 수산화물은 용해도가 낮기 때문에 알루미늄 산화물과 마찬가지로 점토 입자간의 간극을 채움으로써 지반의 전단강도를 증대시킨다.

### 3. 전극분해 실험

#### 3.1 사용 전극과 대상시료의 특성

본 연구에서는 해성점토의 강도개량을 위해 기존 연구자들에 의해 효과가 제안된 99.9% 순도의 알루미늄을 전극재료로 선정하였고, 시료는 남해안 광양지역에서 채취한 해성점토로서 교란된 상태의 시료를 채취하여 실내실험실에서 습윤 상태의 흙을 No. 40체로 체가름 한 것을 사용하였다. 이와 동시에 시료채취지점과 동일한 위치에서 운반되어온 해수를 첨가하여 액성한계의 1.4배정도(85%)의 함수비를 갖는 고풍수비 상태로 시료를 준비하였다. 본 연구에서 사용된 시료의 토질특성을 정리하면 표 1에 제시되어 있는 바와 같다.

표 1. 대상시료의 지반공학적 특성

| Soil Classification | G <sub>s</sub> | Coefficient of Consolidation(C <sub>v</sub> ) | Compression Index (C <sub>c</sub> ) | Liquid Limit (LL) | Plastic Limit (PL) | Plastic Index (PI) | Swell Index (C <sub>s</sub> ) |
|---------------------|----------------|---|-------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|
| CL                  | 2.64           | 4.23×10 <sup>-3</sup> cm <sup>2</sup> /sec    | 0.49                                | 60%               | 35%                | 25%                | 0.09                          |

#### 3.2 전극분해 실험 장치 및 전극배치

그림 2는 실험에 사용된 중형토조의 규격과 전극배치형태를 나타내고 있다. 기본적으로 본 실험에서 사용된 토조는 40cm×50cm×50cm 규격에 아크릴 재질로 구성되어 있으며, 각 모서리 부분은 물의 유출 방지를 위해 실리콘으로 방수처리 하였다. 또한 실험도중 전극의 이동이나 기울림을 방지하기 위해 상부에 지지막대를 설치하였다.

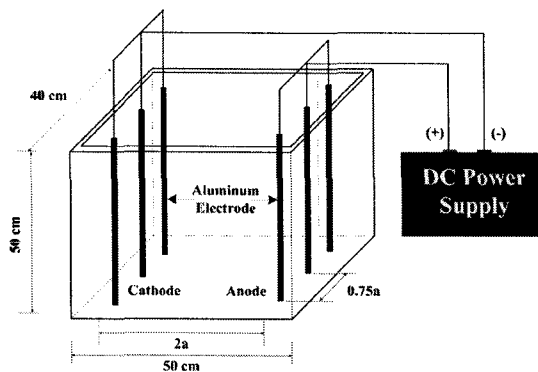


그림 2. 본 실험에 사용된 Box cell

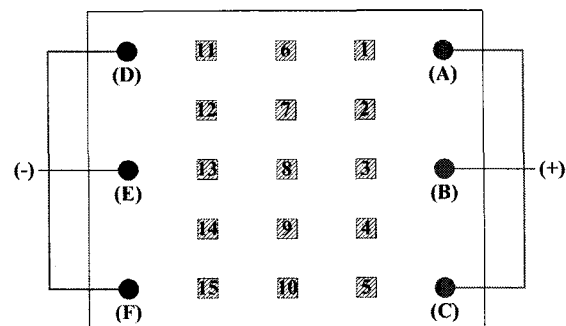


그림 3. 전단강도측정 위치 및 샘플링 포인트

알루미늄 전극을 이용한 전극분해 유도 시, 양(+ )전극과 음(- )전극간 고결화 정도를 정확히 파악하기 위해 각각의 전극을 나란히 배치하였으며, 등전위면의 형성을 유도하기 위해 Segall(1992)이 제시한 바와 같이 동일극성전극 간 간격 대비 이질극성전극 간 간격의 비를 0.75:2로 설정하였다. 따라서 이질전극 간 거리는 40cm로 설정되었다. 또한 실험 종료 후 각각의 지점별 비배수 전단강도 측정위치와 샘플링 위치는 그림 3과 같다.

### 3.3 실험조건

본 실험은 인위적인 고결체 주입을 유도하기 보다는 삽입된 전극의 전기분해 반응으로 용출된 이온의 이동과 점토표면에서의 흡착에 따른 고결화 효과를 파악하기 위해 실시되었다. 사용된 시료의 초기 강도는 대략 1.2kPa로 측정되었으며, pH는 8.1, 초기 전기전도도는 120mS/m이다. 전극의 전기분해는 Faraday 법칙에 따르며, 단시간 내에 다량의 전극분해를 유도하여 고결화 효과를 극대화하기 위해 일정한 고전류(2.5A)를 적용하였다. 실험 종료 후에는 콘 관입시험기를 이용하여 지점별 비배수 전단강도를 측정하였으며, 그 지점에서 샘플링을 실시하여 pH와 전기전도도를 측정하였다. 표 2는 중형토조를 이용하여 실시한 전극분해실험의 실험조건을 나타내고 있다.

실험 종료 후, 개량된 시료의 비배수 전단강도 측정을 위해 직경 2.8cm 전동식 정적 콘관입시험기를 이용하였으며, 인접한 측정지점간의 관입에 의한 변형 등의 교관현상을 방지하기 위해 강철판으로 측정 지점을 균등 분할한 후, 실험을 수행하였다.

표 2. 전극분해 실험조건

| Fixed Factors |                  |                |                     | Variable Factors |
|---------------|------------------|----------------|---------------------|------------------|
| Soil          | Water Content(%) | Duration (Day) | Electric Current(A) | Electrode        |
| Marine Clay   | 85               | 7              | 2.5(Constant)       | Aluminium(99.9%) |

## 4. 실험결과

### 4.1 시료 내 함수비 분포

알루미늄 전극분해 실험 결과, 초기 조성 시료의 함수비가 85%이었음에도 불구하고 전반적으로 시료 내에는 함수비의 감소현상이 발생하였다(그림 4). 특히, 양(+ )극부에서 측정된 함수비는 초기에 비해 절반 이하로 감소되었으며, 음(-)극부는 약 20% 감소하였다. 이는 시료 내 전기저항의 증가에 따른 온도 상승효과(45℃)에 의한 간극수의 증발효과와 전기삼투에 의한 양(+ )극부 함수비의 감소현상에 기인한다고 판단할 수 있다.

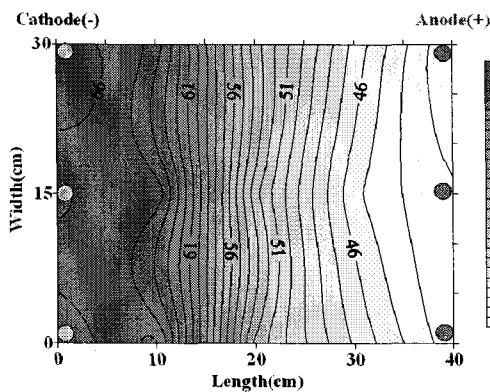


그림 4. 시료내부의 함수비 분포(%)

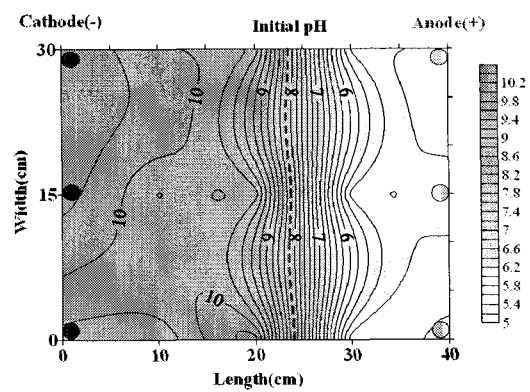


그림 5. 최종 pH 분포

### 4.2 시료 내 최종 pH 분포

일반적으로 동전기 전기장 적용 시, 양(兩)극에서는 시료내부에 존재하는 간극수의 전기분해에 의해

양(+)극에서는 수소(H<sup>+</sup>)이온이 그리고 음(-)극에서는 수산화이온(OH<sup>-</sup>)이 발생하여 산전선과 염기전선을 형성한다. 따라서 시간이 경과함에 따라 양(+)극에서의 pH는 2정도 까지 낮아지며, 반면에 음(-)극에서의 pH는 12까지 증가한다(Acar & Alshabekeh, 1993).

실험 결과, 양극부를 기준으로 정규화된 거리 0.25지점까지 pH=5의 산성영역이 발생되었으며, 0.25~0.5지점까지는 급속한 pH 상승(pH=6~9)이 발생하였다. 이후에 0.5~1.0지점까지는 pH=10 정도의 염기성 영역이 지속적으로 나타났다(그림 5). 특히, 양(+)극부 근처에서 수소이온(H<sup>+</sup>)은 이온화 경향이 상대적으로 큰 알루미늄과 산화환원반응을 일으키므로 음극부로 이동되는 수소이온(H<sup>+</sup>)의 결핍으로 인해 산성영역은 상당히 좁아졌다. 반면 음(-)극부 근처에서는 수산화이온(OH<sup>-</sup>)에 의한 알루미늄 분해작용이 발생하며 식(4)와 식(5)에 제시된 바와 같이 수산화알루미늄(Al(OH)<sub>3</sub>)의 침전과 함께 수산화이온이 지속적으로 발생되므로 점차 염기성 영역이 넓어짐을 알 수 있다.

### 4.3 시료 내 최종 전기전도도 분포

그림 6은 실험 종료 후, 각 지점별로 측정된 최종 전기전도도 분포를 나타낸 그림으로서, 양(+)극부 근처에서는 수소이온(H<sup>+</sup>)과 알루미늄과의 산화환원반응으로 인해 3가의 알루미늄 이온(Al<sup>3+</sup>)이 지속적으로 용탈되므로 비교적 높은 전기전도도가 나타났다. 하지만 양(+)극에서 용출된 3가의 알루미늄 이온과 염기전선이 교차하는 구간에서는 점차 수산화알루미늄(Al(OH)<sub>3</sub>)의 침전으로 인해 전기전도도가 감소하는 경향을 띄었다. 음(-)극부 근처에서는 수산화이온의 알루미늄 분해반응에 의해 수산화알루미늄(Al(OH)<sub>3</sub>) 침전물이 형성되지만, 지속적으로 수산화이온(OH<sup>-</sup>)이 생성되기 때문에 전기전도도는 중앙부에 비해 더 크게 나타났다.

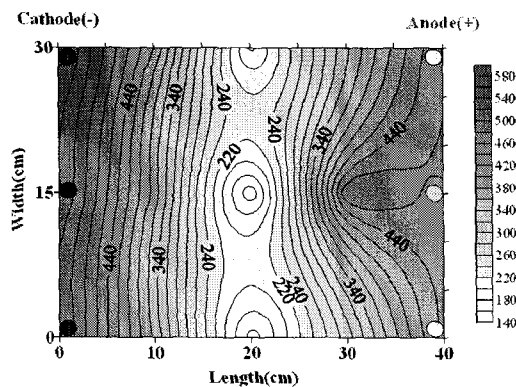


그림 6. 최종 전기전도도 분포(mS/m)

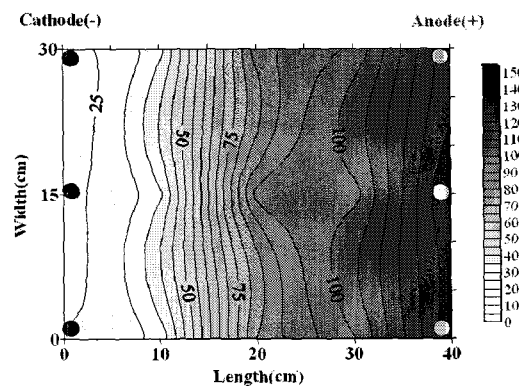


그림 7. 전단강도 분포(kPa)

### 4.4 시료 내부의 전단강도

그림 7에 제시된 바와 같이 음(-)극부 근처에서의 전단강도는 초기 강도인 1.2kPa에서 24.1kPa로 약 20배 증가하였고, 양(+)극부 근처에서의 전단강도의 증가는 1.2kPa에서 127.7kPa로 약 106배 증가하였다.

### 4.5 알루미늄 침전물의 고결화에 기인한 전단강도

양극부 근처에서의 전단강도 증진량은 함수비 저감효과에 의한 강도증진과 알루미늄 전극의 전기분해에 기인한 고결화 반응 등의 복합적인 작용에 의해 유발된다. 따라서 명확한 함수비 저감효과에 의한 강도 증진량을 산정하고자, 본 연구에서는 각각 소성한계부터 액성한계까지 함수비를 달리한 동일 시료에 대해 φ100의 원통형 아크릴 셀에 재성형한 후 1일 동안의 안정화 기간을 거쳐 정적 콘관입시험기를

이용하여 비배수 전단강도를 측정하였다. 또한 전극의 전기분해 실험 후의 함수비와 측정된 전단강도를 동시에 도시함으로써 순수하게 전극의 이온용출과 침전물의 고결화 작용에 의한 전단강도 증진량을 추정하고자 하였다(그림 8).

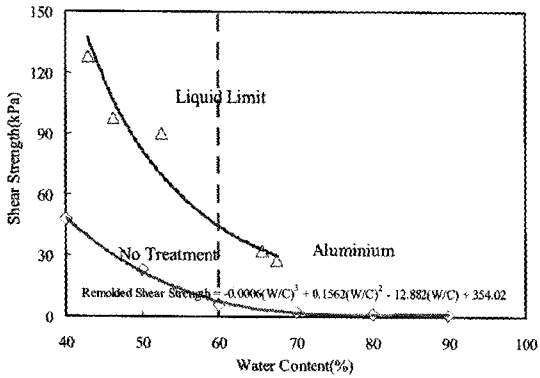


그림 8. 재성형 해성점토의 함수비에 따른 비배수 전단강도

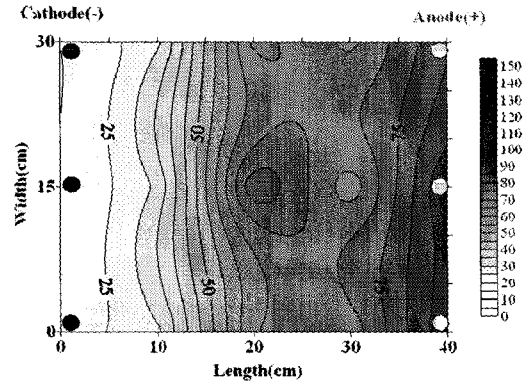


그림 9. 알루미늄 이온의 고결화에 기인한 전단강도 증가량(kPa)

그림 9는 함수비 저감효과에 의한 강도증진량을 배제하고 순수하게 알루미늄 전극의 전기분해에 의한 전단강도 증가량만을 고려한 그림이다. 실험 결과, 전기삼투에 의한 함수비 저감효과는 전반적인 강도증가에 많은 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 시료 내부의 전단강도 증가는 전극에서 분해된 알루미늄 이온의 이동과 이온교환, 흡착 및 침전 등의 화학반응에 의한 고결화 작용의 결과라고 판단할 수 있다.

#### 4.6 전단강도와 pH 및 전기전도도의 상호관계 분석

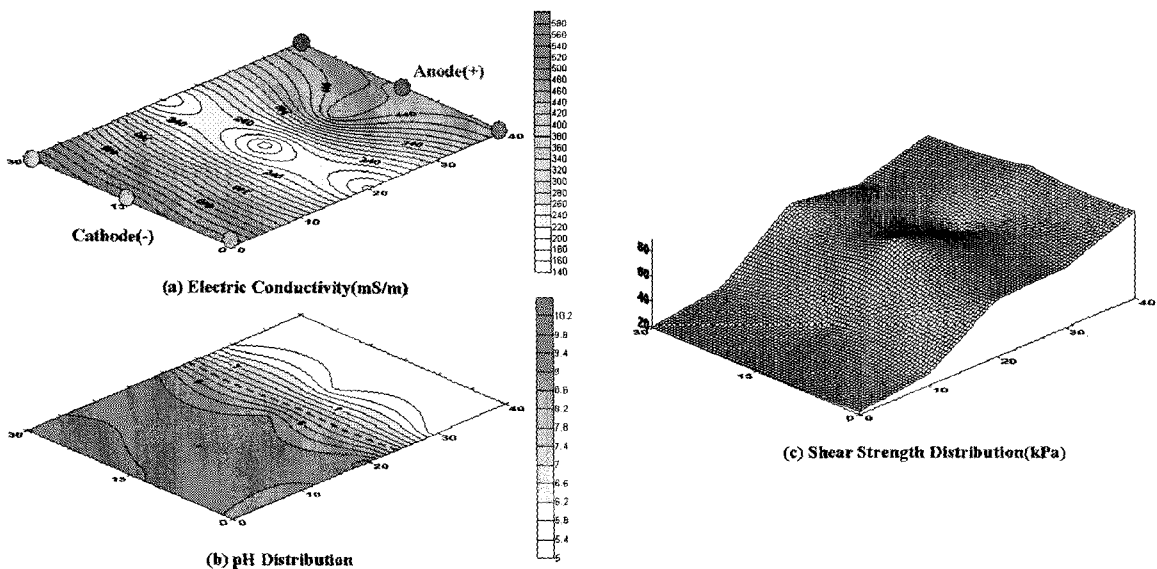


그림 10. 알루미늄 전극 사용 시 지점별 최종 전단강도, pH 및 전기전도도의 관계

양(+)극부의 알루미늄 전극은 간극수의 전기분해에 의해 발생된 수소이온(H<sup>+</sup>)과의 산화-환원반응을 통해 3가의 알루미늄 이온(Al<sup>3+</sup>)으로 용탈된다. 대부분의 수소이온(H<sup>+</sup>)이 알루미늄 전극과의 산화-환원반응에 의해 소비되었기 때문에 양(+)극부 근처에서의 산성영역은 매우 좁아졌다. 용탈된 3가 알루미늄

이온( $Al^{3+}$ )은 이온이동(EM)에 의해 음극부로 이동 중에 간극수 내의 용존 산소와 결합하여 산화알루미늄( $Al_2O_3$ ) 침전물을 형성하며, 지반 내 간극을 채우는 고밀도화 작용과 고결화 작용을 동시에 유발시킨다. 따라서 시료 내의 산성영역에서는 양극부에서 멀어질수록 전기전도도는 감소하며, 전단강도는 산화알루미늄( $Al_2O_3$ )의 침전작용에 의해 상당히 증가하였다고 판단할 수 있다(그림 10).

시료 중앙에서의 고결화 작용은 음극부에서 발생한 수산화이온( $OH^-$ )과 양극에서 지속적으로 용탈된 3가의 알루미늄 이온( $Al^{3+}$ )의 결합에 의한 다량의 수산화 침전물의 생성에 기인한다고 볼 수 있다. 이는 침전물의 생성에 의한 이온 종의 결핍으로 인해 시료 내부에서 측정된 전기전도도가 가장 낮게 나타난다는 사실로서 간접적으로 유추할 수 있다.

음(-)극부 근처에서는 식(4)와 식(5)에서 제시된 바와 같이 수산화 이온에 의해 알루미늄 전극이 분해되지만, 최종적인 산물로서 수산화알루미늄( $Al(OH)_3$ )과 수산화이온( $OH^-$ )이 재 방출됨을 알 수 있다. 이때 방출된 수산화이온( $OH^-$ )은 이온이동(EM)에 의해 양극부로 점차 이동하며 염기성 영역을 넓혀가게 된다. 또한 지속적으로 방출되는 수산화이온( $OH^-$ )의 영향으로 전기전도도는 음(-)극부 근처에서 상당히 높게 나타남을 알 수 있다.

수산화알루미늄( $Al(OH)_3$ ) 침전물이 시료의 중앙부와 음(-)극부에 다량 침전되었음에도 불구하고 음(-)극부 근처에서 낮은 전단강도가 나타났다. 이는 수산화알루미늄( $Al(OH)_3$ )의 pH에 대한 특성 때문으로 수산화알루미늄은 어떠한 경우에서도 pH=5 부근에서 가장 용해되기 어렵고, pH가 증가함에 따라 서서히 용해되는 속도가 증가하기 때문이다(정동준 & 이종대, 1999). 따라서 음(-)극부 근처에 수산화알루미늄 침전물이 과도하게 침전되어있다 하더라도 높은 pH 조건의 형성으로 인해 대부분 간극수 내로 용해되었을 것으로 판단되며, 이에 따라 음(-)극부 내에서의 침전물 발생에 의한 고결화 작용도 저감되었다. 따라서 위의 분석 결과를 토대로 판단해 보면, 알루미늄 전극의 전기분해에 의한 3가 알루미늄 이온의 용탈 및 침전물 생성에 의한 고밀도화 효과가 해성점토의 비배수 전단강도를 증가시키는 주요 메카니즘이라고 판단할 수 있다.

음극부에 나타나는 전단강도 증가효과는 대부분 해성점토 시료 내부에 있는 탄산염과 칼슘 침전물에 의한 강도증진효과라고 판단할 수 있는데, Townsend(1985)는 철 산화물과 탄산염 및 유기질 물질이 함유된 시료에 동전기를 적용시킬 경우, 흙의 형태나 이온의 농도 변화에 따라 전단강도에 영향이 미칠 수 있음을 보고한 바 있다. 또한 Fukue et al.(1999)은 해성 퇴적토의 경우, 1%의 탄산염 함유량 증가에도 7.5kPa의 배인 전단강도 증가효과가 유발된다고 제시하였으며, Acar & Alshawabkeh(1993)은 시료 내부에 칼슘이온이 존재할 경우, 동전기 적용 시료의 음극부 끝단에서 칼슘침전물에 의한 고결화가 유발되어, 간극을 막는 clogging 현상이 발생함을 보고하였다.

## 5. 결론

본 연구는 염분의 농도가 높은 고탍수비의 해성점토에 대해 철과 알루미늄 전극의 전기분해를 유발함으로써 침전물 생성에 의한 고밀도화 효과를 유도하고, 실제현장에 적용 가능한 전극분해 기법개발을 목적으로 수행하였다. 실험 시, 사용된 시료는 실제 남해안에서 채취한 해성점토를 함수비 85%로 재성형 하였으며, 다량의 전극분해와 신속한 고결화를 목적으로 2.5A의 전류 조건에서 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 동일 시료를 재성형한 후 함수비의 변화에 따른 전단강도량을 산정한 결과, 전반적인 시료의 전단강도 증가는 함수비 저감효과가 아닌 알루미늄 이온의 이동과 침전에 의한 영향으로 판단할 수 있었다.
2. 최종 pH와 전기전도도를 측정된 결과, 양극부 근처에서의 좁은 산성영역은 사용된 전극과 수소이온의 산화·환원 반응에 의한 수소이온의 결핍이 원인이며, 지속적인 전극의 전기분해 반응에 의해 양극부 근처에서의 전기전도도는 초기에 비해 상당히 증가하였다.

3. 양(+)극부에서 나타나는 전단강도 증가는 대부분 알루미늄 산화물과 수산화알루미늄 침전물의 발생에 기인하며, 이러한 침전물이 토립자의 간극을 채움으로 인해 고밀도화와 고결화 효과가 유발된다.
4. 음극부의 전단강도 증가는 양(+)극에서 용출된 금속이온의 이동과 침전에 기인하기 보다는 해성점토 시료 내부에 존재하는 탄산염과 칼슘이온에 의한 침전물이 음극부의 고밀도화와 고결화 효과를 유발한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2004년도 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 연구지원비에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 정동준, 이종대(1999), "알칼리용액에서 알루미늄의 부식거동 및 음이온억제제의 효과 연구", 산업과학기술연구소 논문집.
2. 심은기, 황영기, 전해수(1999), "알칼리용액에서 알루미늄의 부식속도 측정", *Journal of the Korean Electrochemical Society*, Vol. 2, No. 3.
3. Acar, Y. B., Alshawabkeh A. N.(1993), "Principles of electrokinetic remediation", *Environmental Science and Technology*, Vol. 27, No. 13, pp.2638~2647.
4. Fukue, M., Nakamura, T. and Kato, Y.(1999), "Cementation of soils due to calciumcarbonate", *Soil and Foundation*, Vol 39, No 6, pp. 55~64.
5. Gray, D. H. and Schlocker, J.(1969), "Electrochemical Alteration of Clay Soils", *Clay and Clay Minerals*, Vol 17, pp.309~322.
6. Mitchell, J. K.(1993), *Fundamentals of soil behavior-2nd edition*, Wiley Interscience, pp.256~258.
7. Quigley, R. M.(1980), "Geology, mineralogy and geochemistry of canadian soft soil", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 20, pp.288~298.
8. Segall, B. and Bruell, C.(1992). "Electro-osmotic contaminant-removal processes", *ASCE*, Vol. 118, No. 1, pp.84~100.
9. Townsend, F.(1985), "Geotechnical characteristics of residual soils", *ASCE*, Vol 111, No 1. pp.77~94.