

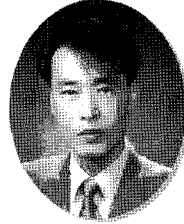


지반개량공법중 전기삼투공법이란 무엇이며 공법의 원리와 특징을 알고 싶습니다.



안 광 국

충북대학교 토목공학과 교수  
akk@chungbuk.ac.kr



이 처 근

(주)나노지오 컨설턴트 대표이사



정 구 식

충북대학교 토목공학과 대학원 박사과정

## 1. 공법의 개요

1939년 Casagrande가 포화된 점토질 실트지반의 절토사면 안정화를 위해 전기삼투를 지반공학 분야에 처음으로 적용한 이후 전기삼투공법(electro-osmosis method)은 배수에 의한 연약지반처리, 기초지반의 지지력 증대, 지반보강 및 차수를 위한 화학그라우트제 주입 등 주로 연약지반의 개량을 위해 사용되어 왔으며, 최근에는 중금속 또는 유기 오염물 제거에 큰 효과가 있는 것으로 알려져 지반환경 분야에서 활용이 증가하고 있다. 전기삼투공법은 하중 재하 없이 전기삼투에 의해 압밀을 진행시키는 공법으로 압밀진행에 따라 흙의 공학적 성질이 개선될 뿐만 아니라 흙과 전극재의 전기화학적 반응으로 원지반의 전단강도가 상당히 증가되어, 특히 고함수비의 연약 세립토지반에 매우 유용하게 사용할 수 있다.

## 2. 전기삼투 이론

포화된 점토의 입자표면은 물속에 용해되어 있는 음이온의 흡착이나 점토광물 형성과정에서 발생하는 동

형치환(isomorphous substitution)등의 원인으로 음으로 대전되어 있으며, 간극수의 양이온들을 끌어들여 전기적으로 평형을 유지하려고 한다. 음으로 대전된 점토광물과 평형을 유지하기 위해 양이온이 끌리는 범위를 이중층(double layer)이라고 하며 이중층은 Helmholtz 층과 확산층(diffuse layer)으로 이루어져 있다. Helmholtz 층은 양이온과 물분자가 점토광물 표면에 강하게 부착되어 있어 고정층이라고 하며 확산층을 가동층이라고 부른다. 즉, 전위차가 생기면 확산층의 양이온은 음극으로, 음이온은 양극으로 이동하게 되며, 이때 이중층 바깥의 자유수는 확산층의 이온들이 이동할 때 끌려가

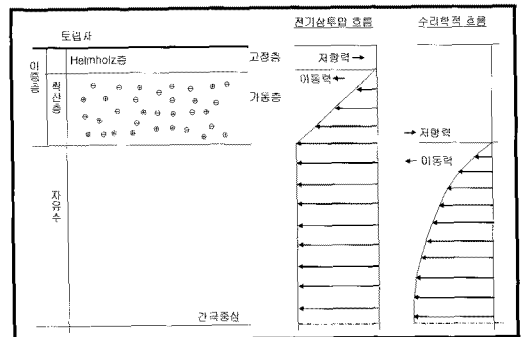


그림 1. 단일 모세관에서의 전기삼투원리 모식도 (Casagrande, 1952)



게 된다. 확산층에는 음이온보다 양이온이 훨씬 많이 존재하고, 따라서 전위차가 있는 경우 물은 양극에서 음극으로 흐르게 되는데 이러한 현상을 전기삼투라고 한다.

### 3. 전기삼투 영향인자

전기삼투를 이용하여 지반의 압밀을 촉진시키는 데에 영향을 미치는 인자들은 지반조건과 적용방법에 따라 (표 1)와 같이 나눌 수 있다(Sunderland, 1987).

흙에서 전기와 물의 동수경사에 의한 흐름이 동시에 진행되는 경우에 다음의 이상적인 가정 하에서 (식 1)과 같은 전기와 물의 복합흐름방정식이 성립한다.

- ① 흙은 구조적으로 균질하고 완전 포화되어 있다.
- ② 물리·화학적인 특성이 시간에 따른 변화가 없고 균질하다.
- ③ 전기삼투에 의한 물 흐름의 속도는 전압 경사에 직접

표 1. 전기삼투를 이용한 압밀촉진효과에 미치는 영향인자

구분	영향인자	특징
지반 조건	토립자의 크기와 광물성분	· 2 $\mu$ m보다 큰 성분을 30%이상 함유하는 지반에서 효과적 · 고소성 점토보다 중저소성 실트질 점토에서 효과적
	염분 함유율	· 염분함유율이 높은 지반에서는 효과적이지 못함
	pH	· pH<4인 지반에서는 거의 효과가 없음
	pH	· pH>9인 지반에서는 염분함유율이 많아도 효과가 좋음
적용 방법	투수계수	· 지반의 투수계수( $k_r$ )에 대한 전기삼투 투수계수( $k_e$ )의 상대적인 크기가 클수록 효과적
	전류밀도	· 흙의 종류 및 상태에 따라 큰 차이를 보임
	전극재의 종류	· 은, 백금, 구리, 황동 등의 전극재는 전기전도율이 우수 · 경제성을 고려한 경우 강철재료가 유리
	전극재의 배치형태	· 지반조건에 따라 배수발행(수평, 수직)결정 · 적절한 간격 및 설치깊이의 결정이 중요

적으로 비례한다.

- ④ 흡입자의 전기영동현상은 없으며 비압축성이다.
- ⑤ 전 작용전압은 물의 흐름에 이용되며 손실은 없다.
- ⑥ 흙 매체 전극간에서 시간에 따른 전기장의 변화는 없다.
- ⑦ 전극봉에서 전기화학적인 반응은 없다.
- ⑧ 전기에 의한 흐름과 동수경사에 의한 흐름은 중첩되어 총흐름량이 된다.

$$J_H = L_{HH}X_H + L_{HE}X_E \quad (\text{식 1})$$

여기서,  $J_H$  : 동수흐름과 전기흐름에 대한 총 유량

$L_{HH}$  : 동수흐름에 의한 동수흐름계수

$L_{HE}$  : 전기 경사에 의한 전기흐름계수

$X_H$  : 동수경사

$X_E$  : 전기경사

따라서, 전기삼투에 의한 배수량은 (식 2)로 나타낼 수 있으며, 이때 전기삼투에 의하여 발생하는 양극에서의 간극수압은 (식 3)과 같다.

$$Q_u = -k_h \frac{\Delta H}{L} A - k_e \frac{\Delta E}{L} A \quad (\text{식 2})$$

여기서,  $Q_u$  : 총 배수유량( $\text{cm}^3$ )

$\Delta H$ : 동수두차(cm)

$\Delta E$ : 전위차(V)

$k_e$  : 전기삼투 투수 계수( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ )

$k_h$  : 동수 투수 계수( $\text{cm}/\text{sec}$ )

$A$  : 흐름 방향에 직각으로 횡단면 면적( $\text{cm}^2$ )

$$u = \frac{k_e}{k_h} \gamma_w V + C \quad (\text{식 3})$$

여기서,  $u$  : 간극수압( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$\gamma_w$  : 물의 단위중량( $\text{kg}/\text{cm}^3$ )

V : 전압(Voltage)

C : 상수

(식 2)와 (식 3)의 전기삼투 투수계수  $k_e$ 는 단위 전압 경사당 물의 흐름속도이며, 일반적인 투수시험과 비슷한 방법으로 구할 수 있다. 즉, 길이와 단면적을 아는 흙 시료에 일정한 전압을 가해준 후 단위시간당 유량을 측정하여 결정할 수 있다. 그런데 전기삼투 이론 중 가장 널리 사용되고 있는 Helmholtz-Smoluchowski 이론에 의하면 전기삼투 투수계수는 간극의 크기와는 상관성이 별로 없는 것으로 알려져 있다. 또한 Casagrande (1952)는 다양한 조건의 실험을 수행하여 대부분의 흙에서 전기삼투 투수계수는 일정한 범위의 값을 가지며, 전압경사가 전기삼투 흐름속도를 결정한다고 결론지었다. 전기삼투 투수계수에 대한 과거의 연구성과를 정리한 (표 2)에 의하면  $k_e$ 의 범위는 대략  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$

표 2. 흙의 전기삼투 투수계수(Mitchell, 1993)

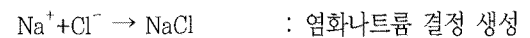
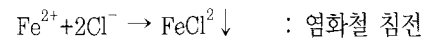
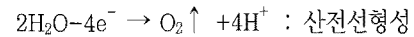
흙 종류	함수비 (%)	$k_e$ ( $10^{-5}$ $cm^2/sec \cdot V$ )	대략적인 $k_e$ ( $cm/sec$ )
1. London clay	52.3	5.8	$10^{-8}$
2. Boston blue clay	50.8	5.1	$10^{-8}$
3. Kaolin	67.7	5.7	$10^{-7}$
4. Clayey silt	31.7	5.0	$10^{-6}$
5. Rock flour	27.2	4.5	$10^{-7}$
6. Na-Montmorillonite	170	2.0	$10^{-9}$
7. Na-Montmorillonite	2000	12.0	$10^{-8}$
8. Mica powder	49.7	6.9	$10^{-5}$
9. Fine sand	26.0	4.1	$10^{-4}$
10. Quartz powder	23.5	4.3	$10^{-4}$
11. Quick clay	31.0	2.0-2.5	$2.0 \times 10^{-8}$
12. Bootlegger Cove clay	30.0	2.4-5.0	$2.0 \times 10^{-8}$
13. Silty clay, West Branch Dam	32.0	3.0-6.0	$2 \times 10^{-8} - 6.5 \times 10^{-8}$
14. Clayey silt, Little Pic River	26.0	1.5	$2.0 \times 10^{-5}$

$cm^2/V \cdot sec$ 이고, 흙의 종류에 관계없이 거의 일정한 것으로 나타났다. 따라서 전기삼투 투수계수  $k_e$ 에 대한 동수 투수계수  $k_h$ 의 상대적인 크기가 큰 세립토에서 전기삼투공법이 효과적이라고 할 수 있다.

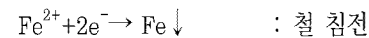
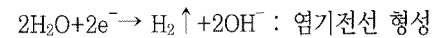
## 4. 전기화학 반응

전극재로 강철(Fe)을 사용하고 간극수내에 염분이 포함된 경우의 양(+)극과 음(-)극에서의 전기화학적 반응은 다음과 같이 발생한다.

### ◎ 양극



### ◎ 음극



전기화학적 반응이 시작되면 양(+)극에서는 산전선이, 음(-)극에서는 염기전선이 형성되며 시간이 지남에 따라 간극수가 양(+)극에서 음(-)극으로 이동하면서 산전선이 음(-)극쪽으로 확산되어 간다. 그리고 전극재로 이용한 강철 막대(혹은 강철봉)는 양(+)극에서의 전기분해 작용을 거쳐 양(+)극 주변에서 염소이온( $Cl^-$ )과 결합하여 염화철로 침전되고, 일부는 음(-)극으로 이동하여 음(-)이온과 결합하여 철로 침전하게 된다. 마찬가지로 염화나트륨( $NaCl$ )도 양(+)극에서 전기분해되어 나트륨이온( $Na^+$ )은 음(-)극으로 염소이온( $Cl^-$ )은 양극으로 이동하여 제2의 화학결합을 하게 된

다. 이러한 화학적인 반응의 정도는 지반내 간극수와 전극재의 화학적인 성분과 전류량에 좌우되는 것으로 화학적인 반응이 과도한 경우에는 지반의 pH변화가 크게 발생하고 전기삼투계수가 급격히 감소하여 전기삼투효과가 떨어지는 무제가 발생할 수 있다. 따라서 장기간의 처리를 요하는 경우와 간극수내에 염분을 많이 포함하는 경우에는 전기화학적 반응에 대한 사전검토가 충분히 이루어져야 한다.

## 5. 전기삼투공법의 활용범위

Casagrande가 불안정한 굴착문제를 해결하기 위하여 최초로 전기삼투공법을 적용한 이래 여러 방면에서 그 활용범위가 확대되고 있다. 특히 연약지반 압밀축진 기술과 말뚝 지지력 개선 기술, 그리고 지반환경 정화 기술 분야에서 많이 활용되고 있으며, 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

### 1) 연약지반 압밀축진

연약지반의 압밀을 촉진시키기 위하여 성토하중 대신에 전기삼투압을 이용할 수 있다. 이 경우 투수계수가 작은 실트 및 점토지반에서 물리적인 하중에 의한 압밀축진 효과 보다 전기삼투압에 의한 압밀축진 효과가 우수한 것으로 알려져 있다. 반면에 염분을 많이 포

함하는 해성점토지반에서의 장기적인 전기삼투 적용은 전기화학적 반응 등으로 인하여 압밀축진 효과가 저감될 수 있다.

### 2) 말뚝 지지력 증대

강관말뚝을 연약지반내에 시공하는 경우에 말뚝 주변에 전극재를 배치하여 전기삼투공법으로 말뚝 주변 연약지반의 강도를 증진시켜 말뚝의 주변마찰력을 크게 증대시키는 기술이 적용되고 있다. 이때 증가된 주변마찰력으로 인하여 말뚝의 연직지지력과 인발저항력이 증대되는 효과를 얻을 수 있다.

### 3) 오염지반 정화

포화된 점토지반에서 벤젠, 톨루엔, TCE 등 유기물 질과 납, 구리, 카드뮴 등의 중금속을 제거하는 기술로 전기삼투공법이 적용되고 있는데, 양(+)극에 물을 주입하면 오염물질이 간극수를 따라 음(-)극으로 이동하여 전극봉에 모이는데 이를 펌핑하여 제거하게 된다. 이러한 기술은 다른 오염정화기술에 비하여 경제성 및 효율성이 높고, 특히 투수성이 매우 낮은 점토지반에서 그 효율성이 매우 크다. 또한 전극에 영양소를 주입하여 오염물질을 정화하는 생물학적 처리방법에도 적용된다.