

전압경사에 따른 전기삼투 투수계수의 변화에 대한 실험적 연구

Experimental study of electro-osmotic hydraulic conductivity changes with voltage gradients

윤동욱¹⁾, Dong-Wook Yoon, 김현기²⁾, Hyun-Ki Kim, 조남준³⁾, Nam-Jun Cho

¹⁾ 국민대학교 토목공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil Engineering, Kookmin Univ.

²⁾ 국민대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Kookmin Univ.,
geotech@kookmin.ac.kr

³⁾ 국민대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kookmin Univ.

SYNOPSIS : This study evaluates the electro-osmotic hydraulic conductivity for the clay specimen by applying the series of the voltage gradient simultaneously with different stress conditions. The test results shows that the shrinkage of voids corresponds to the linear decrease in the electro-osmotic seepage velocity, and the changes of electro-chemical characteristics in the specimen induces the gradual decrease of the electro-osmotic seepage velocity with the constant voltage gradient.

Key words : Helmholtz-Smoluchowski model, electro-osmosis, permeability

1. 서 론

지반내부에 일정한 전압 차이를 발생시키면 간극수 내에 존재하는 양이온과 음이온들은 각각 음극과 양극으로 이동하게 되는데 이 과정에서 각각의 이온들은 물분자에 의해 수화된 상태(hydrated ions)로 존재하고 있어서 이온의 이동과 함께 간극수의 흐름이 발생한다. 점성토의 경우에는 전수두차이에 의한 수리학적 흐름이 매우 느리게 나타나기 때문에 전기삼투를 추가로 적용하면 훨씬 빠른 속도로 간극수가 이동할 수 있어서 압밀시간을 단축하는 등의 지반 개량 효과를 기대할 수 있다. 일반적으로 고풍수비의 점성토 지반의 개량이나 연약지반에 설치되는 말뚝기초의 지지력 개선, 간극수가 중금속으로 오염된 점성토 지반 정화 등의 부분에서 많이 활용하고 있다(김명모 등, 2005).

이러한 여러 공법들의 적용에 있어서 전기삼투 투수계수는 배수속도와 효율을 결정하는 가장 중요한 흙의 역학적 성질이기에 때문에 그에 대한 정확한 측정이 필수적이다. 본 연구에서는 일차압밀이 완료된 점성토 시료에 대하여 일정한 전압경사를 주어 이로 인해 발생하는 간극수의 흐름을 통해 주어진 시료에 대한 전기삼투 투수계수를 평가하였다.

2 전기삼투에 의한 투수이론

간극이 물로 포화된 점성토 지반에서 각각의 토립자는 그 표면에 음과 양의 전하가 토립자 표면으로

부터 떨어진 거리에 따라서 적당한 비율로 존재하는데 토립자의 표면에는 물속에 용해되어 있는 음이온의 흡착이나 토립자 구성성분의 해리 등으로 인한 과잉의 음전하분포를 보이게 된다. 따라서 토립자는 전기적 평형을 유지하기 위해 간극수 내에 존재하는 양이온을 끌어당겨 전기적 성질에 의한 이중층을 형성하게 되는데 그의 물리적 성질은 토립자의 광물 조직과 구조, 혹은 간극수의 성질에 따라서 다르게 나타난다. 이러한 이중층은 고정층과 확산층으로 나뉘고, 이 가운데 고정층은 토립자에 아주 근접하여 접근해 이는 간극수중의 양이온이 극히 강한 힘으로 입자의 표면에 고착되어 있는 부분을 의미하며 Helmholtz층이라고도 한다. Helmholtz-Smoluchowski모델에서는 그 외층으로 단독 이온 또는 쌍극자의 모양으로 토립자를 느슨하게 둘러싼 확산층이 있는데 이 층의 결합력은 전자에 비하여 약하므로 가동층이라 하며 상기 고정층과 합하여 전기 이중층이라 명칭한다(Smoluchowski, 1914; Mitchell, 2005).

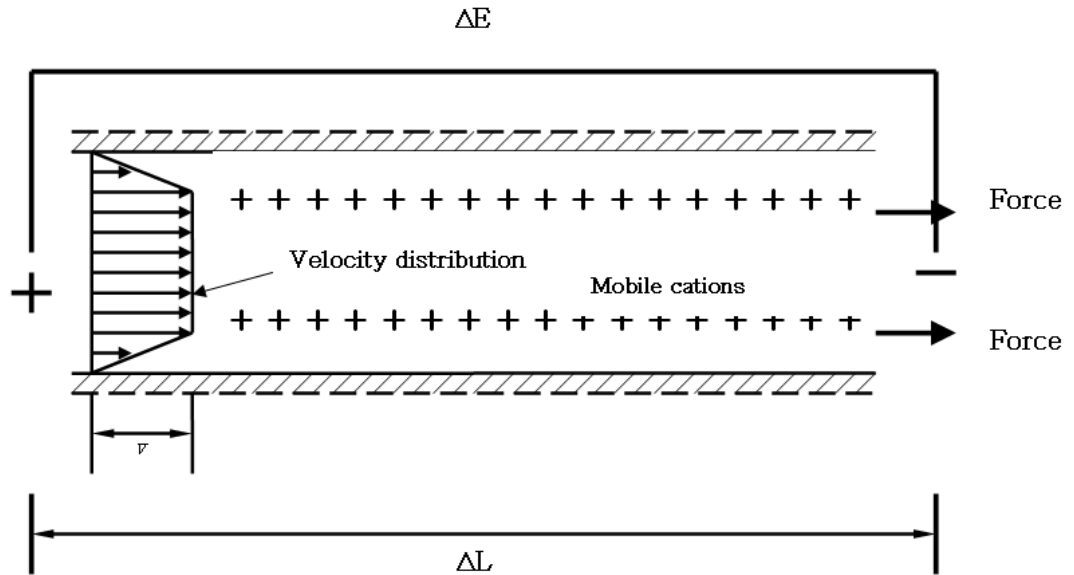


그림 1. 단일 공극에 대한 전기삼투 침투현상의 모식도(Helmholtz, 1879)

그림 1과 같이 이중층이 존재하는 토립자의 공극 사이로 전위차를 발생시키면 계면전하의 크기 및 전장의 세기에 비례하는 전기적인 인장력이 발생하여 가동층의 양전하를 띠는 이온은 음극의 방향으로 음전하를 띠는 이온은 양극 방향으로 이동하는데, 이 때 각 이온에 붙어있는 물분자들이 이온과 함께 딸려 가게 되고 일반적으로 양이온에 붙어 있는 물분자가 음이온에 붙어 있는 물분자보다 많기 때문에 전체적인 간극수의 흐름은 양극에서 음극으로 나타나게 된다(Casagrande, 1952; 김수삼 등, 1996; 김명모 등, 2005).

전기삼투에 의한 물의 흐름은 수리학적 흐름과 비슷하고 Darcy의 방정식과 동일한 형태를 갖는다고 가정했을 때 전압경사에 의한 간극수 흐름의 유속은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$V_e = K_e \left(\frac{\partial E}{\partial x} \right) = K_e i_e \quad (2)$$

여기서 V_e 는 전압경사에 의한 물의 유속(cm/sec), K_e 는 전기삼투투수계수($\text{cm}^2/\text{volt} \cdot \text{sec}$), i_e 는 전압경사, x 는 배수거리(cm), E 는 전압의 크기(V)이다. 단, 이를 위해서는 다음과 같은 가정조건을 만족해야 한다(Casagrande, 1952).

1. 흙은 구조적으로 균질하고 완전 포화되어 있다.
2. 물리·화학적인 특성이 시간에 따른 변화가 없고 균질하다.
3. 전기삼투에 의한 물 흐름의 속도는 전압경사에 직접적으로 비례한다.
4. 흡입자의 전기영동현상은 없으며 비압축성이다.
5. 전 작용전압은 물의 흐름에 이용되며 손실은 없다.
6. 흙 매체 전극 간에서 시간에 따른 전기장의 변화는 없다.
7. 전극봉에서 전기화학적인 반응은 없다.
8. 전기에 의한 흐름과 동수경사에 의한 흐름은 중첩되어 총 흐름량이 된다.

3 전기삼투 투수시험

3.1 전기삼투 투수시험 방법

본 연구에 사용된 카올리나이트는 액성한계가 35%, 소성한계가 22%로 나타나 통일분류법상 CL에 해당하는 점토이며, 100kPa의 압밀압으로 일차압밀이 완료되는 시점까지 K_0 압밀을 시켜 성형하였고 성형된 시료의 초기함수비는 43%로 나타났다. 이와 같이 성형된 시료에 대하여 다음과 같은 과정으로 실험을 진행하였다 (그림 2 참조).

1. 카올리나이트 시료를 시험 셀에 맞게 공시체를 준비하고 공시체 상부와 하부에 전극을 연결한다.
2. 하중 단계에 따른 압밀시험을 실시한다.
5. 일차압밀이 종료된 것을 시간에 따른 변위곡선으로 확인한 뒤 실린더의 초기눈금 값을 기록한 후 공시체 하부의 양극, 상부의 음극 단자에 4V의 전위차를 가한다.
6. 전기 삼투에 의해 발생하는 유량의 흐름을 시간에 따른 유리관 수두의 변화를 통해 측정한다.
7. 전기 삼투에 의한 침투유속이 어느 정도 일정한 값으로 나타나는 것을 확인하고 나서 전위차를 4V에서 8V로 증가시키고 전기삼투에 의한 침투 현상을 측정한다.
8. 8V에서의 전기삼투에 의한 침투유속이 마찬가지로 어느 정도 일정한 값으로 나타나는 것을 확인하면 전위차를 12V로 증가시켜 전기삼투에 의한 침투 현상을 측정한다.

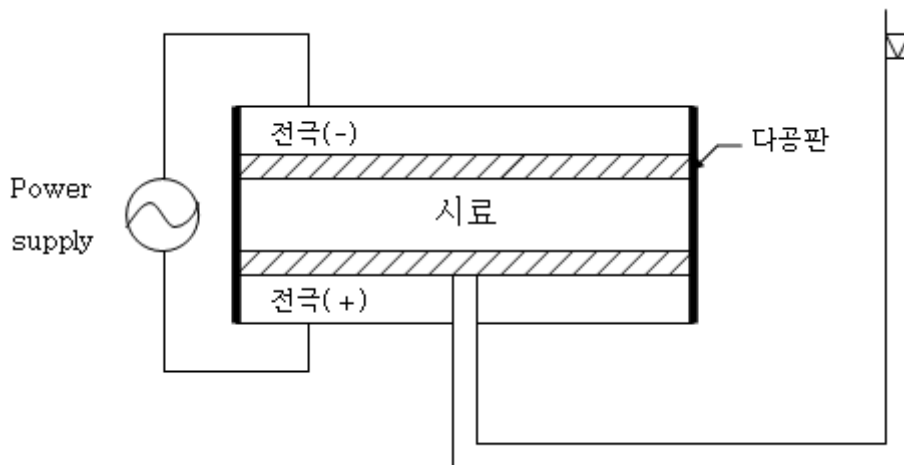


그림 2. 전기삼투 투수계수 측정실험의 개념도

]

3.2 전기삼투 투수시험 결과

다음의 그림 3은 20kPa과 640kPa의 압밀압에 의해 일차압밀이 완료된 시료에 대해 실시한 전기삼투 투수시험 결과 얻어진 투수계수 값을 측정 시간에 따라 도시한 것이다. 그림에서 보이다시피 침투유량이 전위차를 가한 뒤 시간이 흐를수록 점차적으로 감소하다가 일정시간 이후에는 침투유량의 변화가 줄어들어 거의 일정한 형태로 나타나며, 전위차가 클수록 전압경사에 따른 침투유량은 줄어드는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 현상은 압밀압의 크기에 상관없이 동일하게 관찰되었다. 이는 전기삼투수성은 시간에 따라 감소하는 것으로 보고되고 있는데 이는 전기삼투 진행에 따른 전기화학적 변화 때문이다 (Shang et al., 1994).

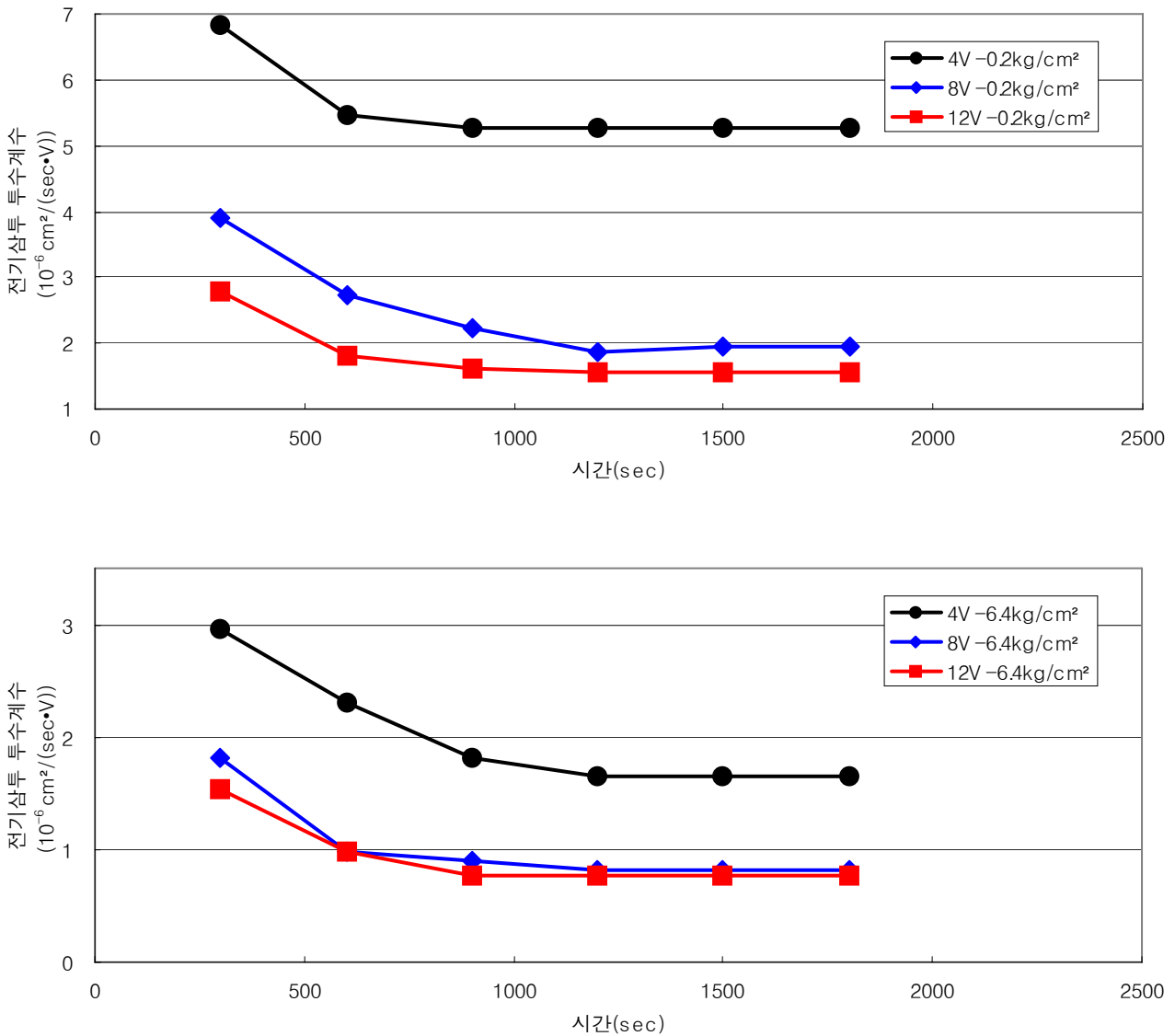


그림 3. 전압경사 적용 시간에 따른 전기삼투 투수계수의 변화

다음의 그림은 전기삼투에 의한 침투유량이 어느 정도 안정화된 상태에 대해 산정한 전기삼투 투수계수를 각 시료의 간극비에 대해 도시하였다. Helmholtz-Smoluchowski 모델에 따르면 전기삼투에 의한 침투

유속은 간극의 크기에는 큰 상관성이 없으나 전체 공극률에 비례하여 증가한다고 알려져 있다 (Smoluchowski, 1914; Mitchell, 2005). 이는 본 연구에서도 다음의 그림 4에서 보이듯이 전체 간극비가 줄어들수록 전기삼투에 의한 침투유속이 줄어드는 것으로 관찰되었다. 그러나 전압경사의 크기는 전기삼투에 의한 침투유속의 크기와 상관성이 없는 것으로 보통 가정을 하나 본 연구의 실험 결과에서는 전압경사가 증가함에 따라 침투유속의 크기가 줄어드는 것으로 나타나고 있는데, 이는 4V, 8V, 12V의 전위차에 대한 실험을 독립적으로 수행하지 않고 순차적으로 같은 시료에 대해 진행했기 때문에 이전 전위차에 의해 발생한 시료내부의 전기화학적 변화가 결과에 영향을 미친 것으로 생각한다.

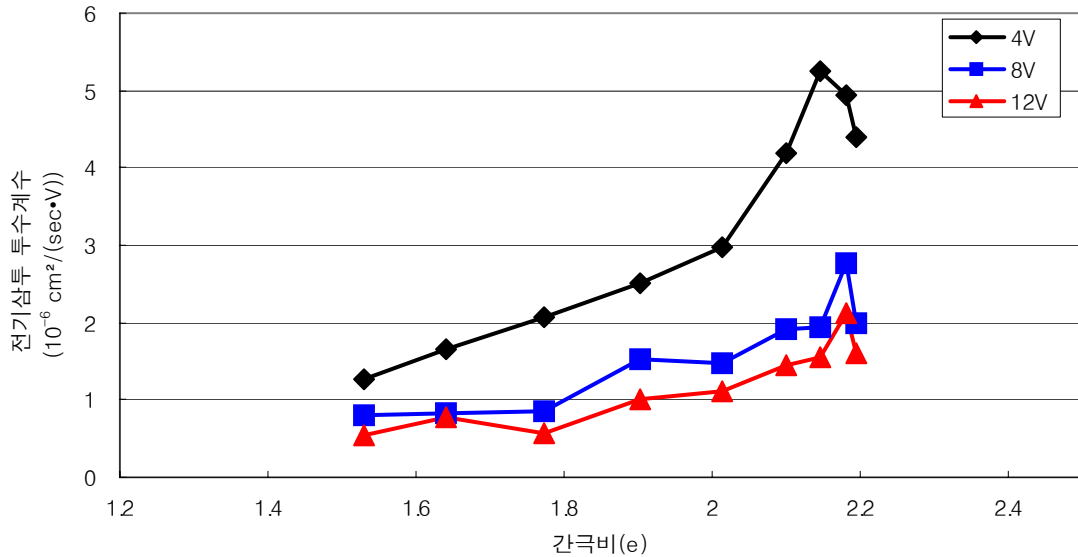


그림 4. 간극비와 전위차에 따른 전기삼투 투수계수의 변화

4. 결론

본 연구에서는 일차압밀이 완료된 점성토 시료에 대하여 일정한 전압경사를 주어 이로 인해 발생하는 간극수의 흐름을 통해 주어진 시료에 대한 전기삼투 투수계수를 평가하였다. 전기삼투가 진행되는 과정에서 시료내부의 전기화학적 특성의 변화에 따라 침투 유속의 크기가 시간에 따라 점차 감소하게 된다. 그리고, 간극비가 줄어들수록 전기삼투에 의한 침투유속이 감소하는 것으로 나타났고, 이는 Helmholtz-Smoluchowski 모델에서 제안하는 바와 같이 간극비와 전기삼투 투수계수 간에 선형적인 관계가 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. 김명모, 김병일, 이승원, 조성민 (2005), 지반개량공법설계, 도서출판 새론, pp.290~295.
2. 김수삼, 이광열, 한상재, 강민수 (1996), "방사형 전기삼투배수에서 압밀계수에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제16권 제3-6호, pp.595~603
3. Casagrande, L. (1952), "Electro-Osmotic Stabilization of Soil", *Journal of Boston society of Civil Engineers*, Vol. 39, pp.51~83
4. Mitchell, J. K. and Soga, K. (2005), *Fundamentals of Soil Behavior, 3rd ed*, John Wiley & Sons,

New York, pp.291 ~ 305

5. Helmholtz, H.(1879), "Studien uber elektrische Grenzschiehten", *Wiedemanns Annalen d., Physik*, Vol. 7, pp.137
6. Smoluchowski, M. (1914), In; L. Graetz, (ed.), *Handbuch der Electizitat und Magnetismus*, Vol. 2, J. A. Barth, Leipzig.
7. Shang, J. Q., Lo, K. Y. and Quigley, R. M. (1994), "Quantitative determination of potential distribution in Stern-Gouy double-layer model", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31 no. 5, pp.624~636