

중금속 오염 점성토의 전기삼투 배수와 제타포텐셜의 상관성

The Relationship between Electroosmotic Drainage and Zeta Potential of Contaminated Clayey Soil with Heavy Metal

임성철¹⁾, Sung-Chul Lim, 한상재²⁾, Sang-Jae Han, 김정환³⁾, Jung-Hwan Kim 김수삼⁴⁾, Soo-Sam Kim

¹⁾ 중앙대학교 토목공학과, 공학석사, Master, Dept. of Civil Eng., Chung-Ang Univ.

²⁾ 중앙대학교 생산공학연구소, 전임연구원, Senior Researcher, RIPE., Chung-Ang Univ.

³⁾ 중앙대학교 토목공학과, 박사과정, Ph.D. Student, Dept. of Civil Eng., Chung-Ang Univ.

⁴⁾ 중앙대학교 건설환경공학과, 교수, Professor, Dept. of Civil and Environ. Eng., Chung-Ang Univ.

SYNOPSIS : This research is about the relationship of electroosmotic drainage and zeta potential. Two laboratory experiments were conducted, at first a constant 16 voltage was applied to the cylindrical consolidated specimen of 10cm in diameter, 16cm in length at the concentration of 0, 500, 3000ppm Pb(II) and electroosmotic flow was measured for 12days. Then, zeta potential of kaolinite suspension was measured at the same concentration of electroosmotic permeability experiments in the range of pH from 2 to 14. From the result of this study, it was shown that zeta potential was dependent on the concentration of electrolyte and pH, was proportional to coefficient of electroosmotic permeability. According to the compared result of electroosmotic drainage, as the concentration of Pb(II) was low, the negative value of zeta potential was high and electroosmotic total flow was much.

Key words : Electroosmotic drainage, Zeta Potential, Lead concentration, Electrical double layer

1. 서론

전기삼투 흐름원리를 이용한 전기삼투 배수공법은 보통의 연약지반 처리로는 처리할 수 없는 투수성이 매우 낮은 초연약 지반을 짧은 시간 안에 안정화시키려는 목적으로 사용되어왔고, 최근에는 복토재와 광산찌꺼기의 탈수와 압밀, 오염된 지반에서 오염물질을 제거하는 것 등의 지반환경공학적인 이용으로 그 적용범위가 확대되고 있다. 이러한 전기삼투 현상을 지반에 적용 시 관련된 중요한 파라미터 중의 하나는 단위 전압 및 시간당 단위 면적을 통과한 배수량으로 정의되는 흙의 전기삼투계수(k_e)이다. 이러한 전기삼투 배수의 효율은 간극수의 pH와 전해질 농도에 따라서 크게 달라지는데(West and Stewart, 1995; Shang, 1997), 전기삼투계수(k_e)가 확산이중층의 Stern층과 확산층(Gouy layer)의 경계면에 존재하는 전기포텐셜인 제타포텐셜에 관계되기 때문이다. 이러한 제타포텐셜은 pH와 전해질 농도에 따라 영향을 받아 전기삼투에 의한 배수량 및 전기삼투 배수의 효율성에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 납농도에 따른 전기삼투 배수량을 측정하고, 납농도 및 pH에 따른 제타포텐셜의 크기를 측정하였다. 이를 통해, 제타포텐셜의 변화특성에 따른 전기삼투 배수특성을 검토하고, 전기삼투 배수와 제타포텐셜과의 상관성을 규명하고자 하였다.

2. 이론적 배경

흙 속의 전기삼투 흐름을 지배하는 파라미터는 경험식으로 정의되는 전기삼투 투수계수(k_e)이며, 다음 식(1)과 같이 정의된다.

$$V_e = k_e E \quad (1)$$

여기서, V_e 는 전기삼투 흐름속도(m/s), k_e 는 전기삼투 투수계수($m^2/(s \cdot V)$), E 는 전기장의 세기(V/m). 식(1)은 전기삼투에 의해 발생한 간극유체의 흐름속도가 전기삼투 투수계수에 비례하고 있음을 나타내고 있다. 일반적으로 흙 속의 전기삼투 흐름을 해석시 H-S 이론이 사용되는데, 여기서, 전기삼투 투수계수는 물과 모세관벽 사이의 전기력과 마찰력간의 평형을 근거로 하여 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$k_e = \frac{n \epsilon_w}{\mu} \zeta \quad (2)$$

여기서, n 은 흙의 간극율(무차원), ϵ_w 는 간극수의 유전율(F/m), μ 는 물의 점성력($N \cdot s/m^2$), ζ 는 제타포텐셜(V). 식(2)에서 간극수의 유전율과 점성은 전해질의 농도가 매우 큰 경우에 거의 일정하고 온도와 흙의 간극율은 쉽게 측정할 수 있다.

그림 1에는 점토 표면에 인접한 Stern층과 확산층으로 구성된 전기이중층이 개략적으로 나타나 있는데, Shang et al.(1994)은 점토-물-전해질 시스템에서 Stern-Gouy 전기이중층 이론을 사용하여 포텐셜 분포를 계산하였다. 즉, CEC, 비표면적, 전해질 농도, 원자가, 온도, 간극유체의 유전율 등과 같은 파라미터를 통해 입자표면에서 거리에 따른 포텐셜 분포를 이론적으로 구했는데, 특히, 점토입자 표면으로부터 0.6nm 지점의 포텐셜을 제타포텐셜값으로 산정하였다.

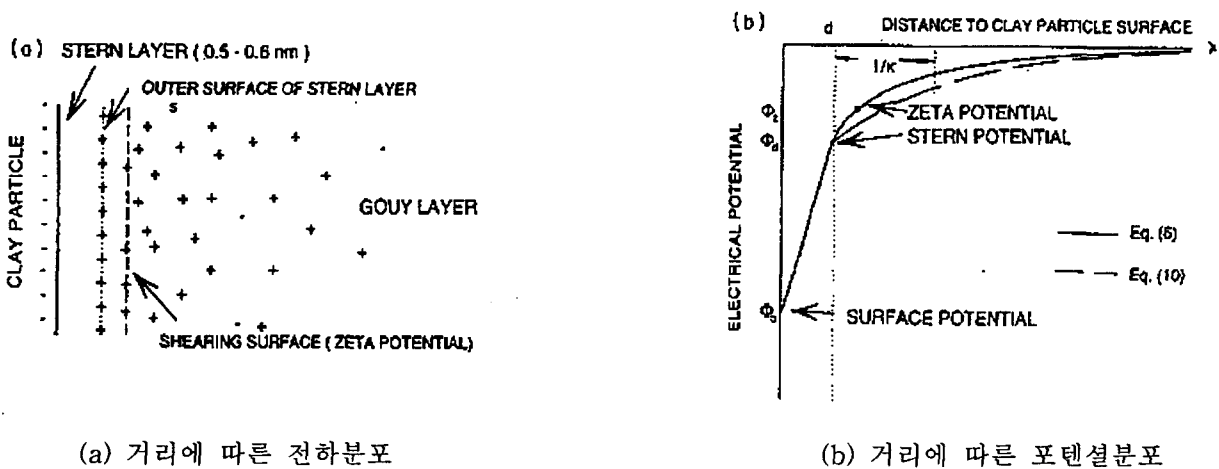


그림 1. Stern-Gouy 전기이중층 (Shang, 1994)

3. 실험종류 및 조건

3.1 목적 및 범위

전기삼투 배수와 제타포텐셜과의 상관성을 규명하기 위한 실험으로 기본물성 실험을 KS F 규정에 의거 실시하여 뉴질랜드산(K-1) kaolinite의 기본적인 물성치와 특성을 파악하였고, XRF(X-Ray Fluorence Spectrometer) 분석을 통하여 시료의 성분조성(chemical compositions)을 파악하였다. 또한, 납을 사용하여 회분식 흡착실험을 실시한 후 CEC를 구하였다. CEC 이상/이하의 납농도에 따라 전기삼투 배수량을 측정하였고, 간극수의 pH와 납농도에 따라 제타포텐셜을 측정하였다. 이러한 실험결과들을 토대로, 제타포텐셜의 변화특성에 따른 전기삼투 배수특성을 검토하고, 전기삼투 배수량의 실측치와 예측치를 비교하고자 하였다. 각각의 실험조건을 표 1에 제시하였다.

표 1. 전기삼투 투수와 제타포텐셜의 실험종류 및 조건

구분	농도	가해진 전압	가동 시간	구분	pH	적정 용액	농도	비고
전기삼투 투수실험	0 500 3000 (ppm)	1V/cm	12일	제타포텐셜 측정	2~14	NaOH	0 500 3000 (ppm)	오염물질: Pb(NO ₃) ₂

3.2 실험기기

3.2.1 전기삼투 투수실험기 체계 및 구성

실험기는 직경 10cm, 길이 24cm의 전기삼투 투수셀과 배수된 물을 측정할 수 있는 메스실린더, 전기 회로, 전원공급장치, 간극수압 측정장치 및 일정수두를 유지할 수 있는 Mariotte Bottle 그리고 유압, 유출액의 pH를 측정할 수 있는 pH meter 등으로 구성되어 있다. 전기삼투 투수실험기 구성도의 개략적인 모습을 그림 2에 나타내었다.

3.2.2 제타포텐셜 측정기기 체계 및 구성

본 연구에서는 Matec Applied Science에서는 개발한 ESA(electrokinetic sonic amplitude)-8000 시스템으로 제타포텐셜을 측정하였다. 제타포텐셜 측정기 구성도의 개략적인 모습을 그림 3에 나타내었다.

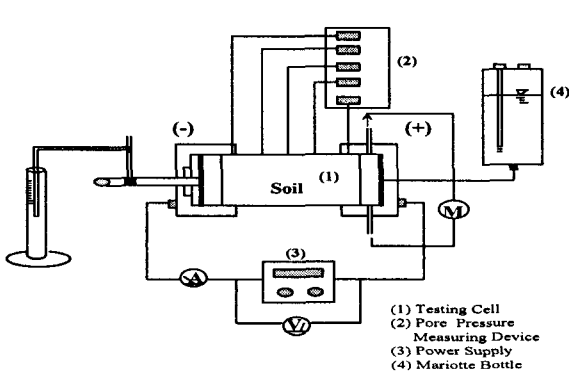


그림 2. 전기삼투 실험장치

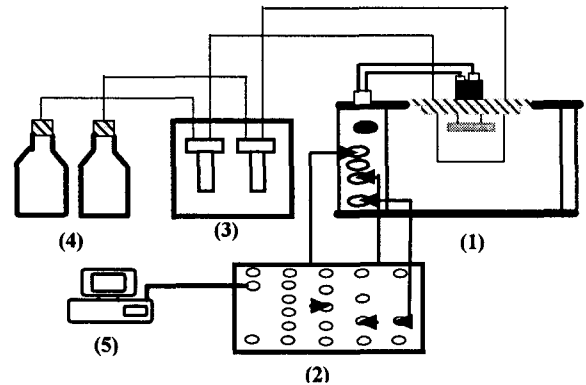


그림 3. 제타포텐셜 측정장치(ESA-8000)
(Matec applied science, 1996)

4. 실험결과 및 고찰

4.1 기본물성 실험결과

기본물성 실험결과를 종합하여 표 2에 나타냈으며, 화학적 분석으로 통해 얻어진 결과를 표 3에 나타내었다. Freundlich 모델에 의한 흡착 상관관계로부터 평형농도를 구해보면 대략 평형농도 171.6mg/ℓ 이상이 되면 일치하지 않았다. 따라서, 평형농도에서의 흡착량 1761mg/kg을 최대 납흡착량으로서 판단하였으며, 이를 CEC로 하여 단위를 환산한 결과 본 연구의 대상 시료인 뉴질랜드산 kaolinite의 CEC는 pH 5에서 1.7meq/100g로 계산되었다.

표 2. 토질 특성

함수비 (%)		액성 한계 (%)	소성 한계 (%)	소성 지수 (%)	비중	#200 통과율	pH at w=400%	분류
초기	압밀후							
83	60	60	38.8	21.2	2.65	100	5	CH

표 3. 뉴질랜드산 kaolinite의 화학적 조성

유기물 함량 (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	MnO (%)	P ₂ O ₅ (%)
8.4	50.4	35.5	0.25	0.05	Trace	Trace	Trace	Trace	-	-

4.2 납농도에 따른 전기삼투 투수실험과 제타포텐셜 측정결과

납농도에 따른 뉴질랜드산 kaolinite의 전기삼투 총 배수량을 그림 4에 나타내었다. 실험초기에는 배수량이 급증하다가 서서히 감소하였으며, 12일간의 실험기간 동안 각각의 실험 Pb0, Pb500, Pb3000에 서 발생한 총 전기삼투 배수량은 640ml, 485ml, 447ml로 측정되어 납이 함유되지 않은 시료에서 가장 많은 전기삼투 배수량이 발생하였다. Pb0 실험을 기준으로 Pb500, Pb3000일 때 배수량을 비교하면 각각 76%, 70% 수준의 전기삼투 배수량이 발생하여 납농도가 증가함에 따라 전기삼투 배수량은 감소하였다.

납농도와 pH 변화에 따른 뉴질랜드산 kaolinite의 제타포텐셜 측정결과는 그림 5와 같다. 일반적으로 음의 값을 갖는 점토의 제타포텐셜에 납농도가 미치는 영향은 시료의 pH 변화에 따라 그 거동이 크게 달라짐을 그림 5를 통해 확인할 수 있으며, 점토의 전하가 0일 때의 pH 즉, 영전하점(PZC)은 pH 3~4 부근이었다.

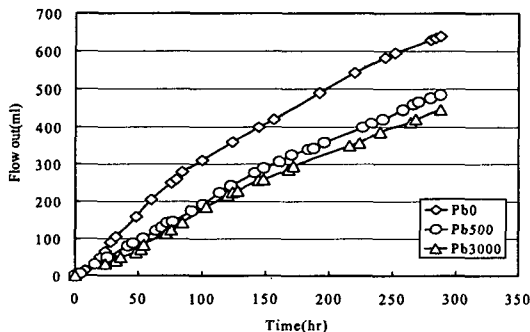


그림 4. Pb0, Pb500, Pb3000 실험동안의 전기삼투 배수량

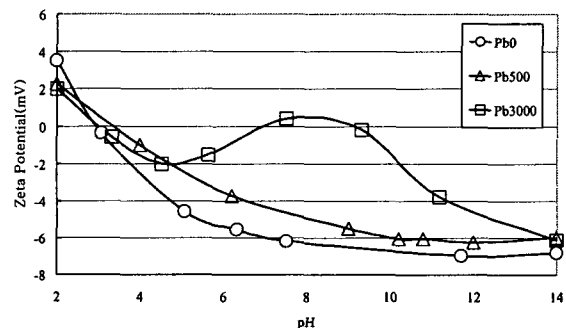


그림 5. 납농도와 pH 변화에 따른 제타포텐셜 변화

Pb0, Pb500, Pb3000 실험에서 제타포텐셜 변화를 살펴보면 3.51~-6.96(mV), 2.25~-6.24(mV), 2~-6.13(mV)의 값을 보였으며, 각각의 평균값은 -3.75(mV), -2.85(mV), -2.33(mV)로 나타났다.

4.3 고찰

4.3.1 Stern-Gouy 전기이중층 이론에 의한 제타포텐셜 계산

점토-물-전해질 시스템에서의 표면포텐셜, Stern 포텐셜, 제타포텐셜 등의 전기포텐셜분포, 이중층 두께를 Stern-Gouy 전기이중층 이론을 통해 계산하였으며, 계산결과를 표 4에 나타내었다. 계산에 사용된 기호는 다음과 같다. Φ_0 ; 점토입자 표면의 전기포텐셜, Φ_d (Stern 포텐셜); Stern층의 바깥 면에서의 전기포텐셜, ζ ; 제타포텐셜(점토입자 표면에서 0.6nm지점의 전기포텐셜)

Pb1ppm, Pb50ppm, Pb500ppm, Pb3000ppm에서 제타포텐셜은 표면포텐셜의 4.82, 3.35, 2.47, 1.76%에 해당하는 값을 갖는 것으로 계산되어 표면포텐셜의 90% 이상이 Stern층에서 소멸되었고, 납농도가 증가할수록 그 비율(ζ/Φ_0)은 작게 나타나 납농도가 증가함에 따라 제타포텐셜은 감소함을 알 수 있는데, 이는 확산이중층 두께의 차이에 기인한 것으로 판단되며, 그림 6을 통해 확인할 수 있다.

표 4. Stern-Gouy 전기이중층 이론에서 계산된 포텐셜

실험종류	CEC (meq/100g)	S (m ² /g)	Φ_0 (mV)	Φ_d (mV)	ζ (mV)	ζ/Φ_0 (%)
Pb1	1.7	5	-3245	-164.5	-156.3	4.82
Pb50			-3192	-115.1	-106.9	3.35
Pb500			-3155	-86	-77.8	2.47
Pb3000			-3133	-63.4	-55.2	1.76

4.3.2 제타포텐셜 측정치와 전기삼투 투수 계수 실측치와의 상관성

실측한 전기삼투 배수량과 제타포텐셜의 상관성을 규명하기 위해서, 식(1)에서 구한 전기삼투 투수계수의 실측치를 H-S 이론의 식(2)와 같이 제타포텐셜의 함수로 나타내었다. Pb0, Pb500, Pb3000 실험에서 전기삼투 투수계수의 실측치와 예측치를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 전기삼투 투수계수의 실측치는 예측치보다 크기는 작지만, 그 경향은 제타포텐셜과 비례관계에 있음을 보였다. 이런 상관성을 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(k_e)_m = 0.43\zeta \quad (3)$$

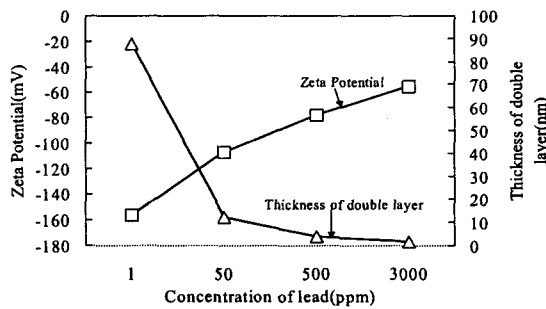


그림 6. 납농도에 따른 이중층 두께와 제타포텐셜의 변화

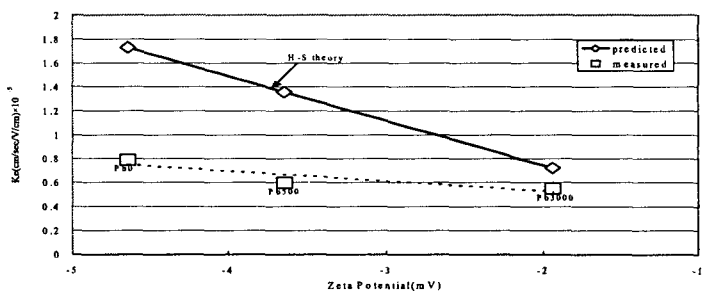


그림 7. Pb0, Pb500, Pb3000 실험에서 제타포텐셜에 따른 전기삼투 투수계수의 실측치와 예측치 의 비교

4.3.3 제타포텐셜에 따른 전기삼투 배수량의 변화

그림 8은 ESA기법으로 측정된 제타포텐셜의 평균값과 전기삼투 배수량과의 상관성을 나타낸 것으로, 납농도가 낮을수록 시료의 제타포텐셜이 가장 크고 이때의 전기삼투 배수량도 가장 많았다.

한편, 납농도가 증가할수록 시료의 제타포텐셜은 점점 감소하여 전기삼투 배수량도 점점 감소하였다. 이는 제타포텐셜과 비례관계에 있는 전기삼투 투수계수가 제타포텐셜의 변화에 의해 직접적인 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 전기삼투 배수량, 전기삼투 투수계수, 제타포텐셜 값들을 표 5에 나타내었다.

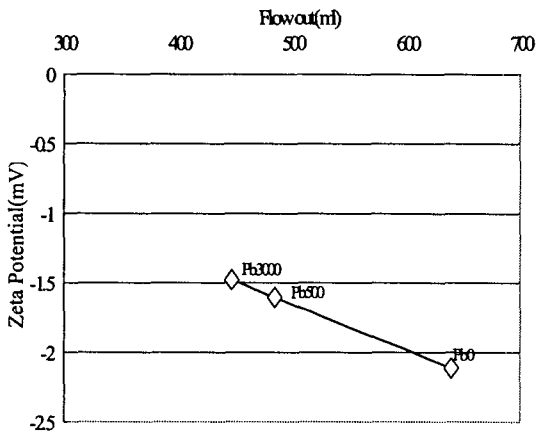


표 5. 전기삼투 배수량, 전기삼투 투수계수, 제타포텐셜

실험 종류	지속 시간 (일)	총유량 Q (ml)	유속 (ml/hr)		전기삼투 투수계수 (cm ² /V·s) × 10 ⁻⁵		제타포텐셜 (mV)		
			mean	max	mean	max	mean	max	min
Pb0	12	640	2.22	3.42	0.79	1.21	-3.75	-6.96	3.51
Pb500	12	485	1.68	1.98	0.60	0.7	-2.85	-6.24	2.25
Pb3000	12	447	1.55	1.81	0.55	0.64	-2.33	-6.13	2

그림 7. Pb0, Pb500, Pb3000 실험에서 제타포텐셜에 따른 전기삼투 배수량의 변화

5. 결론

- (1) 납농도와 pH에 따른 kaolinite의 제타포텐셜 측정결과 제타포텐셜은 납농도와 pH변화에 의존적이다.
- (2) 점토의 음의 제타포텐셜은 전기삼투 투수계수와 비례관계에 있다.
- (3) 제타포텐셜에 따른 전기삼투 배수량을 비교한 결과, 중금속 오염 지반에서의 간극수의 흐름은 오염도에 따라 변화하므로 오염물 이동 예측시 이를 고려하여야 할 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

1. Matec Applied Science(1996), ESA-8000 Manual
2. Shang J. Q.(1997), "Zeta Potential and Electroosmotic Permeability of Clay Soils", Can. Geotech. J. Vol. 34
3. Shang J. Q., Lo K. Y., and Quigley R. M.(1994), "Quantitative Determination of Potential Distribution in Stern-Gouy Double-Layer Model", Can. Geotech. J. 31(5): 624-636
4. West L. J., and Stewart D. I.(1995), "Effect of Zeta Potential on Soil Electrokinetics", J. of ASCE