

점성토의 전기삼투 배수와 Zeta Potential의 상관성

Relationship between Electroosmotic Drainage and Zeta Potential of Clayey Soils

김 수 삼 ^{*1}	Kim, Soo-Sam
한 상 재 ^{*2}	Han, Sang-Jae
임 성 철 ^{*3}	Lim, Sung-Chul

Abstract

On the relationship between 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 diameter, and 16cm length at the concentration of 0, 500, 3000ppm Pb(II) and 0, 230, 2300, 23000ppm Na, Electroosmotic flow was measured for 12 and 14 days. 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 and proportional to the coefficient of electroosmotic permeability. According to the compared result of electroosmotic drainage, the lower the concentration of electrolyte was, the higher was the negative value of zeta potential and the larger the electroosmotic flow.

요 지

본 연구에서는 전기삼투 배수와 제타포텐셜과의 상관성을 규명하고자 하였다. 실험으로는 직경 10cm, 길이 16cm의 원형 압밀시료에 일정 전압경사법으로 1V/cm의 직류전압을 가하여 0, 500, 3000ppm의 납농도와 0, 230, 2300, 23000ppm의 염분농도에서 각각 12일과 14일 동안 전기삼투 배수량을 측정하였고, 같은 농도에서 kaolinite 현탁액의 제타포텐셜을 pH2 부터 14범위에서 측정하였다. 실험결과 제타포텐셜은 전해질 농도와 pH 변화에 의존적이고, 전기삼투 투수계수와 비례관계가 있음을 확인할 수 있었다. 제타포텐셜에 따른 전기삼투 배수량을 비교한 결과, 전해질 농도가 낮을수록 제타포텐셜은 음의 값은 크고, 전기삼투 배수량도 더 증가하였다.

Keywords : Electroosmotic drainage, Zeta potential, Electrolytic concentration, Electrical double layer

1. 서론

지반에서 전류는 확산이중층 내의 양이온을 이동시켜 간극수에 이온상태로 존재하는 전해질을 반대 전하를 띠는 전극쪽으로 이동시킴과 동시에, 전기삼투 흐름을 유발

한다(Mitchell, 1993; 김수삼외 1999). 이러한 전기삼투 흐름원리를 이용한 전기삼투 배수공법은 보통의 연약지반 처리로는 어려운 투수성이 매우 낮은 초연약 지반을 짧은 시간 안에 안정화시키려는 목적으로 사용(Bjerrum et al 1967; Casagrande, 1983; Lo et al. 1991)되어왔고, 최근에

*1 정회원, 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수

*2 중앙대학교 생산공학연구소 선임연구원

*3 평원엔지니어링 지반공학부 주임

는 복토재와 광산찌꺼기의 탈수와 압밀(Shang, 1997a; Lockhart, 1986; Pamucku, 1997), 오염된 지반에서 오염물질을 제거(Bruell et al. 1992; Acar et al. 1994; Acar and Alshawabkeh, 1996; 한상재, 2000)하는 등의 지반환경공학 적 이용으로 그 적용범위가 확대되고 있다. 이러한 전기삼투 현상을 지반에 적용시 관련된 중요한 파라미터 중의 하나는 동수두 투수계수(k_h)와 유사한 단위 전압 및 시간 당 단위 면적을 통과한 배수량으로 정의되는 흙의 전기삼투 투수계수(k_e)이다. 이러한 전기삼투 배수의 효율은 간극수의 pH와 전해질 농도에 따라서 크게 달라지는데 (West and Stewart, 1995; Shang, 1997b), 이것은 일반적으로 Helmholtz-Smoluchowski 이론(이하, H-S 이론)에 따르는 전기삼투 투수계수(k_e)가 전기이중층의 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 납과 염분농도에 따른 전기삼투 배수량을 측정하고, 납과 염분농도 및 pH에 따른 제타포텐셜의 크기를 측정하였다. 또한, Stern-Gouy 전기이중층 이론에서 제타포텐셜을 이론적으로 계산하였다. 이를 통해, 제타포텐셜의 변화특성에 따른 전기삼투 배수특성을 검토하고, 전기삼투 배수량의 실측치와 예측치를 비교함으로써 전기삼투 배수와 제타포텐셜과의 상관성을 규명하고자 하였다.

2. 이론적 배경

흙속의 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)이다. 식 (1)은 전기삼투에 의해 발생한 간극유체의 흐름속도가 전기삼투 투수계수에 비례하고 있음을 나타내고 있다. 일반적으로 흙속의 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)이다.

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 Helmholtz층과 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.

3. 실험종류 및 조건

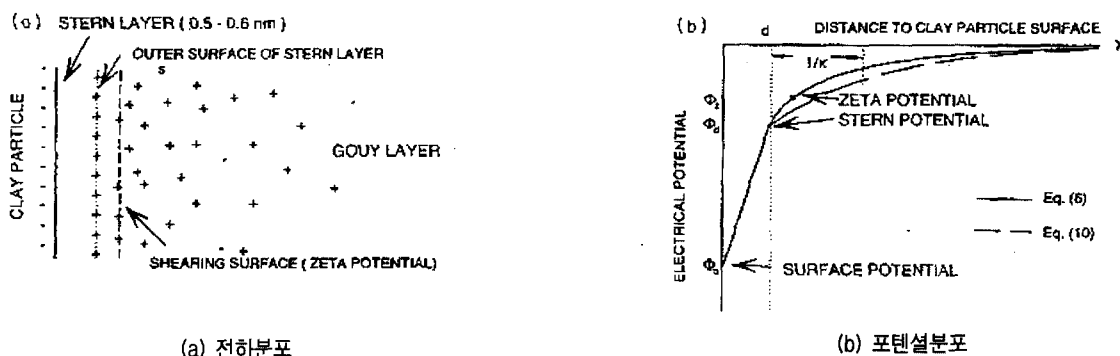


그림 1. Stern-Gouy 전기이중층(Shang, 1994)

3.1 목적 및 범위

전기삼투 배수와 제타포텐셜과의 상관성을 규명하기 위한 실험으로 기본물성 실험을 KSF 규정에 의거 실시하여 국외의 뉴질랜드산(K-1)과 국내의 하동산(K-2) kaolinite의 기본적인 물성치와 특성을 파악하였다. kaolinite는 균질하여 실험오차를 줄일 수 있는 장점이 있으므로 사용하였다. XRF(X-Ray Fluorence Spectrometer) 분석을 통하여 시료의 성분조성(chemical compositions)을 파악하였다. 또한, 납을 사용하여 회분식 흡착실험을 실시한 후 CEC를 구하였다. 전해질 종류와 CEC 이상/이하의 전해질 농도에 따라 전기삼투 배수량을 측정하였고, 간극수의 pH와 전해질 종류와 농도에 따라 제타포텐셜을 측정하였다. 이러한 실험결과들을 토대로, 제타포텐셜의 변화특성에 따른 전기삼투 배수특성을 검토하고, 전기삼투 배수량의 실측치와 예측치를 비교하고자 하였다. 각각의 실험조건은 표 1에 제시하였다.

3.2 실험기기

(1) 전기삼투 투수실험기 체계 및 구성

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

(2) 제타포텐셜 측정기기 체계 및 구성

본 연구에서는 Matec Applied Science에서 개발한

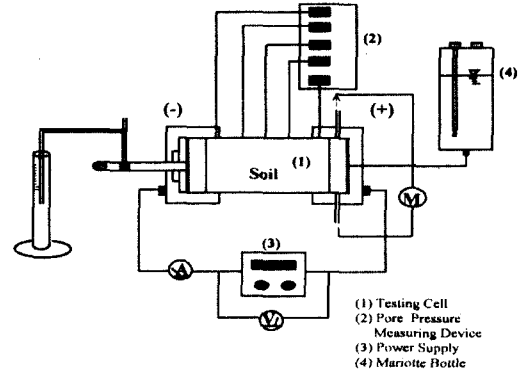


그림 2. 전기삼투 실험장치

ESA(electrokinetic sonic amplitude)-8000 시스템으로 제타포텐셜을 측정하였다. 제타포텐셜 측정기의 개략적인 모습을 그림 3에 나타내었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 기본물성 실험결과

뉴질랜드산 kaolinite의 Atterberg 한계는 액성한계 60%, 소성한계 38.8%로 통일분류법에 따라 소성이 큰 무기질 점토로 구분될 수 있고, 경남하동산 kaolinite의 Atterberg 한계는 액성한계 38.3%, 소성한계 27.8%로 통일분류법에 따라 소성이 작은 무기질 점토로 분류될 수 있다. 뉴질랜드산과 하동산 kaolinite는 #200번체 통과량이 100%, 98.63%에 해당하는 입자가 매우 고운 점토질 흙이고, 유기물 함유량은 각각 8.4%, 10.3%으로 측정되었다. 기본물성 실험결과를 종합하여 표 2에 나타냈으며, 화학적 분석으로 통해 얻어진 결과를 표 3에 나타내었다. 비중은 각각

표 1. 전기삼투 투수와 제타포텐셜의 실험종류 및 조건

구분	전해질 종류									
	Pb(NO ₃) ₂					NaCl				
	pH	적정 용액	농도	가해진 전압	가동 시간	pH	적정 용액	농도	가해진 전압	가동 시간
전기삼투 투수실험	-	-	0 500 3000 (ppm)	1V/cm	12일	-	-	0 230 2300 23000 (ppm)	1V/cm	14일
Zeta Potential 측정	2~14	NaOH	0 500 3000 (ppm)	-	-	2~14	NaOH	0 230 2300 23000 (ppm)	-	-

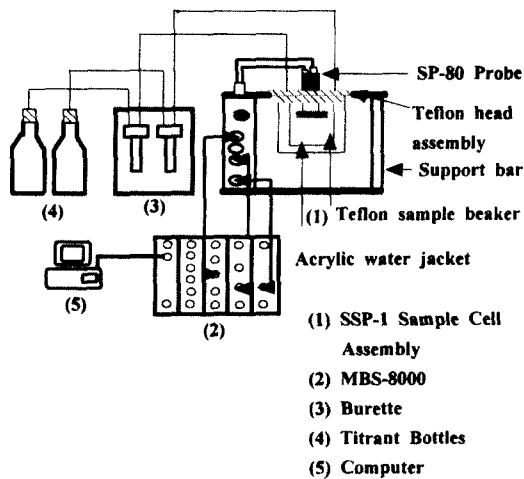


그림 3. 제타포텐셜 측정장치(Matec applied science, 1996)

2.65, 2.5였으며, 함수비 400%의 슬러리에서 측정된 pH는 각각 5, 7의 값을 갖는 것으로 나타났다. 그리고, 2 μm 이하의 점토함유량은 각각 97%, 42%로 나타났다.

뉴질랜드산 시료의 초기 함수비는 83%, 압밀완료 후의 함수비는 60%로 맞추었고, 하동산 시료의 초기 함수비는 72%, 압밀완료 후의 함수비는 50%로 맞추었다. 일반적으로 kaolinite의 Atterberg 한계는 액성한계가 30~110%, 소성한계가 25~40%의 분포로, 본 두 시료의 실험결과치는 기존 문헌의 범위에 해당하는 수치이며, Skempton의 활성도를 계산한 결과, 각각 0.22, 0.25로 나타나 기존 문헌의 kaolinite의 활성도 0.5~0.3보다 약간 낮은 활성도를 보였는데, 이는 함수비에 따라 시료의 거동이 안정되어 있고, CEC가 작음을 뜻한다.

표 2. 토질 특성

흙의 종류	함수비 (%)		액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수 (%)	비중	#200 통과율	pH at w=400%	통일분류
	초기	압밀후							
K-1	83	60	60	38.8	21.2	2.65	100	5	CH
K-2	72	50	38.3	27.8	10.5	2.5	98.63	7	CL

표 3. K-1, K-2의 화학적 조성

흙의 종류	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 (%)
K-1	8.4	50.4	35.5	0.25	0.05	Trace	Trace	Trace	Trace	-	-
K-2	10.3	48.82	35.53	1.03	0.18	2.69	0.15	0.61	0.65	0.02	0.03

뉴질랜드산, 하동산 kaolinite에 납의 최대 흡착량을 구하기 위하여 5ppm에서 2000ppm까지 질산납 용액의 농도를 달리하면서 질산납 용액 200ml와 kaolinite 20g과 혼합하여 상온에서 24시간 교반한 뒤 원심분리기를 이용하여 상청액을 분리한 다음 AAS 분석을 통하여 평형흡착농도에 대한 kaolinite의 흡착량을 구하였다.

Freundlich 모델에 의한 흡착 상관관계로부터 각각의 kaolinite의 평형농도를 구해보면 뉴질랜드산의 경우 대략 평형농도 171.6mg/ℓ 이상이 되면 일치하지 않았고, 하동산의 경우 556.8mg/ℓ 이상이 되면 일치하지 않았다. 따라서, 각각의 평형농도에서의 흡착량 1761mg/kg과 5654mg/kg을 최대 납흡착량으로 판단하였으며, 이를 CEC로 하여 단위를 환산한 결과 본 연구의 대상 시료인 뉴질랜드산 kaolinite의 CEC는 pH 5에서 1.7meq/100g이고, 하동산 kaolinite의 CEC는 PH 7에서 5.52meq/100g로 계산되었다.

4.2 전기삼투 투수실험결과

(1) 납농도에 따른 뉴질랜드산 kaolinite의 전기삼투 투수실험

납농도에 따른 뉴질랜드산 kaolinite의 전기삼투 총 배수량을 그림 4에 나타내었다. 실험초기에는 배수량이 급증하다가 서서히 감소하였으며, 12일간의 실험기간 동안 각각의 실험 Pb0, Pb500, Pb3000에서 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

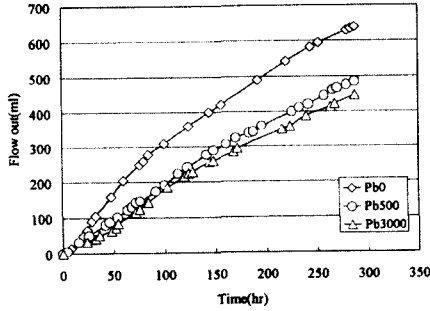


그림 4. Pb0, pb500, pb3000 실험동안의 전기 삼투 배수량

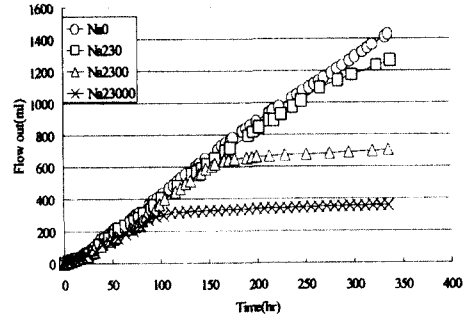


그림 5. Na0, Na230, Na2300, Na23000 실험동안의 전기삼투 배수량

납농도가 증가함에 따라 전기삼투 배수량은 감소하였다.

(2) 염분농도에 따른 하동산 kaolinite의 전기삼투 투수 실험

염분농도에 따른 하동산 kaolinite의 전기삼투 총 배수량을 그림 5에 나타내었다. 실험결과 실험초기에는 염분농도에 따라 배수량은 큰 차이를 보이지 않다가 실험이 진행될수록 큰 차이를 보였다. 14일간의 실험기간 동안 각각의 실험 Na0, Na230, Na2300, Na23000에서 발생한 총 배수량은 1428ml, 1266ml, 703.5ml, 361ml로 기록되었다. Na0 실험을 기준으로 Na230, Na2300, Na23000일 때 배수량을 비교하면 89%, 49%, 25% 수준의 전기삼투 배수량이 발생하여 염분농도가 증가함에 따라 전기삼투 배수량은 급격히 감소하였다.

4.3 제타포텐셜 측정결과

(1) 납농도와 pH 변화에 따른 kaolinite의 제타포텐셜 측정결과

납농도와 pH 변화에 따른 뉴질랜드산 kaolinite의 제타포텐셜 측정결과는 그림 6과 같다. 일반적으로 음의 값을 갖는 점토의 제타포텐셜에 납농도가 미치는 영향은 시료의 pH 변화에 따라 그 거동이 크게 달라짐을 그림 6을 통해 확인할 수 있으며, 점토의 전하가 0일 때의 pH 즉, 영전하점(PZC)은 pH 3~4 부근이었다. 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.

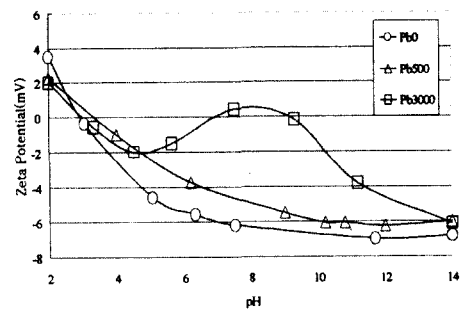


그림 6. 납농도와 pH 변화에 따른 제타포텐셜의 변화

(2) 염분농도와 pH 변화에 따른 kaolinite의 제타포텐셜 측정결과

염분농도와 pH 변화에 따른 하동산 kaolinite의 제타포텐셜 측정결과는 그림 7과 같다. 그림 6과 마찬가지로 음의 값을 갖는 점토의 제타포텐셜에 염분농도가 미치는 영향은 시료의 pH 변화에 따라 그 거동이 크게 달라짐을 확인할 수 있으며, PZC는 pH 4 부근으로 측정되었다. Na0, Na230, Na2300, Na23000 실험에서 제타포텐셜 변화를 살펴보면 5.92~-11.07(mV), 4.98~-9.02(mV), 3.07~-5.37(mV), 1.87~-3.24(mV)의 값을 보였으며, 각각의 평균값은 -5.04(mV), -4.03(mV), -2.58(mV), -1.37(mV)로 나타났다. 이상의 실험결과를 통하여 뉴질랜드산과 하동산 kaolinite의 제타포텐셜은 전해질 농도와 pH 의존적으로 변화하였으며, 제타포텐셜의 음의 값이 커질수록 전기삼투 배수량은 증가함을 알 수 있다.

4.4 고찰

(1) Stern-Gouy 전기이중층 이론에 의한 제타포텐셜 계산

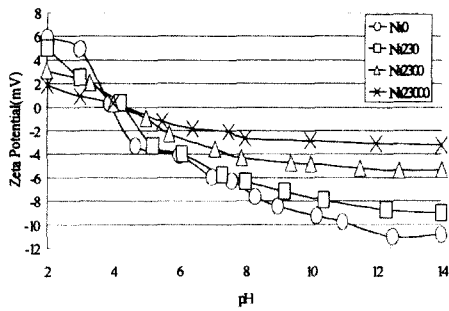


그림 7. 염분농도와 pH 변화에 따른 제타포텐셜의 변화

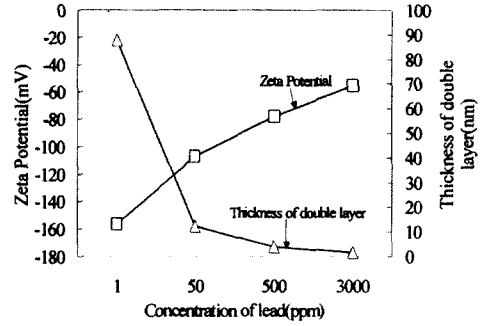


그림 8. 납농도에 따른 이중층 두께와 제타포텐셜의 변화

표 4. Stern-Gouy 전기이중층 이론에서 계산된 포텐셜값

흙의 종류	실험종류	CEC (meq/100g)	S (m ² /g)	Φ_0 (mV)	Φ_d (mV)	ζ (mV)	ζ/Φ_0 (%)
K-1	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
K-2	Na2.3	5.52	15	-3593	-258	-245.9	6.84
	Na230			-3481	-141.8	-129.7	3.73
	Na2300			-3420	-83.9	-72.2	2.11
	Na23000			-3361	-28.1	-20	0.60

Φ_0 : 점토입자 표면의 전기포텐셜, Φ_d (Stern 포텐셜): Stern층의 바깥 면에서의 전기포텐셜, ζ : 제타포텐셜(점토입자 표면에서 0.6nm지점의 전기포텐셜)

점토-물-전해질 시스템에서 표면포텐셜, Stern 포텐셜, 제타포텐셜 등의 전기포텐셜분포, 이중층 두께를 Stern-Gouy 전기이중층 이론을 통해 계산하였으며, 계산결과를 표 4에 나타내었다.

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 확산이중층두께의 차이에 기인한 것으로 판단되며, 그림 8을 통해 확인할 수 있다.

Na2.3ppm, Na230ppm, Na2300ppm, Na23000ppm에서 제타포텐셜은 표면포텐셜의 6.84, 3.73, 2.11, 0.60%에 해당하는 값을 갖는 것으로 계산되었고, 염분농도가 증가할수록 그 비율(ζ/Φ_0)은 작게 나타났다. 염분농도가 증가함에 따라 확산이중층두께가 감소하고, 이에 따라 제타포텐

셜이 감소하고 있음을 그림 9를 통해 확인할 수 있다. 표 4에서 뉴질랜드산과 하동산 kaolinite의 납과 염분농도에 따른 각각의 전기포텐셜은 점토입자 표면에서 멀어질수록 감소하며, 특히, 점토입자 표면의 0.5~0.6nm에 해당하는 Stern층에서 표면포텐셜의 90% 이상이 감소하였고, 전해질 농도가 증가할수록 이러한 감소폭은 더 크게 나타나 결과적으로 전해질 농도의 증가가 제타포텐셜을 감소시키는 영향인자임을 알 수 있다.

(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. 뉴질랜드산 kaolinite와 하동산 kaolinite에 대하여 간극율을 나누어주어 정규화시킨 전기삼투 투수계수의 실측치와 예측치 및 제타포텐셜을 그림 10에 나타내었다.

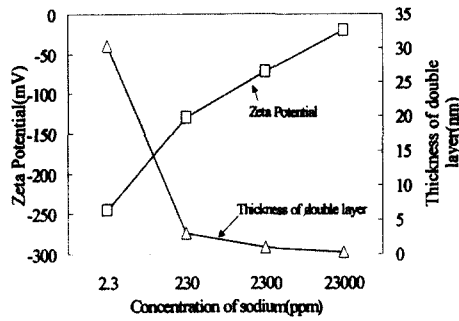


그림 9. 염분농도에 따른 이중층 두께와 제타포텐셜의 변화

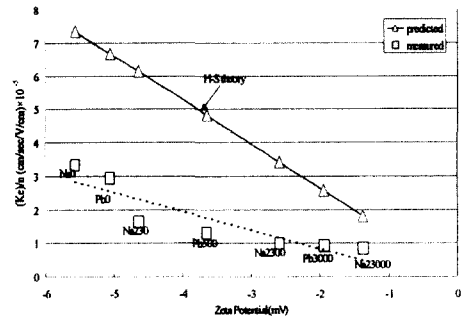


그림 10. K-1, K-2에서 제타포텐셜에 따른 정규화된 전기삼투 투수계수의 실측치와 예측치의 비교

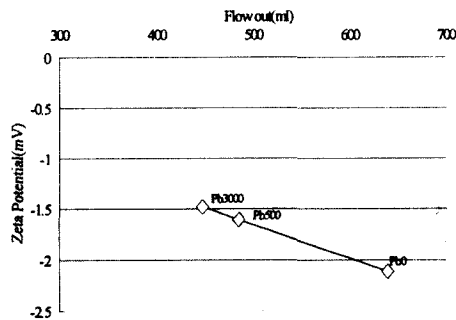


그림 11. Pb0, Pb500, Pb3000 실험에서 제타포텐셜에 따른 전기삼투 배수량의 변화

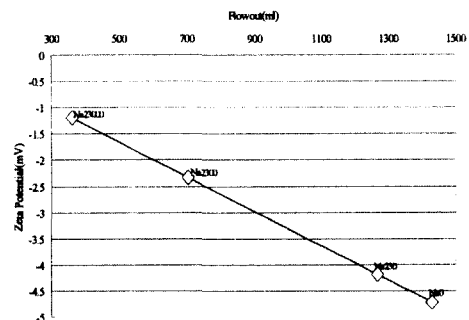


그림 12. Na0, Na230, Na2300, Na23000 실험에서 제타포텐셜에 따른 전기삼투 배수량의 변화

그림 10에서 전기삼투 투수계수의 실측치는 예측치보다 크기는 작지만, 그 경향은 제타포텐셜과 비례관계에 있음을 보였다. 이때, 회귀분석을 통한 상관계수(r^2)는 0.852로 나타났다. 이런 상관성을 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{(k_e)_m}{n} = 0.708\zeta \quad (3)$$

(3) 제타포텐셜에 따른 전기삼투 배수량의 변화

그림 11과 그림 12는 ESA기법으로 측정된 제타포텐셜의 평균값과 전기삼투 배수량과의 상관성을 나타낸 것으로 전해질이 함유되지 않은 시료의 제타포텐셜이 가장 크고, 이때의 전기삼투 배수량도 가장 많았다. 한편, 전해질 농도가 증가할수록 시료의 제타포텐셜은 점점 감소하여 전기삼투 배수량도 점점 감소하였다.

이는 제타포텐셜과 비례관계에 있는 전기삼투투수계수가 제타포텐셜의 변화에 의해 직접적인 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 전기삼투 배수량, 전기삼투 투수계수, 제타포텐셜 값들을 표 5에 나타내었다

(4) 전기삼투 배수량의 실측치와 예측치의 비교

측정한 제타포텐셜을 사용하여 H-S 이론에서 구한 전기삼투 배수량의 예측치(predicted1)와 Stern-Gouy 전기 이중층 이론에서 계산한 제타포텐셜을 사용하여 H-S 이론에서 구한 전기삼투 배수량의 예측치(predicted2) 및 실측치를 상호 비교하여 그림 13과 그림 14에 나타내었다. 계산한 제타포텐셜을 사용하여 구한 전기삼투 배수량의 예측치는 실측치보다 19.58~46.92배 크게 나타났고, 측정된 제타포텐셜을 사용해서 구한 전기삼투 배수량의 예측치는 실측치보다 1.13~1.77배 크게 나타나, 실측치와 다소 차이는 보이지만, Stern-Gouy 이론에서 계산한 제타포텐셜을 사용하여 구한 예측치 보다는 실측치에 근접했다. 이러한 예측치들이 과대 평가된 이유를 살펴보면, Stern-Gouy 이론의 경우, pH가 증성일 때 적합한 이론으로, 전기삼투 흐름시 발생하는 pH 변화를 고려하지 못하기 때문에 과도한 차이가 발생하였고, 제타포텐셜을 측정하여 전기삼투 배수량을 예측한 경우는 제타포텐셜이 실제 전기삼투 흐름시의 제타포텐셜이 아니라 현탁액 시료의 제타포텐셜을 사용한 것에 따른 차이에 기인한다. 따라서, 실제시료의 pH 변화에 따른 제타포텐셜을 측정함으로써

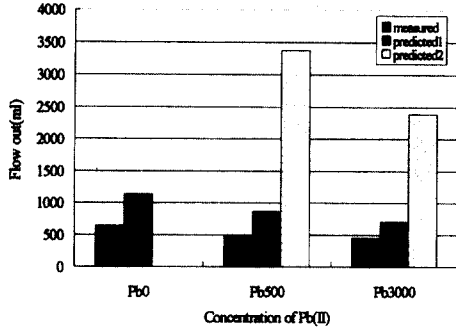


그림 13. Pb0, Pb500, Pb3000 실험에서 전기삼투 배수량의 실측치와 예측치의 비교

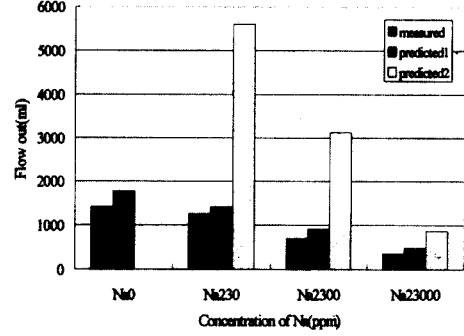


그림 14. Na0, Na230, Na2300, Na23000 실험에서 전기삼투 배수량의 실측치와 예측치의 비교

표 5. 전기삼투 배수량, 전기삼투 투수계수, 제타포텐셜 값

실험 종류	실험 종류	지속 시간 (일)	총유량 Q (ml)	유속 (ml/hr)		전기삼투 투수계수 ($cm^2/V \cdot s$) $\times 10^{-5}$		제타포텐셜 (mV)		
				mean	max	mean	max	mean	max	min
K-1	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
K-2	Na0	14	1428	4.25	4.44	1.5	1.57	-5.04	-11.07	5.92
	Na230	14	1266	3.77	4.19	1.33	1.48	-4.03	-9.02	4.98
	Na2300	14	703.5	2.09	3.97	0.74	1.41	-2.58	-5.37	3.07
	Na23000	14	361	1.07	3.13	0.38	1.11	-1.37	-3.24	1.87

표 6. 전기삼투 배수량의 실측치와 예측치의 비교

실험 종류	제타포텐셜 (mV)	$(K_e)_m \times 10^{-5}$ ($cm^2/s \cdot V$)	$(K_e)_p \times 10^{-5}$ ($cm^2/s \cdot V$)	총유량 (measured) (ml) ①	총유량 (pre.1) (ml) ②	총유량 (pre.2) (ml) ③	②/①	③/①
Pb0	-3.75	0.79	1.40	640	1135	-	1.76	-
Pb500	-2.85	0.60	1.06	485	863	22756	1.77	46.92
Pb3000	-2.33	0.55	0.87	447	705	16695	1.58	37.35
Na0	-5.04	1.50	1.88	1428	1780	-	1.25	-
Na230	-4.03	1.33	1.50	1266	1423	46019	1.13	36.29
Na2300	-2.58	0.74	0.96	703.5	911	25537	1.30	36.30
Na23000	-1.37	0.38	0.51	361	484	7068	1.34	19.58

써 예측치와 실측치간의 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 각각의 예측치와 실측치를 표 6에 제시하였다.

5. 결론

(1) 전해질 종류와 농도 및 pH에 따른 kaolinite의 제타포텐셜 측정결과 제타포텐셜은 전해질 농도와 pH변화에

의존적이고, 전기삼투 투수계수와 비례관계에 있다.
 (2) Stern-Gouy 전기이중층 이론에서 계산한 제타포텐셜을 사용하여 H-S 이론에서 전기삼투 배수량을 예측한 결과, 실측치에 비해 약 20~45배 정도로 과대 평가되었으며, ESA기법으로 측정된 제타포텐셜을 사용하여 H-S 이론에서 전기삼투 배수량을 예측한 결과 약 1.1~1.8배 정도로 실측치에 근접한 결과를 얻을 수 있었

다. 따라서, 전기삼투 현상을 실제 지반에 적용시, 전해질 농도와 pH 변화에 따른 제타포텐셜을 정확히 측정한다면, H-S 이론을 통해서 예측한 전기삼투 배수량의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

- (3) 제타포텐셜에 따른 전기삼투 배수량을 비교한 결과, 전해질 농도가 낮을수록 제타포텐셜의 음의 값은 크고, 전기삼투 배수량도 많았다. 따라서, 일반적으로 H-S 이론에서 간극수의 흐름을 좌우하는 전기삼투 투수계수가 제타포텐셜의 크기에 비례하므로, 제타포텐셜의 크기에 따라 전기삼투 현상에 의한 저투수성 세립토 지반에서의 간극수의 흐름은 변한다.

참고 문헌

1. 김수삼, 한상재, 임성철, 정방미(1999), "제타포텐셜이 납으로 오염된 흙의 전기삼투 투수성에 미치는 영향", 대한토목학회, '99 학술발표회
2. 한상재(2000), "Electrokinetic 기법에 의한 오염토의 전기삼투와 중금속 이동 특성", 중앙대 박사학위논문
3. Acar Y.B., and Alshawabkeh A.N.(1996), "Electrokinetic Remediation I: Pilot Scale Tests with Lead-Spiked Kaolinite", J. of Geotechnical Engineering, ASCE, 122(3): 173-185
4. Acar Y.B., Hamed J.T., Alshawabkeh A.N., and Gale R.J.(1994), "Removal of Cadmium(II) from Saturated Kaolinite by The Application of Electric Current". Geotechnique, 44(2): 239-254
5. Bjerrum L., Mowm J., and Eide O.(1967), "Application of Electro-Osmosis to a Foundati-on Problem in a Norwegian Quick Clay", Geotechnique, 17: 214-235
6. Bruell C.J., Segall B.A., and Walsh M.T.(1992), "Electroosmotic Removal of Gasolin Hydrocarbons and TCE from Clay", J. of Environmental Engineering, ASCE, 118:(1) 68-63
7. Casagrande L.(1983), "Stabilization of Soils by means of Electro-Osmosis-State of The Art, J. of The Boston Society of Civil Engineers, ASCE, 69(2): 255-302
8. Hunter R.J.(1981), "Zeta Potential in Colloid Science", Academic Press
9. Lockhart, N.C.(1986), "Electro-dewatering of Fine Suspension. Edited by H.S. Muralidhara Batelle Press, pp. 241-274
10. Lo K.Y., Ho K.S., and Incluet I.I.(1991), "Field Test of Electroosmotic Strengthening of Soft Sensitive Clay", Can. Geotech. J., 28: 74-83,
11. Matec Applied Science(1996), ESA-8000 Manual
12. Mitchell J.K.(1993), "Fundamental of Soil Behaviour", 2nd edition University of California, Berkeley
13. Pamukcu Sibel.(1997), "Electro-Chemical Technologies for In-Situ Restoration of Contami-
14. Shang J.Q.(1997a), "Electrokinetic Dewatering of Clay Slurries as Engineerd Soil Covers", .Can. Geotech. J. Vol.34
15. Shang J.Q.(1997b), "Zeta Potential and Electroosmotic Permeability of Clay Soils", Can. Geotech. J. Vol. 34 nated Subsurface Soils", Lehigh University
16. 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
17. West L.J., and Stewart D.I.(1995), "Effect of Zeta Potential on Soil Electrokinesis", J. of .ASCE

(접수일자 2000. 8. 7)