

Electrokinetic cell을 이용한 해성점토지반의 개량효과 연구

Electrokinetic Strengthening of Soft Marine Clays in E/K Cell

이 승 원*¹

Lee, Seung - Won

이 영 남*²

Lee, Young - Nam

Lo, Kwan Yee*³

Abstract

To study the improvement of soft marine clay from southern coast of Korea under the electroosmosis and electrophoresis conditions, several electrokinetic tests were carried out in electrokinetic(E/K) cell. In electroosmosis tests, various treatment times and current densities were used to investigate the strengthening effect under different conditions. From these tests results, it may be noted that electroosmotic strengthening of soft marine clay was effective in proportion to unit power consumption, current density and treatment time. However, electrophoresis method was not effective for this soil.

요 지

본 연구에서는 E/K cell(286×254×119mm)을 이용하여 해성점토 지반에서의 electrokinetic 공법에 의한 지반개량효과를 비교 연구하였다. 남해안 해성점토에 대해서 순수 재하시험과 저전압을 이용한 전기삼투시험, 그리고 고전압을 이용한 전기영동시험을 실시한 결과, 저전압 전기삼투에 의한 지반개량 효과가 제일 컸으며, 고전압 전기영동에 의한 지반개량효과는 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 전기삼투시험에서는 전류가동시간과 전류밀도가 클수록, 즉 전력소모량이 많을수록 지반개량효과가 크게 나타났다.

Keywords : Electrokinetic, Electroosmosis, Electrophoresis, E/K cell, Treatment time, Current density, Soft marine clay

*1 정희원, 현대건설(주) 기술연구소 선임연구원

*2 정희원, 현대건설(주) 기술연구소 연구위원

*3 Director, Geotechnical Research Centre, University of Western Ontario, Canada

1. 서 론

Reuss가 1807년에 전기삼투(electroosmosis) 현상을 최초로 발견하고, L. Casagrande가 1937년에 지반공학 분야에 이를 처음으로 적용한 이후 전기삼투를 이용한 지반개량공법이 수 십년간 세계 각지에서 연약 점토 및 실트질 지반의 압밀 촉진과 강도증가를 목적으로 사용되어왔다. 반면에 고전압하에서의 전기영동(electrophoresis) 및 유도전기영동(dielectrophoresis) 현상을 이용한 지반안정화 공법이 1950년대에 개발되어 예민비가 큰 점토 지반에서 강도증진 및 배수촉진을 목적으로 적용되어왔다. 연약지반에서 이러한 전기동력(electrokinetic)을 이용하는 경우, 지반-물-전해질 시스템(soil-water-electrolyte system)의 상태와 전기동력의 적용조건에 따라 그 효과는 달라진다(Mitcell, 1993; Shang et al., 1995b). 따라서 본 논문에서는 실내에서 모형셀(E/K cell)을 제작하여 울촌현장의 해성점토에 대하여 PBD(Plastic Board Drain)를 이용한 순수 재하시와 저전압 전기삼투 및 고전압 전기영동시의 지반개량 효과를 비교하였다. 또한 전기

삼투에 대해서는 선행재하 여부, 전류가동시간의 변화, 그리고 전류밀도의 변화에 대한 압밀 촉진 및 강도증진 효과를 알아보기 위한 실험을 수행하였다.

2. 전기동력(electrokinetic)의 이론

슬러리 상태의 지반이나 고함수비의 연약지반에 이 공법을 적용시키면 전기적으로 대전된 흙 입자가 이동(electrophoresis)하거나 간극수가 이동(electroosmosis)하여 배수를 촉진시키고 강도를 증가시키게 되는데 이러한 현상에 대한 기본적인 이론은 다음과 같다.

· 전기영동(electrophoresis)

외부 직류장에 의해 전기적으로 대전된 흙 입자가 이동하는 현상으로, 음의 전자로 대전된 입자는 양극으로, 양의 전자로 대전된 입자는 음극으로 이동하게 된다. Hunter(1981)는 하나의 점토 입자에 작용하는 전기영동력을 입자의 제타 포텐셜(zeta potential)을 이용하여 정량적으로 계산하는 식을 제시하였다.

표 1. 전기동력을 이용한 지반개량시 개량 효과에 영향을 미치는 인자

	영향인자	특 징
지반조건	토립자의 크기와 광물성분	· 2 μ m 보다 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 > 9인 지반에서는 염분함유율이 많아도 효과가 좋음
	투수계수	· 지반의 투수계수(k_v)에 대한 전기동력 투수계수(k_e)의 상대적인 크기가 클수록 효과적
적용방법	전류밀도	· 흙의 종류 및 상태에 따라 큰 차이를 보임.
	전극재의 종류	· 은, 백금, 구리, 황동 등의 전극재는 전기전도율이 우수 · 경제성을 고려한 경우 강철 재료가 유리
	전극재의 배치형태	· 지반조건에 따라 배수방향(수평, 수직) 결정 · 적절한 전극재의 간격과 설치깊이의 결정이 중요

· 전기삼투(electro-osmosis)

포화된 흙에는 (-)의 흙입자와 중립을 맞추기 위한 (+)이온이 많이 존재하는데, 여기에 전위(electrical potential)가 발생하면 (+)이온은 음극에 (-)이온은 양극으로 이동하면서 물을 끌어당긴다. 그러나 이때 이동하는 (+)이온이 (-)이온 보다 훨씬 많아 물은 양극에서 음극으로 흐르게 된다. 이러한 현상을 전기삼투라 하는데, 이에 대한 연구는 Mitchell(1991, 1993), Lo(1991a, 1991b), 김(1997a, 1997b) 등에 의해 연구되었다.

전기동력을 이용하여 지반의 압밀을 촉진시키는 데에 영향을 미치는 인자들은 지반조건과 적용 방법에 따라 표 1과 같이 나눌 수 있다 (Sprute et al., 1980; Sunderland, 1987).

3. 시험 장비 및 시험 방법

전기삼투와 전기영동시험을 위한 모형 셀(E/K cell, 그림 1)은 재하추를 이용하여 상부에 하중을 재하시킬 수 있도록 제작되었으며, 양쪽 하부에 배수장치를 설치하여 간극수의 배수가 가능하도록 하였다. 전극용 강철망과 강철막대는 PBD에 삽입시켜 이를 통해 간극수가 배수되도록 하였다. 시험동안의 배수유량은 하부 배수밸브를 통하여 유출된 물의 양을 측

정하여 구하였으며, 상부 양쪽에 다이얼게이지를 설치하여 시료의 침하량을 측정하였다. 시험전후에는 실내배인시험을 실시하여 시료의 강도 변화를 측정하였고, 시료를 채취하여 시험전후의 함수비 변화를 측정하였다. 또한 양쪽에 PBD를 설치한 상태에서 순수 재하하중에 의한 시료의 압밀 거동 및 강도 변화를 측정하여 전기삼투 및 전기영동 시험에 의한 압밀 촉진 효과와 강도증진 효과를 비교하였다. 표 2는 본 시험에 사용된 시험장비의 재원과 실내시험 및 계측 내용을 정리한 것이다.

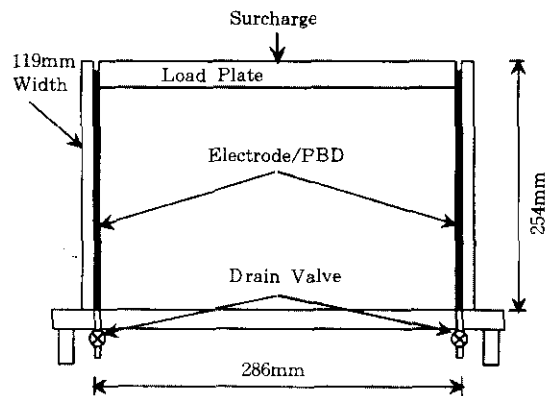


그림 1. E/K cell의 모형도

표 2. 시험장비 재원과 실내시험 및 계측 내용

E/K cell	재질	Plexiglas
	크기	286 × 119 × 254mm
	배수방법	PBD를 이용하여 양쪽 하부에 설치된 배수밸브로 배수
	재하방법	상부 재하판 이용
계측장치	시료의 부피 변화 측정	하부배수밸브를 통해 유출된 수량 측정
	시료의 침하량 측정	상부의 다이얼 게이지 이용
실내시험	함수비	시험 전후에 시료를 채취하여 측정
	강도변화 측정	시험전후에 실내배인시험 실시

4. 시험 결과

4.1 시료 특성

본 시험에 사용된 시료는 울촌 제1지방산업 단지 조성공사 현장에서 해저면 아래 5.0~5.5m 깊이에서 교란된 상태로 채취한 해성점토로 염분 함유율이 30g/l 이고, 자연함수비가 100~120%인 고소성 점토(CH)이다. 이 시료의 원지반에서의 전단강도는 13kPa(현장배인 시험 결과)였으며, 교란된 시료의 전단강도는 1~5kPa(실내배인시험 결과)였다. 이 시료에 대한 그 밖의 기본적인 지반 특성치는 표 3과 같다.

4.2 시험 계획 및 시험 방법

전기동력에 의한 개량효과를 비교하기 위하

표 3. 시험에 사용된 시료의 지반 특성치

단위중량 (t/m ³)		1.45
입도분포	Sand (%)	11
	Silt (%)	66
	Clay (%)	23
비중		2.78
자연함수비 (%)		100 ~ 120
액성한계 (%)		59
소성한계 (%)		32
비배수전단강도 (kPa)	원지반	13
	교란시료	1 ~ 5
전기 전도도 (Electrical Conductivity, S/m)		5.1
염분 함유율(g/l)		30
pH		7.6
투수계수 (k _v , cm/sec)		2.0 × 10 ⁻⁶

표 4. 각 단계별 시험 방법

Step	Test Type	Test No.	Time(day)	Surcharge (kPa)	Current Density (A/m ²)	Interval of Intermittent Current (min. on/min. off)
1	Control* ¹	1A-CT	6	15.1	—	—
		1B-CT	8	15.1	—	—
		1C-CT	8	30	—	—
	Low Voltage Electroosmosis	1-LV	6	15.1	0 → 30* ²	10/2
	Hight Voltage electrophoresis* ¹	1A-HV	6	15.1	—	—
		1B-HV	8	15.1	—	—
1C-HV		8	30	—	—	
2	Control	2-CT	6	15.1	—	—
	Low Voltage Electroosmosis	2-LV	6	15.1	30	10/2
		3-LV	6	15.1	30	2/2
		4-LV	6	15.1	30	4/2
		5-LV	6	15.1	15	4/2

*¹ 1-CT와 1-HV 시험은 A, B, C단계로 실시되어 각 단계별로 체적 변화량, 함수비 변화량, 강도변화량을 측정하여 개량효과를 비교함.

*² 초기 2일동안은 순수재하시험만 실시하고, 2일부터 전기삼투를 실시함.

여 순수 재하시험(control test, CT)은 2회, 3~6.6V의 저전압 전기삼투시험(LV test)은 5회, 그리고 1500V의 고전압 전기영동시험(HV test)은 1회 실시하였다. 이들 시험은 두 단계로 나누어 수행되었는데, 1단계에서는 전기삼투와 전기영동에 의한 개량효과를 순수재하시의 개량효과와 비교하기 위한 시험을 수행하였고, 2단계에서는 전기삼투시험에서 전기가동 시간과 전류밀도의 변화에 따른 개량효과를 비교하기 위한 시험을 수행하였다. 각 단계별

시험 방법은 표 4와 같다.

4.3 시험 결과

개량효과 판정을 위해 시험 전후에 실시한 시료의 체적, 함수비, 전단강도에 대한 변화량은 표 5(1단계 시험), 표 6(2단계 시험)과 같다. 여기에서 표 5의 1B-CT, 1C-CT와 1B-HV, 1C-HV의 측정값은 시험초기 값에 대한 변화량을 표시한 것으로 누적변화량을 나타낸 것이다.

표 5. 1단계 시험 결과(체적, 함수비, 강도 변화량)

		1A-CT	1B-CT	1C-CT	1-LV	1A-HV	1B-HV	1C-HV
Volume of Sample (cm ³)	Initial V ₀	4806.0	4806.0	4806.0	4666.5	4860.0	4860.0	4860.0
	Collected Water ΔV	203.0	236.0	350.0	464.0	239.0	263.0	381.0
	Final V _f	4603.0	4570.0	4456.0	4202.5	4621.0	4597.0	4479.0
	ΔV/V ₀ (%)	4.2	4.9	7.3	9.9	4.9	5.4	7.8
Moisture Content (%)	Initial w ₀	96.9	96.9	96.9	94.0	91.8	91.8	91.8
	Final w _f	79.8	75.8	74.4	75.6	76.9	76.3	73.3
	Δw	17.1	21.1	22.5	18.4	14.9	15.6	18.5
	Δw/w ₀ (%)	17.7	21.8	23.2	19.5	16.2	17.0	20.2
Shear Strength (kPa)	Initial c _{u0}	4.0	4.0	4.0	3.8	4.1	4.1	4.1
	Final c _{uf}	7.8	7.8	10.1	10.6	7.9	7.5	10.9
	Δc _u	3.8	3.8	6.1	6.8	3.4	3.8	6.8
	Δc _u /c _{u0}	0.95	0.95	1.53	1.79	0.83	0.93	1.66

표 6. 2단계 시험 결과(체적, 함수비, 강도 변화량)

		2-CT	2-LV	3-LV	4-LV	5-LV
Volume of Sample (cm ³)	Initial V ₀	4725.0	4692.0	4666.5	4462.5	4819.5
	Collected Water ΔV	320.0	670.0	590.0	630.0	522.0
	Final V _f	4405.0	4022.0	4076.5	3832.5	4297.5
	ΔV/V ₀ (%)	6.8	14.3	12.6	14.1	10.8
Moisture Content (%)	Initial w ₀	110.0	117.0	114.2	108.3	99.9
	Final w _f	94.3	78.3	89.4	81.5	80.5
	Δw	15.7	38.8	24.8	26.8	19.4
	Δw/w ₀ (%)	14.3	33.1	21.7	24.7	19.4
Shear Strength (kPa)	Initial c _{u0}	1.4	1.0	1.0	1.6	1.8
	Final c _{uf}	4.9	9.6	6.4	9.2	7.4
	Δc _u	3.5	8.6	5.4	7.6	5.6
	Δc _u /c _{u0}	2.50	8.60	5.40	4.75	3.11

4.4 전기영동시험

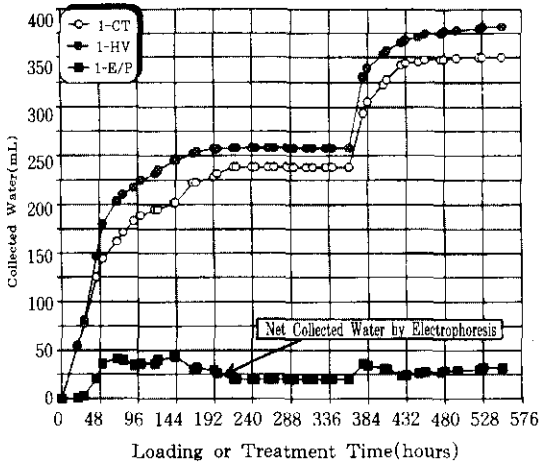
1-HV와 1-CT의 시간에 따른 배수유량은 그림 2(a)와 같은데, 여기에서 1-HV의 총배수유량에서 1-CT의 배수유량을 뺀 순수한 전기영동에 의한 배수유량(1-E/P)은 그림 2(a)의 맨 아래 곡선과 같다. 여기에서 순수한 전기영동에 의한 배수유량은 전기영동 개시 초기에 40ml를 기록한 이후로 시험종료시까지 거의 변화가 없었으며, 상재하중을 증가시킨 경우에도 전기영동에 의한 순수한 배수유량에는 거의 변화가 없었다. 즉, 전기영동에 의한 배수촉진 효과는 전기영동 개시시점에 미소하게 발생하였으나, 그 후로는 효과가 거의 없었다. 또한 시간에 따른 시료의 함수비 및 전단강도의 변화를 살펴보면 그림 2(b)와 같은데, 1-HV와 1-CT와 거의 차이를 보이지 않았다. 따라서 본 시료에 대한 고전압 전기영동의 개량효과는 거의 없는 것으로 판단되는데, 이는 전기영동

에 의한 개량 효과는 흙입자의 이동이 자유로운 슬러리 상태의 지반에서 효과가 큰데 반하여(Hunter, 1981; Lockhart, 1983; Shang et al., 1994). 본 시험에 사용된 시료는 흙입자간의 구속력이 커서 흙입자의 이동이 자유롭지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

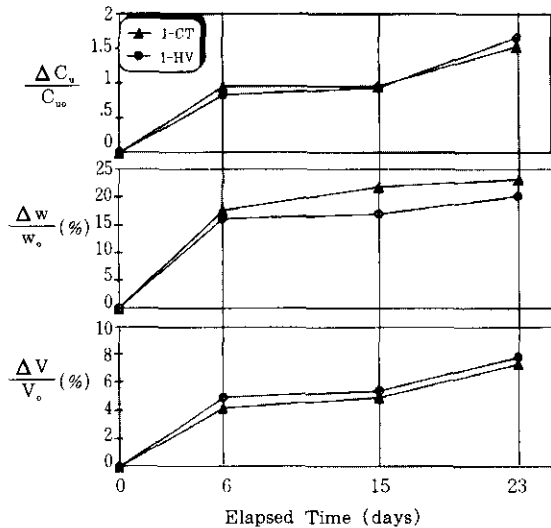
4.5 전기삼투시험

4.5.1 선행재하에 의한 영향

전기삼투시험에서 선행재하 여부가 지반개량 효과에 미치는 영향을 알아보기 위하여 1-LV와 2-LV 시험을 실시하였는데, 각 시험에서의 시간에 따른 총배수유량은 그림 3(a)와 같았다. 여기에서 1-LV와 2-LV의 순수한 전기삼투에 의한 배수유량(1-E/O, 2-E/O)은 1-LV와 2-LV의 총배수유량에서 1-CT, 2-CT의 배수유량을 빼서 구한 것으로 그림 3(b)와 같다.

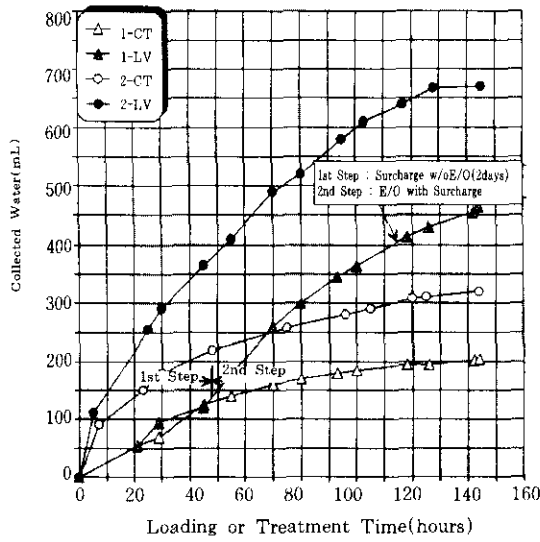


(a) 시간에 따른 배수유량

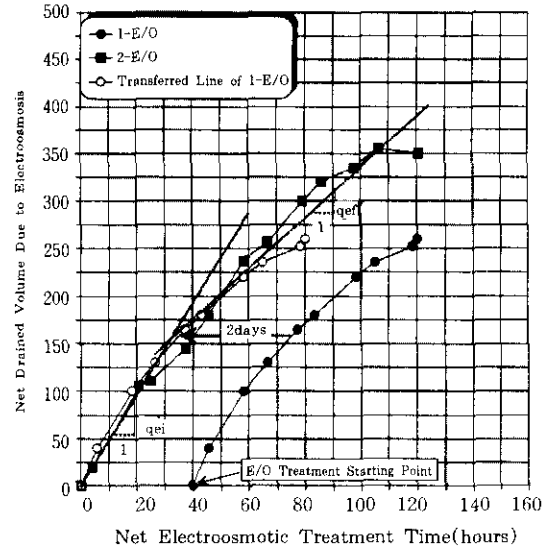


(b) 시험방법에 따른 체적감소비, 함수비감소비, 전단강도비의 변화

그림 2. 1-CT, 1-HV 시험 결과



(a) 총배수유량



(b) 순수한 전기삼투로 인한 배수유량

그림 3. 1-LV, 2-LV 시험의 시간에 따른 배수유량

Mitchell(1993)은 전기삼투에 의한 단위시간 당 배수유량(q_e)은 식 (1)과 같이 지반의 전기삼투 투수계수(k_e , coefficient of electroosmotic hydraulic conductivity)와 전류세기(I)에 비례하고, 전기전도도(σ , electrical conductivity)에 반비례함을 밝혔다. 여기에서 k_e 와 σ 값은 지반의 간극비, 간극수의 성분, 포화도, 염분농도, 입도분포, 광물성분 등에 영향을 받는 것으로 알려져있다(Mitchell, 1993).

$$q_e = k_e \frac{\Delta V}{\Delta d} A = k_e EA = \frac{k_e}{\sigma} I = k_i I \quad (1)$$

$$\text{여기서, } k_i = \frac{EA}{I} k_e = \frac{E}{j} k_e = \frac{k_e}{\sigma}$$

$$\sigma = \frac{\Delta d}{\Delta V} \frac{I}{A} = \frac{j}{E}$$

k_e : 전기삼투 투수계수($m^2/s/volt$),

ΔV : 전압차(volt)

Δd : 전극간 거리(m)

A : 단면적(m^2),

E : 단위길이당 전압(= $V/\Delta d$, V/m),

j : 전류밀도(= I/A , A/m^2)

그림 3(b)에서 1-E/O와 2-E/O 곡선은 거의 같은 경향을 보이고 있어서 선행재하가 전기삼투 효과에 주는 영향이 거의 없는 것으로 판단되는데, 이는 본 시험에서 실시된 선행재하가 지반의 k_e 와 σ 값에 별 영향을 주지않은 것을 의미한다. 그러나 1-E/O와 2-E/O의 단위시간당 배수유량은 전기삼투시간이 경과함에 따라 q_{e0} 에서 q_{e1} 로 감소하는데, 그 원인은 전기삼투시간이 경과함에 따라 지반내 간극비가 감소하고 간극수의 전기화학적 반응이 활성화되어 k_e (= k_e/σ)값이 점차 줄어들기 때문이다. 반면에 함수비감소비와 전단강도증가비(표 5, 표 6)는 2-LV가 1-LV 보다 크게 나타났는데, 이는 2-LV의 전기삼투 적용기간이 1-LV 보다 2일 더 많았기 때문이다.

4.5.2 전류가동시간

전기삼투에 의한 개량효과에 영향을 주는 변수의 하나인 전류의 가동시간을 변화시켜 2-LV, 3-LV, 4-LV 시험을 실시하였다. 이 시험들은 30A/m²의 동일한 전류밀도 조건하에서 전류의 가동시간을 2-LV에서는 10/2(on/off time, minute), 3-LV에서는 2/2, 4-LV에서는 4/2로 변화시켜 시험을 실시하였다. 이 시험들에서의 시간에 따른 총배수유량 곡선은 그림 4(a)와 같으며, 총배수유량에서 2-CT의 배수유량을 뺀 순수한 전기삼투에 의한 배수유량(2-E/O, 3-E/O, 4-E/O)을 전기삼투 적용시간에 대하여 도시한 곡선은 그림 4(b)와 같다. 또한 전류가동시간(on time)에 대한 체적감소

비($\frac{\Delta V}{V_0}$, %), 함수비감소비($\frac{\Delta W}{W_0}$, %), 전단강

도증가비($\frac{C_{cut}}{C_{u0}}$)는 그림 4(c)와 같다. 그림 4(b)

의 2-E/O, 3-E/O, 4-E/O 곡선으로부터 순수한 전기삼투에 의한 단위시간당 배수유량(q_e)은 거의 같은 값을 보이고 있으며, 그림 4(c)로부터 전류가동시간이 증가할수록 전기삼투에 의한 배수유량이 많아 체적감소비, 함수비감소비, 강도증가비가 커지는 경향을 보임을 알 수 있다. 단, 4-LV의 강도증가비가 3-LV의 강도증가비 보다 작은 이유는 4-LV 시료의 초기 전단강도가 3-LV 시료 보다 1.6배 컸기 때문이었다.

4.5.3 전류밀도

전류밀도를 달리했을때의 전기삼투 효과에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 4-LV(30A/m²)와 5-LV(15A/m²) 시험을 실시하였다. 이 두 시험의 전류가동시간은 4/2(on/off)로 동일하게 적용하였으며, 지반의 초기 조건과 재하조건은 2-CT, 2-LV, 3-LV 시험과 동일하게 적용되었다. 2-CT, 4-LV, 5-LV 시험에 의한 시간에 따른 총배수유량 곡선은 그림 5(a)와 같으며, 순수한 전기삼투에 의한 배수

유량 곡선은 그림 5(b)와 같고, 각 시험 종료후의 개량효과(체적감소비, 함수비감소비, 강도증가비)는 그림 5(c)와 같다. 4-LV, 5-LV 모두 2-CT 보다 압밀 촉진 및 강도증가 효과가 큰 것으로 나타났는데, 4-LV가 5-LV 보다 그 효과가 큰 것으로 나타났다. 이는 전류밀도가 클수록 지반내 물의 흐름 포텐셜(streaming potential)이 커져 전기삼투에 의해 배출되는 물의 양이 많아지기 때문이다(Mitchell, 1993). 즉, 전기삼투에 의한 배수유량(q_e)과 전류의 크기(I) 사이에는 식 (1)과 같은 관계가 성립하는데, 동일한 면적(A)에서의 전류밀도(j)는 전류의 크기와 비례하므로 q_e 는 k_e 와 σ 가 시험기간동안 일정하면 I값에 비례하게 되어, q_{e4} (4-E/O의 q_e)가 q_{e5} (5-E/O의 q_e) 보다 2배가 커진다. 그러나 실제 시험결과는 $q_{e4} = 1.7q_{e5}$ 로 나타났는데, 이는 전류의 크기(I)가 클수록 시료내 간극비의 감소, 간극수의 전기화학적인 반응의 활성화, 전극재의 마모 등에 의한 k_e 값의 감소경향이 더 크기 때문으로 판단된다.

4.5.4 단위체적당 전력소모량

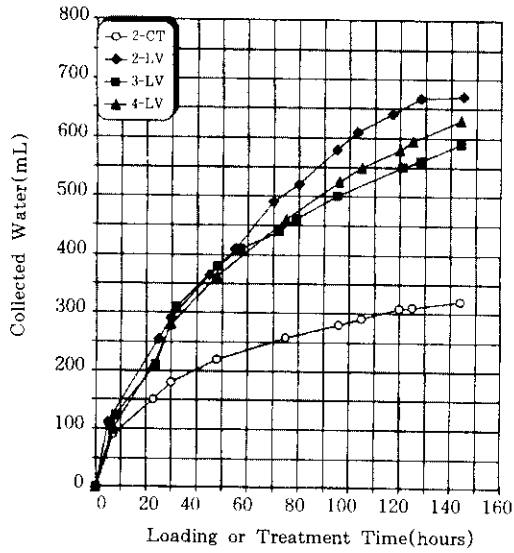
전기삼투공법을 현장에 적용하는데 있어서 가장 중요한 설계변수는 단위체적당 전력소모량으로, 경제적인 지반개량을 위해서 신중히 결정되어야 하는 값이다. 전기삼투시험에서의 단위체적당 전력소모량은 식 (2)를 이용하여 구할 수 있는데, 이 식을 이용하여 앞의 전기삼투시험에 대한 단위체적당 전력소모량을 구하면 표 7과 같다.

$$P = \frac{j \cdot E \cdot t}{1000} \quad (\text{kwh/m}^3) \quad (2)$$

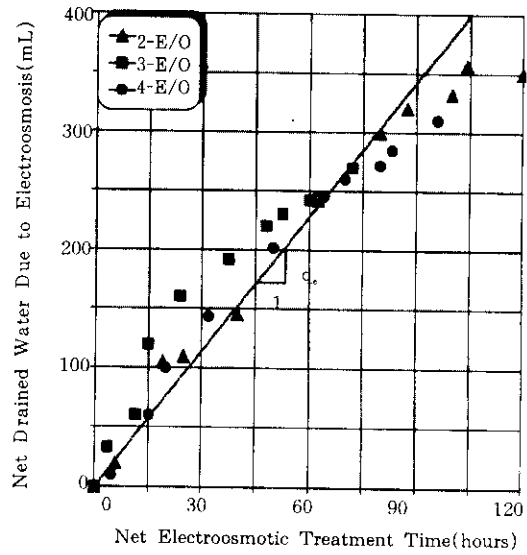
여기서, t : 전류가동시간의 총합 (hour)

표 7. 전기삼투시험의 단위체적당 전력소모량

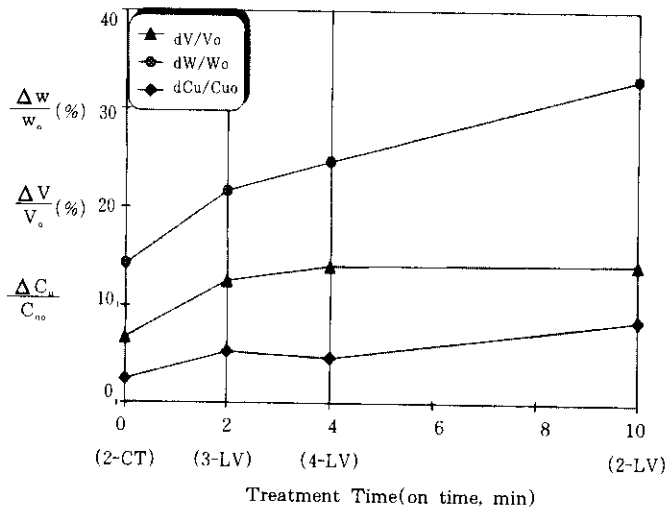
	1-LV	2-LV	3-LV	4-LV
j(A/m ²)	30	30	30	30
E(V/m)	23.077			
t(hour)	80	120	72	96
P(kwh/m ³)	55.385	83.077	49.846	66.462



(a) 시간에 따른 총배수유량

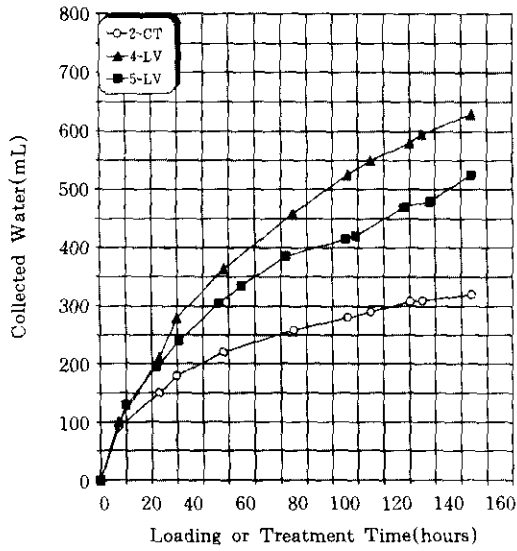


(b) 순수한 전기삼투에 의한 배수유량

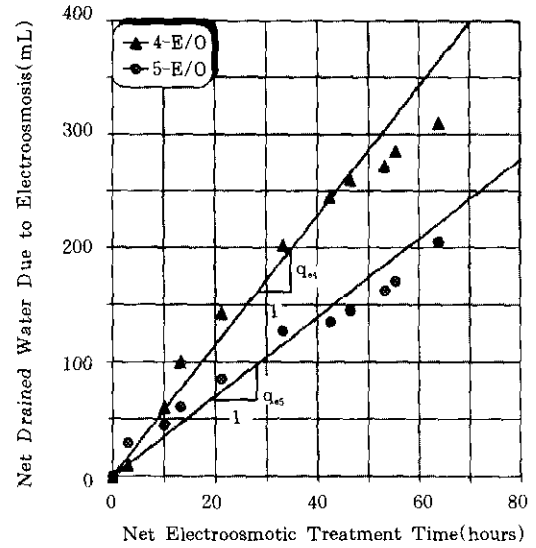


(c) 전류가동시간에 대한 지반개량효과

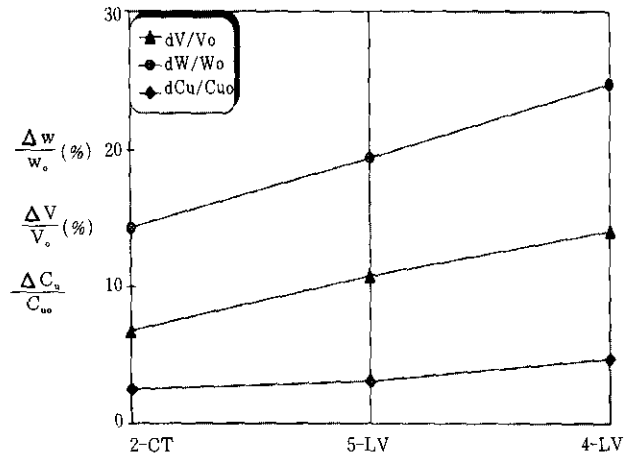
그림 4. 2-CT, 2-LV, 3-LV, 4-LV시험 결과



(a) 시간에 따른 총배수유량



(b) 순수한 전기삼투에 의한 배수유량



(c) 전류밀도 변화에 대한 지반개량효과

그림 5. 2-CT, 4-LV, 5-LV 시험 결과

본 시험으로부터 얻은 개량효과를 단위체적당 전력소모량에 대하여 도시하면 그림 6, 7, 8과 같은 경향을 얻을 수 있다. 여기에서, (순수한 하중재하 + 전기삼투)의 복합흐름(coupled flow)으로 인한 총 개량효과는 그림 6(a), 7(a), 8(a)와 같은데, 이 중에서 순수한 전기삼투에 의한 개량효과는 식 (3.a), (3.b), (3.c)를 이용하여 그림 6(b), 7(b), 8(b)와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 식 (3)에서 첨자 E/O는 순수한 전기삼투에 의한 개량효과를 표시한 것이고, 첨자 LV는 복합흐름에 의한 개량효과를, 첨자 CT는 순수한 하중재하에 의한 개량효과를 나타낸 것이다.

$$\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)_{E/O} = \left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)_{LV} - \left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)_{CT} \quad (3.a)$$

$$\left(\frac{\Delta W}{W_0}\right)_{E/O} = \left(\frac{\Delta W}{W_0}\right)_{LV} - \left(\frac{\Delta W}{W_0}\right)_{CT} \quad (3.b)$$

$$\left(\frac{\Delta c_u}{c_{u0}}\right)_{E/O} = \frac{(c_{uf})_{LV} - \{(c_{u0})_{LV} + \beta \Delta P\}}{(c_{u0})_{LV}} \quad (3.c)$$

여기서, $\beta = \frac{\Delta c_u}{\Delta P}$ $U = \frac{(c_{uf})_{CT} - (c_{u0})_{CT}}{\Delta P}$

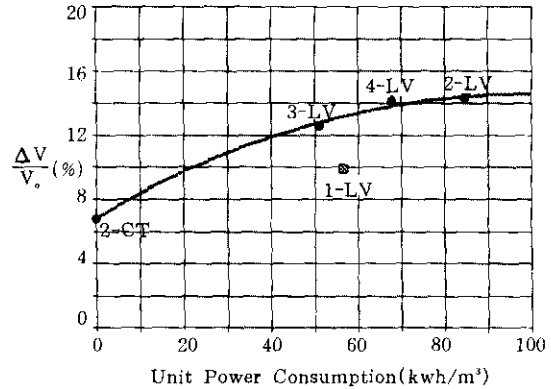
$\beta = 0.252$ (for 1-CT),

$\beta = 0.232$ (for 2-CT)

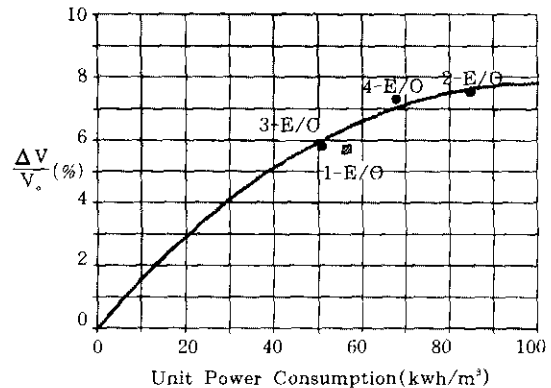
그림 6의 체적감소비 곡선은 포물선 형태를 나타내어 일정한 전력소모량 이상에서는 체적감소비가 더 이상 증가하지 않은 반면, 함수비 감소비 곡선(그림 7)과 강도증가비 곡선(그림 8)은 일정한 전력소모량 부근에서 급격히 증가하는 경향을 보였다. 이는 단위체적당 전력소모량이 일정량 이상되면 전기삼투에 의한 배수량은 더 이상 증가하지 않지만 간극수의 전기화학적 반응이 활성화되어 지반내 함수비는 계속 감소하고 전단강도도 급격히 증가하기 때문이다. 이때 간극수의 전기화학적 반응이 활성화되는 시점은 지반의 간극비, 초기 전단강도, 전기전도도와 전기삼투 투수계수 등에 영향을 받게 되는데, 본 시험에 사용된 시료에서는 단위체적당 전력소모량이 80kwh/m³ 부

근에서 간극수의 전기화학적 반응이 활성화되어 체적감소비가 급격히 감소하면서 함수비 감소비와 강도증가비가 급격히 증가하였다.

본 시험 결과중에서 1-LV는 다른 전기삼투 시험에 비하여 체적감소비는 비슷한 경향을 보였으나, 함수비감소비와 강도증가비가 상당히 낮게 나타났는데, 이는 1-LV 시료의 전기삼투 개시시점에서의 전단강도(4kPa 이상으로 추정)가 다른 전기삼투시험 시료들의 초기 전단강도(1~1.8kPa) 보다 훨씬 컸기 때문으로 판단된다.

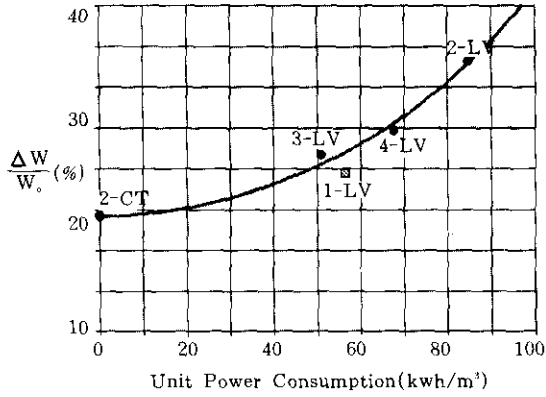


(a) 총 체적감소비

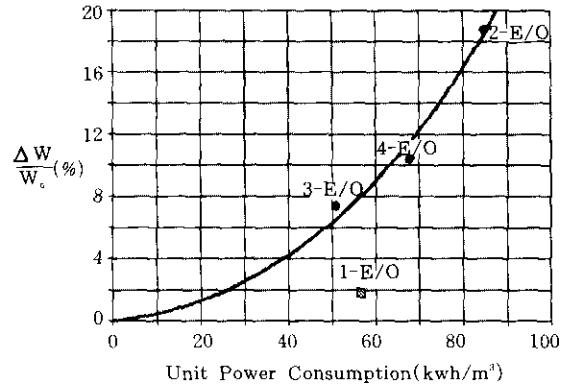


(b) 전기삼투에 의한 체적감소비

그림 6. 단위체적당 전력소모량에 대한 체적감소비

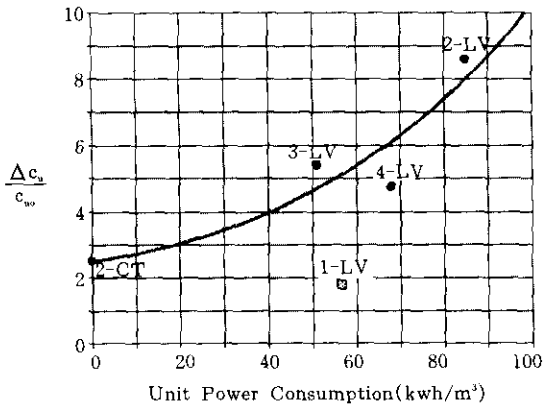


(a) 총 합수비감소비

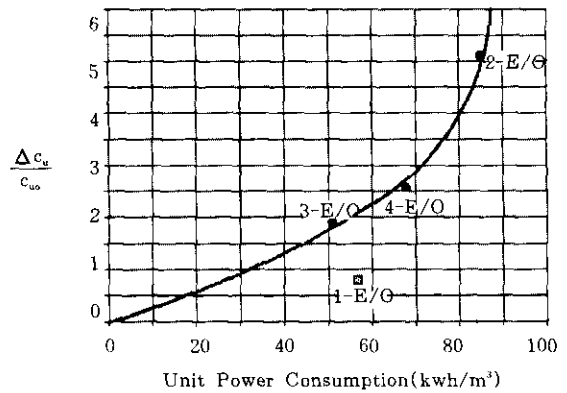


(b) 전기삼투에 의한 체적감소비

그림 7. 단위체적당 전력소모량에 대한 합수비감소비



(a) 총 강도증가비



(b) 전기삼투에 의한 강도증가비

그림 8. 단위체적당 전력소모량에 대한 강도증가비

5. 결 론

- 1) 본 시험에 사용된 율촌 시료에 대해서는 고전압 전기영동시험에 의한 지반개량 효과는 거의 없는 것으로 나타났으며, 저전압 전기삼투시험에 의한 지반개량 효과는 순수 재하 시험시 보다 훨씬 큰 것으로 나타났다.
- 2) 전기삼투시험시 선행재하 실시여부는 지반개량 효과에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타난 반면, 전류가동시간이 많을수록, 전류밀도가 클수록 지반개량 효과는 크게 나타났다.
- 3) 전기삼투시험에서 단위체적당 전력소모량이 클수록 시료의 체적감소비는 포물선 형태로 증가하여 일정 전력소모량 이상에서는 전기삼투에 의한 간극수의 배출이 거의 없었다. 반면에 함수비감소비와 전단강도증가비는 일정 전력소모량 이후부터 급격히 증가하는 경향을 보였는데, 이는 일정 전력소모량 이후에는 시료의 간극비가 감소하고 전기전도도가 증가하여 단위배수유량은 점점 감소하게 되는 반면, 간극수의 전기화학적인 반응이 활성화되어 지반내 함수비가 배수유량과 관계없이 감소하고, 시료의 강도가 급격히 증가하기 때문으로 판단된다.
- 4) 시료의 초기 전단강도가 클수록 함수비 감소비와 강도증가비가 작게 나왔는데, 이는 지반이 연약하고 고함수비일수록 전기삼투에 의한 개량효과가 상대적으로 큼을 의미한다.

참 고 문 헌

1. 김수삼, 한상재, 김경현, 김운형(1997a), "전기삼투배수에서 간극수의 염분농도가 미치는 영향", 대한토목학회 학술발표회집, 대한토목학회, pp.301~304
2. 김수삼, 한상재, 김현기, 방준호(1997b), "전기삼투배수에서의 전기·화학적 변화에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회집, 대한토목학회, pp.345~348
3. Hunter, R.J.(1981), *Zeta Potential in Colloid Science*, Academic Press, New York, N.Y.
4. Lo, K.Y., Inculet, I.I. and Ho, K.S.(1991a), "Electro-osmotic strengthening of soft sensitive clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.28, pp.62~73
5. Lo, K.Y., Ho, K.S. and Inculet, I.I.(1991b), "Field test of electro-osmotic strengthening of soft sensitive clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.28, pp.74~83
6. Lockhart, N.C.(1983), Electro-osmotic dewatering of clays, *Colloids Surfaces*, Vol.6, pp.239~269
7. Mitchell, J.K.(1991), "Conduction phenomena : from theory to geotechnical practice", *Geotechnique*, Vol.41, pp.299~340
8. Mitchell, J.K.(1993), *Fundamentals of Soil Behaviour*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, N.Y.
9. Pohl, H.A.(1978), *Dielectrophoresis*, Cambridge, Cambridge University Press, New York, N.Y.
10. Shang, J.Q., Inculet, I.I. and Lo, K.Y.(1994), "Low-frequency dielectrophoresis in clay-water-electrolyte systems", *Journal of Electrostatics*, Vol.33, pp.229~244
11. Shang, J.Q., Lo, K.Y. and Inculet, I.I.(1995), "Polarization and conduction of clay-water-electrolyte systems", *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No. 3, pp.243~248
12. Sprute, R.H. and Kelsh, R.H.(1980), "Dewatering fine-practice suspensions with direct current", *Proceedings of the International Symposium on Fine Practice Process*, Las Vegas, Nevada, Vol.2, pp.1828~1844
13. Sunderland, J.G.(1987), "Electrokinetic dewatering and thickening", *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol.17, pp.889~1056 (접수일자 1998. 3. 16)