

복합동전기토목섬유를 이용한 연약지반개량

Soft Ground Improvement using Electrokinetic Geosynthetics

이 명 호^{1*} Lee, Myung-Ho
한 중 근² Han, Jung-Geun
이 재 영³ Lee, Jai-Young

ABSTRACT

The major reason to employ electrokinetic geosynthetics is to take advantage of its ability to densify very low permeability materials in shorter time periods than ordinary seepage consolidation. A number of laboratory scale experiments was carried out with acrylic column using natural clayey soil. The testing results indicate that (1) the electrically induced settlement was faster than the gravitational one, (2) the higher the voltage, the faster the dewatering but the less final settlement, and (3) the pH extended as low as 3 in the anode section and as high as 11 near the cathode.

요 지

동전기토목섬유를 이용한 초연약지반의 개량은 일반적인 압밀공법에 비해 신속하게 저투수성 점토지반을 탈수시키며 강도증가를 유발하게 된다. 본 연구는 동전기토목섬유의 적용성을 조사하고자 스코틀랜드지방의 자연점토를 이용하여 일련의 실내실험을 수행하였다. 조사결과, 자중에 의한 압밀에 비해 전기삼투압에 의한 압밀이 빠르게 진행됨을 알 수 있었으며, 공급전압이 높을수록 신속하게 간극수의 탈수가 이루어졌으나 최종침하량은 적었으며, 동전기적 효과로 양극부근에서 산성화(pH≈3)가 음극부근에서는 알칼리화(pH≈11)가 일어났다.

Keywords : Electrokinetic geotextile, Soft ground, Dewatering, Electroosmosis, Consolidation

1. 서 론

최근 준설매립에 의한 연약지반의 확대와 함께 이들 지반의 개량을 효과적으로 수행하기 위한 여러 공법의 개발이 진행되어왔다. 이들 개량공법 중 삼투현상을 이용한 전기삼투(electroosmosis)공법은 1809년 Reuss에 의해 처음 발견된 이래 연약지반의 탈수 및 지반의 안정화 처리를 위해 적용되어왔다(Bjerrum *et al.*, 1967, Fetzer, 1967). 또한 지반의 안정화를 증진시키기 위한 화학물질의 첨가 등은 지반의 고형화를 유도하였으며(Gray, 1970), 최근에는 오염지반으로부터 유기 및 무기오염물질의 추출을 위해 적용되고 있다(Lageman *et al.*, 1989). 연약지반개량 시, 전

기삼투공법을 채용하는 가장 큰 이유는 일반적인 압밀에 비해 신속하게 저투수성 점토지반을 압밀시키며 강도증가를 유발하기 때문이다. 전기삼투는 점토 및 실트지반의 탈수에 효과가 있으며 사질토 지반의 경우 탈수효과가 다소 감소하게 된다(Yeung, 1994).

지반 내에서 전기적, 화학적, 수리학적 중첩(coupling) 효과로 다양한 동전기현상이 일어나는데 이들 현상을 전기삼투, 전기영동, 흐름포텐셜, 침전포텐셜이라 한다(Mitchell, 1993). 동전기적 중첩효과는 투수성이 낮은 점성토지반에서 효과가 크게 나타나며, 불포화토의 경우 적합하지 않다고 알려져 있다(Olsen, 1969). 전기삼투 및 전기영동은 직류전류(DC)에 의한 유체 및 입자의 이동을 말하며, 흐름포

1* 정회원, 한양대학교 대학원 토목환경공학과 연구교수 (Member, BK Research Associate, Dept. of Civil & Env. Engineering, Hanyang University, E-mail: mhleecok@hanyang.ac.kr)

2 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil & Env. Engineering, Chung-Ang University)

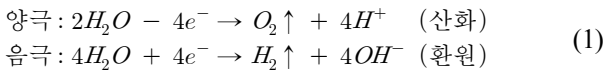
3 정회원, 서울시립대학교 환경공학부 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Environmental Eng., University of Seoul)

텐셜 및 침전포텐셜은 유체 및 입자의 이동에 의한 직류전류의 생성을 말한다.

- ① 전기삼투(electroosmosis): 직류전류에 의한 간극수의 흐름.
- ② 전기영동(electrophoresis): 직류전류에 의한 입자의 이동.
- ③ 흐름포텐셜(streaming potential): 유체의 흐름에 의한 직류전류의 생성.
- ④ 침전포텐셜(sedimentation potential): 입자의 이동에 의한 직류전류의 생성.

동전기적으로 처리된 포화토의 경우, 전기삼투의 효과로 간극수는 양극에서 음극방향으로 이동하게 된다. 삼투효과에 의한 간극수의 이동원리는 표면에 음전하를 띠는 흙 입자들 사이(간극)에 존재하는 유전율(dielectric constant)이 높은 물 분자들이 전기적으로 반발되기 때문이다. 또한, 간극수에 이전부터 존재하는 양이온(cation)과 동전기적 처리에 의해 새로 생성된 양이온들이 전기적 이동(electromigration) 현상으로 음극방향으로 이동하면서 주변의 물 분자를 끌고 가기 때문이다.

동전기처리 중 발생하는 화학반응을 단순화하면, 식 (1)에 나타낸바와 같이 음극에서는 수산화이온(OH⁻)이 형성되어 pH가 증가하고 수소 가스(H₂)가 발생하며, 양극에서는 수소이온(H⁺)이 형성되어 pH는 감소하고 산소 가스(O₂)가 발생한다.



따라서 동전기처리에 의한 전기·화학적 작용으로 인하여 일반적인 압밀거동에 비해 지반의 특성(액성한계, 소성한계, CEC 등)에 변화가 생기게 된다(Mitchell, 1991).

압축성 지반에서 양극(+)으로부터 물의 공급이 없다면 전극 사이의 지반에서는 전기삼투에 의해 음극(-)에서 배수된 물의 부피만큼 압밀이 진행된다. 전기삼투에 의한 두 전극사이의 간극수 흐름을 일차원으로 나타내면 다음과 같다.

$$q = - \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial u_e}{\partial x} - k_e \frac{\partial V}{\partial x} \quad (2)$$

여기서, q : 전기삼투에 의한 흐름, γ_w : 물의 단위중량, k_e : 전기삼투에 의한 투수계수, k_h : 투수계수, u_e : 과잉간극수압, V : 전압이다.

전기삼투에 의한 1차원압밀현상을 설명하는 지배방정식(Esrig, 1968)은 다음과 같다.

$$\frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial x^2} + k_e \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = m_v \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (3)$$

그리고

$$\frac{\partial^2 u_e}{\partial x^2} + \frac{k_e}{k_h} \gamma_w \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{1}{C_v} \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (4)$$

여기서, m_v : 체적압축계수, C_v : 압밀계수이다.

양극(+)에서 물의 유입이 없고, 음극(-)에서 전기삼투에 의해 간극수가 유출되는 조건의 경우, 양극(+)에서는 부압(negative pressure)이 최대가 되며 음극(-)방향을 향해 선형적으로 감소하여 음극(-)에서 0이 된다. 결국 이론적으로는 전기삼투에 의해 양극(+)에서 발생된 최대부압의 크기에 따라 최종압밀량이 결정됨을 알 수 있다. 양극에서 발생된 부압은 다음의 식 (5)로 표현된다.

$$u_e = - \frac{k_e}{k_h} \gamma_w V \quad (5)$$

따라서 주어진 공급전압에 대한 유효응력의 증가(전기삼투에 의한 압밀량)는 k_e/k_h 에 의존적으로 결정된다.

그림 1은 준설토를 이용하여 조성(매립)한 초연약지반의 안정화를 위해 동전기토목섬유(EKG, electrokinetic geosynthetics)를 적용한 예를 보여준다. 그림 우측에는 모래주머니를 이용하여 건조한 벽체를 나타내는데, 모래주머니를 쌓아올리면서 준설토를 약 400mm 높이로 뒷채움하고 동전기토목섬유를 수평방향으로 설치하여 직류전류를 공급함으로써 탈수 및 강도증진을 유발시킨다. 탈수가 진행됨에 따라 단계별로 벽체를 쌓아서 새로운 준설토를 채우고, 전 단계에서 음극(-)으로 사용된 동전기토목섬유를 양극(+)으로, 표면에 새로 설치하는 동전기토목섬유를 음극(-)으로 하여 연속적으로 탈수 및 강도증진을 유도하게 된다. 전기삼투압에 의한 탈수가 완료된 뒤, 매립되어

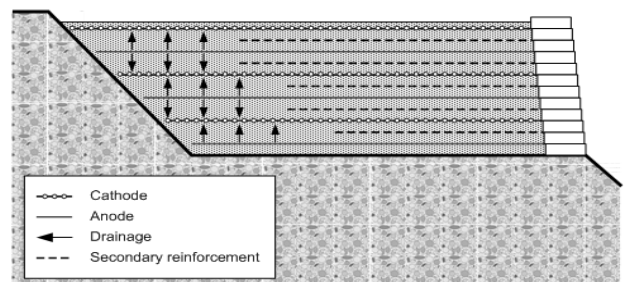


그림 1. 준설토로 조성된 연약지반의 안정화와 강도증진을 목적으로 설치된 동전기토목섬유 및 연직구조물

있는 동전기토목섬유는 사면보강재로서의 역할을 하게 된다. 본 연구에서는 이러한 원리를 이용한 동전기토목섬유가 연약지반의 안정화에 미치는 영향을 조사하고자 하였다.

2. 실험방법 및 절차

점토슬러리 등의 준설토를 매립하는 경우를 고려한 칼럼테스트를 실시하였으며, 전기삼투효과를 조사하고자 전압구배, 시료의 높이, 함수비, 전극배열 등을 변화시키면서 일련의 실험을 수행하였다.

2.1 실험기

본 실험에서 사용된 전기삼투 셀은 그림 2에 나타낸바와 같이 (i) 칼럼, (ii) 상/하단 캡, (iii) 전극 내장 동전기토목섬유, (iv) 전류 및 전압 측정용 멀티미터, (v) 시료 내 전압구배 측정용 핀, (vi) 직류전원 등으로 구성되어 있다.

스테인리스 및 구리선이 내장되어 있는 5mm 두께의 토목섬유를 이용하여 전압고정 조건으로 직류전류를 공급하였으며, 칼럼의 측면에서 2mm 직경의 구리핀을 이용하여 처리중인 시료의 전압구배를 측정하였다.

2.2 실험방법

스코틀랜드에서 채취한 해성점토(Bothkenner clay)를 사용하여 일련의 실내실험을 수행하였다. Bothkenner 점

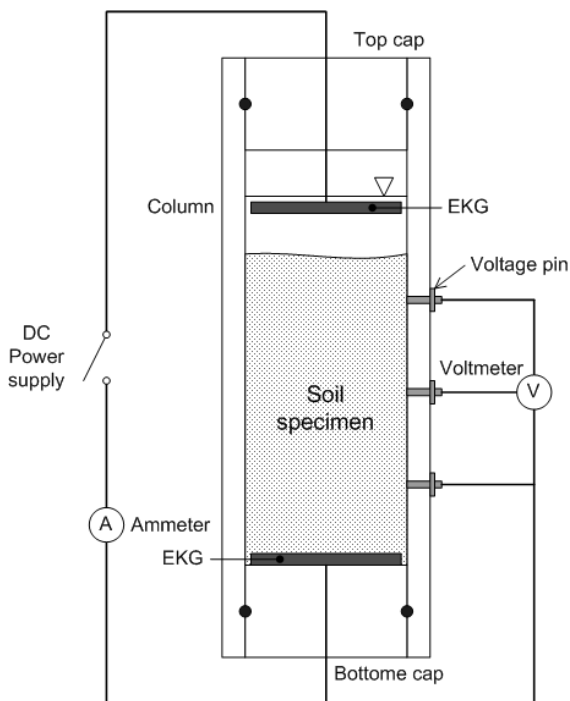


그림 2. 전기삼투 셀(electroosmosis cell)

토의 특징을 요약하면 다음과 같다(Hight *et al.*, 1992):

- ① 점토를 구성하는 주요 광물은 일라이트이다,
- ② 점토의 구성성분은 깊이에 따라 비교적 균질하며 면모 구조를 갖는다,
- ③ 점토의 표면에 유기질성분이 붙어있으며 간극수의 pH는 약 7 정도이다.

Bothkenner 점토를 해수와 혼합하여 실험에 필요한 초기함수비(100~400%)를 만들고, 동전기토목섬유의 적용을 위해 개발된 전기삼투 셀(i.d. 40cm, length 80~120cm)에 다양한 전압구배(0.5~2.5V/cm)로 직류(DC)전류를 공급하였다. 칼럼의 하부와 상부에 각각 음극(-)과 양극(+)으로 전극배열을 함으로서 중력에 의한 점토입자의 이동방향과 같은 방향으로 탈수(배수)되는 조건(ekg_c1, ekg_c2, ekg_c3, ekg_s4, ekg_s5)과 칼럼의 하부에 양극(+), 상부에 음극(-)으로 전극을 배치하여 자중(self-weight)압밀이 일어나면서 배수되는 조건(ekg_s1, ekg_s2, ekg_s3)으로 구분하여 실험을 수행하였다. 실험이 진행되는 동안 (i) 시료의 표면침하량, 시료 내의 (ii) 전위차 및 (iii) 전류를 측정하였으며 실험 종료 후 (iv) 시료의 pH를 측정하였다. 실험 조건은 표 1에 요약된바와 같다.

3. 결과 및 분석

3.1 압밀침하량

그림 3은 시간에 따른 표면침하량곡선을 나타낸다. gc1은 중력에 의한 자연 발생 침하곡선을 보여주며 ekg_c1, ekg_c2, ekg_c3는 양극(+)이 시료의 상부에 위치하여 각각 0.5, 1, 1.5V/cm의 전압구배가 적용된 경우이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 자중으로 진행되는 시료의 압밀거동에 비해 동전기토목섬유로 처리된 시료의 경우 전기삼투의 효과로 급격한 체적감소가 일어남을 알 수 있다. 공급전압구배가 클수록 시료의 압밀속도는 빠르며, 최종침하량은 전압구배가 작을수록 크게 나타났는데, 시료의 하단부에서 전기분해에 의해 발생된 가스의 영향(시료 내부로 침입)으로 최종침하량에 영향을 주었음을 동전기처리 후 시료 해체시 확인할 수 있었다; 이때 시료 내 가스발생으로 인한 기포 및 공동(cavity)이 형성되었다.

그림 4는 전극배열이 자중압밀과 같은 방향인 (-)top 배열로 수행된 결과를 보여준다. gc2는 중력에 의한 자연 발생 침하곡선이며 ekg_s1, ekg_s2, ekg_s3는 음극(-)이 시료의 표면에 위치하여 각각 0.5, 1, 1.5V/cm의 전압구배를

공급한 경우이다. 동전기토목섬유로 처리된 시료의 경우 최종침하량은 공급전압구배의 크기에 관계없이 거의 유사하게 나타났으며, 앞서 언급된 실험결과(ekg_c1, ekg_c2,

ekg_c3)에 비해 공급전압구배가 클수록 시료의 침하속도가 빨라짐을 확연히 구분할 수 있다.

그림 5는 ekg_s1, ekg_s2, ekg_s3와 유사한 조건에서

표 1. 실험조건

Test No.	Applied voltage (V)	Electrode array	Initial density (g/cm ³)	Initial height (cm)	Final height (cm)	Duration (hrs)
gc1	—	—	1,32	120	76	37
ekg_c1	60	(+) top	1,32	120	46	10
ekg_c2	120	(+) top	1,32	120	51	5
ekg_c3	180	(+) top	1,32	120	54	3
gc2	—	—	1,16	80	53	11
ekg_s1	40	(-) top	1,16	80	24	11
ekg_s2	80	(-) top	1,16	80	24	5
ekg_s3	120	(-) top	1,16	80	26	2
ekg_s4	160	(+) top	1,16	80	39	5
ekg_s5	200	(+) top	1,16	80	36	2

gc: gravitational compaction, ekg_c: electrokinetic geosynthetics with copper electrode, ekg_s: electrokinetic geosynthetics with stainless steel electrode.

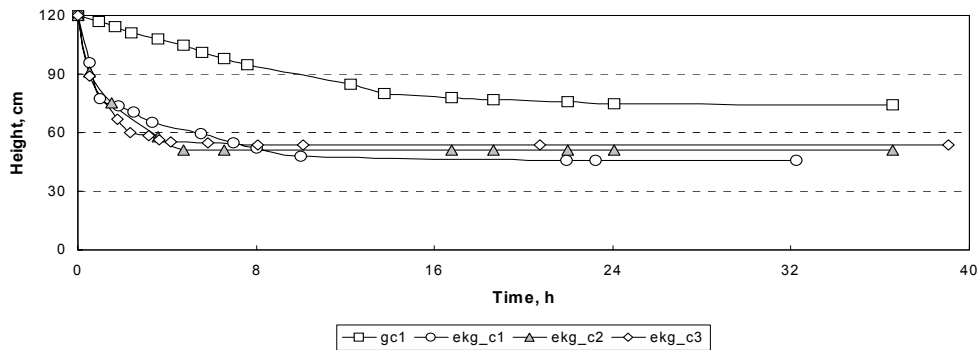


그림 3. 표면침하량 vs 시간: gc1-0V; ekg_c1-60V,(+)top; ekg_c2-120V,(+)top; ekg_c3-180V,(+)top.

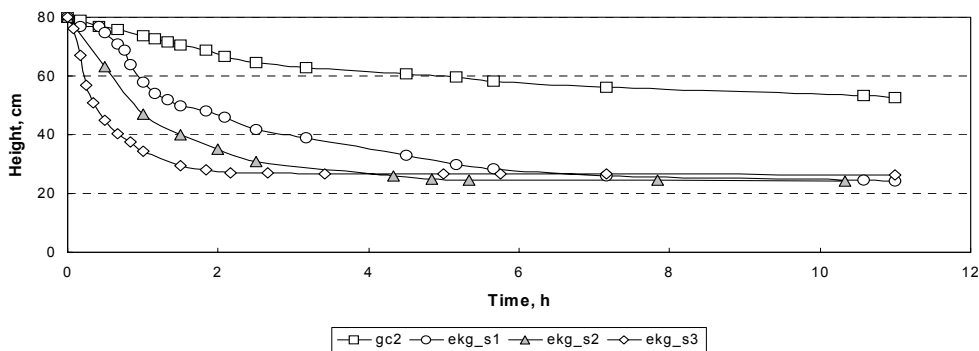


그림 4. 표면침하량 vs 시간: gc2-0V; ekg_s1-40V,(-)top; ekg_s2-80V,(-)top; ekg_s3-120V,(-)top.

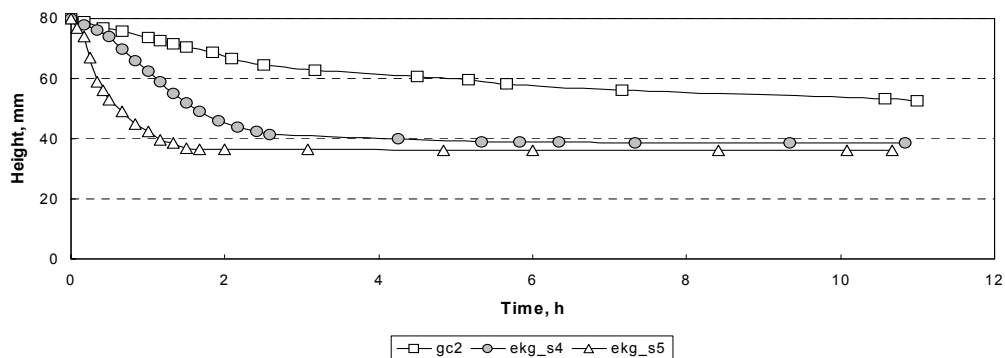


그림 5. 표면침하량 vs 시간: gc2-0V; ekg_s4-160V,(+)top; ekg_s5-200V,(+)top.

전극을 (+)top 배열로 수행한 결과를 나타낸다. ekg_s1~3에서보다 큰 전압구배(ekg_s4: 2V/cm, ekg_s5: 2.5V/cm)를 공급하였으나 가스의 발생 및 cavity 형성으로 최종침하량은 50% 내외에 그쳤다.

3.2 전류 및 전위차

그림 6과 7은 시료 내에서 측정된 전위차의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 동전기토목섬유로 처리된 시료는 삼투압에 의해 신속하게 간극수를 배출시켜 압밀되며 시료의 전기전도도(electrical conductivity)는 감소하게 된다. 따라서 그림에서 볼 수 있듯이 시간이 경과함에 따라 시료 내에서 측정된 전위차가 증가하게 됨을 알 수 있다. 공급전압구배가 작을수록 시료 내에서의 각종 화학반응은 서서히 일어나며, 전압구배가 클수록 급격한 반응이 일어남을 유추할 수 있다. 그림 6의 ekg_c3와 그림 7의 ekg_s5의 경우 시료의 하단부를 통해 간극수의 배출이 이루어졌으며, 전기분해에 의해 발생된 이온의 다량 유입으로 측정된 전위차가 급격히 감소하는 현상을 보여주었다. 동전기토목섬유로 처리된 전 실험에 대해 측정된 전류는 거의 일정한 값을 유지하였다.

3.3 pH

초기 pH는 6.8 ± 0.5 로 중성에 가까웠으나, (+)top 실험(ekg_c1, ekg_c2, ekg_c3, ekg_s4, ekg_s5) 종료 후 시료의 상단과 하단에서 각각 산성화 및 알칼리화가 일어났다. 한편, (-)top 실험(ekg_s1, ekg_s2, ekg_s3)의 경우 하단부에서 pH는 3으로 감소하였고, 상단부에서는 pH가 11까지 증가하였다.

4. 결론

동전기토목섬유를 이용한 지반안정화처리에 관한 실내 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다:

- (1) 동전기토목섬유의 적용 결과, 연약지반의 경우, 자중에 의해 자연 발생된 침하(약 30%)에 비해 약 2배 이상의 침하(약 70%)가 유도되었으며 최종침하에 걸리는 시간 역시 현저히 줄일 수 있었다.
- (2) 공급전압구배의 크기를 크게 할수록 침하에 걸리는 시간을 감소시키며, 급격한 침하를 유도할 수 있으나 처리대상 지반의 특성 등을 변화시키게 됨으로 현장 적용

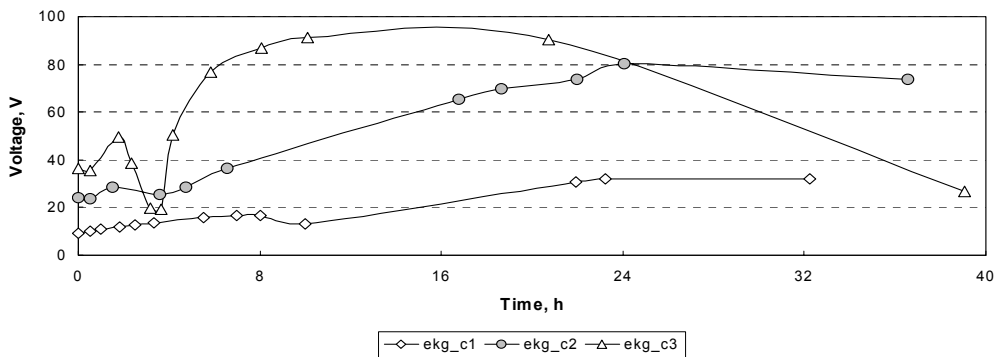


그림 6. 시료 내 전위차 vs 시간: ekg_c1-60V,(+)top; ekg_c2-120V,(+)top; ekg_c3-180V,(+)top.

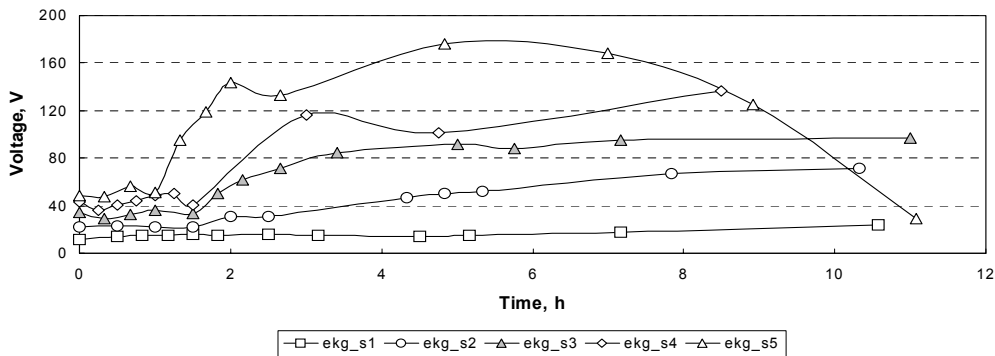


그림 7. 시료 내 전위차 vs 시간: ekg_s1-40V,(-)top; ekg_s2-80V,(-)top; ekg_s3-120V,(-)top; ekg_s4-160V,(+)top; ekg_s5-200V,(+)top.

시 공급 전압구배는 100V/m 내외로 제한하는 것이 바람직하다고 판단된다.

- (3) 수평방향으로 전극을 배열하는 경우, 탈수되는 간극수의 배수와 함께 전기분해로 발생하는 가스의 적절한 배출이 현장 적용 시 동전기토목섬유의 효과를 극대화시키기 위해 극복해야 할 가장 중요한 점이라고 사료된다.

참고문헌

1. Bjerrum, L., Moum, J., and Eide, O. (1967), "Application of electro-osmosis to a foundation problem in a norwegian quick clay", *Geotechnique*, Vol.17, pp.214-235.
2. Esrig, M. I. (1968), "Pore pressure, consolidation, and electrokinetics", *J. of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.94, SM4, pp.899-921.
3. Fetzer, C. A. (1967), "Electro-osmotic stabilization of West Branch Dam", *J. of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.93, SM4, pp.85-106.
4. Gray, D. H. (1970), "Electrochemical hardening of clay soils", *Geotechnique*, Vol.20, No.1, pp.81-93.
5. Hight, D. W., Bond, A. J., and Legge, J. D. (1992), "Characterization of the Bothkennar clay: an overview", *Geotechnique*, Vol.42, No.2, pp.303-347.
6. Lageman, R., Pool, W., and Seffinga, G. (1989), "Electro-reclamation: theory and practice", *Chemistry and Industry*, 18, September, pp.585-590.
7. Mitchell, J. K. (1991), "Conduction phenomena: from theory to geotechnical practice", *Geotechnique*, Vol.41, No.3, pp.299-340.
8. Mitchell, J. K. (1993), *Fundamentals of soil behavior*, 2nd ed., Wiley Interscience, New York.
9. Olsen, H. W. (1969), "Simultaneous fluxes of liquid and charge in saturated kaolinite", *Proceedings of the Soil Science Society of America*, Vol.33, No.3, pp.338-344.
10. Yeung, A. T. (1994), "Electrokinetic flow processes in porous media and their applications", *Advances in Porous Media*, Vol.2, Elsevier, pp.309-395.

(논문접수일 2007. 7. 23, 심사완료일 2007. 8. 14)