

나노섬유를 이용한 동전기 지반개량에 관한 특성

Characteristics on Electroosmosis Ground Improvement Using Nano-geosynthetics

안 광 국[†] · 정 구 식¹⁾ · 이 준 대²⁾

Ahn, Kwangkuk · Jeong, Kusic · Lee, JunDae

ABSTRACT : In this study, Nano-geosynthetics with electroosmosis method was used and tried to verify the possibility of usage for soft ground improvement. Electroosmosis tests were performed with increasing the voltage level and changing distance between electrodes. The electrokinetic cell was assembled and a Nano-geosynthetics was inserted into the plastic drain board. And electroosmosis was applied to the disturbed kaolin clay. In order to study the effects of ground improvement, ground settlement, water content, collected pore water and shear strength were compared and analyzed with non-applied kaolin clay. Also, the electroosmosis tests were performed with changing the distance between electrodes and the voltage size. As a results of changing the distance and voltage between electrodes, the more voltage size was increased, the more the settlement of ground, shear strength and collected pore water were increased. As the distance between electrodes were increased, the settlement of ground, shear strength, water content and collected pore water were decreased. Finally, Nano-geosynthetics as a material of electrode have the sufficient potential to improve soft ground.

Keywords : Ground improvement, Electroosmosis, Nano-geosynthetic, Electrode

요 지 : 본 연구는 지반개량공법에 사용되는 동전기 공법에서 나노섬유를 전극재로 사용하여 지반개량효과 및 나노섬유에 대한 전극재로서의 대체가능성을 확인하였다. 이를 위해 Electrokinetic cell을 제작하여 나노섬유를 PBD에 삽입 후 교반된 Kaolin clay에 전기삼투를 적용한 후 실험전후의 침하량, 함수비, 압밀배수량, 전단강도에 대한 지반개량효과를 비교 분석하였다. 또한 전기삼투실험은 전극거리와 전압경사를 변화시키면서 실험을 수행하였으며, 그 결과로 전압경사증가 및 전극거리가 감소할수록 침하량, 전단강도, 압밀배수량은 증가하였고 함수비는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 지반개량을 위한 동전기 적용시 사용되는 전극재의 소재로 나노섬유가 충분한 가능성이 있는 것으로 판단된다.

주요어 : 지반개량, 전기삼투, 나노섬유, 전극재

1. 서 론

전기삼투공법은 시공조건이 열악한 해안 및 고함수비의 세립토 지반에 많이 이용되며 이를 통해 원지반을 교란시키지 않고 지반을 개량할 수 있는 전기 화학적 방법으로 많이 연구가 진행되었으며 또한, 현장에 활용되고 있다. 전기삼투공법의 적용 효율은 토질의 종류나 간극수의 용존물질(전해질) 및 농도, 전극간의 거리, 적용전압, 전극재의 종류 등의 인자들로 인해 크게 변화한다. 지금까지 사용되던 기존의 전극재의 종류는 은, 백금, 구리, 황동, 강철 등이 사용되었으며 이 중 경제성을 고려하여 강철재료가 많이 이용되고 있다. 강철재료를 사용함에 따른 지반개량 효과는 많이 연구가 진행되었으나(김수삼 외 2인, 1999), 본 연구에서 사용된 나노섬유에 대해서는 연구된 바가 없었다. 따라서

본 연구에서는 향후 효율성이 높을 것으로 기대되는 나노섬유를 전극재로 사용하였다.

본 연구에서는 전기삼투 실험장치를 제작하였으며, 전극재의 종류로 나노섬유를 사용하여 전기삼투기술을 Kaolin clay에 적용하였다. 실험은 전극거리와 전압경사를 변화시키면서 수행하였으며 침하량, 전단강도, 함수비 그리고 압밀배수량을 측정하여 그 값을 비교 분석하였다.

2. 전기삼투(Electroosmosis) 이론

포화된 흙속에 전기장이 가해지면 계면현상으로 인해 음이온은 양극으로 이끌리게 되고 양이온은 음극으로 끌리게 되는데 이때 음전하로 대전된 흙입자와 평형을 이루기 위하여 포화된 흙속에 많은 수의 과잉 양이온이 음극으로 이동

† 정희원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 조교수(E-mail : akk@chungbuk.ac.kr)

1) 정희원, 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

2) 정희원, 세명대학교 공과대학 토목공학과 교수

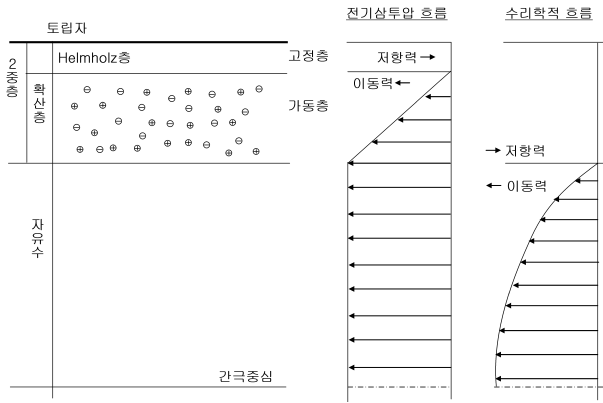


그림 1. 단일 모세관에서의 전기삼투 원리 모식도(Casagrande L, 1952)

함에 따라 양이온은 주위의 수화물과 함께 이동하게 된다. 또한 그림 1에서 나타낸 바와 같이 전기장이 가해지면 확산 이중층내의 수화된 이온은 각기 다른 극으로 이동하면서 자유수층의 간극수를 함께 이동시킴으로써 물이 흐르게 되는데 이와 같은 현상을 전기삼투라고 하며 이에 대한 연구는 Mitchell(1991), Lo(1991a, 1991b) 등에 의해 연구되었다.

3. 실험 장비 및 실험 방법

본 연구는 전극거리와 전압경사를 변화시키면서 전기삼

표 1. Kaolin clay의 기본 물성치

Physical properties	Quantity
Specific gravity, G_s	2.5
Liquid limit, LL (%)	64.2%
Plasticity index, PI (%)	22.9%
Initial Water Content (%)	101 ~ 108
Passage a rate of No. #200 (%)	100
USCS (Unified Soil Classification System)	MH or OH

표 2. 나노섬유의 성질

Dimension	Unit	Specification.	Measurement	
	Width (mm)		610 + 5,-0	
Dimension	Length (m)	Specified	5 + α	
	ITO Coated Side		Inside	
	Visual quality		Pass	
	Optical Properties			Core End of Roll
Resistive Properties	Total Transmittance (%)	≥ 75	75.0	
	Sheet Resistance ($\Omega/sq.$)	80-120	103	
	Uniformity (%)	≤ 10	6.49	
Mechanical Properties	Thermostability (R/R_0)	0.8-1.2	0.80	
	Hardness (H)	≥ 3	3	
	ITO Adhesion	100/100	100/100	

투실험을 수행하였으며, 0V인 경우 전극재인 나노섬유만 제거하고 동일방법으로 적용하여 전기삼투실험을 수행하였다. 전기삼투실험을 위한 모형셀은 상부중앙에 침하량을 측정할 수 있도록 LVDT를 설치하였으며, 양측하부에 배수장치를 두어 간극수의 배수가 가능하도록 하였다. 그리고 나노섬유를 PBD에 삽입시켜 이를 통해 간극수가 배수되도록 하였다. 실험을 통해 발생하는 배수유량은 양측하부의 배수 밸브를 통하여 유출된 물의 양을 측정하였으며, 유출된 배수유량의 증발을 막기 위해 유량측정용 비이커에 기름을 띄어 유량을 측정하였다. 또한, 침하에 영향을 주는 측면 마찰을 감소시키기 위해서 계면활성제를 사용하였다. 24시간 경과 실험종료 후 실험전후에 실내배인시험을 실시하여 시료의 전단강도 변화를 측정하였고, 양쪽 전극재 부분과 중앙지점에서 시료를 채취하여 실험전후의 함수비 변화를 측정하였다. 또한 양쪽의 삽입된 PBD의 간격을 조정하면서 전압경사 증가에 의한 침하량 및 지반개량변화를 비교하였다. 표 1은 본 실험에 사용된 Kaolin clay의 기본 물성치이다. 표 2는 나노섬유의 성질이며, 그림 2는 실험장치 개요도이다.

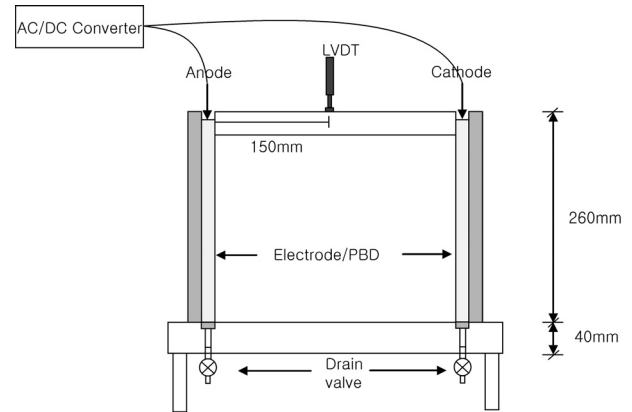


그림 2. 실험장치 개요도

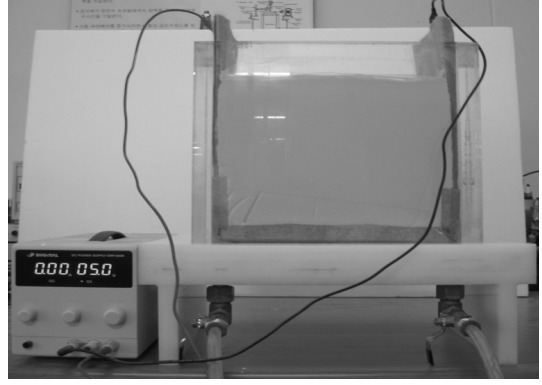
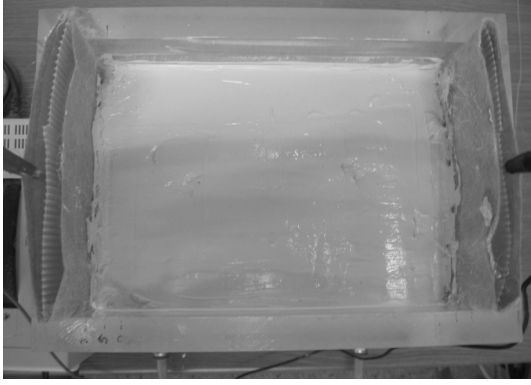


그림 3. 실험에 사용된 모델박스 사진

4. 실험 결과

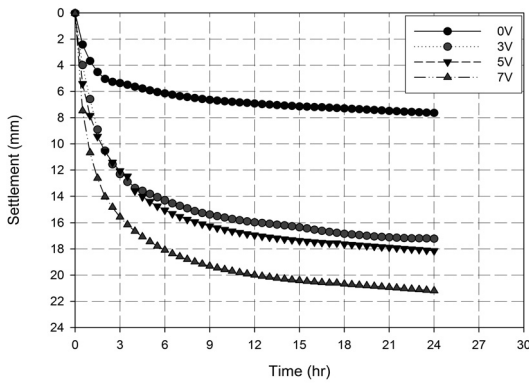
4.1 침하량 변화

그림 4는 전극거리를 250mm, 220mm, 200mm, 180mm로 변화시키면서 시간에 따른 침하량을 나타낸 것이다. 24시간 경과 후 최종침하량의 증가량과 증가율은 각각의 전압경사 0V를 기준으로 전극거리 250mm인 경우 3V일 때 0.6mm로 1.1배, 5V일 때 2.4mm로 1.3배, 7V일 때 4.2mm로 1.6배로 나타났고, 전극거리 220mm인 경우 3V일 때 4.5mm로 1.6배, 5V일 때 5.9mm로 1.8배, 7V일 때 6.5mm

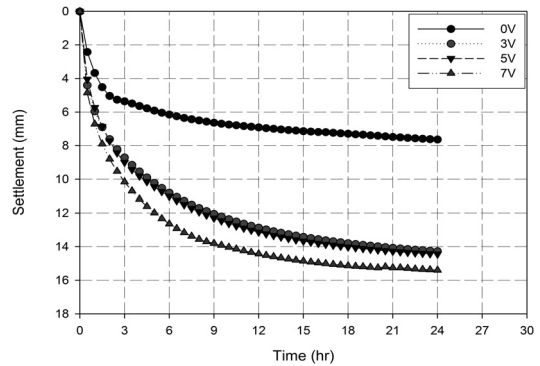
로 1.9배 증가하였고, 전극거리 200mm인 경우 3V일 때 6.6mm로 1.9배, 5V일 때 6.8mm로 1.9배, 7V일 때 7.8mm로 2배 증가하였으며, 전극거리 180mm인 경우 3V일 때 9.6mm로 2.3배, 5V일 때 10.5mm로 2.4배, 7V일 때 13.6mm로 2.9배 증가되었다. 따라서 전극간 거리가 감소되며 전압경사가 증가될수록 침하량은 증가하였다.

4.2 동일침하량 도달시간

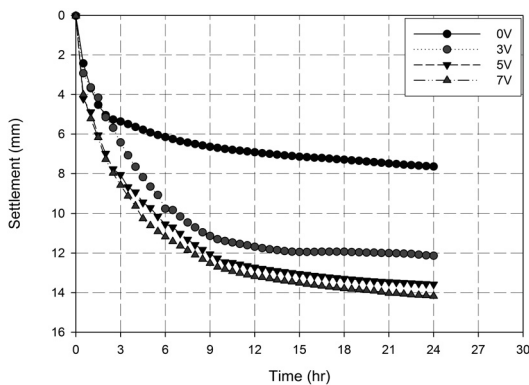
그림 5와 같이 전극거리의 변화와 전압경사의 증가에 대한 최종침하량 도달시간은 전극간 거리가 감소함에 따라



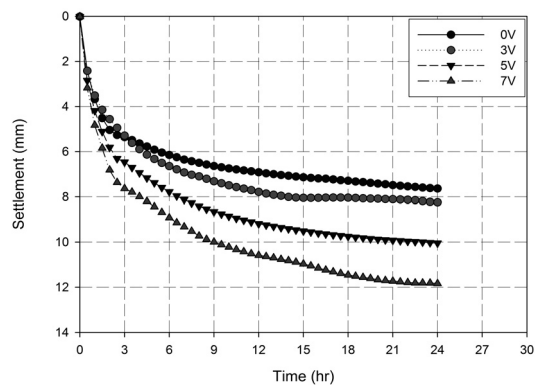
(a) 전극거리(180mm)



(b) 전극거리(200mm)



(c) 전극거리(220mm)



(d) 전극거리(250mm)

그림 4. 전극거리와 전압경사의 변화에 따른 침하량

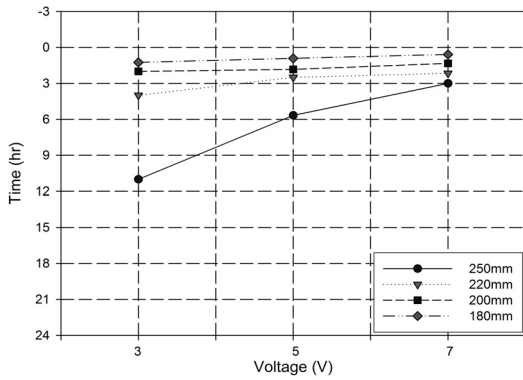


그림 5. 전극거리와 전압경사의 변화에 의한 동일침하량 도달시간

27.8~53.3%의 증가폭으로 250mm기준으로 최대 88.6%로 감소하였고, 전압경사가 증가함에 따라 13.3~94.8%의 증가폭으로 0V 기준으로 최대 97.6%로 감소하여 전극거리 감소 및 전압경사가 증가함에 따라 소요 압밀침하량에 도달하는 시간이 단축될 수 있음을 나타냈다. 또한 전극간 거리가 감소하며 전압경사가 증가할수록 도달시간이 현저히 감소하였으나, 전극거리가 180mm인 경우 저전압과 고전압에 대한 동일침하량 도달시간의 차이는 미비한 것으로 나타났다으며, 이는 전극거리가 가까워질수록 전압경사의 영향을 거의 받지 않는 것으로 판단된다.

4.3 압밀배수량 변화

그림 6은 전극거리와 전압경사의 변화에 따른 압밀배수량이다. 본 실험에서는 전극거리를 250mm, 220mm, 200mm, 180mm로 변화시키고 또한 전압크기를 증가시키면서 발생한 시간에 따른 압밀배수량을 측정하였다. 24시간 경과 후 전극거리와 전압경사의 변화에 따른 압밀배수량의 변화는 전압경사 0V를 기준으로 전극거리가 250mm인 경우, 전압경사 3V일 때 0.8%, 5V일 때 3.9%, 7V일 때 4.7%이었으며, 전극거리가 220mm인 경우 3V일 때 4.3%, 5V일 때 6.3%, 7V일 때 7.9%로 증가하였고, 전극거리 200mm인 경우 3V

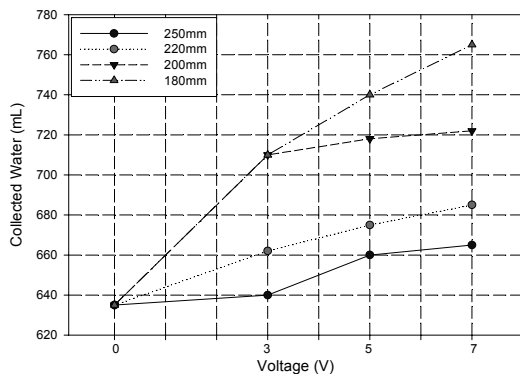


그림 6. 전극거리와 전압경사에 따른 압밀배수량

일 때 11.8%, 5V일 때 13.1%, 7V일 때 13.7% 증가하였으며, 전극거리 180mm인 경우 3V일 때 11.8%, 5V일 때 16.5%, 7V일 때 20.5%로 증가되었다. 전극재간의 거리가 감소할수록 그리고 전압경사가 증가할수록 압밀배수량이 증가하였다. 이는 전압경사의 증가는 전류밀도의 증가를 유발시키고 이로 인해 지반내 물의 흐름 포텐셜이 커져 배출량이 많아지기 때문이다.

4.4 함수비 변화

함수비 변화를 알아보기 위하여 전극간 거리를 250mm, 220mm, 200mm, 180mm로 변화시키고 전압경사를 증가시키면서 측정된 함수비의 결과는 다음 그림 7과 같다. 24시간 경과 후 양쪽 전극재 부분과 중앙지점에서 시료를 채취하여 각 지점에 대한 함수비를 측정 후 평균산출하였다. 이에 따른 함수비 감소율은 각각의 초기함수비를 기준으로 전극거리 250mm인 경우 0V일 때 9.9%, 3V일 때 10.9%, 5V일 때 12.2%, 7V일 때 15.5%로 나타났고, 전극거리 220mm인 경우 0V일 때 9.9%, 3V일 때 12.2%, 5V일 때 12.8%, 7V일 때 15.7% 증가하였고, 전극거리 200mm인 경우 0V일 때 9.9%, 3V일 때 12.1%, 5V일 때 13.0%, 7V일 때 15.9% 증가하였으며, 전극거리 180mm인 경우 0V일 때 9.9%, 3V일 때 14.3%, 5V일 때 15.0%, 7V일 때 16.5% 증가되었다. 전극간 거리가 감소되며 전압경사가 증가될수록 함수비의 감소율이 증가되었다. 실험전후의 각각의 전압에서 함수비 감소양상이 대체로 유사하였다. 따라서 전극간 거리가 가까울수록 함수비의 감소량은 커지고 이는 시료내의 이중화 산층내의 이온이 계면현상으로 인해 이동과 유출로 시료의 함수비가 감소하는 것으로 나타났다.

4.5 전단강도 변화

그림 8은 전극거리와 전압경사의 변화에 따른 실험전후의 전단강도이다. 실험은 전극간 거리 250mm, 220mm, 200mm

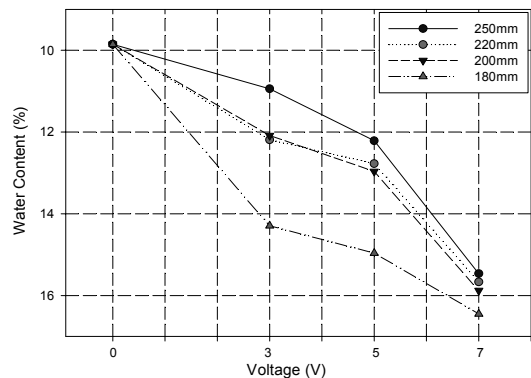


그림 7. 전극거리와 전압경사의 변화에 따른 함수비

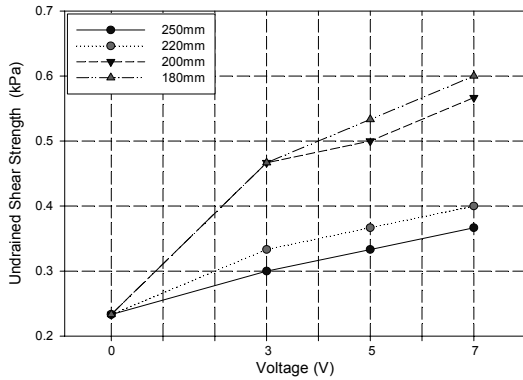


그림 8. 전극거리와 전압경사의 변화에 따른 전단강도

180mm일 때 마다 각각의 전압크기를 증가시켜 발생된 시간에 따른 전단강도변화를 나타내었다. 24시간 경과 실험 종료 후 실험전후의 전단강도측정은 양극으로부터 5, 15, 25cm 위치에 깊이 12cm 지점에서 실내 배인시험을 실시한 후 평균산출하였다. 실험전후의 초기전단강도에 대한 전단강도 증가율은 전극거리 250mm인 경우 0V일 때 1.6배, 3V일 때 1.5배, 5V일 때 1.7배, 7V일 때 1.9배로 나타났고, 전극거리 220mm인 경우 0V일 때 1.6배, 3V일 때 1.7배, 5V일 때 1.9배, 7V일 때 2배 증가하였고, 전극거리 200mm인 경우 0V일 때 1.6배, 3V일 때 2.4배, 5V일 때 2.5배, 7V일 때 2.9배 증가하였으며, 전극거리 180mm인 경우 0V일 때 1.6배, 3V일 때 2.4배, 5V일 때 2.7배, 7V일 때 3배 증가되었다. 초기 전단강도(0.2kPa)와 비교하였을 때 전극재간의 거리감소 및 전압경사가 증가함에 따라 전단강도가 증가하였다. 이는 시료내의 간극수의 유출로 인해 지반이 압밀안정화 되고 있다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 나노섬유를 이용하여 동전기 지반개량의 효과를 분석하기 위해 Kaolin clay에 대하여 전극거리와 전압경사를 변화시키면서 전기삼투실험을 실시하여 지반개량 효과를 비교 분석하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전압경사 0V에서 7V로 증가함에 따라 침하량은 최대 189.5%증가하였고, 함수비의 감소량은 최대 16.5%증가하였으며, 압밀배수량은 최대 20.5%증가하였고, 전단강도는 최대 160.9%로 전극소모량이 많을수록 지반개량효과가 크게 나타났다.
- (2) 전극거리가 감소함에 따라 침하량은 최대 86.4%증가하였고, 함수비의 감소량은 최대 16.5%증가하였으며, 압밀배수량은 최대 15.0%증가하였고, 전단강도는 최대 62.2%증가하는 것으로 나타나 나노섬유를 이용한 동전기 지반개량효과를 확인 할 수 있었다.
- (3) 본 연구에서는 전기삼투공법의 전극재료로 사용되어지는 금속성 전극재를 나노처리된 섬유로 대체하여 전극재료로서의 가능성을 확인하였다. 그러나 다양한 실험변수, 지반조건 및 현장적용성에 대하여 추후 많은 연구가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. 김수삼, 이광열, 한상재 (1999), 전해질 농도에 따른 전기삼투 압밀거동에 관한 연구, *대한토목학회논문집*, Vol. 19, No. 3, pp. 965~974.
2. Casagrande L. (1952), Electroosmotic Stabilization, *Journal of Boston Society of Civil Engineers*, Vol. 39, pp. 51~83.
3. Lo, K.Y., Incullet, I.I and Ho, K.S. (1991a), Electro-osmotic strengthening of soft sensitive clays, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 28, pp. 66~73.
4. Lo, K.Y., Ho, K.S and Incullet, I.I. (1991b), Field test of electro-osmotic strengthening of soft sensitive clays, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 28, pp. 74~83.
5. Mitchell, J.K. (1991), Conduction phenomena from theory to geotechnical practice, *Geotechnique*, Vol. 41, pp. 299~340.

(접수일: 2009. 3. 27 심사일: 2009. 4. 3 심사완료일: 2009. 5. 18)