

## 동전기 주입에 의한 점성토의 강도증가 특성

### Characteristic of Strength Increase in Clayey Soil by Electrokinetic Injection

김기년<sup>1)</sup>, Ki-Nyun Kim, 김종윤<sup>2)</sup>, Jong-Yun Kim, 한상재<sup>3)</sup>, Sang-Jae Han, 김수삼<sup>4)</sup>, Soo-Sam Kim

<sup>1)</sup> 한양대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Hanyang

<sup>2)</sup> 한양대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Hanyang

<sup>3)</sup> 한양대학교 토목환경공학과 연구교수, Research Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Hanyang

<sup>4)</sup> 한양대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Hanyang

**SYNOPSIS :** In this study a series of tests(bench scale test) are carried out for increasing in strength of clayey soil by EK-Injection method. In addition, the effects of strength increase in the treated sample are measured by operating the vane shear test device during 25 days at 5 days intervals in order to estimate the effect of ground improvement caused by diffusion. The test results show that the strength increase was developed approximately double to 7 times in comparison to initial shear strength, and outstanding strength increase was created as much as 7 times while injecting the sodium silicate and phosphoric acid in anolyte and catholyte. In addition, the measured shear strength with the influence of diffusion and reduction of water-content had a tendency to converge in constant value in proportion to elapsed time. As a result of this study, strength increment developed by the influence of EK-Injection and diffusion rather than the reduction of water-content were high as 1000% on average

**Key Words :** Clayey soils, Electro-injection, Injection material, Diffusion, Undrained strength

## 1. 서론

전통적으로 사용되고 있는 침투 그라우팅(permeation grouting) 공법의 경우, 투수계수가 큰 사질토 지반의 경우 주입이 용이한 반면, 투수계수가 약  $10^{-5}$ cm/sec 이하인 실트질 토질의 경우 침투 그라우팅을 위해 펌핑압이나 동수경사가 크게 요구되고 때론 지반할렬 파괴가 발생되므로 이러한 실트질 및 점토질 토질 또는 구조물이 지반에 존재하는 경우에 대해서는 기존의 침투 그라우팅을 실시하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 저투수성 지반의 강도를 증진시키기 위해 주입제를 지중에 침투시키는데 있어서, 동전기 침투(Electrokinetic-Injection: 이하 EK-Injection)기법을 적용하여 각종 주입제를 주입한 후 실내 배인실험을 통해 강도증진효과를 비교분석하고, 확산의 영향을 고려하기 위해 실험 종료 후 25일 동안 5일 간격으로 강도, pH, 함수비 변화를 비교분석하였다.

## 2. 동전기 침투 기법의 원리

EK-Injection 기술은 지반에 삽입된 전극을 통하여 공급되는 저(低) 전류로 인하여 발생된 전기삼투와 전기이온이동에 의해 양(+)극 또는 음(-)극에 주입된 약액과 주입제가 양(兩) 전극 구간으로 이동하여 겔화 및 간극을 충전하는 작용을 일으켜서 지반의 팽창과 교란 없이 강도를 증진시킬 수 있다. 그림 1은 EK-Injection 기법의 모식도를 나타낸 그림이다. 이 기법은 이온의 극성에 맞추어 각 전극에 여러 가지 주입제를 동시에 적용할 수 있기 때문에, 그 적용성이 매우 큰 기법이라 할 수 있다.

현재 사용되고 있는 그라우팅공법에서는 시멘트와 물유리계주입제(Sodium Silicate, 규산나트륨)가 거의 모든 공사에서 사용되고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 기존그라우팅공법에서 많이 사용되고 있는 규산나트륨 용액과, 고결효과가 있다고 알려진 물질을 선정하여 Blank 실험과 강도증진효과를 비교분석하였다.

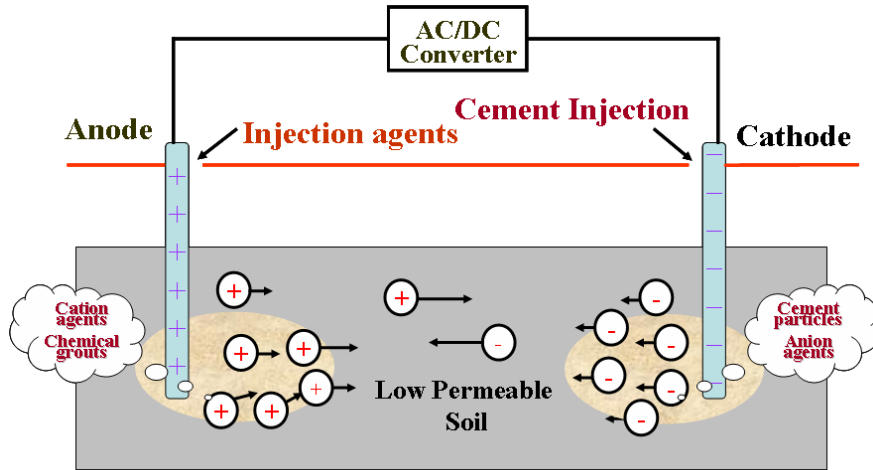


그림 1. EK-Injection 기법의 원리

## 3. 실험

### 3.1 주입제

기존문헌을 검토하여 점성토에서 고결효과가 큰 알루미늄, 철, 칼슘, 인산, 규산 등을 함유한 5가지 주입제를 선정하였다. 주입제의 종류에 따른 특성과 선정배경을 표 1에 정리하였다.

표 1. 주입제 종류에 따른 특성

주입제	특징
Aluminum Hydroxide	화학식 $Al(OH)_3$ . 알루미늄의 수산화물, 천연적으로는 기브사이트 등으로서 산출되는 외에, 산화수산화물 $AlO(OH)$ 가 다이어스포어·비마이트로 산출된다. 알루미늄이온은 지반 내에 주입되면, 고결작용을 일으킨다(Gray ; Schlocker(1969)). DC Chemical Co.의 제품을 본 연구에서 사용하였다.
Calcium Oxide	화학식 $CaO$ , 생석회 또는 석회라고도 한다. 천연의 석회석이나 탄산칼슘을 약 $900^{\circ}C$ 이상으로 가열분해하면 얻어진다. 소련 시베리아에서는 electroosmosis를 이용하여 칼슘을 주입하여 지지력을 약 7배 증진시켰다. DC Chemical Co.의 제품을 본 연구에서 사용하였다.
Iron Oxide	화학식 $FeO$ , 산화제일철이라고도 한다. 철을 산소 부분압력을 낮게 하여 $575^{\circ}C$ 이상으로 가열한 다음 급랭시키면 검은색 결정으로 얻어진다. 철산화물은 토양 내 전단강도의 증가와 간극 크기 감소에 영향을 미친다(Micic, Shang ; Lo(2003)). DC Chemical Co.의 제품을 본 연구에서 사용하였다.

표 1. 주입제 종류에 따른 특성(계속)

주입제	특징
Sodium Silicate	이산화규소와 알칼리를 용융해서 얻어진 알칼리규산염을 진한 수용액으로 만든 것으로, 점도가 높은 용액이다. Thevanayagam & Jia(2002)는 양극에 Sodium Silicate를 주입하여 강도를 크게 증가시킨 바 있다. DC Chemical Co.의 제품을 본 연구에서 사용하였다.
Phosphoric Acid	화학식(H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ), 조해성이 있으며, 20℃에서 물 10g에 5g이 녹는다. Alshawebkeh & Sheahan (1998, 2002)은 카올린의 역학적 특성을 개선하기 위해 음극에 인산염을 주입하여, 지반개량효과를 얻은 바 있다. DC Chemical Co.의 제품을 본 연구에서 사용하였다.

### 3.2 시료 특성

본 연구에서 사용된 대상 시료는 주입제 이외에 다른 이온성 물질의 영향을 최소화하면서, 적용 주입제의 이동양상 및 특성을 정량적으로 파악하기 위해 활성도가 낮고 불순물의 함량이 적으며, 순수 Kaolinite 함유량이 97%이상인 EPK-Kaolinite를 사용하여 조성하였다. 시료의 조성 시, 액성한계를 고려하여 완전포화체로 조성하면서 실험기에 좀 더 용이하게 조성하기 위해 함수비 80%로 포화시킨 후 최대한 조밀하게 주입하였다. 표 2에는 EPK-Kaolinite의 시료특성을 나타내었다.

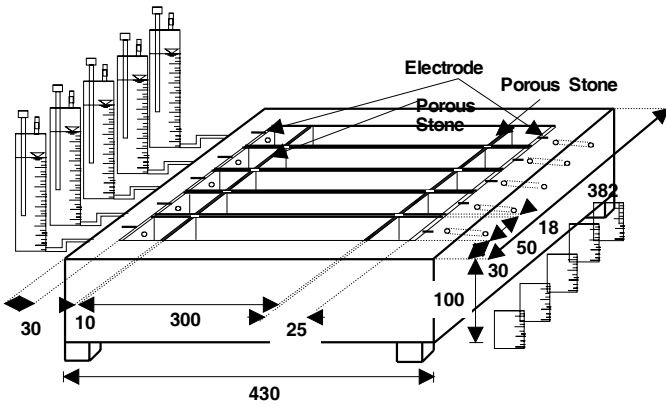
표 2. EPK-Kaolinite의 시료특성

Gs	LL (%)	Activity	Average Particle Size( $\mu$ m)	$w_{opt}$ (%)	Initial pH	CEC (cmol/kg)	Mineral content(X-ray diffraction)	Specific area (m <sup>2</sup> /g)
2.65	64	0.32	2.18	31.0	5.8	4.5	Kaolinite(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 2SiO <sub>2</sub> , 2H <sub>2</sub> O)-97%	22.1

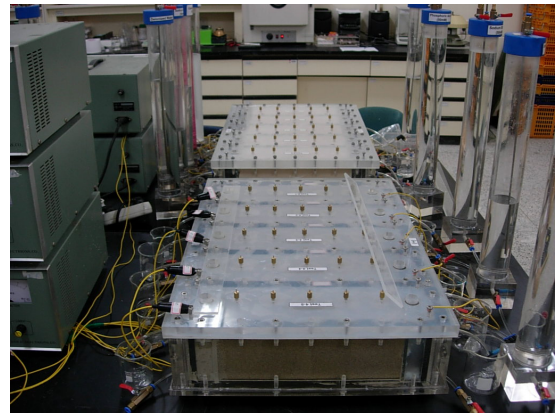
### 3.3 EK-Injection 실험 장치 및 실험 조건

본 연구에서 사용된 실험 장치는 셀 본체, 덮개 및 연결부로 구성되어 있다. 셀 본체는 총 5가지 실험이 동시에 수행될 수 있도록 각각 분리 되어 있어 전압 및 주입용액의 유입 및 유출이 각각 독립적으로 이루어진다(그림 2). 시료가 셀 본체에 설치 된 이후 물의 표면증발을 막기 위해 셀 덮개를 장착하게 되는데, 셀 덮개에는 위치별로 전압을 측정 할 수 있도록 측정 단자(Passive electrode)를 설치하였으며, 양 저수조의 pH와 전기전도도를 측정하기 위해 각 저수조의 상부에 구멍이 뚫려 있다. 또한, 실험 도중 유출수가 다른 시료 내부로 유입되는 것을 막기 위해 덮개의 배면에는 0.5cm두께의 천연고무를 부착하였다. 마지막으로 외부에서의 동수경사 형성을 방지하기 위해 셀의 양극부에는 주입제를 물에 희석시킨 주입용액이 들어 있는 마리오 바틀(Mariotte bottle)을 설치하였으며, 음극부에는 자유롭게 월류(Overflow)가 가능하도록 하였다. 그러나 주입제의 전하특성에 따라 음극부와 양극부에 설치되는 마리오 바틀의 위치는 바뀔 수 있다.

본 연구에서는 표 3과 같이 EPK-Kaolinite를 이용하여 총 5가지의 주입실험을 실시하였다. 극성을 고려하여 양극에는 4가지 종류의 주입제로 나누어서 주입하였으며, 음극에는 인산을 주입하였다. 이 때, Batch 실험을 통해 강도발현효과가 가장 좋은 물질과 농도를 선택하여 주입하였다. 처리기간은 단위전압경사(1V/cm)를 적용하였기 때문에, 실험장치의 길이 30cm를 기준으로 30일간 실시하였다. 또한 확산의 영향을 고려하기 위해 EK-Injection 실험 종료 후 25일간 방치한 후 5일 간격으로 함수비, pH, 비배수전단강도를 측정하였다.



(a) 본체구성도



(b) 실험 전경

그림 2. EK-Injection 실험장치 및 실험전경

표 3. 실험조건

Fixed factors		Variable factors					
Duration(days)	Volt(V/cm)	Injection agents/materials					
30(+ 25)	1.0	Electrode	Agent				Blank
		Test No.	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
		Anode(+)	Aluminum Hydroxide(100mM)	Iron Oxide (30mM)	Calcium Oxide(30mM)	Sodium Silicate (50mM)	Deionized Water
		Cathode(-)	Phosphoric Acid (50mM)	Phosphoric Acid(50mM)	Phosphoric Acid(50mM)	Phosphoric Acid(50mM)	Deionized Water

## 4. 실험 결과 분석 및 고찰

### 4.1 시료 내 함수비분포의 변화

EK-Injection 실험 종료 후 5일 간격으로 25일 동안 측정된 시료 내 함수비분포는 시간의 경과에 따라 거의 변하지 않았으며, 전 범위에서 일정한 값으로 수렴하는 양상을 띠었다. 또한 대부분 액성한계 이상의 범위에서 형성되었으므로, 함수비 변화가 강도증진효과에 영향을 미치지 않았다. 그러나 그림 3의 규산나트륨을 주입한 경우는 시간경과에 따라 액성한계 이하의 범위에서 함수비가 형성되어, 강도증진 효과에 약간의 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

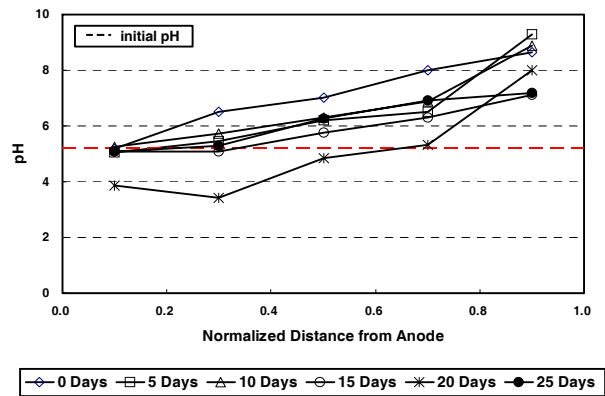
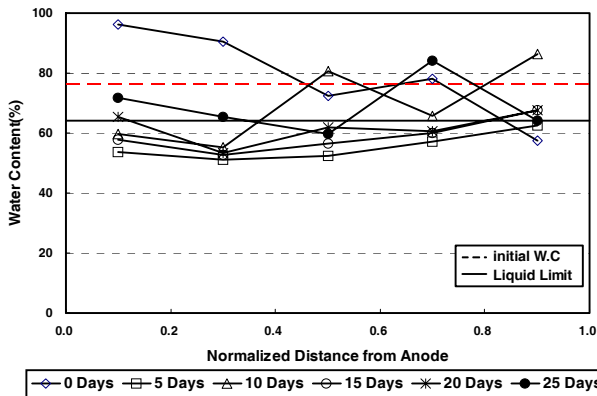


그림 3. EK 주입 종료 후 시료 내 함수비의 변화(Test 4) 그림 4. EK 주입 종료 후 시료 내 pH의 변화(Test 4)



기법의 적용성을 파악하고자, 카올린을 이용하여 저 투수성 지반을 인위적으로 조성한 후 주입제의 종류를 달리하여 일련의 동전기 주입 실험을 실시하였다. 또한 확산의 영향을 고려하기 위해 실험 종료 후 25일간 방치하며, 강도 특성을 파악하였다. 각 실험 간 주입제의 주입 시 발생하는 동전기 특성 및 실내 Vane 실험을 통한 강도변화를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 전 영역에서 평균 2배 이상의 강도증진효과가 나타났으며, 시간의 경과에 따라 비슷한 강도값으로 수렴하는 경향이 나타났다. 특히 규산나트륨을 양극에 주입한 경우 최대 7배까지의 강도증진효과가 발생했다.
2. 양극에 수산화알루미늄을 주입한 경우에는 EK-Injection과 확산에 의한 강도증가치가 함수비 감소에 의한 증가치보다 전 구간 평균 약 1000% 높게 발생하였으며, 같은 방법으로 철산화물, 산화칼슘, 규산나트륨 주입한 경우에서 각각 763%, 1237%, 764% 높게 나타났다. 따라서 함수비에 의한 영향보다는 주입제의 주입으로 인한 electrocementation 효과에 의해 강도가 증가했다는 것을 파악할 수 있었다.

이상의 결론으로 EK-Injection의 실용적인 적용성에 대한 가능성을 파악할 수 있었으나, 최대의 강도 발현을 위한 주입제의 종류, 주입시스템, 주입제 극성에 따른 적용 전극위치(양극 또는 음극) 등에 대한 세밀한 연구가 요구된다.

## 6. 참고문헌

1. 한상재(2000), "Electrokinetic 주입에 의한 오염토의 전기삼투와 중금속 이동 특성", **중앙대학교 박사학위논문**
2. Ahmad. H, Leszczynska. D and Thevanayagam(2001), "Waste Containment by Soil Stabilization Using Electro-Kinetic Grouting Method", *International Containment & Remediation Technology Conference and Exhibition*
3. Alshawabkeh. A. N, Sheahan T. C and Wu. X(1998), "Injection of Nutrient and TEAs in Clayey Soils Using Electrokinetics", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*
4. Alshawabkeh. A. N, Sheahan T. C and Wu. X(2003), "Coupling of electrochemical and mechanical processes in soils under DC fields", *Mechanics of Materials*
5. Alshawabkeh A. N and Sheahan T. C(2002), "Stabilizing Fine-Grained Soils by Phosphate Electro-Grouting", *Journal of the Transportation Research Board (1787)*, pp. 53-60
6. Segall B. A, Matthias J. A, and Charles E. O(1980), "Electro-Osmosis Chemistry and Water Quality", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 106, No. 10, pp. 1148-1152
7. Gray, D. H. and Schlocker, J.(1969), "Electrochemical alteration of clay soils". *Clays and Clay Minerals* 17, 309~322.
8. Micic. S, Shang. J. Q and Lo. K. Y(2003), "Electrocementation of a Marine Clay Induced by Electrokinetics", *International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol.13, No.4
9. Shang. J. Q, Mohamedelhassan. E, Ismail. M. A and Randolph. M. F(2004), "Electrochemical Cementation of Calcareous Sand for Offshore Foundations", *Proceeding of The Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*
10. Shroff A. V and Shah D. L(1985), "Resin grout system for rock treatment". *Proc. Indian Geotech. Conference*, Roorkee Sarita, Prakashan, Meerut, pp. 203~208
11. Thevanayagam, S. and Jia, W.(2003), "Electro-Osmotic Grouting for Liquefaction Mitigation in Silty Soils", *ASCE Special Technical Publication.*, Grouting, Louisiana