

# 저투수성 지반의 전단강도 증가를 위한 동전기 주입 기법의 적용성

## Application of Electrokinetic Injection Method for Increasing Shear Strength of Low Permeable Soil

김 수 삼<sup>1</sup> Kim, Soo-Sam

한 상 재<sup>2</sup> Han, Sang-Jae

김 기 년<sup>3</sup> Kim, Ki-Nyeon

### Abstract

In this study a series of tests (bench scale test) are carried out for increasing the 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. Also, the effects of strength increase in the treated sample are measured by operating the vane shear test device to estimate the effect by treatment durations (5, 10, 15, 20, 25). The test results show that the strength increase was developed approximately 2 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 was 1000% high on average. In case of changes of treatment duration, strength increment developed by the influence of treatment durations rather than the reduction of water-content was 3 to 4 times high on average.

### 요 지

본 연구에서는 점토질 지반의 강도를 증진시키기 위해, 일련의 동전기 현상을 이용한 주입 실험을 수행하였다. 이를 위해 실내 Bench scale 실험을 실시하여 적용성을 파악하였다. 또한 확산의 영향에 의한 지반개량효과를 파악하기 위해 실험 종료 후 5일 간격으로 25일 동안 베인 실험을 실시하여 강도증진효과를 파악하였으며, 처리기간에 따른 영향을 고려하기 위해 5일 간격(5, 10, 15, 20, 25)으로 처리기간을 설정한 후 동전기 주입 실험을 실시하였다. 주입제 종류에 따른 실험결과, 초기 강도치와 비교하여 약 2~7배 정도의 강도증진효과가 발생하였으며, 특히 양극에 규산나트륨을 주입하고 음극에 인산을 주입한 경우 약 7배 정도의 강도증진효과가 발생하였다. 또한 확산과 함수비 감소에 따른 강도값을 분석해본 결과 시간경과에 따라 강도 값이 일정한 값으로 수렴하는 양상을 띠었으며, 함수비 감소에 의한 강도 증가치 보다 동전기 주입과 확산에 의한 영향으로 발생하는 강도증가치가 약 700~1000% 높게 나타났다. 처리기간에 따른 실험결과, 처리기간이 증가함에 따라 동전기 주입에 의한 강도증진효과가 크게 나타났으며, 함수비 감소에 의한 강도증가치보다 대략 3~4배 정도 높게 나타남을 파악할 수 있었다.

**Keywords :** Clayey soils, Diffusion, Electrokinetic-injection, Injection material, Undrained strength

1 정희원, 한양대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Hanyang Univ.)

2 정희원, 한양대학교 토목환경공학과 연구교수 (Member, Research Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Hanyang Univ.)

3 한양대학교 토목환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng., Hanyang Univ., kkn1976@ihanyang.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 11월 30일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

전통적으로 사용되고 있는 침투 그라우팅(permeation grouting) 공법의 경우, 투수계수가 큰 사질토 지반에서는 주입이 용이한 반면, 투수계수가 약  $10^{-5}$ cm/sec 이하인 실트질 토질에서는 침투 그라우팅을 위한 동수경사가 크게 요구되고 때로는 지반 활렬파괴가 발생되므로 이러한 실트질 및 점토질 토질 또는 구조물이 지반에 존재하는 경우에 대해서는 기존의 침투 그라우팅을 실시하기가 어렵다. 이에 저투수성 지반에도 적용 가능한 기법이 요구되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 저투수성 지반의 강도를 증진시키기 위해 강도 증진 주입제를 지중에 침투시키는데 있어서, 동전기 주입(Electrokinetic-Injection: 이하 EK-Injection)기법을 적용하여 각종 주입제를 주입한 후 실내 배인 전단실험을 통해 강도증진효과를 비교분석하고, 확산의 영향을 고려하여 그 효과를 검증하고자 하였다. 또한, 본 연구에 적용된 주입제는 현재 대부분의 주입공법에서 사용되고 있는 물유리계주입제(Sodium Silicate, 규산나트륨) 외에, 문헌 검증을 통해 고결효과가 있다고 알려진 물질(칼슘, 알루미늄, 철, 인산)을 선정하여 Blank 실험(주입제를 주입하지 않은 실험)과 강도증진효과를 비교분석하였다.

## 2. 동전기 침투 기법의 원리

EK-Injection 기법은 저투수성 지반에 주입제를 동전기적으로 주입하는 것으로서, 주입제/경화제 주입수단이 직류전류라는 점이 침투주입과는 다르지만, 비슷한 방식으로 현장에서 강도를 증진시킬 수 있는 기법이다.

외부에서 동수경사의 적용 없이 직류전압경사를 포화토에 가했을 때, 전압경사의 영향 하에서 다음과 같은 현상이 발생한다(Michell, 1993): (i) 유체가 양(+)극에서 음(-)극으로 흐른다(전기삼투). (ii) 양으로 대전된 용해 이온들이 양(+)극에서 음(-)극으로 이동한다(이온이동). (iii) 음으로 대전된 용해 이온들이 음(-)극에서 양(+)극으로 이동한다(이온이동). 전극에서의 가수분해와 전극반응은 pH의 변화와 이온농도의 변화를 유발하고, 이런 일련의 과정을 통해 흙의 성질, 이온과 유체의 흐름에 영향을 주게 된다. 점토나 실트질 지반은 단위 전압 경사 하에서  $10^{-5}$ cm/s/V/cm 정도의 투수계수를 갖지만 그 이상의 전기 삼투적 간극유체 흐름속도를 보인다(Michell, 1993). 이러한 요소들을 고려해 보았을 때, 직류전류를

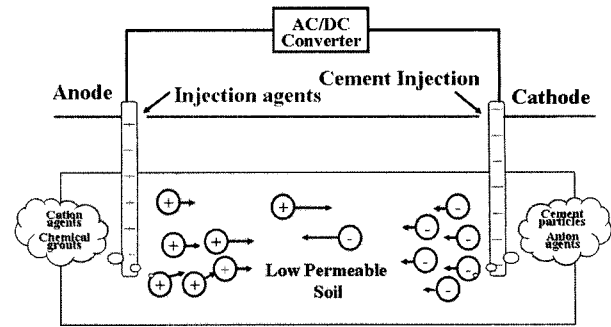


그림 1. EK-Injection 기법의 원리

사용하여 전극 근처에 다양한 그라우팅 성분을 적절하게 주입함으로써 투수성이 낮은 실트질 또는 점토질 지반에 수용성 주입제와 경화제를 주입할 수 있다. 또한 농도의 조절, 다양한 성분의 연속주입, 전극재료의 선택, 적절한 pH범위에서의 전극반응을 제어함으로써, 경화시간을 조절할 수 있다.

따라서 EK-Injection 기법은 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 있으며, 대전된 주입제의 경우 전기영동현상을 이용하여 양(+)극 방향으로 이동시킴으로써 고결작용을 일으키게 할 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.

## 3. EK-Injection 실험

### 3.1 주입제

기존문헌을 검토하여 점성토에서 고결효과가 큰 알루미늄, 철, 칼슘, 인산, 규산나트륨 등을 함유한 5가지 주입제를 선정하여, EK-Injection 실험을 실시하였다. 주입제의 종류에 따른 특성과 선정배경을 표 1에 정리하였다.

### 3.2 시료 특성

본 연구에서 사용된 대상 시료는 주입제 이외에 다른

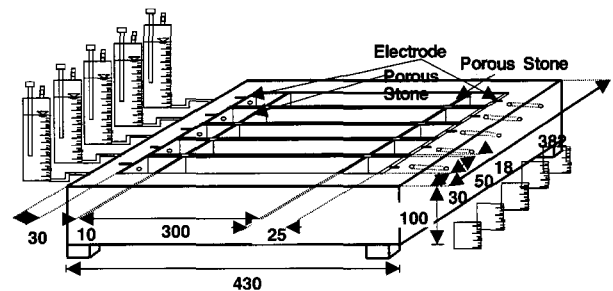
표 1. 주입제 종류에 따른 특성

주입제	특징
Aluminum Hydroxide	화학적 Al(OH) <sub>3</sub> , 알루미늄의 수산화물, 천연적으로는 기브사이트 등으로서 산출되는 외에, 산화수산화물 AlO(OH)가 다이어스포어·뫼마이트로 산출된다. 알루미늄이온은 지반 내에 주입되면, 고결작용을 일으킨다(Gray and Schlocker, 1969).
Calcium Oxide	화학적 CaO, 생석회 또는 석회라고도 한다. 천연의 석회석이나 탄산칼슘을 약 900°C 이상으로 가열분해하면 얻어진다. 시베리아에서는 electroosmosis를 이용하여 칼슘을 주입하여 지지력을 약 7배 증진시켰다.
Iron Oxide	화학적 FeO, 산화제일철이라고도 한다. 철을 산소 부분압력을 낮게 하여 575°C 이상으로 가열한 다음 급랭시키면 검은색 결정으로 얻어진다. 철산화물은 토양 내 전단강도의 증가와 간극 크기 감소에 영향을 미친다(Micic et al., 2003).
Sodium Silicate	이산화규소와 알칼리를 용융해서 얻어진 알칼리규산염을 진한 수용액으로 만든 것으로, 점도가 높은 용액이다. Thevanayagam & Jia(2003)는 양극에 Sodium Silicate를 주입하여 강도를 크게 증가시킨 바 있다.
Phosphoric Acid	화학적(H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ), 조해성이 있으며, 20°C에서 물 10g에 5g이 녹는다. Alshawebkeh & Sheahan(2002)은 카올린의 역학적 특성을 개선하기 위해 음극에 인산염을 주입하여, 지반개량효과를 얻은 바 있다.

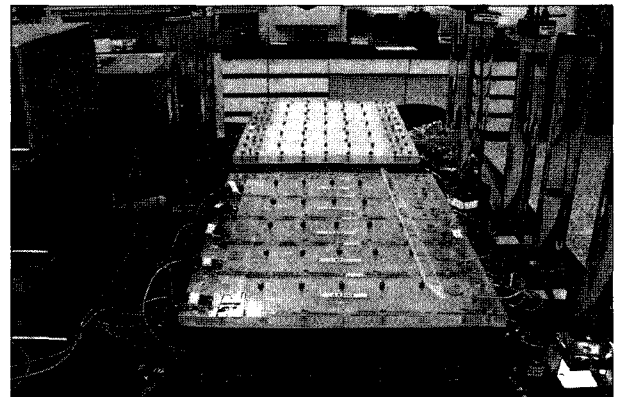
표 2. EPK-Kaolinite의 시료특성(Coletta et al., 1997)

Gs	LL (%)	Activity	Average Particle Size(μm)	w <sub>opt</sub> (%)	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

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.



(a) 본체구성도



(b) 실험전경

그림 2. EK-Injection 실험장치 및 실험전경

### 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 주입 용액의 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 가

능하도록 하였다. 그러나 주입제의 전하특성에 따라 음극부와 양극부에 설치되는 마리오 바틀의 위치는 바뀔 수 있다.

본 연구에서는 표 3, 4와 같이 EPK- Kaolinite를 이용하여 총 10가지의 EK-Injection 실험을 실시하였다. 먼저 Test 1~5의 경우, 극성을 고려하여 양극에 4가지 중

표 3. 실험조건(Test 1~5)

Fixed factors		Variable factors					
Duration(days)	Volt(V/cm)	Injection 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)				Deionized Water

표 4. 실험조건(Test 6~10)

Fixed factors			Variable factors
Volt(V/cm)	Injection materials		Duration(days)
1.0	Test No.	Anode	Cathode
	Test 6	Sodium Silicate (50mM)	Phosphoric Acid(50mM)
	Test 7		
	Test 8		
	Test 9		
	Test 10		
			5 Days
			10 Days
			15 Days
			20 Days
			25 Days

류의 주입제를 주입하였으며, 음극에는 인산을 주입하였다. 이 때, Batch 실험을 통해 강도발현효과가 비교적 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. Test 6~10의 경우, 처리기간을 5일 간격으로(5,10,15,20,25) 변화시킨 후 실험을 실시하였다. 이 때 Test 1~5를 통해 주입제(양극 : 규산나트륨, 음극 : 인)를 선택하여 공통적으로 주입하였다. 모든 실험 간, pH, 전도도, 전압 등의 세부인자를 측정하였으며, 실험종료 후 함수비와 비배수전단강도(Vane 전단실험)를 측정하였다.

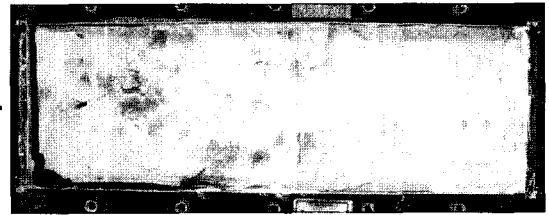


그림 3. 양극부 시료 표면에 Overflow 전경(Test 4)

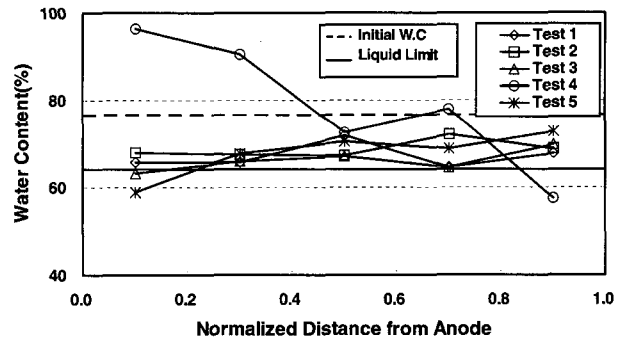


그림 4. EK 주입실험 종료 후 주입제 종류에 따른 시료 내 함수비 분포

#### 4. 실험 결과 분석 및 고찰

##### 4.1 시료 내 함수비분포의 변화

그림 4는 주입제의 종류를 변화시킨 실험(Test 1~5) 종료 후 양극으로부터의 거리를 정규화(x/L=양극으로부터 샘플링된 지점의 거리/전체길이) 시킨 거리에 대한, 시료 내 함수비 분포를 나타낸 그림이다. 초기 함수비 값과 비교해 보았을 때, 약간 씩 감소하는 양상이 나타났지만 대부분의 실험에 있어서 각 섹션별로 큰 차이를 보이지는 않았다. Test 4(양극에 규산나트륨 주입)의

경우에서는 양극부근의 함수비가 다른 경우에 비해 비교적 크게 나타났는데, 이는 실험적 오차로 인해 양극부 저수조 표면의 주입제가 시료 표면으로 Overflow되며 나타난 현상이다(그림 3). 이러한 오차로 인해 시료 표면에서의 함수비는 비교적 크게 나타나는 경향을 보였으나, 깊이 방향의 시료 중앙부 함수비는 다른 경우에서 발생된 함수비 값과 거의 비슷하게 나타났다. 또한 함수비가 비교적 크게 나타났음에도 불구하고 강도증가치가 가장 크게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 Test 4의

양극부에 나타난 함수비 증가현상이 시료 내부의 강도 증진 효과에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단하였다.

확산의 영향을 고려하기 위해, 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 주입제 종류에 따른 실험에서는 액성한계이상의 범위에서 함수비가 형성되었으므로, 이러한 변화가 강도증진효과에 크게 영향을 미치지 않았다고 판단하였다. 그러나 Test 4(규산나트륨을 주입)의 경우(그림 5), 시간경과에 따라 액성한계 이하의 범위에서 함수비가 형성되는 경향이 나타났다. 또한, EK-Injection 실험 종료 후 밀폐 시킨 채로 25일 간 방치하였기 때문에, 시료 내 전반적인 함수비의 감소는 발생하지 않았다. 그림 6은 Test 4(양극에 규산나트륨 주입)에서 5일 간격으로 총 25일간 측정된 pH 변화를 나타내었다. 대부분 초기에는 양(兩)전극 사이에서 값이 상이하게 나타났다. 그러나 시간 경과 20일 이후부터는 일정한 값으로 수렴하는 양상이 나타났으며, 이는 확산의 영향으로 인한 시료 내 이온종들의 이동의 결과이다.

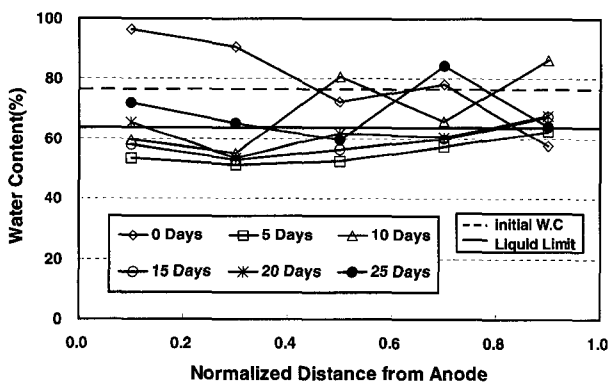


그림 5. EK 주입 종료 후 시간경과에 따른 시료 내 함수비 분포의 변화 (Test 4)

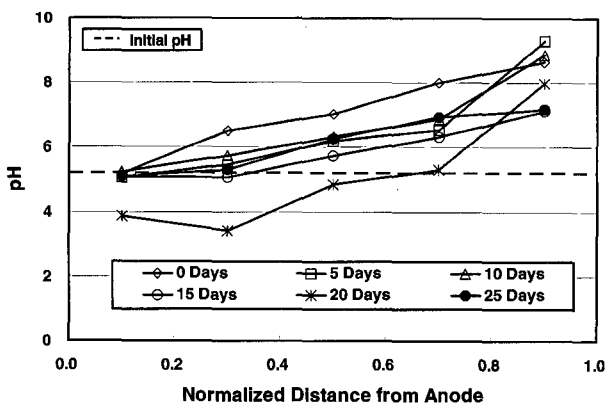


그림 6. EK 주입 종료 후 시간경과에 따른 시료 내 pH 분포의 변화 (Test 4)

처리기간을 변화시킨 실험(Test 6~10)의 경우(그림 7), 초기 함수비 값과 비교해 보았을 때, 처리기간이 가장 짧았던 Test 6의 경우 변화가 거의 없었지만, 처리기간이 증가됨에 따라 양(+)극 부근의 함수비가 처리기간에 거의 비례하여 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 액성한계 이하의 범위에서 함수비가 형성되었다. 따라서 Test 4와 Test 7~10의 함수비감소가 강도변화에 미치는 영향을 비교분석하기 위해 함수비를 단계적으로 변화시킨 후 강도변화를 측정하였다(4.4절 참조).

#### 4.2 주입제 종류에 따른 강도 특성

그림 8에는 EK-Injection 실험 종료 후 5일 간격으로 측정된 Vane 전단 실험 전경을 나타내었다.

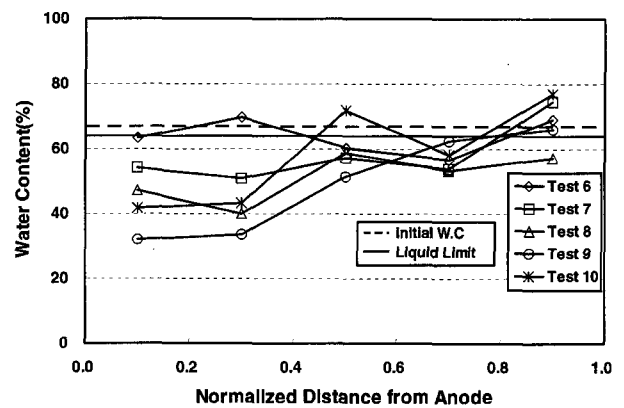


그림 7. EK 주입 종료 후 시료 내 함수비의 분포(Test 6~10)

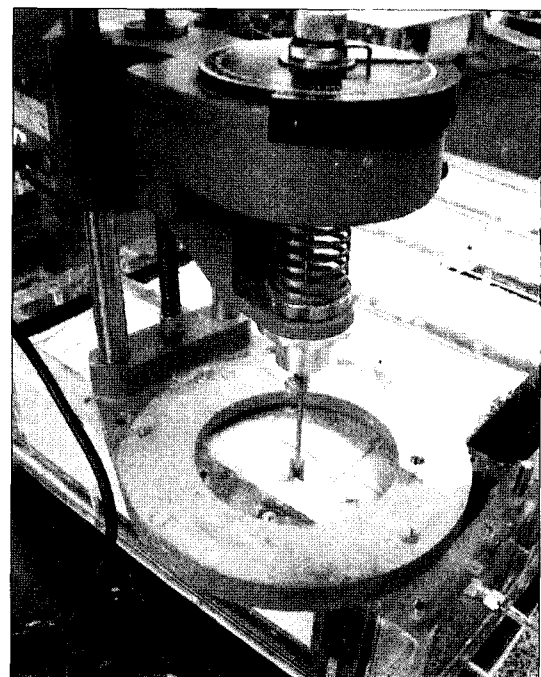


그림 8. Vane 전단실험 전경

그림 9는 EK-Injection 실험 종료 후 시간 경과에 따른 강도변화를 초기 강도로 정규화 시킨 후, 각 실험별 시간에 따른 강도의 평균값을 비교하여 나타낸 그림이다. 그 결과 전 영역에서 평균 2배 이상의 강도증진효과가 나타났으며, 시간의 경과에 따라 비슷한 강도값으로 수렴하는 경향이 나타났는데, 이는 확산에 의한 이온종 이동의 결과이다. 특히 양극에 규산나트륨을 주입한 경우 가장 큰 강도증진효과가 나타났는데(약 6~7배), 이는 규산나트륨 주입제의 cementation 효과가 다른 주입제에 비해 비교적 크기 때문에 발생한 결과이다. Thevanayagam & Jia(2003)의 연구에 의하면, 양(+)극에 규산나트륨을 주입한 경우 일축압축강도가 최대 6배 이상 증가함을 보고하였다.

그러나 EK-Injection 실험 종료 후 20일 부근에서 급격히 강도가 감소하는 양상이 나타났는데, 이는 이 부근에서의 전반적인 pH가 낮게 측정되었고(그림 6) 액성한계가 pH의 감소와 함께 낮아지기 때문에(한, 2000), 비교적 동일한 함수비 분포에 있어서 이로 인한 액성한계의 감

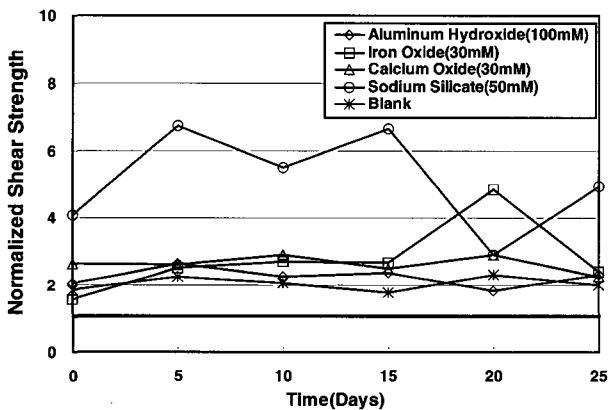


그림 9. EK 주입 종료 후 시간경과에 따른 강도증가비의 변화(Test 1~5)

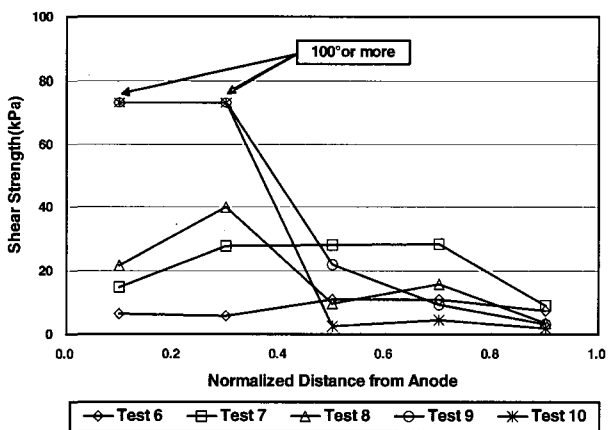


그림 10. EK 주입 종료 후 처리기간에 따른 강도의 변화(Test 6~10)

소가 강도 저감효과의 주요한 원인으로 작용하였다.

#### 4.3 처리기간에 따른 강도 특성

처리기간을 변화시킨 실험 종료 후 실내 베인 실험을 실시한 결과를 그림 10에 나타내었다. 각 위치 별로 양극에서 음극방향으로 총 5개 지점으로 나눈 후, 각 지점 별로 총 4회의 Vane 전단실험을 실시한 평균 강도치를 나타내었다. Test 6~10의 실험결과, 처리기간이 길어질수록 양(+)극 부근의 강도가 높게 나타났다. 특히, Test 9와 10의 경우 Vane 전단실험을 실시할 수 없을 정도로 강도가 높게 발현되었다(따라서, 샘플링을 통한 일축압축실험실시). 이는 양(+)극부에서 발생한 함수비 저감효과와 주입제의 주입으로 인한 고결효과에 따라 발생한 것으로 판단되지만, Test 9와 10이 대략 10% 정도의 함수비 차(그림 7)를 보임에도 불구하고 강도증진효과는 거의 비슷했던 점을 감안할 때, 강도발현의 주 메커니즘이 함수비 감소만이 아닌 주입제의 주입으로 인해서도 발생한다는 것을 증명한다.

그림 11에는 지반 내 규산나트륨을 주입한 경우 일반적으로 발생되는 고결현상의 모식도를 나타내었다.

#### 4.4 EK 주입, 확산, 함수비 감소에 따른 강도변화의 분석

그림 12에는 함수비 저감에 따른 강도변화와 EK-Injection, 확산에 의한 강도변화를 비교분석하여 나타내었다. 이를 위해 함수비를 단계적으로 변화시킨 후 강도변화를 측정하였고, 확산의 영향을 파악하고자 하였기 때문에 EK-Injection 실험종료 직후와 25일 후의 강도값으로 분리하여 고려하였다. 그 결과 양극에 수산화알루미늄을 주입한 경우에는 EK-Injection과 확산에 의한 강도증가치가 함수비 감소에 의한 증가치보다 전 구간 평균 약 1000% 높게 발생하였으며, 같은 방법으로 철산화물, 산화칼슘, 규산나트륨을 주입한 경우에서 각각 763%, 1237%, 764% 높게 나타났다. 따라서 함수비에 의한 영향보다는 주입제의 주입으로 인한 Electrocementation 효과에 의해 강도가 증가했다는 것을 파악할 수 있었다. 전기고결(Electrocementation)현상은 직류전기장이 적용된 지반에서 전기/화학적 이온주입에 의한 흙 입자간 고결화 작용으로 정의 될 수 있다.

Micic et al.(2003)은 Skirted Foundation의 시공성을 강화하기 위한 방법으로 동전기 공법을 이용하여 해성 점토

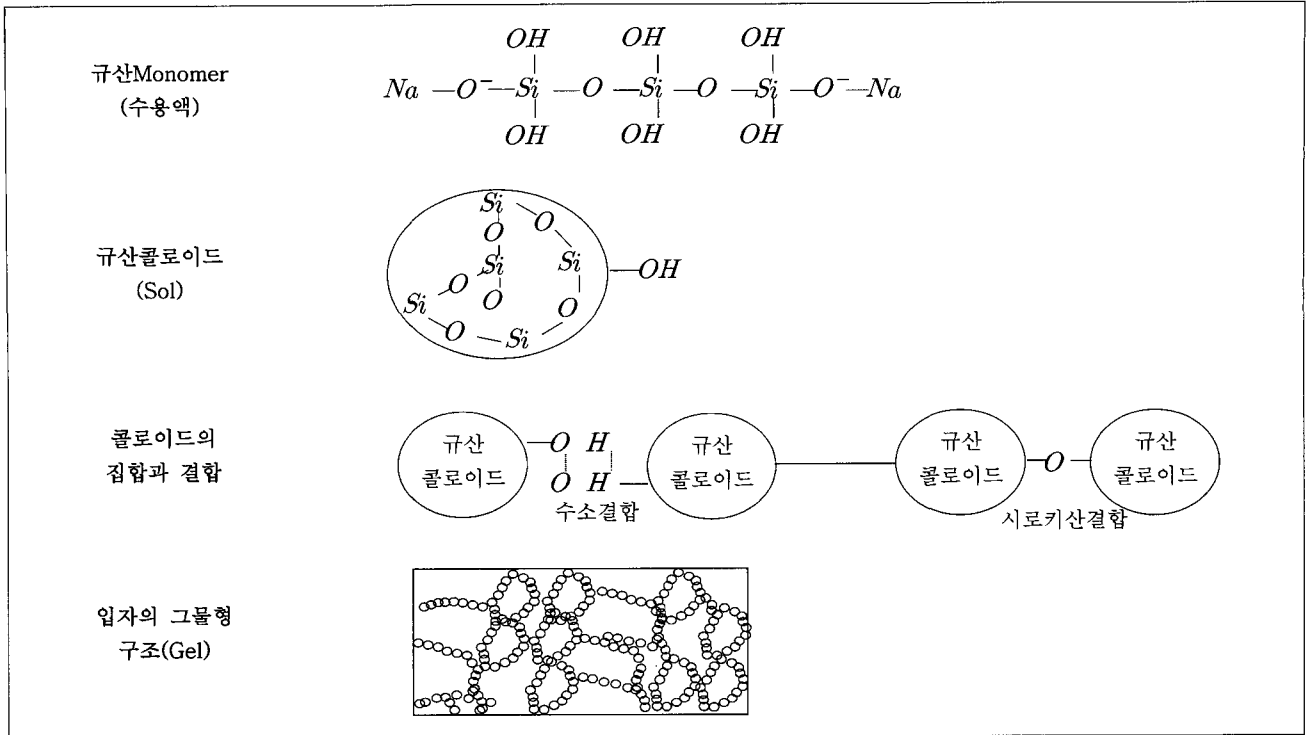


그림 11. 규산나트륨의 겔화과정(Shan & Shroff, 1985)

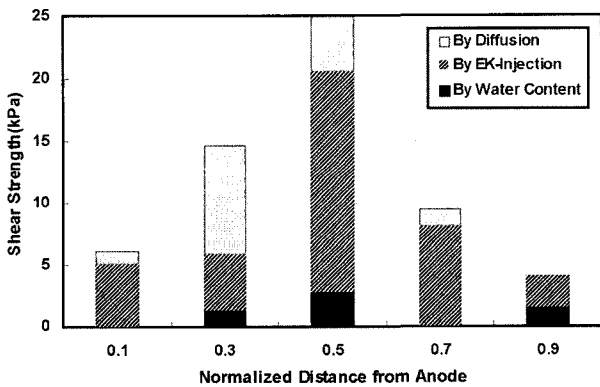
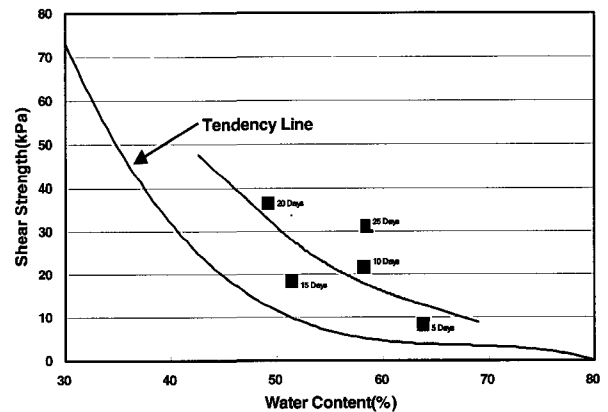


그림 12. 확산, EK 주입, 함수비의 영향에 따른 강도의 변화(Test 4)

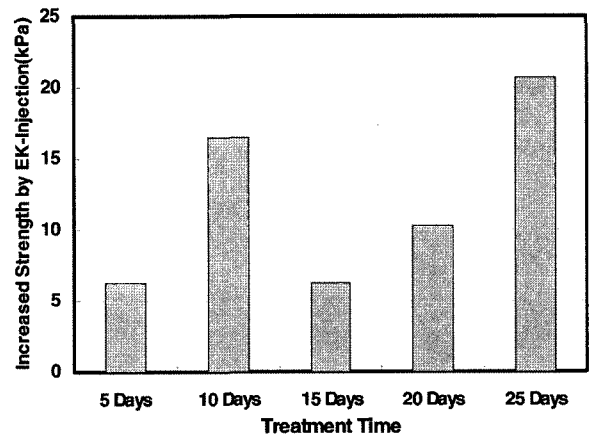
의 강도를 증대시키는 방법을 연구하였는데, 해성 점토에 대해 동전기 처리를 하는 동안 electro cementation 현상에 의해 원지반의 강도가 증가되었다고 보고한 바 있다.

#### 4.5 처리기간과 함수비감소에 따른 강도변화의 분석

그림 13에는 처리기간의 변화에 따라 측정된 평균 강도값과 함수비의 변화로 인해 발생된 강도값을 비교하여 나타내었다. 처리기간을 20일 이상 처리한 Test 9와 10에서의 최종 강도분포가 가장 크게 나타났지만, Test 9의 경우는 함수비의 감소가 크게 일어났기 때문에 함수비의 영향을 제외한 강도증가 분포에서는 비교적 작



(a) 처리기간과 함수비감소에 따른 강도의 변화



(b) 처리기간에 따른 강도의 변화

그림 13. 처리기간과 전단강도의 관계(Test 6~10)

은 값이 발현되었다(그림 13(b)). 그러나 25일간 처리한 Test 10의 경우, 함수비의 감소가 크게 발생하지 않았음에도 불구하고 강도값이 크게 발생하였다. 따라서 이러한 영향을 처리기간에 따른 강도값 추세선으로 분석해 볼 때(그림 13(a)), 처리기간의 증가가 EK-Injection에 의한 강도증진효과를 크게 발현시킬 것으로 예상된다.

함수비감소에 의한 강도증가치와 처리기간에 따른 EK-Injection 실험의 강도증가치를 정량적으로 비교해 보면 EK-Injection에 의한 강도증가치가 전 구간에서 대략 3배~4배 정도 높게 나타남을 파악할 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 저투수성 지반을 개량하기 위해 주입제를 지중에 침투시키는데 있어서 EK-Injection 기법의 적용성을 파악하고자, EPK-Kaolinite를 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 파악하였고(Test 1~5), 처리기간에 따른 영향을 고려하기 위해 5일 간격(5, 10, 15, 20, 25일)으로 25일간 실험을 실시하였다(Test 6~10). 각 실험 간 주입제의 주입 시 발생하는 동전기 특성 및 실내 Vane 실험을 통한 강도변화를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 주입제의 종류를 달리하여 EK-Injection 실험을 실시한 경우, 전 영역에서 평균 2배 이상의 강도증진 효과가 나타났으며, 시간의 경과에 따라 비슷한 강도값으로 수렴하는 경향이 나타났다. 특히 규산나트륨을 양극에 주입한 경우 최대 약 6~7배까지의 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 영향 보다는 주입제의 주입으로 인한 electrocementation 효과에 의해 강도가 증가했다는 것을 파악할 수 있었다.
- (3) 처리기간에 따른 EK-Injection 실험의 경우, 시간의 증가가 EK-Injection에 의한 강도증진효과를 크게 발

현시킨다는 것을 예상 할 수 있었다. 함수비감소에 의한 강도증가치와 처리기간에 따른 EK-Injection 실험의 강도증가치를 정량적으로 비교해본 결과 전 구간에서 대략 3~4배 정도 EK-Injection에 의한 효과가 높게 나타남을 파악할 수 있었다.

이상의 결론으로 EK-Injection 기법의 실용적인 적용성에 대한 가능성을 파악할 수 있었으나, 최대의 강도발현을 위한 주입제의 종류 및 농도, 주입시스템, 주입제 극성에 따른 적용 전극위치(양극 또는 음극), 처리기간 등에 대한 세밀한 연구가 요구된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 2004년도 “건설핵심기술연구개발사업”의 1차년도 연구비 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 한상재 (2000), *Electrokinetic 주입에 의한 오염토의 전기삼투와 중금속 이동 특성*, 박사학위논문, 중앙대학교.
2. Ahmad, H, Leszczynska, D & Thevanayagam (2001), “Waste containment by soil stabilization using electro-kinetic grouting method”, *International Containment & Remediation Technology Conference and Exhibition*, No.245.
3. Alshawabkeh, A. N, Sheahan T. C. (2002), “Stabilizing fine-grained soils by phosphate electro-grouting”, *Journal of the Transportation Research Board (1787)*, pp.53-60.
4. Coletta, T.F., Bruell, C.J., Ryan, D.K., and Inyang, H.I. (1997), “Cation-enhanced solutions for the electrokinetic removal of Pb from kaolinite”, *ASCE Journal of Environ. Eng.*, Vol.123, No.12, pp.1227-1233.
5. Gray, D. H. and Schlocker, J. (1969), Electrochemical alteration of clay soils. *Clays and Clay Minerals* 17, 309-322.
6. 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.
7. Mitchell, j. k. (1993), *Fundamentals of soil behavior-2nd edition*, Wiley Interscience, pp.256-258.
8. 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*.
9. Shan and Shroff (1985), “Resin grout system for rock treatment”, *Proc. Indian Geotech. Conference*, Roorkee Sarita, Prakashan, Meerut, pp.203-208.
10. Thevanayagam, S. and Jia, W. (2003), “electro-osmotic grouting for liquefaction mitigation in silty soils”, *ASCE Special Technical Publication.*, Grouting, Louisiana.

(접수일자 2005. 2. 23, 심사완료일 2006. 4. 7)