

## 시공조건이 시멘트계 고화토의 투수계수에 미치는 영향 Effects of Some Construction Variables on the Hydraulic Conductivity of Soil-Cement in Low Permeable Applications

정문경<sup>1)</sup>, Moonkyung Chung, 김강석<sup>2)</sup>, Kang-Suk Kim, 우제윤<sup>3)</sup>, Je-Yoon Woo

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engr. Dept., KICT

<sup>2)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Civil Engr. Dept., KICT

<sup>3)</sup> 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원, Research Fellow, Civil Engr. Dept., KICT

**SYNOPSIS** : Hydraulic conductivity of soil-cement was measured as a function of some selected construction variables that are often encountered in practice. They are initial (or compaction) water content, delayed compaction after mixing, and repeated freezing and thawing. Sandy and clayey soils were used. The hardening agent used was a cement based soil stabilizer consisting of 80% of ordinary Portland cement and 20% of a combination of supplementary materials. Hydraulic conductivity of soil-cement with varying initial water content was, in trend, similar to that of compacted clay. Hydraulic conductivity of soil-cement decreased with increasing initial water content and reached its minimum when compacted wet of optimum water content. Pore size distributions of soil cement at different initial water contents were analyzed using mercury intrusion porosimetry. The analysis showed that dryer condition led to the formation of larger pores with lesser total pore volume; smaller pores with larger total pore volume at wetter condition. Hydraulic conductivity of soil-cement increased by orders in magnitude when specimen underwent delayed compaction of longer than 4 hours after mixing and repeated freezing and thawing.

**Key words** : soil cement, hydraulic conductivity, initial water content, delayed compaction, freeze and thaw, mercury intrusion porosimetry, landfill

### 1. 서 론

현대적인 위생매립장에는 오염물질 이동과 확산을 막는 차단층으로서 대개 지오펜브레인과 다짐된 자연광물 차수층이 설치되어 있다. 점토차수층이 가장 일반적이며, 그 물성과 여러 가지 조건하에서의 거동에 대해서 많은 연구가 이루어져 왔다. 점토차수층의 시공에 대한 총괄적인 안내서는 문헌에 있다(US EPA, 1993). 만약 매립장이 건설되는 지역에서 차수층 조성에 사용할 흙에 점토 함량이 충분하지 않은 경우에는 차수층의 기준인  $1 \times 10^{-9} \text{cm/s}$  이하의 투수계수를 만족시키기 위해 수 %의 벤토나이트를 첨가하기도 한다. 그러나 점토 성분의 흙을 구하는 것이 용이하지 않거나 벤토나이트 첨가가 비경제적일 경우에는 여전히 차수층 건설을 위해 기존의 점토를 대체할 수 있는 물질의 사용이 필요하다. 이러한 이유로 우리 나라에서는 고화토(soil-cement)를 이용한 매립장 차수층의 건설이 보편화되어 있다.

본 논문에서는 고화토로 차수층을 시공할 경우 현장에서 흔히 겪게 되는 시공 조건인 혼합시 초기함수비, 혼합후 다짐까지의 지연시간, 동결/융해가 고화토의 투수계수에 미치는 영향을 밝히고자 수행한 투수실험 결과를 제시하였다. 또한 초기함수비가 투수계수에 미친 영향의 원인을 고화토의 미세구조를 분석하여 해석하였다.

## 2. 실험재료

경기도 지역 건설현장에서 구한 두 가지의 흙을 사용하였다. 통일분류법으로 SP-SM과 CL로 각기 구분되는 실트질 모래와 소성이 작은 점성토로서 그 물성은 표 1에 나타내었다. 유기물질의 함량은 흙 시료를 110 °C 건조로에서 24시간 건조시킨후 430 °C에서 연소시켜 구하였다. 전체시료에 대한 유기물질 함량은 점성토에서 사질토보다 높았지만, 200번체를 통과한 시료에 대한 유기물질의 함량은 사질토에서 더 높았다. 전체 흙 시료 무게의 3% 미만의 유기물질은 고화토에서 고화과정에 큰 영향을 주지않는다고 보고, 유기물질의 성분을 밝히기 위한 추가적인 화학분석 수행하지 않았다.

실험에 사용된 고화제는 시멘트계 고화제로서 지역 고화제 생산체로부터 공급받았다. 보통 포틀랜드 시멘트가 80%를 차지하고 있으며, 나머지를 CSA(calcium sulpho-aluminate) 시멘트와 마이크로실리카의 다른 여러 가지 물질들이 포함되어 있다. 고화제 제 성분의 정확한 내역과 구성비는 다른 상품화된 고화제에서 처럼 공개되지 않았다.

마이크로실리카 혹은 silical fume은 규산철 혹은 규산철 합금의 제조과정에서 발생하는 산업부산물을 말한다. 콘크리트에 사용되면 크리스탈 크기의 칼슘수화물 입자를 파열시켜 양생 초기 시멘트의 수화를 촉진하는 역할을 한다(Detwiler et al., 1988). 마이크로실리카의 이와 같은 촉매 효과는 탄화칼슘과 같은 불활성의 채움재를 사용해도 얻을 수 있다(ACI, 1998). 경화된 콘크리트에서는  $\mu\text{m}$  크기의 간극을 메꾸으로써 골재-시멘트의 내부 구조를 더욱 치밀하게 하는 효과가 있다. 사용된 마이크로실리카에는 99.5%가 산화규소이며, 평균 직경은  $2.9\mu\text{m}$ 이며 비표면적은  $525\text{m}^2/\text{g}$ 이다.

사용된 CSA 시멘트는 고화제 생산체로부터 공급받았으며, 반응에 필요한 산화알루미늄의 원천으로서 보크사이트(bauxite) 대신 명반석(alunite)을 사용한 것이다. 물과 반응하여 CSA 시멘트는 에트링가이트(ettringite)라고 알려진 high-sulphate calcium sulphoaluminate ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ )를 생성한다. 에트링가이트는 형성 정도에 따라, 크기가  $1\mu\text{m}$  정도의 비정형 결정체에서부터 십 수  $\mu\text{m}$  크기인 바늘모양의 결정체가 되며, 이들 결정체가 3차원의 격자망을 형성하여 고화토 내부구조를 치밀하게 만든다.

표 1. 실험에 사용된 흙의 물성

명칭	비중	$<74\mu\text{m}(\%)$	$D_{10}(\text{mm})$	액성한계(%)	소성지수(%)	통일분류	유기물함량(%)	
							$<74\mu\text{m}$	전체
사질토	2.60	10.8	0.060	34.3	3.1	SP-SM	2.91	1.40
점성토	2.66	82.4	0.001	35.2	12.0	CL	1.65	2.41

비고: 유기물함량을 구할 때 200번체를 통과한 시료와 전체흙에 대해서 별도로 측정하였다.

표 2. 고화제의 화학조성

산화물	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{SO}_3$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	강열감량
(%)	26.7	10.5	2.31	45.4	4.25	1.47	3.21	0.63	0.46	5.07

## 3. 실내실험

### 3.1 투수시험

고화제를 사질토 혹은 점성토와 4% 및 8% 비율로 혼합하였다. 혼합비는 고화제의 중량 대 건조 흙의 중량비이다. 혼합된 흙-시멘트를 몰드에 넣고 수정 Proctor 다짐법으로 다짐하였다. 사질토는 최적함수비( $\omega_{opt}$ )가 10.7%, 최대건조밀도( $\rho_{d,max}$ )가  $1.98\text{Mg}/\text{m}^3$ 이었고, 점성토는  $\omega_{opt}=16.3\%$ ,  $\rho_{d,max}=1.87\text{Mg}/\text{m}^3$ 이었다.

다짐시 초기함수비가 고화토의 투수계수에 미치는 영향을 연구하였다. 시험에서는 최적함수비를 기준으로 건조측으로 6%부터 습윤측으로 9%까지 함수비를 조절하였다. 다짐후, 온도 20 °C, 상대습도 95% 이상인 항온항습조에서 양생하였고, 28일 양생후 강성벽 투수기에서 변수위투수시험법으로 투수계수를 측정하였다.

혼합후 다짐까지의 지연시간에 대한 실험에서 흙 시료를 주어진 혼합비로 고화제와 최적함수비 상태에서 혼합하였다. 혼합후 시료를 평면 유리에 펼쳐놓고 0.5에서 24시간 동안 대기하였다. 다짐과 양생방법은 초기함수비 영향 실험 때와 같다.

반복적인 동결/융해가 고화토에 미치는 영향을 실험하였다. 시료준비는 ASTM D560-96을 따랐는데, 이 방법은 원래 동결/융해를 받은 고화토의 무게 손실을 측정하는 방법이다. (1) 흙과 고화제를 혼합하고 최적함수비 상태에서 직경 5cm, 높이 10cm 몰드에서 다짐한 후 시료를 추출한다. (2) 처음 7일 동안 전술한 조건의 항온항습기에서 양생한다. (3) -23 °C의 냉동고에 24시간 넣고, (4) 다시 온도 21 °C, 습도 95% 이상의 항온항습기에서 23시간 동안 넣어 둔다. 동결과 융해과정을 모두 12번 반복한 후, Geocom 사의 연성벽 투수시험기인 Flow Track 장비로 투수계수를 측정하였다.

### 3.2 간극의 크기 및 분포 측정

초기함수비의 투수계수에 대한 영향 측정을 위해 준비한 시료에 대하여, 수은침투법(MIP, Mercury Intrusion Porosimetry)을 이용하여 고화토 시료의 간극 크기와 분포를 측정하였다. 사용한 장비는 Micrometric Instrument사의 Autopore III 940 모델로서, 간극 측정범위는 6.5nm에서 350 μm이다. 수은침투법에서 수은은 어떤 다공 매체의 표면을 적시지 않으며(non-wetting), 외부 압력이 가해지지 않으면 매체내로 침투하지 않는다고 가정한다. 필요한 침투압은 침투액의 접촉각, 간극의 형상, 표면장력의 함수이다(Diamond, 1970). 가해진 압력과 표면장력이 평형을 이룰 때, 원주형 간극의 최소 직경을 이론식으로 계산한다.

고화토 시료는 초기함수비의 영향 시험에서와 같은 방법으로 준비되고 양생되었다. 각 조건의 시료에서 크기가 약 0.4cm<sup>3</sup> 되는 원주형의 조각을 세 개씩 절단, 성형하여 간극분포해석에 이용하였다.

## 4. 결과 및 토론

### 4.1 초기함수비의 영향

그림 1에 초기함수비에 따른 고화토의 투수계수 실험결과를 나타내었다. 측정된 투수계수는 사질토와 점성토 시료 모두 함수비가 증가할수록 감소하다 최적함수비 보다 6% 습윤측에서 최소값을 나타내었으며 다시 증가하였다. 이는 순수 점성질 흙에서 함수비에 따른 투수계수의 경향(Daniel and Benson, 1990; Mitchell, 1993)과 동일한 것이다. 주어진 함수비의 영역에서 투수계수의 감소 정도는 점성토 시료에서 3승, 사질토 시료에서 1승 정도였다. 즉, 고화토에서 원토가 점성토일 때 사질토인 경우에 비해 훨씬 민감하게 초기함수비에 영향을 받았다. 이는 점성토 시료에는 물에 대해 독특한 표면특성을 보이는 점토입자가 사질토 시료에서 보다 훨씬 많았기 때문이다. 수은침투법으로 분석한 고화토의 간극분포특성을 사질토 시료의 경우 그림 2에, 점성토 시료의 경우 그림 3에 나타내었다. 그림에서 Y축은 건조된 시료의 단위 무게당 서로 다른 유효 간극 크기에 해당하는 간극의 부피이다. 동일한 초기함수비를 가진 시료에서 만든 3개의 샘플로부터 우세한 간극 단위의 분포와 크기에 있어 거의 같은 MIP 결과를 얻을 수 있었다.

그림 2(a)에 나타난 바와 같이 사질토-고화제의 시료를 최적함수비 기준 6% 건조측으로 다짐한 경우 간극의 분포는 크기가 서로 다른 주류 간극이 다수 존재하는 형태(multi-modal)로서, 그 중 직경이 0.5 μm와 2 μm인 간극이 돋보인다. 직경 200 μm 이상에서 정점이 있지만 이는 분석장비의 측정한계 근처에서 보이는 측정 오류로 생각된다. 그림 2(b)에서와 같이 최적함수비로 다져진 시료에서는 더 많은 수

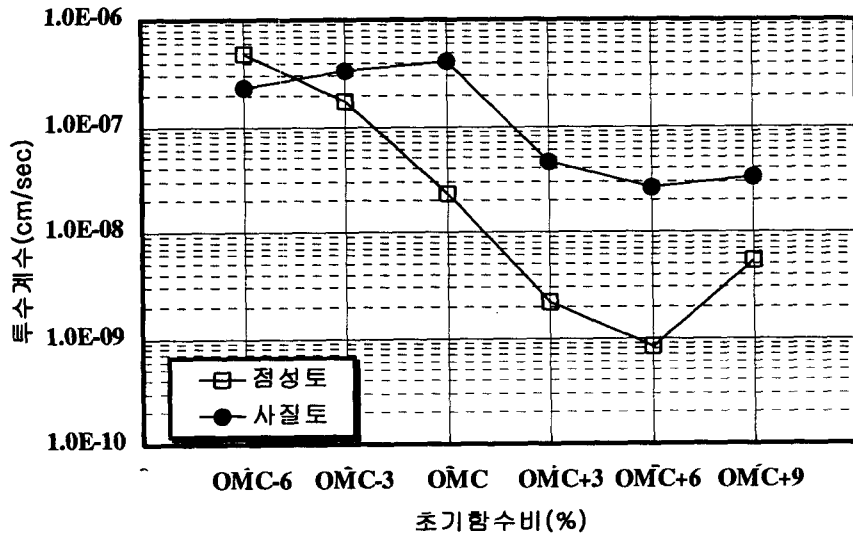


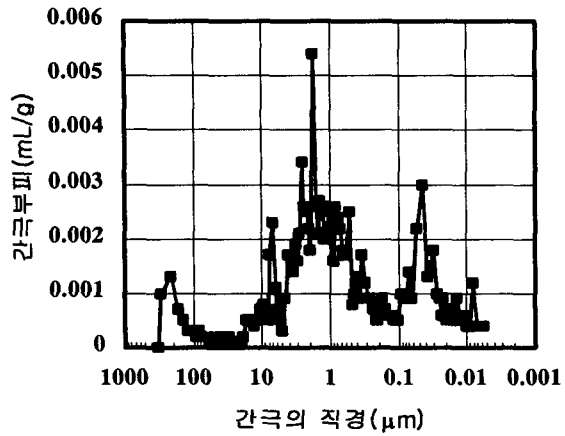
그림 1. 초기함수비에 따른 고화토의 투수계수 변화

의 피크(peak) 직경을 볼 수 있고, 주류 간극은  $2\mu\text{m}$ 보다 작았다. 이 경우 작은 간극의 주류 크기는 약  $0.05\mu\text{m}$ 이었다. 그림 2(c)에서 보인 흡윤측으로 다져진 시료의 간극분포 경향은 건조측 시료라기 보다는 최적함수비 시료와 유사함을 관찰할 수 있으며, 특징적인 크기  $0.05\mu\text{m}$ 의 간극은 여전히 발견되었다.

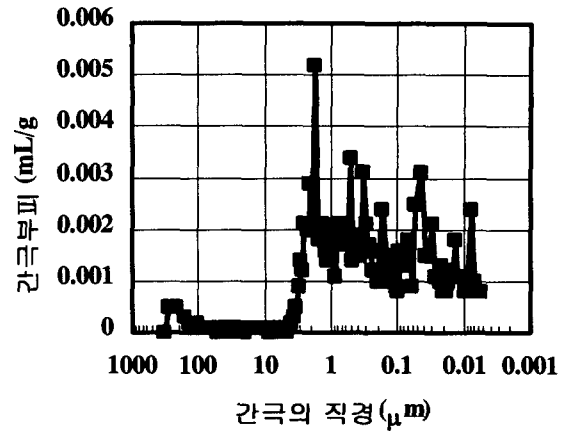
그림 3에 점성도와 고화제를 함수비를 달리하며 혼합, 다짐한 시료의 간극의 크기 및 분포 특성을 나타내었다. 초기함수비가 건조측에서 흡윤측으로 이동할 때, 우세한 간극의 무리는 더 작은 간극 영역으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 사실도 시료에서와 같이 주류 간극이 다수 존재하는 형태를 보였다.

MIP 분석결과는 건조 시료의 단위 무게 당 간극의 총 부피인 누적 간극 부피로 표현할 수 있다. 누적 간극 부피는 초기함수비가 증가할수록 다소 증가하였다. 흙의 종류와 관계없이 최적함수비를 기준하여 건조측으로 다져진 시료의 총 간극 부피는 약  $0.13\text{mL/gm}$ 이었고, 흡윤측으로 다져진 시료에서는 약  $0.17\text{mL/gm}$ 이었다. 이는, 주어진 실험조건하에서는, 만약 비교 시료간에 총 간극 부피의 편차가 크지 않다면, 간극의 부피보다는 간극의 분포특징이 투수계수에 더 큰 영향을 준다는 것을 의미한다. 즉, 관찰된 바는 많은 수의 작은 간극 보다는 적은 수의 큰 간극이 물이 흘러갈 수 있는 경로를 만들 수 있는 확률이 더욱 크고 따라서 결과적인 투수계수가 상대적으로 커진다는 순수 점토에서 밝혀진 현상과 같은 맥락에 있다.

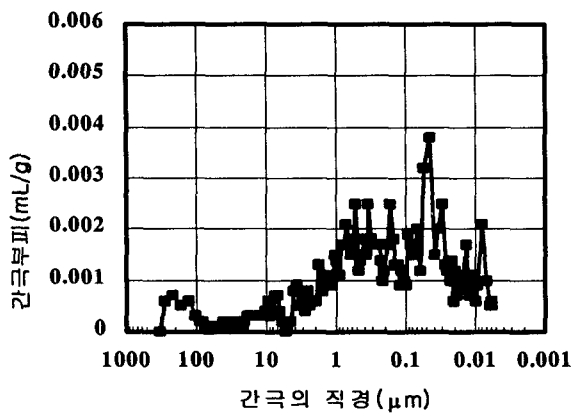
고화토가 순수점토보다 훨씬 더 복잡한 간극 분포 특성을 가지고 있음을 MIP 분석으로부터 알 수 있었다. 다져진 순수 점토는 초기함수비에 따라 주류 간극이 두 개이거나 하나인 형태를 보였다 (Garcia-Bengochea and Lovell, 1981). 점토의 이런 특성은 최적함수비의 건조측에서 점토는 주로 면모화된 구조를 가지는 것에 반해 흡윤측에서는 적은 수의 단립체가 존재하는 분산화된 구조를 지닌다는 사실과 관계가 있다. 한편 고화토에서는 시멘트 혹은 시멘트계 고화제가 복잡한 화학반응을 통해 여러 가지 다른 형태와 크기를 가진 수화물을 흙 입자 표면과 간극에 형성하며 또한 간극수의 화학적 환경을 크게 변화시킨다. 그림 4는 혼합비 10%로 고화제와 흙을 혼합, 다짐한 후 28일간 양생한 고화토의 미세 구조를 전자주사현미경으로 촬영한 것이다. 언급한 모든 요인들이 MIP 분석으로부터 밝혀진 바와 같이 흙 입자의 미세 구조에 어느 정도 영향을 줄 것이다. 그러나, 고화토의 조성시 혼합비가 사실도의 경우 대개 4~8%, 점성도의 경우 8~12%인 것(PCA, 1978)을 고려하면, 이 정도의 고화제 양은 혼합토내 모든 흙 입자의 미세 구조를 바꾸거나 영향을 줄 만큼 크지 않은 것으로 생각된다. 따라서 상당히 많은 양의 흙 입자는 시멘트 화학반응으로부터 영향을 입지 않았을 것이고, 그 결과 고화토 또한 순수 점토에서처럼 초기함수비에 따른 투수계수에 있어 같은 경향을 보인 것으로 판단된다.



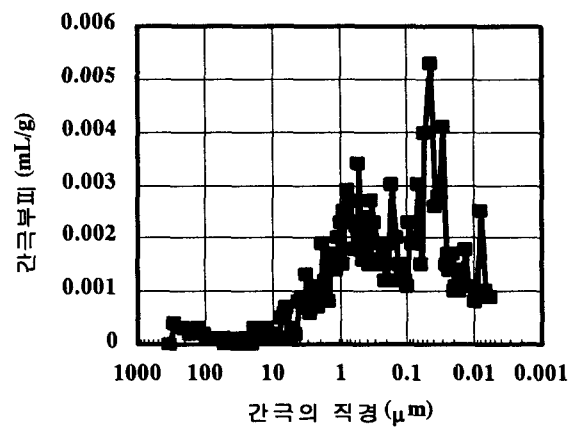
(a)  $\omega = \text{최적함수비} - 6\%$



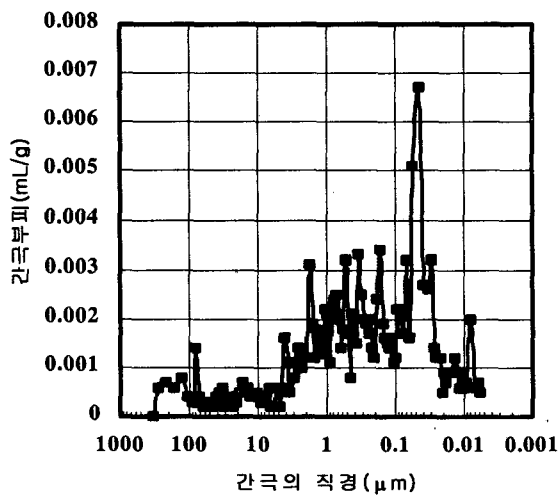
(a)  $\omega = \text{최적함수비} - 6\%$



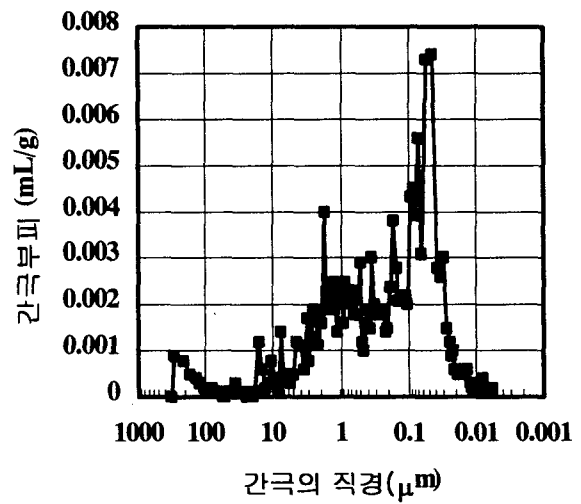
(b)  $\omega = \text{최적함수비}$



(b)  $\omega = \text{최적함수비}$



(c)  $\omega = \text{최적함수비} + 6\%$



(c)  $\omega = \text{최적함수비} + 6\%$

그림 2. 사질토 시료에서 초기함수비에 따른 간극의 크기와 분포

그림 3. 점성토 시료에서 초기함수비에 따른 간극의 크기와 분포

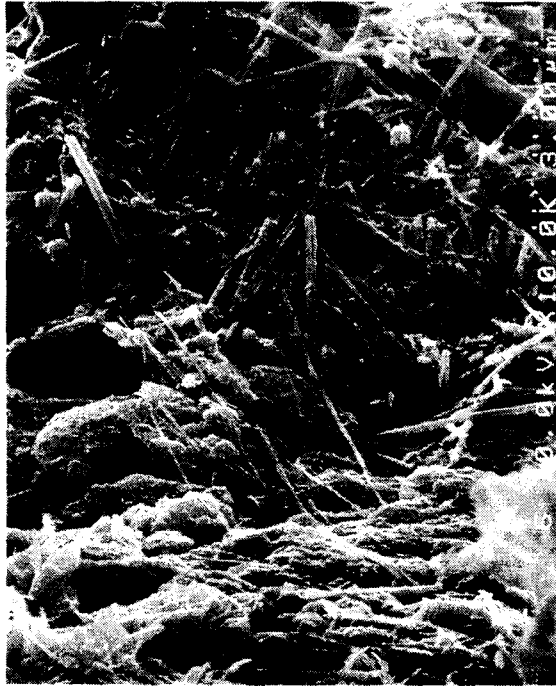


그림 4. SEM으로 촬영한 고화토의 미세구조 - 점성토에 고화제 혼합을 10%, 28일 양생 후

#### 4.2 다짐 지연의 영향

그림 5에 점성토 시료에 대한 투수계수계수 실험 결과를 나타내었다. 흙과 고화제를 물과 함께 혼합한 후 의도적으로 다짐을 지연시킨 결과, 지연시간이 4시간이 넘지 않을 때까지는 다짐 후 투수계수에 큰 증가가 없음을 알 수 있다. 지연시간이 4시간이 넘어서는 투수계수가 약 1승 정도 증가하였다. 일반적으로 고화토의 시공에 있어 밀도와 강도의 치명적 손실을 입지 않기 위한 혼합 후 다짐까지의 지연시간을 2시간으로 정하고 있는데(ACI, 1998), 이는 저투수계수가 가장 중요한 차수층으로서 고화토를 시공할 때에도 동일하게 적용될 수 있다.

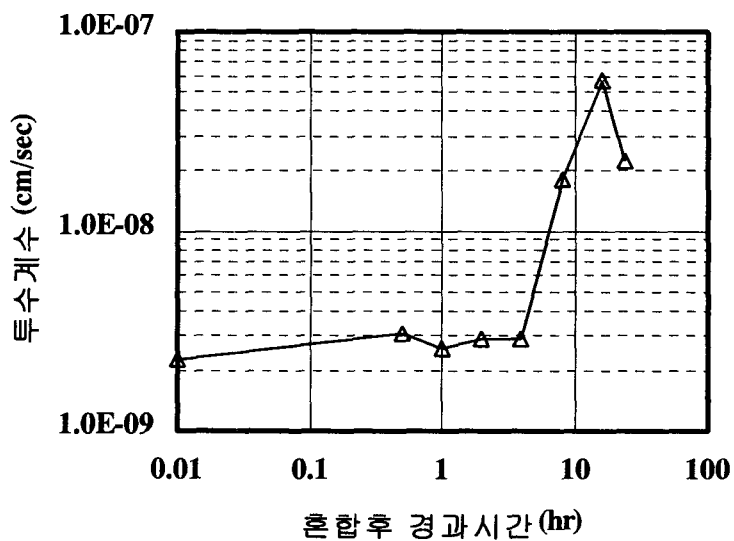


그림 5. 고화토 시공시 혼합 후 다짐까지 지연시간이 고화토의 투수계수에 미치는 영향

## 4.2 동결 융해의 영향 영향

동결/융해를 12회 반복한 고화토에 대한 투수실험 결과를 표 3에 나타내었다. 모든 시료에서 투수계수가 증가하였다. 고화토에서의 투수계수 증가 정도는 순수한 흙을 다짐한 시료에서 보다 매우 커서 고화토의 경우 약 백배 증가한 반면 순수점토의 경우 약 열배 증가하였다.

투수계수가 증가한 것은 건조와 동결 과정에서의 얼음 눈(ice lenses)의 발달에 의한 크랙(crack)의 형성에 기인한다. 고화토가 융해를 겪게 되면 이 크랙은 물이 흘러가는 경로를 형성하게 되는 것이다. 이와 같은 현상은 순수점토에 대해 연구된 바(Benson et al., 1995; Kraus et al., 1997))와 유사하다. 고화토의 미세구조를 고려할 때, 일단 얼음 형성 과정에서 생긴 크랙은 융해과정에서도 다시 자가 치유되는 정도가 순수 점토에서보다 덜 할 것으로 생각된다. 그 결과 반복적인 동결, 융해를 받았을 때 투수계수의 증가가 순수 흙 시료보다 고화토에서 더 컸던 것으로 판단된다.

표 3. 반복적인 동결, 융해를 받은 고화토의 흙에 대한 투수시험 결과

사용된 흙의 분류	순수한 흙만 다진 경우		고화토의 경우	
	동결/융해를 받지 않은 상태	동결/융해 후	동결/융해를 받지 않은 상태	동결/융해 후
사질토	$9.6 \times 10^{-7}$ cm/s	-	$4.0 \times 10^{-7}$ cm/s	$4.6 \times 10^{-5}$ cm/s
점성토	$1.1 \times 10^{-7}$ cm/s	$1.6 \times 10^{-6}$ cm/s	$2.3 \times 10^{-8}$ cm/s	$7.4 \times 10^{-6}$ cm/s

## 5. 결론

본 논문에서는 초기함수비, 혼합후 다짐까지 지연시간, 반복적인 동결/융해가 고화토에 투수계수에 미치는 영향에 대한 실험결과를 제시하였다. 고화토에서 초기함수비와 투수계수의 관계는 순수 점성토를 다진 경우와 그 경향에서 같았다. 초기함수비가 증가할수록 고화토의 투수계수는 감소하였으며, 최적함수비를 기준하여 습윤측에서 최소값을 나타내었다. 수은침투법으로 고화토의 간극 크기와 분포를 분석한 결과, 다수의 주류 간극이 발견되었으며, 미세한 간극군은 초기함수비가 최적함수비의 건조측에서 습윤측으로 증가할 때, 좀 더 작은 크기의 간극 영역으로 이동함을 알 수 있었다. 고화토의 간극 크기 특성이 복잡하기는 하지만, 일반적인 고화제의 혼합비에서는 첨가된 고화제가 초기함수비에 따른 투수계수의 변화에 직접적으로 관련있는 흙 입자의 표면 구조를 모두 바꾸거나 영향을 주기에 충분하지 않으므로 생각된다. 고화토를 혼합하고 다짐이 4시간 이상 지연되었을 경우, 주어진 시험조건에서는 투수계수가 급격히 증가하였다. 고화토의 시공에서 일반적인 시공 기준인 최대 2시간의 지연시간을 저투수성이 요구되는 차수층의 경우에도 동일하게 적용될 수 있다. 반복적인 동결/융해는 고화토의 투수계수에 크게 영향을 주며, 투수계수의 증가 정도는 고화토의 경우가 순수 점토의 경우보다 훨씬 더 컸다.

## 참고문헌

1. U.S. EPA. (1993) Quality Assurance and Quality Control for Waste Containment Facilities, EPA/600/2-88/052, U.S. EPA, Cincinnati, Ohio, USA.
2. Detwiler, R.J., Monteiro, P.J.M., Wenk, H.R., and Zhong, Z. (1988) "Texture of Calcium Hydroxide near the Cement Paste-Aggregate Interface", Cement and Concrete Research, Vol. 18, No. 5, pp. 823~829.
3. American Cement Institute (1998) "Use of Silica Fume in Concrete", Manual of Concrete Practice, Part I - Materials and General Properties of Concrete, ACI 234R-96, ACI, pp. 234R-1~234R-51.

4. Diamond, S. (1970) "Pore Size Distribution in Clays", *Clays and Clay Minerals*, Vol. 18, No. 1, pp. 7~23.
5. Daniel, D.E., and Benson, C.H. (1990) "Water Content-Density Criteria for Compacted Soil Liners", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 12, pp. 1811~1830.
6. Mitchell, J.K. (1993) *Fundamentals of Soil Behavior*, 2nd Ed., John Wiley and Sons, New York, New York.
7. Garcia-Bengochea, I., and Lovell, C.W. (1981) "Correlative Measurements of Pore Size Distribution and Permeability in Soils", *Permeability and Ground Water Contaminant Transport*, ASTM STP 746, Philadelphia, PA., pp. 137~150.
8. PCA(1978) *Soil-Cement Construction Handbook*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.
9. American Cement Institute (1998) "State-of-the-Art Report on Soil Cement", *Manual of Concrete Practice, Part I - Materials and General Properties of Concrete*, ACI 230.1R-1, ACI, pp. 230.1R-1~230.1R-23.
10. Benson, C., Abichou, t., Olson, M., and Bosscher, P. (1995) "Winter Effects on the Hydraulic Conductivity of a Compacted Clay", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 1, pp. 69~79.
11. Kraus, J.F., Benson, C.H., Erickson, A.E., and Chamberlain, E.J. (1997) "Freeze-Thaw Cycling and Hydraulic Conductivity of Bentonite Barriers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 3, pp. 229~238.