

## 酸 이동에 따른 심층혼합기둥체 차수벽의 성능변화

Changes of Performance of Soil-Cement Barrier due to Migration of Acids

정문경<sup>1)</sup>, Moonkyung Chung, 천찬란<sup>2)</sup>, Chan Lan Chun, 이주형<sup>3)</sup>, Juhjung Lee, 김강석<sup>4)</sup>, Kangsuk Kim

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 수석연구원, Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology

<sup>2)</sup> 미네소타주립대 박사과정, PhD Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Minnesota

<sup>3)</sup> 한국건설기술연구원 연구원, Researcher, Korea Institute of Construction Technology

<sup>4)</sup> 한국건설기술연구원 연구원, Researcher, Korea Institute of Construction Technology

**SYNOPSIS** : Soil-cement column is often used as a contaminant barrier. This study presents the results of experimental study performed to investigate the changes of properties of soil-cement column under the attack of acids. Sulfuric nitric, and ascetic acid were used as contaminants. Specimen were made of clayey and sandy soils with addition of cement and water. Permeability of soil-cement decreased with time during permeability test. When significant amount of acid percolated the specimen, permeability increased and compressive strength decreased due to the dissolution and leaching of cement and its chemical reaction compounds. Sulfuric and nitric acid were more effective than ascetic acid in deteriorating soil-cement column. Amount of acid required to lower the pH of soil cement below 12 was calculated from the results of permeability tests. This leads to a conclusion that, under the conditions employed in this study, the chemical stability of soil-cement column could be maintained against acid attack for longer than generally accepted lifetime of contaminant barriers.

Key words : contaminant barrier, soil cement, acid, permeability, chemical stability

### 1. 서 론

시멘트, 석회 등의 지반개량제를 지반에 공급해서 기계적으로 원지반 흙과 혼합하고, 고결작용에 의해 기둥체를 형성하는 심층혼합공법은 제방의 차수벽, 지수를 겸한 토류벽, 연약지반 보강 등의 전통적인 지반공학적 용도로 사용된다. 그 외에 심층혼합 기둥체를 연속적으로 지중에 설치하여 오염부지를 차폐하는 용도로도 국내외적으로 널리 활용되는데, 심층혼합 기둥체를 이용한 차수벽 공법은 기존의 슬러리 차수벽 공법에서 필요한 굴착공정이 없어 위생과 안전에 관련한 위험을 최소화할 수 있고, 또한 상당히 두꺼운 벽체를 형성하므로 vibrating beam wall 보다 기능상 신뢰도가 높다(Rumer and Ryan, 1995).

오염지반의 차폐를 목적으로 심층혼합공법이 적용되었을 경우, 오염환경에서 오염물질과 차수벽 구성 물질간의 안정성은 차수벽이 만족시켜야하는 주요 요건 중의 하나이다(Gerber and Fayer, 1994). 차단벽인 심층혼합 기둥체는 반영구적인 구조물이기는 하나 장기적이고 지속적으로 주변 지반의 화학물질과 반응을 일으킬 수 있다. 특히 酸과 같은 무기성 오염물질은 시멘트를 용출시킴으로써 기둥체의 물성을 변화시켜 내구성을 감소시키고, 황산염이 있는 경우 시멘트의 응결시간을 지연시키며 지반개량제의 팽창 및 균열을 야기시킬 수 있는 것으로 알려져 있다(Glasier, 1997; EPA, 1998). 본 연구에서는 산의 이동에 따른 심층혼합 차수벽의 투수계수, 강도, 성능변화 등 화학적 안정성을 실내실험을 통하여 밝혔다.

## 2. 실험방법

### 2.1 재료 및 오염물질

원지반을 대표하는 흙으로써 모래질 흙과 점토질 흙 2종류를 사용하였다. 모래질 흙은 통일분류법으로 SP에 해당하며 200번체 통과율이 1.7%,  $D_{10}$ 이 0.17mm였다. 점토질 흙은 CL로 분류되며, 200번체 통과율이 75.4%, 액성한계가 35.2%, 소성지수가 12.0%였다.

심층혼합 기동체를 모사한 공시체를 만들 때 사용한 지반개량제는 보통 포틀랜드 시멘트이다. 실제 현장에서 사용되는 지반개량제는 다양한 종류가 있고, 시멘트를 근간으로 하는 소위 시멘트계 지반개량제도 성분과 구성에 있어 다종 다양하다. 따라서 본 연구에서는 시멘트만을 사용함으로써 시멘트계 지반개량제를 이용한 심층혼합기동체를 연구하되 지반개량제에 포함되어 있는 시멘트 외의 기타 특수물질들의 영향을 배제하고자 하였다.

황산( $H_2SO_4$ ), 질산( $HNO_3$ ), 아세트산( $CH_3COOH$ ) 등 3종류의 산을 오염물질로 사용하였다. 무기산의 대표로서 황산과 질산을 선택하였고 유기산의 대표로 아세트산을 선택하였다. 산의 세기를 나타내는 척도로서 산의 이온화 평형상수인 산해리상수( $\text{Log } K_a$ )는 황산이 3, 질산이 0, 아세트산이 -4.7이다.

### 2.2 시료제작 및 실험

모래 혹은 점토질 흙시료, 시멘트, 물을 섞어 지름 5cm, 높이 10cm의 원기둥형 공시체를 일본기준(JSF T31-83, 다지지 않은 안정처리토의 시험방법)을 따라 제작하였다. 이때 사용된 지반개량제의 양은 지반개량제의 건조중량 대 흙의 건조단위중량 비  $a_w$ 기준으로 모래 및 점토 공시체 똑같이 15%이다. 이를 현실적으로 해석하면 개량대상토 1m<sup>3</sup>당 지반개량제 첨가량은 모래공시체의 경우 220kg이고 점토공시체의 경우 150kg이다. 본 실험에서 사용한 지반개량제의 혼합비는 실제 시공에 사용되는 혼합비에 해당함을 알 수 있다(정문경 등, 2001). 물 시멘트비는 1:1.5이었다. 각각의 공시체를 위해 PVC 파이프를 길이 15cm 이상 준비, 붓으로 다짐하여 공시체를 제작하였고, 온도 20~25 °C, 습도 95% 이상의 습윤조에서 28일간 습윤양생후 PVC 파이프의 시료를 강도시험 및 투수시험에 맞게 절단하였다.

투수시험은 그림 1의 연성벽 투수시험기를 사용하였다. 28일간 양생이 된 공시체를 장착하여 실험하였고 침투수로 황산, 질산, 아세트산을 사용하였다. 투수시험의 대조군으로 증류수를 침투수로 사용하였다. 투수시험개요를 표 1에 나타내었다. 증류수를 사용한 경우에는 미생물에 의해 유로가 차단되는 방해효과(Sharma and Lewis, 1984)를 제거하기 위하여 0.05% sodium azide를 첨가하였다. 준비된 공시체를 투수시험기에 장착하고 먼저 질소가스로 가압하여 공시체를 증류수로 포화시켰다. 이는 공시체의 초기 투수계수를 알기 위함이고 또 다른 이유는 일부 오염용액의 경우 바로 당해 용액으로 투수시험을 시작하면 공시체가 포화되기까지 상당한 시간이 걸리기 때문이다. 증류수로 초기 투수계수를 측정한후 약액통의 증류수를 오염용액으로 치환하고 투수계수를 측정하였다. 투수실험과정에서 약액통에 가해진 압력은 모래의 경우 27.6~48.3kPa, 점토의 경우 48.3~96.6kPa이고 압력셀에 가해진 구속압력은 137.9kPa였다. 투수시험이 진행된 기간은 2~5달이다. 투과용액의 pH를 모든 시료에 대해 측정하였다. pH를 측정함으로써 시멘트와 흙 혼합물의 구성을 추정하고 공시체내의 안정성 여부를 쉽게 확인할 수 있기 때문이다(Shi and Stegemann, 2000).

세 그룹의 공시체의 일축압축강도를 측정하였다. 첫 번째는 28일간 습윤양생된 공시체로 투수시험이 진행되기전의 시료이며, 두 번째는 투수시험이 시행된 후의 공시체, 세 번째는 투수시험이 진행되는 동안 0.1 M  $Ca(OH)_2$  용액에서 보관된 공시체다. 세 번째 그룹의 공시체는 투수시험 기간동안 공시체가 계속 양생되므로 그 기간의 오염물질 만의 영향을 보기 위해 대조군으로 진행되었다.  $Ca(OH)_2$  용액을 사용한 것은 공시체 내의 Ca 성분들이 용출되지 않기 위함이다(Martys and Ferraris, 1997).

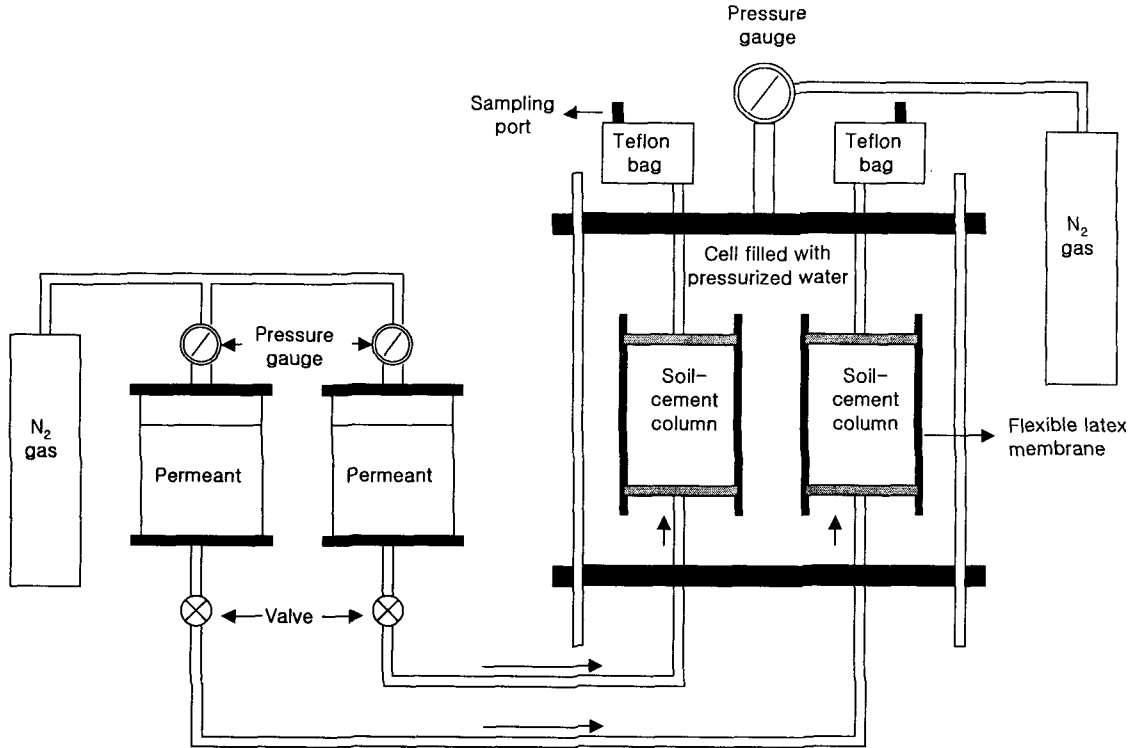


그림 1. 실험에 사용한 투수시험기의 모식도 (화살표는 침투액의 흐름방향)

표 1. 투수시험시 침투수로 사용된 오염물질의 적용 농도

분류	화학	시약	농도(%)	농도(M)	용매(Base Solution)
대조군	증류수	-	-	-	
산성 물질	황산	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.2 1	0.020 0.101	증류수
	질산	HNO <sub>3</sub>	1	0.158	증류수
	아세트산	CH <sub>3</sub> COOH	1 25	0.167 4.166	증류수

### 3. 실험결과

#### 3.1. 투수계수 및 pH

28일 양생된 공시체에 대해 증류수를 이용하여 투수시험을 하였다. 본 연구에서 적용한 배합조건에서 점토공시체는  $10^{-7}$ cm/s, 모래공시체는  $10^{-5}$ ~ $10^{-6}$ cm/s의 투수계수를 나타내었고 시험이 진행되는 동안 크게 변하지 않았다. 완전 포화된 공시체를 오븐 건조시켜 구한 간극부피(pore volume)는 점토 및 모래 공시체에서 각각 120ml, 50ml였는데, 투수시험은 점토공시체에서 간극부피의 약 45배, 모래공시체에서 약 250배의 침투수가 통과한 기간만큼 측정하였다. 두 종류의 공시체에서 공통적으로 pH는 약 12이상의 값을 유지하였다.

황산을 투과액으로 사용한 투수시험에서 점토공시체의 대표적인 결과를 그림 2에 나타내었다. 시험이 진행됨에 따라 투수계수가 감소하다 황산용액이 공시체를 통과하면서 투수계수가 증가하기 시작했다. pH는 투과액의 양이 약 20 간극부피를 지나면서 감소하기 시작하였고 투과액의 pH가 2보다 작아질때까지 실험을 계속하였다. 그림에서 종방향선 A는 투과액이 증류수에서 0.02% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>용액(pH≈2)으로 바뀐 시점이며, B는 0.02%에서 1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액으로 바뀐 시점, C는 공시체를 투과된 용액이 당초 투명한 색에서 황색으로 바뀐 시점이다. 황색의 용액은 pH가 4 밑으로 떨어질 때까지 계속 관찰되었다.

증류수의 결과에서 본 것과 같이 공시체의 시멘트 성분의 용출을 가속화하는 것은 증류수가 아니라 황산의 수소이온이 그 주된 역할을 한다. 결국 침출혼합기동체의 내구성을 감소시키는 것은 투과된 용액의 양보다 공시체를 통과한 황산의 양이기 때문에 투수계수의 추이를 공시체를 통과한 용액의 양으로 투수계수의 추이를 살펴본 것이 그림 3이다. 공시체를 투과한 산의 양으로 표시하였기 때문에 침투수의 농도변화는 필요 없다. 즉, 침투수의 농도가 0.02%에서 1%로 바뀌게 되고 같은 양의 용액이 투과하게 되면 공시체를 투과한 황산의 양은 고농도의 경우가 저농도의 것보다 50배 만큼 황산이 더 많이 투과한 것으로 산출하면 된다. 그림 4에 황산용액이 모래공시체를 투과할 때 투수계수와 pH의 변화추이를 통과한 황산의 양으로 나타내었다. 점토공시체에서처럼 투수계수가 시간이 지남에 따라 계속 감소하다, 투과액의 pH가 알칼리에서 중성영역으로 떨어짐에 따라 투수계수가 증가하였다.

질산으로 수행한 모래공시체에 관한 대표적 결과를 그림 5에 나타내었다. 질산은 다른 산과는 달리 수소이온에 의한 중화 반응 외에 다른 반응성이 적기 때문에 시멘트로 이루어진 물질에서 질산이 시멘트 성분을 잔류고형물 없이 용출시키기만 하였다. 황산에서와 마찬가지로 pH는 어느 순간이 되면 시멘트 공시체내 화학반응결과물의 안정성을 해치는 pH12이하로 떨어지게 되며, 투수계수는 지속적으로 감소하다 pH가 급격히 감소하는 시점에 맞추어 증가하였다.

아세트산을 이용한 점토공시체에 대한 투수시험 중 대표적인 결과를 그림 6에 나타내었다. 본 연구에서 얻은 결과 중 산이 공시체를 통과할 때 투수계수와 pH의 변화추이를 가장 극명하게 보여준다. 아세트산의 경우 다른 무기산과는 달리 투수계수가 다시 증가하면서 유출수의 pH가 12이하로 떨어지는 시점에서 붉은색 용액이 검출되기 시작하였다. 이 붉은색 용액은 pH가 4이하로 떨어지는 시점까지 지속되었다. 붉은색 용액이 다시 투명한 용액으로 바뀐 것으로 보아 이 기간 동안에 공시체의 시멘트 성분이 거의 다 용출된 것으로 생각된다.

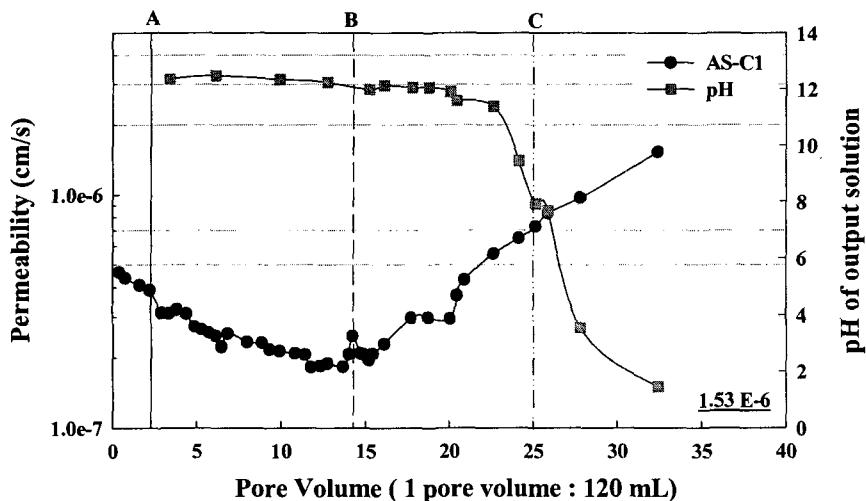


그림 2. 황산용액에 대한 점토공시체의 침투액 투과량과 투수계수 관계(AS-C1은 황산으로 실험한 점토 공시체 시료 1)

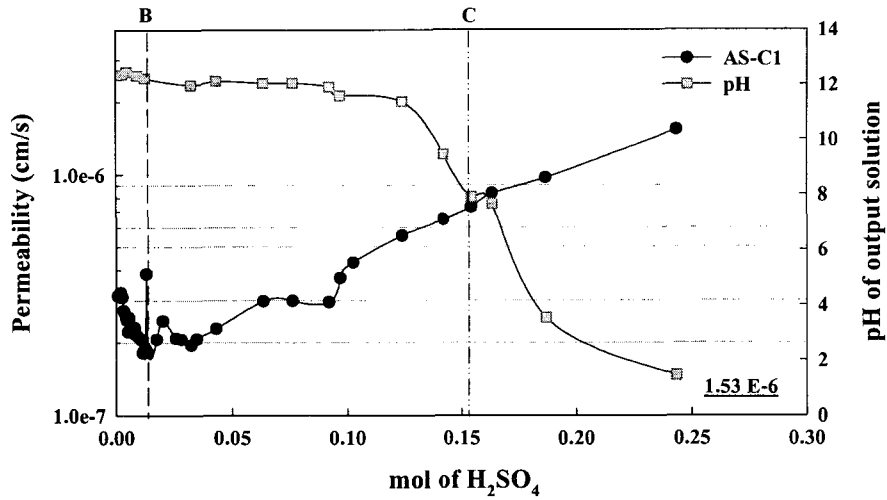


그림 3. 황산용액 침투량(mol)에 대한 점토공시체의 투수계수 추이

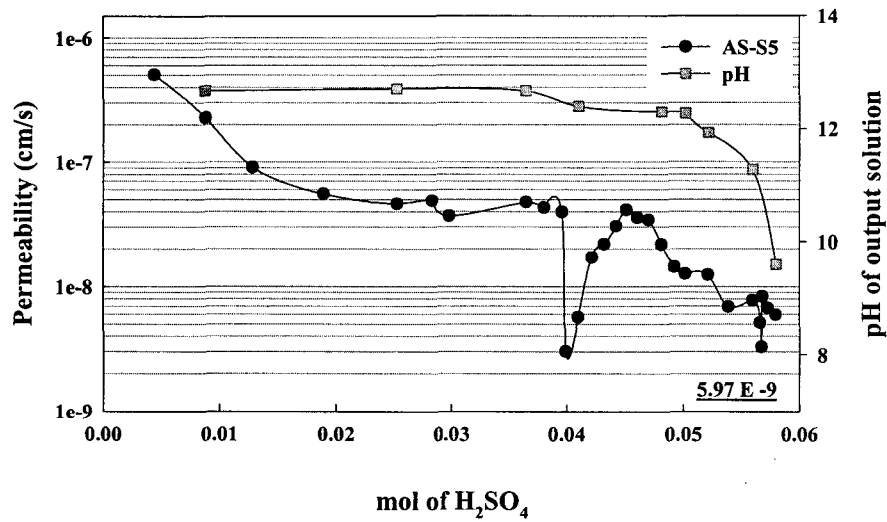


그림 4. 황산용액에 대한 모래공시체의 투수계수와 pH 변화 추이(AS-S4는 황산으로 실험한 모래공시체 시료 4)

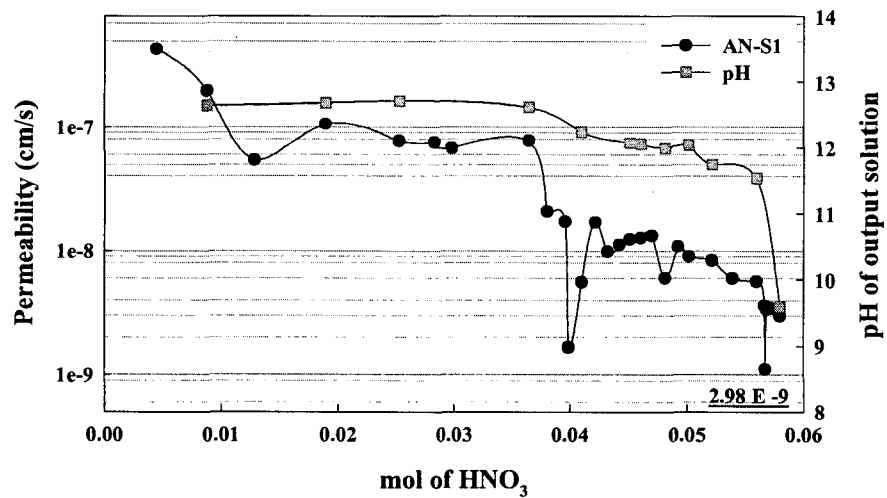


그림 5. 질산에 대한 모래공시체의 투수계수와 pH 변화 추이(AN-S1은 질산으로 실험한 모래공시체 시료 1)

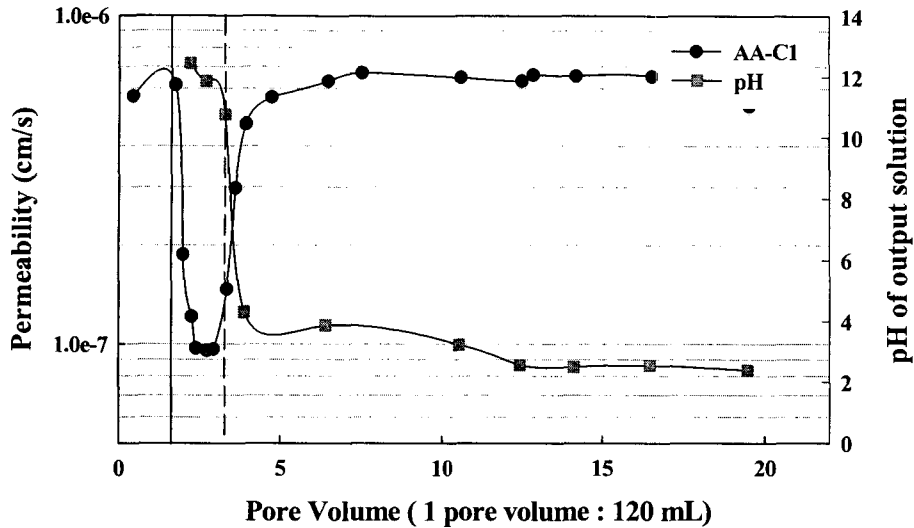


그림 6. 아세트산에 의한 점토공시체의 투수계수와 pH 변화 추이(AA-C1은 아세트산으로 실험한 점토 공시체 시료 1이며, 점선은 유출수의 색깔이 무색에서 붉은색으로 바뀐 시점임)

### 3.2. 일축압축강도

종류가 다른 산을 침투액으로 사용한 투수시험이 종료된 후 공시체의 일축압축강도를 측정하였다. 그 결과를 표 2에 정리하였고, 산과 접촉하지 않은 환경에서 양생된 공시체의 강도와 비교하였다. 산과 접촉하지 않은 공시체의 강도는 모래공시체와 점토공시체 모두 시간의 경과함에 따라 증가하였다.

산을 침투액으로 사용한 경우 투수시험이 종료된 후 공시체의 강도를 구한 결과 일축압축강도가 산과 접촉하지 않은 경우에 비해 감소하였다. 점토공시체의 경우는 제작된 공시체의 밀도 및 강도 측면에서 모래공시체보다 재현성이 뛰어났으며, 산과의 접촉 후 강도저하 현상도 일관되게 나타났다. 강도 저하는 산과 접촉이 일어난 투수시험기간과 유사한 기간만큼 증류수로 투수시험을 하거나  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  용액에 보관한 공시체에 비해 1/4~1/5 수준으로 감소하였다. 모래공시체의 경우 투수시험 후 측정된 일축압축강도의 편차가 심하기는 하나 일부 공시체에서 감소된 강도를 보여주었다.

표 2. 공시체의 일축압축강도의 평균치(kPa)

강도시험조건	모래공시체	점토공시체
28일 습윤양생 후	2580	625
증류수를 침투액으로 이용한 투수시험 후	2542	825
28일 양생후 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 용액에 70일간 담가 놓은 공시체	2604	917
황산으로 투수시험을 마친 공시체	1752~3558 pH=9.6~12.3	149 pH=1.6~7.7
질산으로 투수시험을 마친 공시체	3358 pH=9.5	-
아세트산으로 투수시험을 마친 공시체	415~2769 pH=7.3~11.5	169 pH=2.2~2.7

비고: 여기서 pH는 투수시험이 종료되었을 때 유출액의 pH이며, pH와 강도가 값의 범위로 나타난 경우는 실험목적에 따라 투수시험의 종료시점을 달리 하였고 그 때의 pH와 강도를 측정하였기 때문이다.

#### 4. 심층혼합기동체의 수명예측

공시체에 일정량의 산성물질이 침입하면 공시체 구성물질과 시멘트가 반응하여 투수계수가 증가하고 강도는 감소하였다. 이때 물성변화를 야기하는 산성오염물질의 양은 산의 종류마다 달랐다. 유출수의 pH가 12이하로 떨어지는 시점까지 소요된 산의 양을 공시체의 기능을 저하 혹은 상실시키는 임의의 점이라 하고 공시체의 단위 시멘트 양당 소요된 산의 양을 위 실험결과(그림 2~그림 6)로부터 역계산하였다. 기준을 pH 12로 한 것은 12이하에서부터 시멘트의 칼슘화합물이 산에 의해 용해되기 때문이다.

표 3에 나타난 바와 같이 황산이나 질산과 같은 강산이 약산인 아세트산에 비해 적은 양으로 공시체에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 당량을 기준으로 비교하면 10배 정도의 차이를 보인다. 이는 아세트산이 산의 해리도가 작은 약산이기 때문에 공시체의 알칼리와 중화반응을 일으키는 수소이온이 적게 해리되기 때문이다. 공시체 종류별로 검토해보면, 모래공시체가 포함하고 있는 시멘트의 양이 점토공시체보다 1.5배 더 많음에도 불구하고 공시체에 영향을 미치는 산의 양(mol)은 더 적다. 이로부터 점토공시체가 산성오염물에 대한 영향을 모래공시체보다 덜 받는 것을 알 수 있다.

표 3. 공시체에서 유출수의 pH가 12이하로 떨어질때까지 소요되는 산의 양

산의 종류	점토공시체		모래공시체	
	$\frac{mmol\ of\ acid}{g\ of\ cement}$	$\frac{g\ of\ acid}{g\ of\ cement}$	$\frac{mmol\ of\ acid}{g\ of\ cement}$	$\frac{g\ of\ acid}{g\ of\ cement}$
황산	3.17	0.31	1.24	0.12
질산	-	-	0.96	0.06
아세트산	19.92	1.07	2.92	0.18

비고: 공시체에 함유되어있는 시멘트의 양 = 모래공시체 44.23g, 점토공시체 29.17g

표 3의 결과를 바탕으로 심층혼합기동체가 산성물질로 오염된 지반에 차단벽으로 조성되었다고 가정하고 기동체의 안정성을 유지하는 수명을 추정해 보겠다. 심층혼합공법으로 조성되는 기동체의 직경은 공법의 종류마다 다르지만 우리나라에서 많이 적용되는 것은 직경 55cm의 기동체 3개가 중첩되며 동시 시공되는 형태이다. 중첩되는 지점의 차수벽 유효폭은 약 45cm이다. 기동체의 초기투수계수가  $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 라 하고, 기동체의 구성성분은 본 연구의 조건과 같으며, 차수벽 전면에 걸쳐 동수경사 1로 산성오염물질이 이동해 오는데 차단벽의 두께는 45cm라 가정하자. 이와 같은 조건에서 산성오염물질의 침투에 대한 차수벽의 수명은 다음과 같다.

$$T = 6.42 \times 10^2 \frac{M_A \delta}{B k \Delta h} \quad (1)$$

여기서, T(년)는 기동체의 수명,  $M_A(\text{g of acid} / \text{g of cement})$ 는 실험에 의해 측정된 공시체의 기능을 상실하게 하는데 필요한 산의 양,  $\delta(\text{kg/m}^3)$ 는 처리대상토에 대한 시멘트 혼합량, B(ppm)는 시멘트가 들어간 심층혼합기동체를 투과하는 지하수에 포함된 산의 농도, k(cm/s)는 기동체의 투수계수,  $\Delta h(\text{m})$ 는 차수벽 앞뒤의 수두차이다. 만약 1000ppm의 아세트산으로 오염된 지반이고,  $\Delta h$ 가 1m라면, T는  $1.03 \times 10^7$ 년이다. 오염물질이 고농도의 강산이고,  $\Delta h$  및 k 값을 크게 가정하더라도 차수벽의 수명은 현실적으로 상당히 길다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

酸性물질로 오염된 지반에서 차수벽으로 심층혼합기둥체가 사용되었을 경우, 산으로 인한 오염 혹은 침투 정도에 따른 기둥체의 물성변화를 실험적으로 관찰하였다. 산을 침투액으로 이용한 투수시험을 진행하는 동안 투수계수는 시간이 경과함에 따라 감소하다, 어느 정도 산이 침투하고 나면 투수계수가 증가하였다. 산의 침투가 충분히 이루어진 공시체의 일축압축강도는 산과 접촉이 없는 경우와 비교하여 크게 저하되었다. 산성오염물질이 공시체의 물성변화에 영향을 주는 정도는 황산 및 질산 등 아세트산이 더 크다. 공시체의 구성물질과 화학반응결과물이 용해되는 공시체의 pH를 12라 할때, 이 때까지 소요되는 산의 양을 결정하였다. 본 연구의 실험조건에서 황산이 오염물질일 때 점토공시체의 경우 0.31 g of acid/g of cement, 모래공시체의 경우 0.12 g of acid/g of cement이었다. 아세트산이 오염물질인 경우 점토공시체에서 1.07 g of acid/g of cement, 모래공시체의 경우 0.18 g of acid/g of cement이었다. 이를 바탕으로 현실적으로 심층혼합기둥체의 화학적 안정성을 유지하는 수명을 예측해 본 결과, 기둥체의 pH가 12이상이면 안전하다고 가정할 때 반영구적임을 추정할 수 있었다.

## 참고문헌

1. 정문경, 김강석, 우제윤 (2001), 다축교반식 지반개량제 조성에 의한 대심도 연약지반 보강 및 차수벽 조성공법 연구, 연구보고서 건기연 2001-024, 한국건설기술연구원.
2. 일본토질공학회, “다지지 않은 안정처리토의 시험방법”, JSF T31-83.
3. Gerber, M.A., and Fayer, M.J. (1994), In-situ Remediation Integrated Program: Evaluation and Assesment of Containment Technology, US Dept. of Energy, EM-0201.
4. Glasser, F.P. (1997), “Fundamental Aspects of Cement Solidification and Stabilization”, Journal of Hazardous Materials, Vol. 52, pp. 151-170.
5. Martys, N.S. and Ferraris, C.F. (1997), “Capillary transport in Mortars and Concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 27, NO. 5, pp. 747-760.
6. Rumer, R.R. and Ryan, M.E. (1995), Barrier Containment Technology for Environmental Remediation Applications, John Wiley & Sons, New York, New York, USA.
7. Sharma, H.D. and Lewis, S.P. (1994), Waste Containment System, Waste Stabilization, and Landfills: Design and Evaluation, John Wiley & Sons, New York, New York, USA.
8. Shi, C. and Stegemann, J.A. (2000), “Acid Corrosion Resistance of Different Cementing Materials”, Cement and Concrete Research, 30, pp. 803-808.
9. U.S. Environmental Protection Agency (1998), Evaluation of Subsurface Engineered Barriers at Waste Sites, Report EPA-542-R-98-005, Cincinnati, Ohio, USA.