

# 천연섬유배수재의 타설 조건에 따른 장기 투수계수 및 인장강도의 특성

## A Long Term Characteristics of Hydraulic Conductivity and Tensile Strength of Natural Fiber Drain with respect to Installation Conditions

장진영<sup>1</sup> Jang, Jin-Young

장연수<sup>2</sup> Jang, Yeon-Soo

조삼덕<sup>3</sup> Cho, Sam-Duck

### Abstract

Long term changes of hydraulic properties and tensile strength of natural fiber drain (NFD) are analyzed and compared with those of intact NFD's. NFD was buried in distilled water, two types of seawater and clay soils obtained in southern and western parts of Korea, Kwang-Yang and Si-hwa. Specimens are taken out in 0, 3, 9 and 18 month intervals, and durability tests of the NFD are performed. Hydraulic conductivity of the NFD samples decreased compared with that of intact NFD samples, because clay particles easily passed to coarsened mesh of filters and clogged the porous stone below and reduced hydraulic conductivity. Tensile strength of drains from the soil bucket is reduced larger than those in the seawater and the distilled water. Strength reduction was higher in summer than winter.

### 요 지

본 연구에서는 3가지 조건(흙 / 해수 / 증류수)에 대해 3, 9, 18개월 동안 타설한 천연마섬유 배수재(NFD)로 인장 및 투수특성을 실시하여, 타설되지 않은 NFD와의 열화특성변화를 비교하여 보았다. 흙/필터 시험에 의한 투수계수는 무타설 배수재 필터시험의 투수계수보다 감소하였는데, 타설 시간이 경과됨에 따라 흙 타설 토조에서 배수재가 부패되어 투수시험시 점토분이 무타설 배수재보다 타설 배수재 필터에 쉽게 침투하여 섬유의 격자공간을 메워 발생하는 막힘 현상(Clogging)이 심화되었기 때문이다. 타설기간 경과에 따른 배수재의 인장강도변화는 해수나 증류수 타설 배수재의 강도변화에 비해 흙 타설 배수재의 강도변화가 더 크게 나타났으며 특히 하절기의 강도저감이 동절기에 비하여 큰 것으로 나타났다.

**Keywords** : Clogging, Hydraulic conductivity, Installation, Natural fiber drain, Tensile strength

### 1. 서 론

국내 시공현장에서 대규모 연약지반의 조기침하와

강도증진에 따른 개량을 목적으로 연직배수공법이 많이 사용되고 있는데, 지반개량 배수재로 낮은 단가와 배수능력이 탁월한 Plastic Board Drain(PBD)을 많이 사용

1 정회원, 태조엔지니어링 지반사업부 사원 (Member, Engineer, Dept. of Geotechnical Engrg., Teso Engrg.)

2 정회원, 동국대학교 사회환경시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Univ. of Dongguk, ysjang@dongguk.edu, 교신저자)

3 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher in Chief, Geotechnical Engrg. Division, Korea Institute of Construction Technology)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

하고 있다. 그러나 PBD는 합성섬유 제품으로 지반개량 후 제거를 하지 않았을 시 지반 내에 장기간 방치되어 결국 환경오염을 유발시키고 타설시와 지반 개량시 재료 특성상 축압의 영향을 크게 받아 굴곡 및 꺾임에 의해 배수재로서의 성능저하가 크다는 단점이 있다.

본 연구에 사용된 천연섬유배수재(NFD)는 일본 및 싱가포르 등 동남 아시아권 국가에서 주로 사용되고 있는 연직배수재로서 자연적 소재로 제작되어 지반개량 후 지반과 동화되어 소멸되는 친환경적 특성을 가지고 있다. 국내 현장의 NFD 적용 가능성을 판단하기 위하여 현장에 근접한 조건 및 기타 조건으로 실내 모형토조에 타설하여 타설기간 경과(무타설, 3, 9, 18개월)에 따른 흙/필터 투수시험과 인장강도 특성시험을 실시하여 열화에 따른 배수재 자체의 내구성 시험을 실시하였다.

현재까지 흙/필터 투수시험에 관해서는 Mlynarek(1990)이 Geotextile의 속이나 흙과의 경계면에 세립 실트입자가 점진적으로 쌓여 투수성이 감소하게 되는 막힘 현상(Clogging)에 대해서 발표하였고, Koerner 등(1982)이 실트질 점토와 Nonwoven Needled 섬유에 대하여 장기 흐름 흙/필터 투수시험을 2,500시간 동안 실시하였는데 막힘 현상으로 인해 점진적으로 투수성이 감소하여 투수계수가 수렴값에 이르게 된다는 사실을 알아내었다. 대부분의 시험연구는 부패가 진행되지 않는 PBD에 사용된 필터에 대하여 막힘시험(clogging)을 수행하여 진행된 연구이며 본 연구에서와 같은 다양한 매체내에서 배수재의 부패에 따른 투수특성과 인장특성을 시험에 의하여 분석하는 것은 처음이다. 내구성 실험에 앞서 사용 NFD의 제원 및 특성을 알아보고 타설에 사용된 흙 시료, 해수에 대한 기본물성 및 성분분석을 실시하였다.

## 2. 천연섬유배수재 및 흙 시료, 해수의 특성분석

### 2.1 천연배수재의 특성

천연섬유배수재(NFD)는 천연재료인 황마와 야자껍질 섬유를 이용하여 제작된 것으로 싱가포르를 중심으로 개발된 천연마섬유배수재와 동일한 것이다(Lee et

al., 1987). NFD의 형태는 그림 1과 같이 두께 약 10mm, 폭이 100mm의 직사각형 형태로 이루어져 있고 필터재인 황마섬유가 직경 5mm의 코코넛야자 껍질을 꼬아 만든 4개의 섬유코아를 두 겹으로 감싸고 있다.

NFD는 환경친화적 소재로 배수재로서의 기능을 다한 후에는 지중의 박테리아 등에 의해 자연 생분해되어 지반과 동화되는 특성을 가지고 있고, 유연성이 커서 지반에 타설 시와 타설 후, 지반의 압밀 중에 꺾이거나 잘라지는 일이 없다. 따라서 침하량이 큰 변형 시에도 배수재가 지반 변형과 동일한 변형을 하기 때문에 배수재가 타설된 지반의 압밀도를 확실히 촉진시키는 장점이 있다.

### 2.2 흙 시료 및 해수 특성분석

연구에 사용된 흙 시료는 남해안을 대표하는 전남 광양만 시료와 서해안을 대표하는 경기도 시화호 부근의 시료를 사용하였는데, 기본물성시험 결과 광양 시료는 소성이 낮은 점토(CL)로 분류되었고, 시화시료는 실트 성분(ML)으로 분류되었다. 구체적인 흙시료의 물리적 특성을 표 1과 그림 2에 나타내었다. 투수계수는 시험결과와 평균값으로서 광양시료의 투수계수는 일반적인 점토의 투수계수 범위인  $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 에 포함되는 것으로 나타났고, 실트질 모래성분이 많은 시화시료의 경우는  $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 인 실트 성분의 투수계수 범위에 포함되는 것으로 나타났다.

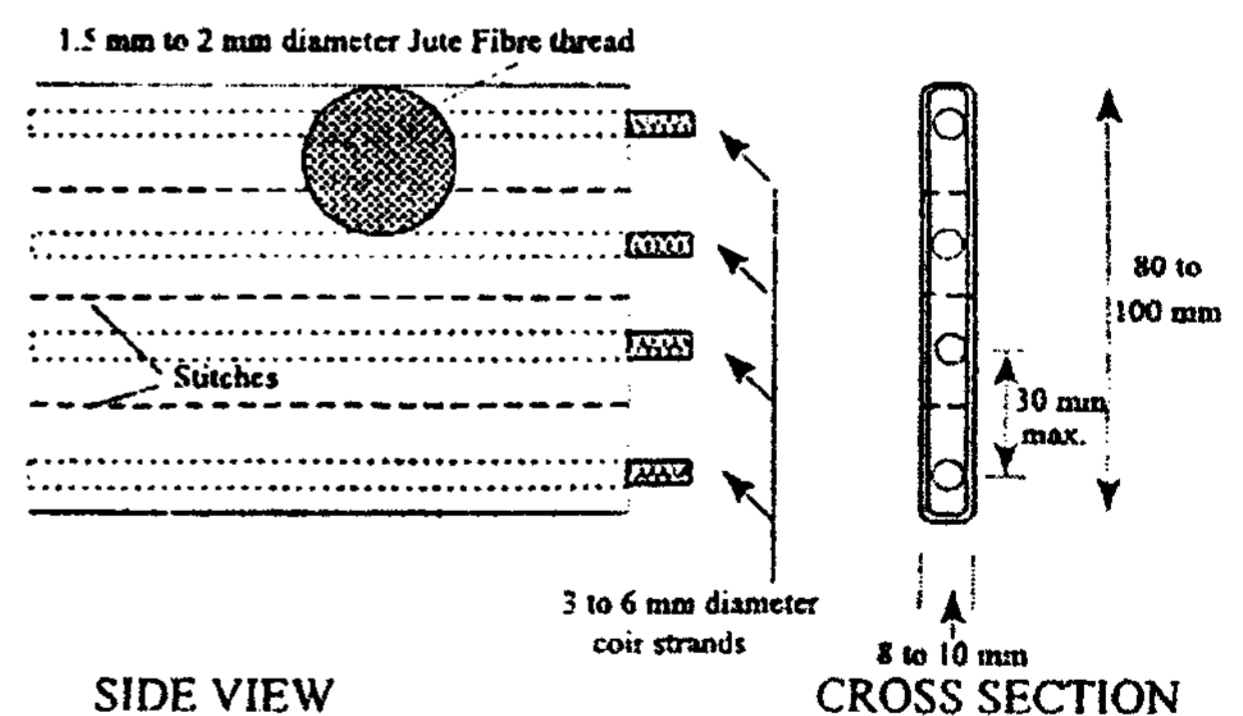


그림 1. Natural Fiber Drain의 구조(Lee et al., 1987)

표 1. 사용 흙 시료에 대한 물리적 성질

성질	분류	200체 통과량 (%)	단위중량	비중 (Gs)	액성한계 (LL, %)	소성한계 (PL, %)	소성지수 (PI, %)	투수계수 (cm/sec)
광양	CL	98.0	1.68	2.65	45.9	24.2	21.7	$4.0 \times 10^{-6}$
시화	SM	33.4	1.83	2.67	NP	NP	-	$2.7 \times 10^{-5}$

성상분석을 위해 흙 시료에 대해서는 XRD 회절분석과 유기물 함량시험, 원소분석시험(CHNS Test)을 실시하였고, 각 시료 및 해수는 이온크로마토그래피(IC)를 이용한 염소이온농도 및 pH를 측정하였다.

회절분석 결과 광양 시료는 비점토 광물인 운모와 장석, 점토광물인 카올리나이트와 일라이트, 클로라이트로 구성되어 있고, 시화 시료 역시 구성성분에 따른 양의 차이는 있었지만 유사하게 나타났다. 이는 김상규 등(1998)이 발표한 회절분석에 의한 국내 연약지반의 광물종류 및 분포결과와 일치한다. 유기물 함량시험에서는 광양 시료가 평균 8.45%, 시화시료가 4%로 광양 시료가 약 4.45% 많은 유기물을 함유하는 것으로 측정되었고, 원소분석시험으로 두 시료 모두 탄소(C)>수소(H)>황(S)>질소(N)의 구성비를 가지고 있다는 것을 알 수 있었다.

해수의 염소이온농도는 광양조건(17g/l)이 시화조건(15g/l)보다 약간 더 많은 것으로 측정되었지만, 이는 일반적인 해수의 평균 염소함유량(30~35g/l)의 1/2~1/3 정도이고(네이버 백과사전, www.naver.com) 흙 시료에 대한 IC분석 결과 역시 광양조건이 염소이온을 약간 많이 포함하는 것으로 나타났다. 두 조건에 대한 pH는

8.28~9.67로 약 알칼리성으로 나타나 기존문헌과 유사한 결과를 보였다(김낙경 외, 2001). 구체적인 성상분석 결과는 장진영(2005)에 나타내었다.

### 3. 천연섬유배수재의 투수 특성 및 인장강도 시험

#### 3.1 실험개요 및 범위

실제 현장지반에 타설된 것을 모사하기 위해서 NFD를 광양 및 시화 흙 시료에 타설하였고 기타조건으로 해수와 멸균 처리된 증류수에 나누어 타설하여 무타설 시와 타설 경과 3, 9, 18개월에 대한 내구성 시험을 실시하였다. 타설 시기 및 타설 조건에 따른 시험계획은 표 2와 같고, 첫 타설시 NFD의 수량제한으로 인해 일정량의 시험토조를 타설하고 배수재가 재수입된 3개월 후 추가분 타설을 실시하였다.

내구성 시험은 투수특성과 인장강도특성으로 나누어 실시하였는데, 투수시험은 배수재가 현장에 타설되어 지반 내 배수현상이 발생할 때 배수재 표면이 흙에 의해 막히게 되어 나타나는 현상을 알아보기 위한 흙/필터 투수시험과 배수재 필터 자체의 순수 투수계수를 알아보기

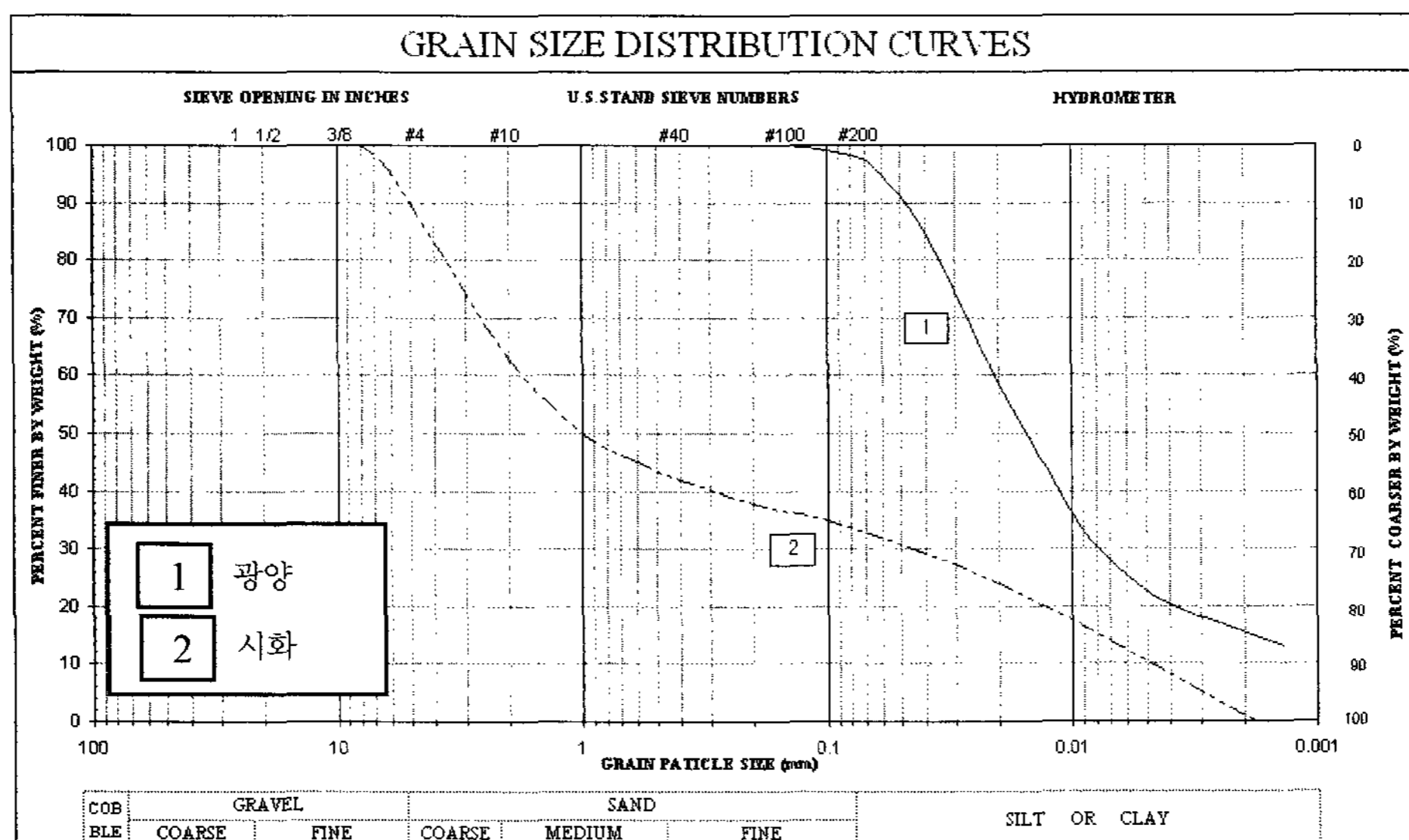


그림 2. 각 흙 시료의 입도분포 곡선

표 2. 타설 배수재의 시기 및 타설 조건에 따른 시험계획

타설일	개월	3개월	9개월	18개월	비고
2003년 11월		04. 2월 실시	04. 8월 실시	05. 5월 실시	광양 흙시료 및 해수, 증류수
2004년 02월		04. 5월 실시	04. 11월 실시	05. 8월 실시	광양 및 시화 흙시료, 광양해수, 증류수

위한 순수필터 시험(투과능계수시험, Permittivity test)을 각각 ASTM D 5101과 ASTM D 4491-99a의 시험규정에 의해 실시하였다(ASTM, 1990).

인장특성시험은 배수재의 편폭을 시험기의 상하 클램프에 물어 일정속도로 당겨 배수재 파괴시 강도를 찾아내는 Strip 시험법으로 ASTM D 5035 규정에 의해 실시하였다(ASTM, 1995).

### 3.2 실험 방법

#### 3.2.1 천연섬유배수재의 투수특성시험

투수특성시험은 흡/필터 시험(투수계수 시험)과 순수필터 시험(투과능계수 시험, Permittivity test)로 구분하여 실시하였으며 그림 3은 투수특성시험에 사용된 시험셀과 셀이 설치된 시험기의 전체모습이다.

흡/필터 시스템에 대한 타설 기간에 따른 투수계수 변화를 알아보기 위해 광양 및 시화 흙시료, 해수, 증류수의 경우에 대해 무타설과 3, 9, 18개월 타설의 경우로 나누어 투수시험을 실시하였다. 그림 3(a)의 시험셀 하부에 시간경과에 따라 변화된 필터를 놓고 상부에 흙시료를 타설하였다. 이후 흡/필터 시스템의 상부에 그림 3(b)의 마노미터에 연결된 튜브를 통하여 유입하여 통과된 투수량을 168시간동안 측정하여 투수계수를 계산하고 그 결과를 타설 기간과 각 조건에 따라 구분하여 분석하였다.

순수필터 시험은 필터재의 연직투수성(통수성)을 알아보는 시험으로서 얇은 황마필터재의 투수성을 투과 거리에 대한 수두차, 즉 동수경사(i)에 의해 표현하는 Darcy의 법칙으로 산정하게 되면 오류를 범할 수 있다. 따라서 투과량에 대한 투수성을 평가하는 것이 중요한

데, 이는 투과능계수(Permittivity,  $\psi$ )로 표현된다(ASTM, 1992). 식 (1)은 Darcy의 투수계수 K를, 식 (2)는 투과능계수  $\psi$ 를 나타낸다.

$$K = \frac{Q}{\frac{\Delta h}{L} \times A}, (cm/sec) \quad (1)$$

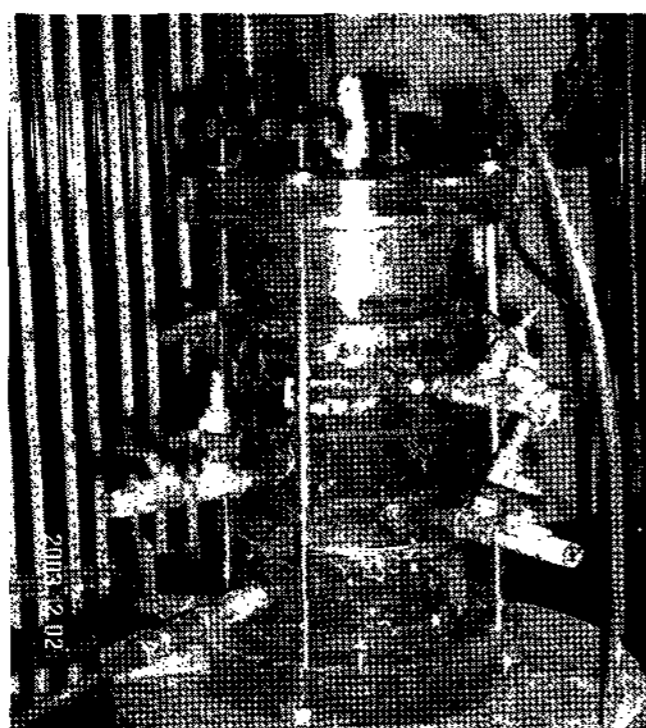
$$\psi = \frac{K}{L} = \frac{Q}{\Delta h \times A}, (sec^{-1}) \quad (2)$$

여기서 Q=투수량,  $\Delta h$ =수위차, L=투과거리, A=투과면적이다.

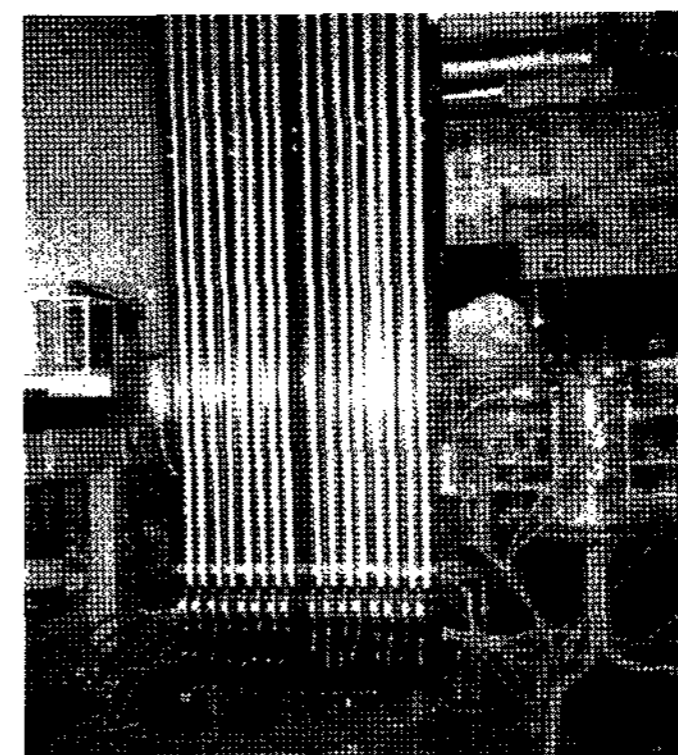
#### 3.2.2 천연섬유배수재의 인장강도시험

인장강도 시험법은 크게 Strip법과 Grab법으로 나뉘고 그림 4에 도시하였다. 본 연구에서는 Strip법을 사용하여 NFD의 강도특성을 알아보았는데, 배수재의 편폭(약 100mm)보다 큰 클램프로 배수재 양끝을 잡아 일정한 속도로 당기게 되면 한계상태에서 배수재 중앙부분에 사선으로 찢어지는 파괴가 나타나는데 이때의 강도 값을 배수재의 인장강도로 사용하였다. 그림 5는 FITI 시험연구원에서 실시한 인장시험 파괴 전, 후의 모습을 나타낸다.

본 연구의 강도시험은 배수재 타설토조의 크기 제한으로 인하여 ASTM에서 규정하는 강도시험에 필요한 시험편 길이(100cm로 5회 이상 반복시험)를 맞출 수 없었다. 따라서 무타설 배수재로 시험편 길이에 따른 강도 변화에 대한 검증은 거쳐 결과에 영향을 주지 않는 시험편의 최소 길이(30cm)로 3회 이상 반복 시험 실시하여 오차범위 내에 드는 결과 값을 평균하여 사용하였다.



(a) 투수시험 셀



(b) 투수시험기의 전체모습

그림 3. 시험에 사용된 투수시험기구

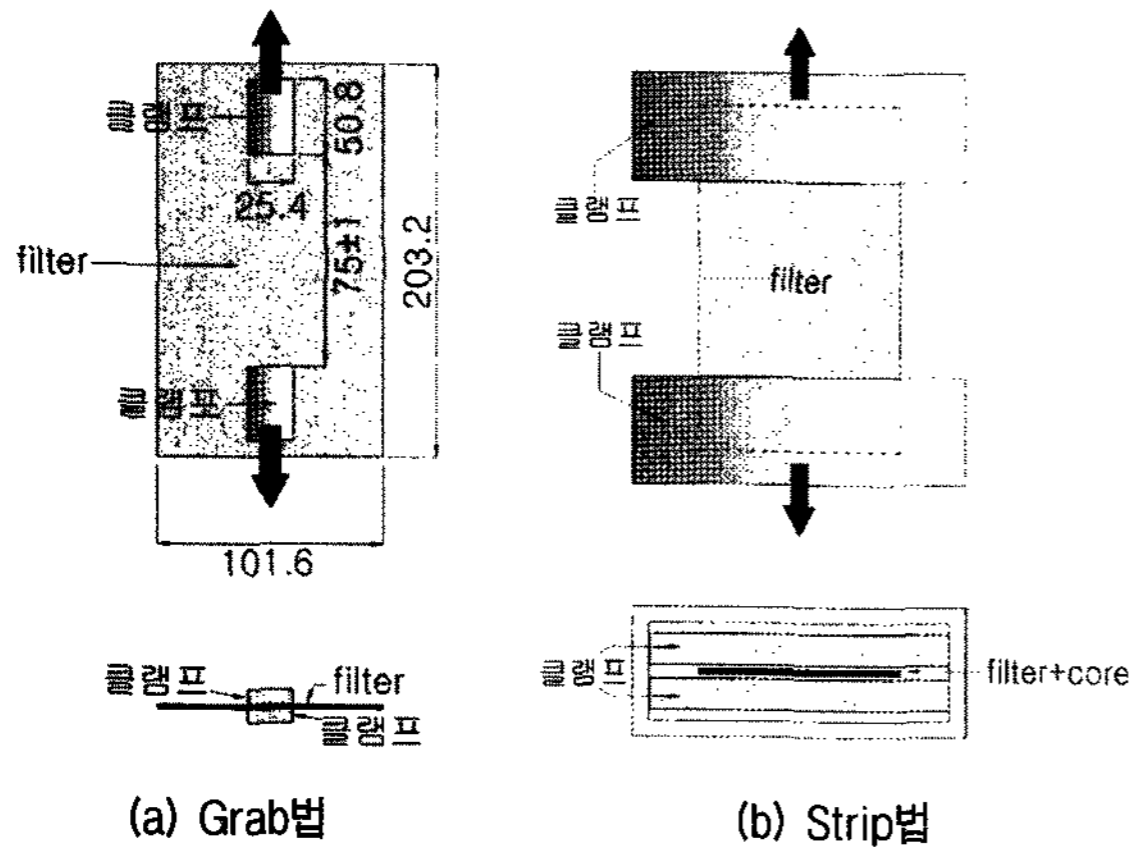


그림 4. 배수재 파지모양(Myles, 1987)

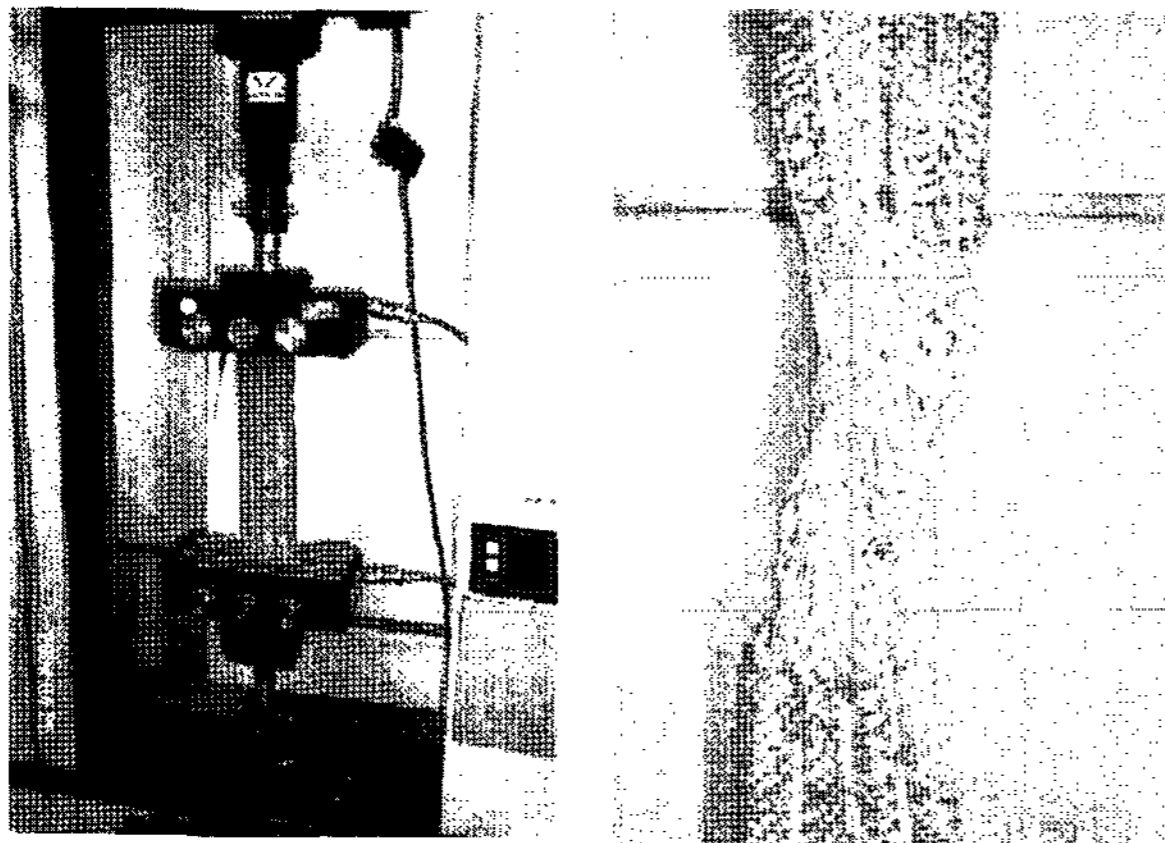
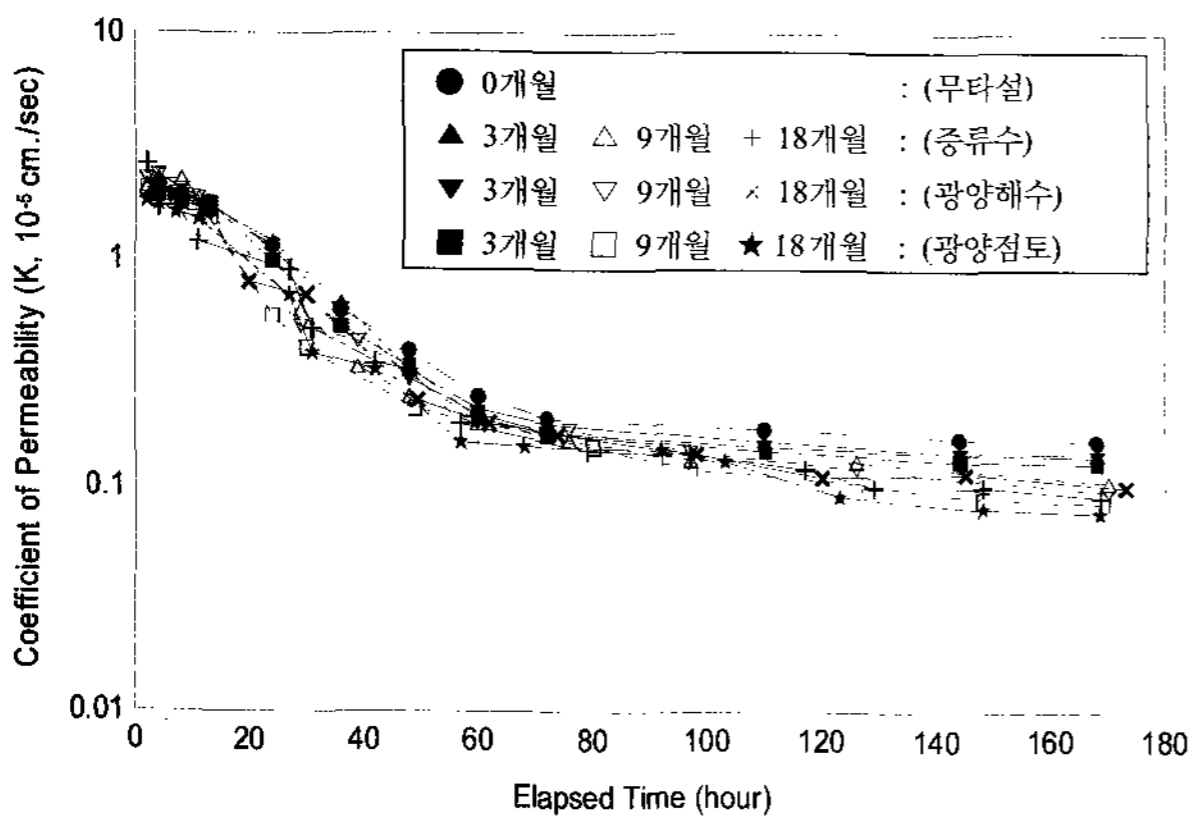


그림 5. 유입클램프를 사용한 인장강도 시험모습

### 3.3 시험결과

#### 3.3.1 흙필터 투수특성시험

흙/필터 투수시험의 광양시료, 광양해수, 증류수 타설 부분에 대해서는 3개월 타설 부분이 시험시작 40~60

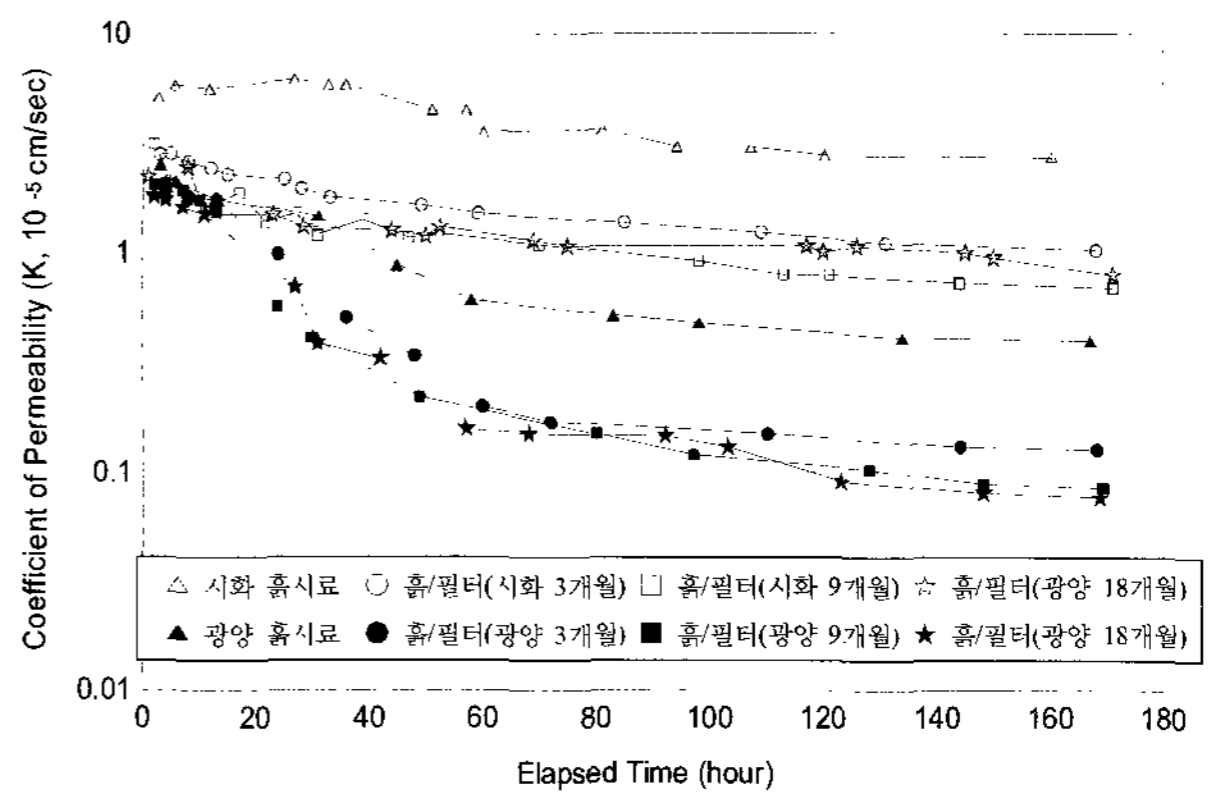


(a) 광양조건 투수특성

시간에서 투수계수가 급격히 감소하여 막힘 현상이 발생하였고, 9개월 및 18개월 타설 부분은 약간 빠른 20~40 시간에서 막힘 현상이 발생하였다. 또한 시간경과에 따라 투수계수가 점차 감소하는 것을 확인 할 수 있었다 (그림 6(a)). 이는 타설 기간에 따른 열화 현상이 심화되는 데에 그 원인이 있다고 할 수 있겠다. 투수계수 저하 경향은 광양 흙 시료와 광양해수, 증류수 순으로 크게 나타났다. 시화시료 타설 배수재에 대한 투수특성 분석은 순수시화 흙 만에 대한 투수시험과 순수 광양 흙만을 포설한 시료의 투수시험 결과를 비교하여 도시하고 이후 3, 9, 18개월 경과된 필터를 포설한 흙/필터시스템의 투수시험결과를 함께 그림 6(b)에 나타내었다. 그 결과 시화 시료의 투수계수가 광양 시료의 투수계수보다 크므로 상위에 도시되었고 조립성분이 강하여 막힘 현상은 광양 흙 시료의 경우보다 작게 나타났다.

순수필터 시험은 수두차( $\Delta h=0.1, 0.5, 1m$ )의 변화를 주어 시험을 실시하였는데, 수두차가 커질수록 투과능 계수(Permittivity)가 줄어들었다(그림 7(a)). 이는 물이 필터재를 통과할 때 높은 에너지 소진이 발생하여 나타나는 현상으로 사료된다. 타설기간 경과에 따른 배수재의 투과능계수는 흙/필터 시험과는 반대로 흙 시료 타설 배수재의 값이 다른 조건 배수재보다 높게 나왔는데 열화현상의 발생에 의해 배수재가 부패되어 섬유간의 틈이 커져 나타나는 현상으로서 필터재의 기능성 저하를 의미한다(그림 7(b)).

그림 6의 흙/필터 시스템의 경우 시간경과에 따라 투수계수가 저하되는 것으로 나타난 반면 그림 7의 순수 필터의 투과능 시험에서 투과능계수는 증가하는 것으로 나타나는 경향은 다음과 같이 설명할 수 있다. 흙에



(b) 시화조건 투수특성

그림 6. 흙/필터 투수특성시험의 투수계수 변화

장기간 포설되어 천연배수재의 필터재는 이미 필터재로서의 기능을 시간이 경과함으로서 차츰 잃어가고 있다고 볼 수 있다. 성겨진 필터재로 주변 흙으로 부터의 물과 함께 세립분의 이동이 활성화 되면서 흙과 접촉한 기능성이 저하된 필터 주변에 세립분에 의한 투수계수가 저하된 층이 형성되는 폐색현상이 진행되는 것으로 판단한다.

Darcy법칙에 기초한 식(1)과 (2) 만에 의하면 흙/필터 시스템의 투수계수가 증가하면 투과량계수도 증가하는 그 경향에 정의 상관성이 있어야 할 것으로 보이나 상기식 자체만으로는 세립분의 배수재 주변으로 이동하여 나타나는 폐색효과를 반영하지 않는 관계로 실험에서 반대 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다.

### 3.3.2 천연섬유배수재의 인장강도시험

표 3은 기간 경과에 따른 인장시험 결과로서 전체적으로 흙 시료>해수>중류수 타설 배수재 순으로 강도 저하를 나타내고 있다. 또한 타설 일자에 따르는 강도 값의 차이가 나타났는데, 이는 조건별 타설 토조를 개봉하

여 시험하는 시기가 하절기와 동절기로 나뉘게 되어 나타나는 현상으로 외부 온도에 대한 강도차로 사료된다. 2003년 11월에 타설된 배수재는 3개월(동절기)→9개월(하절기)→18개월(하절기)로 갈수록 강도변화가 급격히 커졌다가 미미한 변화를 나타내었고, 2004년 2월에 타설된 배수재는 3개월(하절기)→9개월(동절기)로 갈수록 변화가 미미한 것으로 나타났다. 결과적으로 동절기 때 인장강도가 하절기 때보다 크게 측정되어 외부 온도가 높은 하절기 때 배수재의 열화현상이 활발하다는 것을 알 수 있다.

기간경과에 따른 시화 흙 타설 배수재의 강도는 눈에 띄게 저하되었는데 이는 NFD를 부식시키는 지반조건이 광양조건보다 더 좋은 환경을 가지고 있어서 배수재의 열화현상을 촉진, 내구성이 크게 저하된 것으로 판단된다.

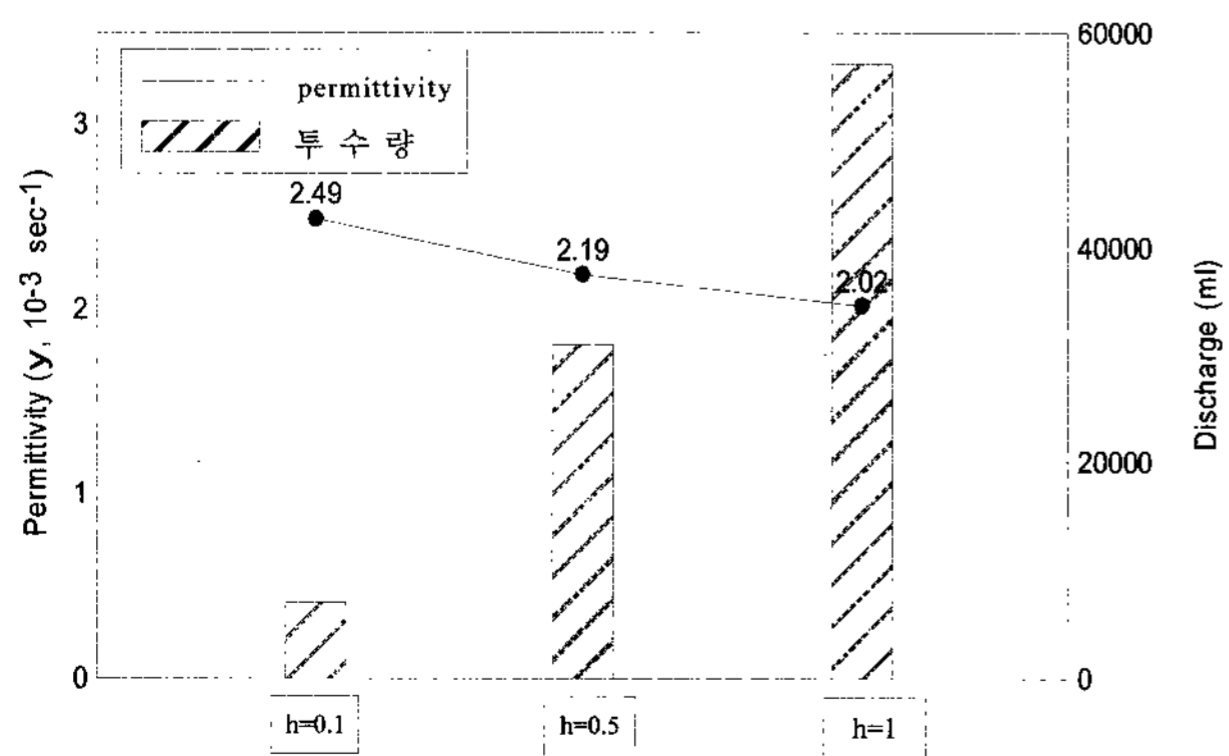
## 4. 결론

(1) 흙/필터 투수계수시험으로 막힘 현상을 파악한 결

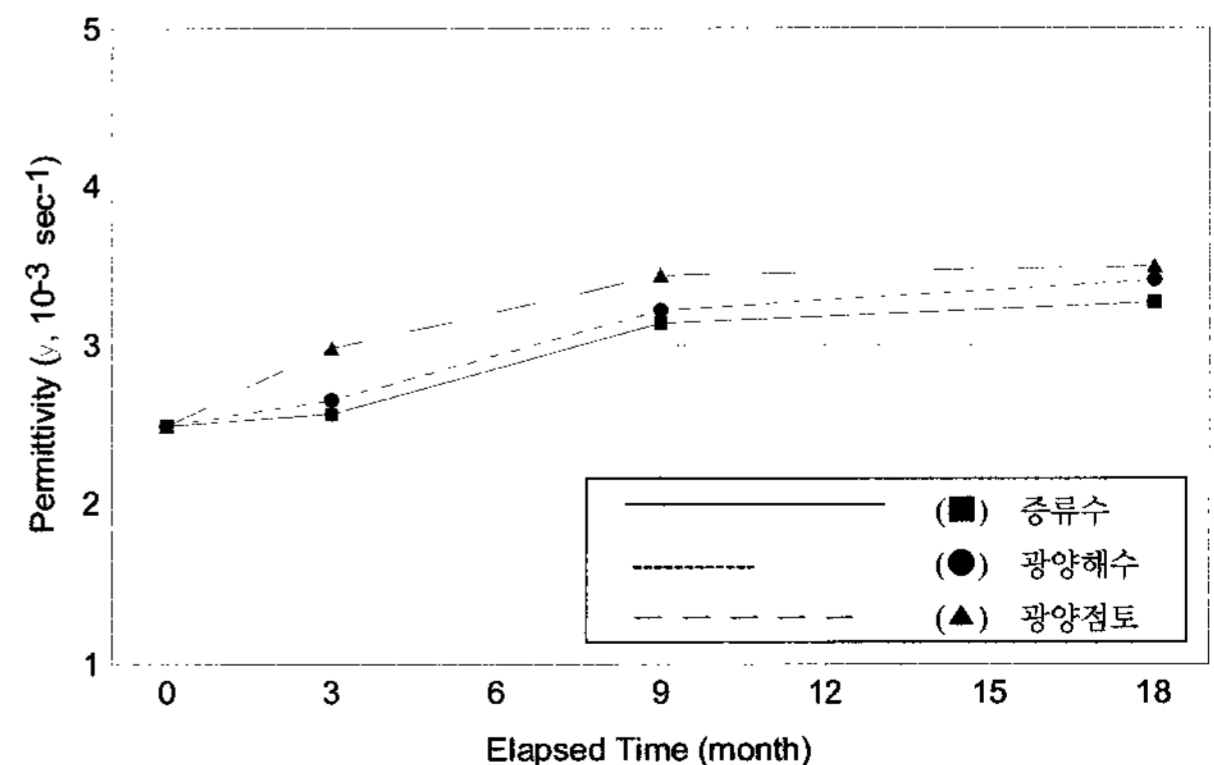
표 3. 타설기간 경과에 따른 배수재 인장시험 결과

(단위:kN/전폭)

타설 시기	조건	0개월	3개월				9개월				18개월				비 고
		무타설	중류수	광양 해수	광양 점토	시화 시료	중류수	광양 해수	광양 점토	시화 시료	중류수	광양 해수	광양 점토	시화 시료	
'03 11/6	60cm /30cm	7.14	6.38	7.35	7.23	-	6.30	5.20	4.70	-	5.79	5.04	4.89	-	※ 9, 18개월 시험 분은 30cm로 시험 실시
	평균	7.14	6.38	7.35	7.23	-	6.67	5.45	4.95	-	5.84	5.10	4.81	-	
	감소율	기준	-11%	+3%	+1%	-	-7%	-24%	-31%	-	-18%	-29%	-33%	-	
'04 2/8	30cm	6.66	4.83	5.05	4.53	5.61	5.34	4.53	4.73	3.37	-	-	-	2.47	※ 9개월 시험은 03년 타설 시험 분의 검증시험
		6.70	5.11	5.09	4.71	6.03	5.41	4.54	4.39	3.41	-	-	-	2.53	
		6.68	5.63	5.58	4.88	6.22	5.66	4.77	4.50	3.71	-	-	-	2.37	
	평균	6.68	5.19	5.24	4.71	5.95	5.47	4.61	4.54	3.50	-	-	-	2.46	
감소율	기준	-22%	-22%	-30%	-11%	-18%	-31%	-32%	-48%	-	-	-	-	-63%	



(a) 수두차의 변화



(b) 광양 18개월까지의 변화

그림 7. 순수필터 시험의 투과능계수 변화

## 참 고 문 헌

- 과 3개월 경과시보다 9, 18개월 경과시의 막힘 현상에 의한 투수계수 저감이 더 빠르게 나타났다. 이는 NFD의 열화에 의해 배수재 필터격자의 성질이 커져 시료로 인한 필터부근 막힘이 심화되어 나타나는 현상으로 사료된다. 타설 조건별 투수계수는 증류수>해수>흙 시료 순으로 나타났다.
- (2) 수두차를 변화를 변화시켜가며 수행한 순수필터 시험 결과 수두차가 커질수록 배수재를 통과하는 물의 에너지 소진이 커져서 투과능계수(Permittivity)는 작아졌다. 그러나 수두차를 일정하게 한 후 수행한 타설 조건별 시험결과는 흙/필터 시험과는 반대로 흙 시료에 매설되었던 필터의 투과능계수가 가장 높게 측정되었는데 이 역시 시간경과에 따른 배수재의 부패에 의해 섬유간의 틈이 커져서 나타나는 결과로 보여진다.
- (3) Strip법을 사용하여 실시한 인장시험 결과 흙 시료>해수>증류수 순으로 강도저하를 보였다. 타설 일자에 따르는 강도 값의 저하는 동절기에 비하여 하절기에 큰 것으로 나타났는데, 이는 하절기에 NFD의 부패를 왕성하게 하는 미생물의 활동이 활발하기 때문으로 사료된다.

1. 김낙경, 이우진 (2001), “군산지역의 점토광물에 대한 연구”, *대한토목학회 2001년 학술발표회 논문집*, pp.1-4.
2. 김상규, 임희대 (1998), “한국 해안에 퇴적된 연약지반의 점토광물의 종류와 분포”, *한국지반공학회지*, 제 14권 6호, pp.73-80.
3. 장진영 (2005), “천연배수재의 인장 및 투수특성에 따른 장기시험 연구” 동국대학교 토목환경공학과 대학원 석사논문.
4. ASTM (1990), “Standard Test Method for Measuring the Soil-Geotextile System Clogging Potential by the Gradient Ratio”, *Annual Book of ASTM Standards*, D 5101.
5. ASTM (1992), “Standard Test Method of Water Permeability of Geotextiles by permittivity”, *Annual Book of ASTM Standards*, D 4491-99a.
6. ASTM (1995), “Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics”, *Annual Book of ASTM Standards*, D 5035.
7. Koerner, R. M. and Ko, F. K. (1982), “Laboratory Studies on Long-Term Drainage Capability of Geotextiles”, *Proc. 2nd Intl. Conf. on Geotextiles*, Las Vegas, NV, 1-6, IFAI, pp.91-95.
8. Lee, S. L., Ramaswamy, S. D., Aziz, M. A., DAS Gupta, N. C., and Karunaratne, G. P. (1987), “Fibredrain for Consolidation of Soft Soils”, *Post-Vienna Conf. on Geotextiles*, Singapore, pp.238-258
9. Mlynarek, J., Rollin, L., Lafleur, J. and Bolduc, G. (1990), “Microstructural analysis of a soil/geotextile system”, *Geosynthetics : Microstructure and Performance*, ASTM STP 1076, pp.137-146.

(접수일자 2007. 5. 9, 심사완료일 2008. 4. 3)