

## 교번흐름 조건에 따른 토목섬유 필터층의 재료분리 및 지오텍스타일의 피로영향 분석

### Fatigue Effect and Particle Rearrangement of Geosynthetics Filter Layer with Cyclic Flow Conditions

오영인<sup>1)</sup>, Young In Oh, 유전용<sup>2)</sup>, Jeon-Yong Yoo, 김현태<sup>3)</sup>, Hyun-Tae Kim

<sup>1)</sup> 농업기반공사 농어촌연구원 농공기술연구실 선임연구원, Senior Researcher, Agricultural Engineering Research Division, Rural Research Institute, KARICO

<sup>2)</sup> 농업기반공사 농어촌연구원 농공기술연구실 책임연구원, Chief Researcher, Agricultural Engineering Research Division, Rural Research Institute, KARICO

<sup>3)</sup> 농업기반공사 농어촌연구원 농공기술연구실 수석연구원, Research Fellow, Agricultural Engineering Research Division, Rural Research Institute, KARICO

**SYNOPSIS** : Geotextiles form one of the two largest groups of geosynthetics and it is consisted two major types of synthetic material (Woven, Non-woven). The functions of geotextiles are separation, reinforcement, filtration, drainage and as a moisture barrier. Within these functions, however, there are a large number of applications or use areas. Although the many research scholar and engineer developed and established the design criteria and construction methodology of geosynthetics filter layer, because the lack of suitable design terminology and uncertainty of long term durability, sustainable research still needed for optimum design methodology to the complicate field conditions. Especially, more intensive research needed about under the cyclic flow condition and fine silty sand base material. In this paper, the filter model test performed under cyclic flow with various boundary conditions (period and frequency of cyclic flow, types of geosynthetic filter material, surcharge etc.).

**Key words** : Geotextile filter, Cyclic flow, Filter criteria, Particle rearrangement, Fatigue effect

## 1. 서론

토목섬유(Geosynthetics)의 다양한 기능 중에서 토목섬유 자체의 투수성을 이용한 토목섬유 필터 및 배수공은 천연골재의 부족과 탁월한 시공성 때문에 토목섬유의 주된 적용분야로 자리 잡고 있다. 필터 및 배수공으로 설치된 토목섬유는 흐름조건이 일면배수조건과 같은 일방향 흐름과 해양 조위와 같은 양방향 교번흐름조건이 주어질 수 있다. 많은 학자와 기술전문가들에 의하여 다양한 현장조건에 대한 토목섬유 필터 및 배수공에 대한 설계기준과 효율적인 시공방법들이 정립되었으나, 양방향 교번흐름과 같은 복잡한 현장여건을 충족시키지 못하였다(Cazzuffi et al., 1995). 또한, 기존연구의 필터설계 방법은 중력(Giroud, 1985), 점착력(Veldhuijzen van Zanten, 1986), 토사재료 강도, 수리학적 부압 등 다양한 물리적 요소를 무시하여 접근하였다. 따라서 다양한 현장조건을 충족시킬 수 있는 설계방법 정립을 위해서는 지속적인 연구가 요망된다. 일반적으로 토목섬유 필터층의 기능저하 및 손상은 필터층으로 설계된 조립질 자연골재와 토목섬유의 경계면에서 발생하는 파손으로 기인되며, 필터층에서 발생하는 지오텍스타일의 파손은 파손시점에 따라 시공 중에 발생하는 시공파손(Construction damage)와 시공 후 응력변화로 인하여 발생하는 진행성파괴(Progressive failure)로 크게 구분한다. 특히, 지오텍스타일과 접

축토사의 접촉면에서 발생하는 활동파괴 메카니즘으로 인하여 파괴가 진행된다. 그림 1은 전형적인 토목섬유 필터층의 거동을 나타낸 것으로 인장파괴, 꿰뚫림, 파열메카니즘 등이 있다(Ingold, 1998). 또한, 토목섬유 필터가 강우나 해수에 의하여 포화되거나 반복적 흐름에 의한 교번하중이 작용될 경우, 피로 영향에 의하여 강도저하 및 접촉마찰저항이 감소하여 파괴가 빠른 속도로 진행된다. 본 연구에서는 상재하중조건, 조위 및 반복흐름과 같은 교번흐름 하중이 발생하는 토목섬유 필터층에서 보호되는 모재료의 입도분리현상과 반복흐름에 따른 토목섬유의 피로영향에 대하여 실험적 연구를 수행하였다.

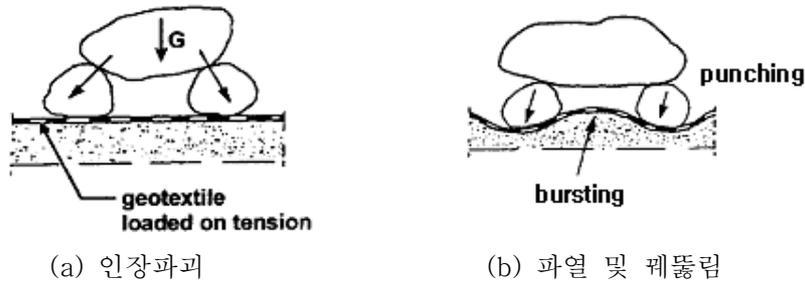


그림 1. 필터용 지오텍스타일의 파괴거동

## 2. 토목섬유 필터층 설계

토목섬유 필터층의 기능은 일차적으로 보호되어야 할 토사재료의 유실을 방지하며 동시에 유체의 흐름을 최대한 자유롭게 허용하여야 한다. 상기의 상반되는 두 기능을 만족하기 위하여 토목섬유 필터층은 보유성기준(retention criteria), 투수성기준(permeability criteria)을 만족하여야 한다. 보유성 기준은 토목섬유 필터의 유효입경(apparent opening size)이 토사입자가 유실되지 않도록 충분히 작아야 함을 의미하며, 투수성 기준은 토목섬유 필터의 입경이 유체의 흐름에 저항이 되지 않도록 충분히 커야함을 의미한다. Giroud(2000)는 보호되어야 하는 토사재료의 선형화된 입도분포곡선(그림 2)과 균등계수와  $d'_{85}$ 에 따른 토목섬유 필터의 보유성 기준을 표 1과 같이 제시하였다.

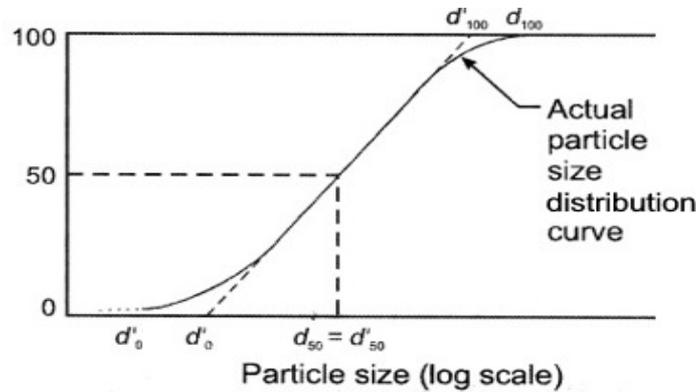


그림 2. 선형화된 입도분포곡선 (Giroud, 2000)

표 1. 보유성 기준( $C'_u = 3$ ,  $d'_{85}$  적용시)

토사재료 밀도	상대밀도, $D_r$	상대다짐도, $R_c$	선형화된 균등계수( $C'_u$ )	
			$1 \leq C'_u \leq 3$	$C'_u \geq 3$
느슨한 상태	$D_r \leq 35\%$	$R_c \leq 86\%$	$O_F \leq (C'_u)^{0.3} d'_{85}$	$O_F \leq (9/C'_u)^{1.7} d'_{85}$
중간밀도 상태	$35\% \leq D_r \leq 65\%$	$86\% \leq R_c \leq 92\%$	$O_F \leq 1.5(C'_u)^{0.3} d'_{85}$	$O_F \leq (13.5/C'_u)^{1.7} d'_{85}$
단단한 상태	$D_r \geq 65\%$	$R_c \geq 92\%$	$O_F \leq 2(C'_u)^{0.3} d'_{85}$	$O_F \leq (18/C'_u)^{1.7} d'_{85}$

토목섬유 필터의 투수성 기준은 필터가 설치되는 구조물의 종류와 일반적인 동수경사(hydraulic gradient)에 따라 다음 식 (1)~(2)와 같이 제시하였다.

$$k_f \geq k_s I_s \text{ (과잉간극수압 발생 시)} \tag{1}$$

$$k_f \geq k_s \text{ (유량의 감소 시)} \tag{2}$$

여기서,  $k_f$ 는 토목섬유 필터의 투수계수,  $k_s$ 는 보호되어야 하는 토사재료의 투수계수,  $I_s$ 는 구조물 종류에 따른 동수경사 정수이다. 상기 기술한 Giroud(2000)의 토목섬유 필터 설계기준과 본 연구에서 사용한 토사재료의 입도분포 및 물리적 특성을 통하여 도출한 지오텍스타일 필터의 는 최대 유효입경(AOS)이 0.44mm이하의 제품을 적용하여야 한다.

### 3. 교번흐름 시험

#### 3.1 자연필터재료 및 토목섬유 필터재료

본 연구의 실험적 연구에서 수행한 토목섬유 필터층은 자연 필터 재료와 토목섬유 지오텍스타일 필터를 복합적으로 사용한 토목섬유 필터층으로 모형 제작한 필터층은 크게 세층으로 구분되며 보호되어야 하는 성토재료는 준설훈사 성토 체체이며, 필터재료는 입경 9.5~19.0mm사이의 쇄석재료와 준설훈사와 필터쇄석 경계면에 설치된 토목섬유 필터로 구성되어 있다. 준설훈사 성토재료는 통일분류법으로 실트질 모래(SM)로 구분되며 각각의 준설훈사 및 필터쇄석의 토질역학적 물성시험 결과는 표 3에 나타난 바와 같다. 실내다짐시험에 의한 준설훈사의 최대건조밀도는 15.23kN/m<sup>3</sup>, 최적함수비는 13.8%로 도출되었으며, 준설훈사의 다짐곡선 및 입도분포곡선은 그림 3과 그림 4에 각각 나타내었다(농업기반공사, 2003).

표 3. 준설훈사와 필터쇄석의 토질역학적 특성

시험재료	물질적 특성		특성값
준설훈사	입도분포	모래 (0.075-4.75mm)	80~84%
		실트 (0.005-0.075mm)	4~19%
		점토 (< 0.005mm)	1.0%
	비중 ( $G_s$ )		2.66
	통일분류법(U.S.C.S)		SM
필터쇄석	골재입경(mm)		9.5~19.0
	겉보기비중 ( $G_s$ )		2.63
	단위중량 ( $\gamma_t$ )		1.643

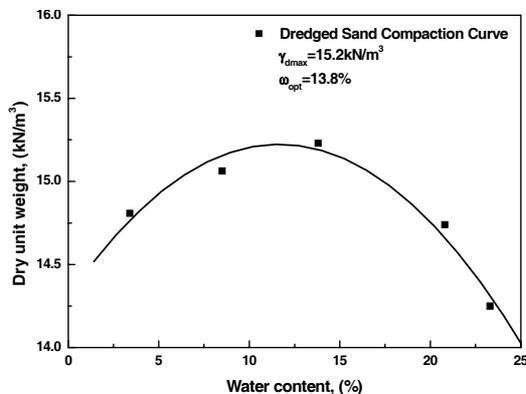


그림 3. 준설훈사의 다짐곡선

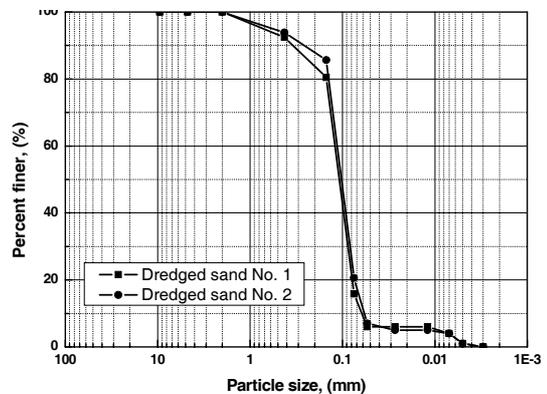


그림 4. 준설훈사의 입도분포곡선

또한, 본 연구에 사용된 토목섬유는 일반적인 토목용 필터로 사용되는 폴리에스터(Polyester) 재질의 장섬유 부직포와 매트 및 부직포를 니들펀칭하여 접합한 복합포이다. 현장적용 필터재료 특성기준은 ASTM D 4632에 명시된 Grab Strength Test법(100mm×150mm)에 의한 인장강도가 약 51kg/inch 이상이며, 신율은 20~40%의 범위이다. 또한, 각각 재료의 유효입경(AOS)은 ASTM D 4751에 의거하여 측정된 결과, 0.15mm~0.18mm로 Giroud(2000)의 필터설계 기준을 만족하는 제품이다. 그림 5는 본 연구에서 사용된 토목섬유 인장강도 시험 장치(Instron UK 140)로 Grab법 시험을 위한 그림이 설치된 사진이다. 그림 6은 토목섬유 필터 원시료(GT sample No. 1, 2)의 인장강도 시험곡선을 나타낸 것으로 GT No. 1 부직포 시료의 경우, 신율 32±2%에서 약 285~294kg의 최대하중을 나타내며, GT No. 2 복합포 시료는 신율 5±2%에서 약 350~370kg의 최대하중을 받는 것으로 도출되었다. 복합포의 인장강도 특성은 최대하중이 직포 매트와 비교 시 발생되므로 직포에 비하여 신율이 작게 발생되며 최대하중은 직포의 최대하중이 도출된다. 각 토목섬유 시료의 물리적 특성은 표 4에 나타난 바와 같다.



그림 5. 인장강도 시험장치

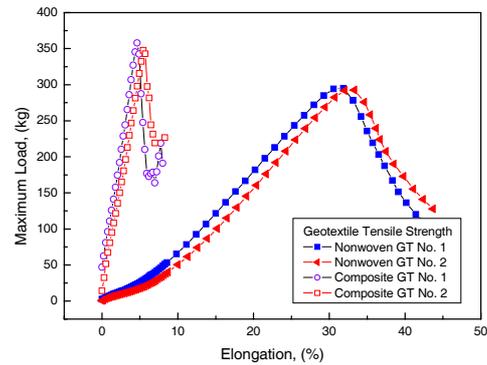


그림 6. 인장강도시험 결과

표 4. 부직포 토목섬유 필터의 물리적 특성

구분	단위	GT sample No.1	GT sample No.2	시험방법
인장강도 <sup>1)</sup>	N/inch	509	637	ASTM D 4632
인장신도	%	20~40	10~40	ASTM D 4632
봉합강도	kg	인장강도 이상	인장강도 이상	ASTM D 4884
재질	-	PET	PET 매트+ 부직포	-
비중	-	1.2	1.25	-
유효입경(AOS)	mm	0.18	0.15	ASTM D 4751
투수계수	cm/sec	$\alpha \times 10^{-2} \sim 10^{-3}$	$\alpha \times 10^{-1} \sim 10^{-3}$	ASTM D 4491

주 <sup>1)</sup> : Grab tensile strength -Correction method : Instron 98 method

### 3.2 교번흐름 시험장치

본 연구에서 사용한 시험장치는 토목섬유 필터 제작장치와 교번하중 흐름장치로 구분된다. 토목섬유 필터재료 많이 사용되는 지오텍스타일은 재질자체의 신율이 상당히 크며, 하중작용에 따른 신율조건이 중요한 초기조건을 작용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지오텍스타일 필터의 신율조건을 균일하게 재현하기 위하여 필터 제작장치를 특수 제작하였다. 필터 제작장치는 토목섬유 필터를 임의 신율상태로 인장하여 고정링에 설치하는 장치이며, 교번흐름 하중장치는 모형 제작된 토목섬유 필터층 내에 물의 흐름을 제어하여 교번흐름을 발생시킬 수 있도록 제작된 장치이다. 교번하중 흐름장치는 직경 300mm의 3단 분리형 모형 필터셀(L=300, 200, 150mm)과 공기튜브와 정압제어장치로 구성된 상재하중 재하장치(Maximum load=490kN/m<sup>2</sup>), 공기압 및 교번압력전달 실린더로 구성된 교번하중 재하장치, 제어장치 및 계측장치로 구분되며, 그림 7과 그림 8은 시험장치 개요도 및 전경을 도시한 것이다.

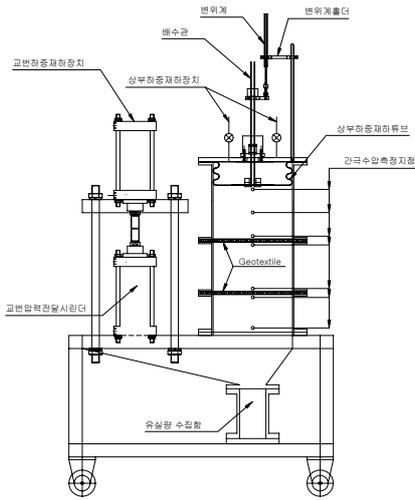


그림 7. 시험장치 모식도



그림 8. 시험장치 사진

### 3.3 시험방법

본 연구의 전체 시험방법 및 분석항목은 교변 흐름에 따른 모재료(준설햄사)의 거동분석시험, 토목섬유 필터의 피로영향 분석시험, 교변하중재하에 따른 필터 유실량 시험으로 구성된다. 교변 흐름에 따른 준설햄사의 거동분석은 교변흐름에 따라 발생하는 필터층 경계면, 필터쇄석, 준설햄사 내의 간극수압 변화를 측정 및 분석하였으며, 시험 종료 후, 준설햄사의 상, 중, 하(필터경계면)에서 토사시료를 채취하여 입도분포시험을 통한 입자재배열 거동을 분석하였다. 또한, 토목섬유 피로영향 분석은 교변흐름 재하 시험의 시험 종료 후 토목섬유 필터의 인장강도시험을 실시하여 강도변화를 분석하였다. 또한, 교변하중 재하에 따른 유실량 시험은 필터가 파손되었을 경우, 필터층의 통하여 유실되는 준설햄사의 양을 정량적으로 분석하였다. 교변흐름의 조건은 크게 상재하중 조건과 흐름주기조건을 재현하였다. 상재하중조건은 제체 하중이  $98\text{kN/m}^2$ 과  $192\text{kN/m}^2$ 이 작용할 경우를 재현하였으며, 주기조건은 5초, 10초, 15초로 730회와 1460회를 반복하였다. 각각의 세부적인 시험조건은 표 5에 나타난 바와 같으며 그림 9는 토목섬유 필터층에 대한 교변하중 시험단면 모식도를 나타낸 것이다.

표 5. 세부 시험항목

토목섬유 필터재료	상재하중	교변하중 주기
GT No.1(부직포)	$98\text{kN/m}^2$	5sec
GT No 2(복합포)	$192\text{kN/m}^2$	10sec
GT No. 3+ Transition		15sec
교변하중 횟수	730회(1년 재현)	

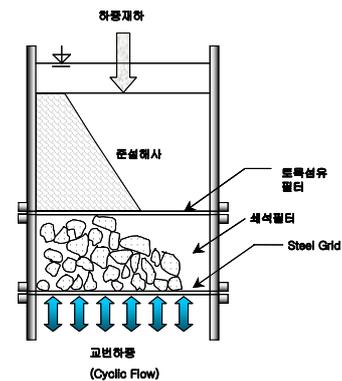


그림 9. 교변하중 시험단면

## 4. 시험결과 및 분석

### 4.1 필터층 내의 간극수압분포

교변흐름 조건 및 토목섬유 필터의 종류(GT No. 1, GT No. 2)에 따른 필터층 내에 발생하는 간극수압분포는 그림 10과 그림 11에 나타난 바와 같다. 각각의 그림에서 보는 바와 같이, 교변흐름의 주기가 빠를수록 토목섬유 필터층의 내부에서 발생하는 정압과 부압의 차가 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 상재하중( $98\text{kN/m}^2$ ,  $192\text{kN/m}^2$ )이 증가함에 따라 필터층 경계면에서의 간극수압차가 크게 발생되었다. 토목섬유 필터의 종류에 따른 간극수압변화를 살펴보면, 부직포 필터의 경우 시료의 포화와 함께 교

변흐름에 의한 간극수압차가 아주 미세하게 발생되었으나, 복합포 필터를 적용한 경우, 모재료인 준설토 래층 내의 간극수압변화가 복합포 필터의 간섭으로 인하여 상대적으로 192kN/m<sup>2</sup> 작용한 경우 약 16% 작게 발생하는 것으로 도출되었다.

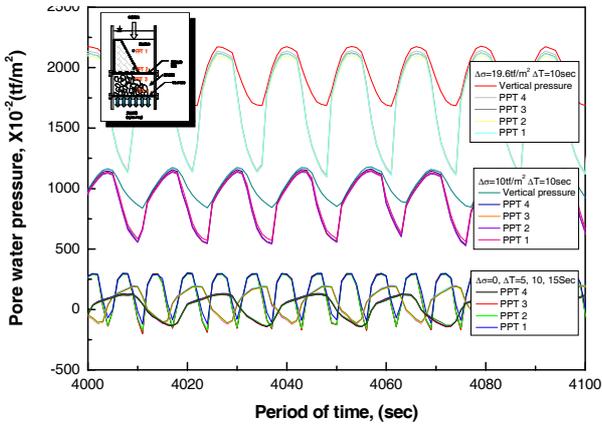


그림 10. 부직포 필터층 내의 간극수압분포

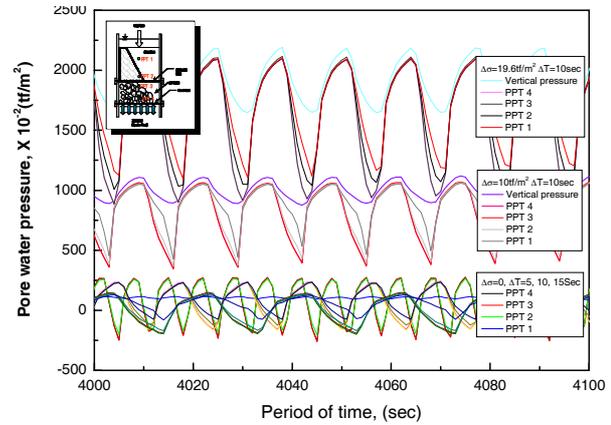
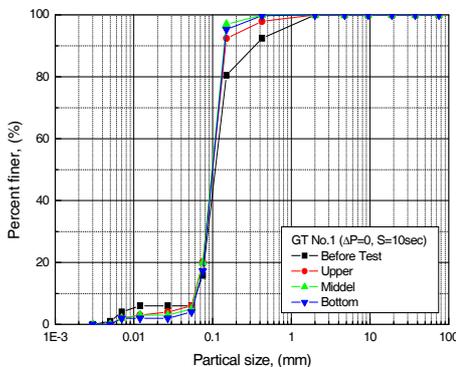


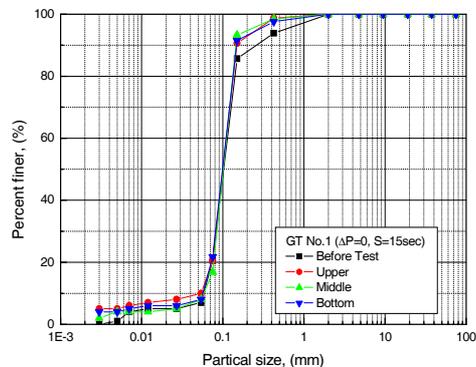
그림 11. 복합포 필터층 내의 간극수압분포

#### 4.2 토사재료의 입자 재배열

일반적으로 필터층(자연필터 또는 토목섬유필터)을 경계로 한 흐름은 일방향 흐름을 갖는 정적흐름 (static flow)과 양방향 흐름이 발생하는 동적흐름이 있으며, 각각의 흐름특성에 따라 필터층에 의하여 보호되어야 하는 모재료의 재료분리가 발생한다. 소규모 제방과 흙댐과 같이 일방향 흐름이 발생하는 필터층에서는 토목섬유 필터층을 경계로 하여 세립분이 필터층으로 이동되며 경계면에서 필터케이크층과 심한 경우 구멍막힘 현상이 발생된다. 반면, 방조제와 같이 조위에 의하여 반복적인 양방향 동적흐름이 발생하는 필터층에서는 토목섬유 경계면에서의 필터케이크 층이 확연히 형성되지 않으며 지속적으로 세립분의 이동이 발생된다. 그림 12는 부직포 필터, 그림 13은 복합포 필터 적용시 교번흐름 하중 재하 후, 상부실린더의 상, 중, 하 부분의 준설토사를 채취하여 입도분포시험을 실시한 결과로, 교번흐름의 주기에 따라 대하여 각각 나타낸 것이다. 각각의 시험결과에서 보는 바와 같이, 원시료에 비하여 0.075mm이하의 세립분은 감소하며, 상대적으로 0.21mm의 조립토의 량이 증가하는 것으로 도출되었다. 교번 흐름하중에 의하여 준설토사 세립분의 이동이 지속적으로 발생되며, 일방향 흐름과 달리 경계면의 세립분이 감소하는 경향을 보였으며, 복합포 필터 적용시 간극수압발생이 감소하여 위치에 따른 입자재배열 현상이 부직포 필터에 비하여 작게 발생되었다.

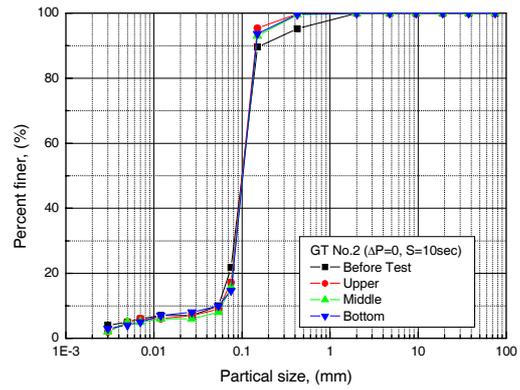
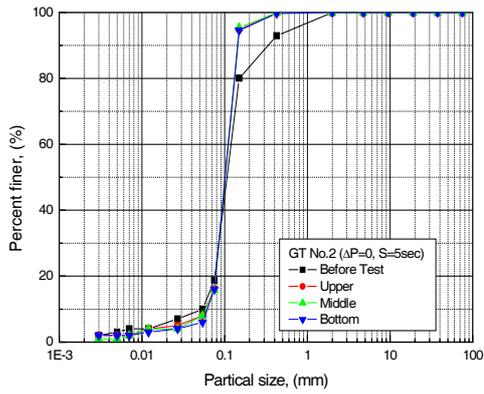


(a) 상재하중,  $\Delta P=0$ , 주기,  $S=10\text{sec}$



(b) 상재하중,  $\Delta P=0$ , 주기,  $S=15\text{sec}$

그림 12. 부직포 필터 적용 시 입도분포시험 결과



(a) 상재하중,  $\Delta P=0$ , 주기,  $S=5\text{sec}$

(b) 상재하중,  $\Delta P=0$ , 주기,  $S=10\text{sec}$

그림 13. 복합포 필터 적용 시 입도분포시험 결과

### 4.3 지오텍스타일 필터의 피로영향분석

본 연구에서는 교번흐름 하중에 의한 토목섬유의 피로영향(fatigue effect)을 분석하기 위하여 인장강도 시험을 실시하였다. Grab 인장강도 시험은 폭이 100mm, 길이가 150mm인 시험편을 25.4mm의 클램프로 잡아서 시험하며, 단위는 N(kg, lbs) 등으로 표현된다.

그림 14와 15는 교번흐름 하중의 주기에 따른 토목섬유 필터의 인장강도 시험결과 및 강도변화 분석결과를 나타낸 것이며, 그림 16과 17은 상재하중의 크기에 따른 인장강도변화를 도시한 것이다. 부직포 필터의 경우, 원시료에 비하여 약 16~32%의 강도저하 현상이 발생하였으며, 교번흐름의 주기가 5초일 경우, 최대 약 32%의 강도저하 현상을 나타내었다. 반면 복합포 필터의 경우, 5초 주기에서 최대 21%의 피로강도저하가 발생되었다. 상재하중에 따른 강도특성변화는 약 192kN/m<sup>2</sup>의 상재하중이 작용할 경우, 부직포 필터의 경우 약 40%, 복합포 필터의 경우, 약 22%의 피로강도 저하현상을 보였다. 또한, 필터재료의 종류에 따른 피로영향은 부직포 필터의 경우 흐름주기 및 상재하중에 따라 피로영향이 현저히 발생되나 복합포 필터의 경우 매트에 의한 강도보강으로 피로강도저하 현상이 감소하는 것으로 도출되었다.

교번흐름과 같이 반복적인 피로하중이 가해지는 경우, 토목섬유 필터의 피로영향은 교번흐름의 주기에 변화에 따른 필터층 내에 발생하는 응력 및 간극수압분포 변화에 영향을 받을것으로 사료된다. 특히 본 연구결과에서 보는 바와 같이, 교번흐름의 주기가 빠를수록 필터층 내의 간극수압 변화차가 크게 발생되며, 피로영향에 의한 강도저하도 가장 크게 발생되었다.

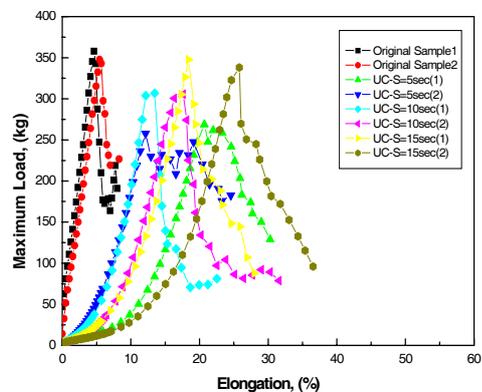
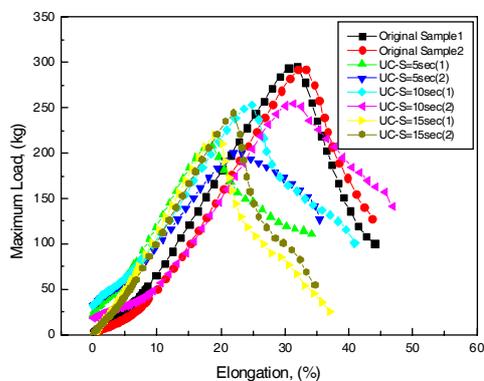


그림 14. 주기에 따른 강도변화(부직포 필터)

그림 15. 주기에 따른 강도변화(복합포 필터)

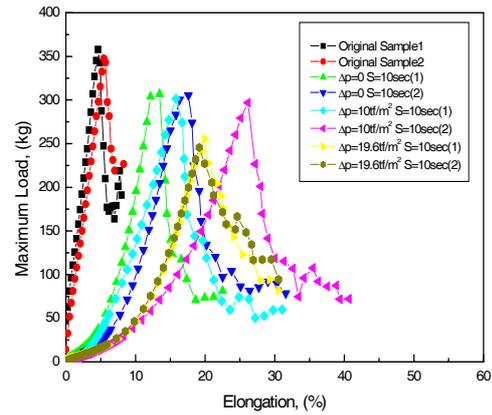
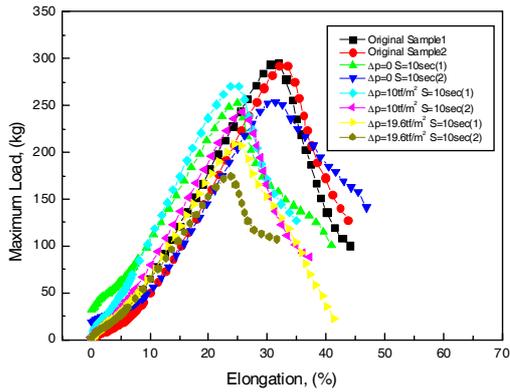


그림 16. 상재하중에 따른 강도변화(부직포 필터)

그림 17. 상재하중에 따른 강도변화(복합포 필터)

## 5. 결론

본 연구는 양방향의 교변흐름이 발생하는 구간에 설치된 토목섬유 필터층에 대하여 토목섬유의 종류, 교변흐름 주기 및 횡수, 상재하중 등의 경계조건에 따른 필터재료 거동 및 토목섬유 필터의 특성변화에 대하여 실험적 연구를 수행하였으며, 연구결과에 따른 결론은 다음과 같다.

1. 교변흐름에 따른 모재료의 입자 재배열 거동은 일방향 흐름에서 발생하는 필터케이직층 형성 또는 구멍막힘 현상이 미미하거나 느리게 발생되며, 장기적이고 연속적인 세립분의 이동 발생되었다. 또한, 점착력이 작아 침식에 약한 준설펀사 성토체의 경우, 상대적으로 유속변화가 크게 발생하는 토목섬유 필터 경계면 부근에서 세립분의 감소가 크게 나타났다. 이러한 입자 재배열 현상은 필터층 경계면에서의 간극수압 증가에 따라 분사 또는 부유현상 발생으로 인한 것으로 판단된다.
2. 교변흐름에 따른 토목섬유 필터의 인장강도 변화(피로영향)는 교변하중 주기가 작으며, 상재하중이 증가할수록 피로영향이 큰 것으로 도출되었다. 특히, 교변하중 주기가 작을수록 필터층 내의 간극수압 차가 크게 발생되어 피로영향을 많이 받는 것으로 사료된다. 토목섬유 필터의 종류에 따른 피로영향 분포는 부직포 필터의 경우 흐름주기 및 상재하중에 따라 피로영향이 현저히 발생되나 복합포 필터의 경우 매트에 의한 강도보강으로 피로강도저하 현상이 약 18% 정도 감소하는 것으로 나타났다.
4. 교변흐름이 작용하는 토목섬유 필터층의 경우, 모재료의 입자재배열에 의한 필터층 변형 및 파손이 예상되며, 반복적인 변형과 응력변화로 토목섬유 필터의 피로영향에 의한 강도저하도 현저히 발생할 수 있다. 따라서 양방향 교변흐름이 발생하는 구간에 대한 토목섬유 필터층의 설계 및 시공은 좀더 면밀한 현장조건 검토와 필터기준에 대한 검토가 요구된다.

## 참고문헌

1. 농업기반공사, (2003), “방조제 해측사면 성토재료 거동분석에 관한 연구”, 농림부, pp. 112-117.
2. Cazzuffi, D, Mazzucato, A., Moraci, M, (1995), "Reliability and Reproducibility of Hydrodynamic Filtration Tests for the Design of Geotextiles as Filters, Quebec, Canada Geosynthetics'95, pp. 231-251.
3. Giroud, J.P., (1985), "Filter Criteria for Geotextile", Geotextiles and Geomembranes Definitions Properties and Design Industrial Fabrics Ass. International St. Paul Minn., pp. 103-108.
4. Giroud, J.P., (2000), "Filter Criteria" in Jubilee Volume 75th Anniversary of Karl Terzaghi's Erdbaumechanik, Technical University, Vienna, Austria,
5. Ingold, T.S., (1998), "Civil Engineering Requirements for Long Term Behavior Durability of Geotextiles RILEM, Chapman and Hall, London, New York, pp. 20-29.
6. Veldhuijzen Van Zanten, R., (1986), "Geotextiles and Geomembranes in Civil Engineering", A.A. Balkema, Rotterdam.