

## 지오멤브레인/지오텍스타일의 접촉 전단강도 평가

### The Evaluation of Interface Shear Strength Between Geomembrane and Geotextile

서민우<sup>\*1</sup> Seo, Min-Woo

박준범<sup>\*2</sup> Park, Jun-Boum

김운영<sup>\*3</sup> Kim, Oon-Young

#### Abstract

Various geosynthetics used as liners or protection layers are installed in the solid waste landfills. The interface shear strength between geosynthetics installed at the slope of the landfill is a very important variable for the safe design of the bottom and cover systems in the solid waste landfills. The interface shear strength between Geomembrane and Geotextile is estimated by a large direct shear test in this study. The effects of normal stress, water existing between geosynthetics and surface condition of Geomembrane, i.e. smooth or textured, were investigated. The test results show that the effect varied depending on the level of normal stress and the type of geosynthetic combinations. The shear strength was evaluated by the Mohr-Coulomb failure criterion in this research. The shear strength parameters obtained from tests considering the site specific conditions such as normal stress, dry or wet, and surface condition of geosynthetic should be applied to the design of geosynthetics installed at the slope of the landfill to construct a safe solid waste landfill.

#### 요지

폐기물 매립지에는 차수 및 보호기능을 하는 다양한 토목섬유가 사용된다. 토목섬유 사이의 접촉(interface) 전단강도는 사면에 설치되는 차수 및 최종 덮개시설의 안전한 설계를 위해 꼭 필요한 물성치로서, 본 연구에서는 대형 직접 전단 시험기를 사용하여 지오멤브레인(GM)과 지오텍스타일(GT) 사이의 접촉 전단강도를 측정하였다. 본 논문에서는 Mohr-Coulomb 파괴 포락선을 이용하여 전단강도를 평가하였으며, 연직하중, 수침상태, 지오멤브레인(GM)의 표면상태-texturing 유무 - 등이 전단강도에 미치는 영향을 알아보았다. 분석 결과 연직하중이나 수침상태가 전단강도에 미치는 영향은 각각 하중의 크기와 토목섬유의 종류에 따라 정도가 다르게 나타났다. 사면에 설치되는 토목섬유의 경우, 다양한 현장조건-상재하중, 수침상태, 사용되는 토목섬유의 종류-을 고려한 시험 결과를 통해 얻은 물성치를 이용하여야 안전한 설계가 될 수 있을 것이다.

**Keywords :** Geomembrane, Geotextile, Interface shear strength, Normal stress, Solid waste landfill, Water effect

\*1 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., redsmwl@snu.ac.kr)

\*2 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ.)

\*3 정회원, 육군사관학교 교수 (Member, Professor, Civil Engrg., Korea Military Academy)

## 1. 서 론

폐기물 매립지에서 발생하는 침출수에는 환경에 유해한 물질들이 다양으로 포함되어 있다. 따라서, 매립지 설계시에는 침출수가 외부로 누출되지 않도록 특별한 주의를 기울여야 하며, 이러한 목적으로 매립지의 바닥과 사면에는 점토 및 토목섬유로 이루어진 차수 시설이 설치된다. 또한 매립이 완료된 후에는 우수 등이 매립지 안으로 유입되어 침출수가 과다하게 생성되는 것을 방지하기 위해 최종 덮개가 설치된다. 매립지에 설치되는 전형적인 차수 및 최종 덮개 시스템은 그림 1과 같다. 그림 1에 제시되어 있듯이 차수 및 최종 덮개 시스템에는 다양한 기능을 가진 토목섬유들이 이용되며, 그 중에서도 차수 기능을 하는 Geomembrane(이하 GM)과 GM의 보호 및 분리 그리고 배수 기능을 하는 Geotextile(이하 GT)이 그 주를 이루고 있다.

매립지에 사용되는 GM 차수재는 설계시 다양한 조건에 대한 안정성 검토를 실시하여야 한다(정문경 등, 1998). 각 조건에 대한 안정성 검토를 위해서는 토목섬유들의 다양한 물성치가 필요하다. 그 중에서 토목섬유/토목섬유, 혹은 흙/토목섬유 사이의 마찰 특성-마찰각은 안정성 검토 계산시 자주 사용되는 설계인자이다. 안정성 검토 사항 중에 마찰각을 필요로 하는 항목으로는 (1)차수재 자중에 대한 안전, (2)매립물 자중에 대한 안전, (3)앵커에 대한 안전, (4)침하에 의해 차수재에 유발되는 전단에 대한 안전, 그리고 (5)매립지 함몰에 대한 안전 등이다. 한편, 1999년에 개정된 폐기물 관리법 제30조 및 시행규칙 제20조에는 사면에 설치되는 GM은 인장력에 대하여 ‘2’ 이상의 안전율을 가질 것을 명시하고 있는데, GM에 유발되는 인장력 계산시 토목섬유

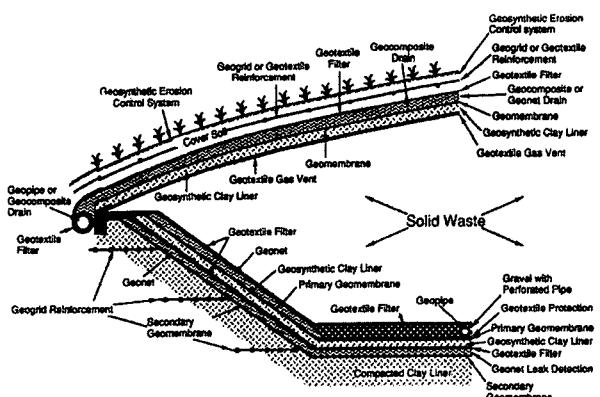


그림 1. 매립지 차수 및 최종 덮개 시스템 (Daniel & Koerner, 1995)

사이의 마찰각은 중요한 물성치가 된다.

토목섬유 차수재 사이(interface)의 마찰특성은 1988년에 미국의 Kettleman Hills 매립지의 파괴사례(Mitchell 등, 1990 ; Seed 등, 1990)가 보고되면서 그 중요성이 부각되었다. 외국의 경우, 이 시기를 전후로 하여 최근까지 토목섬유 사이의 마찰특성에 관한 많은 연구들이 이루어졌으나(Stark & Poeppel, 1994; Stark 등, 1996; Jones & Dixon, 1998a; Jones & Dixon, 1998b; Wasti & Özدüzgün, 2001), 국내의 경우는 이 주제에 관련된 연구결과가 드문 실정이다. 국내에서는 이광열(1997)이 흙과 토목섬유 사이의 마찰각을 측정하여 매립 높이에 따른 차수재의 소요인장강도를 예측하여, 제방높이와 사면의 경사가 증가함에 따라 소요인장강도가 증가한다고 발표하였고, 신은철과 오영인(2000)은 토사/GM, 지오텍스탈/GM, GCL(토목섬유 점토 차수재)/GM 사이의 전단 특성에 관한 연구를 수행하여, 토사 특성, 지오멤브레인의 표면 상태, 그리고 GCL의 수화 상태가 마찰 특성에 미치는 영향을 고찰한 바 있다. 이와 같이 몇몇 국내 연구자들에 의해 흙/토목섬유 사이의 전단강도에 대한 연구(이광열, 1997; 주재우 등, 1998; 원명수 등, 2001)와 토목섬유/토목섬유의 전단특성(신은철과 오영인, 2000)에 대한 연구가 수행되었지만 아직도 보다 포괄적이고 우리나라 매립 조건에 맞는 연구가 필요한 실정이다.

토목섬유/토목섬유 혹은 토목섬유/흙 사이의 접촉 전 단강도 측정법으로는 (1)직접 전단시험(direct shear test) (2)링 전단시험(ring shear test) (3)경사판 시험(inclined board test) 등이 있다(Jones & Dixon, 1998a). 첫째로 직접전단 시험은 흙의 전단강도 측정에 사용되는 직접전단 시험기를 변형한 것으로, 일반적으로 ASTM D 5321(1998)에 제시된 방법을 따른다. 직접전단시험은 제한된 범위 내-일반적으로 100mm이하-에서 시험이 실시되기 때문에, 잔류 전단강도를 정확히 평가할 수 없다는 점과 비교적 큰 연직응력 상태에서 시험을 실시하여야 하는 단점이 있다. 그러나, 시험기의 구조가 간단하고 연구자들에게 익숙하다는 장점 때문에, 세 가지 방법 중 현재 가장 널리 사용되고 있다. Jones & Dixon(1998b)은 300mm×300mm 크기의 전단상자를 이용하여 표면이 매끄러운(smooth) GM(이하 S-GM)와 표면이 거친(textured) GM(이하 T-GM) 사이의 전단 특성에 관한 연구를 수행하여, GM의 표면상태, 복토재(cover soil)의 종류, GT의 구성 재료의 차이가 전단강도에 미치는 영

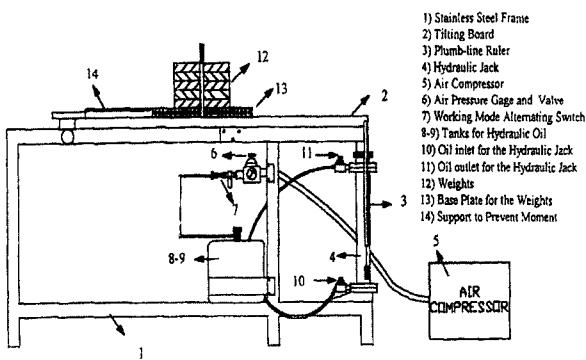


그림 2. 경사판 (Inclined board) 시험 (Izgin & Wasti, 1998)

향을 알아보았다. 국내에서도 본 방법을 사용하여 접촉 전단 강도를 측정한 바 있다(신은철과 오영인, 2000; 이광열, 1997).

두번째로 링 전단 시험이 있다. Stark & Poeppel(1994)은 링 전단 시험법을 이용하여, 토목섬유/토목섬유 또는 흙/토목섬유 사이의 전단 강도를 측정한 바 있다. 이 방법의 장점으로는 (1)변위의 제약이 없어 비교적 정확한 잔류 전단 강도를 측정할 수 있고, (2)전단 도중 접촉면이 동일하게 유지되며, (3)기계적 마찰이 거의 없는 것 등을 들 수 있다. 반면에 단점으로는 (1)전단 방향이 실제 현장에서 이루어지는 방향과 같지 않고, (2)시료의 크기가 작다는 점 등이 있다. Stark 등(1996)은 이 방법을 이용하여 GM/GT 사이의 전단 강도를 측정하여, 최대강도 이후의 강도감소 효과를 확인하고, GM의 표면 상태, GT의 두께, 섬유 종류, 표면의 거칠기 상태 등이 접촉 전단강도에 미치는 영향을 살펴보았다. Jones & Dixon(1998b)은 이 방법과 직접 전단시험 결과를 비교하여, 링 전단 시험법이 큰 변위를 유발시킬 수 있기 때문에 잔류상태에서 더 작은 점착력을 나타낸다고 발표하였다.

마지막으로 경사판 시험이 있는데, 이 시험(그림 2)은 한 쪽 끝이 헌지(hinge)인 경사판(tilting table) 상부에 하나의 토목섬유를 고정시키고, 나머지 토목섬유를 상재 하중의 하부에 고정시킨 상태에서 실시된다. 마찰각은 경사판을 서서히 위로 옮겨 상재하중(weight) 부분이 움직이는 순간의 경사판의 각도를 측정하여 구하게 된다. 유럽에서 널리 사용되는 방법으로 낮은 상재하중 상태에서만 시험을 실시해야 하는 제약을 가지고 있다. 그러나, 토목섬유 사이의 거동을 모사하는데 세가지 방법 중 가장 정확하다고 알려져 있다(Jones & Dixon, 1998a).

Wasti & Özدüzgün(2001)은 본 시험과 직접 전단시험

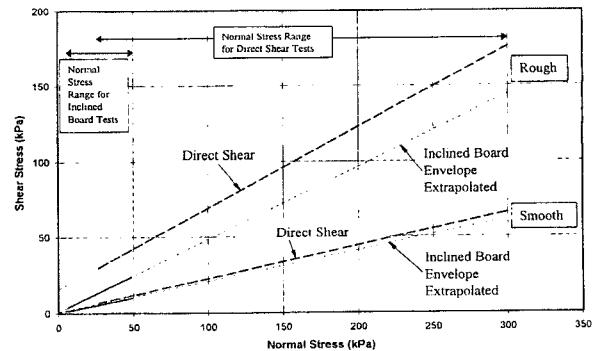


그림 3. 경사판 시험과 직접전단 시험 결과 비교 (Wasti & Özدüzgün, 2001)

을 동시에 수행하여 그 결과를 비교하였는데(그림 3), 같은 크기(크기 60mm×60mm)의 재료에 대해 시험을 수행한 결과, 직접 전단시험에서 더 큰 전단강도가 측정됨을 확인하였다. GM 표면상태가 거친(그림 3에는 rough로 표현됨) 경우, GM의 표면이 매끈한(smooth) 경우보다 직접 전단 시험과 경사판 시험(inclined board test) 결과 사이에서 더 큰 전단 강도의 차이를 보였다.

본 연구의 목적은 대형 직접전단 시험을 통해 GM/GT 사이의 접촉 전단 특성을 측정하여 평가하고, 잔류 상태, GM의 표면 유형, 수침 상태, 연직하중의 크기 등이 전당강도에 미치는 영향 파악하는데 있다. 또한 본 연구 결과를 기존의 연구 결과와의 비교하여 본 연구의 적절성을 확인하였다. 본 시험의 결과는 국내에서 생산된 토목섬유를 사용하는 매립지를 설계할 때, 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 재료 및 시험 방법

### 2.1 시험 재료 및 특성

시험에 사용된 토목섬유는 부직포(nonwoven GT)와 HDPE(High density polyethylene) GM이며, 각 토목섬유의 두께, 구성 성분, 인장 특성 등은 표 1과 같다.

### 2.2 시험 장비 및 과정

본 시험에 사용된 장비는 대형 직접전단 시험기로서 개략적인 모습은 그림 4와 같다. 시험기 상부와 하부 상자의 단면 크기는 30cm×30cm이고, 하부상자는 단단한 재료를 채워 전단면이 평평하게 유지되도록 하였다. 시험기의 구성과 전체적인 과정은 ASTM D 5321에 제시

표 1. 시험에 사용된 토목섬유의 특성

종류	설명	색	두께(무게)	인장강도 <sup>*)</sup> (kgf/m)		재료	시험법
				MD <sup>**) (kgf/m)</sup>	CMD <sup>**) (kgf/m)</sup>		
S-GM	Smooth GM	검정	2.0 mm	6,506	6,119	HDPE	KS M 3054
T-GM	Textured GM	검정	2.0 mm				
GT(A)	부직포	흰색	9.0 mm (1,000 g/m <sup>2</sup> )	11,629	7,358	staple fiber PP	KS K 0520
GT(B)	부직포	검정	5.0 mm (1,000 g/m <sup>2</sup> )	11,906	10.238		

\*) GT는 grab 법, GM 시료는 아령형으로 폭 1cm, 인장강도는 m 단위로 환산함

\*\*) MD는 토목섬유의 방향이 기계방향, CMD는 MD의 직각(cross) 방향

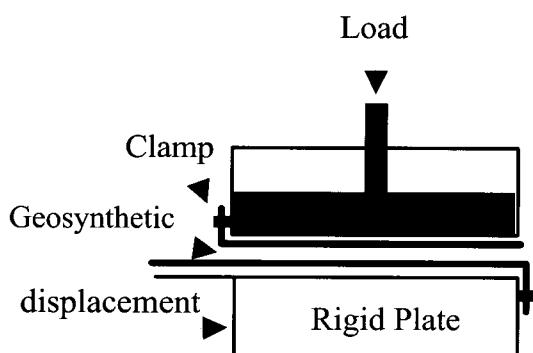


그림 4. 본 연구에 사용된 시험기의 구조

된 방법을 따랐다.

시험순서는 다음과 같다. 먼저 GM과 GT을 각각 적당한 크기로 절단하고, 고정핀을 이용하여 전단시험기의 상·하부 상자에 고정시킨다. 그리고 상·하부 상자에 고정된 토목섬유를 서로 접촉시킨 후, 상재 하중을 가한다. 6, 31, 54, 100, 146(kPa) 크기의 상재 하중이 가해졌으며, 하중을 재하한 후 약 30분이 경과한 후에 전단을 실시하였다. 31-146kPa의 하중은 유압을 통해 재하되었으며, 6kPa의 경우는 이 무게에 상당하는 사하중을 가하였다. 각 조합별(interfaces)로 총 5번의 시험이 실시되었다. 전단 속도는 1mm/min 였으며, 실시된 시험 항목은 표 2에 정리하였다. 이와 같은 시험 조합을 통해 GT의 종류, GM의 표면 상태, 수침 상태 등의 효과를 알아보았다.

시험항목 중 습윤 조건은 토목섬유가 실제 매립지 현장에서 빗물, 지하수 또는 침출수에 젖은 상태에서의 토목섬유의 접촉 전단강도 특성을 알아보기 위해 시행되었다. GT를 수도물(tap water)에 약 3~5시간 동안 적신 후 시험을 실시하였으며, 시험을 실시한 후에는 GT의 무게를 측정하여 물에 의한 GT의 무게 증가를 알아보았다. 이 경우는 정확한 시험 결과를 얻기 위해, 각

표 2. 시험 항목

이름	접촉면	연직 하중 (kPa)	습윤 조건	횟수
Test A	S-GM/GT(A)	6, 31, 54, 100, 146	Dry	5
Test B	S-GM/GT(B)		Dry	5
Test C	S-GM/GT(B)		Wet	10
Test D	T-GM/GT(A)		Dry	5
Test E	T-GM/GT(A)		Wet	10

하중 별로 2번씩의 시험을 실시하여 그 값을 평균하였다.

### 3. 시험 결과 및 고찰

#### 3.1 전단 변위와 전단 응력

본 시험을 통해 측정된 전단변위와 접촉 전단강도는 그림 5와 같으며, 변형률-하중 관계 곡선에서 구한 최대 및 잔류 전단강도, 강도 감소율 등을 표 3에 정리하였다.

건조 상태에서 S-GM과 GT의 접촉 전단강도는 GT(A)와 GT(B)를 대상으로 시험이 실시되었으며(Test A, B), 5개의 상재하중(6~146 kPa) 아래서 변위에 따른 접촉 전단강도의 변화는 그림5의 Test A, B와 같다. 모든 하중 단계에서 최대 전단강도는 3mm이하의 변위에서 발생하였으며, 빠른 시간 내에 최대 전단강도가 나타난 후 강도가 감소하는 변형률 연화(strain softening) 현상을 확인할 수 있었다.

습윤 상태에서 S-GM과 GT의 변위에 따른 접촉 전단강도(그림 5의 Test C)를 살펴보면, 모든 하중 단계에서 최대 전단강도는 2mm 이하의 변위에서 발생하였으며, 본 경우 역시 최대 전단강도가 나타난 후 즉각적으로 강도가 감소하였다. 상재하중 54 kPa이상의 조건에서는 전단강도가 최대점에 다다른 후 일시적으로 감소하였다가 다시 증가하는 모습을 보였다. 이는 전단이 진행됨

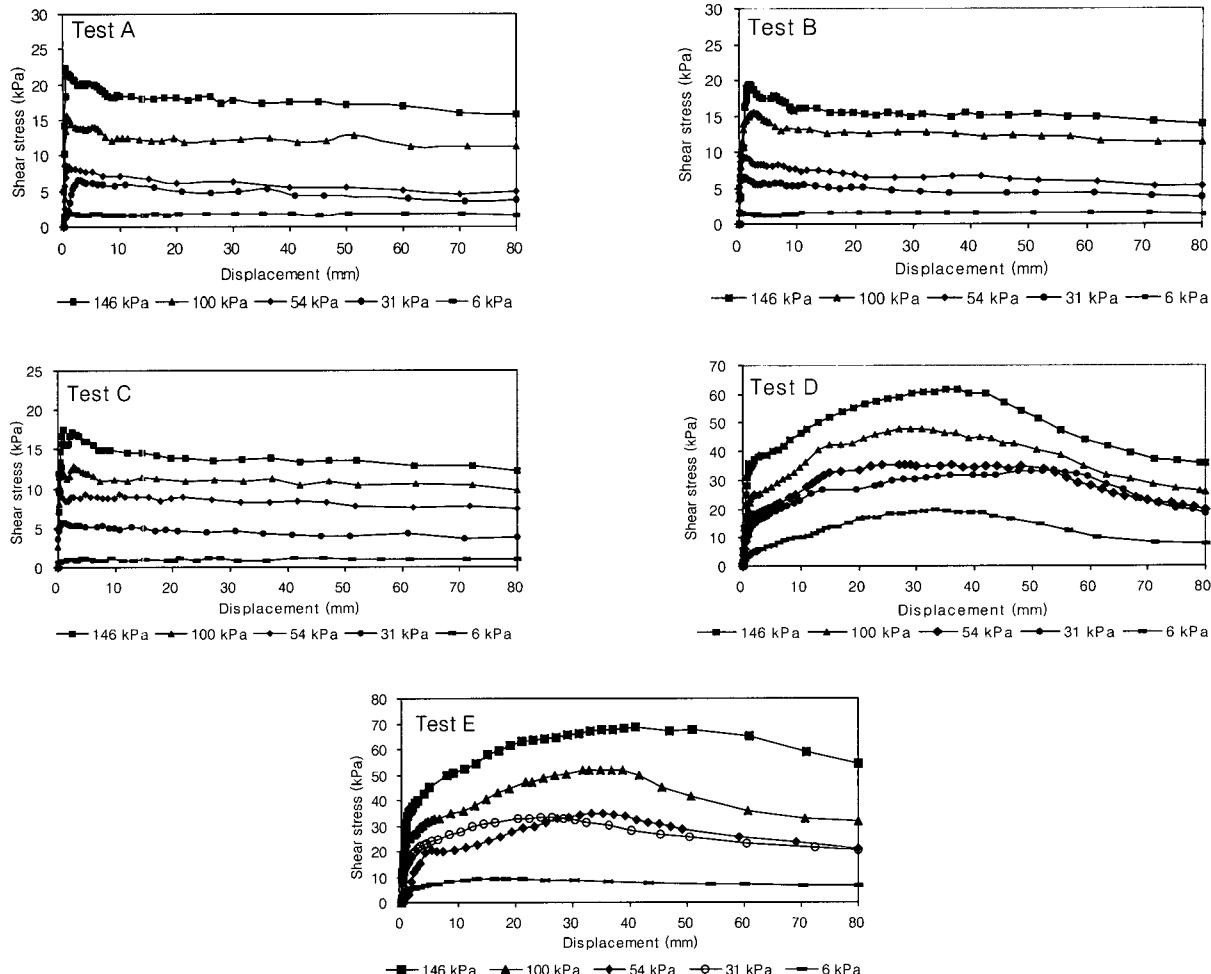


그림 5. 변위에 따른 접촉 전단응력 (Test A~E)

에 따라 접촉면에 과잉 간극 수압이 발생하여 나타난 결과라고 판단된다. 시험 종료 후 GT의 무게를 측정하였더니, 100g에서 400g으로 300%의 무게가 증가하였다.

5개의 상재하중 조건에서 T-GM과 GT의 변위에 따른 접촉 전단강도의 변화(Test D, E) 역시 그림 5에 제시되어 있다. 본 경우는 앞서 제시한 S-GM의 곡선과는 매우 상이한 모습의 전단강도-변형률 관계를 보이고 있었다. 최대 전단강도는 큰 변위가 진행된 후에 나타났으며, 최대 전단강도를 전후로 해서 강도의 급격한 변화가 없는 것이 관찰되었다. 최대 전단강도가 느리게 발현됨은 GT의 인장(stretching)에 기인한 것으로, 이러한 인장은 시험 종료 후 GT의 길이를 측정하여 확인할 수 있었다.

### 3.2 접촉 전단 강도

본 시험을 통해 구한 접촉 전단강도는 Mohr-Coulomb 파괴 포락선 식을 이용하여 연직 응력의 함수로 표현하

였다. 본 시험 결과는 식 (1)에 따라 접촉 전단강도를 산정하였으며, 그 결과는 표 4 및 그림 6과 같다.

$$\tau = \alpha + \sigma \tan \delta \quad (1)$$

여기서,

$\sigma$  : 연직응력(kPa),  $\tau$  : 전단 응력(kPa),  
 $\alpha$  : 겉보기 접착력(kPa),  $\delta$  : 마찰각(°)

표 4를 보면 Test A, B의 경우 아주 높은 상관관계를 나타내고 있으며, Test C, D, E의 경우도 Test A, B에 비해서는 낮지만 비교적 높은 상관관계를 보이고 있었다. Test A, B는 비록 GT의 성질이 약간의 차이가 있지만, 두 경우 모두 S-GM/GT 사이의 전단강도를 표현해 주는 것으로, 최대 마찰각은 7-8° 최대 접착력은 1.4-2.0 kPa이었다. 이 값들은 설계 대상 매립지의 하중 조건이 본 시험이 실시된 하중 범위(6~146kPa)인 경우에는 적용이 가능할 것으로 판단된다. 한편 T-GM은 S-GM에

표 3. 시험 결과 정리

종 류	습윤 상태	연직 응력 (kPa)	최대전단강도 (kPa)	잔류전단강도 (kPa)	강도 감소율 (%)	잔류/최대강도의 비
S-GM/GT(A) (Test A)	dry	6	1.9	1.5	21	0.79
		31	6.5	3.7	43	0.57
		54	8.4	5.0	40	0.60
		100	15.6	11.3	28	0.72
		154	21.6	15.8	27	0.73
S-GM/GT(B) (Test B)	dry	6	1.6	1.4	12	0.88
		31	6.4	3.7	42	0.58
		54	9.3	5.3	43	0.57
		100	15.5	11.3	27	0.73
		154	19.4	14.0	28	0.72
S-GM/GT(B) (Test C)	wet	6	1.2	1.0	17	0.83
		31	5.7	3.8	33	0.67
		54	10.1	7.5	26	0.74
		100	12.4	8.7	30	0.70
		154	18.8	12.3	35	0.65
T-GM/GT(A) (Test D)	dry	6	19.8	7.8	61	0.39
		31	33.5	18.4	45	0.55
		54	35.5	20.0	44	0.56
		100	47.9	26.0	46	0.54
		154	61.7	36.0	42	0.58
T-GM/GT(A) (Test E)	wet	6	9.4	6.4	32	0.68
		31	33.2	20.6	38	0.62
		54	34.9	21.0	40	0.60
		100	51.9	31.6	40	0.60
		154	68.9	54.2	27	0.73

비해 아주 큰 전단강도를 나타내고 있었으며(그림 6), 그림 6에서 실선으로 표시된 부분은 건조 상태의 GT, 점선은 습윤 조건에서의 결과를 가리킨다.

### 3.3 최대 전단강도와 잔류 전단강도

그림 5에서 볼 수 있듯이 큰 변형률 연화(strain softening)

현상을 보이는 경우에는 잔류상태에서의 강도를 측정하여 감소량을 평가하는 것이 중요하다. 본 시험에서는 전 단변형 80mm에서의 측정값을 잔류 전단강도라 하였다. 기존의 연구(Stark 등, 1996)에 의하면 80mm의 값은 진정한 의미의 잔류 전단강도라고 하기에는 변위가 작았지만, 본 시험기의 한계로 인해 80mm에서의 강도를 잔류 전단 강도라 가정하고 분석을 실시하였다.

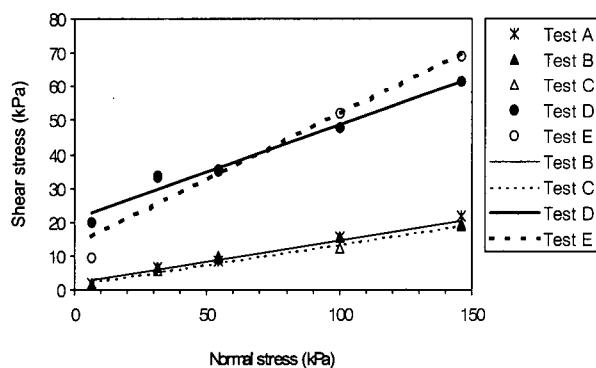


그림 6. 최대 접촉 전단강도 (Test A의 회귀선은 B와 유사하여 생략함)

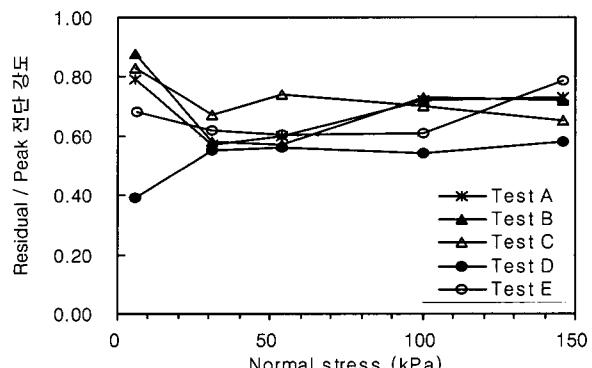


그림 7. 연직 응력에 따른 잔류/최대 전단강도의 비

표 4. 최대 및 잔류 전단강도

이 름	최대 전단 강도			잔류 전단 강도		
	마찰각 (°)	접착력 (kPa)	$r^2$	마찰각 (°)	접착력 (kPa)	$r^2$
Test A	7.9	1.37	1.00	6.0	0.36	0.99
Test B	7.2	1.95	0.98	5.4	0.80	0.98
Test C	6.7	1.69	0.96	4.3	1.52	0.94
Test D	15.7	20.7	0.98	10.3	9.4	0.95
Test E	21.3	13.4	0.95	17.2	5.9	0.95

본 연구에서는 강도 감소율을 산정하여 잔류상태에서의 강도 감소량을 정량화하였다. 여기서 강도 감소율이란 잔류 상태에서의 강도 감소량과 최대 전단강도의 비를 의미한다. 표 3의 강도 감소율을 각 시험별로 평균하여 표 5에 제시하였으며, 또한 최대 전단강도와 잔류 전단강도 비(표 3)도 그림 7에 제시하였다. 표 5를 보면 T-GM를 대상으로 하는 Test D에서 잔류 상태로 진행하면서 가장 큰 강도 감소(48%)가 발생하였으며, 그림 7도 이와 유사한 모습을 보여주고 있다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 최대 강도와 잔류 전단강도의 비는 연직응력에 따라 변하였는데, 본 연구 결과에서는 어떤 경향을 찾기는 힘들었다. 단지 80mm는 진정한 잔류상태에 이르기에는 부족한 변위이기 때문에 이러한 경향이 나타난 것으로 판단되며, 만약 더 큰 변위에서의 값을 얻어서 이를 잔류강도로 한다면 연직응력에 따른 경향을 파악할 수 있을 것이라 생각된다. 이처럼 최대 및 잔류 강도 비의 경향을 파악할 수는 없었지만, Test D를 제외한 모든 경우에서 잔류 전단강도는 최대 전단강도의 60~80% 사이에서 분포함은 관찰할 수 있었다.

설계시 최대, 잔류, 또는 가중치를 고려한 최대 전단 강도 중 어떤 값을 사용하는가는 매우 중요한 문제이다.

표 5. 평균 강도 감소율

종 류	평균 강도 감소율 (%)
Test A	32
Test B	31
Test C	28
Test D	48
Test F	35

일반적으로 과다 설계가 예상되는 경우는 최대 전단강도를 사용하고, 보수적인 설계가 필요할 때는 잔류 전단강도를 사용한다. Jones & Dixon(1998b)은 매립지의 사면에 설치되는 토목섬유 차수재의 경우는 큰 변위의 발생이 예상되기 때문에 잔류 전단강도를 적용할 것을 제안한 바 있다.

### 3.4 거칠기(Texturing) 효과

T-GM은 GM의 마찰을 증가시키기 위해 GM의 표면을 거칠게 만든 GM을 말한다. 이러한 GM의 texturing으로 인하여 접촉 전단강도(마찰각, 접착력)는 크게 증가하고, 최대상태에서 잔류 상태로 진행됨에 따라 강도 감소량이 매우 크게 나타나게 된다(그림 8).

그림 8은 S-GM과 T-GM의 최대 및 잔류 상태에서의 파괴 포락선 비교하여 보여주고 있다. T-GM이 사용된 경우에는 S-GM에 비해 최대 강도는 500% 잔류 전단강도는 380%의 강도 증가가 있었다. 증가 효과는 연직응력이 작은 쪽에서 더 커으며, 이러한 차이는 그림 8에서도 확인할 수 있다.

앞서 언급했듯이 T-GM/GT에서 큰 강도 감소를 보이는 것(표 5 참조)은 전단이 진행됨에 따른 GT와 GM의 표면 변화와 연관이 있다. 즉, S-GM/GT에서는 주 파괴 메카니즘이 전단면에서의 미끄러짐(sliding)이기 때문에 재료 자체의 변화는 없지만, T-GM/GT에서는 시험 도중에 발생하는 GT 장섬유(filament)의 끊어짐, 장섬유의 재배열 또는 GM texturing의 손상 등이 주원인으로 작용하여 전단이 진행되는 동안 GM과 GT의 표면에 변화가 일어난다. 이러한 표면의 변화는 시험 후 GT의 표면을 찍은 SEM(scanning electron microscope) 사진을 통해서도 확인할 수 있었다(그림 9).

T-GM은 S-GM에 비해 접촉 전단강도가 현저히 크기 때문에, 경사가 급하고 높은 마찰각이 요구되는 매립지 현장에 널리 사용된다. 그러나, T-GM을 사용할 때, T-GM의 큰 마찰특성으로 인해 GT에 과도한 인장력이 유발될

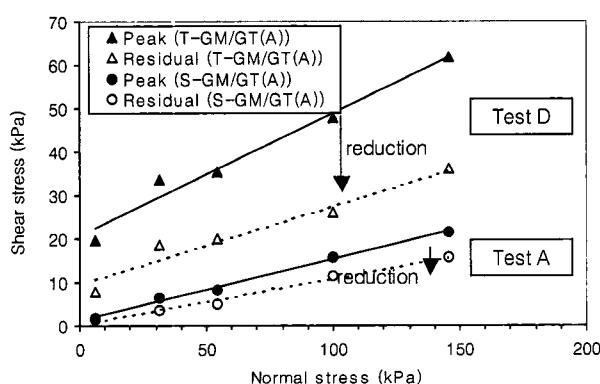
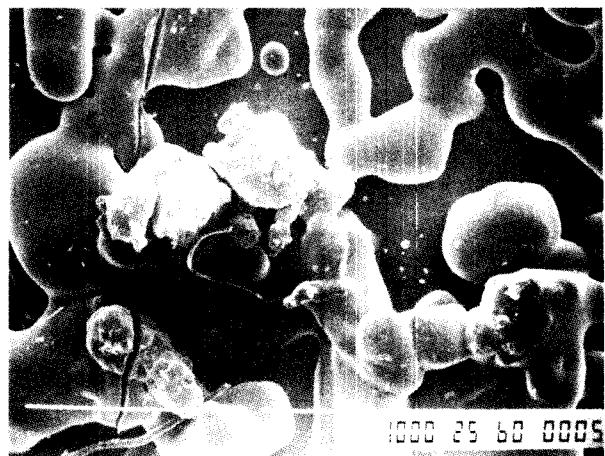


그림 8. S-GM과 T-GM의 파괴 포락선 비교



(a) GT 장섬유(filament)의 끊어짐



(b) GM texturing 파손

그림 9. 시험 후 GT과 GM 표면 상태 (SEM 사진)

수 있으므로, 설계시 T-GM의 상, 하에 설치되는 토목섬유에 유발되는 인장력을 미리 산정하여 인장에 대한 안정성 유무를 평가하여야 한다.

### 3.5 하중 크기가 마찰각에 미치는 영향

접촉 전단 강도는 일반적으로 연직응력에 따라 달라진다고 알려져 있다(Wasti & Özدüzgün, 2001). 본 연구에서는 하중에 따른 마찰각의 변화를 평가하기 위해 접착력을 고려하지 않는 ‘Secant 마찰각’을 도입하였다. Secant 마찰각은 가해진 연직 하중과 전단 응력을 이용하여 구하며(식 (2)), 토목섬유 사이의 경계면의 한계 경사각을 의미하기도 한다. 연직 하중에 따른 secant 마찰각의 변화는 그림 10에 제시되어 있다.

$$\delta_{secant} = \tan^{-1} (\tau/\sigma) \quad (2)$$

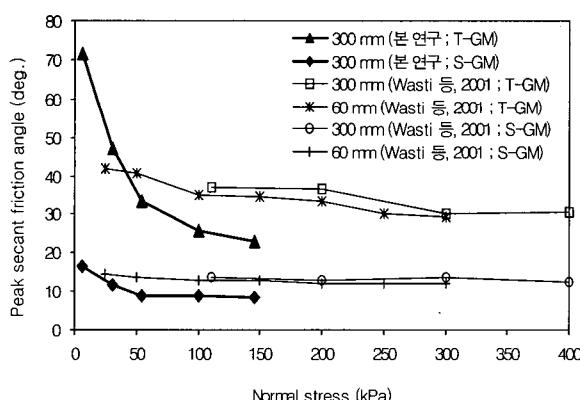


그림 10. 연직 하중에 따른 secant 마찰각의 변화 (GM/GT, 숫자는 재료의 크기)

그림 10을 통해 연직하중에 따른 마찰각의 변화가 T-GM에서 매우 크게 나타남을 확인할 수 있다. T-GM의 경우, 연직하중이 6kPa에서 146kPa로 증가할 때, 마찰각이  $49^\circ$  감소하였으며, 감소 효과는 작은 하중 단계 (54kPa이하)에서 두드러지게 나타났다. S-GM에서는 연직응력의 영향이 T-GM에 비해 크게 나타나지는 않았다. 본 시험 결과를 Wasti & Özدüzgün(2001)의 연구 결과와 비교해보면(그림 10), 연직 응력이 작은 범위(<40kPa)에서는 본 시험에서의 마찰각이 더 크게 나타났으며, 연직 응력이 큰 경우는 마찰각이 작게 평가되었다. 이는 토목섬유 고정 방식을 포함한 시험기의 차이와 재료의 상이함에서 기인한 것으로 판단된다. 비교를 통해 본 시험 결과가 40kPa 이상의 연직하중에서는 보수적인 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다.

Wasti & Özدüzgün(2001)은 시험시 적용되는 연직응력이 작을수록 설계시 접촉 전단강도를 과대 평가할 가능성이 있음을 지적하면서, 설계 위치에 예상되는 연직하중을 미리 예측하여 해당 하중 혹은 더 큰 연직하중에 대하여 시험을 실시하여 그 결과를 설계에 반영할 것을 제안하였다.

### 3.6 수침상태로 인한 접촉 전단강도의 변화

매립지에 설치되는 토목섬유 차수재와 이들의 경계면(interface)은 본격적인 매립이 시작되기 이전에는 빗물이나 기타 현장 조건에 의해서, 그리고 매립지 진행되는 동안에는 침출수에 의해서 흔히 습윤 상태가 된다. 따라서, 설계시 물의 영향에 의한 전단 강도 변화를 평

표 6. S-GM/GT 접촉 전단강도 결과 정리 및 비교

연구자 (년도)	GT 종류 (g/m <sup>2</sup> )	최대 전단 강도		잔류 전단 강도		하중범위 (kPa)	시험법	속도 (mm/min)	크기 (mm)
		마찰각(도)	점착력(kPa)	마찰각(도)	점착력(kPa)				
본 연구 (2001)	부직포 (1,000)	7.2 ~ 7.9	1.4 ~ 2.0	5.4 ~ 2.0	0.4 ~ 0.8	6 ~ 146	DST	1	300×300
신은철 (2000)	부직포 ( - )	6.6	2.4	5.4	2.9	20 ~ 100	DST	1	300×300
Wasti (2001)	부직포 (500)	12.3	3.3	-	-	111 ~ 400	DST	18	300×300
Wasti (2001)	부직포 (500)	12.4	0.3	-	-	5 ~ 25	IBT	-	300×300
Jones (1998b)	부직포 ( - )	8.2 ~ 9.5	0 ~ 3.2	6.1 ~ 6.5	0 ~ 1.3	25 ~ 200	DST	3	300×300
Stark (1996)	부직포 (540)	8.7	-	6.6	-	80 ~ 400	RST	0.4	100(지름)
Jones (1998a)	부직포 ( - )	9.8	-0.8	5.8	0.3	0 ~ 500	DST	-	-

표 7. T-GM/GT 접촉 전단강도 결과 정리 및 비교

연구자 (년도)	GT 종류 (g/m <sup>2</sup> )	최대 전단 강도		잔류 전단 강도		하중범위 (kPa)	시험법	속도 (mm/min)	크기 (mm)
		마찰각(도)	점착력(kPa)	마찰각(도)	점착력(kPa)				
본 연구 (2001)	부직포 (1,000)	15.7	20.7	10.3	9.4	6 ~ 146	DST	1	300×300
신은철 (2000)	부직포 ( - )	22.3	12.8	-	-	20 ~ 100	DST	1	300×300
Wasti (2001)	부직포 (500)	27.0	30	-	-	111 ~ 400	DST	18	300×300
Wasti (2001)	부직포 (500)	26.9	1.3	-	-	5 ~ 25	IBT	-	300×300
Jones (1998b)	부직포 ( - )	21.0 ~ 22.0	3.2 ~ 7.7	14.1 ~ 18.5	1.1 ~ 4.8	25 ~ 200	DST	3	300×300
Stark (1996)	부직포 (540)	31.3	0	15.8	-	80 ~ 400	RST	0.4	100(지름)
Jones (1998a)	부직포 ( - )	25.8	6.9	13.1	3.6	0 ~ 300	DST	-	-

1) 잔류 전단강도는 80mm의 변위 발생 지점에서 측정

2) DST : Direct Shear Test, IBT : Inclined Board Test, RST : Ring Shear Test

가하여 반영하여야 한다. 현재까지 물이 점토/토목섬유의 접촉 전단강도에 미치는 영향은 많이 이루어졌으나 (Simpson, 1995), 토목섬유/토목섬유의 접촉 전단강도의 경우는 아직까지 많은 연구가 이루어지지 않았다.

습윤 상태에 의한 강도 변화는 앞서 제시한 표 4, 그림 6을 통해 확인할 수 있는데, GM의 종류-S-GM 또는 T-GM-에 따라 그 영향이 달랐다. S-GM/GT에서는 GT 가 습윤 상태로 되면서 마찰각의 경우 최대값은 0.5° 잔류값은 1.1° 감소하였다. 점착력은 최대값의 경우 0.3 kPa 감소하였으나, 잔류 상태에서는 오히려 0.7kPa이 증가하는 모습을 보였다. 그러나 이러한 수치는 그다지 큰 값이 아니기 때문에, S-GM에서는 경계면이 습윤 상태가 되면서 강도 변화가 미미하거나 약간 감소한다고 할

수 있다.

그러나, T-GM/GT의 경우는 이와는 다른 양상을 보였다. 경계면이 습윤 상태가 되면서 마찰각은 최대값에서 5.6° 잔류값에서 6.9° 증가하였으나, 점착력의 경우에는 오히려 최대값은 7.3kPa 잔류 상태에서는 3.5kPa이 감소하였다. Ellithy & Gabr(2001)도 이와 유사한 연구 결과와도 발표한 바 있다. 이러한 마찰각과 점착력의 변화는 T-GM의 경우 낮은 연직하중에서는 물에 의해 전단강도가 감소하지만, 하중이 증가할수록 전단강도가 증가하는 것을 의미한다. 즉, 낮은 연직하중 아래에서는 물이 유통작용을 하지만, 하중이 증가할수록 물이 오히려 마찰력을 증가시키는 작용을하게 된다. 그러나, 아직까지는 이러한 변화를 일으키는 정확한 메커니즘을

파악하지 못했으며, 이 부분에 관하여는 추가적인 연구가 필요하다.

### 3.7 기존 연구 결과와의 비교

기존의 연구(Jones 등, 1998 ; Wasti 등, 2001 ; Stark 등, 1996)에 의하면 접촉 전단강도는 사용되는 재료, 재하 하중의 범위, 시험방법, 토목섬유 고정방식, 크기 등에 영향을 받는다. 본 시험 결과와 기존에 발표된 국내 와 연구 결과를 정리, 비교하여 표 6 및 7에 제시하였다. 기존 연구 결과와 본 연구 결과를 비교한 내용은 다음과 같다.

S-GM/GT에서는 본 시험 결과가 다른 연구자의 결과 보다 비슷하거나 약간 작은 마찰각을 보였으며, 접착력은 거의 유사하였다. T-GM/GT의 결과의 경우는 본 연구의 결과가 다른 문헌의 결과들에 비해 마찰각은 작게 그리고 접착력은 크게 평가되었다. 따라서 본 연구 결과를 설계시 적용할 때에는 마찰각만을 적용하면 지나치게 보수적인 설계가 될 수 있으므로 꼭 접착력을 고려하여 전단력을 산정하여야 한다. 본 연구 결과와 비교적 유사한 하중 범위에서 시험을 실시한 신은철과 오영인(2000) 그리고 Jones & Dixon(1998b)의 결과에 대하여 하중 100kPa에서 접착력을 고려한 전단응력을 산정하면, 본 연구 결과는 48.8kPa, 신은철과 오영인(2000)의 결과는 53.8kPa, 그리고 Jones & Dixon(1998b)의 결과는 41-48kPa였다. 본 연구 결과는 중간 정도의 값을 보이는 것으로 나타났다.

그 정도는 다르지만 마찰특성이 연구자에 따라 차이를 보이는 이유는 근본적으로 시험기와 재료의 차이에서 찾을 수 있지만, 더불어 실시된 연직하중의 범위(본 시험에서는 가장 작은 6kPa에서도 시험을 실시함)도 중요한 변수로 작용했음을 알 수 있다. 또한 IBT나 RST에서는 접착력이 거의 0에 가까운 값을 보이나 마찰각은 DST에 비해 크게 평가하는 등, 시험법(DST, IBT, RST)에 따라서도 차이를 보임을 확인할 수 있다.

## 4. 결 론

대형 직접전단 시험기를 사용하여 매립지의 차수재와 최종 덮개에 사용되는 토목섬유 사이(interface)의 접촉 전단강도를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) GM의 표면 상태와 포화 유무에 따라 전단변위와 접촉 전단강도 곡선은 서로 다른 모습을 보였다.
- (2) 접촉 전단강도는 Mohr-Coulomb 파괴 포락선을 적용하여 마찰각과 접착력으로 평가할 수 있었으며, 본 시험에서는 좋은 상관관계를 보였다. T-GM/GT에서 큰 마찰각과 접착력이 가지는 것으로 평가되었다.
- (3) 최대 전단강도와 잔류 전단강도를 강도 감소율과 최대/잔류 전단강도의 비를 이용하여 비교한 결과, 강도 감소율은 T-GM에서 가장 크게 나타났으며, Test D를 제외한 거의 모든 시험에서 잔류 전단강도는 최대값의 60~80% 사이에 존재하였다.
- (4) T-GM/GT과 S-GM/GT은 각각 다른 파괴 메카니즘을 보였으며, 이로 인해 T-GM에서 전단강도가 더 증가하였으며 강도 감소량도 더 커졌다.
- (5) Secant 마찰각은 하중이 증가함에 따라 감소하였다. 따라서 보수적인 즉 안전한 설계를 실시하기 위해서는 예상되는 하중 혹은 그보다 큰 하중에서 시험 결과를 이용하여 전단강도를 평가한 후, 설계에 반영하여야 한다.
- (6) 수침으로 의한 전단강도의 변화는 GM의 종류에 따라 다른 양상을 나타냈다. S-GM/GT의 경우 그 변화 정도가 미미하였으나, T-GM/GT에서는 물의 존재로 인해 마찰각은 증가, 접착력은 감소하였다. 이는 연직하중이 작은 경우에는 물에 의해 전단강도가 감소하지만, 하중이 증가할수록 전단강도가 증가하는 것을 의미한다.

## 참 고 문 헌

1. 신은철, 오영인 (2000), “폐기물 매립장에 사용되는 토목섬유 마찰특성 및 안정해석에 관한 연구”, 한국폐기물 학회지, 제17권, 제7호, pp.862~874.
2. 원명수, 김대현, 김홍기, 김유성 (2001), “직접전단시험에 의한 접착토-토목섬유 경계면에서의 마찰특성”, 대한토목학회 2001년 학술 발표회.
3. 이광열 (1997), “폐기물 매립지 사면차수구조의 HDPE 인장강도에 관한 연구”, 한국폐기물 학회지, 제14권, 제7호, pp.832~840.
4. 정문경, 정하의, 이용수, 최희철, 우제윤 (1998), 폐기물 매립시설의 설계, 시공 기술에 관한 연구, 한국건설기술연구원, 건설기술연구원 연구보고서(98-075), 198p.
5. 주재우, 한호남, 박종범, 오세란 (1998), “직접전단시험에 의한 토목섬유 보강토의 마찰특성”, '98 Geosynthetics Conference, December, pp.87~94.
6. ASTM D 5321 (1998), “Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic and geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method”, American society for testing

- and materials, Philadelphia, Pennsylvania.
7. Daniel, D.E., Koerner, R.M. (1995), Waste containment facilities - Guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover system, ASCE, New York.
  8. Ellithy, G. and Gabr, M.A. (2001), "A model for interface shear strength of nonwoven geotextile", Proceedings of Geosynthetics conference, USA, pp.121~133.
  9. Izgin, M., Wasti, Y. (1998), "Geomembrane-sand interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests", Geotextiles and Geomembranes, 16, pp.207~219.
  10. Jones, D.R.V. and Dixon, N. (1998a), "The stability of geosynthetics landfill lining systems", Geotechnical Engineering of Landfill, Proceedings of the symposium at the Nottingham Trent university, Department of civil and structural engineering on 24 September, pp.99~117.
  11. Jones, D.R.V. and Dixon, N. (1998b), "Shear strength properties of geomembrane/geotextile interfaces", Geotextiles and Geomembranes, 16, pp.45~71.
  12. Mitchell, J.K., Seed, R.B., and Seed, H.B. (1990), "Kettleman Hills waste landfill slope failure. I: Liner system properties", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 116(4), pp.647~668.
  13. Seed, R.B., Mitchell, J.K., and Seed, H.B. (1990), "Kettleman Hills waste landfill slope failure. II: Stability analyses", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 116(4), pp.669~690.
  14. Simpson, B. E. (1995), "Five factors influencing the clay/geomembrane interface", Geoenvironment 2000, Geotechnical Special Publication No.46, ASCE, pp.995~1003.
  15. Stark, T.D. and Poeppel, A.R. (1994), "Landfill liner interface strengths from torsional-ring-shear tests", Journal of geotechnical engineering, ASCE, 120(3), 597~615.
  16. Stark, T.D., Williamson, T.A., and Eid, H.T. (1996), "HDPE Geomembrane/geotextile interface shear strength", Journal of geotechnical engineering, 122(3), pp.197~203.
  17. Wasti, Y. and Özdiüzgün, Z.N. (2001), "Geomembrane-geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box tests", Geotextiles and Geomembranes, 19, pp.45~57.

(접수일자 2001. 9. 28, 심사완료일 2002. 2. 4)