

## 쓰레기의 공학적 특성과 토목섬유재간의 마찰 특성에 관한 연구

### Geotechnical Characterization of Waste and Frictional Properties of Geosynthetics Interface

임학수<sup>1)</sup>, Hack-Su Lim, 장연수<sup>2)</sup>, Yeon-Soo Jang, 최정원<sup>3)</sup>, Jeong-Won Choi

<sup>1)</sup> 삼보기술단 지반공학부, Dept. of Geotechnical Engineering, Sambo Engineering Co. Ltd.

<sup>2)</sup> 동국대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dongguk University.

<sup>3)</sup> 동국대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dongguk University.

**SYNOPSIS** : To prevent the percolation of leachate through the bottom of waste landfills, the liner system of various layers, such as compacted clay, geomembrane, geonet, geotextiles, and geocomposite is designed. Since the friction angle between a geomembrane and other geosynthetics is usually lower than that of the soil alone, the interfaces between soil and geosynthetic or geosynthetic-geosynthetic may become a possible plane of weakness, which leads to potential instability of the system under load of waste at side slopes. In this study, large triaxial tests are carried out with samples of remoulded wastes and direct shear interface friction tests are carried out to understand the frictional properties of geosynthetic-geosynthetic interfaces, which are required for analyzing the safety of side-slope liner systems.

**Key words** : waste, landfills, geosynthetic, liner system, triaxial tests, interface friction tests, side-slope

## 1. 서 론

매립지 사면부에 설치되는 차수시스템은 바닥부 차수시스템과는 달리 차수막 상부에 작용하는 매립된 쓰레기의 하중과 차수재의 자중으로 인해 차수시스템에 인장력을 발생시키며 이로 인해 층분리 또는 미끌림이 발생하게 된다. 이러한 인장력이 토목섬유나 차수재의 허용인장력보다 큰 경우 인장파괴나 고정단에서 분리 등의 현상으로 인하여 차수시스템이 손상되어 매립지내 오염물질의 유출이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 차수시스템에 작용하는 인장력을 산출하기 위해 필요한 쓰레기의 지반공학적 특성치를 종합하여 국내 쓰레기의 특성을 파악하였고 인공 쓰레기 시료를 이용한 삼축 압축강도시험을 통해 쓰레기의 변형특성을 규명하였다. 또한 매립지 사면부 차수시스템의 재료로 사용되는 토목섬유재간의 마찰특성을 파악하기 위해 직접전단 마찰시험을 수행하여 서로 다른 토목섬유재간의 접촉마찰각을 구하여 설계에 반영할 수 있는 값을 제시하였다.

## 2. 인공쓰레기 시료를 이용한 삼축 압축강도 시험

### 2.1 국내 생활 폐기물의 강도특성 및 구성요소

쓰레기의 강도특성은 매립지의 안정성 검토나 침하량 분석을 위하여 매우 중요한 요소이다. 그러나 아직까지 매립지에서의 응력-변형 특성이 확실하게 규명되지 않고 있으며 일반적인 토질역학적 강도정수인 내부마찰각과 점착력이 매립지 설계에 사용되고 있다. 내부마찰각과 점착력은 직접전단과 삼축압축시험과 같은 실내시험 또는 현장시험결과와 매립장 운영시 획득한 계측자료를 바탕으로한 역산 등의 방법으로 구할 수 있다. 문헌에 나타난 역산과 실내 및 현장시험등 여러 가지 시험법을 통해 다양한 조건의 쓰레기로부터 얻은 쓰레기의 점착력과 마찰각의 관계를 그림 1에 정리하여 나타내었다.

우리나라의 생활 폐기물의 구성에 대하여 알아보면 생활 폐기물은 도시 내에서 수거되는 쓰레기로서 주로 고형물이며 주거 활동에 의한 가정쓰레기, 상가와 음식점들로부터의 상업 쓰레기 등이 주로 혼합된 형태로 구성물질이 다양하게 나타난다. 도시 쓰레기의 전체 발생량에서 각각의 성분이 차지하는 비율의 변화 추이를 그림 2에 나타내었다.

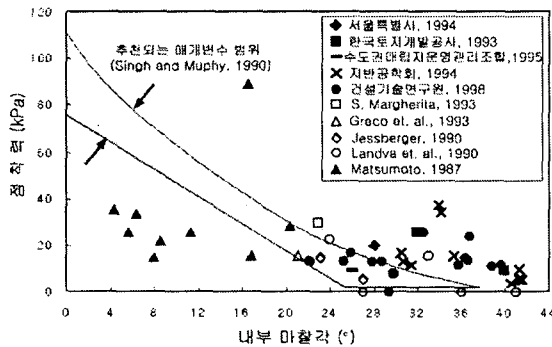


그림 1. 쓰레기의 내부마찰각과 점착력

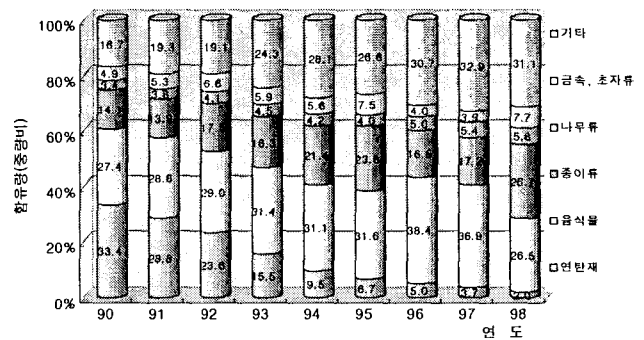


그림 2. 1990년대 우리나라 도시쓰레기의 성분비 변화 추이(환경부, 1999)

### 2.2 인공쓰레기 시료의 성분비 결정

시험에서 사용할 실내 제작 시료는 2.1절의 국내 생활 폐기물 구성요소를 바탕으로 하여 성분비를 결정하였다. 자세한 성상비가 나타나지 않은 기타성분은 표 1에 나타난 1997년도 수도권 매립지에 유입된 생활폐기물 성상비 자료를 참고로 하여 섬유, 목재, 가죽·고무, 플라스틱·비닐류, 금속류 등으로 세분하였으며 각각의 성분이 전체 쓰레기 발생량에서 차지하는 비율을 고려하여 구성비를 결정하였다. 이와 같은 과정으로 결정된 실내 제작 시료의 성분비를 살펴보면 음식물이 27.9%, 종이류 27%, 플라스틱·비닐류 14.4%, 유리 8%, 섬유류 5.1%, 금속류 4.6%, 나무류 1.5%, 고무·가죽류 1.1%, 흙 7.8%로 결정하였다.

표 1. 수도권매립지에 반입되는 생활폐기물의 조성(수도권매립지 운영관리조합,1997)

종류	가연성							불연성				
	음식물	종이	섬유	목재	가죽,고무	플라스틱,비닐류	기타	금속	유리	돌,자기	연탄재	기타
서울시	30.5	30.3	4.9	1.5	0.9	12.9	6.5	2.9	5.2	1.5	0.3	2.7
경기도	39.6	29.6	4.4	1.1	1.2	13.4	3.7	2.2	3.3	1	0.1	0.3
인천시	40.0	29.8	3.8	0.9	1.2	12.2	4.6	1.8	3.4	1.9	-	0.5
평균	34.6	30.0	4.6	1.3	1	12.9	5.4	2.5	4.4	1.4	0.2	1.7

단위 : 중량비(%)

### 2.3 공시체의 제작

성형시료의 크기는 직경 10cm(단면적 : 78.5cm<sup>2</sup>), 높이 20cm로 제작하며 성형시료의 단위중량은 양호한 다짐이었을 때 쓰레기의 단위중량인 0.9~1.1t/m<sup>3</sup>범위 안에 들도록 하였다(Mitchell et al., 1995). 쓰레기 시료의 함수비는 문헌을 참고하여 현장에서의 평균 함수비인 40%로 결정하였다(Sower, 1973., Tchobanoglous et al., 1993).

### 2.4 시험장치의 특성

본 시험에 사용된 삼축압축 시험기는 ASTM D4767-88의 시험장치를 수정하여 제작한 것으로 3축 Cell과 하중 재하장치 및 공시체의 포화와 압밀을 위한 장치로 구성되어 있으며 시험기의 전체적인 개요도를 그림 3에 나타내었다.

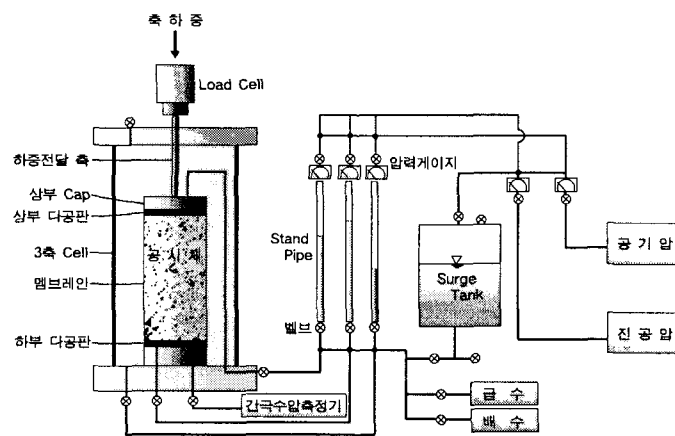


그림 3. 삼축 압축강도 시험기의 전체적 개요도

### 2.5 시험결과

각기 다른 세 가지 구속압력 0.5kg/cm<sup>2</sup>, 1.0kg/cm<sup>2</sup>, 1.5kg/cm<sup>2</sup>을 가한 공시체의 강도시험결과 축 변형률과 응력의 관계를 그림 4와 표 2에 나타내었다. 15.9kg/cm<sup>2</sup>이상의 큰 응력을 가함에도 불구하고 변형이 40%이상 일어날 뿐 공시체에 뚜렷한 파괴현상은 일어나지 않았다. 마찰각은 연직 변형률 5~15% 사이에서 점차 증가하였으며 점착력은 10~20% 범위에서 가파르게 증가하였다. 전단저항각과 점착력의 변형률에 따른 변화경향을 그림 5에 나타내었으며 일반적인 흙 시료의 파괴 변형률 15%(Fang, 1977)를 기준으로 하였을 때 쓰레기의 내부 마찰각은 27°, 점착력은 0.75kg/cm<sup>2</sup>이었다.

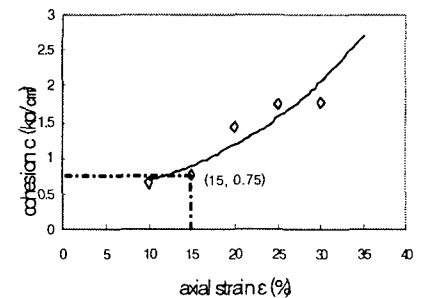
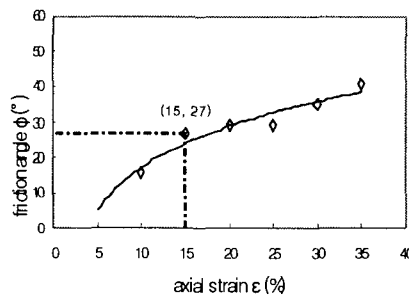
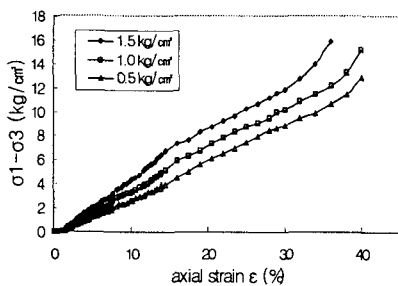


그림 4. 축 변형률과 응력의 관계곡선

(a) 연직 변형률과 마찰각의 관계 (b) 연직 변형률과 점착력의 관계  
그림 5. 변형률에 따른 마찰각과 점착력의 변화

### 3. 토목섬유 차수재의 접촉마찰 특성 시험

#### 3.1 문헌에 나타난 재료간의 접촉 마찰각

Sharma and Lewis(1994)에 의하면 HDPE와 직포, 부직포의 접촉 마찰각은 7~11°의 값을 나타내며 HDPE와 지오네트의 마찰각은 5~19°, 부직포와 지오네트의 마찰각은 9~21° 값의 범위를 나타낸다고 하였다. 또한 사질토와 부직포의 경우 22~44° 범위의 값을 가지며 점성토와 부직포는 15~33°, 사질토와 HDPE는 17~25°, 점성토와 HDPE는 5~10° 범위의 값을 가진다고 하였다.

Gilbert et al.(1996)은 벤토나이트매트의 표면재료가 거칠 경우 HDPE와의 접촉마찰각은 최대 전단응력에서는 23~37°이고 잔류전단강도에서의 마찰각은 20~35°사이의 값을 가진다고 보고하였다.

이처럼 재료간에 다양한 범위의 마찰각이 존재하므로 실제 국내에서 생산되고 있는 제품들을 이용하여 직접전단 마찰시험을 수행하였다.

#### 3.2 접촉마찰각 측정을 위한 재료간의 경계면 결정

매립지 사면부 차수시스템의 포설 순서 및 구성을 고려하여 접촉마찰각을 산출하기 위해 인접가능한 재료간의 경계면을 결정하면 표 4와 같다.

표 4. 인접가능한 토목섬유재와 흙의 종류

재 료	인접 가능한 토목섬유재	인접 가능한 흙
HDPE	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 부직포</li> <li>· 지오펜파지트</li> <li>· 지오네트</li> <li>· 벤토나이트 매트</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 사질토</li> <li>· 점토</li> </ul>
부직포	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지오네트</li> <li>· 벤토나이트 매트</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 사질토</li> <li>· 점토</li> </ul>

### 3.3 시험에 사용된 토목섬유와 흙의 종류 및 특성

#### 3.3.1 HDPE

본 시험에서 사용된 HDPE는 두께가 2mm이며 항복인장강도는 195kg/cm<sup>2</sup>로 특성을 살펴보면 표 5와 같으며 이는 폐기물 관리법상의 HDPE 차수재 기준항목에 대하여 만족하는 제품이다.

#### 3.3.2 부직포

시험에 사용된 부직포는 두께 7mm, 단위면적당 중량이 1000g/m<sup>2</sup>로 특성에 대한 세부사항을 표 6에 나타내었다.

#### 3.3.3 벤토나이트매트(GCL)

본 시험에서는 (주)벽진인터내셔널의 제품인 벤토나이트매트 두 가지 종류를 사용하였으며 Type-A와 Type-B로 구분하였다. Type-A는 상부의 직포형 그림과 하부의 부직포형 지오펜스타일 사이에 벤토나이트를 넣고 니들펀칭하여 벤토나이트의 이동을 방지한 형태로 단면을 그림 6에 나타내었으며 특성치는 표 7과 같다. Type-B는 그림 7과 같이 상·하부의 직포형 지오펜스타일 사이의 섬유조직 안에 벤토나이트 분말을 고압 분사하여 벤토나이트 층을 형성한 다음 스티칭 본딩 방법을 사용하여 위, 아래 지오펜스타일을 결속시킨 형태이다. 상·하부의 지오펜스타일 표면에 모래를 접착하여 표면 거칠기를 증대시킨 friction type의 벤토나이트 매트이며 특성치를 표 8에 나타내었다.

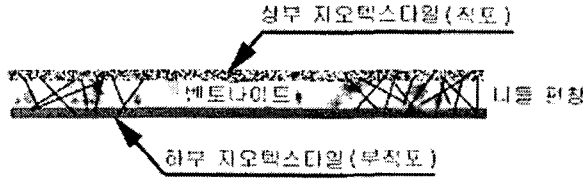


그림 6. Type-A 벤토나이트매트의 전단면

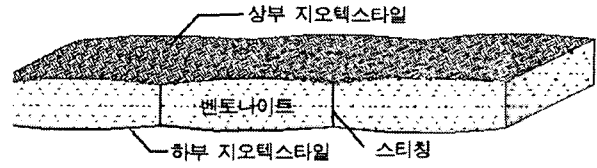


그림 7. Type-B 벤토나이트매트의 전단면

표 5. 직접전단 접촉 마찰시험에 사용된 HDPE의 특성

시험 항목		단위	시험결과	시험방법
두께		mm	2.01	폐기물 관리법 시행규칙 제 20조 관련 (KPS M 6000)
밀도		g/cm <sup>3</sup>	0.943	
카본블랙함량		%	2.5	
카본블랙분산도		등급, 개수	1급, 10개	
인장 성능	항복인장강도	길이	202.2	
		폭	202.3	
	파단인장강도	길이	340.5	
		폭	339.8	
	항복인장변형률	길이	13	
		폭	12	
	파단인장변형률	길이	840	
		폭	850	
인열강도	길이	kg/cm	173.8	
	폭		166.6	
깨물림 강도		kg/cm	398.2	
저온 충격성			이상없음	
치수안정성	길이	%	-0.3	
	폭		-0.3	
산화유도 시간		min	120이상	

표 6. 직접전단 접촉마찰 시험에 사용된 부직포의 특성

시험 항목	단위	시험 결과	시험 방법
중량	g/m <sup>2</sup>	1000	KS K 0514
두께	mm	7	KS K 0506
인장강도	kg/in	279	KS K 0520
인장신도	%	50~100	KS K 0520
투수계수	cm/sec	$a \times 10^{-1}$	KS F 2322
재질	-	polyester	KS K 0210
내약품성	-	산, 알카리, 유기용제에 침식되지 않음	-
자외선 안정성	-	매우 안정적임	-

### 3.3.4 점토와 모래

본 시험에서 사용한 점토는 수도권 매립지 3공구 원지반토를 이용하였고 모래는 주문진 표준사를 이

용하였다. 점토의 비중은 2.68이고, 실트 성분이 63.7%, 점토성분 14.5%, 모래성분 21.8%로 통일분류상 CL로 분류 할 수 있고 모래는 비중이 2.65 균등계수가 1.72, 곡률계수가 1.06으로 통일분류상 SP로 분류된다.

표 7. Type-A 벤토나이트매트의 특성치

시험 항목	시험 방법	단 위	기 준
직포 중량	KS K 0514	g/m <sup>2</sup>	110 이상
부직포 중량			200 이상
벤토나이트 중량	ASTM D 5993		4,500 이상
전체 중량			4,810 이상
수 분 율	ASTM D 4643	%	20 이하
팽 윤 도	ASTM D 5890-95	ml/2g	24 이하
흡 수 성	ASTM E 946	%	600 이상
두 께	KS K 0506	mm	6.5 이상
인장 강도	ASTM D 4595	kN/m	15 이상
인장 신도		%	20 이상
깨뿔림 강도		kg	45 이상
섬유층 분리강도		kN/m	2.5 이상
투수 계수	ASTM D 5887	cm/sec	@×10 <sup>-9</sup> 이하

표 8. Type-B 벤토나이트매트의 특성치

시 험 항 목	시 험 방 법	단 위	기 준		
팽윤도	ASTM D 589	ml	24 이상		
몬트모릴로라이트 함유	ASTM API	%	70 이상		
수분함량	ASTM D 4643	%	15 이하		
두께	ASTM D 1777	mm	6.5 이상		
지오텍스타일 중량	ASTM D 5261	g/m <sup>2</sup>	200 이상		
벤토나이트 중량			4500 이상		
인장 강도	길이방향	ASTM D 4595	Kn/m	16 이상	
				폭방향	33 이상
인장 신도	길이방향		ASTM D 4595	%	30 이하
					폭방향
깨뿔림 강도	ASTM D 4833	N	600 이상		
양면 섬유층 결합방법	-	-	stitching bond		
섬유층 분리강도	ASTM D 4595	N/10cm	400 이상		
투수계수	ASTM D 5084	cm/sec	5×10 <sup>-9</sup> 이하		

### 3.4 시험결과

재료간의 파괴형태에 따른 대표적인 결과 그래프를 나타내면 다음과 같다.

#### 3.4.1 HDPE와 부직포

그림 8은 HDPE와 부직포간의 전단응력-변형률 관계곡선을 나타낸 것으로 각각의 연직응력에 대하여 수평변형률 0.6~0.7%에서 최대 전단응력은 0.05kg/cm<sup>2</sup>, 0.06kg/cm<sup>2</sup>, 0.08kg/cm<sup>2</sup>으로 측정되었다. 세가지 연직하중에 대하여 모두 초기에 전단력을 가한 후 급격히 항복응력에 도달했다가 어느정도 일정함을 유지한 뒤 점차 감소하여 일정한 전단응력을 유지하였다.

#### 3.4.2 HDPE와 Type-A 벤토나이트 매트

그림 9는 HDPE와 Type-A 벤토나이트 매트의 전단응력-변형률 관계곡선을 나타낸 것으로 각각의 연직응력에 대하여 수평변형률 0.1%에서 최대 전단응력은 0.05kg/cm<sup>2</sup>, 0.07kg/cm<sup>2</sup>, 0.08kg/cm<sup>2</sup>으로 측정되었다. 세 가지 연직응력상태에 따라 유사한 모양을 보이며 초기에 급격히 항복응력에 도달했다가 빠르게 감소한 뒤 불규칙한 형태를 보였다. 이것은 A벤토나이트 매트의 상부 지오텍스타일 표면이 니들 펀칭으로 인해 불규칙한 면을 형성하고 있기 때문이라고 사료된다.

#### 3.4.3 HDPE와 Type-B 벤토나이트 매트

그림 10은 HDPE와 Type-B 벤토나이트 매트의 전단응력-변형률 관계곡선을 나타낸 것으로 각각의 연직응력에 대하여 수평변형률 1.2~1.4%에서 최대전단응력은 0.12kg/cm<sup>2</sup>, 0.19kg/cm<sup>2</sup>, 0.26kg/cm<sup>2</sup>으로 측정되었다. 세 가지 연직응력에 대하여 전단응력이 모두 크게 측정된 것은 전단저항력을 강화하기 위하여 B벤토나이트 매트의 표면을 거칠게 처리했기 때문인 것으로 사료된다. 단계별로 큰 연직응력을 가하였을 때 더 많은 수평변형이 일어난 뒤에 최대 전단력이 나타났으며 파괴점을 지난 뒤 일정한 전단응력을 유지하였다.

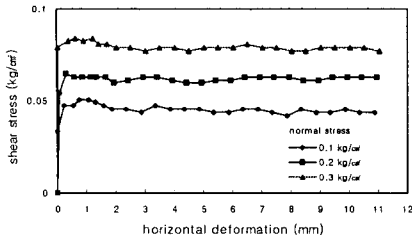


그림 8. HDPE와 부직포

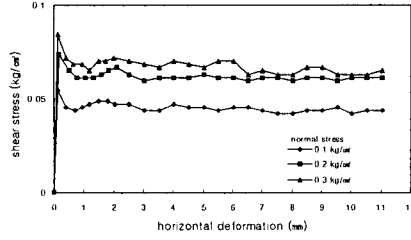


그림 9. HDPE와 Type-A  
벤토나이트 매트

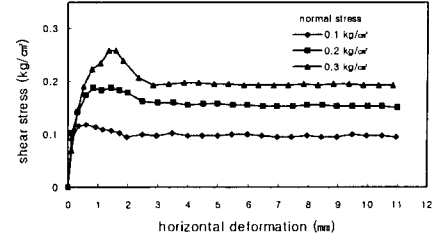


그림 10. HDPE와 Type-B  
벤토나이트 매트

마찰각은 단계별로 가한 연직응력과 각각의 연직응력에 대한 파괴점에서의 전단응력을 구하여 연직-전단응력 그래프를 도시함으로써 알 수 있으며 직선의 기울기가 두 재료간의 마찰각이 된다. 그림 11은 HDPE와 각기 다른 재료간의 직접전단 접촉 마찰 시험에서 얻은 각각의 연직응력에 대한 최대 전단응력 관계 그래프로  $\phi$ 는 재료간의 마찰각이고  $c$ 는 점착력이며 재료에 따른 마찰각의 경향을 나타내었다. HDPE-부직포의 경우 마찰각은  $9.5^\circ$  였으며 HDPE와 두가지 종류의 벤토나이트매트의 경우 각각  $8.5^\circ$ ,  $34.7^\circ$  로 측정되었는데 두 마찰각 값의 차이가 큰 것은 벤토나이트 매트의 표면 거칠기의 차이로 인한 것이다. 3.1절에서 인용한 기존문헌 값과 비교해보면, HDPE와 직포, 부직포의 접촉 마찰각은  $7\sim 11^\circ$  의 값을 나타내며, 벤토나이트매트의 표면재료가 거칠 경우 HDPE와의 접촉마찰각은 최대 전단응력에서는  $23\sim 37^\circ$  이고 잔류전단강도에서의 마찰각은  $20\sim 35^\circ$  사이의 값을 가진다고 하였는데 시험결과는 기존 문헌 값의 범위에 포함되는 값이다.

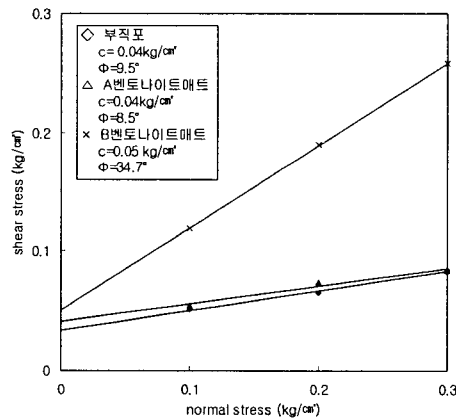


그림 11. HDPE와 다른 재료간의 마찰각 그래프

#### 4. 결론

국내 쓰레기의 강도 특성을 규명하기 위하여 수행한 인공 쓰레기 시료를 이용한 삼축압축 강도시험 및 토목섬유재에 대한 직접전단 접촉마찰 특성시험 결과 일반적인 흙 시료의 파괴 변형을 15%를 기준으로 하여 쓰레기의 내부 마찰각은  $27^\circ$ , 점착력은  $0.75\text{kg}/\text{cm}^2$ 이었다. 그리고, 직접전단 접촉마찰 각 시험결과 HDPE와 부직포는 내부 마찰각  $9.5^\circ$ , 점착력  $0.04\text{kg}/\text{cm}^2$ , HDPE와 니들펀칭 벤토나이트 매트(Type-A)는 내부 마찰각  $8.5^\circ$ , 점착력  $0.04\text{kg}/\text{cm}^2$ , HDPE와 거칠기를 보완한 스티치드 벤토나이트 매트(Type-B)는 내부 마찰각  $34.7^\circ$ , 점착력  $0.05\text{kg}/\text{cm}^2$ 로서 기존문헌들의 강도정수범위에 포함되는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술사업단의 연구비지원(과제번호 : 4-3-1)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 수도권 매립지 운영관리조합(1998), 수도권 매립지 3공구 매립작업 설계 용역 기본설계 보고서(안).
2. 장연수, 이광열(2000), 지반환경공학, 구미서관.
3. 환경부(1999), 환경통계연감, 남형문화.
4. Fang, H.Y., Slutter, R.G. and Koerner R.M.(1977), "Load Bearing Capacity of Compacted Disposal Materials", *Proc. Specialty Session : Geotechnical Engineering and Environmental Control, 9th ICSMFE, Tokyo*, pp.265~277.
5. Gabr, M.A., and Valero, S.N.(1995), Geotechnical properties of municipal solid wastes, *Geotechnical Testing Journal*, 18(2): pp.241~251.
6. Gilbert, R.B., Fernandez, F. and Horsfield, D.W.(1996), "Shear strength of reinforced geosynthetic clay liner", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 4.
7. Landva, A.O., and Clark, J.I.(1986), "Geotechnical testing of wastefill". 39th Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, Canada, pp.371~385.
8. Mitchell, J.K., Bray, J.D.,and Mitchell, R.A.(1995), "Material interactions in solid waste landfills", *Geoenvironment 2000, Geotechnical Special PublicationNo. 46, ASCE*, pp.568~590.
9. Sharma, H.D., and Lewis, S.P.(1994), *Waste containment system, waste stabilization, and landfills : Design and Evaluation*, John Wiley & Sons, Inc.
10. Sower, G.F.(1973), "Settlement of waste landfills", *Proceedings, The Eighth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow*, Vol.2.
11. Tchobanoglous, G., Theisen H., and Vigil, S.(1993), *Intergragated solid waste management : Engineering Principles and management issues*. McGraw-Hill Book Inc., NewYork, 978p.
12. Vallejo, L.E., and Zhou, Y.(1995), "Fractal approach to measuring the roughness of geomembranes", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 121, No.5, pp.442~447.