

## 정적마찰 시험을 통한 접촉전단 특성평가

### Evaluation of Interface Shear Properties Through Static Friction Tests

장용채<sup>1)</sup>, Yong-Chai Chang, 이승은<sup>2)</sup>, Seung-Eun Lee, 서지웅<sup>3)</sup>, Ji-Woong Seo, 존 바우더스<sup>4)</sup>, John J. Bowders

1) 목포해양대학교 해양토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Ocean Civil Eng, Mokpo National Maritime University

2) 목포해양대학교 해양토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Ocean Civil Eng, Mokpo National Maritime University

3) 목포해양대학교 해양토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Ocean Civil Eng, Mokpo National Maritime University

4) 미국 미주리주립대학교 토목환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Eng, The University of Missouri-Columbia

**SYNOPSIS** : Shear properties of plastic bottle film/plastic bottle film and plastic bottle film/granitic soil which were evaluated from static friction tests. The monotonic shear experiments were performed by using an tilt table apparatus and large direct shear device. The test results showed that the friction angle of each interface and the interface depended on the amount of normal stress, the type of the interface used. Therefore, the testing method should be determined carefully by considering the type of loads and normal stress expected in the field with using the materials installed in the site.

**Keywords** : Tilt table test, Direct shear test, PET bottle, Friction angle

## 1. 서론

국내의 많은 건설현장에서 사용되고 있는 토목재료는 흙, 모래와 자갈, 쇠석 등의 천연골재가 대부분이다. 또한, 개발 등으로 대규모 토목공사를 시행함에 따라 건설재료 수급문제로 인한 한정된 자원의 활용문제와 환경적인 측면이 이슈화 되고 있는 실정이다.

이런 관점에서 재활용 재료 중에 일반적으로 흔히 볼 수 있는 음료수 PET병 즉, Poly Ethylene Terephthalate(PET)병을 가지고 채움 재료로 토목 건설 분야에 활용하고자 한다. 예를 들면 매설된 수송관로, 연약지반위의 경량하중을 가할 경우 등을 말하며 연약지반 상에 시공할 경우에는 과도한 침하로 인하여 문제가 발생이 된다.

재활용한 경량재료를 이용하여 채움 재료로 활용한다면 연약지반상의 침하도 경감 할뿐만 아니라, 자원의 재활용 또한 향상 될 것이다. 국내를 살펴보면 PET병을 이용한 제품은 경제활동의 발달로 인하여 사용량이 매년 증가하는 추세이다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 발생하는 PET병을 토목 건설 분야에 활용하기 위하여 플라스틱 병을 상하부로 절단한 다음 얇은 막(film) 형태로 제작하여 PET film/PET film, PET film/화강풍화토를 직접전단시험과 경사판 시험을 실시하여 전단저항 특성을 상호 비교 분석하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 PET film

PET film은 여러 종류가 있지만 본 연구에서 사용한 Sample은 Polyethylene terephthalate(PET)로써 가볍고 쉽게 깨지지 않는 특성을 가지고 있으며 상대적으로 안전하여 재활용이 용이하기 때문에 콜라나 사이다의 음료수 병에 많이 쓰이는 재료를 사용하였으며, 그림 1(a)의 형태를 (b)의 film형태로 만들어 사용하였다. 본 시험에 사용된 PET film은 두께 0.05cm, 길이는 27cm 이다.

### 2.2 화강풍화토

본 실험에서 사용된 흙은 그림 1(c)의 화강풍화토를 사용하였으며, 화강풍화토의 물리적 특성 결과는 표 1과 같다. 모형지반에 화강풍화토를 최적함수비(%) 상태로 조성한 다음 PET film/화강풍화토의 접촉면 전단강도를 시험하였다.

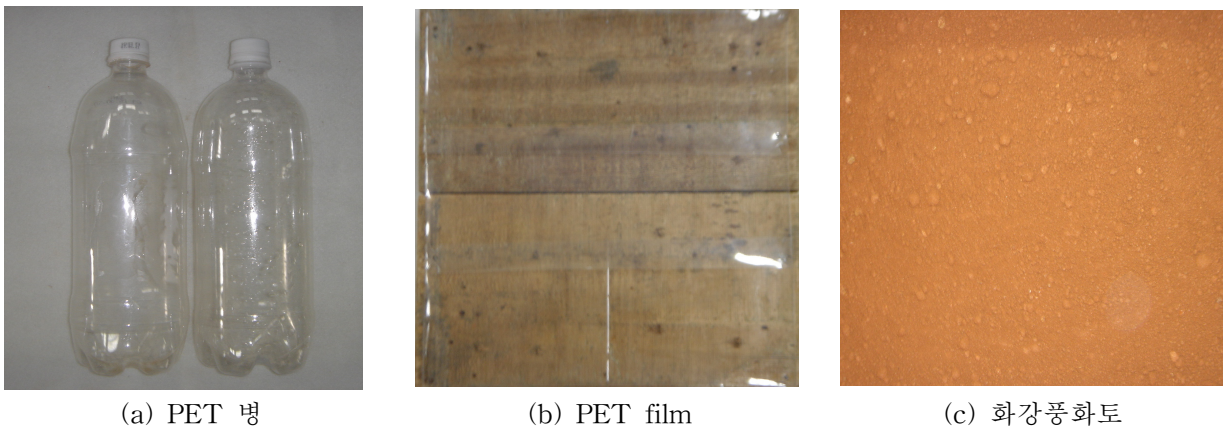


그림 1. 실험에 사용된 재료

표 1. 화강풍화토의 물리적 특성 결과

비 중	액성한계 (%)	소성한계 (%)	최대건조밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	최적함수비 (%)	균등계수	USCS
2.68	39.5	5.35	1.64	17.5	11	SW-SC

### 2.3 실험장비

본 연구에서 사용한 실험장비는 그림 2와 같다. 그림 2의(a)는 대형전단시험기의 개략도를 나타내고 있으며, 실험 장비는 전단 및 인발이 가능한 시험기로서 전단 상자의 크기를 조절할 수 있는 시험기이다. 전단상자 크기는 길이, 폭, 높이가 각각 300×300×200mm 로 전단 상자가 상·하부로 분리되어 있으며, 상부 전단 상자에는 평면베어링(flat bearing)이 부착되어 있어 직접전단시험 시 상부 전단 상자의 이동이 가능하도록 되어있다.

상부와 하부 전단 상자는 각각 깊이가 100mm이다. 로드셀 최대용량은 최대 11,023 lbs이며, 변위속도 제어시스템에 의하여 임의의 속도로 조절이 가능하다. 본 시험에서는 50kPa에서 150kPa 사이의 수직응력에 대하여 전단시험을 실시하여 접촉면의 전단강도를 평가하였다.

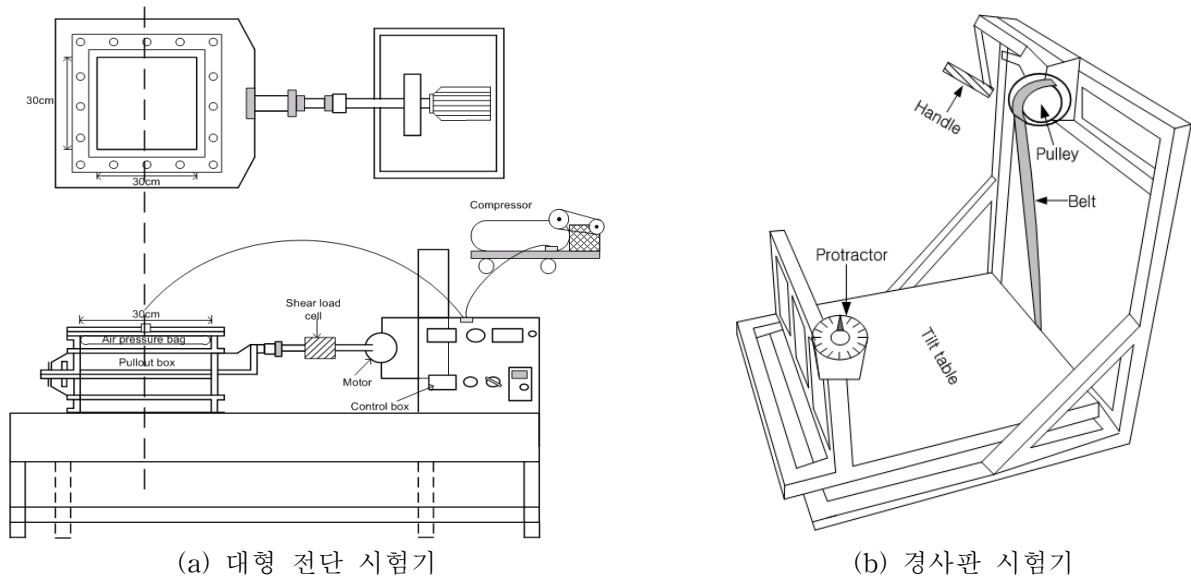


그림 2. 실험장비

그림 2의(b)는 경사판 시험기의 모습이다. 경사판 시험기의 특징은 작은 수직응력상태에서 접촉면의 전단특성을 평가한다는 것이다. 시험기는 크게 경사판, 핸들, 경사계, 도르레, 벨트, 각도기로 구성되어 있다.

## 2.4 실험과정

대형전단시험의 경우 PET film의 인장변형을 최대한 억제시키는 방법으로 나무상자(dummy)위에 PET film을 고정시킨(그림 1(b) 참조) 후 전단상자(300mm×300mm)에 삽입하여 공기압(수직하중)을 가한 상태로 수평력을 가하여 전단상자 상·하단부의 분리면을 따라 강제로 파괴시켜 마찰각을 측정하는 시험이다. 전단상자의 크기는 Scale effect를 최소화하기 위하여 길이 30cm, 폭 30cm, 높이5cm 이상이어야 한다고 규정하고 있으며, 본 연구에서 수직응력(Normal stress)은 단계별로 50kPa, 100kPa, 150kPa를 각각 재하 하였다.

전단상자에 변위계를 설치하고, 변형을 제어 시 전단속도는 1mm/min (0.04in /min)로 하였다. 변위에 따른 전단력을 기록하고, 잔류응력하에서 25~75mm변위가 발생할 때까지 실험을 실시한다. 이와 같은 전단시험을 수직응력에 따라 시험을 실시하여 전단력과 변위관계를 그래프로 나타내며, 그래프로부터 최대전단응력을 계산하여 마찰각을 산정한다.

경사판 시험에서는 일정한 속도로 핸들을 돌리면 경사판이 기울어져 하중을 가하는 물체가 미끄러져 순간의 기울기를 통해 접촉면의 마찰각을 산정하는 방법이다. 본 연구에서는 2kPa에서 8kPa 사이의 작은 수직응력에 대하여 시험을 수행하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 PET film의 마찰각 산정

그림 3은 PET film을 가지고 경사판 시험을 실시한 결과이다. Specimen 1은 상재하중을 94.58lb로 가하여 19°~24°의 마찰각을 얻었으며, Specimen 2는 상재하중을 186.18lb로 가하여 20.5°~28°, Specimen 3 또한 하중을 275.38lb 유지한 상태로 21°~29° 사이의 마찰각이 나타남을 알 수 있었다. 이렇듯 같은

재질의 PET film 을 가지고 접촉면에 대한 경사판 시험을 했음에도 불구하고 마찰각이 작게는 약 2° 크  
 게는 8° 정도의 차이가 나는 이유는 Tilt table을 수동으로 핸들을 조작하여 경사를 주었기 때문에 바닥  
 판의 상승속도가 일정하지 않기 때문에 나타난 결과로 판단된다(그림 2(b) 참조).

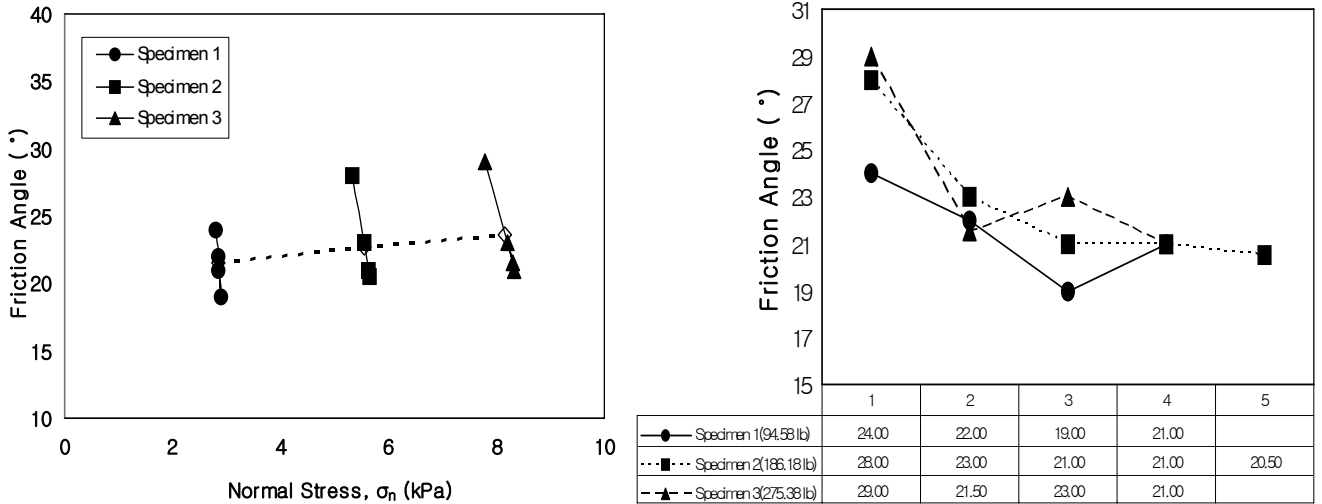
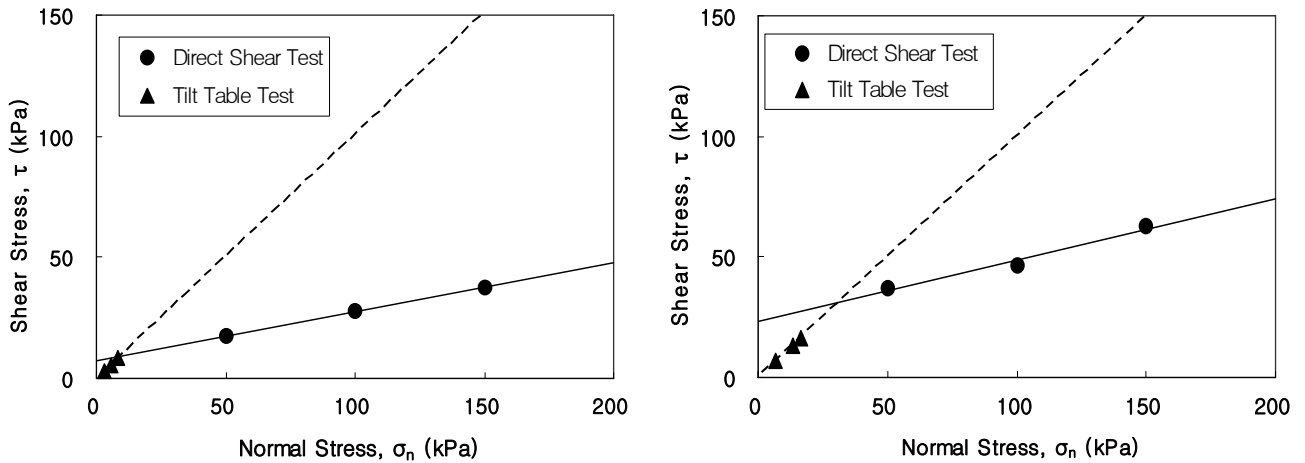


그림 3. PET film의 경사판 시험결과

### 3.2 전단강도 특성비교

그림 4의 (a)는 PET film/PET film, 그림 4의 (b)는 PET film/Granitic Soil을 대형전단시험기와 경사  
 판 시험기를 이용하여 접촉면 마찰각을 비교한 그림이다.



(a) PET film vs PET film

(b) PET film vs Granitic Soil

그림 4. 전단시험과 경사판 시험결과 비교

각 시험방법에 따라 전단강도를 산출하는 방법이 약간씩 다르며 경사판 시험에서는 점착력이 없는 것  
 으로 나타나지만 대형전단 시험에서는 점착력이 구해지므로 강도정수( $c$ ,  $\phi$ )를 비교하기에는 어려움이  
 따른다. 하지만 점착력 성분을 무시하고 마찰각만을 비교한다면 작은 수직응력을 가한 경사판 시험이

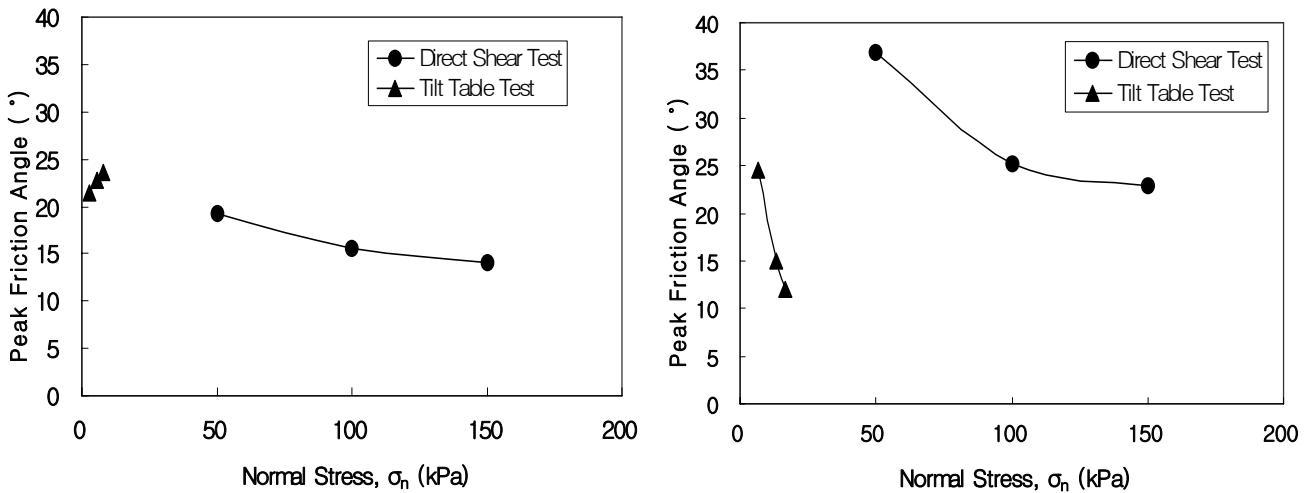
상대적으로 큰 수직응력을 가한 대형전단시험보다 마찰각이 크게 산정되었다(표 2). 경사판 시험을 이용한 기존 연구를 살펴보면 Johns와 Dixon(1998a)은 일반적으로 경사판 시험이 접촉 마찰각 혹은 접촉 전단강도를 비교적 정확하게 평가한다고 하였다. 그러므로 그림 4의 비교결과에서 작은 수직응력에서 경사판 시험결과와 높은 수직응력에서 대형전단시험 결과를 추세선을 추가하여 회귀분선을 하여보면 실험이 수행되지 않은 수직응력의 값을 다른 수직응력에서 얻어진 결과를 추정하여 예상할 경우 매우 큰 오차를 발생시킬 수 있음을 보여주고 있다.

표 2. 대형전단시험과 경사판 시험결과를 통한 전단강도 특성

접촉면	대형전단시험			경사판 시험		
	수직응력 (kPa)	마찰각 (°)	점착력 (kPa)	수직응력 (kPa)	마찰각 (°)	점착력 (kPa)
PET film/PET film	50~150	11.3	7.4	2~8	22.6	-
PET film/Granitic Soil		14.0	23.5		17.2	-

### 3.3 마찰각 비교

그림 5는 수직응력과 마찰각의 관계를 나타내는 그림이다. 대형전단시험의 경우 마찰각은 최대 전단강도를 나타내는 점에서의 강도와 그 때 가해진 수직응력의비  $\tan^{-1}$  값을 의미하며 경사판 시험의 경우 미끄러지는 순간의 수직응력을 말한다.



(a) PET film vs PET film

(b) PET film vs Granitic Soil

그림 5. 전단시험과 경사판 시험결과 비교

그림 5(a)는 점착력을 0으로 가정하였을 때 작은 수직응력에서 더 큰 최대마찰각(secant마찰각)이 나타남을 확인 할 수 있었다. 수직응력이 증가함에 따라 최대마찰각(secant마찰각)은 감소함을 보였다. 이런 이유로 경사판 시험에서 가장 큰 최대마찰각(secant마찰각)이 나타났다. 이것은 최대마찰각이나 한계 경사각을 평가하기 위하여 시험을 실시 할 때에는 하중조건을 정확하게 평가하여 시험 시 고려하여야 한다는 Lopes 등(2001)이 제안한 현장의 하중조건에 있어 중요한 요인이라는 것을 나타낸 것이다.

또한, 그림 5(b)의 경우에는 5(a)와 달리 수직응력이 증가함에 따라 최대마찰각(secant마찰각)이 크게 나타났는데 이는 모형지반을 형성하는데 있어서 Granitic Soil을 최적함수비( $w_{OMC}$ ) 상태로 모사하였으므로 PET film과 Granitic Soil 점착력이 존재하는 관계로 5(a)와 다른 경향이 나타났다고 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 정적마찰 시험인 대형전단시험과 경사판 시험을 실시하여 전단 특성을 파악하였으며, 시험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) PET film을 가지고 경사판 시험을 실시한 결과 마찰각이 작게는 약  $2^\circ$  크게는  $8^\circ$  정도의 차이가 나타남을 알 수 있었는데 이는 경사판의 상승속도와 각도와 관계가 있다고 판단된다.
- 2) 전단강도를 산출하는 방법이 약간씩 다르지만 대형전단 시험과 경사판 시험의 강도정수( $c$ ,  $\phi$ )를 구하면 작은 수직응력을 가한 경사판시험이 상대적으로 큰 수직응력을 가한 대형전단시험보다 마찰각이 크게 산정됨을 알 수 있었다. 또한, 전단시험 결과를 추세선을 추가하여 회귀분선을 하여보면 시험이 수행되지 않은 수직응력의 값을 다른 수직응력에서 얻어진 결과를 추정하여 예상할 경우 매우 큰 오차를 발생시킬 수 있음을 알 수 있었다.
- 3) 최대마찰각이나 한계 경사각을 평가하기 위하여 시험을 실시 할 때에는 하중조건을 정확하게 평가하여 고려하여야 한다는 것을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. 서민우, 신준수, 박준범, 박인준 (2003), “경사판 시험을 통한 토목섬유와 흙의 접촉 전단 특성 평가, 한국지반공학회논문집, Vol. 19, No, 6 pp. 288~294.
2. 장용채, 이승은, 존 바우더스 (2008), “불용자원의 접촉면 마찰특성 평가, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp.1456~1462
3. 장용채, 이승은, 서지웅 (2008), “조립재료와 지오신세틱스의 접촉면 마찰특성 평가”, 한국지반환경공학회, 논문집, 제9권, 제5호, pp.53~59.
3. Jones, D.R.V. and Dixon, N. (1998b), “Shear strength properties of geomembrane/geotextile interface”, *Geotextile and Geomenbranes*, Vol.16, pp.45~71.
4. Lopes, P.C., Lopes, M.L. and Lopes, M.P.(2001), Shear behaviour of geosynthetics in the inclined plane test-influence of soil particle size and geosynthetic structure”, *Geosynthetics International*, Vol.8, No.4, pp.327~342