

# 화학적 영향인자를 고려한 토목섬유-흙 접촉면 동적거동 특성

## The Characteristics of Dynamic Behaviors for Geosynthetic-soil Interface Considering Chemical Influence Factors

박인준<sup>†</sup> · kwak changwon<sup>1)</sup> · 김재근<sup>2)</sup>

Park, Innjoon · Kwak, Changwon · Kim Jaekeun

**ABSTRACT** : Nowadays, geosynthetics for reinforcement and protection are widely applied to the waste landfill site. Current research indicates the potential for progressive failure in geosynthetic-soil system depends on the interface shear strength governed by several intrinsic factors such as moisture, normal stress, chemical, etc. In particular, the effect of the acidity and basicity from the leachate is intensively reviewed to assess the chemical reaction mechanism of interface shear strength under the cyclic loading condition. New multi-purpose interface apparatus(M-PIA) has been manufactured and the cyclic direct shear tests using submerged geosynthetics and soils under the different chemical conditions have been performed, consequently, the thickness of interface and shear stress degradation are verified. The basic schematic of the Disturbed State Concept(DSC) is employed to estimate the shear stress degradation in the interface, then, normalized disturbed function is obtained and analyzed to describe the shear stress degradation of geosynthetic-soil interface with chemical influence factors under dynamic condition.

**Keywords** : Geosynthetic-soil, Interface, Multi-purpose interface apparatus, Cyclic direct shear tests, Thickness of interface, Normalized disturbed function, Shear stress degradation

**요 지** : 최근 쓰레기 매립장에 보강 및 보호 목적으로 토목섬유가 널리 사용되고 있다. 최근 연구결과, 토목섬유-흙 접촉면에서는 진행성 파괴가 발생할 수 있는데 이는 토목섬유-흙 접촉면에서 함수비, 연직응력, 화학적 요소의 영향 등 고유물성에 기인한다. 본 연구에서는 침출수 내의 산성 및 염기성과 같은 성분의 영향이 진동하중 상태에서 토목섬유-흙 접촉면의 전단강도 감소에 미치는 영향을 실내 시험을 통하여 분석하였다. 다기능 접촉면 시험기를 새로 구축하고 서로 다른 pH 조건에서 수침시킨 토목섬유와 흙 시료를 이용하여 진동 직접전단시험을 수행하여 접촉면 전단두께와 화학적 요소에 의한 접촉면의 전단강도 감소를 확인하였다. 또한 접촉면 전단강도 감소를 정량적으로 표현하기 위하여 교란상태개념에 기초하여 동하중 하의 화학적 인자들에 의한 토목섬유-흙 접촉면의 정규화 교란도 함수를 파악하고 전단강도 감소 특성을 확인하였다.

**주요어** : 토목섬유-흙, 접촉면, 다기능 접촉면 시험기, 진동 직접전단시험, 접촉면 전단두께, 정규화 교란도 함수, 전단강도 감소

## 1. 서 론

매립장에서 발생하는 침출수에는 환경에 유해한 물질들이 다량 포함되어, 매립장 설계 시 침출수가 외부로 누출되지 않도록 주의를 기울여야 한다. 이러한 목적으로 매립장의 바닥과 사면에는 토목섬유로 이루어진 차수시설이 설치된다. 매립장 차수시설에 사용된 토목섬유가 늘어남에 따라 토목섬유와 흙 사이에는 폭넓은 접촉면(interface)이 형성된다. 접촉면은 일반적으로 낮은 전단강도를 보이기 때문에 매립장의 구조적 안정성에 큰 영향을 미치며, 매립장 설계 시 접촉면을 중요하게 고려해야 한다. 따라서 접촉면 전단강도를 정확하게 평가하는 것이 매립장 전체의 안정성 확보를 위하여 중요한 요소로서 국내에서는 대형 직접전단 시험

과 인발 시험을 통해 정적 전단강도 연구가 진행되어 왔다 (Christensen 등, 1994).

본 연구에서는 지진과 같은 반복하중 재하 시 재료 및 접촉면의 고유 물성 변화로 급격한 파괴가 발생할 수 있음을 고려하고 침출수 누출로 인한 화학적 요소에 따른 영향인자를 고려한 동적 접촉면 전단파괴의 전개과정을 규명한다. 이를 위하여 접촉면 강도변화에 대한 연구 실적이 다기능 접촉면 전단시험기(M-PIA; Multi-Purpose Interface Apparatus)를 새롭게 제작하여 현장과 가장 유사한 조건에서의 실내 시험을 통하여 접촉면 물성을 파악하고자 한다. M-PIA를 이용한 다양한 조건에서의 폐기물 매립장 접촉면 물성치 산정을 수행하고, 연직하중과 폐기물 침출수의 pH에 따른 화학적 인자들이 토목섬유-흙 접촉면(interface)의 공학적 거

† 정희원, 한서대학교 토목공학과 교수(E-mail : geotech@hanseo.ac.kr)

1) 비회원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정

2) 비회원, 한서대학교 토목공학과 석사

동에 미치는 영향을 분석하여 실험에 근거한 접촉면 물성치 및 전단파괴 경향을 파악하였다.

## 2. 접촉면 거동 이론(교란상태의 개념)

재료는 외부로부터 하중을 받게 되면 재료의 미세구조가 변화를 일으킨다. 교란상태개념(Disturbed State Concept)은 하중을 받는 재료의 거동을 재료 내부의 미세구조의 변화에 의해 표현할 수 있다는 가정에 기초하고 있으며 하중을 받는 재료의 거동을 정의하기 위해 두 개의 기준 상태를 도입하였다. 첫 번째는 상대적으로 손상되지 않은 상태(Relatively Intact State; RI)로써 재료가 외력을 받기 전의 초기 상태에는 미세한 결함들을 포함하더라도 재료가 상대적으로 손상되지 않은 상태로 본다. 두 번째는 완전파괴 상태(Fully Adjusted State; FA)로써 재료의 초기상태에 미세하게 존재했던 손상된 부분이 외력에 의해 점차적으로 확산되어 재료가 전단저항력을 완전히 잃은 상태를 말한다. 하중을 받는 재료는 파괴에 이르기까지는 반드시 RI상태와 FA상태의 사이에 존재하게 되므로 RI상태와 FA상태를 연결하는 구성방정식을 찾는다면 어떠한 재료의 조합이라도 표현할 수 있게 된다. RI상태는 탄성 모델 또는 탄소성 모델 등의 구성방정식으로 나타낼 수 있으며, FA상태는 한계상태개념을 통해 나타낼 수 있다(Desai 등, 1997; Desai, 2001).

그림 1은 진동하중을 받는 재료의 거동을 RI상태와 FA상태를 통해 정의한 것이며, 본 연구에서 알아보고자 하는 토목섬유-흙과의 접촉면에서의 교란상태는 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서와 같이 임의의 하중을 받는 재료는 RI상태에 있는 부분과 FA상태에 있는 부분이 혼합되어 있다고 정의하고 그 혼합 정도는 교란도 함수 D를 이용하여 표현

한다(Park 등, 2000).

동하중을 받는 접촉면의 교란도 함수(D)는 식 (1)과 같이 정의되며, D를 실험으로부터 산정하는 방법은 그림 3과 같다(박인준 등, 2000).

$$D = \frac{\tau^i - \tau^a}{\tau^i - \tau^c} \quad (1)$$

여기서,  $i$ ,  $a$  및  $c$ 는 각각 RI상태, 현재상태 및 FA상태의 전단응력 값을 나타낸다.

특히 접촉면의 현재 전단응력( $\tau$ )이 FA상태( $\tau^a$ )로 이동할 때(shear stress degradation)의 D를  $D_u$ 라고 한다.  $D_u$ 는 FA상태의 교란도를 나타내며 이론적으로 1.0(완전파괴 상태)의 값을 가지나, 대부분의 재료는  $D_u$ 가 1.0에 도달하기 전에 파괴에 이르므로 FA상태의 D는 1.0보다 작은 값을 가진다(박인준 등, 2000).

## 3. 실내 시험결과 분석

### 3.1 실내시험방법

본 연구에서는 접촉면의 거동특성을 분석하기 위해서 다

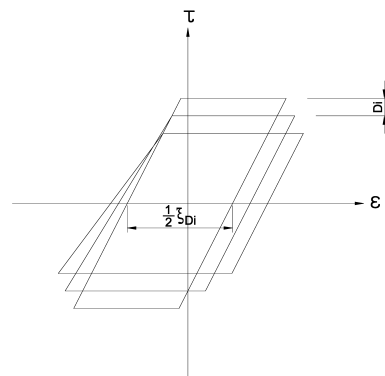


그림 3. 교란도 함수 산정 방법

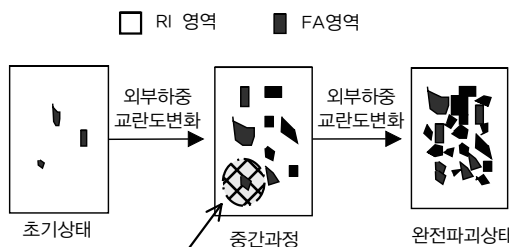


그림 1. 교란도의 변화에 따른 재료 내부의 상태변화(박인준 등, 2000)

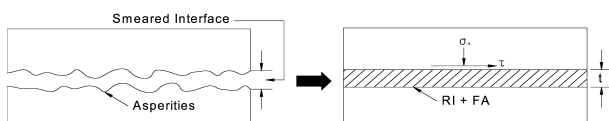


그림 2. 토목섬유-흙 접촉면에서의 교란상태개념

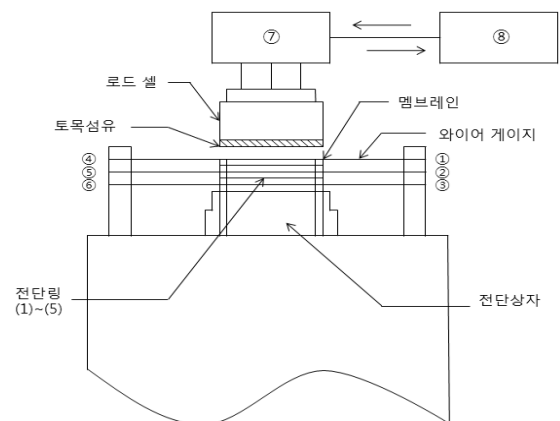


그림 4. M-PIA 시험기의 모식도

표 1. M-PIA 사양

장 치	사 양	비 고
전단력	50kN	- max
전단속도	0.5Hz(mm/sec)	- 설정가능. 예비테스트 결과 0.5Hz로 선정
전단상자	200mm × 170mm 공시체 100mm × 100mm	- 자재 : 스테인레스
수평변위계	+/- 5mm	- LVDT(자동계측)
수직변위계	20mm	- LVDT(자동계측)
Wire draw transducer	+/- 0.05/100mm+양자화 오차	
제어장치	자동 제어 및 데이터 수집 프로그램	- 측면 변위 제어 프로그램 - 자동 다점 인터벌기능 - 속도제어 - 정하중제어 - 응력제어 - 변위제어



그림 5. 제작 완료된 M-PIA 시험기

기능 접촉면 전단시험기(M-PIA)를 제작하였다(그림 4 참조). 이 시험기는 토목구조물의 안정성에 영향을 미치는 지진에 의한 기초 지반의 강도저하를 평가할 수 있는 시험기로서 조립토 및 세립토에 반복하중을 작용시켜 지반의 특성을 조사할 수 있다. 시험기는 하부 전단상자와, 수평 및 연직하중 재하장치(⑦, ⑧), 전단하중 측정용 로드 셀, 연직 변위계, 전

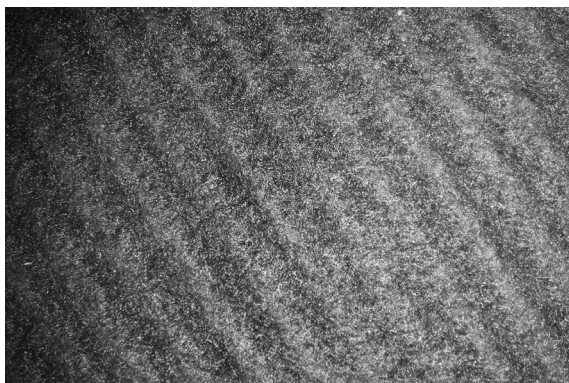
표 2. 화학조건

용 액	pH
NaOH	11~13
Water	7
CH <sub>3</sub> COOH	3~4

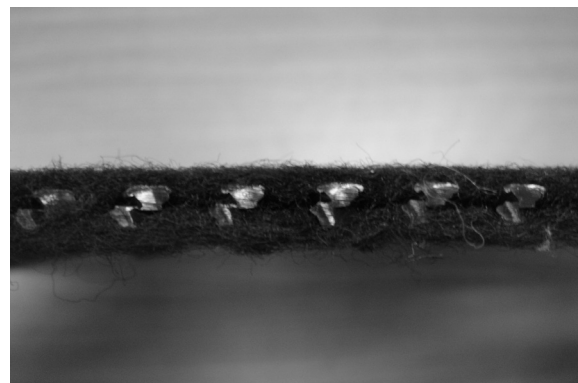
표 3.시료상태

시 료	수침기간	비 고
HDPE	30일	- 두께 : 7.0mm
주문진 표준사	30일	- 시료성형 : 상대밀도 60%, - 하중가압 : M-PIA를 이용, 40kN 하중으로 가압 다짐수행

단링과 각 전단링에 직접 연결된 접촉면 변위측정용 6개의 와이어 게이지(①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥)와 시험기를 제어하는 프로그램을 내장하고 있는 조절장치 및 자동 데이터 수집프로그램으로 구성되었다. 그림 4는 M-PIA(Multi-Purpose Interface Apparatus) 시험기의 모식도이고, 그림 5는 제작 완료된 M-PIA 시험기를 나타내었다. M-PIA 장비의 사양은



(a) 표면(Filter Mat 표면)



(b) 단면(가운데가 차수 시트)

그림 6. 토목섬유(일체형 HDPE)

표 1에 서술하였다.

본 시험에서는 매립장 침출수의 pH의 범위를 3가지로 구분하여 표 2와 같이 적용하였으며, 화학 요소를 고려하기 위하여 표 3과 같은 조건을 구현하였다. 또한 연직하중의 영향을 파악하기 위하여 각 시료에 따라 5kN, 10kN, 15kN 하중을 가하여, 산성, 중성, 염기성에 대한 총 9가지 경우로 시험을 실시하였다.

시험에 사용한 토목섬유 샘플의 표면 및 단면은 그림 6과 같다. 토목섬유는 일체형 HDPE로써 하부 보호용 Filter Mat와 차수 시트를 사전 접착하여 차수 시트가 사석에 의하여 손상되는 것을 방지하며, 지반 밀착력을 높일 수 있는 섬유이다.

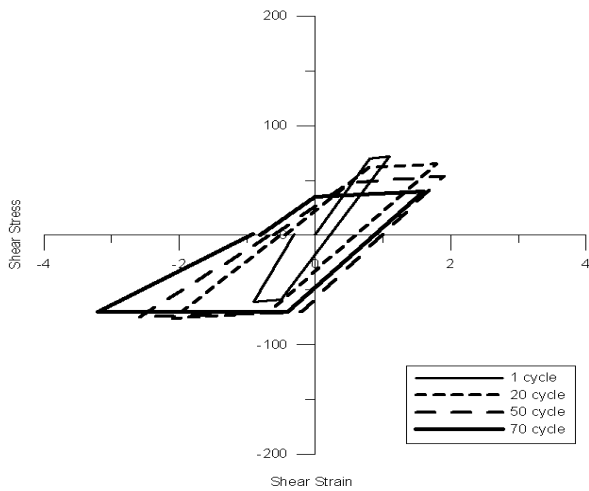
### 3.2 동적전단시험에 따른 전단응력-전단변형을 관계 곡선

접촉면 전단파괴 특성을 분석하기 위해서 3가지 경우

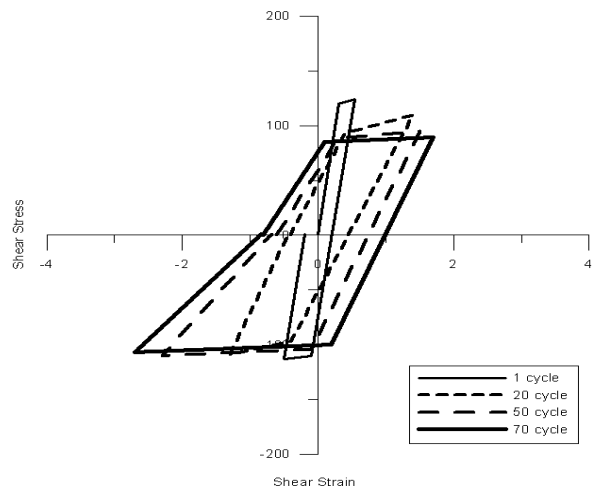
의 pH 및 연직하중 조건을 형성하여, 총 9가지 경우에 대하여 동적전단시험을 실시하였으며 그 결과는 그림 7과 같다. 그림 7에서 Shear Stress(세로축)의 단위는 kPa 이다.

그림 7은 진동수 0.5Hz의 동적하중을 최대 70회에 걸쳐 재하한 결과이며 대표적으로 1회, 20회, 50회 및 파괴 시인 70회 재하 시 전단응력-전단변형을 관계를 도시하였다. 모든 화학조건에서 재하 회수에 따른 전단응력 감소(Shear stress degradation)가 뚜렷하게 나타났으며 연직하중이 클수록 초기전단응력이 증가하고 초기전단응력곡선의 기울기(전단강도)가 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 중성에 비하여 염기성 및 산성일 경우, 초기 재하 시와 70회 재하 시의 최대전단응력의 차이가 최대 약 50%까지 현저하게 커지므로 화학적 요인이 접촉면 전단강도에 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

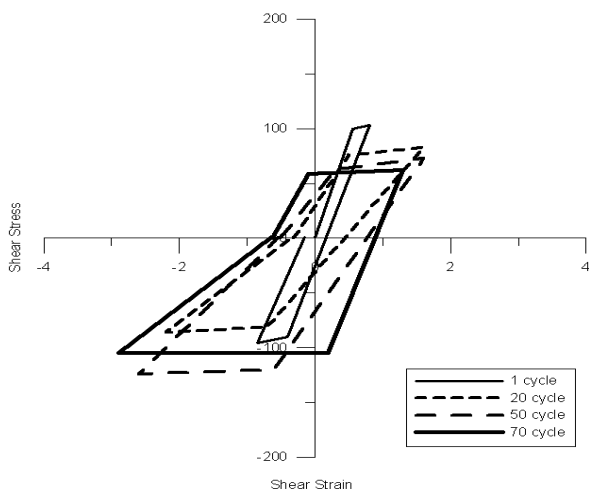
### 3.3 화학 인자별 접촉면 거동특성



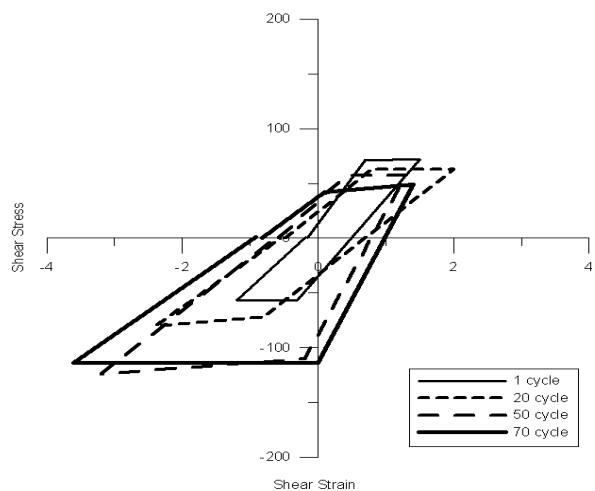
(a) 중성 5kN



(b) 중성 10kN

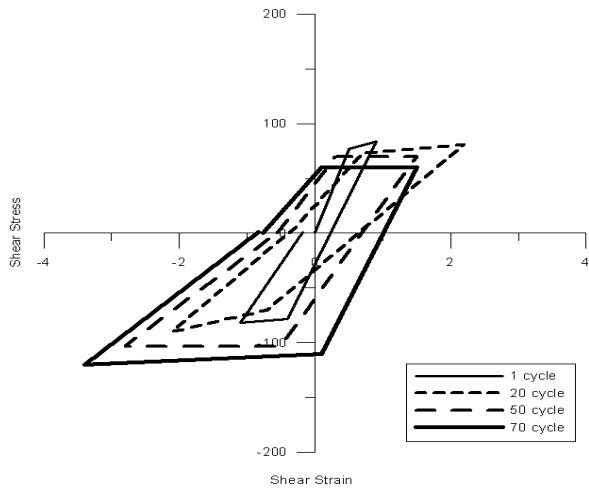


(c) 중성 15kN

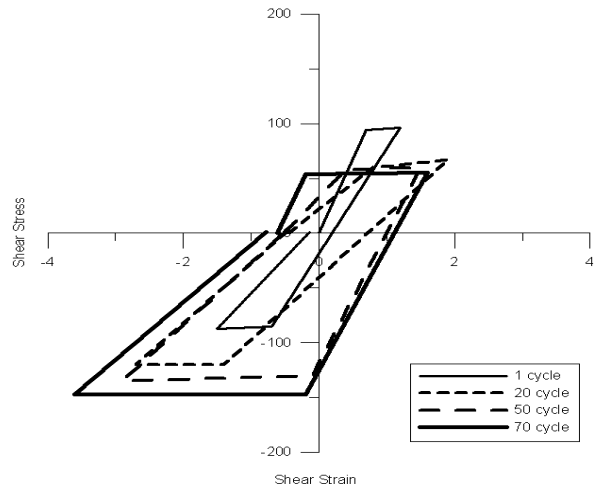


(d) 염기성 5kN

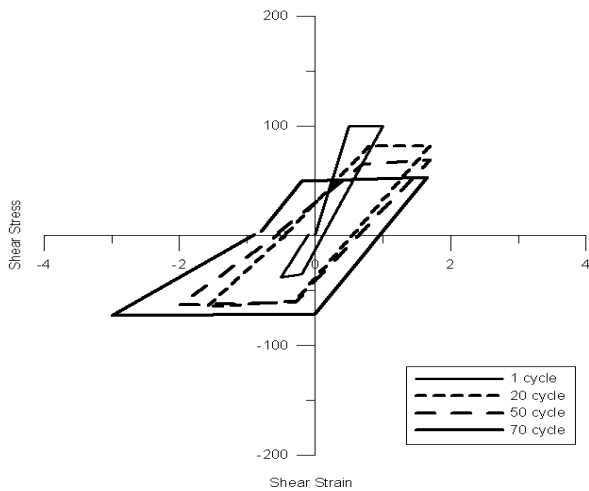
그림 7. 동적전단시험 수행결과(전단응력-전단변형을 관계곡선) (계속)



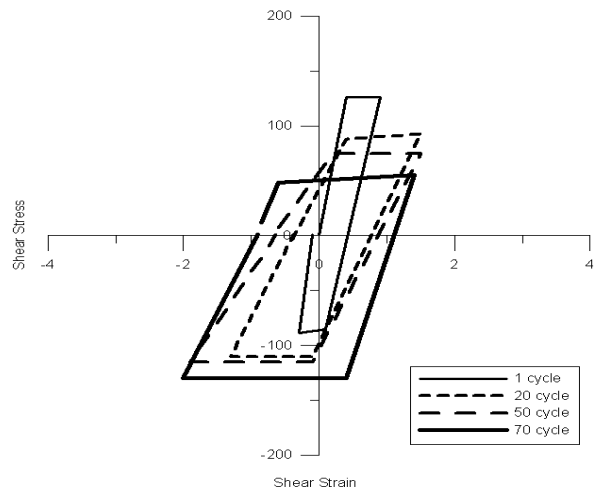
(e) 염기성 10kN



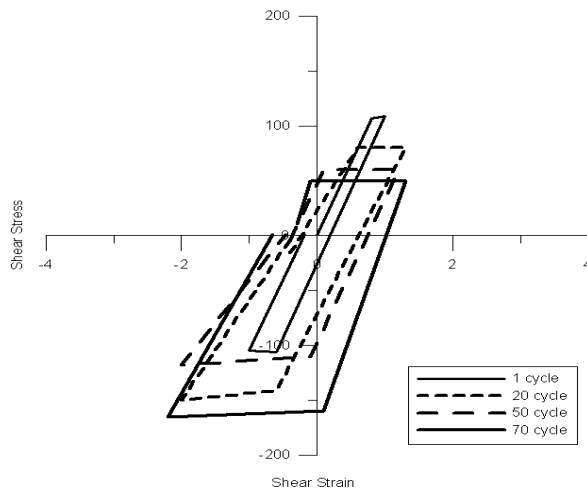
(f) 염기성 15kN



(g) 산성 5kN



(h) 산성 10kN



(i) 산성 15kN

그림 7. 동적전단시험 수행결과(전단응력-전단변형률 관계곡선)

시험결과(그림 7 참조) 동하중재하회수가 증가할수록 접축면 전단응력이 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났으며, 이는 교란도(식 (1) 참조) 증가로 인한 손상(Damage)의 축적

을 의미한다. 시험을 통하여 최종적으로 찾고자 하는 교란도 함수(D)는 식 (1)과 교란도-진동회수 관계를 이용하여 그래프 상에서 구할 수 있다. 즉, 그림 7에서 초기 전단응력값과

FA 상태의 전단응력값의 차에 대한 초기 전단응력값과 현재 전단응력값의 차이가 교란도 함수값이 된다(박인준 등, 2000). 시험 결과를 통해 교란도와 하중재하회수 상관관계를 도시하면 그림 8과 같으며, 화학적 인자별로 교란도 값이 뚜렷한 차이를 보였다. 이는 pH에 따라서 토목섬유-흙 접촉면의 손상 정도가 달라짐을 의미하므로 pH에 따라 각각 다른 교란도 함수 D를 구할 수 있다.

그림 8에서, 중성일 때 초기 약 10회 미만의 재하 시 교란도가 비교적 급격히 증가하나, 그 이후 진동재하회수에 따라서 교란도가 정비례 형태로써 완만한 파괴형상을 나타내었고 연직하중에 따라 교란도의 차이가 염기성 및 산성보다 현저히 크게 나타났다. 염기성일 경우, 비교적 작은 연직하중(5kN, 10kN)이 중성일 때와 유사하게 정비례 형상을 나타내나 큰 연직하중(15kN)일 경우 약 30회 미만의 재하 시에 교란도가 비교적 급격히 증가하는 경향을 보였다. 산성일 경우 모든 연직하중 조건에서 약 35회 미만의 재하 시에 교란도가 급격히 증가하는 경향을 나타내었고 상대적으로 좁은 범위 내에 교란도가 집중되는 형상으로 보였다. 종합적으로, 산성일 경우 하중재하 초기에 토목섬유-흙 접촉면

의 전단강도 감소(손상정도 축적)가 발생하였고, 이는 화학적 영향인자가 접촉면에 반응할 경우 접촉면에서 초기 전단 파괴가 급격히 일어남을 알 수 있다.

### 3.4 화학 인자별 접촉면 전단단계

하중과 전단변위값을 측정하여 그림 9와 같이 화학인자 및 하중에 따라서 접촉면 전단단계의 상대변위를 나타내었다. 모든 경우 연직하중이 증가할수록 접촉면 상대변위가 커지는 것을 알 수 있다. 연직하중별 화학반응을 보면 중성의 경우 연직하중 10kN 이상일 경우 Gage 1의 변위는 지속적으로 증가하여 최대 약 1.4mm에 이르나, Gage 2, 3의 변위값 변화가 거의 없으므로 접촉면 전단강도에 영향을 미치는 전단단계는 상부로부터 두 번째 전단링이 설치된 최대 약 4mm 임을 알 수 있다. 염기성의 경우 Gage 1의 변위는 중성과 마찬가지로 지속적으로 증가하여 연직하중이 15kN일 경우 최대 약 1.6mm를 나타내었고 Gage 2의 변위도 증가하여 연직하중이 15kN일 경우 최대 약 1.2mm를 나타내었다. Gage 3의 변위는 연직하중이 10kN일 경우 최대 약 0.9mm를 나타내어 전단단계는 상부로부터 네 번째 전단링

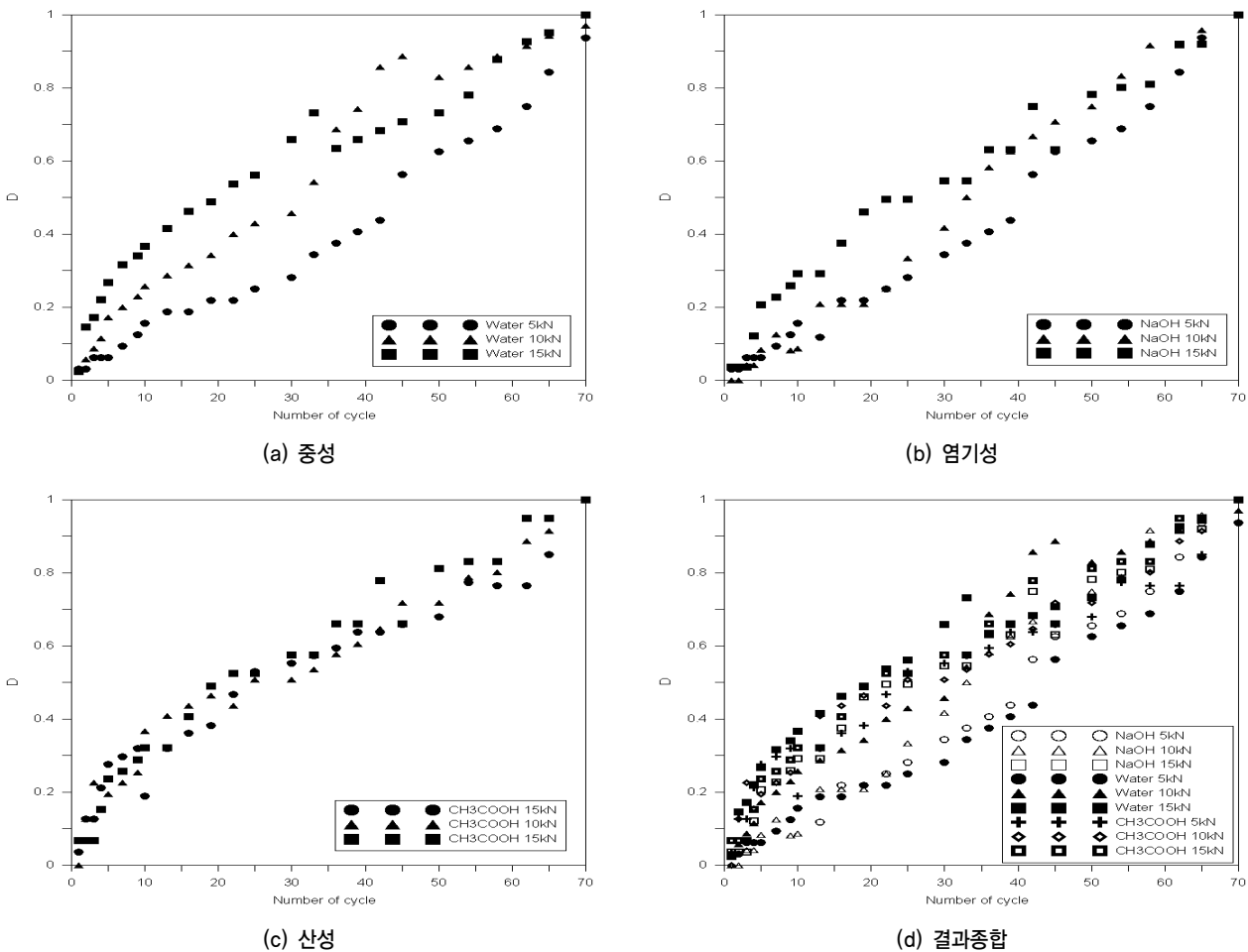
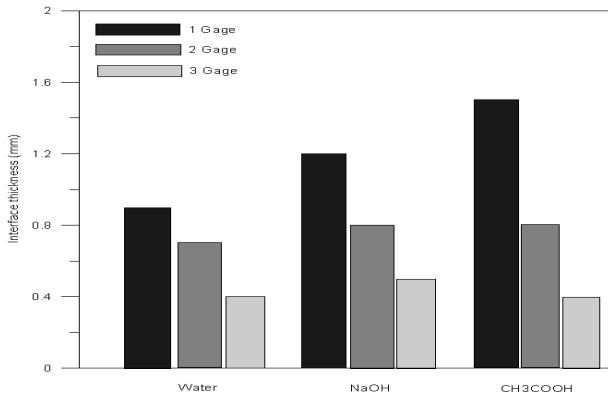
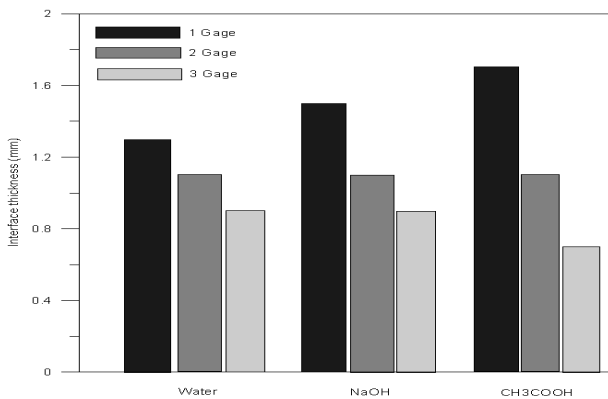


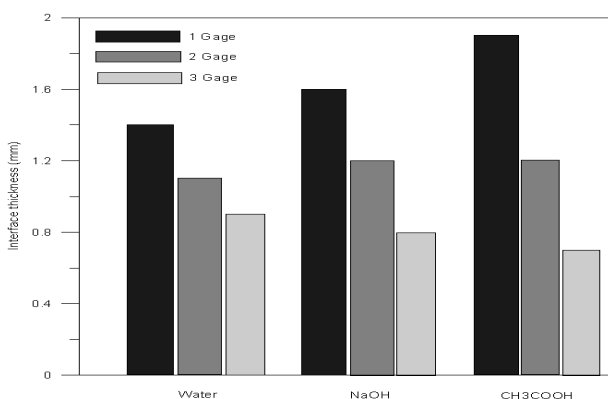
그림 8. 화학적 인자별 교란도 산정결과



(a) 5kN



(b) 10kN



(c) 15kN

그림 9. 연직하중과 화학적영향 인자별 접촉면 두께

이 설치된 약 8mm 임을 알 수 있다. 산성의 경우 Gage 1의 변위는 중성, 염기성과 마찬가지로 지속적으로 증가하여 연직하중이 15kN일 경우 최대 약 1.9mm를 나타내었고 Gage 2의 변위도 증가하여 연직하중이 15kN일 경우 염기성과 유사하게 최대 약 1.2mm를 나타내었다. Gage 3의 변위는 연직하중이 15kN일 경우 최대 약 0.75mm를 나타내어 전단두께는 염기성과 유사하게 상부로부터 네 번째 전단링이 설치된 약 8mm 임을 알 수 있다. 이를 통해 접촉면이 화학적 영향을 받으면 그 두께가 변화하는 현상을 명확하게 입증할

수 있었다.

## 4. 결 론

토목섬유-흙 접촉면의 동적 전단거동특성을 파악하기 위하여 다기능 접촉면 전단시험기 M-PIA(M-PIA; Multi-Purpose Interface Apparatus)를 새로 구축하였다. 서로 다른 화학적 조건(pH)에 따라 수침시킨 토목섬유 및 주문진 표준사를 이용하여 연직하중에 따라 총 9가지 케이스에 대한 실내시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 모든 시험에서 동적 전단재하 회수에 따른 뚜렷한 전단 응력 감소(Shear stress degradation) 경향을 확인하였다. 이러한 전단응력 감소를 수치적으로 표현하기 위하여 교란상태개념(Disturbed State Concept)을 도입하여 토목섬유-접촉면(interface)에서의 정규화된 교란도의 경향을 파악하였다. pH 및 연직하중 조건에 따른 분석결과, 교란도(D)는 중성일 때 모든 연직하중 조건에서 진동재하회수에 따라서 교란도가 정비례 형태로써 완전한 파괴형상을 나타내었다. 염기성일 경우, 본 시험에서 적용된 가장 큰 연직하중(15kN)일 경우 약 30회 미만의 재하 시에 교란도가 비교적 급격히 증가하는 경향을 보였고 산성일 경우 모든 연직하중 조건에서 약 35회 미만의 재하 시에 교란도가 급격히 증가하였다. 종합적으로, 산성일 경우 가장 초기에 토목섬유-흙 접촉면의 전단강도 감소가 발생하였고, 이는 화학적 영향인자가 접촉면에 반응할 경우 접촉면에서 초기 전단파괴가 급격히 일어남을 알 수 있다.
- (2) 본 시험에서 가한 연직하중 값이 가장 작은 경우(5kN), 산성 조건에서 가장 먼저 교란도가 증가하는 경향을 보이거나 연직하중이 10kN 이상일 경우 산성과 염기성 조건에서 대부분의 곡선이 좁은 영역에 분포하므로 연직하중의 영향 보다는 pH 조건의 영향이 커지는 경향을 나타내었다. 즉 산성 또는 염기성과 같은 화학적 조건이 동적하중 하에서 토목섬유-접촉면 거동의 주요 영향인자 중 하나라고 판단된다. 단, 실제 현장 전체가 균등한 산성 또는 염기성을 보이지 않을 수 있으므로 추가적으로 다양한 pH에 대한 시험을 통하여 보다 많은 데이터 구축이 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 접촉면 전단두께를 산정할 수 있다면 수치해석 시 접촉면의 물성을 가장 정확하게 산정할 수 있으므로 매우 유용하게 이용할 수 있는 성과이다. 본 연구에서는 화학인자 및 연직하중에 따른 접촉면 전단두께를 전단링의

변위를 분석함으로써 파악하였다. 중성의 경우 연직하중 증가 시 Gage 2, 3의 변위값 변화가 거의 없으므로 전단두께는 상부로부터 두 번째 전단링이 설치된 최대 약 4mm 임을 알 수 있다. 염기성의 경우 Gage 3의 변위는 연직하중이 10kN일 때 최대 약 0.9mm를 나타내어 전단두께는 상부로부터 네 번째 전단링이 설치된 약 8mm 임을 알 수 있다. 산성의 경우 Gage 3의 변위는 연직하중이 15kN일 때 최대 약 0.75mm를 나타내어 전단두께는 염기성과 유사하게 상부로부터 네 번째 전단링이 설치된 약 8mm 임을 알 수 있었다. 이를 통해 접촉면이 화학적 영향을 받으면 그 두께가 변화하는 현상을 명확하게 입증할 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 2009년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단 중견연구자 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다(No.2009-0085545).

### 참고 문헌

1. 박인준, 유지형, 김수일(2000), 흙-구조물 경계면의 동역학적 해석을 위한 교란 상태 모델링, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 16, No. 3, pp. 5~13.
2. Christensen, T. H., Kjeldsen, P., Albrechtsen, H-J., Heron, G., Nielsen, P. H., Bjerg, P. L. and Holm, P. E.(1994), Attenuation of Landfill Leachate Pollutants in Aquifers, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, Vol. 24, pp. 119~202.
3. Desai, C. S., Shao, C. and Park, I. J.(1997), Disturbed State Modeling of Cycle Behavior of Soils and Interfaces in Dynamic Soil-Structure interaction, *Proc., 9th IACMAG Conference*, Wuhan, China, pp. 987~992.
4. Desai, C. S.(2001), *Mechanics of Materials and Interfaces - The Disturbed State Concept*. CRC Press., pp. 100~600.
5. Park, I. J. and Desai, C. S.(2000), Cyclic Behavior and Liquefaction of Sand using Disturbed State Concept, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 9, pp. 834~846.

(접수일: 2010. 8. 2 심사일: 2010. 9. 6 심사완료일: 2010. 10. 14)