

토목섬유의 동적 경계면 마찰특성 평가

Estimation of Dynamic Interface Friction Properties of Geosynthetics

김 동 진*¹ Kim, Dong-Jin

서 민 우*² Seo, Min-Woo

박 준 범*³ Park, Jun-Boum

박 인 준*⁴ Park, Inn-Joon

Abstract

In this study, shaking table tests were conducted to estimate dynamic interface properties between geosynthetics such as geomembrane, geotextile and geosynthetic clay liner. Accelerations of both shaking table and upper box, and relative displacements between geosynthetics under dynamic loading were measured. Also, the influence of normal stress, frequency of excitation and dry/wet conditions were investigated through the analyses of test results. From the test results, it was found that there is a limited acceleration below which dynamic force can be transmitted between geosynthetics without the loss of horizontal acceleration. Dynamic interface friction angle between geosynthetics could be calculated through the limited acceleration. Relative displacements induced along geosynthetic interfaces under dynamic loading were not consistent depending on the type of interface and test conditions. The maximum slip displacements between geosynthetics are normalized and normalized slip equations were developed for each interface. By using the normalized slip equation, maximum slip displacements for the geosynthetic interface could be predicted for the given base acceleration and frequency of excitation.

요 지

본 연구에서는 매립지에서 사용되고 있는 토목섬유 (지오멤브레인, 지오텍스타일, 토목섬유 점토 차수재) 사이의 동적 접촉 마찰 특성을 평가하기 위해서 진동대 실험을 실시하였다. 동적 하중하에서 진동대와 하부에 토목섬유가 부착된 상자의 가속도, 이들 사이의 상대적 변위를 측정하였으며, 연직응력, 진동 주파수, 건조/수침 상태가 접촉면의 동적 거동 특성에 미치는 영향도 알아보았다. 실험 결과를 통해 동적하중이 감쇠없이 토목섬유 사이를 통과하는 한계 가속도가 존재함을 확인하였으며, 이를 이용하여 토목섬유 사이의 동적 접촉 마찰각을 산정할 수 있었다. 접촉면에서의 상대 변위는 접촉면의 형태와 건조/수침 상태에 따라 다르게 측정되었다. 각 토목섬유 접촉면에 대한 최대 상대변위는 무차원으로 정규화시켜, 가속도와 최대 미끄러짐 사이의 관계식을 구하였다. 이 식을 이용하면 주어진 가속도와 주파수에서, 토목섬유 사이를 따라 발생하는 최대 미끄러짐의 크기를 예측할 수 있다.

Keywords : Dynamic properties, Geosynthetic, Interface, Landfill, Normalized slip, Shaking table

1. 서 론

폐기물 매립지에는 침출수의 누출방지와 집수 및 배수,

그리고 주변으로부터의 지하수 또는 침투수의 유입을 방지하기 위하여 차수시설이 설치된다. 이러한 차수 시스템은 매립지의 바닥과 사면에 각각 설치되어, 매립 폐기

*1 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ.)

*2 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., redsmw1@snu.ac.kr)

*3 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ.)

*4 한서대학교 토목공학과 조교수 (Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Hanseo Univ.)

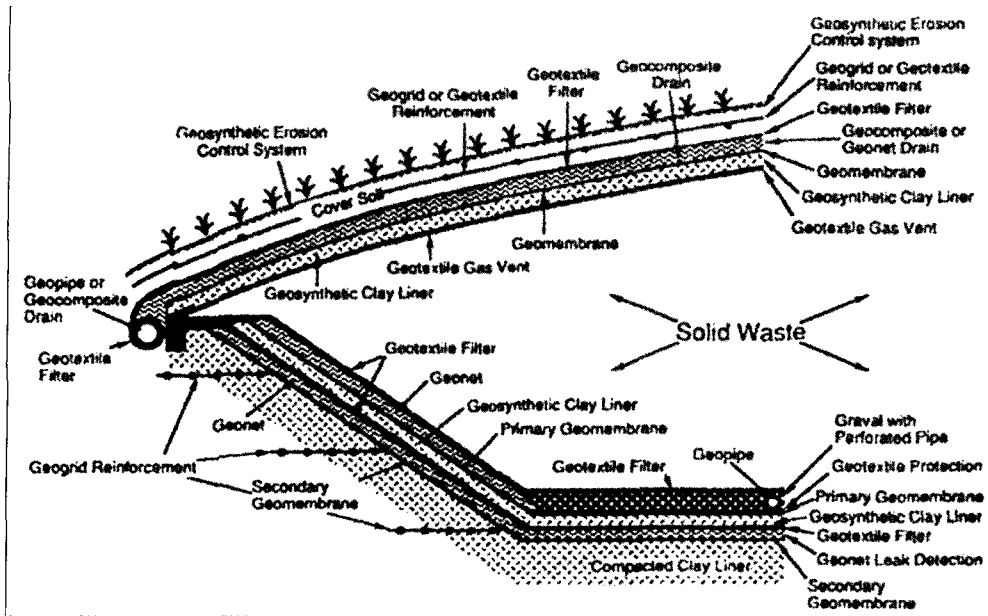


그림 1. 매립지의 차수 및 최종 덮개 시스템 (Koerner, 1998)

물을 주변으로부터 격리시키는 역할을 하게 된다. 매립지에 설치되는 전형적인 차수 및 최종 덮개 시스템은 그림 1과 같다. 그림 1에서 확인할 수 있듯이, 매립지의 차수 및 덮개 시스템에는 여러 종류의 토목섬유들이 사용되고 있다.

여러 가지 토목섬유 중에서 지오멤브레인(geomembrane)은 우수나 높은 함수량을 가진 슬러지에 의해 발생된 침출수가 외부로 유출되는 것을 막고 지하수가 매립지 내부로 유입되는 것을 차단하는 역할을 하며, 지오텍스타일(geotextile)은 필터 및 배수 기능을, GCL(geosynthetic clay liner)은 CCL(compact clay liner)의 대체재료로서 차수재 역할을 한다.

한편, 매립지에 토목섬유를 설치할 때는 매립지의 바닥과 사면에 대한 안정성 검토가 필요하며, 이 때 토목섬유/토목섬유, 흙/토목섬유 사이의 마찰 특성은 구조적 안정성을 평가하는데 중요한 인자가 된다. 토목섬유/토목섬유 혹은 흙/토목섬유 사이의 마찰 특성은 가해지는 하중의 특성에 따라, 크게 정적 접촉마찰 특성과 동적 접촉마찰 특성으로 나눌 수 있다. 현재까지 직접전단 시험기나 인발(pull-out) 시험기를 이용한 정적 하중 상태에서의 토목섬유-흙 시스템의 거동에 대해서는 많은 연구가 이루어졌으며(Martin 등, 1984; Koutsourais 등, 1991), 매립지의 설계 및 시공시에도 정적 상태에서의 안정성만을 고려하고 있는 실정이다. 하지만, 최근 들어 일반 토목 및 건축 구조물에 대한 내진 해석 및 평가에 대한 연구가 진행됨에 따라, 매립지에도 내진 해석 및 평가의 필요성이 대두되고 있다(박인준, 2001; Bray 등,

1998; Matasovic 등, 1998; Yegian 등, 1998).

이러한 연구는 지진시 구조물 기초의 안전성을 확보하기 위한 토목섬유의 적용 가능성에 대한 연구에서부터 시작되었다(Hushmand와 Martin, 1990). 대부분의 시험에 진동대가 이용되었으며, Yegian과 Lahlaf(1992)는 연직응력과 주파수를 변화시켜 가면서 지오텍스타일과 지오멤브레인 사이의 동적 접촉 마찰각을 측정하여, 이를 정적 접촉마찰각을 비교한 바 있다. Yegian과 Lahlaf(1992)의 실험결과 주파수가 증가함에 따라 동적 마찰계수가 감소하는 경향을 보였는데, Kavazanjian 등(1994)은 이러한 감소의 원인으로 반복 전단에 따른 지오멤브레인의 폴리싱(polishing)을 지적하였다. Yegian과 Harb(1995)는 매립지에서 사용되는 다양한 토목섬유 사이에서 발생하는 변위를 무차원으로 정규화시킨 후, 무차원 변위와 가속도의 관계식을 제안하였으며, Castelli 등(2001)은 다양한 토목섬유와 흙 사이의 동적 접촉마찰각을 연직응력을 변화시켜가면서 평가하였다. 표 1은 현재까지 진행된 토목섬유 사이의 동적 접촉마찰 특성에 대한 연구 내용들을 정리한 것이다.

그러나, 국내에서는 매립지의 동적 안정성에 중요한 역할을 하는 토목섬유 경계면에서의 동적 마찰특성, 즉 동적 마찰각, 동적 하중으로 인한 변위 유발, 경계면의 존재로 인해 상부로 전달되는 동적 하중의 감소에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 따라서, 현재로서는 국내 연구 자료로는 토목섬유 경계면에 지진 하중 혹은 동적 하중이 가해질 때 경계면에서의 동적 거동, 마찰 특성 및 변위 양상을 예측할 수 없다.

표 1. 현재까지 진행된 동적 접촉 특성 연구 (Matasovic 등, 1998)

Reference	Test type	Base inclination	Interface	Excitation
Hushmand and Martin (1990)	Centrifuge	Horizontal	Geomembrane/Geomembrane Geomembrane/Geotextile	Frequency 1.5 to 5Hz Base acceleration 0.3 to 0.8g Normal stress up to 8.4kPa
Kavazanjian 등 (1991)	Shaking table	Horizontal	Geomembrane/Geomembrane Geomembrane/Geotextile	Frequency 1.5 to 5Hz Base acceleration 0.3 to 0.8g Normal stress up to 8.4kPa
Yegian and Lahlaf (1992)	Shaking table	Horizontal	Geomembrane/Geotextile	Frequency 2, 5, 10Hz Base acceleration up to 0.4g Normal stress up to 13.6kPa
Zimmie 등 (1994)	Shaking table Centrifuge	Horizontal	Geomembrane/Geotextile Geonet/Geotextile	Frequency 5 to 40Hz Base acceleration 0.04 to 4g Normal stress 2.1 to 84kPa
Yegian and Harb (1995)	Shaking table	Horizontal & Inclined	Various geosynthetics Geosynthetics	Frequency 1, 2, 5Hz Base acceleration up to 1g
De (1996)	Shaking table Centrifuge	Inclined (2 and 4°)	Geomembrane/Geomembrane	Frequency 1, 2, 5Hz Base acceleration 0.15 to 0.22g Normal stress up to 207kPa
Kramer and Smith (1997)	Shaking table	Inclined	Geomembrane/Geotextile	Frequency is a function of fundamental period of model

본 연구에서는 진동대 시험을 통해 토목섬유가 포함되는 구조물의 동적 안전성 평가시 요구되는 토목섬유/토목섬유 사이의 동적 접촉마찰 특성을 평가하였다. 매립지에서 흔히 형성되는 접촉면, 즉 (1) 표면이 고운면(smooth) 지오멤브레인/지오텍스타일, (2) 고운면 지오멤브레인/GCL의 부직포면(nonwoven part), (3) 고운면 지오멤브레인/GCL의 직포면(woven part)을 시험 대상으로 하였으며, 실험결과를 분석하여 연직응력, 주파수, 건조/수화 상태가 접촉면의 동적 접촉 마찰특성에 어떤

한 영향을 미치는지 고찰하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 토목섬유의 특성

본 연구에 사용된 토목섬유는 국내에서 생산된 2mm 두께의 표면이 고운 지오멤브레인, 부직포 지오텍스타일, GCL(geosynthetic clay liner)이다. 현재 CCL(compact

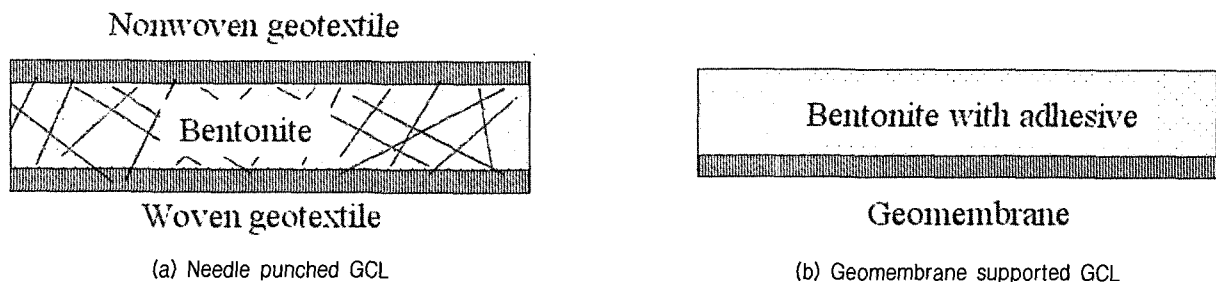


그림 2. 대표적인 GCL

표 2. 사용된 토목섬유의 물리적 특성

부 호	종 류	두께 (mm)	면적당 무게 (g/m ²)	기타
S-GM	표면이 고운면 지오멤브레인 (smooth geomembrane)	2.0	-	HDPE
GT	부직포 지오텍스타일 (nonwoven geotextile)	9.0	1,000	색 : 흰색
GCL	부직포+벤토나이트+직포 시스템 (geosynthetic clay liner)	7.0 (건조시)	4,100 (부직포 : 340) (직포 : 170)	벤토나이트 성분 LL : 484 % PL : 45 %

clay liner)의 대용으로 널리 사용되는 GCL은 크게 두 가지 형태로 나누어 볼 수 있다. 그림 2에 제시되어 있는 바와 같이, 하나는 두 겹의 지오텍스타일 사이에 과립형 벤토나이트를 넣고 니들펀칭(needle-punching)한 형태이고, 나머지 하나는 지오멤브레인에 벤토나이트를 접착제로 붙인 형태이다. 두 가지의 GCL 중, 본 연구에서는 벤토나이트를 부직포와 직포 사이에 넣어 일체화시킨 GCL(그림 2(a))을 사용하였다. 본 실험에 사용된 토목섬유 시료의 종류는 표 2와 같다. 표 2에서와 같이 시료명은 표면이 고운면 지오멤브레인, 지오텍스타일, GCL의 부직포, 직포에 대하여, 각각 S-GM, GT, GCL(NW), GCL(N)라고 명명하였다(표 3 참조).

2.2 실험 장치 및 절차

토목섬유 사이의 동적 접촉마찰 특성을 평가하기 위해 본 연구에서는 진동대를 이용하였으며, 개략도는 그림 3과 같다. 진동대는 마찰력이 없는 수평방향으로 움직이는 두 개의 바퀴 위에 놓여진 알루미늄판으로 진동을 유발시키는 가진기(vibration exciter)와 연결되어 있으며, 진동수와 가속도를 임의로 지정할 수 있다. 본 연구에서는 토목섬유 사이의 마찰 특성을 파악하기 위하여, 먼저 진동대 위에 토목섬유를 고정시키고, 하부에 토목섬유가 부착된 상자를 진동대 위에 설치하였다. 상자 내에 하중판(plate)

을 삽입하는 방법으로 다양한 연직 하중을 가하였으며, 동시에 진동수(2, 5, 10Hz)도 변화시키면서 실험을 실시하였다. 상부 상자와 진동대 테이블의 가속도를 측정하기 위해 가속도계를 각각 설치하였으며, 진동대에 LVDT를 부착시켜 상자와 진동대 사이의 상대적인 변위를 측정하였다. 진동대의 크기는 1,000×1,000(mm)였으며, 상자의 단면은 토목섬유 접촉면의 대형 직접 전단시험에 대한 규정인 ASTM D 5321의 규격을 참고로 하여 300×300(mm)로 제작하였다. 또한 접촉면이 수침되는 상태를 모사하기 위해, 하부판의 경계에 일정 높이를 갖는 벽을 추가한 별도의 판(plate or water pond)을 제작하여, 건조상태와 함께 수침상태에서도 시험을 실시하였다. 실시된 실험 항목은 표 3에 정리하였다. 앞서 언급한 바와 같이 세가지 유형의 경계면(interface)에 대하여 실험을 실시하였으며, 연직응력과 진동수도 표 3에서와 같이 세가지 크기를 적용하였다. 실험시 가속도는 진동대의 최대 진폭을 증가시키는 방법을 적용하여, 최대 0.40g(는 중력가속도)까지 가하였다.

2.3 동적 접촉 마찰각의 선정

진동대 테이블과 상자에 작용하는 동적힘의 개략도는 그림 4와 같다. 테이블이 가속도 a_t 로 움직이고 있을 때, 하부에서 발생한 동적힘은 접촉면을 통해 상자에 작용하게 된다. 이 때, 하부에서 전해진 힘이 토목섬유 사이의 최대 접

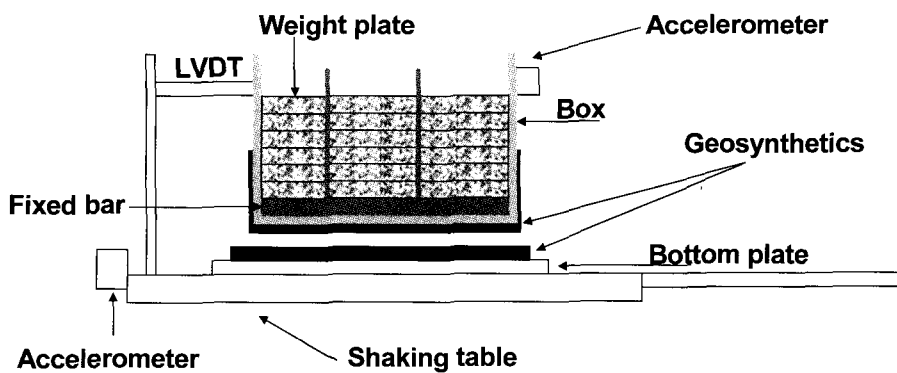


그림 3. 시험 장치 개략도

표 3. 시험 항목

접촉면	설명	연직응력 (kPa)	진동수 (Hz)	가속도 (g)	접촉면 상태
S-GM/GT	표면이 고운 지오멤브레인과 지오텍스타일의 접촉	1.6, 3.6, 6.8	2, 5, 10	0.05~0.40	건조(dry)
S-GM/GCL(NW)	표면이 고운 지오멤브레인과 GCL의 부직포면이 접촉				/
S-GM/GCL(W)	표면이 고운 지오멤브레인과 GCL의 직포면이 접촉				수침(wet)

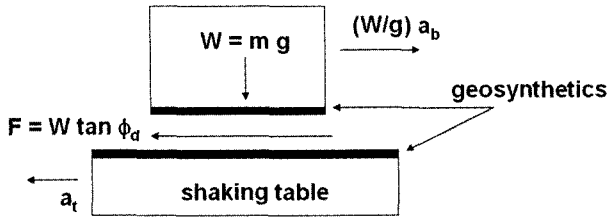


그림 4. 동적 힘(dynamic force)의 개략도

축 전단강도보다 작은 경우에는 초기 힘이 그대로 상부로 전달되지만, 최대 접촉 강도를 초과하는 경우 상부로 전달되는 힘은 감소된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

Mohr-Coulomb의 파괴 메커니즘을 가정하여 접촉면의 마찰력(F)을 표현하면, 아래의 식으로 표현할 수 있다(Yegian과 Lahlaf, 1992).

$$F = W \tan \phi_d \quad (1)$$

여기서, W 는 접촉면에 가해지는 하중(상자+재하판)이며, ϕ_d 는 토목섬유의 동적 접촉 마찰각이다. 그리고, 진동대를 통해 전달되는 힘이 계속적으로 증가하여 접촉면에서 상대적인 변위가 발생하는 순간 상부상자의 관성력, 상자 하중(m)과 가속도(a_b)의 곱으로써 나타낼 수 있다.

$$F = m a_b = (W/g) a_b \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)를 결합하면

$$\tan \phi_d = a_b / g \quad (3)$$

이 되고, 식 (3)를 통해 동적 마찰각(ϕ_d)을 구할 수 있다.

2.4 미끄러짐 크기의 산정

접촉면이 존재하는 구조물에 대한 동적 안정성을 평가

하기 위해서는, 접촉면의 동적 마찰각과 함께 지진시 유발되는 구조물의 변위 양상을 파악하는 것이 중요하다. 지진 혹은 동적하중에 의해 매립지에 설치된 토목섬유 사이의 접촉면에 유발되는 변위는 침출수관이나 배수 시스템 혹은 매립지의 전체적인 안정성에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 동적하중 상태에서 매립지에 사용되는 토목섬유 사이에서 발생하는 변위를 평가하는 것은 의미있는 작업이다. 이를 위해 Yegian과 Harb(1995)는 진동대 실험을 통해 다양한 토목섬유의 경계면에서 발생하는 변위를 다음 식을 이용하여 무차원으로 정규화시켰다.

$$S_n = \frac{S_d}{K_a \cdot T^2} \quad (4)$$

여기서, S_n 은 무차원으로 정규화된 미끄러짐(slip) 크기이며, K_a 는 진동대를 통해 가해진 최대 가속도(m/s^2), S_d 는 측정된 최대 상대 변위(maximum relative slip)의 크기, 그리고 T 는 주기(sec)를 의미한다.

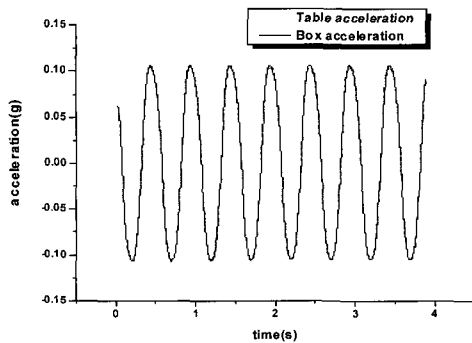
본 연구에서는 진동대와 진동대 상부에 위치하는 상자 사이의 상대 변위를 측정 후, 측정된 변위의 최대 값을 식 (4)를 이용하여 무차원으로 정규화시켜, 가속도와 정규화된 변위(slip)의 관계를 평가하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

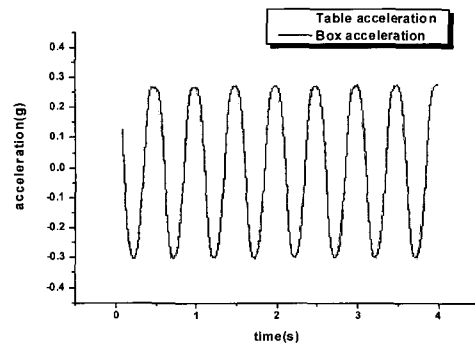
3.1 가속도와 변위 측정

진동대 시험을 통해 측정된 진동대 테이블과 상자의 가속도는 그림 5와 같다. 그림 5는 접촉면이 건조한 상태에서 지오멤브레인(S-GM)과 지오택스타일(GT) 접촉면에 대한 진동대 실험의 결과이다.

그림 5(a)에서 확인할 수 있듯이, 가속도가 상대적으



(a) 상대 변위 발생 이전



(b) 상대 변위 발생 후

그림 5. 진동대와 상자의 가속도 (진동수 2Hz, 연직응력 3.6kPa)

로 작은 단계에서는 상자의 가속도는 테이블의 가속도와 거의 일치하였다. 그러나, 그림 5(b)와 같이 가속도가 상대적으로 클 때, 즉 접촉면에서 상대적인 변위가 발생한 후에는 접촉면을 통해 상부의 상자로 전해지는 가속도가 감소함을 확인할 수 있다. 즉, 가해지는 가속도가 일정 수준을 넘어서면, 상자에 전달되는 최대 가속도는 테이블의 최대 가속도보다 작아지게 된다. 이 지점이 동적 하중에 대한 경계면의 동적 마찰각을 의미하며, 경계면에 이 크기 이상의 가속도가 가해지면 상대변위가 발생하면서 경계면 상부로 전달되는 동적힘이 감소되게 된다.

가속도를 변화시키면서 시험을 실시하여, 가해지는 가속도와 상부 상자에 전해지는 가속도의 관계와 이 때 유발되는 변위를 측정하여 그림 6과 그림 7에 각각 제시하였다. 이 때 가해진 연직응력과 진동수는 각각 3.6kPa, 2Hz였다.

그림 6은 진동대의 가속도에 따른 상자의 가속도를 보여주고 있으며, 그림 7은 진동대 가속도와 이 때 유발되는 상자의 상대변위를 나타내고 있다. 그림 6과 그림 7에서 확인할 수 있듯이, 가속도가 작은 경우에는 상자와 테이블의 가속도는 거의 같은 값을 보이지만, 미끄러짐이 일어난 이후부터는 상자에 전달된 가속도가 테이블

의 가속도보다 작게 측정되었다. 이는 지오멤브레인과 지오텍스타일 사이를 통해 상부로 전달되는 힘은 일정 가속도, 즉 동적 마찰각에 해당하는 가속도를 초과하면 감소된다는 것을 의미한다.

그림 7을 보면 최대 가속도가 0.18g인 점을 전후로 하여 미끄러짐이 일어나기 시작하며, 상자와 테이블 가속도의 관계에서도 0.18g 이후부터 직선이 꺾이게 되므로(그림 6), 이 값을 식 (3)에 대입하면 동적 마찰각을 구할 수 있다. 따라서, 표면이 매끄러운 지오멤브레인(S-GM)과 지오텍스타일(GT) 사이의 동적 접촉 마찰각은, $\tan^{-1} 0.18 = 10.2^\circ$ 이다. 동일한 방법으로 다른 접촉면에서도 동적 접촉 마찰각을 산정하였으며, 각 접촉면에서의 동적 마찰각은 표 4에 정리되어 있다.

3.2 연직응력에 따른 영향

연직응력이 동적 마찰각에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 가해지는 연직응력을 각각 1.6kPa, 3.6kPa, 6.8kPa로 변화시켜가면서 시험을 실시하였다. 각각의 응력은 쓰레기 매립체로 가정했을 때 최대 1m에 (6.8kPa일 때) 해

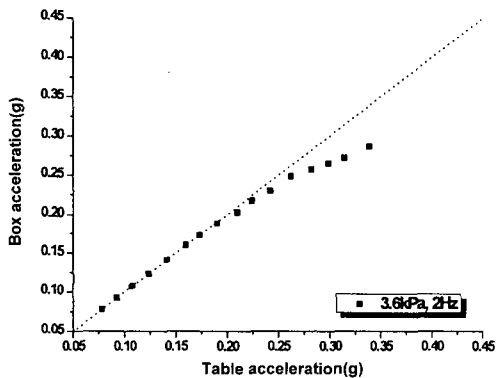


그림 6. 진동대와 상자의 가속도

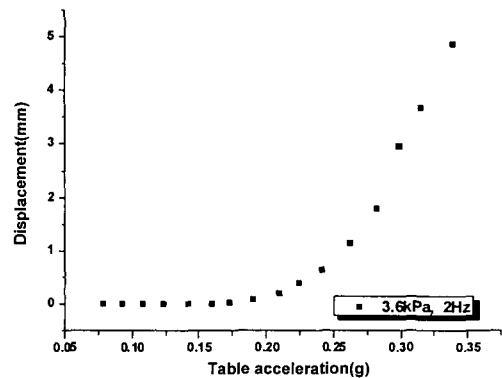
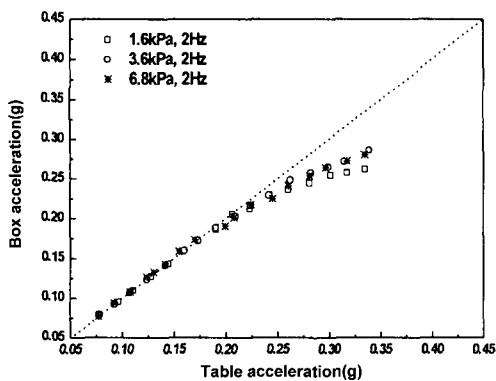
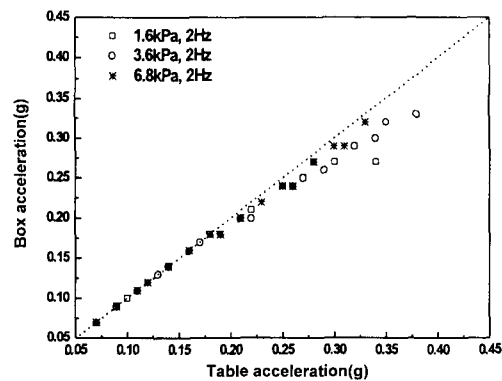


그림 7. 진동대 가속도와 상대 변위



(a) S-GM/GT



(b) S-GM/GCL(NW)

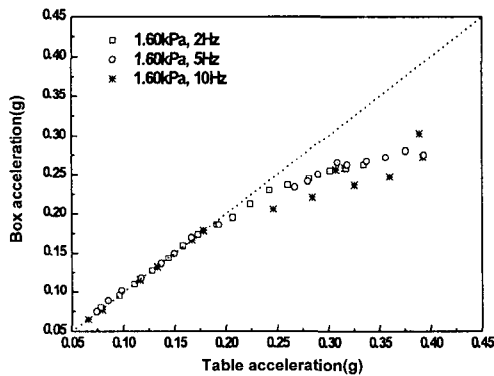
그림 8. 연직응력에 따른 테이블과 상자의 가속도 관계 (진동수, 2Hz)

당하는 크기이며, 실험 결과 중 S-GM/GT과 S-GM/GCL (NW) 접촉면에서의 결과는 그림 8과 같다.

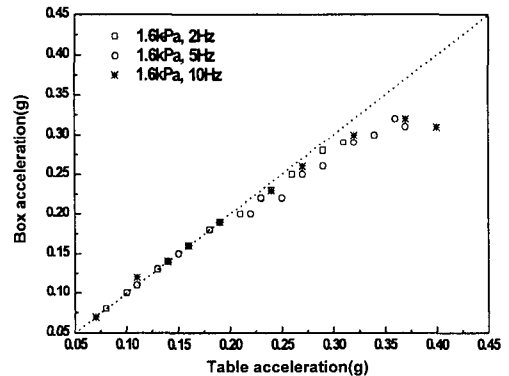
그림 8에서 확인할 수 있듯이 동일한 주파수에서 연직응력의 변화는 동적 접촉 마찰각에 큰 영향을 미치지 않는 것으로, 모든 경계면에서 유사한 결과를 보였다. 이로써 본 연구에 적용된 연직응력의 범위, 즉 1.6kPa에서 6.8kPa의 연직 응력의 범위 내에서는 연직응력이 동적마찰각에 크게 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다. 그러나, 가속도의 감소율은 동적 마찰각 이상의 가속도 범위에서 연직응력이 증가할수록 약간 작아지는 경향을 확인할 수 있었다. 향후 이에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

3.3 주파수에 따른 영향

동일한 연직응력 아래에서 주파수를 2Hz, 5Hz, 10Hz로 변화시켜 가면서 진동대 실험을 실시하여, 진동수의 영향을 살펴보았다. 그림 9는 연직응력이 1.6kPa일 때 가속도의 변화에 따른 동적 마찰특성을 보여주고 있다.

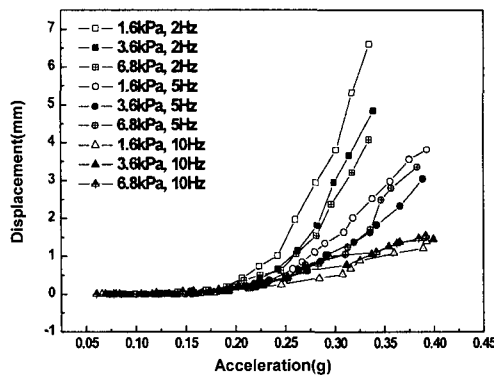


(a) S-GM/GT

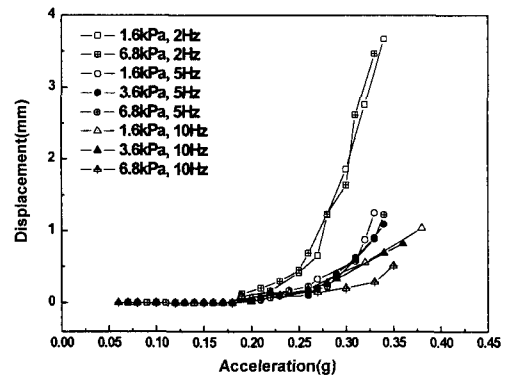


(b) S-GM/GCL(W)

그림 9. 가속도에 따른 테이블과 상자의 가속도 관계 (연직응력, 1.6kPa)



(a) S-GM/GT



(b) S-GM/GCL(NW)

그림 10. 가속도와 변위와의 관계

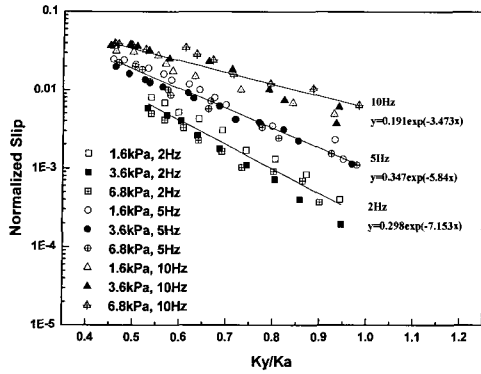
그림 9에서 알 수 있듯이 대부분의 동적 접촉 마찰각은 주파수의 변화에 큰 영향을 받지 않았다. 이러한 경향은 모든 경계면에서 동일하게 나타났으며, 실험 결과를 통해 2Hz에서 10Hz의 진동수 범위에서 동적 마찰특성은 진동수에 크게 영향을 받지 않음을 확인할 수 있었다. 단, 진동수가 증가할수록 가속도의 감소율이 약간 증가하는 경향을 확인하였다.

3.4 가속도와 변위와의 관계

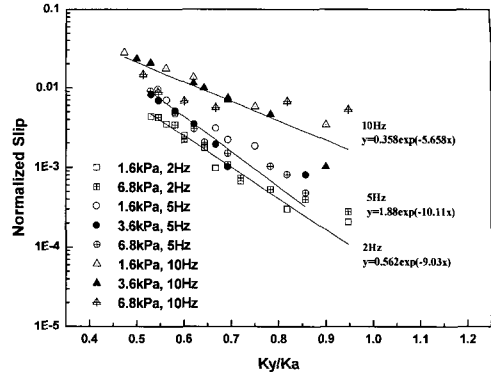
LVDT를 이용해서 측정한 최대 상대 변위와 테이블 가속도의 관계는 그림 10과 같다.

그림 10을 살펴보면 가속도의 크기가 작은 범위에서는 상대변위가 발생하지 않지만, 일단 미끄러짐이 유발되기 시작하면 가속도가 증가함에 따라 최대 미끄러짐의 크기는 지수적으로 증가하였다. 또한, 미끄러짐의 정도는 연직 응력보다 진동수에 크게 영향을 받아, 상대적인 미끄러짐은 진동수가 작을수록 커지는 경향을 보였다.

그림 10에 제시된 가속도와 변위의 관계는 각각 가속



(a) S-GM/GT



(b) S-GM/GCL(NW)

그림 11. K_y/K_a 와 Normalized slip과의 관계

도는 K_y/K_a 으로, 최대 상대 변위는 식 (4)을 이용하여 무차원(S_n)으로 정규화시켰다. 여기서, K_a 는 가해지는 가속도를, K_y 는 상대 변위가 시작되는, 즉 동적 마찰각에 해당되는 가속도를 의미한다. 그림 11은 가속도와 변위를 무차원으로 정규화시킨 곡선과 그 식을 보여주고 있다.

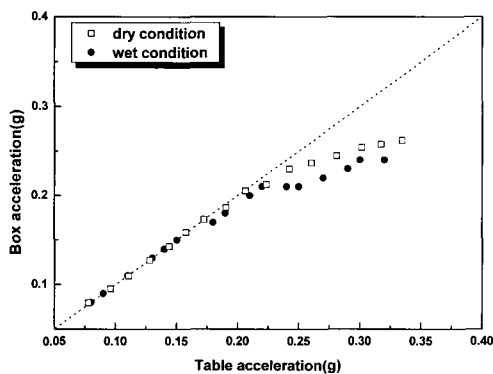
그림 11을 보면 정규화된 가속도-최대 변위 관계는 진동수에 따라 각각 다르게 식이 구성됨을 확인할 수 있다. 그림 11에 제시된 식을 활용하면, 임의의 접촉면에 가속도와 주기를 아는 동적 하중에 가해지는 경우, 접촉면에 유발될 수 있는 최대 상대 변위를 예측할 수 있다. 비록 본 연구에서는 진동수에 따라 각기 다른 식이 유도되었지만, 실제 설계시에는 동적 하중의 진동수를 정확하게 예상하여 설계를 실시하는 것은 쉽지 않다. 따라서 진동수에 관계없이 간편하게 대략의 거동을 미리 예측할 수 있도록, 본 연구에서 얻어진 값들을 평균하여 하나의 간편식을 제안하였다(표 4).

3.5 수침에 따른 영향

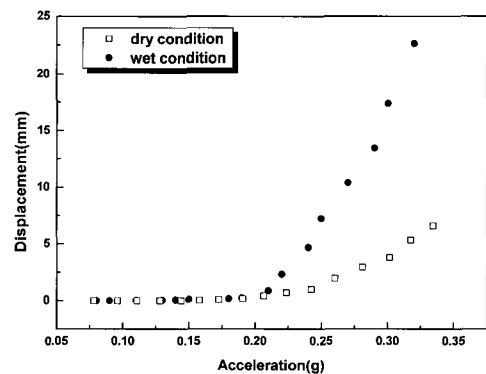
접촉면을 수침 상태로 유지시킬 수 있도록 판을 제작하여, 수침 상태에서의 동적 마찰 특성을 평가한 후, 건조상태의 결과와 비교하였다. 그림 12는 S-GM과 GT의 접촉면에 대하여 건조한 상태와 수침 상태에서의 동적 마찰 특성과 최대 변위를 비교하여 보여주고 있다.

그림 12(a)에서 보듯이 미끄러짐이 일어나기 시작한 시점, 즉 yielding 가속도(K_y)는 수침 상태에서 더 작게 측정되었는데, 이는 S-GM과 GT의 접촉면에 존재하는 물이 접촉면의 마찰을 감소시키는 역할을 했음을 의미한다. 수침 상태에서 발생하는 변위는 그림 12(b)에서 볼 수 있듯이 건조상태에 비해 훨씬 크게 측정되었는데, 이 역시 접촉면에 존재하는 물이 마찰력을 감소시킴으로써 나타나는 결과라고 할 수 있다.

그림 12의 결과들을 통해 건조/수침 상태는 접촉면의 동적 접촉 마찰각과 상대 변위에 영향을 미친다고 할 수 있으며, S-GM/GT 접촉면에서 효과를 뚜렷하게 확



(a) 진동대와 상자의 가속도



(b) 가속도와 변위와의 관계

그림 12. 건조한 상태와 수침 상태에서의 결과 비교 (S-GM/GT)

인할 수 있었다. 나머지 경우, 즉 S-GM/GCL(NW)과 S-GM/GCL(W)에서도 유사한 경향을 발견할 수 있었으며, 그 변화 정도는 표 4에 제시하였다.

4. 결과의 정리 및 적용

본 연구에서 실시한 모든 접촉면에 대하여, 건조/수침 상태에서의 동적 마찰각과 각 진동수별로 정규화된 slip equation을 정리하여 표 4에 제시하였다. 앞서 언급한 바와 같이 동적 마찰각은 상대변위가 발생하기 시작하는 가속도를 기준으로 하여 산정하였으며, 이 값은 가속도의 감소없이 접촉면을 통과할 수 있는 최대 가속도를 의미한다. 정규화된 slip 방정식은 우선 각 진동수별로 구분하여 방정식을 구성하는 계수를 산정한 후, 이들 값을 평균하여 간편하게 이용할 수 있는 식을 제시하였다.

Yegian과 Lahlaf(1992)는 진동대 실험을 통해 구한 동적 접착 마찰각과 직접전단 시험을 통해 측정한 정적 접착 마찰각을 비교하여 거의 차이가 없음을 확인하고, 매립지의 동적 설계시 정적 접착 마찰각을 사용하여도 크게 문제가 되지 않는다고 하였다. 이와 동일하게, 본

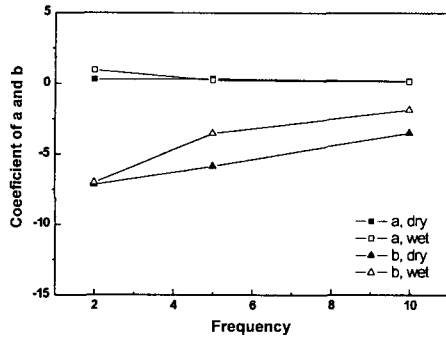
연구에 사용된 토목섬유와 같은 재료를 대상으로 하여 실시한 직접전단 실험결과와 동적 접착 마찰각을 비교해 보았다(서민우 등, 2002a; 서민우 등, 2002b). 비교 결과, 동적 접착 마찰각이 약 1° 정도 크게 측정되었다. 그러나, 이러한 차이는 그다지 큰 값이 아니기 때문에, 본 연구에서도 표면이 매끄러운 지오멤브레인(S-GM, smooth geomembrane)이 포함되는 접촉면의 마찰각은 정적, 동적 하중 상태에서 동일하다고 판단하였다.

또한 수침 상태에서의 동적 접착 마찰각은 건조상태보다 1~2° 가량 작게 나타났는데, 이는 접촉면이 수침 상태이면 더 낮은 가속도에서 미끄러짐이 시작된다는 것을 의미한다. 미끄러짐의 크기 역시 수침 상태에서 건조한 상태보다 더 크게 나타났으며, 이는 매립지에 존재하는 토목섬유의 접촉면이 수침 상태일 때, 동적하중에 매우 취약할 수 있음을 보여주는 증거라고 할 수 있다.

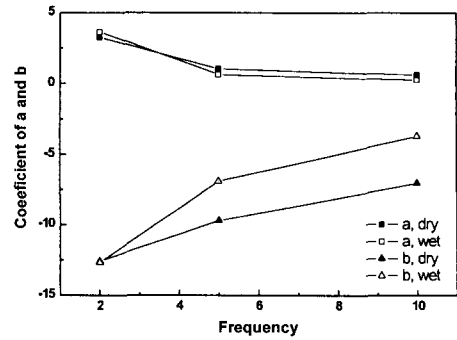
표 4에 제시된 동적 마찰각과 정규화된 slip equation은 해당 접촉면이 존재하는 매립지 혹은 기타 구조물의 내진 설계시 참고자료로 활용될 수 있으며, 특히 slip equation은 임의의 가속도와 주기를 가진 지진 혹은 동적하중에 의한 최대 변위의 예측시 활용될 수 있

표 4. 토목섬유 경계면의 Slip Equation

Interface	Dynamic friction angle (Ky, friction angle)	Normalized slip equation (y : normalized slip, x : Ky/Ka)			
		f(Hz)	a	b	
Dry condition		$y = a \exp(bx)$			
				average equation	
S-GM / GT	0.18g (10.2°)	2	0.30	-7.15	$y = 0.28\exp(-5.49x)$
		5	0.35	-5.84	
		10	0.19	-3.47	
S-GM / GCL(NW)	0.18g (10.2°)	2	0.56	-9.03	$y = 0.93\exp(-8.27x)$
		5	1.88	-10.11	
		10	0.36	-5.66	
S-GM / GCL(W)	0.19g (10.8°)	2	3.25	-12.59	$y = 1.64\exp(-9.77x)$
		5	1.03	-9.71	
		10	0.63	-7.04	
Wet condition		$y = a \exp(bx)$			
				average equation	
S-GM / GT	0.16g (9.1°)	2	0.94	-7.01	$y = 0.43\exp(-4.14x)$
		5	0.24	-3.52	
		10	0.14	-1.88	
S-GM / GCL(NW)	0.14g (8.0°)	2	5.09	-16.16	$y = 2.82\exp(-12.10x)$
		5	0.54	-8.03	
		10	-	-	
S-GM / GCL(W)	0.16g (9.1°)	2	3.62	-12.70	$y = 1.50\exp(-7.56x)$
		5	0.65	-6.90	
		10	0.24	-3.08	



(a) S-GM/GT



(b) S-GM/GCL(A)

그림 13. 주파수에 따른 계수값의 변화

을 것이다.

그러나, 표 4에 제시된 식은 동적 하중 혹은 가속도의 진동수가 정확하게 2, 5, 10Hz일 때만 적용할 수 있다는 단점이 있다. 따라서, 2Hz와 10Hz 사이의 모든 경우에 적용 가능하도록 진동수와 식의 계수, 즉 a와 b의 관계를 알아보았다. 여기서, 계수 a 값은 그림 11에서 y 절편을 의미하며, 계수 b는 K_y/K_a 와 정규화된 slip 곡선의 감소 정도, 즉 기울기를 나타낸다. 진동수와 각 계수의 관계를 통해, 계수 a는 진동수에 상관없이 일정함을, 계수 b는 진동수가 커짐에 따라 증가함을 확인하였다(그림 13). 이 관계를 이용하여 2Hz에서 10Hz 사이의 진동수에 대하여 적절한 a와 b 값을 구할 수 있으며, 그 계수를 이용하여 예상되는 최대 변위를 예측할 수 있다.

그러나 이러한 방법 역시 예상되는 동적 하중의 진동수를 정확하게 예측하기 어렵다는 한계가 있기 때문에, 이러한 단점을 보완하기 위하여 각 계수를 평균하여 간편하게 이용할 수 있는 간편식을 제시하였다(표 4). 이 식을 이용하면 진동수를 정확하게 예상할 수 없는 상황에서 가해지는 동적하중으로 인해 발생하리라 예상되는 변위를 비교적 합리적으로 예측하는 것이 가능하다.

5. 결론

매립지의 동적 안정성에 중요한 역할을 하는 토목섬유 경계면에서의 동적 마찰특성, 즉 동적 마찰각, 동적 하중으로 인한 변위 유발, 경계면의 존재로 인한 상부로 전달되는 동적 하중의 감소에 대하여 고찰하기 위하여, 진동대 시험을 통해 토목섬유 사이의 접촉면에 대한 동적 접촉 마찰 특성을 평가하였다. 세 종류의 토목섬유, 즉 표면이 고운 지오멤브레인, 부직포 지오택스타일, 니들펀칭 GCL이 이용되었으며, 주파수와 연직 응력을 변

화시켜 이들의 영향을 살펴보았다. 또한 접촉면에 건조 및 수침 상태를 구현하여, 각 상태에 따른 동적 특성의 변화를 고찰하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 진동대 시험 결과, 낮은 가속도 범위에서는 진동대 테이블과 상자가 일체로 움직이지만, 어느 가속도를 지나면 상자의 최대 가속도는 테이블의 최대 가속도보다 작아지게 된다. 이 지점에서 상자의 미끄러짐이 발생하기 시작하며, 이 지점 이후로는 토목섬유 사이를 통해 상부로 전달되는 힘은 감소된다. 이 지점에서의 가속도를 이용하여 토목섬유 사이의 동적 접촉 마찰각을 산정하였다.
- (2) 본 연구에 적용된 범위에서는, 즉 연직 응력(1.6kPa~6.8kPa)과 주파수(2Hz~10Hz)는 모든 경계면에서의 동적 접촉 마찰특성에 크게 영향을 미치지 않음을 확인하였다.
- (3) 가속도의 크기가 작은 경우에는 미끄러짐이 거의 일어나지 않지만, 일단 미끄러짐이 발생하면 최대 미끄러짐의 크기는 테이블 가속도가 증가함에 따라 지수적으로 증가하였다. 이 때 발생하는 미끄러짐의 크기는 주파수가 낮을수록 크게 측정되었다.
- (4) 접촉면이 수침상태일 때, 건조한 상태보다 더 작은 가속도에서 미끄러짐이 시작되었으며, 미끄러짐 정도 역시 접촉면이 건조한 상태보다 더 크게 측정되었다. 이는 접촉면이 수침상태가 되면, 토목섬유가 포함되는 구조물은 동적 하중에 더 취약할 수 있음을 의미한다.
- (5) 측정된 동적 마찰각을 통해, 가해지는 동적 하중이 감소없이 전달되는 가속도의 크기를 미리 예상할 수 있다. 또한 정규화된 가속도와 변위의 관계식을 이

용하면, 임의의 주기와 가속도를 가지는 동적하중에 대한 각 접촉면에서 미끄러짐, 즉 최대 상대 변위를 예측할 수 있다. 이러한 동적 마찰각과 예측식은 동적하중이 토목섬유가 포함된 구조물에 미칠 수 있는 피해를 대비하는데 도움이 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 박인준 (2001), "국내 폐기물 매립시설의 내진설계 준비", 제3회 전문가 초청 세미나 - 21세기 지속 가능한 매립기술, 매립기술 연구회, pp.75-108.
2. 서민우, 김동진, 박준범, 박인준 (2002a), "토목섬유 점토 차수재 (GCL)와 지오멤브레인(GM)의 접촉 전단강도 평가", 한국지반 공학회논문집, 제18권, 제4호, pp.137-146.
3. 서민우, 박준범, 김운영 (2002b), "지오멤브레인/지오텍스타일의 접촉 전단강도 평가", 한국지반공학회논문집, 제18권, 제1호, pp. 79-89.
4. ASTM D 5321 (1998), "Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method", ASTM, Philadelphia, Pennsylvania.
5. Bray, J.D., Rathje, E.M., Augello A.J., and Merry. S.M. (1998), "Simplified seismic design procedure for geosynthetic-lined, solid-waste landfills", *Geosynthetics International*, Vol.5, pp.203-235.
6. Castelli, F., Cavallaro, A., and Maugeri, M. (2001), "Laboratory tests for estimation of static and dynamic interface characteristics of geosynthetic", *Proc. of Sardinia 8th International Waste Management and Landfill Symposium*, pp.157-166.
7. Hushmand, B., and Martin, G.R. (1990), *Final report SBIR phase I study, layered soil-synthetic liner base isolation system*, Report submitted to the National Science Foundation Small Business Innovative Research Program, The Earth Technology Corporation, Long Beach, California
8. Kavazanjian, E., Hushmand, B., and Martin, G. R. (1994), Discussion to "Dynamic interface shear strength properties of geomembranes and geotextiles" by M. K. Yegian and A. M. Lahlaf, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.120, No.2, pp.462-465
9. Kavazanjian, E., Hushmand, B., and Martin, G.R. (1991), "Friction base isolation using a layered soil-synthetic lining system", *Proc. of the Third U.S. Conference on lifeline Earthquake Engineering*, ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Monograph, No.4, Los Angeles, California, USA, August 1991, pp.1139-1151.
10. Koerner, R.M. (1998), *Design with geosynthetics*, 4th edition, Prentice Hall, p.551.
11. Koutsourais, M.M., Sprague, C.J., and Pucetas, R.C. (1991), "Interfacial friction study of cap and liner components for landfill design", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.10, No.6, pp.149-166.
12. Kramer, S.L., and Smith, M.W. (1997), "Modified newmark model for seismic displacements of compliant slopes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.123, No.7, pp.635-644.
13. Martin, J.P., Koerner, R.M., and Whitty, J.E. (1984), "Experimental friction evaluation of slippage between geomembranes, geotextiles, and soils", *International Conference on Geomembranes*, pp.191-196.
14. Matasovic, N., Kavazanjian, E., and Giroud, J.P. (1998), "Newmark seismic deformation analysis for geosynthetic covers", *Geosynthetics International*, Vol.5, pp.237-264.
15. Yegian, M.K., and Harb, J.N. (1995), "Slip displacement of geosynthetic systems under dynamic excitation", *Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills*, Geotechnical Special Publication No.54, pp.212-236.
16. Yegian, M.K., and Lahlaf, A.M. (1992), "Dynamic interface shear strength properties of geomembranes and geotextiles", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.118, No.5, pp.760-778.
17. Yegian, M.K., Harb, J.N., and Kadakal, U. (1998), "Dynamic response analysis procedure for landfills with geosynthetic liners", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.124, No.10, pp.1027-1033.
18. Zimmie, T.F., De, A., and Mahmud, M.B. (1994), "Centrifuge modeling to study dynamic friction at geosynthetic interfaces", *Proc. of the Fifth International Conference on Geotextiles and Related Products*, Vol.1, Singapore, pp.415-418.

(접수일자 2003. 4. 29, 심사완료일 2003. 7. 28)