

# 개별요소법을 사용한 매립지 사면 차수 시스템의 안정성 평가

## Evaluation of Stability of Lining Systems of Landfill Using Discrete Element Method

박 현 일\*<sup>1</sup> Park, Hyun-II  
이 승 래\*<sup>2</sup> Lee, Seung-Rae  
정 구 영\*<sup>3</sup> Chung, Koo-Young

### Abstract

In this paper, the discrete element method was applied to evaluate the stability of composite cover and lining system of landfill. This method is capable of estimating the distribution of tensile force and shear stress mobilized in each liner component and its interfaces, based on a relationship of force and displacement. It was assumed that the cover soil and geomembrane were comprised of slices connected with elastoplastic Winkler springs and tensile spring respectively. Parametric study using this method was performed and compared with other techniques based on limit equilibrium method for the example analysis.

### 요 지

본 논문에서는 매립지의 복합 차수 및 덮개 시스템의 안정성 평가를 위하여 개별요소법이 적용되었다. 이 방법은 차수재들의 접촉면에서 유발되는 전단응력과 차수재에 발생하는 인장력을 예측할 수 있어 각각의 차수재에 대한 전단 및 인장파괴에 대한 안전율을 산정할 수 있다. 해석에서 덮개나 차수재료로 사용된 흙의 경우 절편으로 나눈 다음 각 측면들에 탄소성 Winkler 스프링으로 연결되는 것으로 가정하였으며, 지오멤브레인과 같은 차수재들의 경우 절편으로 나뉘어져 인장스프링으로 연결되었다고 가정하여 거동을 모델링하였다. 제안된 방법을 사용한 사례연구와 함께 예제해석에 대한 한계평형법에 근거한 기존 해석방법들과 비교를 통하여 제안된 방법의 적용성을 검토하였다.

**Keywords :** Discrete element method, Liner, Stability, Lining system

### 1. 서 론

최근에 그림 1에 나타난 바와 같은 복합 차수 및 덮개 시스템이 매립지에 적용되기 시작한 것으로 알려져 있다. 그러나 많은 경우에 차수 및 덮개 시스템에 대한 안정성 측면에서의 문제점이 대두되고 있으며, 다음과 같은 두 가지 형태로 살펴볼 수 있다(Mitchell et al., 1990). 첫째, 그림 1에 나타난 바와 같이 차수재들 간에

발생하는 미끄러짐에 의한 파괴를 들 수 있다. 둘째, 매립지 사면에 사용되는 차수재료 혹은 덮개재료로 사용되는 흙이 자중에 의하여 하부접촉면에 전단력을 유발시키며, 결과적으로 차수재에 인장력을 유발시키게 된다. 차수재로서 설치된 토목섬유가 장기적인 역할을 감당하기 위해서는 인장파괴에 대한 검토가 필요하다고 할 수 있다.

이러한 매립지 차수 및 덮개 시스템의 안정성을 평

\*1 정희원, 연수연구원, 한국과학기술원, 건설 및 환경공학과 (Member, Post-Doc, KAIST, Civil & Envir. Engrg., gomdori7@empal.com)

\*2 정희원, 한국과학기술원, 건설 및 환경공학과, 정교수 (Member, Prof., KAIST, Civil & Engrg.)

\*3 정희원, (주)삼성물산 건설부문 플랜트 사업본부, 부장 (Member, SamSung Corp., Plant Engrg., Team Jeneral Manager)

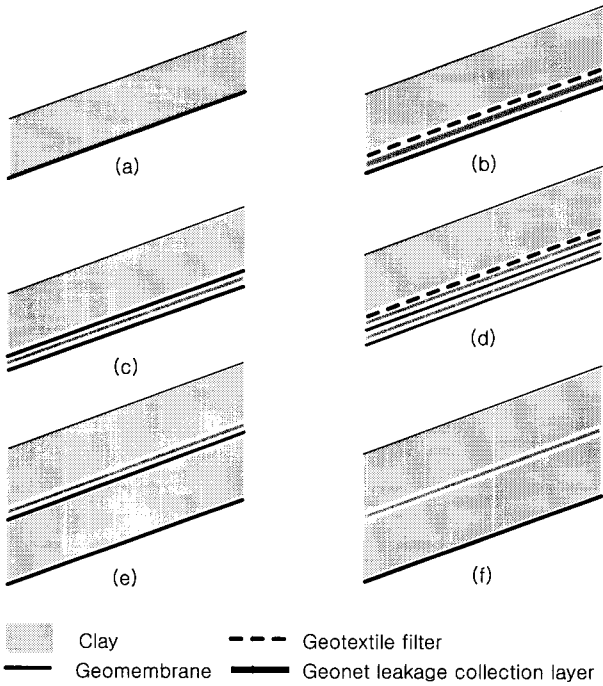


그림 1. 다양한 차수 시스템의 형태 : (a) soil liner and single composite liner; (b) single composite liner with geonet leachate collection layer and a geotextile filter; (c) double liner with a leakage collection layer; (d) double liner with a geonet leakage collection layer, geonet leachate collection layer, and geotextile filter; (e) double composite liner with a geonet leakage collection layer; (f) double clay liner with a geonet leakage collection layer

가하기 위하여 사면안정해석에 주로 사용되어온 한계 평형법(Giroud와 Beech, 1989; Koerner와 Hwu, 1991; Bourdeau 등, 1993; Landrum 등, 2000)과 유한요소법(Wilson-fahmy와 Koerner, 1993; Gilbert 등, 1993)이 적용되어 왔다. 한계평형법에서는 차수재들의 접촉면 가운데 전단강도가 취약하다고 판단되는 단면을 선정하여, 차수재간의 접촉면에서 한계평형 상태의 힘평형 관계를 고려함으로써 차수재에 유발되는 전단력과 인장력을 산정하게 된다. 따라서 접촉면에서의 힘과 변위의 상관관계(compatibility)를 고려되지 않으며, 또한 차수재 접촉면에서의 전단강도는 그 면에 작용하는 수직응력 값에 의존하는데 전단강도가 가장 작은 차수재 접촉면의 선정에 있어서 오류를 범할 수 있다. 유한 요소법의 경우 안정성 해석을 위해 재료에 대한 정확한 구성모델이 필요하며, 동시에 모델 변수 값들에 대한 정교한 적용이 요구된다. 이로 말미암아 해석의 복잡성을 유발하게 되며 또한 결과에 대한 불확실성을 증가시키게 된다.

현재 실제 쓰레기 매립지에 적용되는 쓰레기 매립지 사면시스템은 그림 1에서 나타난 바와 같이 매우 복잡

한 다층 라이닝 시스템으로 구성되어 있다. 그러나 이제 까지 수행되어온 연구결과들을 살펴보면, 쓰레기 매립지 덮개 및 차수 시스템의 안정성 평가를 위하여 여러 연구자들이 한계평형법에 근거한 해석기법들을 사용하여 그림 1(a)와 같은 덮개 흙이 포설된 단층 차수 시스템에 대하여 적용하였다(Giroud와 Beech, 1989; Koerner와 Hwu, 1991; Landrum 등, 2000; Littlemore와 Rogers, 1997; Bourdeau 등, 1993).

본 연구에서는 차수재들 간의 접촉면에서의 응력-변형을 관계를 고려함으로써, 실제 쓰레기 매립지 다층 라이닝 사면 시스템에서의 안정성 평가를 위한 간편한 해석 방법을 제안하고자 하였다. 이를 위한 첫 단계로서 개발된 해석 방법을 검증하기 위해서 기존 연구들에서 적용되었던 그림 1(a)의 덮개 흙이 포설된 차수 사면 단면에 대하여 해석을 수행함으로써 기존 해석 방법들에 의한 결과들과 비교 및 검토하였다. 제안된 해석 방법에서는 개별요소법(Cundall 1971)을 사용하여 사면차수 및 덮개 시스템의 힘평형 뿐만 아니라 변위의 적합성을 동시에 고려할 수 있도록 하였다. 따라서 각각의 차수재들의 각각의 접촉면에 대한 전단응력 및 전단강도의 분포를 구할 수 있을 뿐만 아니라 차수재들의 인장력 분포를 구할 수 있어, 이에 대한 각각의 안전율 또한 평가할 수 있다. 본 연구에 적용된 해석기법은 일반사면의 안정성 평가를 위해 개별요소법을 적용한 Chang(1992)의 연구를 확장 적용하였다.

## 2. 해석방법

### 2.1 개별요소법에 의한 라이닝 시스템의 모델링

차수재 위에 덮개 흙이 설치되어 있는 차수시스템이 그림 1(a)에 나타나 있으며, 차수시스템은 그림 2에 나타난 바와 같이 절편으로 나뉘어져 있다. 예상 파괴면은 경사면의 하부에서 평행한 것으로 가정되었다. 제안된 방법에서는 절편 요소들간의 힘과 변위의 관계를 고려하기 위하여 각각의 절편 요소들은 인접요소들과 Winkler 스프링으로 연결되도록 하였다. 각 절편 요소의 측면을 연결하는 스프링은 압축거동에 대한 수직스프링과 미끄러짐에 의한 전단거동을 모사하는 전단스프링으로 구성되어 있으며, 인장 스프링은 차수재의 인장거동을 모사하기 위해 사용되었다(그림 3).

각 절편 간의 거동은 스프링으로 표현되며, 각 스프링

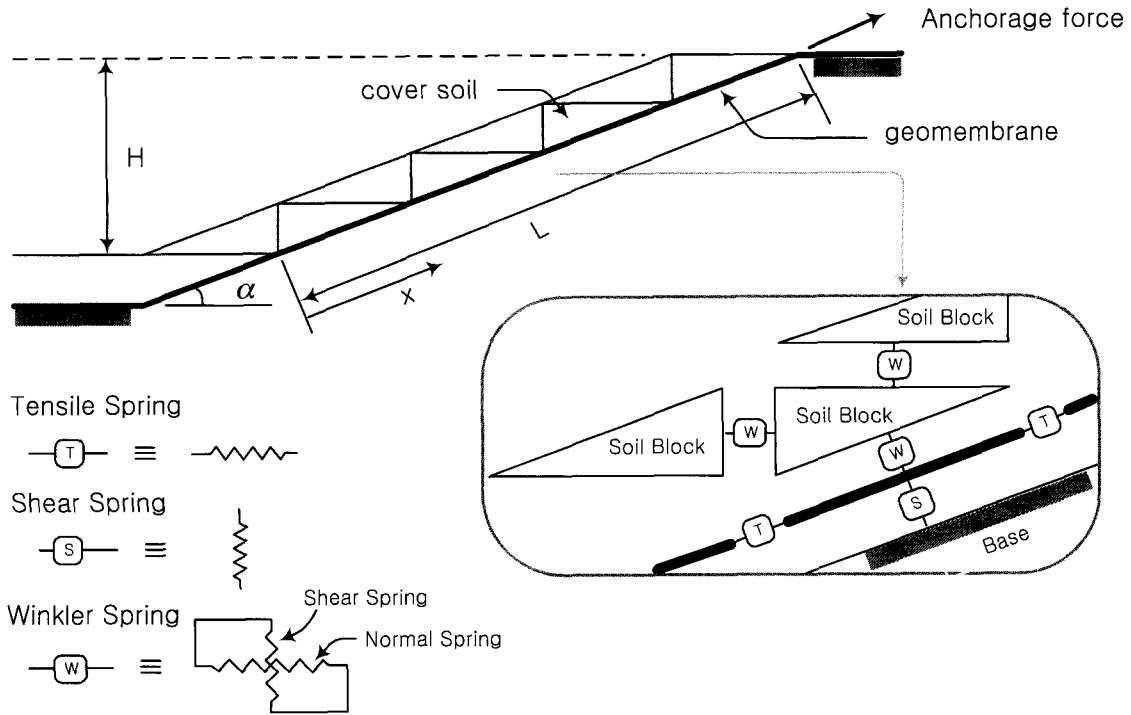
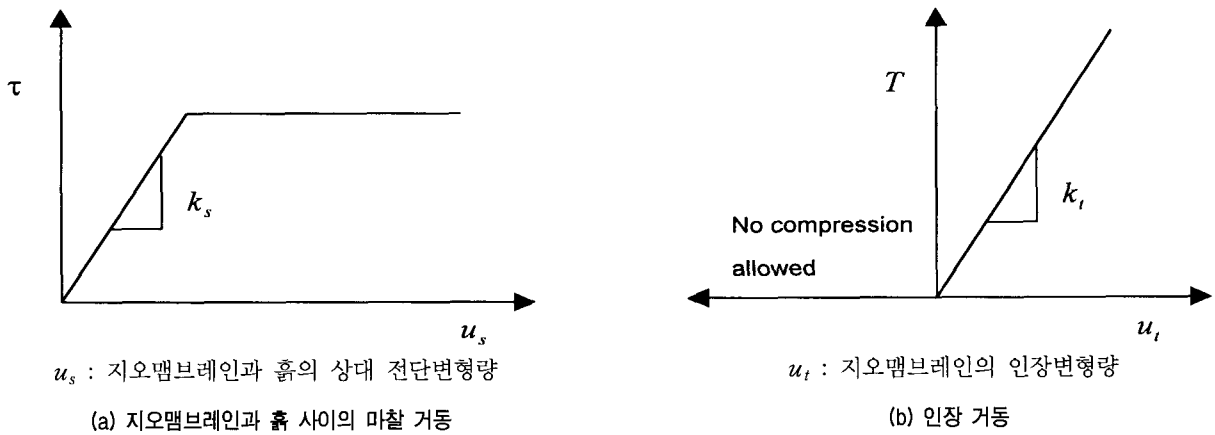


그림 2. Winkler 스프링에 근거한 매립지 차수 사면에 대한 개별 요소 모델링



$u_s$  : 지오멤브레인과 흙의 상대 전단변형량

(a) 지오멤브레인과 흙 사이의 마찰 거동

$u_t$  : 지오멤브레인의 인장변형량

(b) 인장 거동

그림 3. 지오멤브레인 거동에 대한 가정

은 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 따르는 탄소성 거동을 따르는 것으로 모델링하였다. 여기서, 수직스프링의 경우 압축에 의하여 파괴되지 않으며, 지반 절편간에서는 인장은 허용되지 않는다. 전단강도의 경우에는 최대전단강도(식 (1))를 유발시키는 변위이상의 변위에 대하여는 지반의 조건에 따라 감소된 잔류전단강도를 가질 수 있도록 모델링하였다.

$$\tau_p = c_p + \sigma_n \tan \phi_p \quad (1)$$

$$\tau_r = c_r + \sigma_n \tan \phi_r \quad (2)$$

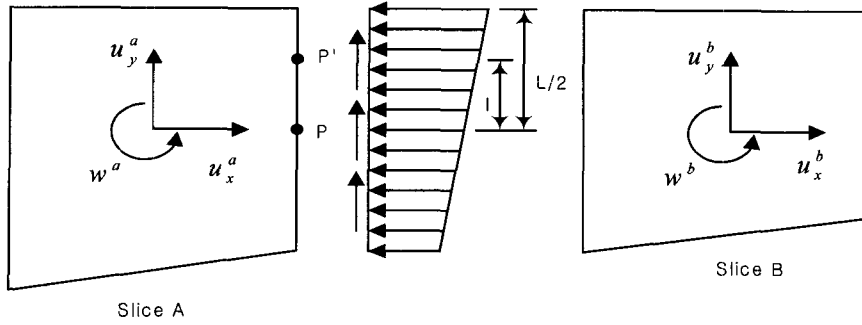
여기서,  $c_p$ 와  $\phi_p$ 는 최대강도 정수이며,  $c_r$ 와  $\phi_r$ 은 잔

류강도 정수이다.

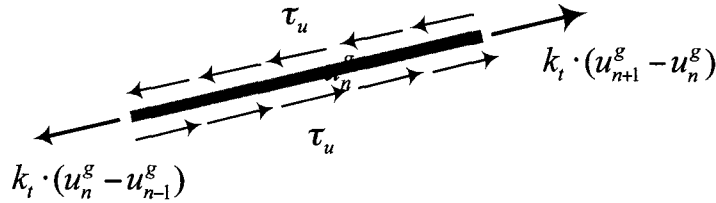
제안된 방법의 수식전개는 Chang (1992)의 연구와 유사한 과정을 따른다. 그림 4(a)에 나타난 두 절편 사이의 중점 P에서의 상대변위는 식 (3)처럼 절편 A와 절편 B의 질량중심점에서의 변위향으로부터 다음과 같은 행렬형식으로 표현될 수 있다.

$$\Delta u^P = R^{pb} u^b - R^{pa} u^a \quad (3)$$

여기서,  $R^p$ 는 절편 질량중심에서의 변위  $u$ 를 측면 중심점 P의 변위로 변환시켜 주는 행렬이다. 그리고 변위벡터  $u = (u_x, u_y, w)^T$ 는 절편 중심에서의 X, Y방향 변위



(a) 흙 절편요소 사이에서 작용하는 전단 및 수직응력



(b) 지오멤브레인 요소에 작용하는 인장 및 전단 응력

그림 4. 개별 요소 모델링

및 회전각을 의미한다. 첨자  $p$ 는 요소절편의 측면번호를 나타낸다.

전체 좌표계( $X$ - $Y$ )에서의 상대변위  $\Delta u^p$ 를 변환행렬  $A$ 를 사용하여 각 절편의 측면에서의 지역좌표계로 바꾸어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \bar{u}^p = A^p \Delta u^p \quad (4)$$

절편의 측면에서 유발되는 수직 및 전단 응력은 수직스프링계수( $k_n$ )와 전단스프링계수( $k_s$ ) 및 상대변위( $\Delta \bar{u}^p$ )의 향으로 표현될 수 있으며, 절편의 측면에 작용하는 힘과 모멘트의 값은 작용하는 응력값들을 적분하므로써 다음과 같은 행렬식으로 구해질 수 있다.

$$\bar{F}_{soil}^p = K_{soil} \Delta \bar{u}^p \quad (5)$$

여기서, 아래첨자  $soil$ 은 흙 요소를 의미한다.

지역좌표계로 나타낸 힘을 전체좌표계로 전환시키면 다음 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$F_{soil}^p = (A^p)^T \bar{F}_{soil}^p \quad (6)$$

그림 4(b)에 나타나 있는 지오멤브레인 절편의 힘평형 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int k_s^u [u_s^{soil} - u(n)^g] dL - \int k_s^l u(n)^g dL + k_t(n) \cdot [u(n)^g - u(n-1)^g] - k_t(n+1) \cdot [u(n+1)^g - u(n)^g] = 0 \quad (7-1)$$

$$F_g^n = K_g \tilde{u}^g = 0 \quad (7-2)$$

여기서,  $k_s^u(n)$ 와  $k_s^l(n)$ 은  $n$ 번째 지오멤브레인 절편의 상부와 하부접촉면의 전단 스프링 계수를 의미한다.  $k_t(n)$ 는 지오멤브레인 절편의 인장 스프링계수이며,  $u^g(n)$ 는  $n$ 번째 지오멤브레인 절편의 변위를 의미한다. 식 (7-2)에서 비음기호( $\sim$ )는 지오멤브레인 절편과 상부 덮개흙 절편의 조합된 좌표계를 의미한다.

지오멤브레인 절편과 덮개흙 절편에 작용하는 힘 평형식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{p=1}^{N^s} f_{soil}^a = \sum_{p=1}^{N^s} \left( \sum_{p=1}^N - (R^{pa})^T F_{soil}^p \right) \quad (8-1)$$

$$\sum_{g=1}^{N^G} f_g^n = \sum_{g=1}^{N^G} K_g \tilde{u}^g = 0 \quad (8-2)$$

여기서,  $N^s$ 는 덮개흙 절편의 갯수이며,  $N$ 은 덮개흙 절편의 측면 갯수이며,  $N^G$ 는 지오멤브레인 절편의 개수를 의미한다.  $f_{soil}^a$ 는 A 절편 질량중심에서의 각 방향 물체력을 의미한다.  $f_g^n$ 는  $N$ 번째 지오멤브레인 절편의 방향물체력을 의미하고, 이 값은 0으로 가정되었다.

## 2.2 개별요소법에 의한 라이닝 시스템의 모델링

흙과 같은 덮개 혹은 차수 재료를 설치하는 경우 일반적으로 다지면서 사면의 하부에서 상부 방향으로 설

표 1. 안전율 계수

	상부 접촉면	하부접촉면	지오멤브레인
F.S.	$FS_u = \frac{\sum \tau_{f,u}^a}{\sum \tau_{a,u}}$	$FS_u = \frac{\sum \tau_{f,l}^a}{\sum \tau_{a,l}}$	$FS_g = \frac{T_{ult}}{T_{max}}$

a = 절편번호,  $\tau_f = \tau_p$  or  $\tau_r$ ,  $T_{max}$  = 지오멤브레인에서 발생하는 최대 인장력값

치하는 시공순서를 따른다. 그림 2에는 수평으로 2개의 흙층이 존재하고 있으며, 각 층의 설치과정을 해석에 고려하기 위하여 자중이 사면 하부에서 상부방향으로 차례대로 작용하는 것으로 고려하였으며, 설치되고 있는 층의 상부 흙 요소들은 해석에 포함되지 않는다. 이와 같이 실제 시공조건을 고려한 시공순서가 해석에 고려되어 있다.

매립지의 차수 시스템에 적용되는 한계평형이론에서는 차수재들의 접촉면들 가운데 가장 작은 전단강도를 갖는 접촉면을 결정하여 그 면에 대한 안전율만을 평가하게 된다. 제안된 방법에서는 각각의 차수재들의 접촉면에서 유발되는 전단응력, 전단강도 및 작용하는 수직응력과 인장력을 함께 계산할 수 있다. 복합차수 시스템에 존재하는 차수재들의 접촉면들에 대한 미끄러짐에 대한 안전율과 함께 차수재들의 인장파괴에 대한 안전율값들이 다음 표 1과 같이 동시에 산정될 수 있다.

### 3. 사례 연구

표 2에 주어진 값들에 근거하여 제안된 방법이 적용된 예제해석이 그림 5~9에서 수행되었다. 그림 5에서는 두가지 매립지 사면경사각에 대하여 지오멤브레인

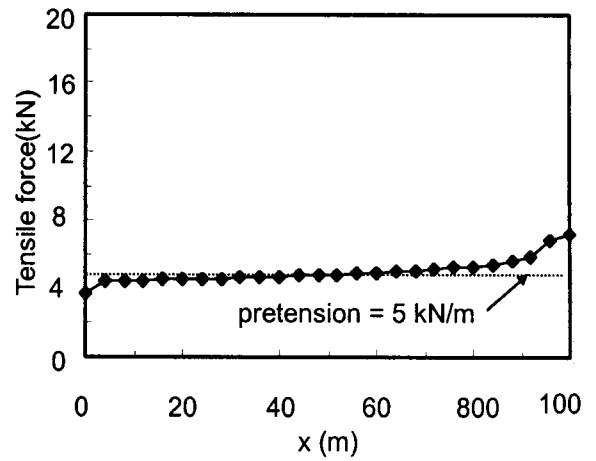
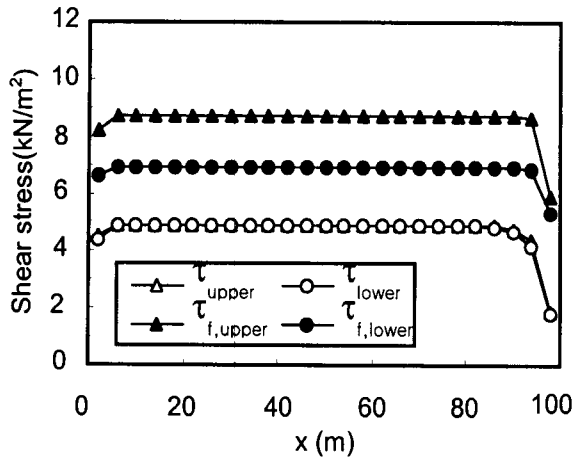
의 상부 및 하부 접촉면에서 유발되는 전단력 뿐만 아니라 전단강도의 값들이 사면의 길이방향으로 구해져 있다. 사면의 상부에 근접함에 따라 유발되는 전단력이 증가하는 양상을 보이고 있다. 완만한 사면경사( $\alpha=18.0^\circ$ )의 경우 구해진 지오멤브레인의 상부 및 하부 접촉면에서의 평균안전율 값은 각각 1.95와 1.51로 구해졌으며, 미끄러짐에 대해서 상당히 안정한 것으로 평가되었다. 구해진 지오멤브레인의 인장력 분포를 살펴보면 사면의 길이방향으로 큰 변화를 보이지 않는다. 반면에 사면경사가 급한 경우( $\alpha=27.5^\circ$ ), 지오멤브레인의 하부 접촉면에서는 유발된 전단응력의 분포가 전체 사면길이에 걸쳐서 대부분 소성상태에 도달되어 있음을 보이고 있다. 또한 인장력의 분포를 살펴보면 사면상부 끝지점에 가까워짐에 따라 구해진 인장력의 값이 급격히 증가하는 양상을 보이고 있다. 이는 라이닝재료의 인장파괴가 상부 끝지점 부근에서 유발될 수 있으며, 또한 지오멤브레인의 하부 접촉면에서의 미끄러짐에 의한 파괴가 일어나기 전에 인장파괴가 먼저 일어날수 있음을 의미한다.

그림 6에서는 차수재 상하부 접촉면에서 전단응력과 차수재의 인장력에 대한 사면 기울기의 영향이 Koerner와 Hwu(1991)의 방법과 무한사면해석방법(Sharma와 Lewis, 1994)에 의한 예측값들과의 비교를 통하여 검토되었다. 이 방법들은 한계평형법에 근거하였으며, 이론적으로 지오멤브레인 하부의 접촉면에서의 안전율값은 산정할 수 없다. 사면의 기울기가  $10^\circ$ 에서  $30^\circ$ 로 증가함에 따라, 상부 및 하부 접촉면에서의 안전율 값은 각각 3.77에서 1.22로 및 2.80에서 1.01으로 감소하였다. 사면 기울기가  $28^\circ$ 에 근접함에 따라 하부접촉면에서의 안전율 값은 1.0에 가까워 지는 양상을 보이고 있다. 이는 하부 접촉면에서의 전단응력 상태가 거의 사면 전체 길이에 걸쳐서 소성상태에 거의 도달했음을 의미한다. 따라서 사면 기울기  $28^\circ$ 에 가까워질 경우 하부접촉면에서의 미끄러짐 파괴에 대한 안정성확보를 위해 보강이 필요하다고 할 수 있다.

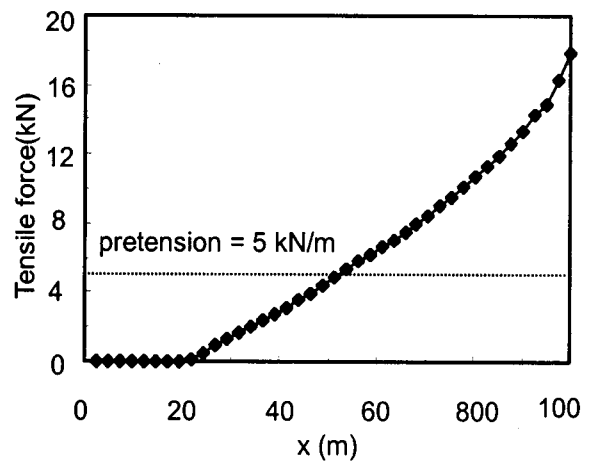
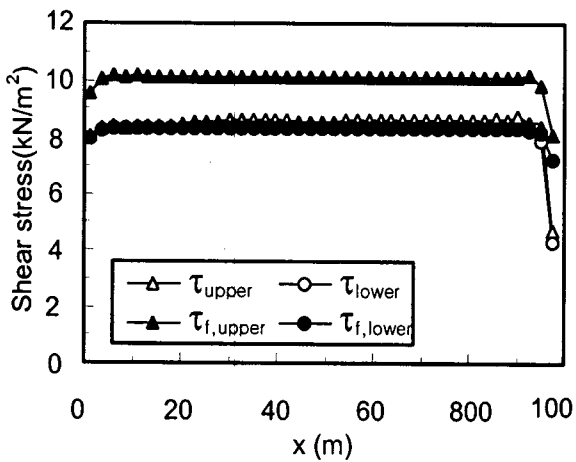
그림 7에서는 사면기울기가  $18^\circ$ 와  $25^\circ$ 인 두가지 경

표 2. 예제해석에 대한 입력물성치값들

변수	값
$\gamma$ , 단위중량 ( $\text{kN/m}^3$ )	19.0
$L$ , 사면길이 (m)	100.0
$H$ , 뒷개흙의 두께 (m)	1.0
$\alpha$ , 사면경사 (deg.)	18.0
$\phi$ , 뒷개흙의 마찰각 (deg.)	32.0
$c$ , 뒷개흙의 점착력 ( $\text{kN/m}^2$ )	5.0
$\delta_U$ , 지오멤브레인의 상부접촉면에서의 마찰각 (deg.)	15.0
$c_U$ , 지오멤브레인의 상부접촉면에서의 점착력 ( $\text{kN/m}^2$ )	2.0
$\delta_L$ , 지오멤브레인의 하부접촉면에서의 마찰각(deg.)	10.0
$c_L$ , 지오멤브레인의 하부접촉면에서의 점착력 ( $\text{kN/m}^2$ )	5.0
$T_o$ , 앵커리지 힘(anchorage force) (kN)	10.0



(a)  $\alpha = 18^\circ$



(b)  $\alpha = 27.5^\circ$

그림 5. 차수재의 접촉면의 전단응력과 인장력

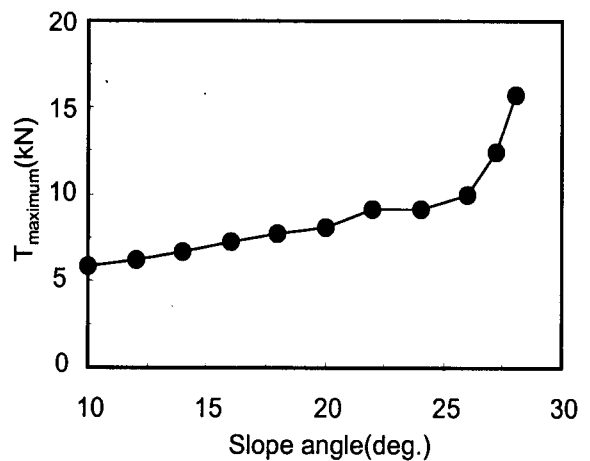
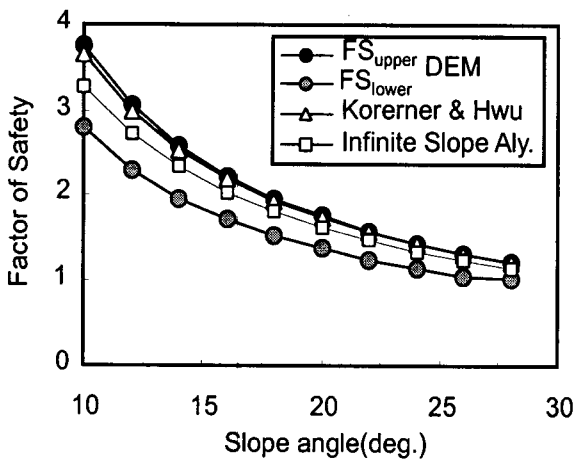
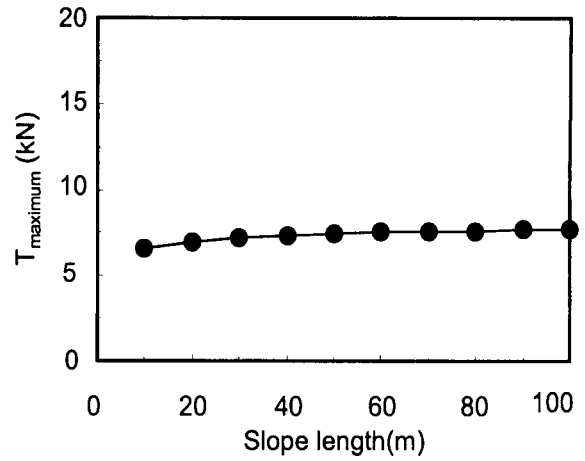
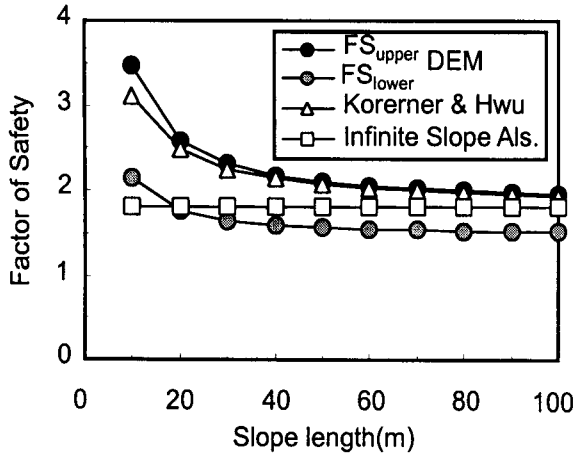


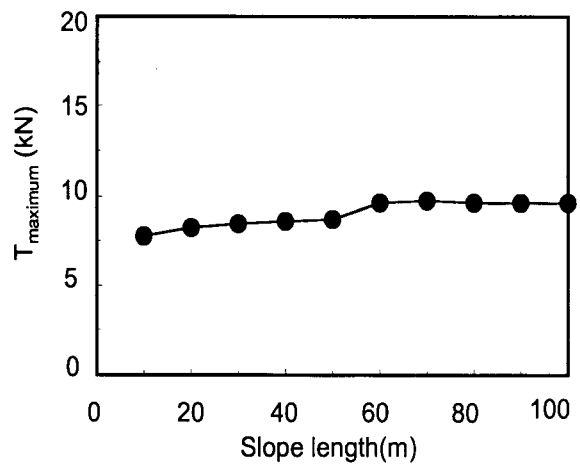
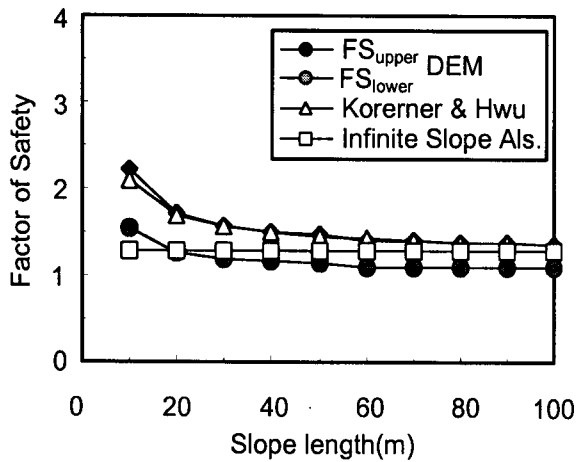
그림 6. 매립지 사면경사의 변화에 따른 구해진 차수재 접촉면의 안전율 및 인장력의 변화

우에 대하여 매립지 사면길이의 변화가 미치는 영향이 비교 검토되어 있다. 사면 기울기가  $18^\circ$ 인 경우, 사면의 길이가 증가함에 따라 안전율 값은 대략 1.0~2.0 범위에서 수렴하는 양상을 보이고 있다. 특히 상부 접촉면에

대하여 제안된 방법과 Koremer와 Hwu 방법의 해가 사면 길이가 증가함에 따라 무한사면이론에 의한 해에 점차적으로 수렴하는 경향을 보이며, 이는 사면길이가 매우 긴 경우에는 차수재의 접촉면에서의 거동이 무한사



(a)  $\alpha = 18^\circ$



(b)  $\alpha = 25^\circ$

그림 7. 매립지 사면길이의 변화에 따른 구해진 차수재 접촉면의 안전율 및 인장력의 변화

면과 유사해 지는 것을 의미한다. 사면 기울기가  $25^\circ$ 인 경우, 안전율 값들의 경향 자체가 완만한 사면 경사에 대한 해석결과와 거의 유사한 양상을 보이며, 단지 예측된 안전율값들의 분포가 다소 감소한 것을 볼 수 있다.

그림 8과 9 및 10에서는 상부 흙의 전단 물성치와 접촉면에서의 전단 물성치의 변화가 안전율에 미치는 영향이 검토되어 있다. 덮개 흙 자체의 강도 물성치의 변화는 상부 및 하부 접촉면의 안전율에 전혀 영향을 미치지

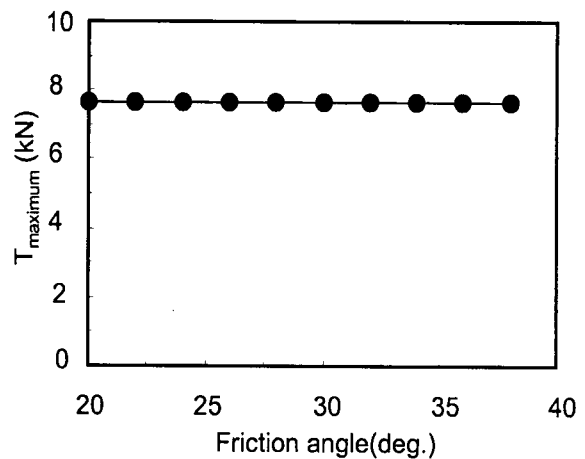
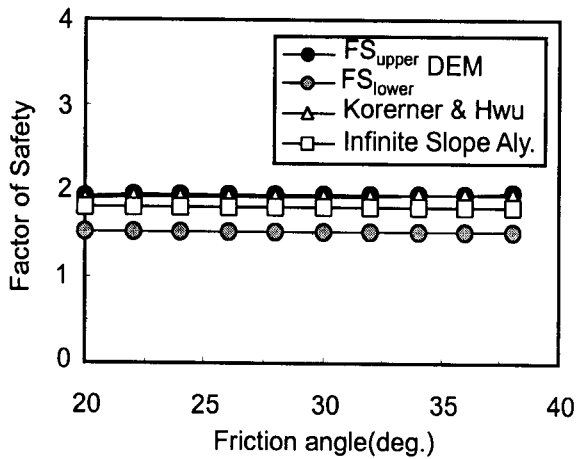
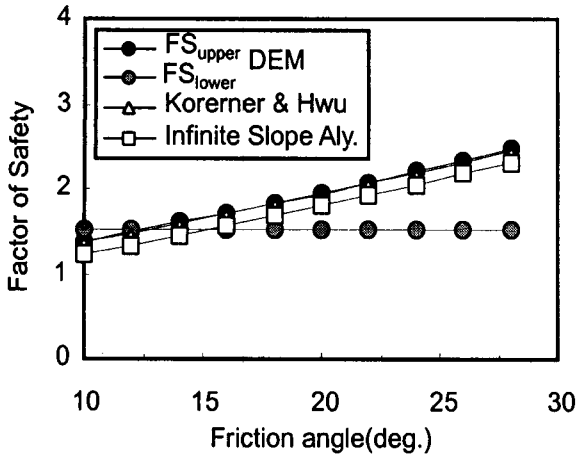
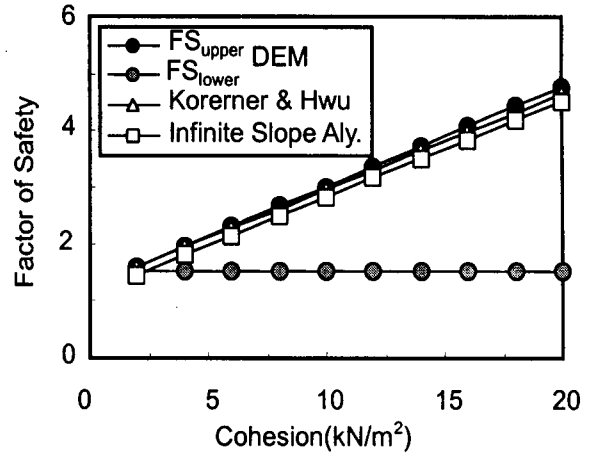


그림 8. 덮개 흙의 전단강도 변화에 따른 차수재 접촉면의 안전율과 인장력의 변화

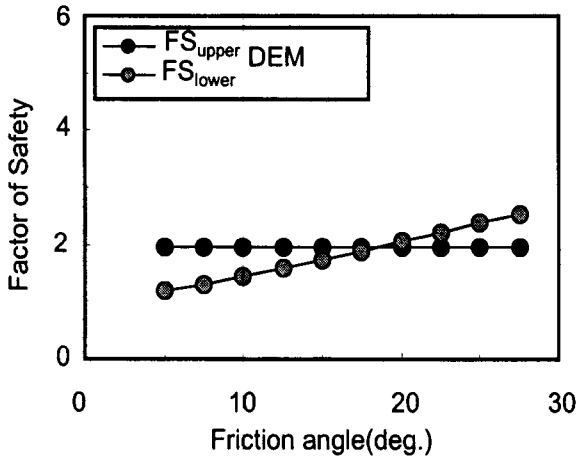


(a) 마찰각의 변화

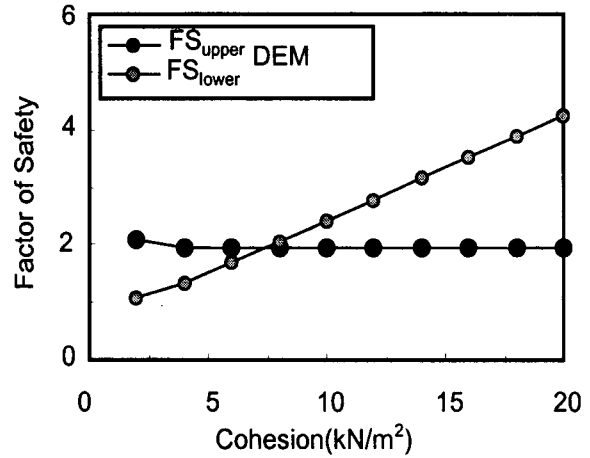


(b) 점착력의 변화

그림 9. 지오멤브레인 상부 접촉면의 전단강도 변화에 따른 차수재 접촉면의 안전율의 변화



(a) 마찰각의 변화



(b) 점착력의 변화

그림 10. 지오멤브레인 하부 접촉면의 전단강도 변화에 따른 차수재 접촉면의 안전율의 변화

지 않음을 볼 수 있다. 또한 상부 접촉면에서의 전단강도 물성치 값의 증가는 상부 접촉면의 안전율을 증가시키며, 하부 접촉면에서의 안전율에는 전혀 영향을 미치지 않는다. 또한 하부 접촉면의 전단 물성치 값의 증가함에 따라 상부 및 하부 안전율 값의 변화에 동일한 양상을 보이고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 매립지 차수 및 덮개 시스템의 안정성을 평가할 수 있는 새로운 방법이 제안되었다. 일반 사면안정해석에 적용된 바 있는 개별요소법을 확장하였으며, 차수재들의 접촉면에 작용하는 전단응력과 차수재에 유발되는 인장력을 합리적으로 모사하기 위하여 역학기구를 설정하여 탄소성 스프링으로 대체하였다.

본 연구에서는 매립지 사면에 설치된 각각의 차수재들의 접촉면에서의 전단강도 및 전단응력의 분포를 계산할 수 있다. 따라서 각각의 차수재들의 접촉면 안전율을 평가할 수 있을 뿐만 아니라 복합차수시스템의 가장 취약한 차수재 접촉면도 동시에 찾을 수 있다. 또한 차수재 전체길이에 걸쳐 발생하는 인장력 분포가 계산되므로 설치된 각각의 차수재들의 인장파괴에 대한 안정성 평가가 가능하다.

#### 참고 문헌

1. 김주용, 이승래, 김준석, 정치광 (1995), "개별요소법을 이용한 지반내일에 의해 보강된 굴착사면의 안정해석", 한국지반공학회지, 제11권, 제4호, pp.49-61.
2. Bourdeau, P.L., Ludlow, S.J. and Simpson, B.E. (1993), "Stability of Soil-covered Geosynthetic-lined Slopes: a Parametric Study",



- Proceedings of the Geosynthetics '93 Conference*, Vancouver, Canada, pp.1511-1521.
3. Chang, C.S. (1992), "Discrete Element Method for Slope Stability Analysis", *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.118, No.12, pp.1889-1905.
  4. Cundall, P. A. (1971), "A Computer Model for Simulating Progressive, Large-scale Movements in Blocky Rock Systems", *Proceedings of the International Symposium on Rock Fracture*, Nancy, France, Vol.1, pp.8-17.
  5. Gilbert, R.B., Lona, J.H. and Daly, J.J. (1993), "Structural Integrity of Composite Geosynthetic Lining and Cover Systems", *Proceedings of the Geosynthetics '93 Conference*, Vancouver, Canada, pp.1389-1401.
  6. Giroud, J.P. and Beech J.F. (1989), "Stability of soil layers on geosynthetic lining systems", *Proceedings of the Geosynthetics '89 Conference*, IFAI, San Diego, CA, pp.35-46.
  7. Koerner, R.M. and Hwu, B.L. (1991), "Stability and Tension Considerations Regarding Cover Soils on Geomembrane Lined Slopes", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.10, pp.335-355.
  8. Landrum, J.M., Bourdeau, P.L. and Deschamps, R.J. (2000), "Stability Analysis of Landfill Slopes: a Probabilistic Approach", *Geoenvironment 2000*, Cardiff, UK., pp.1020-1034.
  9. Littlemore, D.S. and Rogers, K.S. (1997), "The Slope Stability of Geomembranes in Landfill Facilities", *Geoenvironmental Engineering Conference 97*, Louisiana, USA., pp.105-109.
  10. 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*, Vol.116, No.4, pp.647-660.
  11. Sharma, H.D., and Lewis, S.P. (1994), *Waste Containment System, Waste Stabilization, and Landfills*, Wiley Interscience Press, pp. 518-522.
  12. Wilson-Fahmy, R.F. and Koerner, R.M. (1993), "Finite Element Analysis of Stability of Cover Soil on Geomembrane-lined Slopes", *Proceedings of the Geosynthetics '93 Conference*, Vancouver, Canada, pp.1425-1437.

(접수일자 2002. 8. 14, 심사완료일 2003. 3. 28)