

## 흡입응력을 고려한 불포화 사면의 안정해석법

### Stability analysis of an unsaturated slope considering the suction stress

송영석<sup>1)</sup>, Young-Suk Song, 이남우<sup>2)</sup>, Nam-Woo Lee, 황웅기<sup>3)</sup>, Woong-Ki Hwang, 김태형<sup>4)</sup>, Tae-Hyung Kim

<sup>1)</sup>한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원, Senior Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>2)</sup>한국지질자원연구원 지구환경연구본부 연구생, 현 한국해양대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University

<sup>3)</sup>한국해양대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University

<sup>4)</sup>한국해양대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Korea Maritime University

**SYNOPSIS** : The stability analysis method of an unsaturated slope considering the suction stress was performed on the infinite sand slope. During drying and wetting processes, the Soil-Water Characteristics Curve (SWCC) of the sand with the relative density of 75% was measured using the automated SWCC apparatus. Also, the Suction Stress Characteristics Curve (SSCC) was estimated. Based on these results, the stability analysis of an unsaturated infinite slope was carried out considering the slope angle, the weathering zone and the relative change in friction angle as a soil depth. According to the result of slope stability analysis, the safety factors of slope were less than 1 when the slope angles were more than 50°. The safety factors of slope tend to increase with increasing the depth from the ground surface. Especially, the safety factors have a tendency to increase and decrease above near the ground water level due to the suction stress. The maximum safety factor of slope in this analysis was occurred at the Air Entry Value (AEV) of drying process. The influence range of suction stress above the ground water level can be found out and can be defined as the funicular zone which means the metric suction range from the air entry point to the point of residual volumetric water content.

**Keywords** : Matric suction, Suction stress, Soil-Water Characteristic Curve, Suction Stress Characteristic Curve, Factor of safety

## 1. 서론

우리나라의 경우 대부분의 산사태는 우기에 집중적으로 발생되므로 우리나라 산사태의 발생요인 중 가장 큰 요인은 강우임을 예측할 수 있다. 즉, 연평균 강우량의 대부분이 6월에서 9월 사이에 편중되어 있어 이 기간에 집중호우로 인한 산사태의 발생이 빈번하게 발생되고 있으며, 이로 인한 피해도 매년 급증하고 있는 실정이다(Park et al., 2008).

우리나라에서 발생하는 대부분의 산사태는 발생 깊이가 2m 이내로서 얇은 평면파괴형태로 발생된다(최경, 1986; 김경수 등, 2007). 즉, 우리나라의 산사태는 대부분 강우의 침투로 인하여 발생하며, 이때

파괴면은 주로 얇은 깊이에서 형성된다. 강우의 침투로 인하여 지하수위 상부의 위치하는 불포화 지반의 포화도가 증가하게 되며, 모관흡수력은 감소하게 된다. 이로 인하여 불포화 지반내 흡입응력(suction stress)은 변화하게 되며, 이는 불포화 사면의 안정성에 영향을 미치게 된다.

불포화 사면의 안정해석을 위해서는 지반내 모관흡수력과 체적함수비의 영향을 반드시 고려해야 한다. 특히 사질토 지반의 무한사면에서는 사면의 경사, 깊이에 따른 내부마찰각 변화, 그리고 지하수위 영향에 따른 흡입응력이 사면의 안정성을 결정하게 된다. 흡입응력은 불포화 지반에서 흙이 물을 보유할 때 발생하는 구조적 및 물리화학적 응력을 모두 고려한 개념이다(Lu and Likos, 2004).

따라서 본 논문에서는 흡입응력을 고려한 사면안정해석법을 이용하여 사질토로 구성된 불포화 무한사면에 대한 안정해석을 수행하고자 한다. 먼저 자동 흡-함수특성곡선 측정장치를 이용하여 사질토의 건조 및 습윤과정에 따른 흡-함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC)을 예측하고, 흡입응력특성곡선(Suction Stress Characteristics Curve, SSCC)을 산정한다. 이를 토대로 사면의 경사, 풍화작용 및 깊이에 따른 내부마찰각의 변화를 고려하여 사질토로 구성된 불포화 무한사면에 대한 안정성 해석을 수행하고자 한다.

## 2. 시험시료 및 시험장치

표 1은 불포화 무한사면 안정해석에서 사용된 사질토의 물리적 특성을 나타낸 것이다. ASTM D 4253-83 및 ASTM D 4254-83 시험법에 의거하여 최대 및 최소 건조단위중량을 산정하였으며, 상대밀도 75%에 대한 흡함수특성곡선 측정시험을 실시하였다.

표 1. 시험시료의 물리적 특성

Description	Symbol		Property
Specific gravity	$G_s$		2.621
Max. dry density	$\gamma_{dmax}$	g/cm <sup>3</sup>	1.613
Min. dry density	$\gamma_{dmin}$		1.366
Effective particle size	$D_{10}$	mm	0.42
$D_{30}$ particle size	$D_{30}$		0.51
$D_{60}$ particle size	$D_{60}$		0.63
Uniformity coefficient	$C_u$		1.5
Coefficient of curvature	$C_c$		1.0
Soil classification	USCS		SP

본 연구에서는 상대밀도 75%의 사질토에 대한 흡-함수특성곡선을 산정하기 위하여 자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 활용하였다. 본 시험장치는 측정원리가 간단하고 연속적인 측정이 가능하며, 시험자에 의해 발생할 수 있는 오차를 최소화하여 정확한 불포화도의 흡-함수특성곡선을 산정할 수 있다.

그림 1은 자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 나타낸 것이다(송영석 등, 2010). 그림에서 보는 바와 같이 본 시험장치는 압력조절장치, 플로우셀, 물저장소, 공기방울트랩, 저울, 시료준비장치, 측정시스템 등으로 구성되어 있다. 먼저 압력조절장치에 의해 조절 및 계획된 공기압을 흡시료에 가해지게 된다. 공기압에 의해 포화된 시료내 간극수가 빠져나가게 되며, 이러한 간극수는 HAE(High Air Entry) 디스크와 공기방울트랩을 거쳐 저울을 통하여 측정된다. HAE 디스크는 공기와 흡입자들이 이동하는 것은 제한하지만 물의 흐름을 제한하지 않는다. 이때 공기압은 흡시료의 모관흡수력으로 작용하게 되며, 흡시료가 가지는 일정한 공기함입치를 넘어서게 되면 흡시료 내부에 있는 간극수가 빠져나가기 시작한다. 이러한 과정을 토대로 건조 및 습윤과정의 흡함수특성곡선을 측정할 수 있다. 한편, 공기의 압력은 0-300kPa범위까지 적용할 수 있으며, 축변환기법(Hilf, 1956)을 도입하였다.

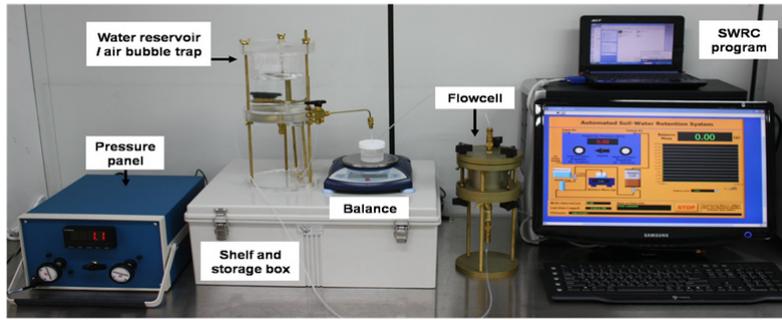


그림 1. 자동 흡-함수특성곡선 측정장치

### 3. 시험결과 및 분석

#### 3.1 흡-함수특성곡선

자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 이용하여 단계별 모관흡수력과 간극수량을 측정하였다. 그리고 시료에 모관흡수력을 재하시켜 간극수를 배출시키는 건조과정과, 반대로 모관흡수력을 재하시켜 간극수를 유입시키는 습윤과정을 재현하였다. 측정된 모관흡수력( $u_a - u_w$ )과 체적함수비( $\theta$ )의 관계를 토대로 van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 건조 및 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선을 예측하였다. 식 (1)은 van Genuchten(1980)에 의해 제안된 흡-함수특성곡선 산정식을 나타낸 것이다.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)^n]} \right]^m \quad (1)$$

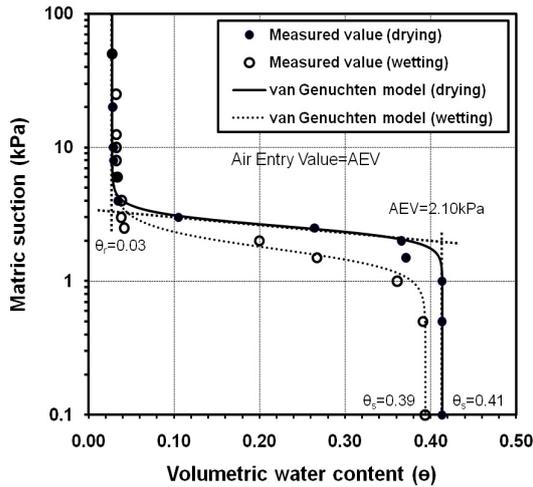
여기서,  $S_e$ 는 유효포화도,  $\theta_s$ 는 포화체적함수비,  $\theta_r$ 은 잔류체적함수비를 의미한다. 그리고,  $\alpha$ 는 공기유입값과 관계된 계수,  $n$ 은 변곡점의 경사에 관계된 계수,  $m$ 은 잔류함수비에 관계된 계수를 의미한다.

표 1은 van Genuchten(1980) 방법으로 예측한 상대밀도 75%의 사질토에 대한 건조 및 습윤과정의 불포화도 관련계수를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 건조과정의 대한  $\alpha$ 는 0.393,  $n$ 은 8.553,  $m$ 은 0.883이며, 포화과정에 대한  $\alpha$ 는 0.593,  $n$ 은 5.561,  $m$ 은 0.820이다. 이 계수들을 이용하여 건조 및 습윤과정에 대한 흡-함수특성곡선을 도시할 수 있다.

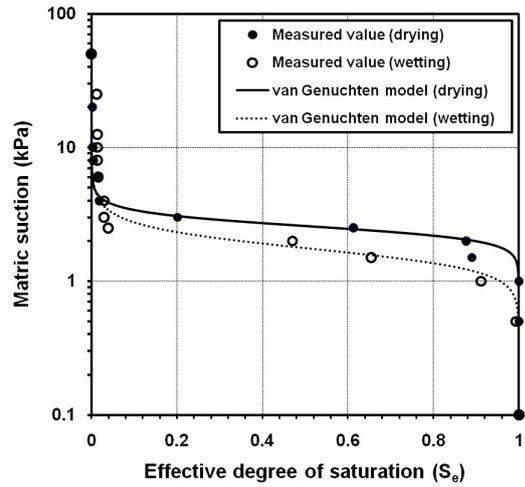
그림 2는 van Genuchten(1980) 방법으로 예측한 흡-함수특성곡선을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 체적함수비에서 모관흡수력이 다르게 나타나는 이력현상(hysteresis)을 볼 수 있으며, 공기함입치(AEV)는 2.10kPa로 나타났다. 그리고 건조과정의 포화체적함수비( $\theta_s$ )는 0.41, 잔류체적함수비( $\theta_r$ )는 0.03이며, 습윤과정의 포화체적함수비( $\theta_s$ )는 0.39, 잔류체적함수비( $\theta_r$ )는 0.03이다.

표 1. van Genuchten(1980)방법으로 산정된 불포화도 관련계수

계수	$\theta_s$	$\theta_r$	$a$	$n$	$m$	AEV
건조과정	0.41	0.03	0.393	8.553	0.883	2.10kPa
습윤과정	0.39	0.03	0.593	5.561	0.820	



(a) 모관흡수력과 체적함수비의 관계



(b) 모관흡수력과 유효포화도의 관계

그림 2. 건조 및 습윤과정의 흡-함수특성곡선

### 3.2 흡입응력특성곡선

일반적으로 불포화토의 전단강도를 결정하는 방법으로는 전단강도를 하나의 응력상태변수로 정의한 Bishop(1959)의 유효응력 접근법과 순연직응력과 모관흡수력을 독립적인 응력변수로 정의한 Fredlund and Morgenstern(1978)의 독립상태변수(independent state variable) 접근법으로 구분 할 수 있다. 식 (2)는 Bishop(1959)의 이론을 나타낸 것이며, 모관흡수력이 독립적인 응력변수로 정의될 수 없음을 나타낸다. 식 (3)은 Fredlund and Morgenstern(1978)의 이론을 나타낸 것이며, 모관흡수력 증가에 따라 전단강도가 선형적으로 증가하는 것으로 나타난다.

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)]\tan\phi' \quad (2)$$

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (3)$$

Lu and Likos(2004, 2006)에 의하면 모관흡수력은 간극내 물과 공기의 접촉면에서 발생하므로 독립적인 응력변수로 정의할 수 없으므로, Bishop(1959)의 유효응력 접근법이 합리적이라고 하였다. 그리고 식 (4)에서 보는 바와 같이 Bishop(1959)의 이론을 토대로 불포화 전단강도에 흡입응력(suction stress) 개념을 도입하고, Mohr-Coulomb과괴규준으로 확장하였다. 식 (5)에서  $\sigma^s$ 는 흡입응력으로서 입자상호간에 발생하는 물리화학적 응력, 표면장력에 의한 모관응력, 흡구조에 따른 응력을 고려하였다. 그리고 식 (5)에서 보는 바와 같이 흡입응력은 모관흡수력과 유효포화도의 곱으로 정의할 수 있으므로 흡-함수특성곡선에서의 면적을 의미한다. 그러므로 흡입응력은 유효포화도와 특정한 상관관계를 갖게 되며, 이를 흡입응력특성곡선(Suction Stress Characteristics Curve, SSCC)이라고 한다.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + \chi(u_a - u_w)\tan\phi' = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + S_e(u_a - u_w)\tan\phi' \quad (4)$$

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + (u_a - u_w)S_e = (\sigma - u_a) - \sigma^s \quad (5)$$

본 연구에서는 흡-함수특성곡선을 예측하기 위한 van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 흡입응력 특성곡선의 상관식을 유도하였다. van Genuchten(1980)은 유효포화도와 모관흡수력의 관계를 식 (1)과 같이 제안하였으며, 이를 식 (5)에 대입하여 정리하면 식 (6)과 같이 유효포화도 혹은 유효체적함수비에 따른 흡입응력 산정식을 구할 수 있다.

$$\sigma^s = -(u_a - u_w)S_e = -\frac{(u_a - u_w)}{(1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n)^{(n-1)/n}} \quad (6)$$

그림 3은 건조 및 습윤과정의 흡습수특성곡선으로부터 측정된 불포화도 관련계수( $\alpha$ ,  $n$ )와 식 (6)을 이용하여 모관흡수력에 따른 흡입응력을 산정한 결과이다. 건조과정의 경우 최소흡입응력은 -1.8kPa이며, 흡입응력이 발생하는 모관흡수력의 범위는 0~6.3kPa이다. 그리고 공기함입치(AEV=2.10kPa)이하인 경우 모관흡수력이 증가함에 따라 흡입응력은 감소하지만, 공기함입치 이상인 경우 모관흡수력이 증가함에 따라 흡입응력은 증가하여 결국 0의 값을 갖는다. 한편, 습윤과정의 경우 최소흡입응력은 -1.1kPa이며, 흡입응력이 발생하는 모관흡수력의 범위는 0~8.6kPa이다. 흡입응력은 부(-)의 값으로 작용하기 때문에 결국 불포화도의 전단강도 및 유효응력을 증가시키게 된다. 따라서 사질토로 구성된 사면의 경우 지반내 물이 유입되면서 흡입응력의 영향으로 사면 안정성을 유지하다가 일정 흡입응력 이상이 되면 갑작스런 사면붕괴를 유발하게 됨을 알 수 있다.

그림 4는 사질토의 유효포화도에 따른 흡입응력과 흡입응력특성곡선(SSCC)을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 사질토의 흡입응력은 유효포화도가 증가함에 따라 감소하다가 완전포화직전에 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

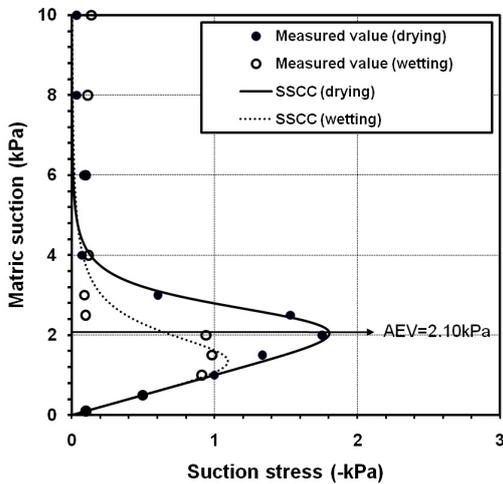


그림 3. 모관흡수력과 흡입응력의 관계

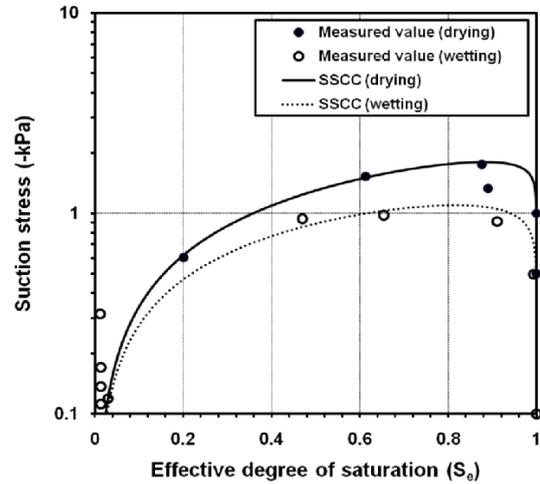


그림 4. 흡입응력특성곡선

#### 4. 불포화 무한사면 안정해석

불포화 사면의 안정해석을 위해서는 지반내 모관흡수력과 체적함수비의 영향을 반드시 고려해야 한다. 특히 사질토 지반의 무한사면에서는 사면의 경사, 깊이에 따른 내부마찰각 변화, 그리고 지하수위 영향에 따른 흡입응력이 사면의 안정성을 결정하게 된다. 따라서 이들 영향을 모두 고려하기 위하여 흡입응력을 고려한 불포화 무한사면의 안정해석법을 적용하였다. 식 (7)은 흡입응력과 깊이에 따른 내부마찰각의 변화를 고려할 수 있는 무한사면의 안전율 산정식을 나타낸 것이다. 첫 번째 항은 내부마찰각에 관한 항, 두 번째 항은 점착력에 관한 항, 그리고 세 번째 항은 흡입응력의 관한 항이다.

$$F(z) = \frac{\tan\phi'(z)}{\tan\beta} + \frac{2c'}{\gamma(H_{wt} - z)\sin 2\beta} - r_u(\tan\beta + \cot\beta)\tan\phi'(z)$$

$$r_u = \frac{\sigma^s}{\gamma(H_{wt} - z)}, \quad \phi(z)' = \phi_o + \frac{\Delta\phi}{1 + \frac{z_w}{H_{ss}}} \quad (7)$$

여기서,  $H_{wt}$ 는 지표면과 지하수위의 깊이,  $H_{ss}$ 는 파괴가 일어난다고 가정하였을 때 지표면과 가상의 파괴면 사이에 거리,  $z$ 는 지하수위로부터의 거리,  $z_w$ 는 풍화영역깊이,  $\beta$ 는 사면의 경사를 나타낸다. 그리고  $\phi_o$ 는 지표면에서의 내부마찰각,  $\Delta\phi$ 는 풍화영역깊이( $z_w$ )에서의 내부마찰각 변화량을 의미한다.

그림 5는 사질토로 구성된 불포화 무한사면의 안정해석을 위한 해석단면을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 지하수위는 지표면으로부터 10m 아래에 존재하는 것으로 가정하였다. 그리고 표 2는 불포화 무한사면의 안정해석을 위한 입력 값을 나타낸 것이다. 대상사면은 상대밀도가 75%인 사질토로 구성되어 있으며, 사면의 경사는 30°, 40°, 50°, 60° 및 70°로 가정하였다. 풍화영역깊이( $z_w$ )는 0.5m, 풍화영역깊이에서의 내부마찰각 변화량( $\Delta\phi$ )는 6°로 가정하였다(Lu and Godt, 2008). 불포화 사면안정해석에 필요한 불포화토 관련계수  $\alpha$ 와  $n$ 은 앞서 수행한 자동 흡습수특성곡선 시험결과를 적용하였다. 그리고 상대밀도 75%인 사질토에 대한 직접전단시험을 실시하여 점착력과 내부마찰각을 산정하였다. 이때 점착력( $c$ )은 0kPa, 내부마찰각( $\phi'$ )은 43.27°이다.

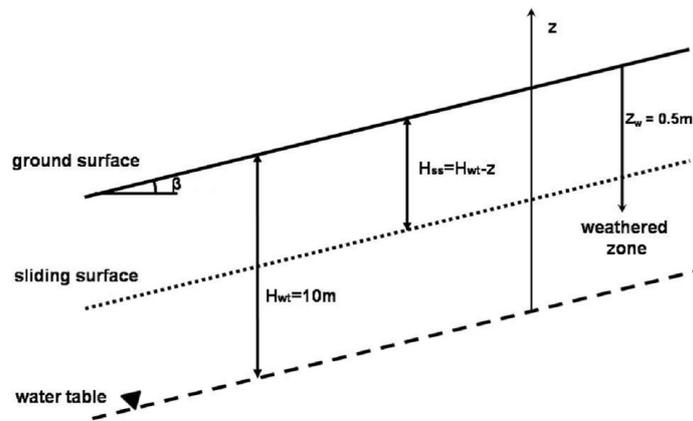
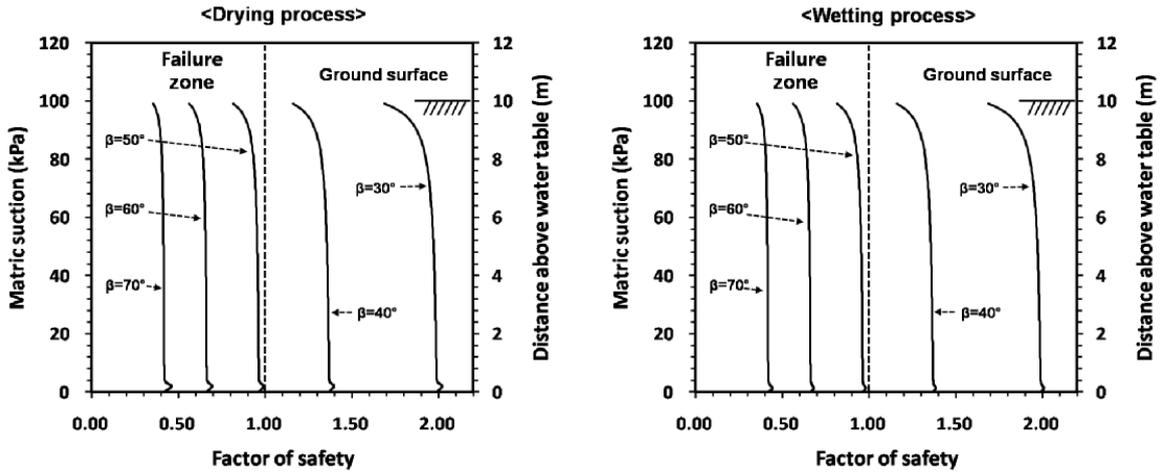


그림 5. 사질토 지반의 무한사면

표 2. 불포화 무한사면의 안정해석을 위한 입력값

흡-습수특성곡선 (van Genuchten parameter)	건조과정	$\alpha$ (kPa <sup>-1</sup> )	0.393
		$n$	8.553
	습윤과정	$\alpha$ (kPa <sup>-1</sup> )	0.593
		$n$	5.561
직접전단시험 (Direct shear test)	$\phi_o$ (°)	43.27	
	$c'$ (kPa)	0	
사면 조건 (Slope conditions)	$\Delta\phi$ (°)	6	
	$\beta$ (°)	30, 40, 50, 60, 70	
	$H_{wt}$ (m)	10	
	$z_w$ (m)	0.5	

그림 6은 불포화 무한사면의 경사에 따른 지하수위로부터 지표면까지의 깊이별 사면안전율을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 사면의 경사가 커짐에 따라 사면안전율은 감소하는 것으로 나타났으며, 50°이상의 사면경사에서는 사면안전율이 1이하인 것으로 나타났다. 그리고 깊이가 깊어짐에 따라 사면안전율은 증가하는 경향을 보이고 있으며, 지하수위 부근에서는 흡입응력의 영향으로 인하여 사면안전율이 증감하는 것으로 나타났다. 즉 흡입응력이 작용하는 범위 내에서는 흡입응력의 영향으로 인하여 지반의 강도가 증가되므로 사면안전율도 증가하는 것으로 나타났다.



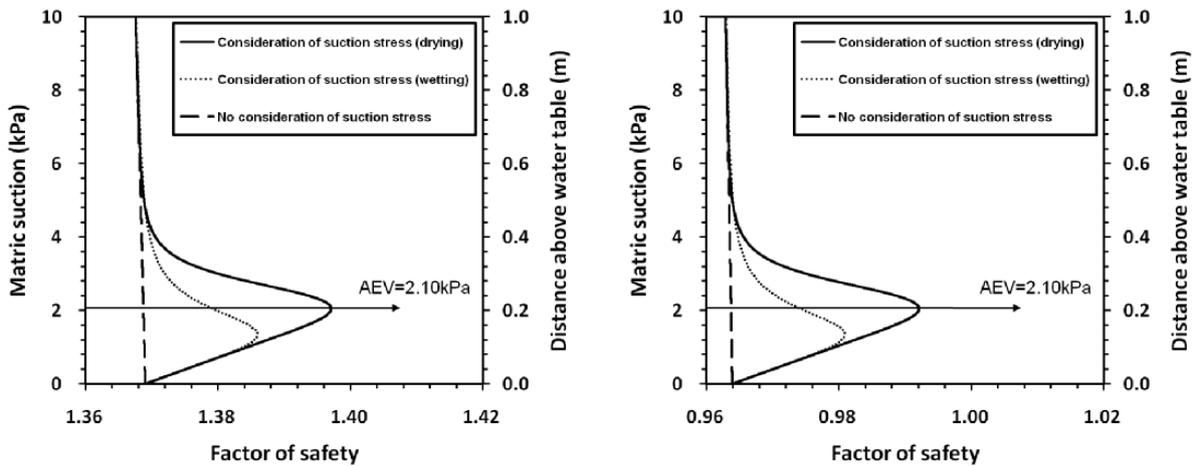
(a) 건조과정결과 적용시

(b) 습윤과정결과 적용시

그림 6. 사면깊이에 따른 사면안전율 변화

그림 7은 흡입응력에 따른 사면안전율의 영향을 살펴보기 위하여 지하수위면 상부 흡입응력이 작용하는 범위에서의 사면안전율과 모관흡수력을 도시한 것이다. 즉 그림 6에서 흡입응력의 영향범위를 확대하여 도시하고, 흡입응력을 고려하지 않은 사면안정해석결과와 함께 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 지하수위로 인한 흡입응력의 영향으로 사면안전율은 증가하였다가 다시 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 대상지반의 공기함입치(AEV)에서 최대사면안전율이 발생한다. 그러나 흡입응력을 고려하지 않은 경우 사면안전율의 증감현상은 발생하지 않았다. 한편 모관흡수력과 사면안전율의 상관관계는 그림 3의 흡입응력과 모관흡수력의 상관관계와 유사한 거동을 보인다. 앞서 설명한 바와 같이 흡입응력은 부(-)의 값을 가지므로 결국 유효응력은 증가하게 되며, 이로 인하여 지반의 강도도 증가되는 것이다. 따라서 최대흡입응력이 발생하는 공기함입치(AEV)에서 최대사면안전율이 발생함을 알 수 있다.

한편, 건조 및 습윤과정에 대한 사면안전율을 서로 비교하여 보면 사면안전율의 증감은 습윤과정에서 보다 건조과정에서 더 큰 것으로 나타났다. 그리고 지하수위의 모관현상으로 인한 흡입응력의 영향범위는 건조과정의 경우 지하수위로부터 0.63m이며, 습윤과정의 경우 지하수위로부터 0.86m임을 알 수 있다. 따라서 본 영역까지를 공기침투가 발생한 이후 잔류체적함수비가 발생하는 시점인 funicular 영역으로 정의할 수 있으며, 흡입응력 영향범위 이상은 pendular 영역으로 정의할 수 있다.



(a)  $\beta=30^\circ$

(b)  $\beta=40^\circ$

그림 7. 흡입응력에 따른 사면안전율 변화

## 5. 결 론

흡입응력을 고려한 사면안정해석법을 이용하여 사질토로 구성된 불포화 무한사면에 대한 안정해석을 수행하였다. 자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 이용하여 상대밀도 75%의 사질토의 건조 및 습윤과정에 따른 흡-함수특성곡선(SWCC)을 측정하고, 흡입응력특성곡선(SSCC)을 산정하였다. 이를 토대로 사면의 경사, 풍화작용 및 깊이에 따른 내부마찰각의 변화를 고려하여 불포화 무한사면의 안정성 해석을 수행하였다. 사면안정 해석결과 50°이상의 사면경사에서 사면안전율이 1이하인 것으로 나타났으며, 깊이가 깊어짐에 따라 사면안전율은 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히 지하수위 부근에서는 흡입응력의 영향으로 사면안전율은 증가하였다가 다시 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 대상지반의 공기함입치(AEV)에서 최대사면안전율이 발생하였다. 그리고 지하수위의 모관현상으로 인한 흡입응력의 영향범위를 산정할 수 있으며, 습윤과정에서의 영향범위가 건조과정에서의 영향범위보다 크게 발생되었다. 흡입응력의 영향범위는 공기침투가 발생된 이후 잔류체적함수비가 발생하는 시점인 funicular 영역으로 정의할 수 있다. 그러나 흡입응력을 고려하지 않은 경우 지하수위의 모관현상에 의한 사면안전율의 증감현상은 발생하지 않았다. 따라서 지하수위가 존재하는 불포화 무한사면의 안정해석에서는 지하수위의 영향으로 인한 모관현상과 흡입응력을 반드시 고려하여야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “급경사지 및 휴폐광산지역의 재해예방기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 김경수, 송영석, 채병곤, 조용찬, 이춘오 (2007), “지질조건에 따른 자연사면 산사태의 기하학적 특성”, *지질공학*, 제17권, 제1호, pp.75-87.
2. 송영석, 이남우, 김태형, 황웅기 (2010), “자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 이용한 모래의 불포화 특성 평가”, *Proc. 2nd Workshop on Unsaturated soils*, pp.42-65.
3. 최경 (1986) **한국의 산사태 발생요인과 예지에 관한 연구**, 강원대학교 박사학위 논문, 45p.
4. Bishop, A.W. (1959), "The principle of effective stress", *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknikk*, Vol.106, No.39, pp.859-863.
5. Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. and Widger, D.A. (1978), "The shear strength of unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, No.3, pp.313-321.
6. Hilf, J.W. (1956), *An investigation of pore water pressure in compacted cohesive soils*, Technical Memorandum No.654, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Division, Denver, CO.
7. Lu, N. and Godt. J.(2008), "Infinite-slope stability under steady unsaturated seepage conditions", *Water Resources Research*, Vol.44, W11404.
8. Lu, N. and Likos, W.J.(2004), *Unsaturated soil mechanics*, Wiley, New York, 556p.
9. Lu, N. and Likos, W.J.(2006), "Suction stress characteristic curve for unsaturated soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.132, No.2, pp.131-142.
10. Park, D.K., Oh, J.R., Son, Y.J., Park, J.H. and Lee, M.S. (2008) "Steep slope management system in Korea", *Proc. the 2nd East Asia Landslides Symposium*, Seoul, pp.7-11.
11. van Genuchten, M.T.(1980), "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898.