

공간분포형 습윤지수를 이용한 유역규모의 사면안정해석

오성렬* · 이기하**

Slope Stability Analysis at Catchment Scale Using Spatially-distributed Wetness Index

Sungryul Oh* · Gi-ha Lee**

요약 : 본 연구에서는 2011년 7월 27일 집중호우로 인한 서울시 우면산 산사태 지역을 대상으로 뿌리의 보강효과와 분포형 습윤지수를 고려한 GIS기반의 무한사면안정해석기법을 이용하여 사면안정해석을 실시하였다. 사면안정해석을 위한 지형·지질학적 매개변수는 수치지도, 정밀토양도 및 임상도(임상도와 영급도)로부터 추출하여 10m×10m 해상도의 공간분포형 데이터베이스로 변환하였다. 또한, 분포형 습윤지수의 산정을 위한 비집수면적(specific catchment area)은 무한방향흐름 기법(IFD, infinity flow direction)을 이용하여 결정하였으며, 모형의 입력 강우자료는 서울시 서초와 남현 AWS의 산사태 발생초기와 종기시의 평균 일강우량을 적용하였다. 대상유역의 사면안정해석을 위해 격자별 안전율(Safety Factor)은 4개 등급(unstable, quasi stable, moderately stable, stable)으로 구분하여 도시하였다. 산사태 발생인자별 분석결과, 무한사면안정해석기법을 이용하여 산정된 사면안전률은 사면경사에 매우 민감하게 반응하는 것으로 분석되었으며, 거주지 주변의 절개지 부근과 산지정상부근의 급경사지에서 불안정 지역이 집중적으로 분포하고 있음을 확인하였다.

주요어 : 무한사면안정해석기법, 무한방향흐름방법, 분포형 습윤지수, 우면산 산사태

Abstract : This study presents an application of infinite slope stability method with consideration of root cohesion and spatially-distributed wetness index on the Woomyeon mountain landslide area due to torrential rain of July 27, 2011. Spatially-distributed model parameters were extracted based on digital elevation map, soil map, forest map, and then converted in to 10 m × 10 m spatial resolution data. The infinity flow direction algorithm was used to calculate the specific catchment area, which plays important role to estimate the spatially-distributed wetness index. Average daily rainfall of two automatic weather stations (Seochu and Namhyeon) were selected as rainfall input data on the slope stability assessment model under steady-state condition. Slope stability level was classified into four categories based on the factor of safety: unstable, quasi-stable, moderately-stable, stable. The simulation results showed that the slope stability was very sensitive to variation of slope steepness and most unstable areas within the study site were dominantly located in cutting-area surroundings along with the residential area and the mountaintop.

Key Words : Infinite slope stability method, Infinity flow direction, Spatially distributed wetness index, Woomyeon mountain landslide

*충남대학교 공과대학 토목공학과 박사과정(Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Chungnam National University, ohsungryul@nate.com)

**경북대학교 과학기술대학 건설방재공학부 조교수(Assistant Professor, Department of Construction and Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University, Sangju, leegiha@knu.ac.kr)

I.

우리나라는 전 국토의 70%가 산지로 구성되어 있으며, 매년 집중호우로 인한 사면붕괴가 발생하여 연평균 60여명의 인명피해와 수 천억원 이상의 재산피해가 발생하고 있다(이수근 등, 2008). 과거에는 산사태의 대부분이 산간오지에 집중되거나, 그 발생빈도가 낮아 다른 재해에 비해 크게 주목받지 못하였으나 최근 산업화 및 도시화에 따른 도시 주변부와 전원공간의 개발이 활발해 지고 있으며, 공학적 안정성 평가없이 난개발되는 경우가 많아 그 위험성이 커지고 있고, 이상기후에 따른 국지성 호우 증가로 그 피해면적 및 복구비가 증가하고 있는 추세이다(그림 1). 이러한 사면재해는 전체 자연재해 사망자 대비 비율을 볼 때 22.3%로 단일 유형의 재해 유형 중 가장 큰 비중을 차지한다(박덕근 등, 2006).

따라서 사면재해를 사전에 방지하고 그 피해를 감소시키기 위해서는 산사태 위험지도 작성을 통한 적절한 예방대책이 필요하며, 국외의 경우 산사태 위험지도 작성을 통한 다양한 사전적 예방대책을 운영하고 있다. 국내의 경우 산림청, 한국지질자원연구원 등 여러 기관에서 산사태 위험지도를 제작 및 운영 중에 있다. 하지만, 산사태 위험지도의 제작 시 여전히 불확실성을 내포하고 있으며, 산사태 발생의 중요한 외적 요인인 강우를 직접 고려하지 못하고 지형·지질학적 특성에 근거한 산사태 위험성 평가가 이루어지고 있다. 일반적으로 산사태 발생 메카니즘은 불안정한 내적 요인(점착력, 내부마찰각 등)이 외적 요인(강우 등)에 의해 발현되는 것으로써 강우와 이에 따른 토양 포화도의 변화는 사면안정해석에 있어 매우 중요한 요소이며, 보다 효율적으로 사면재해에 대응하기 위해서는 강우를 고려한 토양의 포화

상태의 시·공간적 변동성을 모의할 수 있는 정량적인 해석기법이 요구된다.

강우와 토양의 포화도를 고려한 사면안정해석에 대한 연구는 1990년 이후 지리정보체계(Geographic Information System, GIS) 및 원격탐사(Remote Sensing, RS)의 비약적 발전과 함께 공간 분포형 지형, 지질, 임상 인자의 산정이 가능해지면서 이를 기반으로 한 무한사면안정해석(infinite slope stability analysis) 기법을 이용한 광역적 산사태 위험해석에 연구가 지속적으로 수행되어왔다. Montgomery and Dietrich(1994)는 미국의 Tennessee와 Oregon 지역에 대하여 O'loughlin(1986)이 제안한 토양 포화도 개념을 바탕으로 무한사면안정해석 기법을 적용하여 모의된 결과가 산사태 및 토석류 발생지(landslide initiation site)와 유사함을 확인하였다. Van Westen and Terlien(1996)은 콜롬비아의 Manizales 지역에 대해 지질 및 지형인자 등을 추출하고 강우와 지진에 따른 시나리오별 사면안정해석을 수행한 바 있으며, 기존에 적용되지 않았던 사면의 상재압(식생, 건물 등의 분포하중)의 개념을 무한사면안정해석에 도입하였다. Borga *et al.*(2002)은 습윤지수, 상재압, 뿌리 점착력을 고려하여 이탈리아 Cordon과 Vauz 지역의 사면안정해석을 시도하였으며, 한계강우(critical rainfall)와 한계습윤지수(critical wetness index)를 개념을 도입하여 유역의 지형학적 특성에 의한 파괴 확률을 결정하였다. Acharya *et al.*(2006)은 네팔의 Rasuwa 지역에 대하여 토양이 건조상태($m=0$), 준포화상태($m=0.5$), 완전포화상태($m=1$)로 구분하여 무한사면안정해석기법을 적용하였으며, 강우의 동적특성을 고려한 안전율의 변동성을 분석하였다. Ray and De Smedt(2009)는 네팔의 Dhaling 지역에 대하여 Acharya *et al.*(2006)과 마찬가지로 토양을 건조상태($m=0$), 준포화상태($m=0.5$), 완전포화상태($m=1$)로 구분하고, 2년, 25년 빈도의 강우량과 초기포화도를 0.5로 가정하여 산정된 비 산출율(specific yield)을 통한 산사태 위험지역의 변동성을 비교·분석하였다.

국내 연구사례의 경우 이사로(1999)는 용인지역을 대상으로 항공사진과 현지조사를 통해 산사태 재해지역의 특성을 파악하고, 경사, 경사방향, 곡률, 토질, 모재, 배수, 유효토심, 지형, 임상의 경급, 영급 밀도 등의 산사태 발생인자를 고려하여 로지스틱 회귀분석, 인공신경망 기법 등을 적용하여 산사태 취약성을 분석하였다. 김민구(2005)는 강원지역을 대상으로 Acharya *et al.*(2006)

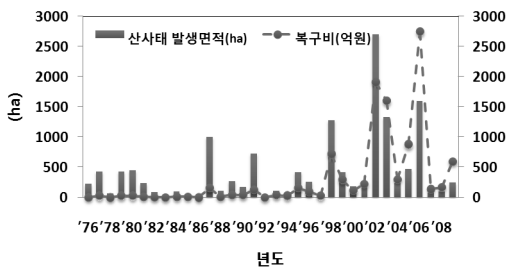


그림 1. 1976~2008 산사태 발생 면적 및 복구비의 연도별 변화 출처 : 산림청, 2010.

및 Ray and De Smedt(2009)의 연구사례와 마찬가지로 공간적으로 동일한 습윤지수(집중형 습윤지수)를 적용하고, 뿌리보강효과를 고려한 무한사면안정해석법을 이용하여 사면안정해석을 실시하였으며, Wu *et al.*(1979)이 제안한 식생별 인장강도 분류표를 국내기준에 맞게 적용하였다. 이현우(2011)는 강원도 평창군 진부면 일대를 대상으로 집중형 습윤지수와 토양의 마찰각, 점착력 등의 불확실성을 고려하기 위해 Monte Carlo simulation을 통하여 확률변수에 따른 사면안정율을 계산하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 사면안정해석에 있어 강우에 따른 토양 습윤지수의 시·공간적 변동성은 산사태 위험해석을 위한 매우 중요한 영향인자임에도 불구하고, 그 값을 대상유역 전체에 대하여 0, 0.5, 1 등과 같이 동일하게 가정하여 사용하여 왔으며, 이는 기존의 사면안정해석기법은 강우와 이에 따른 토양의 포화상태의 공간적 변화를 고려하지 못한다는 단점을 가지고 있음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 유역의 지형학적 특성에 따른 습윤지수의 공간분포를 고려하기 위하여 무한방향흐름방법(infinity flow direction method)을 이용한 비집수면적(specific catchment area)의 개념을 도입하여 2011년 7월 26일부터 28일까지 집중호우로 인한 서울시 우면산 산사태 지역을 대상으로 사면안정해석을 수행하고, 대상유역의 격자별 사면안전률(safety factor, F_s)을 도출하였다.

II.

전술한 바와 같이 GIS와 RS기술의 비약적 발전으로 인해 다양한 형태의 공간분포형 인자들이 추출이 가능해졌으며, 이를 활용한 무한사면안정해석기법은 산사태위험지도 작성 등 광역적 사면재해 영향평가를 위하여 광범위하게 사용되고 있다. 본 연구에서 사용된 무한사면안정해석기법의 이론 및 무한방향흐름방법을 이용한 분포형 습윤지수의 산출과정은 다음과 같다.

1. 무한사면안정해석기법

그림 2는 무한사면안정 모형의 개념적 모식도로써 깊이 비에 비해 사면의 길이가 상대적으로 긴 경우 파괴면에 사면에 평행하게 형성되며, 사면의 길이는 거의 무한대

이므로 양끝의 영향은 무시한다. 또한 침투수압이 사면에 평행하게 작용한다고 가정할 때 무한사면안정해석식은 다음과 같이 유도된다.

단위길이당 전단응력 :

$$\tau = \frac{T}{b/\cos\beta} \cdot 1 = \frac{W}{b} \cos\beta \cdot \sin\beta \quad (1)$$

단위길이당 수직응력 :

$$\sigma = \frac{P}{b/\cos\beta} \cdot 1 = \frac{W}{b} \cos^2\beta \quad (2)$$

여기서, T 는 사면의 전단력(ton), P 는 파괴면의 수직방향력(ton), b 는 사면폭(m), β 는 사면경사(°), W 는 흙의 자중(ton), τ 는 단위길이 당 전단응력(ton/m²), σ 는 단위길이 당 수직응력(ton/m²)이다.

Mohr-Coulomb의 법칙에 의해 전단강도(S)는 식 (3)과 같으며,

$$S = c + (\sigma - u) \tan \phi \quad (3)$$

여기서, c 는 흙의 점착력(ton/m²), u 는 간극수압(ton/m²), ϕ 는 흙의 내부마찰각(°)을 의미한다.

또한, 안전률(F_s)의 개념으로부터 전단응력은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\tau = \frac{S}{F_s} \quad (4)$$

식 (1)~(4)로부터 식 (5)와 같이 정리할 수 있으며,

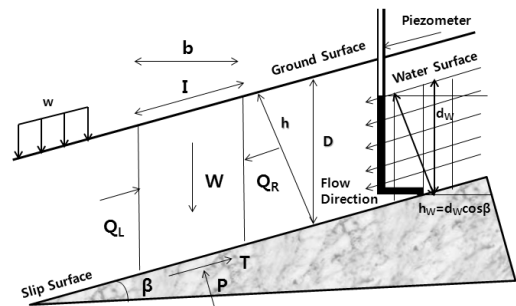


그림 2. 무한사면안정모형의 모식도

$$\frac{W}{b} \sin\beta \cos\beta = \frac{1}{F_s} (c + [\frac{W}{b} \cos^2\beta - u] \cdot \tan\Phi) \quad (5)$$

식 (5)를 F_s 에 대해 다시 정리하면 무한사면안정해석을 위한 기본식, 식 (6)과 같다.

$$F_s = \frac{c + [\gamma D \cos^2\beta - u] \cdot \tan\Phi}{\gamma z \sin\beta \cos\beta} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 뿌리보강효과를 고려하기 위해 점착력 c 를 흙의 점착력(c_s)과 뿌리의 점착력(c_r)로 구분하여 정리하면 식 (7)과 같고,

$$F_s = \frac{c_s + c_r + [\gamma D \cos^2\beta - u] \cdot \tan\Phi}{\gamma D \sin\beta \cos\beta} \quad (7)$$

마지막으로, 식 (7)에서 간극수압(u)의 영향에 의해 감소되는 흙의 단위중량과 사면에 작용하는 상재하중(w)의 영향을 고려하면 식 (8)과 같이 정리된다(Borga *et al.*, 2002).

$$F_s = \frac{c_s + c_r + [\cos^2\beta \gamma_s (D - d_w) - \cos^2\beta d_w (\gamma_s - \gamma_w) + w \cos\beta] \tan\Phi}{D \gamma_s \sin\beta \cos\beta + w \sin\beta} \quad (8)$$

여기서, c_s 는 흙의 점착력(KN/m^2), c_r 는 뿌리점착력(KN/m^2), D 와 d_w 모암으로부터 지표면까지의 높이(m) 및 수위(m), γ_w 는 물의 단위중량(KN/m^3), γ_s 는 흙의 포화단위중량(KN/m^3), w 는 상재하중(KN/m^2)이다.

2. 습윤지수

강우에 의한 침투량의 증가는 토양의 포화도와 간극수압을 증가시키며, 이는 결과적으로 잠재 파괴면에서의 유효수직응력과 전단강도의 감소를 발생시킨다. 따라서 침투량 증가에 따른 지표하수의 수위상승은 사면의 불안정성을 야기하게 된다. 이러한 토양의 포화도를 추정하기 위해 Montgomery and Dietrich(1994)와 Borga *et al.*(1998) 등은 사면의 지형학적 특성을 기반으로 습윤지수 산정을 위한 모형을 개발하였다. 이 모형은 상부사면(upslope area)의 총 강우의 침투량은 지표하수와 같으며 이는 지형경사와 평행하게 흐른다는 가정을 기반으로 하고 있으며, 결과적으로 이 가정에 의해 토양 포화층에서의 흐름은 Darcy's Law에 의해 식 (9)와 같이 표현될 수 있다.

$$q = \sin\theta K h \quad (9)$$

여기서, q 는 단위폭당 유량(m^2/s), K 는 흙의 투수계수(m/s), h 는 포화토층의 두께(m), $\sin\theta$ 는 경사이다.

식 (9)의 경사가 흐름방향에 있어서 단위길이 당 지표하수의 높이로서 감소한다고 가정하고 이를 수식화 하면 다음과 같이 표현된다.

$$iA = (\sin\theta K h_w) b \quad (10)$$

여기서, b 는 흐름방향의 단면 폭(m), i 는 침투 혹은 유효강우강도(m/s), h_w 는 지하수위(m), A 는 기여면적(m^2)이다.

식 (10)을 h_w 에 대해 정리하고 이를 포화토층의 두께(h)로 나누면 식 (11)과 같이 습윤지수로 표현할 수 있다(그림 2 참조).

$$m = \frac{h_w}{h} = \text{Mfn} \left\{ \frac{ia}{Kh \sin\theta}, 1 \right\} \quad (11)$$

여기서, $a = A/b$ 로 a 는 비 집수면적, A 는 기여면적(m^2), b 는 지표하수의 흐름방향 단면 폭(m), m 은 습윤지수로써 그 범위는 0(건조)~1(포화)이며, 1이상인 경우 지표흐름(overland flow)이 발생한다.

식 (11)은 상부사면 기여면적의 모든 흐름이 하부지역 임의의 한 지점으로 수렴한다는 가정을 기반으로 하고 있으며, 이때 상부사면으로부터 하부로 진행시의 흐름에서의 지체, 저류 등은 고려하지 않는다.

3. 무한방향흐름기법

무한방향흐름 기법은 격자기반의 흐름해석 기법으로서 O'Callaghan and Mark(1984)가 제안한 SFD(single flow direction) 기법과 Quinn *et al.*(1991)이 제안한 MFD(multiple flow direction) 기법의 제약사항을 개선하기 위해 실제 유출기여면적이나 비 집수면적을 생성시키는 흐름의 물리적 특성과 이론적 분산효과와의 차이로 인해 지형특성에 따라 과도하게 분산되거나 수렴하는 문제점을 해결하고, 최소한의 분산효과를 고려하면서 그 흐름방향을 결정하기 위해 고안된 기법이다(Tarboton, 1997).

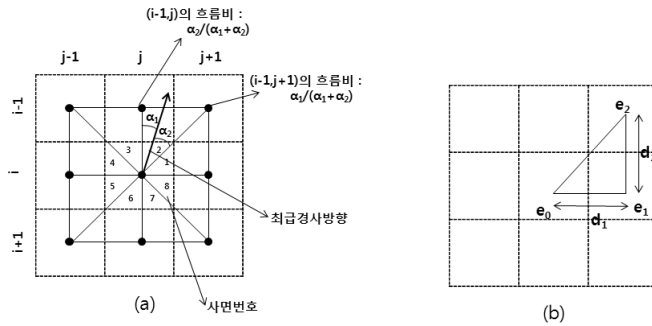


그림 3. 무한방향흐름 기법의 (a) 흐름분배 알고리즘, (b) 경사계산 알고리즘

그림 3은 임의의 유역을 격자기반으로 분할하였을 경우 인접격자와의 경사비교를 통해 흐름방향 및 흐름의 분기율을 결정하기 위한 무한방향흐름 기법의 모식도를 나타낸 것이며, 각 격자의 중심점을 연결하면 인접격자에 대해 그림 3(a)와 같이 8개의 삼각형 개체를 구성할 수 있다. 여기서 각 개체의 경사는 식 (12)로 정의되는 경사벡터로 정의할 수 있다.

$$s_1 = (e_0 - e_1)/d_1; s_2 = (e_1 - e_2)/d_2 \quad (12)$$

여기서, s_1, s_2 는 각 X, Y 성분의 경사벡터, e_0, e_1, e_2 는 각 격자의 표고값, d_1, d_2 는 각 표고간의 거리를 나타낸다.

식 (12)를 통해 구해진 경사벡터의 r 과 s 는 다음과 같이 산정된다.

$$r = \tan^{-1}(s_2/s_1); s = (s_1^2 + s_2^2)^{1/2} \quad (13)$$

이렇게 구해진 r 은 8방향 격자에서 흐름방향을 결정하는 경사 값을 산출하며, 이 값을 통해 8개의 개체의 위치와 그 분기율의 산출이 가능하다. 예를 들어 그림 3(a)의 경사 값이 70° 라면 흐름방향은 제2 개체에 존재하며, 그 분기율은 경사 값 70° 중 제2 개체에 기여하는 각

도 α_2 는 25° , α_1 는 20° 를 통해 $j+1$ 방향으로는 $\alpha_1/(\alpha_1 + \alpha_2) = 20^\circ/45^\circ = 0.45$ 만큼, j 방향으로는 $\alpha_2/(\alpha_1 + \alpha_2) = 25^\circ/45^\circ = 0.55$ 만큼 분기하게 된다. 만약, 식 (13)에 의해 산정된 r 이 $0 \sim \tan^{-1}(d_2/d_1)$ 의 범위 내에 있지 않을 경우 흐름의 과도한 분산을 방지하기 위하여 해당 단면의 경사는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{cases} r < 0 & : r = 0; s = s_1 \\ r > \tan^{-1}(d_2/d_1) & : r = \tan^{-1}(d_2/d_1); s = (e_0 - e_2)/(d_1^2 + d_2^2)^{1/2} \end{cases} \quad (14)$$

이상의 과정에서 산정되는 8개의 개체 경사 중 최급하향경사(steepest descent slope)를 선택하여 그에 해당하는 r 과 s 를 중앙 격자점의 흐름방향 및 사면경사를 결정하게 된다. 사면별 r 을 계산하는 일반식은 다음과 같이 나타낸다.

$$r_g = a_j r + a_c \pi/2 \quad (15)$$

여기서, r_g 은 $0 \sim 2\pi$ 의 값으로 동쪽 원점을 기준으로 반시계방향을 따라 각도(radian)의 형태로 계량된 흐름방향을 의미하며, 표 1의 계수를 이용하여 각 개체별 흐름방향 및 분기율을 추정할 수 있다.

표 1. 경사와 각도 계산을 위한 사면 방향별 계수

	1	2	3	4	5	6	7	8
e_0	$e_{i,j}$	$e_{i,j}$	$e_{i,j}$	$e_{i,j}$	$e_{i,j}$	$e_{i,j}$	$e_{i,j}$	$e_{i,j}$
e_1	$e_{i,j+1}$	$e_{i-1,j}$	$e_{i-1,j}$	$e_{i,j-1}$	$e_{i,j-1}$	$e_{i+1,j}$	$e_{i+1,j}$	$e_{i,j+1}$
e_2	$e_{i-1,j+1}$	$e_{i-1,j+1}$	$e_{i-1,j-1}$	$e_{i-1,j-1}$	$e_{i+1,j-1}$	$e_{i+1,j-1}$	$e_{i+1,j+1}$	$e_{i+1,j+1}$
a_c	0	1	1	2	2	3	3	4
a_j	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1

출처 : Tarboton, 1997.

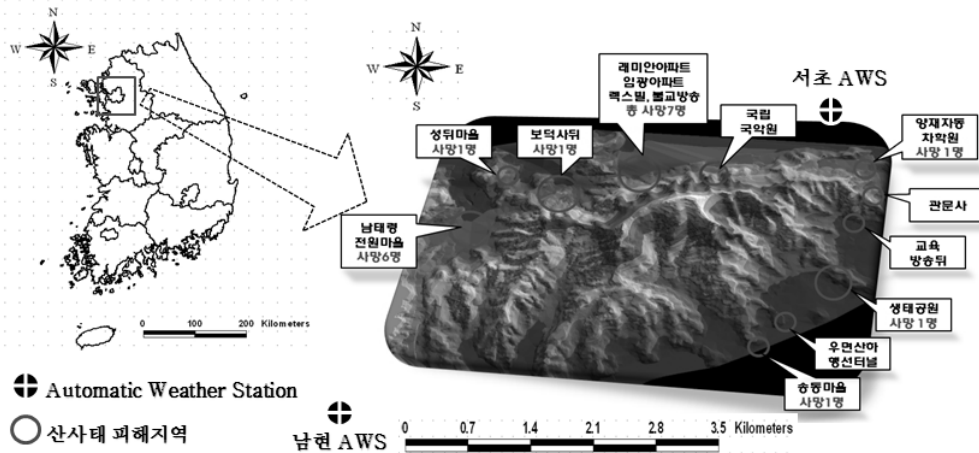


그림 4. 우면산 산사태 발생지역 및 피해현황

III. :

1. 대상유역

본 연구의 대상유역은 서울시 서초구 우면동과 서초동, 강남구 양재동 일대에 위치하고 있는 우면산 지역(그림 4)으로 2011년 7월 26일부터 28일까지 약 530mm의 국지성 집중호우로 인해 산사태가 발생하였다. 이로 인해 발생한 사상자는 총 39명(사망: 18명, 부상: 21명)으로 피해지역인 서초구의 경우 특별재난지역으로 지정되었으며 총 194억 원의 복구비가 투입되었다. 이 지역의 평균해발고도는 295m, 기반암은 편마암 계열이며 임상의 경우 활엽수 계열이 전체의 96.6%로 산사태에 취약한 환경을 가지고 있을 뿐만 아니라 택지개발로 인해 산지 주변부가 절토되어 급경사지를 이루고 있다.

본 연구에서는 무한방향흐름 기법으로 산정된 비 집수면적을 활용하여 대상유역에서의 격자별 분포형 습윤지수를 산정하고, 산사태 발생시기의 강우자료 및 무한사면안정해석 모형을 이용하여 우면산 지역의 사면안정해석을 수행하고, 그 결과를 분석하였다.

2. 사면경사의 산정

사면경사는 무한사면안정해석 모형을 이용한 사면안정률 계산시 결과에 지배적인 영향을 미치므로 신중하

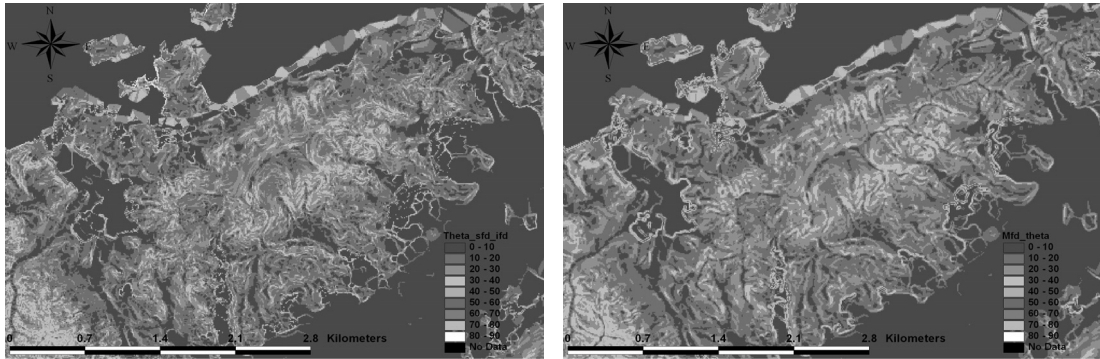
게 결정되어야 한다(Borga *et al.*, 2002). 본 연구에서는 국토지리정보원에서 제공되는 1:5,000 수치지도를 바탕으로 대상유역을 10m×10m 격자로 분할하고, 각 격자에 해당하는 두 가지 형태의 사면경사를 추출하였다. 일반적인 사면경사는 추출방식에 따라 (1)최급경사, (2)평균최대치 경사로 구분될 수 있으며, 최급경사는 흐름방향 중 가장 급한경사, 식 (16)으로 정의되며, 평균최대치 경사는 인접 8개 격자의 표고를 고려한 식 (17)로 정의된다. 그림 5는 경사계산 알고리즘에 따른 우면산 지역의 격자별 사면경사, 그림 6은 각 기법별 경사구간에 해당하는 격자의 분포를 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} \text{셀방향최급경사(Orthogonal)} &= \text{Arctan}(\text{표고차}/\text{밀변거리}) * (180/\pi) \\ \text{셀방향최급경사(Diagonal)} &= \text{Arctan}(\text{표고차}/(\text{밀변거리} * \sqrt{2})) * (180/\pi) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{평균최대치 경사} = \text{Arctan}([\frac{(\delta Z/\delta X)^2 + (\delta Z/\delta Y)^2}{2}]^{1/2}) \quad (17)$$

여기서, δZ : 고도변화, δX , δY : 평면직각좌표에 의한 수평거리변화(격자간 간격)이다.

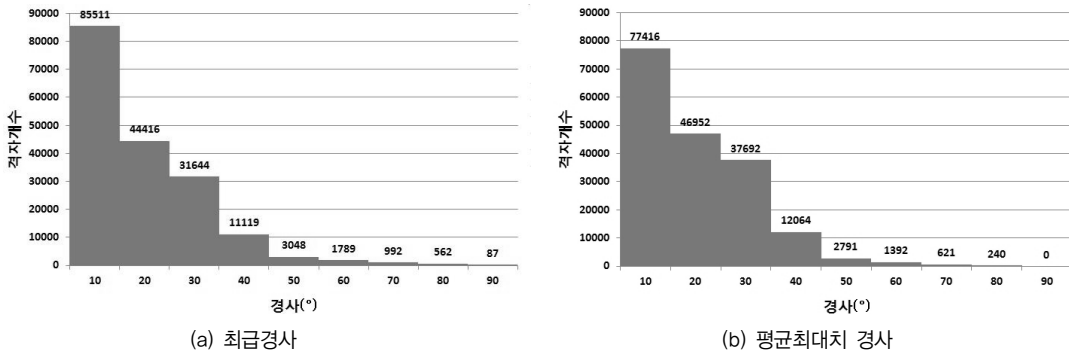
그림 5~6과 같이 경사가 70°이상인 지역의 경우 절개지 주위에서 뚜렷하게 나타나며, 40°~50°이내 지역은 산지 정상부에 위치한다. 40°이상의 경사의 누적 개수는 최급경사의 경우 6,478개, 평균최대치 경사의 경우 5,074개로 급경사지(절개지, 정상부)에서는 최급경사가 더 크게 나타나며 10°~40°의 구간에서는 최급경사의 경우



(a) 최급경사

(b) 평균최대치 경사

그림 5. 경사추출 방법에 따른 사면경사



(a) 최급경사

(b) 평균최대치 경사

그림 6. 최급경사와 평균최대치 경사의 분포 비교

87,179개, 평균 최대치경사의 경우 96,708개로 급경사지 이외의 지역에서는 평균 최대치경사가 더 크게 나타난다. 우면산 지역의 사면경사는 산정기법에 따라 최급경사를 적용한 경우 유역평균 13.08°, 평균최대치 경사의 경우 유역평균 13.62°로 분석되었으며, 이는 지형학적으로 불안정지역에 해당하는 급경사지의 경우 최급경사의 경우가 격자의 수가 더 많은 반면, 이외의 완경사지역의 경우 평균최대치 경사의 경우가 격자의 수가 더 많기 때문에 평균최대치 경사의 경우가 대상유역에 대해서 평균적으로 경사가 더 크게 산정되었다.

3. 비집수면적의 산정

비집수면적은 식 (11)과 같이 단위 등고선 폭(b)에 대한 상부사면의 기여면적(A)으로 정의되며, 일반적인 상부사면의 기여면적은 무한흐름방향 기법을 이용하여 산정된 흐름누적값(flow accumulation value)에 격자의 면

적을 곱하여 표현된다. 본 연구에서는 ArcGIS의 TauDEM (<http://hydrology.usu.edu/taudem>) extension을 이용하여 무한방향흐름기법의 비집수면적을 산출하였으며, 계산된 우면산 지역의 비집수면적은 그림 7과 같다.

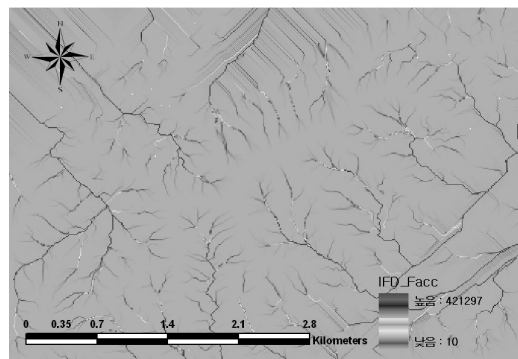


그림 7. 우면산 지역의 비 집수면적 산정결과

4. 강우 입력자료 구축

무한사면안정해석 모형의 적용을 위해서는 기본적으로 산사태 발생시간과 이에 따른 시간별 누적강우량이 필요하다. 그림 4에 표시된 바와 같이 기상청에서 운영하는 우면산 지역의 인접 강우관측소는 서초와 남현 관측소로서 본 연구에서는 그림 8과 같이 7월 26일부터 27일 자정까지의 일 누적강우를 분석하였으며, 모형의 특성상 강우의 시변성과 선행강우를 고려하지 못함으로 선행강우에 대한 분석은 실시하지 않았다. 강우의 입력자료는 두 관측소의 강우시작(26일 17시)부터 산사태가 최초 발생된 시기인 27일 8시 이전의 일 누적강우량과 산사태 최종발생시기인 27일 11시 이전의 누적강우량을 기준으로 이 값들의 평균인 강우량 286mm/day로 결정하였다.

5. 투수계수 및 유효토심의 산정

투수계수는 Rawls and Brakensiek(1985)가 실제 미국 전역의 약 5,000여개의 토양표본에 적용하여 만들어진 경험식인 식 (18)과 식 (19)를 이용하여 산출하였다. 이 식에서 사용되는 변수인 점토의 함량비(%)와 모래의 함량비(%)의 경우 한국 토양정보시스템에서 제공하는 토양통 검색서비스에서 제공되는 입경분포 5개 분류군 중 조사, 중사, 세사는 모래의 함량비(%), 점토는 점토의 함량비(%)로 하여 투수계수를 산정하였다.

$$SAT = 0.332 - 0.0007251 \cdot m_s + 0.1276 \cdot \log_{10}(m_c) \quad (18)$$

$$K_{sat} = EXP[12.012 - 0.0755 \cdot m_s + (-3.895 + 0.03671 \cdot m_s - 0.1103 \cdot m_c + 0.00087546 \cdot m_c^2)/SAT] \quad (19)$$

여기서, m_c 는 점토의 함량(%), m_s 는 모래의 함량(%), K_{sat} 는 포화투수계수(cm/hr)이다. 우면산 지역의 투수계수 공간분포도는 그림 9(a)와 같다.

유효토심은 그림 9(b)와 같이 한국 토양정보시스템에서 제공하는 토양통 검색서비스에서 제공되는 토양통별 기층별 토심의 합산 값을 유효토심으로 환산하여 사용하였다. 우면산지역의 토양통은 송산통과 안릉통 이 대부분을 차지하며 농촌진흥청에서 제공하는 토양통도에 의해 투수계수와 유효토심이 결정되어 그림 9(a)와 (b)가 비슷한 형상으로 나타남을 확인할 수 있다.

6. 흙의 단위중량, 점착력 및 내부마찰각의 산정

흙의 단위중량, 점착력 및 내부마찰각은 토양의 자연적 조건에 따라 같은 토성함량을 가진 같은 토양이라도 그 값이 천차만별이기 때문에 대표 값을 결정하기 어렵다. 본 연구에서는 Rawls *et al.*(1983)이 제시한 토양의 유효공극률과 일반적으로 제시된 흙의 진 비중값 2.65를 기준으로 식 (20)을 통해 표토토성별 포화단위중량을 산출하였다. 농촌진흥청에서 제공되는 표토토성분류군은 9가지로서 미 농무성에서 제공하는 표토토성의 삼각분류표와 비교할 때 분류되지 않은 세사양토, 양질세사토, 양질조사토는 토성의 함량비에 따라 표 2와 같이 세사양토는 사양토로, 양질세사토와 양질조사토는 사토로 재분류하였다.

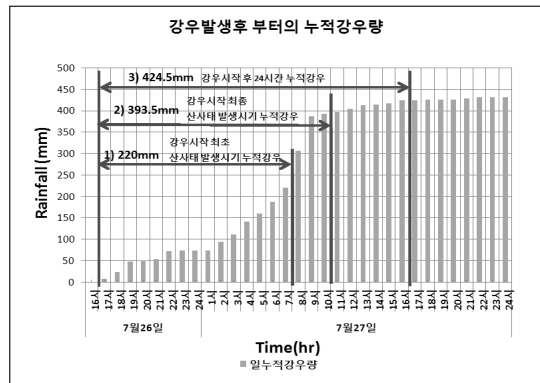
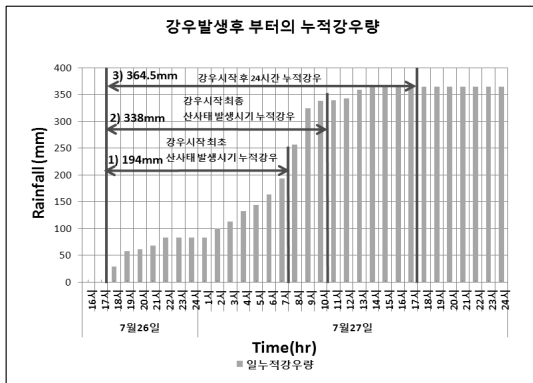


그림 8. 서초 AWS와 남현 AWS의 일 누적강우량

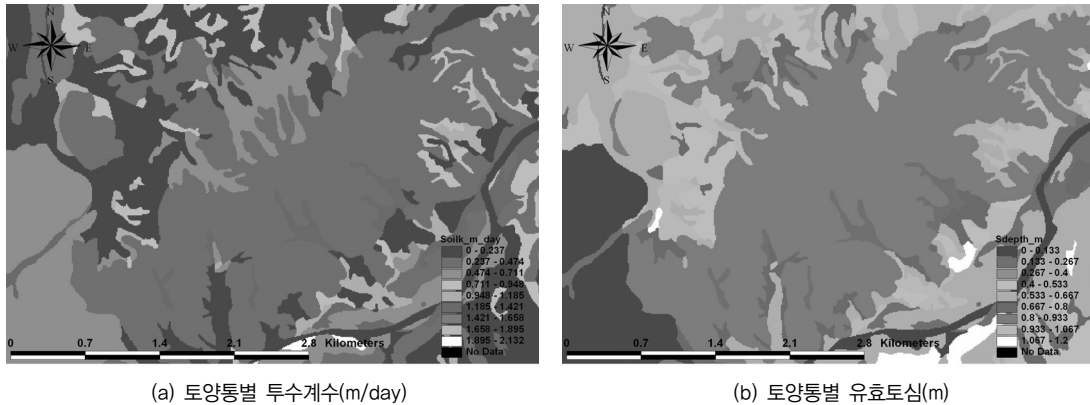


그림 9. 우면산 지역의 투수계수 및 유효토심

표 2. 표토토성별 포화단위중량 분류표

토성타입 (영문명)	한국명	재분류	유효공극률 θ_e (cm ³ /cm ³)	γ_s (t/m ³)
Sand	사토	양질세사토 양질조사토	0.417	2.16
Loamy Sand	양질사토		0.401	2.18
Sandy Loam	사양토	세사양토	0.412	2.17
Loam	양토		0.434	2.15
Silt Loam	미사질양토		0.486	2.11
Sandy Clay loam	사질식양토		0.330	2.24
Clay Loam	식양토		0.309	2.26
Silty Clay Loam	미사질식양토		0.432	2.15
Sandy Clay	사질식토		0.321	2.25
Silty Clay	미사질식토		0.423	2.16
Clay	점토		0.385	2.19

$$\gamma_{sat} = \frac{Gs + e}{1 + e} \gamma_w = 1.145 t/m^2 \quad (20) \quad (21)$$

여기서, G_s 는 흙의 비중, e 는 흙의 공극률, γ_w 는 물의 단위중량(t/m³)이다.

흙의 점착력은 김민구(2005)가 제시한 식을 이용하였으며, 일반적인 모래, 실트, 점토의 점착력을 0, 1, 1.7 (t/m²)로 적용하여 점착력의 함량비별 가중치를 주어 그 값을 산출하였다. 식 (21)은 미사질 식양토(모래 10%, 실트 55%, 점토 35%)에 대한 점착력 산출 예를 보여주고 있다.

$$\text{모래}(0.1 \times 0) + \text{실트}(0.55 \times 1) + \text{점토}(0.35 \times 1.7)$$

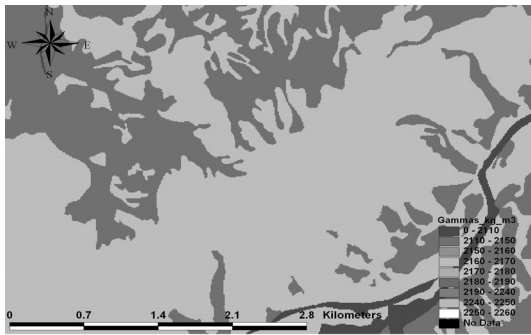
흙의 내부마찰각은 국립방재연구소(2003)에서 제공된 표토토성별 내부마찰각 분류표에 의거하여 이를 토성별로 표 3과 같이 분류하였다. 그림 10은 표토 토성별로 분류된 (a) 포화단위중량, (b) 내부마찰각, (c) 흙의 점착력을 나타내며, 우면산지역의 경우 대부분의 표토 토성군이 사양토로서 점착력은 0.405t/m², 내부마찰각은 28°, 포화단위중량은 2.17t/m³으로 분석되었다.

7. 뿌리점착력의 산정

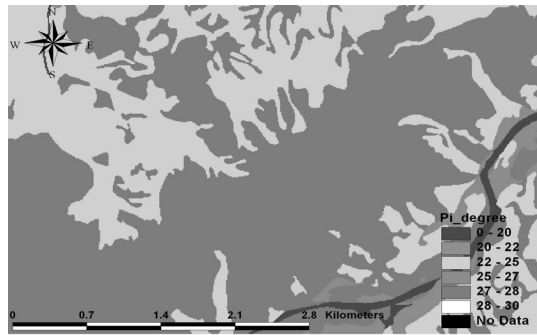
흙의 전단강도를 상승시키는 요인인 뿌리점착력은 임

표 3. 표토 토성별 함량비, 점착력, 내부마찰각 분류표

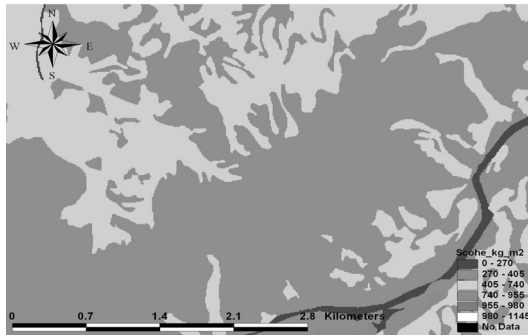
토 질	모래(%)	실트(%)	점토(%)	점착력 (t/m ²)	내부마찰각 (°)
양질사토	80	10	10	0.270	30
사양토	70	15	15	0.405	28
양토	40	40	20	0.740	25
미사질양토	15	70	15	0.955	27
식양토	30	30	40	0.980	20
미사질식양토	10	55	35	1.145	22
양질세사토	100	0	0	0.000	30
양질조사토	100	0	0	0.000	30
세사양토	70	15	15	0.405	27



(a) 표토토성별 포화단위중량(kg/m³)



(b) 표토토성별 흙의 내부마찰각(°)



(c) 표토토성별 흙의 점착력(kg/m²)

그림 10. 우면산 지역의 표토토성별 포화단위중량, 내부마찰각 및 점착력

상 및 영급에 의해 그 값이 결정된다. 본 연구에서는 Wu et al.(1979)이 제시한 식생별 뿌리의 평균인장강도를 기반으로 하여, 산림청에서 제공하는 24개의 식생군을 기준으로 국내 식생분류기준표에 맞게 학명별로 대체수목

을 결정하고, 표 4와 같이 임상별 인장강도를 재분류하였다. 또한 영급을 고려하기위해 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI)와 뿌리의 건조량의 비율에 관한 연구(최정렬, 2010)에서 제시된 1군과 2군의 영급의 변화를 고려

표 4. 수종별 뿌리의 인장강도 재분류

군	학명	일반명	한국명	분류수목	인장강도범위 Ton/m ²	인장강도중간값 Ton/m ²
1군	Psuedotsuga	Douglas Fir	미송나무	소나무림, 소나무인공림, 잣나무림, 낙엽송림, 침엽수혼효림, 침엽수인공림	19~61	40
	Salix	Willows	버드나무		9~36	22,5
	Populus	Populus	포플러나무	포푸라림	5~38	21,5
	Alnus	Alders	오리나무		4~74	39
2군	Acer Sacharinum	Siver Maps	단풍나무	참나무림, 활엽수혼효림, 활엽수인공림, 침활혼효림, 밤나무인공림	15~30	22,5
	Tsuga Heterophylla	Western Hemlock	솔송나무	리기다 소나무림	27	27
	Vaccinum	Huckleberry	월귤나무		16	16
	Hordeum Vulgare	Barley	보리	경작지	15~31	23
		Grass, Forb	잔디	초지	2~20	11
	Aleurites	Candlenut	쿠쿠이나무	황폐지, 미립목지	6	6
	Acacia	Acacia	아카시아		11	11

표 5. 임상별 영급별 뿌리의 평균 점착력 분류표(t/m²)

Species/age	1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~
Douglas Fir	0,017	0,034	0,036	0,058	0,108	0,060
Willows	0,027	0,081	0,084	0,140	0,159	0,157
Populus	0,026	0,077	0,080	0,134	0,152	0,150
Alders	0,047	0,140	0,145	0,243	0,276	0,271
Silver Maps	0,027	0,081	0,084	0,140	0,159	0,157
Western Hemlock	0,032	0,097	0,100	0,168	0,191	0,188
Huckleberry	0,019	0,058	0,060	0,100	0,113	0,111
Barley	0,028	0,083	0,086	0,144	0,163	0,160
Grass, Forb	0,013	0,040	0,041	0,069	0,078	0,077
Candlenut	0,007	0,022	0,022	0,037	0,042	0,042
Acacia	0,013	0,040	0,041	0,069	0,078	0,077

하여 임상별, 영급별 인장강도를 식 (22)를 이용하여 산정하였으며, 그 결과는 표 5와 같다.

$$C_r = 0.6 T_r (A_r/A) \quad (22)$$

여기서, T_r 은 임의전단면에 존재하는 뿌리만의 평균 인장강도(t/m^2), A 는 임의의 전단면의 면적(m^2), A_r 는 임의의 전단면속에 포함되어 있는 뿌리의 전체면적(m^2)이다. 뿌리의 면적비(A_r/A)는 이인도 등(1991)이 연구를 통해 제시한 뿌리의 일반적 면적비 평균값인 0.001을

적용하였다.

그림 11은 우면산 지역의 임상별 영급을 고려한 뿌리 점착력 분류도로서 유역의 대부분이 Silver maps 계열의 4영급과 2영급 계열군으로 분류되어 있는 것을 확인할 수 있다.

앞 절에서 결정된 수문기상학적, 지형학적, 지질학적 인자를 무한사면안정해석 기법에 적용하여 대상유역내 각 격자에 대한 안전률을 계산하였으며, Acharya *et al.*(2006)이 제안한 사면안전률 범위를 이용하여 unstable ($F_s < 1$), quasi stable($1 < F_s < 1.25$), moderately stable(1.25

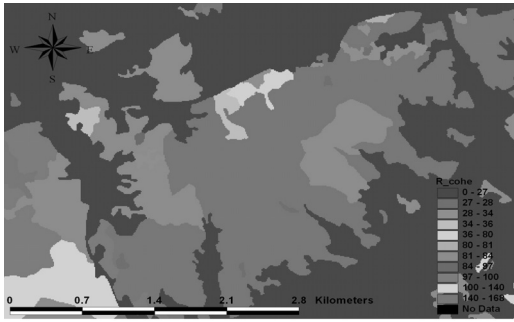


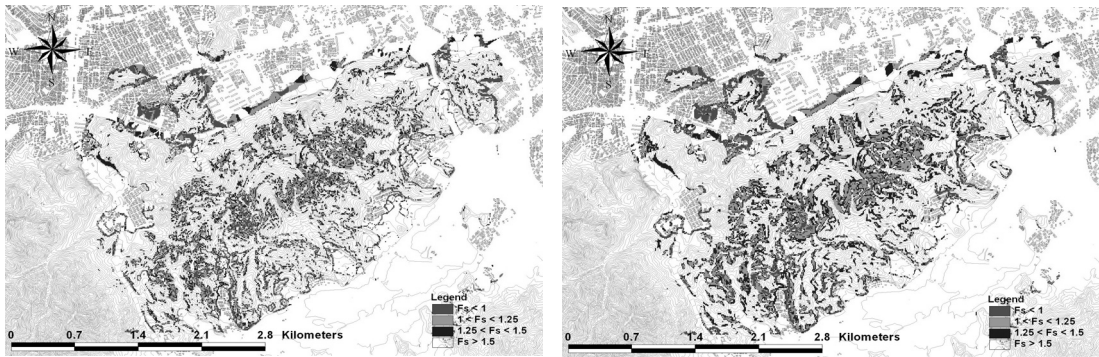
그림 11. 우면산 지역의 뿌리점착력 분류(kg/m²)

< $F_s < 1.5$), stable($F_s > 1.5$)과 같이 4등급화 하였다. 여기서, stable에 해당하는 지역의 경우 모의 대상지역이 순수 우면산 지역만을 고려한 것이 아니라 주거지에 해당하는 평지 및 관악산지역의 산지 일부가 포함되어 있고, 사면안정해석의 주요 목적은 불안정 지역의 시각화이기 때문에 본 연구의 계산결과에서는 stable지역의 영향면적을 고려하지 않았다.

DEM을 이용한 사면경사 계산방식에 따라 최급경사와 평균최대치 경사를 이용하여 사면경사에 따른 대상유역 내 안전율을 계산하고, 이상의 경사변화에 따른 안전률의 비교·분석 결과를 그림 12에 도시하고, 표 6에 정리

하였다. 그림 12와 같이 우면산 지역에서 unstable지역은 절개지와 산지 정상부분에 집중적으로 발달되어 있으며, 이는 그림 5(a)의 급경사지의 공간분포도와 매우 유사함을 확인할 수 있다. unstable지역의 면적은 최급경사를 적용한 경우가 평균최대치 경사를 사용하였을 경우보다 크게 산정된 반면, quasi stable지역과 moderately stable지역의 경우는 평균최대치 경사를 이용한 경우가 최급경사를 이용하여 계산한 유역의 면적보다 더 크게 분석되었다. 이는 최급경사를 적용한 경우 급경사지에 해당하는 격자의 수는 증가한 반면, 준경사 및 완경사지에 해당하는 격자의 수는 평균최대치 경사를 적용한 경우가 더 많아 졌기 때문이며, 식 (8)에 해당하는 매개변수에 의한 안전율의 민감도 분석을 통해 Borgia *et al.*(2002)이 증명한 바와 같이 사면경사는 사면안전률에 영향을 미치는 가장 중요한 지형학적인자이며, 본 연구에서 도출된 우면산 지역의 사면안전률 역시 유역의 지형학적 특성에 의해 지배됨을 확인할 수 있다.

그림 13은 우면산 지역의 불안정(unstable)지역 및 천이(quasi stable, moderately stable)지역에서의 경사에 따른 안전율의 분포(좌) 및 각 경사구간에 해당하는 격자의 수(우)를 나타내고 있다. unstable지역에서의 경사에 따른 안전율 분석도의 경우 격자가 40°~60°지역에 밀



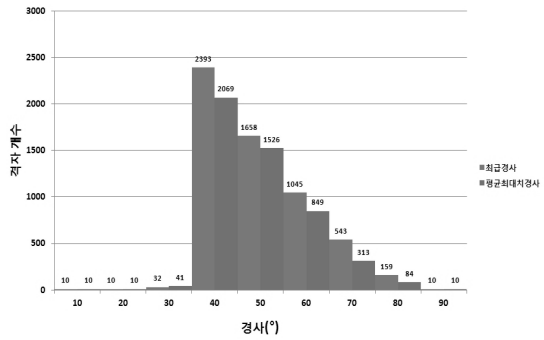
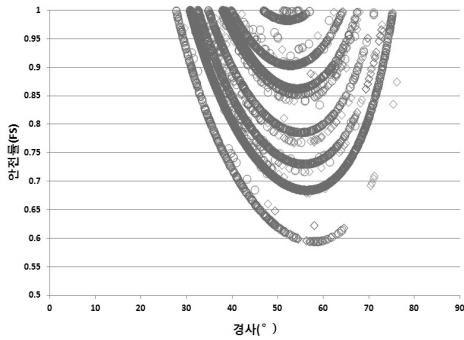
(a) 최급경사를 이용한 사면안전률

(b) 평균최대치 경사를 이용한 사면안전률

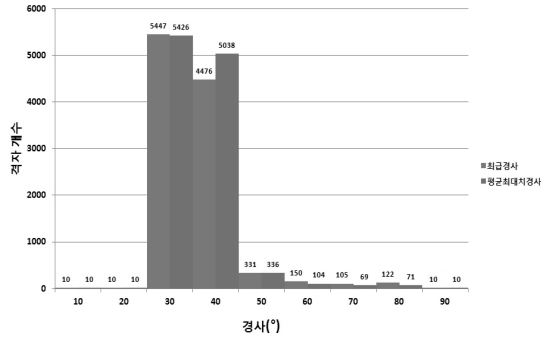
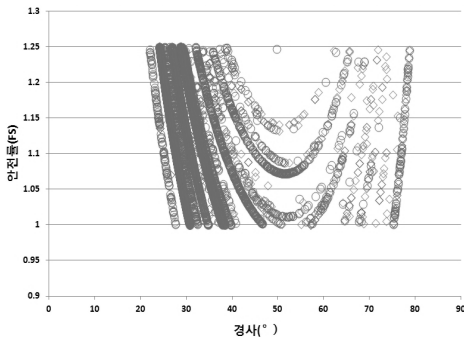
그림 12. 우면산 지역의 사면안정해석 결과

표 6. 사면경사의 변화에 따른 우면산지역의 평균 안전률 및 영향면적

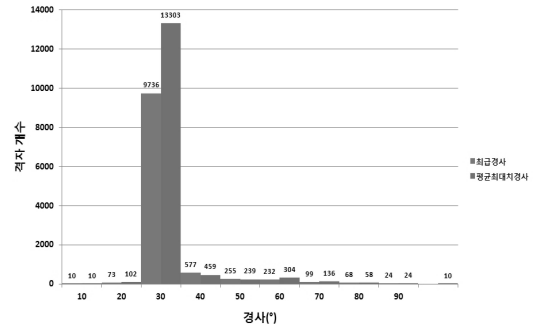
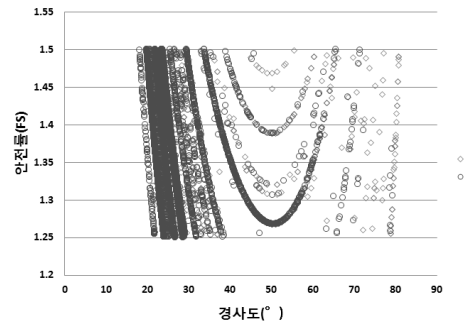
안전율범위 경사계산	$F_s < 1$ (unstable)		$1 < F_s < 1.25$ (quasi stable)		$1.25 < F_s < 1.5$ (moderately stable)		Sum (km ²)
	면적(km ²)		면적(km ²)		면적(km ²)		
최급경사	면적(km ²)	0,577	면적(km ²)	1,057	면적(km ²)	1,098	2,732
평균최대치 경사	면적(km ²)	0,482	면적(km ²)	1,106	면적(km ²)	1,455	3,043



(a) 경사에 따른 안전율 및 격자개수 비교(unstable 지역)



(b) 경사에 따른 안전율 및 격자개수 비교(quasi stable 지역)



(c) 경사에 따른 안전율 및 격자개수 비교(moderately stable 지역)

그림 13. 사면안정 등급별 경사에 따른 안전율 및 격자 개수 비교결과

집되어 있는 양상을 보이며, 히스토그램을 통해 살펴보면 최급경사의 경우가 평균최대경사의 경우에 비해 40°~60°구간에 존재하는 셀의 개수가 더 많음을 알 수 있다.

여기서 주목할 만한 사항은 일반적으로 경사가 급해짐에 따라 사면안전률이 감소할 것으로 예상되지만, 다양한 사면경사에서 동일한 사면안전률을 나타내고 있으며, 이는 무한사면안정해석 기법에 사용되는 다양한 매

개변수들의 상호작용들에 의해 비록 경사가 급하지 않은 격자에서도 낮은 안전율을 나타낼 수 있음을 의미한다. 예를 들어, 산지하부의 경우 산지정상부근보다 완만한 경사를 보이지만, 비 침수면적의 경우 지표하수의 수렴으로 인하여 산지하부가 산지정상보다 훨씬 크므로 불안정한 사면특성을 나타낼 수 있음을 의미한다.

quasi stable지역에서의 경사변화에 따른 안전율 분포도의 경우 격자가 30°~40°지역에 밀집되어 있는 양상을

보이며, 평균최대치 경사의 경우가 최급경사의 경우에 비해 30°~40°구간에 존재하는 격자의 수가 더 많음을 알 수 있다. 또한 moderately stable지역에서의 경사에 따른 안전율의 변화를 살펴보면 대부분의 격자가 경사가 30° 구간에 밀집되어 있는 양상을 보이며, quasi stable지역과 마찬가지로 평균최대치 경사의 경우가 최급경사의 경우보다 30°구간에 존재하는 격자의 개수가 더 많음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터, 우면산 지역의 사면불안정이 예상되는 경사구간은 40°~60°, quasi stable지역의 경사구간은 30°~40°, moderately stable지역의 경우 30°로 경사가 완만해질수록 안정상태에 가까워지며, 반대로 그 경사가 급해질수록 불안정상태에 가까워짐을 확인 할 수 있다.

하지만, 본 모형의 적용상에 있어 모형이 가지는 정상상태의 특성상 입력강우자료와 비 집수면적의 시변성을 고려하지 못한다는 점, 선형 습윤지수, 즉 토양이 가지는 초기포화도를 고려하지 못한다는 단점을 가지고 있으며, 이는 최종적으로 습윤지수 산출 및 이에 따른 사면안전율을 변화시키는 요인이 된다. 마찬가지로, Montgomery and Dietrich (1994) 및 Ray *et al.*(2005)은 이와 같은 정상상태의 무한사면안정해석 모형의 경우 산사태 발생위치에 관한 기초정보로는 활용이 가능하지만, 산사태의 시·공간적 발생원인에 대한 완벽한 물리적 해석은 불가능하다고 지적한 바 있다.

다시 말해서, 그림 13에서 나타난 바와 같이 경사가 매우 급한 지역에서도 안전율이 매우 높을 수 있으며, 상대적으로 환경사지에서도 상당히 낮은 사면안전율이 나타날 수 있는데 이는 입력자료의 불확실성, 모형의 불확실성, 매개변수 산정의 불확실성 등에서 기인하며, 이러한 불확실성을 제거하고, 보다 물리적으로 타당한 사면해석 결과를 도출하기 위해서는 물리적 기반의 분포형 사면안정해석 모형이 필요할 것으로 판단된다.

V.

본 연구에서는 2011년 7월 27일 집중호우로 인한 우면산 산사태 지역을 대상으로 공간분포형 습윤지수를 적용한 뿌리보강 무한사면안정해석 기법을 통해 사면안정해석을 실시하였다. 국토지리정보원의 수치지도, 농촌

진흥청에서 제공하는 정밀토양도, 산림청에서 제공하는 임상도를 통해 GIS기반의 사면안정해석을 위한 데이터 베이스를 구축하였으며, 분포형 습윤지수의 생성을 위한 비 집수면적의 산정은 ArcGIS의 TauDEM extension의 무한방향흐름기법을 적용하였다. 또한, 사면경사는 최급경사와 평균최대치 경사를 고려하고, 강우의 입력 자료는 산사태 발생초기와 종기의 누적강우량의 평균, 286mm/day를 적용하였다. 본 연구로부터 도출된 주요 결과는 다음과 같다.

1. 유역내 사면경사의 평균값은 각 경사계산 알고리즘에 따라 최급경사는 13.08°, 평균최대치 경사는 13.62°로 최급경사보다 평균최대치 경사가 더 크게 분석되었다. 하지만 unstable지역의 경우 평균최대치 경사 보다 최급경사에서 영향면적이 넓게 나타났으며, 대부분의 unstable지역은 경사가 매우 큰 절개지(산지하부 거주지 주변)와 산정상부에 집중적으로 위치하였다. 반면, 천이지역(quasi stable, moderately stable)의 경우 최급경사 보다 평균최대치 경사의 경우가 영향면적이 넓게 나타났으며, 이는 급경사지에 위치한 unstable지역 이외의 환경사 지역에 집중적으로 분포되어 있음을 시각적으로 확인하였다.
2. 사면안정해석 각 등급에서의 경사구간에 따른 안전율 및 격자개수의 결과를 살펴보면, unstable지역은 사면경사 40°~60°, quasi stable지역의 경우 30°~40°, moderately stable지역의 경우 30°에서 집중적으로 발생되었다. 이는 강우에 의한 유역의 동적 특성의 변동에 의한 것이라기보다는 유역 고유의 지형학적 특성인 경사에 의해 기인한 것이며, Borga *et al.*(2002)이 언급한 바와 같이 경사가 급해지면 사면이 불안정상태에 가까워지며, 경사가 완만해지면 사면이 안정상태에 가까워지는 양상이 명확하게 나타났다.
3. 이상의 결과로부터 정상상태의 무한사면안정해석 기법을 이용한 사면안정의 해석의 경우 사면경사의 산출방법에 따라 해석결과에 매우 민감하게 영향을 미칠 수 있음을 확인하였고, 따라서 사면경사 산정 시 유역의 지형학적 특성(절개지, 산정상부, 계곡, 능선 등)을 보다 상세하게 반영할 수 있는 방법을 선택한다면 좀 더 정확한 사면안정해석 모의

가 가능할 것으로 판단된다.

4. 또한 사면경사가 다름에도 불구하고 동일한 안전율을 갖는 경우가 발생하였는데, 이는 무한사면안정해석에 사용되는 수문기상학적, 지형학적, 지질학적 매개변수의 복합적 상호작용으로부터 기인한 것으로 판단되며, 본 연구에서 적용한 사면안정해석 모의기법이 가지는 정상상태의 특성으로 인해 강우와 습윤지수의 시·공간적 변동성 및 선행강우에 따른 토양의 초기 습윤지수를 고려하지 못한다는 단점을 가지고 있다. 따라서 염면적지수를 이용한 토양의 초기함수비 추정 및 동역학적 수리모형을 이용한 지표하수의 거동을 모의기법을 사면안정해석에 활용한다면, 보다 물리적으로 타당하고, 정확한 사면재해 해석 및 예방을 위한 중요한 도구로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 국립방재연구소, 2003, 「지리정보시스템을 이용한 사면붕괴 재해 연구」.
- 김민구, 2005, “뿌리보강모형을 활용한 GIS 산사태 위험도 작성방법연구,” 성균관대학교 석사학위논문.
- 박덕근·오정림·박정훈, 2006, “우리나라 지반재해와 방재정책,” 대한지질공학회 심포지움 논문집, 185-189.
- 산림청, 2010, 산사태·임도 등 수해피해 현황 관련 통계자료.
- 이사로, 1999, “지리정보시스템(GIS)을 이용한 산사태 취약성 분석 기법 개발 및 적용 연구,” 연세대학교 박사학위논문.
- 이수근·이경수·김병호, 2008, “절취사면 설계 현황에 대한 연구,” 한국방재학회 학술발표회 논문집, 569-572.
- 이인모·성상규·임충모, 1991, “뿌리의 강도가 자연사면 안정에 미치는 영향에 관한 실험연구,” 대한토질공학회지, 7(2), 51-66.
- 이현우, 2011, “확률론적 해석기법과 지리정보시스템(GIS)을 이용한 산사태 취약성 분석,” 세종대학교 석사학위논문.
- 최정렬, 2010, “생태수문모형과 사면안정모형을 이용한 내린천 유역의 잠재 산사태 위험도 평가,” 강원대학교 석사학위논문.
- Acharya, G., De Smedt, F., and Long, N. T., 2006, Assessing landslide hazard in GIS: a case study from Rasuwa, Nepal, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(1), 99-107.
- Borga, M., Dalla Fontana, G., and Cazorzi, F., 2002, Analysis of topographic and climatic control on rainfall-triggered shallow landsliding using a quasi-dynamic wetness index, *Journal of Hydrology*, 268 (1-4), 56-71.
- Borga, M., Dalla Fontana, G., Da Ros, D., and Marchi, L., 1998, Shallow landslide hazard assessment using physically based model and digital elevation data, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 35(2-3), 81-88.
- Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E., 1994, A physically based model for the topographic control on shallow landsliding, *Water Resources Research*, 30(4), 1153-1171.
- O'Callaghan, J.F. and Mark, D.M., 1984, The extraction of drainage networks from digital elevation data, *Computer vision, Graphics and Image Processing*, 28(3), 324-344.
- O'loughlin, E.M., 1986, Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis, *Water Resources Research*, 22(5), 794-804.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., and Plancheon, O., 1991, The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models, *Hydrological Process*, 5(1), 59-79.
- Rawls, W.J. and Brakensiek, D. L., 1985, Prediction of soil water properties for hydrologic modeling, Watershed Management in the Eighties, in Jones, E and Ward, T.J. eds., *Proceedings of a Symposium ASCE*, New York, 293-299.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., and Miller, N., 1983, Green-Ampt infiltration Parameters from soil data, *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(1), 62-70.
- Ray, R.L. and De Smedt, F., 2009, Slope stability analysis using GIS on a regional scale: a case study from Dhading, Nepal, *Environmental Geology*,

57(7), 1603-1611.

- Tarboton, D.G., 1997, A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resources Research*, 33(2), 309-319.
- Van Westen, C.J. and Terlim, T.J., 1996, An approach deterministic landslide hazard analysis in GIS: a case study Manizales (Colombia), *Earth Surface Processes Landforms*, 21(9), 853-868.
- Wu, T.H., McKinell, W.P., and Swanston, D.N., 1979, Strength of tree roots and Landslide on prince of WALES Island, Alaska, *Canadian Geotechnical Journal*, 16(1), 19-33.

교신 : 이기하, 742-711, 경상북도 상주시 경상대로 2559
경북대학교상주캠퍼스, 경북대학교 건설방재공학부
(이메일: leegiha@knu.ac.kr)

Correspondence : Gi-ha Lee, 742-711, 2559 Gyeongsang-
daero, Sangju-si, Gyeongsangbuk-do, Korea, Department
of Construction and Disaster Prevention Engineering,
Kyungpook National University (Email: leegiha@
knu.ac.kr)

투 고 일: 2014년 11월 28일

심사완료일: 2014년 12월 10일

투고확정일: 2014년 12월 15일