

무한사면안정해석모형을 이용한 우면산 산사태 분석

Analysis on Mt. Umyeon Landslide Using Infinite Slope Stability Model

이기하*, 오성렬**, 이대업***, 정관수****

Gi Ha Lee, Sung Ryul Oh, Dae Up Lee, Kwan Sue Jung

요 지

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, 정밀도양도 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. 대상구역의 사면안정해석을 위해 격자별 안전률은 4개의 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.

핵심용어 : 부등류, 상류수위, 설계모형, 암거, 흐름해석

1. 서론

우리나라는 전 국토의 70%가 산지로 구성되어 있으며, 매년 집중호우로 인한 사면붕괴가 발생하여 연평균 60여명의 인명피해와 수 천억원 이상의 재산피해가 발생하고 있다. 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. 이러한 사면재해는 전체 자연재해 사망자 대비 비율을 볼 때 22.3%로 단일 유형의 재해유형 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 포화상태의 시·공간적 변동성을 모의할 수 있는 정량적인 해석기법이 요구된다.

* 정회원 · 충남대학교 국제수자원연구소 연구원 · E-mail : leegiha@gmail.com
** 충남대학교 토목공학과 석사 · E-mail : ohsungryul@nate.com
*** 충남대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : daeup-lee@nate.com
**** 정회원 · 충남대학교 토목공학과 교수 · E-mail : ksjung@cnu.ac.kr

사면안정해석에 있어 강우에 따른 토양 습윤지수의 시·공간적 변동성은 산사태 위험해석을 위한 매우 중요한 영향인자임에도 불구하고, 그 값을 대상구역 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 구역의 지형학적 특성에 따른 습윤지수의 공간분포를 고려하기 위하여 무한방향흐름방법(infinity flow direction method; Tarboton, 1997)을 이용한 비 집수면적(specific catchment area)의 개념을 도입하여 2011년 7월 26일부터 28일까지의 집중호우로 인한 서울시 우면산 산사태 지역을 대상으로 사면안정해석을 수행하고, 대상구역의 격자별 사면안전률(safety factor, Fs)을 도출하였다.

2. 기본이론

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.

2.1 무한사면안정모형

간극수압(u)의 영향에 의해 감소되는 흙의 단위중량과 사면에 작용하는 상재하중(w)의 영향을 고려하면 무한사면안정해석식은 식 (1)과 같다(Borga et al., 2002).

$$s = \frac{c_s + c_r + [\cos^2\theta\gamma_s(D - D_w) - \cos^2\theta D_w(\gamma_s - \gamma_w) + w \cos\theta] \tan\Phi}{D\gamma \sin\theta \cos\theta + w \sin\theta} \quad (1)$$

여기서, θ 는 사면경사($^\circ$), Φ 는 내부마찰각($^\circ$), c_s 는 흙의 점착력(kN/m²), c_r 은 뿌리점착력(kN/m²), D 와 D_w 는 모암으로부터 지표면까지의 높이(m) 및 수위(m), γ_w 는 물의 단위중량(kN/m³), γ_s 는 흙의 포화단위중량(kN/m³), w 는 상재하중(kN/m²)이다.

2.2 습윤지수

비 집수면적을 고려한 습윤지수는 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$m = \frac{h_w}{h} = \frac{D_w}{D} = \text{Min} \left\{ \frac{ia}{Khsin\theta}, 1 \right\} \quad (2)$$

여기서, b 는 흐름방향의 단면 폭(m), i 는 강우강도(m/s), A 는 유출기여면적(m²), $a = A/b$ 로 a 는 비 집수면적, m 은 습윤지수로써 그 범위는 0(건조)~1(포화)이며, 1이상인 경우 지표흐름(overland flow)이 발생한다. Eq. (12)는 유출기여면적(contributing area)의 모든 흐름이 하부지역 임의의 한 지점으로 수렴한다는 가정을 기반으로 하고 있으며, 이때 상부사면으로부터 하부로 진행시의 흐름의 지체, 저류 등은 고려하지 않는다(Ray and De Smedt, 2009). 토양이 포화되어 지표류가 발생하고, 습윤지수가 커짐에 따라 안전율은 감소하게 되며, 습윤지수가 작아짐에 따라 안전율은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 산사태 발생의 위치를 규명하기 위해서는 강우로 인한 토양의 습윤지수 변동성을 공간적으로 모의할 수 있어야 하며, 격자기반의 DEM(digital elevation model)로부터 산출되는 흐름방향(flow direction) 및 유출기여면적 정

보는 습윤지수 산정에 매우 유용하게 활용될 수 있다(Tarboton, 1997).

2.3 무한방향흐름기법

무한방향흐름 기법은 실제 유출기여면적이거나 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).

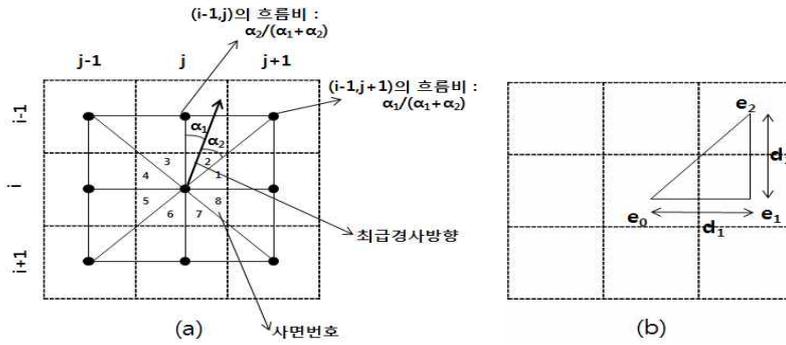


그림 1. 무한방향흐름 기법의 (a) 흐름분배 알고리즘, (b) 경사계산 알고리즘

그림 1은 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 1(a)와 같이 8개의 삼각형 개체를 구성할 수 있다. 여기서 각 개체의 경사는 식 (3)으로 정의되는 경사벡터로 정의할 수 있다.

$$= (e_0 - e_1)/d_1; s_2 = (e_1 - e_2)/d_2 \quad (3)$$

여기서, s_1, s_2 는 각 Y 성분의 경사벡터, e_0, e_1, e_2 는 각 격자의 표고값, d_1, d_2 는 각 표고간의 거리를 나타내며, 식 (3)을 통해 구해진 경사벡터의 r 과 s 는 다음과 같이 산정된다.

$$r = \tan^{-1}(s_2/s_1); s = (s_1^2 + s_2^2)^{1/2} \quad (4)$$

이렇게 구해진 r 은 8방향 격자에서 흐름방향을 결정하는 경사 값을 산출하며, 이 값을 통해 8개의 개체의 위치와 그 분기율의 산출이 가능하다. 만약 식 (4)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.

$$\begin{aligned} r < 0 & : r = 0; s = s_1 \\ r > \tan^{-1}(d_2/d_1) & : r = \tan^{-1}(d_2/d_1); s = (e_0 - e_2)/(d_1^2 + d_2^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

이상의 과정에서 산정되는 8개의 개체 경사 중 최급하향경사(steepest descent slope)를 선택하

여기에 해당하는 r 과 s 를 중앙 격자점의 흐름방향 및 사면경사를 결정하게 된다. 사면별 r 을 계산하는 일반식은 다음과 같이 나타낸다.

$$r = a_f r + a_c \pi / 2 \tag{6}$$

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

표 1. 경사와 각도 계산을 위한 사면 방향별 계수 (Tarboton, 1997)

	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_f	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1

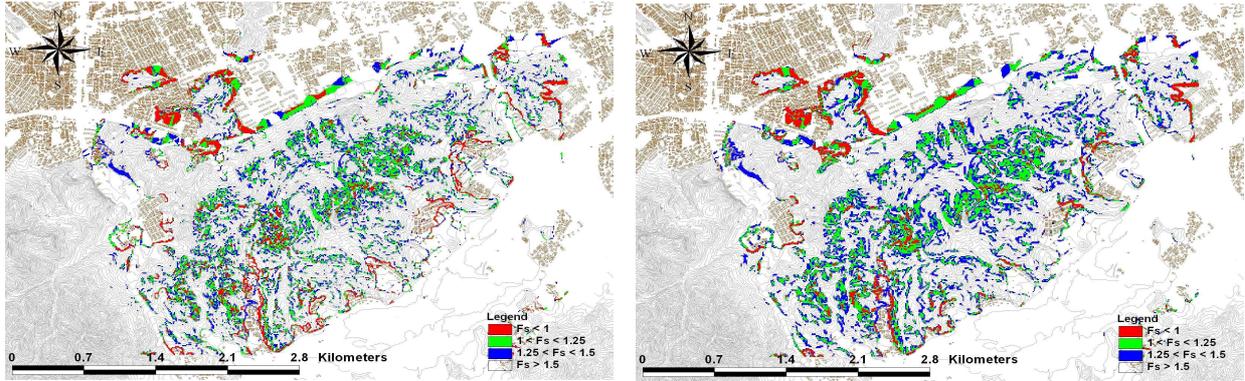
3. 모형의 적용 및 결과

본 연구에서는 무한방향흐름기법으로 산정된 비 집수면적을 활용하여 2011년 7월 26일부터 28일까지의 집중호우 기간동안 서울시 우면산 지역에서의 격자별 분포형 습윤지수를 산정하고, 산사태 발생시기의 강우자료 및 무한사면안정해석 모형을 이용하여 우면산 지역의 사면안정해석을 수행하고, 그 결과를 분석하였다.

격자기반의 수문기상학적, 지형학적, 지질학적 인자를 무한사면안정해석 기법에 적용하여 대상유역내 각 격자에 대한 안전률을 계산하였으며, Acharya et al.(2006)가 제안한 사면안전률 범위를 이용하여 unstable($s < 1$), quasi stable($1 < Fs < 1.25$), moderately stable($1.25 < Fs < 1.5$), stable ($Fs > 1.5$)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 대상유역내 안전율을 계산하고, 이상의 경사변화에 따른 안전률의 비교·분석 결과를 그림 2에 도시하고, 표 2에 정리하였다. 그림 2와 같이 우면산 지역에서 unstable지역은 절개지와 산지 정상부분에 집중적으로 발달되어 있으며, 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 (1)에 해당하는 매개변수에 의한 안전율의 민감도 분석을 통해 Borga 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.



(a) 최급경사를 이용한 사면안전률

(b) 평균최대치 경사를 이용한 사면안전률

그림 2. 우면산 지역의 사면안정해석 결과

표 2. 사면경사의 변화에 따른 우면산지역의 평균 안전률 및 영향면적

안전율범위 경사계산	<1 (unstable)		1 < F_s < 1.25 (quasi stable)		1.25 < F_s < 1.5 (moderately stable)		Sum (km ²)
	면적(km ²)	0.577	면적(km ²)	1.057	면적(km ²)	1.098	
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

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신 F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단 및 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2011-0006960)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 박덕근, 오정림, 박정훈 (2006) 우리나라 지반재해와 방재정책, 대한지질공학회 학술발표논문집, 대한지질공학회, pp.185-189.
2. 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, Vol.65, No. 1, pp.99-107.
3. 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, Vol.268, No.1-4, pp.56-71.
4. 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, Vol.57, No.7, pp.1603-1611.
5. Tarboton, D.G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, Water Resources Research, Vol.33, No.2, pp.309-319.