비 집수면적 산정기법에 따른 사면 안정성 비교·분석 A Comparative Analysis on Slope Stability Using Specific Catchment Area Calculation

이 기 하* / 오 성 렬** / 안 현 욱*** / 정 관 수****

Lee, Gi Ha / Oh, Sung Ryul / An, Hyun Uk / Jung, Kwan Sue

Abstract

There has been an increase for the landslide areas and restoration expenses due, in large part, to the increased locally heavy rains caused by recent climate change as well as the reckless development. This study carried out a slope stability analysis by the application of distributed wetness index, using the GIS-based infinite slope stability model, which took the root cohesion effect into consideration, for part of Mt. Umyeon in Seoul, where landslide occurred in July 2011, in order to compensate the defects of existing analysis method, and subsequently compared its result with the case on the exploitation of lumped wetness index. In addition, this study estimated the distributed wetness index by methodology, applying three methods of specific catchment area calculation: single flow direction (SFD), multiple flow direction (MFD), and infinity flow direction (IFD), for catchment area, one of the variables of distributed wetness indices, and finally implemented a series of comparative analysis for slope stability by methodology. The simulation results showed that most unstable areas within the study site were dominantly located in cutting-area surroundings along with the residential area and the mountaintop and unstable areas of IFD and lumped wetness index method were similar while SFD and MFD provided smaller unstable areas than the two former methods.

Keywords : Mt. Umyeon landslide, slope stability analysis, wetness index, infinite slope stability model, specific catchment area

요 지

최근 기후변화에 따른 집중호우의 증가 및 무분별한 유역개발에 의한 산사태 발생빈도 및 재해복구비용이 증가하고 있는 추세이다. 본 연구에서는 2011년 7월에 발생한 서울시 우면산 지역을 대상으로 뿌리 점착력을 고려한 GIS기반의 무한사면안정모형을 이용하여 사면안정해석을 수행하였다. 무한사면안정모형의 중요 매개변수인 습윤지수의 공간분포화를 위해 비 집수면적 개념을 도입하였으며, 세가지 기법(일방향 흐름기법, 다방향 흐름기법, 무한방향 흐름기법)을 이용하여 비 집수면적을 산정하고, 각 기법에 따른 대상유역내의 격자별 사면안정율의 변화양상을 분석하였다. 또한, 기존의 무한사면안정모형을 이용한 사면안정해석에 일반적으로 적용되고 있는 공간집중형 습윤지수 결과와의 비교를 통하여 우면산 지역의

* 국회입법조사처 경제산업조사실 국토해양팀 입법조사관 (e-mail: leegiha@assembly.go.kr)

Legislative Researcher, Land, Transport and Maritime Affairs Team, National Assembly Research Service, Seoul 150-703, Korea

** 충남대학교 공과대학 토목공학과 석사 (e-mail: ohsungryul@nate.com)

Graduated student, Dept. of Civil Eng., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

*** 교신저자, 국가수리과학연구소 계산수리과학연구부 수치프로그래밍연구팀 연구원 (e-mail: hanlight20@hotmail.com)

Corresponding Author, Researcher, Numerical Program Team, Division of Computational Sciences in Mathematics, National Institute for Mathematical Sciences

**** 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: ksjung@cnu.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

사면안정 해석의 차이점을 비교·분석하였다. 무한사면안정모형을 이용하여 산정된 사면안전을 분석결과, 거주지 주변의 절개지 부근과 산지정상부근의 급경사지에서 불안정 지역이 집중적으로 분포하고 있음을 확인하였으며, IFD와 집중형 습윤지수에 의한 불안정지역은 유사하게 나타난 반면, SFD와 MFD에 의한 불안정지역은 앞선 두 가지 기법에 비해 작게 산정되었다.

핵심용어 : 우면산 산사태, 사면안정해석, 습윤지수, 무한사면정해석모형, 비 집수면적

1. 서론

지구온난화로 인한 급격한 기후변화에 의해 집중호우의 빈도 및 강도가 증가하고, 지속적인 유역개발에 따른 토지이용의 증가는 산사태 위험성을 가중시키고 있다. 우리나라의 경우 국토의 70% 이상이 산지로 구성되어 있는 지형학적 특성을 비롯하여 국토의 지속적인 개발로 인해 매년 집중호우로 인한 산사태가 발생하여 피해면적 및 복구비가 지속적으로 증가하고 있는 추세이다(이수곤 등, 2008).

박덕근 등(2006)에 의하면 1976~2005년까지 산사태 및 사면재해 발생관련 사망자는 총 1,321명으로 연평균 약 47명, 전체 자연재해로 인한 사망자 대비 22.3%를 차지하고 있으며, 이는 단일유형의 재해로서 사망자 비율이 가장 높은 것으로 나타났다. 또한, 국내의 산사태의 경우 강원도 등과 같은 산지지형에서 장마전선 정체 및 태풍의 이동경로 등에 의한 집중호우로 산사태가 집중적으로 발생하였으나 최근 들어 이상기후에 따른 국지성호우로 인해 수도권 지역 등 도심지내의 산사태 발생빈도가 증가하고 있으며, 이에 따른 인명 및 재산피해 증가로 인해 산사태 방지 및 피해 저감을 위한 적절한 대책이 요구된다(소방방재청, 2009).

산사태는 넓은 범위에 걸쳐 동시 다발적으로 발생하며, 발생 후에는 인위적으로는 멈출 수 없기 때문에 발생가능 지역에 대한 사전 분석을 통한 적절한 예방시설의 설치를 통해 피해를 최소화 하는 것이 바람직하다. 따라서 산사태 발생가능성에 대한 광역적 평가가 필요하며, 산사태위험지도의 제작 및 배포 등과 같은 정보의 활용이 요구된다. 국외의 경우 산사태 관련 기술선진국에서는 국가적 차원에서 산사태 예방 및 관리를 위한 위험지도를 제작·운영하고 있으며, 특히 미국의 경우 주별로 표준화된 위험지도 제공하고 있다(김민구, 2005). 국내에서도 산림청에서 산사태위험지관리시스템(<http://sansatai.forest.go.kr/>)을 통해 위험지 정보를 제공하고 있으나 이는 산사태 발생인자들에 대해 발생확률 가중치를 배점하여 위험성을 측정하

는 방법으로서 평가자의 주관적 판단이 개입될 여지가 남아있기 때문에 방법론상의 모호성이 남아있다. 뿐만 아니라 전술한 시스템은 산사태를 발생시키는 직접적인 외적 요인(강우, 지진)에 대해 고려하지 않았으며, 지반파괴에 직접적인 영향을 미치는 전단강도(점착력 및 내부마찰각 등)와 관련된 인자들이 고려되지 못한다는 단점이 있다. 따라서 이러한 제약사항을 극복하기 위해서는 보다 과학적이고, 객관적인 산사태 모의 및 해석기법의 제시가 필요한 실정이다.

전술한 바와 같이 산사태 발생 메커니즘은 유역의 내적 요인(지형, 지질 등)뿐만 아니라 외적 요인(수문기상 등)의 시·공간적 변동성에 의해 상당히 복잡하기 때문에 다양한 요인들에 대한 방대한 양의 관련정보들의 효율적 처리와 분석을 위해 GIS(geographic information system)와 같은 공간분석시스템의 활용이 절대적으로 필요하다(Wang et al., 2005). 일반적으로 GIS를 이용한 산사태 해석기법은 크게 가중치(weight or ranking)를 이용한 지수기법(index method), 통계적 해석기법(statistical method)과 결정론적 해석기법(deterministic method)으로 구분할 수 있다(Wang et al., 2005).

산림청에서 운영하고 있는 산사태위험지관리시스템은 GIS를 이용한 지수기법의 한 예로써 수치지형도, 수치임상도, 수치입지도, 수치지질도를 기반으로 국립산림과학원에서 제시한 산사태 위험지 판정기준 및 인자별 점수표를 이용하여 산사태 발생 위험등급을 1등급에서 4등급까지 구분하고 있다(산림청, 2005). 국외의 경우 1980년대 후반, GIS 보급 초창기에 GIS 지수기법을 이용한 연구(Wagner et al., 1988; Gupta and Joshi, 1989)가 다수 수행된 바 있으며, 이 기법은 산사태 관련 광범위한 공간정보들을 신속하게 처리할 수 있는 반면, 가중치 결정에 있어 객관성이 결여될 수 있는 단점을 가지고 있다.

또한, 산사태 위험해석을 위해 일반적으로 사용되는 통계적 해석기법으로써 로지스틱 회귀분석(logistic regression analysis)이 있으며, 이 기법은 종속변수를 산사태 발생유무로 하고, 독립변수를 산사태 발생 영향인자로 적용

하여 종속변수와 독립변수간의 관계를 추정한다(이용준 등, 2006). 한국지질자원연구원에서는 로지스틱 회귀분석을 이용하여 확률론적 산사태 예측지도를 작성한 바 있다(소방방재청, 2009). 이 기법은 실제 산사태가 발생한 지역의 자료를 대상으로 영향인자의 민감도 분석이 이루어지므로 대상유역에 대해서 비교적 신뢰도가 높은 산사태 발생확률 정보를 제공할 수 있지만, 지수기법과 마찬가지로 산사태를 발생시키는 외적 요인이 반영되지 않으며, 타 지역으로 적용 시 예측결과에 불확실성을 초래할 수 있는 단점을 가지고 있다.

물리적 기반의 모형을 이용한 결정론적 산사태 위험해석 기법의 경우, 산사태 발생 메카니즘의 물리적 과정을 정식화하여 모형에 반영함으로써 외적 요인의 변동에 따른 사면안전율(safety factor)을 산정하고, 산사태 발생 위험지역을 판별할 수 있는 근거를 제공해준다(오경두 등, 2006). 국외의 경우 다양한 물리적 기반의 결정론적 산사태 해석모형이 개발되었으며, 이상의 모형들은 다음과 같이 두 가지 범주로 구분할 수 있다. 1) 지표하흐름(subsurface flow)을 정상상태(steady-state)로 가정하여 산사태 위험을 해석하는 모형(SHALSTAB: Montgomery and Dietrich, 1994; SINMAP: Pack et al., 1998)과, 2) 강우에 따른 토양의 침투특성의 시·공간적 변동성을 고려하여 지표하흐름 해석에 근거한 모형(CHASM: Anderson et al., 1996; TRIGRS: Baum et al., 2002; GEOTOP-FS: Simoni et al., 2008)으로 구분할 수 있으며, 두 가지 형태의 모형 대부분 무한사면안정해석모형(infinite slope stability model)을 기반으로 하고 있다. 결정론적 기법의 경우 전술한 지수 및 통계적 기법과 달리 산사태 발생의 내·외적 발생요인의 상호작용을 고려한 알고리즘을 이용하여 GIS기반의 사면안정성에 대한 정량적 지표를 제공함으로써 최근에 산사태 위험성 평가 및 예측에 적극 활용되고 있는 추세이다(이사로, 1999; 김민구 등, 2005; 양인태 등, 2007).

본 연구에서는 2011년 7월에 발생한 서울시 우면산 산사태 지역을 대상으로 Montgomery and Dietrich (1994)의 비 집수면적(specific catchment area)개념에 근거한 무한사면안정해석모형을 기반으로 Borga et al. (2002)이 확장하여 제시한 무한사면안정해석모형을 이용하여 사면안정해석을 수행하였다. 모형의 지형, 지질, 임상학적 공간분포형 매개변수 산정을 위하여 수치지형도, 정밀토양도, 수치임상도를 이용하였으며, 모형의 수문학적 인자인 습윤지수(wetness index)는 세 가지 기법(일방향 흐름기법, 다방향 흐름기법, 무한방향 흐름기법)을 이용하여 비 집수면적을 산정하고, 각 기법의 적용에 따른 대상유역내

의 격자별 사면안전율의 변화양상을 분석하였다. 또한, 무한사면안정해석모형에 일반적으로 적용되고 있는 공간집중형 습윤지수(spatially-lumped wetness index)에 의한 분석결과와의 비교를 통하여 우면산 지역의 사면안정 해석의 차이점을 비교하였다.

2. 사면안정해석을 위한 모형의 구성

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 무한사면안정해석모형의 기본이론 및 모형의 수문학적 매개변수인 분포형 습윤지수의 산출과정은 다음과 같다.

2.1 무한사면안정해석모형

Fig. 1은 무한사면안정해석모형의 개념적 모식도로써 깊이에 비해 사면의 길이가 상대적으로 긴 경우 파괴면은 사면에 평행하게 형성되며, 사면의 길이는 거의 무한대이므로 양끝의 영향은 무시한다. 또한 침투수압이 사면에 평행하게 작용한다고 가정할 때 무한사면안정해석식은 다음과 같이 유도된다.

단위길이당 전단응력 :

$$\tau = \frac{T}{b/\cos\theta} = \frac{W}{b} \cos\theta \sin\theta; W = \gamma Db \quad (1)$$

단위길이당 수직응력 :

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

여기서, T 는 사면의 전단력(N), P 는 파괴면의 수직방향

Fig. 1. Concept of the Infinite Slope Stability Model

력(N), D 는 모암으로부터 지표면까지의 높이(m), b 는 사면폭(m), θ 는 사면경사($^\circ$), W 는 흙의 자중(N), γ 는 흙의 단위중량(kN/m^3), τ 는 전단응력(kPa), σ 는 수직응력(kPa)이다.

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

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

여기서, c 는 점착력(Pa), u 는 간극수압(kPa), Φ 는 내부마찰각($^\circ$)을 의미한다.

또한, 안전율(safety factor, F_s)의 개념으로부터 전단응력은 Eq. (4)와 같이 표현된다.

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

Eqs. (1)~(4)로부터 Eq. (5)와 같이 정리할 수 있으며,

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

Eq. (5)를 F_s 에 대해 다시 정리하면 무한사면안정해석을 위한 기본식, Eq. (6)을 유도할 수 있다.

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

Eq. (6)으로부터 뿌리보강효과를 고려하기 위해 점착력 c 를 흙의 점착력과 뿌리의 점착력으로 구분하여 정리하면 Eq. (7)과 같고,

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

여기서, c_s 는 흙의 점착력(kN/m^2), c_r 은 뿌리점착력(kN/m^2)이다.

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

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

여기서, D_w 는 모암으로부터 수면까지의 수심(m), γ_w 는 물의 단위중량(kN/m^3), γ_s 는 흙의 포화단위중량(kN/m^3), w 는 상재하중(kN/m^2)이다. Borga et al. (2002)은 Eq. (8)의 각각의 매개변수의 변화에 따른 F_s 의 민감도 분석을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 F_s 는 사면경사(θ)와 내부마찰각(Φ)에 매우 민감하며, 경사가 급해짐에 따라 불안정($F_s < 1$)해지고, 내부마찰각이 커짐에 따라 안정($F_s > 1$)해지는 것을 확인할 수 있다.

2.2 습윤지수

강우에 의한 침투량의 증가는 토양의 포화도와 간극수압을 증가시키며, 이는 결과적으로 잠재 파괴면에서의 전단강도의 감소를 발생시킨다. 따라서 침투량 증가에 따른

Fig. 2. Sensitivity Plot for the Infinite Slope Equation (Borga et al., 2002)

Fig. 3. Definition of Specific Catchment Area

토양 포화도의 증가는 사면의 불안정성을 야기하게 된다. 이러한 토양의 포화도를 추정하기 위해 Montgomery and Dietrich (1994)와 Borga et al. (1998)은 사면의 지형학적 특성에 따른 습윤지수(Fig. 1의 D_w/D 또는 h_w/h) 산정 모형을 제시하였다. Fig. 3과 같이 집수면적(catchment area)에서 총 강우의 침투량은 지표하수와 같으며 이는 지형경사와 평행하게 흐른다는 가정을 기반으로 하고 있으며, 결과적으로 토양 포화층에서의 흐름은 Darcy법칙에 의해 Eq. (9)와 같이 표현될 수 있다(Figs. 1 and 3).

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

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

또한 Fig. 3에서 유출기여면적(A)에 일정한 강우(i)가 내린다고 가정할 경우 Eq. (9)의 단위폭당 유량(q)는 Eq. (10)과 같다.

$$q = iA/b \quad (10)$$

Eqs. (9) and (10)으로부터 Eq. (11)과 같이 정리할 수 있다.

$$iA = (\sin\theta K h_w) b \quad (11)$$

여기서, b 는 흐름방향의 단면 폭(m), i 는 강우강도(m/s), A 는 유출기여면적(m^2)이다.

Eq. (11)을 h_w 에 대해 정리하고 이를 $h(=D\cos\theta)$ 로 나누면 Eq. (12)의 습윤지수로 표현할 수 있다(Fig. 1).

$$m = \frac{h_w}{h} = \frac{D_w}{D} = \text{Min}\left\{\frac{ia}{Kh\sin\theta}, 1\right\} \quad (12)$$

여기서, $a = A/b$ 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). Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 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 정보는 습윤지수 산정에 매우 유용하게 활용될 수 있다(Tarboton, 1997).

2.3 DEM을 이용한 습윤지수 산정기법

유출기여면적은 사면경사를 이용하여 흐름방향을 결정하게 되고, 이를 흐름방향으로 누적한 흐름누적 값(flow accumulation value)에 의해 산정된다. 만약 집수면적에 내린 강우가 식생에 의한 차단, 대기 증발 등과 같은 손실이 없다고 가정하면, 흐름누적 값은 각 격자에 유입되는 유입량(Eq. (10))을 나타내며, 이러한 흐름누적값을 등고선의 폭으로 나눈 것이 비 집수면적이 된다.

일반적으로 흐름누적 값은 해당 격자에 영향을 미치는 상부격자(upslope cell)의 개수를 나타내며, 격자의 개수와 흐름누적값은 같은 의미로 혼용되어 사용된다. 유출기여면적은 해당 격자에서의 상부격자에 의한 영향면적(상부격자의 개수×격자의 크기)이 되며, 이 영향면적을 등고선의 폭으로 나눈 값이 비 집수면적이 된다(Fig. 3).

따라서 공간분포형 습윤지수 산정을 위해서는 DEM기반의 흐름경로 추적 및 흐름분배 알고리즘을 이해해야 하며, 본 연구에서는 Eq. (12)의 비 집수면적(a) 산정을 위하여 세 가지 흐름해석 알고리즘(일방향 흐름해석, 다방향 흐름해석, 무한방향 흐름해석)을 이용하였으며, 격자별 비 집수면적 정보를 활용하여 공간분포형 습윤지수를 산정하였다. 각 기법별 특징은 다음과 같다.

유출기여면적 계산을 위한 가장 간단한 방법으로 O'Callaghan and Mark (1984)가 소개한 일방향 흐름해석 기법(single flow direction method, SFD)이 있으며, 이 기법은 Fig. 4(a)와 같은 표고를 갖는 DEM자료에서 어느 한 격자에서 이웃 격자 8개 중 가장 경사가 급한 경사에 흐름 전체를 배분해줌으로써 유출기여면적을 계산하게 된다. 즉, Fig. 4(b)와 같이 경사가 가장 급한 격자(0.519)

로 상류격자에서의 모든 흐름이 집중된다. 기본적으로 SFD는 인접한 격자에 축방향이나 대각선 방향으로만 흐름을 생성하게 되므로 흐름이 발산하는 지역과 수렴하는 지역 그리고 평행한 지역에 따라 유출기여면적이 다르게 나타나는 제약사항이 있다(한지영, 2003).

SFD와 달리 Quinn et al. (1991)이 제안한 다방향 흐름 해석기법(multi-flow direction method, MFD)은 Fig. 4(b)와 같이 어느 한 격자 주위의 8방향에 대한 격자 각각의 경사를 계산하고 해당 격자보다 고도가 낮은 모든 방향에 대해서 일정한 비율을 가지고 흐름을 분산시킨다. 즉, 해당 격자보다 고도가 낮은 격자(경사 값이 0.519, 0.233에 해당하는 두 격자)에 대하여 흐름이 분산되며, 이때 경사에 따른 가중치를 부여하여 두 격자 중 급경사의 경우 더 높은 비율의 흐름이 분배된다. 따라서 이러한 다방향 흐름방법은 산의 봉우리와 같이 흐름이 분산되는 지형에 적합하며, 계곡과 같이 경사가 급한 수렴지형에서는 SFD보다 적용성 낮은 것으로 알려져 있다.

마지막으로, 무한방향 흐름해석기법(infinity flow direction method, IFD)은 Tarboton (1997)에 의해 제안되었으며, 이 기법은 격자의 흐름방향이 인접격자의 8방향에 국한되어있는 SFD와 MFD를 개선하기 위한 방법론이다.

전술한 바와 같이 SFD는 흐름방향이 8방향에 국한되어 있을 뿐 아니라 경사방향의 흐름이 존재할 때 실제기여면적과의 차이를 보이며, 완만한 흐름에 대한 분산효과를 고려하지 못한다. MFD는 인접격자의 경사에 따른 흐름의 분산효과를 고려할 수 있지만, SFD와 마찬가지로 8방향에 국한되어 있으며, 실제 기여면적이나 비 집수면적을 생성시키는 물리적 특성과 이론적 분산효과(모든 낮은 방향에 대한 분산효과)와의 차이로 인해 급경사지역 모의 시 흐름이 과도하게 분산되는 한계점을 지닌다. IFD는 이러한 MFD의 문제점을 해결하기 위해 최소한의 분산효과를 고려하면서 효율적으로 흐름을 배분하는 기법이다(Tarboton, 1997).

Fig. 5(a)는 격자 중심점에서 인접격자와의 경사비교를 통해 흐름방향 및 흐름의 분배율을 결정하기 위한 무한방향흐름 기법의 모식도를 나타낸 것이며, 각 격자의 중심점을 연결하면 인접격자에 대해 Fig. 5(b)와 같이 8개의 삼각형 개체를 구성할 수 있다. 여기서 각 개체의 경사벡터는 Eq. (13)과 같이 정의할 수 있다.

$$s_1 = (e_0 - e_1)/d_1; s_2 = (e_1 - e_2)/d_2 \quad (13)$$

여기서, s_1, s_2 는 각 X, Y 성분의 경사벡터, e_0, e_1, e_2 는 각

Fig. 4. Comparison of Flow Direction Methods for Contributing Area Calculation

Fig. 5. Infinity Flow Direction Algorithm

격자의 표고, d_1, d_2 는 각 표고간 거리

Eq. (13)에 의해 구해진 경사벡터의 r 과 s 는 다음과 같이 산정된다.

$$r = \tan^{-1}(s_2/s_1); s = (s_1^2 + s_2^2)^{1/2} \quad (14)$$

Eqs. (13) and (14)에서 8방향 격자의 표고와 중심 표고의 차이로 부터 최급경사의 방향각 r 을 결정하고, 이렇게 산출된 방향각은 $0 \sim \tan^{-1}(d_2/d_1)$ 의 범위 안에 포함되어야 하며, 모든 격자는 정방향 격자 형태이므로 방향각의 범위는 $0^\circ \leq r \leq 45^\circ$ 가 된다. 예를 들어 Fig. 5와 같이 격자 중심점간의 표고차를 통해 최급경사의 방향이 제2개체에 위치하면, $e_{i,j}, e_{i-1,j}, e_{i-1,j+1}$ 의 세 격자점 표고로부터 Eqs. (13) and (14)를 이용하여 제2개체의 방향각 r 을 산출하게 된다.

여기서 주의해야 할 점은 이렇게 산출된 각도의 기준은 항상 e_0 와 e_1 을 연결하는 선이 되며, 제2개체의 경우 기준은 $e_{i,j}$ 와 $e_{i-1,j}$ 을 연결하는 선으로 이때 경사 r 은 시계방향으로 결정된다. 만약, 최급경사 방향이 제3개체로 결정되면 $e_{i,j}, e_{i-1,j}, e_{i-1,j-1}$ 의 표고로 부터 경사 r 이 산출되며 그 기준은 $e_{i,j}$ 와 $e_{i-1,j}$ 를 연결한 선으로 경사 r 은 반시계방향으로 결정된다.

즉, 방향각 r 은 Table 1의 8개 개체의 e_0, e_1, e_2 의 표고에 의해 산정되며 e_0 와 e_1 을 이은 선을 기준으로, 1, 3, 5, 7에 해당하는 개체에서는 반시계방향으로, 2, 4, 6, 8에 해당하는 개체에서는 시계방향으로 경사 r 의 방향이 결정된다. 만약, Eq. (14)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 r 은 다음과 같이 제한된다.

$$\begin{cases} r = 0; s = s_1 & : r < 0 \\ r = \tan^{-1}(d_2/d_1); s = (e_0 - e_2)/(d_1^2 + d_2^2)^{1/2} & : r > \tan^{-1}(d_2/d_1) \end{cases} \quad (15)$$

따라서 이렇게 계산된 r 을 통해 분배율을 계산할 수 있다. 예를 들어 Fig. 5(a)와 같이 최급경사의 방향이 제2개체에 존재하고 $\overline{e_{i,j}e_{i-1,j}}$ 을 기준으로 방향각 r 이 20° 일 경

우, $\alpha_1 = 20^\circ$ 이고 $\alpha_2 = 25^\circ$ 가 된다. 따라서 분배율은 $j+1$ 방향으로 $\alpha_1/(\alpha_1 + \alpha_2) = 20^\circ/45^\circ = 0.45$ 만큼, j 방향으로 $\alpha_2/(\alpha_1 + \alpha_2) = 25^\circ/45^\circ = 0.55$ 와 같이 결정된다.

또한, $\overline{e_{i,j}e_{i,j+1}}$ 을 기준으로 하는 방향각 r_g 을 계산하는 일반식은 다음과 같이 정의된다.

$$r_g = a_f r + a_c \pi/2 \quad (16)$$

여기서, 각 개체에서 $\overline{e_0e_1}$ 을 기준으로 하며, 그 각의 크기가 사면내($0^\circ \leq r \leq 45^\circ$)에 존재하는 r 과 달리, r_g 는 고정된 기준면 $\overline{e_{i,j}e_{i,j+1}}$ 을 기준으로 $0 \sim 2\pi$ 의 크기를 가지며 기준을 중심으로 반시계방향을 따라 각도(radian)의 형태로 계량된 흐름방향을 의미하며, Table 1의 계수를 이용하여 각 개체별 흐름방향 및 분배율을 추정할 수 있다. 예를 들어 Fig. 5(a)와 같이 제2개체에 흐름방향이 존재하고 r 이 20° 라면 Table 1의 제2개체에 해당하는 계수 a_c 와 a_f 를 Eq. (15)에 대입하여 $r_g = 70^\circ$ 라는 결과를 얻을 수 있다.

IFD를 이용한 흐름누적값의 모의는 흐름방향 r 또는 r_g 에 따라 1) 한 개의 하류방향 격자로 배수하는 경우와, 2) 2개의 하류방향 격자로 분산하여 배수하는 경우의 2가지 형태로 나타나게 된다. 전자의 경우 흐름누적(혹은 이에 따른 비 집수면적)의 산정은 SFD 방법과 일치하게 되지만, 후자의 경우 Fig. 5에서 보는 바와 같이 경사벡터가 두 격자와 이루는 교각 α_1, α_2 의 상대적인 크기를 가중치로 하여 흐름을 분배하게 된다. 주목할 만한 사항은 흐름의 분산이 언제나 두 개의 하류방향 격자로만 발생하며, 이를 통하여 과도한 흐름분산을 제어하게 된다.

3. 모형의 적용

본 연구에서는 전술한 세 가지 흐름기법으로 산정된 비 집수면적을 이용하여 대상유역에서의 격자별 습윤지수를 산정하고, 정밀토양도, 임상도를 이용하여 무한사면안정 해석모형의 매개변수를 추출한 후, 산사태 발생시기의 강우자료를 이용하여 우면산 지역의 사면안정해석을 수행

Table 1. Facet Elevation and Factors for Slope and Angle Calculations (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

3.1 대상유역

급경사, (2) 평균경사로 구분될 수 있으며, 최급경사는 흐름방향중 가장 급한경사, Eq. (17)로 정의되며 SFD 및 IFD를 이용한 비 집수면적 계산 시 사용된다. 또한, 평균경사는 인접 8개 격자의 표고를 고려한 Eq. (18)로 정의되며, MFD를 이용한 비 집수면적 계산 시 사용된다. Fig. 7은 경사계산 알고리즘에 따른 우면산 지역의 격자별 사면경사를 나타내고 있다.

$$\begin{cases} Slope(Orthogonal) = Arctan(\text{표고차}/\text{밀변거리}) * (180/\pi) \\ Slope(Diagonal) = Arctan(\text{표고차}/(\text{밀변거리} * \sqrt{2})) * (180/\pi) \end{cases} \quad (17)$$

$$Slope = \text{Arctan}([(\delta Z / \delta X)^2 + (\delta Z / \delta Y)^2]^{1/2}) \quad (18)$$

3.2 지형학적 매개변수 선정

3.3 지질 및 임상학적 매개변수 산정

Eq. (8)의 무한사면안정해석모형의 지질학적 매개변수 산정을 위해 농촌진흥청에서 제작·배포하는 1:25,000 정밀토양도(표토토성, 배수등급, 토양통)자료를 이용하여 토

Fig. 6. Mt. Umyeon landslide in Seoul, Korea

Fig. 7. Comparison of (a) Steepest Slope and (b) Mean Slope Within the Study Site

Fig. 8. Spatially-distributed Parameters for Application of the Infinite Slope Stability Model

양형을 구별하고 투수계수, 유효토심, 흙의 단위중량, 점착력 및 내부마찰각을 산정하였다. 또한 산림청에서 운영하는 산림공간정보시스템의 정보를 이용하여 24개의 식생군을 기준으로 국내 식생분류기준표에 맞게 학명별로 대체수목을 결정하고, 임상별 인장강도를 재분류하여 임상별 영급을 고려한 뿌리점착력을 산정하였다. 사면안정해석을 위한 우면산 지역의 매개변수 공간분포도는 Fig. 8과 같다.

3.4 강우 입력자료

서울 AWS (automatic weather station)에서 2011년 7월 26일부터 28일까지의 3일 누적강우량은 587.5mm이었으며, 산사태가 발생한 2011년 7월 27일의 일강우량 301.53mm으로써 우면산 일대를 비롯한 서울 및 경기지역에 집중호우가 발생하였다. 무한사면안정해석모형의

적용을 위해서는 기본적으로 산사태 발생시간과 이에 따른 시간별 누적강우량 값이 필요하다. 기상청에서 운영하는 우면산 지역의 인접 강우관측소는 서초 AWS와 남현 AWS로서 본 연구에서는 두 관측소에서의 산사태가 최초 발생된 시기인 27일 8시 이전의 24시간 누적강우량과 산사태 최종발생시기인 27일 11시 이전의 24시간 누적강우량을 기준으로 이 값들의 평균인 286 mm/day을 Eq. (12)에 적용하여 습윤지수를 산정하였다.

4. 사면안정해석 결과분석

앞 절에서 산정된 변수들을 무한사면안정해석모형에 적용하여 우면산 지역에 대한 격자별 안전율(F_s)값을 산출하였다. 본 연구에서는 사면안정의 판단기준이 되는 안

전율의 임계치인 1값을 사용하여 대상유역을 안정지역과 불안정지역으로 구분하는 것이 아니라 Acharya et al. (2006) 및 Ray and De Smedt (2009) 등의 사례와 마찬가지로 습윤지수 변화에 따른 안전율의 변동성을 분석하는데 그 목적이 있다. 따라서 본 연구에서는 습윤지수(m)의 공간분포를 고려하지 않은 공간집중형 상태와 비 집중면적 및 강우에 따른 공간분포형 상태에서의 우면산 지역의 사면안정해석결과를 비교·분석하였으며, Acharya et al. (2006)가 제안한 안전율 등급을 이용하여 unstable ($F_s < 1$), quasi stable ($1 < F_s < 1.25$), moderately stable ($1.25 < F_s < 1.5$), stable ($F_s > 1.5$)와 같이 4등급화하여 도시하였다. 여기서, stable에 해당하는 지역의 경우 모의 대상지역이 우면산 지역만을 고려한 것이 아니라 주거지에 해당하는 평지 및 관악산 지역의 산지 일부가 포함되어 있고, 사면안정해석의 주요 목적은 불안정 지역의 시각화이기 때문에 본 연구의 계산결과에서는 stable지역의 영향면적은 고려하지 않았다.

4.1 공간집중형 습윤지수를 이용한 사면안정해석 결과

기존의 연구(김민구, 2005; Acharya et al., 2006; Ray and De Smedt, 2009)에서 산사태 잠재위험지 평가에 사용되었던 방법과 마찬가지로 대상유역내의 모든 격자에

대하여 공간적으로 동일한 습윤지수를 완전건조($m = 0$), 준포화($m = 0.2, 0.5$) 및 완전포화($m = 1$) 상태로 분류하여 적용한 후, 사면안전율의 변화양상을 분석하였다. 즉, Eq. (12)에 의해 결정되는 습윤지수를 인위적으로 결정함으로써 수문 및 지형학적 특성에 따른 토양의 포화도의 변화를 고려하지 않고 사면안정해석을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 9와 같다.

Fig. 9(a)에서 토양이 완전건조 상태임에도 불구하고, unstable 지역이 발생한 것은 산사태 발생의 외적 요인인 강우에 의한 침투와 상관없이 일부 지역에서 지형 및 지질학적으로 요인만으로 불안정한 상태가 발생할 수 있음을 의미하며, 산지하부 주거지 지역 주변의 절개지에서 불안정 지역이 집중적으로 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 습윤지수가 증가함에 따라 unstable 및 quasi stable 지역의 면적은 증가하는 반면 비교적 안정한 moderately stable 지역의 면적은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 대상유역의 토양이 완전포화된 Fig. 9(d)의 경우 실제 산사태 및 토석류로 인한 지역(원으로 표시)과 비교했을 때 피해지 주변격자들이 unstable 조건에 해당하는 것으로 분석되었다.

4.2 공간분포형 습윤지수를 이용한 사면안정해석 결과

사면안정해석에 있어 수문 및 지형학적 특성에 따른 토

Fig. 9. Comparison of Safety Factor Maps Depending on Wetness Index

양 습윤지수의 공간적 변동성은 산사태 위험해석을 위한 매우 중요한 영향인자임에도 불구하고, 그 값을 대상유역 전체에 대하여 동일하게 가정하여 적용하는 것은 토양의 포화상태의 공간적 변화를 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다. 따라서 습윤지수의 공간분포를 고려하기 위하여 비 집수면적 및 강우에 따른 습윤지수를 Eq. (12)를 이용하여 계산하고, 이를 Eq. (8)의 무한사면안정해석모형에 적용하였으며, SFD, MFD, IFD를 이용한 비 집수면적 산정기법에 따른 안전율 변화양상을 비교·분석하였다.

본 연구에서는 SFD 및 MFD의 경우 각각 ArcView 3.2a의 Hydro Extension 및 SHASTAB Extension을 이용하여 흐름누적값을 계산하였으며, IFD의 경우 ArcGIS의 TauDEM Extension을 이용하여 흐름누적값을 계산하였다. 각 기법에 따른 비 집수면적의 산정결과는 Fig. 10과 같다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이 MFD의 경우 고도가 낮은 인접격자에 대해 모두 흐름을 분배하기 때문에 SFD, IFD에 비해 비 집수면적이 과다 산정되었으며, IFD의 경우 산정상부에서의 과도한 흐름분산을 제한하고 단일방향 또는 이 방향으로 흐름을 분배하기 때문에 SFD보다 비 집수면적이 크게 산정되었다.

각 기법에 따른 사면안전율을 계산하기 위하여 매개변수의 공간분포도(Fig. 8), 비 집수면적(Fig. 10) 및 강우에 따른 습윤지수 정보를 ascii파일로 변환하여 본 연구에서

개발된 Fortran기반의 사면안정해석 프로그램(Fig. 11(a))에 적용하여 대상유역의 격자별 안전율을 계산하였다. Figs. 11(b)~(d)는 비 집수면적 산정기법에 따른 안전율 계산결과를 도시한 것이며, 각 기법별 안전율의 등급에 해당하는 면적 및 평균안전율은 Table 2와 같다.

Table 2에서 나타난 바와 같이 비 집수면적 산정기법에 따른 불안정 지역($F_s < 1$)의 면적은 SFD, MFD, IFD 순으로 증가하며, 이는 동일한 지형학적, 지질학적 특성에도 불구하고 비 집수면적 산정기법에 따라 사면안전율이 달라질 수 있음을 의미한다. 비 집수면적을 이용한 안전율 분석결과, Fig. 9(d)와 마찬가지로 불안정 지역은 사면경사가 급한 산지정상부 및 절개지, 비 집수면적이 상대적으로 크게 산정되는 수렴지형에서 집중적으로 발생하였다.

비 집수면적 산정방법에 따른 평균안전율의 변화양상을 보게 되면 SFD의 결과가 다른 기법에 비해 비슷하거나 근소하게 크게 나타나는 경향을 보이는데 이는 비 집수면적이 작을수록 습윤지수가 감소하고, 결과적으로 안전율을 증가시키기 때문이며, 불안정 지역의 면적은 SFD에 비해 IFD가 약 35%로 증가하였으며, 이는 동일한 경사에도 불구하고 IFD의 비 집수면적이 상대적으로 크기 때문에 증가한 습윤지수에 따른 안전율의 저하에 따른 것으로 판단된다. 반면에 quasi stable 및 moderately stable 지역의 경우 MFD기법이 타 기법에 비해 크게 산정되었

Fig. 10. Comparison of Specific Catchment Area for Three Flow Direction Methods

(a) slope stability analysis program

(b) SFD

(c) MFD

(d) IFD

Fig. 11. Comparison of Safety Factor Maps Depending on Specific Catchment Area Calculation

Table 2. Summary of Area and Average Safety Factor for Each Safety Level

Flow Direction Method Area & Safety factor		SFD	MFD	IFD	$m = 1$
$F_s < 1$ (Unstable)	Area(km ²)	0.427	0.484	0.577	0.578
	Ave. F_s	0.878	0.866	0.871	0.871
$1 < F_s < 1.25$ (Quasi stable)	Area(km ²)	0.884	1.106	1.057	1.057
	Ave. F_s	1.142	1.137	1.142	1.142
$1.25 < F_s < 1.5$ (Moderately stable)	Area(km ²)	0.966	1.457	1.098	1.099
	Ave. F_s	1.380	1.372	1.376	1.376

는데 이는 SFD와 IFD에서는 최급경사를 이용하는 반면 MFD는 평균경사를 사용하게 되며, 일반적으로 산지정상부와 절개지 이외의 지역에서 평균경사가 최급경사보다 작게 산정되기 때문에 비교적 안정한 지역은 MFD의 경우가 가장 크게 발생하게 된다.

IFD기법의 경우 Table 2에 정리된 바와 같이 공간집중형 습윤지수($m=1$)를 적용한 경우의 안전율과 면적이 거의 동일한 수치를 보이는데 이는 본 연구에서 적용된 일강우량 및 비 침수면적에 의한 습윤지수 산정 시 대상유

역내 모든 격자가 완전포화에 가까운 극한 상황이 되었음을 의미하며, 또한, 공간집중형 습윤지수를 적용한 경우는 SFD 및 MFD를 이용한 결과보다 불안정 지역이 크게 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 2011년 7월에 발생한 우면산 산사태 지역을 대상으로 무한사면안정해석모형을 이용하여 습윤지

수의 공간적 고려 유무에 따른 사면안전을 해석결과를 비교·분석하였다. 습윤지수는 공간집중형 습윤지수와 공간 분포형 습윤지수로 구분하여 적용하였으며, SFD, MFD, IFD의 세 가지 기법을 이용하여 공간분포형 습윤지수를 산정하였다. 이상의 연구를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 공간집중형 습윤지수 적용 시 토양이 완전건조 상태임에도 불구하고, 불안정한 지형 및 지질학적 특성으로 인해 unstable 지역이 발생하였으며, 습윤지수가 증가함에 따라 unstable 및 quasi stable 지역의 면적은 증가하는 반면 비교적 안정한 moderately stable 지역의 면적은 감소하는 것을 확인하였다. 또한 unstable 지역은 산지하부 주거지 지역주변의 절개지에서 불안정 지역이 집중적으로 분포하고 있었으며, 실제 산사태 및 토석류로 인한 피해지역과의 비교를 통해 피해지 주변경사자들이 unstable 조건에 해당하는 것을 확인하였다.
- 2) 세 가지 흐름해석 기법을 이용하여 비 집수면적을 분석한 결과, MFD의 경우 고도가 낮은 인접격자로 흐름을 과도하게 분배함에 따라 비 집수면적이 크게 산정되며, SFD의 경우 일방향 흐름분배로 인해 비 집수면적이 타 기법에 비해 작게 산출되고, IFD의 경우 산지정상부에서의 과도한 흐름분배를 억제하는 고유특성으로 인해 MFD보다는 비 집수면적이 작게 산정되고, SFD보다는 크게 산정되었다.
- 3) 비 집수면적 산정방법에 따른 안전율의 분석결과, SFD의 경우 비 집수면적이 타 기법에 비해 작게 산정됨에 따라 습윤지수가 감소하고, 결과적으로 안전율이 증가하였다. 또한, 동일한 경사에도 불구하고 IFD의 비 집수면적이 상대적으로 크기 때문에 불안정 지역의 면적은 SFD에 비해 IFD가 크게 산정되었으며, 일반적으로 산지정상부와 절개지 이외의 지역에서 평균경사가 최급경사보다 작게 산정되기 때문에 평균경사를 사용하는 MFD기법이 타 기법에 비해 quasi stable 및 moderately stable 지역이 크게 산정되었다.
- 4) 공간집중형 습윤지수($m=1$)와 공간분포형 습윤지수의 결과를 비교·분석한 결과, 비 집수면적을 IFD로 산정하였을 경우 안전율의 등급별 영향면적이 유사하였으며, 이는 IFD에 의한 공간분포형 습윤지수 산정 시 대상유역내 모든 격자가 완전포화 상태에 이르렀음을 의미한다. 또한, IFD 및 집중형 습윤지수를 이용하여 사면안정해석 결과가 SFD 및 MFD의

결과보다 불안정 지역이 크게 산정되었다.

본 연구에서는 공간집중형 습윤지수, 공간분포형 습윤지수에 따른 사면안정해석결과의 차이를 비교·분석하였고, 사면안정해석 시 지형, 지질학적 특성뿐만 아니라 수문학적 특성을 고려할 수 있는 공간분포형 습윤지수 적용의 필요성을 제시하였다. 그러나 공간분포형 습윤지수의 실제 적용상에 있어 유역의 지형·지질·임상학적 인자의 공간적 이질성의 반영은 가능하지만 토층의 초기 습윤지수가 고려되지 못하고, 모형자체가 정상상태에서 해석되기 때문에 강우의 시·공간적 변동성에 따른 습윤지수의 동적 특성을 반영할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 다시 말하면, 산사태 발생 잠재 위험지역에 대한 공간적 평가는 가능하지만, 언제 발생하는 지에 대한 시간적 예측은 불가능하다. 따라서 엽면적지수(LAI) 등을 이용한 초기 토양함수비 결정 및 지하수 거동특성을 모의할 수 있는 모형 등을 이용한 동역학적 습윤지수 산정방법 등이 결합된다면 산사태 위험 발생시기 및 위치에 관한 보다 정확한 예측이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단 및 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2011-0006960)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김민구 (2005). 뿌리보강모델을 활용한 GIS 산사태 위험도 작성방법연구. 석사학위논문, 성균관대학교.
- 김정환 (2011). 우면산 산사태 복구보고서도 부실덩어리. 한국일보.
- 박덕근, 오정립, 박정훈 (2006). “우리나라 지반재해와 방재정책.” **대한지질공학회 심포지움 논문집**, 대한지질공학회, pp. 185-189.
- 산림청 (2005). 산사태위험지관리시스템 매뉴얼.
- 소방방재청 (2009). 산사태재해 예측 및 저감기술 개발.
- 양인태, 천기선, 박재국, 이상윤 (2007). “GIS를 이용한 강우조건에 따른 산사태 취약지 평가.” **한국지형공간정보학회지**, 한국지형공간정보학회, 제15권, 제1호, pp. 39-46.

- 이용준, 박근애, 김성준 (2006). “로지스틱 회귀분석 및 AHP 기법을 이용한 산사태 위험지역 분석.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권 제5D호, pp. 861-867.
- 이사로 (1999). 지리정보시스템(GIS)를 이용한 산사태 취약성 분석 기법 개발 및 적용 연구. 박사학위논문, 연세대학교.
- 이수곤, 이경수, 김병호 (2008). “절취사면 설계 현황에 대한 연구.” **한국방재학회 학술발표회 논문집**, 한국방재학회, pp. 569-572.
- 오경두, 홍일표, 전병호, 안원식, 이미영 (2006). “GIS 기반 산사태 예측모형의 적용성 평가.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제1호, pp. 23-33.
- 한지영 (2003) 토양수분 예측을 위한 수치지형 분석과 동역학적 습윤지수의 개발. 석사학위논문, 부산대학교.
- 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.
- Anderson, M.G., Collison, A.J.C., Hartshorne, J., Lloyd, D.M., and Park, A. (1996). “Developments in slope hydrology-stability modelling for tropical slopes.” *Advances in Hillslope Processes, Edited by Anderson, M.G and Brooks S.M.*, Wiley, pp. 799-821.
- Baum, R.L., Savage, W.Z., and Godt, J.W. (2002). “TRIGRS—A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis.” U.S. Geological Survey, Open-file Report 02-0424, 27p.
- 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*, Vol. 35, pp. 8188.
- 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, pp. 56-71.
- Gupta, R.P., and Joshi, B.C. (1989). “Landslide hazard zoning using the GIS approach—a case study from the Ramganga catchment, Himalayas.” *Engineering Geology*, Vol. 28, pp. 119-131.
- Montgomery, D.R., and Dietrich, W.E. (1994). “A physically based model for the topographic control on shallow landsliding.” *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 4, pp. 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*, Vol. 28, No. 3, pp. 324-344.
- Pack, R.T., Tarboton, D.G., and Goodwin, C.N. (1998). The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping. *Proceedings-International Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 1157-1165.
- 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*, Vol. 5, No. 1, pp. 59-79.
- Ray, R.L., and De Smedt, F. (2009). “Slope stability analysis using GIS on a regional scale: a case study from Dhaliding, Nepal.” *Environmental Geology*, Vol. 57, No. 7, pp. 1603-1611.
- Simoni, S., Zanotti, F., Bertoldi, G., and Rigon, R. (2008). “Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using GEOTOP-FS.” *Hydrological Process*, Vol. 22, pp. 532-545.
- 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.
- Wagner, A., Leite, E., and Olivier, R. (1988). “Rock and debris-slides risk mapping in Nepal: using GIS.” *Proceedings of 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne, Switzerland 2, Rotterdam: Balkema, pp. 1251-1258.
- Wang, H., Liu, G., Xu, W., and Wang, G. (2005). “GIS-based landslide hazard assessment: an overview.” *Progress in Physical Geography*, Vol. 29, No. 4, pp. 548-567.

논문번호: 12-025	접수: 2012.03.06
수정일자: 2012.04.16/04.18	심사완료: 2012.04.18