

집중호우로 인한 산사태 및 토석류 위험도 분석*

- 우면산 피해지역에 대한 적용 -

오경두**, 이창희***, 강병화, 허재영, 황신범

전 세계적으로 이상기후로 인하여 국지성 집중호우가 빈번하게 발생하고 있고, 도시의 팽창으로 산지의 점유가 급증함에 따라 산사태나 토석류로 인한 피해도 점차 증가하고 있다. 이에 따라 과학적이고 합리적인 기반재해 예방정책 수행이 강력히 요구되고 있고 관련 법률은 정부에서 각종 설계, 시공 및 붕괴위험예측 등에 활용할 수 있는 전국단위의 기반재해위험지도를 제작하여 보급하도록 하고 있다. 그러나 아직까지 시민의 안전을 확보할 수 있는 신뢰성 있는 기반재해위험도 분석에 관한 연구가 일천한 것이 현실이다. 본 연구에서는 SINMAP과 FLO-2D를 이용하여 집중호우로 인한 산사태 및 토석류 피해 위험 지역을 정량적으로 분석할 수 있는 방법을 제안하였다. 2011년 많은 피해가 있었던 우면산 지역에 적용한 결과 피해지역과 일치성이 높게 나타났다. 본 연구에서 제안한 기반재해위험도 분석 방법은 산사태 위험지역 뿐만 아니라 토석류피해 위험지역의 범위를 분석하여 제공함으로써 인명과 재산 피해를 줄이기 위한 방재계획 수립에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 산사태, 토석류, 집중호우, GIS, SINMAP, FLO-2D

1. 서론

전 세계적으로 이상기후로 인하여 국지성 집중호우가 빈번하게 발생하고 있고, 도시의 급격한 팽창으로 산지 점유가 늘어남에 따라 산사태나 급경사지 붕괴로 인한 피해가 점차 증가하고 있다. 특히, 지난 2011년 7월 밀양, 춘천 및 우면산 산사태 등으로 58명의 인명피해가 발생하여 산사태 및 토석류를 포함한 기반재해위험이 사회적 이슈로 등장하면서 시민의 관심이 급증하게 되었다.

급경사지 재해예방에 관한 법률 제20조에 의하면 소방방재청장은 각종 설계, 시공 및 붕괴위험예측 등에 활용할 수 있는 전국단위의 기반재해위험지도를 제작하여 보급하도록 되어 있으나 현재까지 제작 보급되지 않고 있는 실정이다. 이와 같이 기반재해위험지도가 보급되지 못한 이면에는 시민의 안

전을 확보할 수 있는 과학적이고 신뢰성 있는 기반재해위험도 분석에 관한 국내 연구가 일천한 데도 그 원인이 있는 것으로 보인다.

기반재해위험도 분석과 관련하여 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서는 오래전부터 GIS기법을 이용하여 재해위험지도를 제작하고 있으며(Chacon, *et. al.*, 2006), 국내에서도 최근 GIS기법을 이용한 산사태 재해위험지역 분석 관련 연구를 수행하고 있다(국립방재연구소, 2004). 산림청에서는 산사태 피해 발생자료를 축적하여 산사태 위험지역 판정기준을 제시하였으며(이종학 외, 2005), 한국지질자원연구원에서는 기반암에 따른 산사태 발생확률 모델 및 재해위험지도를 개발하였다(한국지질자원연구원, 2009). 한편, 김홍택 외(2002)는 기존의 경험적 방법에서 벗어나 수문·토질역학적 사면안정해석기법을 채택한 SINMAP 모형을 이용하여 붕괴위험지역을 식별함으로써 토석류 발생위험도를 평가하고자 하였으나 토석류 위험도 분석에는 제한이 있었다. 김병식 외(2009)는 미국 지질조사국(USGS)에서 산불면적, 토양의 특성, 강우량 등의 자료로부터 토석류 발생 확률을 예측하기 위해 개발한 회귀식 모형을 이용하여 강릉 연곡천 일대의 토석류위험도평가를 수행한 바 있으며, 유한중 외(2012)는 산사태의 발생 확률을 토석류와 연관시켜 산사태 발생확률 50% 이상인 지역의 연속강우량, 표토의 모암, 토석류 침식인자(유역면적*유로평균경사) 등을 고려해 유역별 토석류 위험도를 산정하는 모델을 개발한 바 있다.

지금까지 국내에서 수행된 산사태 및 토석류 위험도 관련 연구는 산사태가 발생할 가능성이 높은 사면의 위치를 찾아내는 기술에 집중되어 왔다. 이러한 기술들은 산지에 위치한 붕괴 가능성이 높은 지점들을 식별할 수는 있으나 피해 위험지역 식별과는 거리가 있어 활용성이 제한되고 있다. 또한 산사태나 토석류 위험도 분석 기술이 대부분 회귀식 등 과거 자료에 기반한 경험적 기법으로(채병곤 외, 2004; 조용찬 외, 2007; 이승우 외, 2012) 유역 특성이 다른 지역에 대해서는 적용에 제한이 있을 수 있다.

토석류 피해위험지역 식별과 관련한 연구는 개별 피해사례별 연구 정도로서(서용석 외, 2005, 2008; 채병곤 외, 2010) 유역 단위 이상의 대규모 지역을 대상으로 한 위험도 분석 사례가 드문 형편이다. 최근 산림청에서 RWM 모형을 이용하여 유역 규모의 토석류 위험지도를 시범제작 하였으나(이창우 외, 2010) 토석류의 발생지점과 토석류의 양 등에 대한 사전 입력 자료가 필요하며 주로 피해가 발생하는 평지에서의 토석류 유하과정을 적절히 모의할 수 없어 활용이 제한되고 있다. 특히 우리나라의 산지에서는 집중호우 시 슬라이딩 형태의 산사태가 발생한 후 토석류를 형성하여 계곡 하류부 평지에 위치한 주거지역에 큰 피해를 발생시키고 있으나, 이에 대해서는 피해 발생 이전에 사전 분석할 수 있는 기술이 개발되지 않아 방재행정을 위한 기반재해위험지도 제작에 어려움을 겪고 있다.

실무적인 방재행정에 활용할 수 있는 기반재해위험지도를 제작하기 위해서는 개별 피해사례 분석보다는 유역단위 등 일정 규모 이상의 지역을 대상으로 위험도를 분석하는 기법이 필요하다. 이를 위해서는 GIS 기법에 기반한 기술이 적절하며 산사태위험도와 토석류위험도를 분석할 수 있는 기술이 모두 요구된다. 또 한 가지 고려해야 할 사항은 강우인데 기존의 산사태나 토석류 위험도 분석 기술

* 본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업인 “집중호우를 고려한 급경사지 재해위험도 정밀평가기법 및 기반재해위험지도 개발[NEMA-자연-2012-58]”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

** 제1저자, *** 교신저자.

들은 강우의 영향이 고려되지 않아 예측 신뢰성에 대한 문제 제기가 있어 왔다(동아일보, 2012). 따라서 본 연구에서는 집중호우로 인한 산사태 및 토석류 피해위험지역을 GIS 시스템 상에서 광역적으로 분석할 수 있는 지반재해위험도 분석 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 GIS 기반의 산사태와 토석류 분석 모형인 SINMAP과 FLO-2D를 이용하였고, 집중호우로 인한 산사태 위험지역 뿐만 아니라 토석류가 유하할 수 있는 위험물골과 토석류 피해위험지역을 정량적으로 분석할 수 있는 방법을 함께 제안하고자 한다¹⁾. 본 연구를 통하여 집중호우에 따른 산사태 위험지역과 더불어 토석류의 이동경로 및 토석류 피해예상지역의 범위를 평가할 수 있는 방안을 제안함으로써 향후 소중한 인명과 재산 피해를 줄이기 위한 방재계획 수립에 기여할 것으로 기대된다.

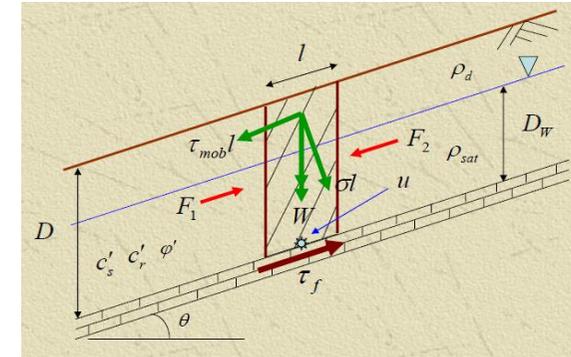
전단응력(τ_{mob})과 파괴에 저항하는 전단강도(τ_f)의 비로 사면의 안전율을 구하게 된다. 지하수위 위쪽의 토양도 포화상태로 가정하여 해석을 간략화하면 지하수위의 영향을 받는 무한사면의 안전율(FS, Factor of Safety)은 (식 1)과 같이 구할 수 있다(Hammond, *et al.*, 1992). 토심이 얇은 사면에서 표토층이 완전 포화되지 않았더라도 산사태가 발생할 상황에서는 강우의 침투에 의해 상당 부분 습윤 상태에 도달하게 되므로 합리적인 가정으로 볼 수 있다.

II. 지반재해위험도 분석

1. 적용 모형의 개요

1) 산사태위험도분석 모형

본 연구에서 산사태위험도분석에 이용한 SINMAP(Stability INdex MAPping)은 Arcview GIS 시스템의 확장 프로그램 형태로 캐나다 Forest Renewal British Columbia의 지원에 의해 미국의 유타대학에서 개발되었다. 캐나다를 포함한 미국, 스위스 등 급경사 산지가 발달한 지역에서의 전형적인 산사태 유형 가운데 하나는 경사가 급한 기반암 위에 퇴적된 얇은 붕적층이 집중호우 시에 슬라이딩으로 붕괴되면서 계곡의 물과 섞여 토석류로 빠르게 유하하여 인명과 재산 피해를 유발하는 형태이다. 우리나라와 일본, 중국 등에서도 이러한 유형의 산사태와 토석류 피해가 빈발하고 있다. SINMAP은 이와 같이 급경사지의 얇은 토층에서 지하수위 상승으로 인하여 발생하는 사면붕괴위험도를 평가하기 위하여 개발된 모형이다. 집중호우 시에 지하수위가 상승하면서 붕적층 퇴적 중량의 증가, 간극수압 증가로 인한 마찰력 감소, 토양의 포화로 인한 흙과 식생뿌리의 점착력 감소 과정을 해석하여 사면의 위험도를 판단한다. 특히, 붕괴면적에 비해 토층이 얇은 급경사 산지에서 붕괴지 가장자리의 영향을 무시해도 해석에 영향이 거의 없음을 감안하여 무한사면(infinite slope)으로 가정하여 해석함으로써 해석의 효율성을 크게 높인 것이 특징이다.



<그림 1> SINMAP 사면안정해석 개념(Fowze, 2012)

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} = \frac{(c'_s + c'_r) + \cos^2\theta [(D - D_w)\rho_{sg} + (\rho_w g - \rho_w g)D_w] \tan\phi'}{D\rho_{sg} \sin\theta \cos\theta} \quad (\text{식 1})$$

여기서 c'_s 는 흙의 점착력[N/m²], c'_r 는 식생뿌리의 점착력[N/m²], θ 는 사면경사[radian], ρ_s 는 포화상태 흙의 밀도[kg/m³], ρ_w 는 물의 밀도[kg/m³], g 는 중력가속도(9.81[m/s²]), D 는 토층의 연직방향 두께[m], D_w 는 토층 내 지하수의 연직방향 깊이[m], ϕ' 는 흙의 내부마찰각[radian]이다.

(식 1)에서 사면안전율의 분자와 분모를 토피의 압축응력 $h\rho_{sg} = D\cos\theta\rho_{sg}$ 로 나누어 재정리하면 (식 2)와 같다.

$$FS = \frac{(c'_s + c'_r)/h\rho_{sg} + \cos\theta [(1 - D_w/D) + (1 - \rho_w/\rho_s)D_w/D] \tan\phi'}{\sin\theta} \quad (\text{식 2})$$

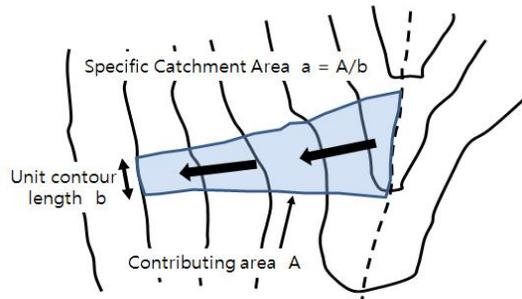
(식 2)에서 $(c'_s + c'_r)/h\rho_{sg}$ 는 퇴피의 압축응력에 대한 흙과 식생뿌리 점착응력의 상대적인 비인데 무차원량 C 로 정의한다. 그리고 D_w/D 는 전체 토피 두께에 대한 지하수 수심의 비로 습윤지수 w 로 정의한다. 마지막으로 ρ_w/ρ_s 는 토피의 밀도에 대한 물의 밀도 비로 r 로 정의한다. 새로 정의한

1) 본 연구에서 산사태는 자연 또는 인공 사면의 붕괴 현상을 의미하며 산사태 위험지역은 SINMAP에서 계산한 사면의 붕괴 확률이 일정 기준치를 넘는 지역을 의미한다. 반면에 토석류는 계류부(溪流部)에 퇴적된 토사나 산사태로 인하여 발생한 토사, 유목, 암석 등이 계류수(溪流水)와 함께 유하하는 현상으로 토석류 위험지역은 FLO-2D에서 계산된 계류수의 수심과 유속, 유로경사 등을 이용하여 평가하였다.

무차원량을 이용하여 (식 2)를 다시 정리하면 안전율은 (식 3)과 같이 쓸 수 있다.

$$FS = \frac{C + \cos\theta(1-wr)\tan\phi'}{\sin\theta} \quad (\text{식 3})$$

(식 3)에서 흙과 식생뿌리의 상대적 접촉응력, 사면경사, 흙의 내부마찰각, 흙과 물의 밀도 등은 현장실험이나 분석, 문헌자료 등으로부터 평가가 가능한 매개변수들이다. 그러나 사면으로의 지하수 유입과 유출과정을 반영한 토양의 습윤지수 w 는 수문학적인 해석이 필요한 매개변수로서 Beven 외 (1979)에 의해 제시된 지형학적 습윤지수(TWI, Topographic Wetness Index)에 의하여 구할 수 있다. 지형학적 습윤지수를 구함에 있어 기본적인 가정으로는 (1) 얇은 토층에서의 지하수는 지형의 경사를 따라 흐른다. (2) 토층에 공급되는 지하수량은 강우가 토양의 침투능을 초과하여 증가하더라도 토양의 침투능에 의해 제한을 받아 단위면적당 일정한 값 R [m/hr]로 수렴한다. (3) 사면에서 단위폭당 지하수를 배수하는 능력은 토양의 투수계수에 투수층의 두께를 곱한 토양의 수리전도도 T [m/hr]와 지하수 흐름의 사면 경사방향 성분 $\sin\theta$ 의 곱인 $T\sin\theta$ 로 구해진다.



<그림 2> 지하수 집수면적의 개념(Pack 외, 2005)

기본 가정 (1)에 의해 <그림 2>와 같이 사면의 어느 한 지점으로 유입되는 지하수의 공급지역인 집수지역을 식별할 수 있으며 이때 사면 단위폭당 집수지역의 면적을 a [m/m]라고 한다. 그러면 기본 가정 (2)에 의하여 사면의 한 지점에 대해 단위폭당 공급되는 지하수의 양은 Ra [m/hr]가 되고, 기본 가정 (3)으로부터 배수되는 양은 $T\sin\theta$ [m/hr]이다. 따라서 지형학적 습윤지수는 (식 4)와 같이 구해진다.

$$w = \text{Min}\left(\frac{Ra}{T\sin\theta}, 1\right) \quad (\text{식 4})$$

SINMAP 모형에서는 수치고도모형(DEM, Digital Elevation Model)을 이용한 GIS 분석으로 사면

단위폭당 집수면적 a , 사면경사 θ 와 이에 따른 $\sin\theta$ 의 값을 쉽게 구할 수 있다. 그러나 유역의 수문학적 특성을 반영한 매개변수 T/R [m]은 집중호우시 지하수에 의한 사면의 붕괴에 큰 영향을 미치는 중요한 인자이나 연직방향과 달리 사면에 평행한 방향의 투수계수가 갖는 이방성(異方性, anisotropy)과 공극의 굴이나 썩은 나무뿌리 등으로 인한 대공극(大空隙, macropore) 등의 영향으로 쉽게 결정하기 어려운 매개변수이다.

2) 토석류위험도분석 모형

본 연구에서 토석류위험도를 분석하기 위해 이용한 FLO-2D는 1988년 미국 콜로라도주의 토석류 위험을 평가하기 위해 미연방재난관리국(FEMA)의 지원 하에 개발된 MUDFLOW 모형에서 발전된 것이다. 이 모형은 유역을 GIS 분석에 적합하게 정사각형 격자로 분할하여 강우로부터 홍수량을 산정하거나 토석류나 홍수파의 유동을 해석할 수 있다. (식 5)와 (식 6)은 FLO-2D에서 채택한 x 방향 연속방정식과 운동량방정식으로 y 방향에 대해서도 동일한 방식으로 표현할 수 있다(O'Brien, 2007).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} = i \quad (\text{식 5})$$

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial h V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial h V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad (\text{식 6})$$

여기서, h 는 수심[m], V_x 는 x 방향 유속[m/s], i 는 토양 침투량을 빼고 남은 초과우량[m/s], S_{fx} 는 마찰경사[무차원], S_{ox} 는 사면경사[무차원], g 는 중력가속도(9.81[m/s²])이다. 좌변의 마찰경사 S_{fx} 는 홍수파의 경우에는 Manning 공식으로부터 산정하며, 토석류는 지표면 저항계수, 점성응력, 항복점응력, 난류와 입자간 충돌응력을 고려하여 산정한다(O'Brien, 2007).

마찰경사 S_{fx} 를 구하기 위해서는 유량 외에도 Manning의 조도계수와 지형자료가 필요한데 조도계수는 토지피복도로부터 산정하며, 지형자료는 수치고도모형(DEM)을 이용한다. 강우량으로부터 지표면 유출을 발생시키는 초과우량 i [m/s]를 구하기 위해서는 강우지속시간에 따라 달라지는 침투량을 계산하는 방법이 필요하다. FLO-2D에서는 Darcy의 법칙에 기반한 Green-Ampt 침투 모형을 채택하고 있는데 토양으로 침투한 물은 피스톤 흐름을 형성하여 상부 포화층과 하부 비포화층 사이에 뚜렷한 경계면을 형성하며 침투하는 것으로 가정한다. 이 침투 모형의 매개변수로 포화투수계수, 토양흡인수, 유효공극율, 초기함수율 등이 필요하다.

2. 모형의 적용

2011년 7월 27일 산사태 및 토석류 피해가 극심했던 서울시 서초구 서초동, 방배동, 양재동에 위치한 우면산 일대 가로 5.4km, 세로 4.2km의 영역을 모형 적용 대상지역으로 정하였다.

1) 산사태위험도 분석

본 연구에서 수행한 SINMAP 산사태위험도분석 절차는 <그림 3>과 같다. 우면산 일대에 대해 통일분류법으로 분류된 토양도로부터 미국 NRCS의 수문학적 배수기준(윤용남, 2005)에 따라 토양을 A, B, C, D 4개 등급으로 분류하였다. 식생의 점착력에 대해 평가하기 위하여 환경부 토지피복도를 이용하여 분석 대상지역을 산지와 비산지로 구분하였다. 이렇게 구분된 토양도와 토지피복도를 GIS 상에서 중첩시켜 8가지 조합을 갖는 셰입 파일(shape file) 형태의 레이어를 생성하였다. 토양의 수리전도도에 대한 지하수 유입량의 비율(T/R)과 토양과 식생 뿌리의 상대적 점착력(C), 토양의 내부마찰각(ϕ)에 대한 매개변수 보정 레이어는 SINMAP에서 Create Multi-Region Calibration Theme 기능을 이용하여 작성하였다. 이때 매개변수 보정 레이어는 토양도와 토지피복도를 중첩시켜 작성한 셰입 파일 레이어를 이용하였다. <표 1>은 셰입 파일 형태로 작성된 매개변수 보정 레이어에 입력한 내용을 정리한 것이다.

<표 1> SINMAP 매개변수 보정 레이어 구성

토양도 배수특성	토지피복도 산지/비산지	수문지질학적 매개변수(T/R)[m]	상대적 점착력(C)[무차원]	내부마찰각(ϕ)[°]
A	산지	1,750~2,250	0.00~0.25	24~35
B	산지	2,000~2,500	0.00~0.25	24~35
C	산지	2,250~2,750	0.00~0.25	24~35
D	산지	2,500~3,000	0.00~0.25	24~35
A	비산지	1,750~2,250	0.00~0.22	24~35
B	비산지	2,000~2,500	0.00~0.22	24~35
C	비산지	2,250~2,750	0.00~0.22	24~35
D	비산지	2,500~3,000	0.00~0.22	24~35

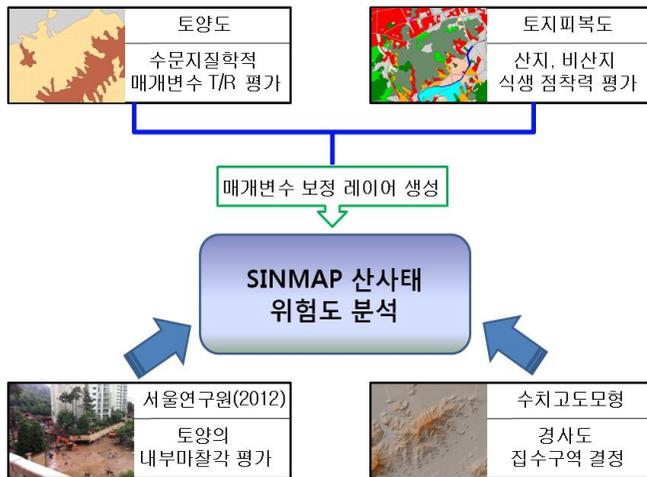
토양의 수리전도도에 대한 지하수 유입량의 비율(T/R)은 SINMAP 모형에서 제시한 기본값을 기준으로 미국 NRCS 기준에 따라 배수 매우 양호 A, 배수 약간 양호 B, 배수 약간 불량 C, 배수 불량 D로 구분한 후 등구간으로 중첩을 허용하여 값을 부여하였다. 이때 T/R 값이 작을수록 같은 양의 강우량에 대해 사면의 지하수 상승이 증가하여 붕괴위험이 높아지게 된다. 본 연구에서는 안전측을 고려하여 모형에서 제시한 기본값 범위인 2,000~3,000m 보다 작은 값인 1,750m부터 3,000m 사이를 4개 구간으로 등분할하여 부여하였다.

토양과 식생 뿌리의 상대적 점착력(C)에 대해서는 산지와 비산지에 대해 다르게 적용하였다. 서울연구원(2012) 자료에 의하면 우면산 일대 흙의 점착력은 10kN 정도로 제시하고 있으며 식생뿌리의 점착력은 뿌리가 토양에 얽혀 분포하고 있음을 감안하여 1kN 정도로 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 산지에 대해서는 모형에서 제시한 상대적 점착력(C)의 기본값 0.00~0.25를 그대로 적용하고 비산지에 대해서는 식생뿌리의 영향을 토양과 식생뿌리 전체 점착력의 10% 정도로 가정하여 모형에서 제시한 기본값을 10% 감소시킨 0.00~0.22로 부여하였다²⁾.

토양의 내부마찰각(ϕ)은 서울연구원(2012) 자료가 토양의 특성이나 특정한 지역 구분 없이 시추 자료로부터 산정된 값이어서 우면산 전 지역에 대해 24~35°를 동일하게 적용하였다.

경사도와 지하수 집수구역은 수치고도모형(DEM)으로부터 SINMAP 모형 내부에서 생성하게 된다. 수치고도모형은 국립지리정보원 1:5,000 수치지도를 이용하여 TIN을 생성한 후 그리드로 변환하여 생성하였으며 격자의 해상도는 2.5m로 하였다.

<표 1>에 나타난 바와 같이 SINMAP에서 매개변수의 값을 단일 수치가 아닌 범위로 부여하도록 하는 이유는 이들 매개변수들이 불확실성이 큰 변수들이라는 점을 고려하여 각각 상한계와 하한계 범위 내에서 발생확률이 균일한 확률분포를 갖는 것으로 가정, 최악의 시나리오부터 최상의 시나리오까지 다양한 조합을 검토한 후 최종적인 붕괴확률을 결정하기 위해서이다(Pack, et. al., 2005). <표 2>



<그림 3> SINMAP 산사태위험도분석 절차

2) 서울연구원(2012) 자료에 근거하여 식생뿌리와 토양의 점착력을 각각 1kN과 10kN으로 볼 때 식생뿌리가 있는 흙의 점착력은 11kN 정도로 볼 수 있다. 반면에 식생이 없는 나지 등은 흙의 점착력만 존재하므로 10kN 정도로 볼 수 있어 식생이 있는 경우 보다 약 10% 정도 점착력이 감소하는 것으로 가정하였다.

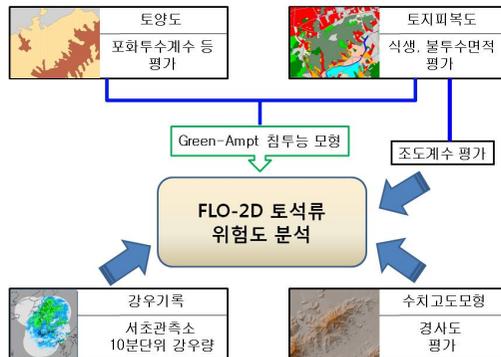
는 본 연구에서 산사태위험도 분석을 위해 적용한 매개변수를 정리한 것이다.

<표 2> SINMAP 모형 입력 매개변수 및 입력자료

매개변수 / 입력자료	모형 기본값	본 연구 적용값	비고
내부마찰각 ϕ [°]	30~45	24~35	서울연구원(2012) 조사자료 이용
토양수리전도도/지하수 유입량 T/R[m]	2,000~3,000	A: 1,750~2,250 B: 2,000~2,500 C: 2,250~2,750 D: 2,500~3,000	토양도 이용 토양의 배수능 반영
상대적 점착력 C [무차원]	0.00~0.25	산지: 0.00~0.25 비산지: 0.00~0.22	토지피복도 이용 Pack 외(2005) 기준과 서울연구원(2012) 자료 참조
경사도와 집수구역 자료	DEM에서 산정	DEM에서 산정	국립지리정보원 1:5,000 수치지도 이용

2) 토석류위험도 분석

본 연구에서 수행한 FLO-2D 토석류위험도분석 절차는 <그림 4>와 같다.



<그림 4> FLO-2D 토석류위험도분석 절차

우면산 일대에 대해 통일분류법으로 분류된 토양도를 이용하여 포화투수계수를 부여하였다. 이때 적용한 기준은 FLO-2D 모형과 마찬가지로 Green-Ampt 침투 모형을 채택한 VfloTM 모형에 대한 자료(오경두, 2009)이며 이를 정리하면 <표 3>과 같다.

<표 3> Green-Ampt 침투 모형 입력 매개변수 및 입력자료

토양형	포화투수계수 [cm/hr]	토양흡인수두 [cm]	유동공극률 [무차원]
CL, CH	0.10	20.88	0.385
GC	0.55	18.00	0.390
ML, OL	0.65	16.68	0.486
SM	5.25	6.13	0.401
GP, SP, SW, GW	10.50	4.95	0.417

지표면 흐름의 에너지 손실을 반영하기 위한 Manning의 조도계수는 FLO-2D 사용자 지침서에 제시된 값을 준용하기 위하여 22개 토지피복군으로 분류된 환경부 중분류 토지피복도를 대분류 7개 토지피복군으로 재분류한 후 <표 4>의 조도계수를 부여하였다³⁾. 시가화·건조지역의 조도계수가 아스팔트나 콘크리트수로의 조도계수 0.01~0.02 정도 보다 훨씬 크게 주어진 것은 수심이 깊은 하천이나 인공수로에서의 흐름과 달리 수심이 얇은 지표면 흐름의 경우 지표면 거칠기(roughness)에 의한 영향을 크게 받기 때문이다(O'Brien, 2009).

<표 4> 지표면 흐름에 대한 Manning 조도계수 입력자료

대분류	토지피복 유형	Manning 조도계수
1	수역	0.03
2	시가화·건조지역	0.10
3	나지	0.15
4	습지	0.03
5	초지	0.20
6	산림지	0.30
7	농지	0.17

불투수면적의 비율은 시가화·건조지역으로 분류된 토지피복 유형에 대해서만 적용하였으며, 오경두 외(2005)가 제시한 서울시 주택지역 평균 불투수면적비율인 87%를 적용하였다.

강우자료는 기상청 서초관측소(AWS)의 10분 단위 우량자료를 이용하였다. 우면산 산사태가 발생한 2011년 7월 27일 호우가 시작된 01:00부터 10:00까지 강우자료를 입력하여 모의하였다. 9시간 동안 내린 총강우량은 254.5mm였으며 10분당 10mm를 넘는 집중호우는 호우 후반부인 07:40에서 08:40 사이 한 시간 동안에 집중되었다. 최대 강우강도의 호우는 08:20에서 08:40사이 17.5[mm/10분]으로 20분간 지속되었다.

경사도를 산정하기 위한 수치고도모형(DEM)은 SINMAP 모형에서와 동일하게 국립지리정보원

3) <표 4>와 같이 모래, 자갈, 흙 등 하상 재료 등에 의해 Manning 조도계수를 부여하지 않고 토지피복유형에 따라 부여한 것은 하천 유로와 달리 유역 전체적으로 발생하는 지표수의 흐름에 대한 마찰손실을 구하기 위해서이다.

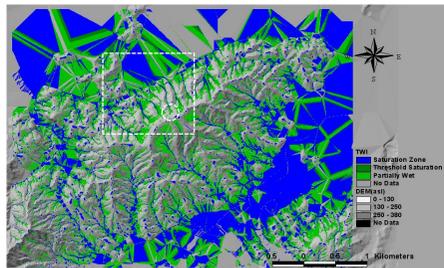
1:5,000 수치지도를 이용하여 TIN을 생성한 후 그리드로 변환하여 수치고도모형을 생성하였으며 격자의 해상도는 계산 시간 등을 감안하여 10m로 하였다. FLO-2D의 일반적인 격자 크기는 5~100m 내외 정도이다(O'Brien, 2009).

Green-Ampt 침투 모형은 초기함수율을 정해주어야 하는데 우면산 일대는 2011년 7월 한 달 동안 연평균 강수량 1,450mm에 다소 못 미치는 1,131mm의 많은 강우가 내렸고(한국지반공학회, 2011), 전 날에도 83.5mm의 강우가 내린 점을 감안하여 포화상태(Wet)로 초기함수율 조건을 부여하였다. FLO-2D에서는 유역의 습윤상태에 따라 초기함수율을 Wet, Normal, Dry로 구분하여 입력할 수 있다.

3. 적용 결과 및 고찰

<그림 5>는 SINMAP에서 지형학적 습윤지수(TWI)를 구한 것이다. 우면산 정상 부근에서 사방으로 20여개의 계곡이 형성되어 있음을 알 수 있다. 우면산 정상과 계곡 시작지점 사이에 부채꼴 형태의 우묵한 지형(hollow)이 형성되어 우면산 정상에서 계곡쪽으로 지하수가 수렴하고 있음을 알 수 있다. 우면산 정상 부근에서 지하수가 수렴하는 이 지역은 대부분 경사가 30° 이상인 급경사 지역이다. 집중호우시 지하수가 수렴하면서 간극수압과 토피중량 증가에 의한 사면 불안정이 증가하고 강우강도가 토양의 침투능을 초과할 경우 계곡이 시작되는 지점부터 우면산 정상쪽으로 사면 하단부의 세굴(undercutting)이 진행되어 산사태 위험이 매우 높은 지역이다.

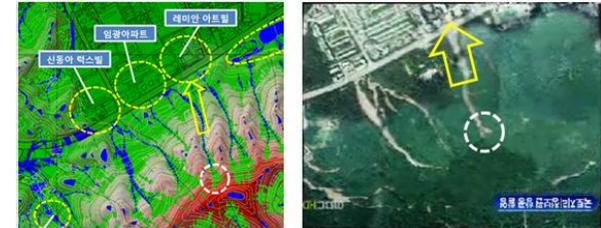
<그림 5>에 점선 직사각형으로 표시한 부분은 산사태에 이은 토석류로 레미안 아파트, 임광 아파트, 신동아 아파트 등에서 5명의 사망자와 2세대 반파의 피해가 발생한 지역이다. 그리고 점선 원으로 표시한 지역은 우면산 산사태 당시 피해가 극심했던 레미안 아파트 방면 산사태와 토석류가 시작된 지점이다. 초속 15미터를 넘는 토석류가 바윗돌과 유목 등을 연행하여 레미안 아파트 3층까지 파괴시키면서 3명이 사망하였다.



<그림 5> 지형학적 습윤지수(TWI)

<그림 6>의 왼쪽 그림은 이 지역의 지형학적 습윤지수와 배경 지도를 중첩하여 표시한 것으로 그

림 위쪽 3개의 큰 원은 토석류 피해가 발생한 아파트 지역이고 아래쪽 작은 점선 원은 레미안 아파트 방면 계곡 시작지점의 지하수 수렴부이며 화살표는 레미안 아파트 방면으로 토석류가 진행한 방향을 표시한 것이다(4). 그림의 오른쪽 항공사진은 국토지리정보원에서 우면산 산사태 이후 촬영한 것으로 점선 원안에 레미안 아파트 방면 토석류가 시작된 Y자 형태의 계곡 시작점과 화살표 방향으로 토석류가 유하했던 경로가 뚜렷하게 보인다. 그리고 왼쪽 그림의 지형학적 습윤지수 상의 지하수 수렴부와 오른쪽 항공사진의 토석류 시작점이 일치하고 있음을 알 수 있다.



<그림 6> 레미안 아파트 방면 TWI(좌) / 레미안 아파트 방면 토석류 유하 흔적(우)

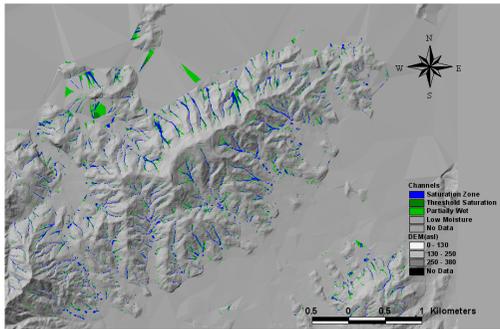
<그림 7>의 왼쪽 그림은 레미안 아파트 방면 붕괴 사면 하단부가 세굴되어 기반암이 노출된 상태를 보여주고 있다. 지표수에 의한 세굴 흔적이 뚜렷하게 보이며 특히 세굴이 지표수가 집중될 수 있는 사면 하단부에 심하게 발생하였다. 세굴 지역 점선 표시는 한국지반공학회(2011) 사진 자료에 저자가 추가한 것이다. 오른쪽 그림도 한국지반공학회(2011)의 사진 자료로 레미안 아파트 방면 계곡 시작점 부근에서 다량의 지하수가 용출되는 모습이다. 이 지점은 <그림 6>의 지형학적 습윤지수에서 지하수가 수렴하여 포화가 시작되는 계곡 시작지점과 일치한다.



<그림 7> 레미안 아파트 방면 붕괴 사면 하단부 세굴(좌) / 지하수 용출(우)

4) <그림 5>와 <그림 6>에서 레미안 아파트 방면 물결은 TWI에 의하면 계곡 하류로 진행하면서 좌측으로 굽어지는 형태로 나타나고 화살표 방향 물결은 미약하게 형성되는 것으로 보인다. 그러나 관측된 토석류 동영상 자료에 의하면 토석류는 초속 15미터 이상의 빠른 속도로 유하하면서 화살표로 표시한 직선방향으로 대부분 유하하였고 일부만 좌측 물결을 따라 유하하였다. 이것은 토석류의 운동에너지가 매우 커서 관성력에 의해 직진하는 경향이 우세했기 때문으로 판단된다.

<그림 8>은 지형학적 습윤지수가 0.5 이상이고 유로 바닥 경사가 10° 이상인 위험물골 지역을 나타낸 것이다⁵⁾. 지형학적 습윤지수 0.5는 우면산 산사태 당시 붕괴된 사면의 지하수 포화도 분포를 고려하여 정한 것이며 계곡 유로의 경사는 Zhuang, et al.(2013)가 제시한 토석류 발생 유로의 경사가 10±2° 이상임을 감안하여 정한 것이다⁶⁾. 위험물골이 우면산 주변에 20여개가 분포하고 있으며 특히 우면산 북쪽 사면의 물골들은 지류가 거의 없이 물골들이 나란하게 평행한 형태를 이루고 있어 토석류 위험이 높은 급경사 수로의 전형적인 형태(Gordon, et al., 1992)를 보이고 있다. 반면에 우면산 남쪽과 서쪽 사면의 물골들은 수지상 유로(dendritic streams)로 유로의 밀도가 상대적으로 높아 비홍수량(specific discharge)이 클 것으로 보이며 이로 인하여 하류부에 침수피해를 유발할 가능성이 큰 것으로 판단된다. 우면산 산사태 당시 우면산 북쪽 사면에서는 주로 토석류로 인한 피해가 컸던 반면에 송동마을과 흥천마을, 전원마을, 보덕사 등 우면산 남쪽과 서쪽 사면에서는 토석류와 더불어 돌발홍수로 인한 피해가 더 컸던 것도 이러한 물골 특성과 연관이 있을 것으로 보인다.

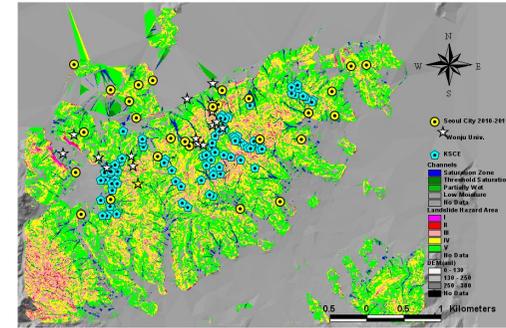


<그림 8> 우면산 일대 위험물골 분포

<그림 9>는 본 연구에서 분석한 우면산 일대 산사태위험도와 피해지점을 함께 표시한 것이다.

5) SINMAP에서 제공하는 습윤지수 범위는 Saturation Zone 2.1~3.1, Threshold Saturation 1.1~2.1, Partially Wet 0.1~1.1, Low Moisture 0.0~0.1 범위인데 본 연구에서는 위험물골 식별을 위하여 <그림 8>에서 Partially Wet은 0.5~1.1로 변경하였고, Saturation Zone 2.1~3.1, Threshold Saturation 1.1~2.1은 변경없이 동일하게 적용하였고, 습윤지수가 낮은 Low Moisture는 그림에 표시하지 않았다.

6) SINMAP의 T/R 매개변수 부여에 따라 지형학적 습윤지수의 분포가 달라지고 이에 따라 위험물골의 분포도 달라질 수 있다. 그러나 T/R 매개변수에 따른 위험물골 범위의 변화는 대부분 계곡 상류부에 위치한 지하수 수렴부에 국한되며 계곡을 따라 중하류부에 위치한 위험물골 본류에는 사실상 영향이 거의 없다. 따라서 주거 지역 등에 피해를 유발할 수 있는 토석류의 유하 경로를 식별하는데에는 큰 문제가 없는 것으로 사료된다. 위험물골이라는 용어는 주관적이긴 하나 방재 실무적인 측면에서 토석류의 유하 가능성을 강조하기 위하여 선택한 용어이다.



<그림 9> 우면산 일대 산사태위험도와 피해지점

본 연구에서는 산사태위험도를 사면안정계수(SI, Safety Index), 경사도, 피해 유형을 기준으로 <표 5>와 같이 5개 등급으로 구분하였다⁷⁾. 이 기준은 본 연구에서 피해지점의 피해 유형과 사면안정계수 및 경사도의 관계를 분석하여 제안한 것이다.

<표 5> 산사태위험도 구분 및 피해 유형

산사태 위험도	사면안정 계수(SI)	경사도 [°]	피해 유형
I	0.0	40° 이상	자연상태 흩사면에서는 유지할 수 없는 사면으로 암반 노두이거나 절개지, 축대, 옹벽 등 인공사면일 가능성이 높으며 낙석 피해나 붕괴시 매몰 위험이 있음
II	0.0~0.5	27° 이상	도심 자연공원 7부 능선 이상에 주로 분포하며 과거에 붕괴되었거나 보강되었을 가능성이 높은 사면으로 붕괴시에는 토석류 피해를 유발할 가능성이 높은 사면
III	0.5~1.0		도심 자연공원 5부 능선 이상에 주로 분포하며 붕괴위험과 토석류 발생 가능성이 높은 위험한 사면
IV	1.0~1.5	20~27° 사이	도심 자연공원 5부 능선 이하에 주로 분포하여 사면유실과 붕괴가 복합된 형태의 피해를 유발하며 자연상태에서는 붕괴 가능성이 낮으나 등산로 등 산 지개발시 붕괴위험이 급증하는 사면
V	1.5~3.0	10~20° 사이	도심 근린공원이나 성토지역에 주로 분포하여 붕괴 보다는 사면유실 형태의 피해가 발생하며 인명피해 보다는 물질 손실을 초래하는 사면

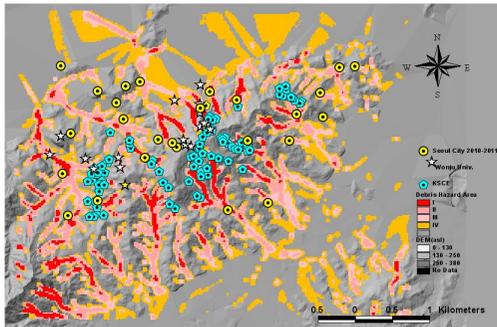
7) SINMAP에서는 사면안정율(FS)로부터 구해진 사면안정계수(SI)가 1.5를 넘는 사면은 안정한 사면으로 분류하여 사면에 상당한 외적인 불안정 요소가 가해지지 않는 한 붕괴위험이 없는 것으로 판단한다. 그러나 본 연구에서 과거 피해사례와 비교 검토한 결과 이러한 사면에서 사면 붕괴 형태의 피해는 발생하지 않지만 지표수의 집중으로 인한 사면 유실 형태의 피해가 발생하는 것으로 나타나 산사태 위험도 V등급으로 포함시켰다. 이것은 SINMAP이 지표수의 세굴 등에 의한 사면유실 형태의 피해를 직접 모의할 수는 없지만 사면안정계수가 이러한 피해가 발생할 가능성이 높은 지역을 식별하는 간접적인 지표로 활용될 수 있기 때문으로 판단되며 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서 검토한 우면산 일대 피해지점 자료는 <표 6>과 같다.

<표 6> 우면산 일대 산사태 관련 피해지점 자료

자료 출처	자료수	비고
서울시 피해 자료	25	2010년과 2011년 서울시 관내 25개 구청 산사태 관련 피해지점 자료 중 우면산 일대 자료
우면산 조사단 자료	85	대한토목학회(KSCE)에서 우면산 산사태 관련하여 조사한 피해지점 자료
강릉원주대학교 자료	17	강릉원주대학교에서 우면산 일대 피해지점을 조사한 자료
합계	127	서울시, 우면산 조사단, 강릉원주대 조사 자료

<그림 10>은 본 연구에서 분석한 우면산 일대 토석류위험도와 피해지점 자료를 함께 표시한 것이다. FLO-2D에서 토석류위험도는 수심(h)과 수심(h)과 유속(v)의 곱(vh) 두 가지 기준의 조합으로 판단하는 방안을 제시하고 있다(O'Brien, 2007). 그러나 이 기준을 적용한 결과 우면산 일대에서는 산지 급경사 유로에서의 위험이 과소 평가되는 반면 평지에서의 위험은 과대 평가되는 것으로 보였다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위하여 수심(h)[m], 유속(v)[m/s], 경사(s)[radian] 세 가지 요소의 곱(vhs)으로 토석류위험도를 판단하였다. 이때 경사가 영인 지점에 대해서는 시행착오법으로 적절한 범위를 탐색하였으며 본 연구에서는 우면산 일대 유로에 대해 해당 유속의 1/10을 경사도로 부여하였다.



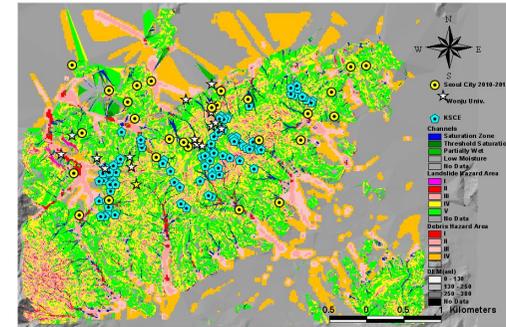
<그림 10> 우면산 일대 토석류위험도와 피해지점

<표 7>은 본 연구에서 분석한 토석류위험도와 우면산 산사태 당시 토석류 피해 정도와 피해 지역 위치를 고려하여 제안한 토석류 위험도 기준이다. 그러나 우면산 주변 도로를 따라 물결이 형성되는 지역에서 토석류위험도가 다소 높게 평가되는 것으로 보여 앞으로 보완이 필요할 것으로 사료된다. <표 7>의 토석류위험도와 피해 지역 위치 관계는 토석류피해 경향에 대한 가이드라인 정도로 보아야 하며 토석류위험도와 피해 지역의 위치 특성이 다른 경우가 발생할 수 있다.

<표 7> 토석류위험도 구분과 피해 지역 위치 관계

토석류위험도	v*hs [m/s]	피해 지역 위치
I	> 0.10	위험물골 상류지역
II	0.04~0.10	위험물골 중류지역
III	0.02~0.04	위험물골 하류지역
IV	0.005~0.02	위험물골 하류 평지

<그림 11>은 우면산 일대 산사태·토석류위험도에 피해지점을 함께 표시한 것이다.



<그림 11> 우면산 일대 산사태·토석류위험도와 피해지점

<표 8>은 산사태·토석류위험도와 피해지점과의 관계를 분석한 것이다. 산사태위험지역으로 분류된 면적은 9.93km²로 전체 분석 대상 면적 22.6km²의 43.9%였고 토석류위험지역은 4.1km²로 18.2%였다. 반면에 안전지역으로 분류된 면적은 8.57km²로 37.9%로 나타났다. 이와 같이 위험지역의 비율이 높게 나타난 것은 분석대상 지역의 대부분이 산사태·토석류위험도가 높은 우면산 지역에 포함되기 때문으로 판단된다.

피해지점 중에 사면안정계수(SI)가 0.0이거나 0.5 이하인 산사태위험도 I, II 등급 지역에서 발생한 사례는 4.0%로 매우 작게 나타났다. 이것은 현 자료의 조사 기간인 2010년과 2011년 이전에 이미 이 지역에서 산사태가 발생하였거나 사면보강이 이루어졌을 가능성도 있기 때문으로 추정된다. 반면에 피해지점은 산사태위험도 III, IV, V 등급 지역에 집중되어 있는데 각각 21.2%, 29.1%, 32.2%로 20~30% 범위에 비교적 고르게 분포하고 있으며 등급이 낮은 지역에서 피해 건수가 약간씩 더 증가하는 것으로 나타났다.

전체 피해지점 127건 중에 9.6%에 해당하는 12건이 토석류위험지역에서 발생하였으며 토석류위험도 II, III 등급 지역에 피해지점이 집중되어 2/3가 이 지역에서 발생하였고 토석류위험도가 높은 I 등급이나 낮은 IV 등급 지역에는 피해지점이 각각 1/6 정도씩 분포하는 것으로 나타났다. 산사태나 토

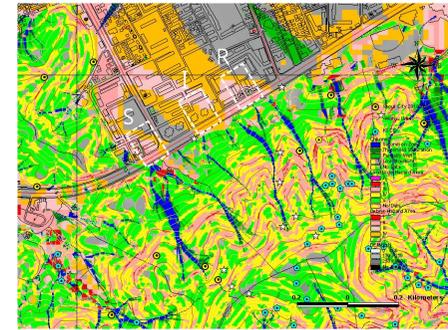
석류위험지역 외의 안전지역으로 분류된 지역에서 발생한 피해는 5건으로 전체 피해지점의 3.9%였다. 따라서 본 연구에서 분석한 산사태·토석류위험지역과 실제 발생한 피해지점과의 일치율은 96.1%로 매우 높게 나타났다.

<표 8> 산사태·토석류위험도별 피해지점 분석

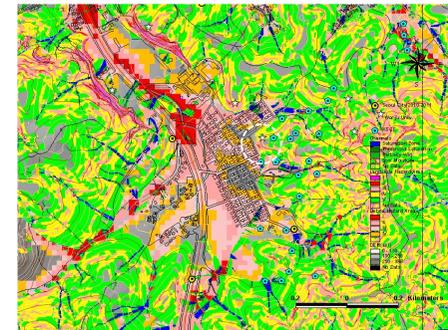
구분	면적 [km ²] (%)	피해 지점		비고	
		건수	비율(%)		
산사태 위험도	I	0.03(0.1)	1	0.8	SI = 0.0
	II	0.2(0.9)	4	3.2	0.0<SI<0.5
	III	1.5(6.6)	27	21.2	0.5<SI<1.0
	IV	3.2(14.2)	37	29.1	1.0<SI<1.5
	V	5.0(22.1)	41	32.2	1.5<SI<3.0
소계	9.93(43.9)	110	86.5	산사태위험도 소계	
토석류 위험도	I	0.4(1.8)	2	1.6	0.1<v*h*s
	II	1.0(4.4)	4	3.2	0.04<v*h*s<0.1
	III	0.9(4.0)	4	3.2	0.02<v*h*s<0.04
	IV	1.8(8.0)	2	1.6	0.005<v*h*s<0.02
	소계	4.1(18.2)	12	9.6	토석류위험도 소계
안전지역	8.57(37.9)	5	3.9	미일치율 3.9%	
합계(100%)	22.6(100)	127	100.0	일치율 96.1%	

<그림 12>는 본 연구에서 분석한 산사태·토석류위험도의 실무적 활용 가능성을 살펴보기 위하여 산사태·토석류위험도와 주택, 도로 등의 배경 지도를 중첩시켜 나타낸 것이다⁸⁾. 우면산 북쪽 방배동 일대에서 각각 3명과 2명의 사망자가 발생한 레미안 아파트(R)와 임광 아파트(I), 2세대가 반파된 신동아 아파트(S) 등 토석류 피해가 심했던 지역의 위치를 점선 박스와 영문기호로 표시하였다. 그리고 우면산 서쪽 전원마을에서 점선 원으로 표시한 곳은 사면 붕괴로 사망 1명의 인명사고가 발생한 지점이다. 그림에 나타난 바와 같이 전원마을 주택가는 관악산과 우면산으로부터 집중되는 토석류와 돌발홍수의 위험에 취약한 지역이었던 것으로 보인다. 전원마을에서는 사면 붕괴로 1명, 토석류와 돌발홍수로 5명 등 총 6명의 사망자가 발생하였다. 그림에 나타난 바와 같이 산사태위험지역은 물론 토석류위험지역의 범위를 주택, 도로 등과 중첩하여 위치 정보를 시각적으로 제공함으로써 효과적인 방재 대책 수립에 도움이 될 것으로 기대된다.

8) <그림 12>의 산사태·토석류 위험도는 우면산 정상에 위치한 공군부대의 영향을 고려하지 않고 자연 상태로 가정하여 제작된 것이다.



(a) 우면산 북쪽 방배동 일대



(b) 우면산 서쪽 전원마을 일대

<그림 12> 우면산 일대 산사태·토석류위험도와 배경 지도 중첩

III. 결론

본 연구에서는 집중호우로 인한 산사태 및 토석류위험지역을 GIS 상에서 광역적으로 분석할 수 있는 기법으로 SINMAP과 FLO-2D를 검토하였다. SINMAP은 강우의 토양 침투로부터 지형학적 습윤지수(TWI)를 산정하여 토양과 식생의 점착력 감소, 지하수 간극수압의 증가로 인한 마찰력 감소, 토피의 중량 증가 등을 고려한 무한사면안정해석기법에 의해 사면안정계수를 평가할 수 있는 시뮬레이션 모형으로 지형, 토양, 식생, 강우의 영향을 고려한 산사태위험도 분석이 가능하였다. 한편, FLO-2D는 강우가 침투능을 초과함에 따라 발생하는 지표수 흐름을 추적하여 유속과 수심으로부터 토석류위험도를 평가할 수 있는 강우·유출 시뮬레이션 모형으로 지형, 토양, 식생, 강우의 영향을 고려한 간접적인 토석류위험도 분석이 가능하였다.

2011년 7월 산사태와 토석류 피해가 극심했던 우면산 일대에 대해 적용한 결과 산사태위험도는 피해 유형과 경사 범위 등을 고려할 때 5개 등급으로 구분하는 것이 적절할 것으로 판단하였다. 토석류 위험도는 계곡 상류, 중류, 하류, 평지 등 위험지역의 위치에 따라 수리적 특성이 달라지는 것을 고려하여 4개 등급으로 구분하는 것이 적절할 것으로 판단하였다.

SINMAP으로부터 산정한 지형학적 습윤지수(TWI)와 레미안 아파트 방면 산사태와 토석류 시작지점에 대한 자료를 비교 검토한 결과 지형학적 습윤지수는 산 정상 부근에서 지하수가 수렴하는 위험지역을 식별하는데 도움이 될 것으로 보인다. 본 연구에서는 지형학적 습윤지수가 0.5 이상이고 계곡 유로 경사가 10도를 넘는 계류부를 위험물골로 제안하였는데 우면산 일대에서 발생했던 토석류 피해지역과 일치성이 높아 토석류가 유하할 수 있는 위험지역을 식별하는데 도움이 될 것으로 보인다.

FLO-2D 모형에서 제시하는 기준에 따라 수심과 유속만을 이용하여 토석류위험도를 평가할 경우 산지 급경사 계곡에서는 위험도가 과소 평가되는 반면 평지에서는 과대 평가되는 경향이 있는 것으로 보였다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위한 방안으로 기존에 제안된 수심, 유속 기준 외에 유로 경사를 추가하는 방안을 제시하였다. 정성적으로 판단할 때 본 연구에서 제안한 기준을 적용한 결과 우면산 일대에서 급경사 계류부의 토석류 위험이 평지 보다 높게 나타나 사실적인 평가에 더 가까운 것으로 보였다. 그러나 우수가 집중되는 도로 등의 토석류 위험이 다소 과대하게 평가되는 것으로 보여 개선이 필요할 것으로 사료된다.

우면산 일대에 가용한 산사태 관련 피해 자료를 이용하여 본 연구에서 분석한 산사태와 토석류 위험지역과의 일치 정도를 비교한 결과 96.1%의 높은 일치율을 보였다. 그러나 가용한 자료가 피해 면적(area)이 아닌 피해 지점(point) 자료여서 본 연구에서 살펴 본 Type I 에러 외에 Type II 에러를 분석하는 것은 제한되었다. 따라서 본 연구에서 제시한 위험지역의 면적이 과대하게 설정되었을 가능성을 배제할 수 없으며 이에 대해서는 추후 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

SINMAP 모형에서 배수 특성이 양호한 토양에서 지형학적 습윤지수가 높게 나타나 더 위험하게 분석되는 경향이 있는데 이것은 지하수 유동 측면만을 고려하기 때문이다. 집중호우 시 토양으로 침투되지 못한 초과우량은 지표수를 형성하여 흐르게 되며 경사가 급한 우리나라의 산지 계곡이나 능선에서는 사면하부세굴(undercutting)로 사면의 안정성을 크게 감소시키는 요인이 되고 있다. 앞으로 이러한 지표수의 영향을 고려하여 사면안정해석을 보완할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

FLO-2D 모형으로 평가한 토석류위험지역은 우면산 일대에서 발생한 토석류 피해 지역과 정성적으로 비교해 볼 때 비교적 잘 일치하는 것으로 보인다. 그러나 본 연구에서 제안한 토석류위험도 기준이 우면산 지역이 아닌 타 지역에도 적용성이 있는지는 추가적인 연구가 필요한 사안이다. 토석류와 돌발홍수는 토사의 농도에 따라 구분이 가능하며 토석류가 비교적 근거리에서 피해를 주는 반면에 돌발홍수는 피해 범위가 원거리까지 미치게 된다. 본 연구에서는 이를 구분하는 기준이나 방법에 대해서 검토하지 않았다. 이에 대해서도 추후 연구가 필요할 것으로 사료된다. 마지막으로 본 연구에서 분석

한 SINMAP 산사태위험지역과 FLO-2D의 토석류위험지역 사이에 직접적인 연관성이 없다는 점은 앞으로 해결해야 할 과제로 보인다. 김상규 외(1997)가 지적한 바와 같이 우리나라에서 발생하는 산사태는 주로 평행활동으로 파괴되어 대부분 토석류로 전환되므로 산사태와 토석류는 밀접한 관계에 있기 때문이다.

결론적으로 본 연구를 통하여 SINMAP과 FLO-2D는 각각 산사태 위험지역과 토석류 위험지역을 광역적으로 스크린(screen)하는 도구로서 유용할 것으로 분석되었으나 우리나라 산사태의 주요 메커니즘 가운데 하나인 지표수에 의한 사면하부세굴이 산사태 분석에 미 반영된 점과 분석된 산사태와 토석류 위험도 사이에 직접적인 연계성이 없다는 점은 본 연구에서 적용한 모형들의 한계로 추후 개선할 여지가 있다고 사료된다.

참고문헌

국립방재연구소. 2004. 토석류의 발생작용 및 피해저감에 관한 연구. 서울: 국립방재연구소.
 김병식, 배영혜, 홍승진. 2009. 격자형 강우자료와 GIS자료를 이용한 돌발홍수와 토석류 발생 위험도 분석. 대한토목학회 학술발표회논문집.
 김상규, 서홍석. 1997. 레올로지 모델을 이용한 토석류 이동해석. 한국지반공학회지. 13(5): 133-143.
 김홍택, 김진호, 이혁진, 박덕근. 2002. GIS 기법을 이용한 토석류 발생위험도 분석. 2002년도 대한토목학회 학술발표회논문집.
 동아일보. 2012. 6. 21. 산림청 산사태 관리 시스템 엉터리.
 서용석, 채병근, 김원영, 송영석. 2005. 인공신경망을 이용한 사태물질 이동거리 산정. 대한지질공학회지. 15(2): 145-154.
 서용석, 김성권, 채병근. 2008. 토석류 산사태 시뮬레이션 연구. 대한지질공학회 학술발표회 논문집.
 서울연구원. 2012. 우면산 산사태 원인 추가 및 보완 조사 공청회.
 오경두, 전병호, 양경규, 안원식, 조영호. 2005. 도시유역 CN 산정 연구. 한국수자원학회논문집. 38(12): 1009-1020.
 오경두. 2009. 분포형 모형 VfloTM에 의한 수문해석. 한국수자원학회 제20회 수공학위크샵 강의자료.
 유한중, 신종환, 서홍석, 김기홍, 이승우. 2012. 유역별 토석류 위험도 평가 모델. 한국방재학회논문집. 12(4): 67-76.
 윤용남. 2005. 수문학. 경기: 청문각.
 이승우, 김기홍, 윤찬영, 유한중, 홍성재. 2012. 데이터베이스 구축을 통한 산사태 위험도 예측식 개발. 한국지반공학회. 28(4): 23-39.
 이종학. 2005. GIS를 이용한 산사태위험지 관리시스템. 한국산림공학기술연구회. 3(3): 245-255.

이창우, 우충식, 윤호중. 2010. RWM(Random Walk Model)을 이용한 토석류 피해예측지도 시범제작. 한국임학회 정기학술발표논문집.

조용찬, 채병곤, 김원영, 장태우. 2007. 화강암질암 지역 토석류 산사태 예측을 위한 로지스틱 회귀모델의 수정 및 적용: 강릉지역을 대상으로. 자원환경지질학회논문집. 40(1): 115-128.

채병곤, 김원영, 조용찬, 김경수, 이훈오, 최영섭. 2004. 토석류 산사태 예측을 위한 로지스틱 회귀 모형 개발. 대한지질공학회지. 14(2): 211-222.

채병곤, 김만일. 2010. DEBRIS-2D를 이용한 인제지역 토석류 산사태 거동모사 사례 연구. 대한지질공학회지. 20(3): 231-242.

한국지반공학회. 2011. 우면산 산사태 원인조사 및 복구대책수립 용역 최종보고서.

한국지질자원연구원. 2009. 산사태재해 예측 및 저감기술 개발. 대전: 한국지질자원연구원.

Beven, K. J. and M. J. Kirkby. 1979. A Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24(1): 43-69.

Chacon, J., C. Irigaray, T. Fernandez, and R. E. Hamdouni. 2006. Engineering Geology Maps: Landslides and Geographical Information Systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 65: 341-411.

Fowze Muhammathu, J. S. 2012. *SINMAP Theory and Implementation*(http://rs-capacity-building.tksc.jaxa.jp/pdf/16_5-0000003.pdf).

Gordon, N. D., T. A. McMahon., and B. L. Finlayson. 1992. *Stream Hydrology*. John Wiley & Sons Ltd.

Hammond, S., D. Hall, S. Miller, and P. Swetik. 1992. *Level I Stability Analysis(LISA) Documentation for Version 2.0, General Technical Report INT-285*. USDA Forest Service Intermountain Research Station.

O'Brien, J. S. 2007. *FLO-2D User's Manual*. FLO Engineering, Inc.

O'Brien, J. S. 2009. *FLO-2D Reference Manual 2009*. USDA

Pack, R. T., D. Tarboton, C. N. Goodwin, and A. Prasad. 2005. *SINMAP 2.0: A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping*. Utah State University.

Zhuang, J. Q., P. Cui, J. B. Peng, K. H. Hu, and J. Iqbal. 2013. Initiation Process of Debris Flows on Different Slopes due to Surface Flow and Trigger-Specific Strategies for Mitigating Post-Earthquake in Old Beichuan County, China. *Environmental Earth Sciences*. 68: 1391-1403.

로 제작중이다. 주요 논문으로 “GIS 기반 산사태 예측 모형의 적용성 평가(2006)” 등이 있으며, 관심 분야는 산사태, 토석류, 돌발홍수, 댐 붕괴 등 자연재해 관련 위험지도제작과 주민대피계획 등으로 중앙지수지·댐 안전관리위원, 소방방재청 사전재해영향성검토위원, 풍수해저감종합계획심의위원, 서울특별시 건설기술심의위원, 서울지방국토관리청 설계자문위원, 제주특별자치도 하천관리위원으로 활동하고 있다(okd0629@kma.ac.kr).

李昶熙: 경북대학교 공학박사 학위를 취득하고(논문제목: GIS기반 도시침수해석 통합모형의 개발, 2006년 2월), 현재 한국방재협회 정책연구실 실장으로 재직하고 있다. 주요 논문으로는 “수치모형을 이용한 하천제방 설계인자 검토(2011)”, “체계적인 방재자원 동원체계를 구축하기 위한 운영체계 및 제도 개선 방안(2013)” 등이 있다(lch75039@hanmail.net).

姜秉和: 고려대학교 공학박사 학위를 취득하고(논문제목: 초고층 및 지하연계 복합건물의 지하공간 침수대책 평가기준 연구), 현재 한국방재협회 회장으로 재직하고 있다. 주요 논문으로는 “소하천정비사업 우선순위 선정기준에 관한 연구(2011)”, “국가 지진재해대응시스템 구축 및 운영체계(2009)” 등이 있으며, 서울특별시 안전관리위원회 위원, 제주특별자치도 사전재해영향성검토위원, 국토해양부 중앙하천관리위원회 위원으로 활동하고 있다(kal2222@naver.com).

許再寧: 일본 오사카대학에서 공학박사 학위를 취득하고(논문제목: A Numerical Study on the Behavior of River Plumes, 1989. 3), 현재 대전대학교 토목공학과 교수로 재직하고 있다. 주요 저서로는 하천공학(도서출판 회중당, 1997)과 수리학(개정증보판)(형설출판사, 2002) 등이 있다(jyhuh@dju.kr).

黃信鈞: 상지대학교 공학석사 학위를 취득하고(논문제목: Rule Operation 기법을 이용한 남한강 유역의 홍수 해석), 현재 한국방재협회 정책연구실 연구원으로 재직하고 있다. 주요 논문으로는 “하천 중심의 제방붕괴 위험인자 평가(2012)”, “HEC-RAS 모형을 이용한 남한강 홍수해석 모형의 구축(2011)” 등이 있다(driftt@s Nate.com).

투 고 일: 2013년 08월 22일
수 정 일: 2013년 09월 13일
게재확정일: 2013년 09월 17일

吳景斗: 미국 U. of Washington, Seattle에서 석사와 박사학위를 취득하고, 현재 육군사관학교 건설환경학과 교수

A Methodology to Analyse Landslide and Debris-Flow Hazards Due to Heavy Rainstorms

– Application on the Damage Areas around Woomyon Mountain –

Kyoung Doo Oh, Chang Hee Lee, Byung Hwa Kang, Jae Young Heo, Shin Bum Hwnag

As localized heavy rainstorms due to global climate change occur more frequently along with rapid increase of forest encroachment due to expansion of cities, loss of life and property due to landslides and debris flows also increases gradually. In order to cope with increasing hazard risk scientific and reasonable policies for the prevention of landslide-related disasters are urgently needed; the law concerning landslide-related disasters requires the government to provide hazard maps which may be used for hazard forecast as well as design and construction of hazard mitigation facilities. Even until now, however, not so much research on this subject enough to secure the safety of citizens has been carried out. We proposed a methodology to analyze landslide and debris-flow hazard risks due to heavy rainstorms quantitatively using SINMAP and FLO-2D models. The proposed methodology was applied for the analysis of disastrous damage around Woomyon Mountain in Seoul occurred on July 27th 2011. The hazard maps from this study seem to show fairly good agreement with damage areas. The hazard maps showing not only landslide-prone slopes but also high debris-flow risk areas are expected to be useful for the disaster prevention and mitigation planning to reduce loss of life and property.

Key words: landslide, debris flow, heavy rainstorm, GIS, SINMAP, FLO-2D