

매개변수에 따른 산사태 위험도의 변화

Variation of Landslide Risk with Parameters

이 준 대¹⁾ · 권 영 철²⁾ · 배 우 석[†]

Jundae Lee · Youngcheul Kwon · Wooseok Bae

Received: November 2nd, 2017; Revised: November 22nd, 2017; Accepted: December 8th, 2017

ABSTRACT : In this study we performed risk evaluation based on parameters using the SINMAP, GIS-based extended program in order to predict ground disaster that is frequent recently. As for the risk evaluation, in order to understand the effects of parameters, we defined that the ranges of internal friction angles and T/R values as important variables had three and four patterns, respectively. The results of the interpretation were compared with those of the existing landslide in order to identify landslide flow and to evaluate the applicability of the parameters. The analysis of the geomorphologic saturated zone showed that the boundary saturated zone and the saturated zone were almost consistent with the site of avalanche of earth and rocks and the area of underground water convergence was correlated to the area where collapse started, indicating that the geomorphologic saturated zone may serve as an index for estimating possibility of landslide when used with slope distribution, colluvial soil, and structures inducing landslide in combination. When the lower limit of the internal friction angle increased more, the upper threshold decreased by 50 to 70% and the influence on the stability index was higher, but the influence was declined within the range of lower wetness index. The analysis of changes based on wetness index range showed that all the groups have similar SI distribution, except for the one in which mean altitude values are applied, indicating that the results are susceptible more by the internal friction angle than by the wetness index.

Keywords : Landslide, Risk evaluation, SINMAP, Parameters

요 지 : 본 연구에서는 최근 발생하는 지반재해를 사전에 예측하기 위해 널리 사용되고 있는 GIS의 기반의 확장프로그램인 SINMAP을 이용하여 매개변수에 따른 위험도 평가를 수행하였다. 위험도평가는 매개변수의 영향을 파악하기 위해 중요변수인 내부마찰각과 T/R 값의 범위를 각각 3가지와 4가지 패턴으로 결정하였으며, 해석결과를 기존 산사태 결과와 비교하여 산사태 거동을 규명하고 매개변수의 적용성을 평가하였다. 지형학적 습윤대를 분석한 결과, 한계습윤대와 포화대가 토석류 영역과 거의 일치하고 있으며 지하수 수렴부가 붕괴시점부와 상관관계가 있는 것으로 나타나 지형학적 습윤대가 경사분포나 붕괴도층의 존재여부, 산사태 유발구조물 등과 복합적으로 산사태 발생 가능성을 평가하기 위한 지표로 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 내부마찰각의 하한계가 증가함에 따라 상한계불안정영역이 50~70%까지 감소되어 안정지수에 미치는 영향력이 큰 경향을 보였으나 낮은 습윤지수 범위에서는 그 영향력이 줄어드는 양상을 나타내었다. 습윤지수의 범위에 따른 변화를 분석한 결과, 고도평균값을 적용한 경우를 제외하면 모든 Group에서 유사한 안정지수 분포를 보이고 있어 습윤지수보다는 내부마찰각에 민감한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다.

주요어 : 산사태, 위험도평가, SINMAP, 매개변수

1. 서 론

지난 2011년 춘천, 우면산 산사태는 토석류가 전 국가적으로 사회 문제로 부각되는 계기가 되었으며 이에 대한 국민적 우려와 관심도 급증하였다. 그러나 산사태가 갖는 불확실성과 지반의 불규칙성, 해석상의 전제조건 등 현존하는 오차요인들로 인해 산사태를 정확히 예측하는 데 많은 어려움을 겪고 있는 것도 현실이다. 더욱이 국토의 상당부분이 급경사지이며 비교적 표층이 얇아 천근종의 수목에 대해 외부요인에 저항하기 위한 뿌리작용을 기대하기 어려워 이와

같은 기후적, 지형·지질적, 인위적 원인에 의해 많은 산사태가 발생하고 있는 상황이다. 최근 많은 산사태가 토석류 유형을 따르고 있는 것으로 밝혀지고 있어(Kim & Han, 2017) 이에 대한 연구가 집중되고 있으나 국내연구는 초기단계로 지속적인 조사와 분석이 필요하다.

GIS 기술을 이용하여 사면의 안정성과 산사태 위험성을 평가하는 대표적인 방법으로 Montgomery & Dietrich(1994)는 무한사면안정모델을 통해서 사면의 경사와 집수지역을 기반으로 하는 사면안정 등급을 정의하고, Wu & Sidle(1995)는 무한사면안정모델에 동적인 수리 모델링을 접합시킨 더

1) Department of Civil Engineering, Semyung University

2) Department of Civil Engineering and Management, Tohoku Institute of Technology

† NANO-GEO ENC Co. Ltd. (Corresponding Author : old1007@hanmail.net)

욱 정교한 모델을 제시하였으며, Pack(1995)은 수리적 모델을 무한사면안정모델과 결합하여 사면안정분석을 위한 SINMAP을 개발하였다. 광역적인 산사태 평가를 위한 지반재해위험도 분석과 관련해서 선진국에서는 오래전부터 GIS기법을 이용하여 재해위험지도를 제작하고 있으며(Chacon et al., 2006), 국내에서는 최근 GIS기법을 이용한 산사태 재해위험 지역 분석과 관련된 많은 연구가 수행되고 있는 상황으로 Kim et al.(2002)은 수문·토질역학적 사면안정해석기법을 채택한 SINMAP 모형을 이용하여 붕괴위험지역을 식별함으로써 토석류 발생위험도를 평가하였다. 지금까지 국내에서 수행된 산사태 및 토석류 위험도 관련 연구는 산사태가 발생할 가능성이 높은 사면의 위치를 찾아내는 기술에 집중(Oh et al., 2013)되어 왔으며, Oh et al.(2006)은 GIS 기반 토석류 예측모형의 적용성 평가에서 GIS 기반의 예측모형 SINMAP의 적용성을 검토하였고, Kim & Han(2017)은 초기 설정값이나 토질시험 결과를 단일보정영역에 입력하여 발생하는 문제를 해결하기 위해 정밀토양도를 이용하여 다중보정영역에 대해 토양토별로 매개변수를 입력할 수 있는 새로운 방식을 제시하였다.

현재까지 산사태나 토석류의 피해를 줄이기 위해 많은 위험성 평가 및 예측과 관련된 연구가 진행되어 왔으며, 국내의 경우 실제 산사태 현장정보를 기반으로 발생요인에 인위적 가중치를 부여하는 방법으로 광역적인 안정성을 평가하여 왔으나 가중치에 대한 객관성이 결여될 수 있고 산사태 발생의 물리적 메커니즘을 반영하기 어려운 단점을 가지고 있으며, 확률론적 기법과 통계적 기법은 실제 산사태 발생 지점에 기초하여 발생 요인에 대한 상관관계를 통계적으로 해석하여 확률을 제시하는 방법으로 임의 대상 지역의 산사태 발생 요인들의 통계적 특성을 반영하는 식을 사용하기 때문에 타 지역에서의 적용에 한계를 가진다(Oh, 2013). 그러나 대부분의 연구는 매개변수로 프로그램의 제안값을 그대로 적용하거나 일부 경험값을 사용하는 등 자의적인 판단에 의해 사용함으로써 산사태 위험도 예측의 신뢰성에 다양한 문제점이 부각되고 있는 상황이다.

따라서 본 연구에서는 최근 빈번하게 발생하고 있는 산사태나 토석류와 같은 지반재해를 사전에 예측하기 위해 널리 사용되고 있는 GIS의 기반의 확장프로그램인 SINMAP을 이용하여 입력변수로 사용되고 있는 매개변수의 영향력을 평가하였다. 영향력 평가를 위해 춘천 ○○지역의 기존 산사태 발생지역을 연구 대상지역으로 선정하고 동일지역에 대한 지표지질조사 결과와 기존 조사자료를 활용하여 해석에 필요한 데이터를 수집하였다. 위험도평가는 매개변수의 영향을 파악하기 위해 중요변수인 내부마찰각과 T/R 값의 범위를 3가지 패턴으로 결정하였으며, 해석결과를 기존 산

사태 결과와 비교하여 산사태 거동을 규명하고 매개변수의 적용성을 평가하였다. 매개변수는 기본값으로 SINMAP에서 제공하고 있는 default 값을 사용한 1그룹과 Oh et al.(2013)이 제안하고 있는 산지와 비산지를 4개의 그룹으로 나누어 적용하는 방식인 2그룹, Kim(2012b)이 제안한 고도 평균을 이용하는 3그룹으로 나누어 해석을 수행하였다. 토석류의 발생가능성과 위험평가에 적용되는 매개변수의 영향을 평가하기 위해서 GIS 상용프로그램인 ArcGIS를 사용하였으며, 국토지리정보원에서 발행한 1/5000 수치지도를 이용하여 DEM(Digital Elevation Model)을 제작하였다. DEM은 분석 시의 신뢰성을 확보하기 위해 10×10m의 해상도로 제작하였다. SINMAP을 사용한 해석결과는 사면의 안정도를 6개 등급으로 나누어 평가하는 사면안정지수(SI)로 평가하며 기존 산사태 발생 구간과 비교·분석하였다.

2. 산사태 피해지역 평가

2.1 연구대상지역의 현황

본 연구의 대상지역은 강원도 춘천시 신북읍 천전리 ○○지역으로 2011년 07월 27일 총 2개소에서 토석류로 인한 피해가 발생한 지역이다. 대상지역은 급경사지에서 발생한 산사태가 토석류로 발전하여 각각 350m 및 150m 정도를 유하하여 많은 인명과 재산피해를 유발하였다.

현장조사 결과, Fig. 1과 같이 대상 지역은 봉적층이 상당히 두껍게 발달되어 있는 구간으로 재해가 발생한 구간의 상부 경사는 30~55°의 고각을 형성하고 있으며 표층부가 매우 느슨한 상태이고 35~40°로 사면붕괴가 발생하였다. 유하부는 보통 15~25°의 저각으로 형성되어 암석과 토사, 유목을 퇴적으로 유하시킨 것으로 추정되며, 사면의 길이는 토석류 1지역이 280m, 토석류 2지역이 196m로 나타났고 폭은 토석류 1지역 약 10~25m, 토석류 2지역이 8~30m인 것으로 조사되었다. 지역별로 차이는 있지만 토석류 1지역의 경우 발생부 사면 위쪽으로 임도가 있었으며 임도 아래 쪽으로 세굴이 발생하여 전체적인 원호파괴 형태의 모습을 나타내었고, 토석류 2지역의 경우는 발생부 상부에 옛 군사 시설과 밭이 확인되었으며 배수로에서 발생부 쪽으로 유출이 있어 전형적인 세굴에 의한 평면파괴 형태로 발생하였다(Choi, 2013).

조사구간에 형성된 봉적층은 점성을 함유한 토사가 전석이나 자갈질과 함께 구성되어 있으며 하부 퇴적부에서 많은 양의 수분을 함유하는 토질인 것으로 확인되었다. 이러한 토층의 성질이 활동력을 배가시키는 데 영향을 미쳤을 것으로 판단되며, 현장 조사결과 매우 느슨하게 구성되어 있는

것으로 나타났다.

또한 Kim(2012a)이 현장의 5개 지점에서 채취하여 실행한 실내시험결과, 전체적으로 세립분을 많이 포함하고 있는 점토질 모래로 통일분류법상 SC로 구분되었으며 대상구간의 점착력은 31.38~53.94kPa, 내부마찰각은 38~40°, 투수계수는 1.16~1.19×10⁻³cm/sec으로 실트질 모래의 투수계수 범위로 분석되었으며 대체적으로 많은 점토질을 함유하고 있

는 지반으로 분석되었다.

조사결과 2011년 6월 22일에서 7월 14일까지 724mm에 상당하는 선행강우가 발생하였으며, 7월 26일~29일 754mm의 누적강우량을 기록하고 피해 직전 6시간 동안의 지속강우량이 261mm로 기록되었으며 7월 26일 23시에는 65mm의 최대 시우량을 기록하였다. 따라서 산사태 발생일 당시 강우강도가 침투능을 증가하여 표층부의 유효응력이 감소



Fig. 1. Site detail of chunjeon-ri landslide

Table 1. Detail investigation results of landslide damage (Choi, 2013)

Site 1					Site 2						
Position	L (m)	W (m)	Area (m ²)	Degree (°)	Position	L (m)	W (m)	Area (m ²)	Degree (°)		
1	Initiation zone	44	26	1,144	38	Initiation zone	10	8	80	39	
		19	20	380	27		2	6	9	54	35
3	Initiation zone	19	15	285	42		3	7	14	98	41
		4	14	56	37		4	7	15	105	35
		20	16	320	55		5	7	14	98	52
		21	14	294	32		6	10	14	140	44
		25	17	425	30		7	8	20	158	40
7	Transport zone	18	16	288	25		8	9	15	138	45
		22	16	352	10		9	10	14	137	26
		20	15	300	20		10	16	17	266	22
		20	14	280	19		11	20	16	324	16
12	Deposition zone	6	26	156	13		12	24	14	346	46
		42	20	840	11		13	62	33	2,046	11

Table 2. Results of laboratory tests of study area (Kim, 2012a)

Site	ω (%)	Gs	LL (%)	PI (%)	USCS	γ _d (kN/m ³)	e	k (cm/s)	c (kPa)	φ (°)
1	10.3	2.7	26.9	8.38	SC	15.7	0.72	1.2E-3	53.94	38
2	9.56	2.72	24.8	9.72	SC	16.1	0.69	1.9E-3	31.38	40

하고 지속적으로 지하수위가 상승함으로써 붕적토층의 상부 지점에 파괴를 유발시키며 이에 따른 전이와 slip이 토석류를 진행시킨 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구대상 지역의 산사태는 집중호우로 포화대가 하강하면서 임도 등 일부구간에서 침식이 발생되고 이 구간이 확장되면서 파괴를 유발하며 파괴된 토사와 암석, 유목 등이 기반암 상부의 표층을 파괴하며 하부로 전이되어 slip을 발생시키는 과정을 통해 유하된 쇄설물이 능선 하부의 퇴적부에 위치한 구조물을 매몰 또는 파괴시킨 것으로 판단된다.

2.2 SINMAP 모형과 매개변수

SINMAP은 미국 Utah대학에서 개발된 것으로 상용프로그램인 GIS상에서 누구나 개인의 목적에 맞게 수정하여 사용할 수 있도록 공개된 프로그램이다(Pack et al., 2005). SINMAP 모형은 디지털고도모델(Digital Elevation Model) 데이터의 지리적 정보에 기반을 둔 계산과 사면 안정지수(Stability Index) 매핑을 시행하는 ArcView GIS 프로그램의 확장형으로 정상상태 수리모델로 얻어진 습윤도와 함께 무한평면사면안정성모델의 이론적 근거를 가지고 있다. 또한 디지털고도모델(DEM)은 필요한 입력정보(기울기 및 비집수면적)를 얻고자 할 때 사용되고 매개 변수는 하한값과 상한값 사이의 범위를 가진다. 이 값들은 토질, 식물 또는 지질학적 데이터를 기반으로 한 지형학적 보정영역(calibration regions)에 의해 보정된다. SINMAP에 대한 이론적 접근은 Pack et al.(2001), Kim & Han(2017)을 참고할 수 있다.

SINMAP의 주요 매개변수는 흙의 내부마찰각, 습윤지수(T/R), 점착력(C)으로 현장 측정된 자료를 실험실분석을 통해 얻는 것이 가장 유리하며, 기타 DEM을 통해 경사도, 모압, 산림상태, 경사길이, 경사위치, 사면형태, 토심 등을 고려할 수 있다. 또한 SINMAP은 광범위한 지역의 산사태 위험성을 대표하기 위해 여러 한계성을 동시에 포함하고 있으며, 우선 프로그램에서 추천하는 설계값은 미국(Utah)에 적합한 것으로 국내 적용을 위한 입력정수의 신뢰성이 요구되는 상황이다. 그리고 SINMAP의 안정지수는 수치적으로 정확하게 해석된 절댓값이라기 보다는 상대적인 위험성을 표현하는 값이라는 한계성이 있으며, 좁은 지역에서 발생하는 토석류의 진행방향이나 거리, 충격량 등의 재현에는 어려움이 있다는 단점을 가지고 있다. 그러나 현재 광역적인 지역의 산사태 위험성을 다양한 인자를 활용하여 분석할 수 있는 프로그램이 많지 않은 상황에서 본 프로그램이 연구목적 수행하기 위한 최적의 특징을 가지고 있는 것으로 판단된다.

이전의 연구로부터 Song et al.(2012)은 T/R, $\tan\phi$, C 라

는 세 가지 변수의 국내지형에 맞는 값을 구하는 것이 가장 중요하다고 주장하였고, 나무뿌리의 강도는 안전율에 다소 영향을 미치지만 흙의 전단강도 및 토심은 안전율에 미치는 영향이 매우 커 토석류 위험도를 분석할 경우 흙의 전단강도와 토심의 선정에 대하여 매우 신중할 필요가 있다고 주장하였다. 또한 Oh et al.(2013)은 유역의 수문학적 특성을 반영한 매개변수 T/R[m]은 집중호우 시 지하수에 의한 사면의 붕괴에 큰 영향을 미치는 중요한 인자이나 연직방향과 달리 사면에 평행한 방향의 투수계수가 갖는 이방성과 근층의 굴이나 썩은 나무뿌리 등으로 인한 대공극 등의 영향으로 쉽게 결정하기 어려운 매개변수라 설명하였다. 그리고 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 부여하고 해석을 수행하였으며, 토양과 식생 뿌리의 상대적 점착력(C)에 대해서는 산지와 비산지에 대해 다르게 적용하였다. 우면산 일대 흙의 점착력은 10kN 정도로 제시하고 식생뿌리의 점착력은 뿌리가 토양에 얽게 분포하고 있음을 감안하여 1kN 정도로 제시하고 있어 산지에 대해서는 상대적 점착력(C)을 0.00~0.25로 적용하고 비산지에 대해서는 식생뿌리의 영향을 토양과 식생뿌리 전체 점착력의 10% 정도로 가정하여 모형에서 제시한 기본값을 10% 감소시킨 0.00~0.22로 부여하였다. 토양의 내부마찰각은 우면산 전 지역에 대해 24~35°를 동일하게 적용하였다. 분석결과, 지형학적 습윤지수는 산 정상 부근에서 지하수가 수렴하는 위험지역을 식별하는 데 도움이 될 것으로 보이는 것으로 해석되었고 우면산 토석류 피해와 일치성이 높아 지형학적 습윤지수가 0.5 이상이고 계곡유로 경사가 10도를 넘는 계류부를 위험물골로 제안하고 토석류가 유하할 수 있는 위험지역을 식별하는 방법으로 제시하였다.

현실적으로 토석류가 발생하는 지역은 일반 평지가 아닌 산지이므로 일반적으로 사용되는 대형 현장조사장비가 진입하기 곤란한 문제가 발생하여 수치해석을 위한 정확한 지반정수 산정에 어려움이 발생한다. 따라서 Song et al.(2013)은 실내투수시험 결과와 지표투수시험 결과를 비교하고 두 실험 결과가 큰 차이가 나타나지는 않아 향후 두 시험 중 한쪽만 수행하여도 SINMAP 등 해석을 위한 입력자료로 충분한 활용가치가 있을 것으로 판단된다고 발표한 바도 있다.

따라서 본 연구에서는 붕괴지역에 대한 기존 사례조사 결과와 기준에 알려진 뿌리부의 점착력을 이용하여 분석한 결과 프로그램에서 적용하고 있는 상한한 범위에 포함되어 기본값을 적용하였다. 내부마찰각은 산사태 발생에 많은 영향을 미치는 요소로 기존 사례조사 결과 38~40°를 보이고 있

어 Pack et al.(2001)이 제안한 마찰각의 범주에 포함되는 것으로 판단하고 프로그램에서 적용하고 있는 기본값군과 토지공사의 분류표상의 내부마찰각범위군, 대상지에 대한 실험값과 Pack et al.(2001)이 제안한 내부마찰각 범위군으로 구분하여 해석을 수행하였다.

투수량계수와 투수계수의 비(또는 토양의 수리전도도에 대한 지하수 유입량의 비)인 습윤지수(T/R)는 SINMAP 모형의 매개변수 중 가장 까다로운 부분이다. “(T/R)sinθ [m] 값은 강우량이 많은 기간에 포화상태를 만들어내는데 요구되는 사면시작부에서 토석류 발생지점까지의 거리의 길이로 생각될 수 있다”라고 기술한 Pack et al.(2001)의 추정치에 따라 사면이 시작되는 지점으로부터 토석류 발생 시작점까지의 거리를 SINMAP 모형에서 계산된 흐름 방향선을 따라 ArcView에서 측정하여 T/R을 산정한다(Kim, 2012b). 또한 T/R 값은 값이 작을수록 같은 양의 강우량에 대해 사면의 지하수위 상승이 증가하여 붕괴위험이 높아지는 성질을 가지게 된다(Oh et al., 2013).

Kim(2012b)은 토석류의 시작지점을 모르는 경우, 토석류 발생 시점이 산지의 5부~7부 능선부인 것에 착안하여 유역의 고도평균값을 T/R의 상한값으로 정하고 표고 최고점의 10%를 T/R의 하한값으로 하는 개략적인 T/R 산정 방법을 제시하였으며 다음 식에 의해 결정할 수 있다고 제시하였다.

$$(T/R)_{\min}(\text{고도 최고점의 } 10\%) \sim (T/R)_{\max}(\text{고도평균값}) \quad (1)$$

따라서 본 연구에서는 습윤지수(T/R)의 변화에 따른 안정지수의 변화를 분석하기 위해 프로그램에서 정하고 있는 상하한 범위인 2,000~3,000m의 그룹과 Oh et al.(2013)이 미국 NRCS의 수문학적 배수기준을 토대로 A~D의 4등급

으로 분리하여 부여한 방식을 적용하여 1,750~3,000m를 적용하였다. 마지막으로 Pack et al.(2001)의 주장을 토대로 토석류 발생시점을 이용하여 습윤지수를 제안한 Kim(2012b)의 방법론에 의해 20~140m의 범위를 매개변수로 적용하였다.

해석에 적용된 매개변수의 범위는 국내의 유사 해석에서 제안하고 있는 다양한 방법론으로 기 붕괴가 발생한 지점을 대상으로 적용 가능성을 정성적으로 평가하는 데 그 목적이 있음을 밝힌다.

3. 매개변수에 따른 사면안정지수의 변화

본 연구에서는 내부마찰각과 습윤지수의 변화가 사면안정지수에 미치는 영향을 평가하기 위해 내부마찰각의 하한계와 상한계 값을 토지공사분류 값, 프로그램 기본값, 실험값의 세 Group으로 나누고 각각의 Group에서 습윤지수(T/R)를 4개의 Case로 나누어 해석을 수행하였다. 습윤지수의 Case는 각각 프로그램의 기본값, Oh et al.(2013)이 토지피복도를 고려하여 제안한 값, Kim(2012b)이 고도평균 값을 이용하여 제안한 방법을 이용하여 산정한 값을 적용하였다.

3.1 내부마찰각의 영향

Fig. 2는 Group 1~3에 대한 해석 결과로, 내부마찰각의 하한계를 증가시키며 해석을 수행한 사면안정지수의 면적비 산정 결과를 나타내고 있다. 모든 경우에서 고도평균값을 이용하는 방법이 다른 방법에 비해 상·하한계불안정 영역이 과다하게 산정되는 것으로 나타났으며 상대적으로 안정영역의 면적비가 급격히 축소되어 불안정 영역이 과대 산정되는 경향을 보이는 것으로 분석되었다.

Table 3. Parameters applied to SINMAP

Parameters		Value			
Common	Gravitational acceleration	9.81 m/s ²			
	Density of water	9.8 kN/m ³			
	Density of soil	19.6 kNg/m ³			
	Complex cohesion	Lower bound 0.0 kPa Upper bound 24.5 kPa			
Variable	Group1	Case1	Case2	Case3	Case4
	T/R	2,000 m ~ 3,000 m	1,750 m ~ 2,500 m	2,250 m ~ 3,000 m	20 m ~ 140 m
	φ	25°~35°			
	Group2	Case5	Case6	Case7	Case8
	T/R	2,000 m ~ 3,000 m	1,750 m ~ 2,500 m	2,250 m ~ 3,000 m	20 m ~ 140 m
	φ	30°~45°			
	Group3	Case9	Case10	Case11	Case12
	T/R	2,000 m ~ 3,000 m	1,750 m ~ 2,500 m	2,250 m ~ 3,000 m	20 m ~ 140 m
φ	36°~43°				

Fig. 2(a, d)은 전국의 토양조사 결과를 이용한 범위로 고도평균값을 이용하는 방법을 제외하면 T/R 값의 범위에 따른 변화는 크지 않으며 불안정영역이 약 60%에 달하는 것으로 나타났다.

Fig. 2(b, e)은 프로그램이 제안하고 있는 범위로 Group 1에 비해 안정영역이 30~40% 정도 면적이 증가하고 있으며, 하한계불안정영역은 큰 변화가 없으나 상한계불안정영역은 약 70%까지 감소되는 경향을 나타내고 있다. Fig. 2(c,

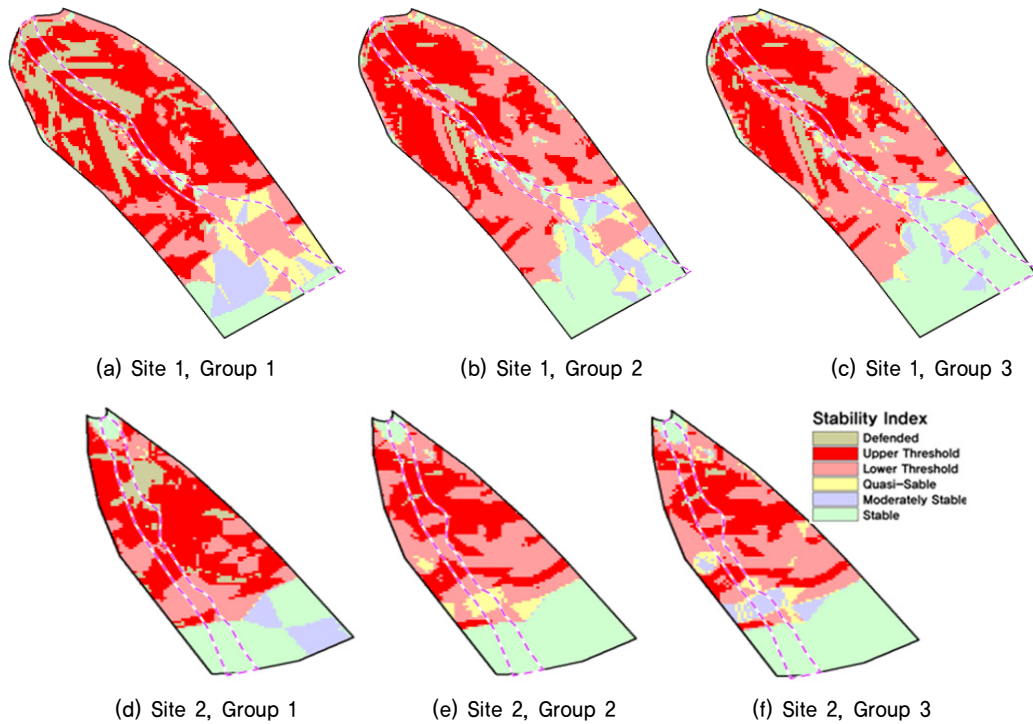


Fig. 2. Comparison of slope stability index with elevation average value

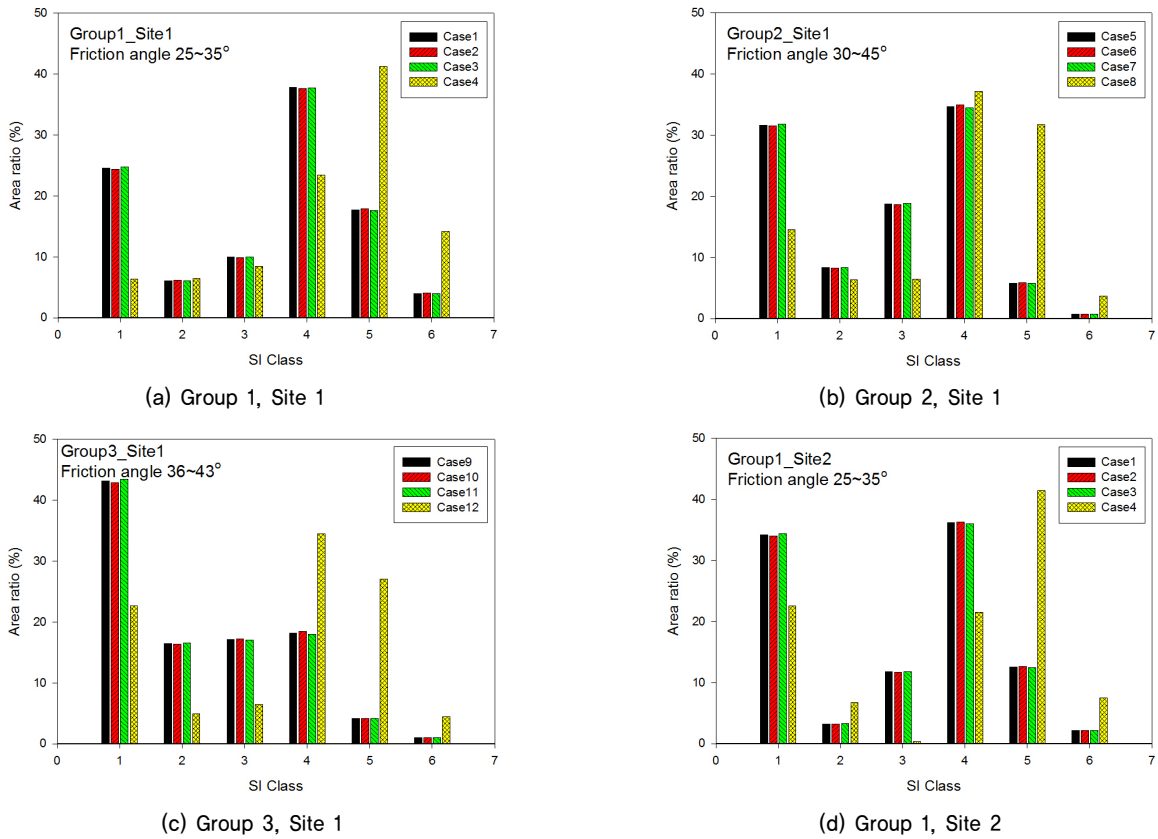
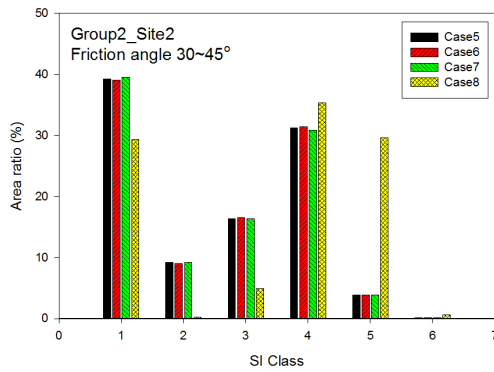
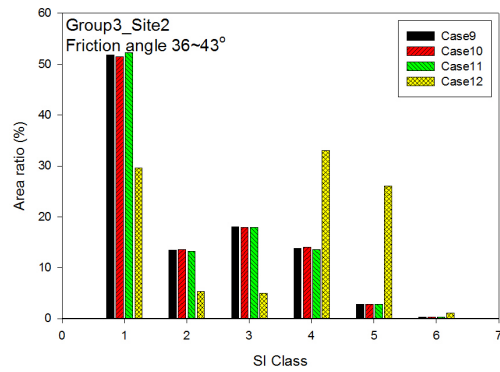


Fig. 3. Comparison area ratio with slope stability index



(e) Group 2, Site 2



(f) Group 3, Site 2

Fig. 3. Comparison area ratio with slope stability index (Continued)

f)는 산사태 발생지역에서 채취된 시료의 실험결과를 이용하는 방법으로 안정영역이 약 30~50%로 급증하고 반대로 불안정영역은 28~47%까지 감소되는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 토석류가 발생된 Site 2에서도 동일한 경향을 보여 내부마찰각이 사면안정지수를 결정짓는 중요한 변수임을 확인하였다(Fig. 3).

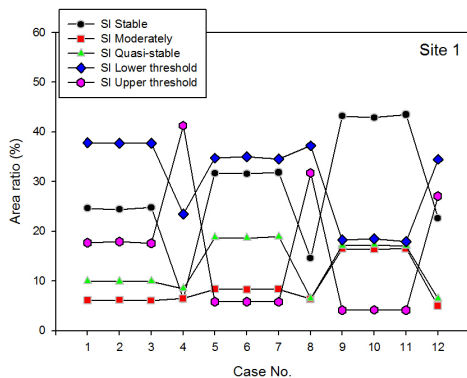
3.2 습윤지수의 영향

Fig. 4는 제 1, 2지역에 대한 Case 1~12의 해석 결과로, 습윤지수의 범위를 변화시키며 수행한 결과이다. 습윤지수는 프로그램 기본값인 Case 1, 5, 9와 산지와 비산지를 구분하고 각각에 대해 4개 그룹으로 나누어 습윤지수를 제안한 Oh et al.(2013)의 방법인 Case 2, 6, 10과 Case 3, 7, 11 대상 지역의 지형을 고려하여 고도평균값을 사용하는 방법인 Case 4, 8, 12로 나누어 분석하였다.

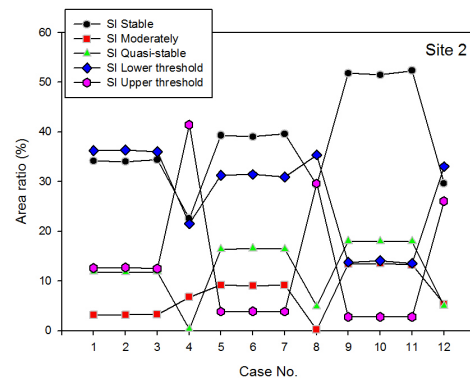
분석결과, 고도평균값을 적용하는 Case 4를 제외하면 모든 Group에서 Case 1~3의 해석결과가 거의 유사한 것으로 나타났다. 즉 습윤지수의 범위가 현재 제안되고 있는 범위에서는 큰 차이를 보이지 않으며, 내부마찰각의 범위(Group

1, 2, 3)에 더욱 민감한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 제 2지역에서도 동일한 경향을 나타내고 있다.

그러나 습윤지수로 고도평균값을 이용하는 경우 안정영역에 대한 분포율이 급격히 감소하며 상대적으로 불안정영역의 분포율이 급증하는 양상을 볼 수 있으며 이러한 경향은 제 2구간에서도 동일하다. 습윤지수의 변화에 따른 불안정영역의 변화를 관찰한 결과, 산사태 발생위험도가 큰 상한계 불안정 영역의 변화가 고도평균값을 적용한 Case 4, 8, 12를 제외하면 동일한 Group 내에서는 거의 유사한 것으로 나타났다. 이와같이 습윤지수를 결정하는 것은 매우 어려운 과정이므로 지역이나 암종, 지반특성, 침수지형 등 다양한 변수를 고려한 산사태 피해지역의 현황과 습윤지수의 상관성을 평가한 많은 자료의 축적과 이에 관한 추가적인 연구가 절실히 요구된다. 또한 과대평가되고 있는 고도평균값을 제외하면 상한계 불안정 영역이 파괴시점부에 집중되어 현장의 상황과 일정부분 부합되는 양상을 나타내고 있으며, 실제 산사태로 연결되는 영역은 등산로이거나 침수지형으로 수렴된 위험물골과 일치하는 것으로 현장조사 결과를 통해 확인하였다.



(a) Site 1



(b) Site 12

Fig. 4. Variation of slope stability index with moisture index

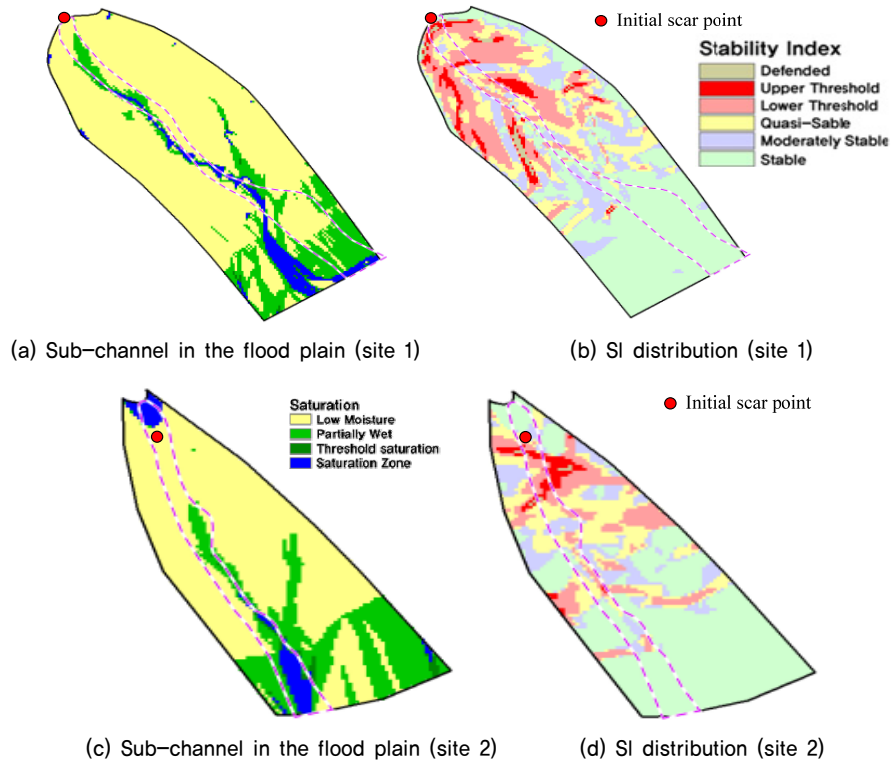


Fig. 5. Analysis results about slope stability

4. 결 론

본 연구에서는 최근 빈번하게 발생하고 있는 산사태나 토석류와 같은 지반재해를 사전에 예측하기 위해 널리 사용되고 있는 GIS 기반의 확장프로그램인 SINMAP을 이용하여 매개변수에 따른 위험도 평가를 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 토석류 발생지역의 경사도를 분석한 결과, 제 1지역은 35~52°(평균 41°), 제 2지역은 27~38°(평균 33°)로 30~40° 범위에 분포하는 것으로 나타나 토석류의 발생시점부는 고정사라기 보다는 일정 범위의 사면경사에 지형적 요인과 강우와 같은 외적요인이 복합적으로 작용할 수 있는 조건이 형성되는 구간에 조성되는 것으로 판단된다. 또한 퇴적은 11~13° 구간에 집중되어 선행연구와 매우 유사한 범위를 나타내었다.
- (2) 지형학적 습윤대를 분석한 결과, 한계습윤대와 포화대가 토석류 영역과 거의 일치하고 있으며 지하수 수렴부가 붕괴시점부와 상관관계가 있는 것으로 나타나 지형학적 습윤대가 경사분포나 붕괴토층의 존재여부, 산사태 유발구조물 등과 복합적으로 산사태 발생 가능성을 평가하기 위한 지표로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 내부마찰각의 하한계가 증가함에 따라 상한계불안정영역이 50~70%까지 감소되어 안정지수에 미치는 영향력이 큰 경향을 보였으나 낮은 습윤지수 범위에서는 그 영향력이 줄어드는 양상을 나타내었다.

- (4) 습윤지수의 범위에 따른 변화를 분석한 결과, 고도평균값을 적용한 경우를 제외하면 모든 Group에서 유사한 안정지수 분포를 보이고 있어 습윤지수보다는 내부마찰각에 민감한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다.
- (5) 과대평가되고 있는 고도평균값을 제외하면 상한계 불안정 영역이 파괴시점부에 집중되어 현장의 상황과 부합되는 양상을 나타내고 있으며, 실제 산사태로 연결되는 영역은 등산로이거나 집수지형으로 수렴된 위험물골인 것으로 나타났다.

감사의 글

“이 논문은 2016년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구입니다(This work was supported by the intramural research grant of Semyung University in 2016).”

References

1. Chacon, J., Irigaray, C., Fernandez, T. and Hamdouni, R. E.

- (2006), Engineering geology maps: landslides and geographical information systems, Buletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 65, pp. 341~411.
2. Choi, J. H. (2013), Study on slope hazard-triggering rainfall characteristics in Chuncheon area, Master's thesis, Kangwoon University, pp. 1~121 (in Korean).
 3. Kim, D. H. (2012a), Extraction of landslides risk factors in Gangwon Mountain region, Master's thesis, Sangji university, pp. 1~52 (in Korean).
 4. Kim, P. G. (2012b), Numerical modeling for the detection and movement of debris flow using detailed soil maps and GIS, Ph.D dissertation, Kyungpuk National University, pp. 1~191 (in Korean).
 5. Kim, P. G. and Han, K. Y. (2017), Numerical modeling for the detection of debris flow using detailed soil map and GIS, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 37, No. 1, pp. 43~59 (in Korean).
 6. Kim, H. T., Kim, G. H., Lee, H. J. and Park, D. K. (2002), The risk analysis of debris flow occurrence using GIS, Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 2002, pp. 2183~2186 (in Korean).
 7. Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. (1994), A physically based model for the topographic control on shallow landsliding, Water Resources Research 30, pp. 153~171.
 8. Oh, C. H. (2013), Study on risk assessment techniques of mountainous disasters using GIS, Ph.D dissertation, Kangwoon National University, pp. 1~146 (in Korean).
 9. Oh, K. D., Hong, I. P., Jeon, B. H., Ann, W. S. and Lee, M. Y. (2006), Evaluation of GIS-based landslide hazard mapping, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 39, No. 1, pp. 23~33 (in Korean).
 10. Oh, K. D., Lee, C. H., Kang, B. H., Heo, J. Y. and Hwang, S. B. (2013), A methodology to analyse landslide and debris-flow hazards due to heavy rainstorms - application on the damage areas around Woomyon Mountain, Journal of Crisis and Emergency Management: Theory and Practics, Vol. 9, No. 9, pp. 45~66 (in Korean).
 11. Pack, R. T. (1995), Statistically-based terrain stability mapping methodology for the Kamlops Forest Region, British Columbia. Proceedings of the 8th Canadian Geotechnical Conference, Canadian Geotechnical Society, Vancouver, B.C
 12. Pack, R. T., Tarboton, D. and Goodwin, C. N. (2001), Assessing terrain stability in a GIS using SINMAP, 15th annual GIS conference, pp. 1~9.
 13. Pack, R. T., Tarboton, D., Goodwin, C. N. and Prasad, A. (2005), SINMAP user's manual, <http://hydrology.usu.edu/sinmap2>, pp. 1~65.
 14. Song, B. W., Kil, K. O., Kim, B. S. and Kim, W. H. (2012), Analysis for design parameters on infinite slope stability to estimate debris flow-induced hazard in wide area, Korean Geo-Environmental Society Conference, pp. 219~224 (in Korean).
 15. Song, B. W., Yoon, H. S. and Kim, S. M. (2013), In-situ experiment method on evaluation of debris flow, Journal of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 14, No. 7, pp. 31~38 (in Korean).
 16. Wu, W. and Sidle, R. C. (1995), A distributed slope stability model for step forested hillslopes, Water Resources Research, Vol. 31, No. 8, pp. 2097~2110.