

대룡산 토석류 특성 분석 및 위험지역 예측에 관한 연구*

최영남¹ · 이형호² · 유남재^{1*}

Characteristic Analysis and Prediction of Debris Flow-Prone Area at Daeryongsan*

Young-Nam CHOI¹ · Hyung-Ho LEE² · Nam-Jae YOO^{1*}

요 약

본 연구에서는 2013년 7월 강원도 춘천시와 홍천군에 위치한 대룡산에서 발생한 토석류 산사태 현장 51개소를 조사하고 강우와 현장조사 자료를 바탕으로 토석류의 거동특성을 분석하였다. 사면형과 계곡형 토석류에 따라 발생부와 퇴적부의 위치 및 경사 그리고 침식 폭 및 두께를 토석류 전 구간에 대해 조사하였다. 또한, 1:5,000의 수치지형도를 통해 대룡산의 DEM(Digital Elevation Model)을 구축하고 SINMAP(Stability INdex MAPping)을 이용하여 산사태 위험도를 평가하고 실제발생 위치와 비교 분석하였다. 분석결과 사면형 토석류는 위험지역과 실제발생 위치가 유사한 것으로 나타났으며, 계곡형의 경우 SINMAP(Stability INdex MAPping) 계산상 계산되는 지형학적 습윤지수를 통해 발생위치를 추정하였다. 또한, 미국 NRCS에서 제안한 매개변수 투수량계수/지하수함양률(T/R)에 대한 4가지 조건별 해석 결과 현장조사 결과와 다소 차이를 보였으며, 투수량계수/지하수함양률(T/R)의 값이 작을수록 위험도가 높게 나타나는 경향을 보였다.

주요어 : 대룡산, 토석류, 수치표고모델(DEM), 현장조사, SINMAP

ABSTRACT

In this study, landslide of debris flow occurred at 51 sites around Daeryongsan located in between Chuncheon-si and Hongcheon-gun during July in 2013 were investigated in field and behavior characteristics of debris flow were analyzed on the basis of records of rainfall and site investigation. According to debris flow types of channelized and hill slope, location and slope angle of initiation and deposit zone, and width and depth of erosion were investigated along entire runout of debris flow. DEM(Digital Elevation Model) of Daeryongsan was constructed with digital map of

2018년 08월 21일 접수 Received on August 21, 2018 / 2018년 09월 07일 수정 Revised on September 7, 2018 / 2018년 09월 07일 심사완료 Accepted on September 7, 2018

* 2017년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-520170167)

1 강원대학교 토목공학과 Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University

2 성우건설(주) Sung woo Construction company

* Corresponding Author E-mail : njyoo@kangwon.ac.kr

1:5,000 scale. Land slide hazard was estimated using SINMAP(Stability INdex MAPping) and the predicted results were compared with field sites where debris flow occurred. As analyzed results, for hill slope type of debris flow, predicted sites were quite comparable to actual sites. On the other hand, for channelized type of debris flow, debris flow occurrence sites were predicted by using stability index associated with topographic wetness index. As analyzed results of 4 different conditions with the parameter T/R, Hydraulic transmissivity/Effective recharge rate, proposed by NRCS (Natural Resources Conservation Service), predicted results showed more or less different actual sites and the degree of hazard tended to increase with decrease of T/R value.

KEYWORDS : Daeryongsan, Debris Flow, DEM, Field Investigation, SINMAP

서론

극한 강우와 산지개발로 인한 산림 훼손으로 토사재해가 증가하고 있다. 2002년부터 2014년까지 우리나라의 연평균 산사태 피해면적은 666ha이며, 사망 9명, 905억 원(피해복구액 기준)의 재산피해로 인해 국가적으로 큰 손실을 입고 있다(Korea Forest Service, 2016). 토사 재해 위험지에 대한 체계적인 관리방안이 필요하며 이를 위한 재해위험지도가 필요하다. 토사재해 위험지구는 산림청의 산사태정보시스템이나 구 소방방재청의 급경사지관리시스템으로 관리되었으나, 2011년 여름 중부지방의 수해로 인한 77명의 사망자 중, 산사태 사망자 대부분(43명)이 재해위험지구 지정 아닌 지역에서 발생하였다. 발생한 재해의 대부분이 인지되지 않은 곳에서 발생하여 불가측성이 높고 특히 인구가 밀집한 도시산지의 토사재해 위험지구 관리의 정책변화가 필요하다(Kim and Jang, 2014).

지반재해위험도 분석과 관련하여 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서는 오래전부터 GIS를 이용하여 재해위험지도를 제작하고 있다(Charcon *et al.*, 2006). 국내에서도 GIS를 기반으로 여러 상용프로그램을 사용 또는 개발 중에 있다. 토석류 위험지구 지정을 위한 기술적 방안은 지형학적 분석에 의한 방법과 수리모델 기반의 시뮬레이션에 의한 방안이 다수 연구되고 있다.

현재까지 연구 사례를 검토한 결과 현장에서 수집한 자료가 정확해야 보다 정교한 시뮬레이션이 이루어져 다수의 잠재적 위험지구에 적용하기에는 한계가 있다. 이에 대한 대안으로서 기존의 수치지형도, 항공사진 및 LiDAR 데이터를 활용한 방재지형학적 측면의 위험지구 확정 방안이 대안으로 주장되고 있다(Kim *et al.*, 2015). 그리고 토석류 평가 및 분석은 조사자의 주관적인 요소가 많은 정성적 분석으로 산사태 위험지 평가시 위험지역이 넓게 나타나는 광역성을 나타내고 있어서 많은 데이터베이스를 통해 신뢰성 있는 평가가 이뤄져야 한다.

본 연구에서는 2013년 7월 강원도 춘천시와 홍천군에 위치한 대룡산의 지질 및 지형적 특성을 분석하고 발생한 토석류에 대한 현장조사 자료를 통해 특성을 분석하여 토석류 연구를 위한 기초자료를 제공하고, 토석류 산사태 취약지역 예측을 위하여 GIS를 이용한 SINMAP 프로그램을 활용한 무한사면해석을 실시하였다. 국내에서는 SINMAP(Stability INdex MAPping)을 통한 무한사면분석기법은 확률적 기법과 수리적 모델을 결합하여 정량적인 분석이 가능하다.

연구대상지 현황 및 특성

1. 위치 및 지형

연구대상지 대룡산은 해발 899m로 비교적 산세가 험하고 그림 1과 같이 춘천시 동내면 고

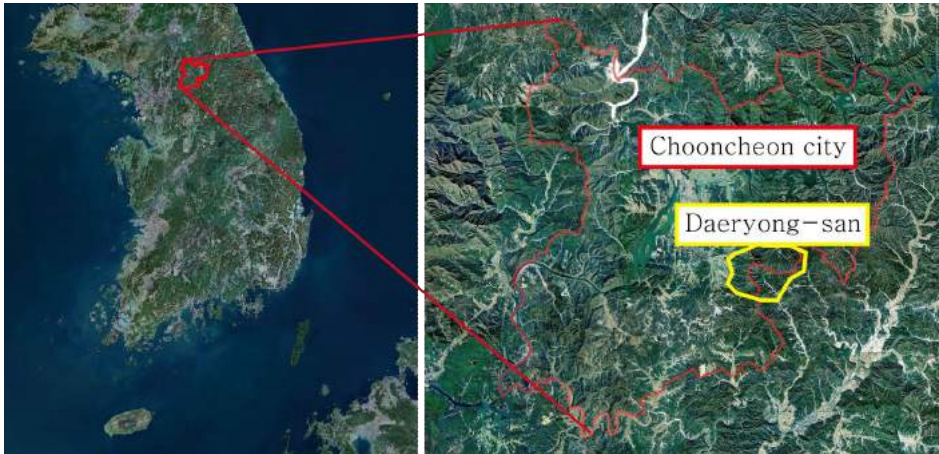


FIGURE 1. Research area

은리, 사암리, 동면 상걸리 그리고 홍천군 북방면 북방리에 위치한다.

대룡산의 서쪽은 분지지형에서 나타나는 산록완사면 지형형상으로 유수로 인한 산지급사면의 침식활동으로 인해 침식된 이동 물질이 퇴적되어 형성되었다. 산록완사면은 너비 8km, 길이 3km로 춘천시 동면 만천리 굽벙이 마을에서 춘천시 동내면 거두리, 신촌리, 고은리, 사암리, 점말마을까지 형성되어 있으며, 경사는 암석분포 경계선이 되는 해발 약 240~300m 등고선을 급변점으로 배후산지는 42° 내외의 급경사이고, 완사면은 2~12° 로 완경사를 이룬다.

대룡산 동쪽에 위치한 홍천군 북방면 북방리

의 지형은 북서쪽으로 동내면과 동산면, 북쪽으로는 동면, 동쪽으로는 화촌면과 인접하며, 대룡산 부근의 경사도는 평균 30~40° 이며, 이러한 일부 능선과 암석지를 제외한 임지의 평균경사도는 20~25° 정도의 완경사이다.

2. 지질

춘천시의 광역지질은 선캠브리아기 변성퇴적암류와 후기에 이를 관입한 시대미상의 변성화성암류, 중생대 화성암류로 구성되며, 대부분은 변성 퇴적암류가 차지하고 용두리 편마암 콤플렉스, 구봉산층군, 의암층군이 하부로부터 구분된다. 대룡산 부근의 주변부는 화강암에서 섬록

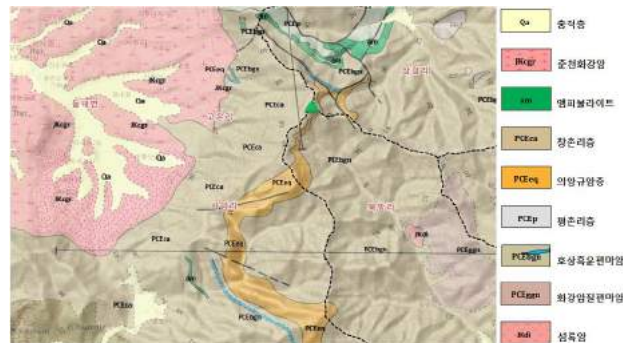


FIGURE 2. Geologic map around Daeryongsan(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

암으로 접이하기도 하나 이 분포는 극히 좁은 범위에 한정된다.

그림 2는 대룡산의 지질도로 춘천시 동내면 고은리, 사암리의 대룡산 부근 산록완사면의 기반암석은 완사면이 춘천화강암이고, 배후산지는 호상흑운모편마암, 규암, 석회암, 앰피블라이트 및 흑운모편마암 등으로 구성되어있다.

춘천방면과 홍천방면에 걸쳐 모암으로 화강암과 화강편마암이 풍화하여 생성된 양토 또는 사질양토를 이루며, 산림토양의 대부분은 유기질이 풍부하고 식물생육에 적합한 지형적 특징을 가지고 있다.

현장조사를 통한 토석류 특성 분석

1. 현장조사 위치 및 특성

본 연구는 2011년에 제작되고 국토지리정보원에서 제공하는 1:5,000의 수치지형도를 이용하여 대룡산의 지형적 특성을 분석하였다. 그림 3은 1:5,000 수치지형도에 토석류 발생위치를 표시한 것으로 춘천시 고은리 4개소, 사암리 3개소, 상걸리 23개소, 홍천군 북방리 19개소 총 42개소이다. 또한, 앞서 설명한 것과 같이 대룡산은 춘천 방면과 홍천 방면의 지형적 특성이

다르게 나타나 지형적 특성과 대룡산 주능선을 기준으로 서쪽과 동쪽으로 나누어 분류하였다.

표 1은 토석류 발생지의 위치 및 형태를 정리한 것으로 자연사면 17개소, 인공사면 34개소이다. 또한, 계곡형(Channelized)과 사면형(Hill slope)으로 분류한 결과 그림 4와 같이 서쪽은 계곡형이 동쪽은 사면형이 주로 발생하였다. 지형적 특성상 서쪽은 계곡이 길게 발달하고 동쪽은 급경사지가 많이 나타난 결과로 판단되며, 특히 동쪽의 토석류는 주로 임도를 따라 토석류가 발생하였다.

ArcGIS를 이용하여 대룡산의 DEM(Digital Elevation Model)을 구축하고 그림 5와 같이 구축된 DEM을 수치지형도에 중첩하여 토석류 발생 및 진행 위치에 따라 7개의 유역을 생성하였다.

그림 5와 같이 W-1유역은 토석류가 발생하고 계곡을 따라 이동하여 고은소류지에 퇴적되고, W2와 W3유역은 중앙고속도로를 지나 대룡산 하류 하천에 퇴적되었다. 또한, 동쪽 E-1~E-4는 대부분 사면형 토석류로 발생하여 계곡에 유입 또는 퇴적되는 특성을 보였다.

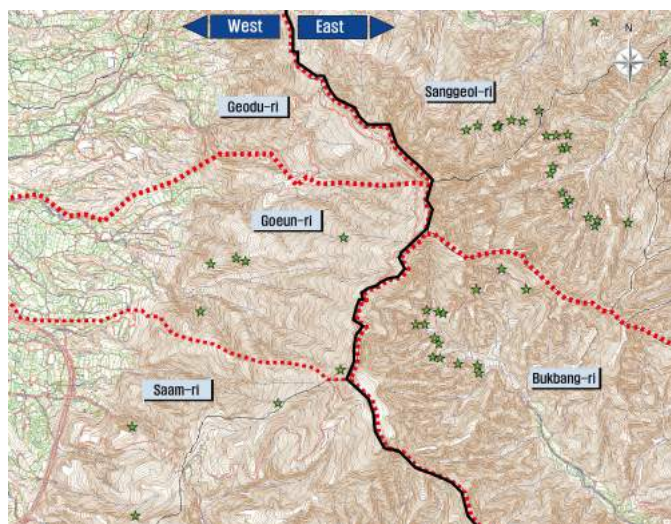


FIGURE 3. Location of debris flow occurrence

TABLE 1. Summary of debris flow occurrence area

Area	Latitude	Longitude	Slope	Type	Area	Latitude	Longitude	Slope	Type
Saram-ri	N37 49 53.7	E127 48 21.6	Natural	Channelized	Goeun-ri	N37 50 43.2	E127 48 47.2	Natural	Channelized
	N37 49 20.4	E127 47 27.5	Natural	Channelized		N37 50 3.6	E127 48 45.42	Artificial	Channelized
	N37 49 46.86	E127 47 26.58	Natural	Channelized		N37 50 35.52	E127 47 56.82	Artificial	Channelized
	N37 51 37.1	E127 50 48.8	Natural	Hill slope		N37 50 37.44	E127 48 6.42	Artificial	Channelized
	N37 51 47.2	E127 50 22.6	Natural	Channelized		N37 50 21.36	E127 47 52.68	Natural	Channelized
	N37 51 15.1	E127 49 34	Artificial	Hill slope		N37 50 36.36	E127 48 9.84	Natural	Channelized
	N37 51 16.4	E127 49 38.2	Artificial	Hill slope		N37 50 6.80	E127 49 23.16	Artificial	Channelized
	N37 51 15.9	E127 49 45.5	Natural	Hill slope		N37 50 12.81	E127 49 21.26	Artificial	Channelized
	N37 51 18	E127 49 51	Artificial	Hill slope		N37 50 17.03	E127 49 17.45	Artificial	Channelized
	N37 51 17.5	E127 49 55.2	Artificial	Channelized		N37 50 2.22	E127 49 37.84	Artificial	Hill slope
Sanggeol-ri	N37 51 20.9	E127 50 1.44	Artificial	Channelized	Bukbang-ri	N37 50 4.48	E127 49 37.38	Artificial	Hill slope
	N37 51 13.3	E127 50 7.94	Artificial	Hill slope		N37 50 4.48	E127 49 37.38	Artificial	Hill slope
	N37 51 13.3	E127 50 12.2	Natural	Hill slope		N37 50 5.15	E127 49 30.00	Artificial	Hill slope
	N37 51 9.54	E127 50 11.7	Artificial	Hill slope		N37 50 6.86	E127 49 23.16	Artificial	Hill slope
	N37 51 3.75	E127 50 6.57	Artificial	Hill slope		N37 50 7.22	E127 49 20.42	Artificial	Hill slope
	N37 51 1.73	E127 50 5.48	Artificial	Hill slope		N37 50 11.14	E127 49 22.68	Artificial	Hill slope
	N37 50 56	E127 50 10.1	Natural	Hill slope		N37 50 17.08	E127 49 13.91	Artificial	Hill slope
	N37 50 52.7	E127 50 11.4	Natural	Channelized		N37 50 17.08	E127 49 13.91	Artificial	Hill slope
	N37 50 48.6	E127 50 19.8	Artificial	Hill slope		N37 50 17.03	E127 49 17.45	Artificial	Hill slope
	N37 50 46.1	E127 50 22.2	Artificial	Channelized		N37 50 21.12	E127 49 18.27	Natural	Hill slope
	N37 51 16.50	E127 49 46.10	Artificial	Hill slope	N37 50 20.60	E127 49 22.56	Artificial	Hill slope	
	N37 51 13.28	E127 50 4.16	Artificial	Channelized	N37 50 20.20	E127 49 24.62	Artificial	Hill slope	
	N37 51 9.37	E127 50 10.22	Artificial	Hill slope	N37 50 27.25	E127 49 37.25	Natural	Hill slope	
	N37 50 53.87	E127 50 12.75	Natural	Hill slope	N37 50 33.35	E127 49 46.71	Natural	Hill slope	
	N37 50 47.67	E127 50 23.10	Natural	Channelized	N37 50 27.20	E127 49 56.00	Artificial	Hill slope	
	N37 50 46.88	E127 50 34.78	Artificial	Hill slope					

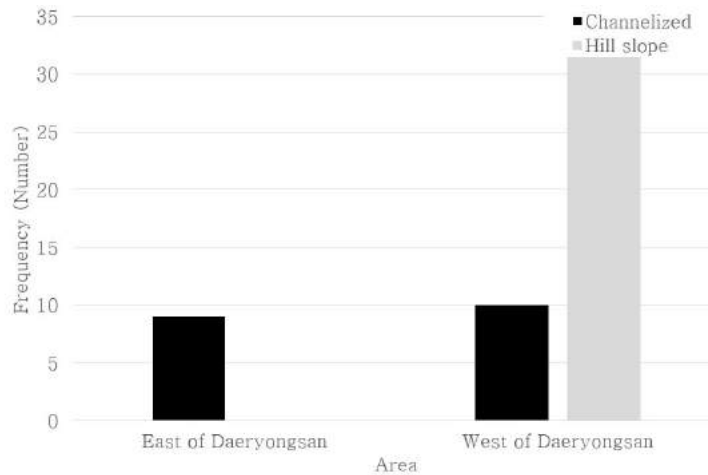


FIGURE 4. Occurrence types of debris flow in regions of Daeryongsan

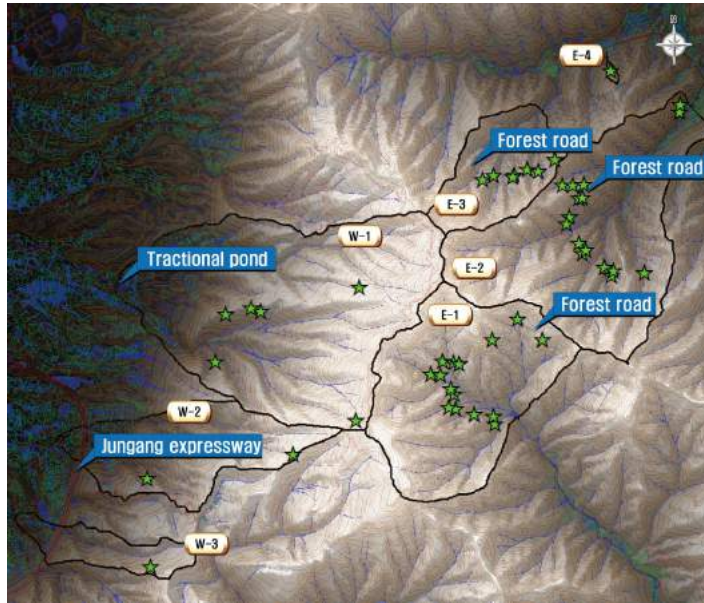


FIGURE 5. DEM(Digital Elevation Model) division of area due to debris flow occurrence

2. 기반암

본 연구의 토석류 발생지역의 기반암은 변성암인 규암, 편마암, 화강편마암이 분포하는 것으로 조사되었으며, 그림 6과 같이 규암 6개소, 편마암 29개소, 화강편마암 16개소로 편마암의 비율이 가장 높은 것으로 조사되었다. 국내의 지질 분포는 화성암이 44.2%, 변성암이 34.9%

로 나타난다(Oh, 2006). 국내의 지질 분포는 화성암의 분포가 변성암보다 높지만 변성암의 특성상 변성암은 물리적 풍화에 취약하고, 풍화 토층으로 형성되는데 유리한 조건이며, 표면 절리가 발달하여 강우의 침투수에 풍화되고 침식되기 때문에 변성암에서 토석류가 주로 발생하는 것으로 판단된다.

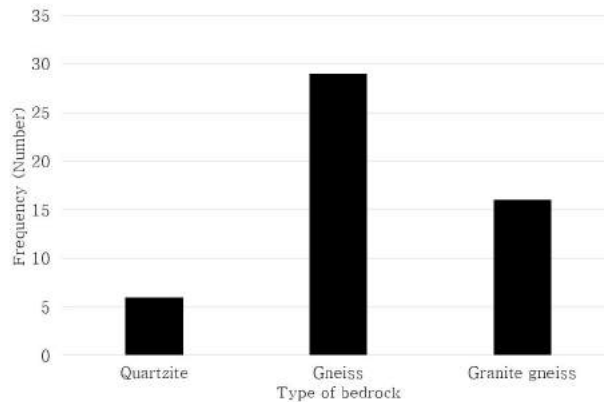


FIGURE 6. Types of bedrock at initiation zone

3. 고도

토석류 발생위치는 그림 7과 같이 주로 6~7부 능선에서 발생하였다. 산사태는 7부 능선에서 주로 발생하는 것으로 알려져 있지만, 대룡산 동쪽의 경우 임도가 5~7부 능선에 위치하고 있어 5~6부 능선에서도 전체의 약 30%가 발생하였다.

그림 8은 퇴적 고도를 나타낸 것으로 서쪽의 계곡형 토석류는 하부의 하천으로 이동하여 퇴적되었지만 동쪽의 사면형 토석류는 5~7부 능선에서 퇴적되었다. 서쪽 북방리의 5~7부 능선은 경사가 완만하고 토사가 퇴적될 수 있는 지형적 여건을 가지고 있어 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다.

4. 이동거리

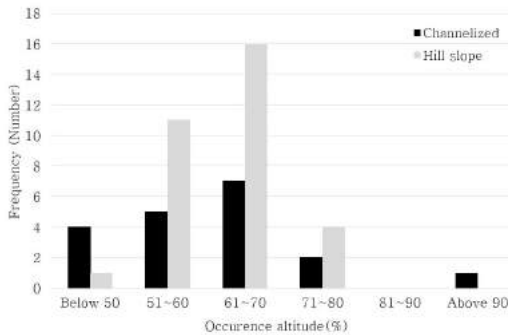


FIGURE 7. Occurrence frequency of altitude at initiation zone

그림 9와 같이 대룡산 계곡형 토석류의 평균 이동거리는 577m로 나타났으며, 그림 10의 사면형은 45m로 나타나 약 12배의 차이를 보였다. 특히 서쪽의 계곡형 토석류는 하류의 하천이 있고 침수면적이 큰 계곡이 잘 발달되어 있어 토석류가 이동하기 유리한 것으로 판단된다.

5. 경사

발생부의 사면경사는 그림 11과 같이 연구지역 중 60%가 31~40° 에서 발생하였으며, 토석류 발생 평균경사는 37° 로 나타났다. Jang *et al.*(2017)이 분석한 강원도 지역의 발생부 평균경사와 같은 값이며, Jun *et al.*(2013)이 분석한 강원도 영서지역의 토석류 발생부 평균경사 34.3°와는 다소 차이를 보지만, 30~40°의 같은 범위를 가지는 것으로 나타났다.

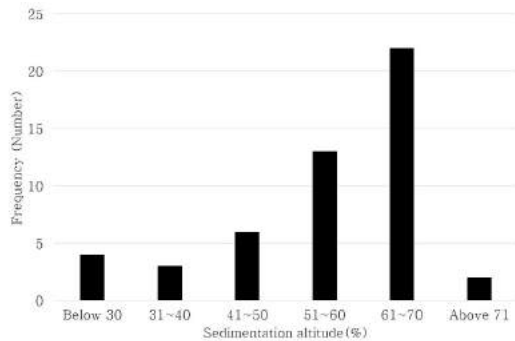


FIGURE 8. Occurrence frequency of altitude at sedimentation zone

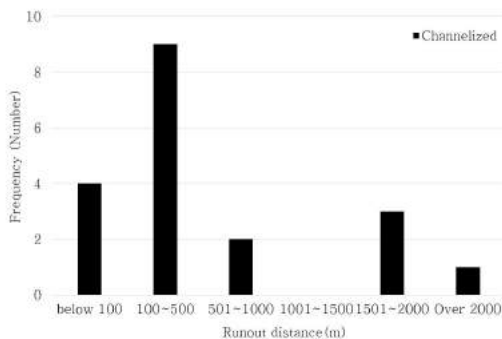


FIGURE 9. Occurrence frequency of runout distance(Channelized)

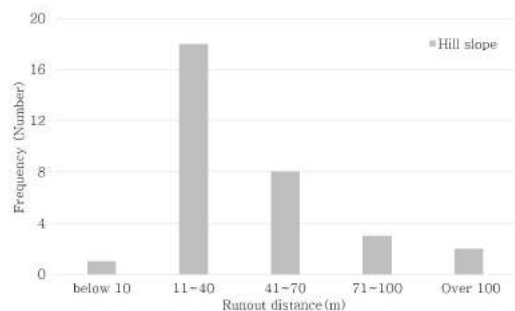


FIGURE 10. Occurrence frequency of runout distance(hill slope)

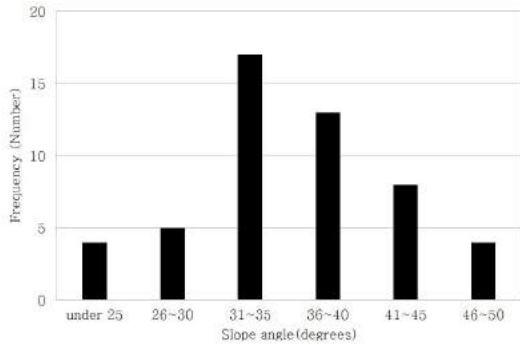


FIGURE 11. Occurrence frequency of slope angle at initiation zone

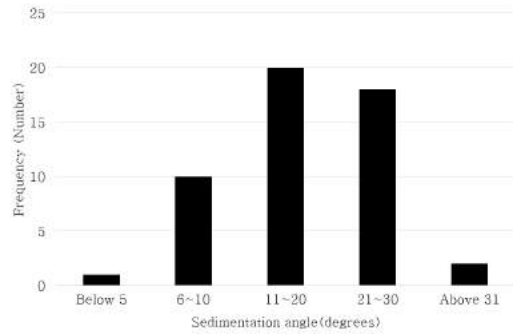


FIGURE 12. Occurrence frequency of slope angle at sedimentation zone

토석류의 평균 퇴적경사는 19°로 나타났으며, 그림 12와 같이 연구지역 중 약 40%가 11~20°에서 퇴적하는 것으로 나타났다. 또한, 21~30° 범위에서도 높은 빈도를 보였다. 일본 국토교통성(2016)에서는 2~15°를 토석류 퇴적구간으로 보고 있다. 본 현장조사 자료는 퇴적이 완료된 상태에서 경사를 측정하여 실제 퇴적된 하부 경사와는 다소 차이를 보이는 것으로 판단된다.

6. 침식 폭 및 깊이

그림 13은 현장조사 시 침식 폭 및 깊이를 측정한 것으로 일본의 국토교통성에서는 침식된 폭과 깊이를 통해 토석류의 규모를 추정하고 있

다. 따라서 본 자료를 통해 대략적인 발생량을 추정할 수 있으며, 사방시설의 설계에 있어 규모를 결정하는데 주요한 자료가 될 것이다.

계곡형 토석류의 폭은 약 10m 이내이며, 침식 깊이는 0.3~2m로 나타난다. 사면형 토석류의 침식 폭은 계곡형에 비해 크고 평균 15m로 나타났으며, 침식 깊이는 보통 1m이내인 것을 알 수 있다. 계곡형 토석류의 침식 깊이가 큰 것은 토석류 발생 전부터 계곡부에 토사가 퇴적되고 토석류 발생시 침식으로 인한 것으로 판단된다.

7. 강우자료 분석

강우는 토석류 발생에 있어 매우 중요한 요인

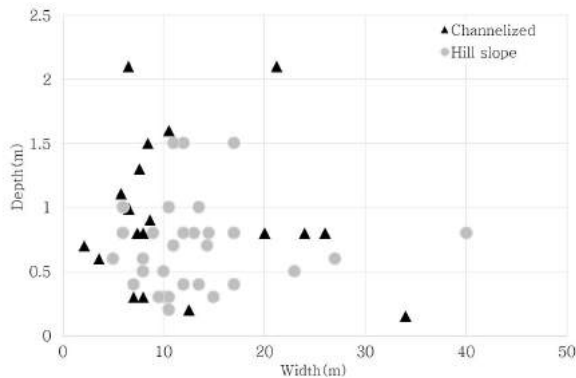


FIGURE 13. Distribution of erosion width and depth for types of debris flow

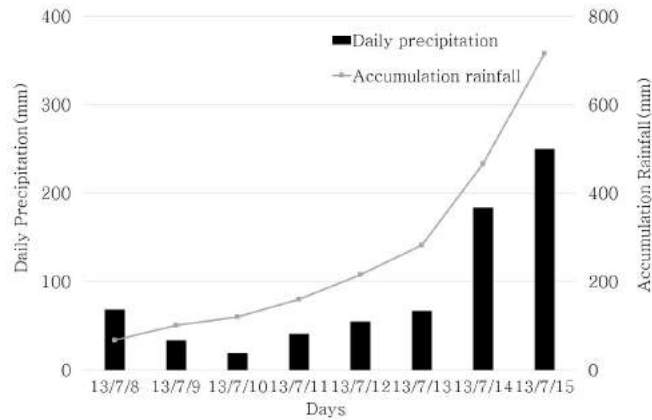


FIGURE 14. Daily precipitation and accumulation rainfall for a week

으로 토석류 유발강우에 대한 기준은 연구자 및 대상지역에 따라 차이를 보인다(Jang *et al.*, 2017). 과거 산림청에서 제시한 산사태 경보 단계인 누적강우량 200mm, 시간최대 강우량 30 mm, 일 강우량 150mm를 기준으로 그림 14와 같이 누적강우량과 일강우량을 나타내었다.

강우자료는 대룡산 정상을 기준으로 정상에서 가장 가까운 거리에 위치한 홍천군 북방면 북방리관측소의 자료를 이용하였으며, 토석류가 발생한 7월 14일 이전의 7일 누적강우량을 나타내었다.

그림 14와 같이 7월 14일 12시까지의 누적강우량은 474mm이며, 시간최대 강우량은 7월 14일 10시에 64mm, 일최대강우량은 184mm로 나타나 과거 산림청 기준에 따라 산사태 경보 단계에 해당되었다. 또한, 오전 8시부터 11시까지에만 138mm가 내려 많은 양을 기록하였다.

SINMAP을 이용한 토석류 위험도 분석

1. SINMAP의 무한사면 안정해석

본 연구에 사용된 SINMAP(Stability INDEX MAPping)은 Utah대학에서 개발한 것으로 GIS 상에서 누구나 개인의 목적에 따라 수정하여 사

용할 수 있도록 공개된 프로그램이다(Pack *et al.*, 2005). 이 프로그램은 ArcGIS 프로그램의 확장형으로 디지털고도모델(DEM) 데이터를 기반으로 사면 안정지수를 계산한다. SINMAP은 Hammond *et al.*(1992)의 무한사면해석을 기본으로 식 (1)과 같다(Pack *et al.*, 1998; Oh *et al.*, 2006; Cha, 2014).

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2\theta[\rho_s g(D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g)D_w] \tan\phi}{D\rho_s g \sin\theta \cos\theta} \quad (1)$$

여기서, C_r :식생의 점착력[N/m²], C_s :흙의 점착력[N/m²], D :토층깊이[m], D_w :토층 내 지하수위[m], ρ_s :흙의 단위중량[kg/m³], ρ_w :물의 밀도[kg/m³], θ :사면경사[deg], ϕ :내부마찰각[deg], g :중력가속도(9.81[m/s²])

식 1은 건조상태와 습윤상태의 흙의 단위중량이 같다는 가정하에 유도되었으며, 식 2는 식 1에서 토층 깊이 D 를 토양의 두께 h 로 정리하면 식 2가 된다.

$$FS = \frac{C + \cos\theta[1 - wr] \tan\phi}{\sin\theta} \quad (2)$$

여기서, $r = \rho_w + \rho_s$, $h = D \cos \theta$,
 $C = (C_s + C_r) / (h \rho_s g)$, $w = D_w / D = h_w / h$

흙의 상대적 점착력 C 는 식생과 흙의 점착력을 합한 전체 점착력과 토양무게와의 상대적인 비를 나타내며 무차원이다. 또한 상대 습윤도 (relative wetness)는 사면의 배수특성과 연관시켜서 $w = Ra / T \sin \theta$ 로 가정하였다. 이때 Ra 는 정상상태 지하수 재충진율 (steady state lateral recharge rate)을 나타내며, a 는 비집수면적 (specific catchment area), R 은 투수계수 (hydraulic conductivity)를 의미한다. 이 중 비집수면적 a 는 A/b 와 같이 정의할 수 있으며, 가정한 상대습윤

도를 이용하여 식 2를 나타내면 식 3과 같다.

$$FS = \frac{C + \cos \theta [1 - \min(\frac{R}{T} \frac{a}{\sin \theta}, 1) r] \tan \phi}{\sin \theta} \quad (3)$$

식 3에서 최소값 $\min(Ra / T \sin \theta, 1)$ 은 상대 습도의 상한계가 1.0임을 의미한다. 식 4와 식 5는 사면안정계수를 정의하기 위하여 사용된 식들이다. 이 중 집수면적 A 와 사면경사 θ 는 지형 자료로 산정이 가능하며, 물과 흙의 밀도비 r 는 0.5로 가정하고 있다. 또한 복합점착력 (C), 흙의 마찰력 ($\tan \phi$), 지하수 재충진율과 흙의 투수량 계수의 비 (R/T) 등은 불확실성을 내포한 매개변수로서 SINMAP을 해석하는데 중요한 요소이다.

SINMAP에서는 이들 매개변수가 각각 상한계와 하한계 범위를 가지며, 이 범위 내에서 발생 확률이 균일한 확률분포를 갖는 것으로 가정한다. 임의로 R/T 를 x 로 $\tan \phi$ 를 t 로 표현하면

$C \sim U(C_1, C_2)$, $x \sim U(x_1, x_2)$, $t \sim U(t_1, t_2)$ 로 나타낼 수 있다. 이와 같은 확률분포 가정하에 하한계 C 값과 t 값 그리고 상한계 x 값 (즉 C_1, t_1, x_2)을 가지는 경우, 안전율 (FS) 값이 1보다 크며 사면 붕괴 위험성이 적은 지역으로 판단할 수 있다 (식 4).

$$SI = FS_{\min} = \frac{C_1 + \cos \theta [1 - \min(x_2 \frac{a}{\sin \theta}, 1) r] t_1}{\sin \theta} \quad (4)$$

반면 식 5와 같이 상한계 C 값과 t 값 그리고 하한계 x 값 (즉 C_2, t_2, x_1)을 가지는 경우, 안전율 (FS) 값이 1보다 작으며, 사면붕괴 위험성이 큰 지역으로 판단할 수 있다

$$SI = FS_{\max} = \frac{C_2 + \cos \theta [1 - \min(x_1 \frac{a}{\sin \theta}, 1) r] t_2}{\sin \theta} \quad (5)$$

SINMAP의 사면안정지수 (SI)는 수치적으로 정확하게 해석된 절대값이라기 보다는 상대적인 위험을 표현하는 지표로서 주로 활용되고 있다. 표 2는 SINMAP의 사면안정지수 (SI)를 6단계의 분류등급으로 구분하여 도시한 것이다 (Pack *et al.*, 1998).

2. 본 연구에 적용된 매개변수

본 연구에 사용된 토질정수는 2013년 호우피해지 산사태복구공사 실시설계용역 지반조사보고서 (춘천권-고은지구)의 결과를 적용하였다. 붕적층, 풍화토 그리고 풍화암과 연암 등이 존재하지만 토석류는 보통 붕적층과 풍화토의 침식에 의

TABLE 2. SINMAP stability index (SI) (Pack *et al.*, 1998)

Class	Condition	Predicted state	Parameter range
1	$SI > 1.5$	Stable slope zone	Range cannot model instability
2	$1.5 > SI > 1.25$	Moderately stable zone	Range cannot model instability
3	$1.25 > SI > 1.0$	Quasi-stable slope zone	Range cannot model instability
4	$1.0 > SI > 0.5$	Lower threshold slope zone	Pessimistic half of range required for instability
5	$0.5 > SI > 0.0$	Upper threshold slope zone	Optimistic half of range required for stability
6	$0.0 > SI$	Defended slope zone	Range cannot model stability

TABLE 3. Site investigation report for landslide restoration works (Chooncheon-si, 2013)

Type	Weight(kN/m ³)	Cohesion(kPa)	Friction angle(deg)	Coefficient of permeability(cm/sec)
Colluvium	17.8	14.1	28.3	7.9×10 ⁻⁴
Sedimentary deposit	19.0	20.0	30.0	5.0×10 ⁻⁴

해 발생하므로 봉적층과 풍화토의 토질 정수만을 사용하였다(표 3).

또한, 사면 단면폭당 집수면적 A , 사면경사 θ 와 이에 따른 $\sin\theta$ 값은 SINMAP 모형에서 수치고도모형(DEM, Digital Elevation Model)을 이용하여 GIS 분석으로 산정하였다. 그러나 유역의 수문학적 특성을 반영한 매개변수 투수량계수/지하수함양률(T/R)은 집중호우시 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 매개변수이다(Oh *et al.*, 2013) 따라서 토양의 수리전도도에 대한 지하수 유입량의 비율인 수문지질학적 매개변수 T/R 은 SINMAP 모형에서 제시한 기본값을 기준으로 미국 NRCS(Natural Resources Conservation Service) 기준에 따라 매우양호 A(1,750~2,250m), 약간 양호 B(2,000~2,500m), 약간 불량 C(2,250~2,750m), 불량 D(2,500~3,000m)로 구분하여 각 조건별로 해석을 실시하였다.

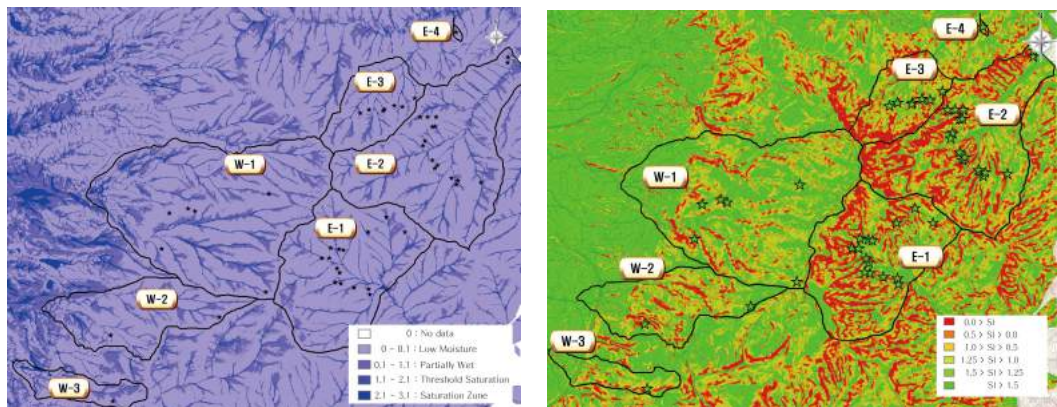
3. 해석결과

해석 결과는 그림 15 a) 지형학적 습윤지수와 그림 15 b) 사면 안정지수로 구분되어 출력된다. 이 결과를 통해 각 유역별, 투수량계수/지하수함양률(T/R)로 구분하여 그림 16, 17과 같이 정리하였다.

그림 16과 17은 대룡산 서쪽과 동쪽의 해석한 결과로 지형학적 습윤지수와 사면안정지수를 중첩하여 나타내었다.

그림 16과 17처럼 대룡산 서쪽에 비해 동쪽의 위험도가 높은 것으로 나타났으며, 실제 발생 장소의 수도 5.5배 많은 것으로 나타나 재해위험지 평가 및 사방사업의 우선순위 결정 그리고 개발 사업 이전에 위험도를 평가할 때 이용가능할 것으로 판단된다.

사면형 토석류는 서쪽과 동쪽에서 위험지역으로 나타난 위치와 실제 발생위치가 유사한 것으로 나타났으며, 계곡형 토석류는 토석류 발생위치와 위험지역이 서로 다르게 나타났다. 계곡형 토석류는 현장조사에서 30° 이상의 사면경사로 조사되었고, 수치지형도상에서는 20° 미만의 경



a) Topographic wetness index

b) Stability index

FIGURE 15. Analysis result of Daeryongsan

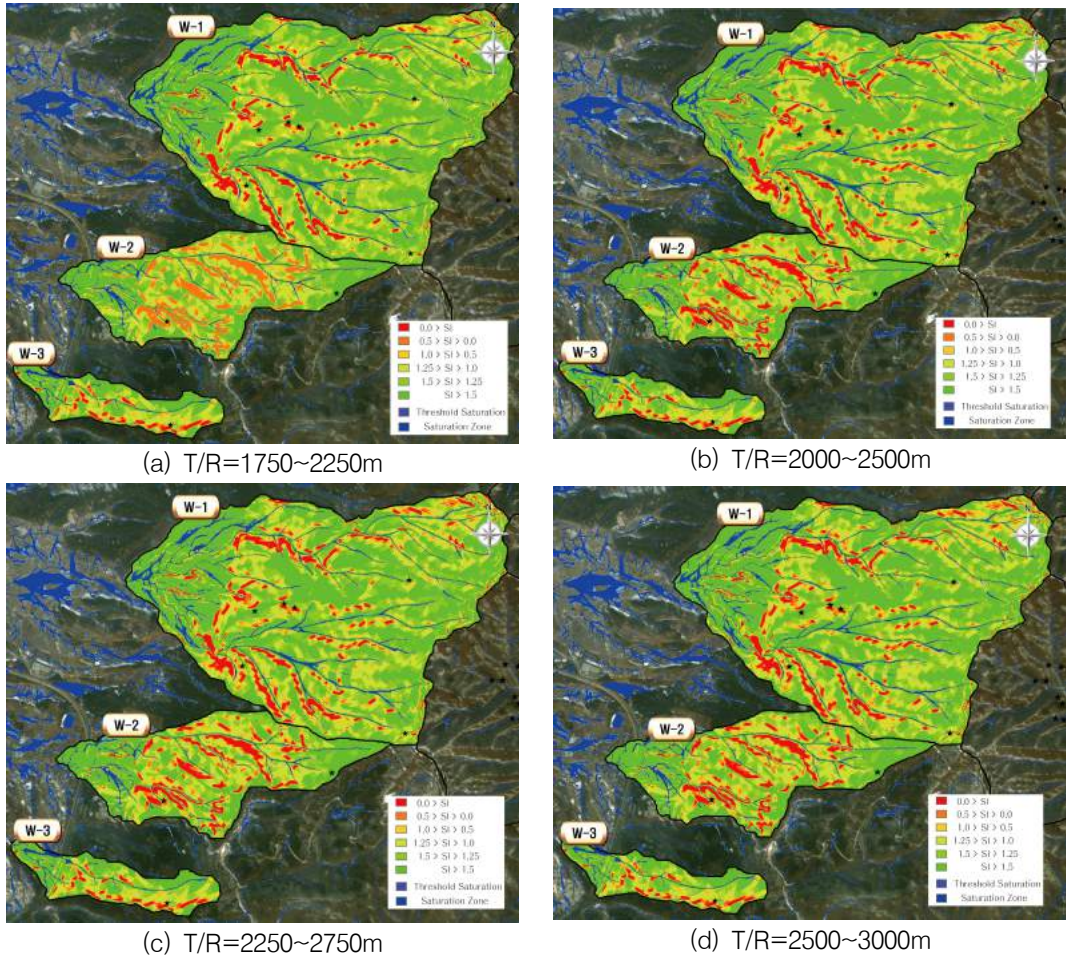


FIGURE 16. Analysis result of stability index in west area

사로 나타나 실제 경사와 수치지형도에 차이로 인하여 위험지역과 실제발생위치가 다르게 나타난 것으로 판단된다.

계곡형 토석류는 지형학적 습윤지수에서 계곡의 시작점과 토석류 발생위치가 유사한 것으로 나타나 위험지역 평가 및 예측시 사면안정지수와 지형학적 습윤지수도 함께 고려해야 할 것으로 판단된다.

매개변수 투수량계수/지하수함양률(T/R)에 따른 사면안정지수의 영향은 크지 않은 것으로 판단되지만 본 연구에서 사용한 미국 NRCS 기준에서 벗어난 계수에 대해서는 좀 더 연구가 필요

할 것이다.

또한, 투수량계수/지하수함양률(T/R)은 값이 작을수록 산사태 위험이 높아지는 것으로 나타났다. T/R이 작은 것은 토양의 투수계수가 큰, 배수가 양호한 조립토 지반 또는 임도와 같이 산림이 훼손되어 점착력이 작은 교란된 지반으로 안전율이 작아지기 때문이다.

현장조사와 SINMAP의 해석 결과를 종합해 보면 계곡형 토석류는 계곡 주변 사면의 붕괴와 계곡에 쌓여 있는 토사가 침식되면서 발생되며, 사면형 토석류는 기반암 위의 토사 그리고 기반암의 경사에 의해 발생된다. 따라서 SINMAP에

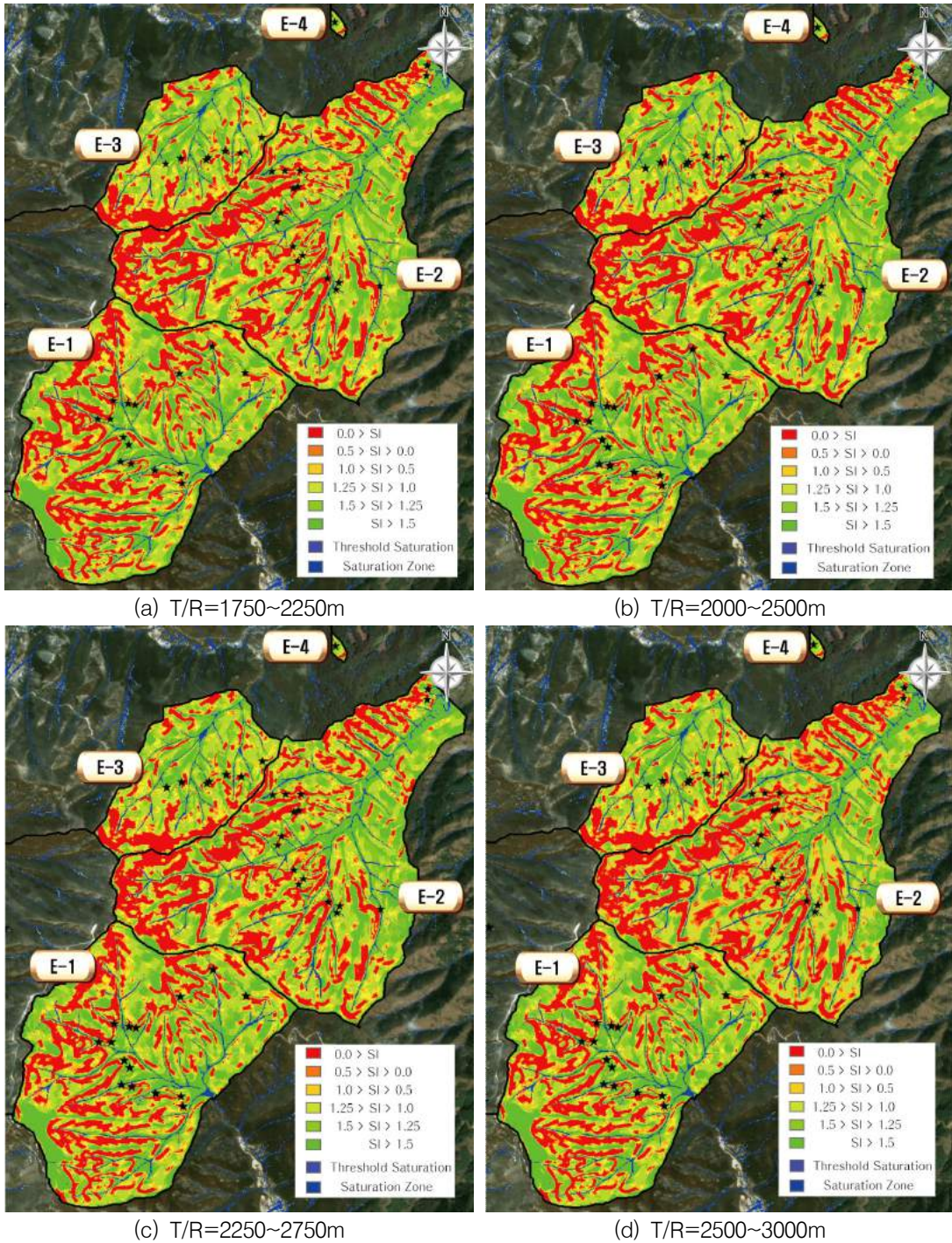


FIGURE 17. Analysis result of stability index in east area

의한 산사태 위험지역 선정시 습윤대(계곡) 그리고 해석결과에 나타난 위험지역의 토사층의 두께를 고려하여 위험지역을 선정 하는 것이 합리적이라 판단된다.

결 론

대룡산에서 발생한 토석류는 임도가 위치한 5~7부 능선에서 37°의 사면경사에서 주로 발생하였다. 또한, 퇴적부의 고도는 5~7부 능선이며, 퇴적 경사는 17°로 조사되었다. 발생부의 하부 기반암은 변성암으로 규암 6개소, 편마암 29개소, 화강편마암 16개소로 편마암의 비율이 가장 높은 것으로 조사되었다.

토석류의 평균이동 거리는 계곡형이 577m, 사면형 45m로 계곡형이 사면형에 비해 12배 더 이동한 것으로 조사되었으며, 계곡형 토석류의 침식 폭은 약 10m 이내, 침식 깊이는 0.3~2m 이며, 사면형 토석류의 침식 폭은 평균 15m, 침식 깊이는 평균 1m이내인 것으로 조사되었다.

SINMAP을 이용한 대룡산의 산사태위험도를 평가한 결과 서쪽에 비해 동쪽의 산사태위험도가 높은 것으로 나타났으며, 사면형 토석류는 위험지역과 실제발생위치가 유사하게 나타났다. 계곡형의 경우 수치지형도의 경사와 실제 경사가 큰 차이를 보여 정확도가 낮게 나타났으며, 계곡형 토석류는 지형학적 습윤도를 통해 계산된 계곡의 상부와 발생위치가 같게 나타났다.

미국 NRCS에서 제안한 매개변수 T/R에 대한 4가지 조건별 해석 결과 산사태위험도가 약간의 차이를 보였다. 또한 매개변수 T/R값이 작을수록 위험도가 높게 나타나는 경향을 보였다. **KAGIS**

REFERENCES

- Cha A.R. 2014. A comparison on the identification of landslide hazard using geomorphological characteristics. Journal of the Korean Geo-Environmental Society 15(6):67-73 (차아름, 2014. 지형특성을 활용한 산사태 위험도 판단을 위한 비교. 한국지반환경공학회지 15(6):67-73).
- 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(4):341-411.
- Chooncheon-si. 2013. Site Investigation Report for Landslide Restoration Works. (춘천시, 2013. 산사태 피해복구지 지반조사 보고서).
- 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.
- Jang, C.B., Y.N. Choi and N.J. Yoo. 2017. A study on behavior characteristics and triggering rainfall of debris flow. Journal of Korean Geo-environmental society, 18(1):13-21 (장창봉, 최영남, 유남재, 2014. 토석류의 거동 특성 및 유발강우에 관한 연구. 한국지반환경공학회지 18(1):13-21).
- Jun, K.J., G.H. Kim and C.Y. Yune. 2013. Analysis of debris flow type in Gangwon Province by database construction. Journal of the Korean Society of Civil Engineers 33(1):171- 179 (전경재, 김기홍, 윤찬영, 2013. DB구축을 통한 강원지역 토석류 유형 분석. 대한토목학회지 33(1):171-179).
- Kim, K.N. and S.J. Jang, 2014. Development of criteria for zoning of debris flow hazard area. Journal of The

Cha A.R. 2014. A comparison on the identification of landslide hazard using geomorphological characteristics. Journal of the Korean Geo-Environmental Society

- Korean Society of Hazard Mitigation, 14(6):177-183 (김경남, 장수진. 2014. 토사재해 위험구역 결정을 위한 기준점 설정 연구. 한국방재학회지 14(6): 177-183).
- Kim, K.N., S.J. Jang, K.Y. Lee, G.B. Seo, B.S. Kim, K.W. Chun, 2015. Prediction of the debris flow-prone area in the hilly district within urban. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 15(3):141-146. (김경남, 장수진, 이광연, 서기범, 김범수, 전근우. 2015. 도시내 산지의 토석류 위험구역 예측. 한국방재학회지 15(3):141-146).
- Korea Forest Service. 2016. <http://www.forest.go.kr>. (산림청. 2016. 산사태위험지도)
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2016. Technical Note of National Institute for Land Infrastructure Management.
- Oh, Y.H. 2006. Comparative analysis of distribution of rocks in the geological maps of south and north Korea. Master Dissertation, Korea National University of Education, Korea (오영환. 2006. 남북한 지질도의 암석분포에 대한 비교 분석. 한국교원대학교 대학원. 석사학위논문).
- Oh, K.D., I.P., Hong, B.H. Jun, W.S. Ahn, and M.Y. Lee, 2006. Evaluation of GIS-based landslide hazard mapping. Journal of Korea Water Resources Association, 39(1):23-33 (오경두, 홍일표, 전병호, 안원식, 이미영. 2006. GIS 기반 산사태 예측모형의 적용성 평가. 한국수자원학회지 39(1):23-33).
- Oh, K.D., C.H. Lee, B.H. Kang, J.Y. Heo, and S.B. Hwang. 2013. A methodology to analyse landslide and debris-flow hazards due to heavy rainstorms-application on the damage areas around Woomyon mountain. Journal of Safety and Crisis Management, 9(9):45-66 (오경두, 이창희, 강병화, 허재영, 황신범. 2013. 집중호우로 인한 산사태 및 토석류 위험도 분석. 한국위기관리논집 9(9):46-66).
- 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.
- Pack, R.T., D.G. Tarboton and C. N. Goodwin. 1998. The SINMAP approach to terrain stability mapping. In 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada, 21-25. **KAGIS**