

산악형 국립공원지역의 산사태 발생과 취약지역 특성 분석

이성재¹ · 이은재² · 마호섭^{3*}

¹서울대학교 학술림, ²국립산림과학원 산림기술경영연구소,

³경상대학교 환경산림과학부(농업생명과학연구원)

Analysis of Characteristics of Landslide Susceptibility in Rugged Mountain Range in the Korean National Park

Sung-Jae Lee¹, Eun-Jai Lee² and Ho-Seop Ma^{3*}

¹Seoul National University Forest, Seoul 08826, Korea

²Forest Technology and Management Research Center, National Institute of Forest, Pocheon, 11186, Korea

³Division of Environmental Forest Science, Gyeongsang National University

(Institute of Agriculture of Life Science), Jinju 52828, Korea

요약: 우리나라에서는 매년 태풍 혹은 국지성 집중호우로 유발되는 산지토사재해로 인한 피해가 발생하고 있다. 특히, 국립공원 지역은 대부분 산악지로 이루어져 있고 지형의 경사가 가파르고 토심이 얕아 많은 피해가 발생하고 있다. 본 연구는 산악형 국립공원(설악산, 소백산, 지리산)지역에서 발생한 산사태 발생지 446개소를 대상으로 선정하여 다양한 산림 환경 인자별로 조사하고 산사태발생지 특성을 분석하였다. 산사태 발생 평균면적, 평균 침식량, 평균 길이, 폭은 각각 1,212 m², 1,389 m³, 75 m, 12.9 m로 나타났다. 산림환경 인자가 산사태 발생 빈도에 미치는 영향을 분석한 결과, 사면경사도 (31~40°), 사면방위 N(북사면), 중단·횡단사면 오목(凹), 표고(401~800 m), 사면위치 산복, 하천차수 1차, 임상 혼효림, 모암 화강암, 토심 (46 cm 이상)에서 발생빈도가 높은 것으로 조사되었다. 산사태가 발생한 피해지에서의 침식량과 산림환경 인자와의 상관관계를 분석한 결과는, 중단사면(복합), 표고(1,201 m 이상), 토심(46 cm 이상)에서 1% 수준 내에서 정의 상관관계를 보였다.

Abstract: In Korea, debris-flow disasters are induced by typhoon and localized torrential rainfall annually. These disasters are particularly severe in the Korean national park due to its geomorphological characteristics. This study was conducted to analyze the landslide characteristics and forest environmental factors of landslide areas located in rugged mountain range in the Korean national park (Mt. Seorak, Mt. Jiri, and Mt. Sobaek). Overall, landslides occurred at 474 sites. The average area of the landslide scar among these sites was 1,212 m². The average landslide sediment was 1,389 m³, average landslide length was 75 m, and the average width was 12.9 m. The landslides frequently occurred in regions with igneous rock and coniferous forest. In addition, slope gradient degree (31°-40°), slope gradient direction (N), vertical slope (concave), cross slope (concave), altitude (401-800 m), position (middle), stream order (first order), forest type (mixed), parent rock (igneous), and soil depth (<46 cm). The relationship between landslide soil volume and environmental factors showed positive correlation. The variables of vertical slope (complex), altitude (<1,201 m), and soil depth (<46 cm) correlated significantly at 1 % level.

Key words: landslide, Korean national park, forest environment factors, rugged mountain range

서론

산사태는 호우시 빗물에 의해 포화된 토피가 균형을

잃고 중력에 의해 무너져 내리는 붕괴현상으로 산림을 파괴할 뿐만 아니라 자연자원 피해의 큰 원인중의 하나로 인식되고 있다(Ma and Jeong, 2007; Ma et al., 2008; Lee and Ma, 2018; Lee et al., 2019).

국립공원은 우리나라를 대표하는 자연경관지로서 소중한 보전해야 할 겨레의 유산이며 국민휴식공간이다. 지난 수십 년간 연간 3,000만 명이 넘는 탐방객들로 봄

* Corresponding author
E-mail: mhs@gnu.ac.kr

ORCID

Ho-Seop Ma  <https://orcid.org/0000-0002-2698-0639>

민 국립공원은 우리나라의 대표적인 관광명소로 부상했지만 탐방객들을 위한 편의시설과 탐방객 증가로 인위적인 훼손이나 산사태 및 낙석 등으로 자연적인 환경피해가 가속화되고 있어 방문객 및 인근 주민들에게 불안감을 가중시키므로 이에 대한 복구 및 예방 대책이 필요하다(Kwon et al., 2015).

최근 우리나라는 산사태로 인하여 2006년부터 2015년까지 피해면적 393ha, 인명피해 218명에 달하고, 특히 집중강우에 의한 피해가 절대적으로 많은 것으로 나타났다. 또한 재산 피해는 약 5조 4천억 원에 달하는 천문학적 피해가 발생한 것으로 조사되었다(Jung, 2018). 특히 과거와 비교되지 않을 만큼 강우량 및 강우강도 증가로 산림재해 발생이 집중화·대형화되어 가고 있다. 이러한 산사태는 주로 장마철 또는 태풍으로 인한 집중호우에 발생되며, 이러한 현상으로 사태물질인 토사, 토석 및 유목이 엄청난 힘으로 계류를 통하여 주택, 농경지 및 도로 등을 덮쳐 많은 인명 및 재산피해를 야기한다(Ma and Jeong, 2007; 2008, Lee, 2014; Lee and Ma, 2018; Ma and Lee, 2018).

산사태 피해를 저감하기 위해서는 산사태 발생 예상지역에서의 피해위험 범위를 예측하여 관리하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 산림청 및 산림조합중앙회에서는 급경사지 붕괴, 산사태 및 토석류 등에 대한 현장조사, 분석, 위험도 평가방법 등을 고도화하는 방안을 제안하고 있다. 특히, 이 방법은 재해를 사전에 예방 할 수 있는 가능성을 높일 수 있으며, 이 자료를 활용하여 지방산림청 및 지자체에서는 산사태 취약지역을 지정하여 관리할 수 있다.

최근 산사태발생으로 인한 인적·재산 피해를 최소화하기 위하여 발생특성 및 현황분석 연구가 활발히 진행되고 있다. 우리나라 국립공원지역의 산사태 발생 특성분석(Ma and Jeong, 2007), 항공사진을 이용한 산사태 영향

인자분석(Woo et al., 2008), 2011년 집중호우로 인한 산사태 발생특성 분석(Kim et al., 2012), 초기 산사태 발생에 영향을 미치는 지형요소의 특성분석(Cha and Kim, 2014), 땅밀림 산사태 발생지의 산림환경 특성 분석(Park et al., 2015), 시계열 공간영상을 이용한 산악형 국립공원지역의 산사태 현황분석(Kwon et al., 2015), 산사태 발생지점의 특성을 고려한 취약성 분석 비교(Shin and Lee, 2018) 등 연구되고 있다. 하지만, 산사태는 여러 유발인자들이 복잡하게 조합되어 다양한 형태로 발생되고 있는데 비해 산사태 발생지 원인규명 및 침식량에 대한 연구가 미흡한 상태이며, 현장조사 자료도 부족한 실정이다(Varnes, 1987; Hutchinson, 1988; European Community Program, 1993; Lee and Ma, 2019).

본 연구에서는 산악형 국립공원지역의 산사태 피해지역을 대상으로 현장조사를 실시하고, 이를 기초로 산사태 발생특성(규모, 산림환경인자 등)에 대한 데이터베이스를 구축하였다. 구축된 데이터베이스를 이용하여 산사태 발생의 영향인자를 분석하였다. 또한 산악형 국립공원지역의 산사태 발생 및 취약지역 특성을 보다 정확하게 규명하기 위하여 실제 현장에서 수집한 자료를 종합하여 해석하였다. 이는 추후 산사태 등 산지토사재해 발생으로 인명과 재산피해를 최소화 할 수 있는 학술적 정보로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

재료 및 방법

1. 대상지 선정 및 현장조사 방법

우리나라 국립공원에서 2010년까지 태풍과 집중호우 등으로 인하여 산사태가 발생한 446개소(설악산국립공원 386개소, 지리산국립공원 37개소, 소백산국립공원 23개소)를 대상으로 현장조사를 실시하였다(Figure 1). 또한 기존의 자연사면, 임도 및 암반사면 붕괴와 관련된 선행

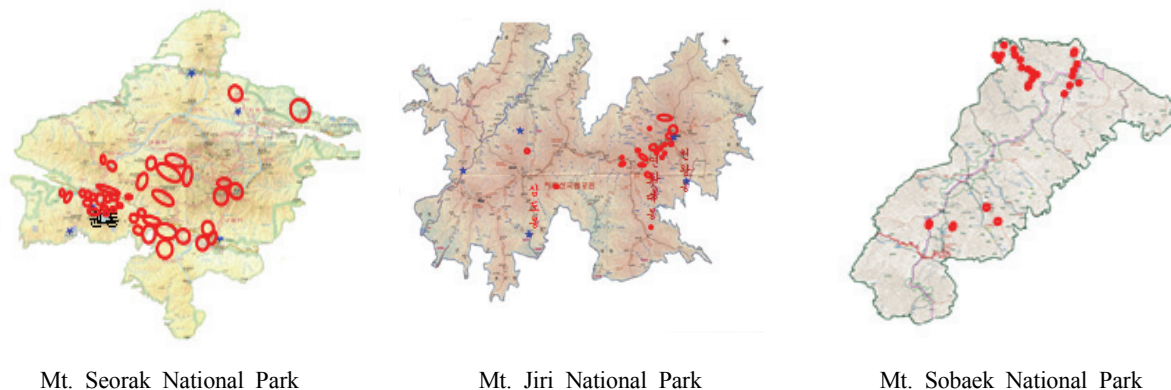


Figure 1. Location of the study sites of Landslide (3 regions).

Table 1. Classification of category for each factor.

Factors	Category				
	1	2	3	4	5
Area	<500 m ²	501 ~ 1,000 m ²	1001 ~ 1,500 m ²	1501 ~ 2,000 m ²	2,001 ~ 2,500 m ²
Soil volume	<500 m ³	501 ~ 1,000 m ³	1001 ~ 1,500 m ³	1501 ~ 2,000 m ³	2,001 ~ 2,500 m ³
Length	<50 m	51 ~ 100 m	101 ~ 150 m	151 ~ 200 m	201 m<
Breadth	<5 m	6 ~ 10 m	11 ~ 15 m	16 ~ 20	21 m<
Slope gradient	<20°	21 ~ 30°	31 ~ 40°	41 ~ 50°	51°<
Aspect	N	E	S	W	
Vertical slope	Concave	Convex	Straight	Complex	
Cross slope	Concave	Convex	Straight	Complex	
Altitude	<400 m	401 ~ 800 m	801 ~ 1,200 m	1,201 m<	
position	Upper	Middle	Lower		
Stream order	0	1	2	3<	
Forest type	Coniferous	Deciduous	Mixed		
Parent rock	Igneous	Metamorphic			
Soil depth	<15 cm	16 ~ 30 cm	31 ~ 45 cm	46 cm<	

연구를 참고하여 산사태 발생침식량에 영향을 미치는 요인을 도출하였다(Choi, 1986; Ma, 1994; Ma and Jeong, 2007; Jung, 2010; Park et al., 2010; Ma and Lee, 2018; Lee and Ma, 2018; Lee and Ma, 2019). 산사태 피해지에서의 침식량에 미치는 주요 영향인자 중 총 10개의 산림환경 인자를 선정하고 각 인자를 Table 1과 같이 구분하였다. 산사태 발생지 취약성 및 상관성을 분석하여 원인 분석에 활용하기 위하여 구분하여 조사하였다.

1) 산사태 발생지 규모

산사태 길이(m)는 산사태가 발생한 시작점부터 퇴적된 지점까지를 현장조사로 파악한 후지형도(1/25,000)상에 표기하여 도면상에서 측정하였다. 산사태 폭(m)과 깊이(m)는 산사태 발생지 상부·중부·하부 3지점에서 각각 측정하여 평균하였다. 산사태 발생면적(m²)은 산사태가 발생한 시작점부터 퇴적된 종점까지의 평균길이와 평균 폭을 곱하여 계산하였다. 산사태 발생침식량(m³)은 산사태가 발생한 시작점부터 퇴적된 지점까지 평균길이와, 평균폭, 평균 깊이를 곱하여 계산하였다.

2) 산사태 발생지 산림환경 인자

사면경사(°)는 산사태 발생원(산사태발생지 중심) 지점의 평균경사를 Clinometer를 이용하여 측정하였고, 사면방위는 산사태 발생원 지점의 방위를 지형도 및 Compass를 이용하여 N, E, S, W로 구분하였다. 사면형태(중단사면)는 산사태 발생원 지점의 중단사면을 볼록(凸), 오목

(凹), 직선(□), 복합(凹凸)형으로 구분하였고, 사면형태(횡단사면)는 산사태 발생원 지점의 횡단사면을 볼록(凸), 오목(凹), 직선(□), 복합(凹凸)형으로 구분하였다. 해발고(m)는 토석류 발생원 지점의 고도를 측정하였으며, 사면위치는 산사태 발생원 지점의 위치를 산정·산복·산록으로 구분하였다. 하천차수는 산사태 발생원 지점의 위치를 1/25,000 지형도상에서 Strahler에 의해 개정된 Horton의 방식(1952)의 방식에 의해 구분하였으며, 임상은 산사태 발생원 지점의 임상도 및 현지조사를 통해 침엽수림, 활엽수림, 혼효림으로 구분하였다. 모암은 지질도와 현지조사를 통하여 산사태 발생원부터 발생구간까지 모암을 퇴적암, 화성암, 변성암으로 구분하였다. 토심은 산사태 발생원부터 유하 및 퇴적구간까지 상부, 중부, 하부 3지점에서 토심을 측정하여 평균하였다.

2. 통계분석방법

국립공원 산악형(설악산, 지리산, 소백산)에서 발생한 산사태지 446개소를 대상으로 산사태 발생 규모 및 침식량 특성을 분석하였으며, 침식량에 영향을 미치는 10개의 산림환경 인자와의 상관분석 통하여 산사태 발생 취약성을 분석하였다. 산사태의 침식량에 관여하는 산림환경 인자로는 경사도, 사면방위, 사면형태(중·횡단사면), 사면위치, 하천차수, 고도, 임상, 모암, 토심 총 10개 인자 446개 설명변수를 이용하여 상관분석을 실시하였다. 통계프로그램 SPSS 21.0을 이용하여 통계분석을 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 산사태 피해지 발생 규모 특성 분석

산악형 국립공원(설악산, 지리산, 소백산) 지역에서 산사태 발생지 446개소를 대상으로 산사태 취약성을 파악하기 위하여 산사태 발생규모별 산사태 발생빈도를 분석한 결과 Figure 2와 같다. 발생 길이는 50 m 이하에서 전체 발생 466개소 중 214개소로 48%, 51~100 m에서 149개소로 33.4%, 101~150 m에서 45개소 10.1%, 151~200 m에 22개소 4.9%, 201 m 이상에서 16개소 3.6%로 조사되었으며, 산사태 발생 평균길이는 76.67 m이었다. Lee(2014)은 전국의 산사태지 발생 길이를 조사한 결과 전체 산사태 발생지 747개소 중 50 m 이하에서 302개소로 41%의 분포를 보이고 있었고, 다음으로 51~100 m에서 237개소 32.2%, 101~150 m에서 84개소 11.4%를 차지하고 있었고, 201 m 이상과 151~200 m에서는 66개소, 48개소로 각각 9%, 6.5%가 나타났으며, 전국의 산사태 발생 평균 길이는 99 m로 발생하였다. Jung(2010)의 경북지역의 산사태 발생지 172개소를 대상으로 발생면적을 연구한 결과 50 m 이하에서 47.4%로 연

구결과와 유사한 결과로 생각된다.

산사태 폭은 6~10 m에서 전체 발생 466개소 중 165개소로 37%, 다음으로 5 m 이하에서 103개소로 23.1%, 11~15 m에서 80개소 17.9%, 21 m 이상에 65개소 14.6%, 16~20 m에서 33개소 7.4%로 조사되었으며, 산사태 평균 폭은 12.87 m이었다. Choi(1986)는 산사태발생지 산지에서 1977년부터 1982년 6년간 안양 외 9곳에서 발생된 산사태 발생지 317개소를 대상으로 산사태 폭은 5 m의 경우가 가장 높았으며, 20 m 이하의 경우가 전체의 90%정도를 해당한다. 또한 Cho and Chang(2006)의 연구에 의하면 2002년 태풍 ‘루사’로 인한 집중호우가 내린 강릉지역의 산사태발생지 조사를 통해 1,365개소의 산사태 발생 원인 및 규모 특징에 관해 조사에서 산사태의 평균 폭은 10 m보고와 유사한 결과를 나타내었다.

500m² 이하의 산사태 발생면적은 전체 466개소 중 235개소로 52.7%, 다음으로 501~1,000 m²에서 88개소로 20%, 2,001 m² 이상에서 64개소 14.3%, 1,001~1,500 m²에서 41개소 9.2%, 1,501~2,000 m²에서 18개소 4%로 조사되었으며, 산사태 발생지 평균면적은 1,232 m²이었다. 이는 Jung(2010)을 연구에 의하면 경상북도의 산사태 발

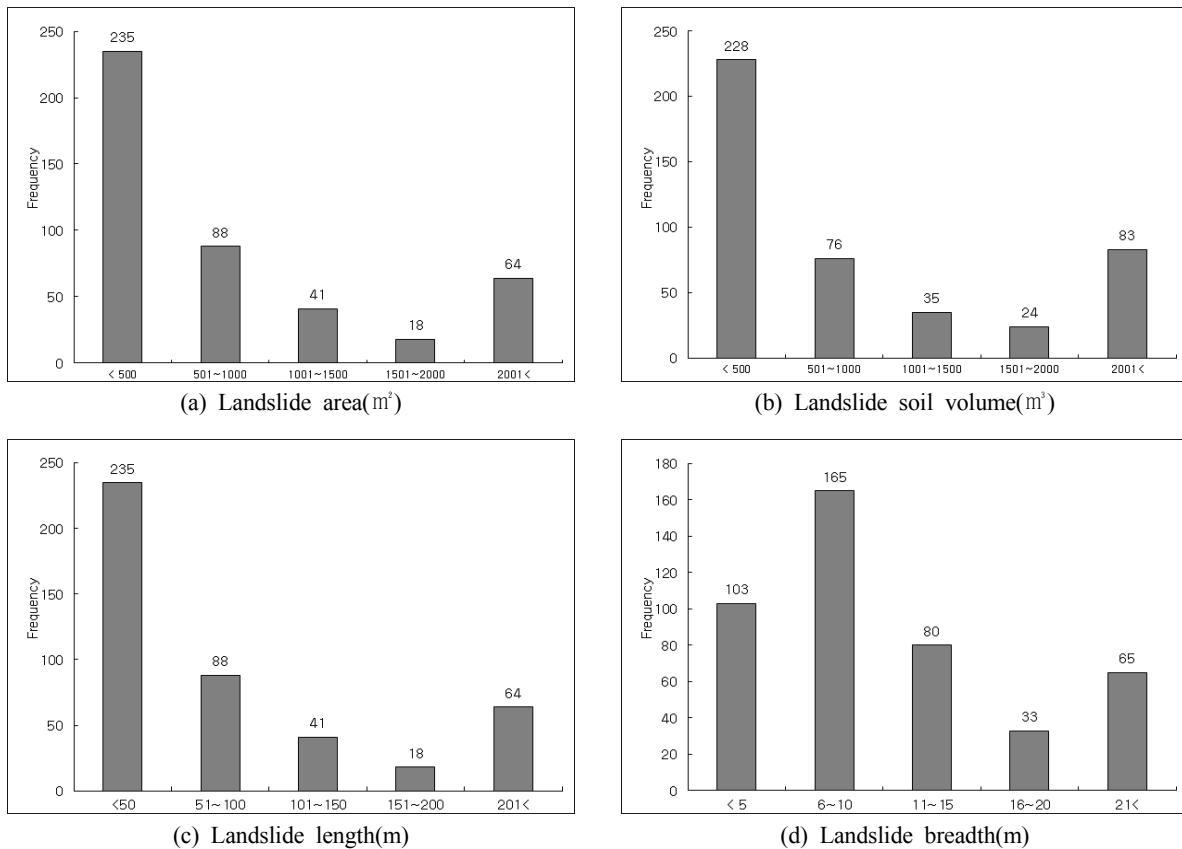


Figure 2. Frequency by area, Soil volume, length and width of Landslide.

생지 172개소를 대상으로 산사태 발생면적을 연구한 결과 500 m² 이하는 38.6%로 조사결과와 유사하지만, Kang et al.(1988)의 조사에 의하면 국내에서 발생한 산사태의 약 90% 정도가 산사태 발생면적이 2,000 m² 이하의 소규모 산사태가 많은 것으로 보고하여 조사한 것과 차이를 보였다.

산사태에 의한 침식량을 조사한 결과는 500 m³ 이하에서 전체발생 466개소 중 228개소로 51.1%의 분포를 보였고, 다음으로 2,001 m³ 이상에서 83개소 18.6%, 501~1,000 m³에서 76개소로 17%, 1,001~1,500 m³에 35개소 7.8%, 1,501~2,000 m³에서 24개소 5.4%로 나타났으며, 산사태 평균 침식량은 1,439 m³이었다. Park et al.(2010)은 전북지역의 산사태 발생지 규모분석에서 산사태 발생지 182개소 중 침식량은 500 m³ 이하가 63개소로, 2,501 m³이상 규모가 60개소, 501~1,000 m³가 29개소가 조사되었으며, 평균 침식량은 4,418 m³로 보고하였다.

이와 같은 결과를 종합하여 보면 산악형 국립공원의 발생 침식량은 소규모성으로 규모가 클수록 산사태 발생 개소 수는 적어져 반비례하는 경향을 보고 있으며, 산악형 국립공원 지역은 지리적 특성상 산정 곡두 및 1차 하천 지

점의 토심이 얇은 급경사지 상부에서 발생한 산사태가 대형토석류로 발전하여 하부로 이동하는 특성을 보였다.

2. 산사태 발생빈도와 산림환경 인자와의 상관분석

산악형 국립공원 지역을 중심으로 다양한 산림환경 인자가 산사태 발생빈도에 미치는 영향을 분석한 결과는 Figure 3과 같다. 산사태 발생지역의 경사도를 분석한 결과 31~40°에서 산사태 전체 발생 개소수의 41(183개소)로 많은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 21~30°에서 106개소(23.8%), 41~50°에서 71개소(15.9%), 51°이상에 61개소(13.7%), 20° 이하에서 25개소(5.6%) 순으로 분석되었다. Kim et al.(2000)은 지질조건에 따른 자연사면 산사태 발생지 사면경사는 26~30°에서 가장 많은 산사태가 발생하였다고 보고하였다. 특히, 20°이하일 때는 거의 발생하지 않았으며, 30°보다 경사가 증가하는 경우 발생 빈도는 점점 감소하는 경향을 보였다. Choi(1986)은 산사태 발생 빈도는 30~35°경사 범위에서 가장 많이 발생되지만, 대면적의 산사태는 30°이하의 지형에서도 많이 발생하였다고 보고하였다. Ikeya(1989)는 일본 전역에서 발생한 대규모 암설유동을 분석한 결과에서는 10~20°사이

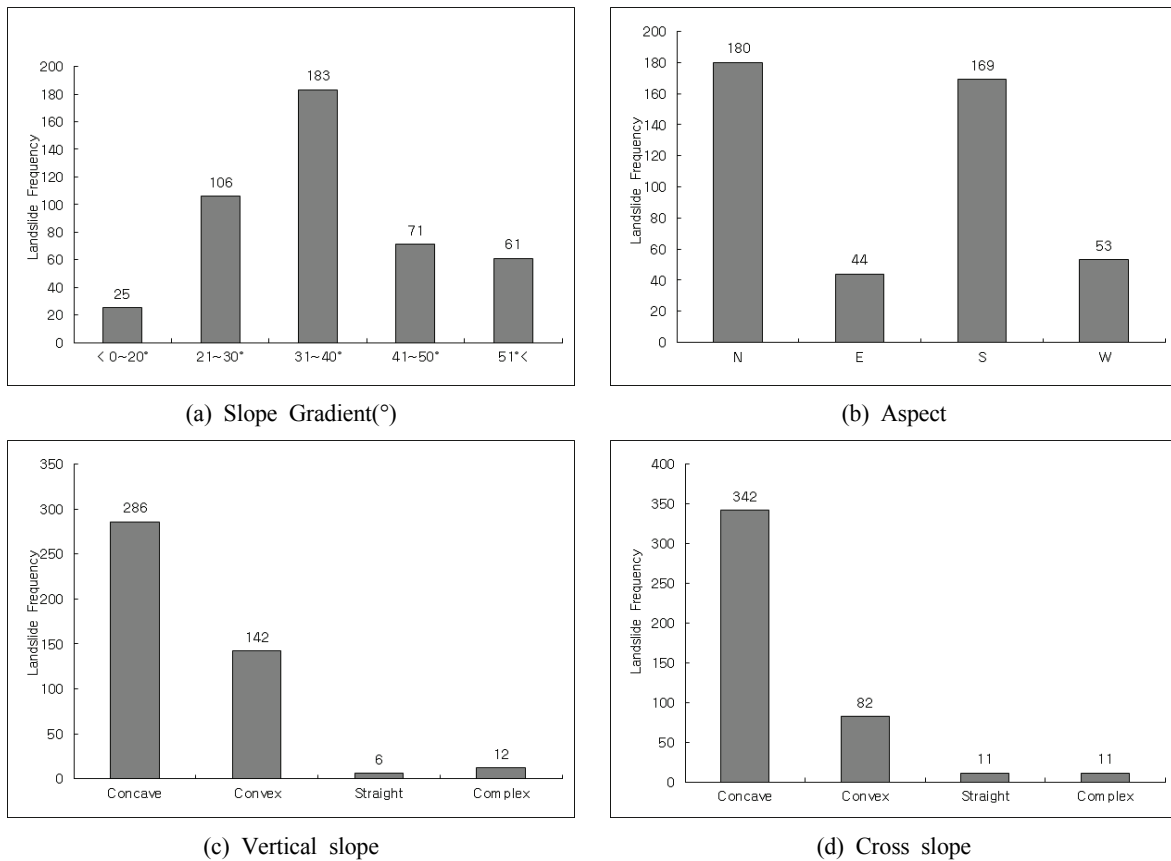


Figure 3. Occurrence frequency of Landslide by each factors.

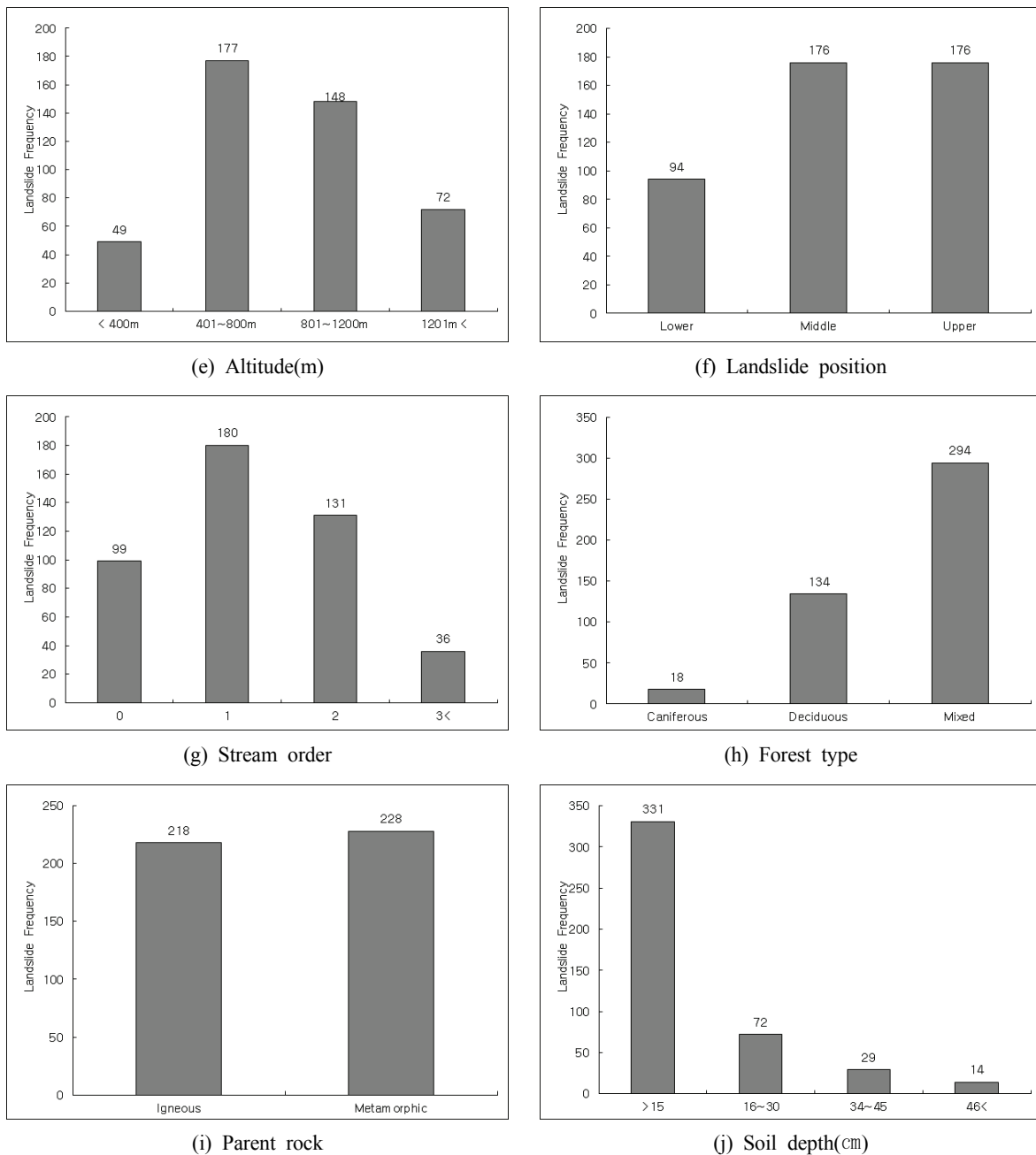


Figure 3. (Continued).

의 산지사면에서 70% 이상, 5~10°산지사면에서 20%가 발생하였다고 보고하였다. 특히, 사면 경사는 산사태 발생 빈도에 주된 영향인자이며, 산사태 발생 및 위험도를 예측하는데 반드시 고려되어야 할 영향인자라고 Dai et al.(2001)는 보고하였다.

사면방위가 산사태 발생에 미치는 영향을 분석한 결과 N(북사면)에서 180개소(40.3%)로 발생 빈도가 높게 나타났다. 다음으로 S(남사면)에서 169개소(37.9%), W(서쪽사면)와 E(동쪽사면)에서 53개소(11.9%), 44개소(9.9%)

의 분포를 보이고 있다. Lee(2014)는 전국의 산사태지 사면방위를 조사한 결과 전체 산사태 발생지 747개소 중 N(북사면)에서 306개소로 42%의 분포를 보였고, 다음으로 S(남사면)에서 270개소 37%, W(서쪽사면)와 E(동쪽사면)에서 88개소, 73개소로 각각 12%, 10%로 조사되었으며, Jung(2010)의 조사에 의하면 경북지역의 산사태 발생지 172개소 방위를 조사한 결과 북동 38.4%, 북서 32%로 조사되었다. Kim et al.(1998)은 산사태의 경우 북측사면이 남측사면에 비하여 2배 높은 산사태 빈도를 보이

며, 그 원인이 지질구조의 영향은 아닌 것으로 해석되며 암석의 풍화 정도, 토양 심도, 동경 지수, 식생 등의 차이가 원인이 될 수 있다고 하였다. 따라서 방위와 산사태 발생위험과의 관계는 실제 산사태가 발생지의 관계연구가 필요한 것으로 사료된다.

산사태 발생지의 종단사면을 조사하여 분석한 결과 오목(凹)사면은 286개소로 64.2%의 분포를 보였고, 볼록(凸)사면은 142개소 31.8%를 복합(凹凸)과 직선(口)사면은 12개소, 6개소로 각각 2.7%와 1.3%의 분포였다. Park et al.(2010)은 전북지역에서 산사태 발생지의 종단사면 특성을 분석하였으며, 이 결과에 의하면 오목(凹)사면이 70개소(38%)로서 가장 많이 발생했으며, 다음으로 직선(口)사면이 59개소(32%), 복합(凹凸)사면 및 볼록(凸)사면에서는 각각 50개소와 3개소 조사로 나타났다. Lee(2014)는 전국의 산사태지 종단사면을 조사한 결과 전체 산사태 발생지 747개소 중 오목(凹)사면은 300개소로 41%의 분포를 보였고, 다음으로 직선(口)사면은 221개소 30%, 복합(凹凸)과 볼록(凸)사면은 201개소, 15개소로 각각 27%, 2%의 발생 빈도를 보였다. 이러한 결과는 산사태가 대체로 평탄사면의 약간 오목한 지형에서 전이형 슬라이드로 시작되어 토석류인 사태물질이 주위의 계곡으로 흘러내리면서 유동성산사태로 변화되는 양상으로 설명할 수 있다(Kim et al., 2005).

횡단사면을 조사하여 분석한 결과 오목(凹)사면은 342개소로 76.6%의 분포를 보였고, 볼록(凸)사면은 82개소 18.4%를 복합(凹凸)과 직선(口)사면 11개소, 11개소로 각각 2.5%와 2.5%의 분포를 보이고 있다. Lee(2014)는 전국의 산사태지 횡단사면을 조사한 결과 전체 산사태 발생지 747개소 중 오목(凹)사면은 490개소로 66%의 분포를 보였고, 다음으로 직선(口)사면은 174개소 24%, 복합(凹凸) 및 볼록(凸)사면은 54개소, 19개소로 각각 7%, 3%의 발생 빈도를 발생한 결과와 유사한 경향을 보였다.

산사태 발생지의 고도를 분석한 결과 401~800 m에서 177개소로 39.7%의 분포를 보였으며, 801~1,200 m에서 148개소 33.2%, 1,201 m 이상과 400 m 이하에서 72개소, 49개소로 각각 16.1%와 11%의 분포를 보이고 있다. Dyrness(1967)는 고도 690~780 m에서도 산사태가 많이 발생한다고 보고하여 연구결과와 유사한 경향을 보였다. 하지만 Kim et al.(2000)은 산사태 발생지 고도는 대부분 500 m 이하에서 발생한다고 연구한 것과 차이를 보였다. 따라서 본 연구 대상지인 국립공원 지역은 해발고도가 1,440~1,915 m로 높기 때문에 700 m 이상의 산복과 산정 부위에서 산사태 발생률이 높은 것을 알 수 있다.

사면 위치를 조사하여 구분한 결과 산복과 산정에서 각각 176개소로 39.5%의 분포를 보였고, 산록에서 94개

소 21%의 분포를 보이고 있다. Park et al.(2010)은 전북 지역의 산사태 발생지 사면 위치를 분석한 결과 산복 97개소(53%), 산정 64개소(35%), 산록 21개소(11%)의 조사한 결과와 유사한 경향을 보였다. 이상의 결과를 정리하면 산악형 국립공원지역의 사면 위치별 산사태 발생 빈도는 국립공원 특성상 대부분 고산지대이므로 산복 및 산정의 5부 능선 이상에서 많이 발생하였다고 사료된다.

산사태 발생지 산림유역면적 내 하천차수를 분석한 결과 1차에서 180개소로 40.4%, 2차에서 131개소 29.4%, 0차와 3차 이상에서 99개소, 36개소로 각각 22.2%, 8%의 분포를 보이고 있다. Park et al.(2010)에 의하면, 전북지역의 산사태 발생지의 하천차수를 조사한 결과 1차에서 63개소 34%, 0차에서 49개소 27%의 조사결과와 Lee(2014)는 전국의 산사태지 유역면적 내 하천차수는 1차에서 306개소로 38%의 분포를 보였고, 다음으로 0차에서 195개소 26%, 2차와 3차 이상에서 162개소, 99개소로 각각 22%, 13%의 발생 하였다고 조사되었다. 1차수에서 산사태 발생이 많은 것은 주로 지표유하수가 함유하는 산정부위 곡두에 물이 집수되기 때문이며, 이는 산악형 국립공원지역 산사태가 대부분 산정 및 산복상부의 오목사면에서 발생하는 것에 크게 기여하는 원인이 되는 것으로 판단된다.

임상을 구분한 결과 혼효림에서 294개소로 66%의 분포를 보였고, 활엽수림에서 134개소 30%를 침엽수림에서 18개소 4%의 분포를 보이고 있다. Jung(2010)의 조사에 의하면 경북지역의 산사태 발생지 172개소를 대상으로 산사태발생지 임상을 조사한 결과 혼효림이 51.2%로 유사한 경향을 보였다. Park et al.(2010)은 혼효림과 활엽수림은 낙엽이 있기 때문에 집중호우 시에 지표면으로 흐르는 유출수의 속도를 늦추어 토양의 유실을 방지하여 다른 임상에 비해 침엽수림이 발생빈도가 높다는 연구결과와 다시 차이가 있다. 따라서 특정 임상이 산사태의 발생에 많은 영향을 미친다는 결과를 단정지을 수 없으며, 임상에 따른 산사태 침식량에 따른 연구는 다른 산림환경 인자들과 복합적으로 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

모암은 변성암에서 228개소로 51%의 분포를 보였고, 화강암에서 218개소 49%의 분포를 보이고 있다. Ma and Jeong(2007)의 연구에 의하면 우리나라 국립공원 7개 지역을 대상으로 총 44개의 산사태 발생지 모암을 분석한 결과 변성암 34개소(77%), 화강암 10개소(23%)가 발생하였다고 보고와 유사한 경향을 보였다. 또한 Park et al.(2010)에 의하면, 전북지역의 산사태 발생지 모암을 조사한 결과 화성암 106개소와 퇴적암 69개소가 발생하였다고 보고하여 조사한 것과 차이를 보였다.

토심은 15 cm 이하에서 331개소로 74.2%의 분포를 보였고, 16~30 cm에서 72개소 16.1%, 31~45 cm와 46 cm 이상에서 29개소, 14개소로 각각 6.5%와 3.1%의 분포를 보이고 있다. Park et al.(2010)의 전라북도 지역의 산사태 발생지 토심이 15cm에서 산사태 발생빈도가 높다는 연구결과와 유사하지만, Lee et al.(2012)는 강원도지역의 산사태발생지 토심을 조사한 결과 토심이 20~50 cm인 경우 산사태 발생분포가 54%로 가장 높았다고 보고하여 다소 차이가 있다. 이상의 연구의 종합하여 보면 산사태는 특정 인자에 의해 발생하는 것이 아니라 다양한 인자들의 복합적인 영향 때문인 것으로 사료된다.

위 연구의 결과 내용은 산악형 국립공원 지역에서 산사태 발생 예상지역을 알 수 있는 기초자료를 제공해줄 것으로 생각되며, 이러한 지역을 중심으로 철저한 관리 및 예방대책이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

3. 산사태 발생지역의 침식량과 산림환경 인자와의 상관분석

국립공원 고산지역의 산사태 발생과 10가지 산림환경 인자와의 상관을 분석한 결과를 보면 Table 2와 같다. 결과를 살펴보면 산사태에 의한 발생 침식량은 종단사면(복합), 표고(1,201 m 이상), 토심(46 cm 이상)에서 1% 수준 내에서 정의 상관관계를 보였고, 횡단사면(볼록)에서 5%수준 내에서 정의 상관관계를 나타냈다. 한편 토심(15

cm 이하) 1% 수준 내에서 부의 상관관계를 보였고, 표고(401~800 m), 발생위치(산록)에서 5% 수준 내에서 부의 상관관계를 보였다. 그 외 경사(20°~30°) 사면방위(북), 종단사면(직선), 횡단사면(오목), 하천차수(3차 이상), 임상(활엽수, 혼효림), 모암(변성암), 토심(31~45 cm) 등이 산사태 발생 침식량과 정의 상관관계를 보였으나 상관성은 높지 않은 것으로 분석되었다. 이러한 결과로 볼 때 Lee and Ma(2019)의 중부권역의 산사태 발생특성 분석에서 산사태발생 면적과 산림환경 인자를 분석한 결과 종단사면(복합), 표고(1,201 m 이상) 1%수준의 정의 상관관계를 나타낸 결과와 유사하였다. 특히 상관관계 분석에서 산사태 발생 침식량에 1% 수준에서 정의 상관관계를 나타낸 표고(1,201 m 이상), 토심(46 cm 이상)은 산사태 주요 발생지인 산정 및 산복이상의 고산지대에서 표토가 깊어야 0.7 m정도 되므로 표층활락형 및 복합형의 붕괴가 발생하고, 암반사면에서는 주로 절리형의 붕괴가 발생하고 있는 것으로 사료된다. 특히 산악형 국립공원은 지형 및 지세가 험준하고 경사가 급한 곳에서 산사태가 발생하여 계곡까지 확대되어 침식형 토석류로 발전하는 현상이 나타나므로, 산지 상류유역 구간은 토석류 재해로 인한 피해를 줄일 수 있도록 많은 노력이 필요한 것으로 사료된다.

Table 2. Correlation analysis between landslide soil volume and factors.

Factors	Slope gradient (°)					Aspect			
	<20	21~30	31~40	41~50	51<	N	W	S	E
Landslide Soil volume	-0.038	0.038	-0.023	-0.010	0.037	0.092	-0.052	-0.039	-0.033
Factors	Vertical slope				Cross slope				
	Concave	Convex	Straight	Complex	Concave	Convex	Straight	Complex	
Landslide Soil volume	-0.050	-0.024	0.001	0.163**	0.056	0.111*	-0.092	-0.034	
Factors	Altitude(m)				Landslide position				
	< 400	401~800	801~1,200	1,201 <	Upper	Middle	Lower		
Landslide Soil volume	-0.029	-0.106*	-0.002	0.168**	0.097*	-0.010	-0.103*		
Factors	Stream order				Forest type				
	0	1	2	3<	Coniferous	Deciduous	Mixed		
Landslide Soil volume	-0.067	-0.047	-0.034	0.041	-0.046	0.016	0.003		
Factors	Parent rock			Soil depth(cm)					
	Igneous	Metamorphic		< 15	16~30	31~45	46 <		
Landslide Soil volume	-0.054	0.054		-0.125**	-0.007	0.009	0.315**		

Note) **Means statistically significant at 1% level, *means statistically significant at 5% level.

결 론

본 연구는 산악형 국립공원 지역에서 발생한 산사태 발생 특성과 산림환경 인자가 산사태 발생 빈도 및 침식량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 설악산, 소백산, 지리산을 중심으로 총 446개소를 조사하였다. 그 결과 평균 발생면적은 1,232 m², 평균 발생침식량은 1,439 m³, 평균 산사태 길이는 76.7 m, 평균 산사태 폭은 12.9 m로 나타났다. 또한 경사도(31~40°), 사면방위(N 북사면), 종단사면(오목 凹), 횡단사면(오목 凹), 표고(401~800 m), 사면위치(산정, 산복), 하천차수(1차), 임상(흔효림), 모암(화강암), 토심(15 cm 이하)의 조건에서 산사태에 취약한 것으로 분석되었다.

산사태 발생 주요 인자로는 강우인자와 경사면의 기하학적 형상과 구성, 지하수상태 및 지질 등이며, 이중에서 관련이 큰 인자는 강우이다. 하지만 산사태의 경우 정확한 발생 시간을 파악할 수 없기 때문에 강우인자의 영향을 분석하기가 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 상관성 분석이 불가능한 강우인자를 제외하고 산림환경 인자가 산사태 발생 빈도와 침식량에 미치는 영향을 분석하였다. 산사태 발생침식량(m³)과 산림환경 인자의 상관분석을 한 결과 종단사면(복합), 표고(1,201 m 이상), 토심(46 cm 이상)에서 1% 수준 내에서 정의 상관관계를 보였고, 횡단사면(볼록)에서 5%수준 내에서 정의 상관관계를 보였다.

산사태는 넓은 범위에서 동시다발적으로 일어나며 토양, 지질 및 지형적인 요인으로 한번 재해가 발생했던 주변 일대에서 다시 발생하는 특성이 있으므로 산사태의 발생 및 피해를 최소화하기 위해서는 산림환경별 산림관리 및 예방 대책이 필요하다. 특히, 산사태는 자연적인 환경파괴를 가속화시켜 산림생태계의 질서를 파괴할 뿐만 아니라 국민의 생명과 재산 피해를 발생시키기 때문에 산사태 발생 우려지역을 선정하고 집중적으로 관리되어야 한다. 이를 위해 항공 및 무인항공기를 촬영하여 산악형 산림지역의 산림환경 인자를 파악할 수 있는 중장기적인 모니터링 체계를 구축하는 연구가 추가적으로 필요하다고 사료된다.

또한 국립공원지역은 경관 및 자연생태학적으로 보전 가치가 매우 높은 지역이므로 새롭게 발생하는 산사태는 지속적인 자료축적이 필요하며, 이를 바탕으로 산사태위험지 붕괴 판정표 기술을 확립하고 예방과 복구기술을 통하여 자연경관이 뛰어난 국립공원의 산지유역을 종합적으로 보전할 수 있도록 힘써야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산림청 '산림과학기술개발사업(과제번호: S21121

3L020110)'의 지원과 서울대학교 농업생명과학대학 학술림 지원에 의하여 이루어진 것입니다. 심사단계에서 논문의 완성도를 높일 수 있도록 좋은 의견을 주신 심사위원 여러분께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

References

- Cha, A.R. and Kim, T.H. 2017. Detection and application of geomorphological features affecting the landslide. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 17(5): 157-162.
- Cho, Y.C. and Chang, T.W. 2006. The geometric characteristics of landslides and foimt characteristics in gangneung area. *The Journal of Engineering Geology of Korea* 16(4): 437-453.
- Choi, K. 1986. Landslides occurrence and its prediction in Korea. Doctor of Philosophy Dissertation kangwon National University. Korea. pp. 45.
- Dymess, C.T. 1967. Mass soil movements in the HJ. Andrews experimental forest. Pacific northwest forest and range experiment station U.S. Department of Agriculture U.S. Forest Service Research Paper PNW 42: 1-14.
- Dai, F. C., Lee, C. F., Li, J. and Xu, Z. W., (2001), Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology* 40(2): 381-391.
- European Community Program (EPOCH). 1993. Temporal occurrence and forecasting of landslides in the european Community. Contract No. 900025.
- Hutchinson, J.N. 1988. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology, In *Landslides Proc. 5th Int. Symp. on Landslides*. Balkema, Rotterdam, pp. 3-35.
- Ikeya, H. 1989. Debris flow and its countermeasures in Japan, *Bull. of the IAEG*. 40(1): 15-33.
- Jung, Y.D. 2018. A study on the development of mountainous disaster management system in recreation forest. Doctor of Philosophy Dissertation Gyeongsang National University Korea. pp. 2-4.
- Jung, K.W. 2010. Studies on the causal characteristics of landslide and the development of hazard prediction map for landslide in Gyeongsangbuk-Do Province, Korea Doctor of Philosophy Dissertation Kyungpook National University. Korea. pp. 1-4.
- Kang, W.P., Ma, H.S. and Jeong, M.G. 1988. Studies on the landslides caused by typhoon No. 875 in Gyeongsangnam - do Distiricts. *Journal Korean Forestry Society* 77: 276-282
- Kim, K.S., Kim, W.Y., Chae, B.G., Song, Y.S. and Cho, Y.C. 2005. Engineering geological analysis of landslides on

- natural slopes induced by rainfall. *The Journal of Engineering Geology* 15(2): 105-212.
- Kim, W.Y., Chae, B.G., Kim, K.S., Ki, W.S., Cho, Y.C., Chio, Y.S., Lee, S.R. and Lee, B.J. 2000. Prediction and mitigation of landslide hazards. KR-00(T)-09. pp. 124.
- Kim, W.Y., Lee, S.R., Kim, K.S. and Chae, B.G. 1998. Landslide types and susceptibilities related to geomorphic characteristics(Yeonchon, Chulwon area). *The Journal of Engineering Geology* 8(2): 115-130.
- Kim, S.W., Chun, K.W., Kim, J.H., Kim, M.S. and Kim, M.S. 2012. Characteristics of heavy rainfall for landslide-triggering in 2011. *Journal of Korean Forestry Society* 101(1): 28-35.
- Kwon, H.J., Lee, C.W., Woo, C.S., Kim, D.Y., Youn, H.J. and Park, S.J. 2015. A status of landslide damage in mountainous national park of Korea using temporal spatial images. *Journal of the Korea Society of Hazard Mitigation*. 15(5): 97-102.
- Lee, C.W., Kim, G.H., Yung, C.Y., Ryu, H.J. and Hong, S.J. 2012. Development of landslide-risk prediction model thorough database construction. *Korean Geotechnical Society* 4: 23-33.
- Lee, S.J. 2014. Development of prediction technique of landslide using forest environmental factors. Doctor of Philosophy Dissertation Gyeongsang National University. Korea. pp. 1-11.
- Lee, S.J. and Ma, H.S. 2018. Development of prediction technique of landslide using forest environmental factors. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 52(4): 63-72.
- Lee, S.J. and Ma, H.S. 2019. Analysis of landslide characteristics of the central regions in Korea. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 53(1): 61-72.
- Lee, S.J. and Ma, H.S. 2019. Development of prediction technique of landslide hazard of central regions in Korea. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 53(3): 7-16.
- Lee, S.J., Lee, E.J. and Ma, H.S. 2019. Analysis of characteristics of forest environmental factors of debris flow in Jeollabuk-do, Korea. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 53(5): 63-74.
- Ma, H.S. 1994. Studies on development of prediction model of landslide hazard and its utilization. *Journal of Korean Forestry Society* 83(2): 175-190.
- Ma, H.S. and Jeong, W.O. 2007. Analysis of landslides characteristics in Korean national parks. *Journal of Korean Forestry Society* 6: 611-619.
- Ma, H.S., Jeong, W.O. and Park, J.W. 2008. Development of technique of landslide hazard area in Korea national parks. *Journal of Korean Forestry Society* 97(3): 326-331.
- Ma, H.S. and Jeong, W.O. 2010. Characteristics analysis of debris flow disaster in Korean national parks. *The Korea Society For Environmental Restoration And Revegetation Technology* 13(4): 52-64.
- Ma, H.S., Kang, W.S. and Lee, S.J. 2014. Prediction and evaluation of landslide hazard based on regional forest environment. *Journal of Korean Forestry Society* 103(2): 233-239.
- Ma, H.S. and Lee, S.J. 2018. Analysis of debris flow characteristics in Bongwha area Gyeongsangbuk-do, Korea. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 52(1): 1-11.
- Park, C.M., Ma, H.S., Kang, W.S., Oh, K.Y., Park, S.H. and Lee, S.J. 2010. Analysis of landslide characteristics in Jeonlabuk-do, Korea. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 44(4): 9-21.
- Park, J.H., Lee, C.W., Kang, M.J. and Kim, K.D. 2015. Analysis of characteristics of forest environmental factors on land creeping occurrence. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 49(5): 133-144.
- Shin, H.W. and Lee, S.G. 2018. Comparison of landslide susceptibility analysis considering the characteristics of landslide trigger points. *Journal of the Korean Society of Surveying* 36(2): 59-68.
- Strahler, A.N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology, *Bulletin of the Geological Society of America* 63: 1117-1142.
- Woo, C.S., Youn, H.J., Lee, C.W. and Jeong, Y.H. 2008. Estimation of the moving soil volume of debris flow using aerial Lidar data. *Korean Forestry Society*. pp. 327-328.
- Varnes, D.J. 1978. Slope movement types and processes, in *landslides analysis and control*, TRB special Report, 176. National Academy of Science. pp. 11-33.

Manuscript Received : June 25, 2019

First Revision : October 31, 2019

Second Revision : November 19, 2019

Accepted : November 20, 2019