

토석류 위험지역에 영향하는 산림환경 특성 분석

박재현* · 강민정 · 김기대
경남과학기술대학교 산림자원학과

Influenced on Analysis of Characteristics of Forest Environmental Factors on Debris Flow Occurrence

Jae-hyeon Park*, Min-Jeong Kang and Ki-Dae Kim

Department of Forest Resources, Gyeongnam National University of Science and Technology,
Jinju 660-758, Korea

요약: 이 연구는 토석류 위험지역 총 272개소에서 토석류 유출에 영향을 미치는 20개의 산림환경인자에 대하여 산림환경 특성을 분석하였다. 입지환경인자 중 토심은 하(30 미만), 방위는 서쪽사면, 표고는 200~300 m, 산지평균경사는 25~30°, 토질은 사양토, 모암은 화성암, 사면형은 복합사면이 토석류 위험이 높은 것으로 나타났다. 강우환경인자 중 최대시우량은 50~100 mm, 1일최대강우량은 300 m 이상이 토석류 위험이 높은 것으로 나타났다. 또한 유역환경인자 중 계상평균경사는 10~20°, 계상평균폭은 10 m 미만, 계상에 있는 토석의 양은 적음(계상구성물 중 20% 미만), 수계밀도는 1 km/km²이내, 산사태 발생 가능성이 있는 경사 20° 이상의 분포비율은 40~60%, 산사태 위험도 2 등급 이상 비율은 40~60%, 유목이 있는 상태, 사방공작물 시설이 있는 경우, 입상환경인자 중 영급은 3영급, 소밀도는 밀, 입상은 혼효림 등의 인자가 토석류 위험이 높은 것으로 나타났다.

Abstract: This study was conducted to analyze the forest environmental characteristics on a total of 20 forest environmental factors affecting the debris flow against 272 sites of risk areas. In the case of environmental factors, it showed the high risk of debris flow under the following conditions such as soil depth of less than 30cm, west slope, altitude of 200~300 m, mountain average slope of 25~30°, sandy loam, igneous rocks, and composite slope. Among the rainfall factors, 50~100 mm of maximum hourly rain fall and 300 mm of maximum rain fall per day have been shown the high risk of debris flow. Furthermore, the high risk of debris flow was related to the river-bed average slope of 10~20°, the river-bed average width of >10 m, the small amount of debris in river-bed (less than 20% of river-bed structure), the drainage density of >1 km/km², the 40~60% of area with more than 20° slope, and the 40~60% of areas with risk grade 2 of landslide. In addition, forest environmental factors including the driftwood, soil erosion control structures, age-class 3, crown density (density), and mixed forest were important factors causing the high risk of debris flow.

Key words: debris flow, forest environmental characteristics, landslide, soil erosion control

서론

토석류란 산지 또는 계상에서 토석과 나무 등이 물과 섞여 빠른 속도로 유출되는 것으로 산사태의 일종이다. 토석류는 산지 외에도 계상의 하류 퇴적지에 인접한 시설물이나 가옥 및 인명에 막대한 피해를 입히는 재해이다. 토석류를 발생시키는 원인으로는 지형, 지질조건 등의 내적 요인과 집중강우, 지진 등의 외적요인으로 나눌 수 있는데, 이 중에서 주요 원인은 대부분 집중호우에 의해 발생

되는 것으로 나타난다(Ryu and Youn, 2008).

최근 우리나라는 산지토사재해로 인해 2005년 이후 연평균 피해면적 480, 인명피해 10명, 복구비용 870억원의 피해를 입고 있다. 특히, 태풍 및 집중호우로 인해 2005년 496, 2006년 1,597, 2011년 824, 2012년 491, 2013년 312로 산지토사재해가 대규모로 발생하는 추세에 있다(Statistics Korea, 2014). 또한 2011년 우면산 산사태와 같은 도시생활권 산사태의 경우 토석류 유출이 확대되어 대규모의 인명피해까지 발생되고 있다(Korea Forest Service, 2013).

토석류 발생은 토양 및 지질 등과 같은 지형적 요인과

*Corresponding author
E-mail: pjh@gntech.ac.kr

강우와 같은 기상적 요인으로 인해 과거 토석류 발생지 일대에서 다시 발생하는 특성이 있어 이에 대한 원인분석과 대처방안 및 피해를 저감하기 위한 토석류 유출 발생과 관련이 있는 산림환경인자의 특성을 파악해야 한다. 현재까지 진행된 토석류 유출 특성분석과 관련한 연구는 토석류 발생 지형과 유발 강우 특성 분석(Kim, 2008), 산지 토사재해 발생에 있어서 산림환경인자의 영향(Ma et al., 2014), 대면적 산지토사재해의 예측과 예방을 위한 산지 사면의 붕괴위험도 예측모델의 개발 및 실용화 방안(Ma, 1994), GIS를 이용한 산사태 위험지 판정 모델의 개발(Lee et al., 2005) 등이 있는데, 이러한 연구결과를 분석해 볼 때 산지토사재해는 매우 유동적이기 때문에 예측이 어려워 다방면의 연구와 대책수립이 필요하다. 한편 Pack(2004)은 GIS의 기능을 이용한다면 산사태나 토석류와 같은 산지재해를 관리하는 정보시스템으로 적합할 것이라고 하였는데, 이러한 GIS를 활용하여 토석류 발생에 영향을 미치는 산림환경인자들을 조사 분석하는데 효과적으로 적용할 수 있을 것이다.

따라서 이 연구는 전국을 대상으로 하여 토석류 유출 발생지 또는 가능성이 있다고 판단되는 산지계류를 중심으로 토석류 유출에 영향을 미치는 산림환경인자들의 특성을 분석함으로써 토석류 재해관리를 위한 기초자료를 제공하고자 수행하였다.

재료 및 방법

이 연구 대상지역은 계류보전사업 및 사방댐을 시설한 지역을 대상으로 서울지역(38개소), 경기도(10개소), 강원도(40개소), 충청북도(25개소), 충청남도(20개소), 전라북도(26개소), 전라남도(74개소), 경상북도(23개소), 경상남도(16개소) 등 전국의 272개소로 기왕의 산사태 발생이 있거나 위험지역 그리고 산사태 등으로 인한 토석류 유출 위험지역을 대상으로 토석류 유출 발생과 관련이 많은(Ma et al., 2014) 총 20개의 산림환경인자를 선정하여 토석류 발생위험 특성을 분석하였다.

토석류 유출에 관련이 많은 계상에 있는 입지환경인자는 토석의 양, 계상평균경사(%), 계상평균폭(m), 사방공작물 시설 유무, 산사태 발생 가능성이 있는 경사 20° 이상의 분포비율, 유목의 유무, 토심과 같은 7개의 인자를 대상으로 분석을 실시하였다. 또한 FGIS를 이용해 모암, 방위, 사면형, 산지평균경사(°), 산사태 위험도 2등급 이상의 비율(%), 소밀도, 수계밀도(km/km²), 영급, 임상, 토질, 표고와 같은 11개 인자에 대해 지질도, 지형도 및 관련 조사 자료를 분석하였다. 산사태 및 토석류 발생에 영향을 미치는 외부요인인 최대시우량(mm)과 1일최대강우량(mm) 등 2개 인자는 조사대상지와 가장 인접한 기상대의 과거

강우 이력을 토대로 분석에 활용하였다. 이와 같이 조사된 산림환경인자는 입지환경인자, 강우환경인자, 유역환경인자, 임상환경인자로 구분하여 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 입지환경인자

입지환경인자는 7개 인자로 토심, 방위, 표고, 산지평균경사, 토질, 모암, 사면형 등이 있으며, 분석결과는 다음과 같다(Figure 1).

1) 토심

토심은 깊이에 따라 상(1 m 이상), 중(30~99 cm), 하(30 cm 이하)로 구분하였다. 전국 272개소 중 토심이 하(30 cm 이하)인 곳에서 100개소(37%)가 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났고, 중(30~99 cm)에서 72개소(26%), 상(1 m 이상)에서 19개소(7%)인 것으로 나타났다. 이는 Kim and Lee(2012)가 제시한 토심이 깊음(100 cm 이상)으로 분류된 지역에서 산사태가 거의 발생되지 않고, 토심이 낮을수록 발생 빈도가 높아진다는 연구와 Park et al.(2010)의 토심이 15 cm에서 산사태 발생빈도가 높다는 연구결과와 유사한 결과로 생각된다.

2) 방위

방위는 계류가 포함되어 있는 산지의 방위로 서사면에서 55개소(20%)로 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났고, 동사면에서 47개소(17%), 북사면 30개소(11%) 순으로 나타났다. 이와 같은 결과는 Park et al.(2006)과 Park et al.(2010)의 연구결과와 같이 북동사면의 토석류 발생빈도가 가장 높은 결과와 상이한 결과이었다. 그러나 상기의 연구와 이 연구는 기왕의 연구들과 달리 8방위로 세분화하였으나 북사면, 북동사면, 북서사면에서 토석류 유출이 발생하지 않은 것은 강우에 의한 산지계류침식뿐만 아니라 Choi et al.(2004)의 연구와 같이 강우에 따른 다양한 요인의 영향에 따라 토석류가 발생되어 방향도 영향받음을 유추할 수 있는 결과로 판단된다. 또한 우리나라 산맥의 형태가 북쪽에서 남쪽으로 발달한 것에 따른 차이에 의한 결과도 영향을 주었을 것으로 사료된다. 따라서 방위와 토석류 발생위험과의 관계는 실제 토석류가 발생한 지역과의 관계연구가 필요할 것으로 사료된다.

3) 표고

표고는 200~300 m에서 74개소(27%)로 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났고, 100~200 m에서 51개소(19%), 500 m 이상에서 50개소(18%), 300~400 m에서 43개소(16%), 400~500 m에서 25개소(9%), 100 m 미만(5%)으

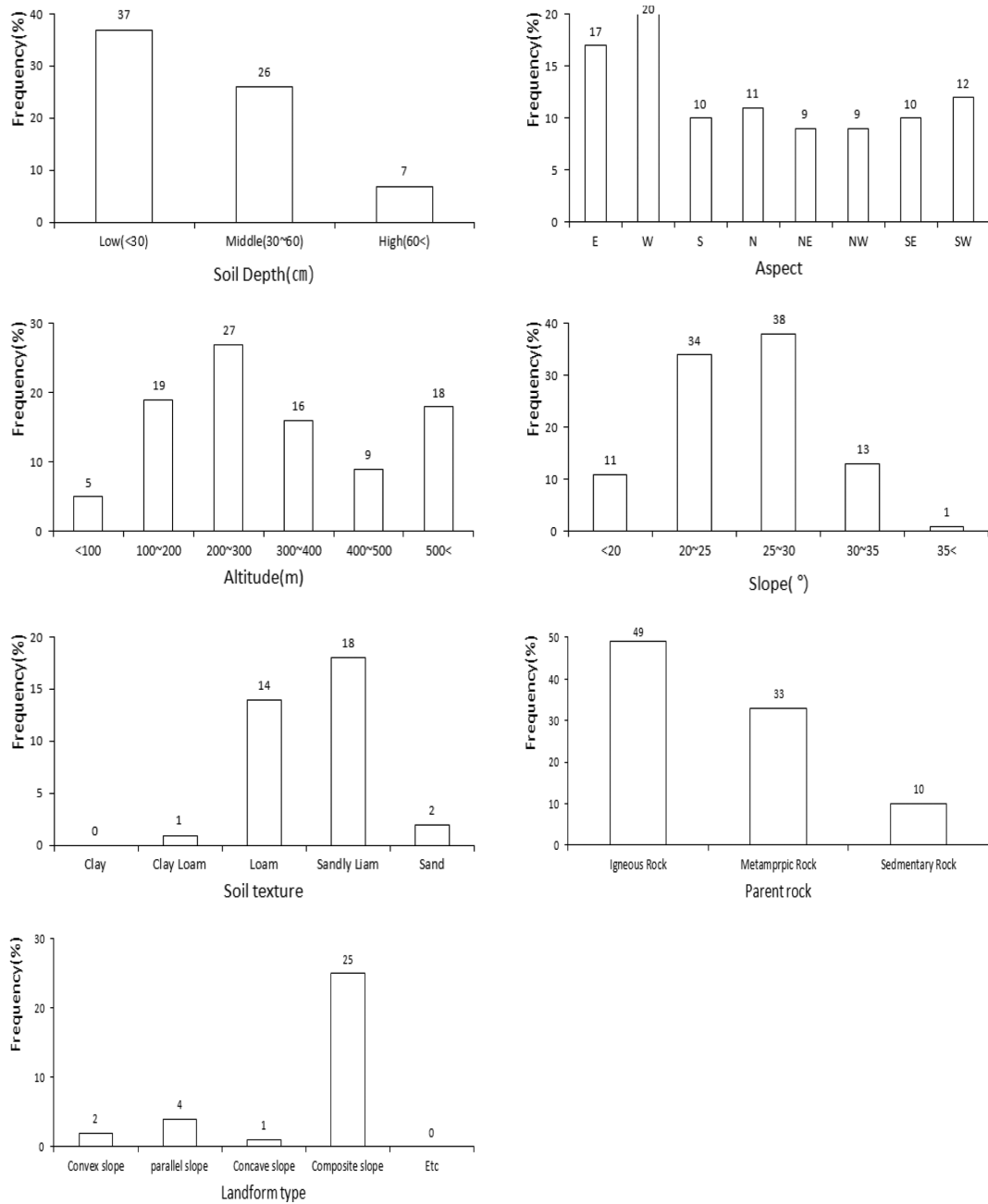


Figure 1. Occurrence frequency of debris flows by site environment factors.

로 나타났다. 이와 같은 결과는 Park et al.(2010)이 보고한 전라북도지역을 대상으로 산지표고 400~500 m에서 가장 많은 발생빈도를 보였다는 연구결과와는 차이가 있으나, Kim et al.(1998)이 보고한 연천-철원지역에서는 200~300 m에서 토석류가 가장 많이 발생하였다는 결과와 유사하였다. 이와 같은 결과로 볼 때 산지에 집중강우나 태풍이라는 외부요인이 작용했을 때 정상부에서 아래로 하강하는 사면이 계곡과 연결하는 계곡의 표고가 200~300 m가 대부분인 것으로 인해 토석류 발생빈도가 높아진다는 것을 유추할 수 있는 결과이었다.

4) 산지평균경사 및 사면형

산지평균경사는 25~30°에서 103개소(38%)로 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났고, 20~25°에서 92개소(34%), 30~35°에서 35개소(13%), 20° 미만에서 31개소(11%), 35° 이상에서 4개소(1%)로 산지경사를 완, 경, 급, 험, 절 5단계로 구분했을 때 급경사지에서 발생빈도가 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 Ma(1994), Park et al.(2010)의 급경사지에서 산사태 빈도가 높다는 결과와 유사하였으며, Kim et al.(2006)의 우리나라의 경우 모암의 성질을 떠나서 토석류 발생지역 경사 중 가장 높은 빈도는 26~30°

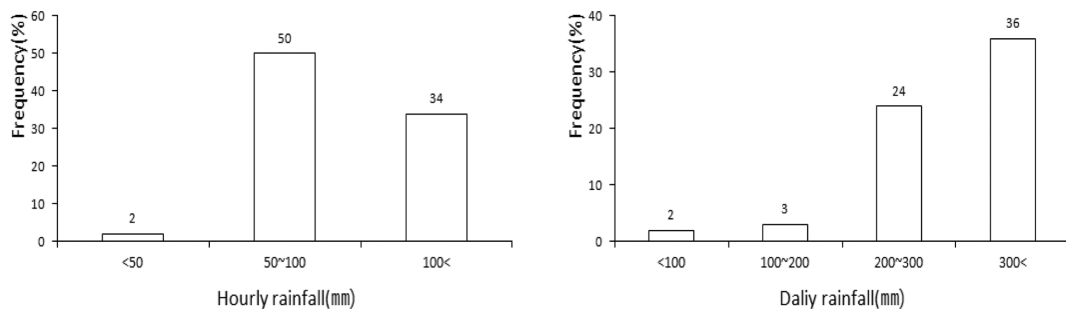


Figure 2. Occurrence frequency of debris flows by rain environment factors.

인 것으로 나타났다는 연구결과와도 유사한 결과로 산지사면의 경사가 급할수록 토석류 발생 확률이 높아지는 것이 아니라 특정경사도에서 토석류 발생빈도가 높은 것이라고 판단된다. 또한 사면형은 복합사면에서 67개소(25%)로 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났고, 평행사면 12개소(4%), 상승사면 6개소(2%), 하강사면(1%)의 순으로 나타났다. 이는 복합사면의 토석류 발생빈도가 가장 낮다는 Park et al.(2010)과 상반된 결과이나 복합사면은 변곡점에서의 변환 충격으로 토석류 발생빈도가 다른 사면형에 비해 높을 수 있을 것이라(Woo, 1997) 사료된다.

5) 토질 및 모암

토질은 사양토 50개소(18%)로 조사된 구역 중에서 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났고, 양토 39개소(14%), 사토 6개소(2%), 식양토 2개소(1%)로 나타났다. 이는 Ko et al.(2013)의 결과와 유사한 결과이었다. 즉, 토석류는 토양이나 암석의 사이에 수분이 증가하여 입자간의 결속력이 약해지면서 흘러 내려오는 것이기 때문에 위험지역에 입자간의 응집력이 약한 모래성분이 많은 사양토가 분포하는 것이 토석류가 발생될 수 있는 원인이라고 사료된다. 또한 모암은 화성암 133개소(49%)에서 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났고, 변성암이 90개소(33%), 퇴적암 28개소(10%)로 Park et al.(2010)과 유사한 결과를 나타내었다. 이는 국토의 대부분이 화성암으로 구성된 우리나라의 특성과 연결되며, 화성암의 특성인 풍화의 진행이 계속될수록 산사태의 발생빈도가 커지는 것과 Kim et al.(1998)의 화성암에 포함되는 화강암이 변성암보다 4.7배 산사태 취약성이 높다는 선행결과와 Tanaka et al.(2003)의 화강암 지역의 토양 입경이 편마암보다 크고 토양층의 투수성도 화강암이 편마암보다 높게 나타난다는 연구결과와 유사한 결과로 생각된다.

2. 강우환경인자

강우환경인자는 2개 인자로 최대시우량과 1일최대강우량으로 구분 분석하였다(Figure 2). 최대시우량은 50~100 mm

에서 137개소(50%)로 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났고, 100 mm 이상에서 93개소(34%), 50 mm 미만에서 5개소(2%)로 나타났다. Choi(2010)는 토석류의 발생 당일 최대시우량이 50 mm/hr 이상일 때 토석류가 발생한다고 하였는데, 이와 같은 결과를 볼 때 최대시우량이 50 mm 이상 일 때 토석류 유출에 영향을 미치는 것으로 판단된다. The National Weather Service(2013)에 의하면 우리나라에서는 최대시우량 50~100 mm가 가장 많이 분포하는 것으로 보아 이 정도의 최대시우량이 토석류 유출에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 시간 당 100 mm이상의 최대시우량 발생 빈도는 상대적으로 적지만 이 정도 이상의 최대시우량에서는 대규모 토석류 발생을 야기하게 될 것이라 추정된다. 1일최대강우량은 300mm 이상인 곳이 98개소(36%)로 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났고, 200~300 mm 65개소(24%), 100~200 mm에서 7개소(3%), 100 mm 미만에서 5개소(2%)의 순으로 나타났다. Kim et al.(2006)은 여름에 지역적으로 짧게는 이틀에서 길게는 나흘간에 걸쳐 150~588 mm의 집중호우가 내리는 곳에서의 토석류산사태가 발생했다고 하였는데, 이와 같은 결과와 밀접한 연관성을 가지는 것으로 판단된다.

3. 유역환경인자

유역환경인자는 계상평균경사, 계상평균폭, 계상에 있는 토석의 양, 수계밀도, 산사태 발생 가능성이 있는 20° 이상의 분포비율, 산사태 위험도 2등급 이상 비율, 유목의 유무, 사방공작물 시설 유무 등 8개 인자로 분석 결과는 다음과 같다(Figure 3).

1) 계상평균경사, 계상평균폭, 계상에 있는 토석의 양 및 수계밀도

계상평균경사는 10~20°에서 124개소(47%)로 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났고, 10°미만이 49개소(18%), 20~30°에서 15개소(6%), 30~40°가 2개소(1%)로 나타났다. 계상평균폭은 10 m 미만인 곳이 184개소로 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났고, 10~15 m가 13개소(5%), 15 m 이상 5개소(2%)로 나타났지만 10 m 미만의 계상의 폭은

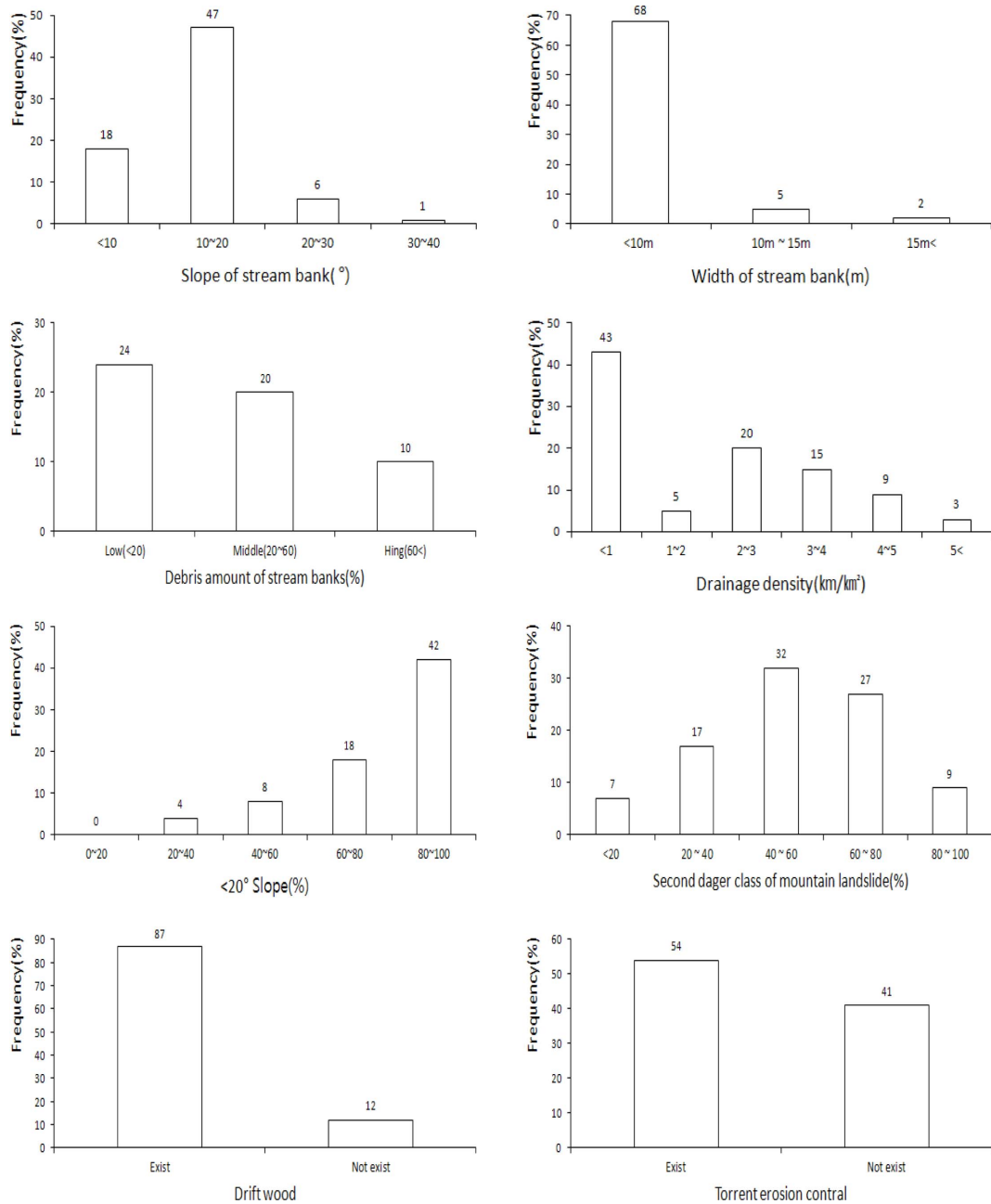


Figure 3. Occurrence frequency of debris flow by drainage area environment factors.

집중호우가 발생했을 때 유량 증가 시 월류함으로 기존 계상의 폭을 넘어 주변 유목과 토석 등을 포함시켜 토석류를 일으킬 수 있다고 판단된다. 한편, 계상에 있는 토석의 양은 적음(계상구성물 중 20% 미만)에서 64개소(24%)로 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났고, 보통(계상구성물 중 20~60%)이 55개소(20%), 많음(계상구성물 중 60% 이상)이 26개소(10%)로 조사되었다. 이는 계상에 표출되어 있는 계상물질 외에도 계안 하부에 토석류 등의 물질이 있는 경우 세굴현상으로 인해 토석류가 발생될 수 있다고 사료된다. 즉, 계상물질 중 토석의 양과 토석류 위험지역의 특성에 대해서는 타 인자들과의 관계를 고려하

여 그 관계특성은 보다 면밀히 검토할 필요성이 있다고 사료된다. 또한 수계밀도는 1 km/km² 미만에서 118개소(43%)로 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났고, 2~3 km/km²가 54개소(20%), 3~4 km/km²가 40개소(15%), 4~5 km/km²가 24개소(9%), 1~2 km/km²가 14개소(5%), 5 km/km² 이상 9개소(3%)로 나타났다.

- 2) 산사태 발생 가능성이 있는 경사 20° 이상의 분포비율 및 산사태 위험도 2등급 이상 비율
- 산사태 발생 가능성이 있는 경사 20° 이상의 분포비율이 40~60%인 곳이 88개소(32%)로 토석류 위험지역이 가

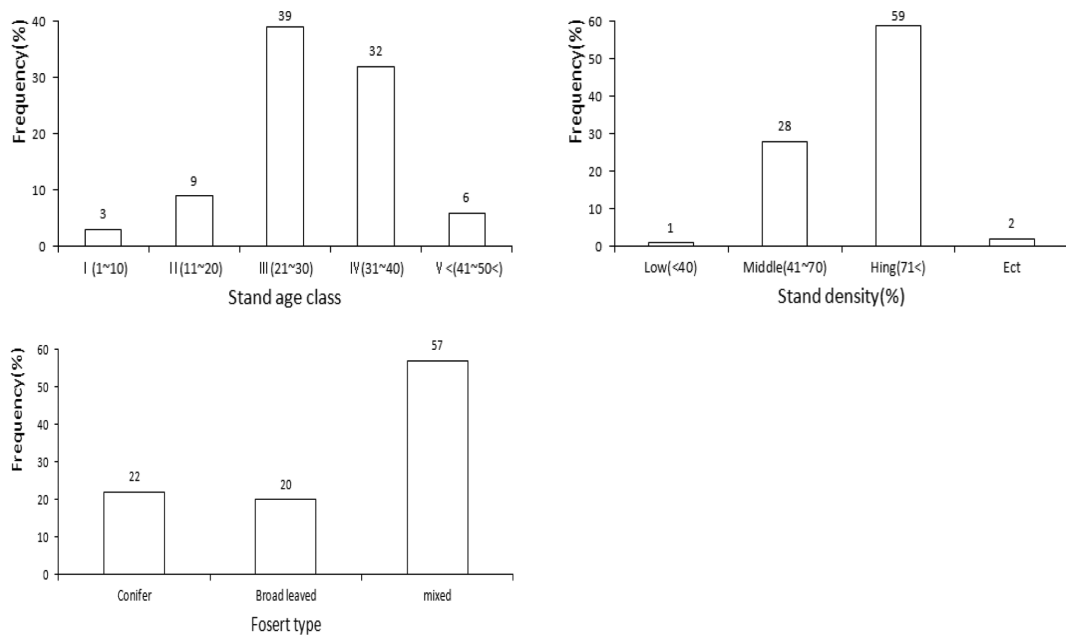


Figure 4. Occurrence frequency of debris flow by forest environment factors.

장 많이 나타났고, 60~80%가 74개소(27%), 20~40%가 45개소(17%), 80~100%가 25개소(9%), 20% 미만인 19개소(7%)로 조사되었다. 앞서 토석류 위험지의 산지평균경사 빈도를 보면 20° 이상의 경사가 86% 이상을 차지하는 것으로 보아 산지경사가 20° 이상 일 때는 산사태와 토석류에 모두 영향을 주는 것으로 판단된다. 또한 산사태 위험도 2등급 이상 비율은 40~60%인 곳이 88개소(32%)로 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났고, 60~80%가 74개소(27%), 20~40%가 45개소(17%), 80~100% 25개(9%), 20% 미만인 19개소(7%)로 나타났다. 산사태 위험등급 통계에 의하면 (Korea Forest Service, 2013) 산사태 위험도 3등급의 비율이 36.1%로 가장 많으나 2등급이 24.0%, 1등급이 11.2%으로 2등급과 1등급이 3등급에 비해 적지 않은 비율을 차지하고 있었으며, 토석류 위험지역에서의 산사태 위험도 2등급 이상 비율이 50% 이상 차지하는 것은 산사태와 토석류는 유사한 환경인자의 영향을 받는 것으로 사료된다.

3) 유목 및 사방공작물 시설 유무

유목의 유무는 유가 237개소(87%)로 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났고, 무는 33개소(12%)로 나타난 것으로 보아 과거 토석류의 발생에 의한 산림 내에 분포한 다수의 유목이 토사와 함께 쓸려 내려온 것으로 추정한다. 또한 사방공작물은 기존에 설치되어 있는 곳이 147개소(54%), 아직 설치되어 있지 않은 곳이 112개소(41%)로 나타났다. 즉, 토석류 위험지역에는 사방공작물 등 사방시설을 통하여 산지재해를 예방하기 위해 설치된 것으로 사료되며, 사방시설이 설치되지 않은 곳도 장기적으로 토석류

에 의한 산지재해를 예방하기 위해서는 사방시설의 설치가 필요할 것으로 사료된다.

4. 임상환경인자

임상환경인자는 3개 인자로 영급, 소밀도, 임상으로 구분 조사 분석하였다(Figure 4). 영급은 3영급이 105개소(39%)로 토석류 위험지역이 가장 많은 나타났고, 4영급이 88개소(32%), 2영급이 25개소(9%), 5영급이 17개소(6%), 1영급이 9개소(3%) 순으로 나타났다. Lee et al.(2008)은 30~50년생의 비교적 오래된 나무들이 자라고 있는 산림에서 집중호우 시 빗물의 침투가 용이하나 바람의 흔들림에 의해 뿌리부분으로 전단력이 작용하여 산사태에 취약하다고 하였는데, 이 연구결과에서도 그와 유사한 것으로 판단된다. 또한 이 연구결과는 Youn et al.(2011)이 보고한 숲가꾸기를 실시한 지역의 영급분포 중 4영급보다 3영급에서 산사태가 많이 발생한다는 결과와 동일한 결과로 영급이 낮을수록 임목의 활착이 미흡하여 토석류의 발생빈도가 많을 것으로 추정하지만 Korea Forest Service(2014)에 따른 최근 10년간 영급별 산림면적에 의하면 3영급의 임목이 우리나라 산림분포에 다수를 차지하기 때문에 토석류 유출 빈도가 높게 나타난 것으로 사료된다. 또한 소밀도는 밀이 160개소(59%)로 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났고, 중에서 76개소(28%), 하에서 4개소(1%)로 Park et al.(2006)의 경북지방의 산사태 특성을 조사한 선행연구에서의 임분밀도가 70% 이상인 지역이 가장 많은 부분을 차지하고 있다는 연구결과와 동일한 결과로 임목의 밀도가 높은 울창한 산지에서도 다른 요인에 의해 토

석류가 발생할 수 있다고 생각된다. 아울러 임상은 혼효림이 154개소(57%)로 토석류 위험지역이 가장 많이 나타났다, 침엽수 59개소(22%), 활엽수 55개소(20%)로 Jung et al.(2008)의 연구결과와 유사한 결과가 나타났다. 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 연구결과가 있었지만 이 연구조사가 인자별 단순 개소수에 불과한 것으로 빈도에 따른 특정임상이 토석류의 발생에 큰 영향을 미친다는 결과를 단정 지을 수 없다고 사료된다. 따라서 임상에 따른 토석류 위험에 따른 연구는 다른 인자들과 복합적으로 다양한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

결론

이 연구에서는 토석류 및 산사태 위험지역인 총 272개소를 대상으로 토석류 유출에 영향을 미치는 산림환경인자 총 20개를 선정하여 인자별 발생분포율과 토석류 발생과의 연관성을 파악하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 입지환경인자

토심은 하(30 이하), 방위는 서쪽사면, 표고는 200~300 m, 산지평균경사는 25~30°, 토질은 사양토, 모암은 화성암, 사면형은 복합사면에서 토석류 발생빈도가 높은 것으로 나타났다. 토심은 일반적으로 낮은 경우에 토석류 발생빈도가 높은 것과 유사한 결과로 나타났으며, 방위는 북동사면이나 남서사면에서의 토석류 발생빈도가 높은 것으로 보고되었으나 본 연구에서는 서쪽사면에서의 발생빈도가 가장 높은 것으로 나타났다. 산지평균경사는 사면의 경사가 급할수록 토석류 발생 확률이 높아지는 것이 아니라 특정경사에서 토석류 발생빈도가 높은 것으로 판단되며, 토질과 모암은 산림 내에서의 분포율이 높음에 따라 토석류 발생빈도에 크게 기인하는 인자이나 지역별 토질 및 모암이 다르기 때문에 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 사면형의 경우 복합사면과 평행사면이 안전하다는 기존연구와 상반되는 결과이나 복합사면의 경우 변곡점에서의 변환충격으로 인해 토석류 발생빈도가 타사면형에 비해 높을 수 있을 것이라 사료된다.

2. 강우환경인자

최대시우량은 50~100 mm, 1일최대강우량은 300 mm 이상인 곳에서 토석류 발생빈도가 높은 것으로 나타났다. 강우량은 산사태 및 토석류 유출에 직접적인 원인으로 토석류 위험지역의 기상환경에 따른 영향을 받아 토석류가 재 발생될 것으로 판단된다.

3. 유역환경인자

계상평균경사는 10~20°, 계상평균폭은 10 m 미만인 곳, 계상에 있는 토석의 양은 적음(계상구성물 중 20% 미만), 수계밀도는 1 km/km² 미만, 산사태 발생 가능성이 있는 경사 20° 이상의 분포비율이 40~60%, 산사태 위험도 2등급 이상 비율은 40~60%, 유목의 유무는 유, 사방공작물은 기존에 설치되어 있는 곳에서 토석류의 발생빈도가 높은 것으로 나타났다. 계상평균경사, 계상평균폭과 수계밀도 및 계상에 있는 토석의 양 등의 인자는 분포율이 높을수록 토석류 발생 확률이 높아지는 것이 아니라 특정현황에 따라 토석류 발생빈도가 높은 것이라고 생각된다. 또한 산사태 발생가능성이 있는 경사 20° 이상의 분포비율이 50% 이상인 것으로 나타나 우리나라 산지의 대부분이 산사태 및 토석류의 위험에 노출되어있는 것으로 판단되며, 산사태 위험도 2등급 이상 비율이 50%이상 차지하는 것은 산사태와 토석류는 유사한 환경인자의 영향을 받는 것으로 생각된다.

4. 임상환경인자

영급은 3영급, 소밀도는 밀, 임상은 혼효림에서 발생빈도가 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 영급이 적은 산림에서의 산사태 및 토석류의 발생빈도가 높다고 보고되어있지만 영급분포의 고령화에 따른 하층부의 지지능력이 쇠퇴함에 따라 토석류의 발생빈도가 높아지는 것으로 추정된다. 또한 임목간의 밀도가 낮을수록 산사태의 발생빈도가 높지만 산림 내에서의 토석류 발생은 대면적으로 확산되기 때문에 소밀도에 크게 영향을 받지 않을 것이라 생각된다. 임상에서는 혼효림에서 발생빈도가 가장 높은 것으로 나타났지만 이는 토석류를 발생시키는 주요인으로 보기 어려우나 보다 다양한 관련 연구를 통해 밝혀져야 할 부분이라고 판단된다. 따라서 상기의 결과와 같이 토석류는 특정 인자에 의해 발생하는 것이 아니라 여러 인자들의 복합적인 영향으로 발생하는 것이기 때문에 토석류 위험개소의 빈도 분포를 넘어서 인자들 간에 유의성을 알 수 있는 통계적인 자료에 의한 상관관계를 분석하는 것이 추후 필요할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 결과는 전국 토석류 유출 지역에 대한 특징을 알 수 있는 기초자료를 제공해줄 것으로 판단되며, 이를 바탕으로 토석류에 대한 체계적인 조사와 분석이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 산림청 훼손지연구사업단과 경남과학기술대학교 기성희 연구지원을 받았음.

References

- Choi, J.W., Lee, S.L., Min, K.D., and Woo, I. 2004. Landslide Susceptibility Mapping and Verification Using the GIS and Bayesian Probability Model in Boun. *Economic and Environmental Geology* 37(2): 207-223.
- Choi, Y.J. 2010. A Study on Downstream Process of Debris Flow Mobilized from Landslides. Department of Civil Engineering Graduate School, Kang won National University dissertation. pp. 932.
- Jung, G.W., Pack, S.J., and Lee, C.W. 2008. Development of the Score Table for Prediction of Landslide Hazard -A Case Study of Gyeongsangbuk-do Province-. *Journal of Korean Forestry Society* 97(3): 332-339.
- Kim, G.H. and Lee, H.G. 2012. GIS Based Analysis of Landslide Factor Effect in Inje Area Using the Theory of QuantificationII. *Journal of Korea Spatial Information Society* 20(3): 57-66.
- Kim, K.S. 2008. Characteristics of Basin Topography and Rainfall Triggering Debris Flow. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 28(5): 263-271.
- Kim, K.S., Kim, Y.W., Chae, B.G., Cho, Y.C., Lee, C.O., and Song, Y.S. 2006. Geometry of Debris Flow Occurrence on Natural Slopes. *KSEG Conference 2006*: 51-59.
- Kim, W.Y., Kim, K.S., Lee, S.R., 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.
- Ko, S.M., Lee, S.W., Yune, C.Y., and Kim, G.H. 2013. GIS-based Analysis of Debris-flow Characteristics in Gangwondo. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 31(1): 57-67.
- Korea Forest Service. 2014. Statistical Yearbook of Forestry. 44. pp. 496.
- Korea Forest Service. 2013. Nation Landslide prevention measure. [http://www.forest.go.kr\(2015.01.14\)](http://www.forest.go.kr(2015.01.14)).
- Lee, S.G., Shin, H.W., Lee, K.S., and Jung, S.H. 2008. The study on the predict and characteristics of debris landslides. *KGS Spring National Conference 2008*: 427-434.
- Lee, S.K., Lee, B.D., and Chung, J.D. 2005. Development of a Landslide Hazard Prediction Model using GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 8(4): 81-90.
- Ma, H.S. 1994. Studies on Development of Prediction Model of Landslide Hazard and Its Utilization. *Journal of Korean Forestry Society* 83(2): 175-192.
- Ma, H.S., Kang, W.S., and Lee, S.J. 2014. Effects of Forest Environmental Factors on the Sediment Disaster Occurrence. *Journal of Agricultural & Life Sciences* 48(4): 73-80.
- Pack, D.G. 2004. Reduction of the occurrence and damage of the pomegranate sat study. Ministry of Government Administration and Home Affairs National institute for disaster prevention. pp. 317.
- Park, J.M., Ma, H.S., Kang, W.S., Oh, K.W., Pack, S.H., and Lee, S.J. 2010. Analysis of Landslide Characteristics in Jeonlabuk-do, Korea. *Journal of Agricultural & Life Sciences* 44(4): 9-20.
- Park, S.J., Lee, H.H., Joo, S.H., Heo, T. ., Lee, C.W., Jung, G.W., Kim, B.K., and Kim, H.C. 2006. Analysis on the characteristics of the Landslide in Gyeongsangbuk-Do(1). *Journal of Korean Forestry Society of the Annual Conference 2006*: 397-399.
- Ryu, G.J. and Youn, I.J. 2008. Japan's measures to prevent the damage, and the pomegranate (debris) on sat practice. *Korean Geotechnical Society Proceedings* 24(11): 30-36.
- Tanaka, Yuki, Matsukura, Yukinori, and Kim, T.H. 2003. The central region of the Korean peninsula, granite and gneiss basin rainfall flux characteristic. *The Geological Society Of Korea Fall Conference 2003*: 1-157.
- Statistics Korea. 2014. e-Nation index. [http://www.index.go.kr\(2015.01.14\)](http://www.index.go.kr(2015.01.14)).
- The National Weather Service. 2013. Annual Climatological Report. [http://www.kma.go.kr\(2015.01.14\)](http://www.kma.go.kr(2015.01.14)).
- Woo, B.M. 1997. Erosion Control Engineering. Hyang-moon Corp. Seoul. pp. 310.
- Youn, H.J., Lee, C.W., and Woo, C.S. 2011. Effects of forest tending on Landslide. *Journal of Korean Forestry Society* 100(3): 417-422.

(Received: January 26, 2015; Accepted: April 29, 2015)