

수량화 2중법을 이용한 GIS 기반의 인제지역 산사태 영향인자 분석

GIS Based Analysis of Landslide Factor Effect in Inje Area Using the Theory of Quantification II

김기홍* 이환길**
Gi Hong Kim Hwan Gil Lee

요약 강원도의 경우 대부분 산지로 이루어져 있어 산사태로 인한 피해가 매우 크다. 이러한 산사태를 예방하기 위해서는 산사태 발생에 영향을 미치는 기초적인 관련 인자를 분석하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 강원도 인제군 인제읍 덕산리 지역을 대상으로 재해 직후 촬영된 항공사진을 이용하여 육안판독에 의한 디지털화 방법으로 산사태 발생 및 미발생 지점을 추출하였으며, GIS를 이용한 지형도, 임상도, 토양도의 중첩분석을 통하여 산사태 관련 인자에 대하여 지형학적, 임상학적, 토양학적 특성을 수량화 2중법을 이용하여 분석하였다. 분석결과 경사도는 20°~35° 사이에서 산사태가 많이 발생하였으며, 임상 인자의 경우 침엽수가 산사태 발생 빈도와 더 큰 연관성을 보였다. 토양 인자의 경우 유효 토심이 얇을수록, 토양모제가 산성암일수록 산사태 발생빈도가 높게 나타났다.

키워드 : 산사태, 항공사진, GIS, 수량화 2중

Abstract Gangwon-do has been suffering extensive landslide damage, because its geography consists mainly of mountains. Analyzing the related factors is crucial for landslide prediction. We digitized the landslide and non-landslide spots on an aerial photo obtained right after a disaster in Inje, Gangwon-do. Three landslide factors-topographic, forest type, and soil factors-were statistically analyzed through GIS overlap analysis between topographic map, forest type map, and soil map. The analysis showed that landslides occurred mainly between the inclination of 20° and 35°, and needleleaf tree area is more vulnerable to a landslide. About soil properties, an area with shallow effective soil depth and parent material of acidic rock has a greater chance of landslide.

Keywords : Land slide, Aerial photo, GIS, Quantification II

1. 서론

우리나라는 국토의 70% 이상이 산지로 구성되어 있으며, 장기간의 침식과 풍화작용으로 인하여 이중 대부분이 곡선형 노년기에 속한다. 이러한 지형학적인 요인으로 인하여 강우가 발생하면 강우 유출량이 급격히 증가하여 짧은 시간 안에 큰 피해가 발생한다. 또한, 급경사지가 많고 토심이 얇아 토양층위간의 성질이 급변하여 산사태 발생 지역이 많다.

특히 강원도의 경우 한반도 중동부에 위치하며, 전체 면적의 80% 이상이 산지로 이루어져 있어 집중호우에 의한 산사태와 그에 따른 토석류가 발생할 가능성이 매우 크다. 이러한 산사태는 가옥 및 인명 피해, 농경지의 유실, 도로유실 및 교통소통 방해 등의 전반적인 사회적 폐해를 유발할 뿐 아니라 매년 반복되고 있어 전체적인 누적 피해규모가 매우 크다.

산사태를 발생시키는 원인에는 크게 내적요인과 외적요인의 두 가지가 있으며 이들 요인이 함께 구

* 본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호# '08지역기술혁신 B-01)에 의해 수행되었습니다.

* 강릉원주대학교 토목공학과 부교수 ghkim@gwnu.ac.kr(교신저자)

** 강릉원주대학교 토목공학과 석사과정 killgil21@naver.com

비 되었을 때 비로소 산사태가 발생하게 된다. 즉, 내적으로 취약한 구조를 가지고 있는 사면에 강우 및 절토 등의 외적 요인이 가해질 경우 작은 영향에도 쉽게 산사태가 발생할 수 있다[3].

산사태를 미연에 방지하거나 혹은 그 피해를 최소화하기 위해서는 산사태 발생지역, 원인분석, 발생 시기, 규모 및 피해정도에 대한 예측이 필요하며, 이러한 예측을 위해서는 산사태 발생에 영향을 미치는 기초적인 관련 인자를 분석하는 것이 매우 중요하다. 산사태의 경우 넓은 지역에서 광범위하게 발생하고, 대부분 산지 깊은 계곡에서 시작되므로 접근이 쉽지 않아 주로 RS(Remote Sensing) 및 GIS(Geographic Information System)를 이용한 연구가 진행되고 있다. 특히 GIS는 다양한 정보의 통합, 활용 및 분석기능을 제공하고 공간 예측 모델링 및 평가를 할 수 있기 때문에 하천의 교란, 자연재해 피해조사, 산사태와 같이 많은 양의 공간 정보를 관리 분석하는데 유용하게 활용할 수 있다[4, 5, 6, 10]. 최근에는 GIS를 이용하여 통계적 기법을 적용한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 윤홍식(2009) 등은 국내 산사태 발생이력자료에 GIS기법을 적용하여 산사태 발생요인을 분석하고 이를 기초로 통계적 분석을 수행하여 발생요인과 산사태 사이의 상관관계를 산출하였고[8], 양인태(2006) 등은 강원도 남부지역의 산사태 유발 인자를 조사, 분류하고 GIS를 이용하여 취약지역을 결정하였다[7]. 국외의 경우 Dai와 Lee(2003)는 GIS를 이용하여 홍콩의 산사태 발생 지역에 대한 지형, 지질, 강우특성을 분석하고 이를 바탕으로 로지스틱회귀분석을 수행하여 예측모델을 구축하였고[1], Sezer(2011) 등은 말레이시아 산사태의 지형, 식생, 토양 등을 분석하고 퍼지모델을 이용하여 산사태 위험지도를 구축하였다[2].

본 논문에서는 강원도 인제군 인제읍 덕산리 지역의 산사태 발생과 주변 조건을 수량화 2종법을 이용하여 분석함으로써 산사태 발생 특성을 파악하고 산사태 분석 모델 제작에 사용할 수 있는 인자를 선정하였다.

2. 연구방법

2.1 연구 대상지역

본 연구의 대상지역은 그림 1의 강원도 인제군

인제읍 덕산리이다. 이 지역은 2006년 7월 12일과 16일 사이에 쏟아진 국지적 집중호우로 그림2와 같은 산사태가 수많은 지점에서 발생하여 많은 인명과 막대한 재산 피해를 입힌 지역이다. 비슷한 강우 조건에 대하여, 대상 지역 내 일부 지역에서는 대규모 산사태가 산발적으로 발생한 반면 그 인접 지역은 피해 흔적이 거의 없어 수량화 2종법을 이용한 분석에 적당한 지역으로 판단하였다. 대상지의 제원은 가로 8km, 세로 3km이며 표본 추출 지역의 면적은 8.4km²이다. 산사태 발생지점 98개점, 발생하지 않은 지점 122개점을 랜덤 선정하여 비교 분석하였다.



그림 1. 연구 대상 지역

2.2 연구 방법

산사태 발생 직후의 항공사진을 이용하여 육안판독에 의한 디지털이징 방법으로 산사태 발생지점(98개점)과 미발생 지점(122개점)의 데이터를 취득하였고, 이를 분석하기 위하여 벡터 형식의 수치지형도, 임상도, 토양도를 래스터 데이터로 변환하였다. 변환된 래스터 데이터와 산사태 발생지점의 위치자료에 대하여 GIS 중첩 분석을 수행하여 각 지점의 지형 인자, 임상 인자, 토양 인자별 데이터를 취득하였다. 취득된 데이터는 경우에 따라 발생횟수에 따른 비율과 단위면적당 발생빈도의 비율 두 가지 방법으로 정리하여 연관성이 높다고 판단되는 쪽으로 정리하였으며, 정리된 데이터를 수량화 2종법을 이용하여 분석하였다. 그림 2처럼 산사태 발생 지역과 미발생 지역을 육안 판독 후 포인트 데이터로 디지털이징하여 셰이프 파일로 제작하였다.

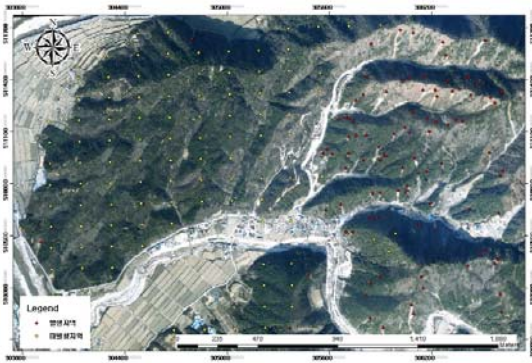


그림 2. 연구 대상 지점
(산사태 발생 및 미발생 지점)

2.3 수량화 방법

수량화 방법이란 질적인 외적기준이나 설명변수의 각 범주에 적절한 수량을 부여하는 것으로서, 수량화에 의하여 질적(범주형) 변수를 양적(연속형) 변수로 바꾸는 것이다. 예를 들면 식생이나 토질과 같은 질적인 변수의 각 범주에 수량을 주어, 강우량이나 경사도 등의 양적 변수와 같이 다차원적인 해석을 수행하는 방법이다.

수량화 방법 이론은 크게 4가지의 유형(I, II, III, IV)으로 나눌 수 있는데, 먼저 외적 기준이 있는 경우와 외적 기준이 없는 경우로 분류된다. 여기에서 외적 기준이란 설명 혹은 예측하고자 하는 것으로 외적 기준이 있는 경우의 수량화 방법에는 수량화 I, II, 외적 기준이 없는 경우의 수량화 방법에는 수량화 III, IV가 있다. 수량화 I은 질적 요인에 관한 정보에 의거하여 양적으로 측정된 외적기준의 값을 설명 혹은 예측하기 위한 방법으로, 수리적으로는 가변수에 대한 회귀분석이라고 볼 수 있다. 수량화 II는 질적 변수인 외적 기준과 질적 변수인 설명변수의 각 범주에 수량화 값을 부여하는 것으로, 외적 기준과 설명변수를 모두 가변수를 이용하여 표현한 뒤, 외적 기준 가변수들의 선형 결합과 설명변수 가변수들의 선형결합 간의 상관계수를 최대화함으로써, 모든 질적 범주에 수량화 값을 부여하는 방법이다. 이를 통해 질적인 형태의 외적기준을 질적인 요인(설명변수)에 의하여 예측 또는 판별할 수 있게 된다. 수량화 III은 개체의 여러 가지 범주로의 반응 방식에 의하여 개체와 범주 양쪽을 수량화하고 또한 그 수량을 이용하여 분류하는 방법이다. 수량화 IV는 대상을 두 개씩 짝지어 그 사이의 친근

성을 정의하고 이 친근성에 의하여 대상에 수량을 부여해, 친근성이 큰 쌍을 가깝게, 친근성이 작은 쌍은 멀리하도록 유클리드 공간 내에 배치하고자 하는 방법이다[13].

본 연구에서는 수량화 II 방법을 이용하여 산사태 발생 지역과 미발생 지역에 대하여 지형 인자, 임상 인자, 토양 인자에 대하여 비교 분석하였다. y축은 단순 발생빈도와 단위면적당 발생빈도로 정의 하여 각 인자별로 연관이 높다 판단되는 방법으로 정리 하였으며, x축은 각 요인별 기존의 연구사례를 토대로 기준을 마련하여 오른쪽으로 갈수록 산사태 발생에 많은 영향을 미치는 순서로 정리하였다.

3. 산사태 영향 인자별 분석

3.1 지형 인자

국토지리정보원에서 제공하는 수치지형도(1:5000)를 바탕으로 발생 및 미발생 지점의 경사도, 경사길이, 사면형상 등의 지형 인자를 분석하였다. 분석한 지형 인자는 발생빈도의 비율로 나타내어 수량화 2중법으로 표현하였다. 그림 3은 발생 지점 및 미발생 지점과 경사도를 중첩한 예이다.

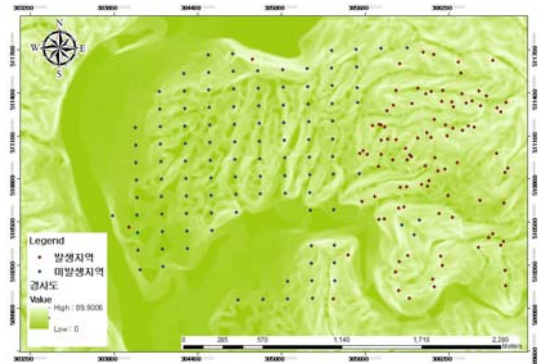


그림 3. 연구 대상 지점과 경사도 중첩

경사도는 0°에서 55° 사이를 5° 간격, 11단계로 구분하여 분류하였다. 연구 대상 지점 중 55°이상의 경사는 존재하지 않는다. 그림 4(a)를 보면 미발생 지역은 고른 분포를 보이는 반면 발생 지역은 20°~35° 사이에 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 GIS 기법 및 발생 자료 분석을 이용한 산사태 위험지도 작성에 대한 윤홍식(2009)의 연구결과와 부합하는 것으로[8], 60°이상의 급경사 지점

은 토층이 매우 얇거나 지표에 암반이 노출되어 있는 곳이 많아 산사태 발생의 기본조건이 충족되지 않으며, 경사도 20°~35°의 지점이 일정 수준 이상의 경사도와 적당한 토층을 함께 갖고 있어 산사태의 위험이 가장 큰 것으로 사료된다. 이는 강릉지역 산사태의 기하학적 특성과 질리특성에 관한 연구에서 제시한 21°~35°와도 유사한 결과이다[11].

경사 길이는 0m~150m 사이를 10m 간격으로 나누고 '150m 이상'의 항목을 추가하여 총 16단계로 구분하였다. 산사태 발생 지점과 미발생 지점의 분포에 큰 차이는 보이지 않았으나 경사길이가 짧은 지역이 미발생 지점에 많이 포함되어 있어 경사 길이가 짧으면 산사태에 대해 비교적 안정적이라는 추론이 가능하다(그림 4(b)). 이러한 결과는 짧은 경사에서는 산사태를 발생시키는 토양 또는 임상의 자중이 상대적으로 작고 사면 파괴가 일어날 충분한 공간이 없기 때문인 것으로 사료된다. 하지만 이러한 추론은 경사길이가 10m 이하의 짧은 거리에만 해당되며 경사길이와 산사태 발생의 연관성을 주장하기에는 다소 무리가 있다.

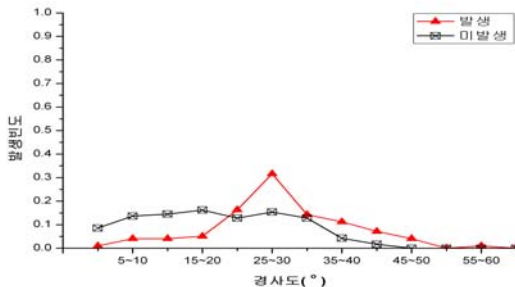
사면 형상은 '오목', '평지', '볼록' 3단계로 구분하였다. 그림 4(c)에서 볼 수 있듯이 산사태 발생 지

점과 미발생 지점이 뚜렷이 구분된다. 발생 지점의 경우 '오목'한 사면형상을 가진 지역이 많았고 미발생 지점의 경우 '볼록'한 모양을 보이는 사면이 많이 나타났다. 이는 GIS와 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 이용한 산사태 취약지 결정 및 유발 인자 영향에 대한 양인태(2006)의 연구 결과와 유사한 결과이며[7], 사면형상이 산사태 발생에 영향을 미친다는 결론을 내릴 수 있다.

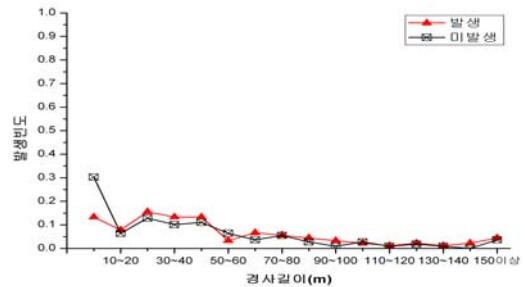
3.2 임상 인자

산사태와 임상 인자의 연관성을 분석하기 위해 산림청에서 제공하는 임상도(1:25,000)를 이용하여 발생 및 미발생 지점의 임상, 경급, 영급, 밀도를 조사하였다. 각 임상 인자에 대하여 구간별 단위 면적당 산사태 발생빈도를 수량화 2종법으로 표현하였다. 그림 5는 연구 대상 지점과 밀도 분포를 중첩한 예이다.

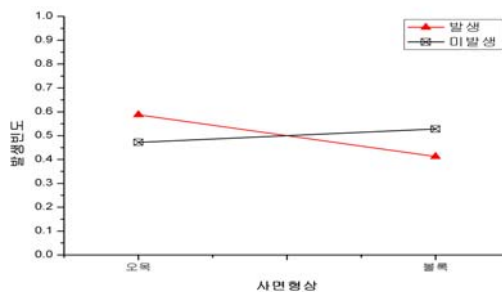
임상은 수중에 따라 분류한 것이다. 연구 대상 지역의 임상 분포는 '소나무림'(75.62%)이 가장 많은 비중을 차지하였고 그 뒤로 '제지'(15.37%), '소나무인공림'(5.74%), '침활혼효림'(2.37%), '낙엽송림'(0.9%)으로 나타났다. 임상의 경우 산사태 발생 지



(a) 경사도에 따른 지점 분포



(b) 경사 길이에 따른 지점 분포



(c) 사면 형상에 따른 지점 분포

그림 4. 지형 인자에 따른 연구 지점의 분포

점과 미발생 지점에서 뚜렷한 차이를 보였다(그림 6(a)). 침엽수 보다는 침활혼효림, 즉 활엽수 쪽으로 갈수록 산사태 발생빈도가 낮았는데, 이는 원격탐사, GIS 및 인공신경망을 이용하여 강릉지역 산사태 취약성을 분석한 이명진(2003)의 연구 내용과 일치한다[9]. 특히 '낙엽송'의 경우 해당 지점에서 발생한 산사태의 횟수는 적지만, 연구 대상 지역 내 점유 면적 또한 가장 작아, 단위면적을 고려한 산사태 발생 빈도로 보았을 때는 위험도가 매우 높았다. 낙엽송은 뿌리를 깊게 뻗기 보다는 넓게 뻗는 특성을 가지고 있어서 산사태에 대한 저항력을 높이는 데 별 도움이 되지 못하는 것으로 보인다.

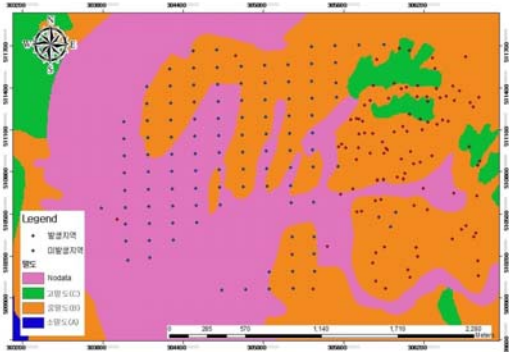


그림 5. 연구 대상 지역과 수목의 밀도 분포

경급은 입목의 흉고직경에 따라 분류한 것이다. 경급의 면적분포는 '소경목'(66.25%)이 가장 많았고 '중경목'(33.51%), '대경목'(0.24%)로 나타났다. 경급에 대한 분석에 따르면, '소경목' 지점에서 가장 많은 산사태가 발생하였으나 단위 면적에 따른 발생 빈도는 '중경목'이 훨씬 더 높았다(그림 6(b)). 이러한 결과는 식생의 흉고직경이 커짐에 따라 식생의 자중이 늘어나 산사태 위험을 높이기 때문인 것으로 보인다. 하지만 연구 대상 지역의 경급에 따른 입상 정보가 '소경목'과 '중경목', 두 가지 밖에 없어 산사태 발생과의 연관성을 증명하기에는 다소 무리가 있어 보인다.

영급은 입목의 임령(年數)에 따라 분류한 것이다. 영급의 면적분포는 '3영급'이 48.96%로 가장 많은 면적을 차지하였으며, '4영급'(28.18%), '2영급'(17.30%), '5영급'(5.56%) 순으로 나타나 대상 지역 대부분의 수목이 20년 이상의 수령을 보였다. 영급에서의 단위 면적당 발생빈도는 임령이 적은 지역

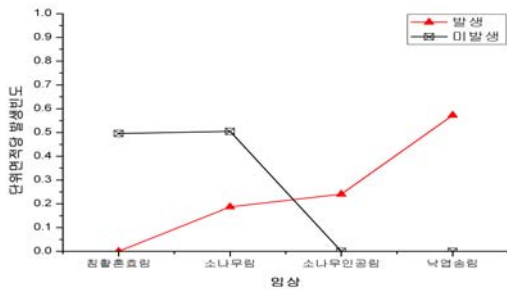
이 빈도가 낮게 나왔으며, 임령이 높을수록 빈도가 높게 나타났다(그림 6(c)). 이는 수목의 수령 증가에 따른 뿌리의 신장이 흙의 조직을 안정시키는 효과보다 수목의 자중 증가로 인해 산사태의 위험도를 높이는 효과가 더 크기 때문인 것으로 사료된다. 수목의 자중이 산사태 발생에 미치는 영향에 대해서는 추후 더 광범위한 자료를 이용하여 분석해 볼 필요가 있다.

밀도는 면적에 비례하여 수목의 수관 점유율을 3단계로 구분하여 나타낸 것이다. 연구 대상 지역에서는 '소밀도(A)', '중밀도(B)', '고밀도(C)' 항목 중 '소밀도' 지점은 없었으며 전체면적의 약 92%의 면적이 '중밀도' 값을 가지고 있다. 면적이 넓은 만큼 '중밀도'가 많은 횟수를 보였으나 단위면적에 따른 빈도로 보았을 때는 '고밀도'의 빈도가 높게 나왔다(그림 6(d)). 이로 미루어 보면 교목의 수관점유 면적이 높을수록 산사태에 취약하다고 할 수도 있겠다. 그러나 산사태 미발생 지역은 '고밀도' 지역이 전체면적에 10%도 안 된다는 점, 그리고 참고했던 다른 연구의 내용으로 미루어 보아 이러한 결과는 밀도보다는 다른 외적인 요인에 의한 것이라 판단하였다.

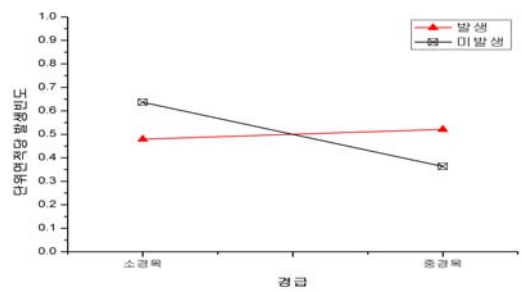
3.3 토양 인자

토양 인자에는 배수등급, 심토 자갈함량, 유효토심, 토양모재, 심토토성, 표토토성, 침식등급 등이 있으며, 농촌진흥청(흙토람)에서 제공되는 정밀토양도(1:25000)를 이용하여 연구 대상 지점의 토양 인자를 조사하였다. 각 토양 인자에 대하여 구간별 단위 면적당 산사태 발생빈도를 분석하기 위해 수량화 2중법을 적용하였다. 그림 7은 연구 대상 지역과 배수등급 분포도를 중첩한 예이다.

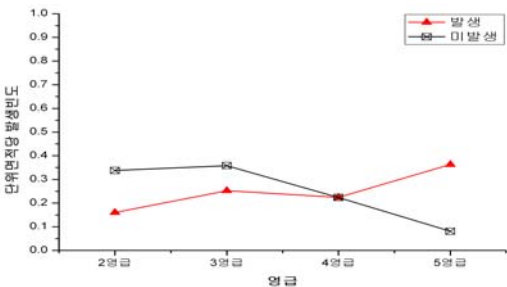
배수등급이란 토양이 물에 불포화되는 지속기간이나 빈도를 나타내는 것으로, 5등급으로 분류된다. 배수등급의 구간별 면적비율은 '매우양호'가 63.91%로 가장 많은 면적을 차지하였으며, '양호' 17.60%, '약간양호' 16.62%, '약간불량' 1.87%의 면적분포를 보였다. 80%가 넘는 지역이 '양호' 이상의 등급을 보여 대상유역은 대체적으로 배수가 잘되는 지역이라 할 수 있다. 각 배수등급 구간별로 단위면적당 산사태 발생 빈도를 분석한 결과 '매우양호' 지역에서의 발생 비율이 약 78%, 미발생 비율이 약 32%



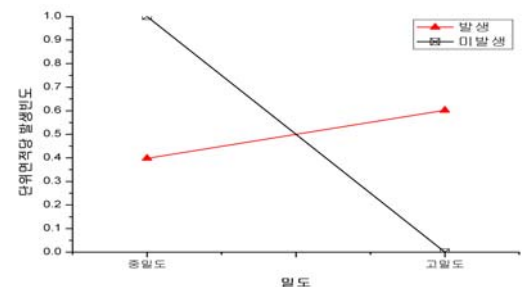
(a) 인상에 따른 지점 분포



(b) 경급에 따른 지점 분포



(c) 영급에 따른 지점 분포



(d) 밀도에 따른 지점 분포

그림 6. 인상 인자에 따른 연구 지점의 분포

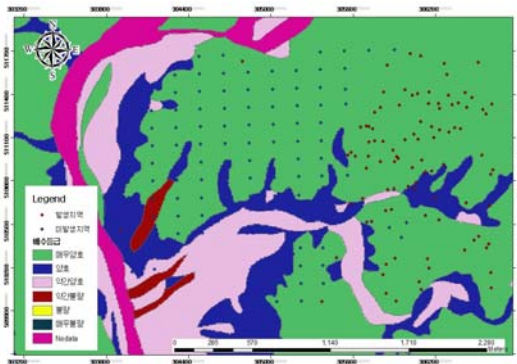


그림 7. 연구 대상 지역과 배수등급 중첩

로 나타나 배수가 양호할수록 산사태 발생에 취약하다는 것을 알 수 있었다(그림 8(a)). 산사태 미발생 비율은 ‘약간양호’한 지역에서 낮은 분포를 보였으며 나머지 항목에 대해서는 비교적 비슷한 값을 보였다. 배수등급이 낮을수록 즉, 배수가 이루어지지 않을수록 토양의 수분 함유량이 많아 산사태 발생 빈도가 높을 것이라는 예측과는 반대로, 배수가 잘 되는 지점일수록 산사태에 취약하다는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 AHP(Analytic Hierarchy Process) 분석기법을 이용한 산사태 분석에서의 연

구결과와 동일한 것이다[12]. 토양의 투수성이 양호하면 토층이 더 쉽게 포화되어 하층이 증가할 뿐만 아니라 물이 더 빠르게 토층과 암반의 경계부에 도달함으로써 파괴 요인으로 작용할 수도 있을 것이다[3].

심토 자갈함량은 표면에서부터 20cm 이상의 깊이에서 직경 2mm 이상의 자갈 함유량을 말한다. 심토 자갈함량은 자갈의 함량에 따라 ‘많음’(35% 초과), ‘있음’(10~35%), ‘없음’(10% 미만)으로 분류되며, 대상 지역 심토 자갈함량의 분포는 ‘없음’ 지역의 면적이 약 67%로 가장 많은 면적을 차지하였고 ‘있음’ 21.47%, ‘많음’ 11.47% 순이다. ‘없음’ 지역에서 산사태가 가장 많이 일어났으며 ‘있음’ 지역 중에는 미발생 지역이 많이 나타나 극명한 차이를 보였다(그림 8(b)). 자갈의 함량이 적을수록 산사태에 취약하며, 심토에 적당한 자갈(10~35%)이 포함되어 있으면 산사태 방지효과가 있음을 알 수 있었다. 유효토심이란 일반적으로 작물의 뿌리가 뻗을 수 있는 깊이 즉, 굳은 토층까지의 거리를 말한다. 유효토심은 깊이에 따라 ‘매우얕음’(20cm 미만), ‘얕음’(20~50cm), ‘보통’(50~100cm), ‘깊음’(100cm 이상)으로 구분된다. 대상 지역의 유효토심의 면적분포는

‘보통’ 68.03%, ‘깊음’ 19.39%, ‘얕음’ 10.03%, ‘매우 얕음’ 2.54% 순으로 분포되어 있다. ‘깊음’으로 분류된 지역에서는 산사태가 전혀 발생하지 않았으며 토심이 낮을수록 발생 빈도가 높아지는 것을 볼 수 있었다(그림 8(c)).

토양모재란 토양이 생성됨에 있어 모재가 된 암석이나 지층을 말한다. 토양모재의 종류에는 ‘변성암’, ‘산성암’, ‘염기성암’, ‘제 3기층’, ‘제 4기층’, ‘중성암’ 등이 있다. 대상 지역의 면적분포는 ‘산성암’ 87%이 가장 많은 면적을 차지하고 있었으며 ‘제 4기층’ 8%, ‘변성암’ 5%의 순서로 분포되어 있었다. 토양모재에 대한 산사태 발생 횟수는 가장 넓은 면적을 차지하고 있는 ‘산성암’ 지역에서 가장 많았다. 면적을 고려한 발생 빈도에서도 ‘산성암’이 가장 높게 나와 ‘산성암’이 산사태에 취약한 토양모재로 분류되었다(그림 8(d)). ‘변성암’ 지역은 산사태 발생 보다는 미발생 비율이 높게 나타나 대체적으로 안정적이라고 판단할 수 있었다. ‘제 4기층’의 경우는 고결도가 낮고 주로 퇴적층으로 이루어져 있어 토양모재 분석 전 가장 취약할 것으로 판단하였으나 분포 면적이 작아 산사태가 전혀 발생하지 않았다. 추후 더 많은 자료를 가지고 추가적인 분석을 할 필요가 있다고 판단된다.

심토는 표면에서부터 깊이가 약 15cm 이상인 토양을 말하며, 점토, 모래, 미사(입경 0.05~0.002mm)의 함량을 나타낸 것이 심토토성이다. 대상 지역의 면적 분포는 ‘사양질’ 약 80%, ‘식양질’ 약 17%, ‘식질’ 약 2%, ‘사질’ 약 1%의 분포를 보였다. 대부분의 면적이 ‘사양질’과 ‘식양질’로 구분되어 있어 미사의 함량이 대체적으로 높고 점토 함량이 낮은 토양 분포를 보였다. 단위면적당 발생 빈도수를 추출해 본 결과 미발생 지역은 ‘식양질’과 ‘사양질’이 일정한 값을 보이는 반면 산사태 발생지역은 ‘식양질’보다 ‘사양질’의 발생비율이 압도적으로 높아 ‘사양질’이 산사태에 취약하다는 결과를 얻을 수 있었다(그림 8(e)). 심토토성이 배수 등급과 연관이 있다는 추론도 가능하다. 점토질 지반보다는 사질 지반의 배수성이 좋기 때문에 심토토성은 배수 등급에 많은 영향을 줄 수 있다.

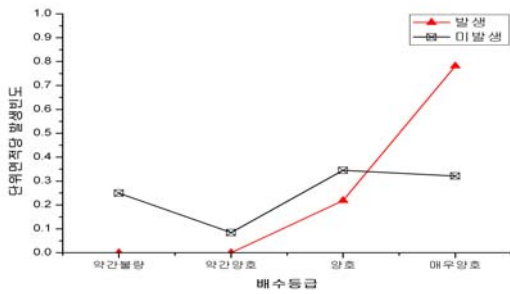
표토는 흙의 표면에서부터 깊이 약 15cm 이하의 토양을 말하며, 표토를 점토, 모래, 미사(입경 0.05~0.002mm)의 함량에 따라 구분한 것을 표토토성이라고 한다. 대상 지역의 면적 분포는 ‘사양토’ 약

79%, ‘양토’ 약 17%, ‘미사질양토’ 약 3%, ‘세사양토’ 약 0.4%, ‘양질세사토’ 약 0.2%의 분포를 보였다. 대부분의 면적이 ‘사양토’와 ‘양토’로 구분되어 있어 미사의 함량이 대체적으로 높고 점토 함량이 낮은 토양분포를 보였다. 단위면적당 발생 빈도수를 추출해 본 결과 미발생 지역은 ‘사양토’와 ‘양토’가 일정한 값을 보이는 반면 산사태 발생지역은 ‘양토’보다 ‘사양토’의 발생비율이 압도적으로 높아 ‘사양토’가 산사태에 취약하다는 결과를 얻을 수 있었다(그림 8(f)). 이는 심토토성에 대한 분석과 같은 결과이며 토성 또한 비슷한 미사, 점토, 모래의 성분 분포를 보였다.

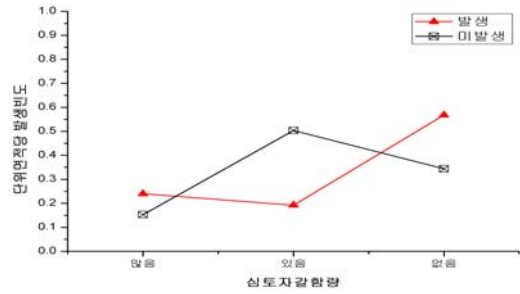
침식등급이란 물, 바람, 중력에 의해 표층 토양의 손실 여부를 분류한 것이다. 침식은 토양의 표면에서 15-20cm 이내의 표층에서 일어나며 침식등급의 기준 또한 표층의 손실 여부를 따져 구분한 것이다. 침식등급은 표토의 유실량이 25% 이하이거나 표층토의 두께가 15cm 이상 일 때 ‘없음’, 표토의 유실량이 25-75% 이하이거나 표층토의 두께가 12cm 이상 일 때 ‘있음’, 표토의 유실량이 75% 이상 일 때 ‘심함’, 토양단면이 대부분 파괴된 상태일 때 ‘매우 심함’으로 분류된다. 침식등급의 면적 분포는 ‘있음’ 약 63%, ‘없음’ 약 37%이다. 침식등급은 단위 면적당 발생 빈도로 나타내었다. 표토의 침식이 일어나지 않은 지역은 산사태가 발생하지 않은 지역이 많았으며, 표토의 침식이 클수록 산사태 발생확률이 높게 나타났다(그림 8(g)). 그러나 침식등급의 경우 발생과 미발생이 비슷한 선형을 보여 산사태 관련 인자로 보기에는 다소 무리가 있다.

4. 결론

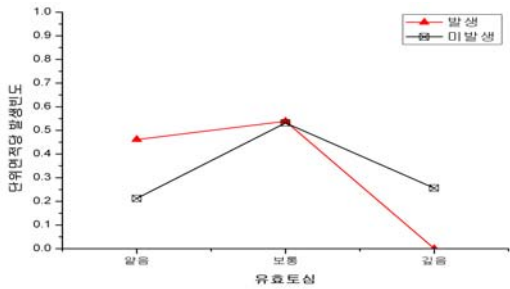
본 연구에서는 2006년 7월 12에서 16일 사이 국지적 집중호우로 인하여 대규모 산사태가 발생한 강원도 인제군 인제읍 덕산리 지역을 대상으로 산사태 발생 지점과 미발생 지점을 구분하여 수량화 2중법을 통해 산사태 발생 관련 인자를 분석하였다. 재해 직후 촬영된 항공사진을 이용하여 육안관독에 의한 디지털지정 방법으로 발생 및 미발생 지점을 추출하였으며 추출된 지점을 지형 인자(3개), 임상 인자(4개), 토양 인자(7개)와 중첩을 통하여 데이터를 취득하였다. 취득된 데이터를 발생 빈도 비율과 단위면적당 발생 비율로 구분하여 정리하였으며, 이



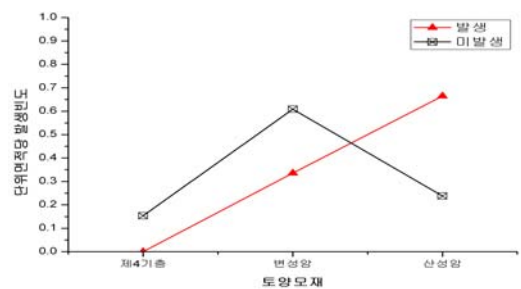
(a) 배수등급에 따른 지점 분포



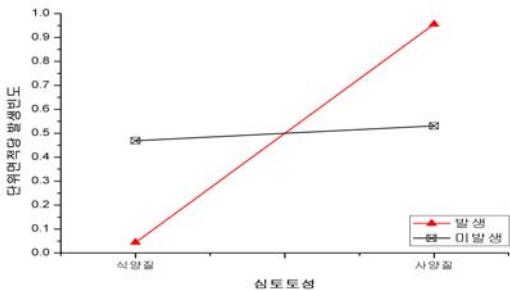
(b) 심토 자갈 함량에 따른 지점 분포



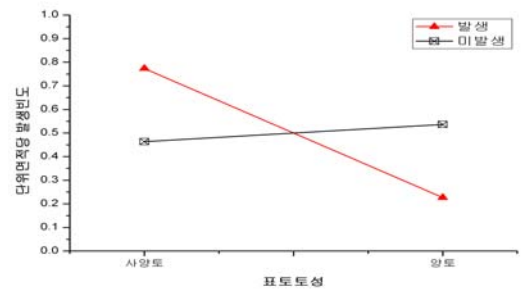
(c) 유효토심에 따른 지점 분포



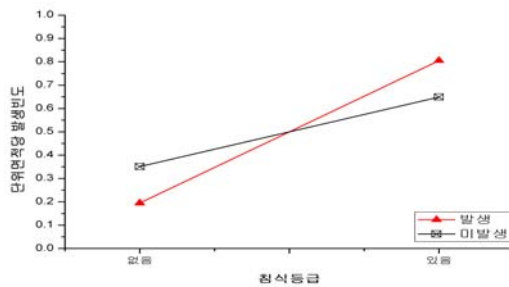
(d) 토양모재에 따른 지점 분포



(e) 심토토성에 따른 지점 분포



(f) 표토토성에 따른 지점 분포



(g) 침식등급에 따른 지점 분포

그림 8. 토양 인자에 따른 연구 지점의 분포

를 수량화 2종법으로 분석한 결론은 다음과 같다. 첫째, 지형 인자 중에서 경사도는 20°~35° 사이에서 가장 많은 산사태 발생 빈도를 보였다. 이로부터

경사가 급해 토층이 없거나 얇은 지점보다는 적당한 토층을 가지고 있는 경사 20°~35° 사이의 지점에서 산사태 위험도가 높다고 판단할 수 있었다. 경

사길이는 10m 이하의 길이에서 산사태 미발생 지점이 많이 분포하였다. 경사 모양은 ‘볼록’ 사면보다는 ‘오목’ 사면이 산사태 발생에 관련이 높은 것으로 보인다.

둘째, 임상 분류에서는 활엽수가 침엽수에 비해 산사태에 안정적인 것으로 나타났고, 침엽수 중 특히 낙엽송 지역이 산사태에 가장 취약하다는 결과가 나왔다. 경급에 대해서는 수목의 직경이 커질수록 산사태 발생 빈도가 높게 나타났으며, 영급에 대해서는 수목의 수령이 높을수록 발생 비율이 높게 나타나 경급과의 연관성을 볼 수 있었다. 이러한 결과로부터 식생의 흉고직경이 커짐에 따라 식생의 자중이 늘어나는 것이 산사태 발생에 영향을 미친다고 판단할 수 있었다. 산림의 밀도는 높을수록 산사태 발생 빈도가 높았으나 산사태 미발생 지역은 ‘고밀도’ 지역이 한 점도 없었다는 것과 ‘고밀도’ 분포를 보인 지역이 전체 면적에 10%도 안 된다는 점, 그리고 참고했던 다른 연구 결과로 미루어 보아 연구 대상 지역에서 발생한 산사태는 산림 밀도의 영향보다는 다른 외적인 요인에 영향을 받았다고 판단하는 것이 옳다고 사료된다.

셋째, 토양 인자 중 배수등급에 대해서는, 배수가 잘 될수록 산사태 발생빈도가 높게 나타났다. 이는 투수성이 양호하면 토층이 더 쉽게 포화되어 하중이 증가할 뿐만 아니라 물이 더 빠르게 토층과 암반의 경계부에 도달함으로써 파괴 요인으로 작용될 수 있기 때문인 것으로 생각된다. 유효 토심은 알을수록 산사태 발생빈도가 높았고 심토의 적당한 자갈함량은 산사태 방지에 도움이 된다는 결론이 도출되었다. 토양모재가 퇴적암이나 변성암에 비해 산성암일 경우에 산사태 발생 비율이 높았으며, 심토 및 표토에 사질 성분이 많이 포함되어 있을수록 산사태 위험이 높은 것으로 나타나 구조적으로 취약함을 알 수 있었다. 침식 등급의 경우 산사태 발생과 미발생이 비슷한 선형을 보여 산사태 관련 인자로 보기에는 다소 무리가 있다.

종합해 보면 지형인자는 경사도와 사면형상, 임상인자는 임상, 경급, 영급, 토양인자는 배수등급, 심토자갈함량, 표토토성이 산사태 발생과 연관성을 보여 산사태 분석 모델에 사용될 수 있다 사료된다.

본 연구에서는 산사태 발생에 영향을 미칠 수 있는 기초적인 인자를 파악하는데 초점을 두었으며, 통계적인 분석이나 물리적 분석을 하는데 있어 영

향 인자를 선정할 때 기초적인 자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다. 향후 각 인자의 등급별 데이터의 최대우도를 이용한 로지스틱회귀분석을 통해 각 지점별 산사태 발생확률을 산정하는 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다. 본 연구의 대상 지역이 인제로 한정되어 있고 지역에 따라 환경이 다를 수 있기 때문에 연구 결과를 확대 적용하기 위해서는 더욱 다양한 지역의 자료를 바탕으로 검증 및 추가적인 분석이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] F. C. Dai and C. F. Lee, 2003, "A Spatiotemporal Probabilistic Modelling of Storm-Induced Shallow Landsliding using Aerial Photographs and Logistic Regression," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 28, no. 1, pp. 527-545.
- [2] E. A. Sezer, B. Pradhan, and C. Gokceoglu, 2011, "Manifestation of an adaptive neuro-fuzzy model on landslide susceptibility mapping: Klang valley, Malaysia," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 1, pp. 8208-8219.
- [3] 김기홍, 윤찬영, 이환길, 황계선, 2011, "GIS를 이용한 인제 산사태 발생지역의 토석류 분석," *한국측량학회지*, 제29권, 제1호, pp. 47-53.
- [4] 김태훈, 김계현, 남기범, 심재현, 최우정, 조명흠, 2010, "고해상도 공간영상을 이용한 자연재해 피해조사시스템 설계 및 구현," *한국공간정보시스템학회논문지*, 제12권, 제1호, pp. 57-65.
- [5] 박은지, 김계현, 이은길, 2008, "GIS기법을 이용한 하천 교란 실태의 분석(I)," *한국공간정보시스템학회논문지*, 제10권, 제2호, pp. 81-93.
- [6] 박은지, 김계현, 장창래, 2008, "GIS기법을 이용한 하천 교란 실태의 분석(II)," *한국공간정보시스템학회논문지*, 제10권, 제4호, pp. 27-35.
- [7] 양인태, 천기선, 박재훈, 2006, "GIS와 AHP를 이용한 산사태 취약지 결정 및 유발인자의 영향," *한국지형공간정보학회지*, 제14권, 제1호, pp. 3-12.
- [8] 윤홍식, 이동하, 서용철, 2009, "GIS 기법 및 발생 자료 분석을 이용한 산사태 위험지도 작성," *한국지리정보학회지*, 제12권, 제4호, pp. 59-73.

- [9] 이명진, 2003, “원격탐사, 지리정보시스템 및 인공 신경망을 이용한 강릉지역 산사태 취약성 분석 및 검증,” 연세대학교 석사학위논문.
- [10] 이진덕, 연상호, 김성길, 이호찬, 2002, “산사태 발생가능지 예측을 위한 GIS의 적용,” 한국지리정보학회지, 제5권, 제 1호, pp. 38-47.
- [11] 조용찬, 장태우, 2006, “강릉지역 산사태의 기하학적 특성과 절리특성에 관한 연구,” 대한지질공학회지, 제16권, 제4호, pp. 437-453.
- [12] 채병곤, 조용찬, 송영석, 서용석, 2009, “AHP 분석 기법을 이용한 급경사지재해취약성 평가표개발,” 대한지질공학회지, 제19권, 제1호, pp. 99-108.
- [13] 허명희, 1998, 수량화방법 I, II, III, IV, 자유아카데미.



김 기 홍

1995년 연세대학교 토목공학과 공학사
 1998년 연세대학교 토목공학과 공학 석사
 2004년 연세대학교 토목공학과 공학 박사

2005년~현재 강릉원주대학교 토목공학과 부교수
 관심분야는 사진측량, GIS, 자연재해



이 환 길

2011년 강릉원주대학교 토목공학과 공학사

2011년~현재 강릉원주대학교 토목공학과 석사과정

관심분야는 사진측량, GIS, 자연재해

논문접수 : 2011.12.29
 수정일 : 2012.05.14
 심사완료 : 2012.06.26