

항공라이다 DEM을 이용한 강원도 평창군 일원의 GIS 기반의 토석류 발생가능성 분석

이인지¹ · 이동하² · 서용철^{1*}

GIS-Based Analysis of the Debris Flow Occurrence Possibility Using an Airborne LiDAR DEM around Pyeongchang-Gun, Kangwon-Do

In-Ji LEE¹ · Dong-Ha LEE² · Yong-Cheol SUH^{1*}

요 약

본 논문에서는 보다 합리적이고 객관적인 토석류 방재대책 수립에 도움을 주기 위하여 고정밀 LiDAR DEM을 이용한 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 방법을 제시하였다. 매우 극단적인 산악 지형 분포를 보이는 강원도 평창군 일원을 연구대상지역으로 설정하고, 유한차분법을 적용한 GIS 기반의 수치해석 프로그램을 이용하여 토석류의 발생 가능성을 시뮬레이션 하였다. 그 후 해석된 토석류 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 동일한 대상지역에 대하여 SINMAP 및 지형해석 방법에 의한 토석류 해석을 수행하고, 그 해석결과를 본 연구에서 제안된 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 결과와 비교·분석하였다.

주요어 : 토석류, GIS, 토석류 시뮬레이션, SINMAP 해석, 지형해석

ABSTRACT

In this study, we performed a GIS-based debris flow simulation using the high-resolution airborne LiDAR DEM in order to establish the effective and reasonable debris prevention plans in Korea. To do so, we set a study area to an specific region over Pyeochang-gun in Kangwon-do which showed the extreme rugged distribution of topography and simulated a possibility of debris flow occurrence in this area using a GIS-based numerical simulation program which was developed by applying the finite difference method. After that, we also performed the debris flow simulation by SINMAP

2010년 9월 6일 접수 Received on September 6, 2010 / 2010년 10월 24일 수정 Revised on October 24, 2010 / 2010년 11월 10일 심사완료 Accepted on November 10, 2010

1 부경대학교 위성정보과학과 Dept. of Geoinformatics Engineering, Pukyung National University

2 성균관대학교 공과대학 College of Engineering, Sungkyunkwan University

* 연락처자 E-mail : suh@pknu.ac.kr

and geomorphic analysis method in the same region and compared each result with that of GIS-based debris simulation for verifying the reliability.

KEYWORDS : *Debris Flow, GIS, Debris Flow Simulation, SINMAP Analysis, Geomorphic Analysis*

서론

재해(disaster)는 일반적으로 인간활동에 의한 재해와 자연현상에 의한 재해로 크게 구분되는데, 산사태(landslide)는 대표적인 자연재해로서 우리나라에서도 해마다 발생되고 있다. 특히 지진과 함께 대표적인 지반재해로 분류되는 산사태는 그 발생에 있어서 강우와 밀접한 관련이 있으며, 우리나라는 기후의 특성상 여름철인 6월 ~ 9월에 강우가 집중되고 있어 이 기간 동안 산사태로 인한 인명, 재산상의 피해가 꾸준히 보고되고 있는 실정이다.

실제로 최근 집중호우 및 이상기후로 인한 국지성 홍수가 빈번하게 발생되면서 매년 수십, 수백 명의 인명피해와 수천억 원의 재산피해가 발생하고 있다. 특히 2006년 7월 태풍 에위니아로 인한 강원지역의 재산피해는 약 1조 4189억 원으로 도로 127개소, 하천 65개소 등의 주요 시설물이 유실 또는 침수피해를 입었으며(소방방재청, 2008; 국립방재연구소, 2003), 상류지역 산사태와 동반된 대규모 토석류가 도로 전체를 휩쓸어 도로가 단절되거나 붕괴되어 국민의 생활이 고립되는 등 막대한 피해를 끼쳤다(유명옥 등, 2006; 윤홍식 등, 2009; 한국도로공사 도로교통기술원, 2004).

특히 우리나라 산사태 유형의 대부분을 차지하는 토석류(debris flow)는 오랫동안 풍화작용을 받은 산비탈면이 장마 또는 태풍 등의 집중호우로 인해 물로 포화되어 흘러내리는 형태로 발생하며, 산의 상부로부터 돌덩이, 자갈, 나무, 흙과 같은 물질들이 물과 함께 쓸려 내려오는 현상으로 그 속도가 빠르고 파괴력도 위력적이다. 국토의 약 65%가 산악지인

우리나라의 경우, 산악지 대부분의 토심이 얇고 경사가 심하여 집중호우 시 토압의 상승 및 토사의 응집력 저하로 토석류 재해 발생이 쉬운 특성을 지니고 있으며, 특히 도로 비탈면, 산간 및 도심고지대 급경사지 등은 집중호우로 인해 토석류 발생위험성이 높은 것으로 알려져 있다. 실제로 최근 지반재해로 인한 피해현황을 살펴보면, 우기철 산사태 등 사면붕괴 재해관련 사망자 253명 중 토석류로 인한 인명피해가 70명으로 약 28% 이상을 차지하고 있는 것으로 조사되었다(조홍동과 배우석, 2007).

토석류는 일반적으로 여름철 집중호우 발생 시 표토층을 구성하고 있는 풍화토층이 강우로 인해 포화상태로 되어, 빠른 이동속도로 중력방향으로 낙하하는 사면붕괴재해의 일종이다(Lorenzini and Mazza, 2004). WP/WLI UNESCO Working Party(1990)의 보고서에 따르면 산사태(landslide)는 암석, 토사, 쇄설물질 등이 급격하게 경사면을 따라 아래로 이동하는 현상을 말하는데, 이러한 산사태의 유형 중 물을 함유하고 있으며 빠른 속도로 하강하여 표층을 파괴하고 평지(하류부)에 도달하여 퇴적물이 쌓이는 현상을 토석류(debris flow)라고 분류하고 있다(전병희 등, 2010).

토석류는 그 발생에 있어서 지형, 지질 및 기후상황 등 환경적 요건에 따라 내적·외적의 다양한 발생요인이 존재하며, 내적요인으로는 지질, 토질, 지질구조, 지형 등의 구조적 조건, 외적요인으로는 강우, 지하수, 하천해안의 침식, 지진 등과 같은 환경적 조건이 존재한다. 이러한 토석류 흐름의 특성은 상기의 내적·외적요인들이 복합적으로 작용하여 합수량, 토적물의 크기와 종류에 따라 고체와

액체간의 상호작용에 좌우되므로, 그 발생이 매우 돌발적이고 사전예측이 어렵다. 따라서 최근 발생되고 있는 기후변화로 인한 이상기후(게릴라성 폭우 및 호우)로 인한 토석류 발생과 이에 따른 피해를 효율적으로 예측/방재하기 위해서는 토석류 산사태에 대한 올바른 인식과 학문적, 정책적 노력을 위한 꾸준한 연구가 필요하다(유남재 등, 2008). 하지만 현재 아직까지도 국내에서는 토석류에 대한 정밀한 피해 현황 분석, 토석류의 발생 메커니즘 이해 및 그에 따른 예측 시뮬레이션 없이 단순히 시설적인 측면에서 사방시설 설치, 저류시설 개선 등에 국한되어 경험적이고, 주관적인 방재대책만이 적용되고 있는 실정이다(조홍동과 배우석, 2007).

이에 따라 본 논문에서는 보다 합리적이고 객관적인 토석류 방재대책을 수립하기 위해 토석류 확산 알고리즘의 설계 및 구현을 통한 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션을 수행하고자 한다. 이를 위해 매우 극단적인 산악지형 분포를 보이는 강원도 평창군 일원을 연구대상 지역으로 설정하고, 토석류 이동 메커니즘의 분석 결과를 GIS 기반 수치해석 프로그램으로 개발하여 토석류의 발생 가능성을 시뮬레이션 하였다. 본 시뮬레이션에서는 토석류 물질을 비압축성 유체로 가정하고 유한차분법을 적용하였으며, 유한차분법의 적용을 위한 직교 그리드(grid)로는 항공 LiDAR 측량을 통해 생성된 2m 해상도의 고정밀 DEM을 이용하였다. 보다 효율적인 토석류 시뮬레이션을 위하여 토석류 발생 과정 및 이동 메커니즘(mechanism)을 분석하고, 대상지역에 대한 고정밀 DEM을 이용하여 경사, 토석류 이동 방향, 계곡을 추출한 결과에 토석 부피, 물 부피, 속도, 유효 점도, 동적 마찰 계수를 기초로 한 유한차분법을 적용하여 시간에 따른 대상지역의 토석류 이동 형태 및 피해범위를 산출하였다. 또한 본 연구에서 제안한 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 동일한 대상지역에 대하여 SINMAP(Pack *et al.*, 1998) 해석 및 지형

해석(Kasai *et al.*, 2009)에 의한 방법을 적용하고, 그 해석결과를 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 결과와 비교·분석하였다.

연구대상지역

본 연구를 위한 대상지역으로 급격한 산악 지형이 고르게 분포하고 있는 강원도 평창군 일원을 선정하였다. 이 지역의 경우 한국도로공사 도로교통기술원(2004)에 의해 직접 현장조사 되었으며 도속도로 주변 산사태 발생 현황을 분석한 결과, 2002년 이후로 총 164개의 대규모 토석류가 발생하여 토석류 발생 빈도 및 발생 가능성이 매우 높은 토석류 취약지역으로 판단되었다.

그림 1에 표현된 연구대상지역의 지형 및 지질 특성을 간략하게 설명하면 다음과 같다. 표고 분포의 경우 최소 453.6m에서 최대 1169.3m의 분포를 보였으며, 평균표고는 675.8m로 표고 분포의 표준편차는 $\pm 107.9m$ 를 나타냈다. 사면경사의 경우 최대 70.37° 의 급경사지가 존재하였으며, 평균 사면경사는 20.41° 로 사면경사 분포의 표준편차는 $\pm 11.96^\circ$ 로서 연구대상지역 전체적으로 상당히 급격한 사면경사를 나타내었다.

또한 연구대상지역에 분포한 산사태 발생지점(한국도로공사 조사자료 기준)에 대하여 정밀토양도를 중첩하여 획득된 토질정보를 정리한 결과 총 14개의 대표적인 토질 종류를 확인할 수 있었으며, 특히 사암질의 SgE2 토질에서는 많은 산사태가 발생하여 전체 발생건수의 52% 정도를 차지하였다(이동하 등, 2009a). 즉, 사면부에 다량 분포하는 사암질의 토질인 SgE2에서 산사태가 다수 발생하였으며, 동일한 사암질 계통의 토질인 JiB와 WiE, OnD2, YaD2 등에서도 다수의 산사태가 발생하였음을 확인하였다. 대상지역의 경우 토석류에 취약한 사암질 계통의 토질이 다수 분포하여 토석류 발생 가능성이 매우 높은 것으로 판단되었으며, 이러한 지역적 지형 및 토질 특성으로 인해 토석류 예측 가능성 분석

을 위한 최적의 대상지역으로 선정되었다.

본 대상지역의 보다 정확하고, 신뢰성 있는 토석류 예측 가능성 분석을 위해 고해상도 DEM을 2m의 해상도로 작성하여 이용하였다. DEM 작성을 위한 자료로서 Leica ALS 60 LiDAR 장비를 통해 2008년 3월에 관측된 항공라이다 데이터(2.6point/m²)를 이용하였으며, 이 데이터의 경우 DEM 제작을 위한 클래스 분류를 수행한 후 LAS 1.1 포맷으로 생성된 자료이다. 그림 1의 (b)는 본 연구대상 지역에 대하여 작성된 2m 해상도의 DEM을 나타낸 것이다.

DEM 작성 시 보다 정확한 지형정보를 효율적으로 획득하기 위하여 항공라이다 자료에 스트리밍 방식(이동하 등, 2009b)을 적용하여 인텍싱 및 텔로니 삼각망 생성을 수행하고, 최적의 보간법(Natural Neighborhood 또는 TIN)을 적용하여 대상지역의 고해상도 DEM을 효율적으로 생성하였다. 스트리밍 방식의 DEM 프로세싱은 인텍싱, 스트리밍, 보간, 가상 파일 생성, DEM·음영기복도 생성 순으로 구성되어 DEM을 생성하게 되는데, 이러한 스트리밍 프로세싱의 가장 주요한 핵심은 항공라이다 자료와 같은 대용량의 입력데이터 처

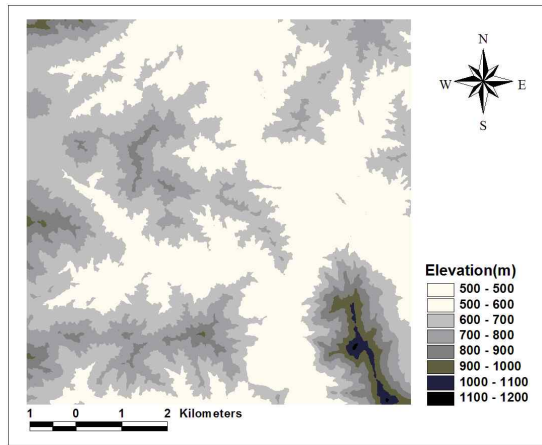
리 시에 일반 DEM 프로그램처럼 메모리에서 이를 처리하지 않고, 가상파일을 이용한 공간 분할 구조로 관리하여 처리하는 것이다(이동하 등, 2009b). 이를 통해 넓은 지역의 고정밀 DEM 생성 시, 입력데이터 간 추가적인 인접 및 수정 작업이 불필요하여 보다 정확한 높이정보를 취득하는 것이 가능하다.

유한차분법을 적용한 GIS 기반의 토석류 해석

최근 GIS(Geographic information system) 기술은 효율적인 데이터 포맷과 공간자료 분석 기능으로 인해 방재 및 재해영향평가에서 활발하게 이용되고 있는데, 이는 GIS를 이용할 경우 사면붕괴와 토석류 재해에 대한 관련 자료의 수집, 처리, 시각화, 분석이 보다 효율적·경제적으로 가능하기 때문이다(Carrara and Guzzetti, 1999). 토석류 시뮬레이션에 있어서 가장 핵심적인 사항은 복잡한 3차원 지형에 걸친 토석류의 이동경로의 예측, 안전지대를 결정하기 위한 잠재적 이동거리 및 재해범위를 산정하는 것이다. 따라서 효율적인 토석류의 예측 및 분석을 위해서는 토석류 수치해



(a) 연구대상지역의 지형분포



(b) 고해상도 DEM(해상도 2m)

FIGURE 1. 연구대상지역

석모델과 GIS가 결합된 도구의 개발이 매우 중요한 사항이 되었다(위광재 등, 2010).

본 절에서는 토석류 이동 메커니즘 분석 결과를 GIS 기반 수치해석 프로그램으로 개발하여 토석류의 발생 가능성을 시물레이션하고, 이를 통해 토석류로 인한 피해를 최소화할 수 있는 기반을 구현하였다. 이를 위해 토석류 물질을 비압축성 유체로 가정하고 유한차분법을 적용한 Windows 기반의 토석류 시물레이터를 개발하였다. 여기서 유한차분법의 적용을 위한 직교 그리드(grid)로는 항공 LiDAR 측량을 통해 생성된 고정밀 DEM을 이용하였으며, 보다 효율적인 토석류 시물레이션을 위하여 토석류 발생 과정 및 이동 메커니즘(mechanism)을 분석하였다. 개발된 토석류 시물레이터에서는 입력된 DEM을 완만하게 재정리한 후, 대상지역에 대한 경사, 토석류 이동 방향, 계곡을 추출한 결과와 토석 부피, 물 부피, 속도, 유효 점도, 동적 마찰 계수를 이용한 유한차분법을 적용하여 시간에 따른 토석류 이동 형태를 정밀하게 시물레이션하게 된다. 그 후 산출된 GIS 기반의 시물레이션 해석결과를 이용하여 대상지역의 최종적인 토석류 발생 가능성 및 피해범위를 예측한 위험 지도를 작성하였다.

1. GIS 기법을 적용한 토석류 이동 메커니즘 분석

석류는 퇴적물과 물의 혼합으로 인해 물흐름과 토사의 질량이동의 중간 정도의 복잡한 흐름 양상을 보이며, 이러한 양상을 시물레이션하기 위한 다양한 수학적·유동학적 모델들이 개발되었다. 일반적으로 토석류(debris flow)와 이류(mudflow)의 해석을 위한 유동학적 모델들은 크게 뉴턴, Bingham, Herschel-Bulkley, 유체팽창(dilatant fluid), 분산응력(dispersive stress), 마찰(frictional) 모델 등으로 분류할 수 있으며, 최근에는 이러한 기본적인 모델을 기반으로 좀 더 정확한 수치 해석을 위한 수학적 개선 및 새로운 기술의

접목이 수행되고 있다(Wang *et al.*, 2008).

토석류는 발생하는 형태에 따라 토석류의 규모와 흐름 특성도 각각 다르며 이러한 다양한 이동 특성을 예측하는 방법으로는 확정론적 방법(deterministic approach), 퍼지로지(fuzzy logic), 인공신경망(artificial neural network) 방법 등이 있다(위광재 등, 2010). 일반적으로 GIS 기법에서 자주 활용되는 토석류 분석방법은 확률론적 예측 방법으로써, 이 방법을 통해 토석류로 인한 사태물질의 이동 특성을 지형데이터에 기초하여 3차원적으로 가시화하여 토석류에 의한 피해범위를 효과적으로 판단할 수 있다.

본 연구에서 제안한 GIS 기반의 토석류 시물레이션에서는 토석류 물질을 비압축성 유체로 가정하며, 이러한 가정을 기반으로 운동방정식과 연속방정식을 적용하게 되면 토석류의 실시간 변화양상을 표현하는 것이 가능하다. 토석류 분석에 연속방정식을 적용하는 경우에는 유한차분법을 위하여 도입된 그리드(grid)의 단위 면적에 대해 3축 방향으로 출입하는 토석 질량의 합이 0이라는 가정을 적용하여 토석류를 해석하게 된다. 그리고 내비어-스토크스(Navier-stokes)방정식라고도 불리는 운동방정식을 적용하는 경우에는 토석류 물질이 비압축성 유체(uniform continuous, incompressible unsteady flow)임에 기인하여, 토석류가 대류한다는 가정을 적용하여 해석한다(Wang *et al.*, 2008). 또한 토석류의 실시간 변화양상은 유체 해석에서 주로 활용되는 유한차분법을 적용하였으며, 이러한 유한차분법의 적용과정에 대한 자세한 내용은 위광재 등(2010)을 참조할 수 있다.

2. GIS 기반의 토석류 시물레이션 결과

GIS 기반의 토석류 시물레이션을 위한 유한차분법의 직교 그리드 데이터로 연구대상지역에 대하여 처리된 2m 해상도의 고정밀 항공라이다 DEM을 활용하였다. DEM은 3차원 지형을 표현하는 격자형 자료구조로 토석류

해석을 위한 기본 정보로 활용되며, 이를 통해 하천망, 경사, 경사향과 같은 다양한 정보를 GIS 기법을 적용하여 손쉽게 추출할 수 있다.

유한차분법을 적용한 토석류 해석을 위해 토석류의 이동은 그림 3(a)와 같이 임의의 DEM 격자 상에서 최대 8방향으로 이동 가능하다고 가정한다. 또한 토석류의 이동방향, 즉 흐름은 그림 3(b)와 같이 인접 격자 중 경사각이 최대 하향값을 보이는 가장 낮은 표고를 가진 격자로 진행된다고 가정하였다.

유한차분법에서 토석류의 흐름을 나타내는 상태방정식은 토석류 진행 시간에 따라, 상기의 가정에 따라 특정한 방향으로 이동하게 된다. 토석류 해석을 위한 유한차분법의 적용 시 두 가지 형태의 차분(전향차분 및 중심차분)을 수행하게 되는데, 이 중 전향차분법은 연속방정식 중 선형항을 분리하며, 중심차분법은 비선형항을 분리하는데 사용된다. 또한 이러한 토석류 시뮬레이션을 정확하게 수행하기 위해서는 각 DEM 격자점 상의 토사량, 수량, 토석류 속도, 유효 점도, 동적 마찰계수 등의 환경변수를 설정하여야 하며, 이러한 설정값에 따라 시뮬레이션 결과의 정확도에 영향을 미치게 된다(Rickenmann *et al.*, 2006). 따라서 일반적으로 환경변수의 값은 직접적인 관측값 혹은 기존의 토석류 발생자료의 정확한 통계적 가중분석을 통해 계산된

다. 하지만 본 연구에서는 통계분석을 위한 토석류 발생자료를 충분히 확보하지 못하여 중국 지역의 토석류 분석을 위해 제안된 환경변수 값(Wang *et al.*, 2008)을 일부 채용하였으며, 이에 따라 토석의 밀도는 2,000kg/m³, 유효 점도는 0.11Pa·s, 중력가속도는 9.8 m/s², 활동토피의 심도는 3.5m로 각각 설정되었다. 동적 마찰계수의 경우 0.32~0.75를 이용하였으며(Lien and Tsai, 2003), 환경변수 중 토사량, 수량 및 토석류 속도는 기존 연구를 통해 제안된 값을 사용하지 않고 임의의 값인 4,000m³, 10,000m³ 및 10m/s로 각각 설정하였다.

상기와 같이 설정된 환경변수를 통해 산정된 각 격자 상의 토석농도(그림 3(a))는 최종적으로 그림 3(b)와 같이 그리드의 중심점에서 계산되어 누적되며, 이러한 과정을 통해 대상지역에 대한 토석류 발생량 및 발생범위를 예측할 수 있다. 하지만 본 시뮬레이션의 경우 지형의 정보가 연속된 DEM을 기본 자료로 이용하기 때문에 대상지역 전체적으로 토석류 발생량이 산출되는 특성이 있다. 따라서 발생량만을 이용하여 발생가능 범위를 규정하게 되면 대상지역 전체가 토석류 발생가능 범위로 산정되는 문제가 존재한다. 이를 해결하기 위해서는 토석류 발생량을 기준으로 이를 지수화(indexing)하여 발생범위를 다시 규정하여야 한다. 여기서는 토석류 발생량을

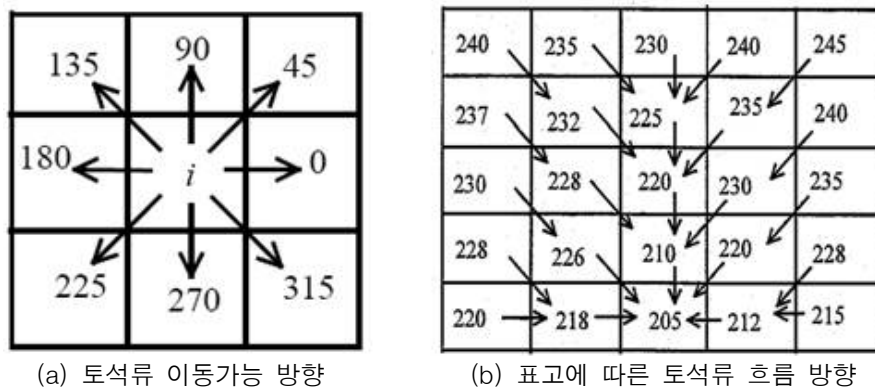


FIGURE 2. 토석류의 이동 방향

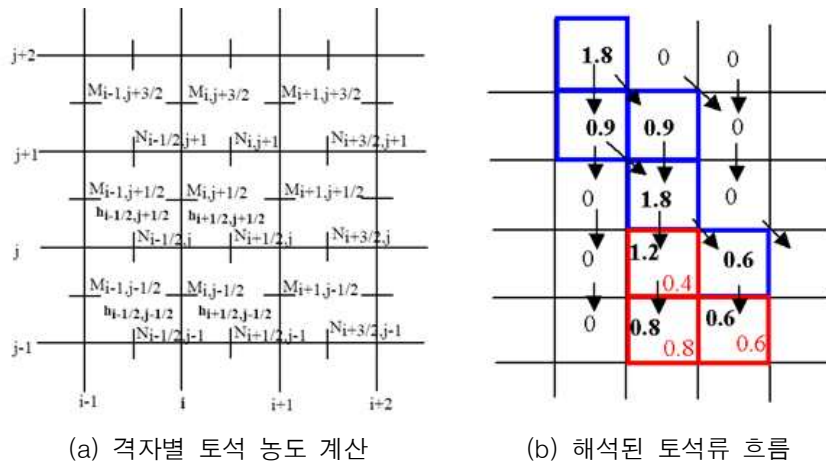


FIGURE 3. 토석류 분석을 위한 격자 분리 및 이동

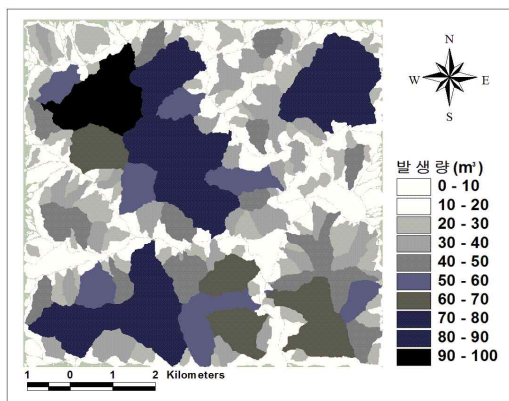
사면안정지수(SI) 분류등급(Pack *et al.*, 1998)과 동일하게 총 6개의 등급으로 선형비례를 통해서 구분하고, 40m³ 이상의 토석류 발생량을 보이는 지역부터를 토석류 발생가능 지역(Lower threshold slope zone, SI > 1.0)으로 설정하였다.

다음의 그림 4(a)는 본 연구에서 제안된 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션을 통해 산출된 대상지역의 토석류 발생량을 나타내고 있으며, 그림 4(b)는 이를 지수화하여 나타낸 토석류 발생가능 범위이다. 대상지역에 대하

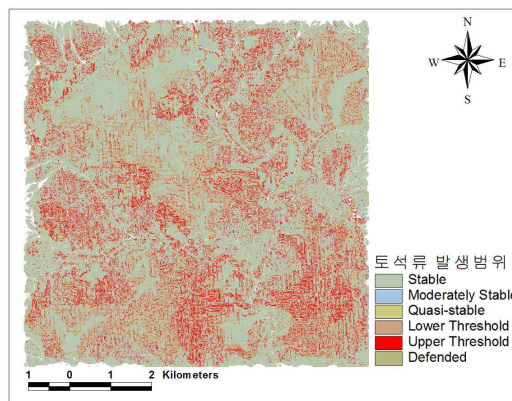
여 시뮬레이션된 토석류 발생량은 하나의 격자점에 대하여 최대 96.035m³까지 나타났다.

SINMAP(Stability INdex MAPping) 해석에 의한 방법

특정한 지역에 대한 토석류 발생가능성 예측, 즉 시뮬레이션은 지형 상부의 파괴에 대한 해석을 수행하는 것으로 대변되며, 크게 통계적 기법과 결정론적 기법으로 나뉜다. 통계적 기법은 파괴의 발생지와 각종 환경, 지



(a) 토석류 발생량



(b) 토석류 발생범위

FIGURE 4. GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 결과

질, 토질 인자들과의 상관관계에 의하여 발생 가능성을 예측하며, 결정론적 방법은 물리, 역학에 기반을 둔 방법으로 각종 지형, 지질, 토질, 기상 등의 파괴의 유발인자들을 수리모델과 사면안정모델에 적용하여 안전율과 파괴확률을 산정하고, GIS 기법을 적용하여 광역적인 파괴의 위험성을 평가하는 방법이다. 이중 결정론적 방법을 이용한 대표적인 해석기법으로 SINMAP(Stability INDEX MAPping)이 토석류 발생량 및 발생위치를 추정하기 위해 주로 이용된다(장현익 등, 2008).

여기서는 대상지역에 대한 토석류 발생량 및 발생범위를 SINMAP으로 해석하여 본 연구에서 제안한 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 결과와 비교하고, 그 신뢰성을 검증하고자 하였다.

1. SINMAP의 적용과정

SINMAP(Pack *et al.*, 1998)은 정상상태의 습윤지수를 바탕으로 한 토석류 해석 모델로서, 모든 강우가 지표하로 침투하여 정상상태를 형성한다고 가정하는 수리적 모델을 무한사면안정모델과 결합하여 사면 안정성을 계산하는 모델이다.

무한사면안정모델은 산사태 활동면의 형태가 사면 표면에 평행인 직선(평면)이라고 가정하는 안정계산 방법으로서, 산사태의 활동길이가 활동깊이에 비해 충분히 큰 사면의 안정계산에 사용된다. 우리나라에서 발생되고 있는 산사태의 대부분을 차지하는 토석류는 얇은 토양층의 붕괴로 발생되고, 경사면을 따라 비교적 긴 거리를 이동할 수 있기 때문에 무한사면안정모델을 적용하기에 적당하다고 볼 수 있다. 무한사면안정모델에서는 흙의 성질과 지하수위 조건은 전체사면에 걸쳐 변하지 않는 것으로 가정하고 있으며, 사면의 모양을 평탄한 사면으로 간주하고 해석하게 된다. 본 연구에서 적용한 무한사면안정모델의 안전율(factor of safety)에 대한 해석식은 다음과 같다.

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2 \alpha [\gamma_s g (D - D_w) + (\gamma_s g - \gamma_w g) D_w] \tan \emptyset}{\sin \alpha \cos \alpha [\gamma_s D]} \quad (1)$$

여기서,

C_r : 뿌리의 점착력, C_s : 흙의 점착력

D : 지표면에서 파괴면까지의 연직방향 두께

D_w : 지하수위에서 파괴면까지의 연직방향 두께

γ_s : 흙의 단위중량, γ_w : 물의 단위중량

α : 사면경사

\emptyset : 흙의 내부마찰각

g : 중력가속도

SINMAP에서는 사면의 안정성을 사면안정지수(SI; Stability Index)로 등급화 하여 표현하게 되는데, 사면안정지수를 산정하기 위한 입력자료로서 Grid 기반의 DEM을 사용하며, 토양과 식물뿌리에 의한 점착력을 고려한다. 점착력이 없는 경우를 원하는 경우 0으로 조정할 수 있다. SINMAP에서 사용되는 환경변수들은 정확한 값이 아닌 범위로서 입력되며, 상한값과 하한값 내에서 균등한 확률을 가지고 임의적으로 분포하는 것으로 가정한다. 마지막으로 SINMAP은 상대습윤도 (relative wetness)를 사면의 배수특성과 연관시켜 최종적인 사면안정지수(SI)를 산정하게 된다.

따라서 SINMAP 해석 시에는 안정성 분석에 적용되는 환경변수(물성치 및 토양조건)를 정확하게 고려하여야 하는데, 여기서는 다음의 표 1과 같은 환경변수를 적용하였다. 이 중 ‘Ratio of Transmissivity, Soil Cohesion, Soil Friction Angle’의 3가지 인자는 불확실성을 내포한 환경변수로서 상한값과 하한값을 사용자가 직접 정하여 입력하도록 되어 있으며, 이 범위 내에서 발생확률이 균일한 확률분포(probability distribution)를 갖는 것으로 가정된다.

상기에 언급한 바와 같이 최종적인 SINMAP의 결과물은 사면안정지수(SI)로 표

현되며, 이 값들은 해석 영역 내 각 지점에서 토석류 발생에 대한 사면의 안정성을 표현해 준다. 이때, SINMAP의 사면안정지수는 수치적으로 정확하게 해석된 절대값이라기 보다는 상대적인 위험성을 표현하는 지표로서,

SINMAP의 안정지수(SI)의 에 대한 분류등급은 다음과 같다(Pack *et al.*, 1998). 표에서 보는바와 같이 SI 가 1.5 이상일때 안전한 지역으로 분류하고 있으며, 0~1.0 구간은 토석류의 발생에 대한 위험지역으로 분류하고 있다.

TABLE 1. SINMAP 분석 시 적용한 환경변수(물성치 및 토양조건) (Pack *et al.*, 1998)

| Variables | Default Value | | Unit |
|-------------------------|---------------|-------|-------------------|
| Gravity Constant | 9.81 | | m/s ² |
| Water Density | 1,000 | | kg/m ³ |
| Ratio of Transmissivity | lower bound | 2,000 | m |
| | upper bound | 3,000 | |
| Soil Cohesion | lower bound | 0.0 | t/m ² |
| | upper bound | 0.25 | |
| Soil Friction Angle | lower bound | 30 | ° |
| | upper bound | 45 | |
| Soil Density | 2,000 | | kg/m ³ |

TABLE 2. SINMAP SI(Stability Index) 분류등급 (Pack *et al.*, 1998)

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

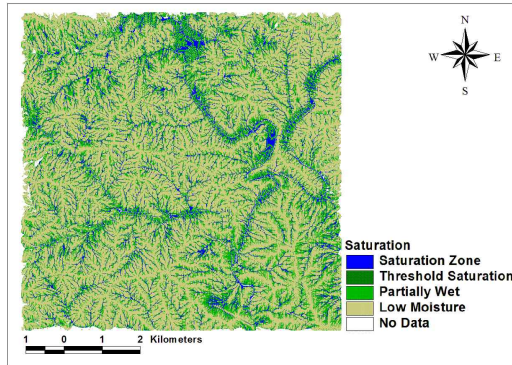
2. SINMAP에 의한 토석류 시뮬레이션 결과

여기서는 SINMAP 방법을 적용하여 연구대상지역의 토석류 발생에 대한 사면안정등급을 해석하고, 토석류에 대한 안전성 평가를 수행하여 토석류 발생범위를 산출하였다. 해석을 위한 지형자료로서 사면안정성 분석의 신뢰도를 높이기 위해 본 연구에서 취득한 2m 해상도의 항공라이다 DEM을 이용하였다. 분석 시 사용되는 환경변수는 SINMAP에서 기본적으로 제공하는 표 1의 기본값(default value)을 적용하였으며, 상기의 표 2의 분류등급을 적용하여 대상지역의 사면안정성을 평가하였다.

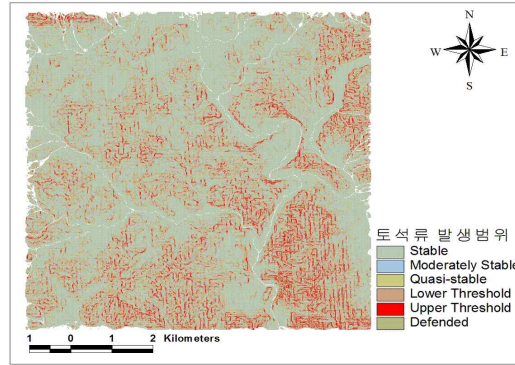
연구대상지역에 대해 SINMAP을 이용하여 토석류 발생에 대한 사면의 안정성 평가를 수행한 결과, 토석류에 대해 안전하다고 판명된 지역(SI > 1.5)이 전체 연구대상지역 중 약 71.72%(80.66km²)를 차지하고 있었다. 이 지역은 대부분 고도 100m 이하의 주거 및 상업 시설이 위치한 지역으로, 이 지역에 대한 토석류 발생의 위험정도는 SINMAP을 통한 사면안정성 해석에서 볼 때에는 안전한 것으로 나타났다. 하지만, 토석류 발생이 의심되는 지역은 SINMAP의 SI 지수 0 ~ 1.0 인 구간으로 이 지역은 전체 연구대상지역에 대해 약 27.84%(약 31.31km²)의 면적으로 나타나, 연

구대상지역 전체적으로 토석류 발생위험이 상당히 높은 것으로 나타났다. SINMAP을 통한 연구대상지역 내 사면안정성 검토를 위해 계산된 함수율 분포는 다음의 그림 5(a)와 같

고, 이를 통해 산출된 사면안정지수 분류등급별 면적 및 비율은 다음의 그림 5(b) 및 표 4과 같다.



(a) 함수율 분포



(b) 사면안정지수(SI) 분포

FIGURE 5. 연구대상지역의 SINMAP 해석 결과

지형해석에 의한 방법

토석류 발생가능성을 객관적으로 평가하기 위한 방법의 일환으로, 지형의 특징을 수치화하여 표현하는 지형해석(McKean and Roering, 2004; Kasai *et al.*, 2009; 이동하 등, 2009a) 기법을 적용하는 것이 가능하다. 산사태가 발생 가능한 지형은 기존의 산사태의 활동과 함께 변화하므로, 지형해석 결과를 통해 주변의 산사태 활동상황이나 발생 단계를 표현하는 것이 가능하다. 예를 들면 특정 지역에 산사태(토석류)가 활발히 활동하게 되면, 동시에 이를 유발하는 미세지형의 발달도 활발하게 일어나 지형의 굴곡이 매우 거칠게 표현된다. 이러한 토석류 발생을 인지할 수 있는 지표면의 굴곡 거칠기(roughness) 지표로 McKean and Roering(2004)은 고유치비(eigenvalue ratio)를 제안하였으며, Glenn *et al.*(2006)은 가상곡면으로부터의 DEM 각 격자와의 표고차에 대한 표준편차 또는 거리와 표고값의 분산과의 상관관계를 나타내는 통계량인 반분산(semivariance)을 구하여 이

러한 값의 공간분포와 산사태의 발생 가능성과의 상관관계를 조사하였다(이동하 등, 2009a).

그러나 이러한 지표는 산사태 발생과 밀접한 연관을 지니는 지질정보(이사로 등, 2002)가 고려되지 않은 결과로서, 지질조건이 서로 다른 장소에 대해서도 이러한 지표를 적용할 경우 동일한 결과를 얻게 되는 문제점이 존재한다. 하지만 고정밀 항공라이다 DEM을 이용하는 경우 취득되는 사면경사의 공간분포는 그 분포밀도를 수 미터 이하의 단위로 얻을 수 있으므로, 이 경우 지질정보와의 통합이 수행되지 않더라도 현재의 산사태의 발생 가능성 및 활동 상태를 표현하는 지표로 활용할 수 있는 가능성이 충분한 것으로 알려져 있다(Kasai *et al.*, 2009).

여기에서는 본 연구에서 취득한 2m 해상도의 고해상도 DEM을 이용하여 고유값 비와 사면경사를 계산하였으며, 이를 통해 연구대상지역에 대한 지형해석을 수행하였다. 최종적으로는 이러한 지형해석 결과를 통해 도출된 토석류 발생범위를 GIS 기반의 토석류 시

플래이션 결과를 비교하여, 두 해석 결과 간의 상관관계 및 신뢰성을 검증하였다.

1. 지형해석 기법의 적용 과정

토석류 발생가능성을 나타내는 지형의 특징을 대변하는 지표(index)로서 사면경사와 고유치 비(eigenvalue ratio)가 있다(Kasai *et al.*, 2009). 이 중 사면경사(slope angle)는 ArcView 소프트웨어에 구현되어 있는 표준 알고리즘을 이용한 유한차분(finite difference)을 통해 유도되며(Burrough and McDonnell, 1998), DEM 상 임의의 격자점에의 수평면과 근방 8점에서 계산되는 근사평면으로 이루어지는 각을 이용하여 계산된다.

또한 고유치 비는 지표면의 거칠기 정도(degree of roughness)를 3차원적으로 나타내는 지표로서(Woodcock, 1977), 여기서는 DEM의 각 격자별 평면의 법선벡터의 방향에 대하여 인접한 3×3 격자 간의 지표면의 거칠기를 나타낸다. 활발한 지표활동이 발생하는 장소에서는 지표면이 거칠게 되어, 고유치 비의 값이 작게 나타나는 것으로 알려져 있다(McKean and Roering, 2004).

본 연구에서는 고유치 비 계산하기 위하여 Woodcock(1977)이 제안한 방법을 이용하였다. DEM의 각 격자면과 수직하는 단위벡터의 집합을 이라고 하면, 이 단위벡터의 방위행렬 또는 위치변환행렬(orientation matrix)와 행렬 내 고유치 은 다음과 같이 계산된다(Kasai *et al.*, 2009).

$$|T - \lambda E| = \begin{vmatrix} \sum x_i^2 - \lambda & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum y_i x_i & \sum y_i^2 - \lambda & \sum y_i z_i \\ \sum z_i x_i & \sum z_i y_i & \sum z_i^2 - \lambda \end{vmatrix} \quad (2)$$

여기서, $x_i = \sin\theta_i \cos\phi_i$, $y_i = \sin\theta_i \sin\phi_i$, $z_i = \cos\theta_i$ 이며, θ_i 와 ϕ_i 는 i 번째 격자의 단위

방위벡터(unit orientation vector)의 여위도(colatitude) 및 경도를 각각 나타낸다. 상기의 식 (2)의 행렬은 이론적으로 $i = 1$ 에서 n 까지의 모든 요소를 계산하게 되나, 본 연구에서는 계산범위를 특정 격자 주변의 3×3 격자로 제한하였으며, 이를 통해 $n = 9$ 로 결정되었다. 또한 총 세 개의 고유치(eigenvalue) λ_k ($k = 1, 2, 3$; $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$)도 식 (2)를 통해 계산되며, 이는 다음의 과정을 통해 정규화(normalized)되어야 한다(Kasai *et al.*, 2009).

$$S_k = \lambda_k / n \quad (3)$$

여기서, $S_1 + S_2 + S_3 = 1$ 이며, 지형해석을 위한 고유치 비(eigenvalue ratio) γ 은 정규화된 고유치 S_1 과 S_2 를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma = \ln(S_1/S_2) \quad (4)$$

고유치 비 γ 이 작을수록 계산범위(3×3 격자) 내 격자들의 각 단위 방위벡터의 방향이 보다 불규칙(random)하다는 것을 나타내며(Guth, 2003), 이는 곧 지표면이 보다 거친 것을 나타낸다(Woodcock, 1977; McKean and Roering, 2004; Kasai *et al.*, 2009).

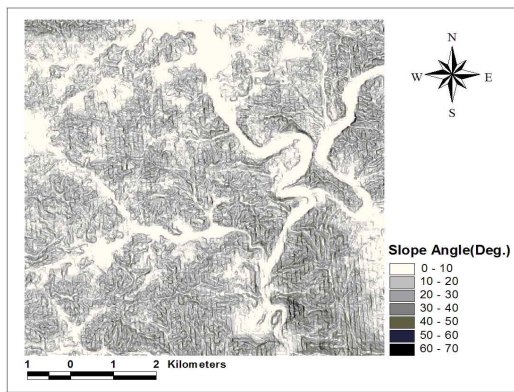
2. 지형해석에 의한 토석류 시뮬레이션 결과

최종적으로 상기의 지형해석 알고리즘 및 항공라이다 DEM을 활용하여 연구대상지역 일원에 대한 사면경사 및 고유치 비를 해석하였다. 그 결과, 고해상도 항공라이다 DEM를 이용하는 경우 토석류 발생이 가능한 지형을 특정하는 사면경사 및 고유치 비(eigenvalue ratio)의 밀도분포가 명확해졌으며, 이러한 밀도분포를 통해 연구대상지역의 토석류 위험도, 발생범위 및 발생가능성 예측이 가능함을 알

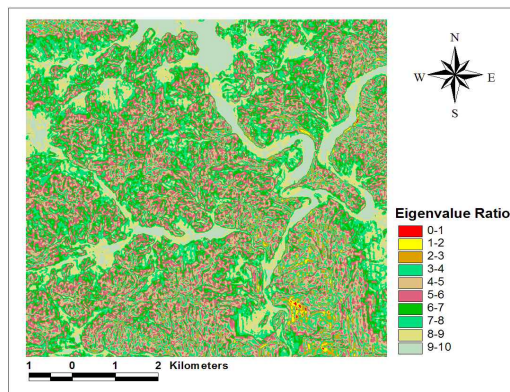
수 있었다. 다음의 그림 6은 연구대상지역 일원에 대하여 계산된 사면경사 및 고유치 비를 표현한 것이다.

그림 6의 지형해석 결과를 토대로 연구대상지역에 대한 사면경사의 밀도분포를 분석한 결과, 가장 밀도가 높은 범위는 경사각 10 ~ 20°로 나타났으며, 그 다음으로 경사각 20 ~ 30°의 범위에서 높은 밀도분포를 나타내었다. 또한 고유치 비의 경우 5 이하의 고유치 비를 보이는 지점이 토석류 발생가능성이 높은 지역으로 분류되고 있는데(Kasai *et al.*,

2009), 연구대상지역의 지형해석 결과 대부분의 지역에서 5 이하의 낮은 고유치 비를 나타내었다. 이에 따라 연구대상지역의 지표면이 상대적으로 거친 것으로 판단되었으며, 이는 연구대상지역의 토석류 발생가능성이 상대적으로 높은 것을 나타내고 있다. 이러한 사항은 그림 7에 표현된 고유치 비의 누적 밀도분포 및 밀도분포 곡선에서도 알 수 있는데, 누적 밀도분포 곡선의 기울기가 매우 커 토석류 발생가능성이 높은 것을 알 수 있다.



(a) 사면경사



(b) 고유치 비

FIGURE 6. 연구대상지역의 지형해석 결과

결과의 비교 및 분석

여기에서는 보다 합리적이고 객관적인 토석류 방재대책을 수립하기 위해 본 연구에서 수행한 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 동일한 연구대상지역에 대하여 수행된 SINMAP 및 지형해석에 의한 토석류 시뮬레이션에 의하여 예측된 토석류 피해범위와 비교 및 분석을 수행하였다.

각 방법에 의해 산정된 토석류 피해범위는 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션의 경우 발생량에 기초하고 있으며, SINMAP은 SI 지수, 지형해석은 고유치 비 등을 이용하여 해석된 것

으로 보다 명확한 비교 및 분석을 위해서는 이를 하나의 동일한 기준으로 통합할 필요가 있다. 이를 위해 SINMAP 해석에서 활용한 SI 분류등급을 기준으로 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 결과 및 지형해석 결과를 표현하였으며, 각 해석방법의 최종 결과인 토석류 발생량 및 고유치 비를 임의로 세분화하여 SI 분류등급으로의 지수화(indexing)을 수행하였다. 토석류 발생량의 경우 70m²이상의 토석류 발생량을 보이는 지역부터를 토석류 발생가능 지역으로 구분하였으며, 고유치 비의 경우 5 이하의 고유치 비를 보이는 지역부터를 토석류 발생가능 지역으로 구분하였다. 그 후 기준한 토석류 발생량 및 고유치 비를 중심으로 크기의

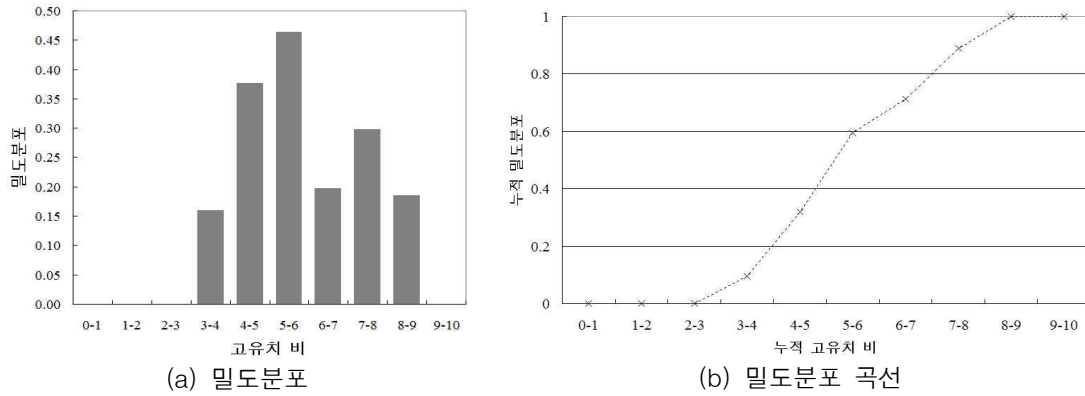
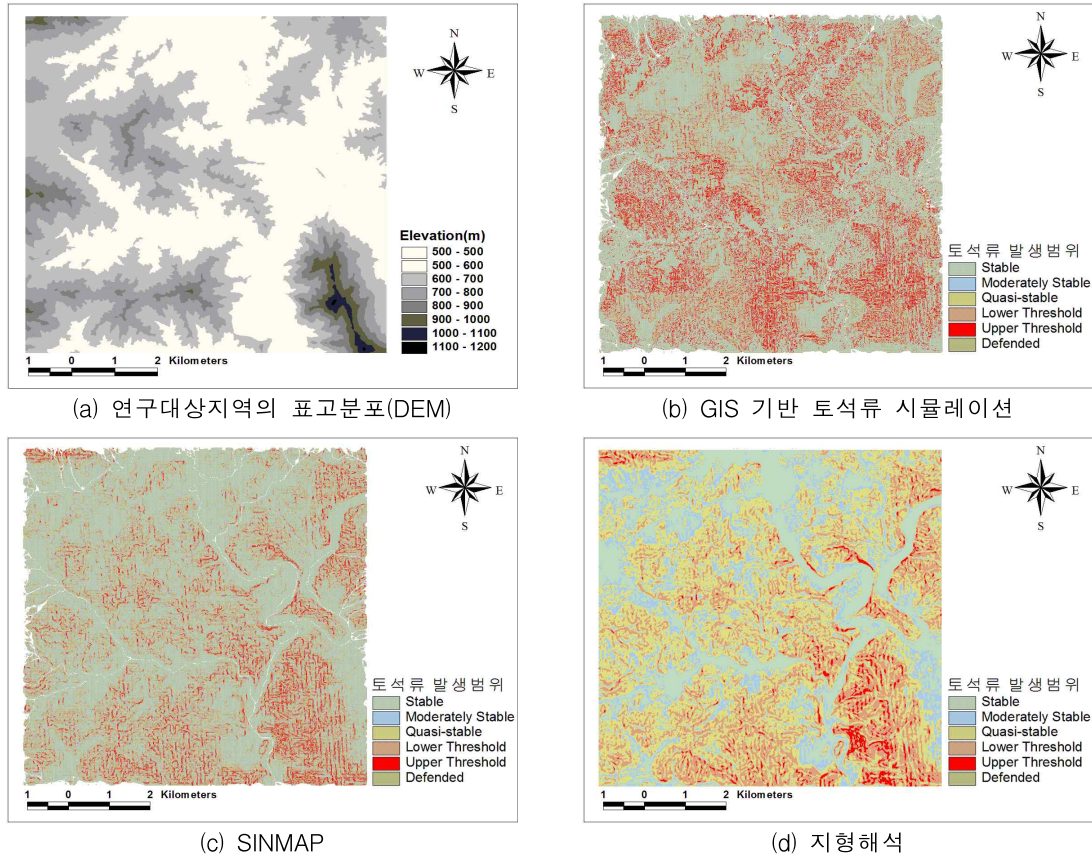


FIGURE 7. 연구대상지역의 고유치 비 분석 결과

중간에 따라 토석류 발생위험도를 SI 분류등급에 간략한 선형비례를 통해 적합하였다.

그림 8은 각 토석류 시뮬레이션 방법에 따라 도출된 각각의 토석류 피해범위를 SI 분류



FFIGURE 8. SI 분류등급에 따른 토석류 시뮬레이션 결과

등급을 기준으로 정리한 것이며, 표 3 ~ 표 5 는 연구대상지역에 대한 분류등급별 토석류 발생가능 면적을 나타낸 것이다.

TABLE 3. GIS 기반의 토석류 시물레이션에 따른 사면안정등급 분석 결과

| Contents | Stable | Moderately Stable | Quasi-Stable | Lower Threshold | Upper Threshold | Defended | Total |
|-------------|--------|-------------------|--------------|-----------------|-----------------|----------|--------|
| 발생량(㎡) | 0~10 | 10~25 | 25~40 | 40~70 | 70~90 | 90 < | - |
| Area(㎢) | 60.92 | 9.99 | 9.91 | 8.26 | 14.17 | 8.73 | 111.98 |
| % of Region | 54.40 | 8.92 | 8.85 | 7.38 | 12.65 | 7.80 | 100 |

TABLE 4. SINMAP 해석에 따른 사면안정등급 분석 결과

| Contents | Stable | Moderately Stable | Quasi-Stable | Lower Threshold | Upper Threshold | Defended | Total |
|-------------|--------|-------------------|--------------|-----------------|-----------------|----------|--------|
| SI | 1.5~10 | 1.25~1.5 | 1~1.25 | 0.5~1 | 0.001~0.5 | 0 | - |
| Area(㎢) | 55.05 | 11.51 | 14.10 | 23.32 | 4.74 | 3.26 | 111.98 |
| % of Region | 49.17 | 10.28 | 12.59 | 20.82 | 4.23 | 2.91 | 100 |

TABLE 5. 지형해석에 따른 사면안정등급 분석 결과

| Contents | Stable | Moderately Stable | Quasi-Stable | Lower Threshold | Upper Threshold | Defended | Total |
|-------------|--------|-------------------|--------------|-----------------|-----------------|----------|--------|
| ER | 9~10 | 7~9 | 5~7 | 3~5 | 1~3 | 0~1 | - |
| Area(㎢) | 37.23 | 22.45 | 23.83 | 25.79 | 2.64 | 0.04 | 111.98 |
| % of Region | 33.25 | 20.05 | 21.28 | 23.03 | 2.36 | 0.03 | 100 |

본 연구에서 제안한 GIS 기반의 토석류 시물레이션 결과를 SI 분류등급에 기준하여 분석한 결과, 낮은 토석류 발생가능성(lower threshold) 이상의 지역이 전체 지역에 대해 약 28.5% 정도로 나타났으며, 이를 통해 연구대상지역 전체적으로 높은 토석류 발생가능성을 보이는 것으로 판단되었다. 이와 더불어 SINMAP을 이용하여 토석류 발생에 대한 사면의 안정성 평가를 수행한 결과에서는 토석류 발생이 가능한 지역(SI 지수 0 ~ 1.0)이 전체 연구대상지역의 약 27.84%(약 31.31

㎢)으로 나타났으며, 지형해석에 의한 결과에서도 낮은 토석류 발생가능성 지역이 전체의 약 25.42% 정도를 나타내어 두 방법 모두 본 연구에서 제안한 GIS 기반의 토석류 시물레이션 결과와 매우 유사한 수치를 나타내었다.

그러나 각 방법에 따른 사면안정등급을 비교하여 보면 SINMAP과 지형해석 결과는 낮은 토석류 발생가능성 지역이 각각 약 21% 및 23% 정도인 반면에, GIS 기반의 토석류 시물레이션 방법은 약 7.4% 정도로 상대적으로 작은 범위를 보이고 있다. 특히 GIS 기반

의 토석류 시뮬레이션 방법을 적용한 경우 높은 발생가능성(upper threshold) 및 대책필요(defended) 지역의 비율이 12.6% 및 7.8% 정도로 보다 크게 나타나 대상지역의 토석류 위험성이 매우 높은 것으로 분석되고 있다. 이러한 위험성의 상대적인 증가는 토석류 시뮬레이션에 있어 적용한 환경변수 중 토사량, 수량 및 토석류 속도를 실제적인 값을 사용하지 않고 다소 큰 임의의 값을 설정하였기 때문으로 판단되었다. 더불어 토석류 발생량 및 고유치 비 등의 방법별 해석결과를 SI 분류등급에 따라 정리하기 위해서는 각 해석결과 간의 상관관계를 명확히 파악하여야 하나, 여기서는 단순한 선형비례관계만을 적용하였기 때문에 최종적인 해석결과에 오차가 존재할 것으로 판단되었다. 따라서 각 방법별 해석결과 간의 비교 및 검증은 위해서는 실제 토석류 관측자료(발생량 및 피해범위)를 토대로 SI 분류등급과 고유치 비 간의 상관관계를 확인하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

상기의 검증 결과, 본 연구에서 제안한 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 방법은 기존의 토석류 발생가능성 예측방법인 SINMAP 및 지형해석 방법과 유사한 결과를 나타내었으며, 이에 따라 강원도 평창군 일원의 연구대상지역이 토석류에 대하여 낮은 안정성을 가지고 있어 적절한 토석류 방재대책이 시급히 필요할 것으로 판단되었다. 따라서 이러한 방재대책 수립 시 본 연구에서 제안한 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 방법을 이용하는 경우, 단순한 토석류 위험지수(위험도)만을 제시하는 SINMAP 및 지형해석 방법에 비하여, 토석류 발생량을 동시에 예측할 수 있어 보다 효율적인 토석류 방재대책을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

결론

본 연구에서는 보다 합리적이고 객관적인 토석류 방재대책을 수립하기 위해 국내 지형

에 적합한 토석류 확산 알고리즘의 설계 및 구현을 통한 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위해 강원도 평창군 일원을 연구대상지역으로 설정하고, GIS의 기반 수치해석 프로그램을 개발하여 토석류의 발생가능성을 시뮬레이션 하였다.

본 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션에서는 토석류 물질을 비압축성 유체로 가정하고 유한차분법을 적용하였으며, 유한차분법의 적용을 위한 직교 그리드로 항공라이다 측량을 통해 생성된 2m 해상도의 고정밀 DEM을 이용하였다. 보다 효율적인 토석류 시뮬레이션을 위하여 토석류 발생 과정 및 이동 매커니즘을 분석하고, 대상지역에 대한 고정밀 DEM을 이용하여 경사, 토석류 이동 방향, 계곡을 추출한 결과에 토석 부피, 물 부피, 속도, 유효 점도, 동적 마찰 계수를 기초로 한 유한차분법을 적용하여 시간에 따른 대상지역의 토석류 이동 형태 및 피해범위를 산출하였다. 그 후 제안된 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 방법의 신뢰성 및 효용성을 검증하기 위하여 동일한 대상지역에 대하여 SINMAP 및 지형해석에 의한 토석류 해석을 수행하고, 그 해석결과를 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 결과와 비교·분석하였다.

그 결과, 본 연구에서 제안한 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 방법은 기존의 토석류 발생가능성 예측방법인 SINMAP 및 지형해석 방법과 매우 유사한 결과를 나타내어 우리나라 지역의 토석류 발생가능성 예측에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 분석되었다. 더불어 본 연구에서 제안한 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 방법을 이용하는 경우, 단순한 토석류 위험지수(위험도)만을 제시하는 기타의 방법에 비해 토석류 발생량까지 동시에 예측할 수 있어 보다 효율적인 토석류 방재대책에 활용될 수 있을 것으로도 판단되었다.

또한 본 연구에서 제안한 GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 방법을 토대로 토석류와 밀접한 연관을 갖는 수리·수문적 구조, 식생, 지질 및 토질구조, 강수량 등의 정보를 보다 정확

하게 활용한다면, 우리나라 지역에 대하여 보다 정확한 토석류 발생가능성 예측을 수행할 수 있을 것으로도 기대된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업 (CATER 2009-3111)의 지원으로 수행되었습니다. **KAGIS**

참고문헌

- 국립방재연구소. 2003. 지리정보시스템을 이용한 사면붕괴 재해연구.
- 소방방재청. 2008. 2007년 재해연보.
- 유남재, 전상현, 박남선. 2008. 강원도 토석류 산사태의 특성에 관한 연구. 강원대학교 산 업기술연구소 논문집. 28(A):3-10.
- 유병옥, 장범수, 최승일, 최우경. 2006. 고속도로 변 토석류 피해발생 및 대책. 한국지반환경 공학회 학술발표회논문집. pp.115-127.
- 윤홍식, 이동하, 서용철. 2009. GIS 기법 및 발생자료 분석을 이용한 산사태 위험지도 작성. 한국지리정보학회지 12(4):59-73.
- 위광재, 이영균, 이동하, 서용철. 2010. GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 프로그램 개발. 한국방재학회논문집. 10(1):49-55.
- 이동하, 김영섭, 서용철. 2009a. 고해상도 항공 라이다 DEM 해석을 통한 강원도 일원의 산 사태 예측 가능성 분석. 한국GIS학회지 17(3):381-387.
- 이동하, 이영균, 서용철. 2009b. 스트리밍 방식을 이용한 대용량 DEM 프로세싱 프로그램의 개발. 한국지형공간정보학회지 17(4):61-66.
- 이사로, 최위찬, 장범수. 2002. 지질구조자료를 이용한 산사태 취약성 분석 기법 개발 및 적용 연구. 한국GIS학회지 10(2):247-261.
- 장현익, 김경석, 이상돈, 유병옥. 2008. 영동 고속도로 토석류 SINMAP해석. 대한토목학 회 학술대회 논문집. pp.2972-2975.
- 전병희, 장창덕, 김남규. 2010. 지상 LiDAR를 이용한 토석류 발생에 의한 침식, 퇴적량 측정. 한국지리정보학회지 13(2):54-63.
- 조홍동, 배우석. 2007. 최근 국내 토석류의 발생과 방재대책. 한국지반환경공학회 지반환경 8(3):6-10.
- 한국도로공사 도로교통기술원. 2004. GIS를 이용한 홍수 시 고속도로 사면붕괴 특성평가 연구.
- Burrough, P.A. and R.A. McDonnell. 1998. Principles of Geographic Information System. Oxford University Press, New York.
- Carrara, A. and F. Guzzetti. 1999. Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. Natural Hazards 20:117-135.
- Glenn, N.F., D.R. Streutker, D.J. Chadwick, G.D. Thackray and S.J. Dorsch. 2006. Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. Geomorphology 73:131-148.
- Guth, P.L. 2003. Eigenvector analysis of digital elevation model in a GIS: geomorphometry and quality control. In: I.S. Evans et al.(eds.). Concepts and Modeling in Geomorphology: International Perspectives. TERRAPUB, Tokyo, Japan, pp.199-220.
- Kasai, M., M. Ikeda, T. Asahina and K. Fujisawa. 2009. LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a steep and rocky region of Japan.

- Geomorphology 113:57–69.
- Lorenzini, G. and N. Mazza. 2004. Debris flow : phenomenology and rheological modelling. WIT Press.
- McKean, J. and J. Roering. 2004. Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology* 57:331–351.
- Pack, R.T., D.G. Tarboton and C.N. Goodwin. 1998. The SINMAP approach to terrain stability mapping. In: D.P. Moore and O. Hungr, Editors, 8th Congress of IAEG vol. 2, Balkema, The Netherlands, pp.1157–1165.
- Rickenmann, D., D. Laigle, B. McArdell and J. Hubl. 2006. Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. *Computational Geosciences* 10:241–264.
- Wang, C., S. Li and T. Esaki. 2008. GIS-based two-dimensional numerical simulation of rainfall-induced debris flow. *Natural Hazards and Earth System Science* 8:47–58.
- Woodcock, N.H. 1977. Specification of fabric shapes using an eigenvalue method. *Geological Society of America Bulletin* 88:1231–1236.
- WP/WLI (International Geotechnical Societies UNESCO Working Party on World Landslide Inventory). 1990. A suggested method for reporting a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 41:5–12. **KAGIS**