

산사태 및 토석류 피해 경감을 위한 지반 재해위험지도 작성 및 활용



오 경 두 |

육군사관학교 건설환경공학과 교수
okd0629@hanmail.net



강 병 화 |

한국방재협회 회장
ka12222@naver.com



이 창 희 |

한국방재협회 정책연구실 실장
lch75039@hanmail.net



류 지 협 |

한려대학교 토목공학과 교수
chryu2@daum.net

좁은 지역에 강우가 집중되는 호우 특성을 가지게 되었다. 이러한 국지성 집중호우에 관한 피해사례는 과거 하천과 관련되어진 재해 피해가 많이 발생되었으나, 홍수 방어를 위하여 지속적인 하천정비와 시설물 등의 설치로 점차 감소되어지는 추세이다. 반면 산사태나 급경사지 붕괴로 인한 피해는 최근 10년간의 자연재해 사망자 중 26%에 해당하는 177명을 기록할 정도로 점차 증가되는 추세를 보이고 있다. 산사태로 인한 피해가 증가하고 있으나, 기존 산사태 위험지도는 산사태 위험지역이 광범위하여 피해예상지역의 파악이 어려우며, 우면산 산사태 및 춘천 산사태 등의 사례와 같이 급경사지 관리지역 외에서 피해가 발생하고 있다.

우리나라의 산사태 유형은 그림 1에 나타난 바와 같이 토석류와 같은 흐름이 72%, 슬라이딩과 같은 평행활동이 26%를 차지하며 회전활동은 불과 2% 정도 밖에 되지 않는다. 이것은 토심이 얇고 물골이 잘 발달한 우리나라 산지의 특성과 밀접하게 관련되어 있다. 산지에서 발생한 평행활동은 대부분 계곡의 물과 섞여서 토석류로 변하게 되므로 우리나라에서 발생하는 산사태 피해 유형은 토석류가 거의 대부분을 차지하고 있다. 따라서 산지와 인접한 주거지역에서는 산사태 자체 보다 산사태로 인한 토석류 피해 예방에 주력해야 한다.

1. 서론

전 세계적으로 이상기후로 인하여 자연재해가 빈번해지고 있으며, 우리나라 또한 지속시간은 짧고

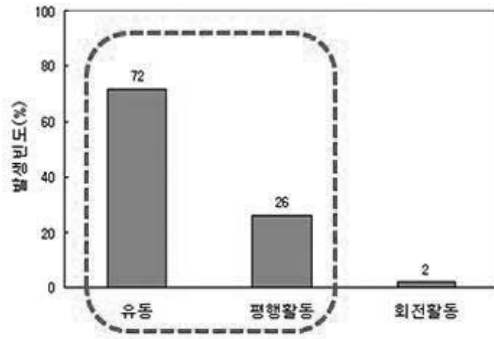


그림 1. 우리나라의 산사태 유형

2. 산사태와 토석류 발생 메커니즘

산지 급경사면에 위치한 흙은 높은 위치에너지를 가진 불안정한 상태에 놓여있게 되는데, 흙과 기반암과의 마찰력, 나무뿌리와 흙, 그리고 흙 간의 점착력 및 사면 아래 쪽 흙들의 지지력 등으로 경사면에서 지탱되어지고 있다. 그러나 집중호우가 발생되면 흙은 물로 포화되기 시작하고 흙 간의 점착력이 약해지면서 나중엔 사라져 버리게 된다. 또한 강우가 지하수 형태로 유입되어 사면이 포화되면 흙과 식생의 점착력이 사라져버리고 간극 수압은 증

가하게 되어 지지력이 급격하게 감소하게 되는데 설상가상으로 물로 포화되어진 흙의 무게가 증가하면서 사면 아래쪽 흙들이 지탱하기 어려운 상태가 되어 언제든지 붕괴될 위험에 처해지게 된다. 산지만이 아니라 우리 주변에 널려 있는 인공 급경사지도 마찬가지이다.

그런데 이런 산사태나 급경사지 붕괴 보다 더욱 무서운 것이 토석류이다. 산사태가 발생하여도 산지에 그대로 머물러 있다면 별다른 피해를 발생시키지 않을 수 있다. 그런데 산사태가 토석류로 돌변하면 40미터가 넘는 넓은 도로를 초속 20미터의 속도로 순식간에 넘어서 아파트 3층까지 쳐 오르는 무시무시한 괴물이 된다. 토석류가 발생하는 원인을 살펴보면 역시 물 때문이다.

산지 정상 부근에서는 그림 2와 같이 깔때기 모양이나 부채꼴 모양으로 지하수 뿐만 아니라 지표수가 수렴하면서 계류부를 형성하게 되는데 집중호우 중에 지표수가 모여서 만나는 계류부 시작 지점부터 유속과 수심이 증가하여 물의 에너지가 커지게 된다. 계류부 형성 지점부터 에너지가 커진 물은 경사면 위 쪽 흙을 간신히 지탱하고 있던 급경사면 아래 쪽 흙들을 세굴시켜 사면 하부침식(slope undercutting)을 발생시키게 된다. 세굴이 진행되

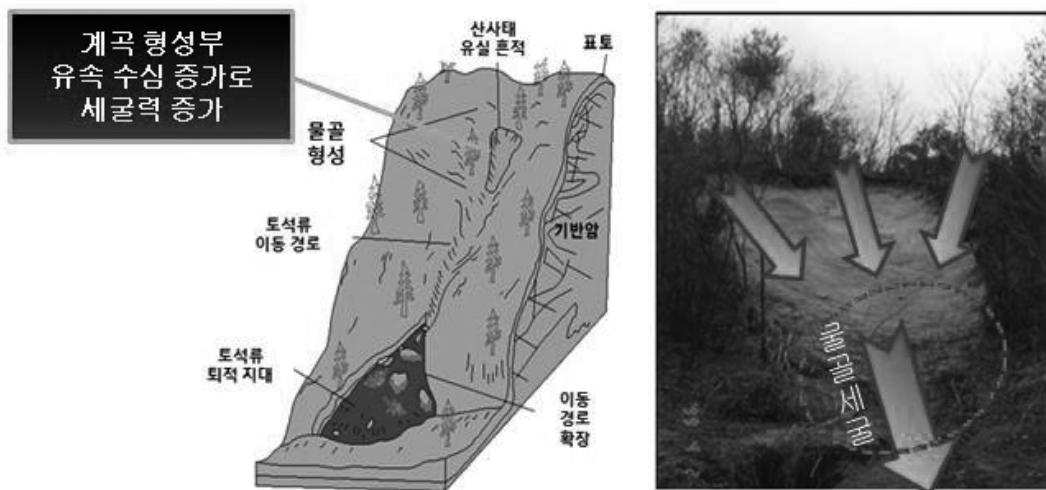


그림 2. 토석류 발생 개념도

학술/기술기사

면 경사면 위 쪽에 있는 흙들은 허공에 떠 있는 것과 같이 불안한 상태에서 순식간에 슬라이딩이 발생하게 되며, 계곡의 물들과 뒤섞이면서 액체 상태로 변하여 마치 댐이 붕괴된 것처럼 천둥과 같은 폭음을 내면서 계곡 아래로 내달리게 된다.

3. 지반재해위험지도의 제작

급경사지 재해예방에 관한 법률 제20조(급경사지에 관한 정보체제의 구축)에서 소방방재청장은 각종 설계·시공 및 붕괴위험예측 등에 활용할 수 있는 전국단위의 지반재해위험지도도를 작성하여 보급하여야 하는데 이를 위해서는 산사태 및 급경사지 붕괴에 대한 국민의 안전을 확보할 수 있는 신뢰성 있는 지반재해위험지도 제작이 필요하다.

이에 자연재해저감기술개발사업단에서는 대전대학교, 육군사관학교, (특)한국방재협회, (사)사면재해경감협회, 강릉원주대학교, 노아솔루션(주)으로 구성된 연구진을 중심으로 2012년 4월부터 3년간

집중호우를 고려한 급경사지 재해위험도 정밀평가 기법 및 지반재해위험지도 개발 연구를 수행 중에 있으며, 1차년도는 서울시와 부산시를 시작으로 2차년도는 5개광역시, 3차년도 9개 시군에 대해서 지반재해위험지도 작성을 추진 중이다.

연구진에서 개발중인 지반재해위험지도는 축대·옹벽 붕괴시 매몰위험지역, 산사태로 인한 토석류·돌발홍수 속도와 영향범위, 지하수 포화대, 위험 물골 정보까지 상세히 제공한다. 즉, 전국을 가로 세로 2m 크기의 격자로 세분하여 각 격자별로 GIS 기반 시뮬레이션 모형에 의하여 집중호우에 의한 지하수 포화 상태와 위험한 물골 형성을 모의한 후 무한사면안정해석기법으로 사면의 안정계수를 결정하는 데 지하수의 영향과 사면경사로 인해 토석이 미끌어 지려는 힘과 이를 저지하는 토양과 기반암과의 마찰력, 토양과 나무뿌리의 점착력 등을 포함하는 물리적인 해석에 바탕을 두고 있다. 이러한 물리적 해석 방법은 식생의 종류, 경사면의 형태, 모암의 종류 등 여러 개의 경험적인 인자에 대한 가중치를 조합하여 산사태 위험도를 해석하던

표 1. 연구내용 및 범위

구분	연구개발목표	연구개발내용 및 범위
1차년도 (2012)	- 서울, 부산지역 급경사지 지반재해위험지도 제작 및 현장 적합성 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 집중호우가 고려된 급경사지 붕괴 매커니즘 및 해석 이론 분석 • 집중호우가 고려된 급경사지 붕괴 해석을 위한 수치모형 분석 • 집중호우가 고려된 급경사지 지반재해위험지도 작성 기준 및 절차 정립 • 집중호우가 고려된 급경사지 지반재해위험지도 작성(서울, 부산) • 집중호우가 고려된 급경사지 지반재해위험지도에 대한 적정성 평가 및 보완 • 급경사지 피해 사례조사 및 지반재해위험지도의 현장점검 및 평가 • 급경사지 위험지도 viewer 시스템 개발
2차년도 (2013)	- 5개광역시 급경사지 지반재해위험지도 제작 및 관리시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 급경사지 지반재해위험지도 제작 기본계획 수립 및 1차 공청회 실시 • 집중호우가 고려된 급경사지 지반재해위험지도 작성(5개 광역시) • 집중호우가 고려된 급경사지 지반재해위험지도에 대한 적정성 평가 및 보완 • 급경사지 피해 사례조사 및 지반재해위험지도의 현장점검 및 평가 • 급경사지 재해 자료관리 시스템 개발
3차년도 (2014)	- 9개 시군 급경사지 지반재해위험지도 제작 및 Web 기반 재해지도 서비스 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> • 급경사지 지반재해위험지도 제작 기본계획 재수립 및 2차 공청회 실시 • 집중호우가 고려된 급경사지 지반재해위험지도 작성(9개 도별 1개 시군씩 9개 시군) • 집중호우가 고려된 급경사지 지반재해위험지도에 대한 적정성 평가 및 보완 • 집중호우가 고려된 급경사지 지반재해위험지도의 활용 방안 정립 • 집중호우가 고려된 급경사지 지반재해위험지도의 유지 관리, 갱신 및 확대 적용 방안 제시 • 급경사지 피해 사례조사 및 지반재해위험지도의 현장점검 및 평가 • Web 기반 급경사지 재해지도 서비스 시스템 구축

기존의 통계적이거나 경험적인 방법과 달리 객관성과 일관성이 높은 위험지도의 작성이 가능하다.

사면에 대한 붕괴위험도 분석 결과 사면안정계수가 1.0 이하로 붕괴 위험이 매우 높은 자연산지에 대해서는 에너지선 방법에 의하여 계산된 붕괴시 토석류의 유하 경로와 속도 및 피해 범위를 제공하며 피해 정도가 토석류 보다 약한 돌발홍수의 유속과 피해범위도 함께 제공한다. 주거지역 내에 위치

하고 있는 축대, 옹벽, 절개지 등 인공사면에 대해서도 사면안정계수가 1.0 이하인 경우 붕괴된 사면이 무너지는 속도와 매몰피해범위를 제공한다. 연구진이 개발중인 기반재해위험지도는 자연사면은 물론 주거지역 내의 인공사면을 포함한 각종 비탈면의 붕괴위험지역(1, 2, 3등급군) 뿐만 아니라 토석류가 발생할 수 있는 위험물골, 토석류와 돌발홍수의 속도와 피해범위, 축대나 옹벽의 붕괴속도와



그림 3. 서울시 기반재해위험지도 제작 사례



그림 4. 부산시 기반재해위험지도 제작 사례

구 분	산사태·토석류·돌발홍수 피해	
	개소	비율(%)
붕괴위험 1등급군	52	24.4
붕괴위험 2등급군	23	10.8
붕괴위험 3등급군	29	13.6
토석류 위험지역	87	40.8
돌발홍수 위험지역	4	1.9
안전지역	18	8.5
전 체	213	100

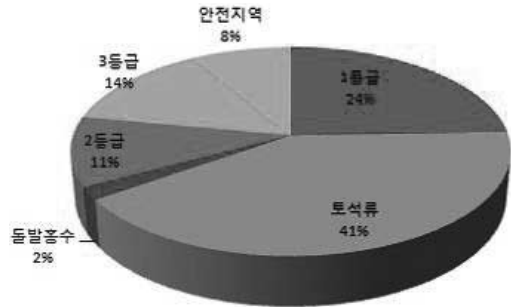


그림 5. 서울시 지반재해위험지역별 피해발생 현황

매몰피해범위를 해당 지역의 도로나 주택 및 각종 시설물 등과 중첩하여 지도상에서 인명피해 위험지역을 바로 확인할 수 있도록 하였다(그림 3, 4).

이번에 개발된 지반재해위험지도에 대하여 (사)사면재해경감협회에서 2010년과 2011년 우면산을 포함한 서울시 전역에서 발생한 213개소의 산사태와 토석류 피해지역을 대상으로 비교 검증한 결과 92%의 일치율을 보였으며, 피해지역에 대한 GPS 위치 오차 등을 감안할 때 100%에 가까운 일치율로 매우 높은 수준의 정확도를 보이고 있다(그림 5).

4. 결론

지난 2월 19일 서울시 한국과학기술사회관에서 본 연구결과를 바탕으로 서울시 등 급경사지 관련 분야 실무 담당자들을 대상으로 지반재해위험지도의 제작과정, 지도제작결과 및 활용법을 설명하는 산사태 및 토석류 피해 경감을 위한 지반재해위험지도 활용 워크숍을 한국방재협회 주관으로 시행하여 높은 관심과 호응을 얻었다. 향후 지반재해위험지도는 이와 같이 해당 지자체 방재 담당 공무원들을 대상으로 의견 수렴과 보완을 거쳐 최종적인 지반재해위험지도도를 작성 공급할 예정이다.

본 연구에서 개발한 산사태 위험지역 및 토석류의 유동 경로와 피해예상지역의 시뮬레이션 기법을

통해 산사태와 토석류 방재 분야에 획기적인 발전이 기대되며, 피해범위를 정확하게 예측할 수 있는 지반재해위험지도도를 작성, 웹기반으로 제공하므로써 인명 및 재산피해 감소 및 대국민서비스 향상과 정부의 신뢰성 제고에 기여할 것으로 판단된다.

- * 무한사면안정해석 : 토심이 얇고 활동사면이 비교적 넓은 경우 사면 가장자리의 영향을 배제하여 해석을 단순화하는 사면안정해석기법으로 토심이 얇고 지하수의 영향을 크게 받는 우리나라 산지에 적합한 해석기법이다.
- * 에너지선 방법 : 1932년 스위스 지질학자 Albert Heim이 화산 분화시 발생하는 쇄설물의 동역학적인 거동을 예측하기 위하여 제안한 이후 미국지질조사국의 화산 쇄설물 피해 예측 모형은 물론 낙석, 눈사태, 토석류 등의 피해 예측에 널리 사용되고 있는 방법이다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업인「집중호우를 고려한 급경사지 재해위험도 정밀평가기법 및 지반재해위험지도 개발」(NEMA-자연-2012-58)과제의 일환으로 이루어 졌습니다. 이에 감사드립니다. ☺



그림 6. 지반재해위험지도 활용 워크숍 개최 현장

참고문헌

1. 오경두 등(2012) SINMAP을 이용한 우면산 지역의 산사태 위험도 분석, 대한토목학회학술발표회논문집, pp. 1918-1921.
2. 오경두 등 (2006) GIS 기반 산사태 예측모형의 적용성 평가, 한국수자원학회논문집, 제39권, 제1호, pp. 23-33.
3. 오경두 등 (2005) 도시유역 CN 산정연구, 한국수자원학회논문집, 제38권, 제12호, pp. 1009-1020.
4. 오경두 (2011) GIS에 의한 산사태 돌발홍수 위험지역 분석, 한국방재저널 2011년 9·10월호, 한국방재협회.
5. 경기도 (2001) 경기도 치수종합대책수립 연구용역 결과보고서, pp. 797-861.
6. 서울특별시 (2012) 우면산 산사태 재해복구사업 사전심의요청서.
7. Ward, S.N. and Day, S. (2006) Particulate kinematic simulations of debris avalanches: interpretation of deposits and landslide seismic signals of Mount Saint Helens, 1980 May 18. Geophys. J. Int. (2006) 167, pp. 991-1004.