



지반재해위험지도를 이용한 산사태 등 토사재해 피해위험지역관리



오 경 두
육군사관학교
건설환경학과 교수



강 병 화
(특)한국방재협회
회장



허 재 영
대전대학교
토목공학과 교수



이 창 희
(특)한국방재협회
정책연구실 실장



황 신 범
(특)한국방재협회
정책연구실 연구원

1. 서론

전 세계적인 이상기후로 자연재해가 빈번해지고 있으며 또한 피해도 더욱 극심해지고 있다. IPCC 4차 보고서에 의하면 1990년 이후 전 세계적으로 평균 기온이 0.74℃ 상승했으며 21세기 말에는 6.4℃까지 상승할 것으로 전망하고 있다. 그런데 우리나라는 같은 기간 범지구적인 기온 상승의 2배에 해당하는 1.5℃나 상승했으며 이에 따라 강우 및 강설량이 증가하는 추세를 보이고 있다. 1920년대 이후 우리나라의 강수량은 7%, 강우강도는 18% 증가하였으며 강수일수는 14% 감소하였다. 이것은 강우가 집중되는 경향을 보여주는 것으로 집중호우 형태의 강우가 증가함을 의미한다. 최근의 1일 100mm 이상 호우 발생빈도는 1970년대 대비 1.7배 증가하였고 재해 발생 빈도도 1970년대 연평균 5.3회에서 8.8회로 크게 증가하였다. 서울의 강우 형태도 강우의 지속시간은 짧아지면서 강우량은 증가하는 재해 유발 형태로 변화하고 있다.

그림 1에 나타난 바와 같이 과거 자연재해의 대부분을 차지하던 하천관련 피해는 전국적으로 하천 정비 등이 이루어지면서 점차 감소해가고 있는 반면 산사태 등 토사재해로 인한 피해는 증가해 가는 추세를 보이고 있다. 2000년부터 2009년까지 최근 10년간 자연재해로 인한 사망자 684명중 26%에 해당하는 177명이 산사태 등 토사재해로 인해 사망하였다. 특히, 2011년 집중호우 당시 산사태, 절개지 등으로 인한 사망자는 57명으로 2002년 77명에 이어 두 번째로 많은 사망자를 기록하고 있다. 특히, 산지에서는 집중호우 시 슬라이딩 형태의 산사태가 발생한 후 토석류를 형성하여 계곡 하류부에 위치한 주거지역에 큰 피해를 발생시키고 있으나 이에 대해서는 예측 기술이 미흡하여 방재행정에 활용이 제한되고 있다. 즉, 소방방재청에서는 13,599개소에 급경사지 관리를 수행하고 있고, 산림청에서는 산사태 위험지역 관리가 수행되고 있으나 산사태 위험지역은 너무 광범위하여 피해예상지역을 파악하기 어렵고, 주요 피해가 산사태가 아닌 토석류가 주 피해 유형이나 이에 대한 위험정도 파악이 제대로 되고 있는 않은 상황이다. 2011년 우면산 산사태 및 춘천 산사태 등 역시 관리지역 외에서 피해가 발생하였다.

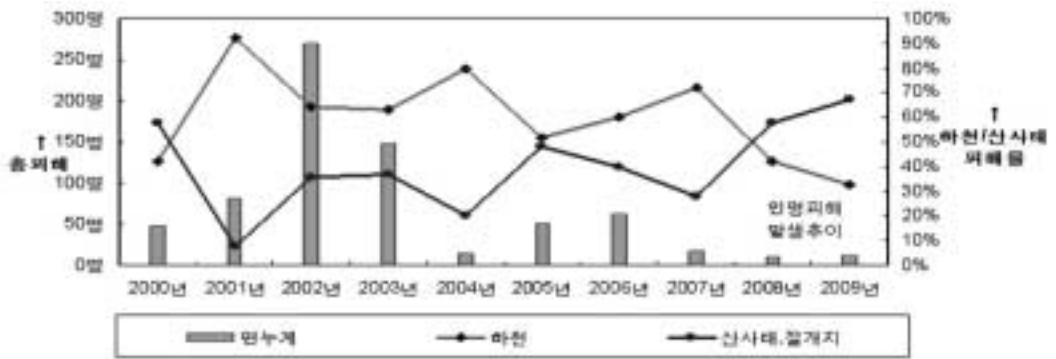


그림 1 최근 10년간 자연재해 사망자 추세

2. 지반재해위험지도의 제작

급경사지 재해예방에 관한 법률 제20조(급경사지에 관한 정보체제의 구축)에서 소방방재청장은 각종 설계·시공 및 붕괴위험예측 등에 활용할 수 있는 전국단위의 지반재해위험지도를 작성하여 보급하도록 되어 있으나 현재까지 제작 보급되지 않고 있는 상황이다. 그러므로 시민의 안전을 확보할 수 있는 과학적이고 신뢰성 있는 지반재해위험지역 분석에 관한 연구가 필요하다.

이에 자연재해저감기술개발사업단에서는 대전대학교, 육군사관학교, (특)한국방재협회, (사)사면재해경감협회, 노아솔루션(주)으로 구성된 연구진을 중심으로 2012년 4월부터 3년간 집중호우를 고려한 급경사지 재해위험도 정밀평가기법 및 지반재해위험지도 개발 연구를 수행 중에 있으며, 1차년도는 서울시와 부산시를 시작으로 2차년도는 5개광역시, 3차년도 9개 시군에 대해서 지반재해위험지도 작성을 추진 중이다.

연구진에서 개발중인 지반재해위험지도는 전국을 가로 세로 2m 크기의 격자로 세분하여 각 격자별로 GIS 기반 시뮬레이션 모형에 의하여 집중호우에 의한 지하수 포화 상태와 위험한 물결 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. 이와 함께 집중호우로 인한 산사태 위험지역뿐만 아니라 토석류가 발생할 수 있는 위험물결, 토석류의 피해영향지역을 분석하고, 해당 지역의 도로나 주택 및 각종 시설물 등과 중첩하여 지도상에서 위험지역을 바로 확인할 수 있도록 하였다. 산사태 위험지역과 더불어 토석류의 이동경로와 계곡 하류부 토석류 피해예상지역의 범위를 예측함으로써 향후 귀중한 인명과 재산피해를 줄이는 것은 물론 과학적이고 효율적인 방재행정구현으로 대국민 서비스 향상과 정부의 신뢰성 제고에 크게 기여할 것으로 예상된다.

표 1과 같이 연구진에서 개발중인 지반재해위험지도와 산림청에서 제공하는 산사태위험지도와의 차이는 산림청 산사태위험지도는 산사태 위험성이 높은 산지 정보를 제공하는 붕괴지역 중심의 위험도를 분석하는 기술에 집중되어 있는 반면, 연구진에서 개발중인 지반재해위험지도는 급경사지에 대한 붕괴위험지역과 더불어 붕괴시 토석류·돌발홍수 피해위험지역 정보를 제공하는 피해 지역 중심의 위험지도이다.

기획특집

표 1 재해위험지도의 비교

구분	산림청 산사태위험지도	연구진에서 개발중인 지반재해위험지도
분석대상 사면	- 자연 산지	- 자연 산지 + 인공 사면(축대, 옹벽, 절개지, 성토지 등)
피해분석 범위	- 자연 산지	- 자연 산지와 인공 사면 및 이에 인접한 도로, 주거지역 등 인명이나 재산 피해 예상 지역
제공 정보	- 산사태위험도(1등급~5등급)	- 붕괴위험도(1등급~7등급) - 토석류 피해위험지역과 유하속도 - 돌발홍수 피해위험지역과 유하속도
제작 방법	- 임상(흔효림, 활엽수림, 침엽수림), 경급(나무밀도지름), 사면경사도, 사면방위(동서남북향), 사면길이, 사면곡률, 모암의 종류, 토심, 지형습윤지수에 대한 점수를 종합하여 판정	- 집중호우시 급경사지로 침투하는 지하수 모의 - 급경사지 지하수위 상승에 따른 토괴중량증가, 간극수압증가, 마찰력 감소, 점착력 감소 모의 - 사면의 전단강도(저항력)와 전단응력(파괴력)의 비인 사면안정계수에 의한 붕괴위험등급 판정 - 붕괴위험1등급군(사면안정계수 0.0~1.0)의 고위험군 사면붕괴시 토석류와 돌발홍수 발생을 모의하여 피해예상지역과 유하속도 제공

사면에 대한 붕괴위험도 분석 결과 사면안정계수(SI)가 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 위치하고 있는 축대, 옹벽, 절개지 등 인공사면에 대해서도 사면안정계수가 1.0 이하인 경우 붕괴된 사면이 무너지는 속도와 매몰피해범위를 제공한다. 사면안정계수에 따른 피해유형은 표 2와 같다.

표 2. 지반재해위험 등급별 피해 특성

구분	특 성	
	경사도	피해 유형
붕괴위험 1등급군 (0<SI(1.0)	27도 이상	•도심지 자연공원 5부 능선 위쪽부터 산지 정상 부근 사이에서 주로 나타남 •주거지역에서는 절개지, 축대, 옹벽, 인공사면, 절토지역 등에서 나타남 •붕괴 위험 높고 매물 사고나 토석류를 발생시킬 가능성이 있음
붕괴위험 2등급군 (1.0<SI(1.5)	20~27도	•도심지 자연공원 5부 능선 아래에서 주로 나타남 •사면 붕괴와 유실이 복합된 형태로 피해가 발생 •자연상태에서 붕괴 위험 낮으나 사소한 개발행위에도 붕괴위험
붕괴위험 3등급군 (1.5<SI(3.0)	10~20도	•도심지 근린공원이나 성토지역에서 주로 나타남 •사면 붕괴 보다는 지표수 집중에 의한 사면 유실 형태로 피해 발생
토석류	주로 평지	•산지의 붕괴위험 1등급군과 위험 물골로 연결된 평지 •인명피해의 위험이 높지만 육안으로는 식별 곤란
돌발홍수	주로 평지	•산지의 붕괴위험 1등급군과 위험 물골로 연결된 평지(토석류 보다 먼거리 까지 영향) •반지하나 지하공간 피해 위험이 높지만 육안으로는 식별 곤란

연구진이 개발중인 지반재해위험지도는 그림 2와 같이 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 매몰피해범위를 해당 지역의 도로나 주택 및 각종 시설물 등과 중첩하여 지도상에서 인명피해 위험지역을 바로 확인할 수 있도록 하였고, 그림 3은 구룡산 대모산 일대를 3차원으로 나타낸 결과이다.

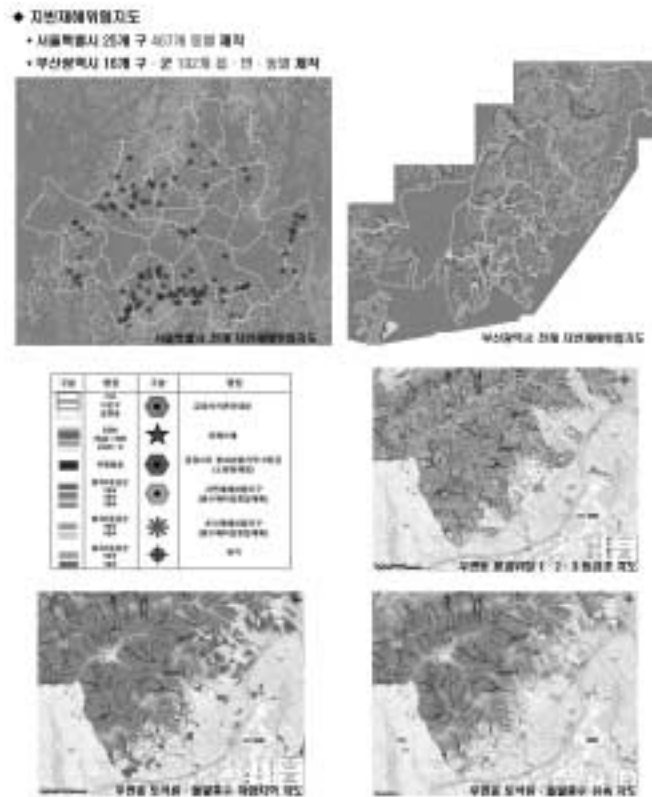


그림 7. 서울시 및 부산시 지반재해위험지도의 제작 예



그림 8. 3D 지반재해위험지도의 예

기획특집

이번에 개발된 지반재해위험지도에 대하여 (사)사면재해경감협회에서 2010년과 2011년 우면산을 포함한 서울시 전역에서 발생한 248개소의 산사태와 토석류 피해지역 및 부산시 111개소를 대상으로 비교 검증한 결과 피해지역에 대한 GPS 위치 오차 등을 감안할 때 100%에 가까운 일치율로 매우 높은 수준의 정확도를 보이고 있다(그림 4).

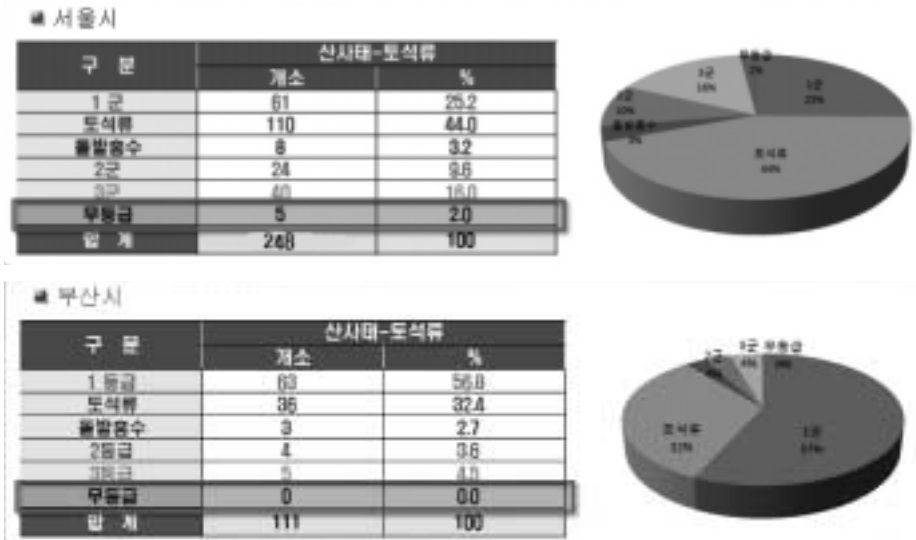


그림 4. 피해지역과의 일치 여부

본 연구진은 지난 2월 19일과 4월 12일 서울시 한국과학기술회관에서 산사태 및 토석류 피해 경감을 위한 지반재해위험지도 활용 워크숍을 시작으로 서울시와 부산시 급경사지 관련 분야 실무 담당자들을 대상으로 지반재해위험지도의 제작과정, 지도제작결과 및 활용법을 설명하는 워크숍을 시행하였고 높은 관심과 호응을 얻었다(그림 5). 이와 함께 서울시에 지반재해위험지도를 활용하기 위한 실무교육 및 의견수렴(5월 16일) 과정을 거쳤으며 2차년도에 작성될 예정인 5대광역시에 대한 지반재해위험지도에 대해서도 해당 지자체 방재 담당 공무원들을 대상으로 의견 수렴과 보완을 거쳐 최종적인 지반재해위험지도를 작성 공급할 예정이다.

본 연구에서 개발한 지반재해위험지도는 산사태 위험지역 및 토석류의 이동 경로와 피해예상지역의 시물레이전 기법을 통해 산사태와 토석류 방재 분야에 획기적인 발전이 기대되며, 피해범위를 정확하게 예측할 수 있는 지반재해위험지도를 작성, 웹기반으로 제공함으로써 인명 및 재산피해 감소 및 대국민서비스 향상과 정부의 신뢰성 제고에 기여할 것으로 판단된다.

3. 결론

산사태 관련 피해 증가의 원인을 자연적인 요인과 인위적인 요인으로 구분하여 살펴볼 수 있다. 첫 번째, 자연적인 요인은 지금까지 설명한 바와 같이 재해 유발형 집중호우의 증가이다. 강한 강도의 호우가



그림 5. 서울시 부산시 지반재해위험지도 활용을 위한 실무교육 및 의견수렴 현장

집중적으로 내릴 경우 급경사를 이루는 사면의 붕괴 위험성은 급격하게 증가하게 된다. 두 번째, 인위적인 요인으로는 난개발과 관리 부재를 들 수 있다. 자연친화적인 환경을 선호하는 최근의 사회적 추세로 인하여 산지 개발이 크게 증가하였고 아파트 등 거주지역이 급경사지역에 근접하게 위치하는 사례가 급증하고 있다.

그동안 산사태 등 토사재해 관련 관리는 발생위치에 따라 급경사지는 소방방재청, 자연사면은 산림청, 도로변 급경사지 등은 국토교통부이 각각 관리됨에 따라 종합적·체계적 관점의 토사재해 방재대책에 한계가 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 부처간 자료를 공동 활용 하고, 기관별로 운영 중인 산사태 등 토사재해 조기감지 및 위험지역 예측 정보 등 각 기관의 장점을 연계 보완하여 산사태 등 토사재해 방재대책 수립에 활용하여야 한다.

기후 변화의 시대에 이상기후에 대응하면서 살아가기 위해서는 위험을 줄이기 위한 노력을 기울여야 한다. 이상기후를 타하기 위해 앞서 우리 스스로를 지키려는 마음가짐과 관련 지식이 필요하며 이를 행동으로 옮길 수 있는 교육과 훈련이 평상시에 이루어져야 한다.

그림 6은 우면산 산사태가 발생한 같은 날 저녁에 4명이 산사태에 이은 토석류로 목숨을 잃은 도솔암의 사고 당시 모습과 현재의 변화된 모습이다. 마치 균용 병커와도 같이 튼튼한 콘크리트 벽체에 자그마한 철문을 달았다. 정부에서 지원해서 만든 것도 아니고 많은 사비를 들여서 유족들이 만들었다고 한다. 위험한 지역에 살고 있다는 것을 알기 때문이다. 이상기후 시대를 살아가려면 알고 행동으로 옮기는 것이 힘이다. 무엇보다도 바꿀 수 없는 소중한 생명과 관련된 자연재해 앞에서 그 무서움과 더불어 피할 수 있는 지혜를 얻는 것 보다 더 중요한 일은 없을 것이다.

기획특집



그림 6. 도솔암 사고당시 및 복원현황

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업인「집중호우를 고려한 급경사지 재해위험도 정밀평가 기법 및 기반재해위험지도 개발」[NEMA-자연-2012-58]과제의 일환으로 이루어 졌습니다. 이에 감사드립니다.

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.