

# Cover Story

## 산지토사재해 사전 예방 및 피해 방지를 위한 산림과학기술의 역할



**김 경 하**  
국립산림과학원 산림방재연구과장

### 1. 들어가며

최근 지구촌은 각종 자연재해로 심한 몸살을 앓고 있다. 금년 7월 들어서 아시아와 유럽을 비롯한 전 세계가 폭우로 인한 산사태와 폭염으로 큰 피해를 입었다. 중국은 쓰촨성과 두장옌에서 산사태로 191명이 사망하고 인도는 우타라칸드주에서 폭우와 홍수로 5,748명이 사망 또는 실종된 것으로 공식 집계되었다. 일본은 7월 들어 역대 최고 온도인 39.5도의 폭염이 계속되어 85명이 사망하였다.

이러한 자연재해는 이산화탄소 등 온실가스의 증가로 인하여 지구가 더워지면서 나타나는 기후변화가 주원인이다. 우리나라도 예외가 아니다. 2011년 7월 26일부터 27일까지 서울 우면산과 춘천 마적산 자락에서 발생한 산사태와 토석류로 무고한 시민과 대학생 등 총 29명이 목숨을 잃었다. 기후변화가 핫 이슈가 되기 시작한 2000년대에 들어서는 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미 등으로 최악의 기상재해가 발생한 바 있다. 우리나라 산지의 대표적 자연재해인 산사태는 1980년대 연간 231ha 발생하던 것이 2000년대 들어 713ha로 약 3.1배 정도 증가했다. 이는 시간당 50mm 이상의 폭우가 1980년대 10.6회에서 2000년대 14.4회로 증가한 것과 무관하지 않다.

이러한 강우패턴의 변화는 우리나라 산지토사재해의 발생양상을 변화시켰다. 즉 2000년대 이전까지 우리나라의 산지토사재해는 대부분 산사태가 발생한 후 붕괴물질이 산지사면이나 산자락에 그대로 쌓여 있는 경우가 많았다. 하지만 2000년대에 들어서면서 양상이 변했다. 특히 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍

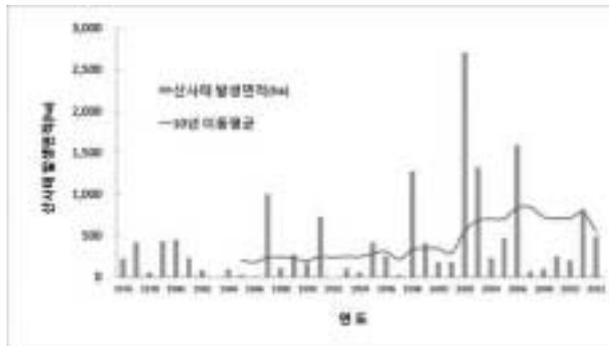
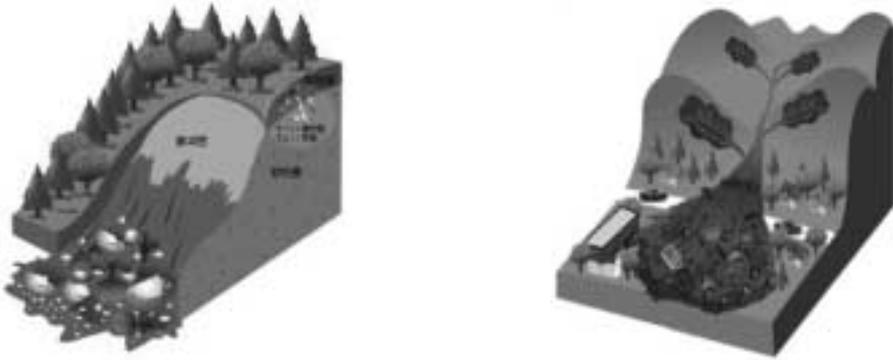


그림 2. 연도별 산사태 발생 면적 변화

매미에 의한 산사태 발생은 한 유역에서 여러 개의 산사태가 동시다발적으로 발생하고 이들 붕괴물질이 산지계류를 통해 한꺼번에 빠져 나가면서 파괴적인 토석류로 발전하였다.



산사태 : 강우로 인해 토층과 임반경계면 위의 흙이 일시적으로 흘러내리는 재해  
 토석류 : 다수의 산사태로 발생한 다량의 흙, 돌, 유목이 물과 함께 섞여 계류하류에 피해를 미치는 재해

그림 2. 산사태와 토석류 모식도

2011년에 발생한 우면산 산사태는 대형 토석류로 발전한 대표적인 사례이다. 이렇듯 산지토사재해의 양상이 바뀐 이유는 크게 두 가지를 들 수 있다. 먼저 첫째로 강우량과 강우강도가 이전 통계를 바꿀 정도로 많아졌고 세졌다. 예를 들면 우면산 산사태 발생 당시 남현 관측소의 연속강우량은 379mm였고 산사태 발생 직전 강우량은 112.5mm였다. 강우량이 기록적으로 많아지면서 붕괴물질과 빗물이 합쳐져서 유동성이 크게 증가하기 때문에 한번 발생한 토석류가 유역하부 먼 거리까지 빠른 속도로 이동하게 된다. 둘째로 1970년대 산림녹화를 시작하면서 숲이 빈약한 시기에는 산사태가 나도 쓸려 내려올 토사가 적었지만 이제 숲이 울창해지면서 토심이 깊어져 일단 산지사면이 무너지면 많은 양의 붕괴물질이 발생한다. 숲은 말뚝 효과와 그물효과로 지반을 붙잡는 효과가 커서 산사태 방지에 효과적이지만 극한강우가 내리면 그 힘을 견디지 못하고 무너진다. 다시 부연하면 숲이 좋아지면 산사태 발생 빈도는 줄어들지만 산사태 규모는 커지는 경향이 있다. 아울러 과거 산사태가 주로 산간오지에서 발생했던 것에 비해 최근에는 도시와 생활권 주변 등 장소를 가리지 않고 발생하고 있다.

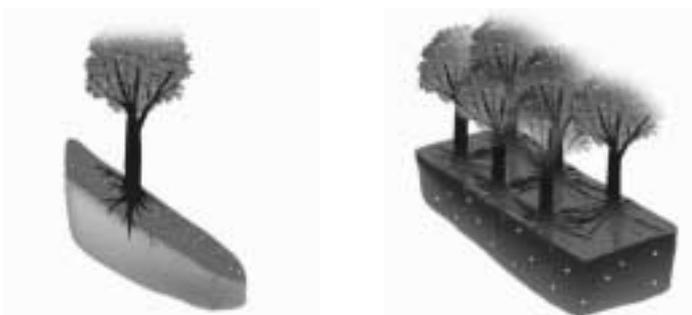


그림 3. 수목근계의 말뚝 및 그물효과

기획특집

박근혜 정부는 국민행복과 안전을 핵심 국정과제로 설정하고 모든 정부의 역량을 집중하고 있다. 하지만 기후변화는 계속 될 것이고 취약성을 극복할 수 있는 대응조치가 강구되지 않는다면 기후변화로 인한 자연재해의 피해는 갈수록 증가할 것이다. 본 글에서는 기후변화로 인한 자연재해 중 우리나라에서 대표적이라고 할 수 있는 산사태와 토석류의 발생특성을 알아보고 그동안 산림과학 분야에서 추진해 왔던 대응기술과 현재 개발 중인 기술을 살펴보고자 한다.

## 2. 우리나라에서 발생하는 산지토사재해의 특성

우리나라에서 발생하는 자연재해는 집중호우에 의한 하천홍수 및 도시침수와 산지토사재해가 대부분을 차지하고 있다. 그 중 산지토사재해는 상대적으로 많은 인명피해를 유발하고 있다. 2011년 한 해만도 산지토사재해로 43명이 목숨을 잃었다. 산지토사재해는 산사태와 토석류로 구분하는데 인명피해는 주로 토석류에 의해 발생한다.

산사태는 빗물이나 지진 등 외부의 힘에 의해서 토양층이 균형을 잃고 무너지는 현상을 말한다. 우리나라는 노년기 지형이므로 주로 빗물에 의해 토양층이 붕괴하여 산사태가 발생하는 반면에 일본은 청장년기의 지형으로 지질학적 침층 붕괴가 자주 발생하고 특히, 외부의 힘도 빗물 뿐만 아니라 지진의 영향이 매우 크다. 이러한 특성 때문에 우리나라의 산사태 발생위험을 예측하고 예지하기 위해서는 산림토양의 수문학적 기작을 정확히 이해해야한다. 안타깝게도 일부 산사태 전문가들은 토목학적 지식을 우리나라 산사태 발생기작에 그대로 적용하여 오류를 범하는 경우가 종종 있다. 산사태는 노출된 경사면에서 발생하는 것이 아니라 숲 속 토양사면에서 발생하므로 이에 대한 이해가 우선적으로 필요하다.

숲 속의 산림토양은 그야말로 살아있는 생태계의 한 구성인자이다. 그림 4와 같이 산림토양은 먼저 표면이 두터운 낙엽과 그 분해물질로 덮여 있어서 원만한 비는 대부분 바로 흡수한다. 유기물층 바로 아래는 무기입자와 유기물질이 잘 섞여서 이루어진 스펀지 층이 있다. 이 스펀지 층은 학술적으로 A층이라고 하

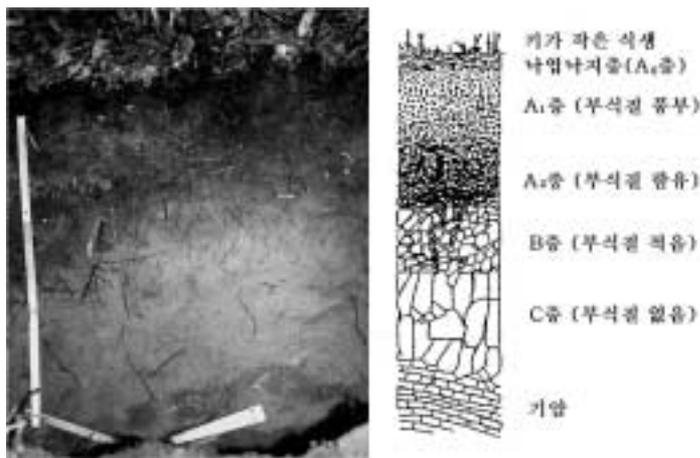


그림 4. 산림토양의 수직 구조

며 보통 공극률이 50~60%이상이다. 이 의미는 비가 100mm가 오면 50내지 60mm는 A층의 빈 공간에 다 흡수된다는 것을 뜻한다. A층 밑에는 유기물 함유량이 상대적으로 적은 B층이 자리 잡고 있다. B층은 A층에 비해 공극률이 반 정도로 감소한다.

산사태는 주로 B층과 그 아래 유기물이 없는 부분인 C층 사이에서 발생한다. 비가 내리면 산림토양의 A층과 B층에 빗물이 포화되어 평소 입자 속 공극수압이 감압(-)에서 가압(+)으로 바뀐다. 증가된 공극수압(또는 간극수압)이 토양입자 간의 응집력을 급격히 감소시키면서 토양층의 전단응력을 떨어뜨린다. 반면에 빈 공극에 빗물이 채워지면서 상부 토양층의 무게가 증가하여 중력 하중과 전단응력의 균형이 깨지면서 산사태가 발생한다. 아울러 나무뿌리는 수평 인장력이 커서 토양층을 붙잡는 인장력을 증가시키지만 나무 자체의 무게는 토양층의 중력 하중을 증가시켜서 산사태를 유발하는 요인이 되기도 하다. 이와 같이 우리나라에서 발생하는 산지토사재해는 주로 빗물에 의한 천층 붕괴가 대부분이며 발생지나 무가 많은 숲속이므로 이들의 토양학적, 수문학적, 생태학적 특성을 잘 이해해야 산지토사재해에 의한 피해를 막을 수 있다.

### 3. 산지토사재해에 대응한 산림과학기술

#### 과거의 연구 성과

우리나라에서 산림과학 분야가 산지토사재해를 다루기 시작한 것은 꽤 오래 전인 1980년대부터이다. 1986년 '산사태 발생 원인에 관한 연구'에서 산사태 유발 강우기준을 시우량 32mm, 연속 강우량 200mm 그리고 7월부터 9월까지 600mm를 제시한 바 있다. 1988년에는 '산사태 발생 예지에 관한 연구'에서 1980년부터 2년간 10개 지역 약 317개 조사지의 자료를 다변량 해석으로 분석하여 산사태 위험지 판정기준을 만들었고 이후 이 결과는 GIS를 활용한 '산사태 위험지도'를 제작하는데 기초자료로 활용되었다. 1990년대는 급경사지 인공사면의 붕괴예지와 산사태 복구사방 기준 공정 및 산사태 예방용 적정수종을 개발하였다.

#### 현재 활용 중인 연구 성과

과거 연구 성과를 바탕으로 현재 활용하고 있는 대표적인 것은 산사태정보시스템을 들 수 있다. 이 시스템은 산림청 홈페이지(www.forest.go.kr)에서 쉽게 찾아 볼 수 있으며 산사태공간정보와 산사태예보정보로 구성되어 있다. 산사태공간정보인 산사태 위험지도는 작년까지는 산사태 발생지와 비발생지의 지형, 지질, 산림조건 등 7개 인자를 독립변수로 수량화 I류를 이용하여 제작하였다. 그러나 금년부터는 산사태공간정보 고도화사업에 의거 2006년부터 최근까지 촬영한 산사태 피해지의 디지털 항공영상자료를 분석하여 약 2,000개소의 자료로 새로운 알고리즘을 개발하였다. 산사태공간정보는 특정 지역의 산사태 발생 확률을 10m 격자 단위로 나타낸 것이다. 산사태 발생 확률은 지형, 지질, 수문 및 토양인자 등 9개의 정량적 인자를 독립변수로 하여 로지스틱 회귀모형으로 분석하였고 추가적으로 임도 및 송전탑, 대형 산불피해지 등을 정성적 인자로 적용하였다.

기획특집

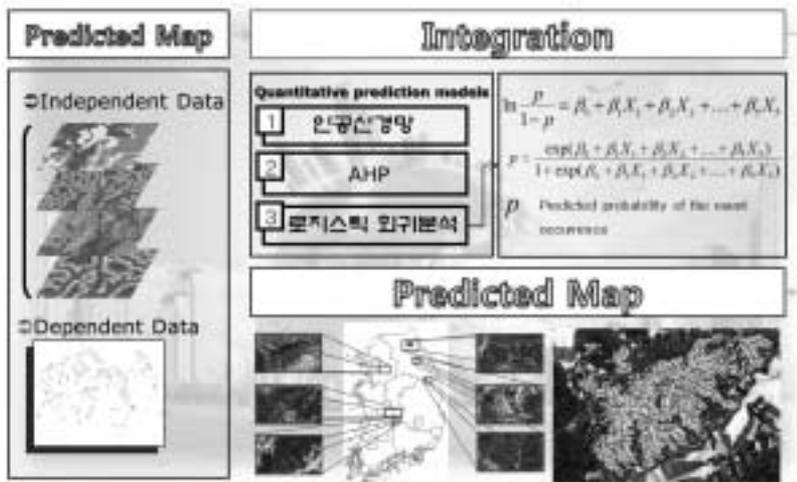


그림 5. 새로 작성한 산사태 위험지도 개발 과정

산사태예보정보는 토양내부의 지하수위를 개념화한 탱크모델을 적용하였다. 주요 내용은 탱크모델로 산사태 발생 당시의 포화정도를 수치화한 토양함수지수를 지역별로 결정하였고, 이 값과 실시간 강우량과 비교하여 산사태 예·경보를 내린다. 지역은 전국을 과거 30년간 연평균 강우량과 지질분포를 고려하여 10개 권역으로 구분하였다. 산사태 예·경보는 실시간 또는 예측 강우량을 탱크모델에 적용하여 계산된 토양 함수량이 토양함수지수의 80%일 때 산사태 주의보를, 100%일 때 산사태 경보를 발령한다.

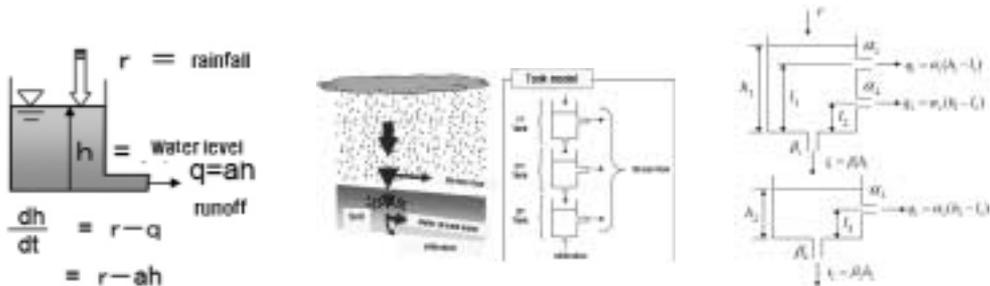
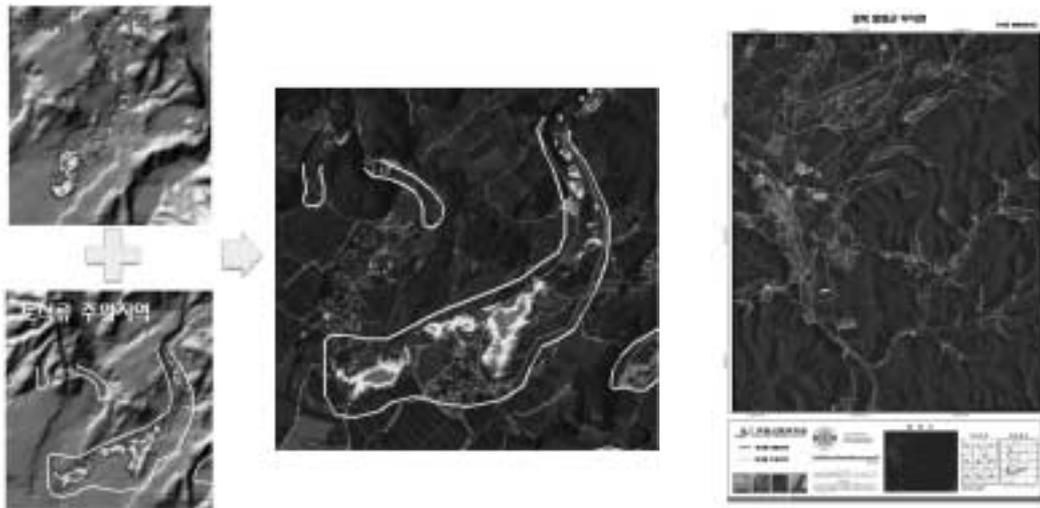


그림 6. 탱크모델 개념도



그림 7. 강우와 지질분포를 고려한 권역 구분

모두에서 언급한 바와 같이 토석류가 산사태 보다 인명피해를 유발하는 직접적인 원인이므로 인명피해를 막기 위해서는 토석류의 피해범위를 예측하는 것이 중요하다. 토석류 퇴적모델은 피해범위를 예측하기 위해 필수적인 수단이다. 토석류 퇴적모델은 상용 프로그램인 FLO-2D PRO나 Debris-Avalanche 등이 있으나 우리나라의 지형적 특성에 맞게 자체에서 응용하여 개발하였다. 자체 개발한 토석류 퇴적모델은 산사태로 발생한 붕괴토석이 8방위 중 사면경사도가 가장 낮은 경로를 통해 이동하다가 경사도의 차이가 작아지는 지점에서는 무작위(random)로 방향을 잡는 알고리즘을 갖고 있어서 Random Walk Model이라고 명명하였다. 이 모델은 1회 토사량, 관성가중치 그리고 정지조건 등을 매개변수로 가지고 있으며 권역별로 실측자료를 이용하여 통계적 방법이나 인공지능 알고리즘을 이용하여 가장 근사한 매개변수 값을 구한다.



### 현재 수행 중인 연구사업

우면산 산사태는 산지토사재해 분야의 연구방향을 전환하는 계기를 제공하였다. 기존의 산지토사재해 연구범위가 주로 산간지역이었다면 우면산 산사태 이후 도시생활권 지역을 중심으로 연구범위를 확대하였다. 현재 수행 중인 연구사업은 다음과 같다.

1. 도시생활권 산지토사재해 피해저감 조기감지시스템 개발(2012~2014)
2. 도시생활권 산지토사재해 위험성 평가 기준(2012~2014)
3. 도시생활권 경계피난체계 정립(2012~2014)
4. 도시생활권형 사방구조물 개발(2012~2014)
5. 토석류 위험지 예측기술 고도화(2011~2013)
6. 사방구조물 위치선정 및 유지관리시스템 개발(2013~2015)

기획특집

산지토사재해 조기감지시스템은 산사태 위험 등급이 높은 지역에 붕괴 전조 신호를 탐지할 수 있는 센서를 매설하여 조기에 산사태를 감지할 수 있다. 현재 센서는 토양 함수율, 토양 간극수압, 경사, 온도 및 음향 등을 측정한다. 측정정보는 USN(Ubiquitous Sense Network) 기반의 센서 통합체계 및 센서노드와 게이트웨이를 통해 저전력 및 저가의 무선 네트워크기술인 Zigbee와 CDMA기술을 적용하여 무선으로 통제실까지 전달된다. 가장 어려운 기술은 산사태 발생 전조 기준 즉 역치(문턱값, threshold value)을 어떻게 결정하는가이다. 센서별 역치는 인공 붕괴시뮬레이터에서 각 센서의 붕괴 직전 역치를 통계적으로 해석하여 얻을 수 있다. 또 다른 어려운 점은 대표성 있는 붕괴 지점을 어떻게 정하는가이다. 이 문제는 토양-수문모델과 사면안정 평가모델을 결합하여 지점들의 정보를 면적으로 적용할 수 있다. 대표적인 모델로 CHASM(Coupled Hydrology-Slope Stability Model)을 예로 들 수 있다. 이 조기감지시스템은 가격이 고가이므로 산지토사재해의 위험성이 상대적으로 큰 지역에 국한하여 설치하는 것이 타당할 것이므로 설치 우선순위를 결정하기 위한 위험성 평가 기준이 필요하다.

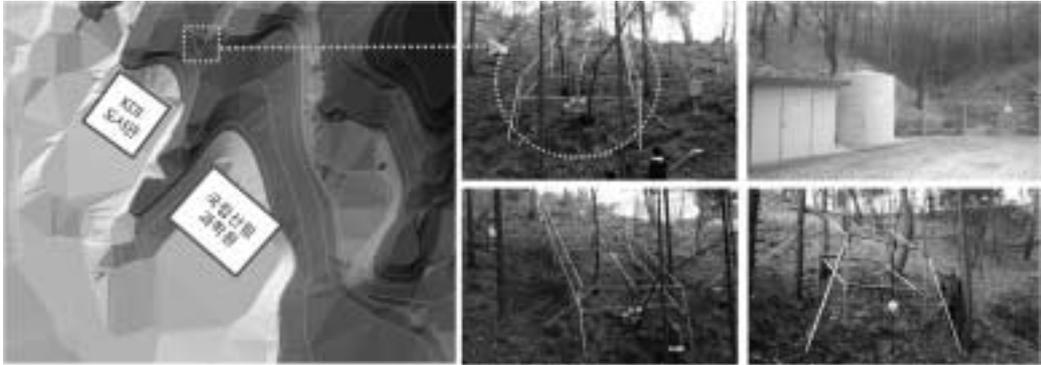


그림 9. 산사태 조기감지시스템 테스트베드 현황

산지토사재해 위험성 평가 기준은 재해예방을 위한 투자 우선순위를 결정하는데 필요하다. 일반적으로 재해 위험성(risk)은 재해발생 빈도(hazard) x 재해피해 민감도(vulnerability)로 결정된다. 산지토사재해의 위험성도 산사태 발생 빈도와 하류 지역의 피해 민감도를 고려하여 결정할 수 있다. 산사태 발생 위험은 산사태 위험지도 상의 1등급에서 5등급까지 구분되어 있으며 민감도는 시설의 종류, 주거자의 수, 대피 능력 등 사회적 인자를 고려하여 구분할 수 있다.

기존의 사방댐은 주로 산간지역의 토석류를 막고 계곡의 경사를 완만하게 줄이는 기능을 가지고 있다. 우면산과 같이 산지와 연결된 도시생활권은 토석류로부터 피해를 막기 위해서 기존의 사방댐과 다른 방재 댐으로서 기능을 고도화해야 한다. 이를 위해서는 신속하게 토석류의 이동을 막거나 토석과 물을 분리하여 배출시키는 등 시설물의 구조를 다양하게 개발해야 한다.

마지막으로 토석류 위험지 예측기술 고도화는 현재 개발된 토석류 퇴적모델을 더 고도화하고 이 모델을 적용하여 산사태로 인한 붕괴물질이 어떤 규모로 어디까지 이동하여 피해를 줄 것 인가를 정확하게 예측해야 한다.

#### 4. 나오며

앞으로 기후변화가 지금과 같은 속도로 진행된다면 강우패턴은 더욱 국지성으로 변하여 장소를 불문하고 산지토사재해로 인한 피해가 증가할 것이다. 기후변화에 대응하여 산사태로 인한 피해를 줄이려면 첫째로 산사태의 발생을 정확하게 예측하고 둘째 산사태 발생 예측정보에 따라 정해진 매뉴얼대로 대피하며 셋째 사전에 산사태 위험지역을 우선으로 사방시설물을 설치해야 한다. 산사태 발생 예측력은 우선 산사태 위험 정보의 예측력을 높이고 기상청에서 제공하는 초단기 강우예보의 정확도를 향상시켜야 한다. 아울러 산사태 자체를 막는 것은 불가항력적인 측면이 있으므로 예측정보에 따라 대피하는 경계피난시스템이 체계적으로 갖추어져 있어야 한다. 경계피난시스템은 재해담당 공무원과 지역 주민들이 평소에도 교육과 훈련을 통해 체득해야 유효하다. 대도시를 중심으로 산사태 위험지역은 사방시설물이나 방재시설물을 설치하여 하류 주민들의 피해를 최소화해야 한다. 이러한 3단계 대응책이 고도화되고 유기적으로 활용된다면 기후변화가 심해지더라도 인명과 재산피해를 최소화할 수 있을 것이다.

#### [참고문헌]

1. 산림청. 2006. 2006년 산지토사재해 특성파악 및 영향인자 분석
2. (사)한국지반공학회. 2011. 우면산 산사태 원인조사 및 복구대책수립 용역 최종 보고서
3. 우충식, 윤호중, 이창우, 정용호. 2008. 항공사진을 이용한 산지토사재해 영향인자 분석 - 강원도 평창군을 중심으로-. 환경복원녹화 11(1) : 14-22
4. 윤호중, 이창우, 우충식, 정용호, 이천용. 2009. 토석류 발생특성과 피해규모 예측기법 개발
5. 이승기, 이병두, 정주상. 2005. GIS를 이용한 산사태 위험지 판정 모델의 개발. 한국지리정보학회지 8(4) : 81-90.
6. 이창우. 2004. 대나무(대체근계)의 토질 강도 보강효과에 관한 연구-토양수분 제어 하의 단순 전단시험에 의한 해석-. 한국환경복원녹화기술학회지 9(3) : 76-81
7. 이천용, 최경, 이종학, 이창우. 2002. GIS를 이용한 산사태 위험지도 작성기법 개발. 산림과학논문집. 65 : 1-10
8. 최경. 1994. 산사태 예방용 적정 수종. 월간 임업정보 제38호. 3p
9. 최경. 1986. 한국의 산사태 발생요인과 예지에 관한연구. 강원대학교 농학박사 학위 논문
10. 최경, 김태훈. 1982. 산사태 발생 원인에 관한 연구. 임업시험장 연구보고. 1-37
11. 최경, 박승걸. 1984. 산사태 발생 예지에 관한 연구-다변량 해석법에 의한-. 임업시험장 연구보고. 109-130
12. Benni T. 2012. Landslide analysis and early warning systems - Local and regional case study in the Swabian Alb, Germany-. Springer..