Land Transport and Maritime R&D Report

R&D 정책인프라사업 최종보고서

R&D /11기술표준화11-01

산사태 및 토석류 발생유형별 피해저감 전략수립연구 연구보고서

2013. 3.

주관연구기관 / 한국건설기술연구원
협동연구기관 / 한국지질자원연구원

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

국토해양부장관 귀하

이 보고서를 “산사태 및 토석류 발생 유형별 피해저감 전략수립연구” 과제의 보고서로 제출합니다.

2013. 3.

주관연구기관명 : 한국건설기술연구원
주관연구책임자 : 구 호 본
연 구 원 : 이 용 수
정 재 형
김 현 준
백 용
박 희 성
황 석 환
김 진 환
권 오 일
장 철 희
류 상 훈
박 은 호
협동연구기관명 : 한국지질자원연구원
협동연구책임자 : 채 병 곤
연 구 원 : 김 경 수
송 영 석
정 승 원
최 정 해
황 재 홍

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td></td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>1년</td><td>단 계 구 분</td><td>(총 단 계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">건설교통 R&D정책인프라사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">산사태 및 토석류 발생유형별 피해저감 전략수립연구</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">구호본</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 18명
내부 : 11명
외부 : 7명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td>정부: 200천원
기업: 0 천원
계 : 200천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 18명
내부 : 11명
외부 : 7명</td><td>총연구비</td><td>정부: 200천원
기업: 0 천원
계 : 200천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한국건설기술연구원
Geo-인프라연구실</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="5">연구기관명 : 한국지질자원연구원 연구책임자 : 채병곤</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">본 연구는 산사태 및 토석류에 대한 국가적 차원의 대책을 수립하기 위하여 기존 산사태 및 토석류 관련 연구과제의 성과물 활용 및 발생유형을 분류하고 원인별, 유형별 대책방안(예, 경보기준 개선안 등)을 제시하였다.
특히, 기존 DB 자료를 기준으로 수문학적 특성 인자(강우강도, 누가강우량 등), 지형학적 특성인자(경사, 토심, 토양종류 등)와의 관계를 검토하여 국내 기준의 개선점을 제시하였다.
그리고, 국내외의 대응정책을 비교 분석하고 우리나라 제도의 발전적 방향을 제시하여 향후 신개념의 대응제도가 정착될 수 있도록 하였다.
마지막으로, 문헌자료 및 전문가 설문을 통하여 산사태 및 토석류 대응을 위한 7대 R&D 주제를 도출하고 제시하였다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">산사태, 토석류, 토사재해, 재해조사, 강우강도</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Landslide, Debris Flow, Geo-Disasters, Calamity survey, Rainfall intensity</td></tr>
</table>

요약문

Ⅰ. 제목

산사태 및 토석류 발생 유형별 피해저감 전략수립연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

○ 우리나라는 전국토의 70 %이상이 산지로 구성되어 있고 연평균 강우량 1,300mm의 2/3 이상이 여름철에 집중되어 있어 산사태 및 토석류 발생은 필연적이다.

○ 본 연구는 산사태 및 토석류에 대한 국가적 차원의 대책을 수립하기 위하여 최근에 발생한 대표적인 산사태 및 토석류 발생현장을 조사하고, 기존 산사태 및 토석류 관련 연구과제의 성과물을 활용하여 발생유형을 분류하고 원인별, 유형별 대책방안을 수립하고자 한다.

○ 특히, 기존 DB 자료를 기준으로 수문학적 특성 인자(강우강도, 누가강우량 등), 지형학적 특성인자(경사, 토심, 토양종류 등)와의 관계를 검토한다. 사면에서의 강우-토양수분-유출 상관관계 분석을 기초로 “산사태 평가 전산모형”으로 국내/외 사례에 적용한 후, 도출된 위험 사면에 대해서 전문가로 구성된 현장팀의 조사로 보정함으로서 산사태 발생 지역의 사면수문학적 평가 방안과 산사태 평가 및 예보를 위한 수문학적 기준 수립을 위한 방안을 도출한다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

○ 기존의 연구조사 자료 및 사례 분석을 통한 유형 분석

○ 지형별(도시, 산지부) 및 시설별(공동주택, 도로)에 따른 산사태 및 토석류 유형 분석

○ 지질별 국내 산사태 및 토석류 피해 사례 분석 및 원인 규명 제시

○ 산사태 및 토석류의 유형별 기준 및 대책 제시

○ 기후변화에 의한 산사태 및 토석류 대응 방재 방향 수립

Ⅳ. 연구개발 결과

(1) 국토 산사태 및 토석류 발생 유형 분석 및 특성 해석

○ 국내에서 재해로 인한 피해저감 목적의 방재행정 차원에서는 Sidle과 Ochiai가 제안한 분류안이 적절할 것으로 제시하였음.

○ 현재의 산사태 기준은 과거의 산사태 이력 분석을 통해 평균적인 개념에서 설정된 값으로 산사태 발생 사후 분석측면에서는 어느 정도 적정성을 가지고 있다고 판단된다. 그러나 실무 예보에 활용하기에는 미흡한 점이 많다. 본 연구에서는 10분단위 강우강도 - 선행강우량을 도입한 경보기준의 가능성을 고찰하였다.

(2) 산사태 및 토석류의 발생 유형에 따른 정책 대책 방안

○ 국내외 산사태 및 토석류 관련 기준, 제도, 정책, 기술개발 등 현황 조사하여, 산사태 및 토석류 대응 제도 및 기술 기준 등 정비 방안을 제시하였다.

3) 기후변화에 의한 산사태 및 토석류 대응 방재 마스터 전략 계획

○ 토사재해 통합체계 기술 R&D 로드맵을 제시하였다.

- 토사재해 저감 국토안전 방재기술의 정책 인프라 개발
- 토사재해 인지 조사 및 안정화 기술 개발
- 미래형 다목적 토사재해 지능형 초단기 감지기술 개발
- 한국형 토사재해 예측지도 플랫폼 구축
- 도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리 시스템 개발
- 토사재해 위험도 산정 및 피해 가시화 평가기술 개발
- 토사재해 SOC 인프라 예방 및 복구 관리 체계 구축

Ⅴ. 연구개발 활용계획

○ 본 과제에서 제시한 정책방안은 관련부처에 의견 및 과제등으로 추진될 예정이며, R&D 로드맵의 순서에 따라 일부 주제는 상세과제의 기획이 시행되었으며, 나머지 주제들도 기획과제가 추진될 예정임.

Abstract

Ⅰ. Title

The damage reduction strategy for the types of landslide and debris flow

Ⅱ. Objective and need of R&D

○ More than 70% of our land is mountainous area and two third of annual rainfall reaching to 1,300mm is concentrated on summer season, which inevitably causes landslide or debris flow.

○ This study is intended to investigate the landslide and debris flow occurred recently so as to classify the cases and identify the cause by type of occurrence, thereby establishing the nationwide countermeasures based on outcome of research efforts.

○ Particularly among the research is evaluation of hydrological factors (rainfall intensity, rainfall mass) and topographical factors (slope, soil depth and kinds etc) based on DB data. Based on correlation among rainfall - soil moisture - rainfall mass, "computation model for evaluation of landslide" is applied to foreign and domestic cases, which will be supplemented by investigation of the experts' group on exposed dangerous slope so as to develop the hydrological criteria for assessment and forecast of landslide.

Ⅲ. Contents and scope of R&D

○ Classification analysis based on existing data and case studies

○ Classification analysis of landslide and debris flow by topographic features (urban, mountainous area) and facility (apartment, road)

○ Analysis of damage by domestic landslide and debris flow by geographical feature and identification of cause

○ Classification of landslide and avalanche and countermeasures

○ Establishment of the strategy to deal with landslide and avalanche caused by climatic change

Ⅳ. Outcome of R&D

(1) Classification analysis of domestic landslide and avalanche and analysis of characteristics

○ Classification according to Sidle and Ochiai would be appropriate from the viewpoint of disaster prevention adminstration for damage reduction

○ Current slide criteria is based on average value concept through history analysis which is feasible from the viewpoint of post-landslide analysis but insufficient for forecasting. In this study, possibility of warning by introducing a 10-minute rainfall intensity - preceding rainfall was evaluated.

(2) Political measures depending on type of landslide and debris flow

○ Based on investigation of the standards, system, police and technical development with regard to domestic & foreign cases of landslide and debris flow, the system and technical criteria to deal with landslide and avalanche are hereby proposed.

3) Disaster prevention strategy to deal with Geo-disasters caused by climatic change

○ R&D road map for integrated Geo-disasters system technologies is proposed

- Development of police infrastructure of disaster prevention for reducing Geo-disasters
- Development for Geo-disasters recognition and stabilization technologies
- Development of multi-purpose intelligent short-term detection technologies against soil disaster
- Development of platform for Korean style Geo-disasters prediction map
- Development of urban Geo-disasters prevention technology and integrated management system
- Development of Geo-disasters risk estimate and damage assessment technology

- Development of Geo-disasters SOC infrastructure prevention and restoration management system

Ⅴ. Plan for use of R&D outcome

○ The measures proposed in this study will be implemented by relevant teams and according to schedule of R&D road map, parts of the subjects have been underway for developing the detail plan while others are scheduled for implementation.

목 차

제 1 장 연구개발 과제의 개요 ····· 1

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 1

제 2 절 연구개발의 범위 ····· 3

제 3 절 재해 대응전략의 범위 및 용어정의 ····· 5

제 2 장 국내외 현황 ····· 7

제 1 절 국내외 산사태 및 토석류의 유형 분석 ····· 7

1. 산사태 및 토석류의 유형 분류 ····· 7

2. 산사태 및 토석류의 예측 ····· 9

제 2 절 국내외 산사태 및 토석류 대응 정책 및 제도 ····· 13

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 23

제 1 절 국내 산사태 및 토석류 발생 유형 분석 및 특성 해석 ····· 23

1. 지질별 국내 산사태 및 토석류 피해 사례 분석 ····· 23

2. GIS를 이용한 국내 산사태/토석류의 특성 분석 ····· 33

3. 국내외 산사태/토석류 유형 분석 및 제안 ····· 42

제 2 절 위성사진 및 고지형도를 이용한 상관성 분석 ····· 48

1. 국내외 현황 ····· 50

2. 위성사진을 통한 산사태 발생 지역의 지형 및 시설물 변화 특성분석 ····· 54

3. 항공사진을 이용한 산사태 지역 특성 분석 ····· 60

4. 지형도 분석을 이용한 산사태 지역 특성 분석 ····· 61

5. 지형 변화와 토사재해의 상관성 분석 결과 고찰 ····· 66

제 3 절 수문학적 유형 분석 및 토사재해 예보 기준 재검토 ····· 69

1. 수문 자료를 활용한 산사태 및 토석류 유형 분석 및 기준 개선 제안 ····· 69

2. 강우와 토양 수분의 상관성 분석 ····· 96
제 4 절 토사재해 대응제도 및 정책 개선 방안 ····· 119
1. 우리나라의 토사재해 대응 관련 법률 ····· 119
2. 토사재해 대응 관련 제도의 개선점 ····· 125
제 5 절 산사태 및 토석류 대응 설계기준 및 개선 방안 ····· 135
1. 우리나라의 산사태 및 토석류 대응 설계기준 ····· 135
2. 산사태 및 토석류 대응 설계기준 개선방안 ····· 136
제 6 절 토사재해 대응 기술 R&D 로드맵 ····· 139
1. 국내외 연구동향 조사 ····· 139
2. R&D 주제 도출 ····· 142
3. 중점과제 선정 및 연구 우선순위 결정 ····· 146
4. 토사재해 대응 기술 R&D 로드맵 ····· 150

제 4 장 목표달성도 및 관련 분야에의 기여도 ····· 179

제 5 장 연구개발 결과의 활용 계획 ····· 180

제 6 장 연구개발 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 181

제 7 장 참고 문헌 ····· 189

부록1. 연구과제 설명자료 ····· 196

부록2. 연구성과집 ····· 219

부록3. 성과총람 ····· 222

부록4. DEBRIS 2020 ····· 231

<표 목차>

<표 1.2.1> 과업 범위 및 내용 ····· 4
<표 2.2.1> 대응정책의 관점에서의 토사재해와 수해의 차이점 ····· 13
<표 2.2.2> 우리나라 관련부처별 엄부영역 ····· 15
<표 2.2.3> 부처별 업무내용 비교 ····· 18
<표 2.2.4> 피해 유형별 토지이용 특성 ····· 19
<표 2.2.5> 미국의 토사재해 방지 체계 ····· 20
<표 2.2.6> 일본의 토사재해 방지 체계 ····· 20
<표 3.1.1> 최근 30년간 자연재해로 인한 사망자 통계 ····· 24
<표 3.1.2> 국내 산사태발생과 관련한 강우기록 ····· 31
<표 3.1.3> 2일간 강우 후 대상지역에서의 산사태 최종 반응지수 ····· 33
<표 3.1.4> Varnes (1978)가 제안한 산사태 분류 ····· 43
<표 3.1.5> European Community가 제안한 산사태 분류안 ····· 43
<표 3.1.6> Vallejo와 Ferrer이 제안한 산사태 분류 ····· 44
<표 3.1.7> Flow 형태 산사태의 분류 ····· 45
<표 3.1.8> Sidle과 Ochiai(2006)가 제안한 산사태 분류 ····· 46
<표 3.2.1> 급경사지 붕괴 발생 현황 (2009년, 2010년) ····· 54
<표 3.2.2> 산사태 및 토석류 발생에 영향을 미치는 시설물 현황 ····· 67
<표 3.3.1> 2006년 7월 지점별 최대강우량 및 지속기간별 재현기간 ····· 71
<표 3.3.2> 산림청 산사태 예보 기준 ····· 78
<표 3.3.3> 일본의 표준 강우 설정 방법의 분류 ····· 82
<표 3.3.4> 산사태 발생 지점의 산사태 발생일시 및 분석 강우관측소 현황 ····· 83
<표 3.3.5> 격자지반의 물리적 분포형 수문모형의 특성 비교 ····· 97
<표 3.3.6> 물리적 기반의 산사태 예측 모형의 종류 ····· 117
<표 3.4.1> 우리나라와 일본의 산사태 재해위험지구 지정기준 ····· 126
<표 3.4.2> 산사태의 유형과 판정기준 개선방향 ····· 128
<표 3.4.3> 제1종•2종 지구단위계획의 비교 ····· 130
<표 3.6.1> 중점과제 도출 과정 ····· 147

<그림 목차>

<그림 1.1.1> 산사태에 의한 산림복구비용 분석 ····· 1
<그림 1.2.1> 연구 수행 절차 ····· 3
<그림 1.2.2> 본 연구에서 용어 정의 ····· 6
<그림 2.1.1> 국내외 산사태 및 토석류 유형 분류 사례 분석 ····· 8
<그림 2.1.2> 미국 USGS에서 발간한 미국 전역의 지역별 산사태 위험 ····· 10
<그림 2.2.1> 2011년 7월 중부지방 일원의 강우와 인명피해 유형 ····· 14
<그림 2.2.2> 에이메현의 패트롤 광경 ····· 21
<그림 2.2.3> 토사재해위험구역도 (일본사례) ····· 21
<그림 2.2.4> 토사재해에 대한 통지문 (일본사례) ····· 22
<그림 3.1.1> 산사태 지역에서 측정한 24시간 및 48시간 강우 강도 ····· 31
<그림 3.1.2> 대상지역의 강우와 Caine의 강우한계선과의 관계 ····· 32
<그림 3.1.3> 각 지역별 산사태 유형 비율 ····· 34
<그림 3.1.4> 지역별 산사태 연장 분포 비율 ····· 35
<그림 3.1.5> 지역별 산사태 폭 분포 비율 ····· 36
<그림 3.1.6> 각 지역별 사면경사와 산사태 빈도와의 관계 ····· 37
<그림 3.1.7> 화강암 지역에서 사면에 따른 산사태 발생 비율 ····· 38
<그림 3.1.8> 각 지역별 산사태 시작 위치 분포 비율 ····· 39
<그림 3.1.9> 암석 종류에 따른 산사태 발생 비율 ····· 40
<그림 3.2.1> 강원도 인제 토석류 발생 현장 ····· 48
<그림 3.2.2> 시설물 개발에 따른 지형 변화 사례 ····· 49
<그림 3.2.3> 항공사진(좌)으로부터 생성된 수치표고모형(우) ····· 51
<그림 3.2.4> 산사태 지형도(좌) 및 LiDAR로부터 추출된 음영기복도(우) ····· 52
<그림 3.2.5> 고산지대 초지이용 변화 ····· 53
<그림 3.2.6> 일본 카미오카역 주변 지형 변화 ····· 53
<그림 3.2.7> A 지역 위성사진 변화 ····· 55
<그림 3.2.8> B 지역 위성사진 ····· 55

<그림 3.2.9> C 지역 위성사진 변화 ····· 56
<그림 3.2.10> D 토석류 발생 피해 지역 상부 도로 및 수목 현황 ····· 56
<그림 3.2.11> D 지역 위성사진 변화 ····· 57
<그림 3.2.12> E 지역 위성사진 변화 ····· 58
<그림 3.2.13> F 지역 위성사진 변화 ····· 59
<그림 3.2.14> G 지역 위성사진 변화 ····· 59
<그림 3.2.15> 인제군 산사태 지역 항공사진(좌: 상류, 우: 하류) ····· 60
<그림 3.2.16> 덕산리(좌) 지역과 한계리(우)지역의 지형도 오버랩 ····· 61
<그림 3.2.17> 덕산리 지역 지형도 비교 1 ····· 62
<그림 3.2.18> 덕산리 지역 지형도 비교 2 ····· 63
<그림 3.2.19> 한계리 지역 지형도 비교 1 ····· 64
<그림 3.2.20> 한계리 지역 지형도 비교 2 ····· 65
<그림 3.2.21> 지형 변화에 따른 지표수 및 지하수 유통 변화 모식도 ····· 67
<그림 3.2.22> 지반 외부 충격 영향 모식도 ····· 68
<그림 3.3.1> 2002년 태풍 '루사'로 인한 전국 도로피해 발생 분포 ····· 70
<그림 3.3.2> 2008년 7월 호우 시간강우 분포도(춘양면) ····· 72
<그림 3.3.3> 2011년 7월 26~27일 총강우량(mm) 분포 ····· 73
<그림 3.3.4> 우면산 산사태 발생 주요 지역(2011.7.27~7.29) ····· 74
<그림 3.3.5> 2011년 기상청 AWS 관측소 관측 강우량 분석 ····· 75
<그림 3.3.6> 2011년 지속기간별 최대강우량 및 재현기간 ····· 76
<그림 3.3.7> 토석류 유발 국내 강우기준의 비교 ····· 79
<그림 3.3.8> 토석류 유발강우의 재현주기 비교 ····· 79
<그림 3.3.9> 토사재해 발생시 시간강우량-일누적강우량, 연속강우량 관계 ····· 80
<그림 3.3.10> 토사재해 발생이전 최대시간강우량-일누적강우량 관계 ····· 80
<그림 3.3.11> 강우선행시간에 따른 강우강도와 선행강우량 비교 ····· 85
<그림 3.3.12> 산사태 발생 분석을 위한 시간 축 기준 설정 방법 ····· 87
<그림 3.3.13> 예보를 고려한 72시간(3일) 전 기준 누가강우량에 따른
산사태 발생 특성 분석 ····· 88

<그림 3.3.14> 10분 단위 강우량과 시단위 강우량의 강우선행시간에 따른 강우강도와 선행강우량 비교 ····· 89
<그림 3.3.15> 10분 단위 강우량과 시단위 강우량 산사태 경보 발생 시간 비교 (개념도) ····· 92
<그림 3.3.16> 10분 단위 강우량과 시단위 강우량 산사태 경보 발생 시간 비교 ····· 93
<그림 3.3.17> 2002-2006년, 2011년 주요 산사태 발생 사상에 대한 경보 기준 분석 ····· 95
<그림 3.3.18> 2011년 7월 21일 호우의 산사태 기준 분석 ····· 95
<그림 3.3.19> 다층 토양에서의 침투 모식도 ····· 99
<그림 3.3.20> 지곡 토양통에 대한 깊이별 토성 특성 부여 예 ····· 102
<그림 3.3.21> Loamy sand (양질사토)에 대한 토양특성 DB 구축 예 ····· 103
<그림 3.3.22> 설마천 유역 현황도 ····· 103
<그림 3.3.23> 범륜사 부근 전경 ····· 104
<그림 3.3.24> 범륜사 부근 모의대상 사면 ····· 104
<그림 3.3.25> 모의적용 지역 ····· 106
<그림 3.3.26> 1 지점에서의 토양수분 비교 ····· 107
<그림 3.3.27> 9 지점에서의 토양수분 비교 ····· 108
<그림 3.3.28> 7 지점에서의 토양수분 비교 ····· 109
<그림 3.3.29> 1 지점에서의 토양수분 비교 (MIKE SHE_2004.07.11~13) ····· 111
<그림 3.3.30> 1 지점에서의 토양수분 비교 (WEP_2004.07.11~13) ····· 111
<그림 3.3.31> 1 지점에서의 토양수분 비교 (MIKE SHE_2004.07.01~02) ····· 112
<그림 3.3.32> 1 지점에서의 토양수분 비교 (WEP_2004.07.01.~02) ····· 112
<그림 3.3.33> 산사태 발생원인 ····· 115
<그림 3.3.34> 산사태 예측모형의 분류 ····· 116
<그림 3.3.35> 산사태 예측 모형의 개발방향 ····· 118
<그림 3.4.1> 우리나라의 재난관련 법률 ····· 119
<그림 3.4.2> 산사태위험지의 판정현황 및 개선방향 ····· 127

<그림 3.4.3> 단계별 토석류위험지구 관리 개념 ····· 129
<그림 3.4.4> 토사재해정보에 관한 긴급연락체제 (일본의 사례) ····· 132
<그림 3.4.5> 토사재해 정보시스템 (일본의 사례) ····· 133
<그림 3.6.1> 국내 논문 및 기술기사 동향 ····· 140
<그림 3.6.2> 미국 USGS 공개 보고서 동향 ····· 141
<그림 3.6.3> 일본 논문 및 기술기사 동향 ····· 141
<그림 3.6.4> 콜롬비아 메델린 지역의 산사태 경보시스템 예 ····· 143
<그림 3.6.5> GIS 및 첨단 모바일 기술에 기반한 재해, 재난 경보시스템 ····· 144
<그림 3.6.6> 풍수해 저감계획을 통한 도시계획 상 토사재해위험지구
관리 방안 ····· 145
<그림 3.6.7> 전문가 설문을 통한 AHP 가중치 분석 결과 ····· 148

제 1 장 연구개발 과제의 개요

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

우리나라는 전국토의 70%이상이 산지로 구성되어 있고 연평균 강우량 1300mm의 2/3 이상이 여름철에 집중되어 있어 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow) 발생은 필연적이다. 과거 1988년 서울시 구로동에 토석류(Debris Flow)가 발생하여 20명의 인명피해가 발생하는 등 산사태(Landslide)와 토석류(Debris Flow)에 의한 연평균 55명의 인명피해와 수많은 재산피해를 유발시켜왔으나 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow)에 대한 국민적 관심이 높지 않아 이에 대한 종합적인 대책을 수립하지 못한 상황이다.

그러나, 그림 1.1.1에서 나타난 것과 같이 산사태(Landslide)에 의한 피해 및 복구비용이 지속적으로 증가하고 있으며, 2011년 7월 서울 강남의 우면산에서 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow)에 의한 인명피해가 17명에 달하여 사회적 이슈가 되면서 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow)에 대한 국민적 경각심 고취와 함께 국가적 차원의 토사재해 방재대책 수립 및 관련 연구의 필요성이 제기되고 있다.

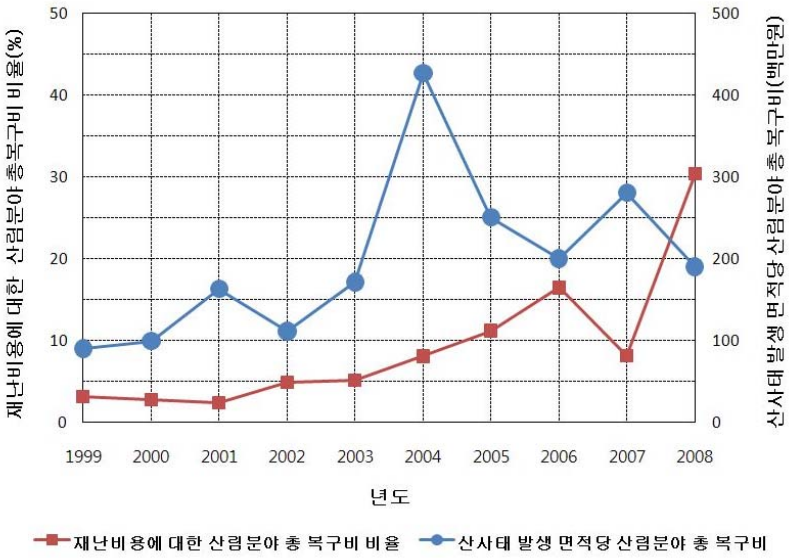


그림 1.1.1 산사태에 의한 산림복구비용 분석*1)

1) 출처 : 통계청, e-나라지표

지금까지의 사면 관련 연구는 도로 비탈면 조사, 안정성 해석, 대책공법 관련 설계기준 등에 한정 되었으며, 자연사면에 해당하는 산사태(Landslide)와 토석류(Debris Flow) 재해 연구는 본격적으로 수행되지 않았다. 다만, 산림과학원에서는 산림관리를 위한 산림재해 예측 모니터링과 재해 방지형 산림조성 기법 등의 연구가 일부 이루어졌으나 이를 국가적인 정책, 연구 개발 및 행정 등에 활용하기 위한 연구 사례는 적은 편이다.

산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow) 관련 행정 및 정책 연구가 활성화 되지 못한 이유는 재난·재해 관련법령이 13개 소관부처별로 나누어져 70여개에 달하고 있어서 책임소재가 모호하고, 정책심의기구(중앙재해대책위, 중앙안전대책위 등)와 수습기구(재해대책본부, 사고대책본부 등)가 분리 및 비상설로 운영되어 집중력이 부족하며, 재난유형별 실효성 있는 매뉴얼을 수행할 전문가 집단이 지정되어 있지 않는 등의 문제가 있다.

반면, 홍콩의 경우에는 CED/GEO라는 전담조직을 창설하여 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow) 재해를 급감시키고 있으며, 일본의 경우에는 국토성 주관으로 2001에 “토사재해방지법”을 도입하여 2011년 현재 특별경계지역 토석류(Debris Flow) 35,510개소, 급경사지 72,452개소로 지정하여, 건축물 구조 심의, 특별경계지역 내 개발행위제한 및 주민 이전을 강력한 행정력으로 관리하고 있다.

이와 같이 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow)와 같은 자연 재난에 대하여 우리나라의 실정에 적합한 전략을 수립하는 것이 필요하며, 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow) 위험지구 관리비용 등의 절약을 위해서는 기존 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow)를 분석하여 유형분류 및 경계 기준 등에 대한 검토를 기반으로 중장기적인 계획의 수립 및 R&D 전략을 구축하는 것이 필요하다.

제 2 절 연구개발의 범위

본 연구에서는 국내에서 발생한 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow)에 대한 기존 문헌 및 연구 자료의 수집을 실시하고 이를 기반으로 한 산사태(Landslide)와 토석류(Debris Flow)의 피해사례를 분석한다. 이를 기반으로 하여 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow) 대응제도 및 기술기준 등 정비방안을 수립하며, 국내·외 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow) 관련 기준, 제도, 정책, 기술개발 등 현황을 조사하여 최종적으로 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow) 대응정책 및 통합체계 기술 R&D 로드맵을 제시한다.

본 연구는 그림 1.2.1과 같은 체계로 진행되며, 우리나라의 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow) 대책 전략을 제시하기 위하여, 기존 연구 자료를 바탕으로 국내 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow)의 발생 유형을 분류하고 국내외 논문 및 기술기사를 분석하여, 이를 근거로 장래의 피해저감 전략 및 장래의 연구개발 계획을 수립한다.



그림 1.2.1 연구 수행 절차

당초 본 연구에서는 국토해양부에서 수행한 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow) 관련 기존 연구 과제의 국내 발생 현황 및 자료를 활용 할 계획이었으나, 각 연구단의 사정에 의해 자료가 제한적이므로, 본 연구에서는 한국지질자원연구원, 한국건설기술연구원 및 ㈜지아이 기술연구소에서 과거 과학기술부 연구개발 사업, 소방방재청 연구개발 사업 등에서 자체적으로 수집한 자연사면 산사태(Landslide) 자료를 토대로 국내 산사태(Landslide) 발생현황과 피해사례, 그리고 지질 및 지형특성에 따른 산사태(Landslide) 특성을 분석하였다. 표 1.2.1은 본 연구의 과업 범위 및 내용을 보여주고 있다.

표 1.2.1 과업 범위 및 내용

연 차	과업 범위	주요 연구 내용
1차년도	국토 산사태 및 토석류 발생 유형 분석 및 특성 해석	• GIS[2]를 이용한 지질별 기존의 연구조사 자료 및 사례 분석을 통한 유형 분석 • 지형별(도시, 산지부) 및 시설별(공동주택, 도로)에 따른 산사태 및 토석류 유형 분석 • 수문자료를 활용한 국내 산사태 및 토석류 피해 사례 분석 및 원인 규명 제시
	산사태 및 토석류의 발생 유형에 따른 정책 대책 방안	• 국내외 산사태 및 토석류 관련 기준, 제도, 정책, 기술개발 등 현황 조사 • 산사태 및 토석류 대응 제도 및 기술 기준 등 정비 방안
	기후 변화에 의한 산사태 및 토석류 대응 방재 마스터 전략 계획	• 산사태 및 토석류 대응정책 및 통합체계 기술 R&D 로드맵 제시

2) 지리정보시스템(Geographic Information System)

제 3 절 재해 대응전략의 범위 및 용어정의

본 연구에서는 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow)에 대한 대응 전략을 수립하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해서는 각 용어의 의미 및 법위가 정립 되어야 하나, 우리나라에서는 재해 현장에서 이를 구분할 수 있는 체계가 정립되어 있지 않으며, 법률적, 행정적 용어로서 명확하게 구분되어 있지 않다. 이는 산사태(Landslide)와 토석류(Debris Flow)의 발생 원인이 유사하고, 두 용어간의 상위 개념과 하위 개념의 관계가 모호하게 사용되어, 피해 상황만으로 정확한 구분이 어려운 것에 원인이 있다. 일반인의 시각에서는 산사태(Landslide)는 토사사면의 붕괴 및 토석류(Debris Flow)를 통칭하는 개념으로 사용되는 등 용어정의에 혼란이 존재한다.

공학적으로 산사태(Landslide)는 암이나 쇄설물질, 토사등이 사면을 따라 이동하는 현상을 말하며, 이는 다양한 형태의 붕괴를 표현하는 용어로서 토사지반활동, 암반지반활동, 낙석등을 모두 포함하는 개념이다. 그리고, 토석류(Debris Flow)는 사면의 표층 또는 계류 바닥에 쌓인 흙, 돌, 나무등이 물과 함께 흘러 내려 퇴적부를 발생시키고 하류에 피해를 발생시키는 현상을 말하며, 산사태(Landslide)의 일부 형태로 판단하는 학자도 있다.

방재 행정의 측면에서 산사태(Landslide)와 토석류(Debris Flow)가 명확하게 구분되어 있지 않으며, 관리 주체에 따라 자연사면과 인공사면으로 구분하여야 하는 등 복잡한 양상을 보이고 있다. 자연사면은 산지나 삼림 안에 존재하는 사면으로서 주로 산림청의 관리를 받고 있다. 인공사면은 인위적으로 사면경사가 조절되거나 옹벽등의 구조체로 조성된 사면을 말하며, 도시 및 SOC시설을 관리하는 지방자치 단체와 국토해양부의 담당이다.

본 연구에서 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow)에 대한 대응 전략을 구축함에 있어서, 재해 대응에 실질적인 방안을 도출하기 위하여, 학술적, 공학적 관점에서의 세분화된 접근 보다, 방재 대응의 일선에서 접근이 쉽도록 구성하는데 중점을 두었다. 특히, 최근 서울등 도심지에서 발생된 유형의 재해를 정의하고 대응전략을 도출하기 위하여, 너무 포괄적인 산사태(Landslide)라는 용어와 너무 세분화되고 전문적인 토석류(Debris Flow)라는 용어를 배제하고, 토사재해라는 통일된 개념을 사용하였다. 토사재해라는 용어는 일본의 급경사지재해, 사면활동, 토석류(Debris Flow)를 모두 포함하는 토사재해경계구역 설정에 사용되는 용어와 유사하며, 본 연구에서는 관리주체 및 발생메커니즘을 고려하지 않고, 방재행정을 효율적으로 수행하기 위하여 대상으로서 자연사면, 인공사면을 모두 포함하는 개념이다.

본 연구에서 학술적이고 공학적인 접근이 필요한 부분에 있어서는 산사태(Landslide)는 자연사면재해를 통칭하는 개념으로 사용하고, 토석류(Debris Flow)라는 용어도 그 의미를 정확하게 전달하기 위해서 별도로 사용한 부분이 있다. 전문용어로서 혼란을 막기위하여 영어원문을 병기하였으며, 인공사면 및 낙석, 암반사면재해를 모두 포함하는 사면재해에 대해서는 토사재해라는 개념을 사용하였다. 각각의 용어가 사회적, 학술적, 공학적, 법률적 분류가 명확하게 정리되어 있지 않으나, 본 연구에서는 다음의 그림과 같이 정의하여 연구를 수행하였다.



그림 1.2.2 본 연구에서 용어 정의

제 2 장 국내외 현황

제 1 절 국내외 산사태 및 토석류의 유형 분석

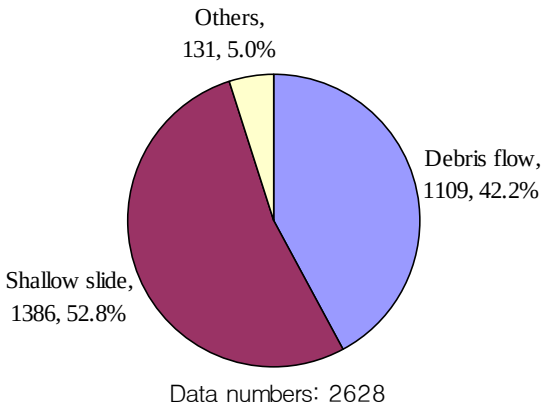
1. 산사태 및 토석류의 유형 분류

자연사면의 산사태(Landslide)는 발생시점(source area)에서 어떤 형태(type)로 발생하였던 간에 사면 하부로 이동하면서 흙과 암편들이 다량의 물과 혼합되어 흘러내리는 경우가 흔하므로 형태를 구분하지 않고 토석류(debris flow)로 명명하는 경우가 많다. 토석류(Debris Flow)는 사태물질이 모래입자보다 큰 암편들이 무게 50% 이상 함유하면서 유동하는 산사태(Landslide)를 일컫는다. 따라서 토석류(Debris Flow)는 슬라이드와는 달리 명확한 파괴면이 형성되지 않는 경우가 많으며 불규칙한 침식면이 남는다(Vanes, 1978; Ikeya, 1989).

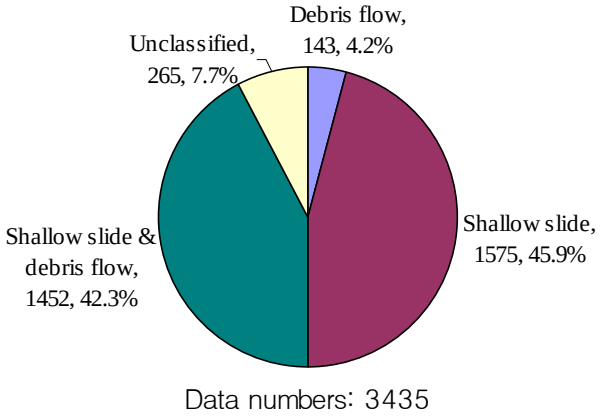
실제 산사태(Landslide) 현장에서는 슬라이드와 토석류(Debris Flow)가 복합적으로 나타나는 경우가 대부분이어서 특정형태로 산사태(Landslide)를 구분하기는 어렵다(김원영 외, 2000). 즉, 산사태(Landslide)의 시작점(source area)에서는 슬라이드 파괴가 발생하며 그 후 파괴물질이 사면 하부로 이동하는 이동통로에서 삭박 작용이 추가로 발생하여, 초기의 슬라이드에 의한 파괴물질과 이동 통로에서 추가된 파괴물질들이 합쳐져서 토석류(Debris Flow)로 유동하게 된다(Johnson and Rodine, 1984). 토석류(Debris Flow)는 시작점과 이동통로 및 하단 퇴적지(depositional toe) 등 3요소를 충족해야만 한다(Costa, 1984). 연구지역에서는 긴 이동통로를 갖는 산사태(Landslide)일 경우 흔히 토석류(Debris Flow)로 분류하였으며, 반대로 이동통로가 매우 짧은 경우에는 슬라이드로 분류하였다. 사면이 길고 험준한 지형에서는 전자의 경우가 많으며 낮은 구릉지 지형에서는 후자에 속하는 경우가 우세하다.

지난 90여 년간(1917-2005) 전 세계적으로 발생한 자연사면 산사태(Landslide) 2,626개를 분석한 바에 의하면 53%인 1,386개는 평행이동 슬라이드(shallow translational slide)로, 42%에 해당하는 1,109개는 토석류(debris flow)로 분류하였다(Fausto et al, 2008, 그림 2.1.1 a). 반면 한국의 경우는 10개 지역의 3,435개 산사태(Landslide) 중 가장 높은 빈도는

평행이동 슬라이드로 전체의 45.9%인 1,575개이며, 다음으로 높은 빈도는 평행이동 슬라이드와 토석류(Debris Flow)가 동반하는 상태의 산사태(Landslide)이며 이들이 전체의 42.3%인 1,452개를 차지하고 토석류(Debris Flow)는 4.2%인 143개에 불과하다(그림 2.1.1 b). 아래의 두 자료에서 특징적인 차이점은 평행이동 슬라이드의 분포비율은 우리나라와 전 세계에서 수집한 자료와 비슷하나, 토석류(Debris Flow)의 경우 우리나라에서는 전체 산사태(Landslide)의 4.2%를 차지하는데 불과하나 전 세계 자료에서는 42.2%를 차지하고 있어 큰 차이를 보인다.



(a) 전세계 2,626개 산사태 자료를 토대로 자연사면에서 발생한 산사태 유형별 비율



(b) 국내의 3,435개 산사태를 대상으로 한 산사태 유형별 비율

그림 2.1.1 국내외 산사태 및 토석류 유형 분류 사례 분석

이러한 차이점이 어디서 비롯되었는지는 명확하지는 않으나, 분류상의 차이로 판단된다. 우리나라의 평행이동 슬라이드 및 토석류(Debris Flow)가 전체 산사태(Landslide)에서 차지하는 비율이 전 세계 산사태(Landslide) 중 토석류(Debris Flow)가 차지하는 비율과 거

의 같은 값을 보이고 있다. 이와 같은 사실은 우리나라에서 평행이동 슬라이드 및 토석류(Debris Flow)로 분류한 산사태(Landslide)와 전 세계 산사태(Landslide)에서 분류한 토석류(Debris Flow)가 같은 종류의 산사태(Landslide)로 추정되는 근거이다. 슬라이드로 시작하여 토석류(Debris Flow)로 변형되어 이동하는 산사태(Landslide)를 국외자료 통계에서는 토석류(Debris Flow)로 분류한 것으로 판단된다.

2. 산사태 및 토석류의 예측

산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow) 재해위험지도 및 예·경보시스템 관련 기술은 미국, 홍콩, 일본의 수준이 가장 높으며, 현재 한국의 기술 수준은 개념 정립 및 연구개발 초기단계이다. 토석류(Debris Flow) 예·경보시스템 구축과 관련하여 미국과 홍콩은 강우를 기준으로 강우경보시스템을 운영하고 있다. 토석류(Debris Flow) 관련 연구가 많이 진행되는 국가와 국가별 관리 및 연구기관은 주로 각국의 지질연구기관, 재해연구기관으로서 각 국의 주요 기관은 다음과 같다.

(1) 일본 : 국토교통성, 국토교통성 산하 토목연구소, 교토대학 재해방지연구소 (Disaster Prevention Research Institute) 등이 있음

(2) 미국 : 내무부산하 지질연구소(USGS)에서 미국전역의 지진재해지도, 산사태재해지도 등의 작성 배포하고 있음. 이 외에도 토석류 재해예방을 위한 많은 이론적, 시험적, 기술적 연구가 진행되고 있음. 각 주의 DOT, 대학에서 협력하여 토석류 대책에 대한 연구 진행

(3) 홍콩 : 정부산하 지반부(GEO) 부서에서 홍콩 전역의 사면을 정보화하여 관리하고 있으며, 토석류 위험 재해 지도의 작성

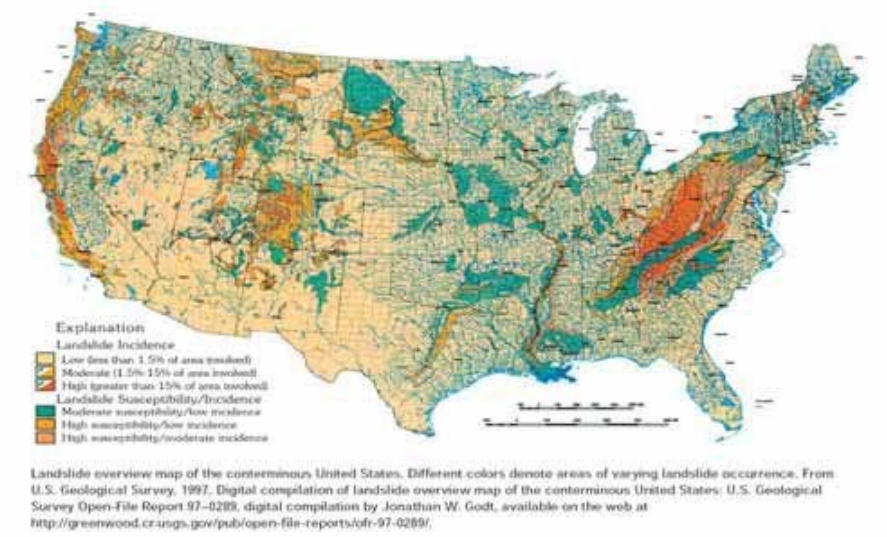
(4) 캐나다 : 각 지방 정부에서 학계와 연계하여 연구 수행

(5) 이탈리아 : 정부(도로관리기관, 지질연구소)와 학계가 연계하여 연구 수행

(6) 스위스 : WSL(Wood-Snow-Landslide)에서 눈사태와 산사태 관련 연구 수행

(7) 중국: 중국과학원(Chinese Academy of Science)산하 산악지 재해환경연구소(Institute of Mountain Hazards and Environment)에서 토석류 연구 실적이 많이 있음

미국의 경우 미국지질조사국(USGS)과 미국기상청(NWS)에서 Keefer의 모델을 이용하여 미국 캘리포니아 주 샌프란시스코 지역을 대상으로 강우 예·경보체계를 구축하여 운용하고 있다.



Landslide overview map of the conterminous United States. Different colors denote areas of varying landslide occurrence. From U.S. Geological Survey, 1997, Digital compilation of landslide overview map of the conterminous United States: U.S. Geological Survey Open-File Report 97-0289, digital compilation by Jonathan W. Godt, available on the web at http://greenwood.cr.usgs.gov/pub/open-file-reports/ofr-97-0289/.

그림. 2.1.2 미국 USGS에서 발간한 미국 전역의 지역별 산사태 위험[3)]

홍콩의 경우 홍콩GEO, 홍콩정부, 홍콩기상청이 공동으로 산사태(Landslide) 예·경보시스템을 개발하여 1984년부터 경보를 발령하기 시작하였고 경보 기준은 도시 내 약 10개소 이상에서 산사태(Landslide)가 예상되는 강우로서 24시간 강우량 175mm, 시간강우량 70mm/h이상을 기준으로 하고 있다. 홍콩의 경우, 과거에는 Lumb(1975)의 보고에서와 같이 강우로 인한 직접적인 침투가 파괴의 주요인으로 작용하고, 파괴 당시의 일강우량 뿐만 아니라 선행강우량의 영향이 크다는 선행강우량 개념의 해석이 지배적이었으나, 그 후 Brand(1985)의 연구결과를 반영하여 짧은 시간에 내리는 집중호우는 지질이나 수문지질의 조건에 관계없이 대규모 산사태(Landslide)를 일으킬 수 있으며, 산사태(Landslide) 발생 당시의 강우 강도가 지배적인 조건이 되는 이론이 우세하다.

대만도 토석류(Debris Flow)로 인한 피해 저감을 위해 전국 주요 지점에 토석류(Debris Flow) 모니터링 시스템을 구축해 조기경보시스템을 운영하고 있다. 대만의 경우는 태풍이 많이 상륙하는 지리적 여건으로 인해 토석류(Debris Flow), 산사태(Landslide)에 대한 감시활동이 체계적으로 이루어지고 있다. 집중호우가 발생할 경우 매 10분마다 강우량을 모니터링하고 기상위성을 이용한 구름 현황 감시로 긴급 상황을 신속하게 전파하고 있으며 토석류(Debris Flow) 감시에 사용되는 계측기 및 장비로는 와이어센서, 강우량계, 초음파 수위계 그리고 이동식 모니터링 차량이 이용되고 있다.

일본의 경우 Yagi and Yatabe (1987)의 연구 결과와 같이, 7일간의 선행누적강우량이 클 때에는 적은 강우일지라도 사면이 붕괴될 수 있다고 보고 있으며 일반적으로 산사태

3) 출처 : pub.er.usgs.gov

(Landslide) 발생 전 3일 또는 7일의 선행 강우량과 발생 당일의 강우강도가 산사태(Landslide)와 밀접한 관계가 있는 것으로 보고 있다. 1996년과 1997년에 토석류(Debris Flow)에 대한 예측과 피난을 위한 경보 시스템의 필요성이 제기되어 와이어식 토석류(Debris Flow) 감지 시스템 및 광섬유 센서를 이용한 토석류(Debris Flow) 감시 시스템을 개발하였다. 와이어식 시스템은 토석류(Debris Flow)가 밀려 내려오는 순간 와이어의 이동 및 절단을 감지하여 알람이나 사이렌 등으로 위험경보를 하는 시스템이며, 광섬유 센서를 이용한 시스템은 광섬유 센서에 의한 지반의 진동 주파수와 진동 강도를 측정하여 토석류(Debris Flow)의 발생을 감지하는 시스템이다.

스위스의 경우는 유연성 원리를 이용한 토석류(Debris Flow) 방지 시스템과 함께 Geophone, CCTV, 링네트의 하중계 등을 이용하여 토석류(Debris Flow)를 감시하고 있다. 토석류(Debris Flow)의 속도, 밀도, 하중을 측정하는 시스템을 이용하여 토석류(Debris Flow)의 거동 메커니즘을 규명하기 위한 연구 자료로 활용하고 있으며, 직접적인 토석류(Debris Flow) 발생을 육안으로 확인하기 위한 CCTV를 운영하고 있다.

국내에서는 홍성완 등(1990)은 강우와 산사태(Landslide) 사이의 관계를 통계학적으로 검토 분석하였다. 김영묵과 정성완(2000)은 충남지역의 강우특성을 고려한 산사태(Landslide)에 관한 연구를 하였다. 장현식 등(2004)은 집중강우 시 발생하는 절토사면의 붕괴 특성에 관한 연구를 수행한 바 있다. 홍원표와 송영석(2005)은 산사태(Landslide) 발생현장에 대한 강우 침투 시 토사재해 변화를 고찰하기 위하여 습윤 전선 하강, 지하수위 상승을 모두 고려한 토사재해 해석을 수행하였다. 신홍건(2007)은 다양한 침투해석모형을 이용하여 합리적 침투모형을 선정한 후 침투량과 지하수위의 변화를 고려한 토사재해 해석을 연구하였다. 황석민(2009)은 강우 시 지반정수 변화에 따른 사면붕괴 모델결정에 관한 기초연구로 강우재현장치를 이용한 모형실험을 통해 불포화토층에 침투하는 강우에 대한 간극수압, 토압, 함수비 등의 변화에 따른 사면 거동에 대해 연구한 바 있다. 또한, 김종각(2010)은 사면을 실제와 같이 모델링하여 실측 지하수위 및 강우량과 모델링 결과를 비교하여 침투해석 및 사면안정해석을 수행하였다.

특히, 강우에 의해서 발생하는 산사태(Landslide)는 주로 얕은 토층 깊이에서 발생하는 천층 산사태(shallow landslide)로서 이를 물리적 과정으로 해석하기위한 물리기반 예측모형의 개발 및 적용이 이루어지고 있다.

물리적 기반의 산사태(Landslide) 예측 모형은 산사태(Landslide) 발생 과정을 수학적으로 표현하기 때문에 많은 가정과 제약이 따른 다는 한계가 있지만, 산사태(Landslide)의 과정을 물리적으로 재현할 수 있고, 경험하지 못한 기후 변화에 따라 적용이 가능하므로

그 적용성이 넓다는 점에서 장점이 있다. 최근에는 GIS/RS[4] 분야의 비약적인 발전으로 대규모의 공간자료의 생성과 활용이 가능하므로 실제 산사태(Landslide)가 일어나지 않았던 광범위한 지역에 대한 분석과 적용이 용이해지고 있다.

물리적 기반의 산사태(Landslide) 예측 모형은 Ward 등(1981), Okimura 등(1985)에 의해서 시작되었다. 일반적으로 물리적 기반의 산사태(Landslide) 예측모형은 사면안정모형과 수문모형(지하수흐름모형 혹은 침투모형)의 결합으로 구성되어 있다. 사면 안정모형은 1차원 무한사면 안정모형을 주로 이용하고 있는 반면, 수문모형은 많은 연구자들에 의해 다양한 모형이 제시되고 있다. Montgomery와 Dietrich(1994)는 사면에서의 물의 흐름을 정상상태의 지표와 흐름(subsurface flow)으로 가정하여 SHALSTAB 모형을 개발하였다. 하지만, 이러한 모형들은 모두 강우 및 유수의 정상성을 가정한 모형(static model)으로서 실제 강우강도의 변화에 따른 양상의 변화를 반영하지 못한다는 한계가 있다.

한편, Iverson(2000)은 강우의 침투에 따른 공극수압의 변화를 Richards 방정식을 간단하게 변형한 선형방정식을 이용하여 해석하고, 이를 1차원 무한사면안정해석모형과 결합하여 사면의 안정여부를 계산하였다. Baum 등(2002)은 Iverson(2000)의 침투해석을 기초로 하여 시간에 따른 공극수압의 변화를 모의하여 사면의 안정성을 해석할 수 있는 TRIGRS를 개발하였다.

Baum 등(2005)이 미국 시애틀의 산사태(Landslide) 발생 지역에 SHALSTAB, SINMAP, TRIGRS 모델을 적용한 결과, TRIGRS 모델의 예측결과가 가장 우수한 것으로 나타났다. 2008년에는 초기 토양수분조건이 불포화 상태인 경우에도 적용이 가능하도록 TRIGRS2가 개발되었다. Sorbino 등(2010)은 SHALSTAB, TRIGRS, TRIGRS2를 1998년 이탈리아 중부지역에 적용한 결과 불포화 조건의 TRIGRS2가 가장 우수한 산사태(Landslide) 발생 예측결과를 나타냄을 확인한바 있다.

반면 최근 국내의 산사태(Landslide) 예측 모형에 관한 연구는 통계 기법(이용준 등, 2006; 마호섭 등, 2008; 배민기 등, 2009)이나 GIS/RS 기법(양인태 등, 2007; 이동하 등, 2009), 그리고 인공신경망 기법(권혁춘 등, 2008; 오현주, 2010) 등의 모형에 대한 것이 대부분이다. 반면, 물리적 기반 산사태(Landslide) 예측 모형(김재수 등, 2000; 차경섭, 2004)에 관한 연구는 외국에 비해 상대적으로 부족한 실정이다.

4) 원격탐사(Remote Sensing)

제 2 절 국내외 산사태 및 토석류 대응 정책 및 제도

세계적 기후변화는 축적 되어온 기상기후통계를 무력화시키고 있으며, 지구 온난화로 북극과 남극의 얼음이 빠른 속도로 녹아 홍수와 가뭄은 예측을 할 수 없는 상황에 있다. 우리나라도 예외가 아니며, 겨울과 봄의 강수량은 현격히 줄고, 여름철에는 기록적인 게릴라성 국지적 폭우가 빈발하고 있다.

최근 여름철 재해는 도심에서 외곽으로, 하천에서 산지로, 수해에서 토사재해로 바뀌고 있으며, 성공적 녹화로 높아진 파지력 때문에 유출되지 못하고 구곡(溝谷)에 퇴적된 토석이 여름철 집중호우와 결합되어 큰 사고를 만들고 있는 실정이다. 표 2.2.1은 토사재해와 수해의 차이점을 대응정책 및 대응제도의 관점에서 설명하고 있다.

표 2.2.1 대응정책의 관점에서의 토사재해와 수해의 차이점

	토사재해	수해
피해 양상		
특징	•국소적으로 피해가 발생 •강우에 기인하여 돌발적 발생 •토석과 유목 등의 고속 이동에 의해 가옥이 파괴되면서 인적 피해가 발생함 •강우시 매번 동일한 장소에서 상습적으로 발생하지 않음	•비교적 넓은 영역에 걸쳐 피해가 확대 •하천수위 상승으로 서서히 침수구역 증가 •제방파손에 의한 외수범람의 경우는 가옥의 파괴를 발생시키나, 내수범람의 경우는 가옥의 침수가 대부분 •호우마다 동일 지역에서 반복하여 발생
피난 행동 특징	•사각지대에서 시작되기 때문에 시각적 확인과 위험성 인식 곤란 •강우와 지형, 지질 등 복수의 요인으로부터 발생하므로 정밀도 높은 발생예측 곤란	•하천의 수위를 눈으로 확인할 수 있기 때문에 위험성을 인식하기 쉬움 •유역 내의 강우상황으로부터 수위를 정밀도 높게 상정하는 것이 가능
주민 의식	•위험성을 인식하기 어려워 피난하지 않음	•위험성을 인식하기 쉽기 때문에 피난함

우리나라는 지금까지 국가적으로 하천 정비에 투자하여 국가하천, 지방하천 및 소하천의 평균 정비율은 각각 99%, 70%, 40%대로 향상되어 하천의 통수능력이 커지고 수해에 대한 위험성이 크게 감소함으로서 치수에 성공하고 있다.

반면, 구곡밀도가 매우 높고 지형의 기복이 심하여 게릴라성 국지적 폭우에 의하여 퇴적 토사와 산지 표토가 한꺼번에 유출되는 토사재해가 증가하는 추세에 있다. 예를 들어 2011년 7월 26일 중부지방 일원에 발생한 집중호우로, 발생한 인명피해 60명 중, 51명이 토석류(Debris Flow) 등의 토사재해로 희생되는 사례를 보더라도 여름철 재해의 주된 요인이 변화하고 있음을 알 수 있다.

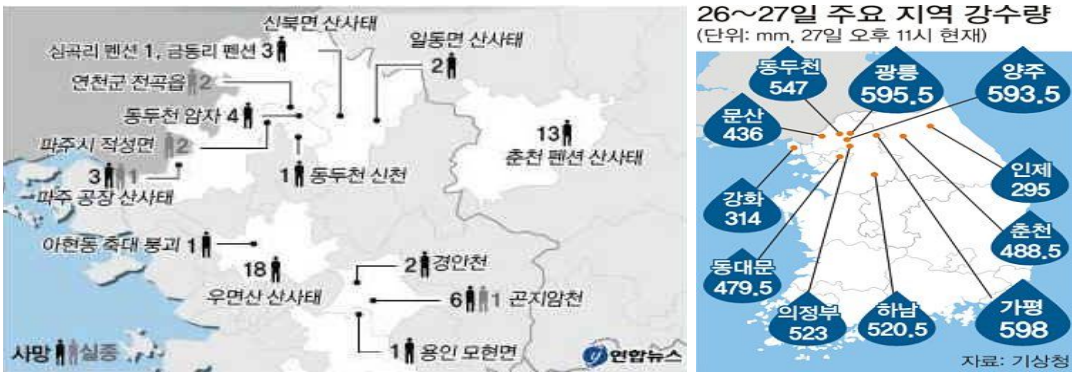


그림 2.2.1 2011년 7월 중부지방 일원의 강우와 인명피해 유형 (토사재해 51명, 수해 9명)*5)

이러한 토사재해는 조사해야 할 대상지 면적이 넓고, 접근성마저 나쁜 산악 비탈지인 경우가 많아서 비용이 많이 소요되나 예산은 제한적이다. 그나마 국고균등배분 이라는 원칙 때문에 국토부, 방재청, 산림청, 농림부, 지자체의 어려움이 있다. 표 2.2.2는 우리나라 주요 부처의 토사재해 법령체계를 요약하여 정리하였으며, 표 2.2.3은 각 부처의 대책내용을 비교하였다. 다른 나라와 마찬가지로 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow) 등의 토사재해는 관할 기관의 이해관계와 상관없이 대단히 복잡한 양상을 보이고 있으며, 이러한 이유로 각 행정기관간의 업무영역이 일부 중복 또는 혼재되는 경향이 있다.

5) 언론보도(연합뉴스)

표 2.2.2 우리나라 관련부처별 업무영역 (국토해양부)

관련부처	국토해양부		
법령	도로의 유지·보수 등에 관한 규칙	시설물의 안전관리에 관한 특별법	국토의 계획 및 이용에 관한 법률
목적	도로의 유지·안전점검 및 보수에 관하여 필요한 사항을 규정함	시설물의 안전점검과 유지관리를 통한 재해, 재난 예방으로 공중의 안전 및 국민의 복리증진에 기여	국토의 이용·개발과 보전을 위한 계획의 수립 및 집행 등에 필요한 사항을 규정함
정의		연직높이 50미터 이상을 포함한 절토부로서 단일 수평연장 200미터 이상인 절토사면을 시설물에 포함	방재시설 : 하천·유수지·저수지·방화설비·방풍설비·방수설비·사방설비·방조설비
유지 보수	도로의 유지·보수는 도로의 구조·시설기준에 관한 규칙이 정하는 기준에 적합하도록 하여야 한다.	▹5년마다 시설물의 안전과 유지관리에 관한 기본계획을 수립·시행해야 함	▹기후변화에 대한 대응 및 풍수해 저감을 통한 국민의 생명과 재산의 보호
방지대책			
복구방안	산사태 등으로 통행에 위험이 있는 경우 통행을 제한하고, 응급복구와 우회소통대책 등 필요한 조치를 취한다.	안전점검 결과 중대한 결함사항에 대하여 보수, 보강 등 필요한 조치를 취한다.	
재해대책	재해대책에는 다음 사항이 포함되어야 한다. ①재해에 대비한 비상근무체계, ②재해취약지구의 지정 및 관리대책, ③응급복구 및 교통대책, ④소요되는 장비 및 자재의 동원 대책, ⑤기타 재해대책에 필요한 사항	시설물정보관리종합시스템 ①시설물의 안전 및 유지관리 계획 ②안전점검·정밀안전진단 및 유지관리의 실적 ③사용제한 등에 관한 사항 ④보수·보강 등 조치결과의 통보내용 ⑤기타 정보관리의 필요가 있다고 인정되어 국토해양부령으로 정하는 사항	
행정 제한			도시·군 기본계획에는 방재 및 안전에 관한 사항에 대한 정책 방향이 포함되어야 한다. 용도지구의 지정 또는 변경을 도시·군 관리계획으로 결정한다. ▹방재지구: 풍수해, 산사태, 지반의 붕괴, 그 밖의 재해를 예방하기 위하여 필요한 지구
다른 법률과의 관계		이 법은 시설물의 안전과 유지관리에 관하여 다른 법률에 우선하여 적용한다.	

표 2.2.2 우리나라 관련부처별 업무영역 (소방방재청)

관련부처	행정안전부 - 소방방재청		
법령	급경사지 재해예방에 관한 법률	자연재해대책법	재난 및 안전관리기본법
목적	급경사지 붕괴위험지역의 지정·관리, 정비계획의 수립·시행, 응급대책 등을 규정함	자연재해의 예방·복구 및 그 밖의 대책에 필요한 사항을 규정	재난 및 안전관리체제를 확립, 재난의 예방·대비·대응·복구와 재난 및 안전관리에 필요한 사항을 규정
정의	급경사지란 높이 5미터 이상, 경사도 34도 이상이며, 길이 20미터 이상인 인공 비탈면 또는 높이가 50미터 이상, 경사도가 34도 이상인 자연 비탈면		
유지 보수	연 1회 이상 안전점검을 실시 5년 단위의 붕괴위험지역 정비 중기계획을 수립		
방지대책	▹붕괴위험지역 지반의 상시계측관리를 할 수 있다. ▹토석류 유출 및 산사태 등 피해가 우려되는 때에는 인접지역의 피해방지 사업을 포함하여 수립할 수 있다.		재난예방을 위한 긴급안전점검 등 재난이 발생할 우려가 있는 등 긴급한 사유가 있으면 긴급안전점검을 수행, 안전조치를 할 것을 명할 수 있다.
복구방안	▹급경사지에서 재해가 발생 또는 발생 우려가 있는 때에는 시설의 사용을 제한·금지하거나 보수·보강 또는 제거하는 등의 안전조치를 명령할 수 있다.	산사태 또는 토석류로 인하여 하천 유로변경 등이 발생한 지역으로서 근원적 복구가 필요한 지역에 대하여 지구단위종합복구계획을 수립할 수 있다.	
재해대책	▹급경사지에 관한 정보체제의 구축 : 급경사지의 현황자료를 관할 본부장에게 제출하여야 한다. ▹급경사지의 안전관리와 재해예방에 관한 정보와 기술의 축적 및 보급을 위하여 표준지침을 마련		상시 종합상황실을 설치·운영, 재난관리체계 등의 정비·평가 ①대규모 재난에 대비한 예방 대응 복구과정 ②재난관리책임기관의 재난 대응 조직의 구성 및 정비 실태 등
행정 제한	▹필요시 붕괴위험지역의 지정을 요청할 수 있다.	산사태위험지역 등 재해가 발생할 우려가 있는 지역을 자연재해위험지구로 지정	소방방재청장은 재난예방을 위한 조치 등에 필요한 지원 및 지도를 할 수 있다.
다른 법률과의 관계	▹고속국도 및 일반국도, 「시설물의 안전관리에 관한 특별법」 제2조 제2호 및 제3호의 시설물에 관하여는 이 법을 적용하지 아니한다. ▹이 법은 급경사지의 지정·관리 및 응급대책 등에 관하여 다른 법률에 우선하여 적용한다.		재난의 예방·복구 등에 관하여는 이 법에서 정한 것 외에는「자연재해대책법」에 따른다.

표 2.2.2 우리나라 관련부처별 업무영역 (산림청)

관련부처	농림수산식품부 - 산림청		
법령	산지관리법	사방사업법	산림보호법
목적	산지를 합리적으로 보전하고 이용하여 임업의 발전과 산림의 다양한 공익기능의 증진을 도모함	국토의 황폐화를 방지하고 국토를 보전하기 위하여 사방사업을 효율적으로 시행함으로써 공공이익의 증진을 도모함	산림보호구역을 관리하고 -중략- 산사태를 예방·복구하는 등 산림을 건강하고 체계적으로 보호
정의		황폐지란 산지가 붕괴되거나 -중략- 지역으로서 국토의 보전, 재해의 방지를 위하여 복구공사가 필요한 지역	
유지 보수		산지보전사업 : 산지의 붕괴·침식 또는 토석의 유출을 방지 산지복원사업 : 훼손된 산지를 복원	산림청장은 산림청장 소속으로 산사태예방지원본부를 설치·운영하여야 한다.
방지대책	토사유출, 산사태 또는 인근지역의 피해 등 재해 방지나 경관 유지 등에 필요한 조사·점검·검사 등을 할 수 있다.	산사태예방사업 : 산사태의 발생을 방지하기 위하여 시행하는 사방사업	산림청장은 체계적인 산사태예방을 위하여 전국산사태예방장기대책을 5년마다 수립·시행하여야 한다.
복구방안		산사태복구사업 : 산사태가 발생한 지역을 복구하기 위하여 시행하는 사방사업	
재해대책		산림청장은 5년마다 다음 각 호의 사항이 포함된 사방사업 기본계획을 수립·시행하여야 한다. ①사방사업의 기본목표 및 추진방향 ②사방기술 개발 촉진 및 활용을 위한 사항 ③사업 대상지 및 사후관리에 관한 사항 ④사방사업 기술 인력의 육성에 관한 사항 등	산사태 대응팀을 설치하고, 다음의 업무를 수행하게 할 수 있다. ①산사태의 예방 및 대응 활동 ②사방시설의 설치 및 관리 ③산사태취약지역 지정 및 관리 ④산사태 현장 예방단 구성 및 운영 ⑤산사태예방대책의 수립을 위한 기초정보 수집과 전달 등
행정 제한	임업용산지에서는 산지전용 또는 산지일시사용을 할 수 없다. 허가 등의 처분을 받거나 신고 등을 하려는 자는 산사태 또는 인근 지역의 피해 등 복구에 필요한 비용을 예치하여야 한다.		지역산사태예방기관의 장은 산사태취약지역을 지정할 수 있다. 토사 유출 및 낙석의 방지 등으로 인한 피해의 방지를 위하여 재해방지보호구역을 지정할 수 있다.
다른 법률과의 관계			「급경사지 재해예방에 관한 법률」의 급경사지 및 붕괴위험지역, 도로, 「시설물의 안전관리에 관한 특별법」 의 시설물에 관하여는 적용하지 아니한다.

표 2.2.3 부처별 업무내용 비교

부처명	정책	주요내용
국토해양부 교통정책실	과학적 도로관리 추진	도로절토사면 운영업무를 전문기관에 위탁 시행하여 효율적이고 체계적인 유지관리를 통한 안전사고 예방 및 적정예산 운영도모 -위험 절토사면에 대한 현장조사, 자동계측, 사면 안정성 검토, 투자우선순위 결정 및 절토사면 Data-Base관리 -일반국도 상 절토사면 12,650개 중 위험절토사면 4,450개를 선정하여 매년 절토사면 정비 실시 -도로절토사면 및 터널 입·출구 절토사면에 상시계측시스템과 CCTV를 설치 추진
행정안정부 소방방재청 방재관리국	국민생활 안전문화 확산	재난안전 교육기반 확충 ·방재안전교육 및 전문 인력의 체계적 양성을 위한 법적근거 마련 ·대국민 쌍방향 재난상황 전파체계 구축 -산사태, 침수지역, 대형화재 등 재난상황 알림 및 행동요령 서비스 제공 -생활주변 위험요인 또는 피해상황 신고, 해당기관에서 즉시 조치
	재해취약지역 투자 확대	재해위험지구 정비 : 224개소 5,176억원 ·인명피해 우려가 높은 상습침수 및 붕괴위험지역 우선 정비 추진 ·사면보강보다는 근원적인 위험요인 해소를 위해 안전지대로 이주 유도
	서민 밀집 위험지역 정비	·달동네 등 재난취약계층 밀집지역에 대한 우선적 재해대책 시행 ·노후사면, 붕괴우려 비탈면, 마을 배수시설 등 공공시설 정비
	급경사지 붕괴위험지역 정비	·생활권 주변 위험지역 내 주택 이주, 사면정비 등을 통한 안전 확보 ·인명피해 우려지역에 계측기를 설치하여 붕괴예측, 주민대피체계 구축 ·소방방재청에 붕괴위험지역 지정 권고권한 부여(현행 : 시장·군수·구청장)
	안전기준 표준화로 대외 경쟁력 강화	·적용 법령에 따라 달리 규정된 안전관리 및 시설기준의 표준화 추진 ·ISO 재난관리 국제표준의 국내 적용, 확산방안 마련 ·행안부-기표원-소방방재청 간 정책협의체 구성, 공동 대응 추진
농림수산 식품부 산림청	산림재해 대응 체계 확립	·산사태 방재 대책 현실화 -토석류 위험지도 제작·보급 등을 통해 산사태 위험지를 생활권 중심으로 확대·개편 ·사방댐(695개)과 산림내 계곡정비사업(416km) 등 사방사업을 도시·생활권 지역에 집중

그리고, 우리나라의 토사재해는 도심 외곽의 주거지 확장, 농촌의 펜션 침투가 산록부 완사면과 선상지에서 이루어져서 잠재적 인명피해 가능성이 증가되는 경향이다. 이는 인명피해 위험공간이 증가하는 경향에도 불구하고 앞에서 설명한 것과 같이 각 관할 기관이 일부 흩어져 있어서, 행정이나 제도 개선 등으로 발 빠르게 적절히 대처하지 못하고 있는 부분이 있다. 표 2.2.4는 피해유형별 토지이용 특성을 보여주고 있으며, 발생지와 피해지가 토지관리 행정체계가 다름으로서 제도적으로 토사재해를 적절히 관리하는데 어려움이 있다.

표 2.2.4 피해 유형별 토지이용 특성

지역(인위적 영향)	토지용도 구분		특성
	발생지	피해지	
'02년 동해시 삼화동(산불교란)	준보전산지 자연녹지지역	준주거지역	· 산불로 인한 지표 교란 후유증으로 발생한 토석류가 농촌 주택과 인근 철도를 덮침(인명피해 무)
'06년 평창군 진부면 상월오개리(임도)	농림지역 계획관리지역	농림지역	· 자연임지 상부사면의 붕괴로 발생된 토석류가 하부 임도에 의해 확대, 교란되면서 농가, 농지를 덮침(인명피해 유)
'06년 인제군 인제읍 가리산리(산지개간)	농림지역	계획 관리지역	· 하상에 퇴적된 축적성 토석이 70년대부터 하천변 고위단구지형에 형성된 농가를 덮침(인명피해 7명)
'11년 춘천시 신북면 천전리(성토사면)	보전녹지지역	일반주거지역 보전녹지지역	· 곡두부 성토사면에서 발생한 표토 붕괴가 토석류로 발달하면서 선상지에 신규 입지한 주택을 덮침(인명피해 13명)

표 2.2.5는 미국의 토사재해 방지체계를 보여주고 있으며, 표 2.2.6은 일본의 사례를 나타내고 있다. 이중에서 토사재해에 대하여 제도 개선 등 소프트한 대책을 강력하게 추진하고 있는 나라는 일본으로서 토사재해 관련 법률을 체계적으로 정비하고, 매년 4천억엔의 예산을 투입하여 토사재해 경계구역 52만개소를 지정, 관리하고 2011년 현재 총 개소수의 20%에 대하여 위험요인 해소사업을 추진하고 있다. 산지의 도시화 및 공원화로 토사재해 위험지역이 증가하고 있어서 대상지를 정비하는 데 있어서 현재의 속도로 추진한다면 향후 80년이 더 소요될 것으로 추정하고 있다.

표 2.2.5 미국의 토사재해 방지 체계

구분	방재관리조직	기능
연방정부	국토안보부(DHS) 연방재난관리청(FEMA)	·주정부와 지방정부의 재난관리 활동 지원 ·주정부 및 지방정부의 위기관리부서, 비영리단체 및 민간부문의 집단과 함께 팀을 구성하여 재난에 대비·대응 ·비상대응팀(ERT), 연방조정관(FCO), 수행비상정보·조정센터(EICC)
주정부	주 위기관리본부(OES) 주 작전센터(SOC) 주 조정센터(SSC)	·중앙정부와 지방정부 사이에 연결고리 역할 수행 ·지방정부의 대응범위를 넘어선 대규모 재난의 관리 ·재난발생시 지휘감독권
지방정부	위기관리국(EOC)	·재난관리의 제일선 책임 ·재난발생시 비상운영센터(EOC)를 운영하며, 자체 현장지위체계(ICS)를 갖추고 있음 ·재난대비 기획기능뿐만 아니라 재난발생 기간 중 경찰, 소방 및 기타 서비스에 대한 조정기능을 수행

표 2.2.6 일본의 토사재해 방지 체계

법률	핵심제도 – 구역제	지정기관 관리기관	주요 대책(관리 개소 수)
사방법 제정 1897년	사방지정지	국토교통대신 도도부현 지사	사방댐 등 사방시설의 공사·관리 시설 손상, 토지 변형행위 등 제한 및 허가(약 183,863개소)
산사태 방지법 제정 1958년	산사태방지 구역	국토교통대신 도도부현 지사	산사태 방지시설의 공사·관리 산사태 조장·유발행위 제한 및 허가(6,785개소)
급경사지 붕괴방지법 제정 1969년	급경사지 붕괴위험구역	도도부현 지사	급경사지(경사도 30도 이상) 붕괴, 조장 유발행위 제한 및 허가 급경사지 붕괴방지 공사(330,156개소)
토사재해 방지법 제정 2000년	토사재해 경계구역 (Yellow Zone)	도도부현 지사	토사재해관련 각종 정보전달 경계피난체제 정비 경계피난에 관한 주민에의 주지
	토사재해 특별경계구역 (Red Zone)	도도부현 지사	특정 개발행위 허가제 건축물 구조규제 위험 건축물 이전 권고, 이전 대책

일본의 소프트한 재해대책의 사례로 “에이메현 토사재해 위험지 patrol 행사”가 있다. 매년 6월을 토사재해방지기간으로 지정하고 토사재해에 관한 주민의 이해와 관심을 높이기 위하여 방재지식을 보급하고, 경계, 피난 체제의 정비 등에 관한 각종 행사를 한다. 이때, 현, 시, 소방, 경찰이 합동으로 토사재해위험개소와 공사 현장을 순찰하고 주변의 주민에게 대피 장소 및 자택 주변의 토사재해 위험 지역을 정확하게 알리는 전단지를 배포한다. 이때 지자체등에서는 피난로, 피난 장소를 정비하고 유사시 주민들이 신속한 피난이 가능하도록 정비하고 있다.



그림 2.2.2 에이메현의 패트롤 광경[6)]

그리고, 토사재해가 발생한 경우 피해를 받을 가능성이 있는 구역의 주민에게 다이렉트 메일로 통지하고 있으며, 「토사재해위험구역도」나 「지역방재계획서」등과 함께 집중호우가 발생한 경우의 경계피난 등 안전대책을 강화하고 있는 실정이다.

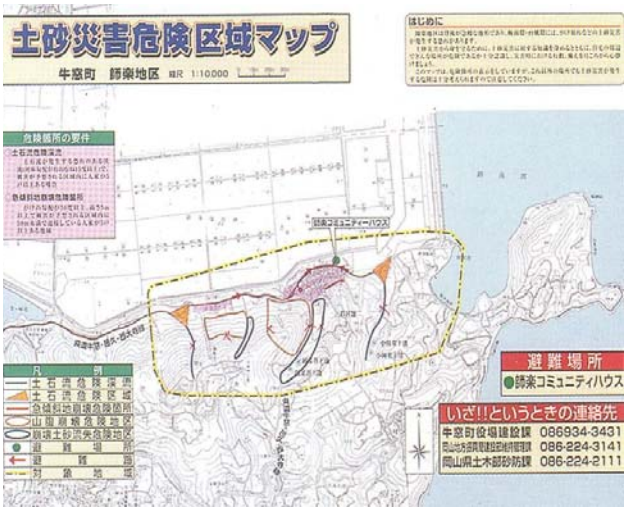


그림 2.2.3 토사재해위험구역도 (일본 사례)[6)]

6) 출처 : 에이메현 홈페이지



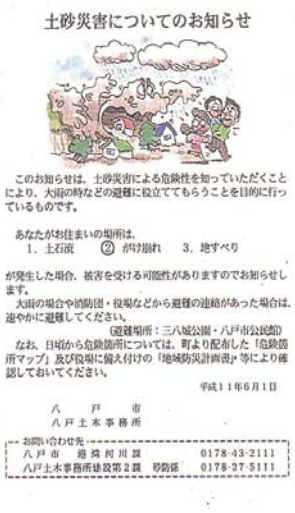


그림 2.2.4 토사재해에 대한 통지문 (일본 사례)[6)]

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 국내 산사태 및 토석류 발생 유형 분석 및 특성 해석

1. 지질별 국내 산사태 및 토석류 피해 사례 분석

가. 산사태/토석류 발생 관련 기존 문헌/연구자료 수집

본 연구에서는 국내에서 발생한 산사태(Landslide) 및 토석류(Debris Flow)의 사례를 수집하기 위하여 기존 문헌 및 연구 자료의 수집을 실시하고 이를 기반으로 한 산사태와 토석류의 피해사례를 분석하였다. 따라서 한국지질자원연구원이 자체적으로 수집한 자연사면 산사태 자료를 토대로 국내 산사태 발생현황과 피해사례, 그리고 지질 및 지형특성에 따른 산사태 특성을 분석하였다.

본 연구에서 1991년 용인-안성지역 산사태, 1996-1998년 경기 북부지역 산사태, 경북 포항-경주지역 산사태, 2002년 태풍 루사로 인한 강원도 강릉-주문진지역 산사태, 경남 마천-거창 산사태, 2003년 태풍 매미로 인한 전국 산사태, 2005년 전북 무주-장수 지역 산사태, 2006년 강원도지역 산사태의 자료 일부를 수집 정리하였다. 이와 같이 1990년대부터 국내에는 거의 매년 하절기에 태풍 또는 집중호우로 인해 여러 지역에서 산사태가 발생하였으며, 이로 인한 인명피해는 표 3.1.1[7]에서 보는 바와 같이 연평균 자연재해로 인한 사망자의 약 23%가 산사태재해로 인해 발생하고 있다. 수집한 자료는 자연사면에서 발생한 개별 산사태에 대해 지질, 지형, 산사태 기하양상, 토질특성, 임상특성 등을 현장조사를 통해 조사한 것으로서, 약 5,000여개에 이르는 방대한 양의 자료이다. 본 연구에서는 이 자료를 분석하여 그 특성을 분석하였으며, 특히 이 중에서 정밀조사가 실시된 860개 산사태를 선별하여 각 산사태별 특성을 정밀분석 하였다.

7) 출처 : 2006, 우리나라의 지반재해와 방재정책

표 3.1.1 최근 30년간 자연재해로 인한 사망자 통계(박덕근 외, 2006)

(단위: 명)

연도	전체 자연재해 사망자	산사태 및 토사재해 사망자			연도	전체 자연재해 사망자	산사태 및 토사재해 사망자		
		소계	산사태 (토석류)	절개지 및 축대 붕괴			소계	산사태 (토석류)	절개지 및 축대 붕괴
1976	526	56	별도 구분 없음		1991	236	68	63	5
1977	345	222			1992	40	2	1	1
1978	158	18			1993	69	12	12	0
1979	423	167			1994	72	6	6	0
1980	279	58			1995	157	28	28	0
1981	216	25			1996	77	2	2	0
1982	121	9			1997	38	5	5	0
1983	91	N/A			1998	384	111	103	8
1984	265	18			1999	89	32	24	8
1985	250	50			2000	49	12	11	1
1986	156	N/A			2001	82	9	7	2
1987	1,022	155			2002	270	79	74	5
1988	143	16			2003	151	37	31	6
1989	307	43	38	5	2004	17	3	1	2
1990	258	67	56	11	2005	47	11	10	1
전체 자연재해 사망자*			합계 : 6,338				연평균 : 211.3		
산사태 및 토사재해 사망자**			합계 : 1,321				연평균 : 47.2		
전체 자연재해 대비 산사태 및 토사재해 사망자 비율 : 22.3%									

나. 산사태/토석류 피해사례 정밀 분석

(1) 용인-안성

1991년 7월 20일과 21일 양일간에 경기도 안성군과 용인군에 내린 집중호우로 많은 산사태가 발생하였다. 경기도 치산사업소, 용인군청과 안성군청에서 조사한 자료에 의하면 양일간 내린 최대 강우량은 229mm 이었으며, 이로 인하여 용인과 안성에서 발생한 산사태는 2,600여개에 이른다고 보고하였다(기상청, 1991; 박용원 외, 1993). 이 지역의 산사태는 선행강우량보다는 당일 내린 강우강도에 의하여 유발되었으며, 특히 일 강우량이 114mm 이상이거나 최대 시우량 40mm 이상인 지역 및 2일간 누적강우가 200mm 이상인 지역에서 산사태가 발생한 것으로 보고되었다(박용원 외, 1993).

산사태가 발생한 면적은 약 350km^2 에 이른다. 이곳은 흑운모편마암, 석영편암, 화강암 등 3종의 암석이 분포하는데 3종의 암석이 비슷한 분포 면적을 가지고 있다. 이 지역은

낮은 구릉지를 형성하고 있고 사면이 짧게 형성되어 있는 지형적 특징으로 인하여 산사태들은 비교적 소규모이다. 풍화심도도 0.5-1m 내외의 심도를 보이고 있고 붕적층의 발달이 미약하여 사태물질의 구성비가 암편 보다는 모래질이 우세하다.

(2) 철원-연천

1996년 7월 26일과 27일 경기도 북부에 내린 집중호우로 인하여 경기도 연천군과 강원도 철원군 일대의 약 1,400km^2 면적에서 916개의 산사태가 발생하였다. 산사태가 발생한 7월 26, 27일 양일간의 강우량은 예년의 7월 한 달간 평균 강우량인 456mm를 초과하는 493mm를 기록하였고, 27일에는 6시간 동안 142mm의 강우량을 보여 당일의 일 강우량인 268mm의 53%를 차지하고 있다. 또한 시간당 최대 강우량은 45mm로서 이는 최대 일 강우량의 17%에 해당한다. 그러므로 이 지역의 산사태가 27일 대부분 발생한 것은 단시간 동안의 집중된 강우에 기인되었을 것으로 보인다.

산사태 유발물질은 거의 기반암 상부의 미고결 토층으로 붕적물질(colluvium), 풍화 잔류토(residual soil) 등이 혼재한다. 분석에 이용한 66개 산사태 중 붕적층과 잔류토양이 섞여서 복합적으로 진행된 경우가 전체의 64%인 42개로 가장 우세하며, 잔류토양이 주 구성물질인 산사태가 26%인 17 개소이다.

(3) 장흥

이 지역의 행정구역은 경기도 의정부시에 속하며 의정부 시내로부터 서측에 위치한다. 이 지역에는 1998년 8월 4일부터 7일까지 4일에 걸쳐 588mm에 달하는 강우량을 기록하고 있다. 산사태가 집중적으로 발생한 날은 8월 6일로서 이날 하루에만 405mm의 폭우가 내려 총 511개의 산사태가 발생하였다.

산사태가 발생한 지역은 의정부시를 중심으로 남북으로 분포되어 있는 화강암지역의 서측이며, 호상편마암과 반상변정편마암이 분포하는 지역이다. 이들 편마암들은 주변 화강암이 분포하는 지역에 비하여 비교적 가파른 험준한 지형을 보이고 있으며, 산릉을 따라 노두의 발달상태가 양호한 편이고 산사면을 따라서도 곳곳에 노두가 있으나 규모가 작고 단열의 발달이 심한 블록형태를 띄고 있다. 대부분 노두가 발달하는 지역에서는 산사태가 발생하지 않으나 이곳은 특징적으로 분포하는 블록 형태의 풍화노두가 파괴되어 하부로 유동하는 산사태들이 많이 발생하였다.

(4) 상주

1998년 8월 2회에 걸쳐 총 약 500mm의 집중호우가 상주와 보은군 지역에 내렸다. 8월 11일과 12일에 총 360mm, 8월 15일에는 총 129mm의 집중강우로 인하여 보은-상주 간 지역의 약 1,000개소에서 산사태가 발생하였다. 이 논문에서 언급한 산사태는 그중 발생 빈도가 밀집한 지역인 상주시 화서면, 화남면, 외서면 및 외남면 등 4개면에 걸친 지역에서 발생한 500여 개의 산사태에 관한 자료이다.

이 지역은 주로 화강암과 석영반암으로 구성되어 있다. 화강암은 대체로 고른 풍화를 받고 저지대에 분포하고 있고, 신선한 암반 노두가 넓게 발달하는 석영반암은 조성광물이 풍화에 강한 관계로 암반으로 구성된 고지대를 형성하고 있어 산사태는 발생하지 않았다. 이 지역 산사태는 저지대를 형성하는 화강암 지역에서만 발생하였다.

(5) 강릉

2002년 8월 31일-9월1일 양일간에 걸쳐 한반도를 강타한 태풍 '루사'의 영향으로 강릉지역에 최대 900mm의 폭우가 내려 강릉시 사천면과 양양읍 일대에 수백개의 산사태를 발생시켰다. 특히 산사태가 집중적으로 발생한 지역은 2000년 산불이 발생한 지역과 일치한다. 행정구역상으로 강릉시 사천면 노동리와 석교리에서 가장 많이 발생하였는데, 이 지역에서만 525개의 산사태가 확인된다.

이 지역은 전역이 화강암으로 중립 내지 세립질의 결정질 암석이다. 이 화강암은 풍화심도는 얕으나 0.5-1m 내외의 고른 풍화대를 형성하고 산사태를 일으키는 미고결 토층은 대부분이 풍화토인 모래질로 구성되어 있다. 산사태가 발생한 지점의 풍화정도는 완전풍화(completely weathered)에 해당하는 흙이고 사태가 발생한 후의 노출된 암반의 상태는 대부분이 높은 풍화 또는 그 보다 덜 풍화된 보통풍화(moderately weathered) 암반이다. 따라서 이 지역은 완전 풍화된 모래질의 흙이 기반암 경계를 따라서 침투된 강우에 의하여 발생한 산사태이며 사태물질은 암편이 거의 포함되지 않은 토사류(sediments flow)에 해당한다.

(6) 주문진 지역

이 지역의 경우 사천지역과 마찬가지로 2002년 태풍 '루사'에 의해 산사태가 발생한 지역으로 강우계가 설치되지 않아 확실치는 않으나 태풍 '루사'가 강릉에서 속초방향으로 진행한 점을 감안하면 속초의 315mm 보다는 많고, 오히려 강릉과 유사한 강우량인 800mm 정도를 보였을 것이라 생각된다. 이 지역도 산림의 훼손이 심하지만 강릉과는 달

리 산불에 의한 소실이 아니라 솔잎혹파리 방재사업의 일환으로 인위적으로 벌목을 한 지역이다. 이 지역의 벌목은 광범위하게 행하여 졌고, 산사태가 가장 집중적으로 발생한 지역도 벌목으로 산림이 훼손된 지역과 거의 일치하여 이 지역에서만 840개의 산사태가 발생하였다.

이 지역은 강릉과 동일한 화강암으로 구성되어 풍화상태도 매우 유사하여 0.5-1m 내외의 박층인 모래질 풍화토가 기반암을 피복하고 있고, 사태물질도 모래질이 우세하고 암편이 적게 섞인 토사류(sediments flow)에 해당된다.

(7) 속초

속초시 일원에도 2002년 태풍 '루사' 기간 중 2일간 315mm의 강우로 인하여 많은 산사태가 발생하였다. 다음 해인 2003년 9월 태풍 '매미'로 207mm의 강우가 다시 내려 산사태 피해가 추가된 지역이기도 하다. 이 지역은 타 지역에 비하여 산사태 발생이 미약한 편으로 약 200여개가 발생하였으며, 이는 강우의 강도가 집중되지 못한 이유 때문일 것이라 판단된다.

이곳도 강릉 및 주문진과 마찬가지로 산사태가 집중적으로 발생한 지역은 해발 300m 이하의 비교적 낮은 구릉으로 형성되어 있으며, 특히 신흥리 지역은 전형적인 구릉지 지형으로 강릉과 주문진과 같은 화강암이 분포하고, 이곳에서 가장 많은 산사태가 발생하였다.

(8) 마천

마천은 소백산맥의 남단인 지리산의 북측에 위치하고 있으며 험준한 지형을 이루고 있다. 이 지역에는 2002년 8월 31일과 9월 1일 사이에 태풍 '루사'가 지나면서 그 영향으로 대형 산사태들이 발생하였다. 이 지역의 산사태는 마천면 소재지를 중심으로 북측의 백운산 북측 사면과 마천면 남서부의 덕전리 남측사면에 집중적으로 발생되었고, 특히 가흥리 금대산 남서측에서 발생한 산사태로 인하여 붕적층의 커다란 암석들이 마천중학교 건물을 파손하여 학교 건물이 폐쇄되기도 하였다.

지리산 어리목 지역에서 측정한 바에 의하면 1일 최대 강수량 856mm를 기록하였으며, 이 지역과 가장 근접한 산청에서 측정한 자료에 의하면 286mm를 기록하고 있어 최소한 500mm 이상은 기록되었을 것으로 추정한다.

이 지역은 흑운모와 각섬석을 다량 함유한 염기성 반려암이 넓게 분포하며, 해발 600m를 기준으로 상부에는 선캠브리아기 편마암이, 하부구간에는 염기성 반려암이 분포한다.

특이한 점은 반려암과 접촉하고 있는 주변의 편마암 지역에서와는 달리 반려암 분포지역에 산사태가 집중되어 있을 뿐 아니라 과거에 발생하였던 산사태의 흔적이 여러 곳에서 관찰된다. 반려암 분포 지역에서 풍화에 취약한 특이한 지질구조는 관찰되지 않으나 절개지나 산사태 파괴면에서는 차별풍화의 산물인 핵석이 매우 잘 발달하고 있다.

이 지역에서의 차별풍화 현상이 어떤 조건 하에서 형성되었는지는 보고된 바 없으나 이런 현상으로 인하여 이 지역의 풍화심도가 매우 불규칙하게 발달한다. 이 지역에서 최대 풍화토의 심도는 10m 이상으로 다른 연구지역의 풍화심도에 비하여 월등히 깊게 발달되어 있다. 또한 핵석을 포함하는 풍화대가 과거부터 지속적으로 붕괴되어 사면 중-하부에 깊은 붕적층을 형성하고 있는 것도 특징 중의 하나이다.

(9) 거창

2003년 9월 12 ~ 13일에 걸쳐 우리나라에 상륙한 태풍 '매미'의 영향으로 거창군 가북면 일대에 집중적으로 산사태가 발생하였으며, 특히 용암리의 송정마을과 중촌리의 다전마을에서 100여개의 산사태가 발생하였다. 강우량은 타 지역에 비하여 적은 편으로 161mm를 기록하고 있으나 전체 강우량이 하루에 집중된 점이 특이하다.

지질은 선캠브리아기의 변성암류인 흑운모 편마암과 흑운모 대상편마암을 기반으로 하여 이를 관입한 중생대의 화성암류로 이루어져 있다. 산사태는 편마암 지대에서도 다소 발생했으나 집중적인 발생지는 화강암 분포지이다. 산사태가 발생한 지점은 대부분 능선과 가까운 지대로서 0.5m 내외의 얇은 슬라이드 형태를 보이고 있다. 이는 이 지역의 풍화상태가 고른 분포를 보이고 붕적층이 거의 발달하지 않아 산사태의 파괴가 기반암 상부의 얇은 풍화토층에서만 발생되었다. 산사태가 발생한 상부의 단애(scarp)에서는 약 0.5m 정도의 나무뿌리 깊이로 파괴면이 형성되어 있다.

(10) 무주-장수

2005년 7월 1일-3일 사이에 최소 200mm 이상 폭우로 인하여 무주군 안성면과 장수군 계북면 등에서 적어도 300개 이상의 산사태가 발생하고 3명이 사망하는 피해가 발생했다. 이들 산사태는 많은 비와 더불어 이 지역 대표수종인 뿌리가 옆으로 퍼지는 천근성 침엽수와 낙엽송 등이 큰 역할을 하여 발생하였다.

무주-장수지역은 소백산맥의 주맥이 남서로 연계되면서 험준한 장년기 산지를 형성한다. 이 지역의 지질은 선캠브리아기의 편마암류와 중생대의 화강암류가 주류이며 국지적으로 퇴적암류가 분포한다. 편마암류는 흑운모편마암과 우백질 화강편마암이며 이들은

화강암화작용에 의하여 대부분 결정질화 되어 있다. 이곳의 화강암은 조립질 입상조직을 보이고 있어 석기나 광물학적으로 화강암과 유사하다.

다. 산사태/토석류 발생원인 규명 및 분류

국내에서 발생하는 자연사면 산사태 및 토석류는 95%이상 하절기 집중호우나 태풍에 동반된 호우에 의해 발생하고 있다. 따라서 우리나라에서 산사태를 발생시키는 가장 직접적인 원인은 강우라고 할 수 있으며, 강우와 지형, 지질, 지반조건이 서로 복합적으로 연계되어 산사태와 토석류의 발생 유무가 결정된다. 따라서 국내 산사태 발생 시기의 강우특성에 대한 분석은 발생원인 규명에 있어 매우 중요하다.

강우와 산사태 발생의 연관성은 Caine(1980)이 강우강도와 누적강우 간의 관련성을 제시한 이후 이에 관련된 많은 연구가 진행되었고(Innes et al, 1983; Olivier et al, Crosta and Frattini, 2001, Cannon and Gartner, 2005), 우리나라에서도 최근 20년 동안의 강우와 산사태 발생 간의 연관성 규명을 위한 연구들이 진행되었다(홍원표 외, 1990; 김원영 외, 1998; 김경수 외, 2000; 한중근, 2001; 김경수 외, 2006).

Caine(1980)은 73개의 천층 슬라이드(shallow slide)와 토석류 산사태(debris flow)를 대상으로 강우기간과 강우강도가 산사태 발생에 미치는 영향을 분석하였다. 그에 의하면 산사태가 발생하기 위한 강우기간과 강우강도의 관계는 아래 식에 의하며 일정시간 내에 강우강도가 이를 상회하는 단계에서 산사태가 발생한다고 하였다.

$$I = 14.82 \times D^{-0.39}$$

여기서, I는 강우강도(rainfall intensity: mm/hour)

D는 강우기간(rainfall duration: hour)

예를 들어 일정 강우강도 하에서 산사태가 발생할 수 있는 강우기간은 위 식을 만족하는 시간보다 길어야하며, 반대로 일정 기간 내에서 산사태가 발생하려면 위 식을 만족하는 강우강도보다 커야한다고 하였다. Caine의 이론은 그 후 많은 학자들에 의하여 수정, 보완되어 왔으나(Siddle et al, 1985; Crosta and Frattini, 2001; Cannon and Gartner, 2005), 아직도 강우와 산사태의 연관성 해석에 직접적으로 인용되고 있다.

Siddle(1985)에 의하면 건조 상태에 있는 박층의 미고결 지층이 파괴시점에 이르기 위해

서는 완전히 포화되어야 하며, 이를 위해서는 최소한 2일 내에 125mm의 강우가 필요하다고 하였다. Brand(1885)는 홍콩에서 발생한 산사태들을 대상으로 한 연구결과 산사태의 유발요인은 강우지속시간보다는 집중강우에 의한 것이라 하였고, Yagi and Yanabe(1987)는 7일 정도의 선행 강우량이 중요 요소로서 그 기간의 선행강우량이 클 때는 집중강우가 없더라도 산사태가 발생할 수 있다고 하였다.

Olivier(1994)는 산사태를 일으킬 수 있는 산사태 반응지수는 연평균 강우, 누적강우 및 집중강우 등 3가지 요소와 관련된다고 하였다. 즉, 반응지수가 1을 초과할 때부터 발생하며 값이 커질수록 발생확률은 커진다고 하였다. 또한 집중강우량이 연평균 누적강우량의 20%를 초과할 경우 산사태가 발생한다고 보고하였다.

$$Cf = Cc + Ce$$

여기서, Cf는 산사태반응지수(coefficient of final response)

$Cc = CPR / MAP$

$Ce = PRE / MAP$

CPR: 누적강우량(cumulative precipitation record)

PRE: 집중강우량(precipitation record of event)

MAP: 연평균 강우량(mean annual precipitation)

홍원표(1980)는 누적강우량과 강우강도 모두가 산사태 발생에 영향이 있다고 하였으나, 김원영(1998)과 한중근(2001)은 각각 경기북부의 산사태 자료와 부산지역의 산사태 자료를 분석한 결과를 근거로 누적강우량 보다는 강우강도에 의하여 산사태가 발생한다고 하였다. 위의 학자들 간에 약간의 차이점은 있으나 산사태 발생은 강우강도와 누적강우 등 2가지 요소와 공히 연관되어 있다고 보고하고 있으나 발생에 미치는 영향력은 강우강도가 주도하는 것으로 판단하고 있다.

표 3.1.2는 10개 지역에서 산사태 발생 당시에 측정한 일 강우자료이다. 이중 주문진에는 강우계가 설치되어있지 않아 자료가 없으나, 그 지역에 산사태를 일으킨 태풍 '루사'가 강릉에서 속초로 진행된 것을 감안하면 강우가 최소한 강릉보다는 적더라도 속초보다는 많을 것으로 생각된다. 위 도표에서 이틀 중 일강우량이 100mm 보다 적은 지역은 강릉, 속초, 마천, 거창, 무주-장수 등 5개 지역이 있으나 이 경우 나머지 하루의 일강우량이 상대적으로 많아 산사태를 발생시킬만한 강우량이 된 것으로 보인다.

Caine의 강우강도-강우기간 이론에 의하면 적어도 4.28mm/h의 강우강도 이상으로 24시

간 강우가 지속되거나 3.27mm/h 이상으로 48시간 지속될 때 산사태가 발생한다. 이를 총 강우량으로 환산하였을 때 1일 강우량이 100mm 이상, 또는 2일간 160mm 이상의 강우량이 있을 때 산사태가 발생된다.

표 3.1.2 국내 산사태발생과 관련한 강우기록

발생 / 지역	1일째		2일째		2일 강우량 (mm)
	발생일	강우량(mm)	발생일	강우량(mm)	
용인-안성	1991. 7. 20	172	1991. 7. 21	229	401
연천-철원	1996. 7. 26	224	1996. 7. 27	268	492
장흥	1998. 8. 5	97	1998. 8. 6	405	502
상주	1998. 8. 11	111	1998. 8. 12	248	359
강릉	2002. 8. 31	870	2002. 9. 1	14	884
주문진	2002. 8. 31	-	2002. 9. 1	-	-
속초	2002. 8. 31	295	2002. 9. 1	120	315
	2003. 9. 12	118	2003. 9. 12	89	207
마천	2002. 8. 31	285	2002. 9. 1	1	286
거창	2003. 9. 12	158	2003. 9. 13	3	161
무주-장수	2005. 7. 1	126	2005. 7 . 2	96	222

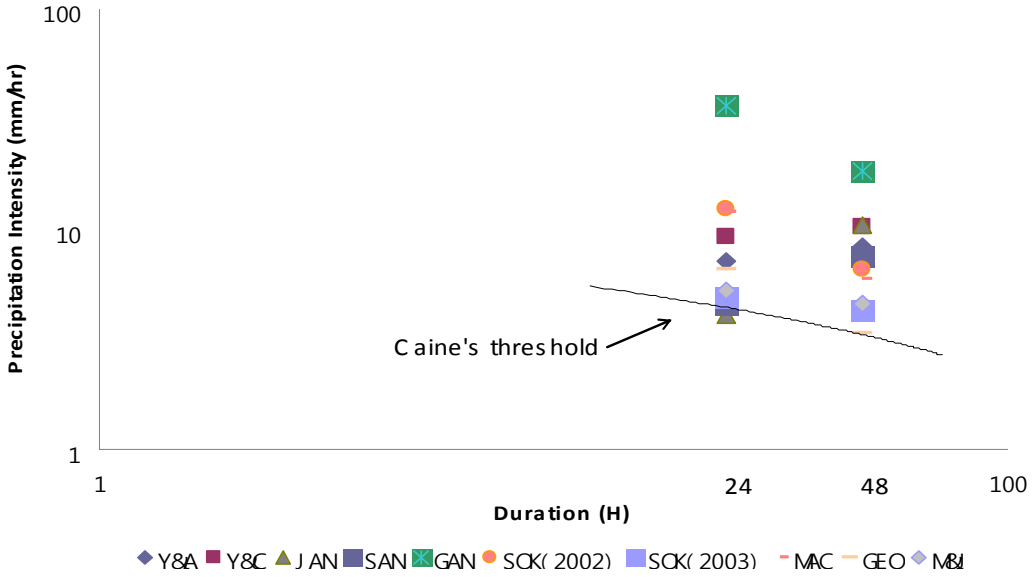


그림 3.1.1 산사태 지역에서 측정한 24시간 및 48시간 강우 강도

(Y&A: 용인-안성, Y&C: 연천-철원, JAN: 장흥, SAN: 상주, GAN: 강릉, SOK: 속초, MAC: 마천, GEO: 거창, M&J: 무주-장수)

그림 3.1.1은 24시간과 48시간의 강우 기간 동안 연구지역의 강우강도가 Caine의 산사태 발생기준(threshold)을 넘는지를 보여준다. 그림에서 24시간을 기준으로 할 때 장흥과 속초(2003년)의 강우강도는 산사태 발생기준을 만족하지 못한다. 그러나 48시간의 강우강도는 위의 두 지역 모두 산사태를 발생시키기에 충분하다. 따라서 10개 지역 모두 Caine이 제시한 산사태 발생기준을 넘어 산사태 발생의 충분한 조건을 갖추고 있다. 단지 거창의 경우만 기준점과 같은 수준을 보인다.

그림 3.1.2는 48시간 동안의 강우강도를 강우량으로 환산하여 Caine의 산사태 발생 기준과 10개 지역에서 48시간 동안의 강우량과를 비교한 도표이다. 이 경우에도 그림 3.1.1에서와 마찬가지로 기준점을 크게 상회하고 있다. 여기서도 거창은 기준치와 비슷한 강우량을 보이고 있다.

Caine의 강우강도-강우기간의 관계식에 의하면 2일간 최소한 160mm의 강우량이 필요하며 그보다 강우량이 적더라도 강우강도가 높으면 산사태가 발생한다고 설명하였다. 우리나라에서는 강우강도-강우기간과 산사태 발생의 관련성을 보고한 논문은 확인하지 못하였으나, 경기도 일대의 산사태를 대상으로 한 연구에서 강우강도와 관계없이 48시간 동안 200mm의 강우량으로 산사태가 발생한다고 보고된 바 있다(김원영 외, 2000).

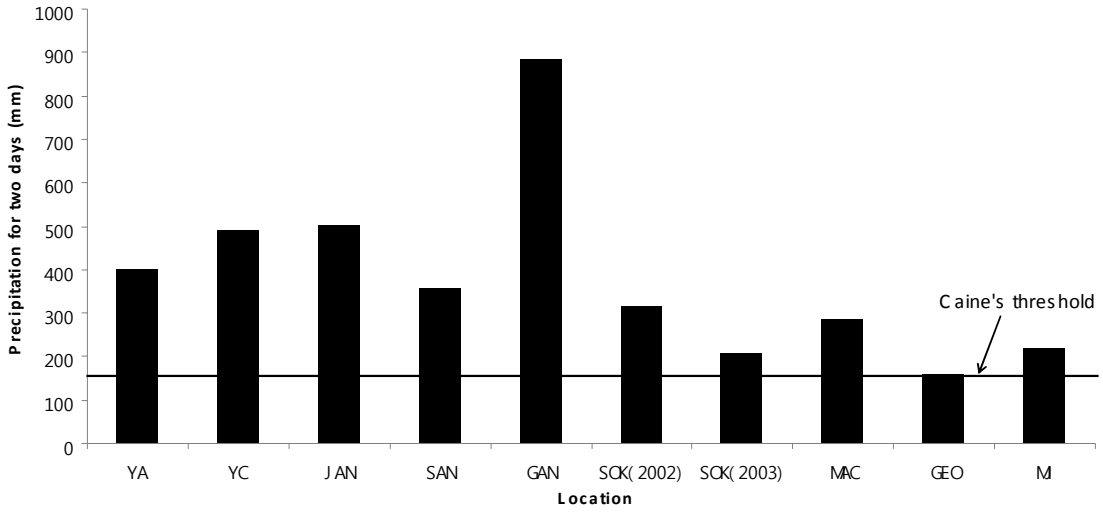


그림 3.1.2 대상지역의 강우와 Caine의 강우한계선과의 관계

표 3.1.3은 산사태 지역의 강우특성을 Olivier의 산사태 반응지수로 표시한 도표이다. 도표에서 우리나라의 연평균 강우량을 1,300 mm로 가정하고 산사태 지역을 그의 이론에 적용하면 모든 지역이 산사태의 발생조건을 충족하는 것으로 나타난다. 장흥과 강릉은

산사태 반응지수 2를 초과하고, 나머지 지역은 1 보다는 크고 2 보다는 작게 나타났다.

반응지수 2라는 개념은 산사태가 발생할 수 있는 강우조건의 2배의 강우량 또는 강우강도를 의미하는 뜻이다. 장흥과 강릉에서의 산사태가 타 지역에서 보다 격렬하게 발생된 사실을 감안할 때 지역별 반응지수와 실제 상황과 잘 일치하고 있다.

표 3.1.3 2일간 강우 후 대상지역에서의 산사태 최종 반응지수

	PRE(mm)	CPR(mm)	Cc	Ce	Cf
용인-안성	401	1321	1.02	0.31	1.33
연천-철원	492	1373	1.06	0.38	1.44
장흥	502	2349	1.81	0.39	2.20
상주	359	2087	1.61	0.28	1.89
강릉	884	2068	1.59	0.68	2.27
주문진	315	1558	1.20	0,24	1.44
속초	286	1449	1.12	0.23	1.35
마천	161	1957	1.51	0.12	1.63
거창	222	1431	1.10	0.17	1.27

MAP: 연평균 강우, 1300 mm/y

PRE: 2일간 강우 기록

CPR: 산사태가 발생한 년도에서 누적강우 기록

2. GIS를 이용한 국내 산사태/토석류의 특성 분석

본 연구에서는 위에서 언급한 산사태 자료를 대상으로 GIS 기법을 이용하여 산사태 및 토석류의 기하양상과 지형, 지질 및 토질특성에 따른 발생특성을 분석하였다.

가. 산사태/토석류 기하 및 지형/지질 특성 분석

(1) 형태

연구지역 중 장흥, 장수 및 마천에서는 토석류 산사태가 비교적 우세한 지역이다. 장흥과 장수지역은 산사태 시작점(source area)에 균열이 심하고 풍화된 편마암 노두들이 흔

히 분포하며, 이들 노두가 파괴되어 토석류를 발생시켰다. 반면 마천 산사태의 대부분은 암괴를 다량 포함하고 있고 심도가 깊게 발달한 붕적층의 파괴에 의하여 발생되었다. 그런데 이 지역은 높은 산악지형으로 대부분 산사태들이 해발 444-624m 정도에서 발생하여 사면길이가 긴 지형을 따라 흘러내려 그 과정에서 토석류가 발생되었다(그림 .3.1.3).

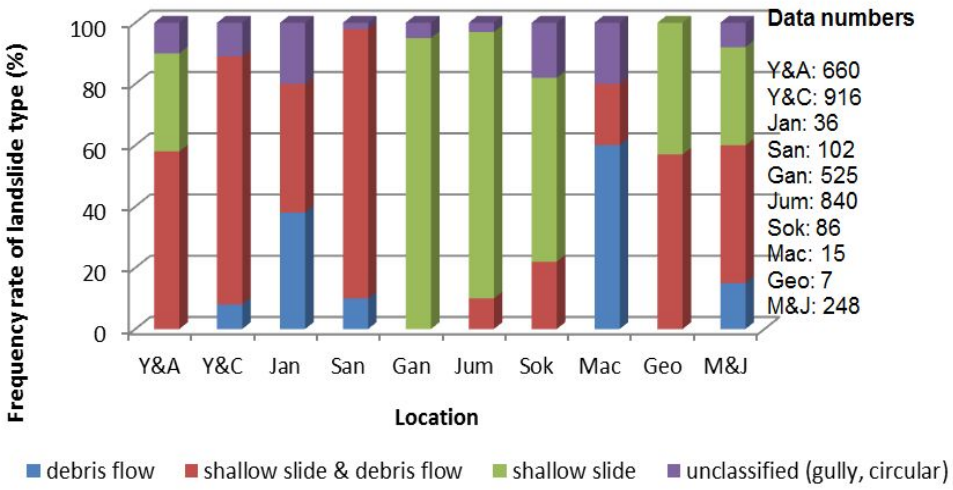


그림 3.1.3 각 지역별 산사태 유형 비율

반면 지형의 고도가 낮고 구릉지로 발달한 화강암 분포지역인 용인-안성, 강릉, 주문진 등은 대체로 풍화심도가 얕고 고르게 발달하면서 활동사면도 짧은 편으로, 이와 같은 지역에서는 평행이동 슬라이드가 우세한 가운데 슬라이드와 토석류가 병존한다. 그러나 10개 지역 중 거창은 분석에 이용된 자료의 수가 적어 그림 3.1.3에서 나타나는 현상만으로 그 지역의 산사태 전반을 대표하기는 어렵다.

(2) 규모

산사태의 규모는 산사태 파괴면의 길이, 폭 및 심도에 의해 결정된다. 이 중 파괴면의 길이와 폭은 측정이 용이하나 심도는 파괴면 최상부의 단애에서만 측정이 가능하므로 파괴면(rupture surface) 전체에 대한 파괴심도는 측정하기 어렵다. 또한 자연사면에서는 파괴물질이 산사면이나 소계곡을 형성된 이동통로를 따라 사면 하부로 이동되므로 파괴면을 정확히 구별하여 측정하기 어렵다. 따라서 연구지역의 파괴심도는 추정치를 근거로 하였다. 산사태를 조사하는 관점에 따라서는 파괴면과 이동거리를 합한 면적을 가지고 규모를 결정하기도 하며, 파괴면의 면적만을 가지고 규모를 결정하기도 한다. 그러나 산

사태의 규모에 관한 정보를 제공할 때는 파괴면과 이동통로를 명확히 구분 설명할 필요가 있다.

연장이 긴 산사태는 장흥, 마천, 거창에 분포하고 있다. 위 지역은 대부분 산사태의 형태상 토석류가 우세한 지역이다. 토석류 우세 지역은 우선 사면이 길어서 파괴된 사태물질이 이동하는 통로(track)가 충분히 길고, 파괴 지점에 암편을 다량 함유한 붕적층 또는 풍화 노두가 존재하는 지역으로 확인되었다. 장흥과 마천은 위의 조건을 만족하는 지역이다. 장흥은 주변의 화강암 지역에 비하여 높은 지형을 형성하여 사면의 길이가 비교적 크고 파괴지점에 소규모 풍화 노두들이 발달하여 토석류가 생성된 지역이며, 마천은 사면의 규모가 크고 대규모 붕적층들이 산사태의 단애를 형성하고 있어 이들 붕적층의 파괴로 토석류가 생성된 것으로 해석하였다. 마천은 길이 200m 이상의 산사태가 60%이고 100m 이하의 소규모는 20%만을 차지할 뿐이다. 장흥도 토석류의 발생이 많아 상대적으로 길게 발달한 산사태의 비율이 높다.

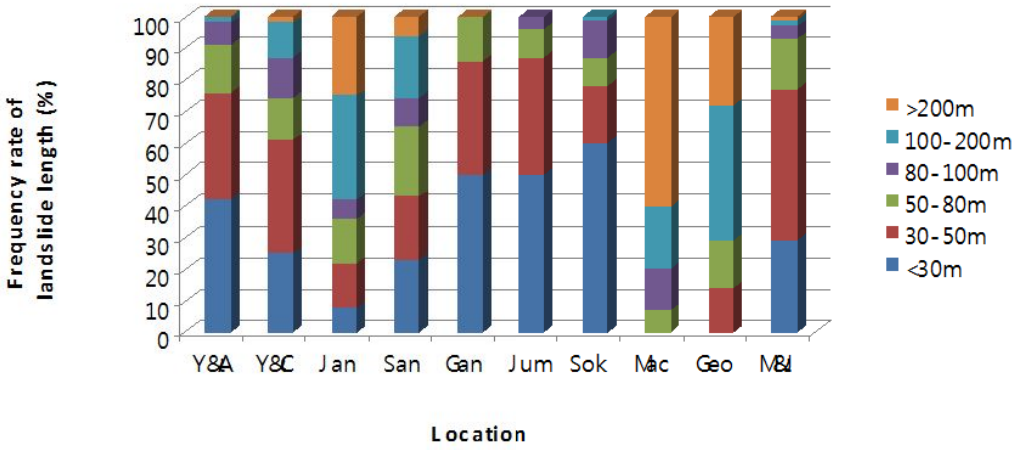


그림 3.1.4 지역별 산사태 연장 분포 비율

이에 반하여 화강암이 분포하고 지형이 구릉지를 형성하는 지역의 산사태들은 길이가 매우 짧다. 대부분이 50m 이하의 소규모인 점이 특징적이다. 용인-안성, 강릉, 주문진, 속초 등은 규모 면에서 매우 유사한 분포 비율을 보이고 있다. 이들 지역에서는 길이 30m 이하의 산사태들이 40-55% 의 분포 비율을 보이고, 50m 이하가 전체의 75-85%를 차지하고 있어 매우 소규모이다. 이들 지역 중 용인-안성을 제외하면 모두 화강암 지역인 점이 특징이다. 용인-안성의 경우는 화강암과 편마암이 공존하지만 지형적으로 화강암 지역과 유사한 구릉지를 형성하고 있어 소규모 산사태가 발달되었다. 상주는 화강암이 분포하면

서도 비교적 긴 산사태를 보이고 있으며, 이는 이 지역에 발생한 토석류 때문으로 판단된다.

채병곤(2005)에 의하면 자연사면 산사태에서 사면의 경사가 급해질수록 산사태의 폭은 좁아진다고 보고하고, 경사와 산사태 폭과의 관계에 대한 경험식을 유도하였다. 이러한 경우는 주로 산사태 이동통로에서 나타나는 현상을 언급한 것으로, 소규모 슬라이드의 경우에는 적용하기 어렵다.

그러나 연구지역의 산사태 시작점에서의 파괴면 만을 대상으로 검토한 결과에 의하면 (그림 3.1.5) 산사태의 폭은 지형적 조건에 크게 지배되지 않는 것으로 보인다. 대부분 지역의 슬라이드 산사태 폭은 6-15m 사이에 집중되고 있다. 그러나 토석류가 발달한 장흥과 마천에서는 폭 15m 이상의 높은 비율을 차지하고 있고, 특히 대규모 산사태가 발생한 마천에서는 그 비율이 더욱 높아지고 있음을 고려하면 산사태의 폭도 산사태의 형태에 의해 좌우되고 있다.

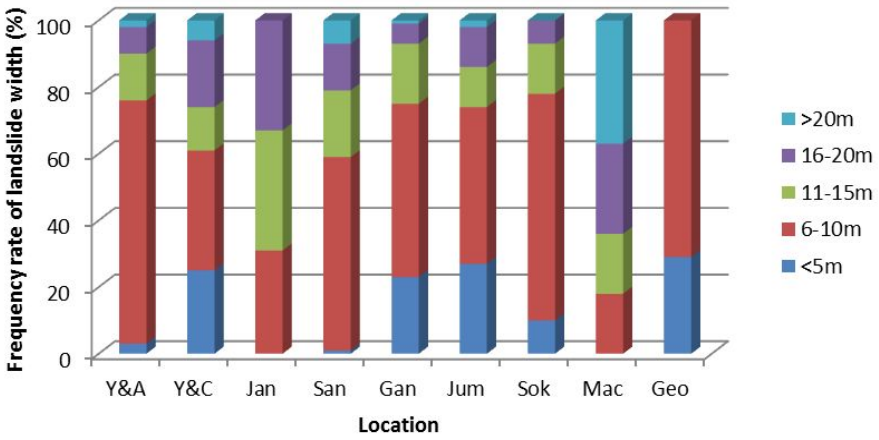


그림 3.1.5 지역별 산사태 폭 분포 비율

(3) 발생위치에서의 경사

사면의 경사는 사면파괴의 가장 중요한 3대 요소 중 하나이다. 암반사면은 파괴면의 경사각이 높을수록 파괴되기 쉽다. 그러나 암반사면과는 달리 자연사면에서는 경사가 급한 지형에서 반드시 산사태가 많이 발생하지는 않는다. 우리나라 자연사면에서 발생하는 산사태는 거의 모두 기반암 상부의 미고결지층(regolith)이 파괴되어 발생하므로 암반사면의 파괴 메커니즘과는 차이를 보인다. 자연사면의 경사 40도 이상 급사면은 사면의 일부이든 전체이던 간에 암반노두가 발달되어 있는 경우가 흔하고, 암반이 분포하는 경우에

는 심한 풍화암반이 아닌 경우를 제외하면 산사태가 발생하지 않는다. 또한 이와 같은 급사면은 미고결 물질이 지속적으로 삭박되어 산사태를 발생시킬 만큼의 충분한 토층(regolith)을 형성하지 못한다(김원영 외, 2000, 채병곤 외, 2008).

연구지역 중 2개 지역을 제외한 나머지 지역의 산사태는 거의 모두 경사 40도 미만에서 발생되었고 26-35도 사이에 집중되어 있다(그림 3.1.6). 그런데 용인-안성과 연천-철원은 경사 20도 미만이 타 지역에 비하여 상대적으로 높은 비율을 차지한다. 특히 연천-철원은 경사 15도 미만이 50% 이상이고, 16-20도 경사에서의 산사태도 21%를 차지하여 이 지역에서 발생한 916개 중 3/4 정도가 20도 미만의 낮은 경사를 보이고 있다.

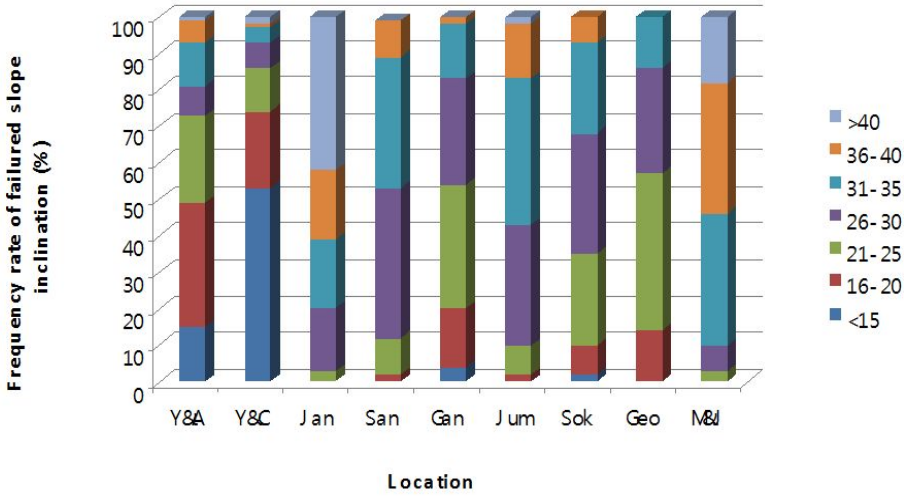


그림 3.1.6 각 지역별 사면경사와 산사태 빈도와의 관계

연천-철원 지역의 산사태 경사가 이와 같이 완만한 값을 보이는 것은 측정의 오류가 포함된 것으로 보인다. 산사태의 경사를 측정할 때는 발생 시작점의 파괴면 만을 대상으로 하는 경우와, 시작점으로부터 사태물질 이동통로까지의 전 구간을 평균하여 측정하는 경우가 있는데 후자의 경우는 파괴사면의 경사로 볼 수 없다. 용인-안성과 연천-철원은 전 구간을 평균한 경사각이고, 나머지 8개 지역은 발생지의 파괴면 만을 대상으로 측정한 자료로 확인되었다.

장흥과 무주-장수지역은 다수의 산사태가 36도 이상의 고각도 사면에서 발생하였다. 위의 두 지역은 편마암의 급사면에 풍화된 노두들이 블록으로 산출된다. 이 지역 산사태 중 다수는 이들 노두들이 파괴되어 토석류를 발생시킨 경우이다. 따라서 풍화 노두의 파괴에 의한 산사태들은 발생사면이 비교적 급사면을 형성한다.

반면 화강암 분포지역의 발생사면 경사각은 비교적 고르게 분포하는데, 대부분이 21-35도 사이에 집중 분포하고 있다. 화강암만 분포하는 상주, 강릉, 주문진, 속초, 거창 등 5개 지역에서 발생한 1,560개의 산사태를 대상으로 사면 경사각의 분포상태를 보면(그림 3.1.7), 81.7%에 해당하는 1,274개의 산사태가 21-35도 범위의 경사의 사면에서 발생하였다.

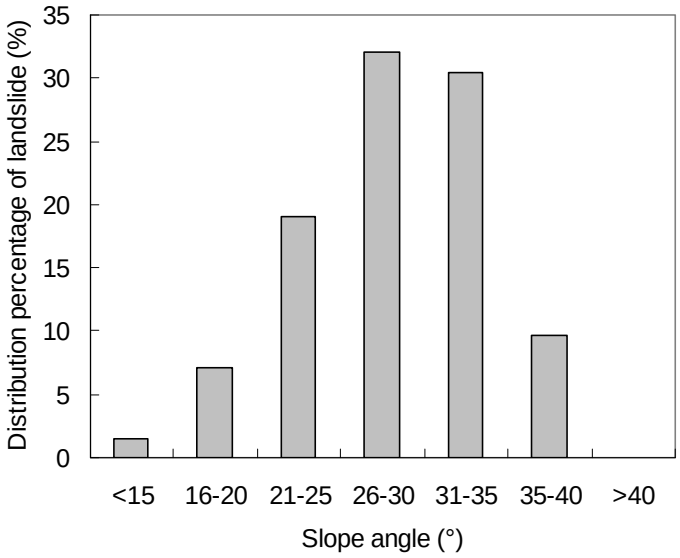


그림 3.1.7 화강암 지역에서 사면에 따른 산사태 발생 비율

(4) 발생위치

산사태의 최초 발생 위치는 평탄한 또는 약간 오목하게 굴곡진 산사면이 대부분이고 드물지만 계곡에서 도랑형(gully)과 토석류가 발생되기도 한다(그림 3.1.8). 평탄면에서 발생하는 산사태의 초기형태는 형태가 평행이동이든 토석류이든 슬라이드로 시작된다. 평탄면에서 발생하는 산사태 최상부의 크라운(crown) 부근에는 수직 인장절리가 흔히 발견된다. 이는 현재의 단애 상부 쪽으로 추가 파괴가 발생될 가능성을 시사하는 증거이다. 즉, 자연사면에서는 슬라이드가 일단 발생된 후 계속해서 상부 쪽에 추가적인 파괴가 일어나는 소위 후퇴성파괴(retrogressive failure)가 생성되는 것으로 해석된다. 화강암 지역의 단애는 등고선 방향으로 명확히 발달하고 있지만 풍화심도가 침엽수의 나무뿌리 심도와 비슷한 0.5m 내외로 매우 얕게 형성되어 있다.

토석류가 우세한 편마암 지역의 산사태는 소 계곡에서 발생하는 비율이 상대적으로 높다. 장홍은 편마암 지역으로 계곡의 비율이 평탄사면보다 우세하다. 또한 편마암이 다른

암석과 같이 분포하는 용인-안성, 연천-철원, 무주-장수 지역도 차이는 있지만 화강암 지역에 비하여 계곡에서의 산사태 발생률이 높은 편이다.

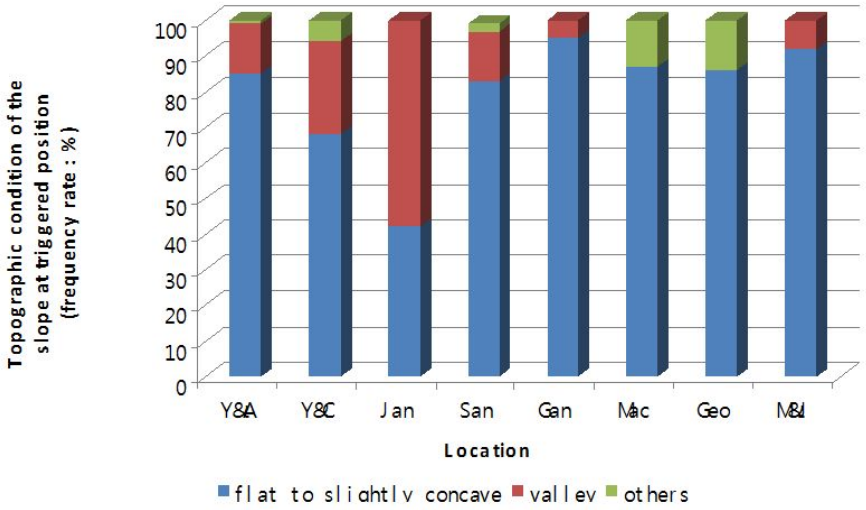


그림 3.1.8 각 지역별 산사태 시작 위치 분포 비율

(5) 기반암 종류별 특성

연구대상인 10개 산사태 지역 중 7개 지역은 화강암이 분포하며 2개 지역은 화강암과 편마암 등의 변성암이, 그리고 나머지 1개 지역은 염기성 심성암인 반려암이 분포한다. 특정 암석이 분포하는 지역이 산사태에 특별히 취약한지에 관한 결론을 내릴 수는 없다.

예를 들어 연천-철원의 경우 328km^2 면적에서 화강암이 전체면적의 7%, 화산암이 18%, 변성암인 흑운모편마암이 75%를 차지하는데, 이 지역의 328개 산사태 중 전체의 22%인 73개가 화강암 분포지역에서, 24%인 77개가 화산암 지역에, 그리고 변성암 지역에서 54%인 178개가 분포하여 단위면적당 발생빈도는 화강암이 2개/km^{2}로 가장 높고, 다음은 0.9개/km^{2}인 화산암, 그리고 0.47개/km^2 인 변성암 순이다. 반면, 용인-안성지역에서 조사한 660개의 산사태 중 단위면적당 발생가능성은 편마암 지역이 45%, 편암이 32%, 화강암이 23%로서 편마암이 화강암에 비하여 2배 높다.

산사태가 발생한 10개 지역 중 2개 지역을 제외한 8개 지역에 화강암이 분포한다. 그 중 3개 지역은 화강암과 다른 암석이 복합적으로 분포하지만 5개 지역은 화강암으로만 구성되어 있다. 이 논문에서 이용한 3,435개의 산사태 중 58%인 2,011개의 산사태는 화강암 분포지에, 24%인 831개는 편마암류에서 발생하였고 18%인 593개는 화강암과 편마암류, 그리고 화산암류 등이 복합적으로 분포하는 지역에서 발생하였다(그림 3.1.9). 위 사실

은 산사태 숫자만을 기준으로 해석하면 화강암이 다른 암석에 비하여 산사태에 보다 취약하다는 의미이다.

암석의 서로 다른 물리적 성질, 특히 풍화 특성에 따라 산사태의 종류나 형태가 결정되는 것으로 판단된다. 화강암은 지질시대를 거치면서 상부의 지층이 삭박되면서 압력이 저하되고 이로 인하여 특징적으로 층상절리가 생성된다. 그런데 화강암은 석기가 균질하고 등방성이므로 층상절리의 간격과 방향이 비교적 일정하게 발달하고 있다. 따라서 생성 환경이나 암석 석기가 다른 변성암과는 달리 화강암의 풍화심도는 비교적 일정하게 발달되는 경향이 있다. 연구지역의 화강암 지역에서 산사태들이 일정한 심도의 풍화심도를 갖고 있어, 이로 인하여 화강암 지역에서는 평행이동 슬라이드(translational slide)가 우세한 것으로 해석하였다.

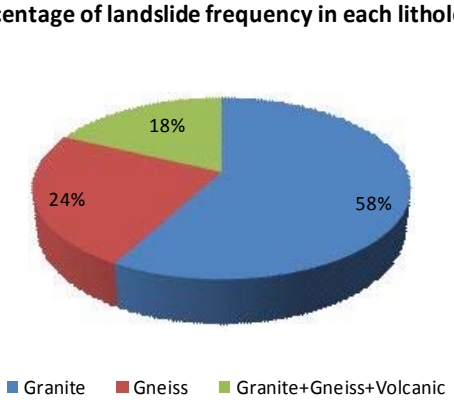


그림 3.1.9 암석 종류에 따른 산사태 발생 비율

(가) 화강암

화강암이 분포하는 지역은 연구대상 10지역 중 용인-안성, 연천-철원, 상주, 강릉, 주문진, 속초, 거창, 무주-장수 등 7개 지역이다. 이 중 상주, 강릉, 주문진, 속초, 거창 지역은 화강암으로만 분포되어 있고, 용인-안성, 연천-철원 및 무주-장수 등 3개 지역은 화강암과 변성암이 혼재 분포되어 있다.

산사태가 발생한 화강암 분포지의 가장 특징적 현상은 비교적 고른 풍화심도를 나타내고 노두가 거의 발달하지 않는다는 점이다. 이러한 지역에서는 강우가 지속되면서 산사태가 발생하면 최초의 산사태 발생지에서 계속 상부 쪽으로 파괴현상이 전파되어 능선 부근까지 발전되는 소위 후퇴성(retrogressive) 산사태가 흔히 발견된다. 화강암이 분포하는 연구지역에서도 산사태 발생지점은 대부분 능선에서 가까운 고지인데, 이는 후퇴성

연속파괴에 의한 결과로 해석된다. 또한 대부분 0.5-1m 내외의 파괴심도를 보이고 있는데 이는 화강암의 풍화상태가 고른 분포를 보이고 붕적층의 발달이 미약하여 산사태의 파괴가 기반암 상부의 얇은 풍화토층에서만 발생되었음을 의미한다. 이와 같은 풍화특성으로 인하여 화강암 분포지의 산사태는 박층의 슬라이드 형태를 띄는 경우가 많다.

상주와 무주-장수의 경우는 지형조건이 강릉, 주문진, 속초지역과는 달리 부분적으로 고도가 높은 지역이 있으며, 이들 지역에서는 고도가 높아짐에 따라 부분적으로 사면의 경사가 급한 지형을 보이면서 고도에 따라 풍화심도가 다소 차이를 보이기도 한다. 이러한 지역에서는 붕적층도 구릉지에 비하여 다소 증가하는 경향이 있다. 붕적층은 풍화대보다 심도가 깊고 많은 암편을 함유하므로 파괴가 발생하면 토석류로 쉽게 변환되는 특성이 있다. 따라서 상주와 무주-장수의 화강암 분포지에서는 타 화강암 분포지와는 달리 사태물질 이동통로(track)가 다소 길게 발달한 소위 토석류 산사태가 부분적으로 발견되고 있다.

(나) 변성암

변성암 지역은 장흥의 전지역, 용인-안성의 일부지역, 그리고 연천-철원의 대부분 지역이 포함되며 흑운모 편마암이 변성암을 대표하는 암석이다. 장흥에서 산사태가 발생한 지역은 흑운모편마암, 호상편마암, 반상변정편마암 등 다양하게 명명된 암석들로 구성된다. 이들 편마암들은 화강암이 분포하는 장흥 동측의 의정부 지역에 비하여 비교적 가파르고 험준한 지형을 보이고 산릉을 따라서는 이들 편마암의 노두가 잘 발달하고 있다. 또한 산사면을 따라서도 곳곳에 노두가 발달하고 있으나 그 규모가 작고 단열의 발달이 심한 블록형태를 띄고 있다. 노두가 발달하는 지역은 산사태가 발생하지 않는다는 일반적 이론과는 달리, 이들 노두들은 강우에 의하여 주변 미고결 토층과 함께 파괴되었다. 따라서 이 곳의 산사태는 이 지역에 분포하는 블록 형태의 풍화노두가 파괴되어 암편을 다량 함유한 토석류(debris flow)로 특징지을 수 있다.

무주-장수 지역의 편마암류는 흑운모편마암과 우백질 화강편마암이며 이들은 화강암화작용에 의하여 대부분 결정질화 되었다. 이 지역의 노두발달 상태도 블록 상태인 경우가 우세하며 장흥과 마찬가지로 균열이 많고 풍화정도가 심한 노두가 부분적으로 파괴되어 토석류 산사태로 발전되는 경우가 많았다.

(다) 반려암

마천지역에는 흑운모와 각섬석을 다량 함유한 염기성 반려암이 넓게 분포하며, 해발

600m를 기준으로 상부에는 선캠브리아기 편마암이, 하부구간에는 염기성 반려암이 분포한다. 특이한 점은 반려암과 접촉하고 있는 주변의 편마암 지역과는 달리 반려암 지역에 산사태가 집중되어 있을 뿐 아니라 과거에 발생하였던 산사태의 흔적이 여러 곳에서 관찰된다. 반려암 지역에서 풍화에 취약한 특이한 지질구조는 관찰되지 않으나 절개지나 산사태 파괴면에서는 차별풍화의 산물인 핵석이 매우 잘 발달하고 있다.

이 지역은 차별풍화현상으로 인하여 풍화심도가 매우 불규칙하게 발달한다. 최대 풍화토의 심도는 10m 이상으로 다른 연구지역의 풍화심도에 비하여 월등히 깊게 발달되어 있다. 또한 핵석을 포함하는 풍화대가 과거부터 지속적으로 붕괴되어 사면 중-하부에 깊은 붕적층을 형성하고 있는 것도 특징 중의 하나이다. 깊은 풍화와 붕적층의 발달로 인하여 이 곳의 산사태는 시작점부터 원호형태의 파괴형태를 보이고 사태물질에는 다량의 암편을 포함하고 있다. 또한 이 지역은 산사면이 길어 사태물질의 이동통로(track)가 매우 길게 발달되어 있다. 따라서 붕적층의 파괴에 의한 산사태는 이동통로를 따라 하강하면서 삭박과 퇴적을 반복하면서 토석류를 형성하고 있는 것이 특징이다.

3. 국내외 산사태/토석류 유형 분석 및 제안

전 세계적으로 산사태와 토석류의 유형을 분석하기 위한 많은 노력들이 진행되어 왔다. 다양한 배경을 가진 학자에 의해 산사태와 토석류의 특성을 고려한 분류안이 제안되어 왔는데, 이는 사면을 구성하는 물질과 사면의 형태, 그리고 붕괴 유형에 따라 서로 다른 특성을 가진다. 우리나라에서는 현재 토석류에 대한 분류가 정립이 되어있지 않으며, 공공기관에서 공식적으로 제시된 분류법이 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 국외의 대표적인 산사태 및 토석류 분류법을 분석하고, 우리나라 실정에 맞는 토석류 분류법을 제안하고자 한다.

가장 전통적인 분류안은 Varnes(1978)가 제안한 것으로서(표 3.1.4) 사면의 붕괴 유형과 붕괴 물질의 종류에 따라 산사태를 구분하였다. 이 분류는 암석과 흙으로 구성된 사면 전체에 적용할 수 있는 것으로서, 산사태 분류의 가장 기본이 되는 것이다. 그러나 본 연구에서 고려하는 국내 자연사면의 산사태는 대부분 토사층으로 구성된 사면에서 발생하고 있으며, 자연사면에서 암반의 붕괴는 매우 드문 상황이다.

표 3.1.4 Varnes (1978)가 제안한 산사태 분류

Type of movement		Type of material			
		Bedrock		Engineering soils	
				Predominantly coarse	Predominantly fine
Falls			Rockfall	Debris fall	Earth fall
Topples			Rock topple	Debris topple	Earth topple
Slides	rotational	few units	Rock slump	Debris slump	Earth slump
	translational	many units	Rock block slide	Debris block slide	Earth block slide
Lateral spreads			Rock slide Rock spread	Debris slide Debris spread	Earth slide Earth spread
Flows			Rock flow (deep creep)	Debris flow	Earth flow (soil creep)
Complex			Combination of two or more principal types of movement		

Hutchinson(1988)은 Vanes의 산사태 유형 외에도 지반의 거동에 따라 추가적인 산사태 유형을 제시하였다. 특히, 그는 지반이 매스(mass) 형태로 거동하는 슬라이딩을 세분화하여 rebound, creep, sagging 등으로 세분화한 것이 특징이다. 한편, European Community Programme에서는 산사태의 유형을 더 세분화하고 암석, 토석, 토사를 구분하여 산사태 유형을 제안하였다 (EPOCH, 1993). 이는 기본적으로 Varnes(1978)의 산사태 분류안을 토대로 하고 일부 산사태 유형의 형태를 세분하였으며, 각 유형별로 물질의 종류에 따른 세부명칭을 부가하였다 (표 3.1.5).

표 3.1.5 European Community가 제안한 산사태 분류안 (EPOCH, 1993)

Type	Rock	Debris	Soil
Fall	rockfall	debris fall	soil fall
Topple	rock topple	debris topple	soil topple
Slide(rotational)	single (slump)	single	single
	multiple	multiple	multiple
	successive	successive	successive
Slide(translational)			
Non-rotational	block slide	block slide	slab slide
Planar	rock slide	debris slide	mudslide
Lateral spreading	rock spreading	debris spread	soil (debris) spreading
Flow	rock flow Sacking)	debris flow	soil flow
Complex(with run-out or changes of behaviour downslope, note that nearly all forms develop complex behaviour	e.g. rock avalanche	e.g. flow slide	e.g. slump-earthflow

Vallejo와 Ferrer(2011)은 Hutchinson(1988)과 EPOCH(1993)의 분류안을 토대로 새로운 산사태 분류안을 제안하였다. 그는 슬라이드뿐만 아니라 스프레드(spread), 플로우(flow) 등에 대해서도 물질의 특성에 따라 세분하였으며, 산사태가 발생하는 초기 붕괴 지표면의 유형과 후속 변형에 대한 구분도 하였다 (표 3.1.6).

표 3.1.6 Vallejo와 Ferrer이 제안한 산사태 분류

Type	Form of initial failure surface		Subsequent deformation
FALL			
Detachment from a	(a) planar (b) wedge (c) stepped (d) vertical	failure surface	Free fall, may break, up, roll bounce, slide, flow down slopes below. May involve fluidisation, liquefaction, cohesionless grain flow, heat generation, chemical, rate effects or other secondary mechanisms.
TOPPLE			
Detachment from a	(a) single (b) multiple	(a) pre-existing discontinuities (b) tension failure surfaces	As above
SLIDE			
Rotational movement (sliding) on a	(a) single (b) successive (c) multiple	circular failure surface	Toe area may deform in a complex way. May bulge, override, flow, creep, May be retrogressive.
Non-rotational compound movement (sliding) on a	(a) single (b) progressive (c) multistoried	Non-circular i. listric ii. bi-planar	Often develops a graben at the head. May have a toe failure of different type.
Translational movement (sliding) on a	(a) planar (b) stepped (c) wedge (d) non-rotational	failure surface	May develop complex run-out after disintegrating. As for falls and flows.
SPREAD			
Lateral spreading of ductile or soft material which deforms in	(a) a layer beneath hard rock (b) a weak interstratified layer (c) a collapsible structure	topographic surface	Can develop sudden spreading failure in quick clays. Slope open up in blocks and gulls or fissures, Liquefaction can occur and the whole slope spreads either as a totally collapsed flow or with 'floating' blocks and grabens.
FLOW			
Debris movement by flow on	(a) a natural, complex i. unconfined ii. channelised		Flow will involve complex run-out from source. May be catastrophic. May move in rheological mechanisms.
Movement by creep on		any hillslope	Creep may be gravity, seasonal, pre-failure or progressive.
Rock flow (sagging Sackung) movement on	(a) single sided (b) double sided	mountain slope (a) of rotational (b) compound from listric biplanar	May be slow gravity creep or early stages of landsliding, but not displaying toe deformations other than bulging.
	(c) stepped	discontinuity	May invlove topping.
COMPLEX Movement involving two or more of the categories above			

Hungr et al (2001)은 토석류를 대상으로 플로우(flow) 형태를 세분하여 제시하였다. 그는 광물, 함수비, 속도 조건에 따라 플로우의 종류를 구분하였으며, 이를 토대로 토석류의 유형을 구분하고자 하였다. 그러나 이 분류는 토석류 물질에 대한 정확한 구분이 이루어져야 하는 단점이 있다 (표 3.1.7).

표 3.1.7 Flow 형태 산사태의 분류 (Hungr et at. 2001)

Mineral	**Water content**[1]	**Special condition**	**Velocity**	**Name**
Slit, sand, gravel, and debris (talus)	Dry, moist, or saturated	No excess pore-pressure Limited volume	Various	Non-liquefied sand (silt, gravel, debris) flow
Slit, sand, debris, and weak rock[2]	Saturated at rupture surface	Liquefiable material[3] Constant water content	Extremely rapid	Sand (slit, debris, rock) flow slide
Sensitive clay	At or above liquid limit	Liquefiable *in site*[3] Constant water content[4]	Extremely rapid	Clay flow slide
Peat	Saturated	Excess pore-pressure	Slow to very rapid	Pear flow
Clay or earth	Near plastic limit	Slow movements Plug flow (sliding)	Less than rapid	Earth flow
Debris	Saturated	Established channel[5] Increased water content[4]	Extremely rapid	Debris flow
Mud	At or above liquid limit	Fine-grained debris flow	Greater than, very rapid	Mud flow
Debris	Free water present	Flood[6]	Extremely rapid	Debris flow
Debris	Partly or fully saturated	No established channel[5] Relatively shallow, steep source	Extremely rapid	Debris avalanche
Fragmented rock	Various, mainly dry	Intact rock at source Large volume[7]	Extremely rapid	Rock avalanche

[1] Water content of material in the vicinity of the rupture surface at the time of failure.
[2] Highly porous, weak rock (example: weak chalks, weathered tuff, pumice).
[3] The presence of full or partial in situ liquefaction of the source material of the flow slide may be observed or implied.
[4] Relative to in situ source material
[5] Presence or absence of defined channel over a large part of the path, and an established deposition landform (fan). Debris flow is a recurrent phenomenon within its path, while debris avalanche is not.
[6] Peak discharge of the same order as that of a major flood or an accidental flood. Significant tractive forces of free flowing water. Presence of floating debris.
[7] Volume greater than 10,000m^3 approximately. Mass flow, contrasting with fragmental rock fall.

Sidle과 Ochiai(2006)는 강우와 산사태를 유발하는 다른 기후조건을 토대로 산사태의 유형과 속도를 구분하였다 (표 3.1.8). 그는 토심에 따라 천층 및 심층 붕괴를 구분하고, 강우기간과 강우량을 고려하여 토층의 함수상태를 고려하여 거동속도가 빠르거나 늦음을 파악하여 산사태의 유형과 속도를 구분하였다. 또한, 강우조건에 따라 산사태가 발생할 수 있는 시기적인 구분도 함께 제시하였다.

표 3.1.8 Sidle과 Ochiai(2006)가 제안한 산사태 분류

Types of soil mass movements	**Rainfall and other climate conditions that contribute to initiation of slope failures**	**Timing of the landslide**
Shallow, rapid landslides	A large total amount of rain during and individual storm, often with a period of high intensity; exacerbated by wet antecedent conditions. Also, during prolonged and rapid periods of snowmelt.	During the storm event or at the peak of rapid snowmelt.
Rapid, deep slides and flows	An extended rainy period (or snowmelt period) followed by a large to moderately large storm; if preferential flow paths exist route water quickly to the failure plane then these failures can occur during an isolated high-intensity rain event.	Usually following extended periods of rain, but towards the latter part of a moderate to large storm.
Slower, deep-seated landslides	Typically requires extended rainfall (or snowmelt) to initiate movement; movement continues through the rainy(or snowmelt) season and then subsides when rainfall is infrequent.	The lag time between the start of a rainy season (or snowmelt season) and the onset of slope movement is usually at least several days, but can be several weeks or more.
Slow flows and deformations	Same as for slower, deep-seated landslides(solifluction responds to snowmelt).	Same as for slower, deep-seated landslides.
Surficial mass wasting	Initiated by freeze-thaw (frost heave), wetting-drying, and wind under nature conditions.	May occur year-round, but most active when frost heave and wetting-drying processes predominate.

이 분류는 자연사면의 산사태를 대상으로 산사태 및 토석류(흐름)의 발생 속도와 깊이를 동시에 고려한 것으로서, 그 동안 다양하게 제안되어 온 분류에 비해 복잡하지 않으면서 실제 산사태 및 토석류로 인한 피해유발의 주요 원인을 고려한 분류라고 할 수 있다. 즉, 발생속도에 대한 분류는 사면 하부로 토사 및 토석의 이동이 빠르거나 느린 조건에 따라 사면 하부에 위치한 시설물 또는 인명에 주는 충격력이 서로 달라짐을 고려한

것이다. 그러므로 산사태 또는 토석류에 대한 효율적 피해 예방과 대응 차원에서 고려하여야 할 조건이다. 한편, 빠른 속도의 토사이동이 발생하더라도 토사 및 토석의 양이 적을 경우 사면 하부에는 큰 피해를 발생시키지 않는다. 따라서 피해예측을 위해서는 이동될 토사량을 함께 고려할 필요가 있는데, 위의 분류는 이런 점을 반영한 것이다. 즉, 심층 산사태와 흐름의 경우 토사량이 천층 산사태 또는 흐름에 비해 많기 때문에 사면하부의 피해규모가 훨씬 크고, 이를 감안해 피해 예방시설 및 대응계획을 수립하여야 한다.

한편, 위의 분류에서는 발생가능 기후조건과 시기도 함께 기재하고 있으므로 사전 방재차원의 대책수립에 쉽게 활용할 수 있다. 즉, 실제 강우량 또는 강우기간을 측정하지 않더라도 특정지역의 토사량, 지형경사, 과거 토사이동 속도 경향 등을 사전에 파악하고 위에서 설명한 기후조건에 따른 산사태 또는 토석류 발생 시기를 개략적으로 예측할 수 있다. 이러한 예측은 전술한 바와 같이 방재시설의 계획 및 설치, 운영 등 전반적인 사전 방재대책에 유용하게 적용될 수 있어 재해대응 업무를 보다 정확하고 효과적으로 수행할 수 있다.

또한, 이러한 구분은 우리나라와 같이 대부분의 자연사면 산사태가 하절기 집중호우에 의해 발생하며, 자연사면에서 복합적인 형태로 발생하는 조건에서 적절하게 활용될 수 있을 것이다. 강우에 의해 발생하는 산사태는 강우량과 조건 등에 따라 산사태와 토석류의 속도가 큰 차이가 있기 때문에, 단순히 산사태 발생유형만을 고려한 분류 보다는 산사태와 토석류의 이동속도를 함께 고려할 필요가 있다. 따라서 국내에서 재해로 인한 피해저감 목적의 방재행정 차원에서는 Sidle과 Ochiai가 제안한 분류안이 적절할 것으로 판단된다.

제 2 절 위성사진 및 고지형도를 이용한 상관성 분석

토석류 발생은 크게 다음과 같이 세 가지 유형으로 시작된다. 각 유형별 구분은 토석류 발생 현장조사를 통해 구분할 수 있으나 엄밀한 구분은 어렵다고 볼 수 있다.

- 강우 시 자연사면 파괴로 인한 쇄설물의 이동
- 계곡유량으로 인한 계곡 바닥과 측벽의 세굴, 침식물의 이동
- 계곡 내 퇴적된 자연 토사댐의 붕괴로 인한 쇄설물의 이동

국내에서의 일반적인 토석류 시작은 경사가 급한 계곡상부에서 표층 붕괴의 형태로 시작되며, 우면산 토석류의 경우도 비슷한 이유로 발생하였다. 일반 국도, 고속국도, 철도시설 등의 주변에 위치한 깎기, 쌓기 비탈면 붕괴와 다르게 산사태 및 토석류는 발생 후, 수십 m에서 수 Km까지 이동하며 대규모의 피해를 발생시키게 된다. 그림 3.2.1은 강원도 인제에서 발생한 토석류 현장으로 상부 표층 붕괴로부터 토석류가 시작되었다. 최초 상부의 작은 표층 붕괴는 하부로 이동하면서 점차 규모가 커지게 되어 마지막에는 대규모의 토석류 흐름을 형성하게 된다.



그림 3.2.1 강원도 인제 토석류 발생 현장

사면파괴에 기인한 토석류는 파괴전 강우에 의한 표토층의 포화가 진행되어 자중이 증가하게 되고 간극수압 증가로 인해 전단강도는 감소하게 된다. 또한 지하수흐름에 의한 침투력으로 하중은 점차 증가하여 지반의 강도보다 하중이 커지는 순간에 파괴가 진행된다. 파괴가 진행되면 파괴시작 후 강도가 계속 감소하고 점착력 상실로 인해 과다 변형 및 표면 균열이 발생하게 되며 균열부로 표면수가 침투되고 지속적인 변형 및 파괴가 진행된다. 변형속도가 빨라지면서 파괴 토체가 느슨해지고 액상화 현상이 발생하게 되어

파괴 토체는 하부로 이동하게 되어 연쇄적인 파괴가 진행된다.

이러한 강우와 지반특성의 상호작용에 의한 토석류 발생원인 외에 다른 발생 원인을 검토해보기 위하여 본 절에서는 시설물 개발에 따른 지형변화가 토석류 및 산사태 발생의 원인이 될 수 있는지에 대한 평가를 하였다.

항공/위성사진을 이용하여 토석류 발생지역의 지형 변화를 분석하고 토석류 발생에 영향을 미치는 특성을 검토하였으며, 그림 3.2.2와 같이 동일한 장소에 다른 시기의 항공사진 또는 위성사진을 분석하여 시설물 등에 의한 개발의 영향을 파악하고자 하였다. 상단부 사진의 경우, 사진의 좌측부에 고속도로 톨게이트 시공을 위하여 산지부를 관통하여 공사가 진행되었으며 사진 하단부는 철도 역사 뒤쪽 산지부에 시설물 시공에 따른 지형변화를 보여준다. 이러한 시설물 개발은 주변 지형을 변화시키고 강우시 우수의 흐름 경로에 변화를 줄 수 있다. 지표수 및 지하수의 유동이 일반적으로 흐르던 경로에서 새로운 경로로 이동하게 될 경우에 지표 침식 및 지하 내부 세굴 등의 발생으로 인한 지반의 연약화가 발생 할 수 있으며 이는 산사태 및 토석류 발생의 시발점이 되는데 주요한 요인이 될 수 있다.



그림 3.2.2 시설물 개발에 따른 지형 변화 사례(좌 : 개발 전, 우: 개발 후)

1. 국내외 현황

항공사진 및 지형도의 변화를 이용하는 기법은 개발제한구역 감시등에 대단히 유효하게 사용되고 있으며, 산사태 및 토석류 예측을 위해서도 위성사진, 항공사진 및 (고)지형도 분석 등의 거시적인 접근 방법을 이용하는 연구가 많이 진행되어 왔다.

국내의 경우, 항공사진을 이용하여 산사태 지역의 정확한 분석을 위한 수치표고모형 생성에 관한 연구, 항공사진으로부터 산사태 발생지역의 면적, 발생고도 및 경사도를 산정하는 연구가 수행되었으며, DEM 해상도에 따른 지반분류특성에 관한 연구도 수행되었다(강수영 외, 2011, 최현 외, 2007, 손정우 외, 2009, 황제선 외, 2010).

최현 외(2007)는 산사태 발생에 따른 지형 변화는 기존의 수치지도를 활용할 경우 분석이 어려운 점을 개선하기 위하여 항공사진을 수치화하여 표고모형을 개발, 활용하는 연구를 수행하였다. 손정우 외(2009), 황제선 외(2010)는 항공사진과 GIS를 이용하여 우리나라 인제지역에서 발생한 산사태 분석을 수행하였으며 산사태 발생 고도, 경사도 등을 분석하였다. 손정우 외(2009)는 산사태 발생 고도는 발단부의 경우 약 532～551m 부근에서 시작되며 유하부는 493～524m, 퇴적부는 467～502m에서 이뤄지는 것으로 분석하였다. 또한 산사태 발생 경사는 18～27° 에서 주로 발생되는 것으로 보고하였으며 35° 이상의 경사에는 발생하지 않는 것으로 나타났다. 특이한 점은 산사면의 방향에 따른 분석을 수행하였는데 동쪽, 동남쪽, 남쪽 방향에서 산사태가 주로 발생하였다고 보고하였다.

그러나 산사면 방향의 분석은 기존의 다른 연구와 크게 다른 방향을 보여주고 있다고 언급하고 있어 산사태와 산사면 방향과의 관계 도출은 신뢰성이 많이 낮다고 볼 수 있으며, 보다 많은 연구가 필요하다. 손정우 외(2009)와 황제선 외(2010)의 산사태 발생 경사도와 발생고도에 관한 연구 결과는 약간의 차이를 보여 산사태 발생 고도와 경사도의 특징을 일반화하기 위해서는 보다 많은 사례 연구가 필요할 것으로 판단된다. 다만, 공통적으로 제시하고 있는 사항은 산사태 발생 경사도인데, 일반적인 비탈면의 붕괴 위험도가 고경사에서 높은 것에 비하여 산사태의 경우에는 특정 경사에서 산사태가 더 많이 발생하게 되고 고경사에서는 산사태 발생이 일어나지 않는다는 점이다. 해당 연구 결과로부터 산사태 및 토석류의 발생은 집중강우시 강우를 유입하는 산사면의 면적과 큰 관계가 있음을 유추해 볼 수 있어 향후 보다 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 손정우 외(2009)는 경사도와 발생 고도 외에 임상학적 특성, 토양학적 특성, 지질학적 특성, 수문학적 특성 등을 분석하여 제시하였다. 해당 논문들에서의 연구 결과는 기존의 다른 연구

결과와 상이한 결과를 보이고 있기도 하여 산사태 발생 지역의 임상, 토양, 지질, 수문학적인 일반적인 특징을 도출하기위한 노력이 필요한 것으로 판단되었다.

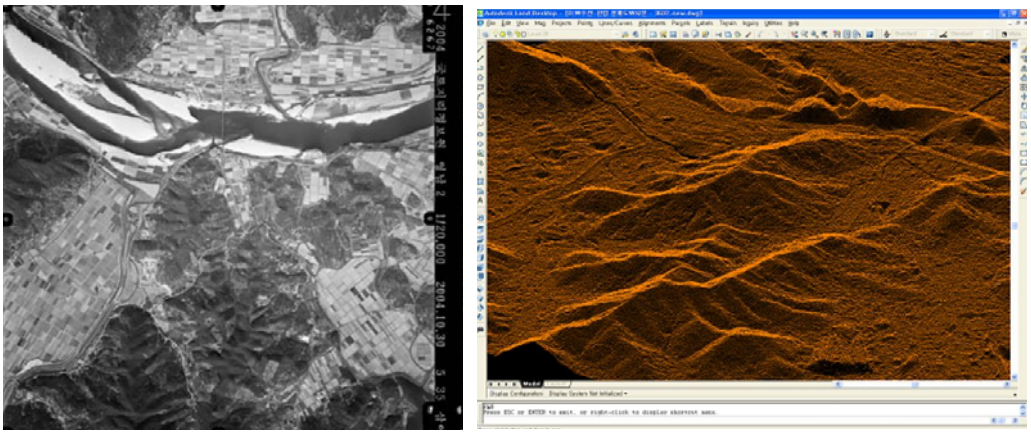


그림 3.2.3 항공사진(좌)으로부터 생성된 수치표고모형(우)(최현 외, 2007)

강수영 외(2011)는 산사태 및 토석류 분석에 활용되는 DEM(Digital Elevation Model) 해상도의 차이에 의한 지반분류 방법의 특성 변화에 대한 연구를 수행하였는데, 앞서 수행된 산사태 발생 지역의 경사도를 분류하는데 있어 DEM 해상도의 차이에 따라 경사도 결과에서 차이가 나타난다고 보고하였다. 연구지역의 경사도나 지형 굴곡이 심할 경우에는 셀의 크기가 작은 고해상도 DEM을 이용하여 지반분류를 하는 것이 적합하다고 보고하고 있다.

국내의 경우 고지형도를 이용한 산사태 및 토석류 관련 연구는 수행된 사례가 없는 것으로 알려져 있어 향후 관련분야에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

국외의 경우에는 항공사진 및 고지형도를 이용한 산사태 및 토석류 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근에는 항공사진 촬영대신 LiDAR(Light Detection And Ranging) 측량을 이용하여 구축한 수치표고모델을 분석하여 산사태 연구를 수행하고 있다. LiDAR는 항공기로부터 지상을 향해 많은 레이저 펄스를 지표면에 발사하여 반사되는 레이저 펄스로부터 지표면의 고정밀 높이정보를 획득하는 최신 공간정보 획득기술로 고품질의 3차원 디지털 데이터를 획득하는 측량 기술이다. 항공사진 및 항공 LiDAR은 산사태 및 토석류 발생 지역 연구를 위한 지형정보의 자료를 취득하기 위한 방법에서 차이를 보이며 그 결과로부터 수행되는 분석의 개념은 같다고 볼 수 있다. 다만, LiDAR를 이용할 경우 정밀한 지형 정보를 구축할 수 있어 향후 산사태 및 토석류 연구 흐름은 LiDAR를 이용하여 보다 정밀하고 정확하게 수행될 수 있을 것으로 기대된다.

항공사진을 이용하여 과거에 발생된 산사태 지역의 광역 지도 작성 및 특성 분석에 관한 연구, 스펙트럼 분석과 고해상도 지형자료를 이용하여 자동으로 산사태 지도를 제작하는 연구, 고지형도 분석 연구, LiDAR 자료와 객체지향분석을 이용한 산사태 지도 작성 등에 관한 연구가 수행되었다(Adam M., et al., 2009, Van Den Eeckhaut, M., et al., 2011, Van Den Eeckhaut, M., et al., 2006).

Van Den Eeckhaut, M., et al.(2006, 2011)은 산림으로 피복되어 있는 지역에 대하여 LiDAR로부터 추출된 이미지를 활용하여 과거에 발생한 산사태 지도를 작성하고 이미지 분석을 통해 산사태 유동 특성을 분석하였다. 산사태 현황지도는 산사태의 위험도를 평가하고 사면 안정성 평가를 하는데 중요한 기본 자료로 활용된다. Adam M. et al(2009)는 이러한 산사태 현황지도의 제작을 위해 스펙트럼 분석과 고해상도 지형자료 분석을 수행하여 자동으로 제작하였다. Tomaz는 Backward editing method를 이용한 고지형도 분석을 통해 토지 이용의 변화를 연구하였는데 이는 과거의 지형과 현재의 지형 변화에 따른 산사태 및 토석류 발생 가능성을 평가하는데 도움이 될 수 있는 연구라고 판단된다.

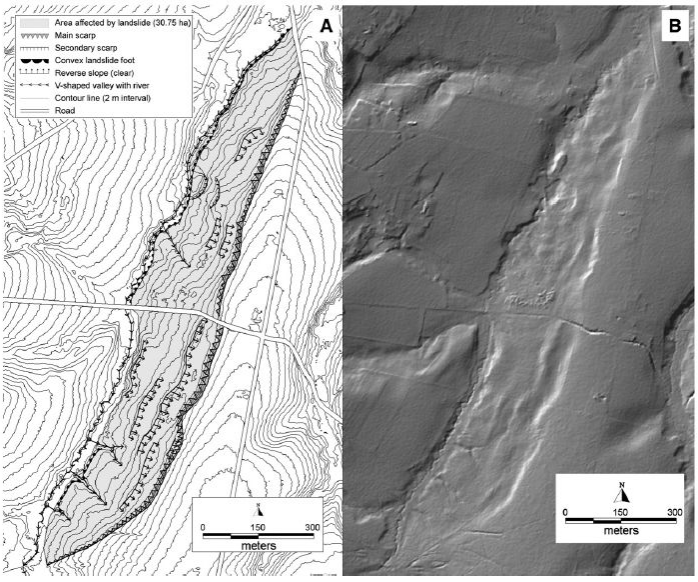


그림 3.2.4 산사태 지형도(좌) 및 LiDAR로부터 추출된 음영기복도(우)
(Van Den Eeckhaut, M., et al., 2011)

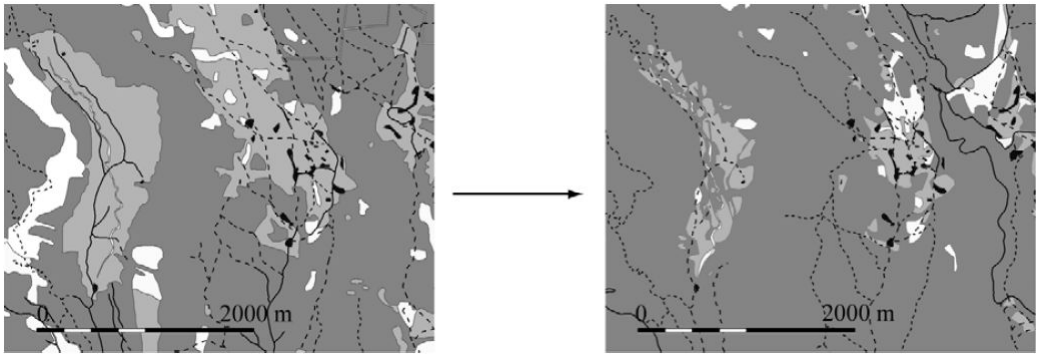


그림 3.2.5 고산지대 초지이용 변화(좌: 1934년, 우: 1995년)(Tomaz)

지진 및 자연재해가 많이 발생하는 일본의 경우, 자연재해로 부터의 피해를 최소화하기 위해 지반의 과거 기록을 꾸준하게 관리해오는 사례가 있다. 계곡부, 과거 붕괴 발생 지역, 액상화 가능성이 높은 지반 등 지반 특성에 따라 자연재해에 대한 취약성 여부를 구분하여 관리하고 있다(그림 3.2.6).

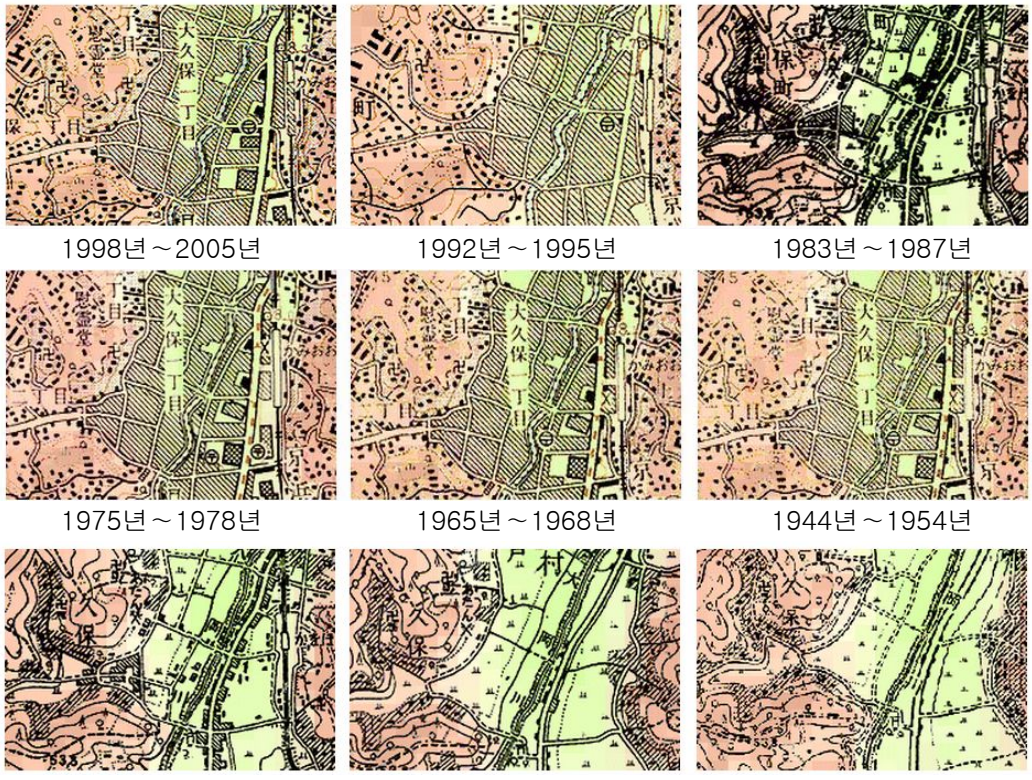


그림 3.2.6 일본 카미오카역 주변 지형 변화

2. 위성사진을 통한 산사태 발생 지역의 지형 및 시설물 변화 특성분석

본 연구에서는 위성(항공)사진의 분석을 통해 산림, 도시, 하천 등 시설물 개발이 산사태 및 토석류 발생의 영향 인자로 작용하는지 검토하였다. 산사태 및 토석류 발생지역의 위치정보와 구글어스(google earth)의 위성사진과 다음지도(daum)의 항공사진을 이용하여 산사태 및 토석류 발생 주변 지역에 대한 과거 및 현재의 지형 변화 및 시설물 현황에 대하여 파악하고 분석하였다.

메타형식의 항공사진 및 고지형도의 경우, 산사태 및 토석류 발생 현장에 대한 자료 취득이 즉각적으로 이뤄지기 어려운 점이 있어 본 연구에서는 자료 검색이 수월한 웹상에서 제공하고 있는 위성사진 및 항공사진을 주로 이용하여 분석하였으며 메타형식의 항공사진과 지형도에 대해서는 몇 가지 사례를 소개하였다.

2009년과 2010년에 발생한 산사태 및 토석류 발생 현장에 대한 위치정보를 수집하였으며 해당 지역의 과거와 최근 위성 및 항공사진을 검토하였다. 표 3.2.1은 2009년과 2010년에 발생한 산사태 및 토석류 발생 현장의 위치정보를 정리한 것이다. 산사태 발생 현장의 GPS 정보를 이용하여 위성사진에 위치를 표기하였으나 여러 가지 사회적 민감성을 고려하여 GPS 정보는 공개하지 않았다.

2009년과 2010년에 발생한 산사태 및 토석류는 대부분 7, 8월에 발생하였으며 발생원인은 강우기에 발생한 집중호우이다. 사망 및 부상자가 많이 발생하였으며 가옥, 공장, 창고 및 차량 등 다수의 재산 피해가 발생하였다. 7개소의 붕괴 현장 중에서 토석류 발생 현장은 4개소에 해당된다.

표 3.2.1 급경사지 붕괴 발생 현황(2009년, 2010년)

ID	발생년도	발생일	발생장소	비고
A	2010	8월14일	전라북도 완주군 비봉면 이전리	토석류
B		8월17일	전라남도 담양군 수북면 대방리	토석류
C	2009	7월14일	경기도 남양주시 화도읍 구암리	토석류
D		7월16일	부산시 사하구 장림2동	토석류
E		7월16일	부산광역시 연제구 연산 6동	-
F		7월16일	경상남도 마산시 구산면 심리	-
G		7월16일	경상남도 창원시 귀산동	-

각각의 붕괴 발생 현장에 대하여 과거 및 최근 위성 및 항공사진을 수집하여 분석하였으며, 현재 입수할 수 있는 자료를 활용하여 정성적인 분석을 실시하였다.

A 산사태 발생지역은 위치 측정지점 북쪽으로 수목 지역을 개발한 흔적이 관찰되나 산지 상부에 해당되지 않는 것으로 판단된다. 산사태 발생 이후 사진에서는 산사태의 발단부, 유하부의 흔적을 관찰할 수 있다. 또한 유하부에는 사방시설로 추정되는 시설물이 설치되어 있는 것을 확인할 수 있어 2010년 산사태 발생 후에 복구된 것으로 추정된다. 수집된 사진 정보로부터, 산사태 발생과 주변 개발에 따른 지형 변화와의 직접적인 연관성을 찾기는 어려운 것으로 판단된다(그림 3.2.7참조).



붕괴 전 (미정) 붕괴 후 (2011년 6월 20일)

그림 3.2.7 A 지역 위성사진 변화

B 산사태 발생지역은 2004년도에 촬영된 위성사진만 제공되고 있기 때문에 2004년도에 촬영된 사진을 사용하였다. 사진에서 볼 수 있듯이 붕괴 발생위치 동북쪽으로는 식생상태가 비교적 불량한 것을 알 수 있으며 산지를 따라 임도가 개설되어 있다. 산사면의 부족한 식생이 어느 정도 산사태 발생에 영향을 미쳤을 것으로 추정된다(그림 3.2.8 참조).



그림 3.2.8 B 지역 위성사진 (붕괴 전, 2004년 10월 22일)

C 토석류 발생 구간은 서울-춘천간 46번 국도에 위치하고 있다. 붕괴 발생은 2009년도에 일어났으며 위성사진은 2004년도와 2008년도에 촬영된 사진을 수집하였다. 토석류는 대규모 인공 비탈면의 계곡부를 통하여 유출되었다. 그림 3.2.9에서 볼 수 있듯이 토석류 발생지점의 남서쪽으로 터널 공사가 진행중임을 관찰할 수 있다. 터널 공사가 토석류 발생의 직접적인 원인으로 볼 수는 없으나 지속적인 터널 발파 과정에서 지반의 강도가 저하되는데 영향을 주었을 가능성이 있다고 판단된다(그림 3.2.9 참조).



붕괴 전 (2004년 4월 20일)　　붕괴 전 (2008년 5월 3일)

그림 3.2.9　C 지역 위성사진 변화

D 토석류 발생 구간은 도심지에 위치한 작은 산 주변에 위치한 아파트로 토석류가 발생된 현장이다. 아파트 동쪽으로 산지가 형성되어 있으며 산지 중간부에는 편도 1차선 규모의 작은 도로가 형성되어 있다. 도로변에는 배수시설이 전혀 설치되어 있지 않아 산지에서 유입되는 지표수나 지하수가 원활하게 배수되지 않고 있다. 현장 사진을 보면 도로 상단부에 위치한 수목과 도로 하부에 위치한 수목들이 심하게 기울어져 있는 것을 관찰 할 수 있다(그림 3.2.10 참조).



그림 3.2.10　D 토석류 발생 피해 지역 상부 도로 및 수목 현황

배수시설이 불량한 도로 주변으로 유입된 지표수 및 지하수로 인하여 지반의 약화가 토석류 발생의 원인으로 추정된다. 토석류 발생부 남쪽에 위치한 시설물(창고) 개발로 인한 영향도 고려해 볼 수 있으나 정확한 영향성을 평가하기 위해서는 지반의 경사, 지하수 이동 경로 등에 대한 분석이 선행되어야 할 것으로 판단된다(그림 3.2.11 참조).



붕괴 전 (2006년 4월 7일)



붕괴 전 (2007년 12월 16일)



붕괴 전 (2009년 5월 19일)



붕괴 후 (2010년 11월 3일)

그림 3.2.11 D 지역 위성사진 변화

E 지역은 사진의 가운데 위치한 능선의 좌측 계곡부에서 산사태가 발생하였다. 능선의 좌측 계곡부를 따라 상류 쪽에는 소규모 공원이 위치하고 있으며 2007년부터 공사가 진행된 것으로 추정된다. 공원, 체육시설 등 산지에 평평한 부지를 갖는 시설의 경우, 강우 발생 시 지하로의 유입 면적이 넓어지게 되어 지반을 약하게 할 수 있다. 따라서 산지 상부에 설치되는 시설물 주변에 배수시설을 설치하는 것이 매우 중요하며 본 현장에서도 이러한 배수시설의 준비 부족이 산사태 발생에 영향을 주었을 것으로 추정된다(그림 3.2.12 참조).



붕괴 전 (2004년 월 7일)



붕괴 전 (2007년 12월 16일)



붕괴 전 (2009년 5월 19일)



붕괴 후 (2010년 11월 3일)

그림 3.2.12 E 지역 위성사진 변화

해안도로변에 위치한 F 산사태 발생지역은 피해 발생 규모가 매우 작다. 위성사진으로도 붕괴가 발생된 소규모 산의 주변 및 상부에 시설물 설치의 변화는 관찰되지 않는다(그림 3.2.13 참조).



붕괴 전 (2003년 11월 23일)　　붕괴 전 (2009년 3월 26일)

그림 3.2.13 F 지역 위성사진 변화

G 산사태 발생지역은 산사태로 인하여 계곡부 하부에 위치한 가옥 한 채가 파손된 현장으로 마을 주변 가운데 위치한 계곡부를 따라 올라가면 상류쪽에서 고속국도 및 톨게이트 건설 현장이 위치하고 있다. 본 현장에서 발생된 산사태는 고속국도 건설에 따른 도로의 생성과 강우기 배수 문제 등의 영향을 받아 발생되었을 가능성이 있다(그림 3.2.14 참조).



붕괴 전 (2004년 3월 28일)　　붕괴 전 (2009년 3월 26일)

그림 3.2.14 G 지역 위성사진 변화

3. 항공사진을 이용한 산사태 지역 특성 분석

최근 들어 위성, 항공사진의 경계가 모호해져 두 이미지의 구분에 큰 의미는 없으나 본 절에서는 국내에서 발생한 강원도 산사태 발생 지역의 메타형식의 항공사진을 검토하여 산사태 발생의 특징을 도출해보고자 하였다. 항공사진의 경우, 군사시설과 같은 보안상의 문제로 정보 접근에 제약이 많이 있어 연구 자료로 활용하기에 수월하지 않은 단점이 있다. 보안 문제를 보완한 항공사진이 인터넷 포털 서비스(다음 지도 등)를 통하여 제공하고 있어 실제 항공사진 검토가 어려운 경우에는 이를 활용할 수 있다.

본 연구에서 수집한 항공사진은 인제에서 발생한 산사태 현장으로 2006년 산사태 발생으로 계곡부를 따라 산사면 상부에서 발생한 토사, 암석류의 흐름 경로를 보여주고 있다. 주계곡부를 따라 토사류의 흐름이 있었으며 좌우측 소계곡부에서 유입된 추가 산사태 유입물 들이 합류되는 형태를 보인다. 특히 본 현장의 경우, 주계곡부 좌측부에 주로 발달하고 있는 소계곡부에서 토사류가 유입되고 있는 형태를 보이고 있다. 같은 수계 내에 산사태의 발생에서 차이를 보이는 점은 추후 그 원인에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 현장에서 볼 수 있듯이 산사태 발생은 주 계곡부 뿐만 아니라 소규모 소계곡부에서 발생된 사태 물질의 합류로 인하여 그 규모가 증가하게 되므로 산사태에 대한 방호 대책을 마련할 때, 주 계곡뿐만 아니라 소계곡부에도 단계별 대응방안을 마련하는 것이 합리적이라고 판단된다.

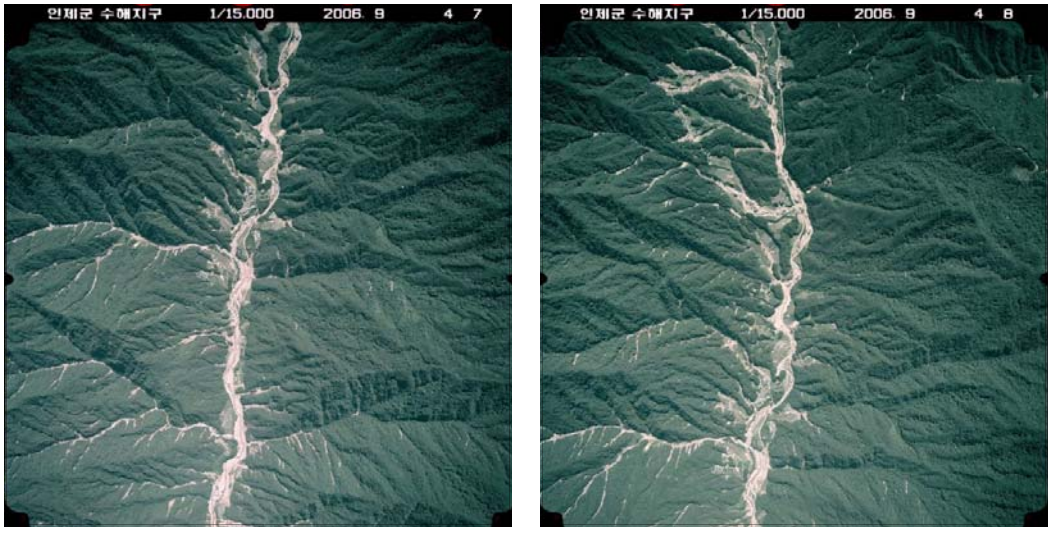


그림 3.2.15 인제군 산사태 지역 항공사진(좌: 상류, 우: 하류)

4. 지형도 분석을 이용한 산사태 지역 특성 분석

자연재해가 많이 발생한 일본의 경우, 한 도시의 재해 이력을 꾸준히 관리해오고 있다. 이를 위하여 도시 개발에 따른 지형의 변화에 대해서도 꾸준한 관리가 이루어지고 있음을 앞서 연구 동향에서 살펴보았다. 본 연구에서도 우리나라 지형도 변화를 분석하여 산사태 관리에 적용 가능성이 있는지 평가하고자 하였다.

연도별 지형의 변화를 검토하기 위해서는 국내 지형도 데이터가 갖추어져 있어야 가능하다. 그러나 국내의 경우, 연도별 지형도 관리가 전국적으로 체계적으로 관리가 이뤄지고 있지는 않은 편이다. 대상지역의 과거부터 현재까지의 지형도가 체계적으로 구비되어 있지 않은 편이며 특히 과거 지형도 수집이 원활히 이루어지지는 않는 편이다. 지형도 역시 산사태 변화를 검토하기 위한 연구 재료로 활용하기에는 여러 가지 보완해야 할 점이 많이 있다.

이번 연구에서는 국내 산사태 발생지역인 인제 덕산리 지역과 한계리 지역의 지형도를 입수하였다. 산사태 발생 전인 2004년도 지형도와 산사태 발생 후인 2010년도 지형도를 동일 스케일로 출력하여 지형 변화를 검토하였다. 2004년도 지형도 위에 트레이싱 페이퍼로 출력한 2010년도 지형도를 오버랩하여 지형변화를 검토하였다.



그림 3.2.16. 덕산리(좌) 지역과 한계리(우) 지역의 2004년. 2010년 지형도 오버랩

과거와 현재 지형도 검토를 통한 지형의 변화는 크게 나타나지는 않았다. 또한 2004년도와 2010년도의 지형도 제작방식에서 차이점이 나타나 등고선의 형태가 조금씩 다른 것을 알 수 있다. 지형도 비교 결과 일부 지역에서 기존에 존재하던 봉우리가 사라지거나 급경사의 형태(절벽)를 보이는 지역의 등고선의 경사 시간이 지남에 따라 완화되는 것을

관찰할 수 있다.

그림 3.2.17은 덕산리 지역의 등고선 변화를 보여준다. 그림의 상단은 2004년도 지형도이며 하단은 2010년도 지형도이다. A와 B 지역의 2004년도 지형을 보면 급경사의 절벽형태를 이루고 있음을 알 수 있다.

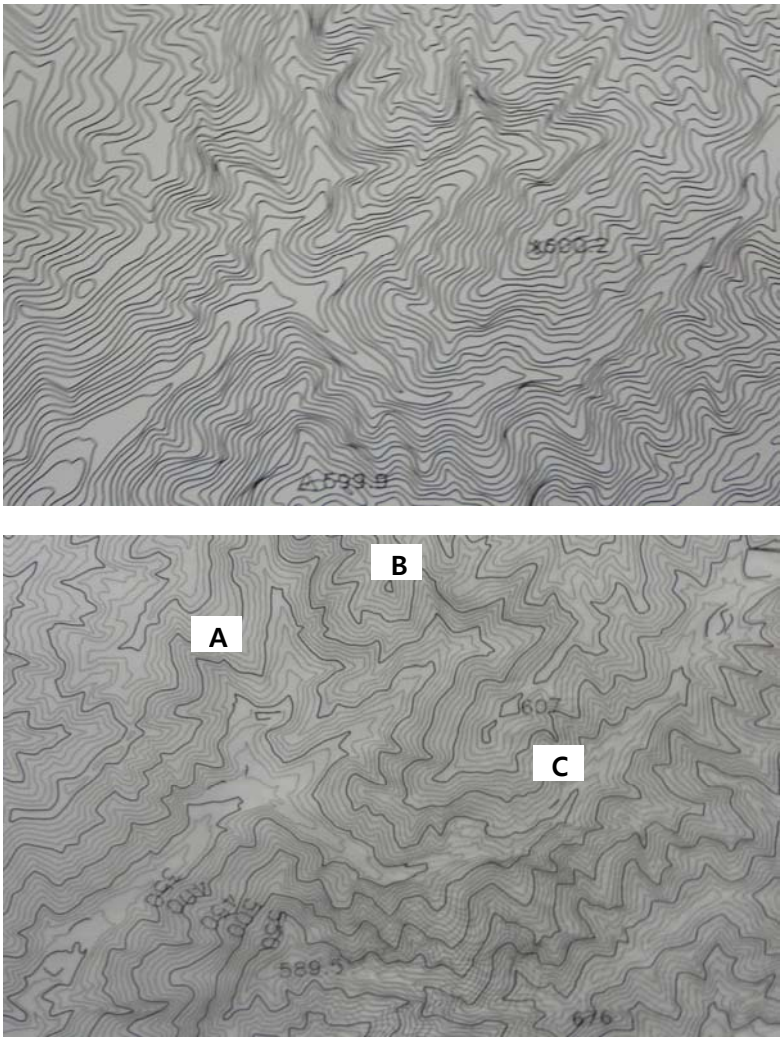


그림 3.2.17 덕산리 지역 지형도 비교 1(상: 2004, 하: 2010)

2010년도의 지형을 보면 과거와 달리 급경사지의 절벽에서 능선, 또는 계곡의 형태로 발전하는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 지형변화는 시간이 지남에 따라 해당지역에서 낙석 또는 산사태 등의 발생으로 지형이 변화된 것으로 추정할 수 있다. C지역은 당초 존재하던 봉우리의 형태가 약간 확장되는 형상을 보이고 있다. 산지 봉우리의 경우 풍화에 가장 취약한 지점으로 볼 수 있는데, 아래 지형의 변화에서도 그 형상을 확인할 수 있었다.

그림 3.2.18은 덕산리의 또 다른 지역의 등고선 변화이다. 해당 지역의 등고선은 2004년도와 2010년도에서 큰 차이를 보이는데 이는 지형도 제작방식의 차이에서 오는 결과로 판단된다. A지역의 경우 앞서 설명한 봉우리 지역과 마찬가지로 봉우리를 이루고 있는 지형의 형태가 급경사에서 완경사로 바뀌는 것을 관찰할 수 있다. B 지역의 경우 계곡의 깊이가 매우 컸으나 시간이 지남에 따라 계곡을 이루는 지형의 경사가 완만해짐을 관찰할 수 있다.

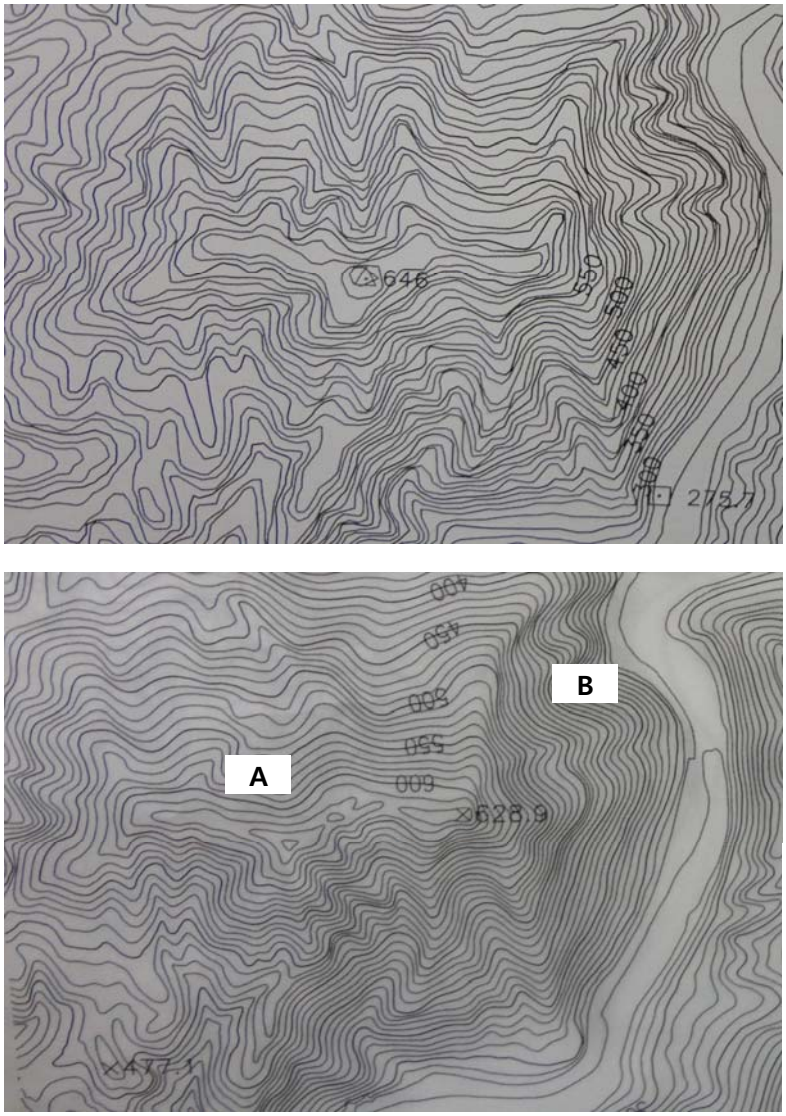


그림 3.2.18 덕산리 지역 지형도 비교 2(상: 2004, 하: 2010)

그림 3.2.19는 한계리 지역의 등고선 변화를 보여준다. A에서 볼 수 있듯이 2004년도에 672m였던 봉우리는 668m로 낮아진 것을 알 수 있다.

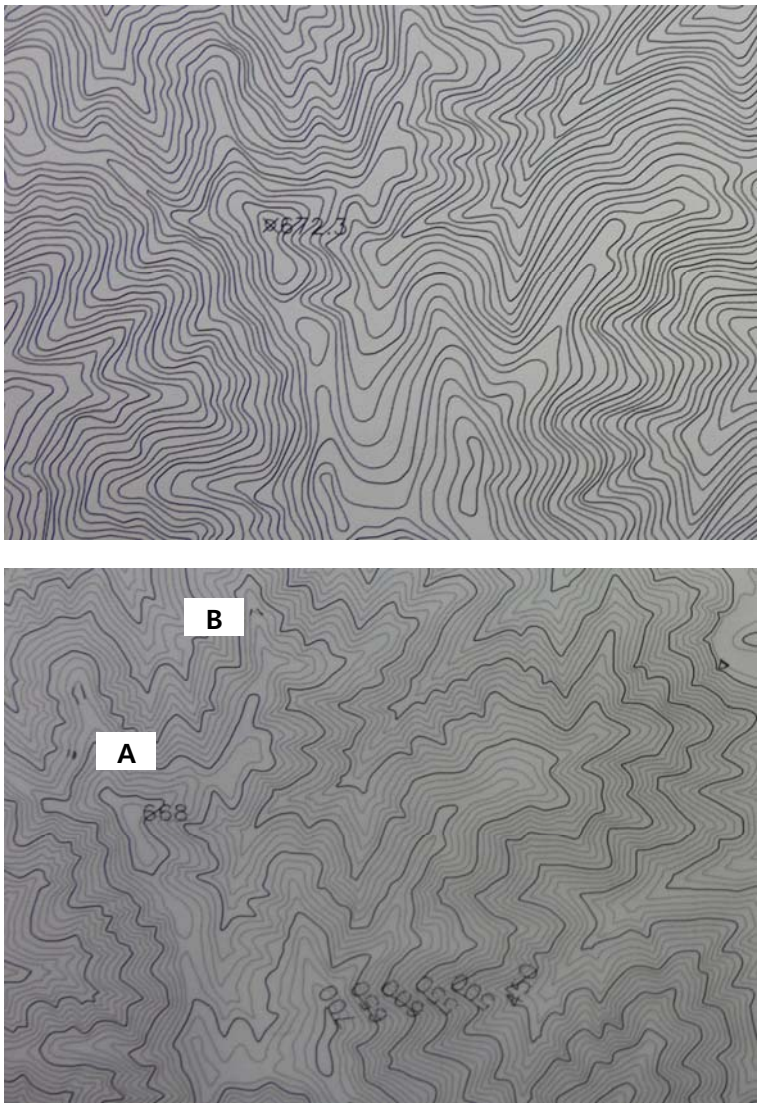


그림 3.2.19 한계리 지역 지형도 비교 1(상: 2004, 하: 2010)

앞에서 덕산리 지역의 봉우리 침식과 동일한 현상으로 볼 수 있으며 B지역에서는 능선부가 확장되는 것을 관찰할 수 있다. 기존의 좁은 형태의 능선이 시간이 지남에 따라 부채골 형태로 변화하는 것을 볼 수 있다.

그림 3.2.20의 A지점에서도 능선부가 확장되는 것을 관찰할 수 있다. 능선 끝이 평평한 구간이 점차 뾰족해 지는 형태로 발전하는 것을 볼 수 있다. 이러한 지형은 능선부 아래로 확장할 수 있는 공간적 여유가 있는 곳에서 관찰된다.

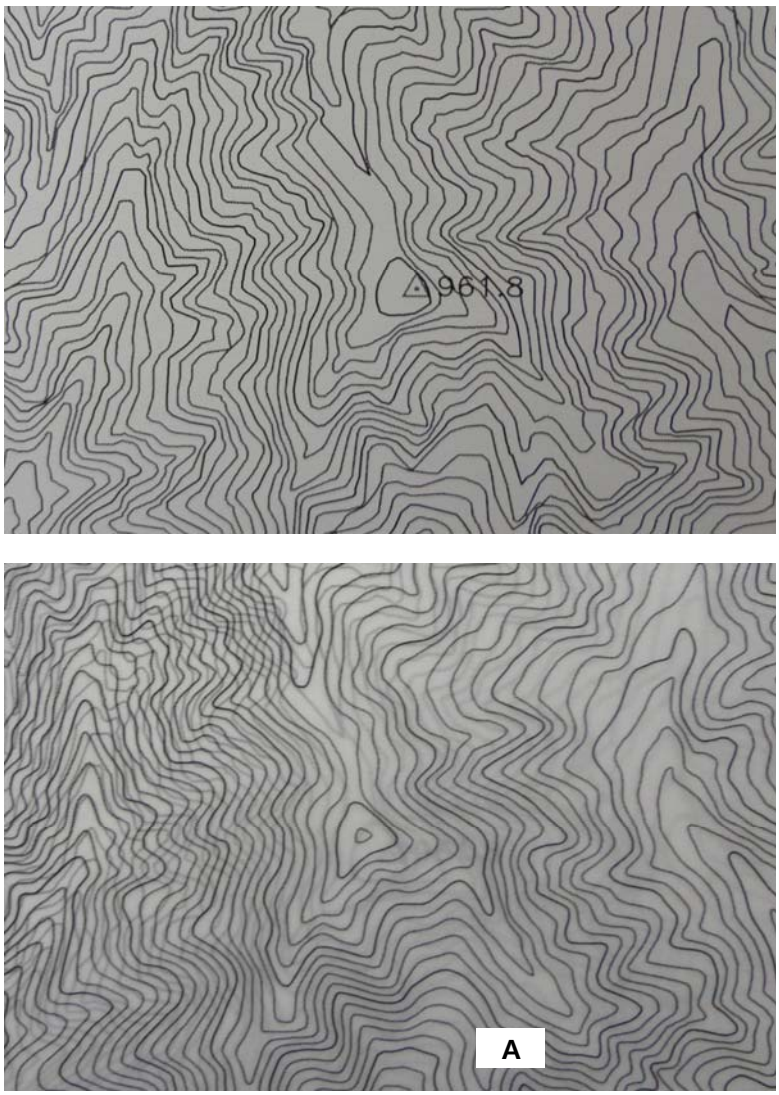


그림 3.2.20 한계리 지역 지형도 비교 2(상: 2004, 하: 2010)

과거 지형도와 현재 지형도를 비교해본 결과, 지형의 변화는 주로 급경사를 이루는 절벽 형태의 지형에서 발생하였으며 산정상부에서도 변화가 관찰되었다. 또한 평평한 지대 위에 분포하고 있는 능선부 시작(말단) 부분에서도 지형 변화가 관찰되었다. 지형 변화는 산지를 구성하고 있는 암반 및 토사 등의 거동을 의미하며 이는 산사태 및 토석류로 발전할 수 있다. 따라서 상기 제시한 특징을 보이는 지형의 경우 산사태 및 토석류 발생 가능성이 높다고 볼 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 산사태 및 토석류 발생은 최정상부에서 시작하여 이동하는 과정에서 그 규모가 점차 확장되는 형태로 발전하게 된다. 지형변화의 가능성이 높은 구간의 하류쪽은 산사태 및 토석류의 이동에 의한 피해 발생 가능 지역으로 볼 수 있어 산사태 및 토석류 방재를 수행하는데 있어 지형도 검토 및 수계 방향 등에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

5. 지형변화와 토사재해의 상관성 분석 결과 고찰

산사태 및 토석류 발생현장에 대한 위성사진 분석을 통하여 산사태와 토석류 발생에 대한 주변 시설물에 관한 현황을 검토하였다. 위성사진 특성상 기상조건의 영향을 많이 받아 일부 사진의 경우 해상도가 좋지 않은 경우가 있었으며 비교적 과거에 찍혔던 위성사진의 경우에도 해상도가 좋지 않았다. 또한 일부 지역의 경우에는 위성사진의 수가 많지 않은 경우가 있어 시간의 변화에 따른 주변지역의 시설물 현황을 검토하는데 어려움이 있었다.

위성사진을 통한 산사태/토석류 발생현장에 대한 분석 결과를 보면 먼저, 산사태/토석류 발생과 주변 지형 및 시설물의 특성과의 상관성을 찾을 수 없는 경우가 있다. 비교적 소규모 산지이거나 시설물 시공에 따른 지형의 변화가 없는 지역의 경우가 이에 해당하며, 이런 지역에서의 산사태/토석류 발생은 집중강우와 이에 반응하는 지반특성에 의한 것으로 추정된다.

이와 반대로 몇몇 산사태/토석류 발생 현장의 경우, 주변 지역에 새롭게 생성되는 시설물, 개발 등에 의하여 지형 변화의 영향을 상당 부분 받은 것으로 관찰되는 현장도 있었다. 산사태/토석류 발생에 새롭게 시공되는 시설물 자체의 영향도 있으며 시설물 시공 과정과 관련된 주요 공정(발파 등), 시설물 시공 중, 시공 후 강우에 대비하기 위한 배수시설 등과 관련되어 산사태/토석류가 발생되었을 가능성이 있다. 연구 결과 도출된, 지형변화의 원인이 되는 시설물 개발의 종류와 그 영향 원인을 표 3.2.2에 나타내었다.

표 3.2.2 산사태 및 토석류 발생에 영향을 미치는 시설물 현황

구분	시설물	영향 원인
교통시설	도로	배수 시설 불량
	터널	발파에 의한 진동
위락시설	공원	배수시설 불량, 넓은 집수 유역
기타시설	창고	넓은 집수 유역

연구결과로부터, 도로, 철도와 같은 국가 주요시설, 지방자치단체에서 운영하는 공원 등을 개발하기 전에 면밀한 지형분석을 통하여 위험지역을 사전에 판단할 필요가 있으며 이를 개발 계획에 반영하는 것이 필요하다. 특히 계곡부 주변과 같이 개발에 따라 명확하게 위험이 예측되는 구간에 대해서는 개발을 제한하거나 개발을 할 경우 피해가 예상되는 지역의 주민들에 대한 이주 대책도 준비하여야 할 것이다.

또한 앞서 언급한 바와 같이, 각종 공사를 수행함에 있어 현장 지형 여건을 고려한 배수시설을 설치하는 것이 필요하다. 단순히 배수시설의 설치에만 그쳐서는 안 되며 유입과 유출 경로를 파악할 수 있도록 체계적인 시스템을 마련하는 것이 필요한 것으로 나타났다.

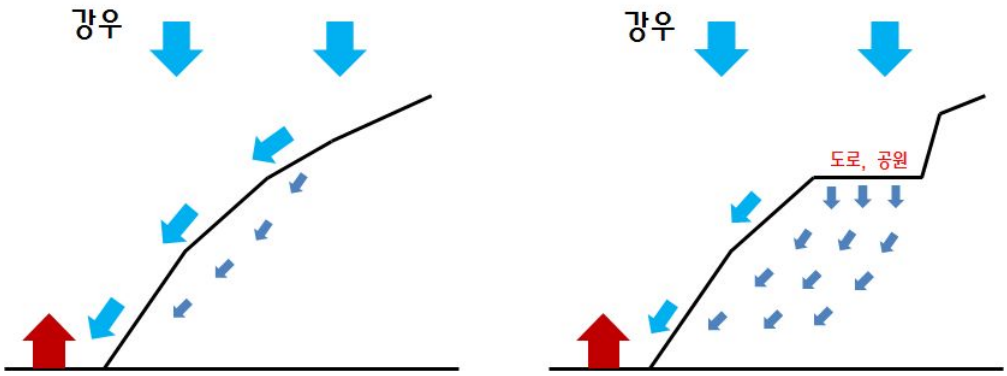


그림 3.2.21 지형 변화에 따른 지표수 및 지하수 유동 변화 모식도

(좌 : 개발 전, 우: 개발 후)

산악지형에 터널을 굴착할 경우, 지반 진동 등에 의하여 지반이 약해지게 될 수 있고 이러한 지반에 강우가 유입될 경우, 토석류 및 산사태가 발생할 수 있으므로 해당 지역에서의 공사 진행시 면밀한 주의가 요구되며 관련 제도를 정비하는 것도 필요한 것으로 나타났다.



그림 3.2.22 지반 외부 충격 영향 모식도

제 3 절 수문학적 유형 분석 및 토사재해 예보기준 재검토

토사재해는 매우 짧은 시간에 일어나고 큰 피해를 발생시키는 특징을 가지고 있다. 또한, 강우 발생 시에는 지중침투수에 의한 간극수압의 상승, 표면유출에 의한 침식, 흙의 포화로 인한 토층의 함수량 증가 등에 의해 사면을 붕괴시키려는 활동력이 증가된다. 즉, 사면 붕괴에 저항하려는 저항력은 감소되고 사면의 안정성은 극도로 저하된다. 따라서 강우 시 사면의 안정성을 검토하는 경우에 보다 합리적으로 강우특성을 적용할 수 있다면 향후 강우로 인해 발생될 수 있는 토사재해의 발생을 미리 예측하고 대비할 수 있을 것이다. 일반적으로 사면해석 시 강우에 대한 인자는 강우강도를 적용하게 되는데 이는 사면에 강우가 모두 침투된다고 가정하므로 과도한 침투량이 계산되는 오류가 있곤 한다 (신흥건, 2007). 이는 수문학적 특성인 강우, 침투, 토양수분 및 유출의 관계를 고려하지 않은 결과라 할 수 있다. 기존의 연구를 살펴보면 토사재해의 직접적 원인이 되는 강우를 시간별(분/시/일), 빈도별로 고려하지 않고 평균 일강우량을 적용하거나 3일 누적강우량 및 연속강우량 등을 적용한 사례가 많은데 이는 강우의 특성을 고려하지 않은 것이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 경계조건으로 작용하는 강우의 시간별 특성을 고려하고, 사면수문학적 접근에 의한 국내외의 토사재해 사례를 면밀히 검토하여 강우가 토사재해에 미치는 영향과 관련성에 대해 알아보고자 한다. 또한 물리적 개념의 분포형 수문해석 모형을 이용하여 수문학적 특성 인자(강우, 침투, 토양수분 및 유출량)와 산사태 및 토석류의 발생간의 기준을 검토하고, 기타 국내외 산사태 및 토석류 모의기술을 조사하여 강우 시 경사면에서의 산사태 및 토석류 발생 해석을 위한 전산 수치해석 기술을 검토하고자 한다.

1. 수문자료를 활용한 산사태 및 토석류 유형 분석 및 기준 개선 제안

가. 수문자료를 활용한 국내외 산사태 및 토석류 분석

국내에서 토석류를 직접 다룬 연구는 매우 적으며, 산사태를 연구하면서 간접적으로 일부 연구된 사례가 있는 정도이다. 토석류 연구와 관련한 대규모 연구단도 2008년 건설교통기술평가원에서 발주된 ‘수충부 및 토석류 방재기술개발 연구단’이 유일할 정도로 국내 연구기반은 매우 취약하다. 토석류 관련 일부 기술을 보유 또는 연구 수행실적이

있는 기관으로는 국립방재연구소, 산림과학연구원, 지질자원연구원을 들 수 있으며 주로 산사태 위험지 분석에 연구의 중점을 두고 있다.

토석류에 대한 국내 기술은 토석류의 특징, 원인, 분석방법, 대책방법에 대하여 총괄하여 기술하고 있는 기준이 거의 없으며, 산림청에서 발간된 “사방기술교본”이 기술적인 내용을 가장 많이 담고 있다. 그 외에 도로설계편람(국토해양부), 건설공사비탈면설계기준(국토해양부), 도로배수시설설계 및 유지관리지침(국토해양부)에서 부분적으로 토석류에 대하여 언급하고 있으나 포괄적인 내용을 포함하고 있지 못한 실정이다. 토석류와 관련되어 학술지에 발표된 논문은 극히 제약되어 있으며 발표내용도 주로 위험지 분석에 국한되어 있다. 발표된 논문의 수도 타 분야의 연구실적에 비해 미미한 실정이다.

토석류 관련 연구의 경우 토석류 발생의 근본적 원인 및 예·경보 체계의 근간이 강우에 있음에도 지금까지 국내 연구는, 토석류 등으로 인한 피해를 사전에 방지하기 위해 도로나 배수 설계 기준 정비(도로선형설계 및 배수설계, 수충부 방재설계) 위주로 추진되어 설계 기준을 넘어서는 호우에 대한 대책이 미비하고 토석류 예·경보 목적에 활용하기 어려운 현실이다. 그리고 최근 국내의 기후변화와 더불어 토석류 발생 사례가 증가하고 있고(김경석 외, 2007) 사회적으로 재해대응을 위한 요구가 높아지고 있지만 아직까지 토석류에 대한 체계적인 조사와 발생특성에 대한 분석사례는 그리 많지 않은 상황이다.

2002년 태풍 ‘루사’로 인한 강원지역의 피해를 조사한 강릉대학교의 분석에 의하면(2007), 2002년 피해의 경우 산지가 발달한 강원지역 태백산맥 일대와 전라북도-경상북도의 경계부분에서 대부분의 피해가 발생하였고 소규모 산지하천 및 급경사 계곡이 많은 강원 영동지역에 가장 많은 도로 피해가 발생한 것으로 나타났다.

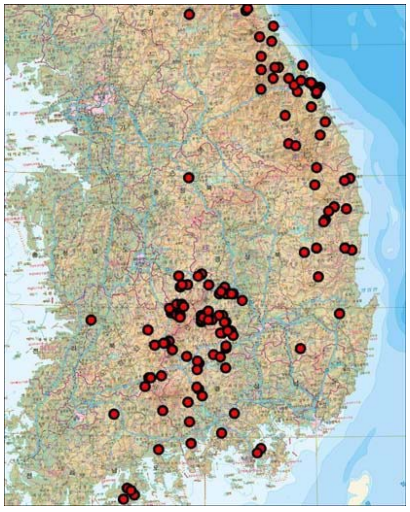


그림 3.3.1 2002년 태풍 ‘루사’로 인한 전국 도로피해 발생 분포

강원지역의 하천은 일반적으로 하천유역이 넓지 않고 유속이 빠르기 때문에 집중호우, 태풍 등으로 인해 유량이 급속히 많아질 경우 이와 같은 만곡부에서의 범람을 야기시키며 하천을 따라 건설되어 있는 강원지역의 도로 특성 상 도로 침수 및 유실피해가 2차적으로 발생하는 것으로 원인을 추정하였다. 이를 방지하기 위해서 강우량 산정 기법 개발, 강우량에 따른 홍수위 예측 및 하상 변동 예측 모델 개발이 필요하였다.

표 3.3.1 2006년 7월 지점별 최대강우량 및 지속기간별 재현기간[8)]

호우 사상	관측소	지속기간(hr)				
		1	3	6	12	24
7.8 -7.10	개천 (929)	66.0 (10~20년)	164.5 (100년)	271.0 (200년이상)	331.0 (200년이상)	332.5 (50년)
	지리산 (872)	54.5 (10년)	130.0 (50년)	214.5 (100년)	289.0 (100~200년)	295.5 (20년)
	중산리 (902)	64.5 (20년)	120.5 (20년)	205.0 (50년)	279.0 (50~100년)	283.0 (20년)
	백운산 (856)	42.0 (2~5년)	105.0 (10년)	188.5 (50년)	279.5 (100~200년)	283.5 (20년)
7.11 -7.13	주교 (450)	77.5 (10년)	198.5 (200년)	282.0 (200년이상)	372.1 (200년이상)	398.1 (100년)
	고양 (540)	69.5 (10년)	188.5 (100~200년)	273.0 (200년이상)	357.5 (200년이상)	373.0 (100년)
	김포 (012100)	57.0 (2~5년)	162.0 (50년)	231.0 (100년)	303.0 (100년)	327.0 (20~50년)
	능곡 (589)	67.5 (5~10년)	165.5 (50년)	236.0 (100년)	286.5 (50~100년)	303.0 (20년)
7.14 -7.21	봉평 (018810)	83.0 (200년이상)	151.0 (200년이상)	203.0 (100~200년)	224.0 (10~20년)	372.0 (50년)
	횡성 (536)	47.5 (5년)	108.0 (10~20년)	187.0 (50년)	300.1 (100년)	404.7 (100년)
	청일 (561)	59.0 (561)	91.5 (10년)	173.0 (50년)	213.9 (10~20년)	360.1 (50년)
	한계령 (213500)	113.5 (200년이상)	241.0 (200년이상)	264.5 (200년이상)	288.0 (200년)	354.5 (50년)
	송산 (063900)	51.0 (5년)	123.0 (20년)	224.0 (100년)	292.0 (100년)	399.0 (200년)
7.25 -7.29	회화 (064500)	67.0 (20년)	109.0 (10년)	182.0 (20~50년)	273.0 (50~100년)	376.0 (100년)
	포승 (472)	78.5 (50년)	169.5 (200년)	208.5 (100년)	279.0 (100년)	380.5 (200년)
	송탄 (471)	58.0 (10년)	91.0 (5년)	151.0 (10~20년)	248.0 (50년)	345.0 (50~100년)

2006년 7월 11-13일에 발생한 호우는 태풍 '빌리스'가 북상함에 따라 우리나라 남부 서해안 지역에서 강우가 시작되었으며, 이후 장마전선이 북상하여 태풍 '에위니아'의

8) 출처 :2006년 7월 태풍 및 집중호우 피해조사(건설교통부, 2006), 국토해양부 시단위 우량자료

수분과 합쳐져 서울, 경기북부, 강원도 지역에 많은 강우가 발생하였다. 2006년 7월의 호우는 전국에 걸쳐 광범위하게 호우가 발생하였고 2006년 호우의 대부분의 피해는 7월 14일-21일까지 장마전선이 서서히 남하 하면서 긴 시간 동안 광범위한 지역에 발생하였다. 위의 표 3.3.1은 2006년 7월 지점별 지속기간별 최대강우량을 나타낸다.

2008년 7월 23일부터 서울, 인천, 경기, 강원, 충북, 경북지역에 호우특보가 발효되면서 경북 봉화군의 경우 7월23일~26일 동안 총 233.5mm의 많은 비가 내렸으며, 최대 시우량 38.0mm의 강한 호우가 발생하였다. 이로 인해 인명피해는 사망 8명이 발생하였다. 춘양면 의양1리에서는 철도 토사사면이 붕괴되면서 주택이 매몰되어 2명이 사망하였으며, 춘양면 참새골에서는 급격히 늘어난 유량 및 토석류로 인해 4명이 사망 하였다. 특히 피해가 가장 심각했던 서벽리에서는 산사태로 인해 발생한 토석류가 주택을 덮쳐 유실되면서 2명이 사망하였다. 그리고 공공시설이 286개소로 약 441억6천만원 이상의 피해가 발생하였으며, 사유시설은 약 35억9천만원, 건물피해는 175동으로 약 10억원, 건물 침수 132개동, 농경지 유실 및 매몰이 178ha로 약 23억2천만원, 농작물 피해가 249ha 발생하였다.

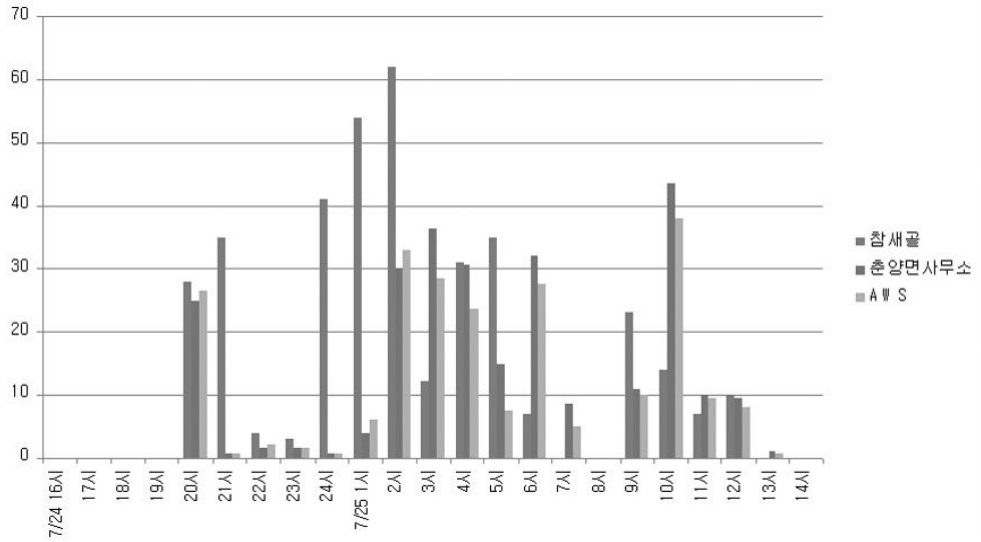
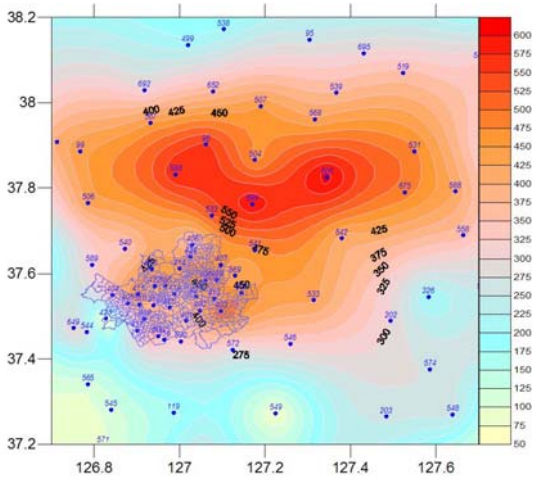


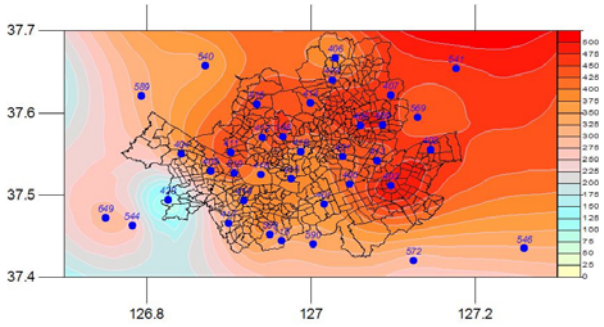
그림 3.3.2 2008년 7월 호우 시간강우 분포도(춘양면)

최우정 등(2008)에 의하면 당시 호우피해 원인 분석을 위해 시간최대, 일최대, 시간최대누적강우량과 강우빈도를 분석한 결과, 춘양면, 소천면의 일최대강우량은 10-15년 빈도로 강우량이 적었으나, 자동우량경보시설의 자료는 100년 빈도를 넘어서는 것으로 나타났다. 또한 시간최대강우량보다 지속시간에 따른 일최대강우량의 강우빈도가 높아 집중호우가 장시간 지속된 것으로 분석되었으며, 15시간 최대누적 강우빈도는 참새골 166년, 도화동

424년, 넛재 360년으로 100년 이상의 큰 강우가 발생한 것으로 분석되었다. 특히 7.15-7.20일 사이에 내린 120.2㎜의 선행강우에 의해 지표면이 포화되어 침투량이 감소하고 유출량이 증가하여 피해가 증가된 것으로 분석되었다.



경기 일원



서울 일원

그림 3.3.3 2011년 7월 26-27일 총강우량(mm) 분포

2011년 7월 서울, 경기 및 강원 일원 호우는 중부지방(특히 서울남부 및 경기북부 일원)을 중심으로 평균적으로 많은 양의 비가 내렸고, 특히 대도심인 서울 남부 지역에 6-12시간 정도 지속적으로 관측 이래 기록적인 비가 내렸다. 기상청 AWS 관악지점과 같이 지속기간 60분 강우량이 100mm를 상회할 정도로 강우강도도 컸으며 총강우량도 많아 지속기간이 길어질수록 재현기간도 길어지는 것으로 나타났다. 이로 인해 상대적으로 장기간 배수에 어려움이 발생하였다.

한국지반공학회의 조사에 의하면 2011년 서울 및 경기일원 집중호우의 경우, 집중호우

는 서울에서 연강수량의 40% 이상이 4일(2011.07.26-29) 동안 집중적으로 발생하였고, 서울 대부분 지역(28개소 중 25개소)에서 시간당 강수량 50mm 이상 기록하였다. 또한 7월 27일 7시30분-8시 30분의 강수대는 동서방향의 좁은 띠 형태로 나타나 서울 내에서도 강수량의 편차가 매우 크게 나타났다.

2011년 7월 집중호우의 원인은 북태평양 고기압의 가장자리를 따라 따뜻하고 습한 공기가 강한 남서풍을 타고 지속적으로 유입되었고, 북서쪽에서 접근한 건조하고 차가운 공기가 중부지방에서 만나면서 대류 불안정이 유발되었고, 사할린 부근 고기압이 강수대의 이동을 저지하여 발생된 것으로 파악되었다.

우면산 산사태 피해에 대한 수문분석 결과, 산사태 발생 약 15시간 이전부터 내린 230.0-266.5mm의 집중호우로 인해 지반이 약해진 상황에서 이후 약 1시간에 걸친 엄청난 호우로 인해 산사태가 발생한 것으로 추정되었다. 특히 유출의 도달시간이 5분 이내로 짧은 지역이기에 최대강우량과 첨두유출량의 발생시점이 일치하고 있으며, 이와 동일한 시점에 산사태가 발생한 것은 집중호우의 영향이 매우 크게 작용하였을 것으로 추정하였다.

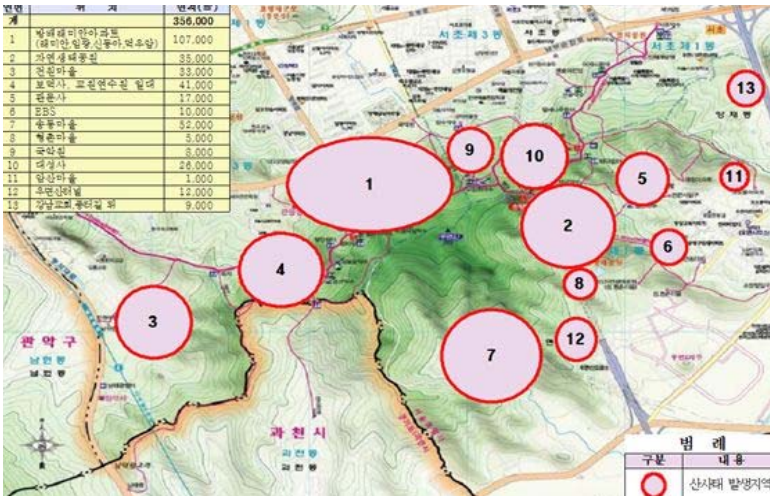
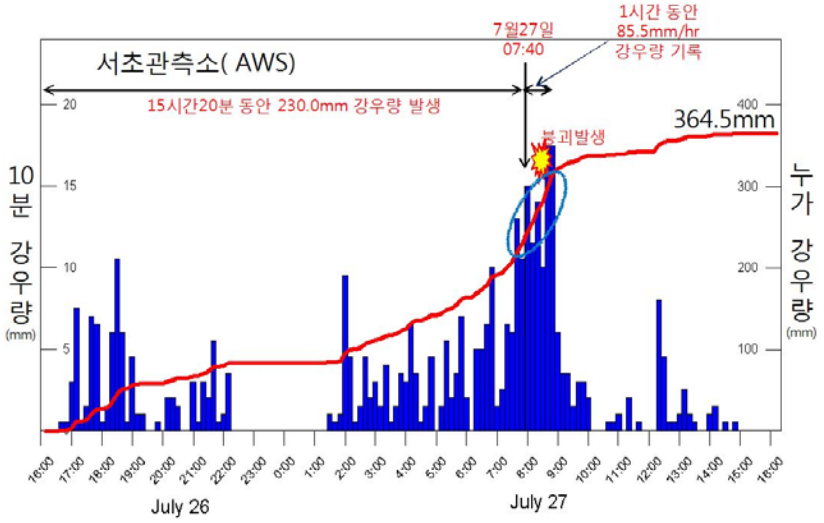
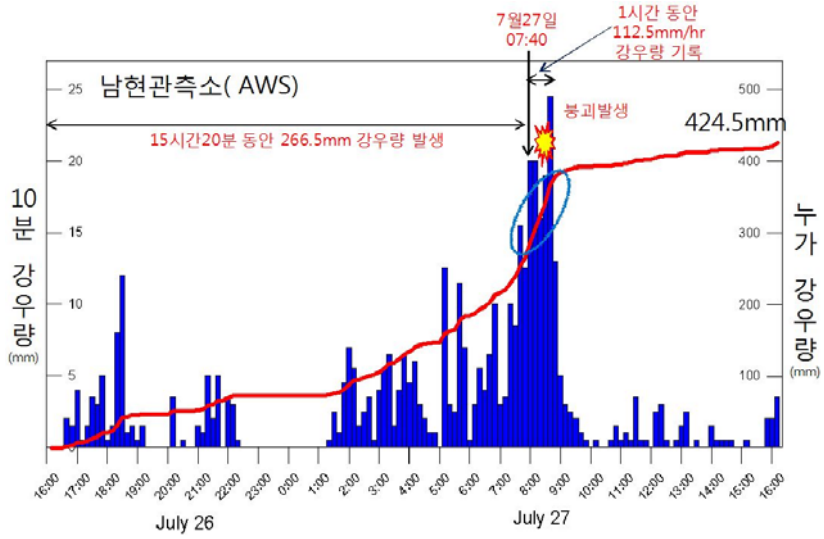


그림 3.3.4 우면산 산사태 발생 주요 지역 (2011.7.27.~7.29)[9)]

9) 출처: 2011년 7월 수도권 집중호우 피해조사 (2011, 한국건설기술연구원)



(a) 서초



(b) 남현

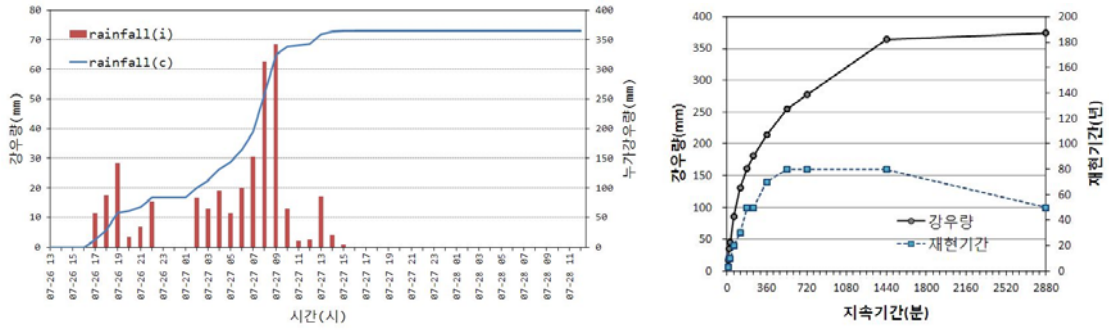
그림 3.3.5 2011년 기상청 AWS 관측소 관측 강우량 분석[10)]

서울을 중심으로 한 중부지방에 호우가 집중된 7월 26일 오후 1시부터 7월 28일까지의 시간별 강우 현황과 해당 기간의 지속 기간별 최대 강우량 및 확률적 재현기간(빈도)을 비교한 결과, 강남지역은 강북지역에 비해 짧은 지속기간에서 큰 재현기간을 보였고 강북지역에 비해 지속기간 증가에 따른 재현기간의 증가 기울기가 크게 나타났다.

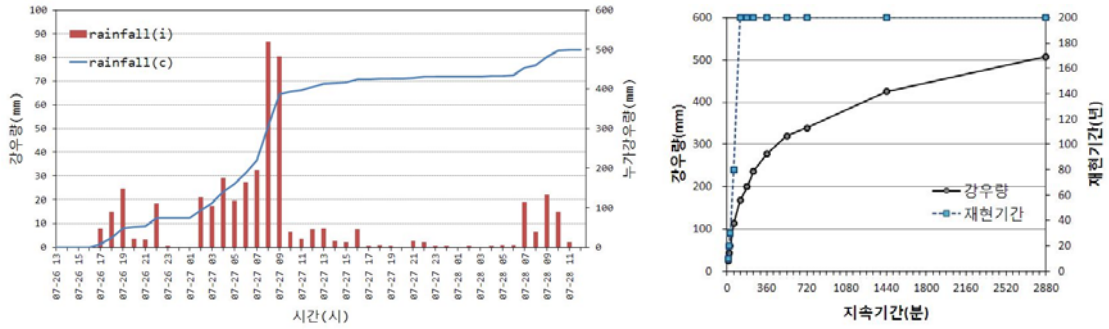
남현, 관악 등의 지점은 60분 지속기간의 강우량의 재현기간이 80년으로 100년에 근접하는 값을 보였으며 송파, 남현, 관악, 양주, 광릉 지점은 지속기간 120분 이상에서 강우량이 200년을 상회하는 재현기간을 갖는 것으로 분석되었다. 주목할 점은 일반적으로 지

10) 출처: 우면산 산사태 원인조사 및 복구대책수립 용역 최종 보고서, 한국지반공학회, 2011

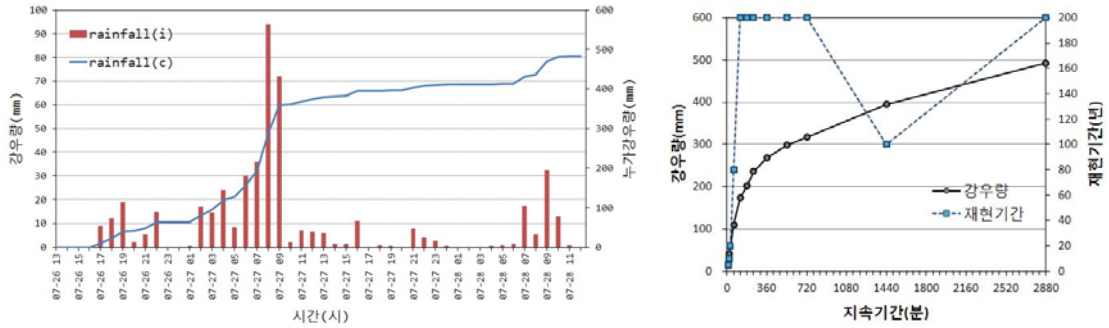
속기간이 길어질 경우 재현기간은 감소하는 경향이 많은데 2011년 호우의 경우는 지속기간의 증가에 따라 재현기간도 지속적으로 증가하는 경향을 보인다는 점이다. 이는 이번 호우가 강우강도는 물론 강우의 총량도 매우 기록적이었다는 것을 의미하고 과거 사례를 통해 볼 때 매우 이례적인 경우라고 판단할 수 있다.



(a) 서초



(b) 남현



(c) 관악

그림 3.3.6 2011년 지속기간별 최대강우량 및 재현기간

산사태 및 토석류를 유발하는 강우기준에 대해서는 Caine(1980)이 임계강우개념을 도입한 이래 Crosta et al.(2000), Wilson et al.(1995) 등의 많은 연구자들이 산사태 예·경보 기준에 대한 연구들을 수행하였다. 이러한 연구에서는 강우강도, 지속기간, 선행강우량, 총강우량 등의 값을 이용하여 임계강우를 구하고자 하였으나 산사태나 토석류는 강우뿐만 아니라 지역적인 지형, 지질, 식생상황과 기후특성에 의해서도 달라질 수 있으므로 단일화된 기준으로 제시하기는 어렵고 지역적 특성이 반영되어야만 한다고 결론짓고 있다. 이는 강우가 토석류의 원인임은 명백하나 토석류를 유발하기까지의 다양한 메커니즘에 대한 규명이 어려움을 시사하고 있다.

국내에서도 과거 산사태 자료와 강우자료를 이용하여 산사태를 유발하는 강우기준을 찾고자 하는 연구가 수행되어왔다. 최경(1989)은 연속강우량과 시간강우강도 개념을 이용하여 산사태를 유발하는 강우기준을 제시하였으며, 연속강우기준으로 200mm 이상, 최대시간강우량이 30mm 이상이 되면 산사태 발생 위험이 있다고 분석하였다. 홍원표 등(1990)은 1977년에서 1987년 사이의 주요 산사태와 강우자료 분석을 통해 산사태가 누적강우량과 강우강도 모두에 영향을 받고 발생 규모도 달라지는 것을 확인한 바 있다. 그는 소규모 산사태(1-3개소/일)는 최대시간강우강도가 10mm/h 이상, 누적강우량이 40mm 이상, 중규모(4-19개소/일)는 각각 15mm/h와 80mm 이상, 대규모(20개소/일 이상)는 각각 35mm/h와 140mm 초과 시에 발생되는 것으로 제안하였다. 이영남(1991)은 1990년 9월 9일 경기도와 강원도에 발생한 집중강우에 의한 산사태 사례 분석을 통해 24시간 누적강우 200mm 이상이거나 24시간 누적강우가 200mm 미만인 경우에도 시간강우강도 10mm/h 이상의 강우가 지속되는 경우 산사태가 발생할 수 있을 것으로 제시하였다.

산사태나 토석류 발생을 유발하는 강우 이전에 발생한 선행강우도 산사태 발생에 영향을 주는 것으로 알려져 있는데, 선행강우의 강우량과 지속시간, 산사태를 유발한 강우와의 시간차가 중요하지만 아직 국내에서는 선행강우가 산사태에 미치는 영향을 분석한 예는 없고 일본의 경우 학자별 의견이 상이하지만 일반적으로 산사태 발생 전 3일 또는 7일의 선행 강우량과 발생 당일의 강우강도가 산사태와 밀접한 관계가 있는 것으로 보고 있다.

국내에서 산사태 주의보나 경보를 발령하는 강우 기준은 대체적으로 시간강우량(강우강도), 일강우량(24시간), 연속강우량을 사용하는데, 산림청에서는 1988년부터 산사태 주의보·경보 기준을 다음 표 3.3.2와 같이 마련하여 활용하고 있다.

표 3.3.2 산림청 산사태 예보 기준

구분	최대시간강우량	1일강우량	연속강우량
산사태 주의보	20~30mm	80~150mm	100~200mm
산사태 경보	30mm	150mm	200mm

김원영 등(1998)은 연천·철원지역을 대상으로 한 산사태유형과 취약성 연구에서 누적강우량보다는 집중호우에 의해 산사태가 발생하였음을 밝혔다. 그리고 김영묵과 장석완(2000)은 대전·충남지역을 대상으로 강우특성과 산사태를 해안과 내륙으로 나누어 분석한 결과 위치, 지형 및 지질조건이 다르더라도 동일한 강우특성을 보이는 것으로 해석하였으며, 최대 시간강우량이 25 mm를 넘거나 파괴 당일의 강우량이 180mm 이상이면 대규모 산사태가 발생한다고 하였다. 또한, 한중근(2001)은 부산지역을 대상으로 한 강우와 산사태연구에서 최대 강우강도가 기록된 후 3시간 이내에서 90% 이상의 산사태가 발생하는 것으로 보고한바 있다.

김경수 등(2006)은 1998년 여름철에 지질조건이 서로 다른 경기도 장흥, 경북 상주 및 포항지역에서 산사태가 많이 발생된 곳의 강우자료와 산사태들을 조사하여 강우조건에 따른 산사태의 특성을 분석하였다. 분석결과 누적강우량이 많은 지역에서만 산사태가 집중적으로 발생하였고 그 지역을 벗어난 바로 인근지역에서는 산사태가 거의 발생되지 않음으로써 강우가 산사태를 유발하는 매우 중요한 외적 요인으로 작용한 것으로 분석하였으며, 누적강우량과 산사태빈도는 서로 상관관계를 갖는다고 보고 하였다. 그리고 산사태 발생건수로 산사태규모를 구분하는 기존의 방법은 전반적으로는 합리성을 가지나 특정지역에 짧은 시간동안 호우가 집중적으로 쏟아지는 국지성 강우특성과 발생빈도가 매우 높은 산사태 양상 등을 반영하여 산사태 발생건수로 산사태 규모를 구분하는 기준설정은 계속 개선할 필요가 있다고 언급하였다.

김경석(2008)은 기존 연구에서 제시한 산사태 유발 강우 기준들과 토석류를 유발한 강우를 나타내었는데, 홍원표(1990)가 제시한 기준 중 대규모 산사태를 유발하는 강우기준과 산림청의 산사태 경보 기준에 해당하는 강우기준이 토석류를 유발시킨 강우와 유사하게 나타났다. 그리고 토석류를 발생시키는 최소강우(누적강우 100mm, 최대시간강우 30mm/h)에서는 약 1,500m^3 정도의 상대적으로 작은 토석류 규모가 발생하지만 24시간 누적강우량이 240mm 이상이고 최대시간강우강도가 약 50mm/h를 초과하면 토석류는 최대 5,000m^3의 규모로 십 수 개소에서 동시에 발생할 수 있는 것으로 분석되었다.

즉, 토석류는 24시간 누적강우 약 100mm 이상, 최대시간강우강도가 약 30mm/h 이상일 때 시작될 가능성이 있으며, 강우강도와 누적강우가 증가할수록 토석류의 발생횟수와 최대유출 토석량도 비례하여 증가하는 것으로 보고하고 있다.

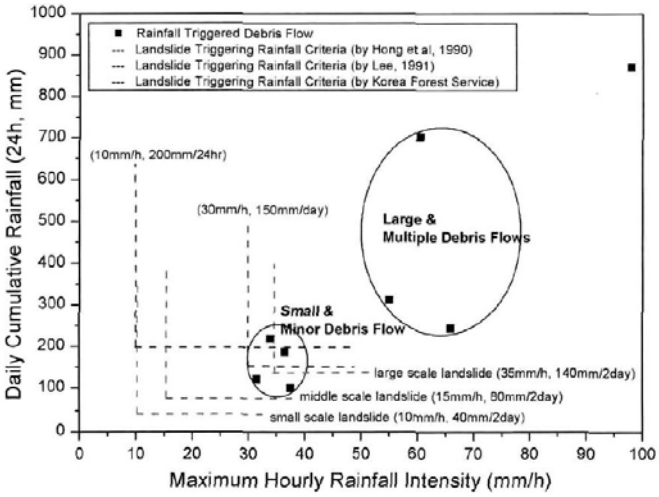


그림 3.3.7 토석류 유발 국내 강우기준의 비교 (김경석, 2008)

토석류는 3년에서 5년의 재현주기를 갖는 작은 강우에 의해서도 발생할 수 있으며 20년 미만의 재현빈도를 갖는 강우에 의해서는 작은 규모의 토석류가 발생하고 20년 이상의 재현빈도를 갖는 강우에서는 큰 규모의 토석류가 발생하는 것으로 분석되었으므로 토석류 발생가능 구간에서는 현행 25년 빈도로 되어있는 배수시설 설계기준에 대한 보강방안이 필요함을 언급하였다.

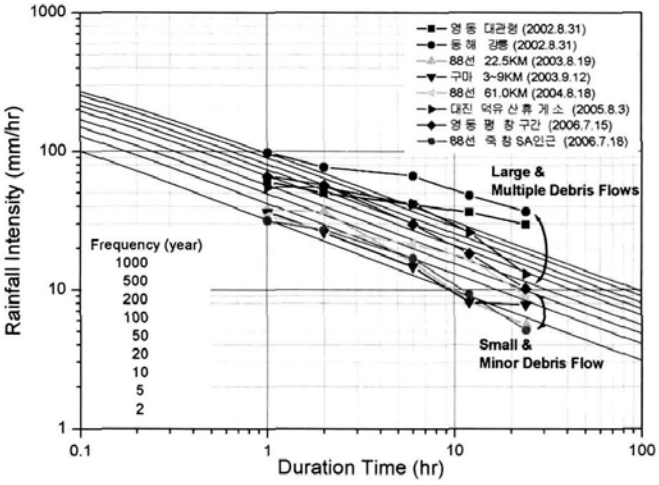


그림 3.3.8 토석류 유발강우의 재현주기 비교 (김경석, 2008)

윤찬영 등(2010)은 108개소의 토사재해 자료와 AWS 시간자료를 바탕으로 토사재해 유발강우 분석을 실시한 바 있다. 윤찬영 등은 구축된 강우 자료를 이용하여 산림청의 산사태 주의보·경보 기준과 유사하게 토사재해 발생시점의 시간강우량-일누적강우량, 시간강우량-연속강우량으로 나타낸 결과 시간강우량-일누적강우량으로 정리한 경우는 65개소(60.2%), 시간강우량-연속강우량으로 정리한 경우에는 64개소(59.3%)에서 산사태 발생시의 강우량이 산림청 산사태 주의보 기준에도 미치지 못하는 것으로 나타났다. 동일한 자료에 대하여 가로축을 토사재해가 발생한 시각 이전의 최대시간우량으로 정리하여 일누적강우량과 함께 도시한 결과, 최대시간 강우량으로 바꾼 경우 산림청의 산사태주의보 기준에 미달하는 자료는 앞서 65개소에서 27개소(25%)로 줄어들었고, 이러한 사실은 산림청의 산사태주의보 발령시점과 실제 산사태 발생시각 사이에 시차가 있다는 것으로 해석하였다.

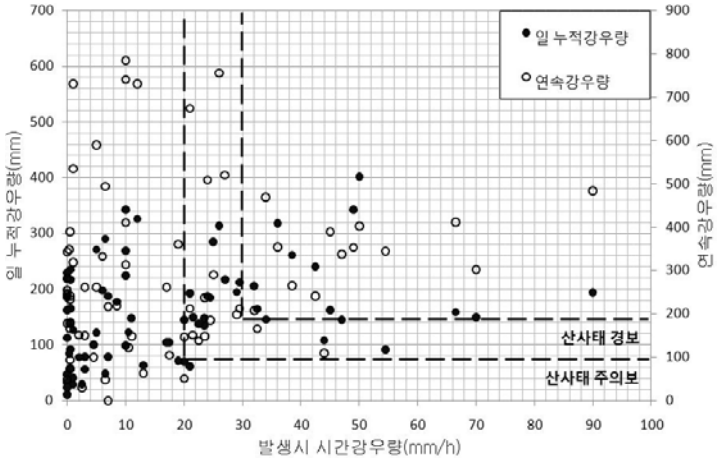


그림 3.3.9 토사재해 발생시 시간강우량-일누적강우량, 연속강우량 관계 (윤찬영 등, 2010)

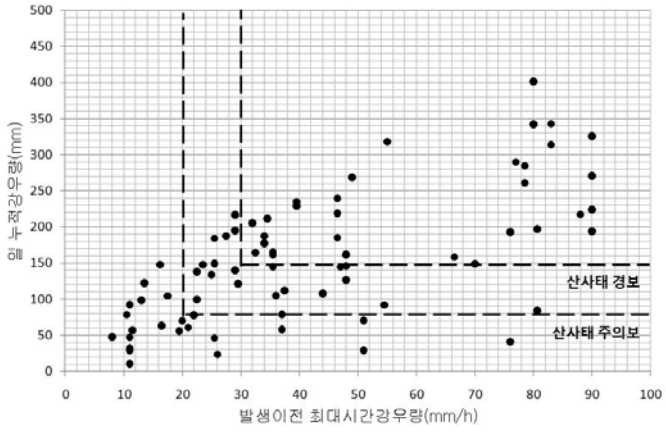


그림 3.3.10 토사재해 발생이전 최대시간강우량-일누적강우량 관계 (윤찬영 등, 2010)

이러한 연구결과는 기존의 최대시간 강우량으로 결정된 산사태 예보기준으로는 산사태 발생시점을 정확히 예측하기가 매우 어렵다는 것을 의미하고, 보다 정확한 예측을 위해서는 공간적, 시간적으로 보다 상세한 강수자료가 필요함을 시사한다.

마지막으로 태풍, 지진 등에 의한 토사재해가 잦은 일본의 경우를 간략히 살펴보고자 한다. 일본의 경우도 전통적으로 강우량과 강우강도를 이용하는 방법을 근간으로 한다는 점에서 방법론 적으로 큰 차이를 보이지는 않는다. 일본에서 재해 예측을 위해 사용되는 표준강우의 설정방법으로는 탱크 모형을 이용한 방법, 적용 강우를 이용한 방법, 유출 시간 내의 강우강도를 이용하는 방법, 다중 요소 분석 방법 등이 있다. 이 중 적용 강우를 이용한 방법으로 A, B 방법과 Yano 방법, 위원회 방법이 있다.

표 3.3.3 일본의 표준 강우 설정 방법의 분류

Method	Method (subcategory)	Index	Target phenomena	Outline	Features
Method using tank model	Method by Suzuki et al.	(i) Storage height in 1st tank (ii) Storage height in 2nd tank	Slope failure Debris flow	This method uses a tank model in which a tank with an outlet in the bottom and another outlet on the side is vertically placed in three layers. This method makes use of good relationship seen between the water height stored in tanks against the input rainfall value and the occurrence timing of a slope failure or a debris flow.	It is desirable to determine various constants of tanks which indicate permeability characteristics of the target area by evaluating conformity with the measurement results such as the flow rate. However, measurement data are usually insufficient, which makes the determination of those constants difficult. It is said that relatively effective disaster prediction is possible even in different geological conditions, if constants in the area of granite are used.
	Method by Michiue et al.	(i) Storage height in 1st tank (ii) Total of storage height in 1st and 2nd tanks	Slope failure Debris flow		
	Method by Makihara et al.	Total of storage height in three tanks	Slope failure		
Method using working rainfall	Method by the tentative guidelines in 1984 (Method A)	Working rainfall (antecedent rainfall, half-life: daily)	Debris flow	Setting of standard and judgment are made using a rainfall index derived by adding the antecedent working rainfall to the continuous rainfall from the start of rain.	During the examination process, the hourly rainfall at a given time and the working rainfall up to one hour before a given time are treated separately, but judgment is made using only the working rainfall up to a given time. Thus, the examination process is rather difficult to understand. This method is in a sense easy to disseminate because the rainfall index used is only one and it is similar to the continuous rainfall. It is pointed out, however, that this method shows some unconformity if used for a long rain or an intermittent rain.
	Method by the tentative guidelines in 1984 (Method B)	(i) Working rainfall intensity (ii) Working rainfall (antecedent rainfall, half-life: daily)	Debris flow	Evaluation is made using a rainfall index derived by combining of the working rainfall used in Method A and the effective rainfall intensity. Because the rainfall index is a combination type index, setting of the standard and judgment is made using a X-Y graph.	Because the antecedent working rainfall used in Method A is also used, this method (Method B) is pointed out to have some unconformity if employed for a long rain or an intermittent rain. This method is recognized as a reference to be used when setting of standard by Method A is difficult. Hence, actual application is not so many compared with Method A.
	Method by Yano (Yano Method)	(i) Working rainfall (one-tank model)	Debris flow	A rainfall index is derived by improving the operation method of the working rainfall in Method A, and by making it to be harmonizing with the transition of the moisture content in the soil.	Unconformity for a long rain or an intermittent torrential rain has been improved by the change of the operation method of working rainfall. This index is also effective for the cancellation of warning. No concrete method is specified about the setting of half-life.
	Method by the Committee for Studying Comprehensive Sediment Disaster Control Measures (Committee Method)	(i) Working rainfall (half-life: 1.5 hours) (ii) Working rainfall (half-life: 72 hours)	Slope failure Debris flow *)	The operation method of working rainfall given in Yano Method and the disaster prediction method using a three-layered tank model are adopted. The rainfall index is derived using a combination of two half-lives, 1.5 hours and 72 hours.	As this method uses the working rainfall used in Yano Method, unconformity for a long rain or an intermittent torrential rain seen in Method A is improved. This index is also effective for the cancellation of warning. The general-purpose applicability of this method is confirmed through use at various locations.
Method using rainfall intensity within the traveling time of runoff water	Method by Hirano et al.	Rainfall intensity within the traveling time of runoff water	Slope failure Debris flow	The rainfall intensity within the traveling time of runoff water derived by using the occurrence model (physical model) of debris flow or slope failure, is used as the index.	Although the traveling time of runoff water differs by topographical and geological conditions, it can be obtained empirically by analyzing causing and non-causing rainfalls in the past. This empirical derivation method is showed.
Method using multiple factor analysis	Method by Araki et al.	A combination of topographical factors and rainfall factors	Debris flow Slope failure **)	Topographical factors deeply related to the occurrence of a debris flow are surveyed and measured at each mountain stream at risk of this disaster. Equations for analysis are derived incorporating these survey results and various rainfall indexes.	Laborious measurement of topographical features is required as the prior work. But, it can be done using topographical maps, and labor can be saved if the distinct element method (DEM) or other efficient method is employed. The standard value can be set for each mountain stream or for a group of similar streams.

*): This method is proposed exclusively for the precipice failure. But, as the tank model used by this method is useful for debris flows, this method is considered to be useful for debris flows.

**): In the literature concerning this method, mountain streams at risk of debris flow are mainly treated. Basically, however, the occurrence of a slope failure and the occurrence of a debris flow are assumed identical.

나. 산사태 및 토석류에 대한 예보기준 개선 제안

다음은 우리나라에서 기 발생한 주요 산사태 이력을 수집하여, 이 중 발생시점, 지역 등이 비교적 명확하고 인근에 강우관측소가 존재하는 12개 호우사상에 대해 강우강도와 선행강우량에 따른 현재 산림청 산사태 기준의 적정성을 분석해 보았다. 그리고 10분 단위 강우자료와 시간단위 강우자료를 동일 사상에 대해 분석하여 자료의 시간스케일에 따른 기준의 적정성도 분석하였다.

표 3.3.4 산사태 발생 지점의 산사태 발생일시 및 분석 강우관측소 현황[11)]

호우 구분	년 월 일 시	시군도 읍면구 동리	경도	위도	사고유형	원인	강우 관측소
1	2002 8 31 17시	강원도 강릉시 성산면 어흘리	128 46 30.7	37 42 56.97		산사태	강릉 (105)
2	2002 8 31 9시	강원도 강릉시 왕산면 대기리	128 51 25.6	37 34 34.0	차량 10대 매몰	토사유출	강릉 (105)
	2002 8 31 9시	강원도 강릉시 왕산면	128 51 2.9	37 34 23.78	차량통제	붕괴	
3	2006 7 15 12시 5분경	강원도 인제군 남면 남전리	128 9 31.4	38 0 41.4	산사태 가옥매몰	산사태	신남 (585)
4	2006 7 15 11시 10분경	강원도 인제군 남면 부평리	128 9 7.8	37 58 28.2	산사태 가옥매몰	산사태	신남 (585)
5	2006 7 15 15시경	강원도 인제군 인제읍 덕산리	128 12 47.6	38 4 53.6	산사태 매몰	산사태	인제 (211)
6	2006 7 15 10시	강원도 인제군 인제읍 덕적리	128 12 46.3	38 4 53.7	산사태 매몰	산사태	인제 (211)
7	2006 7 15 7시	강원도 인제군 북면	128 12 37.4	38 5 15.2	산사태 매몰	산사태	인제 (211)
8	2011 6 29 8시 30분	경기도 가평군 청평면 하천1리	127 26 4.62	37 45 24.38		토사유출	청평 (542)
9	2011 6 29 7시 00분	경기도 가평군 청평면 하천리 117-22	127 26 19.95	37 45 1.64		산사태	청평 (542)
10	2011 6 30 11시 43분	서울시 양천구 신정3동 신정로	126 50 52.33	37 30 52.62		산사태	양천 (405)
11	2011 7 27 0시 8분	강원도 춘천시 신북읍 천전리	127 47 37.5	37 55 59.67	급경사지붕괴	산사태	춘천 (101)
12	2011 7 27 8시 45분	서울시 서초구 방배동 1008-2	127 0 23.5	37 28 29.68	래미안, 임광아파트	산사태	남현 (425)
	2011 7 27 8시 45분	서울시 서초구 양재동 172-1	127 1 28.7	37 28 39.61	양재자동차학원 뒷산	산사태	
	2011 7 27 8시 45분	서울시 서초구 방배동 644-2	126 59 53.93	37 28 11.15	보덕사	산사태	
	2011 7 27 8시 45분	서울시 서초구 방배3동 611	126 59 37.11	37 28 14.46	윗성지마을	산사태	

* 본 분석에 사용된 호우사상 구분은 인근지역으로 산사태 발생일시가 동일한 경우는 같은 호우, 다른 경우는 다른 호우로 구분 (강우지속기간 고려)

11) ㈜ 지아이 지반정보연구소 자료

다음 그림 3.3.11의 그래프 (a)-(f)는 시간단위 자료로 선행 강우시간에 따른 선행 강우량과 강우강도를 산림청 산사태 기준과 함께 도시한 그림이다. 경보 기준을 대상으로 분석해 보면 1일(24시간) 선행강우량 기준은 150mm, 연속강우량 기준은 200mm이고 시간최대 강우강도 기준은 30mm/h이다.

본 분석에서는 산사태(또는 토석류) 발생 시점을 기준으로 선행 강우시간을 3시간, 6시간, 12시간, 24시간(1일), 48시간(2일), 72시간(3일)으로 늘려가면서 비교하여 보았다. 단, 본 분석에서 선택된 호우사상의 경우는 모두 선행 시간최대 강우량이 30mm에 근접하거나 상회하므로 산림청 시간최대 강우량(시강우강도) 기준과 비교는 큰 의미를 갖지 못한다.

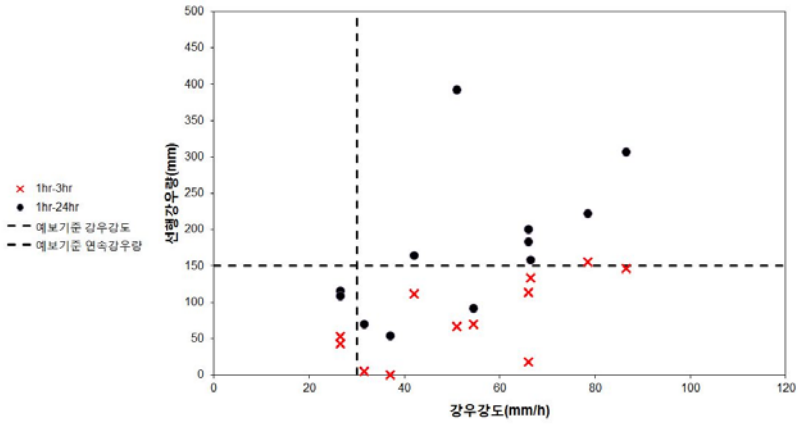
분석결과, 선행 강우시간이 증가함에 따라 선행 강우량이 증가하면서 산림청 강우량 기준에 차츰 근접해 가는 것을 볼 수 있다. 현재 기준인 24시간(1일) 선행 강우량의 경우(150mm)는 7개 사상은 기준에 포함되었으나 5개 사상은 포함되지 않았다. 그리고 연속강우량 기준(200mm)의 경우 4개 사상은 기준에 포함되고 8개 사상은 기준에 포함되지 않았다. 그러나 선행강우 시간을 72시간으로 했을 경우 현재 24시간(1일) 기준에 12개 사상 모두가 근접하거나 포함되는 것으로 나타났다. 미포함된 2개 사상도 149.5mm와 143mm로 기준에 매우 근접한 것을 볼 수 있다.

시간최대강우강도가 대략 60mm이하인 경우 현재 24시간(1일) 선행 강우량이 산림청 기준인 150mm 이하인(기준에 미달하는) 경우가 5개 사상(1일 강우량 최소 37.5mm, 최대 116.0mm)으로 나타났으나 동일 사상에 대해 선행 시간을 72시간까지 확장한 결과 모두 기준 150mm에 근접(2개 사상 149.5mm와 143mm)하거나 상회하였다. 이는 대부분 사상의 시간최대 강우량이 30mm를 상회한다는 점을 볼 때 소규모 호우사상이 3일 이상 꾸준히 지속되는 경우보다는 일정한 시간간격을 두고 폭우가 반복되는 복합호우로 인한 결과로 판단된다. 따라서 실제 산사태 발생 측면에서 보면 1일 선행 강우량 기준만으로 판단하기는 무리가 있으며, 이러한 경우 1일 이내 집중되는 기록적인 단순호우 외에도 지속시간이 3일 이상 되는 중규모(최대 시간강우량 30-60mm) 복합호우로 인해서도 산사태가 발생할 수 있음을 보여주고 있다.

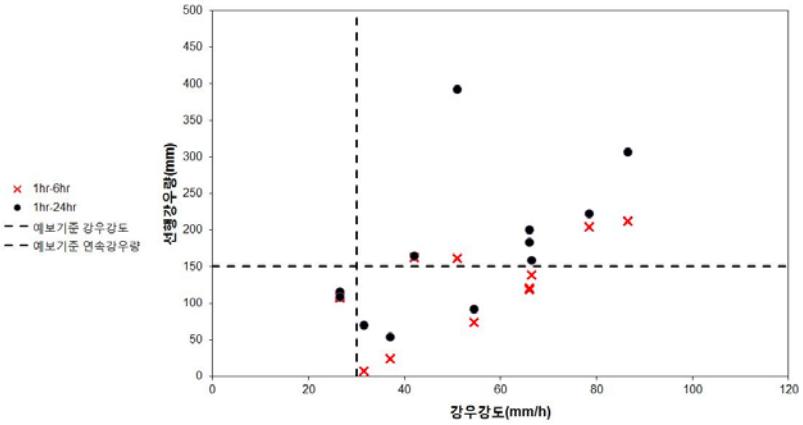
또한 이러한 결과는 산사태 발생 전 3일 선행 강우량과 발생 당일의 강우강도가 산사태와 밀접한 관계가 있다고 보는 일본의 경우와 상통하는 면이 있다. 본 분석

에서 발생한 최대 시간 강우강도는 대부분 산사태 발생시점 주변에서 발생하였기 때문이다. 산사태 발생에 있어 선행강우량과 강우강도의 중요성은 어느 정도 검증이 되었다고 보여진다. 선행강우량은 토사나 암반 혹은 수목 뿌리간의 응집력 혹은 마찰력을 약화시키고 더불어 토사의 하중을 증가시켜 산사태가 발생할 수 있는 충분한 유동조건을 마련하고 강우강도는 이러한 유동조건에 일정시점에서 실제 산사태가 발생하도록 충격하는 도화선과 같은 역할을 하는 것으로 해석할 수 있다.

본 분석 결과를 통해 볼 때, 단시간 기록적인 폭우로 인한 산사태 및 복합호우로 인한 산사태 등을 모두 고려하기 위해서는 현재 1일 강우량 기준은 다소 미흡한 점이 있다고 판단되며, 특히 호우양상이 복합호우 형태를 가지는 경우 연속강우량 기준으로 판단하는 것이 보다 효과적일 것으로 보인다. 또한 연속강우량 기준도 기존 200mm에서 150mm 정도로 낮추는 것이 적정하다고 판단된다.

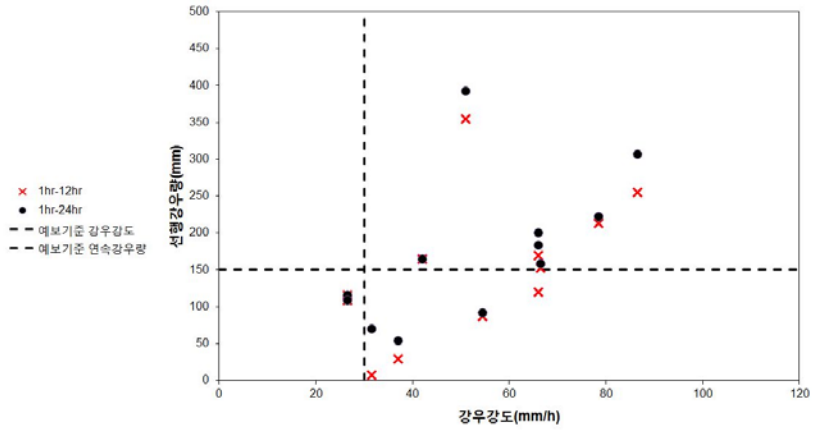


(a)

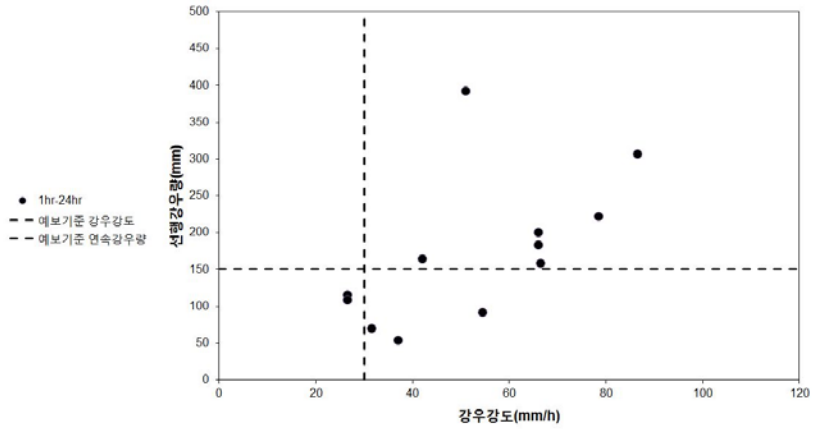


(b)

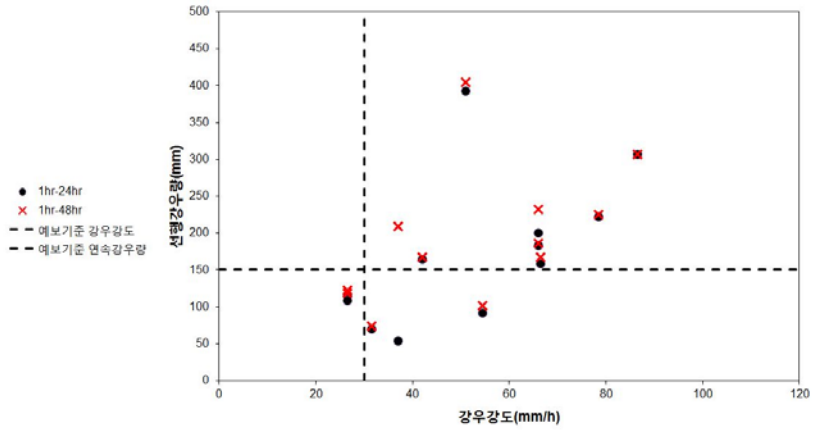
그림 3.3.11 강우선행시간에 따른 강우강도와 선행강우량 비교(계속)



(c)

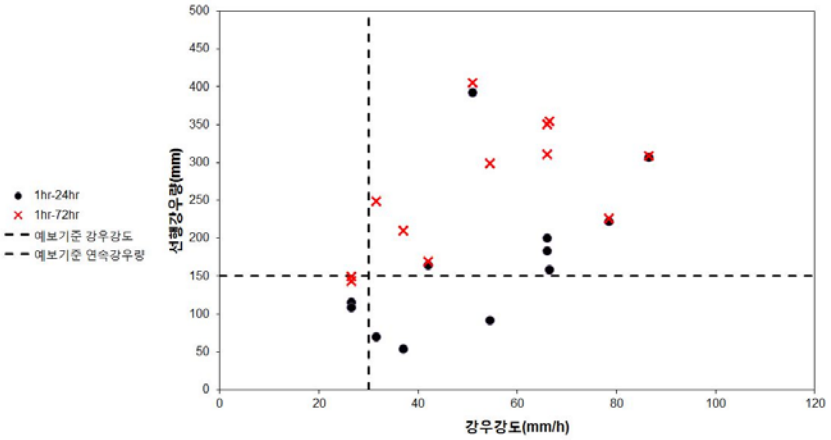


(d)



(e)

그림 3.3.11 강우선행시간에 따른 강우강도와 선행강우량 비교(계속)



(f)

그림 3.3.11 강우선행시간에 따른 강우강도와 선행강우량 비교

그림 3.3.13은 산사태 예보 측면에서 발생시점 기준으로 선행시간 개념이 아닌 산사태 발생시점 3일 이전 기준으로 호우발생 시점 방향으로 누가강우량의 변화를 분석한 결과이다. 본 분석의 목적은 실제로 산사태 예보를 위해서는 미지의 산사태 발생시점 기준이 아닌 호우발생 시점을 기준으로 산사태 발생시점의 추정이 필요하기 때문에 실제 시간 흐름에 따른 누가강우량의 변화 정도와 산사태 발생시점과의 관계를 분석하기 위함이다. 이때 발생시점 3일 이전을 기준으로 정한 이유는 앞서 분석한 결과와 같이 일반적으로 하나의 호우사상이 3일 이상 지속되는 경우는 드물기 때문에 3일 이전을 산사태를 유발하는 유효 최대 유효 호우의 지속기간으로 보고 동일한 지속기간 조건에서 여러 사상을 비교·분석하기 위함이다.

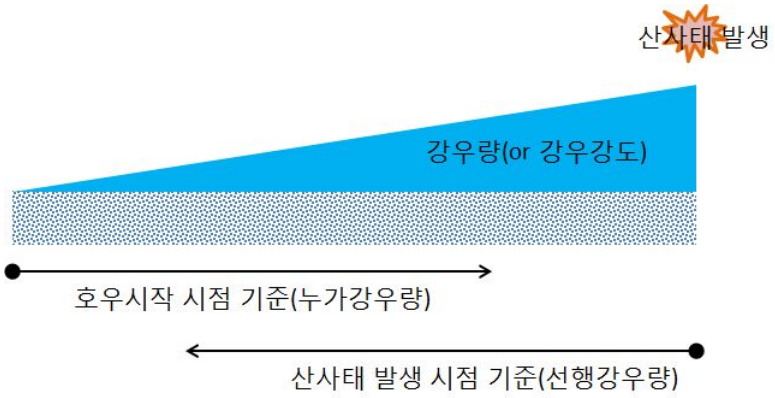


그림 3.3.12 산사태 발생 분석을 위한 시간 축 기준 설정 방법

앞서 분석결과에서 언급했듯이 시간최대강우량이 30mm이상을 보인 경우 산사태 발생시점은 누가강우량이 대략 150mm를 상회하는 경우에 발생하고 있다. 예를 들자면, 현재 강우가 지속되고 있고 시간최대강우량이 30mm를 넘었거나 넘을 것으로 예상되며 향후 3시간 또는 6시간 누가강우량이 150mm를 넘을 것으로 예보된 경우 산사태 발생확률이 매우 높다고 판단할 수 있다.

즉, 산사태 발생은 상대적으로 산사태 발생시점 6시간 이내 강우량의 크기(강우강도 혹은 강우량)에 크게 좌우되고 이에 대한 필요조건은 현재까지의 누가강우량이 150mm이상 온 경우에 한정된다고 볼 수 있다. 이는 최대 강우강도가 기록된 후 3시간 이내에서 90% 이상의 산사태가 발생하였다고 보고한 한중근(2001) 등의 연구와 부합하는 면이 있다.

단, 본 분석에서는 연구 기획의 방향 설정과 그 적정성을 가늠해 보기 위해 일부 대표적인 호우사상만을 분석한 결과로 보다 객관적인 결과를 도출하기 위해서는 보다 많은 자료수집과 추가 분석 및 연구가 요구된다.

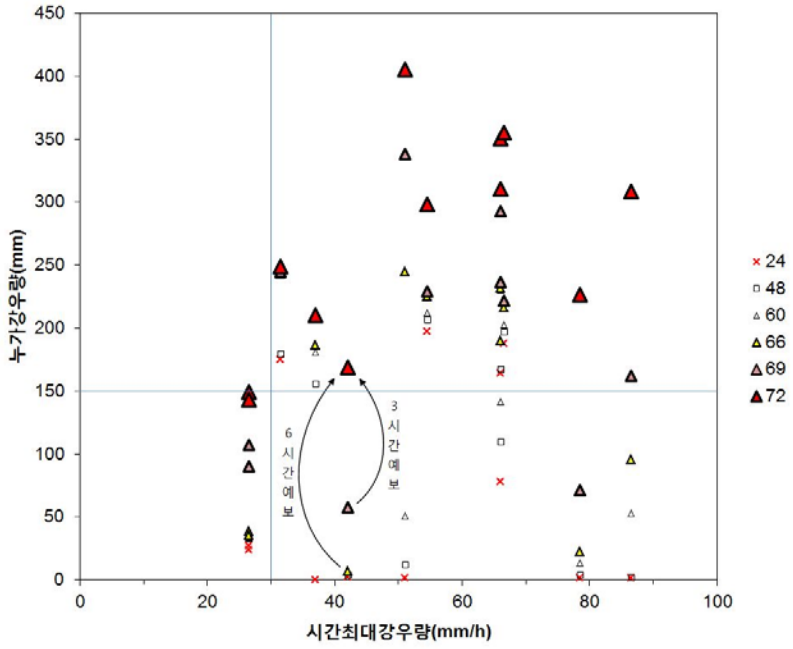
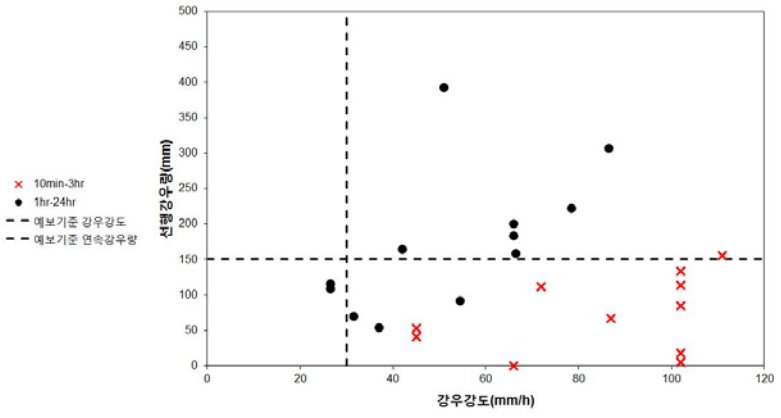


그림 3.3.13 예보를 고려한 72시간(3일) 전 기준 누가강우량에 따른 산사태 발생 특성 분석 (우측범례의 숫자는 강우 시작시간을 산사태 발생 전 72시간으로 가정했을 경우 시작시간 이후 강우지속기간을 의미)

다음 그림 3.3.14의 그래프 (a)-(f)는 강우관측 자료의 시간 스케일에 따른 산림청 산사태 기준의 적정성을 분석한 결과이다. 강우관측 단위시간은 현재의 기준인 시단위와 이보다 세밀한 10분 단위 강우량을 분석하였다. 현재 기상청 AWS의 경우 분단위 관측을 수행하고 있으며 국토해양부 강우관측소의 경우도 10분 단위 관측을 수행하고 있다. 본 분석의 목적은 짧은 기간 기록적인 폭우로 인한 산사태의 경우 과거 시단위로 설정된 산사태 기준의 적정성을 분석해 보고자 함이다. 단, 본 분석은 지속기간 1시간 이하 강우로 인한 산사태 유발 가능성(실제로 거의 희박)을 검토해 보고자 함은 아니며 1시간 간격 측정으로 인한 산사태 발생시점 추정이나 예보지연 등의 문제점을 도출하고 이에 대한 적절한 개선을 위한 올바른 연구방향을 설정하기 위함이다.

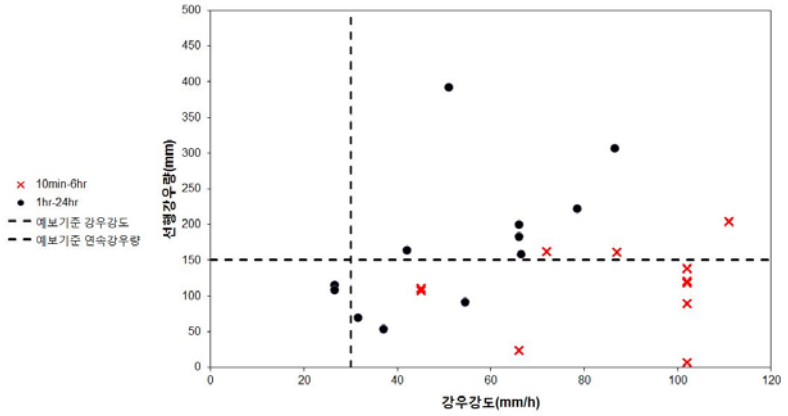
분석결과, 선행 강우시간에 따라 선행강우량의 증가로 기준에 포함되는 강우사상이 증가하는 것과 선행 72시간 강우량의 경우 1일 강우량 기준인 150mm에 거의 포함되는 것은 앞의 결과와 동일하게 나타나고 있다.

앞서 시단위 자료 분석에서 언급하였듯이 선택된 호우사상의 경우는 모두 선행시간최대 강우량이 30mm에 근접하거나 상회하므로 시간최대강우량(강우강도) 기준의 적정성 분석은 큰 의미가 없다고 볼 수 있다. 그러나 10분 단위 강우량이기 때문에 강우강도의 경우 시간최대 강우강도에 비해 10분 강우강도가 크게 나타난다.

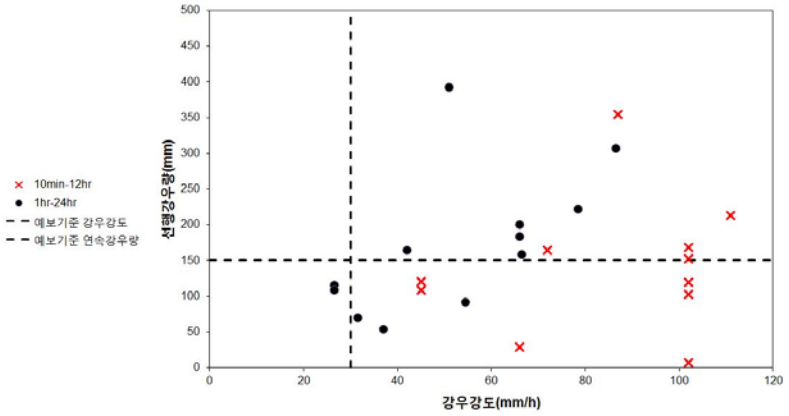


(a)

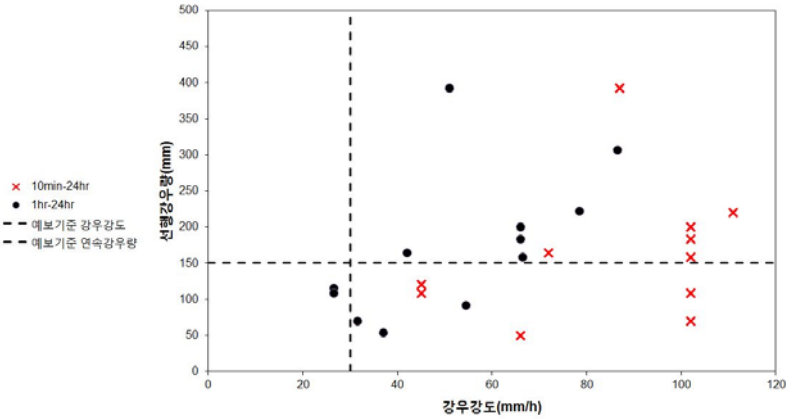
그림 3.3.14 10분 단위 강우량과 시단위 강우량의 강우선행시간에 따른 강우강도와 선행강우량 비교 (계속)



(b)

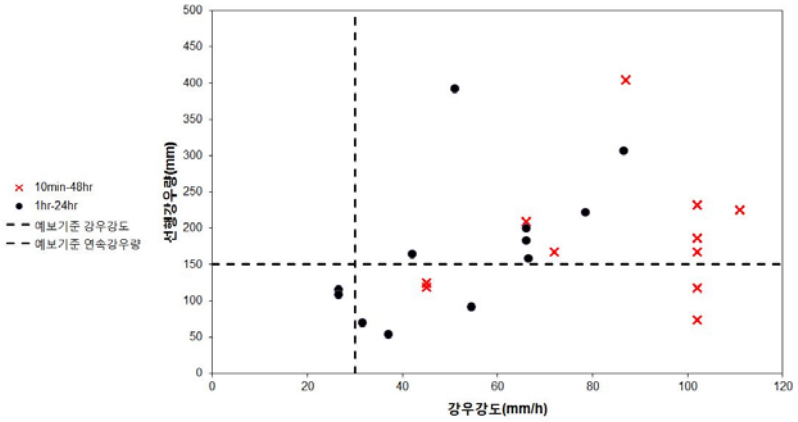


(c)

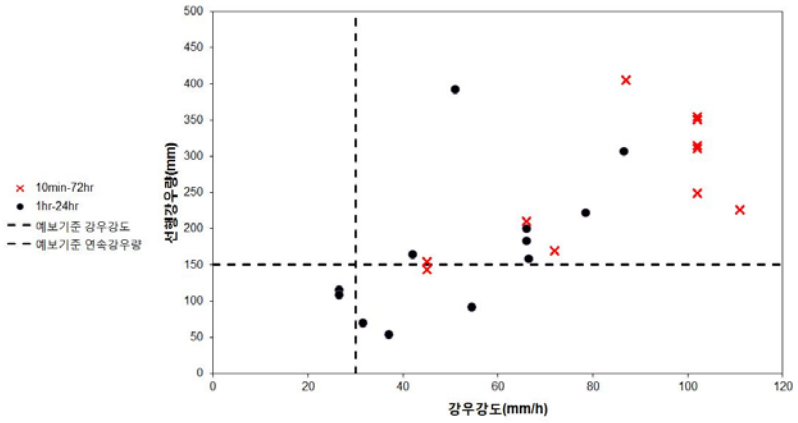


(d)

그림 3.3.14 10분 단위 강우량과 시단위 강우량의 강우선행시간에 따른 강우강도와 선행강우량 비교



(e)



(f)

그림 3.3.14 10분 단위 강우량과 시단위 강우량의 강우선행시간에 따른 강우강도와 선행강우량 비교

강우강도와 더불어 강우의 발생순서도 함께 고려하여 보면 상당히 의미 있는 결과를 도출할 수 있다. 즉, 그림 3.3.15에서 보듯이 1시간 단위 자료의 경우는 10분 단위 강우량 자료에 비해 강우강도 기준에 가깝다. 즉, 10분 단위 강우량을 사용하였을 경우 일정한 조건(산사태 유발 가능 조건)하에서 현재 시간 최대강우량(최대강우강도) 기준에 도달하는 시간이 빨라 선행예보시간을 좀 더 확보할 확률이 높아진다는 것이다.

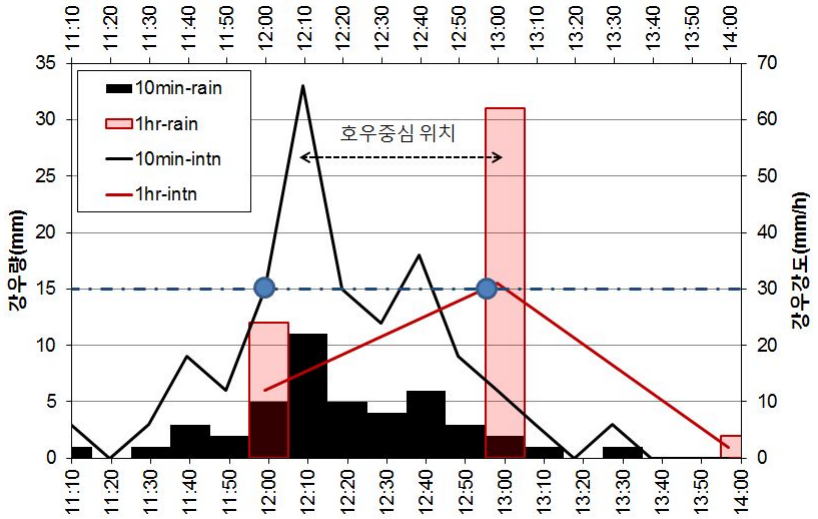
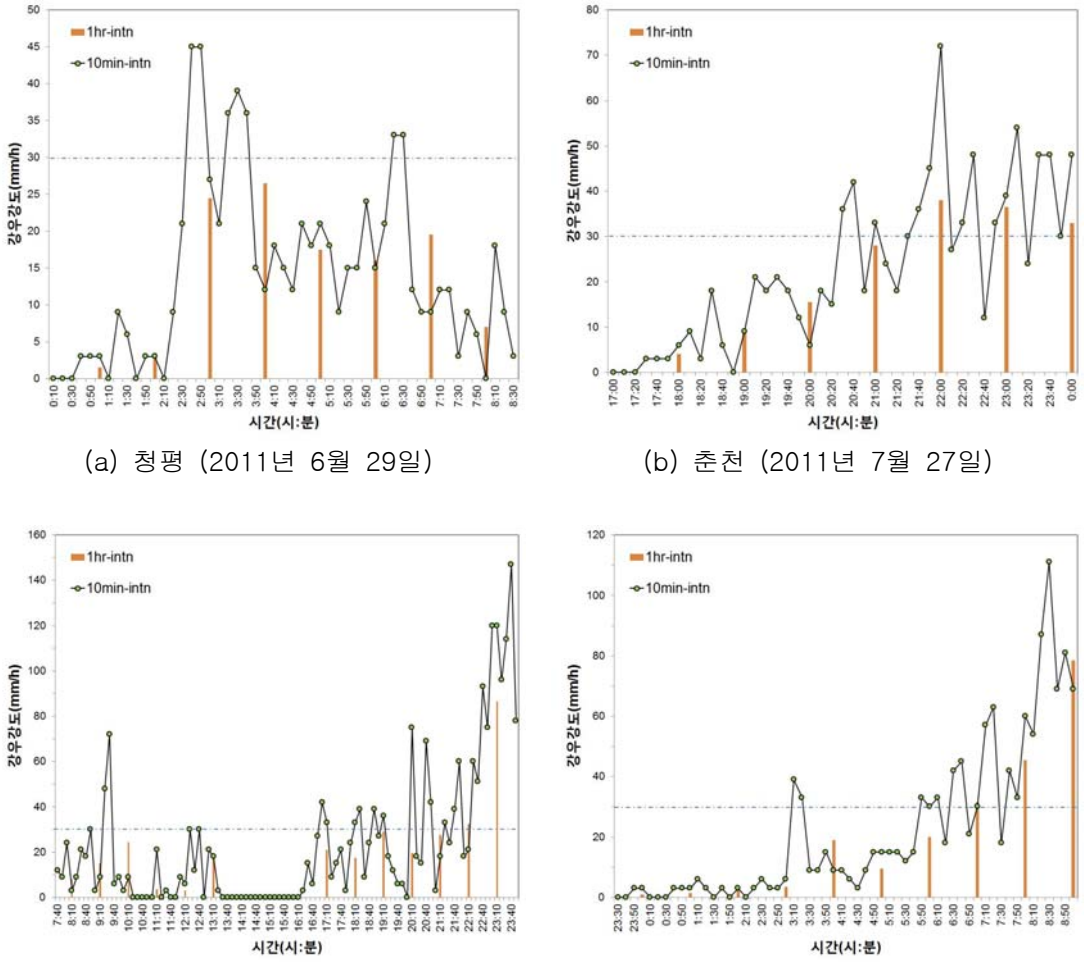


그림 3.3.15 10분 단위 강우량과 시단위 강우량 산사태 경보 발생 시간 비교 (개념도)

아래 그림 3.3.16의 4가지 실제 호우 예에서 보듯이 임의의 호우가 시작된 이후 임의의 시점에서 최소 6시간 이상 호우가 지속될 것으로 예측되고 강우량이나 강우강도가 지속 혹은 증가 추세에 있는 경우, 시간단위 강우강도 기준은 산사태가 발생하기 전까지 최대 2시간 이상을 확보하지 못하고 있다. 따라서 이러한 경우 사전예보시간을 확장하기 위해서는 기존의 시간단위 강우강도 기준보다는 10분 등과 같은 시단위 이하의 강우자료를 활용하는 것이 효과적일 것으로 예상된다. 단, 이 경우에도 경보 기준을 시간단위 강우강도 기준과 같은 30mm로 그대로 적용할지 아님 새로이 제시할지는 추가적인 분석을 통해서 적정수준을 도출 하는 것이 바람직하다.

즉, 현재 산림청 기준은 강우강도가 아닌 시간최대 강우량으로 되어 있어 실제 1시간단위 자료를 기준으로 하고 있으며, 실제 산사태가 발생한 사상을 분석해 본

결과 10분 단위 강우량의 강우강도가 시간단위 강우량의 강우강도 보다 커서 단시간 강우량의 크기(강우강도) 변화를 보다 세밀하게 분석 가능하다. 즉, 국지성 집중호우와 같이 짧은 기간 큰 강우강도를 가진 호우사상의 경우 10분 단위 강우량 사용이 보다 긴 선행 예·경보 시간을 확보하는데 효율적일 수 있고 이는 향후 산사태 예보 기준 개선 시 반드시 추가적인 연구가 필요한 부분이다.



(a) 청평 (2011년 6월 29일)　(b) 춘천 (2011년 7월 27일)

(c) 남현 (2011년 7월 27일)　(d) 강릉 (2002년 8월 31일)

그림 3.3.16 10분 단위 강우량과 시단위 강우량 산사태 경보 발생 시간 비교

현재의 예·경보 기준의 한계는 2011년 호우에서도 명확히 나타난다. 아래의 그림3.3.18은 2011년 7월 기상청 서초와 남현 AWS 관측소 10분 간격 자료 분석결과이다. 맨 위의 그림은 일강우량과 강우강도 산사태 경보 기준을 토대로 2002-2006년 주요 발생 사상과 2011년 사상을 비교한 것이다. 그리고 두 번째 그림은 강우시계

열을 토대로 기준을 적용해 본 결과이다. 파란색 선은 일강우량의 연속변화를 나타내고 빨간색 선은 시강우강도의 변화를 나타낸다. 맨 오른쪽 굵은 점선이 산사태(토석류)가 발생한 것으로 추정되는 시간(2011년 7월 27일 08시 40분경)이다. 맨 왼쪽의 점선은 일강우량 기준 경보 발생 기준(150mm)이고 가운데 점선은 강우강도 기준 경보 발생 기준(30mm/h)이다. 2011년 7월 21일 서울 강남지역 호우의 경우만을 볼 때 산사태 발생 전 최소 대략 1.5시간에서 3시간 전에 경보가 발령되므로 기준은 충분하지는 않지만 최소 기준은 만족한 것으로 보인다. 그러나 이러한 결과는 해당지점의 해당호우에 한해 산사태가 발생한 시점 이후에 결과론적으로 해석한 것이기 때문에 실제 상황에서의 예보 기준으로는 부족한 점이 많다. 따라서 보다 실효적인 대피를 위해서는 실제 산사태 발생 시점을 예측하는 것이 중요하다. 왜냐하면 “산사태 발생위험이 있으니 대피하십시오” 보다는 “3시간 후 산사태 발생 확률이 90%입니다” 라는 경보가 보다 신속하고 안전한 대피를 유도할 수 있기 때문이다.

결론적으로, 현재의 산사태 기준은 과거의 산사태 이력 분석을 통해 평균적인 개념에서 설정된 값으로 산사태 발생 사후 분석측면에서는 어느 정도 적정성을 가지고 있다고 판단된다. 그러나 실무 예보에 활용하기에는 미흡한 점이 많다. 특히, 일강우량, 누가강우량, 시간최대강우량(최대 시강우강도) 만을 고려한 기준으로 강우의 지속기간에 따른 산사태 발생특성, 시단위 이하 강우강도를 고려하지 못해 실제 집중호우의 적정 예보시간을 확보하지 못하는 점 등 많은 실무적인 적용의 한계를 가지고 있다. 따라서 향후 이러한 연구가 추가로 진행된다면 보다 실무에서 실효적이고 정확한 산사태 예보가 가능할 것으로 예상된다.

더불어, 이러한 측면에서 산사태 예측을 위한 단기 강우예측의 정확도를 높일 필요가 있다. 이를 위해서는 지상 강우량계 만을 이용한 강우 예측은 충분한 예측시간을 확보하기 어렵고 좁은 지역에서의 국지적 강우의 발생과 이동 양상을 파악하기 어렵기 때문에 정확도 높은 산사태 분석 및 예측에 활용하기 어렵다. 따라서 기상 혹은 강우 레이더를 활용한 초단기 지역단위 강우예측 방법과 레이더 강우자료를 활용한 산사태 예측 기술 및 시스템의 개발이 요구된다.

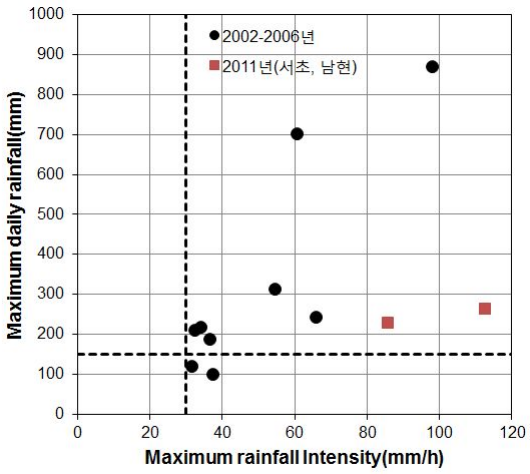


그림 3.3.17 2002-2006년, 2011년 주요 산사태 발생 사상에 대한 경보 기준 분석

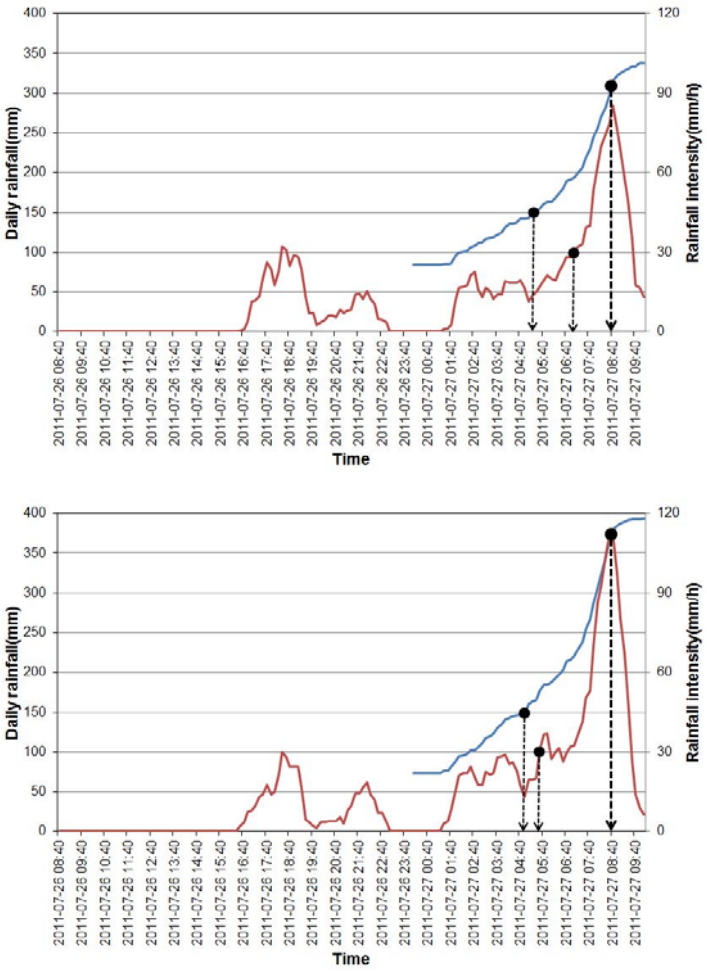


그림 3.3.18 2011년 7월 21일 호우의 산사태 기준 분석 (위: 서초, 아래: 남현 지점), 파란선(일강우량), 붉은선(강우강도)

2. 강우와 토양수분의 상관성 분석

기존의 산사태 및 토석류 관련 연구들은 대부분 누적강우량 및 선행강우량에 의한 연구이며 강우의 시간분포 및 토양수분의 변화, 이에 따른 지표면의 흐름변화를 동시에 고려하지는 못하였다. 따라서 본 연구에서는 사면수문학적 측면에서의 강우시 경사면의 토양수분 변화를 분석한 사례를 검토함으로서 경사면 불포화토양층에서 산사태 및 토석류 발생 해석을 위한 전산 수치해석 기술을 제시하고자 한다.

토양수분은 식물의 생장 및 가용수자원 산정 등에 있어서 중요한 요소로서 토양층 상부의 수 m내에 존재하는 수분의 양을 일컫는다. 토양수분과 토양수분의 공간적 시간적 특징들은 증발, 침투, 지하수 재충전, 토양 침식, 식생 분포 등을 지배하는 중요한 요소이다. 강우 등으로 인한 지표면과 지표하에서의 순간적인 포화공간의 형성 및 유출의 생성 등을 포함하는 과정은 모두 비포화대(vadose zone) 혹은 토양층에서의 토양수분의 함량에 크게 의존하게 된다(이가영 등, 2005).

한국건설기술연구원에서는 토양수분에 대한 정밀측정 자료가 있는 설마천 유역 범륜사 사면에 대하여 물리적 기반의 정밀 분포형 수문모형을 이용하여 강우에 따른 경사면의 토양수분 해석을 수행한 바 있다(김현준 등, 2006). 시험유역의 토양수분자료는 과기부와 건설교통부의 21세기프론티어연구사업인 수자원의지속적확보기술개발사업단의 연구과제에서 수행된 결과를 이용하였다(과학기술부, 2006a, 2006b).

토양수분 모의에 사용된 격자기반의 분포형 수문모형은 DHI에서 개발한 MIKE SHE(DHI, 1999)와 일본의 토목연구소에서 개발한 WEP(土木研究所, 2002) 모형이다. 각 모형의 강우, 차단, 증발산, 유출, 추적 등 유출 해석 성분과 토지이용 변화에 따른 모의가능 여부, GIS/RS 와 연계된 인터페이스를 제공하는지의 여부, 모델 유형 등을 비교한 결과는 표 3.3.5와 같다. 유출 해석 성분 중 강우에 대해서는 두 모형이 모두 지점 우량을 입력 자료로 사용한다. 식생에 의한 증발산은 Penman-Monteith 식을 공통으로 사용하며 엽면적지수 등 식생의 계절변화를 고려하는 별도의 모듈을 가지고 있으나, 식의 구체적인 적용방법에서는 다소 차이가 있다. 침투는 공통적으로 Richard 방정식의 해석을 통해 모의하지만, 계산효율 등의 이유로 Green-Ampt 모형이나 여러 가지 형태의 확장된 Green-Ampt 모형을 사용하기도 한다. 지표면이나 하도의 추적은 MIKE SHE 모형은 Saint Venant 식을, WEP 모형은 운동파 방정식(Kinematic wave equation)이나 동력학파 방정식(Dynamic

wave equation)을 흐름의 지배방정식으로 하여 모의한다.

MIKE SHE 모형은 상업용의 비공개모형으로 모형의 코드를 참조할 수 없으나, WEP 모형은 공개모형으로 사용권에 대한 제약이 없다. 다만 WEP 모형은 전·후처리 인터페이스가 다소 취약하고 매개변수 최적화 모듈이 포함되어 있지 않아 사용자 편의성이 떨어지나, 한국건설기술연구원에서 WEP 모형의 전후처리 시스템을 개발하여 보완하였다(한국건설기술연구원, 2006).

표 3.3.5 격자기반의 물리적 분포형 수문모형의 특성 비교(한국건설기술연구원, 2006)

	WEP	MIKE SHE
Agency	- PWRI (Japan)	- DHI (Denmark)
Model Type	- 분포형 (distributed)	- 분포형 (distributed)
Rainfall	-지점우량 ・Thiessen	- 지점우량
Landuse	- 토양 및 토지이용에 따른 유출변화 모의 가능	- 지표면경사, 토지이용에 따른 유출변화 모의
Evapotranspiration	- 수역, 나지, 불투수역 ・ Penman eq. - 식생의 증산 ・Penman-Monteith eq.	- Penman-Monteith eq. - Kristensen-Jensen eq. - 실제증발산량 ・엽면적지수 (LAI), 토양 수분 함수 ・식물에 의한 증산 ・토양 증발 ・차단저류 증발 ・수면 증발
Interception	- 차단저류 고려 ・토지이용에 따른 차단깊이 설정	- 차단저류 고려 ・Rutter model ・K-J model
Unsaturated zone	- 침투 ・Generalized Green- Ampt eq. (호우기) ・Richards' eq. (1-D) (비호우기)	- 침투 ・Richards‘ eq. (1-D) ・Simplified Richards' eq. (1-D)
Saturated zone	- 지하수 흐름 ・수평 2차원 Boussinesq eq. ・대수층간 수직 흐름 교환	- 지하수 흐름 ・수평 2차원 Boussinesq eq. ・대수층간 수직 흐름 교환
River routing	- Kinematic Wave eq. - Dynamic Wave eq.	- Saint Venant Eq.
Remark	- 공개모형 - 격자 단위의 물리적 매개변수 - 모자이크법에 의해 토지 이용 표현 - 하천과 대수층의 흐름교환 ・Darcy 법칙 - 열순환 해석 가능 - 침투트렌치, 조절지 영향 해석 - 논의 유출 해석 모듈	- 비공개모형 (상업용) - 격자 단위의 물리적 매개변수 - 하천과 대수층의 흐름교환

가. 분포형 수문모형의 토양수분 모의방법 비교

(1) WEP 모형

WEP 모형에서는 표층 토양에서 지하수위까지를 수분전달층으로 설정하여 침투를 모의한다. 침투는 호우시와 비호우시로 구분하여 비호우시에는 Richard 식을, 호우시에는 Green-Ampt 식을 적용한다. 다음의 식과 같이 강우강도가 투수계수보다 작을 때는 비호우시로, 강우강도가 투수계수보다 클 때는 호우시로 간주된다. 이와 같은 차별적 적용을 통해 모의시 시간 효율을 높일 수 있다.

$$I \le K_s \Rightarrow Rechard's Eq. \tag{3.1}$$

$$I > K_s \Rightarrow Green-Ampt\ method \tag{3.2}$$

여기서, I : 강우강도, K_s : 포화투수계수이다.

Jia와 Tamai (1997)는 실제 강우의 다층 토양에서의 침투에 적용 가능한 “Generalized Green-Ampt 모형“을 제시하였고, 이 모형이 WEP 모형에 사용되었다. Green-Ampt 모형은 초기함수율이 낮은 균일한 토양층에 대하여 강한 강우 등으로 지표면이 담수 하는 경우에는 침입전선 (wetting front)이 형성된다고 가정하고 Darcy 법칙을 이용하여 침투현상을 표현하였다.

이 모형은 다음과 같이 공식화된다. 또한 그림 3.3.19는 침입전선이 제 m토양층에 도달한 상태를 나타낸다.

$$f = k_m \cdot \left(1 + \frac{A_{m-1}}{B_{m-1} + F}\right) \tag{3.3}$$

여기에서 f : 침투속도, F : 누적침투량이며, k_m, A_{m-1}, B_{m-1}에 대해서는 뒤에서 설명한다. 누적침투량(F)의 산출방법은 지표면에서의 담수 유무에 따라 경우가 달라진다. 침입전선이 제 $m-1$토양층에 있었던 시점으로부터 지표면의 담수가 계속되는 경우의 누적침투량은 다음 식으로부터 산출된다.

$$F - F_{m-1} = k_m (t - t_{m-1}) + A_{m-1} \cdot \ \ln\left(\frac{A_{m-1} + B_{m-1} + F}{A_{m-1} + B_{m-1} + F_{m-1}}\right) \tag{3.4}$$

한편 앞의 시간 단계 T_{n-1}에서는 담수가 없이 현재의 시간 단계 t_n에서 담수가 시작된 경우의 누적 침투량은 아래 식으로부터 구할 수 있다.

$$F - F_p = k_m (t - t_p) + A_{m-1} \cdot \ \ln\left(\frac{A_{m-1} + B_{m-1} + F}{A_{m-1} + B_{m-1} + F_p}\right) \tag{3.5}$$

$$A_{m-1} = (\sum_{1}^{m-1} L_i - \sum_{1}^{m-1} L_i k_m / k_i + SW_m)\Delta\theta_m \quad (3.6)$$

$$B_{m-1} = (\sum_{1}^{m-1} L_i k_m / k_i)\Delta\theta_m - \sum_{1}^{m-1} L_i \Delta\theta_i \quad (3.7)$$

$$F_{m-1} = \sum_{1}^{m-1} L_i \Delta\theta_i \quad (3.8)$$

$$F_p = A_{m-1}(I_p / k_m - 1) - B_{m-1} \quad 3.9)$$

$$t_p = t_{n-1} + (F_p - F_{n-1}) / I_p \quad (3.10)$$

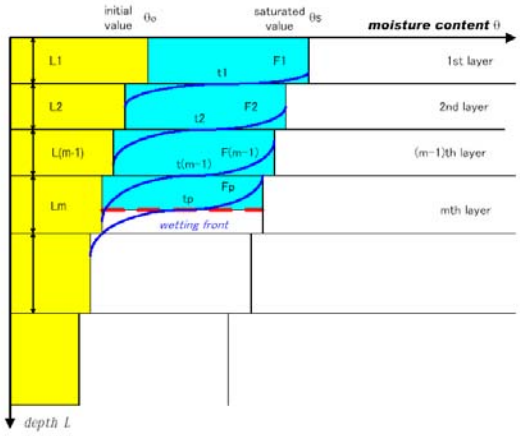


그림 3.3.19 다층 토양에서의 침투 모식도

여기에서 SW : 침입전선에서의 모관 흡인압, k : 전달층 (침입전선보다 상부)의 투수계수, θ_s : 전달층의 토양함수율, θ_0 : 초기토양 함수율, t : 시각, F_p : 지표면 담수시의 적산침투량, t_p : 담수개시시각, I_p : 담수 시작시 강우강도, t_{m-1} : 침투전선이 제m층과 제$m-1$층의 경계면에 도달한 시각, L : 침입전선의 지표면에서부터의 깊이, L_i : 제 i 층의 두께, $\Delta\theta = \theta_s - \theta_0$이다.

WEP 모형의 토양관련 매개변수는 투수계수, 잔류수분율, 포화수분율, 포장용수량, 단분자수분율, α, β, n이 있다.

침투 관련 방정식에서 토양수분과 흡인압 관계 및 토양수분과 불포화투수계수의 관계는 다음의 Havercamp 식 (식 (3.11)) 및 Mualem 식 (식 (3.12))를 통해 계산된다.

$$\Theta = \frac{\alpha(\Theta_s - \Theta_r)}{\alpha + (\ln(\phi))^{\beta}} + \Theta_r \quad (3.11)$$

여기에서 Θ: 체적함수율 [㎤/㎤], Θ_s: 포화수분율 [㎤/㎤], Θ_r: 잔류수분율 [㎤/㎤], ϕ: 흡인압 [㎝/H_2O], α, β: 상수

$$K(\Theta) = K_s\left(\frac{\Theta - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r}\right)^n \quad (3.12)$$

여기에서 K_s: 포화투수계수 [㎝/s], K: 불포화 투수계수 [㎝/s], n: 상수이다.

(2) MIKE-SHE 모형

비포화대 흐름은 MIKE SHE에서 그리고 대부분의 모형 적용에서 중요한 과정중의 하나이다. 비포화대는 보통 이질적이고, 토양내 수분이 강우에 의한 보충과 증발산에 의한 제거 그리고 지하수 함양 등에 따른 주기적인 변동에 의해 특징지어진다. 비포화대 흐름은 주역이 침투과정에서 중요한 역할을 하기 때문에 주로 수직적인 흐름이다. 그러므로 MIKE SHE에서의 비포화대는 1차원 수직흐름만을 고려하고 있으며, 이는 대부분의 적용에서 충분하다. 그러나 토양층내 토양특성 차이가 심한 급경사지역에서와 같은 특정 조건에서는 흐름을 기술하는데 제한적일 수도 있다. MIKE SHE에서는 비포화대와 포화대를 연계하여 토양층 하부에서의 토양수분과 지하수위의 역학관계를 잘 모의하고 있으며, 다음과 같이 비포화대 흐름을 모의하는데 세 가지 옵션을 가지고 있다.

- full Richards equation : 토양수분 보유곡선과 유효 수리전도도에 대한 표나 함수관계 필요
- simplified gravity flow procedure : 수직 변화율이 일정하다 가정하고, 모세관력 무시
- simple two-layer water balance method : 얕은 대수층에 대한 단순 물수지

첫 번째 완전 Richards 공식은 매우 계산이 복잡한 반면, 비포화 흐름이 동적일 경우 가장 정확한 방법이다. 두 번째 단순 중력 흐름 방법은 비포화대에서의 동력학적인 부분보다는 실제 강수량과 증발산량에 근거한 지하수 함양량의 시간적 변화에 주로 관심이 있을 경우 적절한 방법이다. 마지막으로 단순 두 개 층 물수지 방법은 지하수위가 낮고, 지하수 함양량이 주로 근권역의 증발산에 의해서 영향을 받는 경우 적절한 방법이다.

본 연구에서는 완전 Richards 공식을 적용하여 비포화대 흐름을 모의하였으며, 비포화대 흐름 모의에 대한 지배방정식을 위해 토양수분 보유곡선 $\Theta(\psi)$과 수리전도도 $K(\Theta)$에 대한 두 가지 수리학적 함수가 필요하다.

토양내 함수량 Θ와 매트릭포텐셜 ψ 사이의 관계는 토양수분 보유곡선으로서 알려져 있다. 이는 기본적으로 토성과 구조에 의해 정의되며 유기물질의 양과 형태에 의해서도 영향을 받는다. 특질상 수분함량이 감소함에 따라 압력수두가 감소하게 된다. 또한 일반적으로 이력현상에 의해 Θ와 ψ 사이의 관계는 일정하지 않고 수분함량이 증가하거나 감소하는가에 따라 좌우된다. 그러나 MIKE SHE에서는 어떠한 형태의 토양에 대해서도 토양수분 보유곡선을 고려하고 있지만, 이력현상은 고려하지 않는다 (즉, Θ와 ψ 사이의 관계가 유일하다고 가정한다).

일반적으로, 토양수분 곡선은 실험실에서 측정되거나 비슷한 토양들에 대한 일반적인 값에 근거하여 가정한다. 만약 실험실 자료가 있다면, 측정된 Θ, ψ 값을 이용하여 MIKE SHE에 표 형태로서 입력할 수 있으며, 중간값들은 cubic spline 방법을 이용하여 계산될 수 있고, 코드에 내부적으로 저장된다. 또는 대안으로서 측정된 값들은 일반적으로 이용되는 함수관계에 피팅(fitting)될 수도 있다. 좀 더 적절한 함수의 매개변수들을 직접 입력할 수도 있고, 또는 개선된 표 자료들이 MIKE SHE에 외부적으로 생성되어 표 자료로서 입력될 수 있다.

지난 수년간 몇 가지 매개변수 형태의 토양수분 보유곡선이 개발되었으며, MIKE SHE에서는 사용자들에게 이러한 매개변수 형태들을 명시하도록 되어 있다. 이 때, 포장용수량이 비포화대 흐름의 초기조건으로 이용되고, 위조점이 증발산을 통해 제거될 수 있는 수분의 하부경계로서 이용된다.

MIKE SHE에서는 토양수분 보유곡선 관계에 대하여 3가지 옵션 (Tabulated, Van Genuchten, Campbell)을 제공하고 있으며, 본 연구에서는 이 중 Van Genuchten 방법을 적용하였다.

Van Genuchten 방법에 의한 토양수분 $\Theta(\psi)$는 다음과 같이 계산된다.

$$\Theta(\psi) = \Theta_r + \frac{(\Theta_s - \Theta_r)}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \tag{3.13}$$

여기서, Θ_r는 잔류 토양수분, Θ_s는 포화 토양수분, α, n, m은 경험 상수들이다.

각 토성별 매개변수 값들은 모형내 DB 파일 (UZ Soil property file)에 구축되어 있다.

수리전도도는 토양수분함량 θ가 포화상태에서 감소함에 따라 크게 감소한다. 이는 공극이 점점 공기로 채워짐에 따라 흐름에 대한 총 단면적이 감소하기 때문에 발생한다. 추가적으로 공극 시스템의 보다 작은 부분에서 흐름을 운반할 수 있을 때에는 흐름 경로가 더욱 구불구불해진다. 또한 짧은 구간에서의 흡착력이 모세관력에 비해 지배적인 경우에는 물의 점성이 높아지게 된다.

$K(\theta)$ 함수를 측정하는 실험적인 과정은 다소 어렵고 신뢰성이 떨어지기 때문에 대안으로서 보다 쉽게 측정될 수 있는 토양 특성치들로부터 함수식을 유도하는 방법들이 제안되거나 또는 단순히 경험적인 관계식들에 의존하고 있다.

MIKE SHE에서는 수리전도도를 구하기 위한 4가지 옵션 (Tabulated, Van Genuchten, Averjanov, Campbell/Burdine)을 제공하고 있으며, 본 연구에서는 이 중 Averjanov 방법을 적용하였다.

Averjanov 방법은 WEP 모형에서 사용하는 Mualem 식 (식 3.12)과 동일하다.

그림 3.3.20은 지곡 토양통에 대하여 깊이별로 토성을 지정한 것이며, 그림 3.3.21은 USDA에서 분류하고 있는 12개 토성에 대하여 구축된 모형내 DB 파일 (UZ Soil property file) 중에서 양질사토에 대한 예를 나타낸 것이다(한국건설기술연구원, 2006).

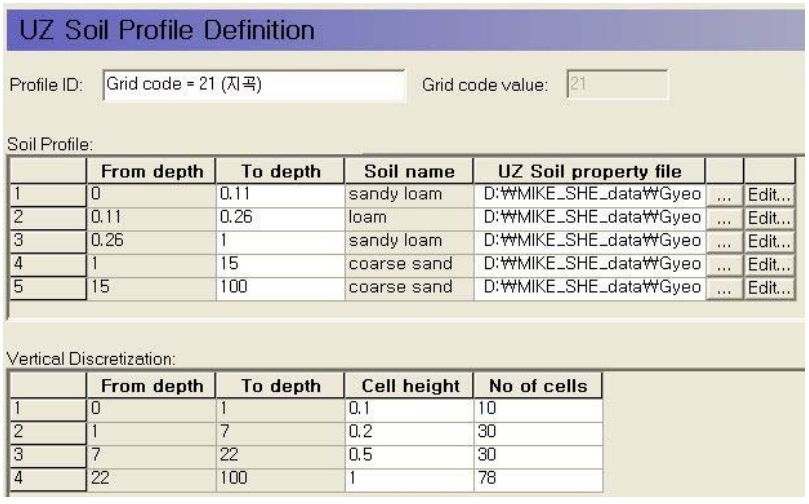


그림 3.3.20 지곡 토양통에 대한 깊이별 토성 특성 부여 예

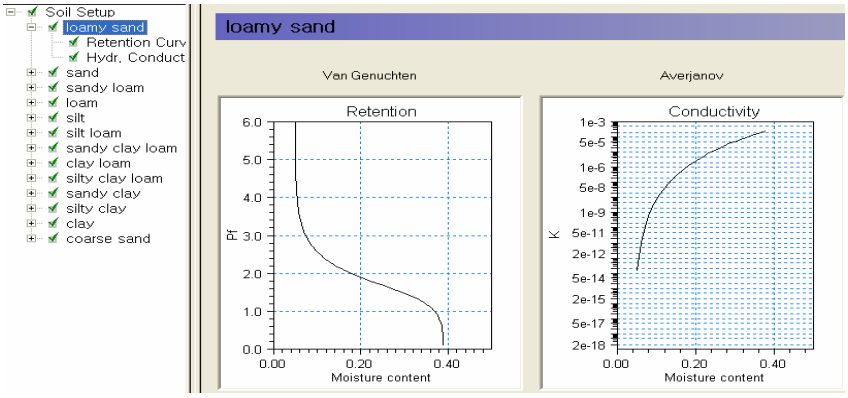


그림 3.3.21 Loamy sand (양질사토)에 대한 토양특성 DB 구축 예

나. 분포형 수문모형을 이용한 경사면의 토양수분 모의

(1) 대상유역

모형 적용을 위해 선정한 범륜사 사면은 설마천 유역에 포함되어 있다. 임진강 상류부에 위치하고 있는 설마천 유역은 한국건설기술연구원의 시험유역으로 운영되고 있으며, 유역 출구점인 전적비교 상류를 기준으로 유역면적은 대략 8.5 km^2이다 (한국건설기술연구원, 2003). 유역내 토지이용은 산지가 99.5%, 논이 0.4%, 초지 및 나지가 0.1%으로서 유역의 대부분은 산악지형으로 이루어져 있으며, 그림과 같이 동쪽엔 유역에서 가장 높은 감악산 (EL. 675 m)이 위치하고 있고, 전반적으로 개발이 많이 이루어지지 않은 유역이다.

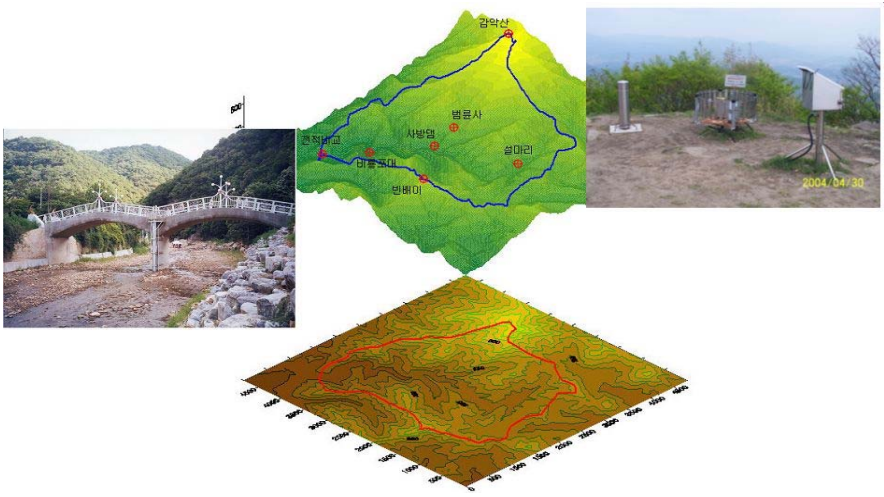


그림 3.3.22 설마천 유역 현황도

유역의 토양은 화강편마암과 같은 조립질 결정암이 우세하고, 임상은 아교목 또는 관목 상태의 활엽수림과 혼효림이 대부분을 차지하면서, 산림의 층상 구조가 발달하지 않아 유역의 산림이 가지는 수분 함양 능력이 대단히 낮은 것으로 평가되고 있다. 또한, 유역의 연평균 강수량은 1,247 mm로서, 이 중 반 이상이 6~8월의 하절기에 집중되고 있다. 유역내 수문관측망은 2003년 12월을 기준으로 우량관측소 6개소 (전적비교, 비룡포대, 설마리, 범륜사, 감악산, 빈베이), 수위관측소 2개소 (전적비교, 사방댐) 및 기상관측소 1개소 (비룡포대)가 설치되어 있으며, 10분 단위로 관측 운영되고 있다.

(2) 모형적용 지역

토양수분 모의 지역은 범륜사 부근 사면으로 크기가 가로, 세로 100 m 이내의 작은 사면이다. 범륜사 (그림 3.3.23참조)는 그림에서 보듯이 설마천 유역의 가운데에 위치하고 있는 사찰로 모의 사면 전방에 10분단위로 측정되는 우량관측소가 운영되고 있다. 그림3.3.24에서 보듯이 모의대상 사면은 경사가 급하고, 식생으로는 침엽수림이 비교적 잘 발달되어 있다.



그림 3.3.23 범륜사 부근 전경



그림 3.3.24 범륜사 부근 모의대상 사면

(3) 토양 매개변수 구축

모의지점의 토양종류는 정밀토양도상 덕산통(DEOGSAN SERIES)이며, 이 토양통은 USDA(United States Department of Agriculture) 분류상 사양토(Loamy sand)이며, 조성은 모래(Sand) 49.8%, 미사(Silt) 44.7%, 점토(Clay) 5.5%로 이루어져 있다(농업토양정보시스템). 이 조성으로부터 토양매개변수를 계산하고 포장용수량(Field capacity), 작물성장한계점(Wilting point)은 사양토의 일반적인 값의 범위에서 사용하였다. 토양깊이는 전 격자에 대하여 50 cm로 동일하게 적용하였다. 기상자료는 2003~2004년의 2년간에 대해 1시간 간격 측정 자료를 사용하였으며, 세부자료별로 강우자료는 설마천 시험유역의 범륜사 지점 우량관측소 자료를 사용하였고, 기타 기상자료 (기온, 상대습도, 풍속, 일조시간, 일사량)는 시험유역에서 비교적 가까운 동두천 기상관측소 자료를 사용하였다.

(4) 토양수분 모의 결과

모의는 2003년 1월 1일 01:00부터 2004년 12월 31일 24:00까지 2년을 1시간 간격으로 모의하였다. 모의기간 중 2003년은 초기 토양수분 값 등 초기조건의 영향을 줄이기 위한 웜업(Warm-up) 기간으로 설정하였고, 2004년의 모의결과를 토양수분 관측 값과 비교하였다. 아래 그림은 각 지점별 토양수분 모의 및 관측결과를 비교한 것이다. 관측지점은 지점 1이 최상단이고 이후 지점 9, 7의 순으로 사면을 따라 내려오며 위치한다(그림 3.3.25).

토양수분의 연간 모의결과를 그림 3.3.25의 1, 9, 7 관측지점에 대해 표층과 30 cm 깊이별로 비교하였다. 그림 3.3.26 ~ 3.3.28에서 보면 두 모형 모두 강우가 집중되는 7월과 8월, 9월에는 토양의 포화함수율에 이르게 된다. 표층에서의 관측 및 모의 결과를 비교하면, 특히 지점 1, 지점 9에서는 MIKE SHE 모형의 모의결과가 관측결과와 비슷한 양상을 보였고, 하부인 지점 7에서는 WEP 모형의 모의결과가 관측결과에 더 근접하게 모의되었다. 30 cm 깊이에서 관측 토양수분은 지점 9에서의 토양수분이 가장 높게 측정되어, 위치와 관련된 일관된 변화를 보이지 않았다. 이상의 결과는 강우에 의한 표층 및 30 cm 깊이의 토양수분의 대략적인 경향은 알 수 있으나 토사재해에 미치는 영향을 분석하고 예측하기에는 한계가 있다. 따라서 강우사상 별 토양수분의 거동 분석이 필요한 것으로 판단된다.

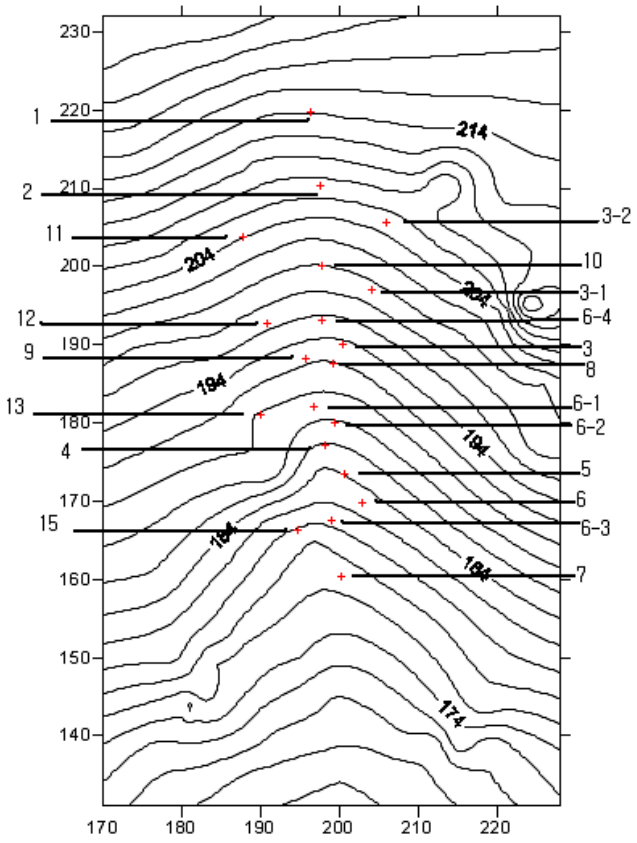
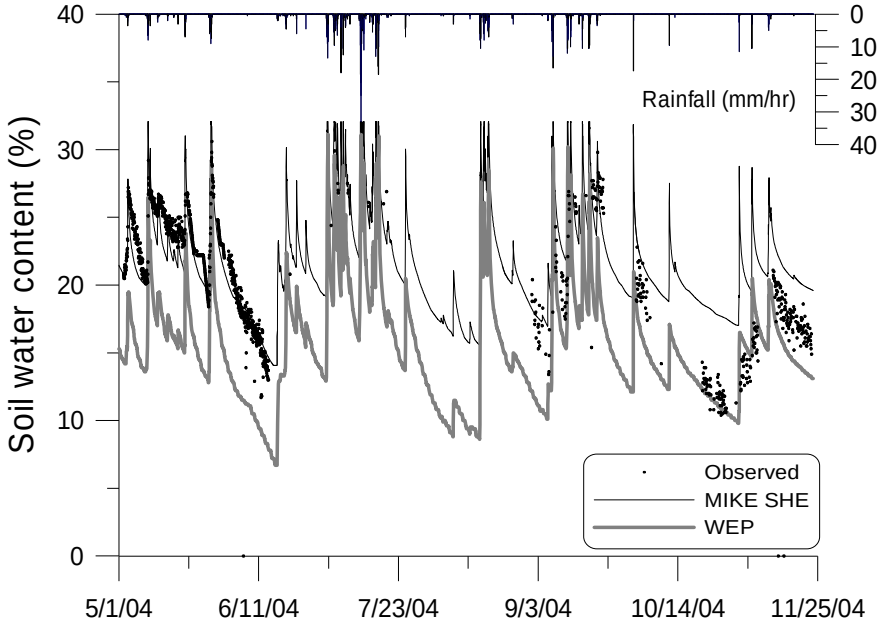
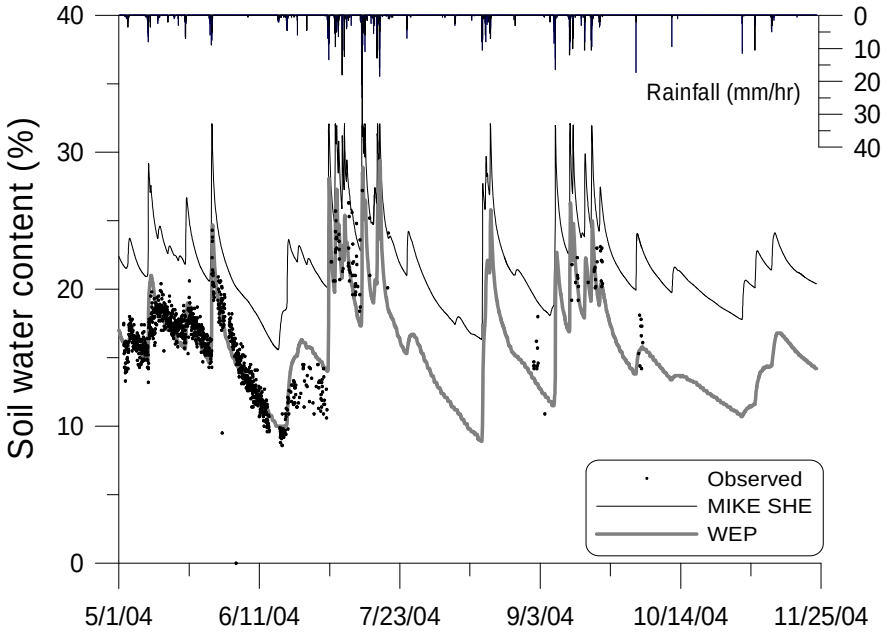


그림 3.3.25 모의적용 지역

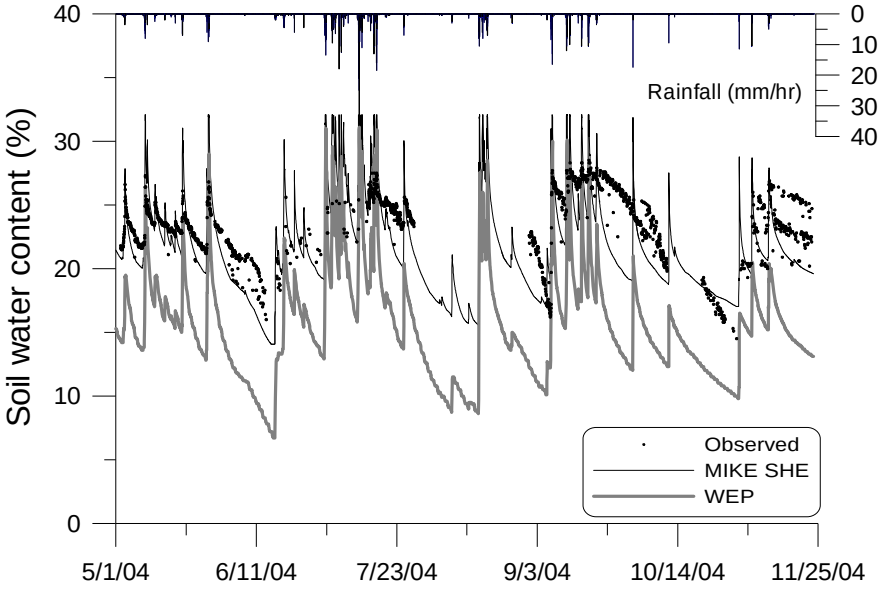


(a) surface layer

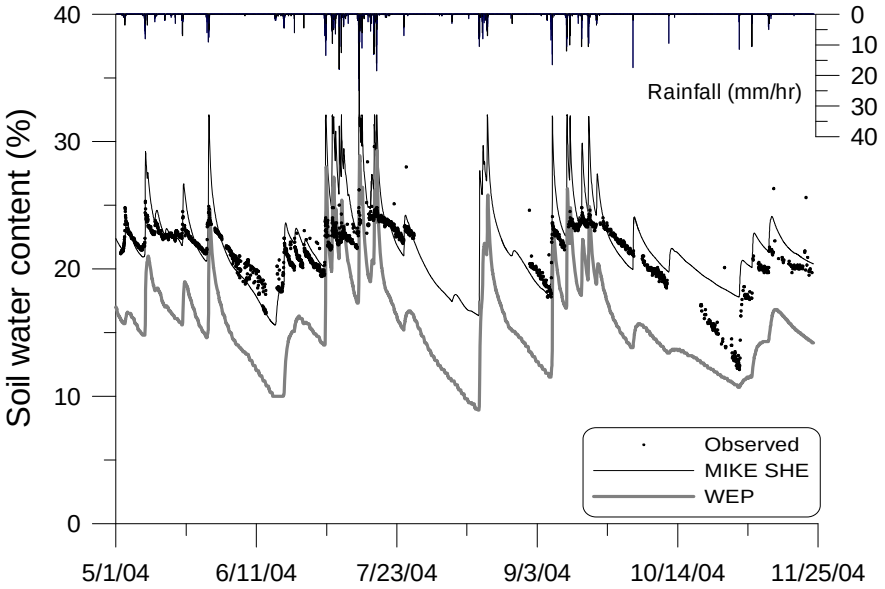


(b) 30cm depth

그림 3.3.26 1 지점에서의 토양수분 비교(한국건설기술연구원, 2006)

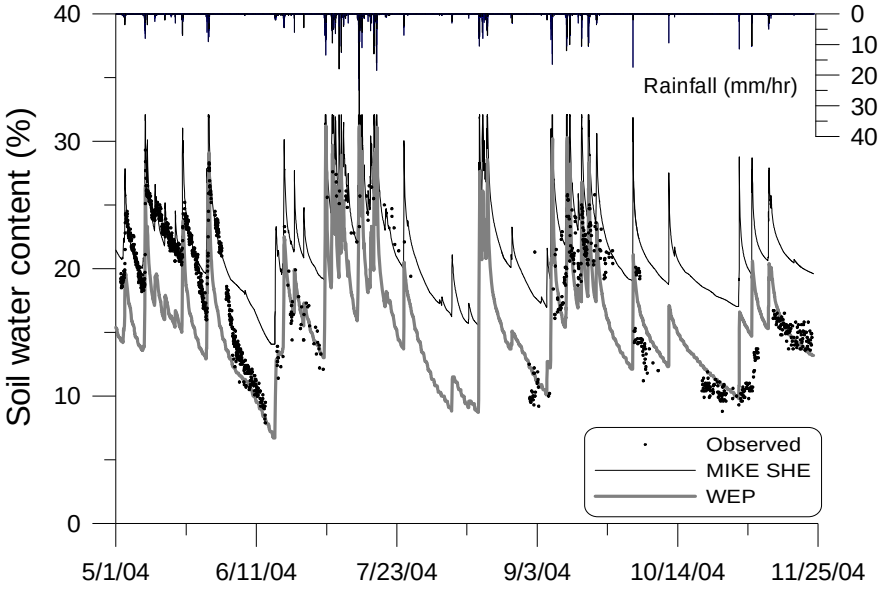


(a) surface layer

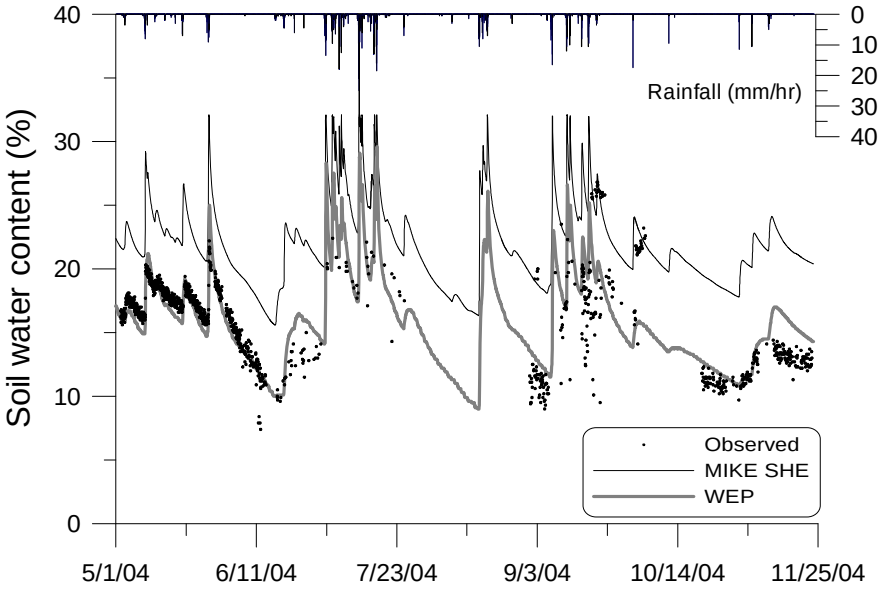


(b) 30cm depth

그림 3.3.27 9 지점에서의 토양수분 비교(한국건설기술연구원, 2006)



(a) surface layer



(b) 30cm depth

그림 3.3.28 7 지점에서의 토양수분 비교(한국건설기술연구원, 2006)

사면수문학적 측면에서의 강우 시 경사면의 토양수분 변화를 면밀히 검토하기 위하여 강우 사상별로 토양수분의 포화시점 및 포화지속시간을 분석하였다. 기존의 연구결과를 보면 포화함수율에 이르는 기간 이후 약 2주 동안은 사면의 붕괴 가능성이 큰 것으로 조사된바 있다(신홍건, 2007).

2004년 7월 11일 0시부터 2004년 7월 13일 23시까지의 72시간 동안의 총 강우량 190 ㎜에 대한 30 ㎝ 깊이에서의 MIKE SHE 토양수분 모의결과(지점 1)를 살펴보면 강우 시작 시간인 16시부터 토양수분이 점차 증가한 후 12시간 후인 28시에 포화(32.1%)에 이르게 되며, 3시간의 포화지속기간을 나타냈다. 그림 3.3.29에서 보는바와 같이 일단 토양수분이 포화가 된 이후에는 시간당 10 ㎜ 이하의 작은 강우에도 토양수분이 민감하게 반응하여 쉽게 포화에 이르는 양상을 나타내게 된다. 따라서, 토양이 포화에 이른 후 연속강우에 의한 토사재해의 발생 확률이 높다고 할 수 있다. 표층의 경우는 그림에서 보는바와 같이 3시간 먼저 포화에 이르며 포화지속시간 역시 5시간으로 길게 나타남을 확인할 수 있었다. 동일 지점에 대한 WEP 모형의 경우는 MIKE SHE에 비하여 토양수분이 낮게 나타났으며 강우에 따른 반응이 더 민감하게 나타났다(그림 3.3.30). 이는 WEP 모형에서는 토양수분의 수직흐름 모의시 MIKE SHE 모형보다 간단한 층 (Layer)을 가정하기 때문에 더 급격한 토양수분 변화를 보이는 것으로 판단된다.

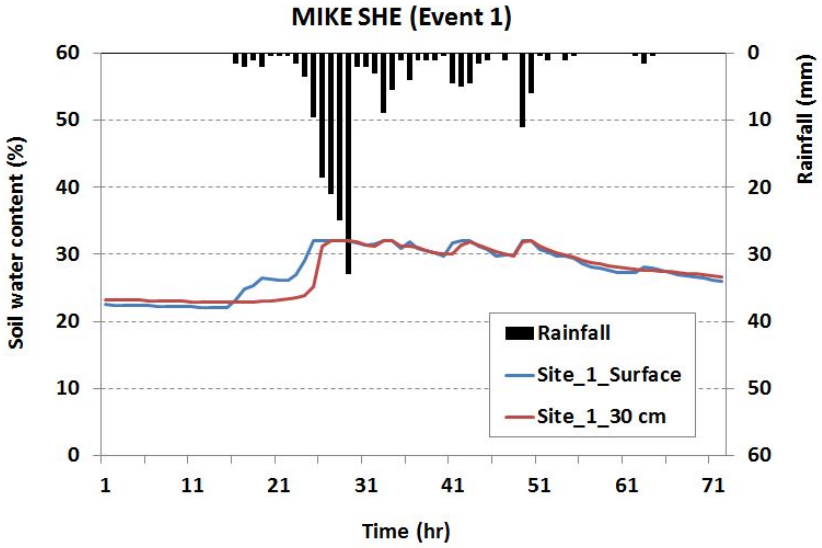


그림 3.3.29 1 지점에서의 토양수분 비교 (MIKE SHE_2004.07.11.~2004.07.13)

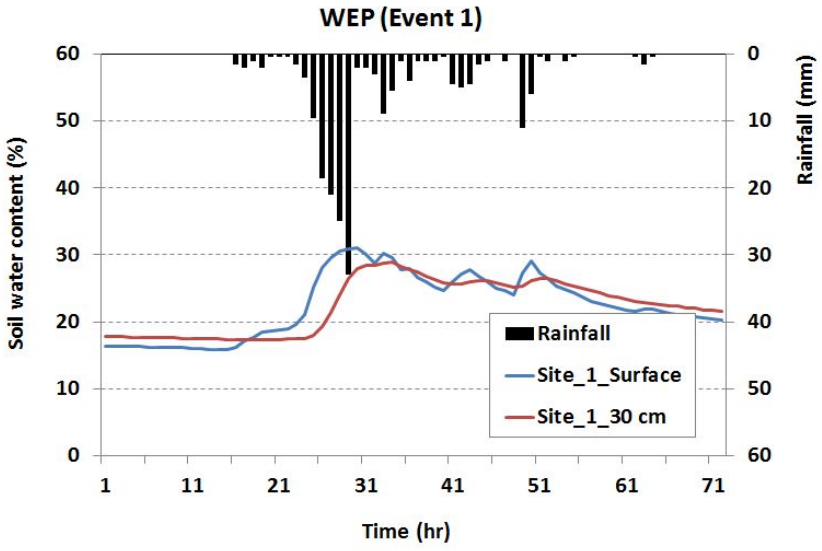


그림 3.3.30 1 지점에서의 토양수분 비교 (WEP_2004.07.11~2004.07.13)

또 하나의 강우사상인 2004년 7월 1일 19시부터 2004년 7월 2일 12시까지의 18시간 동안의 총 강우량 85.3 ㎜에 대한 30 ㎝ 깊이에서의 MIKE SHE 토양수분 모의결과(지점 1)를 살펴보면 강우시작 후 11시간 후에 토양수분이 포화되었으며 이후 3시간 포화가 유지된 후 점차 감소하는 양상을 나타냈다. 표층에서는 2시간 먼저 포화

가 되고 포화유지기간 역시 5시간으로 앞선 강우사상과 비슷한 결과를 나타냈다(그림 3.3.31). WEP 모형의 토양수분 모의 결과는 위의 경우와 마찬가지로 강우에 따른 반응이 민감하고, MIKE SHE에 비하여 낮게 나타났다(그림 3.3.32).

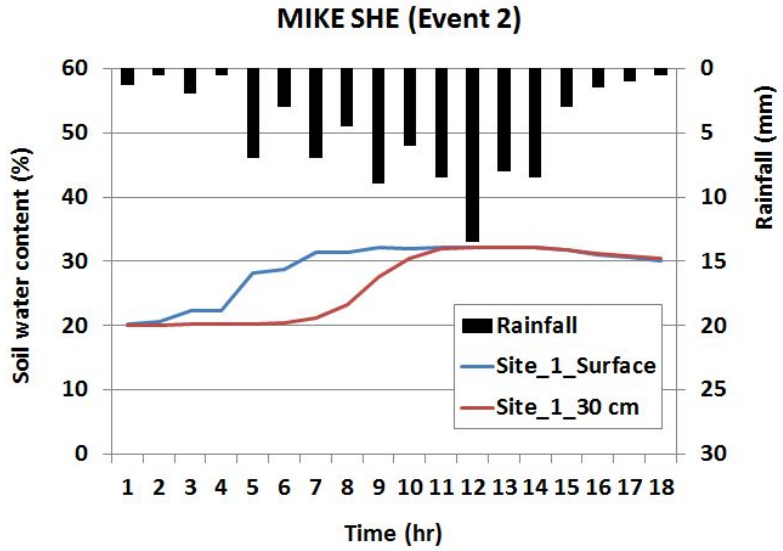


그림 3.3.31 1 지점에서의 토양수분 비교 (MIKE SHE_2004.07.1.~2004.07.2)

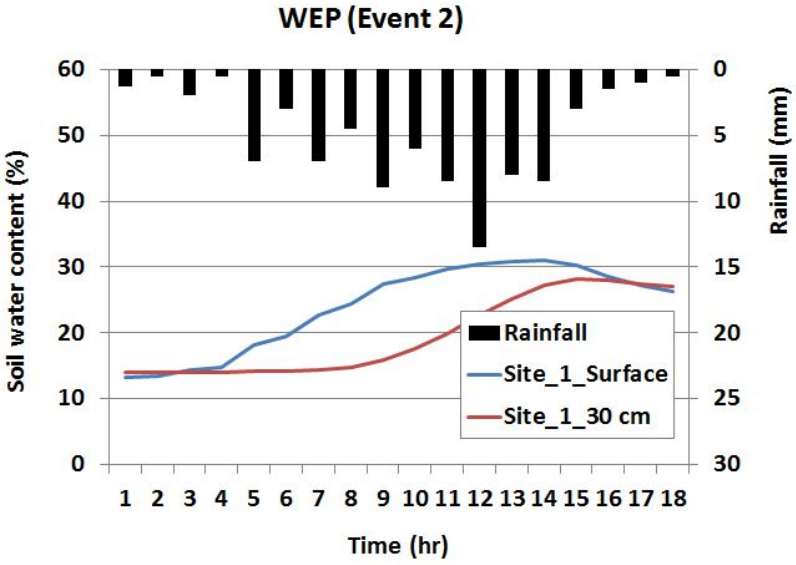


그림 3.3.32 1 지점에서의 토양수분 비교 (WEP_2004.07.1~2004.07.2)

강우 사상별 토양수분의 변화를 살펴본 결과, 30 ㎝ 깊이에서는 강우 시작 후 11시간에서 12시간 후에 경사면의 토양수분이 포화에 이르는 양상을 나타내었으며 표층에서는 이보다 2시간에서 3시간 먼저 포화에 이르고, 포화유지시간의 경우는 30 ㎝ 깊이에서 3시간 정도, 표층에서 5시간 정도의 시간을 나타냄을 확인하였다.

이상의 결과에서와 같이 설마천 경사면의 경우는 강우발생 시간 이후 10시간에서 13시간 정도 이후부터 포화가 유지되는 시간인 3시간 정도의 기간, 이후 연속강우에 의한 기간 동안에는 토사재해의 발생 확률이 있음을 예측할 수 있다. 이는 경사면의 조건 및 토양층의 조건에 의해 각각 다르게 나타날 수 있으므로 향후 실제 산사태 및 토석류 발생 지점들에 대한 면밀한 분석이 필요할 것이다. 또한, 본 연구에서는 1시간 간격의 강우자료를 이용하였으나 향후 시간적, 공간적 특성을 고려하여 1시간 이하의 자료(10분)를 이용한 분석 및 검증이 수행된다면 10분 단위의 토사재해 예측이 가능할 것으로 판단된다.

다. 통계학적 기법을 이용한 토석류 발생 예측

최근 USACE(US Army Corps of Engineers) 에서는 산불이 발생한 산지유역에서의 강우에 의한 토석류의 예측을 위한 통계학적 모형인 MSDPM(Multi-Sequence Debris Prediction Model)을 개발하여 서부 캘리포니아 지역의 소규모 유역(25 ~ 800 ha)에 대해 적용한바 있다(Pak, 2005; Pak and Lee, 2008). 이 모형은 1938년에서 1983년까지 수집된 토석류 발생량 자료를 이용하여 다중회귀분석을 통해 개발되었으며 1984년부터 2000년까지 17년간 수집된 강우량, 산불자료 및 토석류 발생량 자료에 근거하여 보정되었다.

기존의 수많은 토석류 예측모형들이 오로지 단일 설계강우사상에 대해 초점을 맞춘 반면 이 모형은 홍수기의 다중 강우사상과 관련된 토석류 발생량을 예측하는 것이 가능하다. MSDPM의 다중회귀식은 강우, 배수면적, 경사, 그리고 무차원 산불인자 및 강우강도와 총강우량에 대한 임계강우값 등의 변수들을 포함한다. 좀더 상세히 살펴보면, 총강우량, 1시간 최대강우강도, 1시간 최대강우강도에 대한 임계값(TMRI), 최소강우량(TMRA), 경사(S), 배수면적(A), 선행강우사상 및 산불인자(F) 등이다. 산불인자는 산불이 일어난 면적률과 마지막 산불이 발생한 시점부터의 기간, 선행강우사상의 발생횟수로 구해진다. MSDPM은 강우량의 공간적 분포는 고려하지 못

한다. 따라서 현재 이 모형은 주로 소규모의 유역에 적용이 가능하며 유역 면적이 증가할수록 정확도는 감소하게 된다.

$$\sum_{i=1}^{N}(D_{\mathrm{y}}) = 0.25\sum_{i=1}^{N}\left(1+\frac{\left|(I_{\mathrm{m}})_i - I_{\mathrm{c}}\right|}{((I_{\mathrm{m}})_i - I_{\mathrm{c}})}\right) \times \left(1+\frac{\left|(P)_{\mathrm{i}} - P_{\mathrm{c}}\right|}{((P)_{\mathrm{i}} - P_{\mathrm{c}})}\right)(I_{\mathrm{m}})_i^{0.541} S^{0.134} A^{1.023} e^{0.290F} \quad (3.14)$$

여기서, P≒P_c, I_m ≒ I_c, D_y는 토석류 발생량 (㎥), I_m 은 1시간 최대강우강도 (㎜/hr), I_c 는 1시간 최대강우강도에 대한 임계값(TMRI) (㎜/hr), P는 총강우량 (㎜), P_c는 최소강우량 (TMRA) (㎜/hr), S는 경사 (m/㎞) = (h2-h1)/L, h2는 최대표고, h1은 최저표고, L은 하천연장 (㎞), A는 배수면적 (ha), F는 산불인자로 3 ~ 6.5의 무차원 값을 갖는다.

$$F = 6.5 \times (B_{\mathrm{p}} \times B_{\mathrm{y}}^{-0.29} + (1 - B_{\mathrm{p}}) \times (20 - B_{\mathrm{y}})^{-0.29}) \times (2 - \mathrm{e}^{(A_{\mathrm{p}}/200)}) \quad (3.15)$$

여기서, B_p는 산불발생률(0~1), B_y는 산불발생 이후 년수(1~10), A_p는 선행강우사상의 발생횟수이다.

본 모형은 LA의 여러 산불발생지역을 대상으로 약 2,000건 이상 적용되었으며 실측 자료와 비교한 결과 산불발생지역의 정확한 토석류 발생량 예측이 가능한 것으로 나타났다. 향후 국내 산사태 및 토석류 발생지역의 자료수집 및 검증을 통하여 국내 실정에 적합한 모형의 개발을 고려함으로써, 토석류 예측을 위한 통계학적 기법 및 기준을 확립할 필요가 있을 것으로 사료된다.

라. 결정론적 모형을 이용한 산사태 및 토석류 발생 예측

산사태의 주요 발생 원인으로는 지형, 지질, 암질, 토질, 식생, 강우 등과 같은 자연적인 요인과 절토, 성토 등에 의한 인위적 원인으로 나눌 수 있다. Bromhead

(1992)는 산사태의 발생 원인을 다음과 같이 분류하였다.

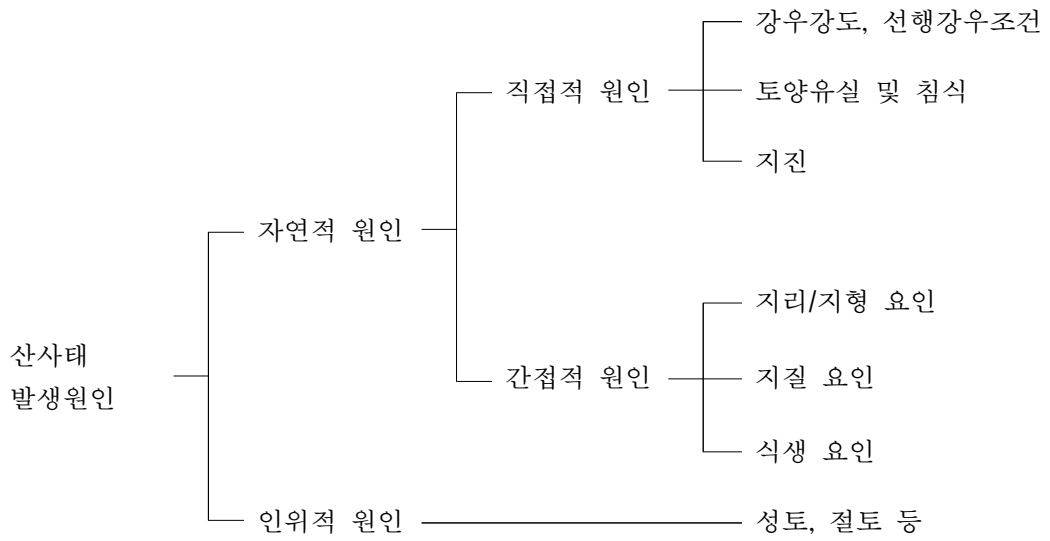


그림 3.3.33 산사태 발생원인 (Bromhead 1992)

국토의 대부분이 복잡한 산악지형으로 이루어진 우리나라는 지질학적으로 만장년기에 속하며, 상대적으로 급경사면이 많기 때문에 여름철 집중 호우 등에 의한 산사태 발생이 빈번하게 발생하고 있다. 또한 우리나라의 산사태는 토심이 얕고 경사가 급한 지역에서 주로 발생하고 있으며, 토석류를 유발하여 하류지역의 2차 피해를 가져오기도 한다. 이러한 산사태는 상대적으로 얕은 표토층이 붕괴되어 빠르게 이동하는 얕은 산사태 혹은 천층 산사태 (shallow landslide)에 속한다.

산사태 예측모형은 연구자에 따라 조금씩 다른 분류기준을 적용하고 있다. Safaei 등(2011)은 다음의 그림 3.3.34와 같이 산사태 예측 모형을 분류하였다.

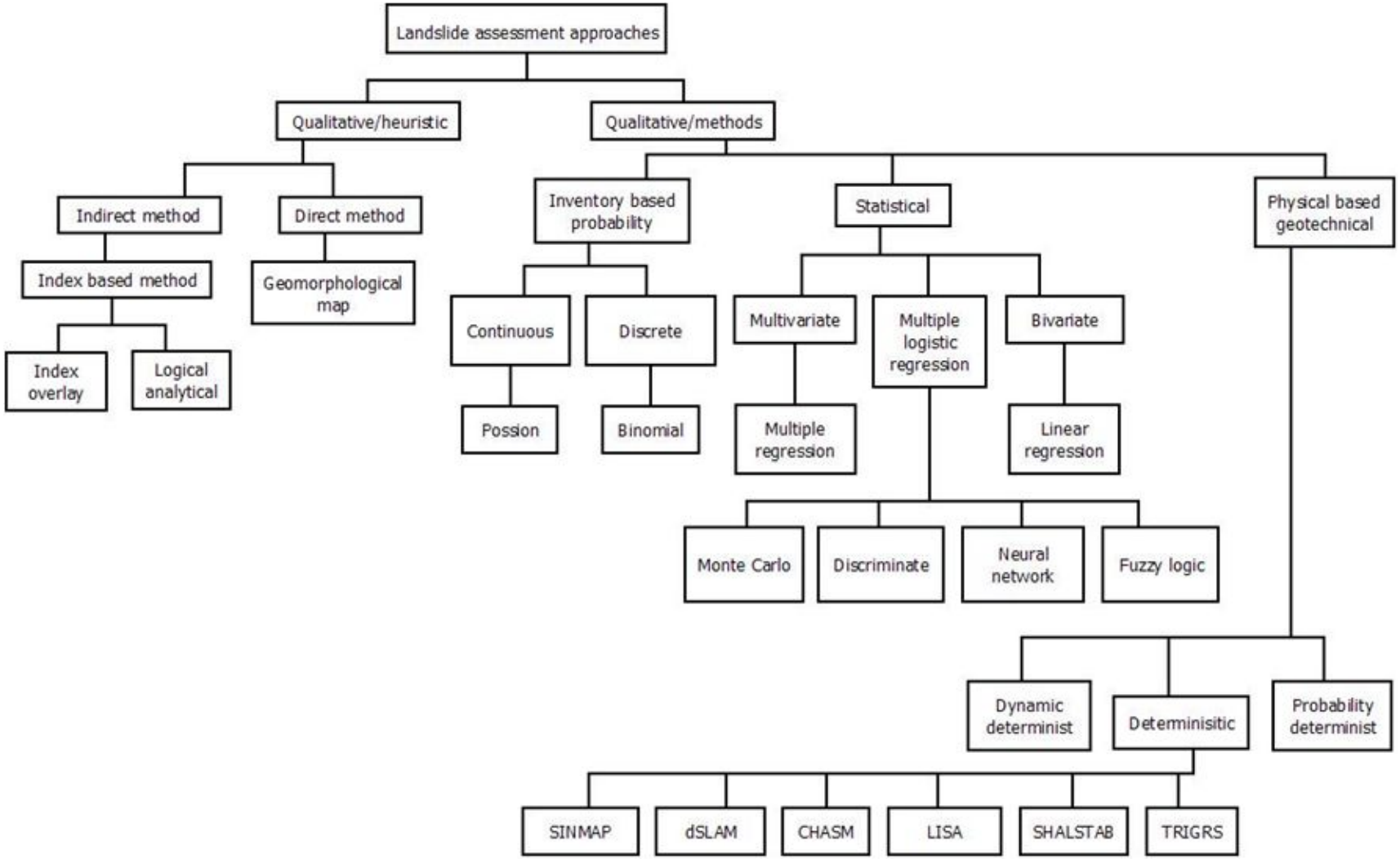


그림 3.3.34 산사태 예측모형의 분류 (Safaie 등 2011)

일반적으로 산사태 예측모형은 크게 Inventory, Heuristic, Statistic, Deterministic 등으로 구분한다. 이 중에서 Deterministic, Physically-based Model (물리적 기반의 산사태 예측 모형)은 사면의 안정해석을 통해 안정율 (Factor of Safety)을 계산하여 산사태 발생을 예측하는 방법으로, 다른 방법과 비교하여 직접적으로 안정하거나 불안정한 사면을 계산할 수 있다. 강우에 의한 산사태 예측모형은 보통 수문모형과 사면안정해석 모형으로 구성되어 있다. 이러한 물리적 기반의 산사태 예측 모형은 주어진 대상지역에 대한 정밀하고 계측된 자료를 많이 필요로 하기 때문에 이러한 입력 자료의 구축에 많은 시간과 비용이 요구되며, 이러한 이유로 인해 주로 소규모 단위로 적용한다.

최근 산사태의 대형화 경향에 따라 그 피해를 최소화하기 위해서 산사태 발생을 예측하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 강우에 의해서 발생하는 얕은 토층깊이의 천층 산사태를 해석하기 위하여 주로 산사태의 발생을 물리적 방법으로 해석하는 물리적 기반 산사태 예측모형에 대한 연구가 많이 추진되고 있다. 물리적 기반의 산사태 예측 모형의 예는 다음 표 3.3.6과 같다.

표 3.3.6 물리적 기반의 산사태 예측 모형의 종류 (Safaei 등 2011)

Model name	Description	References
CHASM	Combined Hydrology And Stability Model	Anderson & Lloyd (1991), Anderson et al. (1996)
LISA	Level I Stability Analysis	Hammond et al. (1992)
SHALSTAB	Shallow Landsliding Stability Model	Montgomery & Dietrich (1994, 1998)
SMORPH	Slope MORPHology	Shaw & Johnson (1995)
dSLAM/IDSSM	Distributed Shallow Landslide Model/Integrated Dynamic Slope Stability Shallow Landslide Model	Wu & Sidle (1997)
SINMAP	Stability Index Mapping	Pach et al.(1998,2001)
SHETRAN	System Hydrology European TRANsport	Ewwen et al. (2000), Birkinshaw et al. (2010)
TRIGRS	The Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-stability	Iverson(2000), Baum et al. (2002), Savage et al. (2004)
PROBSTAB	PROBability of STABility PCRaster GIS package	Van Beek (2002)
PISA	Probabilistic infinite slope analysis.	Haneberg (2004)
GEOtop-FS	combines the hydrological distributed model GEOtop(Bertoldi et al. 2006) and an infinite slope geotechnical model	Simoni et al. (2007)
SUSHI	(Saturated Unsaturated Simulation for Hillslope Instability) model	Capparelli et al. (2006)

이제까지 개발된 대부분의 산사태 및 토석류에 대한 해석적 모형은 강우 침투에 의한 공극수압의 변화와 이로 인한 토양의 전단저항력을 계산하여 사면의 안정성을 평가하고 있다. 이는 강우의 침투기작과 토양수분의 변화가 산사태 및 토석류를 유발하는 매우 중요한 인자라는 의미이기도 하다.

일반적으로 사면 해석에는 무한사면안정해석이론을 사용하며, 산지사면과 같은 복잡한 자연사면보다는 절개면, 성토면 등과 같은 급경사지의 인공사면을 주 대상으로 하는 특징을 갖고 있다. 또한 SHALSTAB, SINMAP 등은 정상류 조건의 지표하 흐름조건에만 적용 가능한 단순수문분포모형을 이용한다. 반면에 CHASM, TRIGRS, DSLAM/IDSSM, GEOtop-FS 등은 시간에 따른 강우침투량 및 토양수분 변화를 모의하여 강우시간에 따른 산사태 발생을 모의하는 동적 수문모형을 사용하고 있다. 그럼에도 불구하고 이들 대부분의 모형은 일반적인 수문모형과 비교하여 강우-유출-침투 관계를 단순화하여 나타내며, 토양 중의 수분이동 및 재분배도 상대적으로 단순한 이론을 적용하고 있어 토양수분의 모의에 한계가 있다. 게다가 토양수분의 추적은 지역적으로 다른 토양의 특성을 충분히 반영할 수 있어야 하므로 해외에서 적용성이 입증된 경우라 하더라도 국내에 적용성을 보장하기는 어렵다고 할 것이다.

우리나라와 같이 강우에 의해 산사태가 발생하는 지역에서는 무엇보다 강우-침투 및 토양수분의 모의 등이 매우 중요하다고 할 수 있으므로, 산사태 및 토석류 예측을 보다 정확하게 하기 위해서는 산지사면의 강우-유출관계를 정확하게 모의할 수 있는 방법이 필요하다. 산지사면에서 발생하는 복잡한 수문과정(강우, 강우차단, 증발, 침투, 토양중의 수분재분배 등)을 사실적으로 표현하여 강우로 인한 사면의 토양수분 변화를 정확하게 모의할 수 있는 방법이 요구되며, 대상사면을 하나로 취급하는 총괄형 모형 (lumped model)보다는 분포형 모형 (distributed model)이 더 적합하다. 특히, 계산의 편의를 위해 격자 (grid) 혹은 셀 (cell) 기반의 공간적 계산단위를 이용할 필요가 있다(그림 3.3.35).

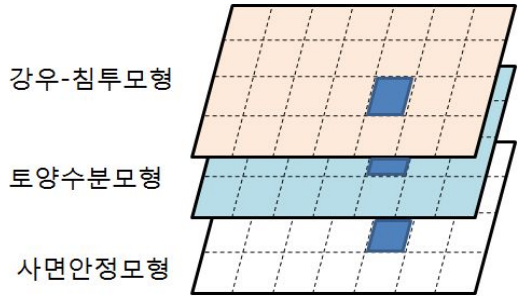


그림 3.3.35 산사태 예측 모형의 개발방향

제 4 절 토사재해 대응제도 및 정책 개선 방안

1. 우리나라의 토사재해 대응 관련 법률

우리나라는 재난에 관련된 업무가 여러 부처에 분산되어 있어, 이를 해결하고 국가관리시스템을 구축하고자 소방방재청을 신설하였으나「예방-대응-복구」분야별로 업무가 유기적으로 통합 되지 못하고, 그림 3.4.1과 같이 재난유형에 따른 분산관리 방식을 채택하고 있다. 중앙부처와 지방간에 역할분담이 명확하게 정립 되어 있지 않고, 지방은 복구예산 확보에 총력을 기울이고 있고, 중앙정부는 예산지원 이외에는 별다른 대책을 추진하지 못하고 있는 실정이다. 이는 "산사태" 등 토사재해와 관련해서도 동일한 현상이 발생하고 있으며, 제도적인 시스템이 구축되지 못한 부분에 비롯되었다 할 수 있다. 이에 산사태 관련 법규를 정리하고 향후 제도 및 정책적으로 개선되어야 할 부분을 도출하였다.

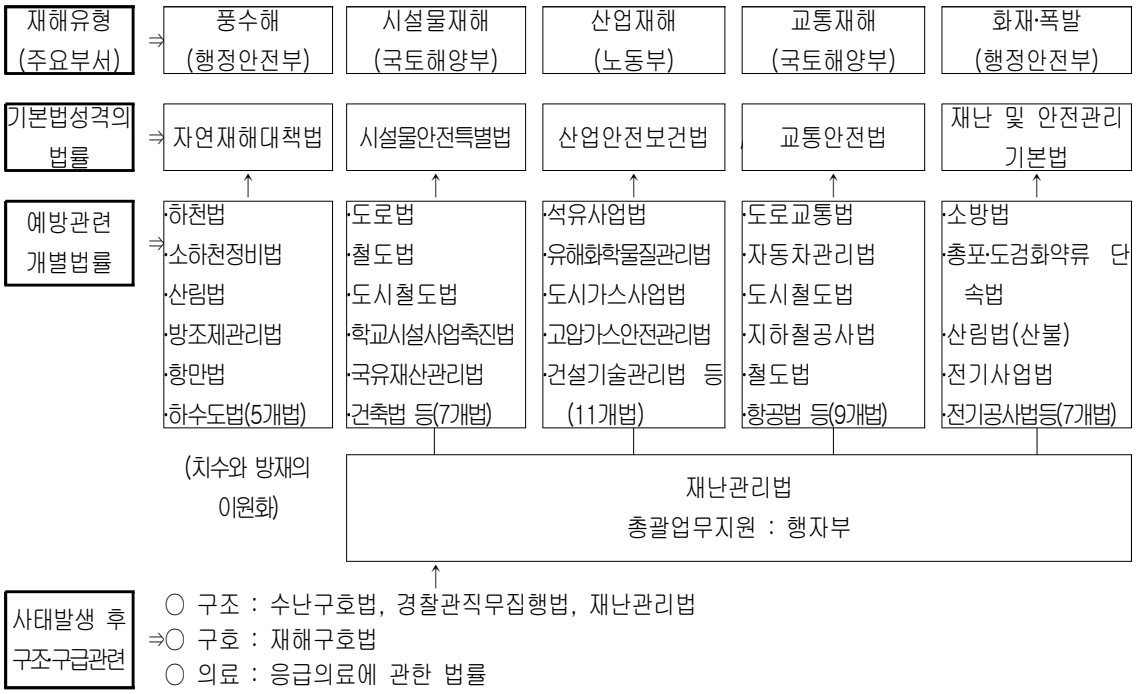


그림 3.4.1 우리나라의 재난관련 법률

가. “산사태” 관련 법률

자연재해의 여러 유형 중, 토사재해의 한 유형으로서 산사태 현상을 규정하여 재해예방 활동의 근거를 제공하는 법규는 급경사지법(제13조 붕괴위험지역의 정비사업 실시계획)과 사방사업법(제3조 사방사업의 구분, 가항 산사태예방사업, 나항 산사태복구사업)이다. 이 두개 법률의 상위법으로서 산사태가 발생하는 지역을 “구역”으로 정의하는 것은 자연재해대책법(제12조자연재해위험지구의 지정 등)과 산림보호법(제7조 산림보호구역의 지정)이다.

보다 포괄적으로 토사재해를 풍수해 유형 중의 하나로 정의하면, 재난 및 안전관리기본법의 “제3장 안전관리계획”에 의해 지자체별로 의무적으로 수립해야하는 “안전관리계획”의 “제2편 유형별 재난관리대책” 중 “제1장 풍수해대책”의 예방대책 중, “① 풍수해저감종합계획”, “② 사전재해영향성검토”, “③ 자연재해위험지구정비사업”, “④ 재난취약시설 정비, 점검”의 정책이 토사재해를 저감하기 위한 구체적 시책사업에 해당된다.

재난및안전관리기본법: 제3조(정의) 이 법에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다.<개정 2011.3.29>
1. “재난”이란 국민의 생명·신체·재산과 국가에 피해를 주거나 줄 수 있는 것으로서 다음 각 목의 것을 말한다.
가. 태풍, 홍수, 호우(豪雨), 강풍, 풍랑, 해일(海溢), 대설, 낙뢰, 가뭄, 지진, 황사(黃砂), 적조(赤潮), 그 밖에 **이에 준하는 자연현상**으로 인하여 발생하는 재해

그러나 산사태 방지를 위한 법, 제도 검토 연구에서 보다 실질적으로 검토해야하는 사항은 각 영역별(산지, 도시외곽, 도심내, 농산촌 지역 등)의 산사태 형태와 각 형태가 발생하는 대표적 공간위치이다.

과거 국내에서 통용되던 산사태의 개념은 농산촌 사회구조에서 자연지형에 순응되도록 시설된 산복 하단부, 산지하천 및 구거부 인근에 위치한 주택 및 사회기반시설이 산지로부터 대량 유출된 토사(flow, fall, slide)에 의해 매몰, 유실되면서 발생된 피해를 포괄적으로 설명하던 용어이다.

그러나 최근의 토사재해는 지형순응형 개발이 아닌, 지형개변형 개발로 인해, 도심지 내외에 인위적으로 급경사지가 형성되면서 장기적인 침식에 의한 ① 안식각의

상실, ② 사면붕괴 방지 시설(옹벽, 석축 등)의 노후화, ③ 관리부실로 인한 붕괴가 빈발하면서 도심에서의 산사태 방지사업 추진의 어려움으로 “급경사지 붕괴 방지법”이라는 법규가 제정되었다.

급경사지법은 “제13조 붕괴위험지역의 정비사업 실시계획”에서 붕괴현상의 한 유형으로서 산사태를 정의하고 있으며, 지형형태에 근거한 그 공간적 범위를 정의하면, 시설물 배후의 최하단부터 최상단까지의 사면으로 한정할 수 있다. 보다 포괄적으로 적용한다면 최상단에서 사면상부의 일정부분까지 시설물 소유주의 소유(하부시설물 소유자), 용도(도시지역, 관리지역의 보전, 생산관리지역)에 따라 개념적으로 범위를 한정할 수 있다.

이중 이미 자연재해가 발생할 우려가 있는 지역은 자연재해대책법 “제12조 자연재해위험지구의 지정”을 할 수 있는데, 산사태위험지역도 해당된다.

제13조(붕괴위험지역의 정비사업 실시계획) ①관리기관은 제12조에 따라 수립된 중기계획을 기초로 대통령령으로 정하는 바에 따라 매년 정비사업 실시계획을 관계 행정기관의 장과 협의를 거쳐 수립하고 이를 고시하여야 한다. 이를 변경하는 때에도 또한 같다. ②제1항에 따라 관리기관이 정비사업 실시계획을 수립함에 있어서 붕괴위험지역에 인접한 지역으로부터의 토석류 유출 및 산사태 등으로 붕괴위험지역에 피해가 우려되는 때에는 그 인접한 지역에 대한 피해방지 사업을 포함하여 수립할 수 있다.

제12조(자연재해위험지구의 지정 등) ① 시장·군수·구청장은 상습침수지역, 산사태위험지역 등 지형적인 여건 등으로 인하여 재해가 발생할 우려가 있는 지역을 자연재해위험지구로 지정·고시하고, 그 결과를 시·도지사를 거쳐 소방방재청장과 관계 중앙행정기관의 장에게 보고하여야 한다.

사방사업법 제2조 5항은 관련 법률 중 유일하게 산사태의 개념과 동법이 적용되는 지형공간을 분명히 정의하고 있다[12]. 또한 동법에서는 이 용어정의를 토대로 “제3조 1항 가목에서 산사태 예방사업”을 정의하여 산사태의 예방-복구-관리에 대한 체계를 이룬다.

특히 상위법이라 할 수 있는 산림보호법 제7조 4항은 산사태의 한 유형인 토사유출 및 낙석이 발생하는 지역을 “재해방지보호구역”으로 지정하도록 규정하여 관련법인 사방사업법을 뒷받침하고 있다.

12) “산사태”란 자연적 또는 인위적인 원인으로 산지가 일시에 붕괴되는 것을 말한다.(사방사업법)

제3조(사방사업의 구분) 사방사업은 그 대상지역에 따라 다음 각 호와 같이 구분한다.
1. 산지사방사업: 산지에 대하여 시행하는 다음 각 목의 사방사업
 가. 산사태예방사업: 산사태의 발생을 방지하기 위하여 시행하는 사방사업
 나. 산사태복구사업: 산사태가 발생한 지역을 복구하기 위하여 시행하는 사방사업
 다. 산지보전사업: 산지의 붕괴·침식 또는 토석의 유출을 방지하기 위하여 시행하는 사방사업

제7조(산림보호구역의 지정) ① 특별시장·광역시장·도지사·특별자치도지사(이하 "시·도지사"라 한다) 또는 지방산림청장은 특별히 산림을 보호할 필요가 있으면 다음 각 호의 구분에 따라 산림보호구역을 지정할 수 있다.
 1. 생활환경보호구역: 도시, 공단, 주요 병원 및 요양소의 주변 등 생활환경의 보호·유지와 보건위생을 위하여 필요하다고 인정되는 구역
 2. 경관보호구역: 명승지·유적지·관광지·공원·유원지 등의 주위, 그 진입도로의 주변 또는 도로·철도·해안의 주변으로서 경관 보호를 위하여 필요하다고 인정되는 구역
 3. 수원함양보호구역: 수원의 함양, 홍수의 방지나 상수원 수질관리를 위하여 필요하다고 인정되는 구역
 4. 재해방지보호구역: 토사 유출 및 낙석의 방지와 해풍·해일·모래 등으로 인한 피해의 방지를 위하여 필요하다고 인정되는 구역

이렇듯 산사태는 산악지형 국가에서 가장 일반적인 재난유형의 하나이기에 복수의 법규에 의해 산사태 현상을 규정하고 있다. 따라서 지자체 입장에서는 산사태 현상과 그에 따른 피해 유형을 근거로 핵심담당 부서가 결정된다. 즉, 지자체의 산사태 예방대책 수립차원의 산사태 검토는 현상적 문제와 사회적 영향을 고려하여 산사태 업무의 주와 보조를 구분하고, 이 업무를 추진하기 위한 수단으로서 관련 법을 연계하는 방안을 채택해야 한다.

중앙부처에서는 소방방재청과 산림청 더 나아가 국토해양부가 산사태라는 현상을 두고 업무 중복이 발생되고는 있으나 지자체 입장에서는 모두 해당 관내의 자연재해이므로 사회적 영향을 고려하여 업무주관 부서를 결정한다.

이를 토대로 정리해보면 예방단계에서는 각각의 기관과 부서가 사전에 파악된 산사태 취약(또는 산사태 위험)지구를 대상으로 사업을 전개하고 있으며, 사후적으로는 사회적 영향도를 고려하여 산림과나 재난방재과가 해당 피해사항을 복구하고 있다고 판단된다.

나. 산사태 위험지구의 설정

(1) 산사태 위험지구 개요

현재 산사태 위험지구로 설정하는 근거는 급경사지법의 “붕괴위험지역”과 산림보호법의 “재해방지보호구역”이다. 붕괴위험지역의 지정은 전문가 답사, 조사 및 평가에 의해 지역을 지정하며, 전국적으로 많은 개소가 지정되어 있는 것으로 파악되고 있다.

붕괴위험지역의 경우, 지역지정 시, ① 지속적인 모니터링, ② 위험요인 해소 사업 ③ 경계 피난 대책의 강구가 필요하나, 현재 이 세 가지 사항이 적극적으로 추진되지 못하고 있는 것이 현실이다.

산림보호법의 “재해방지보호구역” 지정은 산림청을 중심으로 한 국유림 일원에서만 지정되며, 지자체에서는 관련 구역을 지정한 사례를 찾기 어렵다. 지자체 인근의 생활권 대부분은 국유림 보다는 사유림이 주류를 이루고 있어 산림청이 주관하는 “재해방지보호구역”의 지정 사례는 드문 실정이다.

지자체는 관리대상이 되는 산림지의 소유권과 관리권의 특성에 따라 산사태 발생가능지역을 대상으로 사방사업법에 의한 “사방사업대상지(기준 최소 면적 0.1ha)”를 지정하고 이 지역을 대상으로 “산사태 예방사업”을 추진하고 사업추진 10년 경과 후에는 폐지 여부를 검토하게 된다.

산사태를 예방하기 위한 이 두 가지 법률의 적용실태를 정리하면, 붕괴위험지역과 사방사업대상지는 지자체가 지정하고 위험요인 해소사업을 추진하지만, ① 위험요인이 뚜렷하지는 않지만 개발행위와 관련하여 신규로 발생되는 잠재적 붕괴위험지역, ② 위험요인이 뚜렷하지는 않지만 자연사면으로서 산사태 위험이 있는 지역, ③ 위험요인 해소 사업 미이행지의 경우 현재 위험지구로 지정되지 않고 있으며, 특별한 경계, 피난 등의 대책도 없는 경우가 대부분이다. 즉 생활권 인근에서의 토사재해 경계지역 지정을 보다 적극적으로 수행하여 그 현황을 확보해 나가는 방안이 필요하다.

(2) 산사태 위험지구의 지정 실태

도시지역과 농촌에 산재한 산사태 위험지구 중, 지형개변 후 주택, 도로 등의 시설이 입지한 급경사지 위험지역 및 산사태 지역은 붕괴위험지역으로 상당부분 지정관리 되는 것으로 추정된다.

이들 지역은 사면이 안식각을 이루지 못하거나, 대절토면 및 절토면이 시설물에 근접되어 붕괴, 낙석시 시설물에 위험이 발생하는 경우로서 그 위험성이 외관상 뚜렷하여 주민 민원 또는 지자체 자체 조사 등에 의해 현황이 파악되고 후속 관리행위가 이루어진다.

반면 농촌과 도시지역(도심이 팽창하여 택지, 도로 등의 건설이 인근지역 보다 해발고도가 월등히 높아져 절토와 성토가 반복적으로 발생되는 지역)의 거주지 인근에 위치한 토석류 위험지역과 산사태 지역은 토사이동의 근원이 되는 지역이 상시적 관찰에서 파악되지 않는 특징이 있다.

외관상 토사재해 발생 위험이 명확치 않고, 대부분 시선이 닿지 않는 상부(또는 상류)지역에 위치하고, 산림으로 차폐되어 그 위험요인이 명확치 않아, 쉽게 민원이 제기되거나 행정 조사가 추진되지 않고 있다. 이에 따라 실제 산림보호법의 “재해방지보호구역”으로 구역지정 되는 사례가 매우 드물다.

다행히 토사유출 이력이 주민들의 기억 속에 남아 있거나, 객관적 조사에 의해 위험한 것으로 판정이 될 경우, 사방사업대상지 지정에 의한 관리가 부분적으로 이루어지고는 있다. 그러나 이들 지역을 대상으로 개발압력이 높아질 경우 사방지 지정이 소극적으로 추진되는 등, 적극적 관리가 어려운 실정이다.

신규 산사태 위험지구는 ① 상류지역에 과거와 비교하여 특정한 개변행위가 없더라도 집중호우 등에 의해 상류로부터 토사가 유출되는 자연현상이 발생하면 피해를 입게 되는 경우, ② 산지부의 상류에서 적극적 개발행위가 발생하고 이로 인해 그 영향이 하류부에 미치는 경우, ③ 산지부에서 적극적 개발행위를 하여 그 자체가 위험을 증대시키면서 잠재 피해시설이 되는 경우로 구분할 수 있다.

최근 10여년간 주요 피해 유형으로 거론되는 것은 도시팽창과 시설물 확대 시설로 인해 산록부 및 산복부 인근까지 건축물 및 사회기반시설이 입지하는 경우이다. 이러한 경우, 상류 산지에서 시작된 갑작스러운 토사이동으로 하류부 시설물 입지지까지 토사가 이동하면서, 시설물의 매몰, 붕괴, 유실에 의한 피해가 빈번하다.

이러한 입지를 대상으로 한 경우, 건축물(특히 펜션 등)은 인허가 단계에서 최소한의 건축요건이 구비되고 명확한 토사재해 위험이 없을 경우 지자체에서 재해를 염려하여 인허가를 거부할 수 없다[13]. 2011년 7월26일 춘천시 천전리에서 발생한 토석류로 인한 하류지역에서의 인명피해는 이러한 경우의 전형이라 할 수 있다.

산지관리 측면에서 동 지역의 토사재해 위험성은 매우 낮았으나, 결론적으로 토석류가 발생하여 13명이 사망하였다. 이러한 경우에는 국토법의 용도지구인 방재지구, 용도지역인 "자연환경보전지역"으로 지정되어 개발행위의 원천적 거부 또는 최소한의 개발행위 규제가 이루어져야 했으나, 현 국토법상 관련 조항을 적극적으로 적용하는데 어려움이 있다고 판단된다[14].

2. 토사재해 대응 관련 제도의 개선점

가. 토사재해 위험지구설정 개선 방안

급경사지붕괴법의 붕괴위험지역과 산림보호법의 토사재해위험지구가 대상이 된다. 잠재적 재해위험지구가 도심 내에 위치할 경우 토지이용의 고도화, 도심확장(sprawling)이 발생하면서 위험지구의 지정이 쉽지 않을뿐더러 당초에는 안정화된 급경사 자연사면 조차도 신규 위험 사면으로 전락되는 상황이 발생한다. 이러한 유형을 살펴보면, ① 이미 산사태 위험으로 인해 위험지구로 지정된 사면의 경우 위험요인 해소사업이 신속하게 전개되지 않을 경우, 민원발생 소지가 있다. ② 위험도가 높지는 않으나 최근과 같은 악 기상조건에서는 잠재적 산사태 위험 사면은 위험지구로 지정되지 않았기 때문에 기존에 해왔던 유사 개발사업(택지조성, 주택신축, 증개축 등, 도로개설 등)이 일상적으로 추진된다. 실제 재해발생 위험이 가장 높은 경우이다. ③은 당초에는 안정화된 자연사면이었으나 신규로 대지, 택지, 도로 및 공원 조성 등으로 인해 인공사면을 포함한 급경사 사면이 발생한 경우이다.

상기 ①의 경우는 자연재해대책법의 자연재해위험지구의 지정에 의해 관리하고

13) 사전재해영향성검토(5000㎡ 이상) 대상이 아니므로, 건축 요건이 갖추어지면 대부분 건축이 가능함.

14) 도시방재 측면의 이에 대한 논의는 무성하나 도시관리계획 수립단계에서 이러한 위험요인을 반영하여 방재적 도시계획을 수립하기에는 곤란함. 이를 해소하기 위해서는 방재측면, 산림보호측면에서 관리계획 수립 대상이 되는 지역의 재해유형별(특히 산사태 관련) 위험지구 지정이 선행적으로 이루어져야함.
그러나 재해가 미 발생한 가운데, 붕괴위험지역 또는 재해방지구역으로 지정할 경우 토지 소유자에 의한 민원이 제기되어 실제 도시계획 행정을 추진하기 곤란한 것이 일반적 상황임.

②의 경우 인공사면은 급경사지붕괴법의 붕괴위험지역으로 지정하고, 자연사면은 산림보호법의 재해방지보호구역으로 지정하며 ③의 경우에는 급경사지보호법과 사방사업법에 의한 사업을 전개하고, 지속적 관리를 위해 풍수해저감종합계획과 연계하여 토사재해 위험 관리지구로 관리하면서 더 이상의 시설물 입지는 제한하는 방안이다.

이러한 일련의 적극적 법 적용을 통한 위험요인의 사전해소 및 위험지구의 지속적 관리를 위해서는 우선적으로 국내에 토석류 위험지구 지정, 붕괴위험지역의 지정 및 산사태 위험지구의 지정 사업이 선행적으로 추진되어야 한다.

이를 위해서는 현재의 "산사태 위험지역 지정" 방식의 관리체제를 표 3.4.1의 일본 사례와 같이 급경사지, 토석류 및 산사태 현상 등으로 유형을 세분화하여야하고 또한 이에 적합한 조사표, 조사기법의 체계화가 선행되어야한다.

표 3.4.1 우리나라와 일본의 산사태 재해위험지구 지정기준(단위: 개소)

구분	종류별(정의)	지정기준	위험지구 개소수
우리나라	산사태 : 산사면의 암석이나 토양의 일부가 돌발적으로 붕괴하는 현상	미규정(막연히 인명과 재산 피해가 우려되는 지역)	159
일본	급경사지붕괴 : 경사도 30도 이상인 사면(斜面)이 강우 등에 의해 무너지는 현상	경사도 30도 이상 사면높이 5m 이상의 구역	86,651
	토석류위험계류 : 산중턱 또는 계곡물의 토석류가 강우로 물과 함께 하류로 쏟아지는 현상	계곡의 선상부에서 하류의 구배가 2도 이상 지역	79,318
	산사태 : 사면(斜面)의 흙덩이가 지하수 등의 영향으로 아래로 이동하는 현상	산사태 토지 길이에 상당하는 거리 내 구역	11,288

현행 개발된 산사태 위험지 판정표(판정기준)은 현지 일선에서 실제 적용한다는 것은 사실상 어려운 실정이다. 특히 조사인자인 7개 유형, 즉 모암, 경사위치, 사면형, 토심 등의 경우 전문성이 높아 대부분 경험이 부족한 일선실무자가 이를 조사하기 어려우며, 조사면적 또한 10×10m의 국소면적에 불과하여 전체위험지에 대한 정도(精度)가 낮을 우려가 있어 새로운 개선책이 요구된다. 뿐만 아니라 지형도(1/25,000) 등을 이용, 도상에서 산사태위험지라고 미리 가정하고 수명의 전문가로

팀을 구성하여 현장에서 실제 사면을 답사하여 일일이 흙을 파서 토심을 재고 경사 측정을 하고 모암의 종류(퇴적암, 화성암, 변성암, 화성암 등)를 식별하고 그 결과를 야장에 기록해야 하는 등 전문성과 업무난이도가 매우 높으며, 또한 “산사태 위험지 판정기준”에 의한 산사태위험지의 지정은 고도의 전문성, 많은 인원의 동원, 작업물량의 과다 등 기피요인이 많아 일선 시·군·구에서 사실상 적용을 하지 않고 있는 현실이다.

현재의 “산사태 위험지 판정기준”과 같은 국소적이고 높은 전문성, 조사의 복잡성 등을 타개할 수 있는 기준을 마련해야 하는데 이를 위해서는 다음과 같은 점에 주의해야 할 것이다.

산사태 발생으로 주민의 생명·재산에 피해를 줄 수 있는 감수성(感受性)이 높은 곳 중심으로 산사태 위험지를 지정해야만 사전 예방대책 강구 등 운용에 효율적이다. 즉, 산사태가 발생하여도 하류에 미치는 영향이 없을 경우 일종의 자연현상에 불과하다고 할 수 있으므로 예상 피해지 중심의 분류체계 전환이 필요하다.

현 행	⇒	개 선
▪ 주택, 주요시설 등 주변상황도 고려하거나 국소적 정밀성이 너무 높아 실현에 어려움		▪ 실무적으로 쉽게 적용할 수 있도록 단순·명료하게 기준마련
▪ 대상 : 주택배후사면		▪ 대상 : 주택배후사면, 산지, 계류지 포함
▪ 결과 : 대상지역이 적어서 관리에 용이하나 재난관리 체계로 승화시키기에 어려움이 있음		▪ 결과 : 대상지역이 많아짐으로 종합적인 시스템이 구축되어야 함

그림 3.4.2 산사태위험지의 판정현황 및 개선방향

산사태 위험지 지정이 가장 중요한 핵심은 관련인자를 세부적으로 조사하여 지정하는 과정상의 정확성보다는 집중호우 시, 피해감수성의 유무가 더욱 중요하다고 할 수 있다. 산사태발생 확률이 아무리 낮더라고 한번 발생하면 인명·재산피해를 유발할 수 있는 곳 중심으로 지정되도록 개선이 요구된다.

표 3.4.2 산사태의 유형과 판정기준 개선방향

유형	지역개념	판정우선기준(예시)
배후산비탈 및 절개사면 붕괴형	산지를 인위적으로 절개한 사면이 많고 대부분 1ha 미만 소면적이며 위쪽으로 산림과 연결됨 ▪산림이 주택, 학교, 공단시설 등의 배후에 위치하며 거리상 가까움 ▪경사각은 30°이상 급경사 형태이며, 원인자가 복구한 곳도 있음 ▪일반적으로 산사태, 낙석위험이 있다고 판단되어지는 곳임 ※도로절개사면은 제외(도로법 적용) 이와 같은 곳으로 사면(비탈)로부터 50m 이내 지역을 지정	① 사면 또는 산비탈이 사방공법에 의해 미 복구 되어 나지형태로 피복이 안 된 곳이나 복구 했더라도 미흡한 곳 ② 비가 안 오는 평소에도 물이 용출되거나 흐르는 개소 ③ 흙의 깊이가 깊어 비가 오면 하중을 많이 받을 수 있는 곳 ④ 경사면에 변환점이 있는 곳 ⑤ 과거에도 무너진 사실이 있는 곳 ⑥ 경사면의 길이가 10m 이상 되는 곳 ⑦ 사면에 금이 갈라져 있는 곳 ⑧ 토질이 마사토, 푸석 흙 등으로 응집력 낮은 곳 ⑨ 위쪽 산림에 나무가 없거나 소경목인 곳 ⑩ 위쪽 산림이 천연림이 아니고 인공림인 곳
산지붕괴형	▪우리나라의 전형적인 산림상태를 이루며 골짜기와 계곡과 사면이 중첩되고 사면길이가 비교적 긴 곳으로 집수유역에 해당 ▪마을 등 취락의 위치가 배산임수(背山臨水)형에 해당 ▪작은 능선을 이루는 구릉지도 해당 ▪강수량이 모아지는 오목한 지형이 많음 위와 같은 곳으로 산자락 경계선으로부터 100m 이내 지역을 지정	① 임도 또는 송전철탑진입로 및 산판길이 있는 곳 ② 과거에 산사태 이력이 있는 곳 ③ 임내에 개간지, 고랭지채소밭, 폐광, 공원묘지, 군사시설(교통호, 벙커 등)이 있는 곳 ④ 인공림으로 구성된 곳(잣, 낙엽송 임지) ⑤ 벌채지 또는 미입목지
계안붕괴형	▪산속골짜기를 따라 비교적 깊숙하게 발달한 계류의 하류 또는 연·인접지역에 해당 ▪계류양안에 조성된 평탄지를 따라 취락과 농경지가 부분적으로 산재된 경우도 있으며 이 경우 퇴적토사가 많음 ▪상수가 풍부한 곳은 유원지등으로 개발 위와 같은 곳으로 주택·유원지 등이 있는 곳을 지정	① 상류집수유역은 넓으나 지류는 짧고 주계류의 계폭이 좁아서 집중 강우시 단위시간당 유수를 배출할 수 있는 충분한 통수단면이 확보되지 못할 것으로 예상되는 곳 ② 계상구배가 급한 곳 ③ 중류 또는 하류에 사방댐, 야계사방시설이 없는 곳 ④ 계류를 가로질러 임도박스, 교량의 교각 등이 설치되어 유수병목현상이 있는 곳 ⑤ 계상주변에 퇴적토사가 많고 토양층이 깊은 곳 ⑥ 상류에 벌채지 육림사업장등이 있는 곳 ⑦ 계상이 크고 작은 암석이 많이 있는 곳

그리고, 그림 3.4.3에서 나타낸 것과 같이 단계별 토석류 위험지구 관리개념을 체계화하는 것이 필요하다. 현재 산림청 등에서 구축한 산사태 예·경보 시스템을 기반으로 각 시군별 토사재해 위험지구를 판별한 후, 이들 지역을 중심으로 행정계통을 활용하여 피해 감수성이 높은 지역을 파악한다. 그리고 공신력 있는 조사항목에

근거하여 토사재해 감수성이 높을 것으로 파악되는 지역을 기존의 산사태 예·경보 시스템의 레이어를 추가한다. 이후 년차적인 사업추진 계획 수립 과정에서는 잠재 피해규모를 근거로 “우선예방사업지구”를 선정하고 최종적으로 예방사업 대상지구로 선정되면 공학적 정밀조사에 의해 예방사업 계획을 수립하는 과정을 거치도록 함으로서 피해지역 우선의 시스템이 구축될 수 있다.

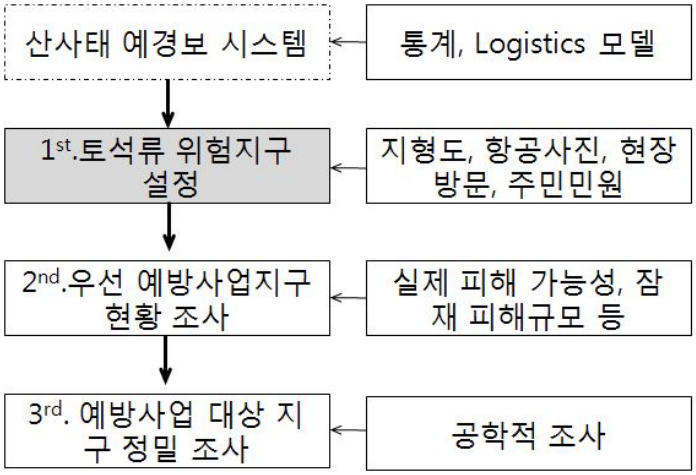


그림 3.4.3 단계별 토석류위험지구 관리 개념

두번째 단계에서 토석류 취약지구(또는 토사재해 취약지구)가 판별되면 발생빈도가 증가하고 규모가 대형화되는 토사재해에 방재자원을 집중할 수 있어 인명과 재산피해를 최소화할 수 있다.

또한 모든 취약지구에 토목구조물을 설치할 수 없는 여건을 고려할 때 상대적으로 작은 예산으로 국가재해관리시스템을 구축하고 재해예방의 외연(外緣)을 확대하는 효과를 가져 올 수 있으며, 장기적으로는 산지, 농지, 하천, 도로사면 등과 종합적으로 연계되는 종합적 재해예방 체계와 연계가 가능할 수 있을 것이다.

특히 상기의 자료를 기존의 GIS 기반 산사태 예·경보 시스템과 연동시킬 경우, 산사태 예보제 발령의 정확성을 높이고 재해예방의 효율성 확보할 수 있으며, 읍·면·리·동까지 토사재해 위험지도를 배포하여 지역주민이 실시간대로 스스로 예방·대피 등 조치가 가능해져 인명 및 재산피해의 절감에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

나. 방재적 토지이용의 추진

토사재해는 그 위험 현상이 명확하지 않으며, 그 개소수가 매우 많고 산재하며, 재해발생 잠재력을 평가하기가 매우 곤란한 특징이 있다. 이러한 이유로 재해위험지구로 지정한 곳보다 지정되지 않은 곳에서의 토사재해 발생빈도가 더 높은 것도 관리의 어려움을 더 한다고 볼 수 있다.

즉 도심 내에서는 제1종 지구단위계획의 수립을 통한 토지이용의 합리화, 구체화 및 기능, 미관을 증진시키도록 하고, 도심외곽 지역에서는 도시화가 예상되는 지역을 체계적으로 개발 및 관리하도록 한다. 또한 용도지역의 “자연환경보전지역”의 지정에 의한 개발행위의 규제, 용도지구의 “방재지구”지정에 의한 개발행위의 규제가 강구되어야 한다.

표 3.4.3 제1종·2종 지구단위계획의 비교

구분	제1종 지구단위계획	제2종 지구단위계획
수립목적	토지이용의 합리화, 구체화 및 기능·미관의 증진	도시화가 예상되는 지역을 체계적으로 개발·관리
대상지역	기성시가지나 대규모 신개발사업지구, 용도지역 해제지구 등 집약적 토지이용이 발생하는 곳	계획 관리지역, 개발진흥지구
지정면적	구역지정 면적기준 없음	최소 면적기준 제시
계획내용	의무적 수립항목에 관한 규정 없음	의무적 수립항목 지정
개발규모 및 행위제한	용도지역내의 허용 개발규모 및 행위제한 범위 내에서 완화	용도지역내의 허용 개발규모 및 행위제한 범위를 넘어 완화
기반시설의 설치주체	공공	공공 또는 민간

이러한 도시 계획적 측면의 개발행위 제한을 위해서는 해당 지구의 재해위험에 대한 객관적 조사, 평가 및 주민동의가 선행되어야 하며, 이러한 일련의 문제점을 고려할 때, 우리나라의 토사재해 위험지구 정책이 현재의 급경사지 붕괴방지법과

산림보호법에 근거하여 각각 급경사지, 토석류 위험지 등에 대한 조사가 이루어져야한다.

이러한 어려움을 극복하기 위해서는 방재적 토지이용의 추진이 필요하고, 적극적인 법 적용을 통한 위험요인의 사전해소 및 위험지구의 지속적 관리를 위해서는 우선적으로 국내에 토석류 위험지구 지정, 붕괴위험지역의 지정 및 산사태 위험지구의 지정 사업이 선행적으로 추진되어야한다. 특히 각 법, 제도를 운용하는 중앙부처의 노력보다는 지자체 차원의 노력이 선행되어야 제도 운영의 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

산지관리법의 경우에는 정의하는 산지전용 규정이 조림, 벌채, 토석 등 임산물의 채취에 의한 경우와 산지일시사용(임도 등의 산길 개설, 석재, 토사 채취)의 경우만을 적용하고 있어 주택 및 도로시설의 입지에 대한 규제는 한계가 있다.

다. 개선된 토사재해 위험구역 관리방안 제안

(1) 기초조사의 개선 및 내실화 추진 필요

기초조사를 실시하여 토사재해의 위험이 있는 구역을 지정한다. 이때 급경사지 붕괴, 토석류, 산사태 등 각각의 유형별 위험구역 조사-판정 기법을 객관화하고 이를 통하여 위험구역을 지정해야한다. 우리나라의 경우 산사태, 급경사지 등 수 종류의 평가표가 기 개발되어 있으나, 정확성에 대한 이의 제기가 있으며, 특히 지자체 방재행정 담당자들이 평가표를 활용할 여건과 준비가 되어 있지 않은 실정이다.

(2) 경계피난체계의 정비 및 제도 활성화 필요

급경사지의 붕괴 등이 발생할 경우에 주민 등의 생명 또는 신체의 위해가 생길 위험이 있다고 판단되는 구역으로 위험의 주지, 경계피난체계의 정비를 추진하여야한다. 자연재해대책법과 산림보호법에 근거하여 재해위험지구 대피, 피난과 산사태 위험 경보/주의보 제도가 있으므로 이를 활성화 시켜 제도적으로 정착시켜야 한다.

(3) 토사재해 정보 체계의 효율화 및 일원화 추진 필요

토사재해를 방지·경감시키기 위해서는 토사재해가 발생할 위험이 있는 구역에 있어서 토사재해에 관한 정보의 수집·전달, 예・경보의 발령, 전달, 피난, 구조 등의

경계피난 체제를 확립해 두는 것이 중요하다. 이를 위해서 토사재해에 관한 경계피난체제에 있어서 그 중심적 역할을 담당하는 풍수해저감 종합계획에서 경계구역별로 경계피난체제에 관한 사항을 지정하고 지속관리 하여야 한다.

일본의 경우에는 토사재해의 징후나 재해가 발생한 경우의 정보수집 및 긴급연락체제를 확립하기 위해 전국에 약 1,200개의 지방자치단체에 토사재해정보 창구를 설치하여 운영하고 있다. 과거에 토사재해에 의한 피해를 입은 지역, 또는 피해를 입을 염려가 크고, 보전대상이 많은 지구에 대하여 강우 등의 정보수집, 처리기기를 정비하여 “종합하천정보시스템”등에서 정보를 모아 토사재해에 대한 경계·피난활동을 지원하는 토사재해감시시스템의 고도화를 추진하고 있다.

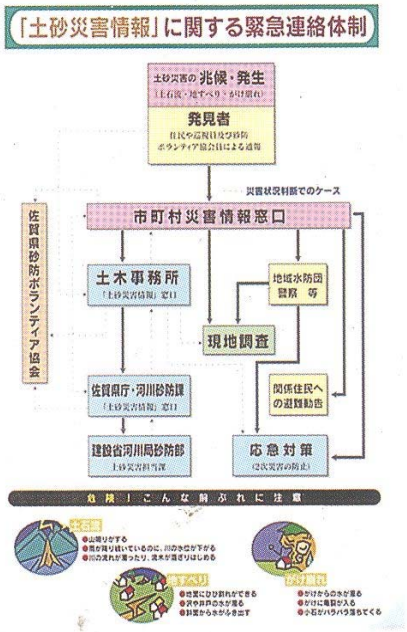


그림 3.4.4 토사재해정보에 관한 긴급연락체제 (일본의 사례)

그리고 토사재해로부터 인명을 지키기 위해 토사재해 관련정보를 주민과 행정기관이 상호 통지하는 시스템을 정비하는 정보화 사업을 지속적으로 추진하고 있다. 주요 사업내용은, 토사재해 위험개소 등의 정보를 지역주민에게 제공하고, 토사재해 위험구역 내에 거주하는 주민에게 조기피난에 참고가 되는 강우량 정보 등을 제공하는 시스템을 포함하고 있으며, 지역주민으로부터 토사재해의 전조현상 신고 창구를 설치하여 운용하고 있다.

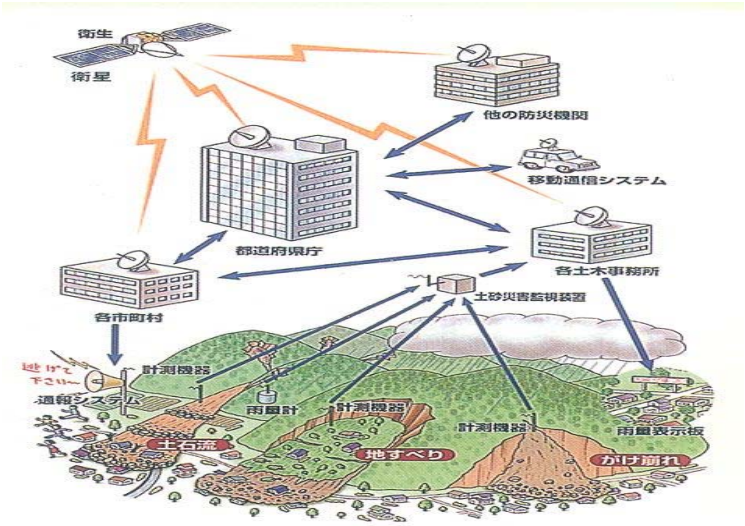


그림 3.4.5 토사재해 정보시스템 (일본의 사례)

(4) 재해방지 주민교육 및 훈련 강화 필요

토사재해에 의한 인적 피해를 방지하기 위해서는 주거 또는 생활 시설이 토사재해 위험성이 있는가 없는가, 긴급 시에는 어떻게 피난할 것인가 등에 대한 정보가 주민에게 정확하게 전달되는 것이 중요하다. 이를 위해 자치단체장은 풍수해저감종합계획에 근거한 지역별 특색을 고려한 토사재해에 관한 정보의 전달방법, 토사재해의 위험성이 있는 경우의 피난지에 관한 사항 및 기타 원활한 경계피난에 필요한 정보를 주민에게 주지시켜야 한다.

(5) 위험지구내의 개발행위 규제 필요

급경사지의 붕괴 등이 발생할 경우 건축물에 손상이 생기거나 주민 등의 생명 또는 신체에 현저하게 위해가 생길 위험성이 있을 것으로 판단되는 구역으로 특정의 개발행위에 대한 허가제, 건축물의 구조 규제 등을 하여야 할 것으로 판단된다. 이미 위험이 명확한 경우 시군 지자체 조례 제정에 의한 허가제응 도입하고, 잠재적 위험지의 경우, 용도지구, 용도지역 지정하는 것도 방안이 될 수 있다.

참고로 경계 구역 내에서 주택택지 분양 또는 사회복지시설, 학교 및 의료시설 등 재해약자 관련시설 건축행위에 대해서는 안전이 확보되는 경우에 한하여 허가하는 방안 등을 추진하여야 한다.

(6) 건축물의 구조 규제

경계구역에서는 주민 등의 생명 또는 신체에 현저하게 위해가 생길 위험이 있는 건축물의 손상을 방지하기 위해 급경사지의 붕괴 등에 따른 토석 등이 건축물에 미치는 힘에 대하여 건축물의 구조가 안전하게 하기 위해 거실이 있는 건축물에 대해서는 건축 확인 제도를 도입하는 것이 필요하다. 즉 구역 내의 건축물의 건축 등에 착수하기 전에 건축물의 구조가 토사재해를 방지·경감하기 위한 기준을 충족시키는가에 대하여 확인 신청서를 제출하고, 건축사의 확인을 받도록 하여야 한다.

(7) 건축물의 이전 등의 권고 및 지원조치 필요

급경사지 붕괴 등이 발생할 경우에 거주자 등의 생명 또는 신체 등에 현저한 위해가 생길 위험성이 있는 건축물의 소유자, 관리자 혹은 점유자에 대하여 특별경계구역으로부터 안전한 지역으로 이전하는 등의 토사재해 방지·경감을 위한 조치에 대하여 자지단체장이 권고하도록 추진하여야 한다. 일본의 경우에는 “주택금융금고의 융자”, “붕괴지 근접 등 위험주택 이전사업에 의한 보조” 등의 지원제도를 운용하고 있다.

(8) 주택건축 거래 제한 제도 도입 필요

특정의 개발행위에 있어서는 자치단체장의 허가를 받지 않으면 해당 주택의 광고, 매매계약을 체결할 수 없도록 하여야 한다. 또한 주택건물 거래업자는 해당 택지 또는 건물의 매매 등에 있어서 특정 개발행위의 허가에 대하여 중요사항을 설명할 의무를 부여하여야 한다.

제 5 절 산사태 및 토석류 대응 설계기준 및 개선 방안

1. 우리나라의 산사태 및 토석류 대응 설계기준

우리나라에서는 도로 및 철도등 SOC 구조물에 인접한 사면에서 발생 가능한 재해에 대하여 관련기준 및 대응 구조물에 대한 설계기준이 명확하게 정의 되어 있으나, 산사태 및 토석류는 적은 빈도로 발생되어 재해로서 피해인식이 높지 않고 기술 대응에 대한 수요가 많지 않아 전체적으로 토석류에 대한 조사 및 대책기술이 낙후된 상황이다. 우리나라의 대표적 대응 구조물 관련 기준을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 사방기술교본 (산림청, 2003)

우리나라의 사방사업 역사소개와 산지사방, 해안사방, 야계사방사업의 사방기술 공종, 공법의 소개와 시공요령 등이 설명되어 있으며 토석류를 위한 산지조림, 사방댐등의 기술적 대책이 포함되어 있다.

(2) 산악지 도로설계매뉴얼 (국토해양부, 2007)

토석류 발생여부, 대책설계, 관리단계별 조사 항목 제시하였다. 산지도로의 특성을 도로 설계 실무에 반영할 수 있도록 하였다. 주요 내용으로는 산악지 도로 선형계획 및 설계 기준, 도로사면 및 토석류 방지 대책, 산악지 도로 배수시설 설계, 산악지 도로의 교량 및 터널계획 등이 포함되어 산지도로의 설계기준이 한층 강화되었다.

(3) 수해예방을 위한 산지부 도로설계기준 (한국도로공사, 2007)

빈번한 국지성 호우로 인한 산지부 도로시설 피해 증가로 수해 예방을 위한 설계기준 상향조정 필요성이 대두되어 일반적 설계기준 보다 산지부 특성에 맞게 상향된 국토부의 기준과 고속도로 설계요령의 일부항목이 서로 상이하여 적용상 혼란이 예상되자 이를 보완코자 제정하였다.

(4) 고속도로 설계 실무 지침서 (한국도로공사, 2008)

토석류 조사 및 대책 적용 지침 연구결과를 반영하여 유역면적이 4㎢ 이하의 소유역을 대상으로 하는 토석류 조사, 대책설계를 위한 특성값 산정방법을 제시하였다.

(5) 고속도로 토석류 조사 및 대책 설계 지침(안) (한국도로공사, 2010)

토석류 재해로부터 고속도로의 도로 통행 기능과 배수시설의 기능 유지를 위한 토석류 대책시설의 설계방향을 제시하였다. 또한 토석류 가능구간 위험평가 및 위험등급화 지침(안)을 수립하여 토석류 발생 위험구간의 위험정도를 평가하고 위험등급을 부여할 수 있도록 활용방법을 제시하였다.

(6) 건설공사 사면 설계기준 (국토해양부, 2011)

토석류 발생가능 구간과 조사내용 및 대상구간을 정의하고 있으며, 과거 토석류 발생 구간, 유역이 넓고 경사가 급한 경우 유역면적 0.05㎢ 이상, 계곡경사 15° 이상을 위험지역으로 판정하고 있다.

(7) 도로배수시설 설계 및 유지관리 지침 (국토해양부, 2012)

토석류 조사와 대책의 필요성에 대한 일반적인 내용과 배수시설내 유송잡물 및 토사퇴적을 고려한 수리계산 방법 제시하고 있다.

2. 산사태 및 토석류 대응 설계기준 개선방안

산사태 및 토석류 조사결과를 바탕으로 현장의 지형 및 지질조건, 발생가능한 토석량을 산정하고 이에 방어시설의 장단점을 고려한 세부설계를 수행한다. 세부설계에 필요한 특성값 산정 및 현장여건을 고려한 최적공법의 설계를 도출하는데 있어서, 현재 우리나라에서 각 관리주체별로 특성값 기초조사등의 사업이 관련부처에 나누어져 있다. 대표적인 사례로서, “도로관리기관”과 “산림관리기관”의 이원화로 인하여 실제로 피해를 받는 도로관리기관(한국도로공사, 국토관리청 등)에서 주도적으로 대책공법을 적용하기 어려운 실정이며. “자연재해대책법(소방방재청)”,

“사방사업법(산림청)” 에 따라 다양한 법률적 해석이 가능해 종합적인 기준을 정립하는 것이 어렵다.

하천의 경우에서도 지자체별로 재난안전과에서 풍수해 저감 종합계획을 수립하여 하천에 대한 저감대책을 수립하고 있는 실정이나 국가하천, 지방하천 등급에 따라 토석류 대책을 별도로 선정하여 관리하고 있는 실정이므로 향후 각 기관별로 상호 연계가 반드시 필요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 다음과 같은 개선 방안을 제시하였다.

(1) 산사태 및 토석류 대응 설계기준의 코드화

시설물 관리주체 또는 당당 부서위주의 설계기준은 각 기관마다 별도의 설계법을 제시하게 되고, 각종 설계 인자의 조사, 대응 구조물의 효율성 평가에 통일된 방향을 제시하지 못하므로서 중복된 비용을 발생시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 산사태 및 토석류 대응 기준을 코드화 하여 범기관, 법부처에서 적용할 수 있도록 각종 용어를 통일 시키고 종합적인 설계법을 정리하여 사용할 필요가 있다. 통일 설계법을 기준으로 일부 세부항목은 각 관리주체 또는 각 부처별 특수성을 반영하면 지금보다 효율적이고 통일적인 설계법이 정립될 것으로 파악된다.

(2) 한국형 토석류 방어 구조물 및 설계법 개발

토석류 방어 구조물의 설치는 프랑스, 오스트리아에서 시작되었으며, 1800년대 말 일본에 도입된 이후로 일본에서는 수많은 사방시설들이 설치되어 왔다. 하지만 이러한 사방시설은 계곡을 차단시키는 댐형태로 설치되었으며 지속적인 유지관리가 필요하고 자연환경 파괴와 심미적인 관점에서 많은 비판을 받고 있는 실정이다.

우리나라의 지형 및 실정에 맞는 다앙한 조건에서 선택적으로 적용가능한 자체설계법 및 공법의 개발이 필요한 실정이다.

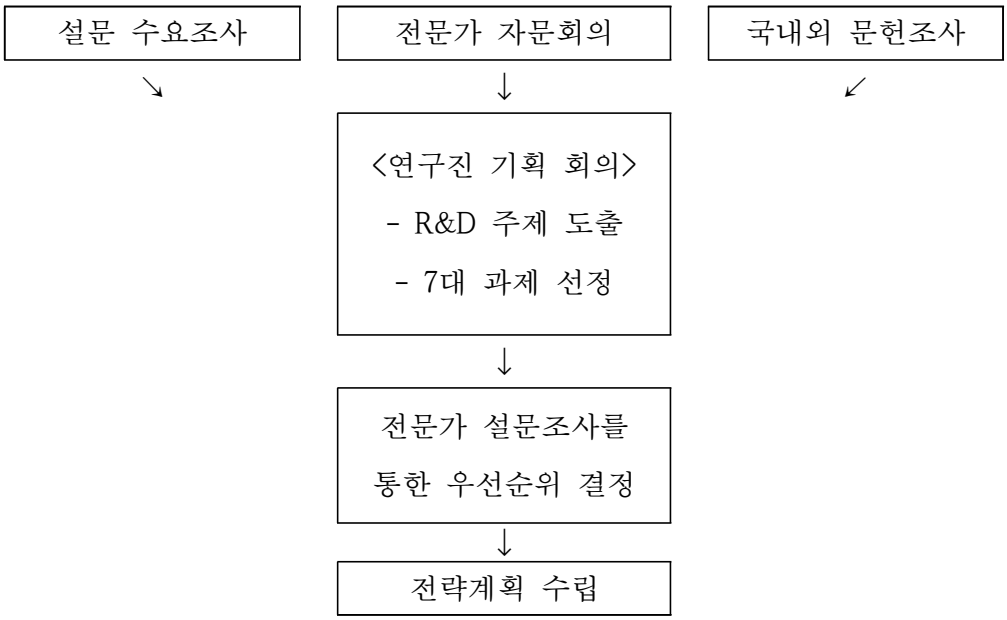
(3) 토석류 발생이력 및 설계인자의 DB 구축

토석류는 자연재해의 하나로서 발생빈도가 많지 않으며 지역별로 발생형태와 규모, 재료의 특성이 다양하므로 특성분석을 통한 기술발전을 위해서는 토석류 발생사례에 대한 자료구축이 매우 중요하다. 이를 위해서는 토석류에 대해서 조사해야 할 내용과 조사방법을 체계화시켜 조사기준 정립이 선행되어야 하고 조사결과를

DB화 할 수 있도록 표준화하는 것도 필요하다. 일본 사방학회의 경우 자국뿐 만 아니라 전 세계적인 토석류 발생사례와 대책공법, 신기술 자료를 공유하기 위한 인터넷 자료 공유 시스템을 운영하고 있으므로 이와 같은 형태의 시스템의 도입이 요구된다고 할 수 있다.

제 6 절 토사재해 대응 기술 R&D 로드맵

본 연구에서는 산사태 및 토석류에 대한 국가적 차원의 R&D 대책을 수립하기 위하여 국내외의 산사태 및 토석류 관련 기존 연구과제의 성과물을 분석하고, 미래기술에 대하여는 전문가 수요조사를 통하여 토사재해 대응기술 주제를 선정하였다. 그리고 도출된 주제에 대하여 전문가 설문조사를 통하여 우선순위 및 시급성을 평가하여 대응기술 R&D 로드맵을 제시하고자 한다. 다음 그림은 전략계획 수립의 절차를 보여주고 있다.



1. 국내외 연구동향 조사

본 연구에서는 기존의 연구동향을 파악하기 위하여, 관련 국내논문 및 국내 기술기사 399건, 미국 USGS 공개보고서 48건, 일본 논문 및 기술기사 476건을 분석하였다. 산사태 및 토석류 대책구조물과 같은 대응 요소기술을 “방지기술”로 구분하였으며, 사후 복구와 관련된 기술을 “복구 및 평가 기술”, 행정시스템 등의 소프트한 대책은 “제도 및 정책”, 사전 예측 및 예·경보 관련 기술을 “조사 및 예측”으로 구분하여 정리하였다.

가. 국내연구동향

관련 국내논문 및 국내 기술기사를 년도별로 파악하여 그림 3.6.1에 나타내었다. 국내의 산사태 및 토석류 관련 연구는 기후변화에 대한 사회적 관심을 반영하는 것과 같이 꾸준히 증가하고 있으며, 과거보다 다양한 연구가 진행되는 것을 나타내었다. 복구관련 연구 또한 꾸준히 증가하는 경향을 보였으나, 조사 및 예측에 관련한 연구가 많은 반면, 소프트한 대책을 다루는 제도 및 정책관련 연구가 절대적으로 부족한 것이 특징이다.

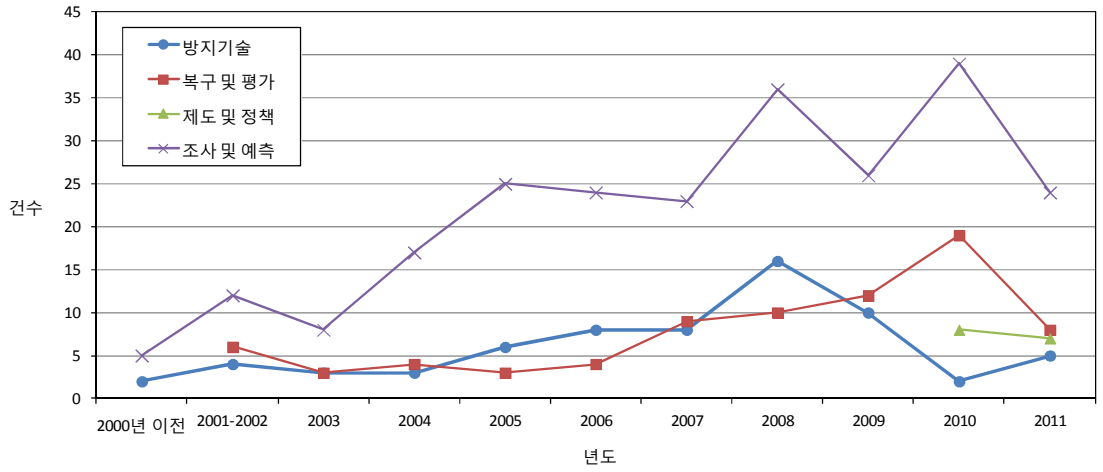


그림 3.6.1 국내 논문 및 기술기사 동향

나. 국외연구동향

국외의 연구동향을 파악하기 위하여 미국의 경우에는 미국지질조사소(USGS)에서 공개된 보고서를 분석하여 그림 3.6.2에 나타내었다. 그리고 일본에서 발표된 논문 및 기술기사를 분석하여 그림 3.6.3에 나타내었다.

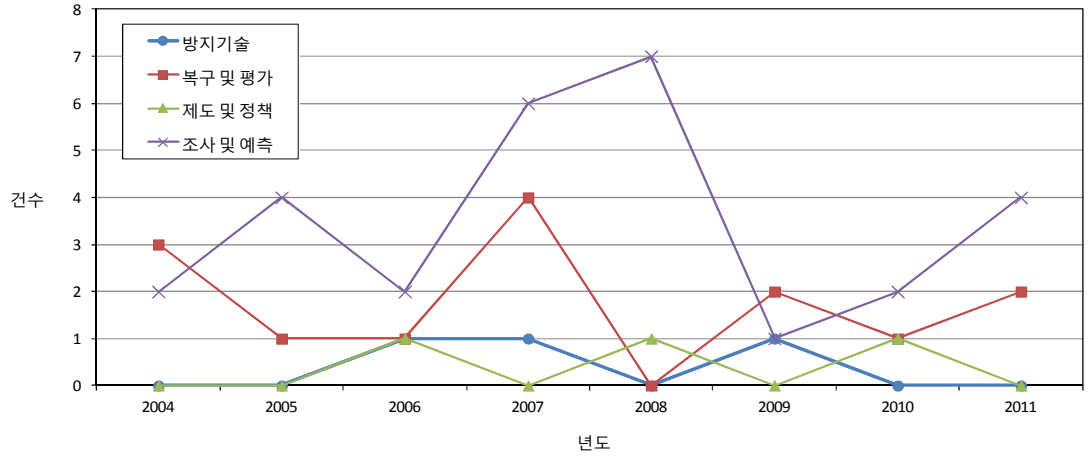


그림 3.6.2 미국 USGS 공개 보고서 동향

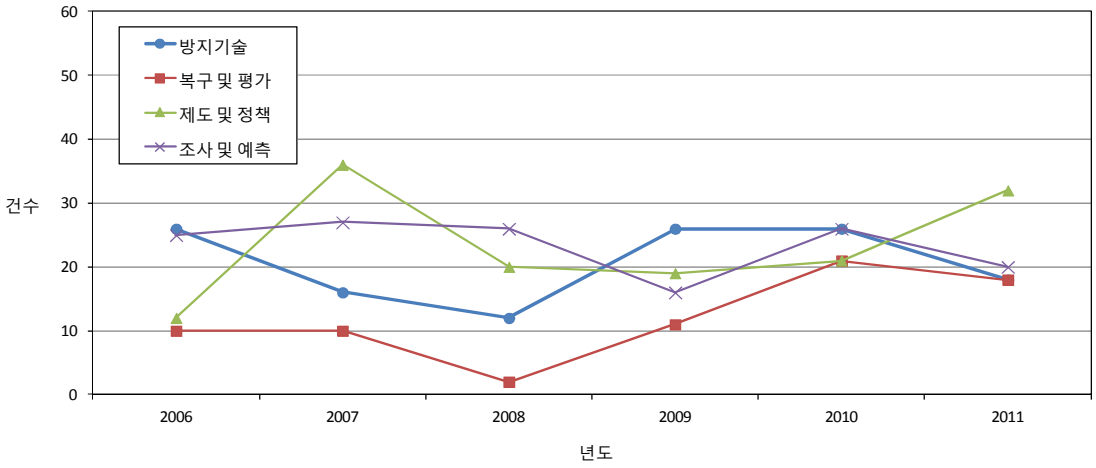


그림 3.6.3 일본 논문 및 기술기사 동향

미국과 일본 모두 우리나라와 같이 조사 및 예측에 관한 연구가 꾸준히 진행되고 있으며, 미국의 경우에는 방지 기술에 대한 연구가 상대적으로 적은 것이 특징이다. 일본의 경우에는 “토사재해 방지법”이 시행되고 위험지역 주민에 대한 규제와 피난 훈련 등이 의무화 되어 있어 소프트한 대책에 대한 연구가 많이 수행되었다. 일본의 경우에는 일상적으로 재난이 발생하는 상황을 반영한 것으로 보이며, 재해대응 인프라를 구축하는 것에는 많은 시간과 막대한 비용이 소요되며 대책 인프라가 건설되기 전에 발생되는 재난에 대하여 다양한 형태의 대응에 대하여 연구가 수행되었다고 판단된다.

2. R&D 주제 도출

전문가 수요조사 등을 통하여 도출된 대표적인 향후 연구대상 주제를 소개하면 다음과 같다.

▣ 효과적인 토석류 예측을 위해서는 강우특성을 고려한 산사태 위험도 등급 판정과 산사태 예·경보 시스템 개발이 필요하다. 특히, 단기간 집중호우 및 장기간 지속적인 강우에 따른 산사태 및 토석류 발생에 대한 연구가 시급하며, 강우의 지속기간별 발생빈도에 따른 산사태 혹은 토석류 발생 위험도 설정에 대한 연구가 필요하다.

▣ 방재 시설물 설계 목적에서는 발생 재현기간에 대한 고려가 필요하며 이에 대한 기준이 필요하다. IDF 곡선과 토석류 발생 강우를 비교 분석하여 토석류 발생 재현기간에 대한 정량화가 필요하다. 현재 토사재해를 유발하는 강우에 대한 일부 연구사례가 있지만 지역별 강우재현주기와 함께 분석한 사례는 일부(김경석, 2008)를 제외하고 찾아보기 어렵다. 토사재해를 유발하는 강우특성을 지역별로 강우강도-지속시간-재현주기 형태로 분석하면 지역별 강우특성에 따른 재해민감도를 확인할 수 있고 산사태나 토석류와 같은 토사재해 대책 구조물 등을 설계할 때에도 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

▣ 국내 산사태나 토석류 예보 기준은 시간최대강우량 혹은 연속 일강우량을 기준으로 설정하고 있으나, 짧은 지속기간에 큰 강우강도를 가지는 국지성 호우가 급격히 증가하고 있는 최근의 호우패턴을 고려할 때, 1시간 이하 강우량을 이용한 토석류 발생시점에 대한 분석과 검증도 필요하다.

▣ 토석류가 빈번히 발생하는 산지지역에 대하여 국지성 집중호우에 대비하여 강우레이더 등의 활용 기술의 개발과 체계의 마련이 요구된다. 이는 현실적으로 지상관측망인 AWS나 읍면동 강우기록계로는 관측망 밀도나 시간적 선행 강우예측에 한계가 분명하기 때문이다. 최근, 레이다 데이터를 이용한 초단기 예측은 재해관리에서 중요한 요소가 되고 있다. 특히 도시홍수나 산악홍수 같은 경우는

30분이내의 예보가 인명 및 재산 피해를 줄이는데 상당히 중요한 역할을 하고 있다.

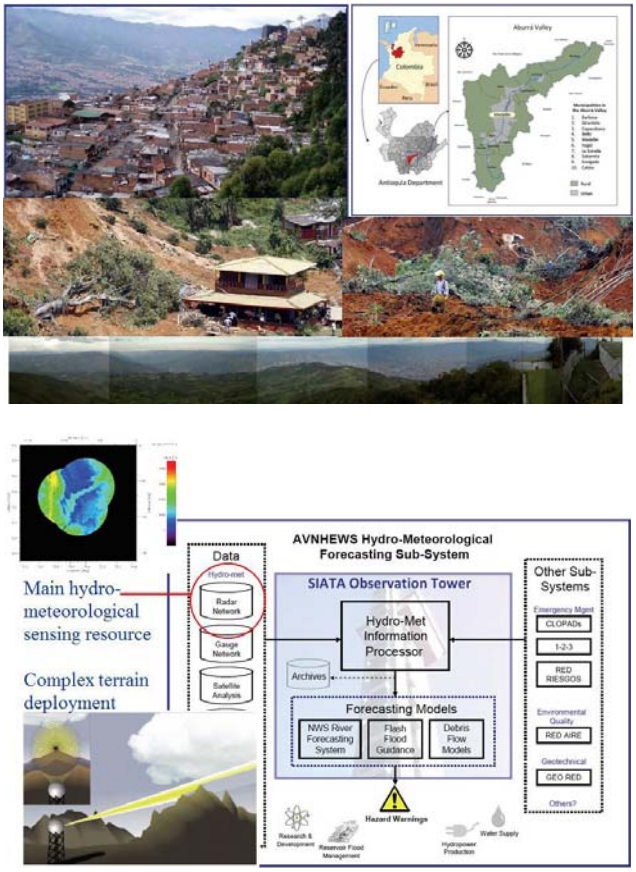


그림 3.6.4 콜롬비아 메델린 지역의 산사태 경보시스템 예
(레이더에 의한 강우추정을 바탕으로 산사태의 가능성을 추론하여 경보를 발령하는 시스템)

▣ 기존의 강우와 토석류 발생을 직접 연계한 방식의 토석류 예·경보 방법의 개선이 필요하다. 이를 위해서는 AWS 공간 상세화 기술, 레이더 강우 처리 및 적용기술, 토석류 모형의 선정 및 적용 기술, 현장 적용성 검증 등의 기술 혹은 방안이 필요하며 마지막으로, 토석류에 대한 한국형 예측 및 예·경보를 위한 레이더, GIS 및 첨단 모바일 기술 등을 활용한 핵심기술 및 활용시스템 개발이 필요하며, 특히 강우레이더와 산지 토석류 모형을 연계한 초단기 토석류 예·경보 시스템에 대한 연구가 시급하다.



그림 3.6.5 GIS 및 첨단 모바일 기술에 기반한 재해. 재난 경보시스템

▣ 강우시 경사면에서의 토양수분의 거동을 분석함으로서 기존의 산사태 및 토석류 발생지역의 사례를 적용하여 검증한다면 침투량 및 토양수분의 변동에 의한 수문학적 측면에서의 발생기준을 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 위해서는 분포형 수문모형 적용 시 정밀격자에 의한 분석이 필요하며 강우량 역시 시간적, 공간적 특성을 고려한 1시간 이하의 자료를 이용하여 발생시점에 대한 정확한 분석 및 검증이 필요할 것으로 사료된다.

▣ 강우로 인한 천층 산사태는 대부분 강우로 인해 발생하는 침투로 인해 습윤전선이 하강하고 지하수위가 상승함으로써 일시적으로 공극수압이 증가하는 현상에 기인한 것이다. 이를 해석하기 위해서는 사면 안정모형과 토양수분을 추적할 수 있는 수문모형과의 결합이 필요하다. 하지만 토양수분의 추적은 지역적으로 다른 토양의 특성을 충분히 반영할 수 있어야 하므로 해외에서 적용성이 입증된 경우라 하더라도 국내에 적용성을 보장하기는 어렵다. 이에 국내 실정에 맞는 적절한 수문모형을 이용할 필요가 있으며 이를 사면안정모형과 결합함으로써 국내 실정에 맞는 물리적기반의 모형 개발 및 USACE(US Army Corps of Engineers) MSDPM(Multi-Sequence Debris Prediction Model)와 같은 통계학적 모형을 이용한 소규모 유역의 토석류 예측 기법 및 기준을 확립할 필요가 있다.

▣ 기존의 산사태 및 토석류에 대한 연구는 산악지 및 지방부에서 많이 이루어 졌

으나 최근의 상황을 반영한 도심지에 소재한 사면에 대한 특화된 연구가 시급한 것으로 나타났다. 그리고 산사태 및 토석류 예·경보 체계와 같은 시스템의 예측 정확도를 높이는 것과 동시에 행정 및 제도에 직접 운용할 수 있는 연구가 시급하다고 판단된다.

▣ 입체적 국토관리를 추진하고, 넓게 보고 빠르게 분석하는 첨단 국토관리체제를 구축 할 수 있는 연구가 필요하다. 당초 안전한 지역이라 하더라도 상류부 산지의 여건변화에 따라 토사재해 발생 가능성이 변화함으로, 넓은 국토를 빠르고 정밀하게 점검할 수 있는 정밀국토관리 기법의 도입이 필요하다. 예를 들어, 우리나라의 아리랑 3호('12년 5월 발사) 위성영상의 해상도는 70cm 급이고, 인터넷 포털에서 제공되는 정사항공사진(Ortho Aerial Photo)의 해상도는 20cm 급이어서 토사재해 위험지의 파악과 관리에 사용하는 기법은 R&D를 통한 개발이 유용하다고 판단된다.

▣ 방호체계의 강화를 위한 제도 개선 연구가 필요하다. "풍수해저감종합계획(소방방재청)" 은 토사재해 관련 방재분야의 주요 행정계획이지만, 국토 및 도시 관리계획과의 연계성이 낮은 실정으로서, 토사재해 우려가 있는 지역에 시설입지가 불가피한 경우, 예정지 주변에 보다 강화된 토사방호 시설과 건축물 설치 기준을 엄격하게 적용할 수 있도록 방재 및 국토분야 계획의 연계성 확보를 위해 계획 위계별 적용 기준과 토지이용 용도별 관리 기준을 마련할 수 있는 연구가 필요하다.

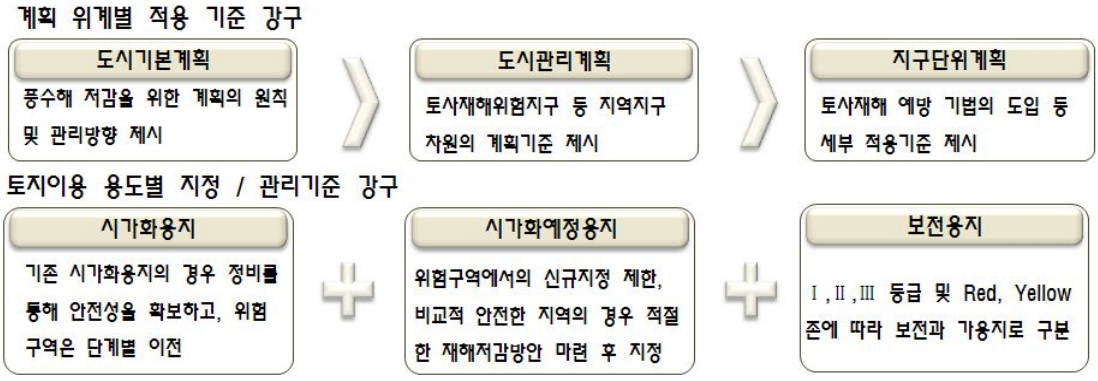


그림 3.6.6 풍수해 저감계획을 통한 도시계획 상 토사재해위험지구 관리 방안 (예)

▣ 공동체의 방재문화를 육성하고 토사재해 관리의 주민참여 활성화를 유도하는 제도개발이 요구된다. 해당 지역의 지형이력을 잘 이용하면, 토사재해 발생 가능성을 판단할 수 있으므로, 해당지역 주민들의 적극적 참여 유도가 필요하고, 마을 주변 토사재해 위험지의 신속한 현황 파악을 위해 스마트폰 App기반의 “토사재해 위험지 이력등록 사업”을 추진하고, 등록된 위험지구에 대해 우선적으로 “환경사방사업[15)]” 등의 사업을 추진하면서, 소요되는 요소기술에 대한 R&D 사업 또한 보조를 맞추어 시행하는 것이 바람직하다. 광범위하게 발생하고 빈번한 토사재해에 대비하기 위하여 “자기책임형” 선진국형 방재문화 수립에 대한 공감대가 형성될 수 있도록 주민방재활동 및 참여를 지원하는 기술적 시스템, 정책 및 제도에 대한 개발 노력이 선행되어야 한다.

3. 중점과제 선정 및 연구 우선순위 결정

국내외 자료조사 및 전문가 수요조사를 통하여 표3.6.1과 같은 과정으로 7개의 R&D 주제를 도출하였으며, ① 토사재해 저감 국토안전 방재기술의 정책 인프라개발, ② 토사재해 인지 조사 및 안정화 기술 개발, ③ 미래형 다목적 토사재해 지능형 초단기 감지기술 개발, ④ 한국형 토사재해 예측지도 플랫폼 구축, ⑤ 도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리 시스템 개발, ⑥ 토사재해 위험도 산정 및 피해가시화 평가기술 개발, ⑦ 토사재해 SOC 인프라 예방 및 복구 관리 체계 구축의 7개 주제가 제시되었다.

제시된 주제에 대하여 전문가의 설문을 통하여 실현가능성, R&D 시급성, 주제의 공공 이익성, R&D 혁신성, 대국민 서비스의 수준을 평가하여 그림 3.6.7에 나타내었다.

15) 사방사업을 통하여 지역안전 확보, 주변 자연과의 조화 및 주민의 윤택한 생활이 영위될 수 있도록 시설물 구조, 재료 및 공간 배치 등을 고려하여 실시하는 사방사업

표 3.6.1 중점과제 도출 과정

사회적 요구	키워드 도출	중점과제 분류
정책개발 / 제도개선	방재계획, 설계기준, 시설기준, 도시방재계획, 도시계획, 인적피해 저감계획, 안전 도시계획, 방재정책, 산림정책, 숲 가꾸기, 등산로 관리 정책, 인공신경망기법, 강우예측, 사면정보, 문화재 시설관리제도, 군사시설 관리제도, AHP기법, 제도개선, 재해특별 관리지구, 토사재해 기술지원 센터, 토사재해방지법, 방재시설 유지관리 시스템, 재해통합관리 시스템	토사재해 저감 국토안전 방재기술의 정책 인프라 개발
토사재해 대응 공공시스템의 효율성 향상	도심지 토사재해 대응 제도개선, 배수로, 바닥경사, 피해지 분석, 피난설비, 토사재해 회피설비, 방재쉘터, 피난매뉴얼, 피난훈련, 피난시스템, 경계피난시스템, 토사재해 대응 도시행정지원체계, 도심지 공원 관리, 피해위험도,	도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리 시스템 개발
	가시화 시스템, 가상현실, 액상화, 유동물질 가시화 파라메터 도출, 3차원 토사유출 가시화, 관리시스템 가시화, 대응구조물 가상현실 평가, 가상현실 관리시스템	토사재해 위험도 산정 및 피해 가시화 평가기술 개발
	보수보강, 보수보강재료, 내구성, 지반보강, 옹벽, 배면 토체, 긴급 대응, 피해규모산정, 사방댐, 흙막이, 대책공법, 토석류 제어시설, 재해복구차량, 무인화시공 및 복구, 복구공사관리, 토사재해 대응시설 유지관리, 토사재해 대응시설 검증	토사재해 SOC 인프라 예방 및 복구 관리 체계 구축
토사재해 대응 요소기술 개발	물리탐사, 안정해석, 천층 거동조사, 고지형 분석, DEM, 간극수압, 충격력 산정, 원심모형실험, 강우예측, 수문모형, 매커니즘, 축소모형실험, 원격탐사, 항공사진, 지반조사, 전단강도, 투수계수, 산사태 민감도, 인공강우실험, 실내모형실험, 최대지속강우량, 토지피복상태, 사태물질, 수리모형실험, 돌발홍수, 현장모니터링, 함수비, 토양강우지수, 모델링, 식생, 위험지도 제작기법 개발	토사재해 인지 조사 및 안정화 기술 개발
	계측, 정보화기기, 모바일, 초단기 물리탐사, 현장조사차량, 항공라이다, 무선센서네트워크, 항공레이저측량, 유비쿼터스, 진동감지센서, 복합기능센서, 융합기술, Sensing, 공중관측 장비개발, 초단기 예보 장비, 토사재해조사 헬리콥터 개발	미래형 다목적 토사재해 지능형 초단기 감지기술 개발
	국토정보, 토사재해 유형, 산림생태계, 산림복지, 산림자원, GIS, 예측시스템, 예경보시스템, 하천퇴적, Web, 위험지도, 예측지도 DB구축 사업, 예측지도 활용 교육, 예측지도 메뉴얼	한국형 토사재해 예측지도 플랫폼 구축



그림 3.6.7. 전문가 설문을 통한 AHP 가중치 분석 결과 (계속)



그림 3.6.7. 전문가 설문을 통한 AHP 가중치 분석 결과

전문가 설문조사를 반영하여, 산사태 및 토석류 대응 기술개발 로드맵 및 전략계획을 제시하였다. 7개의 주제에 대하여 국내의 여건을 반영하여 시급한 과제를 초기에 수행하도록 하였으며, 중장기적인 목표로서 제시되어야 할 부분은 로드맵의 후반기에 배치하였다.

중장기적으로 우리나라에서도 정책 및 제도에 대한 연구가 충분히 확대되어야 한다고 판단되며, 효율적인 복구를 위한 연구 또한 필요한 것으로 나타났다.

4. 토사재해 대응 기술 R&D 로드맵

가. 비전 및 목표

비 전	토사재해로부터 안전한 삶과 SOC-인프라 구축

목 표	▪ 토사재해 발생 예측 평가 기술 확보 ▪ 토사재해 회피 제어 피난 인프라 기술 확보 ▪ 인명피해 최소화를 위한 토사재해 선진화 체계 구축

나. 추진중점과제

추 진 중 점 과 제	• 토사재해 저감 국토안전 방재기술의 정책 인프라 개발 • 토사재해 인지 조사 및 안정화 기술 개발 • 미래형 다목적 토사재해 지능형 초단기 감지기술 개발 • 한국형 토사재해 예측지도 플랫폼 구축 • 도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리 시스템 개발 • 토사재해 위험도 산정 및 피해 가시화 평가기술 개발 • 토사재해 SOC 인프라 예방 및 복구 관리 체계 구축

다. 7대 전략과제

(1) 토사재해 저감 국토안전 방재기술의 정책 인프라 개발

❑ 필요성 및 목적

○ 현재 설계기준 개선주기와 연구 및 기술 대응정책으로는 매년 토사재해가 반복되어 국가의 인적·물적 피해가 증가됨.
○ 급변하는 기후변화에 대응하는 토사재해 방재 정책 및 설계 기준 체제 구축

❑ 주요내용 및 성과

○ 토사재해 복구력에서 대응 및 예방을 위한 재해 제도 기준 마련
○ 토사재해 ICEM 통합 지원센터 운영

(2) 토사재해 인지 조사 및 안정화 기술 개발

❑ 필요성 및 목적

○ 토사재해 발생 조사는 발생 후에 대한 것이 대부분으로 사전 현장조사와 강우가 고려된 확률적 통계에 의한 인지 필요함.
○ 토사재해 발생지역에 대한 조사 및 탐사 기법을 개발

❑ 주요내용 및 성과

○ 토사재해 붕괴지역의 인지 예측 기술
○ 고지형 분석을 통한 토사재해 발생 안정화 복원 기술

(3) 미래형 다목적 토사재해 지능형 초단기 감지기술 개발

❑ 필요성 및 목적

○ 복합 토사재해에 대한 실시간 강우, 지형·지질 특성을 고려한 실시간으로 토사재해를 감지하지 못하여 피해규모가 커지고 있음.
○ IT, ST 기술을 융합한 초단기 토사재해 예보기술이 필요함.

❑ 주요내용 및 성과

○ 한국지형에 적합한 지능형 초단기 토사재해 예보시스템 개발
○ 다목적 smart sensing 기술을 이용한 토사재해의 실시간 리스크 예측기술 개발

(4) 한국형 토사재해 예측지도 플랫폼 구축

❑ 필요성 및 목적

○ 국가적으로 산사태 재해 예측지도는 구축되어 있으나, 토석류 재해에 예측지도는 구축되어 있지 않음.
○ 설계호우강도에 따른 토사재해 평가 및 위험지역 선정에 대한 예측지도 구축

❑ 주요내용 및 성과

○ 토사재해 평가 및 위험지역 선정 기법 확립
○ 지역별 특성을 반영한 국가 토사재해 예측지도 구축

(5) 도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리 시스템 개발

❑ 필요성 및 목적

○ 최근 도시부의 토사재해로 인적피해가 발생하여 도시의 특성을 고려한 토사재해 회피 및 관리를 위한 기술이 필요함.
○ 선진국형 토사재해 방지를 위한 행정지원 및 통합관리 체계 기술 개발이 절실히 필요한 실정임.

❑ 주요내용 및 성과

○ 도시방재형 토사재해 회피 및 복구 기술 확보
○ 토사재해 방지를 위한 행정 및 정책지원 체계 통합관리 시스템 개발

(6) 토사재해 위험도 산정 및 피해 가시화 평가기술 개발

❑ 필요성 및 목적

○ 토사재해 지역은 토사이동에 의한 저경사 지역으로 지형 및 지질요소에 의한 위험도 평가, 안전 영역분류에 모순이 있음.
○ 토사재해 발생 조건과 이동 방향, 영향 범위를 고려한 재해위험도 평가 기술과 체계적이고 효율적인 투자우선 선정 기술 개발이 필요함.

❑ 주요내용 및 성과

○ 실시간 강우 및 지반활동을 고려하여 신뢰성 있는 재해위험도와 토사재해 위험지수 모델 개발
○ 토사재해 Web 기반 토석류 예·경보 시스템과 피해지역의 복구력에 의한 경제적인 붕괴위험지역 투자우선 순위 선정 기술 개발

(7) 토사재해 SOC 인프라 예방 및 복구 관리 체계 구축

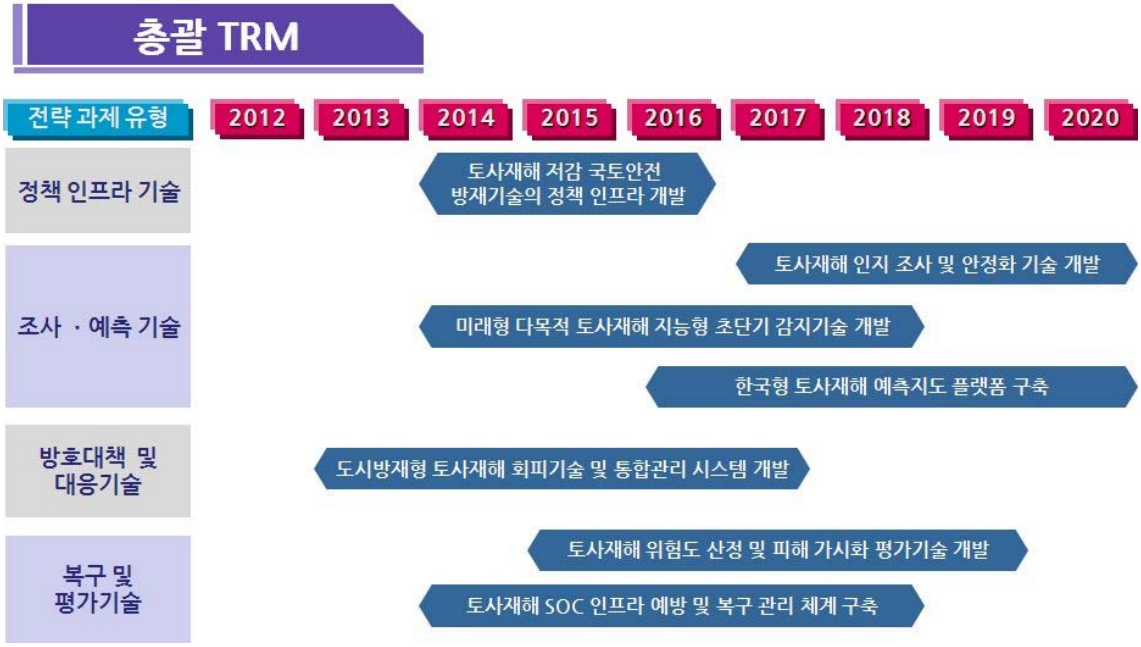
❑ 필요성 및 목적

○ 이상기후에 대한 자연재해 사전예방이 불가하여 체계적인 사후재해복구 통합관리 시스템을 통한 제2·3의 추가 피해 예방 필요함.
○ ICT, GIS 등 3차원 설계 관리를 통한 재해 규모 조사, 분석 자동화, 설계-시공-품질 모니터링 통합 관리 시스템 구축이 필요함.

❑ 주요내용 및 성과

○ 첨단 ICT 기술을 활용한 사후 SOC 재해피해 규모-심도 조사 및 분석 자동화 기술 개발
○ 지형공간정보 및 3D 입체 설계 기술융합 기반 대규모 복합 사후재해복구 사업관리지원 시스템 개발

라. 전략과제 총괄 TRM


총괄 TRM
전략 과제 유형
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
정책 인프라 기술
토사재해 저감 국토안전
방재기술의 정책 인프라 개발
조사 · 예측 기술
토사재해 인지 조사 및 안정화 기술 개발
미래형 다목적 토사재해 지능형 초단기 감지기술 개발
한국형 토사재해 예측지도 플랫폼 구축
방호대책 및
대응기술
도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리 시스템 개발
복구 및
평가기술
토사재해 위험도 산정 및 피해 가시화 평가기술 개발
토사재해 SOC 인프라 예방 및 복구 관리 체계 구축

마. 전략과제 연구 사업비 총괄

(단위, 백만원)

	전략과제명	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	소계
정책 인프라 기술	토사재해 저감 국토안전 방재기술의 정책 인프라 개발		600	700	700					2,000
조사 및 예측 기술	토사재해 인지 조사 및 안정화 기술 개발					3,000	3,000	5,000	5,000	16,000
	미래형 다목적 토사재해 지능형 초단기 감지기술 개발		3,000	3,000	3,000	3,000	3,000			15,000
	한국형 토사 재해 예측지도 플랫폼 구축				1,000	1,000	3,000	3,000	2,000	10,000
방호 대책 및 대응 기술	도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리 시스템 개발	2,000	3,000	5,000	5,000	5,000				20,000
복구 평가 기술	토사재해 위험도 산정 및 피해 가시화 평가기술 개발			2,000	2,000	2,000	2,000	2,000		10,000
	토사재해 SOC 인프라 예방 및 복구 관리 체계 구축		1,000	3,000	5,000	3,000	3,000			15,000
계		2,000	7,600	13,700	16,700	17,000	14,000	10,000	7,000	

바. 전략과제 세부 내용

1. 토사재해 저감 국토안전 방재기술의 정책 인프라 개발

❑ 전략과제 정의

○ 토사재해 대응 제도개선 및 지식 공유형 ICEM 통합 지원체계 개발

❑ 전략과제의 필요성 및 목적

(필요성)

○ 도로 및 철도, 도심지 주택지 등 주요 SOC시설 주변의 절개지, 자연사면, 옹벽에 집중호우로 의한 지반열화(deterioration)로 붕괴나 산사태 발생으로 국가의 인적, 물적 피해와 사회 문제로 대두되고 있음.

○ 현재, 산사태 위험지관리시스템(산림청)이 있으나 이는 산사태에 대한 위험도 정보만 주는 것으로, 토사재해에 대한 조사 - 평가 - 대책(정책, 기술) 등 일련의 통합 체계와 도심지의 토사재해에 대한 기초자료 등 연구는 전무한 상태임.

○ 홍콩은 1972년 Kotewall Road 산사태와 1976년 Sau Mau Ping 산사태를 겪어 100여명의 인명피해와 많은 재산 피해를 겪은 이후, 인공사면 및 사면 붕괴 피해 발생의 저감을 목적으로 GEO(Geotechnical Engineering Office)를 설립하여 국가차원의 관리를 수행 중에 있음.

○ 일본은 PWRI(Public Works Research Institute)의 운영을 통하여 집중호우나 지진에 의한 사면 붕괴로 인한 자국민의 피해를 최소화하기 위한 전략을 수립하여 자연재해로부터의 예방 및 자연재해 축소에 만전을 기하고 있음.

○ 우리나라의 경우에는 도로비탈면은 국토해양부, 산지는 산림청 등 관리기관이 상이하고 방재 예산 및 공법 적용의 한계성으로 토사재해 방재 주체의 통합 필요함.

(목적)

○ 녹색안전개념의 토사재해 방재 정책 및 설계 기준개발

○ 토사재해 통합관리(조사-점검-분석 및 평가-대책) 통합 지원 센터 운영

❑ 핵심기술

전략과제	핵심기술	개 요
토사재해 저감 국토안전 방재기술의 정책 인프라 개발	토사재해 대응제도 및 기준 개선 방안	◦ 토사재해 방재계획 정책지침 ◦ 토사재해 통합관리 설계기준 개발
	토사재해 대응 도시계획 및 정책 개발	◦ 방재적 토지 이용 제도 개발 ◦ 예상 피해지역 중심의 도시계획 기법 개발 ◦ 토사재해 대응 공원 계획 및 제도 개발
	토사재해 ICEM 통합 지원센터 운영	◦ Eco-Smart 토사재해 재해통합관리 시스템 구축 ◦ 유형별 녹색안전 대책기술 개발 ◦ 유형별 방재시설 유지관리 시스템 구축

※ ICEM : Investigation - Check - Evaluation - Management (조사-점검-평가-관리)

❑ 핵심기술 필요성

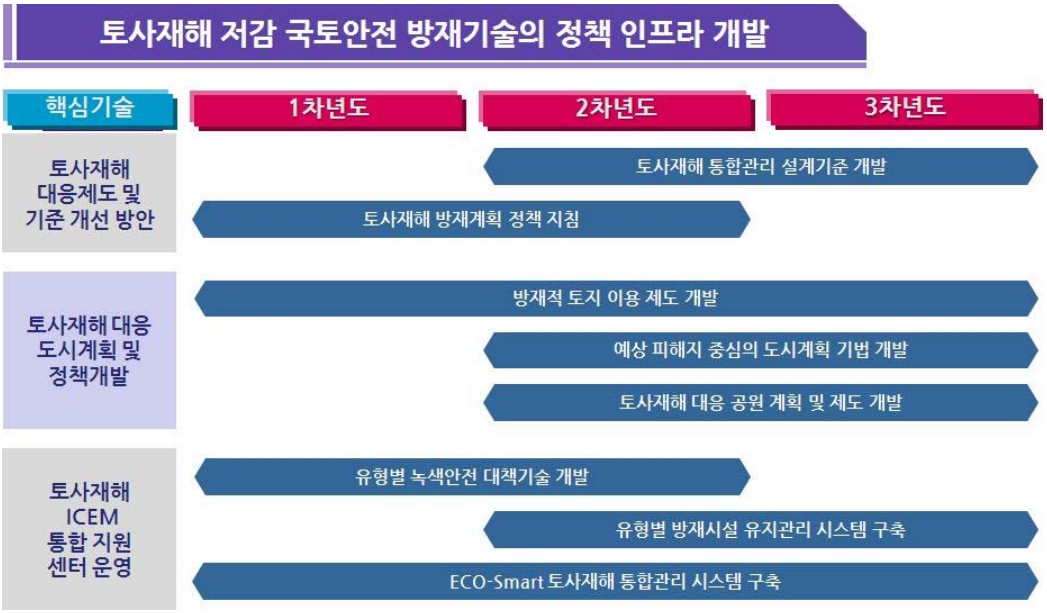
○ 토사재해 대응제도 및 기준 개선 방안

- 토사재해의 통합 방재 계획 및 대응구조물의 통합 설계 기준을 정립하여 효율적인 재난 대응을 하여야 함.

○ 토사재해 ICEM 통합 지원 센터 운영

- 토사재해 유형별 녹색안전 대책기술이 정립되지 않아 중복이 많고 효율적이지 않음.
- 지자체등의 비전문 행정조직에 전문적인 토사재해 대응 및 복구지식을 전달할 수 있는 방안이 필요함.

❑ 기술 로드맵



❑ 최종성과물 활용방안

최종성과물 및 활용방안	최종성과물	◦ 토사재해 방재계획 정책지침 ◦ 토사재해 통합관리 설계기준 개발개발
	활용방안	◦ 토사재해 통합관리(조사-점검-분석 및 평가-대책) 통합 지원 센터 운영 ◦ 방재 대책 수립 및 정부 지원

❑ 연구과제 규모

(단위:백만원)

연구개발 과제의 규모	계	1차년도	2차년도	3차년도
	2,000	600	700	700

2. 토사재해 인지 조사 및 안정화 기술 개발

❑ 전략과제 정의

○ 토사재해 발생에 대하여 사전에 붕괴지역을 과학적인 접근방식으로 인지하고 붕괴지역에 대한 안정화 대책을 수립하여 재해피해를 최소화 할 수 있는 기술 개발

❑ 전략과제의 필요성 및 목적

(필요성)

○ 토사재해 발생지역에 대한 산지는 붕괴 후 사후관리를 위주로 행하여졌으나, 향후 이상기후나 집중호우를 대비하여 붕괴가능지역을 사전에 파악하여 피해를 최소화 필요

○ 위험지구에 대한 정량적인 평가기법을 개발하고 판단함으로 인하여 국토의 효율적인 운영 및 국민의 안정된 생활터전 확보 마련이 필요

(목적)

○ 산사태 위험지구에 대하여 체계적이고 객관적인 판단기법을 개발하고 기존의 자료를 확률론적으로 분석 판단함으로 인한 위험지구에 대한 선정평가에 활용하고자 함.

○ 토사재해 발생 지역에 대한 조사 및 탐사 기법을 개발함으로 인하여 산지 붕괴로 인하여 발생하는 재해를 최소화하고자 함.

❑ 핵심기술

전략과제	핵심기술	개 요
토사재해 인지 조사 및 안정화 기술 개발	붕괴지역 인지기술	◦ 물리탐사를 통한 토사재해 발생 가능지역 추출기법 개발 ◦ Meso scale의 정량적 토사재해 위험도 제작과 mapping 기법 개발 (1:50,000) ◦ 풍화암과 토층간 천층 거동 규명을 위한 조사와 분석기법 개발(BHTV 기법 이용) ◦ 고지형분석을 통한 토사재해 발생지역 복원기법 개발
	안정화 평가기술	◦ 토사재해 발생 알고리즘 개발 및 평가기술 개발 ◦ Landslide발생 메커니즘 규명과 확률론적인 해석 접근 기법 ◦ 붕괴인자별 Landslide hazard curve 작성기법 개발 ◦ Digital element Method (DEM)을 이용한 토사재해 예측 가능지역 추출기법 개발 ◦ 토사재해 유발 인자에 대한 가중치 산정 기법 개발
	붕괴 예측기술	◦ 토층과 강우강도와의 한계 curve 제작기법 개발 ◦ 강우량 증가에 따른 토사재해 simulation 기법 개발 ◦ 풍화토의 초기 거동연계 한계 강우량 산정 기법 개발 ◦ landslide의 거동 단계별 파괴력과 규모 산정 기술 개발 ◦ 천층 파괴 감지를 위한 간극수압과 이동 monitoring 기법 개발

❑ 핵심기술 필요성

○ 붕괴지역 인지기술

- 토사재해 붕괴지역을 사전에 인지할 수 있는 기술이 개발되어 있지 않은 상태임. 따라서 산지 지역의 안정성 여부에 대한 객관적인 사전인지, 평가 기법에 대한 기술 개발이 필요
- 토사재해 지역에 대한 조사기법에 대하여 체계적인 방법이 수립될 필요가 있음. 조사자의 주관적인 개입을 방지하고 인지기법에 대한 국가차원의 기준 정립이 필요

○ 안정화 평가기술

- 토사재해 발생 원인에 대한 규명을 명확히 하고 안정화 평가 대책 기법을 수립할 필요가 있음.
- 토사재해 유발 지역의 안정 인자에 대한 정량적 판별법을 개발하고 인자별 영향 정도에 대한 지표를 객관적으로 분석할 수 있는 기술 개발이 요구됨.

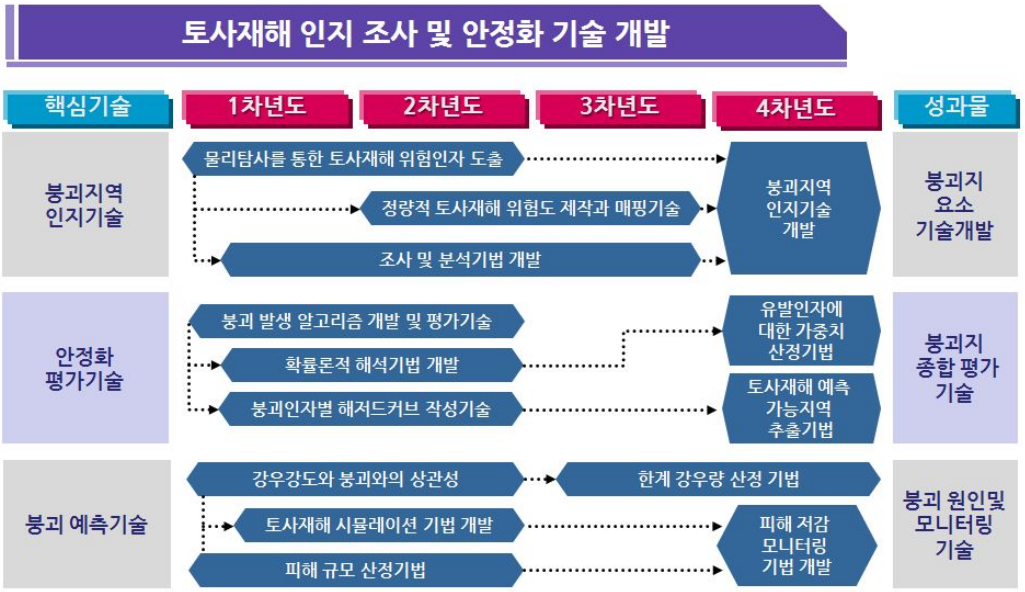
○ 붕괴 예측기술

- 토사재해 발생은 여름철 집중강우와 연계되어 발생되므로 이에 대하여 강우와

수반된 산사태 붕괴 예측기법 개발이 필요함.

- 국내 토사재해 발생은 토층과 암반의 경계부에서 발생되는 경향이 대부분임. 천층 파괴에 대한 거동, 해석, 모니터링 기법 개발이 필요함.

❑ 기술 로드맵



❑ 최종성과물 활용방안

최종성과물 및 활용방안	최종성과물	◦ 토사재해 위험지역에 예측가능 인자별 추출기법 개발 ◦ 토사재해 위험지도 제작과 안정화 평가기법 개발 ◦ 강우 연계 토사재해 발생과 예측기법 개발
	활용방안	◦ 국토 재해 방지 대책 정책방안에 활용 ◦ 재해 저감 관련 방재 산업 기술에 기여

❑ 연구과제 규모

(단위:백만원)

연구개발 과제의 규모	계	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도
	16,000	3,000	3,000	5,000	5,000

3. 미래형 다목적 토사재해 지능형 초단기 감지기술 개발

❑ 전략과제 정의

○ 전통적 기술에서 탈피하여 급변하는 산사태 및 토석류 등 복합적 토사재해 상황에 효율적으로 대응 가능한 신개념의 지능형 토사재해 감지 원천·핵심기술 개발
○ IT·ST 기술을 융합한 미래형 다목적 토사재해 관측·감지 기술 및 센서 개발
○ 재해 상황별 대규모 복합 토사재해 지능형 예보기술 개발

❑ 전략과제의 필요성 및 목적

(필요성)

○ 대형화 및 복합적으로 발생되는 토사재해로 인한 국가적 손실의 적극적 대처를 통해 지속가능한 국민생활 안전 확립
○ 최근 30년간 국내 자연재해로 인한 사망자의 약 23%는 산사태 등 토사재해로 인하여 발생
○ 국민의 지속적인 안전한 삶 영위를 위해 국가주도의 토사재해 피해저감 선도기술의 개발 필요
○ 토사재해 관련기술의 경우 민간주도의 개발은 리스크가 크므로, 세계 각국은 공통적으로 중앙정부 주도의 기술개발을 진행

(목적)

○ 실시간 다목적 입체 관측을 통한 상황별 대규모 복합 토사재해 위험정보 지능형 감지 및 예보 융합기술 개발
○ 산사태 등 토사재해의 피해저감과 관련한 실용핵심기술을 통해 국민 생명과 국가 주요시설의 지속가능한 안전 확보
○ 실용핵심기술을 개발하여 5-10년 후 민간부문의 토사재해관련 산업시장 창출 및 활성화에 기여

❑ 핵심기술

전략과제	핵심기술	개 요
미래형 다목적 토사재해 지능형 초단기 감지기술 개발	미래형 다목적 토사재해 감지기술 및 복합 smart sensor개발	◦ IT·ST 융합기반 다목적 토사재해 smart sensing 기술 개발 ◦ 인공위성을 이용한 토사재해 초해상도(mm급) 공중관측기술 개발 ◦ 원격구동 기능의 능동형 복합 센서 개발
	상황별 대규모 토사재해 실시간 리스크 예측기술 개발	◦ 지형/지질/지반조건을 고려한 광역/국지규모 실시간 토사재해 변동예측 기술 개발 ◦ 실대형(50m급) 모형실험 기반의 토사재해 유발 지질특성 미세 변화 해석기술 개발 ◦ 실시간 강우를 고려한 토사재해 예측모델 개발
	전국 규모의 지능형 초단기 토사재해 예보기술 개발	◦ 지능형의 시간단위 초단기 토사재해 예보기술 개발 ◦ 전국 규모의 지능형 토사재해 예보시스템 및 한국형 예보기준 개발

❑ 핵심기술 필요성

○ 미래형 다목적 토사재해 감지기술 및 복합 smart sensor개발

- 최근 빈번한 돌발기상 조건에 따른 토사재해의 급격한 발생은 전통적 방식으로는 정확한 감지에 한계가 뚜렷함.
- 갑자기 발생하는 토사재해의 신뢰성 높은 감지를 위해 IT 및 ST기술을 융합한 새로운 개념의 초정밀 토사재해 감지기술과 센서 개발이 요구됨.
- 다양한 기상 및 현장조건에서 지속적 구동이 가능하도록 원격제어는 물론 감지센서 자체의 능동적 센싱 기술 개발

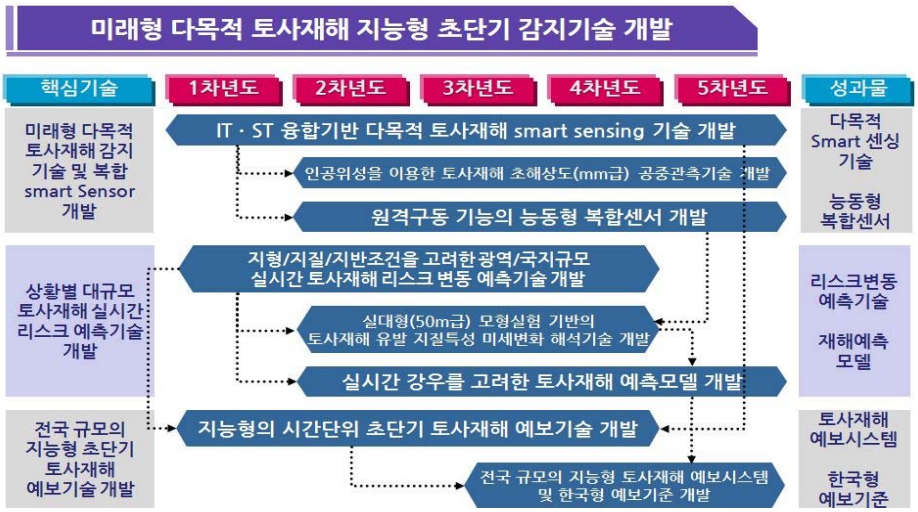
○ 상황별 대규모 토사재해 실시간 리스크 예측기술 개발

- 기존 토사재해 예측기술은 강우자료에만 의존한 예측기술이 대부분이며, 이에 따라 예측의 정확도가 낮은 현실임.
- 초정밀 토사재해 감지기술을 바탕으로 다양한 지형/지질/지반/강우 조건과 스케일에 따른 대규모 토사재해의 실시간 리스크 변동을 예측하고, 토사재해 사전예보 및 피해산정 원천기술이 요구됨.

○ 전국 규모의 지능형 초단기 토사재해 예보기술 개발

- 현재 국내에는 토사재해 예보기술이 전무한 상태이며, 이로 인해 귀중한 인명과 재산이 무방비 상태에 노출되어 있음.
- 전국을 대상으로 다양한 조건과 시나리오를 기반으로 한 지능형 토사재해 예보기술 및 시스템이 필요하며, 특히 초단기(1시간 단위) 사전예보기술이 시급히 요구됨.

❑ 기술 로드맵



❑ 최종성과물 활용방안

최종성과물 및 활용방안	최종성과물	◦ 다목적 토사재해 smart sensing 기술 ◦ 능동형 복합 토사재해 감지 sensor ◦ 토사재해 리스크 변동 예측기술 및 예측모델 ◦ 지능형 초단기 토사재해 예보시스템 ◦ 한국형 토사재해 예보기준
	활용방안	◦ 토사재해 발생의 실시간 예측/감지/예보 등 전주기적 원천핵심기술 확보를 통해 지속가능한 종합적 재해 대처 ◦ 인명 및 국가 주요시설을 토사재해로부터 보호하여 지속적 기능수행 실현 ◦ 세계적 수준의 실용핵심기술을 기반으로 국내에 부재한 토사재해관련 신산업 및 시장의 창출에 기여

❑ 연구과제 규모

(단위:백만원)

연구개발 과제의 규모	계	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
	15,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000

4. 한국형 토사재해 예측지도 플랫폼 구축

❑ 전략과제 정의

○ 이상기후로 인하여 호우 강도가 증가하고 있어서 한국의 토사재해의 위험성은 증가하고 있음.
○ 설계 호우 수준에 따른 임의의 위치에서의 토사재해 피해에 대한 위험성 추정을 위한 토사재해 위험도 산정 모델 개발
○ 특정 설계 호우강도에서 임의의 위치 혹은 시설물이 토사재해로 인한 위험성을 평가에 사용할 수 있는 토사재해 위험도 지도 작성 기술 개발
○ 호우강도를 고려한 전국단위 토사재해 위험도 지도 구축
○ 위험지역에서의 대책 수립 등을 위한 정밀조사 및 분석기술 구축

❑ 전략과제의 필요성 및 목적

(필요성)

○ 국가적으로 지역별 호우수준을 고려한 산사태 위험지도가 구축되어 있지 않고, 토석류 재해 위험 지도는 구축되어 있지 않음.
○ 이상기후로 인한 호우특성 변화에 대응하여 토사재해 위험지역 선정을 위한 재해위험도가 필요함.
○ 위험지역에서의 대책 수립 등을 위해서는 정밀조사 및 정밀 분석기술의 매뉴얼화가 필요함.

(목적)

○ 도로, 철도, 댐, 주거단지, 산업단지 등 주요 시설물의 계획 및 유지관리상에서 설계 호우강도에 따른 토사재해 위험성 평가에 사용할 수 있는 토사재해 위험도 지도 작성 기술 개발
○ 이상기후로 인하여 호우특성이 변화해서 설계 강우 기준을 증가시킬 경우 이

에 대응하는 토사재해 위험도 평가가 가능한 위험도 예측 모델 및 재해위험도 제작 기술 확보

○ 위험지역에서의 대책 수립 등을 위한 정밀조사 및 분석기술 구축

❑ 핵심기술

전략과제	핵심기술	개 요
한국형 토사재해 예측지도 플랫폼 구축	호우수준별 토사재해 위험지도 작성 기술	◦ 기후변화로 인한 호우특성변화를 고려한 토사재해 위험도 평가 기술 확보가 필요함 ◦ 전국단위 토사재해 발생 유형 및 특성 분석을 위한 데이터베이스 구축 ◦ 토질, 임상 특성뿐 아니라 강우특성을 고려한 GIS 기반 토사재해 위험도 산정 기술 개발
	전국단위 토사재해 위험지도 작성	◦ 전국 주요 지차체의 토사재해 위험지도 작성 ◦ 지자체 및 관련기관의 토사재해 위험지도 활용을 위한 교육 프로그램 운영
	토사재해 위험지역에서의 정밀조사 / 분석 매뉴얼 수립	◦ 토사재해 위험지역에 대한 정밀 조사 및 분석기법 수립 ◦ 토사재해 위험지역의 정밀 조사 / 분석 매뉴얼 구축

❑ 핵심기술 필요성

○ 호우수준별 토사재해 위험 지도 작성 기술

- 국가적으로 지역별 호우수준을 고려한 산사태 위험지도가 구축되어 있지 않고, 토석류 재해 위험 지도는 구축되어 있지 않음.
- 기후변화로 인한 이상기후에 따른 호우특성 변화에 대응하여 토사재해 위험지역 선정을 위한 재해위험도가 필요함.

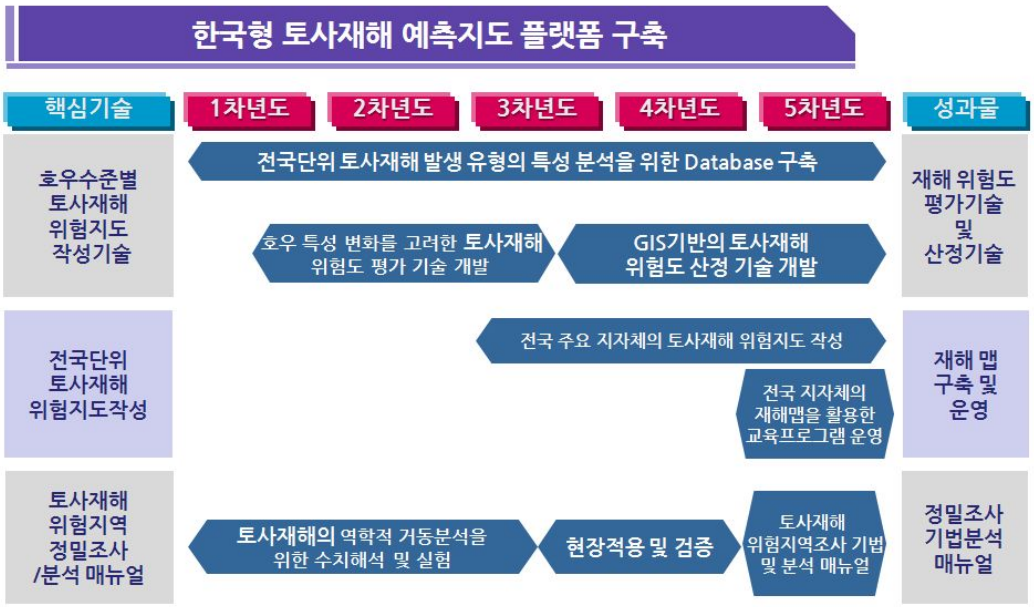
○ 전국단위 토사재해 위험지도 작성

- 특정 설계 호우강도에서 임의의 위치 혹은 시설물에 대하여 토사재해로 인한 위험성을 평가에 사용

○ 토사재해 위험지역에서의 정밀조사 / 분석 매뉴얼

- 토사재해 위험지역에서의 대책구조물 설계 등을 위한 정밀조사 및 분석기술 개발이 필요하고 이를 적용하기 위한 매뉴얼의 수립이 요구됨.

❑ 기술 로드맵



❑ 최종성과물 활용방안

최종성과물 및 활용방안	최종성과물	◦ 호우수준별 토사재해 위험도 평가기술 및 지도 작성 기술 개발 ◦ 전국단위 토사재해 위험지도 작성 ◦ 토사재해 위험지역에서의 정밀조사 / 분석 매뉴얼 수립
	활용방안	◦ 호우수준별 토사재해 위험도 평가 및 재해 위험지역 선정 ◦ 전국단위 토사재해 위험지도 ◦ 토사재해 위험지역에서의 대책 구조물 설계 등을 위한 정밀조사 /분석 매뉴얼 제공

❑ 연구과제 규모

(단위:백만원)

연구개발 과제의 규모	계	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
	10,000	1,000	1,000	3,000	3,000	2,000

5. 도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리 시스템 개발

❑ 전략과제 정의

○ 도시내 토사재해 발생시 인명피해를 최소화하고 도시 기능을 신속하게 복구하기위한 기술을 도출하고, 선진국형 토사재해 방지를 위한 행정지원체계의 도출

❑ 전략과제의 필요성 및 목적

(필요성)

○ 도시지역에서 토석류와 같은 토사재해가 발생되면 대규모의 재산 및 인명피해를 유발하나 국내는 도시지역의 토사재해 관리에 대한 연구가 미흡함.
○ 인구와 인프라가 밀집해 있는 도심의 특성상 산악지역의 토사 재해와 다른 형태의 접근이 필요하며, 인명피해를 저감하기 위한 도시형 피해저감형 대책 및 방재에 대한 연구가 필요함.
○ 도심의 특성을 고려한 사방시설과 같은 구조적 대책뿐만 아니라 인명피해 억제와 신속한 복구를 목적으로 비구조적인 대안이 우선적임.
○ 도시 기능을 신속하게 회복하기 위해서는 조사・점검・평가・대책의 유기적 의사결정과 재해복구자원 등 투입 자원의 긴급복구시스템, 선진국형 행정지원 등을 포함하는 체계적인 복구사업의 관리가 요구됨.
○ 선진국형 토사재해 방지를 위한 행정지원체계의 정립이 요구됨.

(목적)

○ 도시의 특성을 고려한 토사재해 회피 및 관리를 위한 기술 도출
○ 도시내 토사재해 발생시 인명피해를 최소화하고 도시 기능을 신속하게 복구하기위한 기술 도출
○ 선진국형 토사재해 방지를 위한 행정지원체계의 도출

❑ 핵심기술

전략과제	핵심기술	개 요
도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리 시스템 개발	도시 방재형 토사재해 회피 및 복구 기술 개발	◦ 도시재해 경감을 위한 토사재해 회피 기술 ◦ 도시환경을 고려한 토사재해 복구 기술
	도시 방재형 토사재해 대책 의사결정 통합 관리 시스템 구축	◦ 도시부 토사재해 방지 의사결정 체계 ◦ 도시부 토사재해 복구관리 시스템
	토사재해 방지 행정 및 정책지원 체계 개발	◦ 토사재해 방지 조사 및 예방 체계 ◦ 토사재해 사후 관리 및 기술지원 체계 개발

❑ 핵심기술 필요성

○ 도시 방재형 토사재해 회피 및 복구 기술 개발

- 도시 특성에 부합하는 토사재해 대응구조물 및 대책 기법의 개발이 필요함.

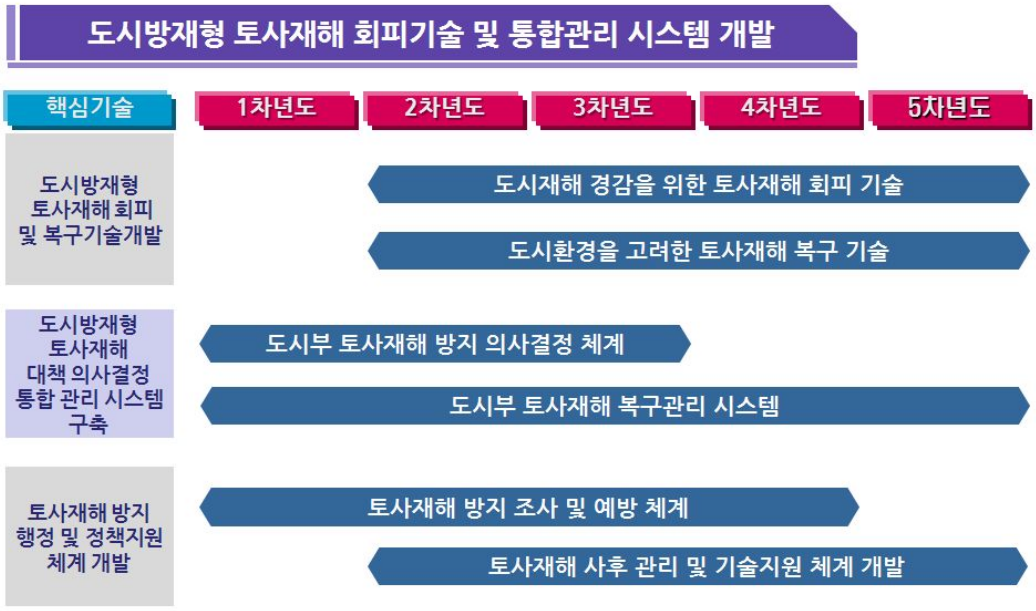
○ 도시 방재형 토사재해 대책 의사결정 통합 관리 시스템 구축

- 도시 기능을 신속하게 회복하기 위해서는 조사・점검・평가・대책의 유기적 의사결정과 유관기관과의 재해복구자원 등 투입 자원의 긴급복구시스템, 선진국형 행정지원 등을 포함하는 체계적인 긴급 대응 및 복구사업의 관리가 요구됨.

○ 토사재해 방지 행정 및 정책지원 체계 개발

- 도시부에서 발생되는 토사재해를 지원하는 전문가 집단 네트워크를 구축하여 활용하는 것이 요구됨.

❑ 기술 로드맵



❑ 최종성과물 활용방안

최종성과물 및 활용방안	최종성과물	◦ 도시형 토사재해 대응 구조물 공법 ◦ 도시부 토사재해 복구관리 시스템 ◦ 토사재해 사후관리 및 기술지원 체계
	활용방안	◦ 지방자치단체의 방재 대책에 활용 ◦ 토사재해 관련 중앙부처 지원

❑ 연구과제 규모

(단위:백만원)

연구개발 과제의 규모	계	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
	20,000	2,000	3,000	5,000	5,000	5,000

6. 토사재해 위험도 산정 및 피해 가시화 평가기술 개발

❑ 전략과제 정의

○ 복합적 원인으로 유발되는 토사재해의 종합적인 대응시스템 및 피해 저감 기술개발

❑ 전략과제의 필요성 및 목적

(필요성)

○ 기후변화, 지진 등에 의한 자연재해의 발생빈도가 증가하고 있고, 이로 인한 인명과 경제적 피해 규모가 증가 추세에 있고, 이에 대한 대응 방안과 더불어 피해 저감 방안이 필요

○ 집중호우, 지진시 액상화에 의한 산사태, 화산분화 등과 같이 단일 사건 재해 대응 기술은 개발 중이나, 천문학적 피해를 수반하는 복합재해에 대한 대응 및 저감기술이 방재선진국과 상당한 차이를 보이고 있어 국내 기술개발이 필요

○ 토사 이동에 의한 피해 지역은 토석이 퇴적되는 저경사 지역이 위치하며, 기존의 지형 및 지질 요소에 의해 위험도 평가 시 안정 영역으로 분류되는 모순이 있음. 따라서 대규모 토사 피해를 저감하기 위해서 토석의 부하량, 액상화 위험도, 토층의 수리수문, 이동 방향, 영향 범위를 고려한 위험도 평가 기술이 필요

○ 여러 기관에서 작성된 위험도 평가기준은 정성적 기준의 평가표, 확률론적 위험도 평가법이 적용되고 있으나, 토사 이동을 고려한 지반 역학적(공학적) 평가 기준의 마련이 필요함. 또한 이를 바탕으로 설계, 시공, 유지관리 시설 기준이 필요

○ 토사 피해와 붕괴 위험지역 관리를 위해 복구력에 기초한 합리적이고 효율적인 투자 우선순위 선정 기술이 필요

(목적)

○ 발생빈도와 피해규모가 지속적으로 증가하는 토사피해에 대응한 도심지 및 SOC 시설물 피해 저감을 위한 토사피해대응시스템을 구축

○ 원인별 토사피해를 사전 예측하기 위한 주요 시설 위험지도 작성 및 예·경보 시스템 구축, 중·중장기적 위험도 관리기술, 토사재해 발생 시 대응 매뉴얼과 피해저감 시설 계획, 피해 복구 시 복구력 산정의 통합관리시스템을 개발

○ 자료 구축 → 분석 → 예측 → 판단 시스템의 설계과정에서 계측기술, 분석기술, IT 응용기술이 종합된 융합기술을 확보하여, 토사재해 활동 감시 및 관리의 선진화를 유도

❑ 핵심기술

전략과제	핵심기술	개 요
토사재해 위험도 산정 및 피해 가시화 평가기술 개발	토사재해 위험도 평가기술	◦ 토사재해 발생 인자별 예측기술 ◦ 권역별 지질, 수리수문, 역학적 특성 분석 및 평가를 통한 가시화 모듈 개발
	위험도 관리기술	◦ 확률론적/공학적 평가법에 의한 토사유출 예측 가상현실 프로그램 개발 ◦ 토사피해 위험도 평가가시화시스템 구축
	가시적 토사재해 통합관리 시스템 구축	◦ 자연재해 감시, 분석, 예측, 평가시스템 모듈의 통합관리시스템 개발 ◦ 관리시스템의 가시화 방안 마련

❑ 핵심기술 필요성

○ 토사재해 위험도 평가 기술

- 재해유형별 국내 토사재해 이력자료 조사 및 DB 구축
- 지질/토질 특성에 따른 토사 피해 원인별 분석, 유발 강우 특성 분석 및 상관성 분석
- 국내 주요 도시지역(인구, 주요시설, 산지면적 기준)의 토사재해 발생확률 산정
- 토사피해 발생의 주요 위험 인자를 도출
- 토사재해 발생 메커니즘 및 해석을 위한 이론 분석

- GIS 기반 지형 및 수문모형에 기초하여 주요 도시 및 시설물 사면 및 녹지공간의 재해위험지도 작성
- 강우자료에 의한 지반의 함수비 모형 작성 및 실시간 토양함수변화분석
- 권역별 지질공학도 작성 및 토층의 특성 분석
- 전국 기반의 토층 심도분포도 작성
- 공학적 특성에 기초한 대표 지반 분류와 지반 정수 산정
- 공학적 특성을 반영한 액상화 조건의 사이버실험실 프로그램 제작

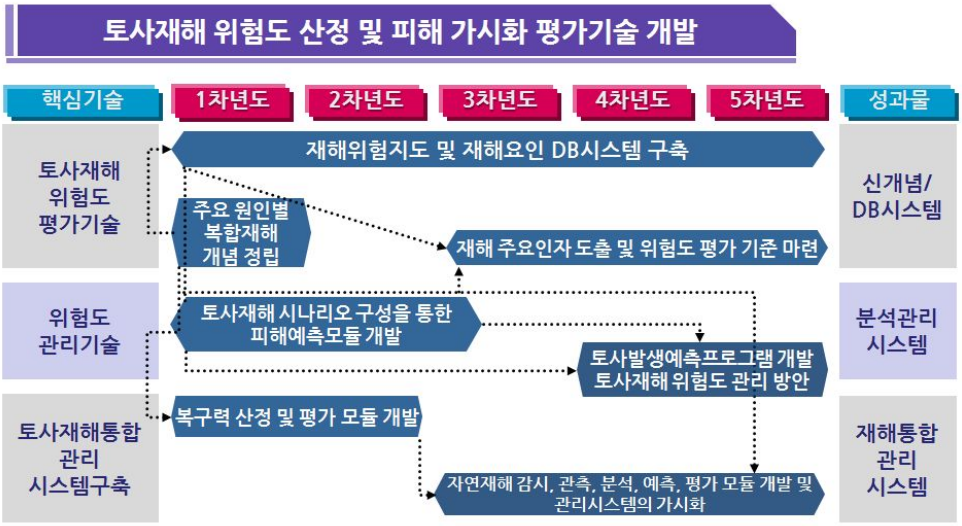
○ 위험도 관리기술

- 지진, 집중호우, 지반침투, 액상화 조건별 토사재해 발생 시나리오 구성 및 피해 예측시스템 개발
- 대도시권 및 주요 시설물의 토사피해 예측지도 작성 시스템 개발
- 복합적 원인에 따른 시나리오 구성과 토사재해 예측시스템 개발
- 토사재해 위험도 수치 지도화 관리 방안 마련
- 복구력(리질리언스)에 의한 합리적인 복구비 산정 방안 및 붕괴위험 지역 투자 우선순위 선정 모듈 개발

○ 가시적 토사재해대응통합관리시스템 구축

- GIS 기반의 위험지도 작성 및 예측 모듈 통합
- 토사재해 감시, 분석, 평가 모듈의 웹기반의 위험지도에 표출 기능 향상
- 도심지 및 주요 시설물 토사재해대응통합시스템 구축

❑ 기술 로드맵



❑ 최종성과물 활용방안

최종성과물 및 활용방안	최종성과물	◦ 토사재해 대응 구조물 가상현실 평가 시스템 ◦ 토사재해 예측 가시화 프로그램 개발 ◦ 토사재해 시나리오별 피해예측 가시화 모듈
	활용방안	◦ 토사재해 대응 재해발생 예측 및 안전설계기준 지침 제공 ◦ 국토이용에 관한 계획수립 및 입지선정 기준을 제시하고 토목·건설공사를 위한 재해발생 예측 및 안전설계기준의 지침을 제공 ◦ 도시방재 패러다임을 복구에서 예방으로 전환하여 국가예산의 효율적 사용이 기대되며, 각종 재해에 대한 종합적 관리를 통해 국가 방재 정책 수립 ◦ 토사재해 위험도 및 복구력에 기초하여 SOC 시설물의 사전 복구 및 저감시설 계획의 우선순위 결정 ◦ 토사재해 EOC(Emergency Operating Center) 유도 ◦ 중·장기적 모니터링과 실시간 단기 모니터링을 통해 위기상황에 대처할 수 있는 신속하고 객관적인 지원수단을 제공함으로써 피해 최소화에 기여

❑ 연구과제 규모

(단위:백만원)

연구개발 과제의 규모	계	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
	10,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000

7. 토사재해 SOC 인프라 예방 및 복구 관리 체계 구축

❑ 전략과제 정의

○ 토사재해 SOC 피해 예방을 위한 구조적/비구조적 방안 수립과 신속하고 투명한 피해 복구 의사결정 체계를 구축하고 이에 필요한 첨단 지형공간정보와 ICT 기술 기반 시스템 구축

❑ 전략과제의 필요성 및 목적

(필요성)

○ 토사재해 사전예방의 한계성을 인식하고 비용효율적인 SOC 방재 방안 수립 의사결정의 과학화 필요

○ 재해 발생 직후 신속, 투명, 비용 효율적 피해 복구 방안 수립 필요

○ 첨단 지형공간정보, ICT 기술 등을 활용한 대규모 복합 사후재해복구 사업관리지원 시스템 개발

(목적)

○ 토사재해 방지를 위한 구조적/비구조적 의사결정체계 구축

○ 토사재해 사후복구 관리체계 구축

❑ 핵심기술

전략과제	핵심기술	개 요
토사재해 SOC 인프라 예방 및 복구 관리 체계 구축	SOC 피해 예방 기술	◦ SOC 피해 조사-점검-평가-대책 (ICEM) 수립 체계 구축 ◦ SOC 피해 대응 의사결정
	피해 규모-심도 조사 및 분석 자동화 기술	◦ 피해 정보 획득 기술 및 분석 ◦ 복구 계획 수립 지원 체계
	사후복구 관리체계 구축 기술	◦ 사후복구 시스템 플래닝 ◦ 사후복구 지원 시스템 개발

❑ 핵심기술 필요성

○ SOC 피해 예방 기술

- SOC 피해 대응 방안에 대한 과학적 의사결정 체계 필요
- 구조적/비구조적 예방 시스템 개발 필요

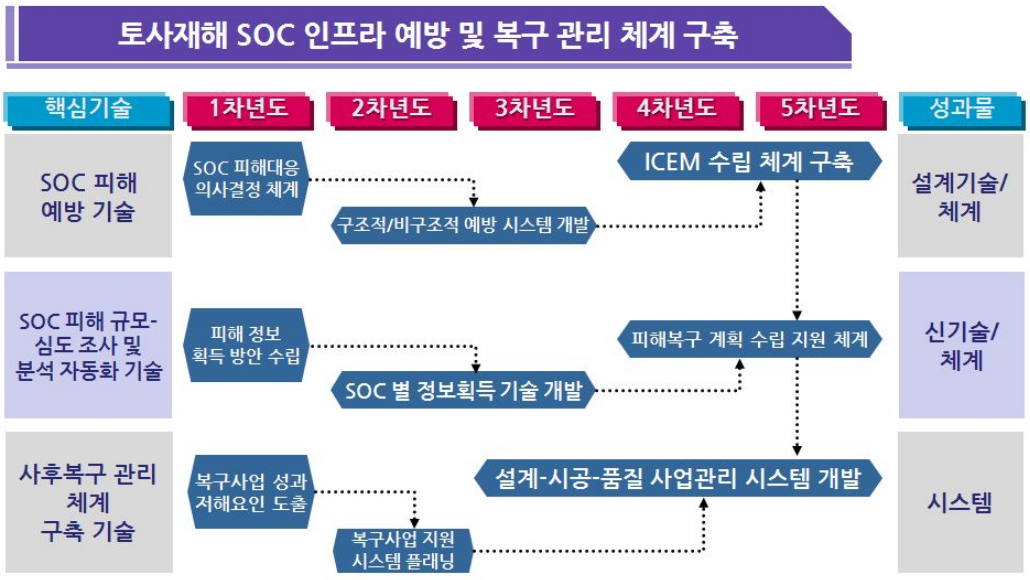
○ 피해 규모-심도 조사 및 분석 자동화 기술

- 피해정보의 규모-심도 분석 자동화를 통한 복구 기간 단축
- 정보의 효율적 활용을 통한 피해 복구 효율성 확보

○ 붕괴 예측기술

- 복구사업 저해요인 규명을 통한 사업의 효율화
- 설계-시공-품질 모니터링과 재해복구 정보의 재활용

❑ 기술 로드맵



❑ 최종성과물 활용방안

최종성과물 및 활용방안	최종성과물	◦ SOC 예방 기술 ◦ SOC 사후복구 체계 ◦ SOC 복구사업 지원 시스템
	활용방안	◦ 투사재해로부터 SOC와 국민의 안전 보호 ◦ 각종 재난 재해 복구 사업의 효율화 증진 ◦ 해외 재난 재해 지역의 인도적 기술 지원

❑ 연구과제 규모

(단위:백만원)

연구개발 과제의 규모	계	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
	15,000	1,000	3,000	5,000	3,000	3,000

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

연차	연구목표	연구내용	추 진 일 정(월별)												연구비 (천원)	비중 (%)
			1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월		
1차년도	국토 산사태 및 토석류 발생 유형 분석 및 특성 해석	기존자료 수집 및 유형분석(지형, 시설, 수문자료 활용)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57686	29 %
		GIS를 이용한 지질별 산사태 및 토석류 발생 유형 분석	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50000	25 %
	산 사 태 및 토석류의 발생 유형에 따른 정책 대책 방안	국내외 관련 기준 조사 및 재난대응 제도 및 기술 기준 등 정비 방안	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50218	25 %
	기 후 변화에 의한 산사태 및 토 석 류 대응 방재 마스터 전략 계획	산사태 및 토석류 대응정책 및 통합체계 기술 R&D 로드맵 제시	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42096	21 %

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

본 연구는 산사태 및 토석류에 대한 국가적 차원의 대책을 수립하기 위하여 기존 산사태 및 토석류 관련 연구과제의 성과물을 활용하여 발생유형을 분류하고 원인별, 유형별 대책방안(예, 경보기준 개선안 등)을 제시하였다.

특히, 기존 DB 자료를 기준으로 수문학적 특성 인자(강우강도, 누가강우량 등), 지형학적 특성인자(경사, 토심, 토양종류 등)와의 관계를 검토하여 국내 기준의 개선점을 제시하였으며, 국내외의 대응정책을 비교 분석하고 우리나라 제도의 발전적 방향을 제시하여 향후 신개념의 대응제도가 정착될 수 있도록 하였다.

마지막으로, 문헌자료 및 전문가 설문을 통하여 산사태 및 토석류 대응을 위한 7대 R&D 주제를 도출하고 제시하였다.

본 과제에서 제시한 정책방안은 관련부처에 의견 및 과제등으로 추진될 예정이며, R&D 로드맵의 순서에 따라 일부 주제는 상세과제의 기획이 시행되었으며, 나머지 주제들도 기획과제가 추진될 예정이다.

제 6 장 연구개발 과정에서 수집한 해외과학기술정보

	문 헌 제 목	발행처	년도
·	Hazard Analysis of Landslides Triggered by Typhoon Chataĺan on July 2, 2002, in Chuuk State, Federated States of Micronesia	USGS	2004
·	Landslides mapped using LIDAR imagery, Seattle, Washington	USGS	2004
·	EMERGENCY ASSESSMENT OF DEBRIS-FLOW HAZARDS FROM BASINS BURNED BY THE PADUA FIRE OF 2003, SOUTHERN CALIFORNIA	USGS	2004
·	Assessment of Hazards Associated with the Bluegill Landslide, South-Central Idaho	USGS	2004
·	Compilation of Post Wildfire Runoff-Event Data from the Western United States	USGS	2004
·	Rock-Fall Hazard Assessment of Little Mill Campground, American Fork Canyon, Uinta National Forest, Utah	USGS	2005
·	Compilation of data relating to the erosive respose of 606 recently-burned basins in the Western U.S.	USGS	2005
·	Landslide Susceptibility Estimated From Mapping Using Light Detection and Ranging (LIDAR) Imagery and Historical Landslide Records, Seattle, Washington	USGS	2005
·	Hydrologic Monitoring of Landslide-Prone Coastal Bluffs near Edmonds and Everett, Washington, 2001-2004	USGS	2005
·	Landslide Hazards at La Conchita, California	USGS	2005
·	Preliminary Assessment of Landslides Along the Florida River Downstream From Lemon Reservoir, La Plata County, Colorado	USGS	2006
·	Rainfall Thresholds for Forecasting Landslides in the Seattle, Washington, Area— xceedance and Probability	USGS	2006
·	Shallow-Landslide Hazard Map of Seattle, Washington	USGS	2006
·	Estimating Landslide Losses—Preliminary Results of a Seven-State Pilot Project	USGS	2006
·	LandslidesTriggeredbytheOctober8,2005,PakistanEarthquakeandAssociated Landslide-DammedReservoirs	USGS	2006
·	Stability of Leaning Column at Devils Tower National Monument, Wyoming	USGS	2006
·	Development of a Global Slope Dataset for Estimation of Landslide Occurrence Resulting from Earthquakes	USGS	2007
·	Emergency Assessment of Debris-Flow Hazards from Basins Burned by the 2007 Slide and Grass Valley Fires, San Bernardino County, Southern California	USGS	2007
·	Preliminary Results of Subsurface Exploration and Monitoring at the Johnson Creek Landslide, Lincoln County, Oregon	USGS	2007
·	Increasing Resiliency to Natural Hazards: A Strategic Plan for the Multi-Hazards Demonstration Project in Southern California	USGS	2007
·	Terrestrial LIDAR Investigation of the December 2003 and January 2007 Activations of the Northridge Bluff Landslide, Daly City, California	USGS	2007
·	EMERGENCY ASSESSMENT OF DEBRIS-FLOW HAZARDS	USGS	2007

	FROM BASINS BURNED BY THE 2007 BUCKWEED FIRE, LOS ANGELES COUNTY, SOUTHERN CALIFORNIA		
·	Field Reconnaissance of Debris Flows Triggered by a July 21, 2007, Thunderstorm in Alpine, Colorado, and Vicinity	USGS	2007
·	EMERGENCY ASSESSMENT OF DEBRIS-FLOW HAZARDS FROM BASINS BURNED BY THE 2007 AMMO FIRE, SAN DIEGO COUNTY, SOUTHERN CALIFORNIA	USGS	2007
·	Mass Wasting Following the 2002 Missionary Ridge Fire near Durango, Colorado, a Field Trip Guidebook	USGS	2007
·	Simulations of Potential Runout and Deposition of the Ferguson Rockslide, Merced River Canyon, California	USGS	2007
·	Methods for the Emergency Assessment of Debris-Flow Hazards from Basins Burned by the Fires of 2007, Southern California	USGS	2007
·	Using Logistic Regression to Predict the Probability of Debris Flows in Areas Burned by Wildfires, Southern California, 2003–2006	USGS	2008
·	Geographical Overview of the Three Gorges Dam and Reservoir, China—Geologic Hazards and Environmental Impacts	USGS	2008
·	Landslides Mapped from LIDAR Imagery, Kitsap County, Washington	USGS	2008
·	Probabilistic Methodology for Estimation of Number and Economic Loss (Cost) of Future Landslides in the San Francisco Bay Region, California	USGS	2008
·	Landslide and Land Subsidence Hazards to Pipelines	USGS	2008
·	Capturinglandslidedynamicsandhydrologictriggers usingnear-real-timemonitoring	USGS	2008
·	TRIGRS—A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0	USGS	2008
·	Leachate Geochemical Results for Ash and Burned Soil Samples from the October 2007 Southern California Wildfires	USGS	2008
·	An Examination of Selected Historical Rainfall-Induced Debris-Flow Events within the Central and Southern Appalachian Mountains of the Eastern United States	USGS	2009
·	Emergency Assessment of Postfire Debris-Flow Hazards for the 2009 Station Fire, San Gabriel Mountains, Southern California	USGS	2009
·	Framework for a U.S. Geological Survey Hydrologic Climate-Response Program in Maine	USGS	2009
·	Multivariate Statistical Models for Predicting Sediment Yields from Southern California Watersheds	USGS	2009
·	Relations Between Rainfall and Postfire Debris-Flow and Flood Magnitudes for Emergency-Response Planning, San Gabriel Mountains, Southern California	USGS	2010
·	Emergency Assessments of Postfire Debris-Flow Hazards for the 2009 La Brea, Jesusita, Guiberson, Morris, Sheep, Oak Glen, Pendleton, and Cottonwood Fires in Southern California	USGS	2010
·	100-Year Flood-It's All About Chance	USGS	2010
·	Regional Climate Change—Science in the Southeast	USGS	2010
·	Map of Debris Flows Caused by Rainfall During 1996 in Parts of the Reedsport and Deer Head Point Quadrangles, Douglas County, Southern Coast Range, Oregon	USGS	2011
·	Evaluation of Landslide Monitoring in the Polish Carpathians	USGS	2011
·	Postwildfire Debris Flow Hazard Assessment for the Area Burned by the 2011 Track Fire in Northeastern New Mexico and Southeastern Colorado	USGS	2011

・	Field Reconnaissance Report of Landslides Triggered by the January 12, 2010, Haiti Earthquake	USGS	2011
・	Emergency Assessment of Postwildfire Debris-Flow Hazards for the 2011 Motor Fire, Sierra and Stanislaus National Forests, California	USGS	2011
・	DEBRIS FLOWS CAUSED BY RAINFALL DURING 1996 IN PARTS OF THE REEDSPORT AND DEER HEAD POINT QUADRANGLES, DOUGLAS COUNTY, SOUTHERN COAST RANGE, OREGON	USGS	2011
・	大規模土砂災害に備える--災害対策車両「分解型バックホウ(遠隔操縦式)」操作訓練	砂防と治水	2011
・	平成22年7月梅雨前線豪雨災害--砂防事業の効果を再認識 (土砂災害の解消を目指して)	砂防と治水	2011
・	東日本大震災の被災地を水害・土砂災害から守るためのソフト対策の強化（特集 東日本大震災における海岸・河川等の被災・復旧状況）	河川	2011
・	土砂災害への対応状況について（特集 東日本大震災における海岸・河川等の被災・復旧状況）	河川	2011
・	砂防学講座「日本の国土の変遷と災害」 大規模崩壊地からの土砂流出とその対策--常願寺川砂防事業の歴史	新砂防	2011
・	災害報告 霧島山新燃岳の2011年1月噴火による降灰とその後の土砂移動	新砂防	2011
・	土砂災害特別警戒区域・警戒区域の指定による住民の避難促進効果 (特集 土砂災害防止法10周年と法改正)	砂防と治水	2011
・	固定資産税(評価)関係 土砂災害リスクの土地価格への影響 (ここが知りたい 最新税務Q&A)	税	2011
・	各種土砂災害復旧に向けて--ISM工法（特集 土砂災害対策--計画・設計・施工）	土木施工	2011
・	岩手・宮城内陸地震に起因した大規模地すべりの復旧対策（特集 土砂災害対策--計画・設計・施工）	土木施工	2011
・	ヘリコプタによる砂防工事--富士山大沢崩れ源頭域調査工事（特集 土砂災害対策--計画・設計・施工）	土木施工	2011
・	南大隅町船石川における無人化施工による災害復旧（特集 土砂災害対策--計画・設計・施工）	土木施工	2011
・	沖縄県内最大級の安里地すべり災害の発生とその復旧・対策（特集 土砂災害対策--計画・設計・施工）	土木施工	2011
・	中畑沢災害関連砂防事業について（土砂災害の解消を目指して）	砂防と治水	2011
・	平成22年の土砂災害と砂防関係事業の効果（特集 平成22年の災害）	河川	2011
・	災害時要援護者への土砂災害対策の取り組み(4)災害時要援護者関連施設に係る土砂災害対策の推進--山形市における災害時要援護者関連施設での避難訓練の取り組み	砂防と治水	2011
・	災害時要援護者への土砂災害対策の取り組み(3)神奈川県および県内市町村における災害時要援護者施設での避難訓練について	砂防と治水	2011
・	大規模土砂災害の危機管理	砂防学会誌	2011
・	最近の豪雨による土砂災害と防災対策の課題(<特集>災害から市民を護る)	地盤工学会誌	2011
・	土砂災害と危機管理（特集 2010年度[日本自治体危機管理学会]研究大会）--（共通論題 水害-避難そして復興--大都市の場合、地方都市の場合）	自治体危機管理研究	2010
・	豪雨による土砂災害防止対策を考える： 鹿児島県シラス台地周辺を事例に	季刊地理学	2010
・	恩恵と災害リスクを包括する住民主体の流域管理に向けて： 砥川流域協議会の事例から	環境社会学	2010

・	災害リスクマネジメントフレームの山間地域の防災力向上への適用性の検証 : 山都町菅地区における土砂災害への減災対策の実践	都市計画	2010
・	現場から 伊原地区砂防事業について--島尻層泥岩における土砂災害対策	砂防と治水	2010
・	土砂災害のおそれがある地域の要援護者支援--社会福祉施設を例に	砂防と治水	2010
・	大規模土砂災害に関する広域支援の取り組み	砂防と治水	2010
・	成績80点の取り方 緊急工事でもしっかり施工管理--地元の強みを生かした施工体制や対外調整で工期を守る	日経コンストラクション	2010
・	総合的な土砂管理に資する流砂観測の一環としての掃流砂計測手法の開発（特集 これからの土砂災害対策）	土木施工	2010
・	安全・コスト縮減のための地すべりとトンネルの相互影響評価 (特集 これからの土砂災害対策)	土木施工	2010
・	施工報告 大動脈の復旧に向けて--東名復旧までの115時間とその後の対応 (特集 これからの土砂災害対策)	土木施工	2010
・	田辺市における治水対策について--2009年の七夕水害での教訓 (土砂災害の解消を目指して)	砂防と治水	2010
・	平成22年度土砂災害防止月間の実施について（特集 土砂災害防止月間)	砂防と治水	2010
・	平成7年兵庫県南部地震の土砂災害対策とその後（特集 地震・火山噴火にともなう土砂災害)	河川	2010
・	無人化施工など建設技術の最先端--災害復旧に効果の期待される施工技術と調達・派遣を支援する仕組み（特集 地震・火山噴火にともなう土砂災害)	河川	2010
・	河道閉塞（天然ダム） の形成による土砂災害リスクの低減対策に関する研究	砂防学会誌	2010
・	土砂災害対策施設の効果	砂防学会誌	2010
・	特集 土砂災害対策施設とその効果	新砂防	2010
・	岩手宮城内陸地震で発生した天然ダムの越流侵食状況の数値シミュレーション（特集 2008年岩手・宮城内陸地震による土砂災害)	土木技術資料	2010
・	特集 2008年岩手・宮城内陸地震による土砂災害	土木技術資料	2010
・	中山間地域と災害時要援護者施設の土砂災害被害の防止軽減に向けて	砂防学会誌	2009
・	2000年三宅島噴火災害における災害調査及び対策施設設計の紹介	建設の施工企画	2009
・	平成21年7月以降の土砂災害の特徴（特集 平成21年7月中国・九州北部豪雨災害)	砂防と治水	2009
・	救助事例研究(29)高速道路における土砂災害に伴う救助活動	近代消防	2009
・	土砂災害防止法推進の取り組み(6)鳥取県における土砂災害防止に関する取り組み状況について--地方の実情に応じた新たな制度・施策の展開	砂防と治水	2009
・	土砂災害の解消を目指して 7.28豪雨災害の教訓	砂防と治水	2009
・	主要災害と復旧 山陰本線下夜久野・上夜久野間土砂災害の復旧工事 (防災特集)	日本鉄道施設協会誌	2009
・	大規模土砂災害を教訓とした復旧に関する今後の課題について (特集 河川技術)	河川	2009
・	土研センター 袋詰脱水処理工法の底質ダイオキシン類浄化への適用例	土木技術資料	2009

・	九州の中山間地域における土砂災害被災地の復興と課題に関する調査	自然災害科学研究西部地区部会報	2009
・	平成20年の土砂災害と砂防関係事業の効果（特集・平成20年の災害）	河川	2009
・	大規模土砂災害に対する危機管理対応（特集 土砂災害による犠牲者ゼロに向けた取り組み）	河川	2008
・	包絡分析法による土砂災害危険箇所評価に基づく砂防施設整備事業の優先順位検討	砂防学会誌	2008
・	現場から 平成19年台風9号災害における南牧村内の土砂災害発生状況について	砂防と治水	2007
・	突然の土砂災害（土砂災害の解消を目指して）	砂防と治水	2007
・	土砂災害の解消を目指して	砂防と治水	2007
・	上下流一貫した緊急治水対策の推進 ： 信濃川下流河川災害復旧等関連緊急事業(復緊事業)	建設の施工企画	2007
・	主要災害と復旧 平成18年7月豪雨による土砂災害と復旧 (土木部門(防災特集))	日本鉄道施設協会誌	2007
・	災害復興への願いを和太鼓に（土砂災害の解消を目指して）	砂防と治水	2007
・	災害廃棄物による地下水・土壌汚染の可能性(<連載特集>環境問題への挑戦(4))	応用地質	2007
・	台風13号に伴う豪雨と土砂災害について（特集・平成18年の災害）	河川	2007
・	諏訪湖周辺の河川災害と土砂災害について（特集・平成18年の災害）	河川	2007
・	災害 只見線 早戸・会津水沼間 土砂災害復旧工事について	SED	2006
・	技術[復旧] 新潟県中越地震復旧の現状--安全で安心できるふるさとをめざして (特集 土砂災害に克つ)	土木施工	2006
・	『世界遺産・宮島』の景観に配慮した災害復旧--広島県廿日市市宮島町・白糸川（特集 土砂災害に克つ）	土木施工	2006
・	盛土崩壊の復旧と対策--山陽自動車道（特集 土砂災害に克つ）	土木施工	2006
・	現場から 台風14号により発生した土砂災害と対策について	砂防と治水	2006
・	福岡県西方沖地震から1年--玄界島の被害と復興への取り組み (土砂災害の解消を目指して)	砂防と治水	2006
・	マルチスタティックレーダによるMUSIC法を用いた埋没生存者の位置推定法(リモートセンシング及び一般)	電子情報通信学会	2006
・	ズームアップ 法面 "V字"に建機を吊り斜面を掘削--国道191号道路災害復旧工事(広島県) 施工者=ライト工業	日経コンストラクション	2006
・	災害を予防して,安全で安心なまちづくり (土砂災害の解消を目指して)	砂防と治水	2006
・	現場発生土砂の活用工法とその現状--連続壁工法に用いられる泥土モルタル(掘削土再利用ソイルモルタル) (特集:建設廃材、災害時泥土等各種材料のリサイクル工法とその事例)	建設機械	2006
・	平成22年7月の巨石崩落災害について（土砂災害の解消を目指して）	砂防と治水	2011
・	7.15豪雨をふりかえる--人命を守るために (土砂災害の解消を目指して)	砂防と治水	2011
・	平成22年7月発生の豪雨災害を受けて（土砂災害の解消を目指して）	砂防と治水	2011

・	平成23年9月台風12号による土砂災害の状況	砂防と治水	2011
・	災害時要援護者への土砂災害対策の取り組み(8)高知県における災害時要援護者施設への啓発活動(防災学習会)の取り組みについて	砂防と治水	2011
・	災害支援企画 モバイルによる土砂災害情報の配信 土砂災害に備えるための情報提供--山口県土砂災害ポータル（特集 進化するモバイルサービス）	月刊LASDEC	2011
・	東北地方太平洋沖地震等に伴う土砂災害危険箇所の緊急点検結果について--国土交通省HP	防災	2011
・	災害時要援護者への土砂災害対策の取り組み(7)要援護者施設への訪問啓発活動	砂防と治水	2011
・	災害時要援護者への土砂災害対策の取り組み(6)災害時要援護者を土砂災害から守るために--健康福祉部局の立場からの対策見直し提言	砂防と治水	2011
・	島根県の土砂災害の取組み（特集 土砂災害対策--計画・設計・施工）	土木施工	2011
・	白山砂防甚之助谷地区における地すべり対策砂災害対策--計画・設計・施工）	土木施工	2011
・	特集 土砂災害対策--計画・設計・施工	土木施工	2011
・	災害時用のサイフォン排水実験に成功--7mの揚程で排水できることを確認	日経コンストラクション	2011
・	土砂災害警戒情報の警戒避難への活用促進に関する調査	自然災害研究協議会	2011
・	土砂災害対策工のDDAシミュレーション	自然災害研究協議会	2011
・	インドネシアにおける総合的な土砂災害対策（特集 海外技術協力）	砂防と治水	2011
・	災害時要援護者への土砂災害対策の取り組み(2)災害時要援護者の早期避難に向けた取り組み	砂防と治水	2010
・	次年子地区の地すべり災害への対策について (土砂災害の解消を目指して)	砂防と治水	2010
・	黒部川水系猫又地区における河床上昇対策	電力土木	2010
・	各県コーナー 愛媛県の防災対策の取組について(土砂災害防止ソフト対策)	防災	2010
・	災害時要援護者への土砂災害対策の取り組み(1)災害時要援護者関連施設に係る土砂災害対策の推進--全国調査の結果と今後の対策について	砂防と治水	2010
・	里山域での土砂災害の回避と残存危険度	砂防学会誌	2010
・	天然ダム等の特殊な土砂災害に対する危機管理体制の整備 ： 空輸対応型油圧ショベルの配備	建設の施工企画	2010
・	大雨災害における避難のあり方等検討会の概要(特集 土砂災害に関する警戒避難を考える)	砂防と治水	2010
・	鹿児島県における土砂災害警報情報の発表単位の細分化について(特集 土砂災害に関する警戒避難を考える)	砂防と治水	2010
・	土砂災害警戒情報はどのくらい当たるのか?--現状と課題(特集 土砂災害に関する警戒避難を考える)	砂防と治水	2010
・	土砂災害に対する警戒避難体制の現状と課題--アンケート調査から見えてくるもの（特集 土砂災害に関する警戒避難を考える）	砂防と治水	2010
・	特集 土砂災害に関する警戒避難を考える	砂防と治水	2010
・	土砂災害に対する住民の警戒避難行動促進のための働きかけ手法(特集 災害被害の軽減に向けた取組み--ソフト対策を中心に)	土木技術資料	2010
・	特集土砂崩壊災害防止対策 土止め措置を講じていなければ人は立ち入ってはならない!!	労働安全衛生広報	2010

・	施工報告 既設砂防堰堤を活用した小規模な水力発電--既存ストックの有効活用、中山間地の電力供給、二酸化炭素削減に寄与します（特集 これからの土砂災害対策）	土木施工	2010
・	施工報告 月山の麓、山形県七五三掛地区における地すべり対策（特集 これからの土砂災害対策）	土木施工	2010
・	施工報告 地域住民と共に歩む土砂災害防止法--土砂災害警戒区域等の指定に向けた住民との合意形成（特集 これからの土砂災害対策）	土木施工	2010
・	特集 これからの土砂災害対策	土木施工	2010
・	土砂災害防止法推進の取り組み(8)NPOと協働した大分県の土砂災害防止法の取り組み	砂防と治水	2010
・	特集 身近に起こる土砂崩壊災害--小規模工事は土止め先行を	安全スタッフ	2010
・	山形県鶴岡市七五三掛地区の地すべり災害への対応について（土砂災害の解消を目指して）	砂防と治水	2010
・	JR北海道 函館線 土砂流入災害（特集 防災）	新線路	2010
・	斜面崩壊検知センサーを用いた斜面監視の実施	土木技術資料	2010
・	平成20年6月14日 岩手・宮城内陸地震を振り返って（土砂災害の解消を目指して）	砂防と治水	2010
・	平成21年の土砂災害と砂防関係事業の効果（特集 平成21年の災害）	河川	2010
・	災害危険情報の受信に必要なリテラシー	経済系	2010
・	土砂災害防止法推進の取り組み(7)災害時要援護者関連施設に係る土砂災害対策について	砂防と治水	2009
・	土砂災害の解消を目指して 2008年土砂災害を振り返って--台風13号による土砂災害の経緯(鹿児島県肝付町)	砂防と治水	2009
・	富山県(森林政策課所管)の土砂災害対策--災害に強い山づくりを目指して 平成20年7月28日豪雨災害発生のメカニズムとその対策	斜面防災技術	2009
・	土木が生み出す魅力--環境シリーズ(第9回)土砂災害防止と河川生態系保全の両立を目指した新たな試み	土木技術	2009
・	鳥取県智頭町市瀬の地すべり災害--土砂崩落対策とその取組（特集 砂防）	土木技術	2009
・	岩手・宮城内陸地震後の土砂災害対策（特集 砂防）	土木技術	2009
・	投下型水位観測ブイ	建設の施工企画	2009
・	新製品・新サービス 支柱の強度を高めた土砂防護柵	日経コンストラクション	2009
・	砂防堰堤で巨れきは止まった--山口土石流災害では花こう岩のもろさも判明	日経コンストラクション	2009
・	土砂災害の解消を目指して 局地的短時間豪雨とその対策	砂防と治水	2009
・	土砂災害の解消を目指して 平成20年7月8日ゲリラ豪雨による局地的災害とその対策	砂防と治水	2009
・	地域と一体となって取り組む土砂災害対策（特集 地域に根ざした砂防事業の展開）	河川	2009
・	地すべりや斜面の調査に関する新技術（特集 土砂災害の防止）	土木施工	2009
・	新たな表層崩壊の発生危険度評価技術と斜面監視技術（特集 土砂災害の防止）	土木施工	2009
・	植生を活用した山腹保全技術（特集 土砂災害の防止）	土木施工	2009
・	スリットを改良したシャッタ付砂防堰堤の試験施工（特集 土砂災害の防止）	土木施工	2009

・	砂防ソイルセメントの大規模砂防堰堤への活用（特集 土砂災害の防止）	土木施工	2009
・	岩手・宮城内陸地震に伴う天然ダム決壊防止（特集 土砂災害の防止）	土木施工	2009
・	大規模な河道閉塞(天然ダム)の危機管理に関する検討委員会について(特集 土砂災害の防止)	土木施工	2009
・	特集 土砂災害の防止	土木施工	2009
・	耐土砂災害サバイバルルームの開発	砂防学会誌	2009
・	土砂災害防止法推進の取り組み(5)土砂災害防止法に関する長崎県の取り組み	砂防と治水	2009
・	質点系の支配方程式に基づく土砂災害危険領域設定手法の現地への適用と評価	日本森林学会関東森林研究	2009
・	広瀬川における細粒土砂堆積制御に関する研究	東北地域災害科学研究	2009
・	トンネル坑口上方のまさ土斜面の崩壊による土砂流動災害の事例	応用地質	2009
・	がけ崩れ災害における崩壊土砂の運動の実態	砂防学会誌	2009
・	土砂災害発生限界雨量線を用いた災害危険箇所の安全性および対策工効果の評価	砂防学会誌	2008
・	土砂災害地形の発生にかかわる現地形と植生変化の影響 ： 北部北上山地における検討例	応用地質	2008
・	積雪地帯における温暖化が土砂災害危険度に与える影響	日本雪工学会誌	2008
・	ピンポイント時間雨量103mm 経験したことのない災害を振り返って（土砂災害の解消を目指して）	砂防と治水	2008
・	能登半島地震による土砂災害の特徴	砂防学会誌	2008
・	土砂崩壊と災害の実態（特集 平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震）	建設関連業月報	2008
・	事例に学ぶ災害防止のポイント 土砂崩壊災害対策(重機災害対策)と感電災害対策 降雨が土砂崩壊の、水分が感電の危険性を増加する	労働安全衛生広報	2008
・	掘削工事中の土砂崩壊による労働災害の調査・分析(<特集>失敗・トラブルから学ぶ)	地盤工学会誌	2008
・	地すべり地末端の崩壊斜面における地盤変位の計測手法の開発	日本地すべり学会誌	2008
・	沖縄島中南部における大規模地辷りの発生条件		2008
・	ダムの効果を問い直す--土砂・流木災害防止等の観点から	ダム技術	2008
・	気候変動の土砂災害への影響（特集 気候変動に備える）	河川	2008

외 다수

제 7 장 참고 문헌

강릉대학교, 2007, 산지하천도로 호우피해방지를 위한 수충부 및 토석류 방재설계 선진화 기술개발 기획보고서, 강릉대학교.

건설교통부, 2006, 2006년 7월 태풍 및 집중호우 피해조사, 건설교통부.

권혁춘, 이병걸, 조은일. 2008. 인공신경망기법과 GIS를 이용한 제주도 산사태 취약성분석 인공신경망기법과 GIS를 이용한 제주도 산사태 취약성분석. 한국환경과학회지 17(6): 679-687.

김경석, 2008, 토석류 발생 지형과 유발 강우 특성 분석, 대한토목학회 논문집, 제28권 제5C호, pp.263-271.

김경수, 김원영, 채병곤, 조용찬, 2000, 강우에 의한 산사태의 지질공학적 특성 -충청북도 보은지역-, 대한지질공학회지, 10(2), 163 ~ 174.

김경수, 송영석, 조용찬, 김원영, 정교철, 2006, 지질조건에 따른 강우와 산사태의 특성 분석, The Journal of Engineering Geology, Vol.16, No.2, June, 2006, pp. 201-214.

김영묵, 장석완, 2000, 대전-충남지역의 강우특성에 의한 산사태에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 제20권 제4C호, pp.341-355.

김원영, 이사로, 김경수, 채병곤, 1998, 지형 특성에 따른 산사태의 유형 및 취약성 - 연천-철원지역을 대상으로-, 대한지질공학회지, 제8권 제2호, pp.115-130.

김원영, 채병곤, 김경수, 기원서, 조용찬, 이사로, 김정환, 윤운상, 2000, 산사태 예측 및 방지기술 연구, 한국지질자원연구원, 315.

김원영, 채병곤, 조용찬, 김경수, 이춘오, 최영섭, 2004, 산사태 예측 및 방지기술 연구, 한국지질자원연구원, 315.

김재수, 이상희, 이승배, 황선문, 김진수. 2009. 천층 산사태 위험지 예측 방법 비교. 산림공학기술 7(1): 12-23.

김종각, 2010, 집중강우에 따른 비탈면 안정성 해석, 석사학위논문, 관동대학교.

마호섭, 정원옥, 박진원. 2008. 국립공원의 산사태 발생 위험지역 예측기법의 개발. 한국임학회지 97(3): 326-331.

박덕근, 2006, 우리나라 지반재해와 방재정책, 2006년 지질공학 심포지움 발표논문집, 41 ~ 49.

박용원, 김감래, 여운광, 1993, 1991년 용인-안성지역 산사태 연구. 한국지반공학회지, 9(4), 103 ~ 116.

배민기, 정규원, 박상준. 2009. 환경정보시스템을 이용한 산사태 발생위험 예측도 작성: 경상북도를 중심으로. 한국환경과학회지 18(11): 1189-1197.

손정우, 김경탁, 이창헌, 최철웅, 2009, 항공사진과 GIS를 이용한 인제지역 산사태 분석, 한국지형공간정보학회지, 제17권 제2호 2009.6, pp 61-69

신홍건, 2007, 강우강도와 침투량에 따른 지하수위 산정 및 사면재해 특성에 관한 연구, 석사학위논문, 서울시립대학교.

양인태, 천기선, 박재국, 이상윤. 2007. GIS를 이용한 강우조건에 따른 산사태 취약지 평가. 한국지형공간정보공학회 15(1): 39-46.

오윤석, 구지희, 홍창희, 김병국, 2006, LiDAR를 이용한 임도주변 산림지역 위험 판정, 한국공간정보시스템학회 추계학술대회, pp 305-310

오현주. 2010. 항공사진을 이용한 산사태 탐지 및 인공신경망을 이용한 산사태 취약성 분석. 한국원격탐사학회지 26(1): 47-57.

오현주, 2010, GIS와 Weight of Evidence를 이용한 산사태 취약성 분석 및 검증, 지질학회지, 제46권 제2호 pp 157-170

윤찬영, 전경재, 김경석, 김기홍, 이승우, 2010, DB구축을 통한 강원지역 사면재해 유발강우특성 분석, 한국지반공학회 논문집, 제26권 제10호, pp. 27-38

이가영, 김기훈, 오경준, 김상현(2005). “설마천 유역 범륜사사면의 토양수분 시공간 집중변화양상의 측정.“ 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제 38권, 제 5호, pp. 345-354

이동하, 김영섭, 서용철. 2009. 고해상도 항공라이다 DEM 해석을 통한 강원도 일원의 산사태 예측 가능성 분석. 한국GIS학회 17(3): 381-387.

이영남, 1991, 지반공학과 자연재해(Ⅱ)-산사태, 대한토질공학회지, 제7권 제1호, pp. 105-113.

이용준, 박근애, 김성준. 2006. 로지스틱 회귀분석 및 AHP 기법을 이용한 산사태 위험지역 분석. 대한토목학회논문집 D 26(5): 861-867.

이창경, 김백운, 김남용, 2006, 항공사진측량에 의한 해안선 변화 조사, 한국지형공

간정보학회지, 제15권 제2호 pp 15-23
지반공학회, 2011, 우면산 산사태 원인조사 및 복구대책수립 용역 최종 보고서, 지반공학회.
차경섭. 2004. 다중셀과 지형지수를 이용한 광역 산사태 위험지 예측. 박사학위논문, 서울대학교.
채병곤, 김원영, 이춘오, 김경수, 조용찬, 송영석, 2005, 지질조건에 따른 사태물질 이동특성 고찰, 대한지질공학회지, 15(2), 185-199.
채병곤, 조용찬, 송영석, 김경수, 이춘오, 이병주, 김만일, 2008, 산사태 피해규모 정량화 및 최적피해저감기술 개발, 한국지질자원연구원, 566.
최경, 1989, 산사태 예지방법과 예방대책, 임업연구원 연구정보, No. 27, pp.1-3.
최우정, 2008, 7.23-26 경북 봉화군 호우피해 현장조사 결과 및 대책, 물과미래, 한국수자원학회.
최현, 홍순헌, 2007, 항공사진을 이용한 수치표고모형 생성과 활용방안, 한국콘텐츠학회논문지, 제7권 제3호. pp 168-175
한국건설기술연구원, 2011, 2011년 7월 수도권 집중호우 피해조사, 한국건설기술연구원.
한중근, 2001, 부산지역에서의 강우와 산사태의 특성분석, 한국환경복원녹화기술학회지, 제4권 제1호, pp.24-31.
홍원표, 김윤일, 김상규, 한중근, 김마리아, 1990, 강우로 기인되는 우리나라 사면활동의 예측, 대한토질공학회지, 대한토질공학회, 제6권 제2호, pp. 159-167.
황석민, 2009, 지반정수 변화에 따른 사면붕괴 모델 결정에 관한 연구, 석사학위논문, 상지대학교.
황제선, 김기홍, 박하진, 2010, 인제 지역의 산사태 발생 위치 추출, 한국지형공간정보학회 추계학술대회, pp 113-114
Adam M. Booth, Josh J. Roering, J. Taylor Perron, (2009) Automated landslide mapping using spectral analysis and high-resolution topographic data: Puget Sound lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon, Geomorphology 109 132–.147
Baum, R.L., Coe, J.A., Godt, J.W., Harp, E.L., Reid, M.E., Savage, W.Z., Schulz, W.H., Brien, D.L., Chleborad, A.F., McKenna, J.P. and Michael, J.A. 2005.

Regional landslide-hazard assessment for Seattle, Washington, USA. Landslides 2(4): 266-279.

Baum R.L., Savage, W.Z. and Godt, J.W. 2002. TRIGRS: A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis. USGS Open-file Report 02-424. pp.61.

Birkinshaw, S. J., James, P. and Ewen, J. 2010. Graphical User Interface for Rapid Set-up of SHETRAN Physically-Based River Catchment Model. Environmental Modelling & Software, 609-610

Brand, E. W., 1985, Predicting the Performance of Residual Soil Slopes Proc., 11th ICSMFE, Sanfran-cisco, pp.2541-2573.

Caine N., 1980, The rainfall intensity: Duration control of shallow landslides and debris flow. Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography, Vol. 62, pp. 23-27.

Cannon, S. H. and Gartner J. E., 2005, Wildfire-related debris flow from a hazard prospective, Springer, Berlin, 363-385.

Crosta, G.B. and Frattini, P., 2000, Rainfall threshold for triggering soil slips and debris flow. Mediterranean Storms: Proceedings of the EGS 2nd Plinius Conference, Siena, Italy. pp. 463-487.

Crosta, G. B., and Frattini P., 2001, Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow, Proceedings of the 2nd EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms, Italy, 463-487.

EPOCH(European Community Programme), 1993, Temporal Occurrence and Forecasting of landslide in the European Community, (Ed. J-C. Flagellot), 3 Volumes, Contract No. 90 0025.

Ewen, J.P. 2000. SHETRAN:distributed river basin flow and transport modeling system. J. Hydrol. Eng, 5, 250-258

Hammond, C., Hall, D., Miller, S. and Swetik, P. 1992. Level I stability analysis (LISA) documentation for version 2.0. General Technical Report INT-285, USDA Froest Service, Ogden Utah. Pp190

Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M, and Hutchinson, J.N., 2001, Review of the

classification of landslides of the flow type, Environmental and Engineering Geoscience, VII, 221-238.

Hutchinson, J. N., 1988, Morphological and geotechnical parameters of landslide in relation ot geology and hydrology, General Report. In Landslides, Proc. 5th. Int. Symp. on Landslides (Ed. C. Bonnard), 1, 3-35.

Ikeya, H., 1989, Debris flow and its countermeasures in Japan, Bull. of the IAEG, 40, 15-33.

Innes, J. L., 1983, Debris flows, Prog. Physical Geography, 7, 469-501.

Iverson, R.M. 2000. Landslide triggering by rain infiltration. Water Resources Research 36(7): 1897-1910.

Jia, Y. (1997). Integrated analysis of water and heat balances in Tokyo metropolis with a distributed model. Ph. D., dissertation, University of Tokyo, Japan.

Liu, C. and Wu, C. 2008. Mapping susceptibility of rainfall-triggered shallow landslides using a probabilistic approach. Environmental Geology 55: 907-915.

Lumb, P., 1975, Slope Failures in Hong Kong, Quar-terly Journal of Engineering Geology, London, Vol.8, pp.31-65.

Ministry of Land Infrastructure and Transport, 2004, GUIDELINES FOR CONSTRUCTION TECHNOLOGY TRANSFER: DEVELOPMENT OF WARNING AND EVACUATION SYSTEM AGAINST SEDIMENT DISASTERS IN DEVELOPMENT COUNTRIES, Japan.

Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. Water Resources Research 30(4):1153-1171

Olivier, M., Bell, F. G., and Jemy, C. A., 1994, The effect of rainfall on slope failure, with examples from the Greater Durban area, Proceedings 7th intern. Cong. IAEG, 3, 1629-1636.

Pack, R.T., Tarboton, D.G., and Goodwin, C.N., 1998. The SINMAP approach to terrain stability mapping, in International Congress of the International Association of Engineering Geology and the Environment,8th,September21-25,1998,Vancouver,BritishColumbia,Canada,Proceedi

ngs:Rotterdam,Netherlands,A.ABalkema,c.2,pp.1157-1165

Pak, J.H., 2005. A Real-Time Debris Prediction Model (USCDPM) Incorporating Wildfire and Subsequent Storm Events. Ph.D. Thesis, University of Southern California, Los Angeles, California.

Pak, J.H. and J.J. Lee, 2008. A Statistical Sediment Yield Prediction Model Incorporating the Effect of Fires and Subsequent Storm Events. Journal of the American Water Resources Association 44(3):689-699.

Roy C. Sidle and Hirotaka Ochiai, 2006, Landslides : processes, prediction, and land use, American Geophysical Union, p25.

Safaei, M., Omar, H., Huat, B.K., Yousof, Z.B.M., and Ghiasi, V., 2011, Deterministic rainfall induced landslide approaches, advantages and limitation, EJGE, 16:1619-1650.

Salciarini, D., Godt, J.W., Savage, W.Z., Conversini, P., Baum, R.L. and Michael, J.A. 2006. Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy. Landslides 3(3): 181-194.

Savage, W.Z., Godt, W.J. and Baum, R.L. 2004. Modeling time-dependent slope stability. Proceedings IX International Symposium on Landslides, pp23-38

Shaw, S. C. and Johnson, D.H. 1995. Slope morphology model derived from digital elevation data. Northwest Arc/Info Users Conference, pp.12. Coeur d' Alene.

Siddle, R. C., Pierce, A. J., and O'Loughin, C. O., 1985, Hillslope stability and landuse, Am. Geophys. Un. Water Resource Monograph, 11, 1-140.

Sorbino, G., Sica, C. and Cascini, L. 2010. Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models. Natural Hazards 53(2): 313-332.

Tomaž Podobnikar, Žiga Kokalj, TRIGLAV NATIONAL PARK HISTORICAL MAPS ANALYSIS

Van Beek, L. P. 2002. Assessment of the influence of change PHD thesis. Utrecht: Utrecht University

Van Den Eeckhaut, J. Poesen,1 G. Verstraeten, V. Vanacker, J. Nyssen, J. Moeyersons, L. P. H. van Beek and L. Vandekerckhove, 2006, Use of

LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest, Earth Surf. Process. Landforms 32, 754--769

Van Den Eeckhaut, M., et al., 2011, Regional mapping and characterisation of old landslides in hilly regions using LiDAR based imagery in Southern Flanders, Quat. Res., doi:10.1016/j.yqres.2011.02.006

Varnes, D. J. 1978, Slope movement types and process, National Academy of Science, Washington, D C., Special report, 2, 11-33.

Varnes, D. J. (1978). Slope Movements : Type and processes. In Landslides Analysis and Control (Ed. E. B. Eckel). Transp. Res. Board, Spec. Rep. 176.

Vieira, B.C., Fernandes, N.F. and Filho, O.A. 2010. Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. Natural Hazards and Earth System Sciences 10: 1829-1837.

Wilson, R. C., and Wieczoreak, G. F., 1995, Rainfall threshold for the initiation of debris flows at La Honda, California, Environmental and Engineering Geoscience, Vol.1, No.1, pp.11-27.

Yagi, N. and Yatabe, R., 1987, Prediction Model of Slope Failure in Sandy Soil due to Rainfall, Proc., 8th Asian Regional Conf., Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.217-220.

土木研究所(2002). WEP モデル 解説書. 土木研究所, pp. 3-22.

농업토양정보시스템. http://asis.rda.go.kr/

http://www.as-re.com/chireki.html

부록1. 연구과제 설명자료

연구과제 설명자료

- 산사태 및 토석류 발생유형별 피해저감 전략수립연구 -

2012. 11.

주관연구기관	한국건설기술연구원
연구책임자	구 호 본

목 차

Ⅰ. 과제 개요 ····· 1

Ⅱ. 연구개발 결과 ····· 10

Ⅲ. 연구성과 활용방안 ····· 16

Ⅳ. 기대효과 ····· 17

첨부1. 논문 실적 ····· 18

2. 연구비 세부 현황 ····· 19

Ⅰ 과제 개요

□ 개 요

○ 과 제 명 : 산사태 및 토석류 발생유형별 피해저감 전략 수립연구

○ 연구기관 : 한국건설기술연구원

○ 연구기간 : '11.11.08 ~ '12.11.07(1년)

○ 연 구 비 : 총 200백만원(정부 200백만원)

(단위 : 백만원)

구분	'11	'12	계
정부	200		200
기업			
계	200	0	200

○ 과제수행체계

구분	연구과제명	총연구기간	연구기관	연구 책임자
주관	산사태 및 토석류 유형별 피해저감 전략수립	'11.11 ~ '12.11	한국건설 기술연구원	구호본
공동	GIS를 이용한 지질별 산사태 및 토석류 발생 유형분석	'11.11 ~ '12.11	한국지질 자원연구원	채병곤

□ 연구 배경

○ 기후변화에 의한 태풍 및 집중호우 증가

- 지구온난화로 인한 이상기후로 세계 각 나라에서 자연재해로 인한 막대한 인명과 재산의 피해가 발생

※ 미국의 허리케인 피해규모 40조원(2012), 태국의 홍수 피해규모 52조원(2011)



허리케인 이삭, 2012



허리케인 카트리나, 2009



태국홍수, 2011

○ 산사태 및 토석류 재해에 의한 재산 및 인명피해 증가

- 전세계 7년간(2004~2010년) 산사태 종 2,620건 발생, 사망자는 약 32,322명으로 년간 4,600명 사망
- 우리나라는 10년간(2001~2010년) 연평균 인명피해 68명, 재산피해 2조 1,214억원 발생하며 최근 도심지의 인명피해 증가

※ 국내 산사태 사망자 : `11년 우면산 산사태 17명, 춘천 산사태 13명
※ 국외 산사태 사망자 : 중국 `10년 간쑤성 1,117명



한계령 토석류, 2006



춘천산사태, 2011

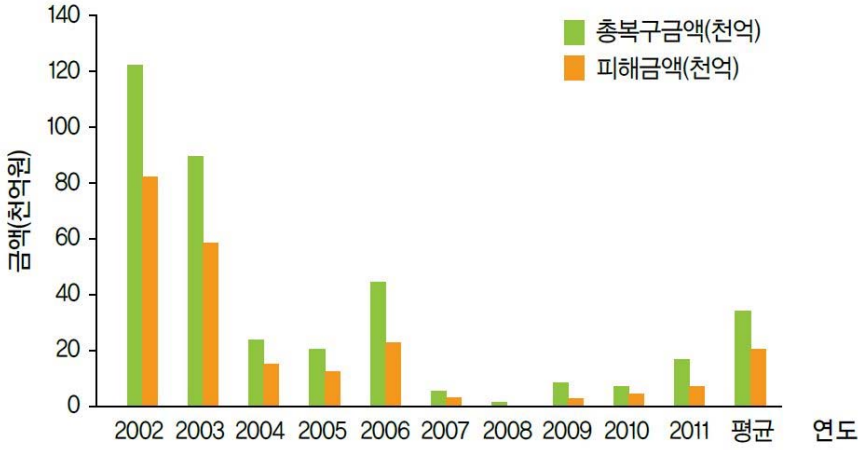


우면산 산사태, 2011

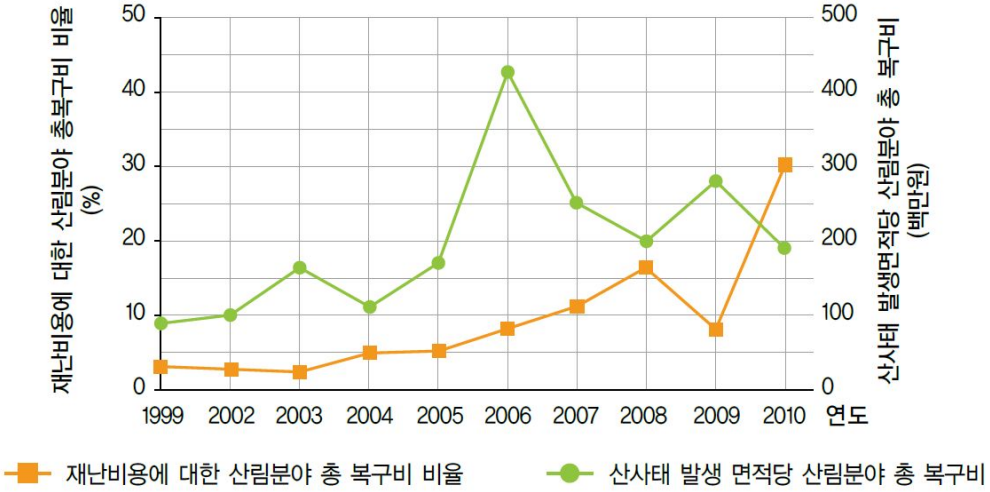
○ 산사태 및 토석류 피해 복구비용 증가

- 자연재난에 의한 재산 피해 규모에서 산림분야 복구비가 꾸준히 증가하고, 산사태 발생 면적당 산림분야 복구비도 해마다 증가

※ 서울지역은 `10년 대비 발생빈도는 35% 감소반면 피해면적은 3배 이상 증가, 복구비용 또한 2010년 71억원에서 2011년 386억원으로 5배 이상 증가



<자연재해 피해 및 복구 비용, 2010 소방방재청>



<산사태 복구비용, 산림청>

○ 산사태 및 토석류 대응을 위한 전략 계획 필요

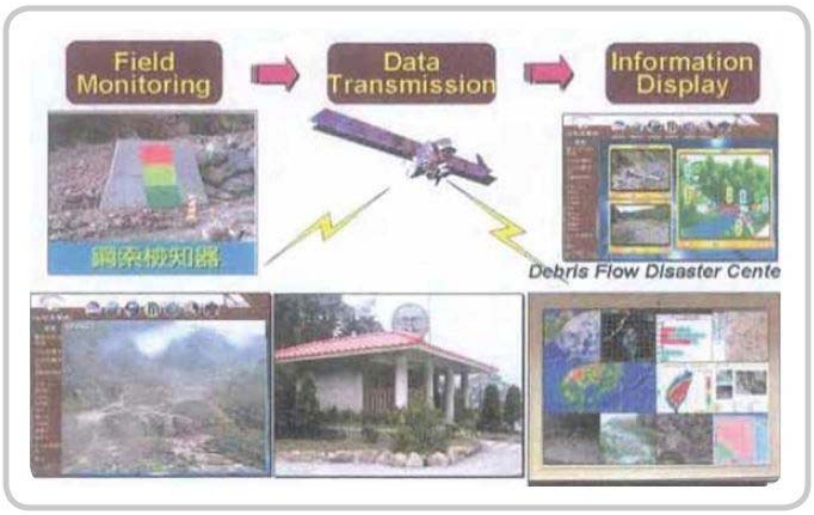
- 기후변화에 의한 산사태 및 토석류가 도심지역에서 발생됨에 따라 인명피해 최소화를 위하여 제도, 지원 및 복구체계, 연구개발 등 체계적인 계획을 수립하여 산사태 및 토석류 선제적 대응 필요

□ 기술 동향

▶ 산사태 및 토석류 대응 시스템

○ 국외현황

- 미국 지질연구소(USGS)는 국립산사태정보센터(NLIC)가 주축이 되어 전역을 대상으로 광역적인 산사태 취약성 평가 및 산사태 위험지도를 작성
- 캐나다 지질조사소(GSC)에서는 지반재해프로그램(GHEGP)을 통하여 토사재해발생의 원인이 되는 지질 및 지형적 특징, 재해에 민감한 지질물질의 거동에 대한 특성을 파악하고 대책수립
- 일본은 토목연구소, 교토대학 방재연구소와 일본지질조사소, 그리고 방재과학기술연구소를 중심으로 일본내 산사태 등 사면재해 위험지역을 분석하여 취약지역을 선정하고, 행정기관에서는 이를 관리함
- 홍콩은 토력공정청(CED) 주관하에 산사태 방지 대책 프로그램(LPM)을 수행하며, 1995년부터 홍콩 내 54,000개 사면의 데이터베이스를 구축, 2010년까지 5,500개의 주요 사면을 추가로 등록 유지관리 수행
- 대만은 국가재해저감과학기술센터(NCDR)의 사면재해 전담부서에서 산사태 데이터베이스 구축 및 산사태 예측 모델을 개발하고, 지반재해를 예측함
- 호주는 호주지질조사소(AGSO)에서 조시지역의 자연재해 취약성 평가를 수행하고, 도시주변의 산사태 위험도 평가 및 전국 산사태 데이터베이스 구축



<대만의 통합지반재해모니터링시스템 구성도>

<산사태 및 토석류 위험지도 조사 비교>

국가명	기관명	주요내용 및 개발기술
미국	지질조사소(USGS)	□ 재해정보 네트워크 구축(DIN) 프로그램 - 지반재해 조기경보 체제구축 □ 산사태 재해(LHA) 프로그램 - 미국전역의 산사태 재해 대응체제 구축 연구 □ 산사태 및 피해저감공법 연구 - 토석류 위험평가기술의 현황파악 및 방호시스템 개발 (미국해양대기관리처(NOAA)와 공동수행
캐나다	지질조사소(GSC)	□ 지질재해 및 지질환경(GHEG) 프로그램 - 자연재해 종합 프로그램 - 캐나다 동부 산사태 연구 - 산사태 발생 예측 연구
홍콩	자치정부(CED/GEO)	□ 산사태 방지대책(LPM) 프로그램 - 홍콩 전역 사면분포현황·조사 - 주요 사면에 대한 산사태 상기 감시 및 사후 관리
일본	방재과학 기술연구소	□ 종합방재 관련연구 □ 설해방재 관련연구
	교토대 방재연구소	□ 종합방재연구 □ 지반재해연구
호주	지질조사소(AGSO)	□ 도시지역 자연재해 취약성평가 과제(NGVUC) - 도시주변 산사태 위험도 평가 연구 - 호주 전역 산사태 DB 구축연구

○ 국내현황

- 산림청은 우리나라 전역을 대상으로 과거 산사태 발생 이력을 검토하여 웹 기반 산사태위험관리시스템으로 위험지도를 제공
- 한국지질자원연구원은 많은 산사태 조사 관련 데이터베이스를 활용하여 사면경사, 토양의 건조단위중량, 암질, 투수계수, 공극률 등의 인자를 바탕으로 산사태 위험지도 제작
- 한국건설기술연구원은 일반국도의 절토사면 안정성 해석 및 대책 연구와 절토사면 유지관리시스템을 개발하여 일반국도에서 유지관리 우선순위를 결정
- 수충부 및 토석류 연구단은 강원도 지역에 대해 유역별 토석류 데이터베이스에 대한 로지스틱 회귀분석을 수행하여 소유역 단위의 토석류 위험도를 평가

○ 문제점

- 산사태의 가장 중요한 강우에 대한 연구 미흡으로 산사태 예측의 신뢰성에 제한이 있고, 산사태 위험지도는 산사태 위험도가 높은 지점에 대한 위치 정보에 국한되며 산사태로 인한 피해 범위가 미흡
- 산사태 사례 DB구축, 통계학적 산사태 예측 모델 개발, GIS 기반 산사태 위험 관리 및 실시간 예/경보 시스템은 선진국 수준의 연구개발을 수행하고 있으나, 대부분 과거 자연재해가 집중된 산악지형과 도로 절개지 중심
- 산사태의 발생 해석과 관련된 기술은 발생인자 분석 기술과 발생예측 기술이 확립된 이후 개발될 수 있는 기술이며 이 기술은 현재 선진국 대비 50% 정도의 기술수준 보유

<산사태 및 토석류 위험지도 조사 비교>

수행기관	연구개발의 내용	활용현황
한국지질자원연구원	산사태 위험도 산정시스템 및 피해저감기술 개발	사태물질 확상범위 예측기술 및 산사태 피해위험도 산정기술
한국지질자원연구원	산사태 발생예측 및 위험도 산정(QRA)기술, 토석류 모니터링	도시사면 관리시스템 개발, 피해저감 공법 적용
국립산림과학원	산지개발에 따른 산사태 발생특성 및 산지토사 재해 예지시스템 개발	인공사면의 안정공법의 설계와 기존 사면안정화제시
국립방재연구원	사면붕괴의 유형별 원인과 저감대책 연구	사면붕괴 원인해석 및 유형별 저감대책 방안 연구
국립방재연구원	사면붕괴 감지 및 관측에 관한 연구	사면붕괴 관측시스템 및 적정시스템 마련을 위한 기초연구
한국건설기술연구원	일반국도의 보강대상 사면에 대한 연구	보강 우선 순위 결정 및 국도유지가무소 정보 제공

□ 시장 및 정책 동향

▶ 산사태 및 토석류 제도

○ 산사태 및 토석류 관련 법령은 크게 국토해양부, 소방방재청, 산림청 관련 법령으로 나뉘며 각 부처의 특성에 따라 법령의 규제, 관리대상 및 방법 등이 다름

<관련 부처별 법령비교>

부처명	법령	목적
국토해양부	1. 도로의 유지·보수 등에 관한 규칙	□ 풍수해 등 기타 재해예방 및 유지관리
	2. 시설물의 안전관리에 관한 특별법	□ 대규모 시설물(급경사지 포함)의 재해예방 및 관리
	3. 국토의 계획 및 이용에 관한 법률	□ 방재지구내의 행위제한
소방방재청	4. 급경사지 재해예방에 관한 법률	□ 급경사지 붕괴위험 지역의 재해예방 및 관리 □ 산사태 현상을 규정하여 재해예방 활동의 근거를 제공
	5. 자연재해대책법	□ 재해위험지구정비 □ 산사태의 예방-복구-관리
	6. 재난 및 안전관리기본법	□ 재해위험지구정비 □ 지자체별로 의무적으로 수립하여 토사재해를 저감하기 위한 구체적 시책사업을 실시
산림청	7. 산지관리법	□ 토사유출 방지, 산사태 또는 인근 지역의 피해 등 재해의 방지나 경관 유지 또는 복구에 필요한 조치
	8. 사방사업법	□ 산사태 예방 및 복구 □ 산사태 현상을 규정하여 재해예방 활동의 근거를 제공
	9. 산림보호법	□ 재해방지보고구역 : 토사 유출 및 낙석의 방지 등으로 인한 피해방지를 위해 필요하다고 인정되는 구역

<정책방향 비교>

부처명	법령	목적
국토해양부 교통정책실	과학적인 도로관리 추진	도로절토사면 운영업무를 전문기관에 시행하여 효율적이고 체계적인 유지관리를 통한 예방 및 적정예산 운영도모 □ 위험 절토사면에 대한 현장조사, 자동계측 사면 안정성 검토, 투자우선순위 결정 및 절토사면 Data-Base관리 □ 일반국도 상 절토사면 12,650개 중 위험절토사면 4,450개를 선정하여 매년 절토사면 정비 실시 □ 도로절토사면 및 터널 입·출구 절토사면에 상시 계측시스템과 CCTV를 설치 추진
행정안전부 소방방재청 방재관리국	국민생활 안전문화 확산	재난안전교육기반 확충 □ 방재안전교육 및 전문 인력의 체계적 양성을 위한 법적근거 마련 □ 대국민 쌍방향 재난상황 전파체계 구축 - 산사태, 침수지역, 대형화재 등 재난상황 알림 및 행동요령 서비스 제공 - 생활주변 위험요인 또는 피해상황 신고, 해당기관에서 즉시 조치
	재해취약지역 투자 확대	재해위험지구 정비 : 224개소 5,176억원 □ 인명피해 우려가 높은 상습침수 및 붕괴 위험지역 우선 정비 추진 □ 사면보강보다는 근원적인 위험요인 해소를 위해 안전지대로 이주 유도
	서민 밀집 위험지역 정비	□ 달동네 등 재난취약계층 밀집지역에 대한 우선적 재해대책 시행 □ 노후사면, 붕괴우려 비탈멸, 마을 배수시설 등 공공시설 정비
	급경사지 붕괴위험지역 정비	□ 생활권 구변 위험지역 내 주택 이주, 사면정비 등을 통한 안전확보 □ 인명피해 우려지역에 계측기를 설치하여 붕괴예측, 주민대피체계 구축 □ 소방방재청에 붕괴위험지구 지정 권고권한 부여 (현행 : 시장·군수·구청장)
	안전기준 표준화로 대외 경쟁력 강화	□ 적용법령에 따라 달리 규정된 안전관리 및 시설기준의 표준화 추진 □ ISO 재난관리 국제표준의 국내 적용, 확산방안 마련 □ 행안부-기표원-소방방재청 간 정책협의체 구성, 공동 대응 추진
농림수산 식 품 부 산 림 청	산림재해 대응 체계 확립	□ 산사태 방지 대책 현실화 - 토석류 위험지도 제작·보급 등을 통해 산사태 위험지를 생활권 중심으로 확대·개편 □ 사방댐(695개)과 산림내 계곡정비사업(416km) 등 사방사업을 도시·생활권 지역에 집중

□ 연구 목적

○ 국토 산사태 및 토석류 발생 유형 분석 및 특성 해석

○ 산사태 및 토석류의 유형별 기준 및 대책 제시

○ 기후변화에 의한 산사태 및 토석류 대응 방재 방향 수립

□ 주요 연구내용

○ 기존의 연구조사 자료 및 사례 분석을 통한 유형 분석

○ 지형별(도시, 산지부) 및 시설별(공동주택, 도로)에 따른 산사태 및 토석류 유형 분석

○ 지질별 국내 산사태 및 토석류 피해 사례분석 및 원인 규명 제시

○ 산사태 및 토석류의 유형별 기준 및 대책 제시

○ 기후변화에 의한 산사태 및 토석류 대응 방재방향 수립

□ 연차별 주요 연구내용

연차	주요 연구내용	연구수행기관
1차년도 ('11.11.08 ~ '12.11.07)	기존의 연구조사 자료 및 사례 분석을 통한 유형 분석	한국건설기술연구원
	지형별(도시, 산지부) 및 시설별(공동주택, 도로)에 따른 산사태 및 토석류 유형 분석	한국건설기술연구원 한국지질자원연구원
	지질별 국내 산사태 및 토석류 피해 사례분석 및 원인 규명제시	한국지질자원연구원
	산사태 및 토석류의 유형별 기준 및 대책 제시	한국건설기술연구원
	기후변화에 의한 산사태 및 토석류 대응 방재방향 수립	한국건설기술연구원

Ⅱ 연구개발 결과

□ 정책 및 제도 개선방향

○ 토사재해 위험지구설정 개선

○ 방재적 토지이용 추진

○ 개선된 토사재해 위험구역 관리방안 제안



〈토사재해 정책 및 제도 개선방향 〉

□ 토사재해 분류 및 예보기준 제안

○ 산사태 및 토석류 발생 유형 분류 제안

- Varnes (1978)의 분류, EPOCH(1993) 분류, Vallejo와 Ferrer의 분류, Flow 형태 분류 등을 검토 하면, Sidle과 Ochiai(2006)의 산사태 분류가 국내의 산사태 및 토석류 유형 분류에 적합
- Sidle과 Ochiai(2006)는 강우와 산사태를 유발하는 다른 기후조건을 토대로 산사태의 유형과 속도를 구분. 토심에 따라 천층 및 심층 붕괴를 구분하고, 강우기간과 강우량을 고려하여 토층의 함수상태를 고려하여 거동속도가 빠

르거나 늦음을 파악하여 산사태의 유형과 속도를 구분

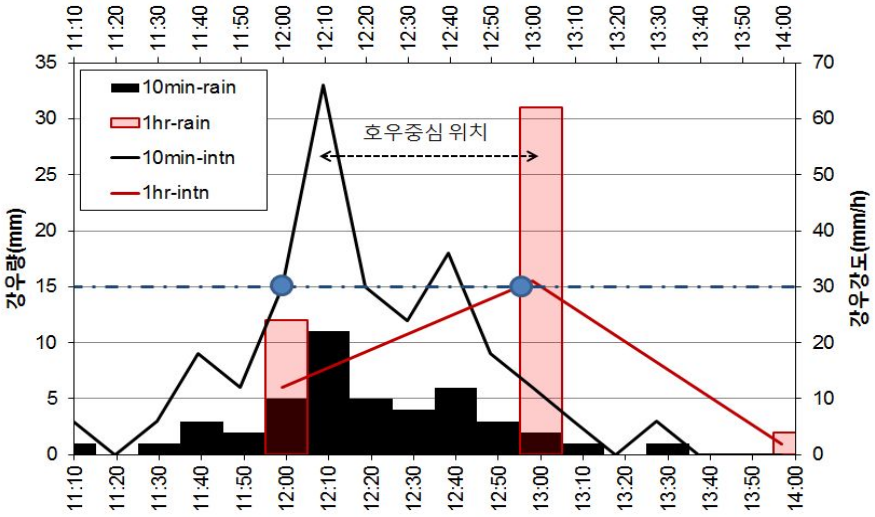
- 우리나라는 대부분의 자연사면 산사태가 하절기 집중호우에 의해 발생하고, 인명 및 시설물의 피해는 무엇보다도 산사태 및 토석류의 속도와 토사량에 좌우되어, 국내에서 재해로 인한 피해저감 목적의 "방재 행정 차원"에서 Sidle과 Ochiai가 제안한 분류가 적절함

< 산사태 및 토석류 분류 기준(안) >

구분
얕고 급속한 붕괴 (Shallow, rapid landslides)
급속하고 깊은 활동과 흐름 붕괴 (Rapid, deep slides and flows)
느리고 깊게파인 붕괴 (Slower, deep-seated landslides)
느린 흐름과 변형 붕괴 (Slow flows and deformations
표면 붕괴 (Surficial mass wasting)

○ 산사태 예보기준 제안

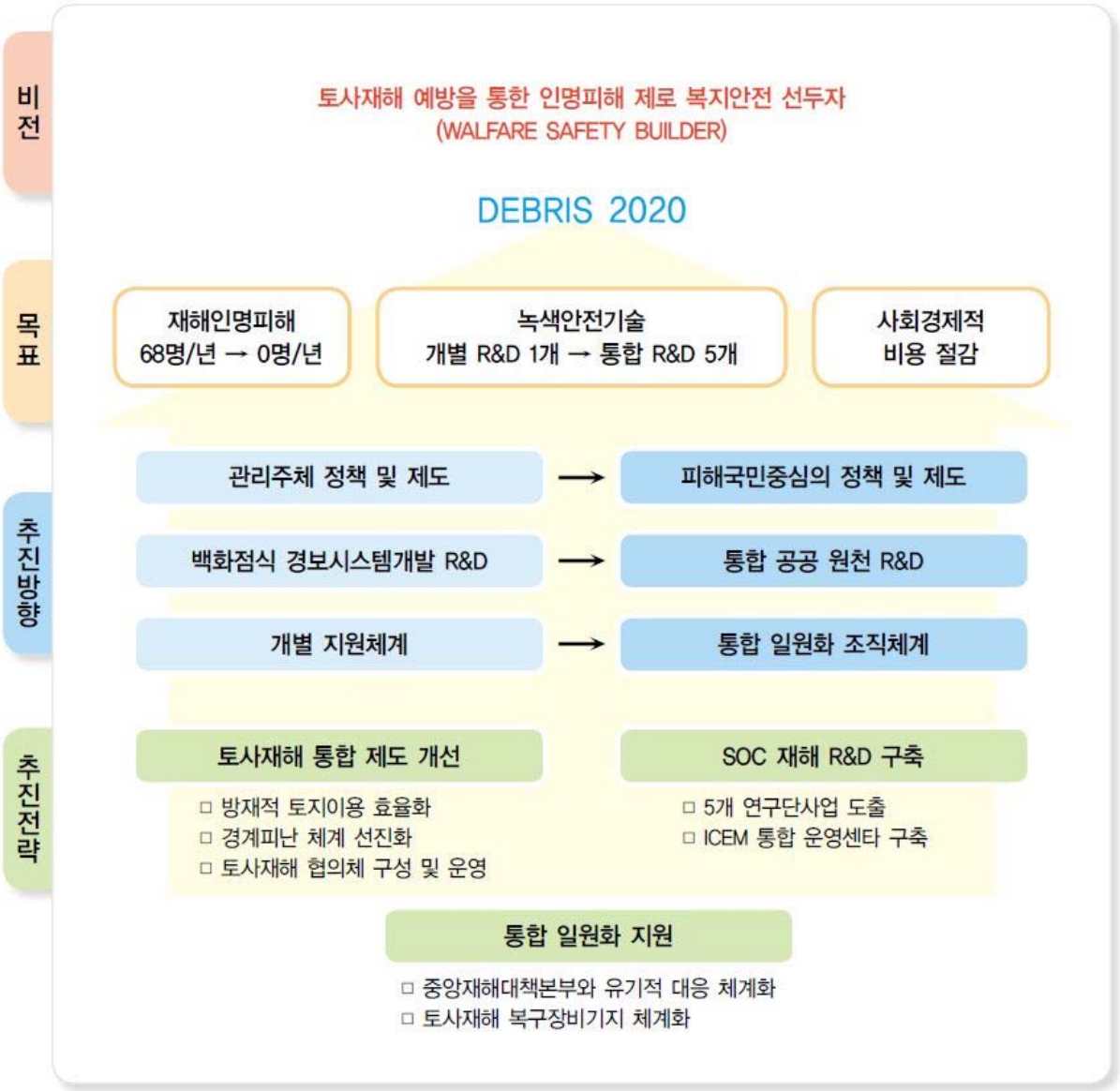
- 산사태 예보기준은 강우강도-강우기간에서 제시한 48시간 선행강우량을 고려하고, 산사태 및 토석류의 특성을 반영하기 위하여 10분 단위 강우강도를 적용하도록 하여야 함



<10분 단위 강우량과 시단위 강우량 산사태 경보 발생 시간 비교 (개념도)>

□ 토사재해 R&D 발전방향

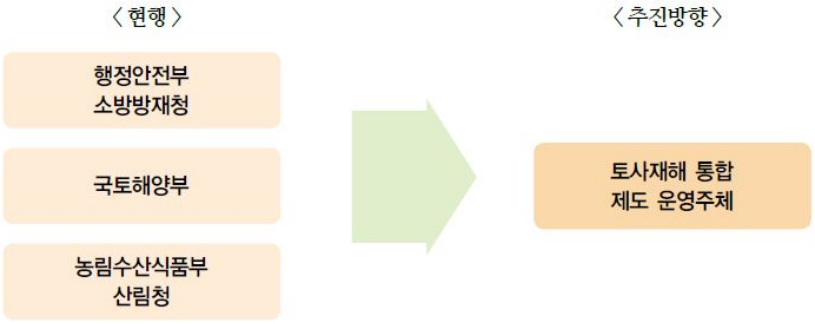
○ 기후변화에 의한 산사태 및 토석류를 포함한 토사재해로부터 생명을 보호하고, 안전복지 선두자로서 그 역할을 수행할 것입니다.



▶ DEBRIS 2020 R&D 추진전략 방향

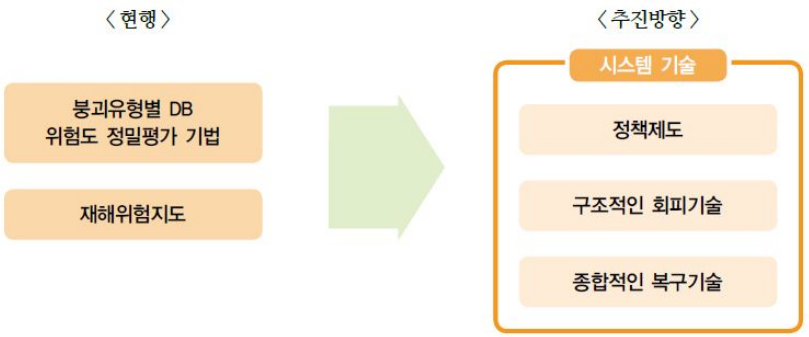
○ 산사태 및 토석류 대응 종합적인 통합 제도 마련

- 산사태 및 토석류 관련 제도 및 대응 기술 통합추진에 따른 효율적 대응



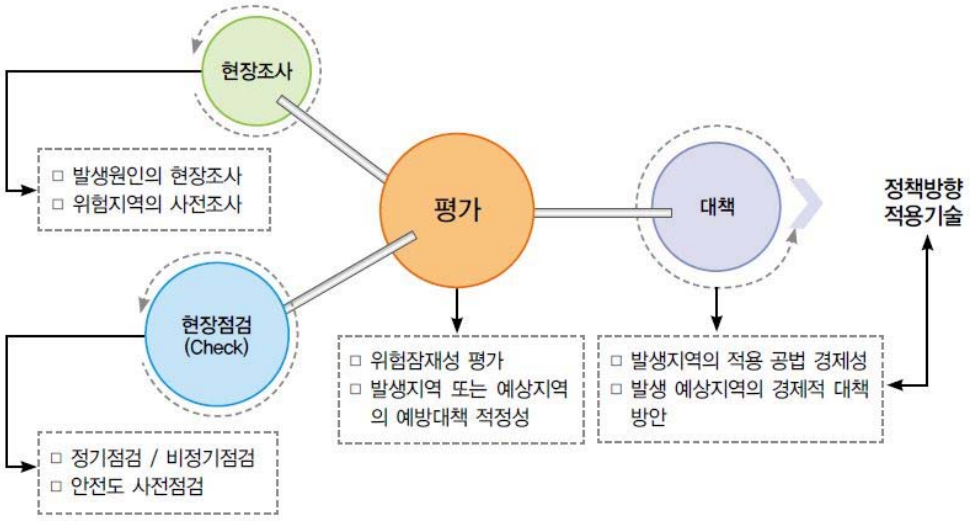
○ 토사재해에 대한 시스템 기술개발 전환

- 기존연구는 산사태 및 토석류에 대한 예경보 시스템 중심연구에서 산사태 및 토석류를 포함한 토사재해에 대한 통합연구 전략



○ 토사재해에 대한 조사-평가-대책 전담 연구센타 설립

- 산사태 및 토석류에 대한 조사, 점검, 평가, 관리에 대한 센타를 설립하여 국민의 안전복지를 추구하도록 전략추진(2016년)

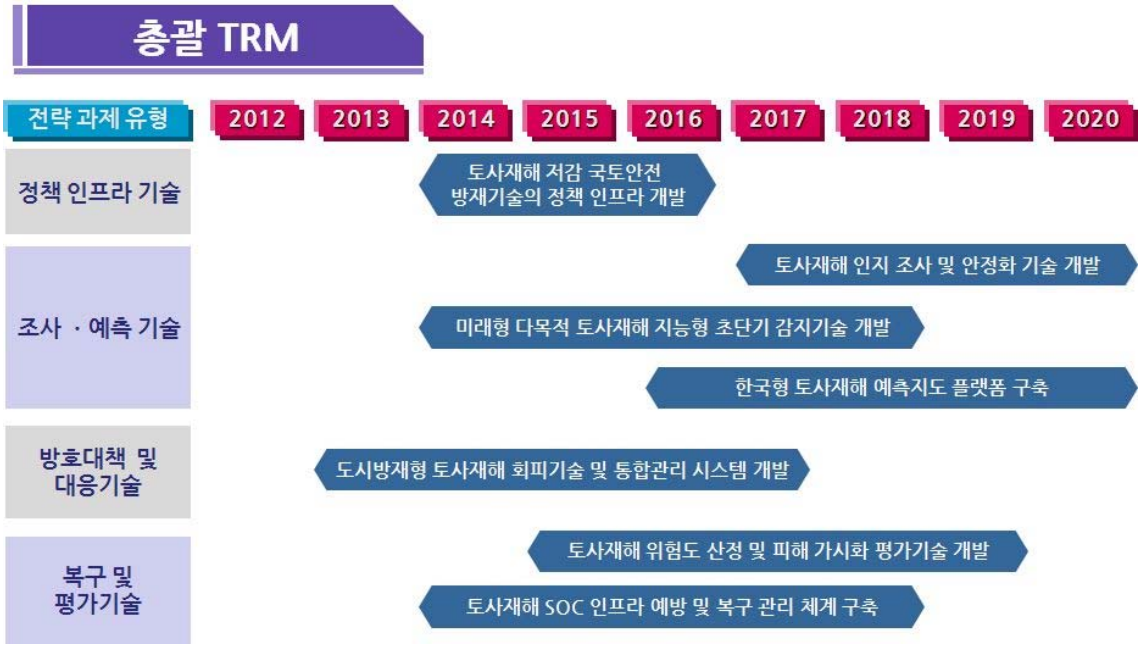


▶ DEBRIS 2020 7대 전략과제

○ 토사재해 예방을 통한 인명피해 제로로 복지안전을 달성하기 위한 전략과제

- 토사재해 저감 국토안전 방재기술의 정책 인프라 개발
- 토사재해 인지 조사 및 안정화 기술 개발
- 미래형 다목적 토사재해 지능형 초단기 감지기술 개발
- 한국형 토사재해 예측지도 플랫폼 구축
- 도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리 시스템 개발
- 토사재해 위험도 산정 및 피해 가시화 평가기술 개발
- 토사재해 SOC 인프라 예방 및 복구 관리 체계 구축

▶ DEBRIS 2020 로드맵



Ⅲ 연구성과 활용방안

□ 산사태 및 토석류 정책 대책 방안 및 R&D 로드맵

○ 국내외 산사태 및 토석류 대응 정책을 비교 분석하여 국내 실정에 맞는 기준 및 제도를 제시함. 그리고, 산사태 및 토석류의 대책을 제시함과 동시에 기후변화에 의한 산사태 및 토석류 대응 방재 방향 수립함

○ 본 과제에서 제시한 정책방안은 관련부처에 의견 및 과제등으로 추진될 예정이며, R&D 로드맵의 순서에 따라 일부 주제는 상세과제의 기획이 시행되었으며, 나머지 주제들도 기획과제가 추진될 예정임

Ⅳ 기대효과

□ 기술적 기대효과

○ 신개념 산사태 및 토석류 R&D 계획수립으로 기술발전을 도모함과 동시에 개발된 제품의 수출을 기대

□ 경제적 기대효과

○ 효율적인 방재예산 집행을 도모하여 국가예산 절감 및 인프라시설의 유지관리 효율화가 기대됨

□ 사회적 기대효과

○ 체계적인 산사태 및 토석류 대응전략 수립으로 대국민 신뢰성 향상 및 공무원 및 공공기관의 기술 이해도를 높임

첨부1 논문 실적

□ 학술회의 발표

순번	학술지명	논문명	발표일	비고
1	한국방재학회	토석류 대책구조물 설계를 위한 모형실험	2012.02.16	국내
2	추계지질과학연합 학술대회	불포화토 내 포화깊이비를 고려한 무한사면 안전율 해석식 제안	2012.10.24	국내
3	대한토목학회 정기학술대회	강우자료를 이용한 국내 산사태 및 토석류 예보기준 검토	2012.10.24	국내
4	대한토목학회 정기학술대회	산사태 및 토석류 재해 대응 기술 R&D 로드맵 제시에 관한 연구	2012.10.24	국내

첨부2 **연구비 세부 현황**

□ 연구기관별/연차별 연구비

(단위 : 천원)

구분		연구과제명	연구기관	연구책임자	'11		계	
					정부	기업	정부	기업
총괄	주관	산사태 및 토석류 유형별 피해저감 전략수립	한국건설기술연구원	구호본	150,000		150,000	
	공동	GIS를 이용한 지질별 산사태 및 토석류 발생 유형분석	한국지질자원연구원	채병곤	50,000		50,000	
	계				200,000		200,000	

부록2. 연구성과집

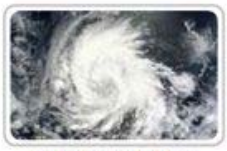
산사태 및 토석류 피해 저감 전략 제시

1 연구배경

- 기후변화에 의한 태풍 및 집중호우 증가
- 산사태 및 토석류 재해에 의한 재산 및 인명피해증가
- 산사태 및 토석류 피해 복구비용 증가
- 산사태 및 토석류 대응을 위한 전략 계획 필요



산사태 복구비용, 산림청



허리케인 이삭, 2012



태국홍수, 2011



춘천 산사태, 2011



우면산 산사태, 2011

2 연구목표

- 산사태 및 토석류 사전 재해 예방을 위한 발생유형 정립과 피해저감 전략 계획 수립

3 연구내용

- 산사태 및 토석류 대응 종합적인 통합 제도 마련

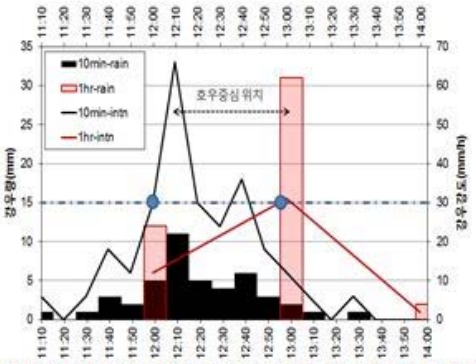


- 토사재해에 대한 시스템 기술개발 전환



- 산사태 예보기준 제안

산사태 예보기준은 강우강도-강우기간에서 제시한 48시간 선행강우량을 고려하고, 산사태 및 토석류의 특성을 반영하기 위하여 10분 단위 강우강도를 적용



10분단위 강우량과 시단위 강우량 산사태 경보 발생시간 비교

4 연구성과

- **토사재해 R&D 발전방향**



- **DEBRIS 2020 7대 전략과제**

➢ 토사재해 저감 국토안전 방재기술의 정책 인프라 개발

➢ 토사재해 인지 조사 및 안정화 기술 개발

➢ 미래형 다목적 토사재해 지능형 초단기 감지기술 개발

➢ 한국형 토사재해 예측지도 플랫폼 구축

➢ 도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리 시스템 개발

➢ 토사재해 위험도 산정 및 피해 가시화 평가기술 개발

➢ 토사재해 SOC 인프라 예방 및 복구 관리 체계 구축

- **DEBRIS 2020 로드맵**



5 기대효과

- **(기술적) 신개념 산사태 및 토석류 R&D 계획 수립으로 기술발전도모**
- **(경제적) 효율적인 방재예산 집행을 도모하여 국가예산 절감 및 인프라시설의 유지관리 효율화**
- **(사회적) 체계적 대응전략 수립으로 대국민 신뢰성 향상 및 공공기관의 기술 이해도 향상**

부록3. 성과총람

국토해양기술연구개발사업
성과총람 원고

주관연구기관명	한국건설기술연구원
연 구 책 임 자 명	구호본

Ⅰ. 과제 기본정보

사업명	R&D정책인프라사업	
최상위과제명	산사태 및 토석류 발생유형별 피해저감 전략수립연구	
(핵심·세부) 과제명		
연구책임자 정보	(성 명) 구 호 본 (전 화) 031-910-0217 (이메일) HBKOO@KICT.RE.KR (소 속) 한국건설기술연구원	

Ⅱ. 연구개발 배경 및 목표

1. 연구배경

○ 우리나라는 전국토의 70% 이상이 산지로 구성되어 있고 연평균 강우량 1,300mm의 2/3 이상이 여름철에 집중되어 있어 산사태 및 토석류 발생은 필연적이다.

○ 산사태 및 토석류는 지역적 특성을 고려한 대책공법의 부족과 한정된 재정 여건으로 인한 지역 방재 인프라의 구축 미흡 등의 문제가 더하여져 집중호우에 의한 수해 피해의 우려가 더욱 커지고 있는 실정이다.

○ 본 연구는 산사태 및 토석류에 대한 국가적 차원의 대책을 수립하기 위하여 기존 산사태 및 토석류 관련 연구과제의 성과물을 활용하여 발생유형을 분류하고 원인별, 유형별 대책방안(정책, 제도 및 R&D전략)을 수립하고자 한다.

2. 연구목표

○ 국토 산사태 및 토석류 발생 유형 분석 및 특성 해석
○ 산사태 및 토석류의 유형별 기준 및 대책 제시
○ 기후변화에 의한 산사태 및 토석류 대응 방재 방향 수립

Ⅲ. 연구개발 내용 및 결과물

1. 주요 연구내용

(1) 국토 산사태 및 토석류 발생 유형 분석 및 특성 해석

○ GIS를 이용한 지질별 기존의 연구조사 자료 및 사례 분석을 통한 유형 분석
○ 지형별(도시, 산지부) 및 시설별(공동주택, 도로)에 따른 산사태 및 토석류 유형 분석
○ 수문자료를 활용한 국내 산사태 및 토석류 피해 사례 분석 및 원인 규명 제시

(2) 산사태 및 토석류의 발생 유형에 따른 정책 대책 방안

○ 국내외 산사태 및 토석류 관련 기준, 제도, 정책, 기술개발 등 현황 조사
○ 산사태 및 토석류 대응 제도 및 기술 기준 등 정비 방안

(3) 기후변화에 의한 산사태 및 토석류 대응 방재 마스터 전략 계획

○ 산사태 및 토석류 대응정책 및 통합체계 기술 R&D 로드맵 제시

2. 연구개발 결과

※ 관련사진을 반드시 첨부하고, 캡션으로 설명

(1) 국토 산사태 및 토석류 발생 유형 분석 및 특성 해석

○ 우리나라와 같이 대부분의 자연사면 산사태가 하절기 집중호우에 의해 발생하며, 자연사면에서 복합적인 형태로 발생하는 조건에서 적절하게 활용될 수 있을 것이다. 강우에 의해 발생하는 산사태는 강우량과 조건 등에 따라 산사태와 토석류의 속도가 큰 차이가 있기 때문에, 단순히 산사태 발생유형만을 고려한 분류 보다는 산사태와 토석류의 이동속도를 함께 고려할 필요가 있다. 따라서, 국내에서 재해로 인한 피해저감 목적의 방재행정 차원에서는 Sidle과 Ochiai가 제안한 분류안이 적절할 것으로 제시하였음.

표. Sidle과 Ochiai(2006)가 제안한 산사태 분류

Types of soil mass movements	Rainfall and other climate conditions that contribute to initiation of slope failures	Timing of the landslide
Shallow, rapid landslides	A large total amount of rain during and individual storm, often with a period of high intensity; exacerbated by wet antecedent conditions. Also, during prolonged and rapid periods of snowmelt.	During the storm event or at the peak of rapid snowmelt.
Rapid, deep slides and flows	An extended rainy period (or snowmelt period) followed by a large to moderately large storm; if preferential flow paths exist route water quickly to the failure plane then these failures can occur during an isolated high-intensity rain event.	Usually following extended periods of rain, but towards the latter part of a moderate to large storm.
Slower, deep-seated landslides	Typically requires extended rainfall (or snowmelt) to initiate movement; movement continues through the rainy(or snowmelt) season and then subsides when rainfall is infrequent.	The lag time between the start of a rainy season (or snowmelt season) and the onset of slope movement is usually at least several days, but can be several weeks or more.
Slow flows and deformations	Same as for slower, deep-seated landslides(solifluction responds to snowmelt).	Same as for slower, deep-seated landslides.
Surficial mass wasting	Initiated by freeze-thaw (frost heave), wetting-drying, and wind under nature conditions.	May occur year-round, but most active when frost heave and wetting-drying processes predominate.

○ 위성사진을 통한 산사태/토석류 발생현장에 대한 분석 결과, 비교적 소규모 산지이거나 시설물 시공에 따른 지형의 변화가 없는 지역의 경우에는 산사태/토석류 발생과 주변 지형 및 시설물의 특성과의 상관성을 찾을 수 없었으나, 주변 지역에 새롭게 생성되는 시설물, 개발 등에 의하여 지형 변화의 영향을 상당 부분 받은 것으로 관찰되는 경우에는 시설물 시공 중, 시공 후 강우에 대비하기 위한 배수시설 등과 관련되어 산사태/토석류가 많이 발생되었다.

○ 현재의 산사태 기준은 과거의 산사태 이력 분석을 통해 평균적인 개념에서 설정된 값으로 산사태 발생 사후 분석측면에서는 어느 정도 적정성을 가지고 있다고 판단된다. 그러나 실무 예보에 활용하기에는 미흡한 점이 많다. 특히, 일강우량, 누가강우량, 시간최대강우량(최대 시강우강도) 만을 고려한 기준으로 강우의 지속기간에 따른 산사태 발생특성, 시단위 이하 강우강도를 고려하지 못해 실제 집중호

우의 적정 예보시간을 확보하지 못하는 점 등 많은 실무적인 적용의 한계를 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 10분단위 강우강도 - 선행강우량을 도입한 경보기준의 가능성을 고찰하였다.

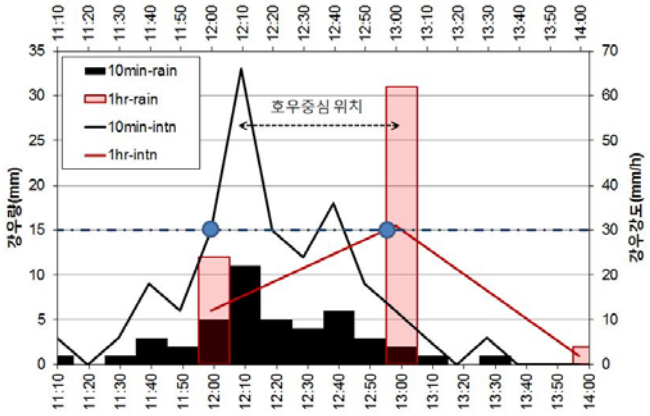


그림. 10분 단위 강우량과 시단위 강우량 산사태 경보 발생 시간 비교 (개념도)

(2) 산사태 및 토석류의 발생 유형에 따른 정책 대책 방안

○ 국내외 산사태 및 토석류 관련 기준, 제도, 정책, 기술개발 등 현황 조사하여, 산사태 및 토석류 대응 제도 및 기술 기준 등 정비 방안을 제시하였다.



그림. 산사태 및 토석류 대응 제도 및 기술기준 정비방안

(3) 기후변화에 의한 산사태 및 토석류 대응 방재 마스터 전략 계획

○ 토사재해 통합체계 기술 R&D 로드맵을 제시하였다.

추 진 중 점 과 제	• 토사재해 저감 국토안전 방재기술의 정책 인프라 개발 • 토사재해 인지 조사 및 안정화 기술 개발 • 미래형 다목적 토사재해 지능형 초단기 감지기술 개발 • 한국형 토사재해 예측지도 플랫폼 구축 • 도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리 시스템 개발 • 토사재해 위험도 산정 및 피해 가시화 평가기술 개발 • 토사재해 SOC 인프라 예방 및 복구 관리 체계 구축

3. 연구개발 성과

(1) 공공적 성과

○ 본 연구에서 제시한 “도시방재형 토사재해 회피 기술 및 통합관리 시스템 개발 기획”이 건설교통연구기획사업에 반영되어 상세기획 사업이 시행됨.

○ 국민의 안전복지를 위한 산사태 및 토석류 피해저감 전략(DEBRIS 2020) 중장기 R&D 로드맵을 제시함.

(2) 기술적 성과

○

○

○

(3) 학술적 성과

○ 본 연구의 결과를 국내학술발표회에서 4건을 발표함

- 토석류 대책구조물 설계를 위한 모형실험(국내외자료분석 및 활용)
- 산사태 및 토석류 재해 대응 기술 R&D 로드맵 제시에 관한 연구(국내외자료분석 및 활용)
- 불포화 내 포화깊이비를 고려한 무한사면 안전율 해석식 제안(GIS Data 를 이용한 자료분석)
- 강우자료를 이용한국내 산사태 및 토석류 예보기준 검토(GIS Data 를 이용한 자료분석)

(4) 경제적 성과

○

○

○

(5) 기타 성과

○

○

○

Ⅳ. 활용계획 및 기대효과

1. 활용계획

○ 본 과제에서 제시한 정책방안은 관련부처에 의견 및 과제등으로 추진될 예정이며, R&D 로드맵의 순서에 따라 일부 주제는 상세과제의 기획이 시행되었으며, 나머지 주제들도 기획과제가 추진될 예정임.

2. 기대효과

○ 본 과제에서 제시한 제도의 도입으로 원활한 방재정책이 수립될 수 있으며, 제시된 R&D 로드맵은 중장기적인 개발전략을 제시함으로서 효율적인 계획이 가능함.

3. 선진 기술수준과의 기술격차 해소

※ 구체적인 수치로 설명(예:년,%)

○ 본 과제에서 제시한 제도가 도입된다면, 방재 선진국과의 격차가 5년 이내로 줄어들 것으로 판단됨. 그리고, 본 과제에서 제시한 R&D 사업이 추진된다면, 선진 기술수준에 90%에 도달 될 것으로 판단됨.

부록4. DEBRIS 2020

국민의 안전복지를 위한

산사태 및 토석류 피해저감 전략

-DEBRIS 2020-



KICTEP
한국건설교통기술평가원

KICT 한국건설기술연구원
KOREA INSTITUTE of CONSTRUCTION TECHNOLOGY

C.O.N.T.E.N.T.S

목차

Ⅰ. 산사태 및 토석류 피해저감 전략 수립 정의

□ 산사태 및 토석류 피해저감 전략수립 과업의 정의
□ 산사태 및 토석류의 정의

Ⅱ. 산사태 및 토석류 대응 전략 필요성

□ 기후변화에 의한 태풍 및 집중호우 증가
□ 산사태 및 토석류 재해에 의한 재산 및 인명피해 증가
□ 산사태 및 토석류 피해 복구비용 증가
□ 산사태 및 토석류 대응을 위한 전략 계획 필요

Ⅲ. 산사태 및 토석류 대응 전략 방향

□ 산사태 및 토석류 대응 종합적인 통합 제도 마련
□ 산사태 및 토석류 등 토사재해에 대한 전담 조직 및 센타 구축
□ 산사태 및 토석류 저감 R&D를 통한 국토해양 안전복지의 선도적 역할

Ⅳ. 국내외 대응 시스템 분석 및 개선방안

1 국내 제도의 현황과 개선점
2 국외 산사태 및 토석류 대응 시스템
3 토사재해 분류 및 예보기준

Ⅴ. 토사재해 피해 저감 전략

□ 비젼 및 목표
□ DEBRIS 2020 추진전략 방향
□ DEBRIS 2020 7대 전략과제
□ DEBRIS 2020 로드맵
□ 전략과제

I. 산사태 및 토석류 피해저감 전략 수립 정의

▢ 산사태 및 토석류 피해저감 전략 수립 과업의 정의

(목 적)

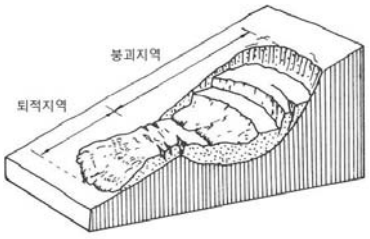
산사태 및 토석류 사전 재해 예방을 위한 발생유형 정립과 피해저감 전략 계획 수립

(과업범위)

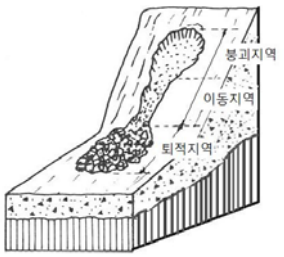
ㅇ 국내 산사태 및 토석류 발생유형 기준 및 대책
ㅇ 산사태 및 토석류 피해저감 전략 계획 수립

▢ 산사태 및 토석류의 정의

산지의 비탈면 지반이 호우, 지진 및 인위적인 이유로 중력방향으로 활동하여 흘러내리는 현상. 산사태가 원인이 되어 토석류 등을 유발시키기도 함.



토사 및 자갈, 암석등이 물과 혼합되어 일체화하여 흘러내리는 현상. 유수의 힘으로 암석 및 자갈을 급속하게 유하시키며 하류에 큰 충격력을 전달함.



Ⅱ. 산사태 및 토석류 대응 전략 필요성

▢ 기후변화에 의한 태풍 및 집중호우 증가

○ 지구 온난화로 인한 이상기후로 세계 각 나라에서 자연재해로 인해 막대한 인명과 재산의 피해가 발생

※ 미국의 허리케인 피해규모 40조원(2011), 태국 홍수 피해규모 52조원(2011)



〈허리케인 이삭, ‘12〉



〈허리케인 카트리나, ’ 09〉



〈태국 홍수, ‘11〉

▢ 산사태 및 토석류 재해에 의한 재산 및 인명피해 증가

○ 전세계 7년간(2004~2010년) 산사태 총 2,620건 발생, 사망자는 약 3만2,322명으로 년간 약 4,600명 사망, 우리나라는 10년간(2001-2010년) 연평균 인명피해 68명, 재산피해 2조 1,214억원 발생하며 최근 도심지의 인명피해 증가

※ 국내 산사태 사망자 : ‘11년 우면산 산사태 17명, 춘천 산사태 13명

※ 국외 산사태 사망자 : 중국 ‘10년 간쑤성 1,117명



〈한계령 토석류, ‘06〉



〈춘천산사태, ’ 11〉

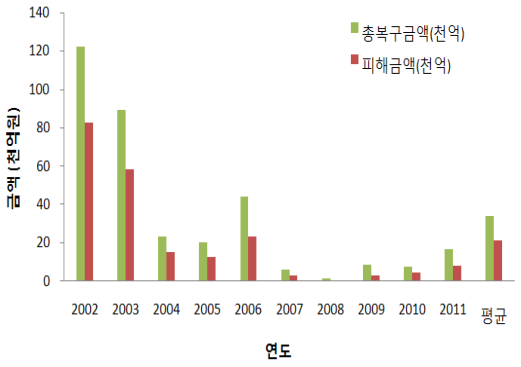


〈우면산 산사태, ‘11〉

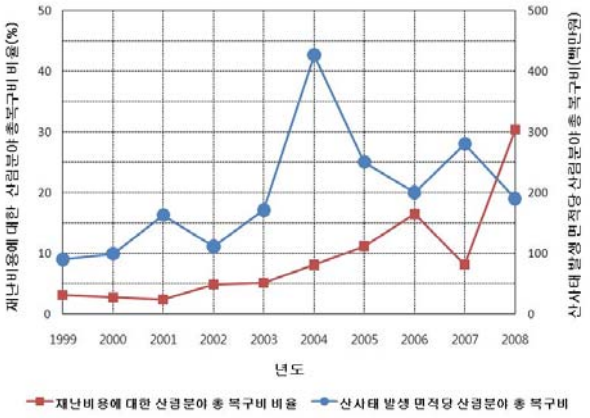
▢ 산사태 및 토석류 피해 복구비용 증가

○ 자연재난에 의한 재산 피해 규모에서 산림분야 복구비가 꾸준히 증가하고, 산사태 발생 면적당, 산림분야 복구비도 해마다 증가

※ 서울지역은 '10년 대비 발생빈도는 35% 감소반면 피해면적은 3배 이상 증가, 복구비용도 2010년 71억원에서 2011년 386억원으로 1년사이 5배 이상 증가



<자연재해 피해 및 복구 비용, '10년 소방방재청>



<산사태 복구 비용> 자료: 산림청

▢ 산사태 및 토석류 대응을 위한 전략 계획 필요

○ 기후변화에 의한 산사태 및 토석류가 대형화, 복잡화 그리고 도심지역에서 발생됨에 따라 인명피해 최소화를 위하여 제도, 지원 및 복구체계, 연구개발 등 체계적인 계획을 수립하여 산사태 및 토석류 선제적 대응 필요

Ⅲ. 산사태 및 토석류 대응 전략 방향

▢ 산사태 및 토석류 대응 종합적인 통합 제도 마련

○ 산사태 및 토석류 관련 제도 및 운영 주체, 원인 조사 및 대응이 각각 달라 체계적인 지원체계 및 복구 협력이 미흡하여 종합적으로 대응한계

부처	정책방향	관련법	기관
국토해양부	과학적 도로관리 추진	· 도로의 유지·보수 등에 관한 규칙 · 시설물의 안전관리에 관한 특별법 · 국토의 계획 및 이용에 관한 법률	한국건설기술 연구원 (도로비탈면)
행정안전부 소방방재청	재해취약지역 투자확대 서민밀집 위험지역 정비 급경사지 붕괴위험지역 정비	· 급경사지 재해예방에 관한 법률 · 자연재해대책법 · 재난 및 안전관리기본법	국립방재 연구원 (급경사지)
농림수산식품부 산림청	산림재해 대응 체계 확립	· 산지관리법 · 사방사업법 · 산림보호법	산림과학원 (자연비탈면)

▢ 산사태 및 토석류 등 토사재해에 대한 전담 조직 및 센타 구축

○ ‘11년 우면산 산사태 및 춘천 산사태 발생 이후 산사태 전담하는 조직이 없어 지자체 중심으로 조사, 복구 추진함으로써 일선 현장에서 혼란이 가중

※ 서울특별시, 급경사지 안전관리의 전담과인 산지방재과 개설(‘11.11)

※ 홍콩, GEO(Geotechnical Engineering Office) 설립운영(사면붕괴 피해저감 목적)

※ 일본, PWRI(Public Works Research Institute) 운영(토사재해 위험지구지정 제도)



<서울특별시 푸른도시국 조직>



<홍콩의 GEO>

▢ 산사태 및 토석류 저감 R&D를 통한 국토해양 안전복지의 선도적 역할

○ ‘11년 우면산 산사태를 계기로 도시안전을 위한 대책이 절실하므로, 이를 계기로 국토해양 R&D를 통한 산사태 및 토석류 피해저감기술 개발을 통하여 국민의 안전복지 증진이 필요

○ 따라서, 도로비탈면은 국토해양부, 산지는 산림청 등 관리기관이 상이하고 방재 예산 및 공법 적용의 한계성으로 산사태 및 토석류 방재 주체 조정통합 필요

○ 향후 산사태 및 토석류 R&D에 대한 비전과 전략을 제시한 “DEBRIS 2020”의 추진
- DEBRIS 20202 발전전략에 의한 구체적인 연구사업 발굴과 투자 계획 필요
- 국토해양 R&D 발전전략과 연계한 산사태 및 토석류 R&D 로드맵 필요



<기후변화와 재해 위험관리 및 정책 및 기술개발 관계>



<산사태 및 토석류 연구 센타>

Ⅳ. 국내·외 산사태 및 토석류 대응 현황분석 및 개선방안

1 국내 산사태 및 토석류 제도

○ **(현 황)** 산사태 및 토석류 관련 법령은 크게 국토해양부, 소방방재청, 산림청 관련 법령으로 나뉘며 각 부처의 특성에 따라 법령의 규제, 관리 대상 및 방법 등이 다름

<관련 부처별 법령비교>

부처명	법령	목적
국토해양부	1) 도로의 유지·보수 등에 관한 규칙	풍수해 등 기타 재해예방 및 유지 관리
	2) 시설물의 안전관리에 관한 특별법	대규모 시설물의(급경사지 포함) 재해예방 및 관리
	3) 국토의 계획 및 이용에 관한 법률	방재지구내의 행위제한
소방방재청	4) 급경사지 재해예방에 관한 법률	급경사지 붕괴위험 지역의 재해예방 및 관리 산사태 현상을 규정하여 재해예방 활동의 근거를 제공
	5) 자연재해대책법	재해위험지구정비 산사태의 예방-복구-관리
	6) 재난 및 안전관리기본법	재해위험지구정비 지자체별로 의무적으로 수립하여 토사재해를 저감하기 위한 구체적 시책사업을 실시
산림청	7) 산지관리법	토사유출 방지, 산사태 또는 인근 지역의 피해 등 재해의 방지나 경관 유지 또는 복구에 필요한 조치
	8) 사방사업법	산사태 예방 및 복구 산사태 현상을 규정하여 재해예방 활동의 근거를 제공
	9) 산림보호법	재해방지보호구역 : 토사 유출 및 낙석의 방지 등으로 인한 피해의 방지를 위해 필요하다고 인정되는 구역

<관련 부처별 정책방향 비교>

부처명	정책	주요내용
국토해양부 교통정책실	과학적 도로관리 추진	도로절토사면 운영업무를 전문기관에 위탁 시행하여 효율적이고 체계적인 유지관리를 통한 안전사고 예방 및 적정예산 운영도모 -위험 절토사면에 대한 현장조사, 자동계측, 사면 안정성 검토, 투자우선순위 결정 및 절토사면 Data-Base관리 -일반국도 상 절토사면 12,650개 중 위험절토사면 4,450개를 선정하여 매년 절토사면 정비 실시 -도로절토사면 및 터널 입·출구 절토사면에 상시계측시스템과 CCTV를 설치 추진
행정안정부 소방방재청 방재관리국	국민생활 안전문화 확산	재난안전 교육기반 확충 ·방재안전교육 및 전문인력의 체계적 양성을 위한 법적근거 마련 ·대국민 쌍방향 재난상황 전파체계 구축 -산사태, 침수지역, 대형화재 등 재난상황 알림 및 행동요령 서비스 제공 -생활주변 위험요인 또는 피해상황 신고, 해당기관에서 즉시 조치
	재해취약지역 투자 확대	재해위험지구 정비 : 224개소 5,176억원 ·인명피해 우려가 높은 상습침수 및 붕괴위험지역 우선 정비 추진 ·사면보강보다는 근원적인 위험요인 해소를 위해 안전지대로 이주 유도
	서민 밀집 위험지역 정비	·달동네 등 재난취약계층 밀집지역에 대한 우선적 재해대책 시행 ·노후사면, 붕괴우려 비탈면, 마을 배수시설 등 공공시설 정비
	급경사지 붕괴위험지역 정비	·생활권 주변 위험지역 내 주택 이주, 사면정비 등을 통한 안전 확보 ·인명피해 우려지역에 계측기를 설치하여 붕괴예측, 주민대피체계 구축 ·소방방재청에 붕괴위험지역 지정 권고권한 부여(현행 : 시장·군수·구청장)
	안전기준 표준화로 대외 경쟁력 강화	·적용 법령에 따라 달리 규정된 안전관리 및 시설기준의 표준화 추진 ·ISO 재난관리 국제표준의 국내 적용, 확산방안 마련 ·행안부-기표원-소방방재청 간 정책협의체 구성, 공동 대응 추진
농림수산 식품부 산림청	산림재해 대응 체계 확립	·산사태 방재 대책 현실화 -토석류 위험지도 제작·보급 등을 통해 산사태 위험지를 생활권 중심으로 확대·개편 ·사방댐(695개)과 산림내 계곡정비사업(416km) 등 사방사업을 도시·생활권 지역에 집중

❑ 토사 재해 관련법

ㅇ 기본적으로 **급경사지법**(제13조 붕괴위험지역의 정비사업 실시계획)과 **사방사업법**(제3조 사방사업의 구분, 가항 산사태예방사업, 나항 산사태복구사업)을 근거로 함

ㅇ **재난및안전관리기본법**의 "제3장 안전관리계획"에 의해 지자체별로 토사재해를 저감하기 위한 시책사업 실시

ㅇ**자연재해대책법**에 의거하여 "제12조 자연재해위험지구의 지정" 가능, 자연사면에서의 산사태의 예방-복구-관리에 중점

❑ 산사태 위험지구 지정 및 관리

ㅇ 급경사지법의 "붕괴위험지역"과 산림보호법의 "재해방지보호구역"을 말하며, 담당공무원 및 전문가의 조사 및 평가에 의해 지정

ㅇ 붕괴위험지역의 경우, ① 지속적인 모니터링 ② 위험요인 해소 사업 ③ 경계피난 대책의 강구가 필요하나, 적극적 추진이 어려운 상황

ㅇ 산림보호법의 "재해방지보호구역"은 산림청을 중심으로 국유림 일원에서 지정되며, 지자체가 지정하거나 사유지에 대하여 지정된 사례가 없슴

ㅇ 기존 거주지의 토사재해 위험지역은 국토법의 용도지구인 "방재지구", 용도지역인 "자연환경보전지역"으로 지정되어 개발행위를 제한하고 있슴

< 잠재적 재해위험지구 지정>

문제점	해결방안
이미 산사태 위험으로 인해 위험지구로 지정된 사면의 경우 위험요인 해소사업이 신속하게 전개되지 않을 경우, 민원 발생 소지가 있다	자연재해대책법의 자연재해위험지구의 지정에 의해 관리
위험도가 높지는 않으나 최근과 같은 악기상 조건에서는 잠재적 산사태 위험 사면은 위험지구로 지정되지 않았기 때문에 기존에 해왔던 유사 개발사업(택지조성, 주택신축, 증개축 등, 도로개설 등)이 일상적으로 추진된다. 실제 재해발생 위험이 가장 높은 경우	인공사면은 급경사지붕괴법의 붕괴위험지역으로 지정하고, 자연사면은 산림보호법의 재해방지보호구역으로 지정
당초에는 안정화된 자연사면이었으나 신규로 대지, 택지, 도로 및 공원 조성 등으로 인해 인공사면을 포함한 급경사 사면이 발생한 경우	급경사지보호법과 사방사업법에 의한 사업을 전개하고, 지속적 관리를 위해 풍수해저감종합계획과 연계하여 토사재해 위험 관리지구로 관리하면서 더 이상의 시설물 입지는 제한하는 방안

❑ 국가설계기준

ㅇ 토석류 대책에 대하여 통일된 기준이 없으며 산림청에서는 “사방기술교본”을 제정하여 운용중

ㅇ 도로설계편람(국토해양부), 건설공사비탈면설계기준(국토해양부), 도로배수시설설계 및 유지관리지침(국토해양부)에서 부분적으로 토석류에 대하여 언급

▢ 정책 및 제도의 문제점

ㅇ 각 부처는 피해 방지 및 복구라는 공동 목표를 갖고 있으나 표준화 및 체계화가 부족하여 정책적 중복이 발생

ㅇ 외관상 시선이 닿지 않는 상부(또는 상류)지역에 위치하여 민원이 제기되지 않는 경우가 많고, 조사에 많은 비용이 소요되어 산림보호법의 “재해방지보호구역” 지정 사례 적음

ㅇ 도시팽창으로 인해 산록부 및 산복부까지 건축물 및 사회기반시설이 입지하여, 토사재해를 유발시키고 이로 인하여 하류부에서 시설물의 피해 및 인명피해가 발생하나 규제할 방법이 없음

ㅇ 특히, 건축물(특히 펜션 등)은 사전재해영향성검토(5000㎡ 이상) 대상이 아니므로, 인허가 단계에서 지자체가 재해를 염려하여 인허가를 거부할 수 없음

ㅇ 붕괴위험지역 또는 재해방지구역으로 지정할 경우 토지 소유자의 소유권을 제한하게 되고 민원이 발생되어 지자체에서 추진하지 않는 상황

ㅇ 지자체 마다 토사재해 담당부서가 다르므로 예방 및 복구 업무를 일관성 있게 추진하기 위해서 관련법 및 지자체 조직의 정비가 필요

ㅇ 토사재해 관리부서인 행정안전부 소방방재청, 산림청, 국토해양부에서 일부 업무 중복이 발생하고, 피해 국민을 위한 유기적인 연결이 부족함

ㅇ 토사재해에 대하여 우리나라 실정에 맞는 상세한 분류체계 및 복구비 계상근거가 정립되어 있지 않으며, 통일된 조사표, 조사기법이 없음

□ 정책 및 제도 개선방향

1) 토사재해 위험지구설정 개선 방안

· 현재의 “산사태 위험지역 지정” 방식의 관리체제를 급경사지, 토석류 및 산사태 현상 등으로 유형을 세분화하고 적합한 조사표, 조사기법이 선행되어야 하며, 토사재해 위험지구 관리개념 체계화

2) 방재적 토지이용의 추진

· 도심 내에서 제1종 지구단위계획의 수립을 통한 토지이용의 합리화, 구체화하고, 도심외곽 지역에서는 도시화가 예산되는 지역을 체계적으로 개발 및 관리가 필요.

· 용도지역 “자연환경보전지역”의 지정에 의한 개발행위의 규제, 용도지구의 “방재지구” 지정에 의한 개발행위의 규제 필요

3) 개선된 토사재해 위험구역 관리방안 제안

· 기초조사의 개선 및 내실화 추진

· 경계피난체계의 정비 및 제도 활성화

· 토사재해 정보 체계의 효율화 및 일원화

· 재해방지 주민교육 및 훈련 강화

· 위험지구 내 개발행위 규제



<토사재해 정책 및 제도 개선방향>

2 국외 산사태 및 토석류 대응 시스템

(현 황)

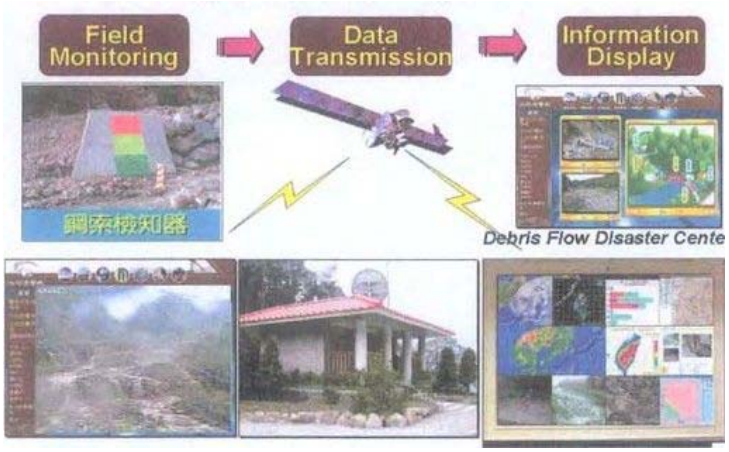
○ 미국 지질연구소(USGS)는 국립산사태정보센터(NLIC)가 주축이 되어 전역을 대상으로 광역적인 산사태 취약성 평가 및 산사태 위험지도를 작성

○ 캐나다 지질조사소(GSC)에서는 지반재해프로그램(GHEGP)을 통하여 토사재해 발생의 원인이 되는 지질 및 지형적 특징, 재해에 민감한 지질물질의 거동에 대한 특성을 파악하고 대책수립

○ 일본은 토목연구소, 교토대학 방재연구소와 일본지질조사소, 그리고 방재과학기술연구소를 중심으로 일본내 산사태 등 사면재해 위험지역을 분석하여 취약지역을 선정하고, 행정기관에서는 이를 관리함

○ 홍콩은 토력공정처(土力工程處, CED) 주관 하에 산사태 방지 대책 프로그램(LPM)을 수행. 1995년부터 홍콩 내 54,000개 사면의 데이터베이스를 구축, 관리하고 있으며 2010년까지 5,500개의 주요 사면을 추가로 등록 유지관리 수행

○ 대만은 국가재해저감과학기술센터(NCDR)의 사면재해전담부서에서 산사태 데이터베이스 구축 및 산사태 예측 모델을 개발하고, 지반재해를 예측함



<대만의 통합지반재해모니터링시스템 구성도>

○ 호주는 호주지질조사소(AGSO)에서 도시지역의 자연재해 취약성 평가를 수행하고, 도시주변의 산사태 위험도 평가 및 전국 산사태 데이터베이스 구축

<국외 산사태 및 토석류 위험지도 조사>

국가명	기관명	주요내용 및 개발기술
미국	지질조사소 (USGS)	· 재해정보 네트워크 구축(DIN) 프로그램 – 지반재해 조기경보 체제 구축 · 산사태 재해(LHA) 프로그램 – 미국 전역의 산사태 재해 대응체제 구축 연구 · 산사태 피해저감공법 연구 – 토석류 위험평가기술의 현황파악 및 방호시스템 개발(미국해양대기관리처(NOAA)와 공동수행)
캐나다	지질조사소 (GSC)	· 지질재해 및 지질환경(GHEG) 프로그램 – 자연재해 종합 프로그램 – 캐나다 동부 산사태 연구 – 산사태 발생 예측 연구
홍콩	자치정부 (CED/GEO)	· 산사태 방지대책(LPM)프로그램 – 홍콩 전역 사면분포현황·조사 – 주요 사면에 대한 산사태 상시 감시 및 사후 관리
일본	방재과학 기술연구소	· 종합방재 관련연구 · 설해방재 관련연구
	교토대 방재연구소	· 종합방재연구 · 지반재해연구
호주	지질조사소 (AGSO)	· 도시지역 자연재해 취약성평가 과제(NGVUC) – 도시주변 산사태 위험도 평가 연구 – 호주 전역 산사태 DB 구축연구

(국내현황)

○ 산림청은 우리나라 전역을 대상으로 과거 산사태 발생 이력을 검토하여 산사태에 영향을 미치는 주요 인자를 추출하여 웹기반 산사태위험지관리시스템으로 위험지도를 제공

○ 한국지질자원연구원은 많은 산사태 조사 관련 데이터베이스를 활용하였으며 사면경사, 토양의 건조단위중량, 암질, 투수계수, 공극률 등의 인자를 이용하여 산사태 위험지도 제작

○ 한국건설기술연구원은 일반국도의 절토사면 안정성 해석 및 대책 연구와 절토사면 유지관리시스템을 개발하여 일반국도에서 유지관리 우선순위를 결정

○ 수충부 및 토석류 연구단은 강원도 지역에 대해 유역별 토석류 데이터베이스에 대한 로지스틱 회귀분석을 수행하여 소유역 단위의 토석류 위험도를 평가

☐ 문제점

○ 산사태의 가장 중요한 강우에 대한 연구 미흡으로 산사태 예측의 신뢰성에 제한이 있고, 산사태 위험지도는 산사태 위험도가 높은 지점에 대한 위치 정보에 국한되며 산사태로 인한 피해 범위가 미흡

○ 산사태 사례 DB 구축, 통계학적 산사태 예측 모델 개발, GIS 기반 산사태 위험 관리 및 실시간 예/경보 시스템은 선진국 수준의 연구개발을 수행하고 있으나, 대부분 과거 자연재해가 집중된 산악지형과 도로 절개지 중심

○ 산사태의 발생 해석과 관련된 기술은 발생인자 분석 기술과 발생예측 기술이 확립된 이후 개발될 수 있는 기술이며, 이 기술은 현재 선진국 대비 50% 정도의 기술수준을 보유

<산사태 및 토석류 대응 시스템 연구기관 분석>

수행기관	연구개발의 내용	활용현황
한국지질자원연구원	산사태 위험도 산정시스템 및 피해저감기술 개발	사태물질 확산범위 예측기술 및 산사태 피해위험도 산정기술
한국지질자원연구원	산사태 발생예측 및 위험도 산정 (QRA)기술, 토석류 모니터링	도시사면 관리시스템 개발, 피해저감 공법 적용
국립산림과학원	산지개발에 따른 산사태 발생특성 및 산지토사재해 예지시스템 개발	인공사면의 안정공법의 설계와 기존 사면안정화제시
국립방재연구원	사면붕괴의 유형별 원인과 저감대책 연구	사면붕괴 원인해석 및 유형별 저감대책 방안 연구
국립방재연구원	사면붕괴 감지 및 관측에 관한 연구	사면붕괴 관측시스템 및 적정시스템 마련을 위한 기초연구
한국건설기술연구원	일반국도의 보강대상 사면에 대한 연구	보강 우선 순위 결정 및 국도유지사무소 정보 제공

□ 산사태 및 토석류 예방 시스템 구축 방안

○ 재해 발생시 통합관리 시스템 필요

- 재해정보관리기능, 복구지원기능, 위급운송로설정기능, 준비기지자재관리기능 등을 갖춘 재해관리시스템 필요(일본 국토교통성 관동정비국)

○ 예방 및 정비사업의 일원화 및 체계화

- 부처별, 산하기관별 등 정비 및 예방사업의 협의체 구성
- 예방 및 정비사업 등 재해정비 및 예방사업 구축
- 지역의 희망사업 추진
  · 예를들면, 지자체, 시민 등의 희망사업 등을 함께 하여 일괄정비하는 방안

○ 시설물 중요도를 고려한 맞춤형 설계 및 시공 유지관리 체계화

- 시설물 설계기준 강화
  · 획일적 설계기준 강화 보다는 도심지, 산악지, 해안 등을 고려한 세부지역 특성을 고려한 시설물 강화 사업 및 예방사업 추진
- 시설물 안전 관리 사업 강화
  · 산지부 및 계곡부 토석류 등 대비 사방 시설

o 사전 예경보 시스템 적극 도입

- 인공위성, 라디오전파, 소규모 지역 등의 예경보 시스템 도입



관동지역 복구자재정비기지 운영

3 토사재해 분류 및 예보기준 제안

▢ 토사재해 발생 유형 분류 제안

○ Varnes(1978)의 분류, EPOCH(1993) 분류, Vallejo와 Ferrer의 분류, Flow 형태 분류 등을 검토 하면, **Sidle과 Ochiai(2006)의 산사태 분류가 국내의 산사태 및 토석류 유형 분류에 적합**

○ Sidle과 Ochiai(2006)는 강우와 산사태를 유발하는 다른 기후조건을 토대로 산사태의 유형과 속도를 구분. 토심에 따라 천층 및 심층 붕괴를 구분하고, 강우기간과 강우량을 고려하여 토층의 함수상태를 고려하여 거동속도가 빠르거나 늦음을 파악하여 산사태의 유형과 속도를 구분

○ 우리나라는 대부분의 자연사면 산사태가 하절기 집중호우에 의해 발생하고, 인명 및 시설물의 피해는 무엇보다도 산사태 및 토석류의 속도와 토사량에 좌우되어, 국내에서 재해로 인한 피해저감 목적의 “방재 행정 차원”에서 Sidle과 Ochiai가 제안한 분류가 적절함

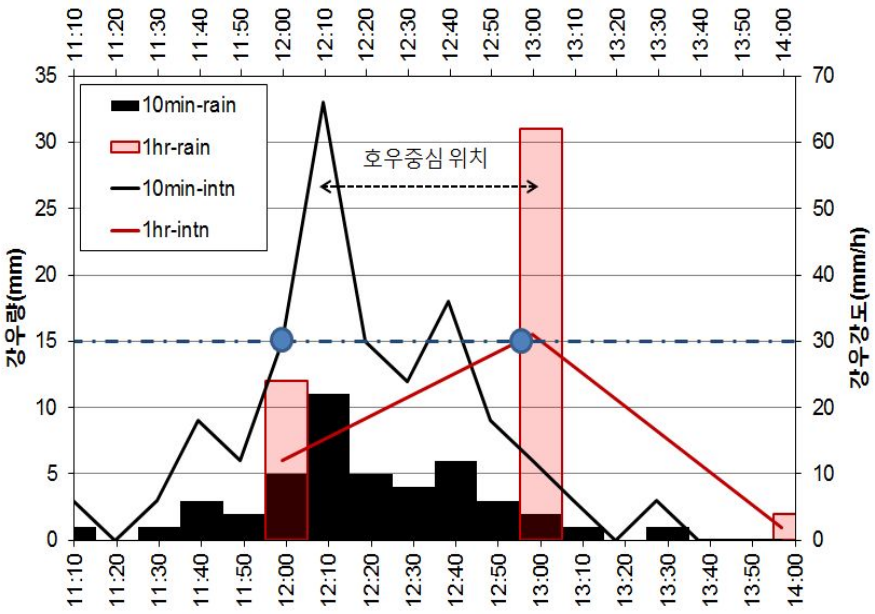
<토사재해 분류 기준(안)>

구분
얕고 급속한 붕괴 (Shallow, rapid landslides)
급속하고 깊은 활동과 흐름 붕괴 (Rapid, deep slides and flows)
느리고 깊게파인 붕괴 (Slower, deep-seated landslides)
느린 흐름과 변형 붕괴 (Slow flows and deformations
표면 붕괴 (Surficial mass wasting)

(참고) Sidle과 Ochiai의 분류(2006)

▢ 토사재해 제안

○ 산사태 예보기준은 **강우강도-강우기간에서 제시한 48시간 선행강우량**을 보완하여 선행강우량을 고려하고, 산사태 및 토석류의 특성을 반영하기 위하여 **10분 단위 강우강도를 적용**하도록 하여야 함



<10분 단위 강우량과 시단위 강우량 토사재해 경보 발생 시간 비교 (개념도)>

Ⅳ. 토사재해 피해 저감 전략

☐ 토사재해 R&D 발전 방향

기후변화에 의한 산사태 및 토석류를 포함한 토사재해로부터 생명을 보호하고, 안전복지로 국민의 안전한 삶을 정착하도록 함으로써 국토의 안전복지 선두자로서 그 역할을 수행할 것입니다



▢ DEBRIS 2020 R&D 추진전략 방향

(1) 토사재해 대응 종합적인 통합 제도 마련

토사재해 관련 제도 및 대응 기술 통합 추진에 따른 효율적인 대응

- 토사재해저감 국토안전 정책기술 (‘13)



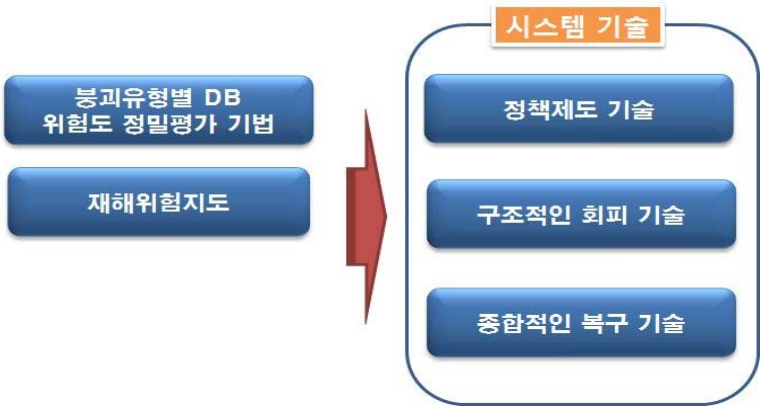
〈현행〉 〈추진방향〉

(2) 토사재해에 대한 시스템 기술개발 전환

○ 기존연구는 토사재해에 대한 예 · 경보 시스템 중심연구에서 토사재해를 포함한 토사재해에 대한 통합 연구 전략

- 미래형 다목적 토사재해 감지기술(’ 13)

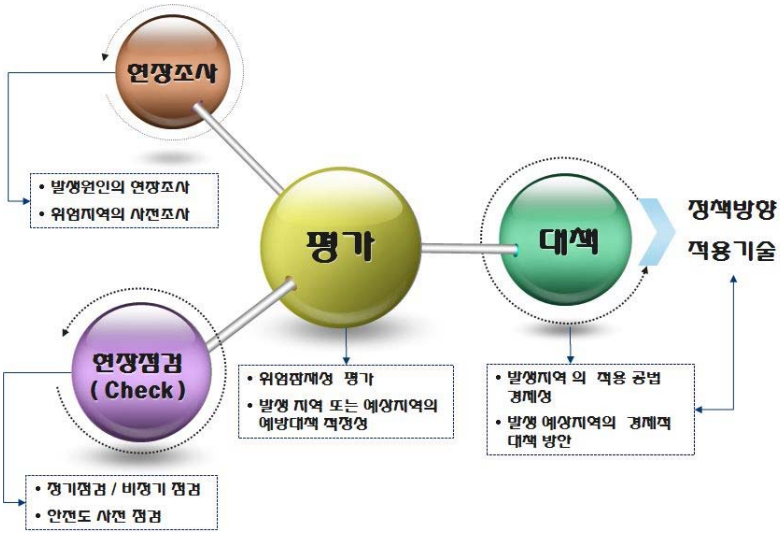
  토사재해 SOC 인프라 기술(‘13) => ICEM 연구센타 구축 연계



〈현행〉 〈추진방향〉

(3) 토사재해에 대한 조사-평가-대책 전담 연구센타 설립

○ 토사재해에 대한 조사, 점검, 평가, 관리(ICEM : Investigation-Check-Evaluation-Management)에 대한 센타를 운영하여 홍콩과 같은 (가칭) ICEM 센타 설립하여 국민의 안전복지를 추구하도록 전략추진 (2016년)

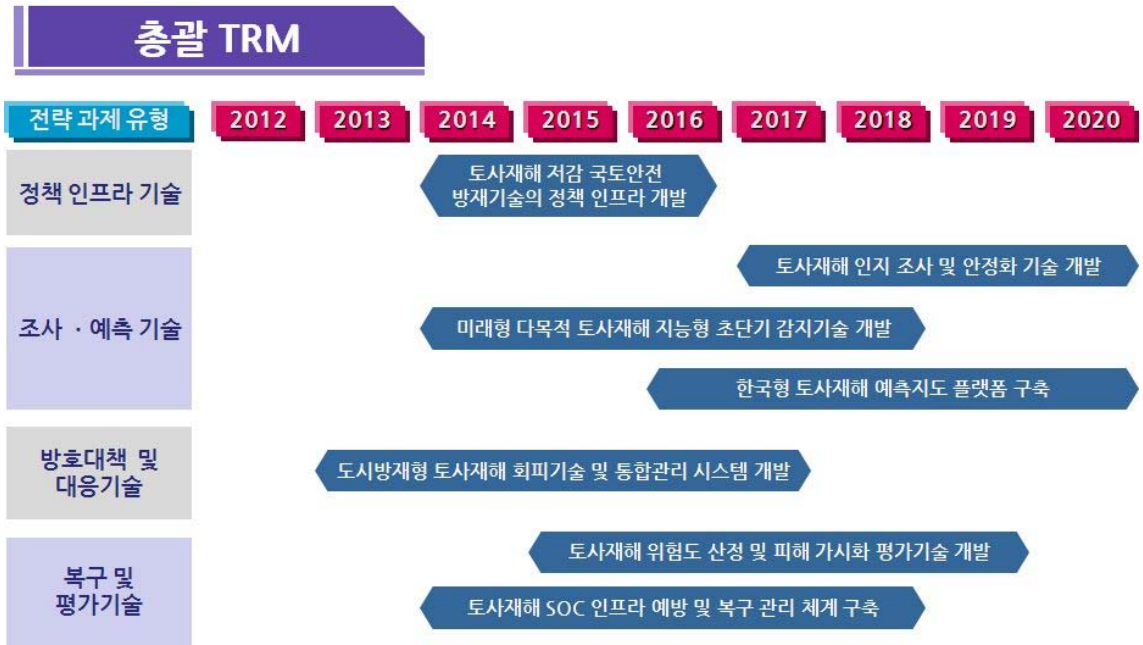


▢ DEBRIS 2020 7대 전략과제

○ 토사재해 예방을 통한 인명피해 제로로 복지안전을 달성하기 위한 전략과제

- 토사재해 저감 국토안전 방재기술의 정책 인프라 개발
- 토사재해 인지 조사 및 안정화 기술 개발
- 미래형 다목적 토사재해 지능형 초단기 감지기술 개발
- 한국형 토사재해 예측지도 플랫폼 구축
- 도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리 시스템 개발
- 토사재해 위험도 산정 및 피해 가시화 평가기술 개발
- 토사재해 SOC 인프라 예방 및 복구 관리 체계 구축

▢ DEBRIS 2020 로드맵



전략과제 1 토사재해 저감 국토안전 방재기술의 정책인프라 개발

전략과제 정의

○ 토사재해 대응 제도개선 및 지식공유형 ICEM 통합 지원체계 개발

지식공유형 ICEM : 다양한 토사재해 대응 기술 및 기법을 정책 및 제도에 반영 및 운용하는 시스템

* Investigation-Check - Evaluation - Management System

위험지 점검 및 보수



대피 훈련



긴급 재난 대응



효율적인 복구



목표

○ 녹색안전개념의 토사재해 방재 정책 및 설계 기준개발

○ 토사재해 통합관리(조사-점검-분석 및 평가-대책) 통합 지원 센터 운영

핵심기술

핵심기술	개 요
토사재해 대응제도 및 기준 개선 방안	ㅇ 토사재해 방재계획 정책지침 ㅇ 토사재해 통합관리 설계기준 개발
토사재해 대응 도시계획 및 정책개발	ㅇ 방재적 토지 이용 제도 개발 ㅇ 예상 피해지역 중심의 도시계획 기법 개발 ㅇ 토사재해 대응 공원 계획 및 제도 개발
토사재해 ICEM 통합 지원센터 운영	ㅇ Eco-Smart 토사재해 재해통합관리 시스템 구축 ㅇ 유형별 녹색안전 대책기술 개발 ㅇ 유형별 방재시설 유지관리 시스템 구축

기대효과

○ 지식공유형 ICEM 통합 지원체계 개발 및 운용으로 인명피해 감소

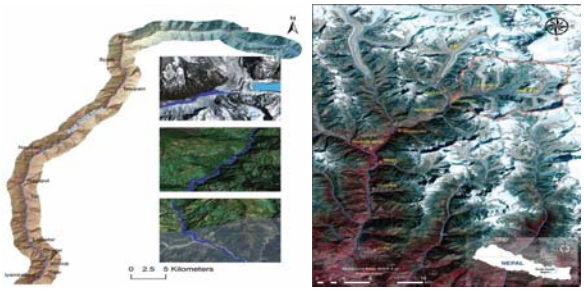
○ 효율적인 방재 및 복구 대책 수립으로 예산 절감

전략과제 2 토사재해 인지 조사 및 안정화 기술 개발

전략과제 정의

○ 사전에 재난 발생지역을 과학적인 접근방식으로 인지 및 경고하는 기술 개발

신개념 조사 및 탐사기법을 도입하여 토사재해의 예측 및 관리의 효율화 달성



목표

○ 객관적인 자료의 활용과 확률론적 분석으로 위험지구 선정기준 정립

○ 토사재해 발생 지역에 대한 신개념 조사 및 탐사 기법을 개발

핵심기술

핵심기술	개 요
붕괴지역 인지기술	ㅇ 물리탐사를 통한 토사재해 발생 가능지역 추출기법 개발 ㅇ Meso scale의 정량적 토사재해 위험도 제작과 mapping 기법 개발(1:50,000) ㅇ 풍화암과 토층간 천층 거동 규명을 위한 조사와 분석기법 개발(BHTV기법 이용) ㅇ 고지형분석을 통한 토사재해 발생지역 복원기법 개발
안정화 평가기술	ㅇ 토사재해 발생 알고리즘 개발 및 평가기술 개발 ㅇ Landslide발생 메카니즘 규명과 확률론적인 해석 접근 기법 ㅇ 붕괴인자별 Landslide hazard curve 작성기법 개발 ㅇ Digital element Method (DEM)을 이용한 토사재해 예측 가능지역 추출기법 개발 ㅇ 토사재해 유발 인자에 대한 가중치 산정 기법 개발
붕괴 예측기술	ㅇ 토층과 강우강도와의 한계 curve 제작기법 개발 ㅇ 강우량 증가에 따른 토사재해 simulation 기법 개발 ㅇ 풍화토의 초기 거동연계 한계 강우량 산정 기법 개발 ㅇ landslide의 거동 단계별 파괴력과 규모 산정 기술 개발 ㅇ 천층 파괴 감지를 위한 간극수압과 이동 monitoring 기법 개발

기대효과

○ 토사재해 예 · 경보 시스템의 정확도 향상

○ 우리나라에 적합한 예측기법의 확립으로 정부의 위기대응 능력을 향상

전략과제 3 미래형 다목적 토사재해 지능형 초단기 감지기술 개발

전략과제 정의

○ IT·ST 기술을 융합한 미래형 다목적 토사재해 관측·감지 기술 및 센서 개발

목표

○ 실시간 다목적 관측형 토사재해 감지 및 예보 융합장비 개발

복합기능 센서 : 강우, 지진등 다양한 원인을 복합적으로 감지하여 토사재해의 위험도를 단기에 감지하는 기술



핵심기술

핵심기술	개 요
미래형 다목적 토사재해 감지기술 및 복합 smart sensor개발	○ IT·ST 융합기반 다목적 토사재해 smart sensing 기술 개발 ○ 인공위성을 이용한 토사재해 초해상도(mm급) 공중관측기술 개발 ○ 원격구동 기능의 능동형 복합센서 개발
전국 규모의 지능형 초단기 토사재해 예보기술 개발	○ 지능형의 시간단위 초단기 토사재해 예보기술 개발 ○ 전국 규모의 지능형 토사재해 예보시스템 및 한국형 예보기준 개발

기대효과

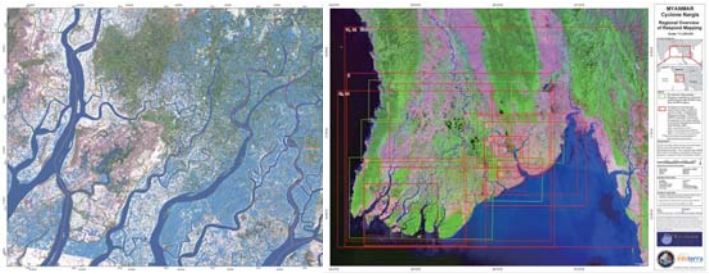
○ 최근 빈번한 돌발기상에 대응하는 IT 및 ST기술을 융합한 새로운 개념의 초정밀 토사재해 능동적 센싱 기술 개발하여 산업화하여 세계시장 진출

○ 전국단위의 사전예보시스템의 개발로 민간부문의 토사재해관련 산업시장 창출

전략과제 4 한국형 토사재해 예측지도 플랫폼 구축

전략과제 정의

○ 설계 호우 수준에 따른 임의의 위치에서의 토사재해 피해에 대한 위험성 추정을 위한 토사재해 DB구축 및 위험도 산정 모델개발



목표

○ 도로, 철도, 댐, 주거단지, 산업단지 등 주요 시설물의 계획 및 유지관리를 위한 토사재해 위험도 지도 개발 및 DB구축

핵심기술

핵심기술	개 요
호우수준별 토사재해 위험지도 작성 기술	○ 기후변화로 인한 호우특성변화를 고려한 토사재해 위험도 평가 기술 확보가 필요함 ○ 전국단위 토사재해 발생 유형 및 특성 분석을 위한 데이터베이스 구축 ○ 토질, 임상 특성뿐 아니라 강우특성을 고려한 GIS 기반 토사재해 위험도 산정 기술 개발
전국단위 토사재해 위험지도 작성	○ 전국 주요 지차체의 토사재해 위험지도 작성 ○ 지자체 및 관련기관의 토사재해 위험지도 활용을 위한 교육프로그램 운영

기대효과

○ 국가적으로 지역별 강우를 고려한 토사재해 위험도 지도가 구축되고 DB가 구축됨으로서 시설물 피해 및 인명손실을 저감

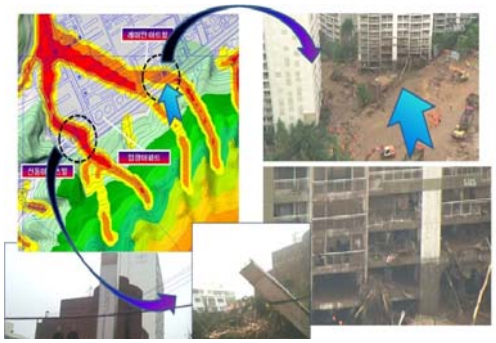
○ 위험지역 정밀조사 및 분석 매뉴얼이 정립되어 일선 기관의 편익을 도모

전략과제 5 도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리 시스템 개발

전략과제 정의

○ 도시내 토사재해 발생시 인명피해를 최소화하고 도시 기능을 신속하게 복구하는 기술개발

토사재해 회피 : 토사재해 피해 지역을 사전에 예측하여, 피해저감 및 인명손실 저감을 목적으로 피해지 방어 중심의 대책 기술



목표

○ 도시의 특성을 고려한 토사재해 회피 및 관리를 위한 기술 개발

○ 선진국형 도시의 토사재해 방지를 위한 행정지원체계의 도출

핵심기술

핵심기술	개 요
도시 방재형 토사재해 회피 및 복구 기술 개발	o 도시재해 경감을 위한 토사재해 회피 기술 o 도시환경을 고려한 토사재해 복구 기술
도시 방재형 토사재해 대책 의사결정 통합 관리 시스템 구축	o 도시부 토사재해 방지 의사결정 체계 o 도시부 토사재해 복구관리 시스템
토사재해 방지 행정 및 정책지원 체계 개발	o 토사재해 방지 조사 및 예방 체계 o 토사재해 사후 관리 및 기술지원 체계 개발

기대효과

○ 도시 특성에 부합하는 토사재해 대응구조물 및 대책 기법의 개발로 도시 기능을 신속하게 회복

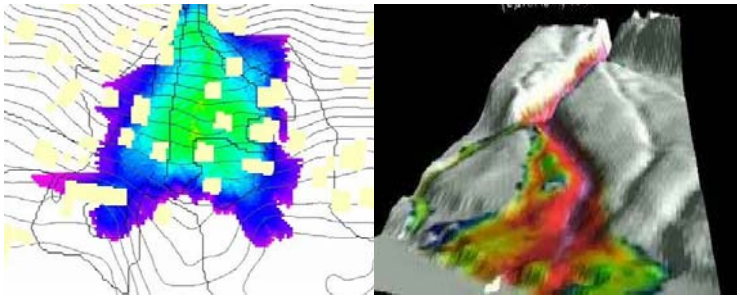
○ 도시의 효율적인 재난대응으로 인명피해 저감

전략과제 6 토사재해 위험도 산정 및 피해 가시화 평가기술 개발

전략과제 정의

○ 복합적 원인으로 유발되는 토사재해의 종합적인 예측 및 피해 저감 시뮬레이션 기술 개발

토사재해 가시화 기술 : 대책구조물 건설 등, 공학적 판단을 목적으로 하는 시뮬레이션 가시화 기술



목표

○ 공학적 판단이 가능한 토사유출 및 재난 시뮬레이션 프로그램 개발

○ 관리 시스템의 가시화 기법 개발

핵심기술

핵심기술	개 요
토사재해 위험도 평가기술	ㅇ 토사재해 발생 인자별 예측기술 ㅇ 권역별 지질, 수리수문, 역학적 특성 분석 및 평가를 통한 가시화 모듈개발
위험도 관리기술	ㅇ 확률론적/공학적 평가법에 의한 토사유출 예측 가상현실 프로그램 개발 ㅇ 토사피해 위험도 평가가시화시스템 구축
가시적 토사재해 통합관리 시스템 구축	ㅇ 자연재해 감시, 분석, 예측, 평가시스템 모듈의 통합관리시스템 개발 ㅇ 관리시스템의 가시화 방안 마련

기대효과

○ 국토이용에 관한 계획수립 및 입지선정 기준을 제시하고 토목·건설공사를 위한 설계법 개선

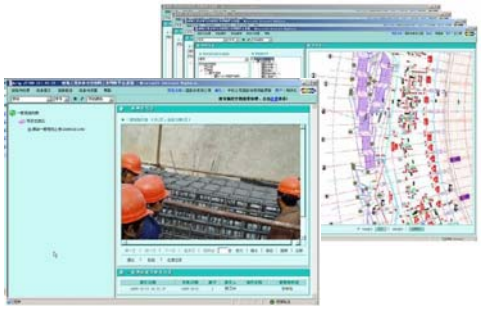
○ 행정 효율화 및 토사재해 대응 정책의 대국민 이해도를 향상시킴

전략과제 7 토사재해 SOC 인프라 예방 및 복구 관리 체계 구축

전략과제 정의

○ 토사재해 SOC 피해 예방을 위한 구조적/비구조적 방안 수립과 신속하고 투명한 피해 복구 의사결정 체계를 구축하고 이에 필요한 첨단 지형공간정보와 ICT 기술 기반 시스템 구축

복구 관리 체계 : 토사재해 복구사업의 합리적이고 신속한 의사결정을 위하여, 사업비관리, 복구자재 관리, 시공관리 등을 시스템화하는 기술



전략과제의 필요성 및 목적

○ 토사재해 방지를 위한 구조적/비구조적 의사결정체계 구축

○ 토사재해 사후복구 관리체계 구축

핵심기술

핵심기술	개 요
SOC 피해 예방기술	○ SOC 피해 대응 의사결정
피해 규모-심도 조사 및 분석 자동화 기술	○ 피해 정보 획득 기술 및 분석 ○ 복구 계획 수립 지원 체계
사후복구관리 체계구축 기술	○ 사후복구 시스템 플래닝 ○ 사후복구 지원 시스템 개발

기대효과

○ 복구력에 기초하여 SOC 시설물의 사전 복구 및 저감시설 계획의 우선순위 결정

○ 피해정보의 분석 자동화로 복구 기간을 단축하고 복구사업 저해요인 규명을 통하여 복구사업 비용 절감

❑ 전략과제 투자계획(안)

(단위, 백만원)

	전략과제명	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	소계
정책 제도	토사재해 저감 국토안전 방재기술 정책 인프라 개발		600	700	700					2,000
조사 및 예측 기술	토사재해 인지 조사 및 안정화 기술 개발					3000	3000	5000	5000	16,000
	미래형 다목적 토사재해 지능형 초단기 감지기술 개발		3000	3000	3000	3000	3000			15,000
	한국형 토사재해 예측지도 플랫폼 구축				1000	1000	3000	3000	2000	10,000
방호 대책 대응 기술	도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리 시스템 개발	2000	3000	5000	5000	5000				20,000
평가 관리 기술	토사재해 위험도 산정 및 피해 가시화 평가기술 개발			2000	2000	2000	2000	2000		10,000
	토사재해 SOC 인프라 예방 및 복구 관리 체계 구축		1000	3000	5000	3000	3000			15,000
계		2,000	7,600	13,700	16,700	17,000	14,000	10,000	7,000	88,000

주 의

1. 이 보고서는 국토해양부에서 시행한 R&D 정책인프라사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 R&D 정책인프라사업사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.