

19CTAP
-C1437
42-02

토 최
기 석 적
계 류
학 방
습 재
및 동
분 특
광 성
기 을
법 설
이 계
적 기
용 술
된 개
발
최
종
보
고
서

2019

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

보안 과제(), 일반 과제(✓) / 공개(✓), 비공개()
발간등록번호()

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 19CTAP-C143742-02

기계학습 및 분광기법이 적용된 토석류 거동특성을 고려한 증강현실 기반 최적 방재시설 설계기술 개발 최종보고서

2020.01.05.

주관연구기관 / 한국과학기술원

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'기계학습 및 분광기법이 적용된 토석류 거동특성을 고려한 증강현실 기반 최적 방재시설 설계기술 개발'(연구개발 기간 : 2018.4. ~ 2019.12.) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2020. 02. 18.

주관연구기관명 : 한국과학기술원 (대표자) 신성철



주관연구기관책임자: 이승래

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19CTAP-C1 43742-02	해당 단계 연구 기간	2019.01.01. ~ 2019.12.31	단계구분	2 / 2 (해당단계) / (총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	창의도전연구분야			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	기계학습 및 분광기법이 적용된 토석류 거동특성을 고려한 증강현실 기반 최적 방재시설 설계기술 개발			
연구책임자	이 승 래	해당단계 참여연구원 수	총: 8명 내부: 8명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 204,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 204,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 9명 내부: 9명 외부: 명	총 연구비	정부: 341,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 341,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국과학기술원 건설 및 환경공학과			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반
-------------------------	----

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	9	1				1					

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호
한국과학 기술원	FREDLUND SOIL WATER CHARACTERI STICS CELL	FREDLUND SOIL WATER CHARACTERI STICS CELL	1	2006.02.20	14345.759	Geotechnical Consulting & Testing System	한국과학 기술원 W1-2 1220	NFEC-20 08-06-0 59425

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)

본 연구에서는 4차산업 핵심기술인 분광기법과 기계학습을 통해 토석류 거동특성을 고려한 증강현실 기반 최적 방재시설 설계기술 개발을 목표로 함

- 분광기법 기반의 체적함수비 추출 및 침투특성 평가 기술개발
- 기계학습 기반의 토석류 거동특성 예측 및 취약성 평가기법 개발
- 증강현실 기반의 토석류 최적 방재시설 설계 시뮬레이터 개발

보고서 면수: 56

〈 국 문 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	선제적 예방관리를 통한 토석류 예측 및 최적 방재시설 설계는 피해를 저감시킬 수 있는 필수 요소임. 4차 산업기술과 관련하여 효율적인 <u>분광 기법을 적용하여 현장물성 DB를 획득하며, 기계학습을 통해 토석류 거동특성을 고려한 증강현실 기반 최적 방재시설 설계기술 개발을 목표로 함</u> 다음과 같은 연구과제를 수행함으로써 설정된 연구목표를 달성하고자 함 • 분광기법 기반의 체적함수비 추출 및 침투특성 평가기술 개발 - 국내 화강풍화토, 주문진 표준사의 분광특성 파악 - 토양함수특성 시험(SWCC test) 및 분광특성 시험 연계 기법 개발 - 분광기법 기반의 지반 침투특성 역해석 기술 개발 • 기계학습 기반의 토석류 거동특성 예측 및 취약성 평가기법 개발 - 토석류 정량적 정보(최종부피) 예측 기계학습 모델 개발 - 토석류 취약성 평가 기반의 방재시설 최적위치 결정기법 개발 • 증강현실 기반의 토석류 최적 방재시설 설계 시뮬레이터 개발 - 토석류 모형실험 결과 활용 및 수치해석 매개변수 연구를 통한 최적 방재시설 설계 기준 도출 - 증강현실 기반의 토석류 방재시설 설계 시뮬레이터 개발				
연구개발성과	다음의 3가지 주요성과를 설정함 • 분광기법 기반의 체적함수비 추출 및 침투특성 평가기술 개발 - 특허 출원 및 등록 1건, SCI급 논문 1건, 일반학술지 1건 • 기계학습 기반의 토석류 거동특성 예측 및 취약성 평가기법 개발 - SCI급 논문 2건 • 증강현실 기반의 토석류 최적 방재시설 설계 시뮬레이터 개발 - SCI급 논문 1건, 일반학술지 1건, 프로그램(소프트웨어) 등록 1건				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	☐ 활용계획 • 시공간적으로 변수가 다양한 환경에서 복잡한 토석류 현상을 미리 예측하고 대응하기 위한 기술들의 정확성 및 효율성에 한계가 있는 현시점. 고도화된 데이터 분석 기술 및 분광카메라기술을 적용한 토석류 선제 대응 기술에 대한 본 기초연구는 향후 사회적 시급성 및 필요성 측면에서 활용성이 매우 높을 것으로 판단됨 • 향후 응용 및 실용화 연구가 진행되는 경우, 최종적인 기술 수요처인 정부 및 지자체의 재난관리 부처, 사방사업 및 산림관리 부처, 그리고 국내외 사방시설 시공업체 등에서의 기술 도입 기대 • 본 연구성과 기술적용 대상지역을 단계적으로 확대해나감으로써, 광역지역 단위의 나아가 전국지역 단위의 고도화된 토석류 위험지역 관리 및 방재체계 수립이 가능함 ☐ 기대효과 • 토석류 재난관리 대책에 대한 패러다임을 ‘사후 복구 및 대책’에서 ‘사전 대비(선제적 대응)’으로 전환하는 과학기술을 제공. 이는 민간에 이전된 후 국내·외 방재 시장의 활성화와 선진화를 위한 기반형성에 기여할 것으로 기대 • 본 과제의 연구수행을 통해 사방시설물 설계 매개변수 연구를 통해 가장 최적의 매개변수 조합을 도출함으로써, 과학적으로 검증된 최적의 설계조건 도출 방법론을 제시함으로써, 국내 사방구조물 건설기술의 경쟁력이 향상될 것으로 기대. 이에 따라, 강우로 인한 토석류 재난관리가 시급한 국가들을 대상으로 기술 수출이 가능함 • 국가적 차원에서 향후 체계적이고 발전된 토석류 방재체계 수립 시 정부 재난관리 소관 부처, 사방사업 및 산림관리 부처 등과 직접적인 연계가 가능하며 토석류 예측 및 대응 시스템의 확립 및 운영은 각종 공공시설을 비롯한 사회재산 등의 물적 피해를 저감시킬 뿐만 아니라, 주민(국민)의 안전 및 복지를 효과적으로 향상시킬 수 있을 것으로 예상됨				
핵심어 (5개 이내)	토석류	방재시설	취약성	분광기법	기계 학습

◁ SUMMARY ▷

Purpose & Contents	Through preemptive preventive management, prediction of debris flow and optimum disaster prevention facility design are essential elements to mitigate damages. By advent of the 4th industrial renovation, we can obtain the physical property database by applying a highly efficient spectroscopic technique and through a machine learning algorithm. The goal is to develop a design technology for an optimal disaster prevention facility based on the debris flow behavior with the application of those technologies The specific tasks are designed as follows: • Development of spectroscopic techniques for volumetric water content extraction and infiltration characteristics evaluation technique: – Identification of spectroscopic characteristics of domestic granite weathered soil, Jumunjin sand – Linkage between SWCC test and spectral characteristics test – Infiltration analysis technique based on spectroscopic characteristics • Estimation of the behavior of debris flow based on machine learning and Development of vulnerability evaluation technique: – Predictive machine learning model for quantitative information (final volume) of debris flows – A decision technique of optimal location for disaster prevention facility based on the vulnerability assessment of debris flow • Development of an optimal design simulator for debris flow disaster prevention facility based on Augmented Reality: – An augmented reality-based simulator through derivation and verification of optimal design standards for disaster prevention facilities				
Results	Expected development products are as follows: • Development of spectroscopic techniques for volumetric water content extraction and infiltration characteristics evaluation technique: – Patent application 1EA, SCI Journal paper 1EA, Domestic Journal paper 1EA • Estimation of the behavior of debris flow based on machine learning and Development of vulnerability evaluation technique: – SCI Journal paper 2EA • Development of an optimal design simulator for debris flow disaster prevention facility based on Augmented Reality: – Patent enrollment 1EA, SCI Journal paper 1EA, Domestic Journal paper 1EA, Software registration 1EA				
Expected Contribution	□ Application plan • At present, there are limitations on the accuracy and efficiency of techniques for predicting and responding to complex debris flows in a variety of environments with variable time and space, This basic research on advanced preventive technologies for analyzing data and using spectroscopic camera will be very useful in view of social urgency and necessity in the future • By the future application and more practical research, it is anticipated to adopt those technologies at the disaster management department of local governments, and the forest management department • By gradually expanding the area applied by this research achievement technology, it is possible to develop advanced hazardous area management and disaster prevention systems further in the national level □ Expected Contribution • Technologies that shift the paradigm of debris flow management measures from post-recovery and countermeasures to ‘preemptive response’ can be provided • The best combination of parameters for the design parameters of prevention facilities, and the scientifically proven method of optimal design conditions will be proposed to enhance the construction technology competitiveness • Establishment and operation of the prediction and response system of debris flow will not only reduce physical damages such as social facilities including public facilities, but also improve the safety and welfare of public people effectively				
Keywords	Debris flow	Disaster prevention facility	vulnerability	Spectroscopic technique	Machine learning

< CONTENTS >

1. Outline of the R&D Project	1
2. Review of Technological Development in Domestic and Abroad	6
3. Contents and Results of Research	7
4. Achievement of Goal and Contribution to Related Fields	43
5. Utilization plan of R&D results	47
6. Overseas science and technology information collected during research	49
7. Security level of R&D results	51
8. Status of research facilities and equipment registered in the National Science and Technology Information System	51
9. Performance of safety measures implemented by laboratories according to R&D projects	52
10. Representative research results of R&D projects	53
11. Miscellaneous	54
12. Reference	55

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	6
3. 연구수행내용 및 성과	7
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	43
5. 연구개발성과의 활용 계획	47
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	49
7. 연구개발성과의 보안등급	51
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	51
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	52
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	53
11. 기타 사항	54
12. 참고 문헌	55

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- 1990년대 후반 이후 전지구적 기후변화로 인해 국내에서는 극한기후(강우) 현상의 심화와 함께 최근 넓은 확산범위와 빠른 속도의 특성을 갖는 토석류(debris flow) 형태의 재해가 빈발화·대형화됨.
- 토석류를 동반하는 산사태 및 홍수 등의 자연재난으로부터 효과적 인명 및 재산 보호를 위한 사전예방 기술 개발의 국가적 관심도(시급성)가 높아짐.
- 그러나, 국내외에서 오랜 기간 동안 많은 이론적·실험적 연구가 수행되었지만, 매우 다양한 내·외부적 요인들이 물리적으로 복잡하게 상호작용하는 토석류 거동 특성(발생, 전이, 유동 속도 및 규모, 확산범위 등)을 높은 시공간적 해상도로 예측하는 것에 여전히 한계점 및 제약이 있음.
- 이러한 이유로 현재까지도 매년 태풍 및 폭우 등으로 발생하는 국내 토석류 재해는 꾸준히 지속되고 있으며, 오히려 극한기후 현상이 심화된 1990년대 후반 이후 급격히 증가함(그림 1-3 참조).
- 산림청 통계에 따르면, 2011년 서울 우면산 산사태가 사회적 이슈가 된 이후 산사태 피해 복구 및 저감을 목적으로 전국에 설치되는 사방구조물의 개수는 연평균 900여개이지만, 2000년대 이후 산사태 피해로 인한 연평균 복구 비용은 800억 원에 육박한다는 점에서 기존의 사방구조물 설치위치 및 설계를 위한 방법론과 기술의 정확성·신뢰성에 문제를 제기할 수 있음.
- 과학기술의 급속한 발전에도 불구하고 토석류에 대한 예방 및 관리의 기술적 수준은 답보 상태인 현 시점에서, 본 연구과제는 4차 산업혁명 시대의 도래와 함께 주목받는 주요 차세대 기술들을 응용하여 토석류 거동특성 예측의 기술적 도약 및 과학적이고 합리적인 최적의 방재시설 설계기준을 제시하는 것을 최종목표로 함. 궁극적으로는, 효과적인 토석류 선제대응 체계가 구축된 인공지능(Artificial Intelligence) 기반 재난안전 사회의 토대를 마련하는 것을 비전으로 설정함.

표 1-1. 문제 제기 및 해결 방안, 연구의 비전

	문제 제기	기존 연구	한계점	해결 방법
1	현장 물성 데이터 획득 방법	현장조사 및 실내시험, 또는 경험적인 추정	DB 구축 위한 시간/인력 소모성 및 데이터 신뢰성	분광기법 기술을 활용한 탐측기술 개발을 통한 DB 구축
2	토석류 거동특성 예측 및 취약성 (vulnerability) 평가 기법	- 토석류 거동특성에 대한 물리 이론적 접근을 통한 모델 개발 - 정성적인 방법을 통한 토석류 취약성 평가	- 토석류의 복잡한 현상에 대한 정확한 모델링의 한계성 - 토석류 취약성 평가의 효율성·신뢰성 문제	광대역 입/출력 GIS 데이터 축적/학습을 통한 빅데이터 기반의 토석류 예측 기계학습 모델 개발
3	토석류 거동특성의 수치해석/실험적 규명	토석류 발생, 전이, 유동성 등의 현상에 대해 물리 이론을 바탕으로 모델링·구현	기존의 물리기반 토석류 수치해석 모델들에는 현장에 따른 유동특성(속도, 규모 등) 결정인자 값을 필요로 하며, 이 값들에 대한 과학적 도출 방법론 부재	토석류 모형실험 결과 활용 및 수치해석을 통한 유동 특성 규명
4	토석류 방재 구조물 설계기준	- 국외 경험식을 통한 토석류 설계인자 결정 - 사방구조물의 종류, 배치, 높이 등의 뚜렷한 기준 및 과학적 근거 부재	- 해외 토석류 이력 바탕의 경험식의 국내 적용성 문제 - 추정된 설계인자 데이터 신뢰성 - 과다설계로 인한 비효율성	- 매개변수 수치해석 연구 및 모형실험 검증 - 증강현실 기반의 사방 구조물 최적설계 시뮬레이터 개발
본 연구팀의 비전		<u>효과적인 토석류 선제대응 체계가 구축된 인공지능(Artificial Intelligence) 기반 재난안전 사회의 토대를 마련</u>		

- 기존의 다소 무분별하고 비효과적인 토석류 방재대책을 개선하고, 효율적이고 신뢰할 수 있는 방재시설을 통한 효과적인 피해저감을 위해서는, 방재시설의 위치와 설계 각 단계별 과학기술적 발전·도약이 필요.
- ✓ [위치] 토석류가 ‘왜’, ‘어디에서’, ‘어떻게’ 일어날 것인지 예측에 대한 새로운 개념의 방법론 제시 - 표 1-1의 1과 2
- ✓ [설계] 방재시설의 ‘성능(에너지 저감율/토석 포착율)’ 및 ‘경제적 효율성’을 고려한 이론적·실험적 근거에 기반한 신뢰성 있는 기준 제시 - 표 1-1의 3과 4
- 그림 1-1은 본 연구과제를 통해 개발될 원천기술이 적용된 효과적인 토석류 선제대응(방재) 체계의 개념도를 나타내고 있음.
- 그림 1-2는 본 연구과제의 비전을 나타내며, 구축하고자 하는 토석류 관리 및 방재체계의 각 단계(총 3단계)에 적용된 주요 핵심기술들을 나타내고 있음.
- 2014년 이후 최근 정부의 안전관련 상위 정책은 사후복구 관리의 개념에서 사전예방관리의 패러다임으로 전환되고 있으며, 본 제안과제는 사전예방을 위한 핵심 기술인 예측(prognosis)에 관한 원천기술 개발이므로, 정부의 창의적·도전적 기초연구 활성화 방안에 부합함.

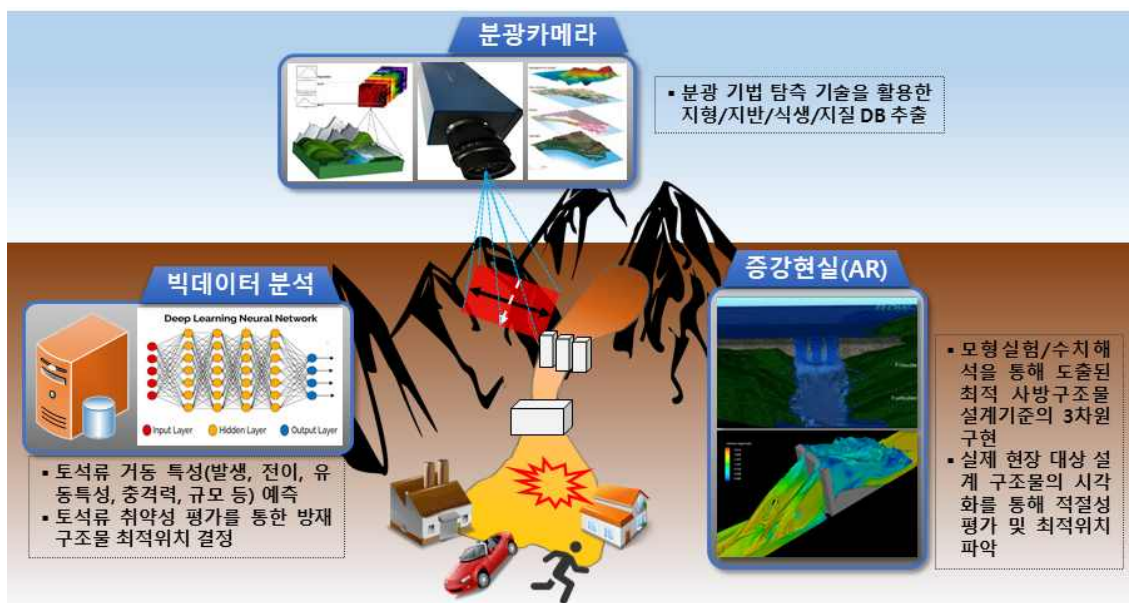


그림 1-1. 주요 핵심기술이 적용된 효과적인 토석류 선제대응(방재) 체계 개념도



그림 1-2. 본 연구과제의 비전

2. 연구개발의 필요성

○ 우리나라의 지형학적 특성 및 기후 조건으로 인한 산사태 피해 현황

- 우리나라는 지형학적 특성상 국토면적의 약 70%가 산지로 구성되어 있고, 여름철 강우가 집중되는 기후 조건으로 인해 산사태 재해가 빈번히 발생함.
- 2005년부터 2017년까지 4,500 ha 이상의 면적에서 산사태가 발생하여 인명 및 재산피해가 꾸준히 발생하고 있으며, 2000년대 이후 급격히 증가함(그림 1-3). 최근에는 전 지구적 기후변화 및 기상이변으로 인해 국지성 호우 발생빈도가 증가하는 추세이며, 특히 하절기에는 250mm 이상의 연속강우가 거의 매년 발생하고 있음. 가장 최근인 2017년에는 충북지방에서 폭우로 인해 막대한 산사태(토석류) 피해를 입음.

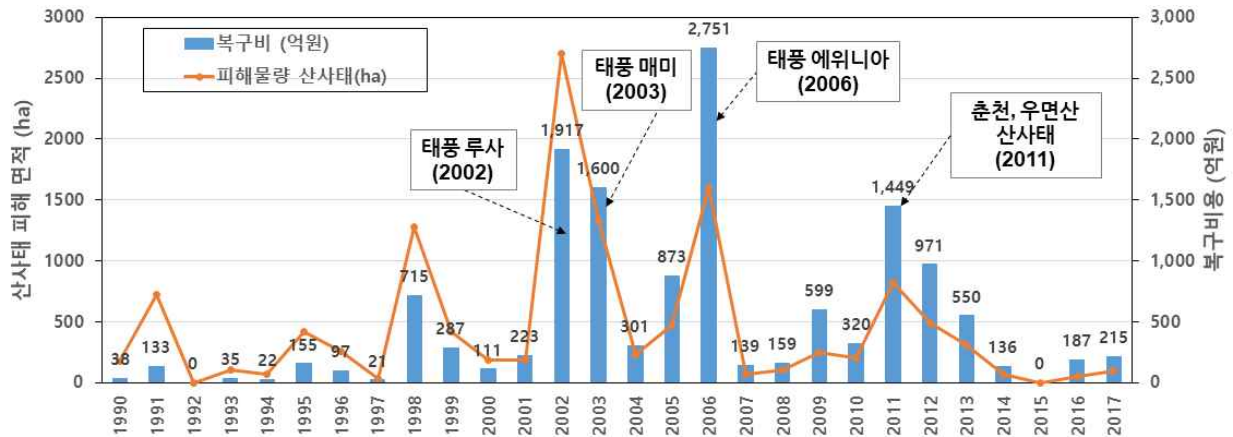


그림 1-3. 1990~2017년까지의 산사태 피해면적 및 복구비 현황 (산림청, 2017)

○ 토석류 피해 예측 및 방재시설 연구개발의 중요성 및 시급성

- 2011년 7월 서울 우면산 일대의 경우 시간당 최대 80.5mm의 강우와 430mm 이상의 일강우량이 이어지면서 산사태 및 토석류가 발생하였으며, 이로 인해 36(사망 16, 부상 20)명의 인명피해와 168억 원의 재산피해를 유발함. 당시 피해지역 일대 방송시설, 통신망, 교통망 복구에만 총 220억의 비용이 소요됨. 특히, 우면산의 경우 인구밀집지역에서 토석류에 의한 대규모 피해가 발생한 사례로 이외에도 산지에 서의 택지, 도로 등 SOC 시설 개발이 증가하고 있는 도심지는 토석류 피해 예측 및 이에 대비하기 위한 신뢰성 있는 대책시설 설계가 시급함.

○ 사후복구 관리 개념에서 선제적 예방 관리로의 패러다임 변화

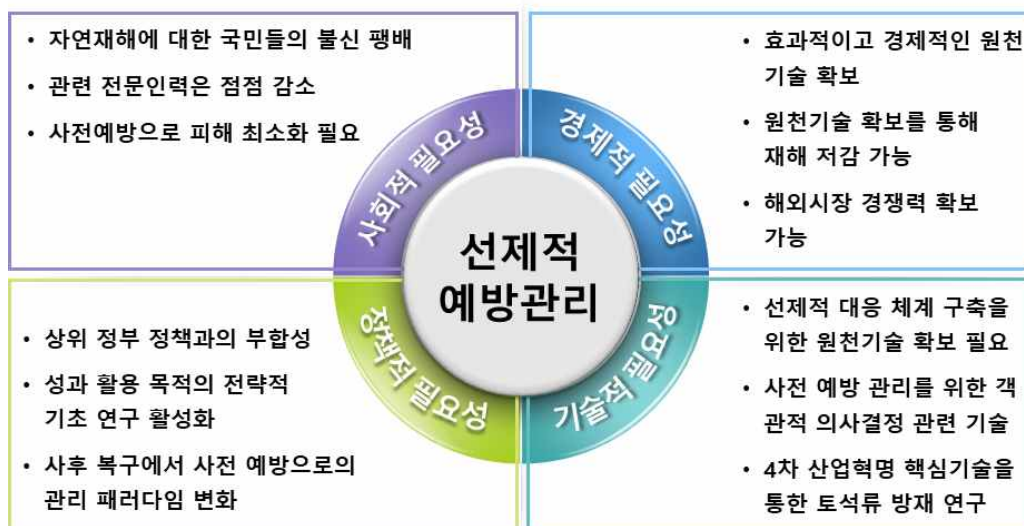


그림 1-4. 선제적 예방관리

3. 연구개발 범위

3-1. 연구개발의 최종 목표

- 선제적 예방관리를 통한 토석류 예측 및 최적 방재시설 설계는 피해를 저감시킬 수 있는 필수 요소임.
4차 산업시대의 도래와 함께 분광 기법을 적용하여 현장물성 DB를 획득하며, 기계학습을 통해 토석류 거동특성을 고려한 증강현실 기반 최적 방재시설 설계기술 개발을 목표로 함.

3-2. 연차별 연구개발 목표 및 내용

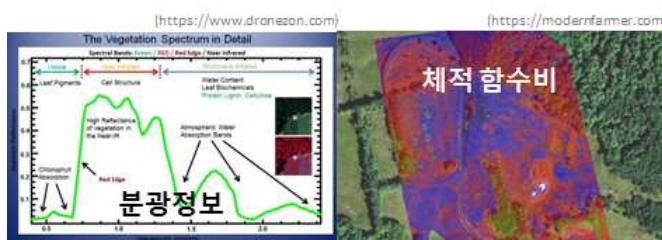
가. 1차 연도

① 개발 목표

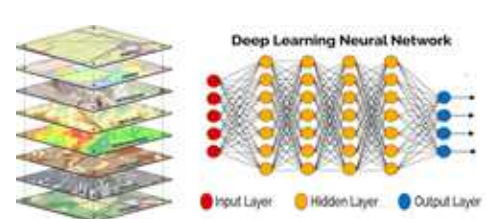
- 주관연구기관(한국과학기술원):
분광기법을 적용한 지반 침투특성 평가기술 및 토석류 거동 통합 예측 기계학습 모형 개발

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(한국과학기술원):
 - 체적함수비에 따른 다중분광 카메라의 전자기파 파장대별 분광정보 분석 및 DB 구축
 - 파장대별 분광정보 DB 기반의 필터링 및 이미지 해석을 통한 GIS 지반 체적함수비 데이터 획득 기술 개발
 - 개발 원천기술 적용성 통합 검증을 위한 Testbed 선정
 - Testbed 시료 샘플링 데이터 및 센서를 통한 지반 모니터링 데이터와의 비교를 통한 분광기법 기반의 체적함수비 데이터 신뢰성 검증
 - 분광기법을 적용하여 강우에 따른 체적함수비의 시계열적 변화 관측을 통해 지반의 침투특성 정보 역해석 도출 및 실험 기반의 침투특성 자료와의 비교를 통한 데이터 신뢰성 검증
 - GIS기술을 활용하여 방대한 토석류 정보(발생일, 위치, 면적, 이동거리, 토사량, 속도 등), 초기유발 영향인자, 유변물성 및 침식 영향인자 DB 구축
 - 광역지역 토석류 초기유발 예측을 위한 기계학습 알고리즘 모형 개발 및 Testbed 적용을 통한 연속 강우량 별 토석류 발생 예측지도와 초기 발생 토사량 예측정보 도출
 - 토석류 발생 시 유동성 영향인자(유변물성, 침식율 등) 예측을 위한 기계학습 알고리즘 모형 개발 및 Testbed 적용을 통한 연속강우량 별 토석류 유동 특성(속도, 두께, 충격량, 확산범위 등) 예측 정보 도출



(a) 분광기법 기반의 지반정보 측정 예시



(b) 머신러닝 예측모델 예시

그림 1-5. 분광기법 및 빅데이터 분석 기반 머신러닝

나. 2차 연도

① 개발 목표

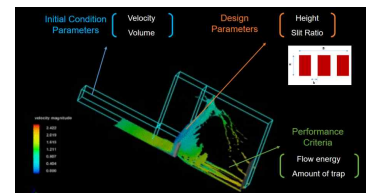
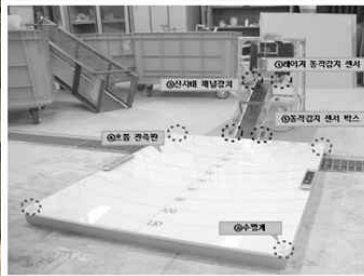
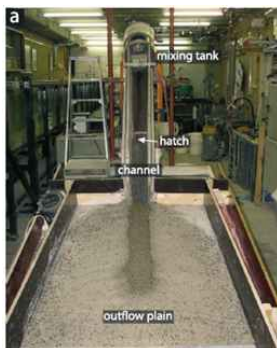
- 주관연구기관(한국과학기술원):

토석류 예측 및 취약성(vulnerability) 평가 연계모델 개발 및 수치해석·모형실험 결과활용을 통한 증강현실 기반의 토석류 최적 방재시설 설계 시뮬레이터 개발

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(한국과학기술원):

- 기계학습 알고리즘의 토석류 예측모델을 연계하여 연속강우량 별 취약성 평가 기술 개발 및 Testbed 적용
- 토석류 취약성 정보를 이용한 Testbed 산지의 토석류 위험유역 선정, 사방구조물 설치 우선순위 유역 및 최적 위치 결정
- 지반조건과 토석류 발생부피의 상관성에 대한 수치해석 연구를 통해 기계학습 모델의 예측 정확성 데이터 검증
- Testbed 현장 조건에 따른 축소 모형실험 결과 활용
- Testbed에서 예측된 토석류 유동특성 조건에서 방재시설 설계조건(구조물 종류, 장벽 배치, 높이, 슬릿 간격 등)-토석류 에너지 저감율/토사 포착율 관계 규명을 위한 수치해석 매개변수 연구
- 축소 모형실험을 통한 수치해석 매개변수 연구 결과의 검증 및 Testbed 최적 방재시설 설계조건 도출
- 토석류 유동 및 사방성능 수치해석 모델링 매개변수 연구결과를 축적을 통한 최적 방재시설 설계 기준 구축
- 실제 지형 대상의 증강현실 시뮬레이터 기반 최적 방재시설 설계 시각화 프로그램 개발



(a) 국내외 축소 모형 실험 장비 사례
(Haas et al., 2015; Kim et al., 2008)

(b) 수치해석 모델링 및 증강현실
시뮬레이터 예시

그림 1-6. 축소 모형 실험 장비 활용 및 증강현실 시뮬레이터 개발

제2장. 국내외 기술 개발 현황

○ 국내 현황

- 최근 이상기후에 따른 국지성 집중호우의 증가로 토사재해 또한 빈번하게 발생함. 국내에서는 매년 약 900개의 사방댐이 설치되고 있는 실정임.
- 국내의 사방댐 설계방법에 대한 자료는 사방공학(1983)과 산림청 사방기술교본(2014), 하천사방시설 설계기준(KDS 51 50 40) 및 국토교통부의 산악지 도로 설계 매뉴얼(2007)등에서 설계기준을 제시하고 있음.
- 하지만 현장조건에 따른 최적의 사방댐 설계에 대한 명확한 자료는 부족한 상황이고 기존의 명확하지 않은 설계 방법과 설계 답습으로 인해 사방댐 설계 기술이 낙후되어 있음.
- 또한 지구온난화로 인하여 우리나라의 강우강도가 더욱 커지고 있으나 기존의 작은 강우조건을 토대로 설계된 사방댐은 극한강우로 인한 산사태에 제대로 대응하지 못하고 산지 주변의 인명 및 사회 인프라에 심각한 피해로 이어질 수 있음.
- 가장 최근에 작성된 하천사방시설 설계기준(2018)과 산악지 도로 설계 매뉴얼(2007)의 경우도 사방댐 설계기준 및 조건이 서로 달라서 일관된 설계방법을 제시하지 못하고 있고 적은 설계인자를 고려하여 설계가 수행되어 비효율적인 사방댐이 설계될 가능성이 큼.
- 국내에 설치된 대부분의 사방댐은 불투과형 사방댐이지만(58% 이상, 2013년 기준) 불투과형 사방댐 설치 시 생태계 교란, 환경 훼손, 유지관리 등의 문제가 발생할 수 있으므로 최근에는 주변경관을 해치지 않고 자연과 조화로운 투과형 사방댐 설치가 증가하고 있는 추세임.
- 하지만 대부분의 지침 및 설계 자료는 불투과형 사방댐에 대한 설계방법이 주로 설명되어 있고, 투과형 사방댐에 대한 최적 설계 방법에 대해서는 매우 불명확하게 언급되어 있음.
- 투과형 사방댐에 대한 연구가 최근에 진행되고 있지만 대부분 실내실험에 근거하여 사방댐 형태에 따른 성능비교에 그치고 있고 현장조건을 고려한 사방댐 설계 연구는 부족한 실정임. 투과형 사방댐의 투과율, 슬릿 간격 등에 대한 표준화가 정립 되지 않고 설계 기준 또한 없는 상황을 고려할 때 투과형 사방댐의 정확한 설계에 대한 연구의 필요성이 있음.

○ 국외 현황

- 일본, 홍콩, 중국, 이탈리아 그리고 스위스 등 산사태 분야의 선진국들은 토석류 방재기술에 관련 연구가 활발하게 진행되고 있고 일반 불투과형 사방댐뿐만 아니라 슬릿트형, 버트레스 사방댐 등 투과형 사방댐의 설계도 80년대 이후부터 계속되어 연구되었음(Watanabe et al. 1980; Mizuyama 1984; Zollinger, 1985; Johnson and McCuen 1989; Wenbing, 2006).
- 잦은 화산 및 지진 활동으로 인해 산사태 재해가 빈번하게 발생하는 일본은 사방댐 관련 연구 및 건설 역사가 깊고, 이전부터 투과형 사방댐 관련 연구 및 설계를 시작했음. 일본에서는 사방댐의 토석류 발생구간에서 예상되는 유목의 발생량과 슬릿간격, 슬릿높이 등 구체적 설계인자를 고려하여 사방댐을 설계 및 설치하고 있음. 또한 트러스와 같은 철제 구조물로 이루어진 투과형 사방댐의 성능을 평가하였음(Takahashi, 2014).
- 최근에는 일본, 오스트리아, 이탈리아 등의 정부기관에서 투과형 사방댐 설계에 대한 표준 정립을 위해 지속적으로 연구개발을 수행하고 있음(Suda et al. 2010; Osanai et al. 2010; Rudolf-Miklau and Suda 2013).

○ 국내·외 연구현황을 통한 연구의 필요성 및 시사점

- 토석류 재해 대응 및 대비 관련 국내 원천기술 수준의 선진화와 최근 기상 변화에 따른 이상 기후 조건에서 유발될 수 있는 극한강우 토석류에 대한 발생 원인과 메커니즘을 연구하여 새로운 유형의 토석류 위험지역 정량적 예측 기술과 토석류 피해 대비 시스템을 구축하기 위한 신뢰성 있고 경제적이며 효율적인 사방댐의 설계 기준 개발이 반드시 필요함.

제3장. 연구수행내용 및 성과

1. 연구개발 목표

구분	내용
최종 목표	기계학습 및 분광 기법이 적용된 토석류 거동특성을 고려한 증강현실 기반 최적 방재시설 설계기술 개발
세부 목표	(1) 분광카메라를 기반의 체적함수비 자료 획득 및 침투특성 평가기술 개발 (2) 기계학습 알고리즘 적용을 통해 복잡한 토석류 거동(초기 유발, 유동성, 규모, 확산범위 등) 특성 예측 모델 개발 (3) 토석류 예측 및 취약성 평가 연계모델 개발을 통한 토석류 위험지역 및 방재시설 최적 설치위치 결정기법 제시 (4) 토석류 모형실험 결과 활용 및 수치해석 매개변수 연구를 통한 최적 방재시설 설계 기준제시 (5) 실제 지형을 대상으로 한 증강현실 기반의 최적 방재시설 설계 시뮬레이터 개발

2. 연구개발 추진전략

- 본 연구과제는 차세대 주요기술들인 분광기법, 기계학습 등의 기술적용을 통한 기존 토석류 방재시설 설계 방법론의 기술적·학문적 도약을 이루기 위하여 그림 3-1과 같이 연구개발 추진전략을 계획하였음.
- 토석류 방재시설 설계 절차는 총 3단계로 이루어져 있으며, 1차년도에는 그 중 첫 번째 단계인 ‘토석류 위험인자 DB 구축’에서 분광 카메라를 이용하여 주요 인자 데이터 획득 기술 개발 및 기계학습 기법을 이용한 토석류 거동특성 예측 모델 개발 연구가 수행됨.
- 이어서, 2차년도에는 SWCC-초분광 캠프테스트를 통한 지반 체적 함수비 DB 구축과 기계학습 기반의 토석류 거동 예측정보를 연계한 취약성 평가기법 개발 및 이를 바탕으로 한 위험구역 및 방재시설 최적위치 결정기법을 개발함.
- 최종적으로 방재시설 설계조건과 사방성능에 대한 수치해석 매개변수 연구 및 모형실험 검증은 수행하며, 이를 통해 증강현실 기반 최적 방재시설 설계 시뮬레이터를 개발할 방침임.

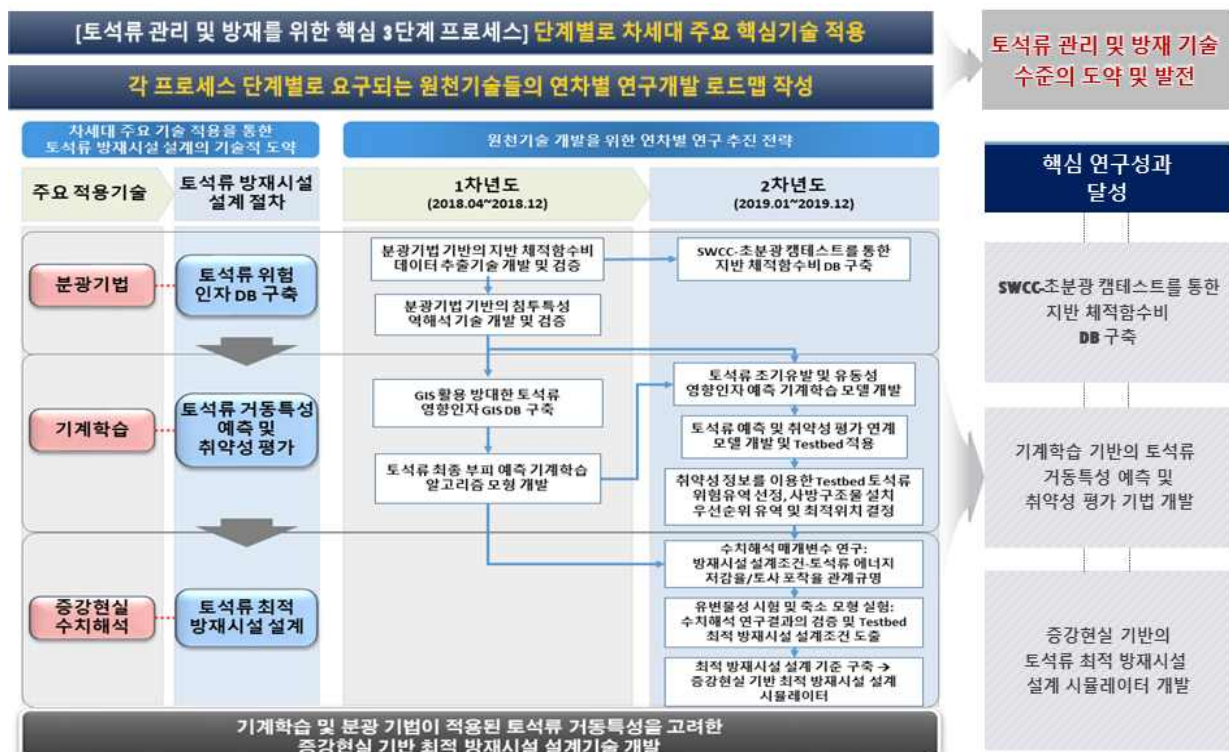


그림 3-1. 최적 방재시설 설계기술의 도약을 위한 연구 추진전략

3. 연구개발 내용 및 결과

○ 토석류 방재시설 설계를 위한 기존 방법과 제안된 방법의 차별성

- 토석류 방재시설 설계를 위한 절차는 크게 3가지 단계로 구성됨 (그림 3-2).
- 기존 방법의 각 단계에서는 그림 3-2에 제시된 바와 같이 한계점이 존재하며, **기존의 한계점을 극복하기 위하여 창의도전 연구**를 수행하였음.
- **[STEP 1] 현장 물성 획득:** 기존 지반 물성 획득 방법은 현장에서 시료 채취 후 실내시험을 수행해야 하므로 상대적으로 물성 획득을 위한 시간 소요가 큼. 본 연구에서 제안된 SWCC-초분광 캠프 테스트 기법은 지반의 분광특성을 이용하여 물성을 획득하는 기술로서, 상용화될 경우 물성 획득 시간을 획기적으로 감소시킬 수 있음.
- **[STEP 2] 토석류 거동 예측 평가:** 기존 방법은 해외에서 제안된 경험식을 토대로 토석류 거동평가를 수행함. 이에 따라, 국내 지반특성 및 토석류의 정량적 정보(위치별 속도, 두께, 부피증가 현상)를 고려하지 못함. 제안된 방법론은 수치해석 기반의 토석류 예측 모델링 과정을 통해 토석류의 정량적 평가가 가능함. 또한, 예측 결과를 토대로 토석류 취약성 분석이 가능함.
- **[STEP 3] 방재시설 설계:** 기존 방법은 [STEP 2]에서 도출된 정보로만 방재시설을 설계하므로 최적 위치, 디자인 등을 고려하기에 한계가 있음. 제안된 방법을 통해 방재시설의 최적 위치 및 디자인의 고려가 가능함.

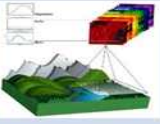
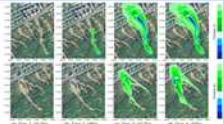
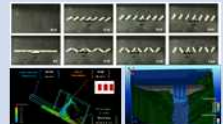
	[STEP 1] 현장 물성 획득	[STEP 2] 토석류 거동 예측 평가	[STEP 3] 방재시설 설계
기존 방법	 현장 및 실내시험	$V = \alpha \cdot A_w^b \cdot S^c$ A_w = 유역면적 (m^2) S = 평균경사 ($^\circ$) 해외 경험식 기반 부피, 속도 산정	 (전도, 활동, 지지력) 안정 검토
한계점	물성 획득 시간	국내 토석류 특성 고려 x	방재시설 최적 위치 결정 등의 한계
제안된 방법	 분광기법을 활용한 지반 물성 획득	 수치해석 기반의 토석류 거동(속도, 두께, 부피 등) 평가	 모형실험 및 수치해석 기반의 토석류 에너지 저감율/포착율 고려
한계점 극복	물성 획득 시간 저감	국내 토석류 특성 고려 시간, 위치별 정량적 평가	방재시설 최적 설계 가능

그림 3-2. 토석류 방재시설 설계방법 비교

○ 최적 방재시설 설계기술 개발 프레임워크

- 토석류 방재시설 설계를 위한 요소기술들의 연계과정은 그림 3-3과 같이 나타낼 수 있음.
- 각 요소기술은 다음 단계에서의 입력자료로 활용되어 유기적으로 연동됨.

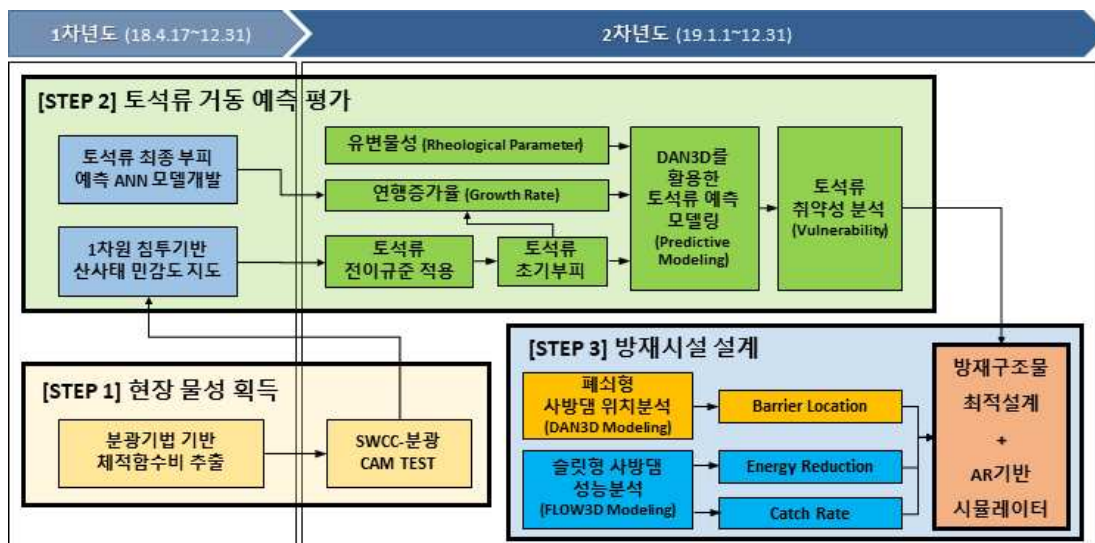


그림 3-3. 최적 방재시설 설계기술 개발 프레임워크

3-1. 분광기법 기반의 지반 체적함수비 데이터 추출기술 개발

- **목적 및 내용:** 흙과 물 등 모든 물체는 그 종류에 따라 고유의 전자파 반사특성을 가짐. 분광반사곡선은 물체의 종류에 따라 에너지를 흡수하고 반사하는 파장대가 서로 달라 각 물체가 가지고 있는 고유정보 추출이 가능함(그림 3-1-1). 본 연구에서는 지반의 수분함량이 증가함에 따라 분광반사율이 낮아지는 특성을 이용하여 지반의 함수량에 따른 분광특성을 분석함으로써 현장지반의 함수비 자료를 획득하였고, 기존 함수비 측정결과와 비교하여 신뢰성을 검증함

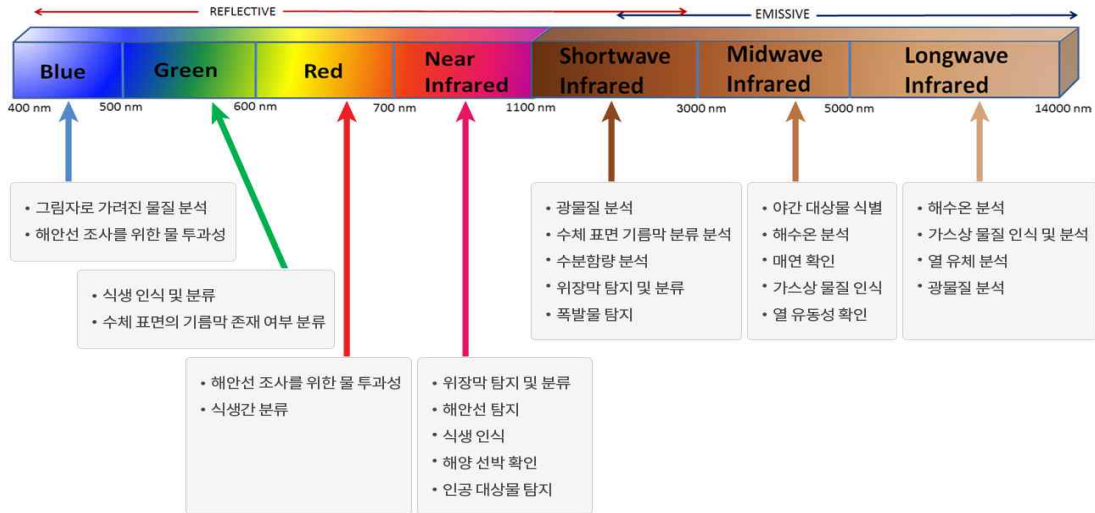


그림 3-1-1. 파장대별 활용 가능 사례 분류

① 자외선-가시광선 분광법

자외선-가시광선 분광법이란 시료가 흡수하는 빛의 양, 즉 흡광도로 시료의 농도, 종류, 구조 등을 결정할 수 있는 분석법임. 분자의 에너지는 회전에너지, 진동 에너지, 전자에너지로 나눌 수 있음. 자외선-가시광선은 에너지로 환산할 경우, 전자에너지에 해당함. 즉 자외선-가시광선의 흡수는 분자 내의 전자의 전이를 일으키게 됨. 이런 전자전이는 분자 내의 전자구조, 즉 분자의 화학결합상태 및 기하학적 구조등의 특징에 따라 흡수되는 빛 에너지의 크기 및 세기가 다르게 나타남. 따라서 자외선-가시광선 분광법은 분자의 전자구조적 성질을 규명하는데 강력한 수단 중 하나임.

바닥 상태의 원자, 분자가 가시광선 및 자외선을 흡수하면 전이가 발생함. 원자는 분자의 종류에 따라 다른 특정한 파장의 빛을 흡수하여 전자전이를 일으키므로, 흡수되는 파장을 알게 되면 원자나 분자의 종류를 확인할 수 있음. 그러나 물질의 흡광도를 직접 측정하는 것은 용이하지 않으므로, 실제로는 일정한 세기의 빛을 물질에 통과시킨 후 통과 전후의 빛을 세기를 비교하여 흡광도를 측정함. 일정한 파장의 빛이 시료 분자에 흡수될 때 고려되는 정량적 기본 법칙은 다음과 같음.

- Lamber 법칙

빛이 어떤 물체를 투과할 때, 빛의 반사, 회절, 굴절 등의 현상이 일어나기 때문에 빛의 세기는 작아지게 됨. 투과 전후의 비에 자연로그를 취하면, 이는 물체의 두께에 비례함. 흡수계수를 이용하여 이를 방정식으로 나타낼 수 있으며, 흡수계수는 물체의 특성에 따라 달라짐. 광흡수에서 입사광의 강도 I_0 와 투과광의 강도 I 의 비를 로그로 표시한 것이 흡수물질의 두께 d 에 비례함을 표현한 법칙. $\log(I_0/I) = ad$ 이며, a 는 흡수계수를 의미함.

- Beer 법칙

Beer의 법칙은 물질의 농도와 흡수되는 빛과의 관계 법칙임. 같은 부피 내에서 시료 용질의 농도를 증가시키는 것은 물질의 두께를 증가시키는 것과 같은 효과임.

② 적외선 흡수 분광법

자외선 가시선 분광법은 전자 전이에 바탕을 두고 있지만 적외선 흡수 분광법은 분자의 운동과 회전 운동에 관계가 있음. 어떤 분자에 적외선을 주사하면 X선이나 자외선, 가시광선보다 에너지가 낮으므로 원자내 전자가 전이 현상을 일으키지 못하고 분자의 진동(vibration), 회전(rotation), 병진(translation) 등과 같은 여러 분자운동을 일으키게 됨. 주로 분자의 진동에 의한 특수한 흡수 스펙트럼이 나타나며 이것을 분자의 진동 스펙트럼(molecular vibration spectrum) 또는 적외선 스펙트럼(IR spectrum)이라 함. 분자 진동의 종류는 크게 신축(stretching)과 굽힘(bending)진동으로 나뉨. 신축진동은 2원자 사이의 결합축에 따라 원자간의 거리가 계속적으로 변하는 운동으로 대칭과 비대칭 운동이 있음. 굽힘진동은 2결합사이의 각도가 변하는 진동으로 가위질 진동(scissoring), 좌우흔들운동(rocking), 앞뒤흔들진동(wagging), 꼬임진동(twisting)으로 구분함(김창한, 1996). 그림 3-1-2를 보면 적외선에 의하여 물 분자가 진동하게 되고, 각각의 기준 진동 방식에 따라 물 분자 고유의 진동 에너지에 대응하는 적외선이 흡수되어 그림 3-1-3과 같은 스펙트럼 양상을 나타내게 됨.

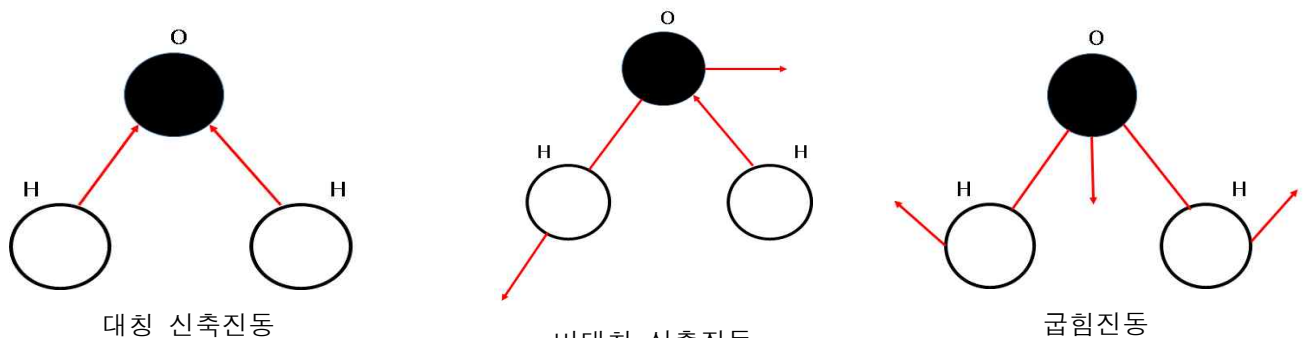


그림 3-1-2. 물의 기준 진동

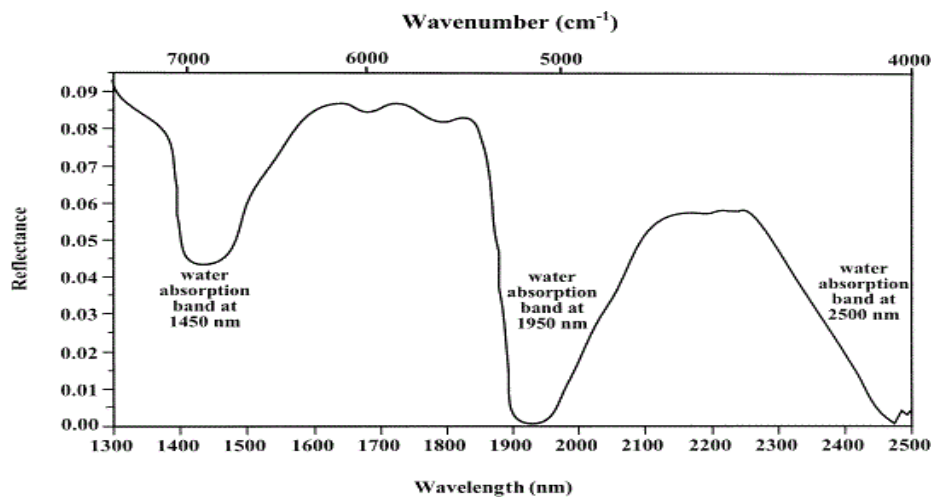


그림 3-1-3. 물 분자 반응 스펙트럼 양상(Clevers et al, 2008)

○ **방법 및 결과:** 초분광카메라 시험을 통하여 영상을 구성하는 각 화소에 해당하는 지표물의 완전한 분광특성 곡선을 얻을 수 있음. 지난 100여 년 동안 화학, 생물학, 천문학 등에서 대상물체의 특성을 구명하기 위한 수단으로 분광계(spectrometer, spectro-radiometer)를 사용해 왔고, 원격탐사 분야에서도 실험실이나 야외에서 다양한 지표물의 분광반사곡선을 측정하기 위하여 분광계를 사용하고 있음. 분광계가 하나의 물체에서 하나의 분광곡선을 측정할 수 있는 반면에 초분광 영상은 영상을 구성하는 모든 화소마다 분광특성 곡선을 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 각 화소에 해당하는 목표물과 관련된 정보를 추출하는 데 사용됨.

초분광카메라는 라인스캔(line scan)방식을 통해 데이터를 측정하고, 데이터는 공간정보, 스펙트럼 정보, 이미지 정보를 포함하는 DataCube 형태로 저장됨. 측정 원리는 대상물의 한 라인을 렌즈와 슬릿을 통해 받아들이게 되면 이것을 Inspector이라고 하는 이미지분광기(Imaging spectrograph)를 거쳐 센서에 도달하게 됨. 일반적인 분광카메라는 어느 한 점(spot)만을 측정하지만 초분광카메라는 line을 측정하게 되며, 이 line에는 수 많은 점들에 대한 정보가 포함되어 있으므로 결국 라인스캔을 통해 촬영된 이미지에서는 각각의 픽셀마다 분광 데이터가 포함된 결과를 얻을 수 있음(그림 3-1-4).

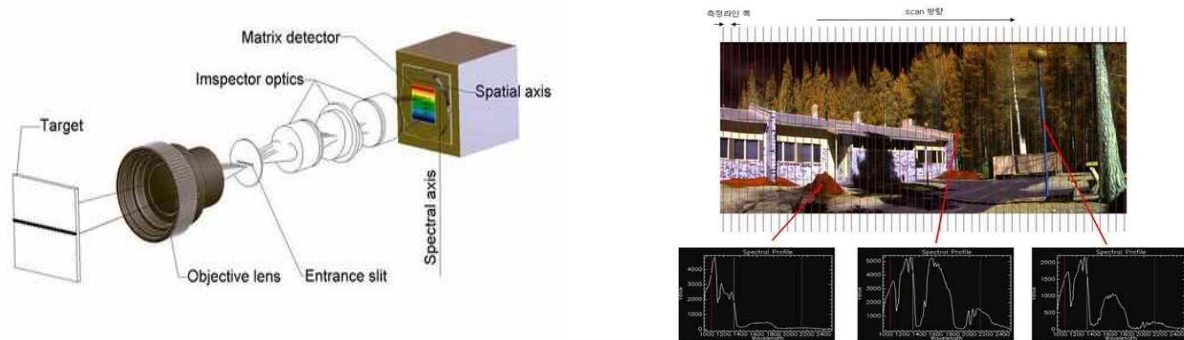


그림 3-1-4. 초분광 카메라 원리(Chang, 2003)

[초분광 카메라 시스템의 구성 및 개략도]

가시광선-단파장적외선 영역은 물질을 구성하고 있는 분자의 운동에 의한 에너지의 흡수가 일어나는 파장대이므로, 반사스펙트럼에서의 흡수 피크는 광물의 구조적 특징보다는 구성원소의 종류에 따라 결정되며, 광물 내의 결합은 부차적인 요소가 됨. 광상 형성과 관련된 열수 변질대는 광화 유체에 의한 원소의 이동과 이와 관련된 광물의 붕괴 및 형성과정에 의해 만들어지므로, 단파장 적외선에 의한 광상탐사를 통하여 효과적인 결과를 얻을 수 있음(김창성 등, 2017).

완전 건조된 각 시료별 분광특성을 규명하기 위하여 시험 장비를 구성하여 진행함. 시험에 사용된 풍화토는 서울 우면산, 구룡산, 대모산 그리고 부산 황령산에서 채취되었고, 모래는 주문진 표준사와 점토는 카오리나이트를 이용하여 시험을 시행하였음(그림3-1-5).

시험 장비 구성 및 개략도는 그림 3-1-6과 같음. 시험에 사용된 초분광 카메라는 SPECIM FX 10로 400~1000nm 영역대의 파장을 사용하며 랩 스캐너는 LabScanner Setup 40*20을 사용함. 또한 시험은 빛을 차단한 암실에서 진행하고 광원은 광량 조절이 가능한 할로겐 조명을 이용하였으며, 광원 set은 양쪽에서 시료를 비추도록 수직방향에서 약 15° 켜 기울어지도록 설치하여 반사광의 공간에 따른 불균일성을 최소화하였음.



(a) 주문진 모래



(b) 화강풍화토 (우면산)



(c) 화강풍화토 (구룡산)



(d) 화강풍화토 (대모산)



(e) 화강풍화토 (황령산)



(f) 카오리나이트

그림 3-1-5. 각 시료별 RGB 이미지

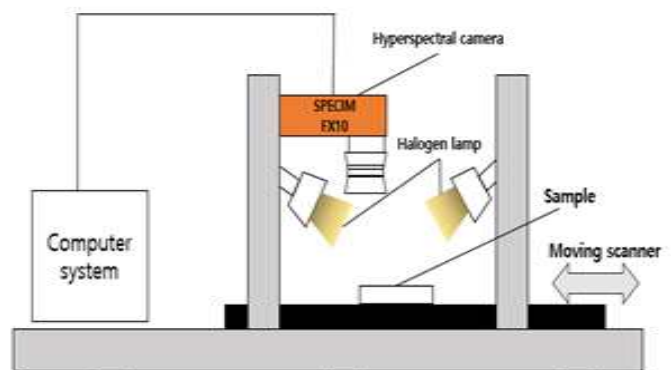


그림 3-1-6. 초분광카메라 개략도 및 시험 구성

표 3-1-1. 초분광카메라 규격 및 성능

항목	SPECIM FX10
Spectral Range	400 - 1000 nm
Spectral Bands	224
Spectral FWHM	5.5 nm
Spatial Sampling	1051 px
FOV	38°
Camera SNR	660:1
Camera Interface	GigE Vision
Dimensions	150 x 85 x 71 mm
Weight	1.26 kg

일반적으로 가시광선 영역대에서는 빛이 분광반사율에 지배적으로 영향을 미침. 따라서 그림 3-1-7과 같이 각 시료의 색에 따라 분광반사율이 변화함. 이러한 가시광선 영역대의 특징이 적외선 영역에도 영향을 미치는 것을 알 수 있음. 또한, 모든 흙에서 함수비가 증가할수록 반사율이 감소하는 경향을 보였으며(그림 3-1-8), 점토는 전체적으로 높은 반사율을 보였으며, 초기 함수비 단계에서 반사율 차이가 크지 않은 이유는 점토의 색이 흰색임으로 빛을 흡수하지 못하고(그림 3-1-8 (f)), 대부분 반사하는 특성이 함수비의 변화가 크지 않았던 0%와 6.5% 단계에 영향을 줌. 화강풍화토의 경우 전체적으로 낮은 반사율을 보였는데(그림 3-1-8 (b),(c),(d),(e)), 이는 화강풍화토의 색이 어두운색임으로 빛을 대부분 흡수하였기 때문임.

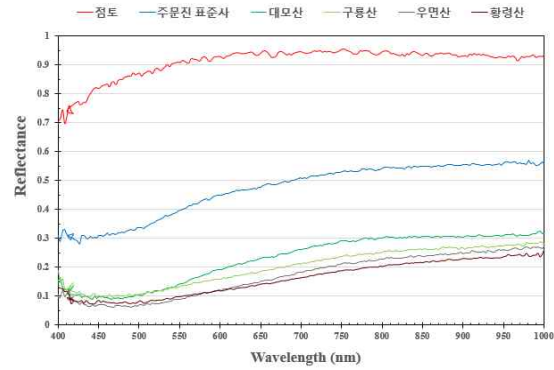
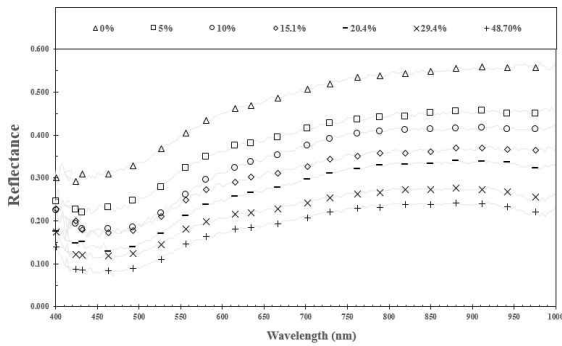
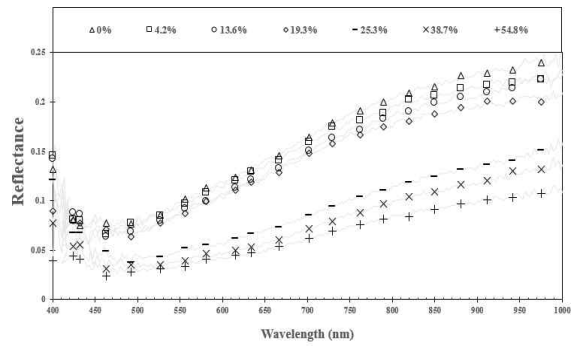


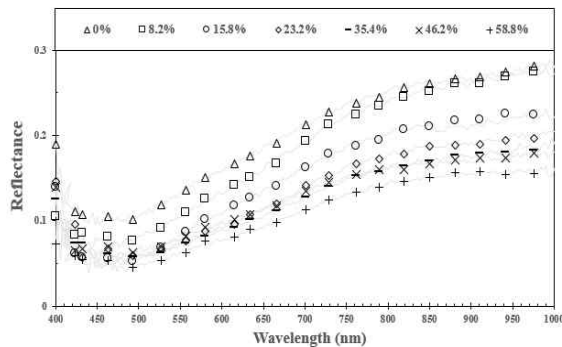
그림 3-1-7. 각 시료별 완전 건조시 분광 반사율



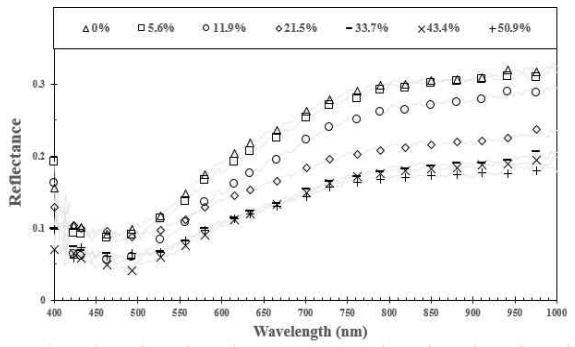
(a) 주문진 모래



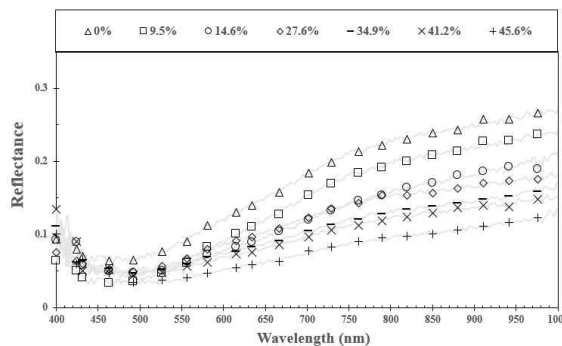
(b) 화강풍화토 (우면산)



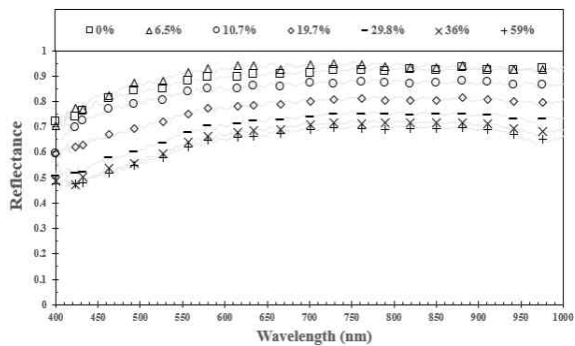
(c) 화강풍화토 (구룡산)



(d) 화강풍화토 (대모산)



(e) 화강풍화토 (황령산)



(f) 카오리나이트

그림 3-1-8. 각 시료의 함수비 별 분광 반사율

근적외선 영역대에서 함수비 관련 매개변수는 식생지수 중 하나인 Water index($\frac{R_{970}}{R_{900}}$), 근적외선 영역대 800nm~1000nm의 깊이, 가시광선 영역(Visible ray)의 그래프의 면적 그리고 근적외선 영역(Near-infrared)의 그래프 면적으로 총 4개의 매개변수가 선정됨. 각각의 매개변수와 함수비를 변수로 설정하여 Partial Least Square Regression(PLSR) 분석을 수행하였음. 그림 3-1-9는 주문진 모래의 함수비와 4개의 매개변수 관계를 나타냄.

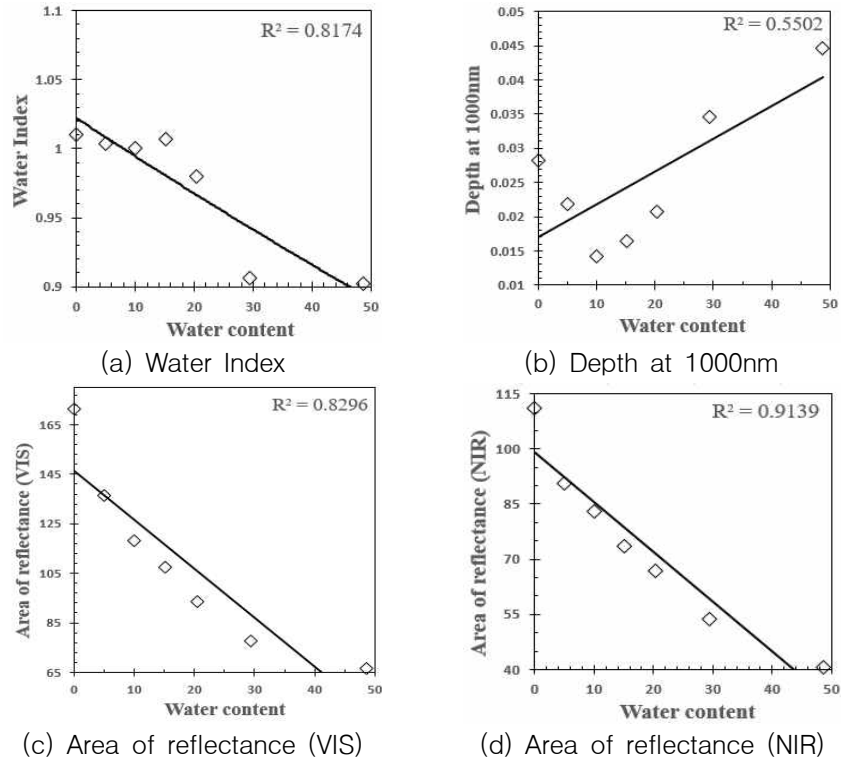


그림 3-1-9. 주문진 모래의 함수비 변화 매개변수와의 관계

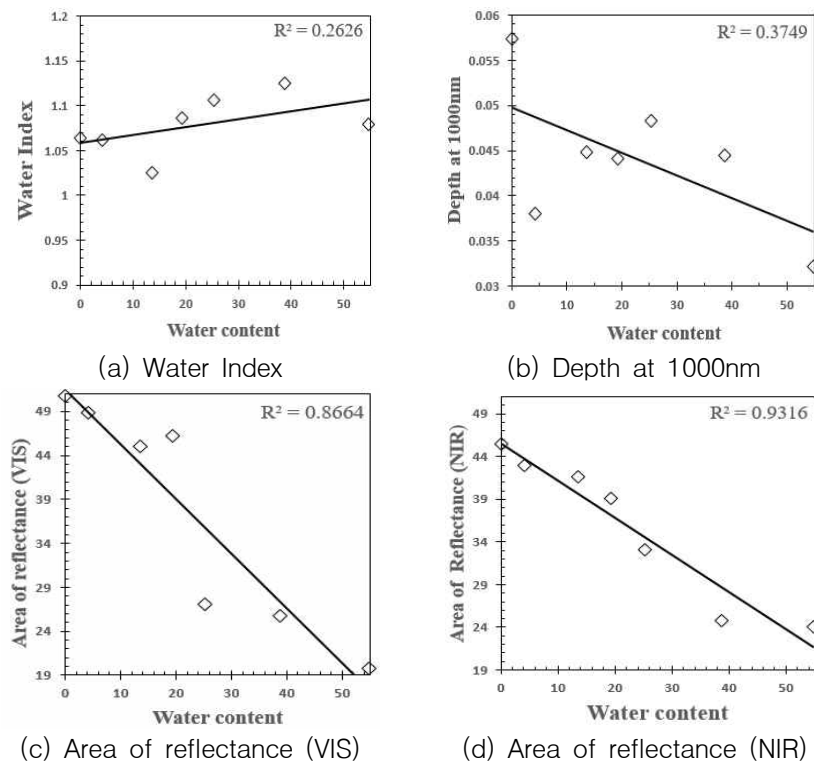


그림 3-1-10. 화강풍화토의 함수비 변화 매개변수와의 관계 (우면산)

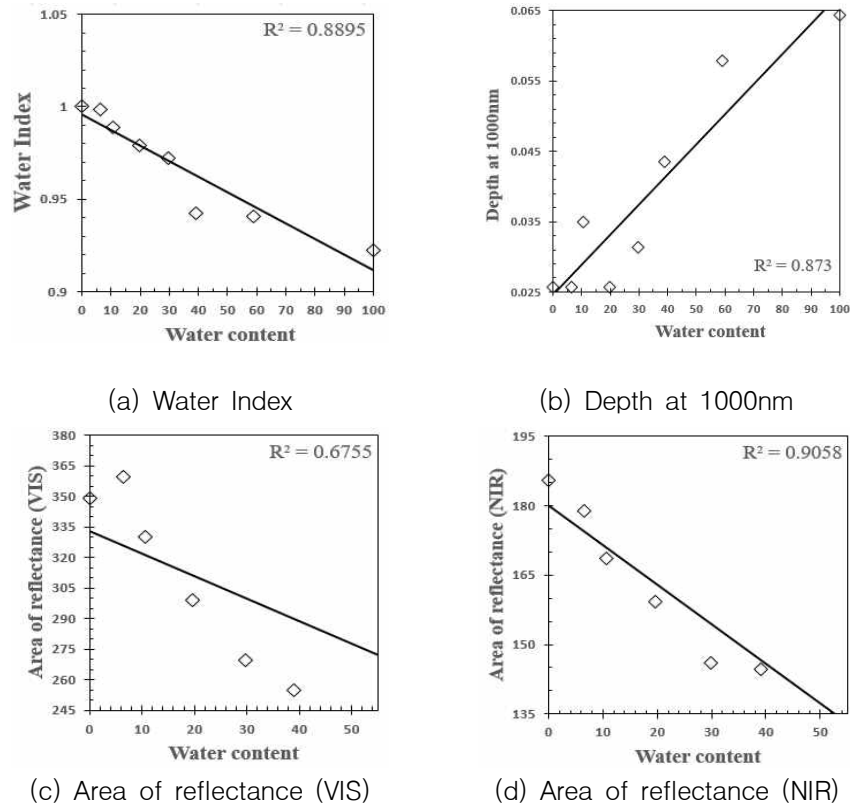


그림 3-1-11. 점토의 함수비 변화 매개변수와의 관계

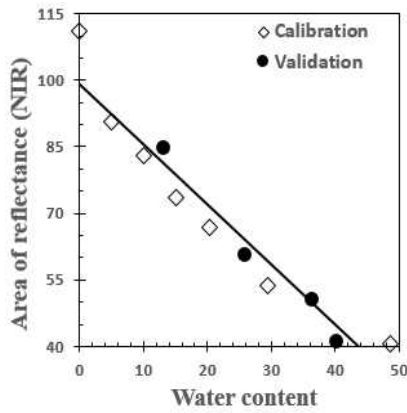
매개변수 중 근적외선 영역의 그래프 면적이 가장 높은 결정계수 값을 보여줌. 그림 3-1-10은 각각의 화강풍화토의 함수비와 매개변수들간의 관계를 보여줌. 마찬가지로 근적외선 영역의 그래프 면적이 가장 높은 결정계수 값을 보였고, 그림 3-1-11의 카오리나이트와 매개변수들간의 관계에서도 근적외선 영역의 그래프 면적이 가장 높은 결정계수 값을 보임에 따라 초분광 근적외선 영역에서 근적외선 영역의 그래프 면적이 가장 함수비와 연관성 높은 매개변수임을 확인하였음.

[분광 반사율에 따른 흙의 함수비 추정]

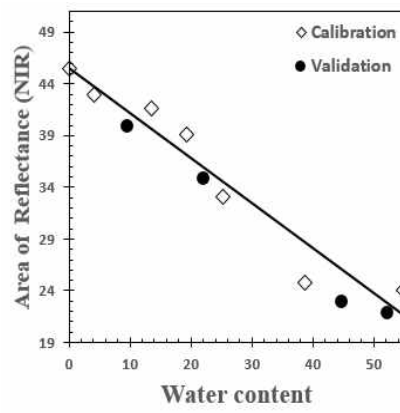
일반적으로 예측모델의 적합도를 평가하는 지표로 평균절대백분율(mean absolute percentage error, MAPE), 근평균제곱오차(root mean squared error, RMSE), 평균절대오차(mean absolute error, MAE), 절대 퍼센트오차최대값(maximum absolute percentage error, MaxAPE) 등이 있음. 그러나 이들 여러 지표들 중 예측이 얼마나 정확한지를 평가하는데 평균절대백분율오차(MAPE)가 가장 많이 사용되고 있으며, 특히 계량모델 간의 예측오차의 비교가 용이하고 신뢰도가 높은 장점이 있음(Kim and Hwang). MAPE는 오차가 예측값에서 차지함을 나타내는 지표로, 그 값이 작을수록 예측이 정확하다고 할 수 있으며, 다음 Eq. (3-1-1)을 통하여 구할 수 있음.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (3-1-1)$$

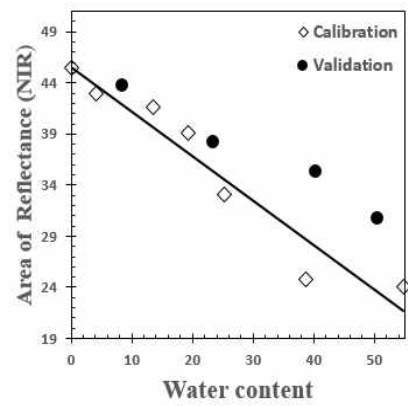
A_t 는 예측값, F_t 는 실제값, 그리고 n 은 관측값의 기간임. 분석 결과(그림 3-1-12), 주문진 모래의 MAPE는 4.8%, 우면산 화강풍화토의 MAPE는 6.2%, 구룡산 화강풍화토의 MAPE는 14%, 대모산 화강풍화토의 MAPE는 9.2%, 황령산 화강풍화토의 MAPE는 13.3%, 카오리나이트의 MAPE는 8.4%으로 비교적 정확한 예측임을 알 수 있었음.



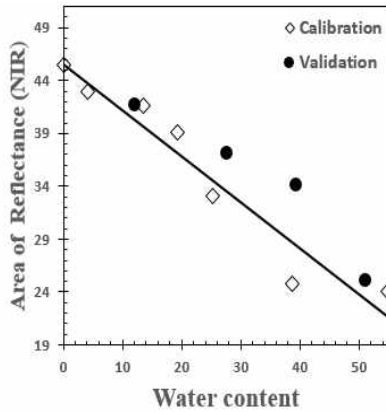
(a) Jumunjin sand



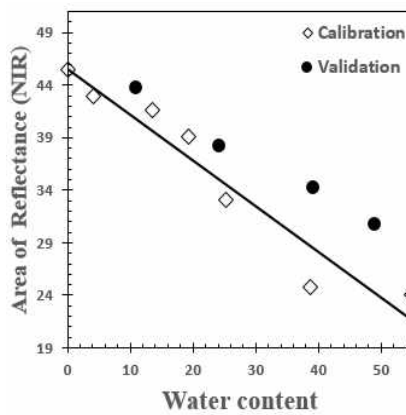
(b) Granite soil(Mt.Umyeon)



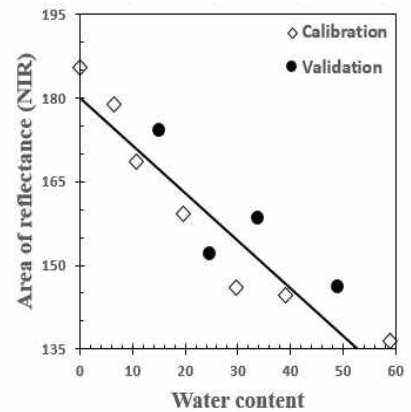
(c) Granite soil(Mt.Guryoung)



(d) Granite soil(Mt.Daemo)



(e) Granite soil(Mt.hwangryeong)



(f) Kaolinite

그림 3-1-12. 예측모델의 함수비와 실제 흙의 함수비와의 비교 및 검증

○ 결과의 활용방안:

- 본 연구 결과를 통해 시료 특성별 분광특성을 분석하였고, 분광 반사율 값과 함수비 변화와의 관계를 정량화 하였음. 이를 토대로 UAV 또는 드론과 연계하여 광역지역에 대한 흙의 함수비 변화 특성을 분석하여 토석류 발생 가능성이 큰 흙을 선별하는데 활용 가능함.
- 또한, 현장적용이 가능한 흙 분류모델이 분광기술을 이용하여 개발된다면 함수비 변화 특성뿐만 아니라 흙의 특성을 분석하는데 활용될 수 있음.

3-2. 함수특성 시험(SWCC test) 및 분광특성 시험 연계기법 개발

- **연구 목적 및 내용:** 불포화 지반 내에서는 간극 내부에 존재하는 물과 공기의 압력차에 의한 표면장력으로 인해 모세관현상이 유발되고 이는 부의 간극수압을 야기시킴. 불포화 지반의 중요한 물성 중의 하나는 흐름특성을 나타내는 불포화 투수계수임. 불포화 지반의 투수성은 지반이 함유하고 있는 수분량, 즉 함수비와 밀접한 관련을 맺고 있음. 낮은 모관흡수력으로 인하여 지반내부에 함수비가 많은 상태에서 물이 보다 원활히 이동할 수 있을 때 투수계수가 커지는 경향을 보이는 것이 일반적인 현상임. 반면 모관흡수력이 증가하여 함수비가 감소하면 지반의 투수성은 감소하게 됨. 이러한 불포화지반의 투수성은 함수특성 곡선과 유사한 형태를 보이게 됨. 함수특성 곡선은 흙 속의 물의 양과 모관흡수력과의 관계로 정의되며, 물의 양은 중량함수비, 체적함수비, 또는 포화도로 나타낼 수 있음. 일반적으로는 체적함수비와 모관흡수력과의 관계로 나타내며, 전형적인 함수특성곡선(Soil Water Characteristics Curve, SWCC) 모양은 그림 3-2-1과 같음.

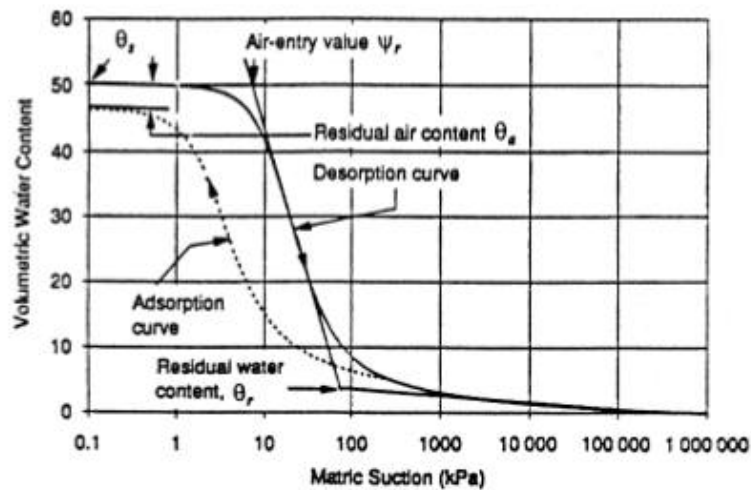


그림 3-2-1. 함수특성곡선 형태 (이성진 등, 2004)

하지만 함수특성 시험은 시간적, 경제적으로 모두 소비가 매우 크다는 한계점이 존재함. 반면, 분광특성 시험 시에는 흙의 수분함량에 따른 시료의 조성 변화와 교란이 발생할 수 있으며, 지점별로 수분함량이 다를 수 있음. 따라서 두 시험 방법의 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 함수특성 시험과 초분광 카메라 시험을 연계하는 방법을 제안하였음. 그 결과를 바탕으로 초분광 반사율을 활용한 SWCC 맞춤변수 추정 ANN 모델을 개발하였음.

- **방법 및 결과:** 본 연구에서 사용된 시료는 testbed인 우면산 일대에서 채취됨. 개발된 인공신경망(Artificial Neural Network; ANN) 모델은 그림 3-2-2와 같이 3-8-8-3의 구조를 가짐. 즉 입력 및 출력층에 3개의 뉴런, 첫 번째 및 두 번째 은닉층에는 8개와 8개의 뉴런이 각각 존재함. 첫 번째와 두 번째 은닉층의 전달함수는 각각 log-sigmoid, tan-sigmoid이며, 출력층으로의 전달함수는 pure-linear 함수를 적용하였음. 입력데이터가 충분하지 않은 경우 발생 가능한 over-fitting을 최소화하기 위해 Bayesian regularization 알고리즘이 적용되었음. 4개의 변수들(모래성분, 세립토 성분, 분광반사율, 건조단위중량)이 Fredlund and Xing (1994) (F&X) 함수특성곡선(건조곡선)의 맞춤변수(a , n , θ_s) 예측을 위한 ANN 모델에서 입력인자로 고려됨. 국내 우면산 지역 시료들에 대하여 실내실험 결과 축적을 통해 총 59개의 입력 및 출력인자에 대한 데이터셋을 모델 개발에 이용하였으며, 이 중 70%는 training에, 나머지 30%는 test 데이터셋에 사용되었음. 그림 3-2-3과 같이 training, validation, 그리고 모든 데이터셋에서 모델의 출력값과 실험값 간에 어느 정도 높은 상관계수 값들을 보였으며, 이는 예측성능의 가능성을 보여줌.

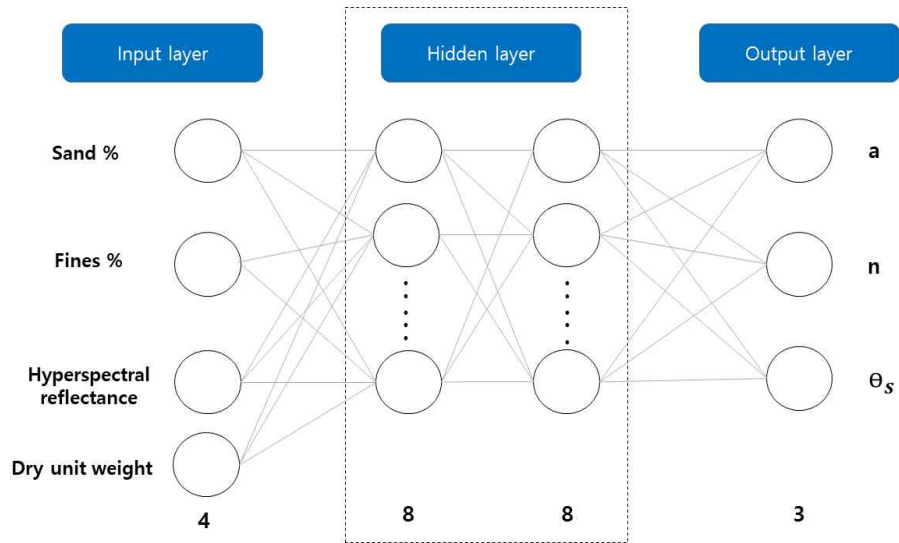


그림 3-2-2. Fredlund & Xing 함수특성곡선 맞춤변수 추정을 위한 ANN 모델 구조

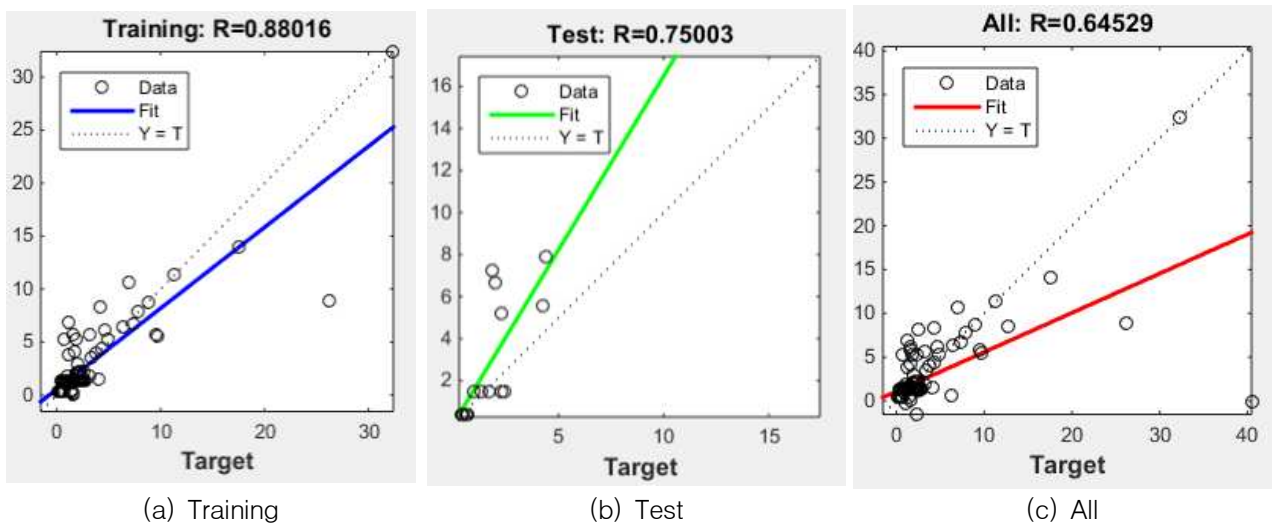


그림 3-2-3. 인공신경망 모델 성능분석 결과

○ 결과의 활용방안:

- 본 연구 결과를 통해 함수특성 시험결과와 분광 반사율을 연계하였음. 이를 통해 추출될 수 있는 불포화 특성들을 바탕으로 산사태 발생을 유발하는 연속강우량 기준을 침투 및 역학적 해석을 통해 도출할 수 있음.
- 또한, 이를 실제 과거 산사태 발생 이력과 비교함으로써 추출된 불포화 특성에 대한 정확도를 간접적으로 검증하는 방법으로 쓰일 수 있음.

3-3. 토석류 최종부피 예측 인공신경망(ANN) 모델 개발

○ **연구 목적 및 내용:** 토석류 발생 부피예측은 도시방재 계획 및 방재구조물 설계 등에 고려해야할 필수적인 요소임. 국내외에서 오랜 기간 토석류 발생 부피예측 연구를 수행해왔지만, 물리적으로 복잡하게 상호작용하는 토석류의 거동특성을 예측하는 것은 여전히 한계가 존재함. 본 연구에서는 과거 토석류 발생 이력자료를 기반으로 토석류 발생 영향인자 DB를 구축하였으며, 상관분석을 통해 토석류 최종부피 예측 영향인자를 결정하였음. 최종적으로 선택된 영향인자를 기반으로 토석류 발생 최종부피 예측 인공신경망(Artificial Neural Networks, ANN) 모델을 개발하였음.

○ **방법 및 결과:** 본 연구개발 방법은 다음과 같이 4단계로 구성되어 있음. (① GIS DB 구축, ② 상관분석을 통한 영향인자 결정, ③ 인공신경망 모델 개발, ④ 기존 토석류 발생부피 예측모델과의 비교

① 토석류 GIS DB 구축 (서울 우면산)

모델 개발을 위한 연구대상 지역은 토석류 이력정보가 많은 서울 우면산으로 선정하였음. 예측모델의 종속변수인 토석류 부피값을 획득하기 위하여 2012년 대한토목학회에서 작성한 「우면산 산사태 원인조사 추가 및 보완조사」 보고서(Korean Society of Civil Engineering, 2012)를 활용하였으며, 상세정보가 없는 이력자료에서는 토석류 발생 전후 항공사진을 통해 토석류 발생면적과 유효토심(해당지역 1m)의 곱으로 부피를 산정하였음. 연구대상 지역에서 고려된 토석류 유역은 총 30개소로 구분하였음(그림 3-3-1).

본 연구에서는 토석류 발생 영향인자를 구축하기 위해 국내외 선행연구를 수행하였음. Kang et al.(2015)은 국내 토석류 발생지역의 사면경사, 상대고도, 사면곡률, 상부사면기여면적, 유사운송능지수(STI; Moore and Wilson, 1992), 하천강도지수(SPI; Wilson and Gallant, 2000) 등을 통해 지형학적 특성이 토석류 발생과 상관성이 있음을 보고하였으며, Marchi and D'Agostino (2004)는 이탈리아 동부 지역의 토석류 규모를 예측하기 위하여 유역면적, 사면경사, 지질정보를 활용하여 회귀식을 제안한 바 있음. Chang et al. (2011)은 대만 지역의 토석류 규모 예측을 위해 유역면적, 산사태 발생면적, 계곡부 길이 등 지형인자와 강우인자를 활용하여 다중회귀식을 제안하였음. Park(2015)은 토석류 연행 증가율 추정을 위해 계곡부 길이, 30°이상의 유역면적, 흙의 평균입경을 영향인자로 선정하였음. 이를 토대로 획득이 간편한 지형학적 인자 6개, 수문학적 인자 2개, 총 8가지 변수를 구축하였음(표 3-3-1과 3-3-2). 영향인자의 수집과 분석의 효율성을 위해 GIS(Geographic Information System)를 활용하였으며, 연구에서 사용된 모든 자료는 국토지리정보원에서 제작한 1:5000 수치지도(digital map)로 부터 획득이 가능함(그림 3-3-2).

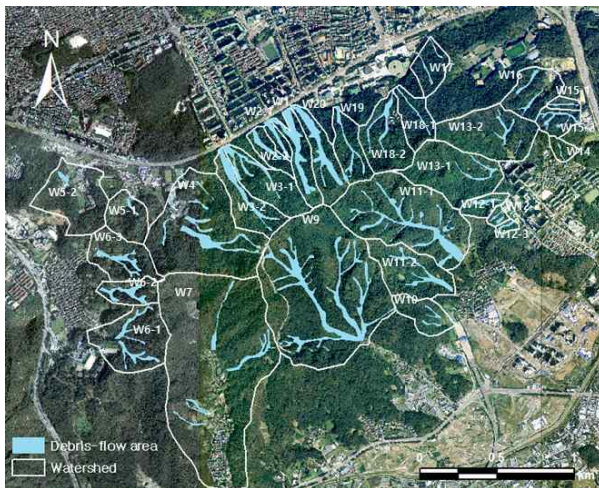


그림 3-3-1. 연구대상 지역의 토석류 발생유역

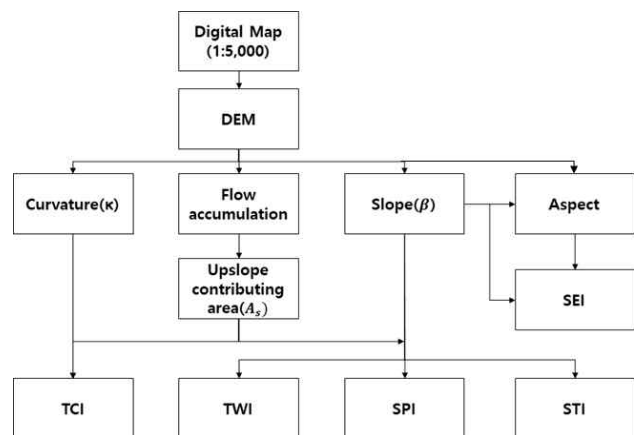


그림 3-3-2. GIS기반 토석류 발생 영향인자 획득과정

표 3-3-1. 토석류 영향인자 후보군 획득 방법 및 설명

	영향 인자	획득 방법	설명	출처
지형학적 인자	유역면적 (A_w, m^2)	국토지리정보원의 수치지도 및 ArcGIS 활용	유역면적이 클수록 토석류 발생가능 영역이 증가함	Marchi and D'Agostino (2004)
	유역경사 15°이상 면적 (A_{15+}, m^2)		사면의 특정 경사 이상일 때 토석류 발생 가능성 증가	Takahashi(1981), Rickenmann and Zimmermann(1993), Lorente et al.(2002), Brayshaw and Hassan(2009)
	유역경사 30°이상 면적 (A_{30}, m^2)			
	유역경사 15°이하 면적 (A_{15-}, m^2)		사면의 특정 경사 이하일 때 토석류 퇴적 가능성 증가	
	유로 평균경사 ($S, ^\circ$)		경사는 사면 안전율에 영향을 미침	Marchi and D'Agostino (2004)
	지형거칠기지수 (TRI)	$TRI = [\sum (x_{ij} - x_{00})^2]^{1/2}$	지형의 거칠기 정도를 나타냄	Riley et al. (1999)
수문학적 인자	유사운송능지수 (STI)	$STI = 1.4 (\frac{A_s}{22.14})^{0.4} (\frac{\sin \beta}{0.0896})^{1.3}$	물의 흐름에 의한 사면 침식 정도 추정	Moore and Wilson (1992)
	하천강도지수 (SPI)	$SPI = \ln(A_s \tan \beta)$		Wilson and Gallant(2000)

여기서, A_s 는 상부사면 기여면적, β 는 사면경사를 나타냄.

표 3-3-2. 우면산 지역 토석류 영향인자 DB 구축

	유역명	종속변수	독립변수 후보군							
		부피(m^3)	A	A_{30}	A_{15+}	A_{15-}	S	TRI	STI	SPI
1	W1	46250	75,600	27400	61200	16100	19	125.15	30.86	4.06
2	W2-1	4400	14700	5800	15400	4000	16.2	101.92	26.70	4.37
3	W2-2	3120	38400	9000	23900	15900	16.2	99.65	23.90	3.92
4	W3-1	22500	93600	5600	68000	29200	17.5	111.50	26.80	4.09
5	W3-2	26400	118000	26200	88000	26500	17.5	124.62	34.84	4.73
6	W4	30912	421400	69200	245200	69200	17.8	109.48	29.28	4.12
7	W5	878.8	74500	600	32900	25600	11.8	69.34	16.93	3.26
8	W5-2	685	158600	200	50400	42300	11.8	61.62	16.32	3.20
9	W6	14730	149400	25200	119700	33100	12	95.33	24.19	3.73
10	W6-1	6730	43500	18200	43000	8000	18	108.69	26.79	3.61
11	W6-2	5400	78100	20800	62700	23500	15.6	94.00	20.37	2.95
12	W7	18207	786400	95600	485000	147200	15.8	97.85	24.49	3.70
13	W9	39067	678900	176200	505900	136200	19.7	116.36	31.10	4.23
14	W10	3188	64200	3200	39700	15500	17.6	84.16	22.19	3.47
15	W11	18765	315000	161000	284200	34600	21.7	128.62	33.51	4.26
16	W11-2	14857.6	127800	18600	99800	34400	21.7	102.59	26.93	4.14
17	W12	3174.4	29200	8200	24900	5800	16.9	88.72	24.02	3.60
18	W12-2	2,307	5300	3400	10200	1500	16.9	84.93	22.20	3.20
19	W12-3	1630.7	7100	400	6700	1700	16.9	74.54	21.25	3.41
20	W13	6074.6	164100	71200	142000	31800	17.6	109.64	29.84	4.16
21	W13-2	5657.4	159900	24800	128000	28300	17.6	91.94	24.04	3.65
22	W14	1338.7	17700	3400	11500	6200	15	65.46	19.07	3.67
23	W15	7331.4	11400	2400	26500	13600	15.6	76.94	19.43	3.29
24	W15-2	2327	38400	0	7600	6900	15.6	60.86	16.21	3.10
25	W16	3176	90900	1200	44900	22400	13.3	73.79	17.02	3.09
26	W17	2552.3	57000	3800	39400	16500	15.9	79.86	22.60	4.01
27	W18	3710.1	65700	6400	47700	17600	19.4	103.77	26.17	4.31
28	W18-2	9870	119700	32200	92600	27000	19.4	120.85	31.25	4.35
29	W19	10465.5	76200	40000	65000	10200	20.9	130.47	34.43	4.34
30	W20	6960	90800	25400	76400	18200	20.1	125.42	32.26	4.32

② 상관분석을 통한 영향인자 결정

일반적으로 예측모델을 개발할 때는 변수를 많이 사용할수록 예측 결과가 향상되지만, 의미 없는 영향인자를 포함하여 분석을 수행하게 되면 모델이 유의미하더라도 과적합(over fitting)이 발생할 가능성이 있음. 이러한 현상을 방지하기 위해 종속변수(토석류 부피)와의 상관성을 고려하여 독립변수를 선택하는 방법이 사용되며, 본 연구에서는 Pearson, Kendall, Spearman 상관계수와 각 상관계수의 유의확률을 고려하여 독립변수의 상관성을 확인하였음(표 3-3-3). 유의확률은 0.05 이하 수준에서 유의하다고 판단할 수 있으며, 상관계수는 -0.2에서 0.2 사이 값일 때 상관없음을 나타냄. 따라서 본 연구에서는 변수 선택 기준을 유의확률 0.05, 상관계수 0.2로 하였으며, 유의성이 검증된 8개 인자를 최종 독립변수로 결정하였음. 특히, TRI(지형거칠기지수), STI(유사운송능지수), 그리고 유역경사가 30도 이상인 면적값이 토석류 최종부피에 가장 큰 상관관계가 가짐을 통계적으로 검증하였음.

표 3-3-3. 각 영향인자별 상관계수, 유의확률(p-value) 분석결과

독립변수	모수 검정		비모수 검정			
	Pearson's r	p-value	Spearman's ρ	p-value	Kendall's τ_B	p-value
유역면적	0.521	0.003	0.600	0.000	0.437	0.001
유역경사 30°이상 면적	0.601	0.000	0.791	0.000	0.617	0.000
유역경사 15°이상 면적	0.594	0.001	0.764	0.000	0.568	0.000
유역경사 15°이하 면적	0.477	0.008	0.535	0.002	0.407	0.002
유로평균 경사	0.562	0.001	0.590	0.001	0.451	0.001
TRI	0.794	0.000	0.798	0.000	0.614	0.000
STI	0.602	0.000	0.795	0.000	0.618	0.000
SPI	0.590	0.000	0.595	0.001	0.384	0.003

③ 인공신경망 모델 개발

ANN 모델은 훈련단계(training phase)와 검증단계(testing phase)로 이루어져 있음. 훈련단계에서는 입력값과 출력값을 이용하여 각 층에 존재하는 뉴런간의 연결강도를 조정하게 되며, 이 과정을 통해 주어진 값을 일반화할 수 있는 최적의 연결 강도를 스스로 학습하게 됨. 그 이후 훈련과정에 포함되지 않은 데이터를 입력하여 얻어진 예측값과 실제값을 비교함으로써 검증을 거치게 됨. 본 연구에서는 사용된 인공신경망 학습규칙은 오차 역전파 알고리즘(error back-propagation algorithm)의 한 종류인 Bayesian regularization이 사용하였음. 최적의 인공신경망 구조를 결정하기 위해 은닉층의 뉴런수를 1에서 7까지 변화시켰으며, 이에 관련된 전달함수의 조합은 표 3-3-4와 같음.

모델 개발을 위해 총 30개의 데이터가 사용되었으며, 70%는 훈련단계, 30%는 검증단계에 무작위로 선택하였음. 모델의 예측정확도를 평가하기 위하여 훈련단계 및 검증단계에서의 상관계수와 평균제곱오차(Mean Square Error, MSE)를 고려하였음. 또한, 종속변수인 토석류 부피 데이터셋은 데이터 범위와 분산이 커 MSE 값이 커지게 되는데, 이러한 문제를 해결하기 위해 토석류 부피 값에 자연로그를 취하여 데이터 범위와 분산을 감소시켰음. 상관계수는 -1에서 1까지 존재하며, 1에 가까울수록 모델이 예측정확도가 높다고 할 수 있음. 또한, MSE는 0.05 보다 낮은 값을 가질 때 성능이 좋은 모델로 평가될 수 있음. 각 전달함수 조합은 1000회씩 수행된 후에 평균 상관계수를 산정하여 가장 성능이 좋은 전달함수 조합을 선택하였음.

그림 3-3-4는 전달함수 조합과 뉴런 개수에 따른 상관계수 그래프를 나타냄. 총 6가지 전달함수 조합을 분석해 본 결과 대부분의 조합에서 뉴런 개수가 3개 이상일 때 전달함수 조합에 관계없이 훈련 상관계수 0.8, 검증 상관계수 0.7 이상의 값을 보였음. 그중 log-sigmoid function과 linear function의 조합에 5개의 뉴런으로 구성된 모델이 가장 성능이 우수하였음(훈련 상관계수 0.88, 검증 상관계수 0.82, MSE=0.25).

최종적으로 결정된 인공신경망 구조는 8개의 입력층, 5개의 뉴런을 가지는 1개의 은닉층, 그리고 1개의 출력층을 가지며, 전달함수는 log-sigmoid와 linear function의 조합을 가짐(그림 3-3-3). 선택된 인공신경망 구조를 이용하여 ANN 모델을 생성한 결과 training 0.91967, testing 0.88295, 전체자료 0.85447로 분석되었으며(그림 3-3-5), 비교적 높은 상관계수를 나타냄.

표 3-3-4. 전달함수 조합

전달함수 조합	뉴런 개수
logsig-purelin	1 ~ 7
logsig-logsig	
logsig-tansig	
tansig-purelin	
tansig-logsig	
tansig-tansig	

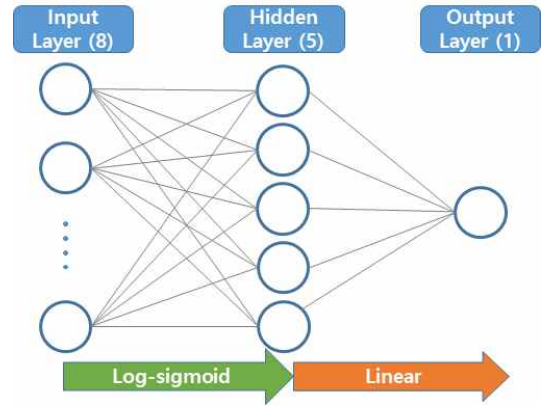


그림 3-3-3. 인공신경망 구조

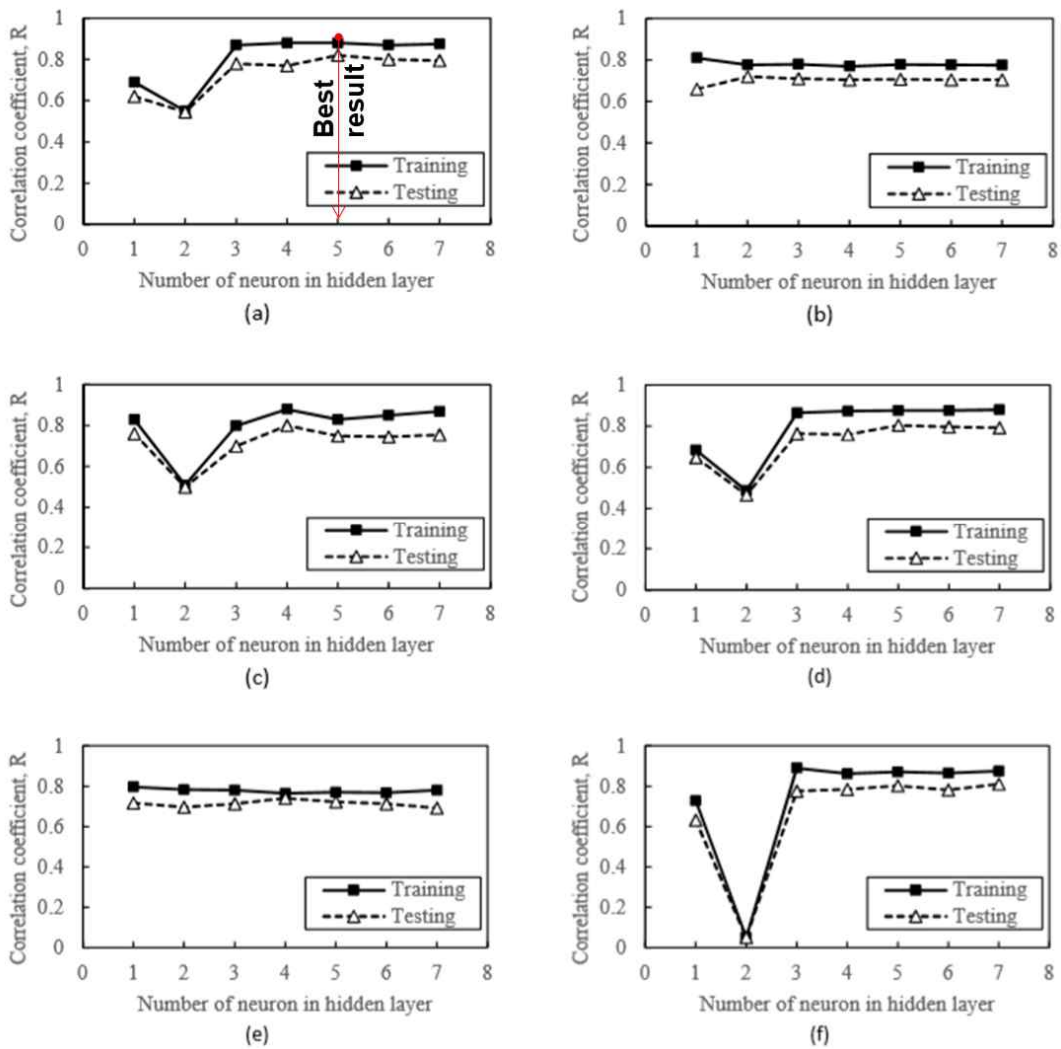


그림 3-3-4. 훈련 및 검증단계 상관계수

- (a) log-sigmoid & linear function; (b) log-sigmoid & log-sigmoid function
(c) log-sigmoid & tan-sigmoid function; (d) tan-sigmoid & linear function
(e) tan-sigmoid & log-sigmoid function; (f) tan-sigmoid & tan-sigmoid function

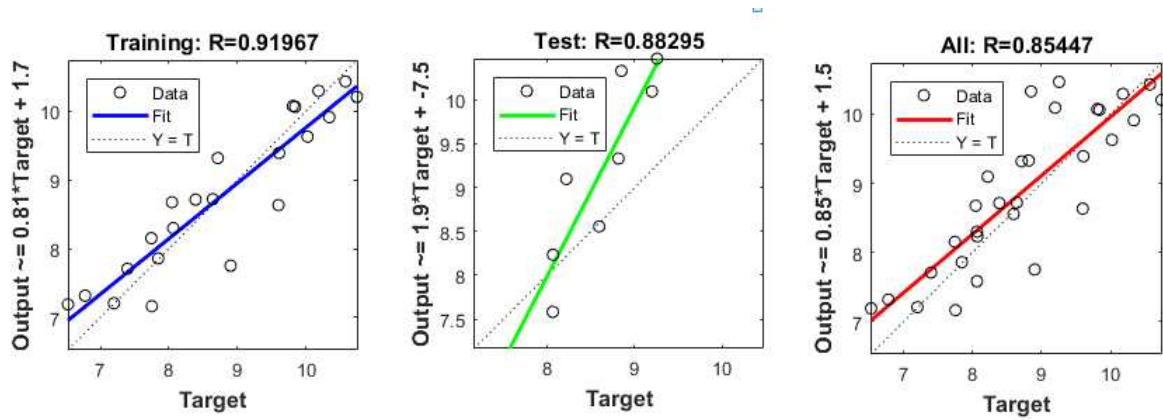


그림 3-3-5. 인공신경망 모델의 시뮬레이션 결과

④ 기존 토석류 부피 예측모델과의 비교

기존 토석류 부피 예측모델과의 비교분석을 위해 Marchi and D' Agostino (2004)가 제안한 회귀분석식 Eq. (3-3-1)을 국내 토석류 발생 이력 자료를 활용하여 제안하였음.

$$V = a \cdot A^b \cdot S^c \quad (3-3-1)$$

여기서, V 는 토석류 부피, A 는 유역면적, S 는 유로의 평균 경사, a, b, c 는 맞춤계수를 나타낸다. 연구지역의 데이터 30개 자료를 바탕으로 맞춤계수를 분석한 결과, $a = 0.3055$, $b = 0.4818$, $c = 1.721$ 로 분석됨.

$$V = 0.3055 \cdot A^{0.4818} \cdot S^{1.721} \quad (3-3-2)$$

국내 연구지역 데이터를 기반으로 제안된 회귀식 Eq. (3-3-2)와 ANN 모델의 성능평가를 위해 전체 데이터를 바탕으로 예측된 토석류 부피와 관측된 토석류 부피 값을 비교하였음. 그 결과 회귀분석 식의 R^2 값은 0.65을 보였고, ANN 모델의 R^2 값은 0.79를 나타내었음(그림 3-3-6). 즉, 본 연구로부터 개발된 토석류 부피 예측 ANN 모델은 기존에 활용되던 회귀분석 모델보다 높은 정확도를 나타낸다고 할 수 있음. 따라서 추후 연구대상 지역과 비슷한 지형조건의 산지에서 토석류 부피예측을 위해서 본 연구에서 개발된 ANN 모델이 유용할 것으로 기대됨.

○ 결과의 활용방안:

- 본 연구 결과를 통해 광역 단위의 토석류 위험지도로 활용 가능함(그림 3-3-7). 즉, 연구대상 범위가 확장 되면 토석류 위험지역을 선정하여 방재시설 구축이 필요한 위치선정 시 근거자료로 활용될 수 있음
- 또한, 토석류 최종부피 값은 토석류 거동 예측에 이용된 해석결과와의 비교를 통해 방재시설물 설계시 입력 자료로 활용될 수 있음

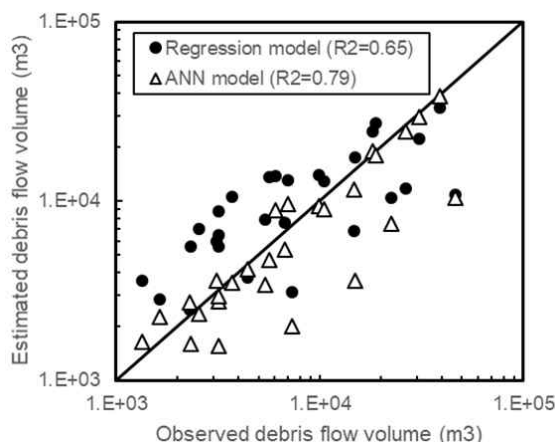


그림 3-3-6. ANN 모델과 회귀분석을 이용한 추정값과 관측값의 비교

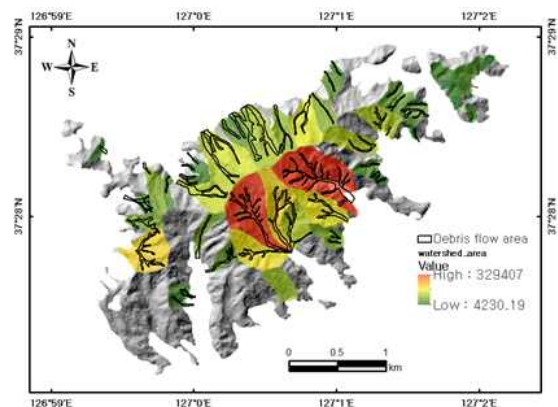


그림 3-3-7. 토석류 부피예측 ANN 모델의 활용 예시

3-4. 강우 침투해석 기반 산사태 민감도 분석기술 개발

○ **목적 및 내용:** 국내 산사태의 경우 깊이가 1~3m인 얇은 형태의 파괴가 빈번히 발생함. 이는 국내 산지의 토심이 얇고 상대적으로 투수계수가 낮은 기반암이 얇은 깊이에 분포되어 있기 때문으로 사료 됨. 또한, 얇은 산사태는 극한강우 발생시 토석류로의 전이가 가능한 발생원(source)이 되므로 토석류 분석을 위해서는 얇은 산사태의 시공간적 분석이 동반되어야 함. 본 연구에서는 흙의 함수특성에 따른 1차원 침투특성을 고려하여 산사태 민감도 분석을 수행하였음. 연구대상 지역은 함수특성곡선 및 지반 물성이 확보된 우면산 일대를 대상으로 하였음.

○ **방법 및 결과:** 본 연구개발 방법은 ① 함수특성곡선(SWCC), ② 1차원 침투해석 조건설정, ③ 무한사면안정 해석으로 구성되어 있음.

① 함수특성곡선(SWCC): SWCC 데이터 획득을 위해 우면산 조사보고서((Korean Society of Civil Engineering, 2012)에서 구축한 자료를 활용하였음. Eq. (3-4-1)과 (3-4-2)는 Van Genuchten(1980)이 제안한 함수특성곡선과 투수계수곡선 맞춤식을 나타내며, 해당 맞춤변수는 표 3-4-1과 같음.

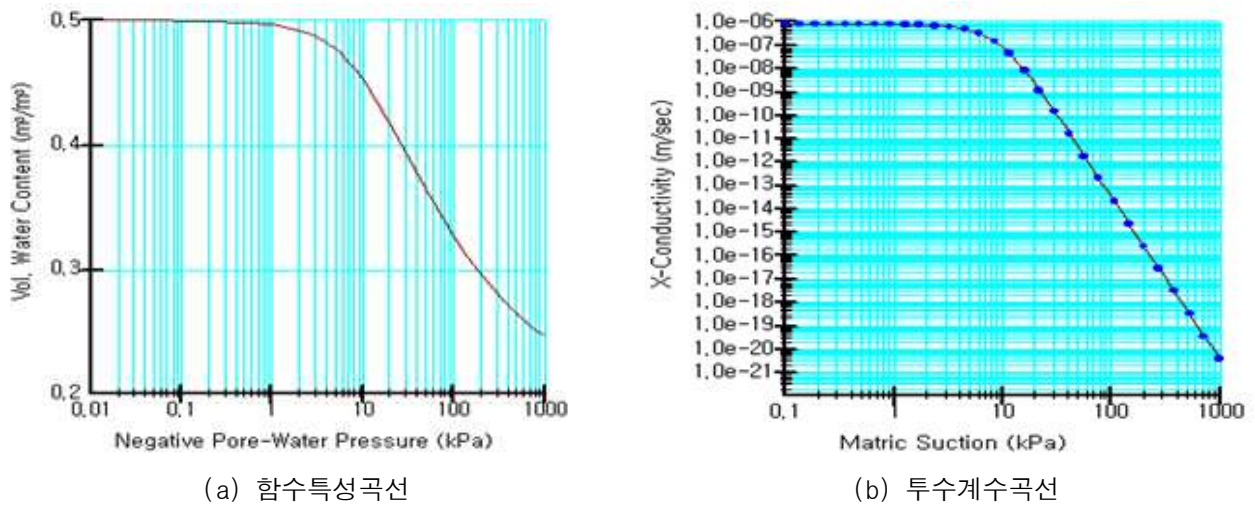


그림 3-4-1. Van Genuchten 모델을 활용한 함수특성곡선

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (a\phi)^n]^m} \quad (3-4-1)$$

$$k_w = \frac{k_s \cdot [1 - ((a\phi)^{n-1}) \cdot (1 + (a\phi)^n)^{-m}]^2}{[(1 + a\phi)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (3-4-2)$$

표 3-4-1. 함수특성곡선 맞춤변수 (대한토목학회, 2012)

Parameters	value
a	0.0885
n	1.35
m=1-1/n	0.25
θ_s (포화체적함수비)	0.5
θ_r (잔류체적함수비)	0.18
k_s (포화투수계수)	8.0E-06 m/s

- ② 1차원 침투해석 조건설정: 강우 침투해석은 상용프로그램 SEEP/W를 활용하였으며, 초기조건 설정은 다음과 같음. 토심 및 초기흡입응력의 경우 우면산 조사보고서의 현장조사 결과를 토대로 선정하였음. 강우 조건은 일정한 강우강도를 두가지 경우(낮은 강우강도, 높은 강우강도)를 고려하였음.

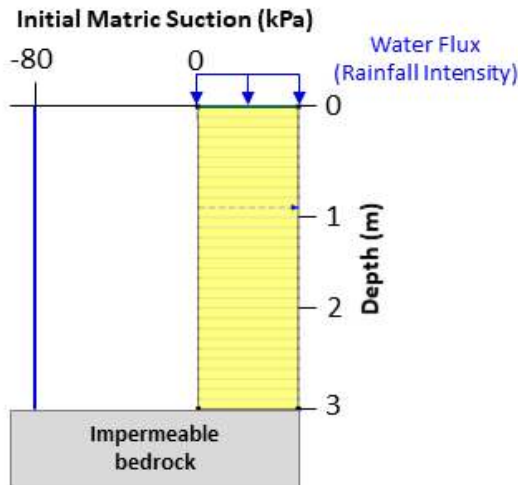


그림 3-4-2. 침투해석 경계조건

표 3-4-2. 침투해석 경계조건 설정 값

Initial Condition		value
토심 (m)		3
흡입응력 (kPa)		-80
강우 조건 (mm/h)	Case 1	2.88
	Case 2	28.8

강우강도가 낮은 경우(Case 1)와 높은 경우(Case 2)에서의 침투해석 결과 시간이 지남에 따라 지표면부터 간극수압이 0값에 가까워지는 양상을 보였으며, 이러한 양상은 Case 2에서 더 크게 나타남. 또한, Case 1에서는 침투 발생 후 약 144시간 후에 바닥부에서부터 포화가 발생하였고 이 시점에 사면파괴(깊이: 3m)가 발생하였음. 반면, Case 2에서는 침투 발생 후 약 14.4시간에 포화가 발생하기 전 사면파괴(깊이: 2~2.5m)가 발생하였음. 두 강우강도 값 모두 포화투수계수 값과 같거나 작은 값이므로 강우유출이 일어나지 않고 모두 침투되는 결과를 나타내었음.

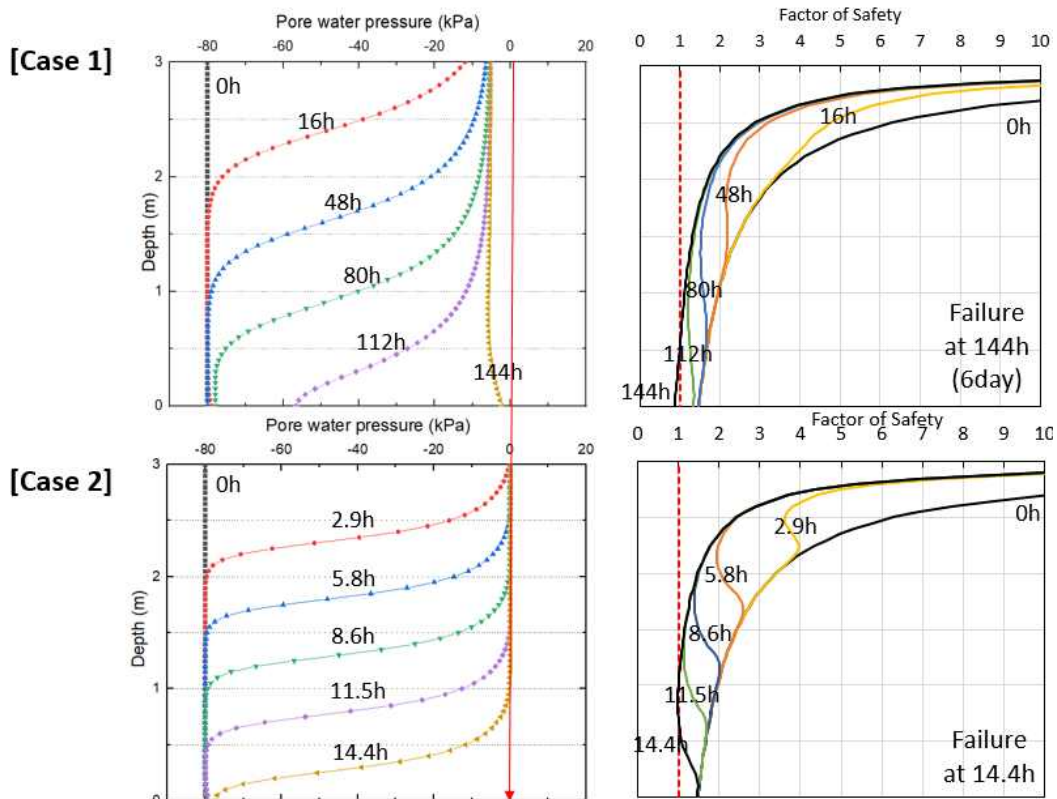
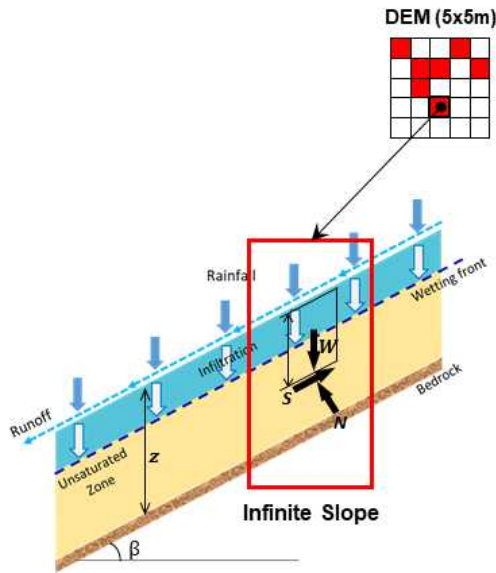


그림 3-4-3. 침투해석 경계조건

- ③ 무한사면안정해석: 앞서 수행되었던 1차원 침투해석결과는 GIS 기반의 DEM 자료와 연동시켜 넓은 지역에 대한 산사태 분석에 활용됨. 즉, DEM을 구성하는 각 cell을 무한사면으로 가정하여 불포화토의 흡입응력을 고려한 무한사면 안정해석을 수행하였음. 해석결과는 그림 3-4-6과 같으며, 안전율이 1이하로 떨어지는 시점(강우지속시간)에 강우강도 값을 곱해 연속강우량으로 표현하였음.



$$FS = \frac{\tan\phi'}{\tan\beta} + \frac{c' - \sigma^s \tan\phi'}{z_w(\gamma \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta)} \quad (3-4-3)$$

그림 3-4-4. DEM의 무한사면 가정 개념도

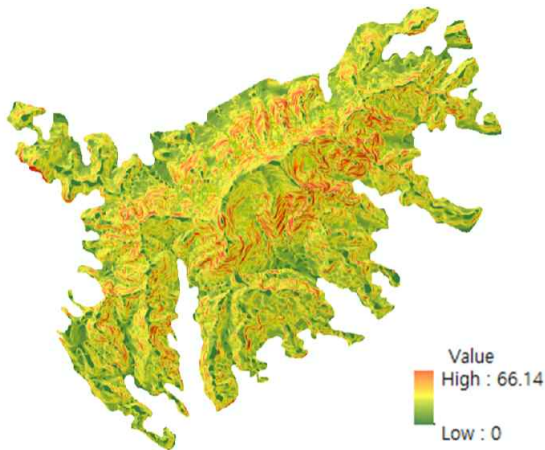


그림 3-4-5. GIS 기반 사면경사 데이터베이스

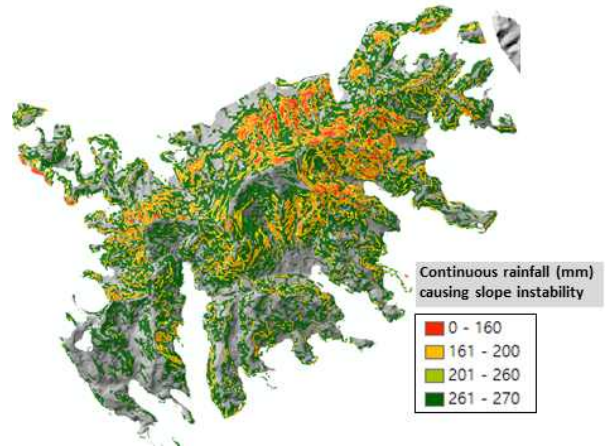


그림 3-4-6. 물리기반 산사태 민감도 지도
(=연속강우량 지도)

- **결과의 활용방안:** 본 연구에서 개발된 물리기반 산사태 민감도 평가기술은 산사태가 발생 가능한 시간, 위치 정보를 제공할 수 있음. 이는 추후 토석류로의 전이가 가능한 지역을 판별하는 기초자료로 활용됨.

3-5. DAN3D를 활용한 국내 토석류 모델링

- **목적 및 내용:** 본 연구에서는 토석류의 연행작용을 고려하기 위해 토석류 유동해석 프로그램인 DAN3D(McDougall, 2006)를 활용하였음. 국내 토석류 분석의 적용성을 검토하기 위하여 CCTV, 블랙박스, 휴대폰 동영상 등을 통해 토석류 속도가 현장 관측된 우면산 래미안 유역 토석류 거동 분석을 수행하였음. 연구결과를 토대로 향후 DAN3D를 활용한 토석류 분석 시에 활용 가능한 참고자료를 제공하고자 함.

○ 토석류 거동 특성분석 방법 비교

- 기존 경험적 방법에 의해 토석류 속도, 두께, 충격압 등을 고려하는 방식은 유역 단위의 지역에서 대푯값만 추정이 가능하므로 토석류가 흐르는 과정에서의 특성 변화를 고려할 수 없음. 따라서, 이러한 한계점을 극복하기 위해 여러 연구자들에 의해 수치해석 프로그램이 개발되었으며 대표적인 특징들을 비교하면 표 3-5-1과 같음. 이 중 DAN3D 프로그램은 타 프로그램들의 연행작용을 고려할 수 없거나, 여러 가지 유변학적 모델을 고려할 수 없다는 단점들을 극복한 모델임.

표 3-5-1. 토석류 거동특성 분석 프로그램들의 주요특성

Model	Rheology	Variation rheology	Entrainment	Reference
DAN3D	Frictional, Voellmy, and Bingham	Yes	Defined	Hungr and McDougall, 2009
Flo-2D	Quadratic	No	No	O'Brien et al., 1993
RAMMS	Voellmy	Yes	Process based and Defined	Christen et al., 2010
MADFLOW	Frictional, Voellmy and Bingham	No	No	Chen and Lee, 2007

○ DAN3D 프로그램

- 지배방정식: DAN3D에서는 유체보다 복잡한 유동특성을 가진 토석류를 모의하기 위해 반경험적(semi-empirical) 방법을 기반으로 등가흐름(equivalent fluid)의 개념과 연속체(continuum) 가정을 적용하였음(McDougall and Hungr, 2004). 등가흐름과 연속체 개념은 다양한 물질들로 이루어진 토석류를 하나의 가상물질로 가정하는 것을 말하며, 이러한 가정 사항을 통해 복잡한 토석류 거동을 간단한 유변학적 관계로 표현할 수 있음. DAN3D의 지배방정식은 라그랑지안(Lagrangian) 계를 따르며, 질량 보존 방정식과 운동량 보존 방정식으로 구성되어 있음.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho v = 0 \quad (3-5-1)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho v \otimes v = -\nabla \cdot T + \rho g \quad (3-5-2)$$

여기서, ρ 는 체적밀도, t 는 시간, v 는 속도벡터, T 는 응력벡터, g 는 중력가속도벡터, ∇ 는 미분 연산자, $\cdot$ 는 내적, $\otimes$ 는 텐서 곱을 나타냄.

- 연행작용: 연행작용은 토석류 바닥 물질의 침식에 따른 부피증가 현상으로 정의할 수 있음. DAN3D에서는 연행작용을 고려하기 위하여 Eq. (3-5-3)과 같이 토석류의 부피가 이동하는 거리에 따라 자연지수적으로 증가한다고 가정하였음.

$$E_s = \frac{\ln(V_f/V_o)}{S} \quad (3-5-3)$$

여기서, E_s 는 연행증가율, V_f 는 토석류 최종부피, V_o 는 토석류 초기부피, S 는 토석류 경로의 유하거리를 나타냄.

- 유변물성: DAN3D에서는 다양한 구성 물질로 이루어진 토석류의 유동특성을 각 환경에 따라 적절히 적용할 수 있도록 5가지 종류의 유변학적 모델(Newtonian, Plastic, Bingham, Frictional, Voellmy)을 제공함. 각 유변학적 모델들은 각기 다른 유동특성을 가지지만, DAN3D에서는 모두 바닥면의 전단응력(basal shear stress)으로 표현되며, 토석류의 흐름방향과 반대 방향으로 작용하므로 항상 음의 값을 가짐. 5가지 모델 중 Frictional 모델의 경우 Eq. (3-5-4)와 같이 한가지 변수로 구성되어 있음. 따라서 한가지 변수인 바닥부 마찰각에 대한 매개변수 연구만으로 역해석이 가능하다는 장점이 있음.

$$\tau = \sigma \tan \phi_b \quad (3-5-4)$$

여기서, τ 는 항복응력, σ 는 전응력, ϕ_b 는 바닥부 마찰각을 나타냄.

○ 토석류 해석결과

본 연구에서는 DAN3D 프로그램의 국내 적용성을 검증하기 위하여 주요 입력자료인 유변물성과 연행증가율 값에 따른 토석류 거동변화를 분석하였음. 먼저 유변물성 값인 바닥부 마찰각이 감소할수록 바닥부의 전단응력이 감소하여 토석류 속도가 증가함을 확인하였음. 특히, 바닥부 마찰각이 1.56° 를 나타낼 때, 토석류 관측값에 근접함을 확인함(그림 3-5-1). 연행증가율 값은 Eq. (3-5-3)에 관측값을 토대로 적용한 결과 토석류의 두께 및 부피 증가현상을 적절히 모사하였음 (그림 3-5-2).

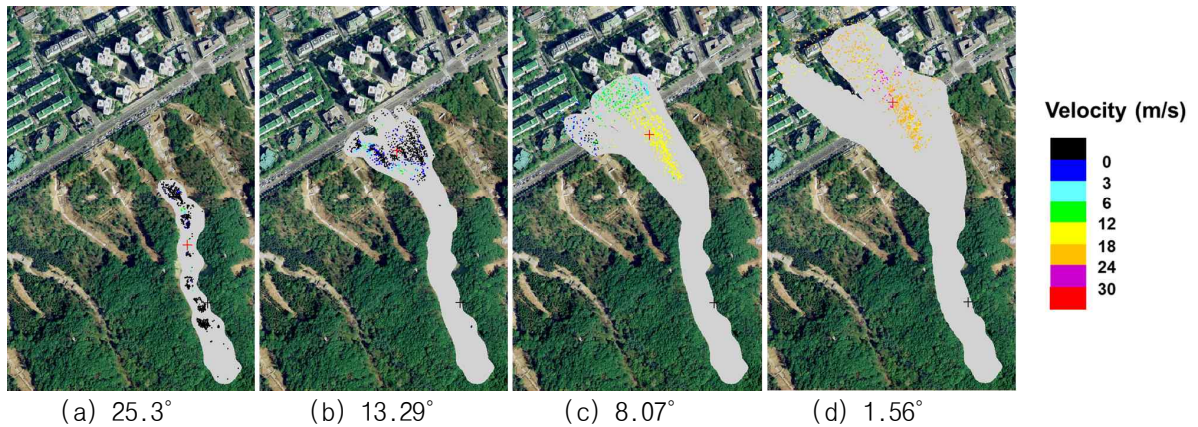
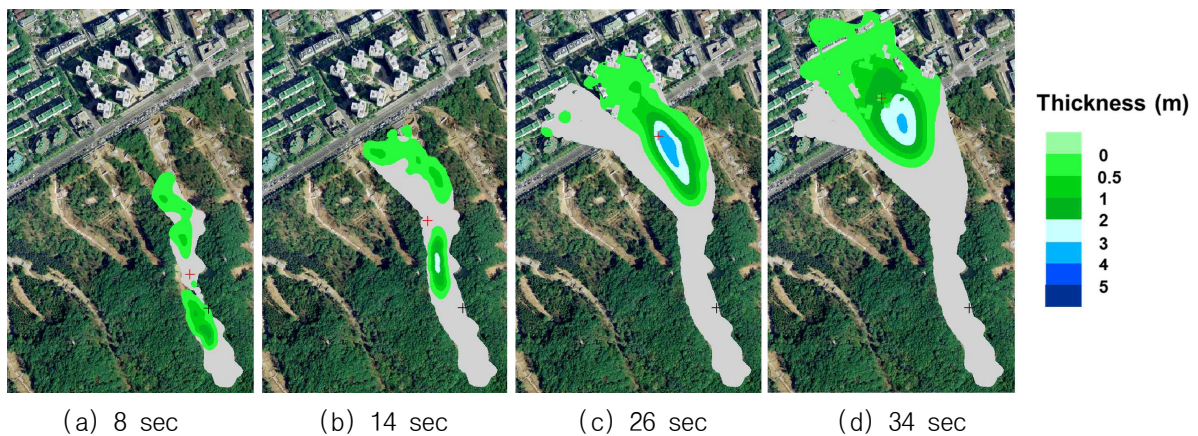


그림 3-5-1. 유변물성에 따른 토석류 거동특성 변화



3-5-2. 토석류 두께 및 부피증가 현상 모사

표 3-5-1. 토석류 모델링 결과 요약

	초기부피 (m^3)	최종부피 (m^3)	유하거리 (m)	연행 증가율	바닥부 마찰각	최대두께 (m)	최대속도 (m/s)
관측자료	3,400	46,500	606.7	0.0043	-	4~5	28
모델링 결과	3,375	42,000	606.7	0.0043	1.56°	4.2	27.2

○ **결과의 활용방안:** 본 연구결과 검증된 유변물성을 고려한 토석류 해석방법을 토석류 방재시설 설계시 필요한 설계입력자료를 제공함

3-6. 토석류 예측 모델링 기술개발

- **목적 및 내용:** 본 연구에서는 방재시설 설계시 필요로 하는 토석류의 정량적 정보(속도, 두께, 부피 등)를 획득하기 위해 토석류 예측모델링 기법을 제안하였으며, 국내 토석류의 빠른 속도와 두께 증가현상을 모사할 수 있는 토석류 수치해석 프로그램 DAN3D를 활용하였음. DAN3D에서는 토석류 분석을 위해 초기부피, 유변물성, 연행증가율 값을 필요로 함. 즉, 3가지 입력인자를 결정하는 방법을 통해 토석류 예측 모델링 방법을 제안함.

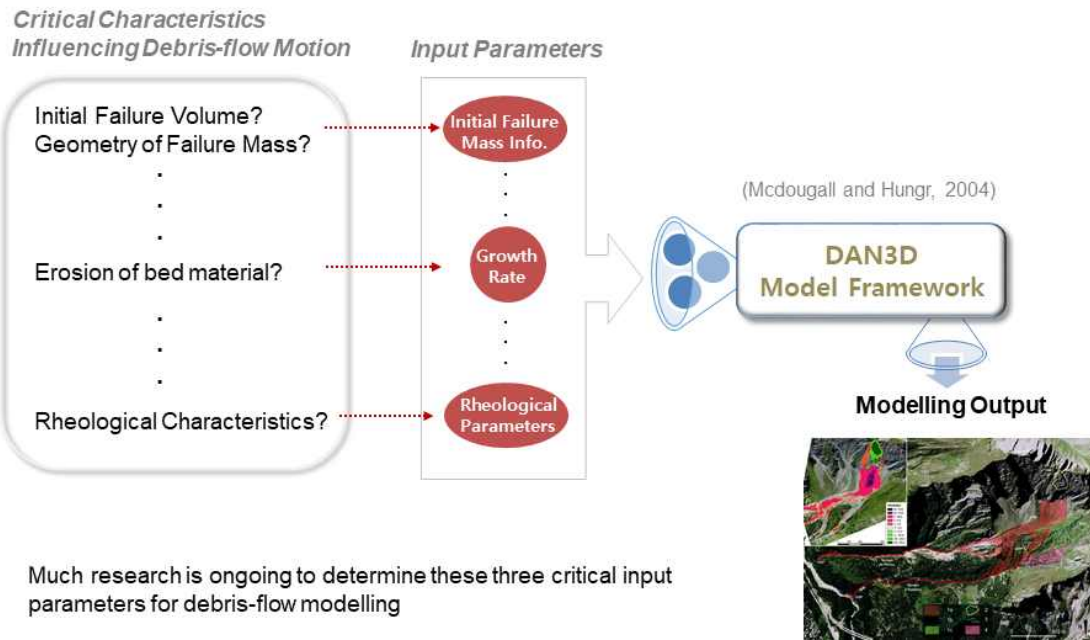


그림 3-6-1. 토석류 예측 모델링 개념도

- **방법 및 결과:** 본 연구에서는 토석류 예측 모델링을 위한 3가지 입력인자 (① 초기부피, ② 연행증가율, ③ 유변물성)를 결정하기 위한 방법을 제안하였음.

- ① 초기부피 결정: 토석류는 얇은 파괴 산사태(source)로부터 강우와 토석이 유입되어 발생하게 됨. 이때, 앞서 개발된 산사태 민감도 분석결과에서 위험지역으로 판정된 영역 중 모든 지점이 토석류로 전이되는 것은 아니므로 토석류 발생에 민감한 지역을 선정하기 위해 토석류 전이규준을 적용하였음. 본 연구에서 적용한 토석류 전이규준은 Kang et al.(2017)이 개발한 ANN 모델이며, 연구대상 지역의 지형인자, 수문인자를 활용하여 토석류 민감지역을 구분하였음. 최종적으로 물리기반 산사태 민감도 지도에 토석류 전이규준을 적용함으로써, 그림 3-6-2. (c)와 같이 토석류 초기부피에 해당하는 영역을 추출함.



그림 3-6-2. 토석류 초기부피 산정 과정

- ② 연행증가율: 앞서 기술한 초기부피 결정법, 토석류 최종부피 예측, 그리고 유하거리를 계산하면 연행증가율 값의 추정이 가능함.
- ③ 유변물성: 본 연구에서는 바닥부 마찰각 값을 추정하기 위해서 과거 우면산에서 발생한 토석류 이력들을 역 해석하여 바닥부 마찰각 데이터베이스를 구축하였음. 또한, 해당 지역의 지반 물성 및 지형, 수문 특성(그림 3-6-3)을 토대로 바닥부 마찰각 추정 ANN 모델을 개발(그림 3-6-4) 하였음.

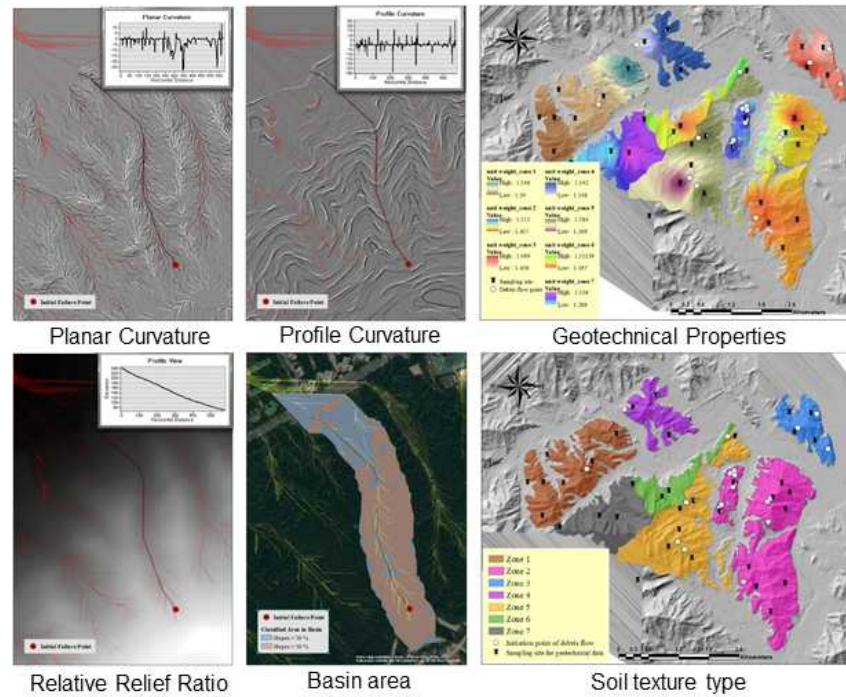


그림 3-6-3. 바닥부 마찰각 추정을 위한 영향인자 리스트

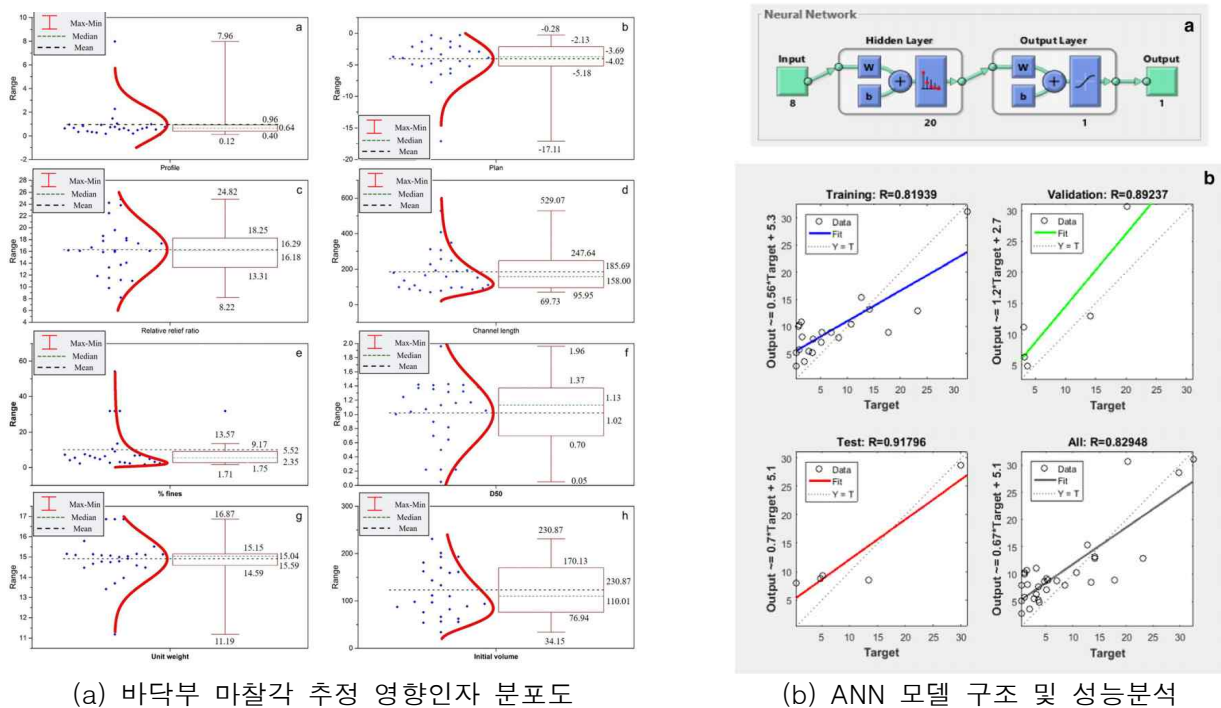


그림 3-6-4. 바닥부 마찰각 추정 ANN 모델 개발

- **결과의 활용방안:** 본 연구 결과 얻어진 초기 토석류 부피 산정방법, 연행증가 모델 및 토석류 바닥부 마찰각 추정 방법들의 결과는 효율적인 방재시설물의 위치선정 시 요구되는 토석류 해석결과를 도출하기 위해 활용될 수 있음.

3-7. 취약성을 고려한 토석류 사방구조물 위치선정 알고리즘 개발

○ **목적 및 내용:** 본 연구는 DAN3D 토석류 수치해석으로 예측되는 토석류의 거동특성을 기계학습 및 컴퓨터 알고리즘들을 사용해서 토석류 위험도 분석을 수행하였음. 위험도 분석결과를 기반으로 간단한 조건들을 적용해 사방댐 위치 선정할 수 있는 위치선정 알고리즘을 제안하였음. 본 연구는 2011 우면산 토석류를 이력 자료를 통해 사용성을 검증하였음.

○ 방법 및 결과:

① 사방댐 위치선정 알고리즘

전체적인 위치선정 알고리즘 흐름도에 제시된 방법으로 최종적으로 사방댐 위치선정 및 토석류의 깊이, 속도, 부피, 폭 정보들을 유출할 수 있도록 설계됨 (그림 3-7-1).

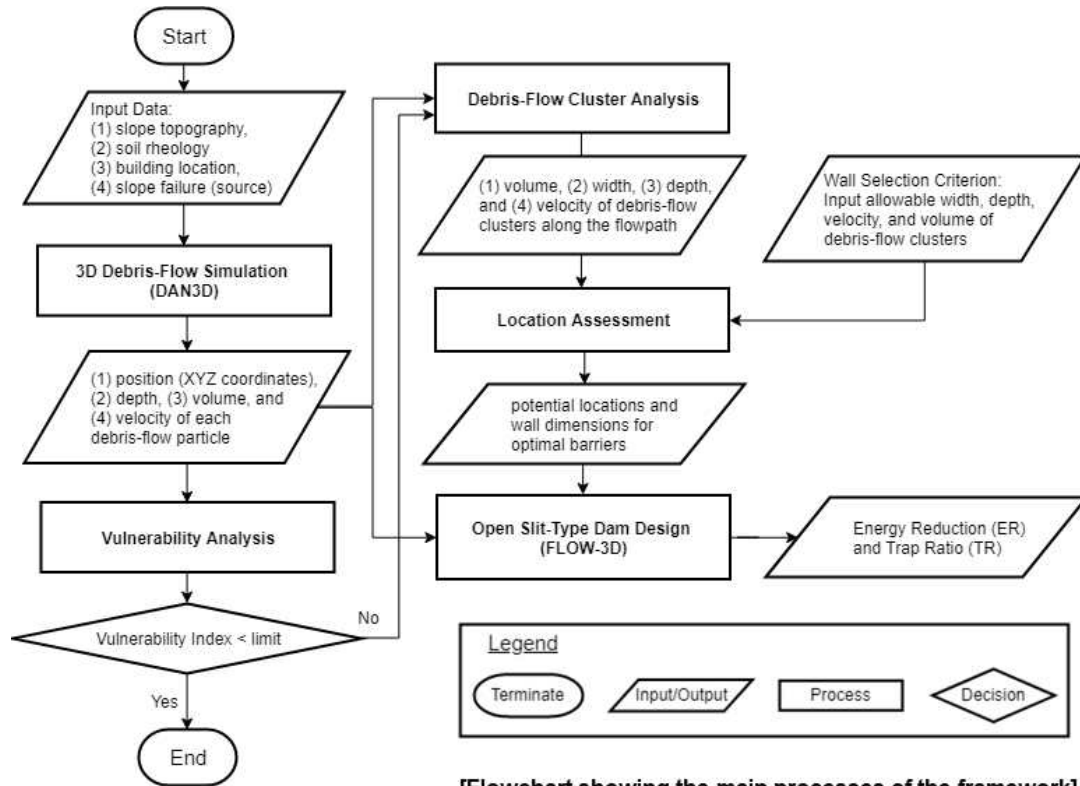


그림 3-7-1. 슬릿형 사방댐을 위한 위치선정 알고리즘

② 3차원 토석류 거동특성 수치해석 (3D Debris-Flow Simulation)

DAN3D는 연행작용 및 유변학적 거동특성을 고려하기 위하여 간략화된 구성방정식을 토대로 토석류 해석이 수행됨. 본 연구결과에서 DAN3D 토석류 해석을 통해 국내 빠른 속도의 토석류 거동특성을 적절히 묘사함을 확인하였음. 또한, 연행작용과 유변학적 모델을 고려할 수 있으므로 본 연구에 적용하기 적합함. DAN3D는 입자기반으로 토석류 거동특성을 계산함. 각 토석류 입자들의 위치, 깊이, 부피와 속도 정보를 유출해서 위치선정 알고리즘을 적용함.

③ 취약성 평가 (Vulnerability Analysis)

토석류 거동특성 결과를 바탕으로 토석류에 의한 건물의 물리적 취약성 평가를 수행한 후 사방댐의 필요 여부를 가림. 취약성 평가는 토석류의 깊이, 속도나 충격압을 사용해서 취약함수(V: vulnerability index)를 계산함 (표 3-7-1). 토석류의 충격압을 다음과 같이 계산됨 (Eq. 3-7-1) (Zanchetta et al., 2004):

$$P = \frac{1}{2} \rho_{df} g h + \rho_{df} v^2 \quad (3-7-1)$$

여기서 P 는 토석류 충격압, ρ_{df} 는 체적밀도, g 는 중력가속도, h 는 토석류 높이, v 는 토석류 속도를 나타냄.

표 3-7-1. 토석류 정보에 따른 토석류로 인한 비 콘크리트 구조와 콘크리트 구조건물의 취약함수(V) 계산식 (Kang and Kim, 2014)

토석류 정보	취약함수(V) 계산식	
	비 콘크리트 구조	콘크리트 구조
속도	$V = 1 - e^{(-0.018 \times v^{4.075})}$	$V = 1 - e^{(-0.064 \times v^{1.625})}$
깊이	$V = 1 - e^{(-2.152 \times h^{1.429})}$	$V = 1 - e^{(-0.440 \times h^{0.725})}$
충격압	$V = 1 - e^{(-0.004 \times p^{1.812})}$	$V = 1 - e^{(-0.0167 \times p^{0.917})}$

건물의 손상등급과 취약함수를 (표 3-7-2)에 나타냄. 손상등급을 고려해서 토석류로 인해 Extensive나 Complete 등급에 있는 건물이 있으면 사방댐 설치 고려 대상 지역으로 선정돼서 다음 단계로 진행됨.

표 3-7-2. 토석류로 인한 건물 손상등급의 설명 및 취약함수(V)와 관계 (Kang and Kim, 2014)

Damage classs	Damage description	Vulnerability (0-1.0)	Impact pressure(kPa)				
			Non-concrete frame (Brick masonry/ wood/Steel light frame)	Reinforced- concrete frame	Brick- concrete	Reinforced- concrete frame	Zanchetta <i>et al.</i> (2004)
					Hu <i>et al.</i> (2012)		
Complete	Partly or totally destructed, evacuation necessary, complete reconstruction	0.9-1.0	> 30	-	> 18	> 110	> 90
Extensive	Partly destructed, loss of parts of external and internal walls, evacuation necessary, reconstruction of destructed parts	0.7-0.8	15-30	> 100	-	-	35-90
Moderate	Cracks in the wall, stability not affected, reparation not urgent, flooding of the internal rooms and damage to the furnishing	0.4-0.6		35-100	6-18	35-110	< 35
Slight	Slight non-structural damage, stability not affected, furnishing or fitting damaged	0.1-0.3	0-15	0-35	0-6	0-35	

④ 토석류 클러스터 거동특성 수치해석 (Debris-Flow Cluster Analysis)

DAN3D는 토석류를 입자로 해석하기 때문에 토석류 영역의 넓이와 폭 정보들을 자동으로 계산하지 않음. DAN3D에서 유출된 토석류 입자 정보들을 사용해서 입자들을 하나의 클러스터로 고려해서 (그림 3-7-2) 각 토석류의 위치에서 토석류의 정보들을(폭, 부피, 속도, 깊이) 계산함. 앞서 설명한 과정은 기계학습기법과 컴퓨터 알고리즘들을 사용해서 계산함. 예를 들면, K평균 기계학습기법으로 입자들의 위치 정보를 사용해 토석류 입자들을 클러스터들로 고려함. 또한, alpha-shape 컴퓨터 알고리즘을 사용해 각 토석류 클러스터의 경계선을 계산함.

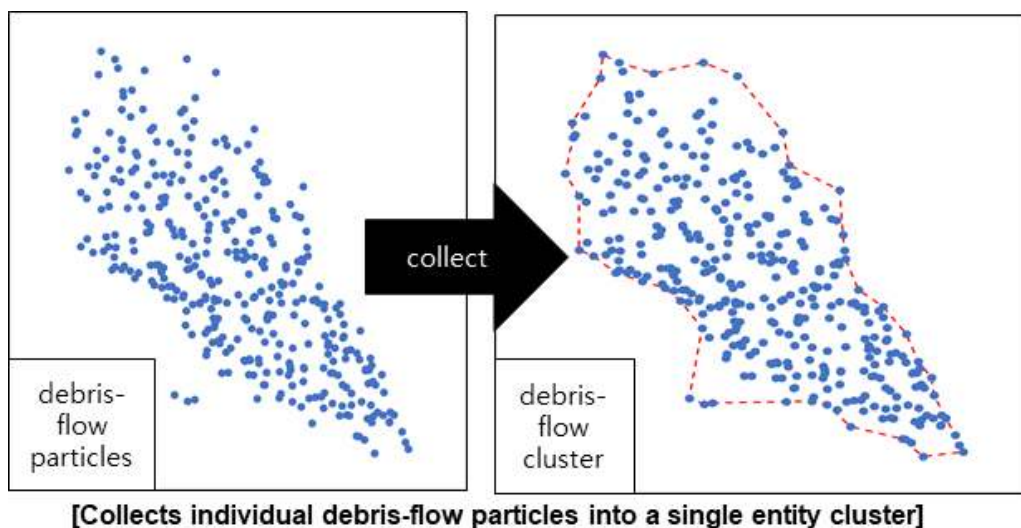


그림 3-7-2. 토석류 입자를 하나의 토석류 클러스터로 뭉침

⑤ 사방댐 위치선정 기준 (Location Assessment)

토석류 클러스터 거동특성 수치해석을 통해 도출된 결과에 사방댐 위치선정 기준들을 적용해서 사방댐 설치 최적 위치를 찾음. 기준들은 크게 다음과 같이 나눌 수 있음:

- 최대 수치 기준: 토석류의 정보에 최대 수치(부피, 폭, 높이)를 기준 잡아서 토석류가 이 최대 수치를 넘어가는 토석류 위치를 위치선정에서 배제함. 예를 들어서, 최대 폭을 30m로 잡아서 토석류의 폭이 30m를 넘는 위치들은 선정하지 않음.
- 취약성 평가: 토석류의 속도와 깊이를 사용해서 취약성 평가를 하고 만약 토석류로 인한 손상등급이 Extensive나 Complete 등급에 있으면 그 위치들은 배제함.
- 건설 및 시설 위치: 다음과 같은 정보들을 대입해서 사방댐 설치하기 적합한지 고려함:
 - 이미 설치된 시설 (건물, 하수구, 통신타워 등등) 위치
 - 공사 편의성이나 건설 기계 사용 가능 여부를 확인하기 위해서 도로에서부터의 거리

⑥ 슬릿형 사방댐 디자인

그 전 단계에서 선정된 사방댐 위치에서 토석류의 폭, 부피, 속도와 깊이를 유출함. 이 토석류의 정보들을 사용해서 사방댐을 디자인할 수 있음. 이 부분은 3-8. 수치해석 기반의 슬릿형 사방댐 성능평가 부분에서 더 자세히 다룸. 본 단계에서 사방댐 디자인 방법을 폐쇄형(closed type)이나 반사형(reflective) 사방댐 디자인 방법으로 교체해서 폐쇄형이나 반사형 사방댐 디자인 또한 가능함.

슬릿형 사방댐의 성능평가는 사방댐 디자인(슬릿 높이, 배차 간격과 슬릿 모양 등)에 민감하므로 정확성을 위해 높은 해상도 수치해석이 필요함. DAN3D에서는 5m 수준의 해상도로 해석이 수행되므로 사방댐 간격이 5m보다 작은 경우 수치해석적 오류가 발생할 가능성이 큼. 또한, DAN3D에서는 0.5m보다 조밀한 해상도를 생성하지 못한다는 한계점이 있음. 따라서, 사방댐 설계시 보다 효율적인 수치해석을 위해 전산유체역학 수치해석 프로그램인 FLOW-3D를 활용하여 토석류 충격압과 부피 저감분석을 수행하였음.

⑦ 2011 우면산 토석류 사례에 적용해서 사용방법 입증

2011 우면산의 래미안 지역을 대상으로 해서 사방댐 위치선정 알고리즘을 적용함. DAN3D 입력하는 정보들을 앞서 연구된 수치를 사용함. DAN3D로 토석류 거동특성을 계산해서 취약성 평가를 진행한 결과 건물 두 곳이 Extensive 손상등급으로 판정돼서 사방댐 설치를 고려함 (그림 3-7-3).

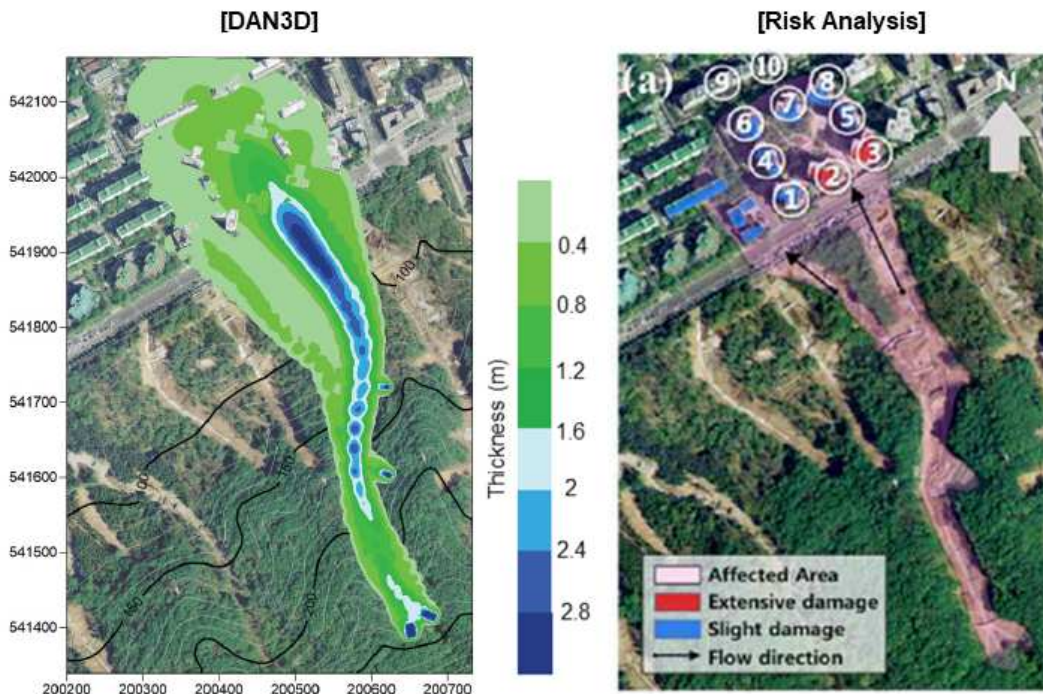


그림 3-7-3. (왼쪽) DAN3D로 우면산 지역에 토석류 거동특성 해석,
(오른쪽) 취약성 평가로 건물 2번과 3번이 Extensive 손상등급을 판정됨

토석류 클러스터 거동특성 수치해석으로 그림 3-7-4와 같이 토석류의 위치별 폭과 최대 깊이를 계산해서 토석류 위험도 분석결과를 지도로 구현함. 최종적으로 래미안 아파트 지역에 피해가 가지 않도록 산지에서 사방댐

위치선정 기준을 적용하여 사방댐 설치 지역을 선정함. 최대 수치 기준들을 사용해 최대 토석류 폭 30m와 최대 토석류 깊이를 3m를 대입해서 사방댐 설치 위치선정 함(그림 3-7-5).

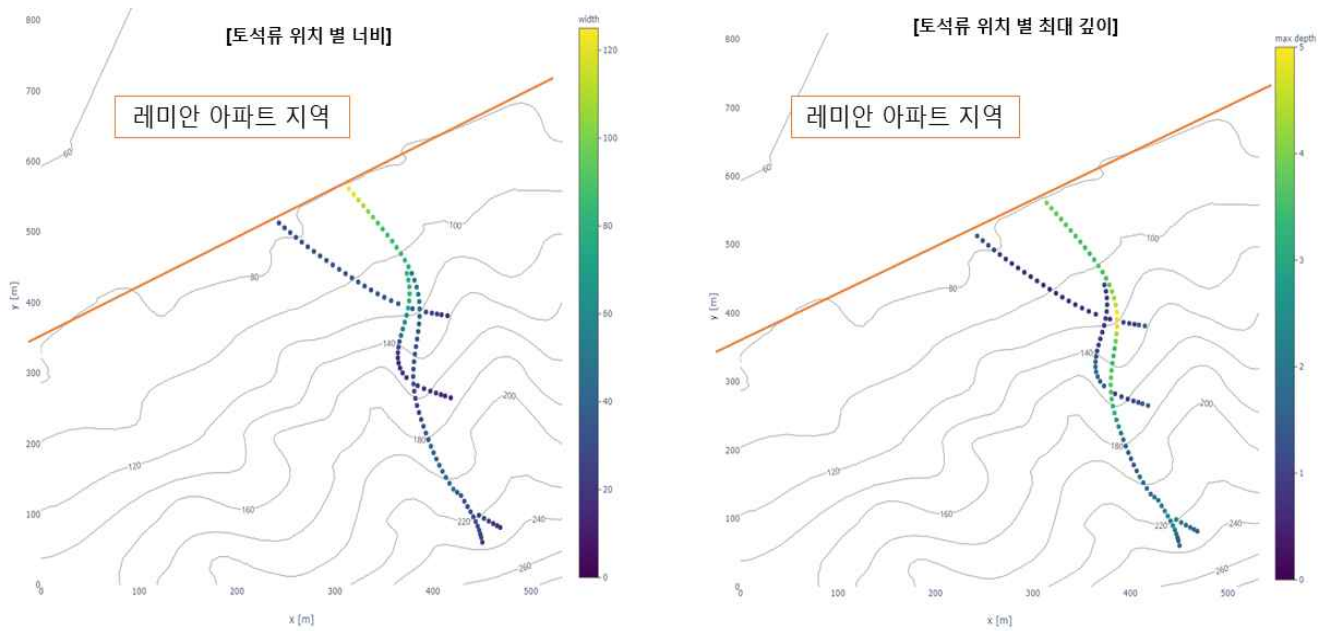


그림 3-7-4. 토석류 클러스터 거동특성 수치해석을 진행해서 (왼쪽) 토석류 위치별 너비와 (오른쪽) 토석류 위치별 최대 깊이를 보여주는 토석류 위험도 분석결과

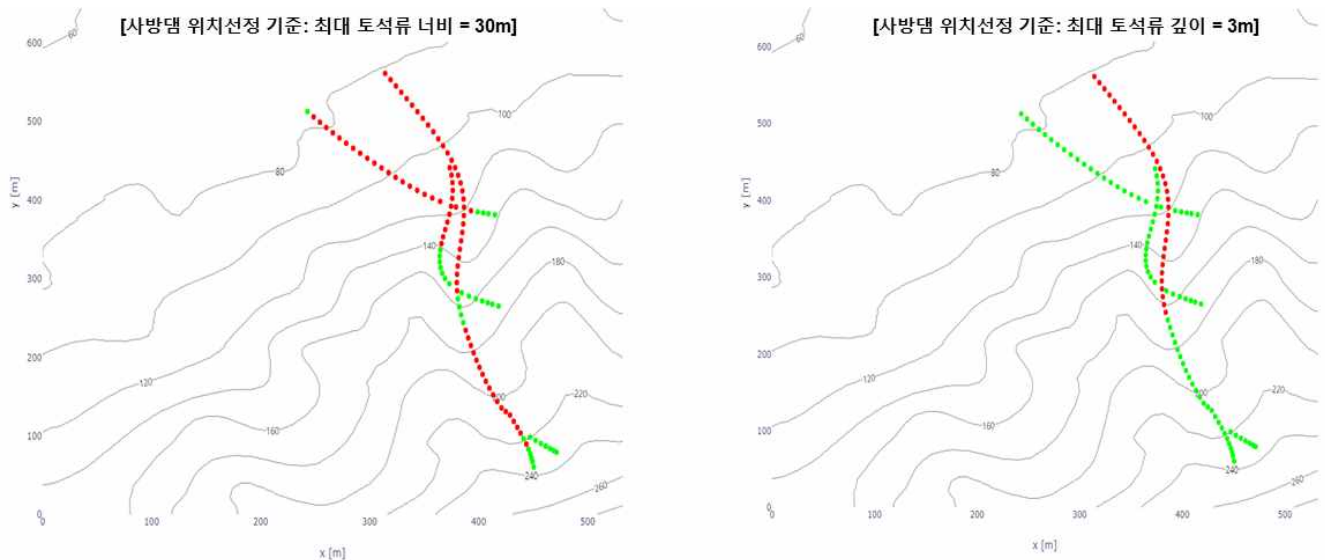


그림 3-7-5. 사방댐 위치선정 기준들을 적용해서 사방댐 설치 가능한 지역은 초록색, 아닌 지역은 빨간색으로 표시함. (왼쪽) 토석류 너비 기준 적용하고 (오른쪽) 토석류 깊이 준 적용한 결과

○ 결과의 활용방안:

- 본 연구에서 개발된 위치선정 알고리즘을 사용하여 사방댐 설치 가능한 위치 및 각 위치에서의 토석류의 정보들을 (속도, 깊이, 부피, 폭, 등) 얻을 수 있음.
- 취약성평가를 통해서 특정 지역이 사방댐 설치 고려대상 지역인지 판정 가능함.
- 여러 복합적인 토석류 거동특성이나 하나의 사방댐이 여러 복합된 토석류를 방지하고자 할 때 고려해야 하는 사항들도 해석 가능함.
- 또한, 위치선정 알고리즘의 전체적인 진행방식을 사용해서 폐쇄형 혹은 투과형 사방댐 위치를 선정하는데 적용 가능함.

3-8. 모형실험 결과 활용 및 수치해석 기반의 슬릿형 사방댐 성능평가

○ **목적 및 내용:** 본 연구에서는 국토교통기술연구개발사업 도시특성을 고려한 도심지 토사재해 예측·평가 및 통합관리기술 개발연구(2015)에서 수행된 슬릿형 사방댐 축소모형 실험결과를 기반으로 수치해석 연구를 수행함. 수치해석 연구를 위해 CFD 프로그램인 FLOW3D를 기반으로 슬릿형 사방댐 토석류의 흐름을 분석하고 사방댐 형태 및 토석류의 성질에 따른 사방댐 성능을 분석하였음. 또한, 분석결과를 토대로 에너지 저감이 되면서 지속 가능한 최적의 슬릿형 사방댐 형태를 제안하였음.

○ 방법 및 결과

① 슬릿형 축소모형 실험결과 연구사례 고찰 (권태혁 등, 2015)

슬릿형 사방댐의 배치에 따른 토석류 흐름에 대한 영향을 분석하기 위해 실내축소모형 실험장치가 사용됨(그림 3-8-1). 실험장치는 각도조절($0-50^\circ$)이 용이한 1.4 m 길이의 수로로, 너비 0.4 m, 높이 0.3 m의 직사각형 단면으로 구성되어 있음. 수로의 폭은 국내 토석류 발생유역 폭(10-15 m)에 대해 상사비(1/30)를 적용함.

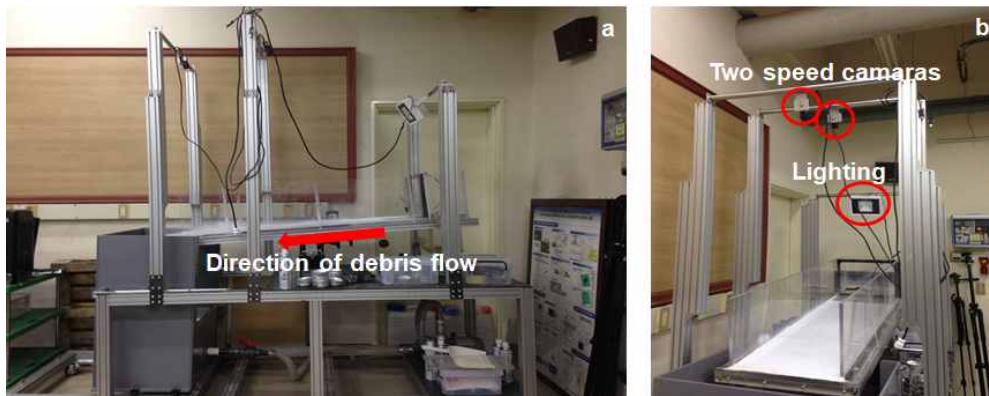


그림 3-8-1. 구축된 실내모형 수로의 모습

축소된 슬릿형 사방댐은 아크릴로 제작된 직사각형 형태의 벽체(너비 50 mm, 높이 90 mm, 두께 13 mm)가 사용됨. 직사각형 벽체를 7개로 고정된 후, 각도와 배치방향에 따른 8개의 배치로 실험이 수행됨(그림 3-8-2). 벽체가 설치되지 않은 상태를 reference로 설정하고, P00 배치는 벽체 8개를 설치한 불투과형 사방댐에서 벽체 1개를 제거한 후, 나머지 7개 벽체를 일정 간격으로 거리를 두고 설치됨. 벽체의 배치각도에 따른 토석류의 흐름에 대한 영향을 분석하기 위해 벽체와 수로의 횡방향이 이루는 각도가 30° (P30), 45° (P45), 60° (P60)로 기울여 배치하고, V30, V45, 그리고 V60은 30° , 45° , 60° 로 기울인 벽체를 서로 마주 보는, V자 형태로 배치하여 실험이 수행됨.

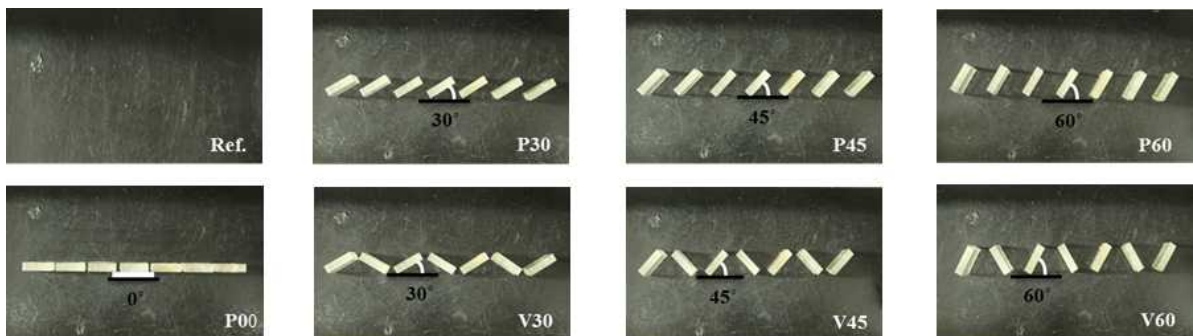


그림 3-8-2. 슬릿형 사방댐의 다양한 배치의 모습

축소모형 실험을 통한 7개의 슬릿형 사방댐의 배치에 따른 토석류의 속도 감소는 P00가 42.07%(2.11m/s)로 가장 큰 것으로 분석됨. 벽체의 배치 각도에 따른 속도 감소는 각각 30° (38.22%), 45° (29.59%), 60° (15.40%)의 순서로, 배치 각도가 작아질수록 토석류 속도 감소폭이 커지는 것으로 나타남. V자 형태로 배치했을 경우에는 사선으로 배치한 경우보다 같은 각도에서 속도 감소가 큰 것으로 나타남. 배치 각도에 따른 영향은 사선 배치와 마찬가지로, 30° (39.77%), 45° (31.47%), 60° (27.13%)로 배치 각도가 작아질수록 속도 감소율이 큰 경향을 보임.

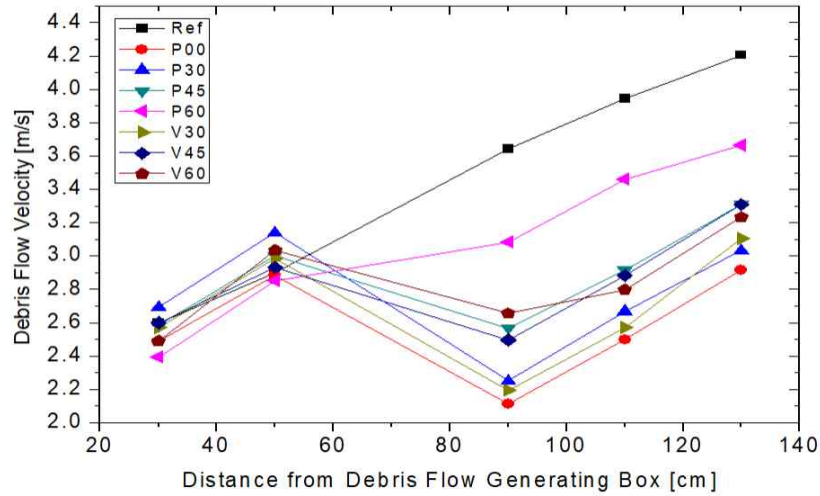


그림 3-8-3. 위치에 따른 토석류의 속도 변화

② 수치해석 모델 구축

먼저 수치해석 모델 검증을 위하여 축소모형 실험결과와 비교를 하였음. 그림 3-8-4와 같이 축소모형에서는 실험실 규모의 토석류 흐름 실험을 진행하였고 7가지 유형의 사방댐의 배치를 비교하였음. FLOW3D로 같은 조건을 갖는 시뮬레이션을 수행하고 속도 저감률을 비교한 결과 그림 3-8-5와 같이 비슷한 결과를 나타내었음.

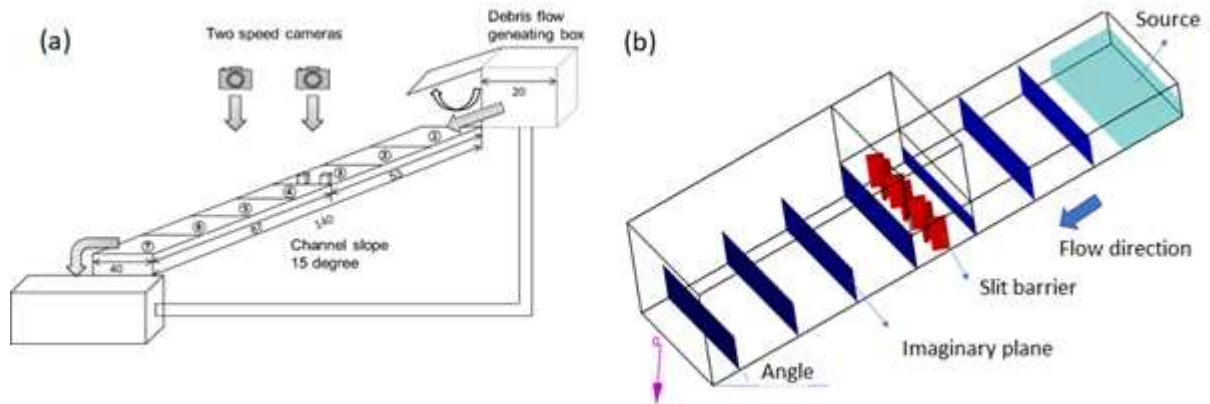


그림 3-8-4. 축소모형 실험 개략도 및 동일 조건의 수치해석 모델

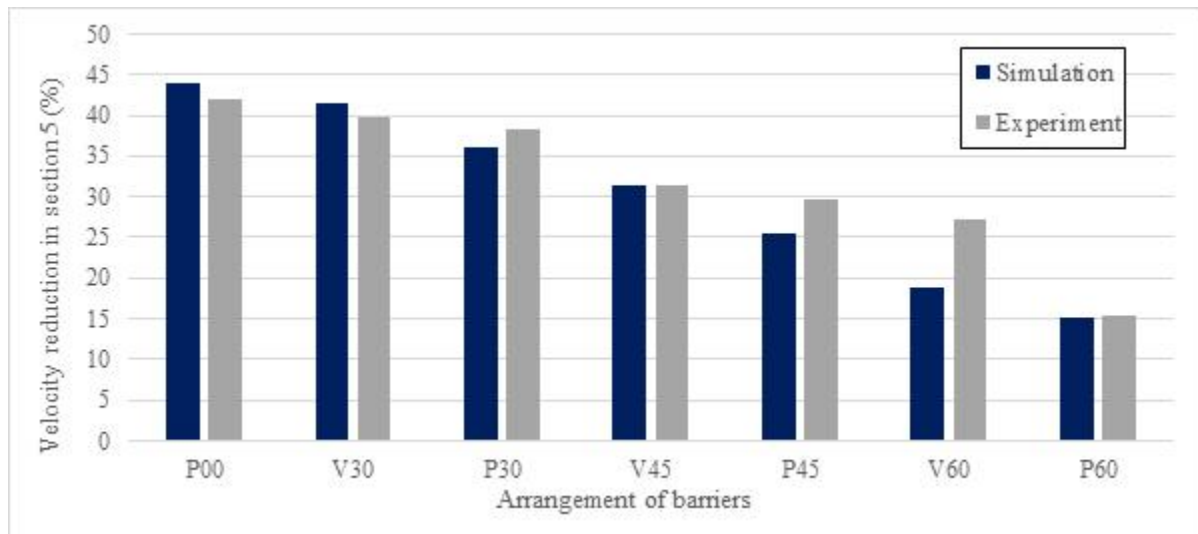


그림 3-8-5. 실험 및 수치해석 결과의 속도 저감률 비교

슬릿형 사방댐의 형태에 따른 토석류 흐름을 효과적으로 분석하기 위해 그림 3-8-6과 같은 수치해석 모델이 사용되었음. 모델링 된 수로는 0.1m의 폭과 1m의 길이를 가지고 15°의 기울어져 있음. 장벽의 경우 수로의 중간에 위치되어 있음. 수로 끝에 있는 가상의 평면을 통해 토석류 흐름 에너지를 계산하고 초기에너지와의 비교를 통해 에너지 저감률을 산정하였고 토석 부피 저감률의 경우 초기 토석의 부피와 사방댐 뒤에 남겨진 토석을 비교하여 산정하였음.

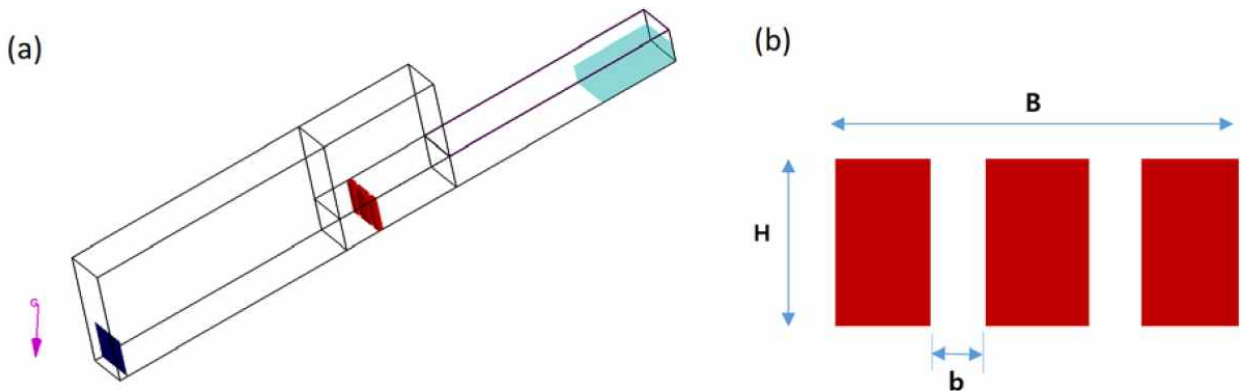


그림 3-8-6. 슬릿형 사방댐 수치해석 모델 및 슬릿 배치

③ 민감도 분석

민감도 분석이란 어떠한 모델에서 가능한 값들을 모두 대입해 인자의 변화에 따라 결과가 어떻게 변하는지 분석하는 것을 말함. 본 연구에서는 사방댐 성능 영향 인자들과 성능평가 인자 간의 관계를 민감도 분석 진행하였음. 슬릿형 사방댐의 성능 영향 인자로 토석류의 초기 속도 v_o , 토석류의 초기부피 V_o , 토석류 농도 C , 사방댐의 높이 H , 사방댐의 슬릿 비율 r 을 선택하였고 사방댐의 성능은 사방댐의 에너지 저감률과 토석 포착률을 이용하여 평가하였음. 각 영향 인자를 달리하여 총 289개의 수치해석 데이터를 이용하여 민감도 분석을 진행하였음.

표 3-8-1. 민감도 분석결과

에너지 저감률					
	C	v_o	V_o	H	r
C	0.0686	0.0313	0.0824	0.0022	0.0034
v_o	0.0313	0.2572	0.1044	0.0069	0.0019
V_o	0.0824	0.1044	0.2851	0.0069	0.0036
H	0.0022	0.0069	0.0069	0.0784	0.0082
r	0.0034	0.0019	0.0036	0.0082	0.0345
ST	0.1879	0.4017	0.4824	0.1026	0.0516
토석 포착률					
	C	v_o	V_o	H	r
C	0.0085	0.0021	0.1234	0.0004	0.0041
v_o	0.0021	0.0437	0.0355	0.0003	0.0025
V_o	0.1234	0.0355	0.6952	0.0101	0.0256
H	0.0004	0.0003	0.0101	0.0127	0.0054
r	0.0041	0.0025	0.0256	0.0054	0.0218
ST	0.1385	0.0840	0.8899	0.0289	0.0594

④ 결과 및 고찰

민감도 분석 결과는 표 3-8-1과 같이 나타남. 이때 ST는 영향인자의 총 영향력을 나타냄. 토석의 속도와 부피는 사방댐 성능을 결정하는 데 중요한 역할을 하지만 토석 농도는 이차적 효과만 내는 것으로 확인됨. 토석류의 초기부피는 토석 포착률 및 에너지 감소 효과에 모두 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 이는 사방댐에 쌓이는 토석의 양의 증가로 인한 병목 현상으로 인한 것으로 생각됨. 수로에서

슬릿 크기의 감소는 수로의 유효 폭의 감소로 인해 에너지 감소 및 토석 포착을 주로 촉진한다는 것이 밝혀짐. 그러나 사방댐의 높이의 경우 댐이 토석류 부피를 차단하기에 충분히 높을 경우 사방댐 높이는 그 이상의 효과가 없는 것으로 나타남. 이러한 차이는 이차 충돌이 발생한 것으로 추정됨. 토석류가 처음으로 벽의 바닥에 닿은 후 역류 영향이 발생하는데 이때 사방댐 하부의 형태가 중요하므로 슬릿 비율이 중요한 역할을 하게 되는 것임.

⑤ 최적의 슬릿형 사방댐 제안

민감도 분석결과를 토대로 사방댐 디자인 변경 시 벽의 높이를 변경시켰을 때의 효과보다 슬릿 크기를 변화시키는 효과가 더 크다는 것을 알 수 있음. 이는 벽의 하부 부분이 제공하는 넓은 면적이 사방댐 성능을 향상할 수 있음을 나타냄. 위의 결과를 바탕으로 그림 3-8-7과 같이 이중 사방댐 시스템을 제안하였음. 이중 사방댐의 경우 개방형 사방댐의 이점을 유지하면서 에너지 감소를 효과적으로 증가시킬 수 있는 것으로 나타냄.

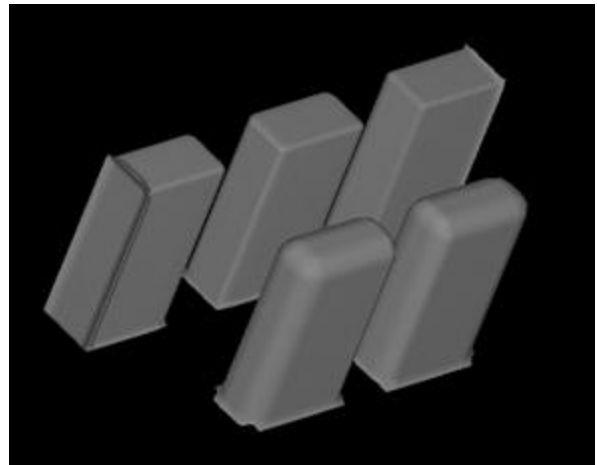
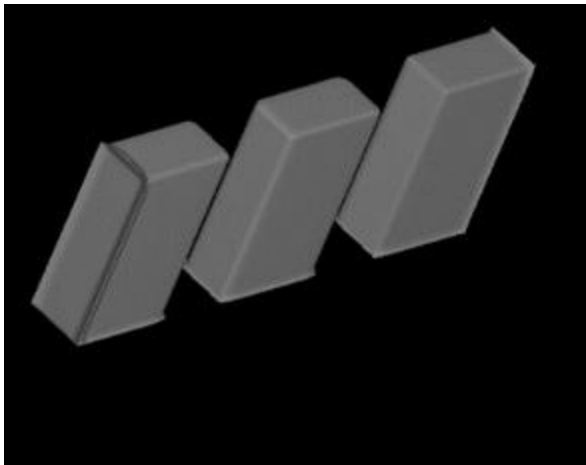


그림 3-8-7. 기존 단일 사방댐 및 이중 사방댐 시스템

○ 결과의 활용방안:

- 본 연구 결과를 통해 토석류의 에너지를 크게 줄이면서 지속 가능한 경제적인 방식의 사방댐 설계를 할 수 있음.
- 또한, 불필요한 사방댐 설계 또는 과대설계를 막게 되면서 효율적인 사방구조물 설계가 가능함.

3-9. 수치해석 기반의 폐쇄형 사방댐 위치별 성능분석

○ **목적 및 내용:** 본 연구에서는 SPH 기반의 토석류 흐름 예측 프로그램인 DAN3D를 이용하여 국내 산지에서 폐쇄형 사방댐의 배치 위치에 따른 토석류의 속도와 깊이 변화를 분석하였음. 사방댐을 설치한 경우 토석류는 충돌 직후 속도와 너비가 일시적으로 증가하나, 하류부에 도달하였을 때는 사방댐을 설치하지 않은 경우보다 속도와 깊이가 감소하는 경향을 보였음. 연구를 통해 도출된 결과는 사방댐 설계 및 현장적용을 위한 근본적인 자료로 사용될 것임.

○ 연구개발 방법 및 결과:

① 연구 대상 지역

본 연구에서는 신동아 아파트로 유입되는 토석류를 연구 대상으로 선택하였음(그림 3-9-1). 역해석으로 재현된 토석류를 reference case로 설정하여, 폐쇄형 사방댐 설치에 따른 토석류 흐름 특성 변화를 비교 분석 하였음.

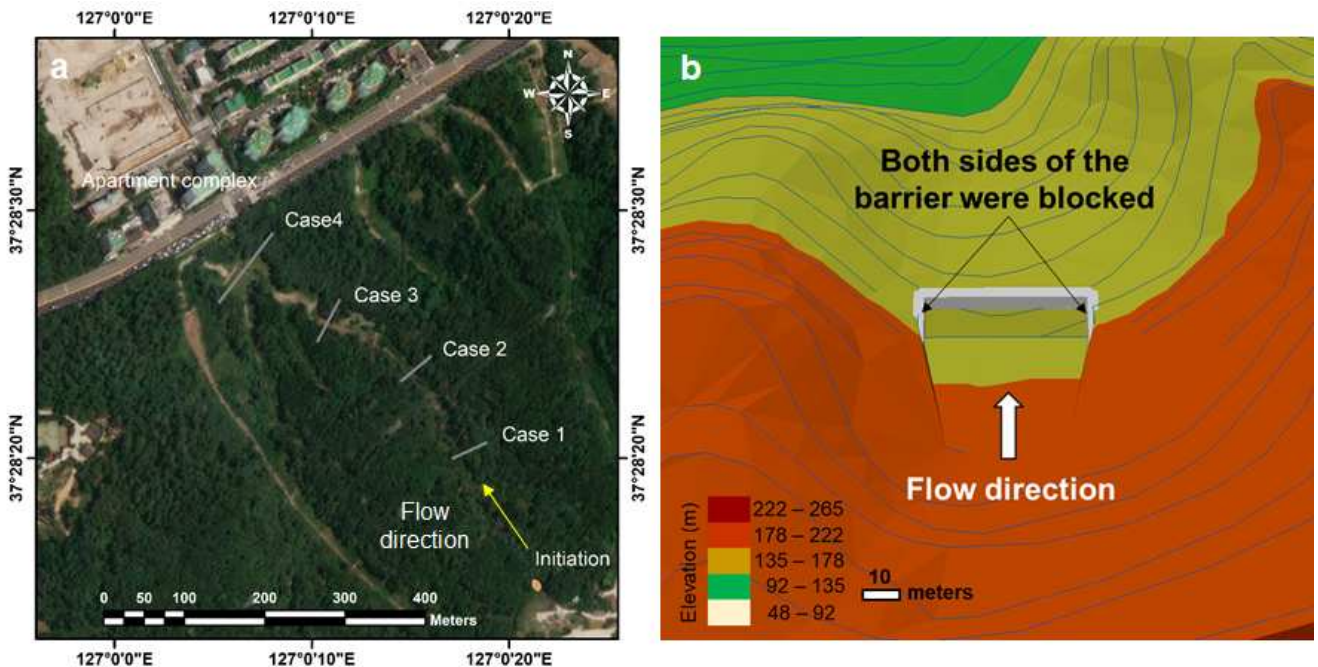


그림 3-9-1. (a) 우면산 신동아 유역 사방댐 설치 모습, (b) 제작된 폐쇄형 사방댐의 모습

② 사방댐 조건

폐쇄형 사방댐은 유역의 지형을 인위적으로 높여 생성하였고, 지형의 침식을 막기 위해 사방댐 본체 및 주변 지형은 침식이 일어나지 않도록 설정하였음. 사방댐은 토석류의 흐름 방향과 수직이 되도록 설치하였고, reference case에서 재현된 토석류를 기준으로 다음의 3가지 조건을 모두 만족하도록 설치하였음. 사방댐의 너비는 발생된 토석류의 선두 너비보다 1.5배 이상이어야 하고, 높이는 발생된 토석류의 높이보다 1.5배 이상이어야 하며, 유역 전체를 폐쇄시킬 수 있어야함. 불투과형 사방댐 설치 위치에 따른 토석류에 영향을 분석하기 위해 사방댐을 유역의 상, 중상, 중하, 하류에 각각 설치하였음.

토석류 초기 발생지역에서 하류부에 위치한 차도까지의 거리를 기준으로, 상부에서 차도까지 30%에 해당되는 곳을 상류, 50%에 해당되는 곳을 중상류, 70% 해당되는 지역을 중하류, 그리고 90% 해당되는 지역을 중하류로 설정하였음(그림 3-9-1).

③ 결과

그림 3-9-2에 나타난 것처럼, 사방댐을 상류에 설치할수록 토석류 저감 효과가 가장 큰 것으로 나타남. 하류부로 갈수록 유역 바닥에 위치한 유송잡물을 연행하는 현상이 발생되면서 토석류의 부피가 커지게 되어 사방댐 1개 만으로는 유하된 토석류를 모두 포착할 수 없었음. 이러한 결과로부터 정확한 토석류 발생 위치를 파악하여 발생 위치에 가깝게 사방댐을 설치하는 것이 유리하다는 결론을 얻음.

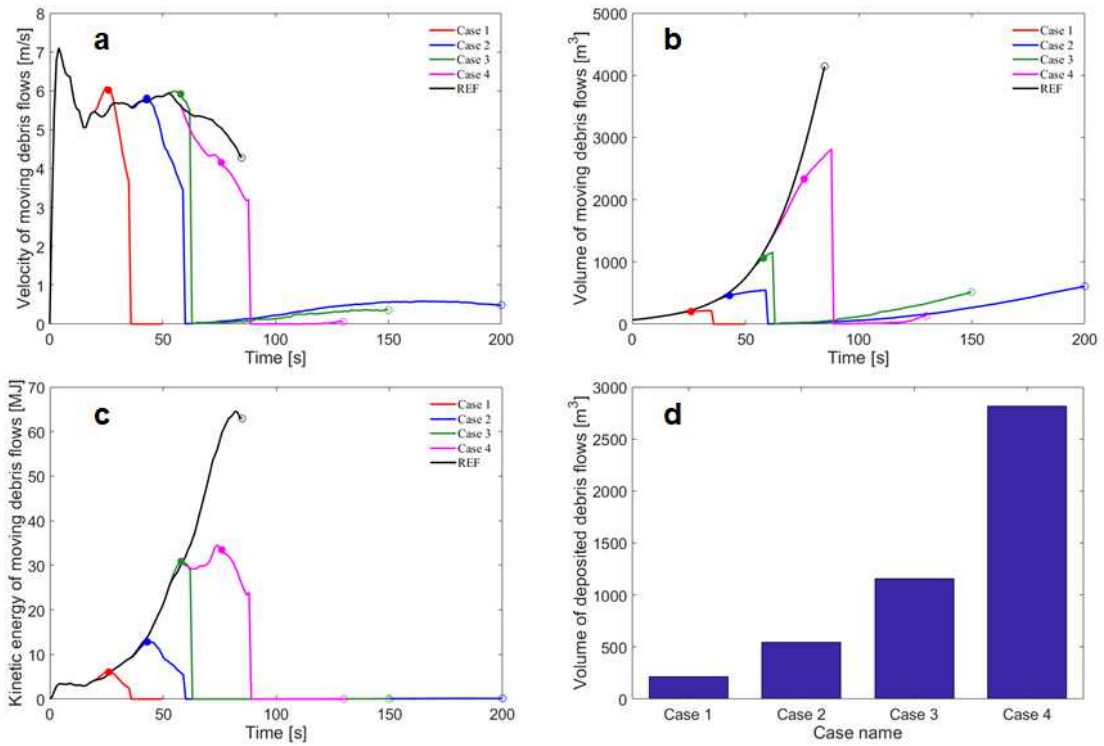


그림 3-9-2. 수치해석 결과: (a) 속도 변화, (b) 부피 변화, (c) 운동에너지 변화, (d) 퇴적량

○ 결과의 활용방안:

본 연구는 토석류 흐름 예측 프로그램인 DAN3D를 이용하여 국내 산지에서 사방댐의 배치에 따른 토석류의 속도와 부피 변화를 분석하였음. 본 연구를 통해 DAN3D가 토석류 이동뿐만 아니라, 사방댐 설치에 따른 토석류 변화 특성을 분석할 수 있기 때문에, 사방댐 설치 제원 및 위치를 여러 시도를 통해 개선한다면 사방댐 설계에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단됨.

- 본 연구 결과를 통해 현장 특성에 적합한 폐쇄형 사방댐의 위치 설계가 가능함.
- 또한, 불필요한 사방댐 설계 또는 과대설계를 막게 되면서 효율적인 사방구조물 설계가 가능함.
- 투과형 사방댐 또는 여러 개의 사방댐을 한 구역에 배치하여 토석류의 흐름 변화 분석에 대한 연구가 추가적으로 필요함.

3-10. 사방댐 설계 시뮬레이터 개발

○ **연구개발 목적 및 내용:** 사방댐이 없을 때와 사방댐 설치됨으로 인해서 변하는 토석류 거동특성들을 증강현실(AR - Augmented Reality)로 구현함. 구현된 증강현실을 안드로이드 버전 스마트폰 애플리케이션으로 만들어서 일반인과 학생들에게 교육적인 용도로 활용할 수 있도록 제작됨.

○ **본 연구에서 활용된 증강현실 (AR) 기술의 정의:** 증강현실(AR)의 정의는 실제 존재하는 환경에 가상의 사물(object)을 띄워서 마치 그 환경에 존재하는 사물처럼 보이도록 하는 기법임. 본 연구에서 토석류 거동특성을 보여주는 증강현실 애플리케이션은 AR 최첨단의 기술 중 하나인 markerless tracking 기술을 사용해서 제작됨. Markerless는 특정한 이미지나 정해진 위치 없이 object를 생성시킬 수 있음. 기계학습 기법으로 스마트폰 카메라에 비치는 평평한 면을 찾아서 object를 생성시킴. Tracking 기술은 생성된 object를 특정 위치에 고정하는 방법임. 이 markerless tracking 기술을 보편적으로 사용되는 스마트폰에 사용하도록 구현함. 본 연구에서는 현재 전 세계의 증강현실 기술 수준과 스마트폰 하드웨어의 한계점을 고려하여 미리 구축된 방대한 양의 토석류 거동 예측정보들이 요구되므로 이들 정보들이 확보된 지역을 시각화하기 위해 증강현실 기술을 적용하였고 이에 대해 설명하였음.

○ 연구개발 방법 및 결과:

① 토석류 거동특성 시나리오

2011에 우면산 신동아 지역에서 일어난 토석류 사례를 바탕으로 DAN3D를 사용해 토석류의 거동특성을 한 후, DAN3D의 결과를 유출해 증강현실로 구현함. 다음과 같은 토석류 시나리오를 해석해서 증강현실로 구현함 (그림 3-10-1):

1. 사방댐이 없는 토석류
2. 폐쇄형 사방댐을 토석류 시작점 근처에 설치됨
3. 슬릿형 사방댐을 토석류 시작점 근처에 설치됨
4. 슬릿형 사방댐을 토석류 시작점 근처에 설치하고 폐쇄형을 산지 밑쪽에 설치됨

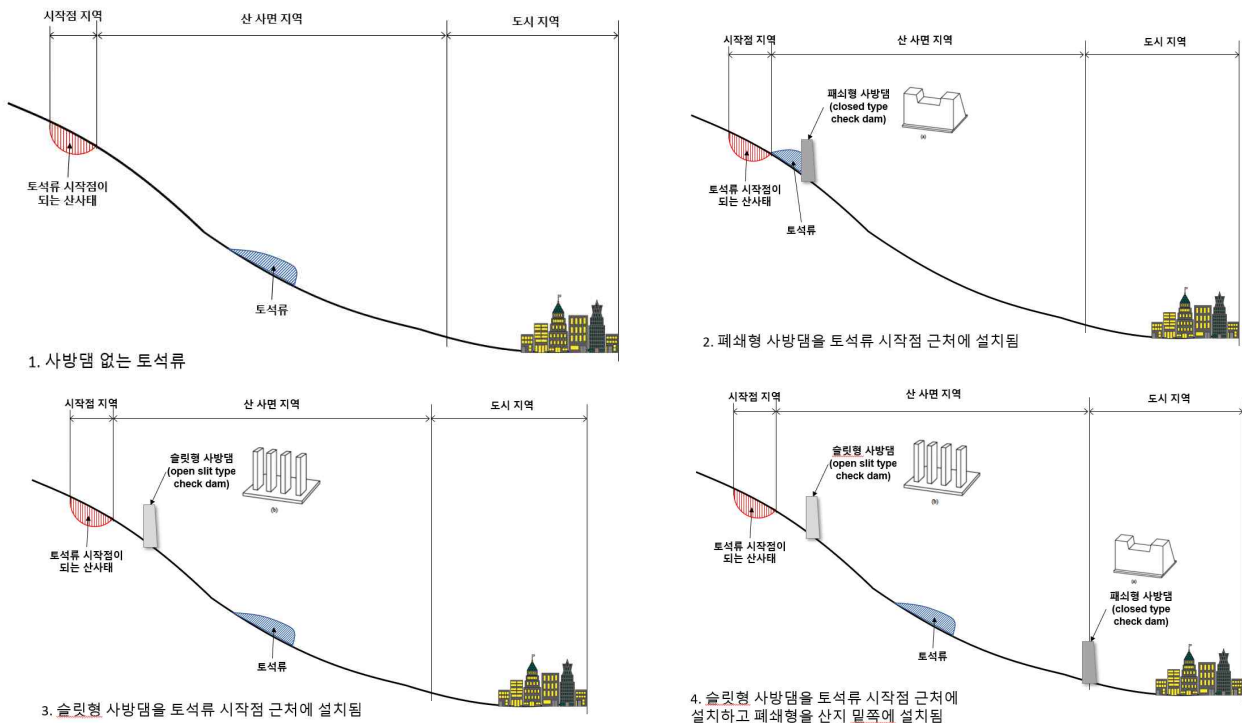


그림 3-10-1. 토석류 증강현실 시나리오 도형

② 토석류 증강현실 애플리케이션

위에서 제시된 토석류 거동특성 시나리오들을 스마트폰 애플리케이션으로 제작해서 각 시나리오에서 보여주는 토석류의 속도와 깊이의 변화들을 증강현실로 보여줌 (그림 3-10-2). 토석류 증강현실을 볼 때 더 자세한 관찰을 위해서 일시정지하는 기능과 함께 재생속도를 2배, 5배와 10배 속도로 재생하는 기능

도 애플리케이션에 추가됨 (그림 3-10-3). 실행 방법을 간단하게 그림 3-10-4에서 제시함.

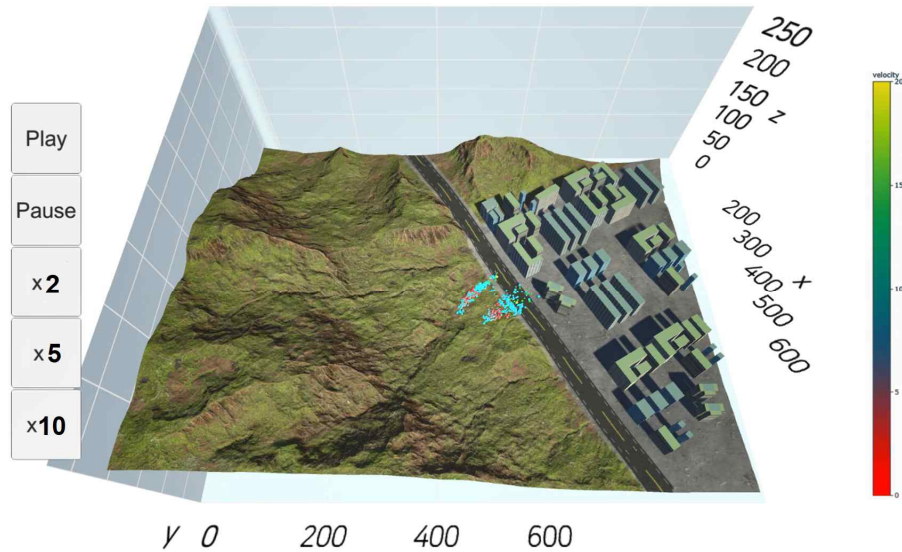


그림 3-10-2 토석류 속도의 변화를 보여주는 증강현실 애니메이션

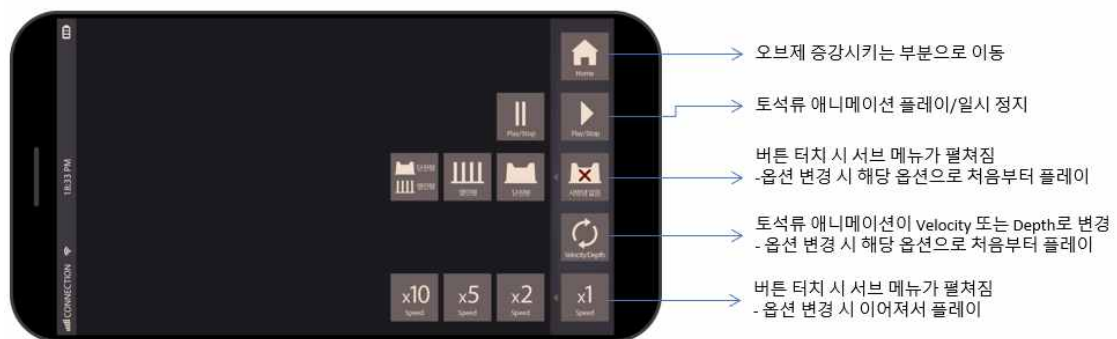
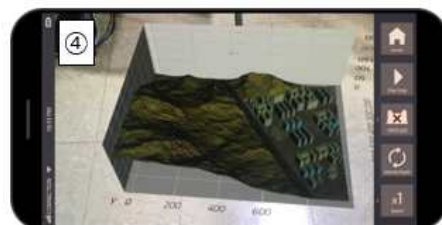
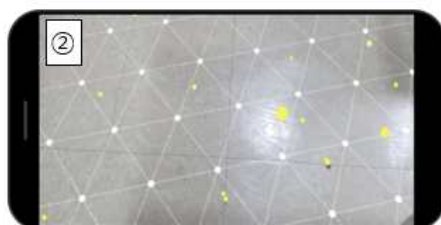
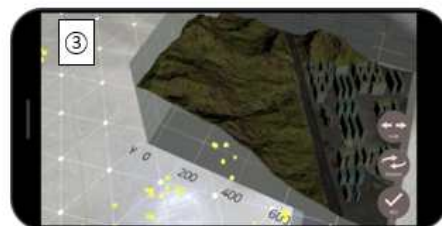


그림 3-10-3 토석류 증강현실 애플리케이션 기능

1. 토석류 AR 사용 가이드 페이지 노출 후 닫기 버튼을 누르면 다음으로 넘어간다

3. 우측 버튼을 눌러 증강된 오브제의 로테이션 및 스케일 조절을 한다



2. 바닥을 스캔 후 화면을 터치하여 오브제를 증강시킨다

4. 우측 UI가 나타나고 메뉴 선택에 따른 시뮬레이션을 확인한다

그림 3-10-4 토석류 증강현실 애플리케이션 사용방법

○ 결과의 활용방안:

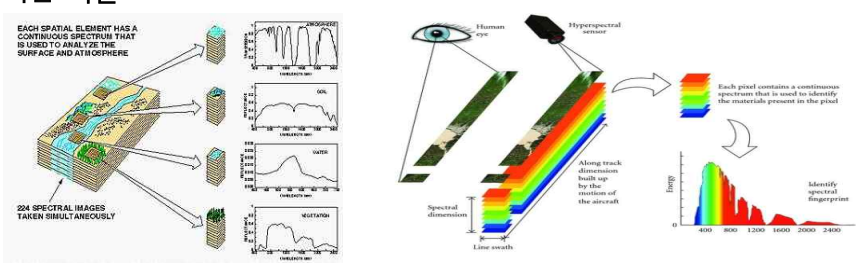
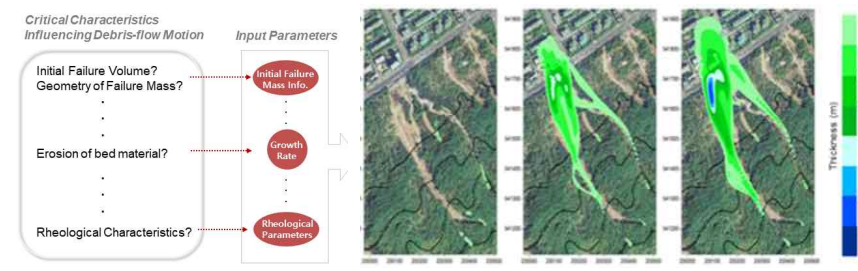
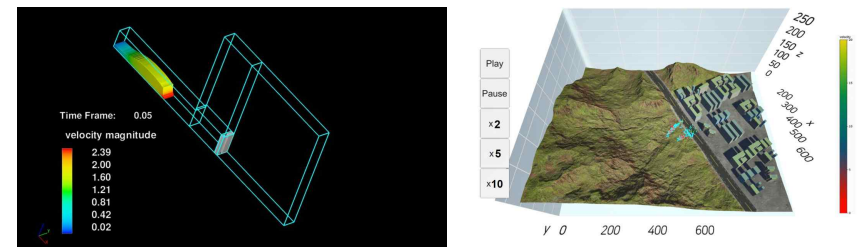
- 2011 우면산 토석류 사례의 거동특성 및 효과적인 사방댐 설치의 중요성을 보여줄 수 있음.
- 교육 및 홍보를 목적으로 활용할 수 있음.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 연구개발 성과

- 본 연구는 당초 핵심 연구목표로 계획된 ‘분광기법 기반의 체적함수비 추출 및 침투특성 평가기술 개발’, ‘기계학습 기반의 토석류 거동특성 예측 및 취약성 평가 기법개발’ 등의 연구개발 성과를 달성하기 위해 성실하게 연구를 완료하였음.

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	달성도
1	분광기법 기반의 체적함수비 추출 및 침투특성 평가기술 개발	물체로부터 반사 또는 방사되는 전자기파를 파장대별 분광정보를 통해 대상을 분류하는데 사용되는 다중분광 카메라를 이용하여 지반의 안정성 및 토석류 주요 영향인자 중 하나인 체적함수비 및 침투특성 정보를 획득하는 기술 	100% 기술개발
2	기계학습 기반의 토석류 거동특성 예측 및 취약성 평가기법 개발	복잡한 물리현상인 토석류에 대하여 입력(토석류 영향인자) 및 출력(토석류 초기유발, 유동특성 등) 데이터의 추적·학습을 통해 토석류 거동현상을 예측하고 지속적인 학습을 통한 정확도 업데이트가 가능한 기계학습 모델을 개발함. 본 모델을 통해 예측된 토석류 유동특성 정보를 연계하여 확산범위 내의 인적·물적 사회재산의 피해정도를 가늠할 수 있는 취약성 평가기법을 제시함 	100% 기술개발
3	증강현실 기반의 토석류 최적 방재시설 설계 시뮬레이터 개발	실제 지형을 대상으로 토석류 유동특성(최대 속도 및 규모 등) 정보가 예측되었을 때, 수치해석 모델링을 통해 도출된 최적의 사방성능을 갖는 설계조건을 제시하고 이를 3차원 영상으로 시각화해주는 프로그램 	100% 기술개발

나. 정량적 성과

○ 본 연구는 당초 계획된 정량적 성과를 달성하기 위해 성실하게 연구를 수행하였음.

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	1	분광기법 기반의 체적함수비 추출 및 침투특성 평가 기술 개발	1-1	분광기법을 적용한 지반 체적함수비 추출기술 개발	① 실험 및 지반 모니터링 데 이터와 비교 검증	1건	1건	학술 논문 투고를 통한 전문가 평가	논문 게재 여부	5	논문: <u>1 건</u>
			1-2	분광기법 기반의 지반 침투특성 역해석 기술 개발	① 실험 데이터 와 비교검증	1건	1건	학술 논문 투고를 통한 전문가 평가	논문 게재 여부	15	특허: <u>출원 1 건</u> 논문: <u>1 건</u>
					② 추출된 침투 특성 데이터 의 활용성	1건	1건	특허 출원	특허 출원 여부	5	
	2	기계학습 기반의 토석류 거동특성 예측 및 취약성 평가 기법 개발	2-1	토석류 초기유발 및 유동성 영향인자 예측 기계학습 모델 개발	① 학습 데이터의 정확성	100%	100%	보고서	보고서 확인	5	논문: <u>1 건</u>
				② 과거 토석류 발 생현장 적용을 통한 검증	1건	1건	학술 논문 투고를 통한 전문가 평가	논문 게재 여부	10		
			2-2	취약성 평가를 통한 방재시설 최적위치 결정기법 개발	① 취약성 평가 결 과를 바탕으로 한 토석류 위험 지역 선정	100%	100%	보고서	보고서 확인	5	논문: <u>1 건</u>
					② 취약성 평가 결과 를 바탕으로 한 방재시설 설치 우선유역 선정	1건	1건	학술 논문 투고를 통한 전문가 평가	논문 게재 여부	15	
	3	증강현실 기반의 토석류 최적 방재시설 설계 시뮬레이터 개발	3-1	수치해석 매개변수 연구를 통한 최적 방재시설 설계 기준 도출	① 방재시설 설계 조건-토석류 에 너지 저감율/토사 포착율 관계 규명	1건	1건	특허 등록	특허 등록 여부	15	특허: <u>등록 1 건</u> 논문: <u>1 건</u>
					② 지반조건-토석 류 유동특성 상 관성 분석	1건	1건	학술 논문 투고를 통한 전문가 평가	논문 게재 여부	5	
			3-2	축소 모형실험을 통한 최적 방재시설 설계기준의 검증	① 수치해석 모델링 결과와의 비교	1건	1건	학술 논문 투고를 통한 전문가 평가	논문 게재 여부	10	논문: <u>1 건</u>
					② Testbed 최적 방재시설 설계 조건 도출	100%	100%	보고서	보고서 확인	5	
			3-3	증강현실 기반의 시뮬레이터 개발	① 최적 방재시설 설계 기준 시각화 프로그램 개발	S/W 개발	개발 여부	S/W 정상 작동 여부	S/W 정상 작동 확인	5	SW: <u>1 건</u>
계									100	특허: <u>출원 1 건</u> <u>등록 1 건</u> 논문: <u>6 건</u> SW: <u>1 건</u>	

- 특히, SCI(E)급 학술지 게재 4편(중복 4편), 국내 학술지 게재 3편(중복 2편, 단독 1편), 특허출원 및 등록 1건, 소프트웨어 저작권 등록 1건의 성과를 달성하였음. 그리고, SCI급 학술지 4편을 제출하였기 때문에 내년 상반기 내로 계획된 성과목표의 달성이 가능할 것으로 판단됨

성과지표	성과 목표	성과달성	달성도
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	4건	2건	50%
일반학술지게재(1점)	2건	2건	100%
특허출원(1점)	1건	1건	100%
특허등록(2점)	1건	1건	100%
소프트웨어(1점)	1건	1건	100%
소계(점수)	14점	10점	

2. 관련 분야 기여도

- 본 과제는 토석류 방재시설 설계에 있어, 차세대 주요기술 적용을 통해 토석류 거동특성을 효과적으로 예측 및 고려함으로써 합리적이고 효율적인 방재시설 설계기술 개발을 목표로 함. 기존의 방재시설 설계 체계에서의 기술적·이론적 한계를 해소할 수 있다는 점에서 혁신적이고 창의적인 연구라고 할 수 있으며, 방재사업 관련 내수 시장의 활성화 및 국제경쟁력 강화가 기대됨.
- 본 연구를 통하여, **토석류 재난관리 대책에 대한 패러다임**을 ‘사후 복구 및 대책’에서 ‘**사전대비(선제적 대응)**’로 전환하는 과학기술을 제공할 것으로 판단됨.

기술적 측면	1. 데이터 획득방법 대안제시: 분광기술 기반의 토석류 설계인자 및 지반정보 데이터 획득방법의 획기적 대안 제시가 가능함 2. 토석류 거동특성 예측 및 취약성 평가기법 개발: 복잡한 토석류 거동현상의 예측에 최적화된 빅데이터 분석 모델 개발을 통해 토석류 위험지역의 효율적 관리가 가능 3. 방재시설 설계 가이드라인 수립: 사방시설물 설계 매개변수 연구를 통해 가장 최적의 매개변수 조합을 도출함으로써, 과학적으로 검증된 최적의 설계조건 도출 방법론을 제시할 수 있을 것으로 기대
경제·산업적 측면	1. 방재구조물 건설기술의 경쟁력 향상: 뚜렷한 설계기준의 부족으로 인해 과대설계 또는 비효율적인 설치 위치선정 등의 문제점들이 있었던 기존의 토석류 대응 구조물들과는 달리, 본 과제의 연구수행을 통해 과학적으로 검증된 방재구조물 설계조건 도출 방법론을 제시 2. 강우로 인한 토석류 재난관리가 시급한 국가들을 대상으로 기술 수출이 가능: 우리나라의 토석류 발생 메커니즘과 비슷한 지역의 재난관리 시 필요로 하는 요소기술 또는 전체 시스템의 수출이 가능함 3. 효율적·경제적이고 신뢰성 높은 재난관리 체계구축: 재해 분야의 특성상 개발된 기술의 사업화는 정부나 지자체 등의 차원에서 진행되므로, 정부 부처와의 긴밀한 협의를 거쳐 재난관리 체계구축을 위한 기술이전이 실시될 것임
사회적 측면	1. 토석류 피해예방을 위한 정책 수립에 활용 가능: 산지의 효율적인 개발을 유도하고, 지자체, 산림청, 도로공사, 행정안전부 등에서 향후 토석류 피해 예방을 위한 정책수립에 적극 활용될 수 있는 기반기술을 확보하는데 기여 2. 국가적 차원의 자연재해 피해 저감: 체계적이고 발전된 토석류 방재체계 수립 시 정부 재난관리 소관 부처, 사방사업 및 산림관리 부처 등과 직접적인 연계가 가능하며 토석류 예측 및 대응 시스템의 확립 및 운영은 각종 공공시설을 비롯한 사회재산 등의 물적 피해를 저감시킬 뿐만 아니라, 주민(국민)의 안전 및 복지를 효과적으로 향상시킬 수 있을 것으로 예상됨 3. 4차산업의 전문연구인력 양성: 빅데이터 기반 머신/딥러닝 기법으로 예측된 토석류 거동특성을 이용하여 이에 대한 파급효과 및 취약성 평가(인명·재산 피해, 재해 복구에 소요되는 시간과 비용 등) 연구에 대한 전문 연구인력 양성 기대

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 최종목표의 국가적 활용방안

- 기후변화로 인해 극한기후(강우) 현상의 심화와 함께 최근 국내 토석류 재해가 빈발화·대형화되고 있으나, 시공간적으로 변수가 다양한 환경에서 복잡한 토석류 현상을 예측하고 대응하기 위한 기술들의 정확성 및 효율성에 한계가 있는 현시점.
- 고도화된 데이터 분석기술 및 분광 카메라기술을 적용한 토석류 선제 대응기술에 대한 본 창의도전 연구는 향후 사회적 시급성 및 필요성 측면에서 활용성이 매우 높을 것으로 판단됨.
- 산지의 효율적인 개발을 유도하고 행정안전부, 각 지자체의 재난관련 부서 공무원들에게 향후 토석류 피해예방에 대한 정책수립에 적극 활용될 수 있는 기반기술 확보에 기여.
- 본 연구성과 기술적용 대상 지역을 단계적으로 확대해나감으로써, 광역지역 단위의 나아가 전국지역 단위의 고도화된 토석류 위험지역 관리 및 방재체계 수립이 가능함.
- AR 시각화 기술을 통해 지역사회가 재난 안전관리의 과정(위험도 예측, 사고 모니터링, 사고 예방을 위한 의식 전환, 현장 대응 및 복구, 학습을 통한 적응)에 직접 참여하고 관련 산업의 발굴 및 육성할 수 있도록 기여.



💡 토석류 방재시설 설계기술 개발을 통해 선제적 재난대응관리 체계 확립

그림 5-1. 연구개발 성과의 국가적 활용 가능성

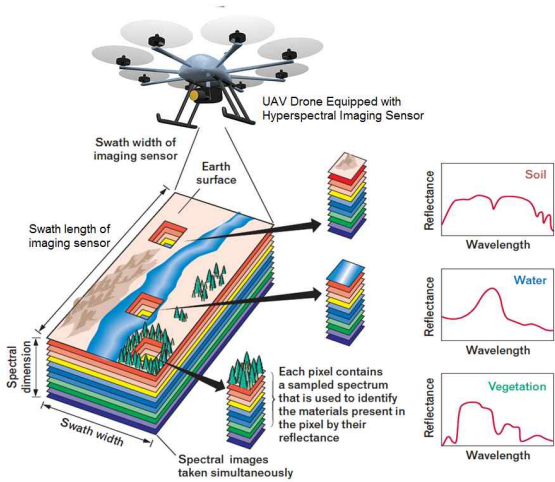
- 향후 응용 및 실용화 연구가 진행되는 경우, 최종적인 기술 수요처인 정부 및 지자체의 재난관리 부처, 사방 사업 및 산림관리 부처, 그리고 국내외 사방시설 시공업체 등에서의 기술 도입 기대.



그림 5-2. 최종성과물의 활용 가능 기관

2. 추가 연구의 필요성

- 본 과제에서는 합리적이고 효율적인 토석류 방재시설 설계기술 개발을 수행하였음. 하지만, 본 연구 과제를 통해 개발된 기계학습 모델들은 데이터의 개수가 많을수록 성능이 높은 모델 개발이 가능하므로 지속적인 데이터베이스 구축이 필수적으로 요구되며, 본 연구에서 개발된 인공지능망 모델 외에 다양한 기계학습 모델(서포트 벡터 머신, 로지스틱 회귀분석, 의사결정 나무 등)을 개발하여 각 모델의 성능을 서로 비교검증 하여 높은 성능의 모델 개발을 위한 후속연구가 필요함.
- 또한, 본 연구에서 시도되었던 분광기법 기반의 체적함수비 추출 기술은 연구실 기반의 데이터 획득 방법으로 향후 UAV(드론)을 활용하여 실제 현장 적용을 위한 효율적인 스캐닝 방법과 고도화된 정보습득 기술 및 분석기술에 대한 후속연구가 필요함.



(a) UAV-분광카메라 연계 계략도 (출처: muonray)



(b) UAV-분광카메라 현장적용 계략도 (출처: TP Regeneration)

그림 5-3. UAV-분광카메라를 활용한 지반/함수비/식생 특성분석 연구

- 본 연구의 범위는 방재시설 설계까지 한정되어 있음. 하지만, 향후 방재구조물의 유지관리를 위한 연구 개발의 연계과정을 통해 보다 효과적이고 실용성있는 설계 및 유지관리 시스템으로의 개발이 가능함.
- 본 연구에서는 Testbed인 우면산을 대상으로 요소기술 개발이 이루어졌음. 이를 위해 머신러닝, 수치해석, 실내시험, 증강현실 등 여러 가지 방법론들을 활용하여 요소기술들을 개발 하였음. 개발된 요소기술들의 원활한 현장 적용을 위해서는 다른 지역에서의 보다 많은 데이터 베이스 구축을 통한 요소기술들의 정확도 향상을 필요로하며, 연구 대상지역의 확대를 통해 실·검증을 위한 후속 연계가 필수적으로 동반되어야 함.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

○ 분광기술 관련 해외 연구사례

- 분광기술을 활용한 농작물 분류 및 구분: 원격탐사 기술 및 분광기술과 결합하여, 한눈에 모든 농작의 작물상태 확인 및 객관적인 수확량을 예측에 활용됨

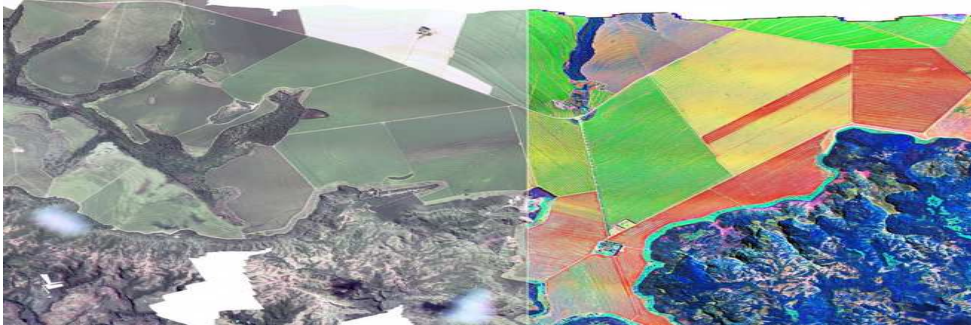


그림 6-1. 분광카메라를 활용한 농작물 분류 및 구분 연구사례 (출처: GAMAYA)

- 광물 탐사: 미확인 암석표면에 대한 분광 정보를 획득한 경우, 구축된 스펙트럼 database에서 동일 또는 유사한 스펙트럼을 가지는 광물을 찾아 그 종류를 판별할 수 있음

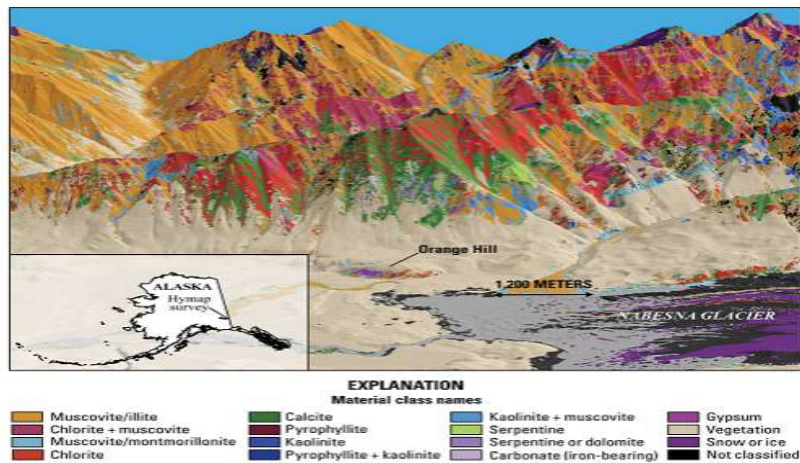


그림 6-2. 분광카메라를 활용한 광물탐사 연구사례 (출처: USGS)

○ 국가별 재해평가시스템의 특징 및 장단점 분석 (토석류 외 복합재난 포함)

	HAZUS-MH - 연방재난관리청 복수재난(홍수, 지진, 허리케인 등) 리스크 평가에 폭넓게 활용 - 위험도 데이터, 피해 및 경제적 손실 분석 결과 등을 지도화하여 GIS 상에서 표출. 위험도 및 취약성 시각적 표출 - 처리 알고리즘들과 데이터셋에서 많은 가정들과 일반화 내재
	CAPRA - 지진, 쓰나미, 사이클론, 홍수, 산사태 및 화산 등을 대상으로 하며 위험도 모듈, 노출도 모듈, 물리적 취약성 모듈, 손실 모듈로 구성 - 사망률 및 경제적 함수들의 다양성 부족 - 미국 환경 조건에 적합하게 역해석됨
	RADIUS - 시나리오 지진으로 인한 손실을 추정하며, 각 매쉬 별로 속성정보 할당 - MS-Excel 소프트웨어 기반 리스크 평가 툴(GIS 형태 아님) - 대략적인 손실 정도를 추정하며, 결과가 적절히 표출되지 않음
	HSE Map - 산업안전보건청 위험정보제공시스템 - 위험시설 화재, 폭발 또는 독성물질누출 사고 시 피해범위와 복합재난 리스크 사전예측 및 조치
	스마트 방재시티 - 새로운 공간정보 모델과 IT 기술을 접목한 복합재난 관리 추진 - 시작단계로 복합재난 관리 및 평가에 필요한 개별 요소기술 부족




○ 사방댐 관련 해외 연구사례

- 폐쇄형 사방댐 디자인: 토석류의 충격으로 인한 over-spilling으로, 즉 사방댐을 부딪쳤을 때 튀어 올라서 토석류가 넘쳐 흐르는 현상, 인해 고려해야 하는 토석류의 높이를 계산하는 방법 고안함 (그림 6-3). 또한, 이 over-spilling으로 인한 토석류 피해를 절감하기 위해서 고안된 닫힌형 사방댐 디자인이 개발됨 (그림 6-4).

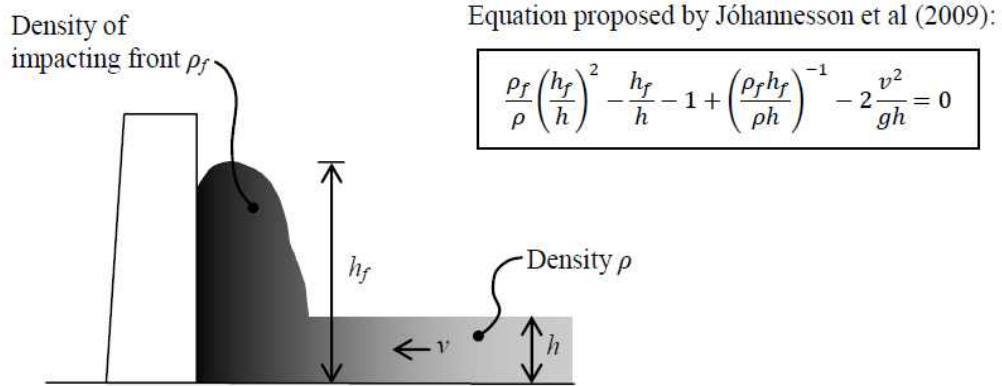
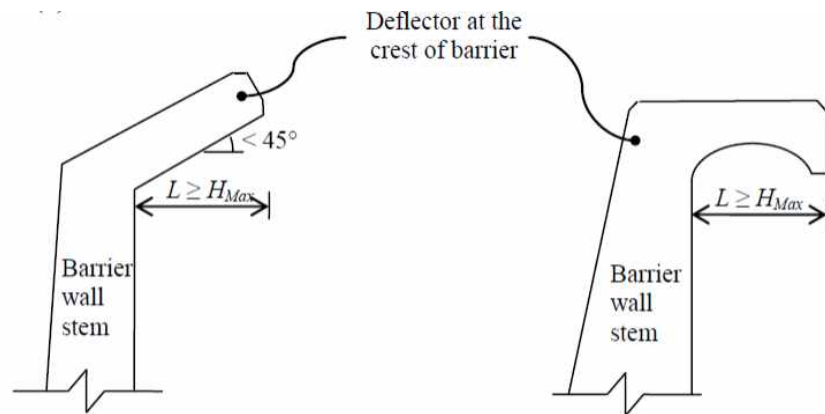


그림 6-3. 토석류 over-spilling 높이 계산 (출처: Geo Report No. 270)



H_{Max} = Maximum debris thickness at the barrier location calculated by debris mobility analysis

그림 6-4. 토석류 over-spilling를 막기 위한 닫힌형 사방댐 디자인 (출처: Geo Report No. 270)

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	○ 본 연구과제는 국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제24조의 4에 언급한 보안과제에 해당하는 사항이 없으므로 보안등급을 일반으로 선정	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
한국과학기술원	FREDLUND SOIL WATER CHARACTERISTICS CELL	FREDLUND SOIL WATER CHARACTERISTICS CELL	1	2006.02.20	14345.759	Geotechnical Consulting & Testing System	한국과학기술원 W1-2 1220	NFEC-2008- 06-059425

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 연구실 안전점검 확보 계획

- 연구실에서는 안전 확보를 위해 화학 약품 등 안전에 위험을 줄 수 있는 물품 및 장비에 대해서 위험 스티커를 부착하고 있음
- 실험 장비를 사용 시 반드시 2명 이상의 연구원이 참여하여 실험을 수행하고 관련 장비는 주기적으로 점검을 수행함
- 실험실 내 화재 발생 및 부상등에 대비해서 실험실에 소화기를 비치하여 주기적으로 교환하고 있으며, 상비약을 비축하고 있음
- 상기 사항은 일상점검(‘안전점검기록부’의 체크리스트 항목에 따른 육안 점검), 정기점검(안전팀 안전관리자에 의한 연 1회 순회 점검) 및 정밀 안전진단(‘연안법 규정 총족 전문가 및 전문기관’에서 연 1회 실시)을 통해 주기적으로 연구실 안전 확보를 하고 있음

○ 참여 연구원의 교육훈련

- 실험실의 다양한 분야를 보다 정확하고 전문적인 사항을 알리기 위해 각 분야별 외부전문가를 초빙하여 실험실 정기 안전교육, 응급처치교육, 소방안전교육을 아래와 같이 실시하고 있음

구 분	대 상	교육방법	교육주기
신입생/신규채용자 교육	신입생/신규채용자	집합교육	봄,가을학기/신규채용시
정기안전교육	연구활동종사자	집합교육	월1회~2회
응급처치교육	연구활동종사자	집합교육	상, 하반기(2회)
온라인안전인증평가	연구활동종사자	온라인교육	반기 1회(2,9월)
온라인안전교육	연구활동종사자	온라인교육	매월 1회

- 연구활동종사자들의 시간적, 공간적인 제약을 극복하기 위해 인터넷을 활용하여 분야별 안전교육 자료를 제공하고 있으며, 관련 안전교육 자료는 연구·실험실에서 사용하고 있는 화학약품, 가스, 기계 및 기구, 레이저 등에 대한 자료뿐만 아니라 소방, 생물학적 안전에 대한 실험실 안전에 대한 전반적인 내용을 제공하고 있음

○ 참여 연구원 건강검진 및 보험가입

- 본 연구기관에서는 아래와 같이 참여 연구원의 건강에 대한 예방 및 보험 프로그램을 제공하고 있으며, 본 연구개발에 모든 참여연구원이 보험 프로그램을 가입

구분	보장범위	보상내용	보험료 재원	대 상	주관부서
연구활동종사자 상해보험	실험실 사고	사망, 후유장해 최대 1억원 상해치료비 최대 1천만원	KAIST 전액 부담	학사과정 학생 전체 과학기술분야 석, 박사 과정 학생	안전팀
학교경영자책임 배상보험	교내 발생사고	사망, 후유장해 최대 5억원 상해치료비 최대 500만원	KAIST 전액 부담	전 학생	학생 복지팀
단체상해보험	교내·외 발생사고	사망, 후유장해 최대 2억원 상해치료비 최대 1천만원	개인 부담	개별 가입자	학생 복지팀
재산종합보험	교내 발생사고	대물 일괄 : 무한/사고당	KAIST 전액 부담	교내 전 시설	재무팀

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허	체적함수비 별 반사율 측정을 위한 SWCC-초분광 캠프 테스트	한국과 학기술 원	발명 자	대한민국	-	2018.10.24. (출원) 2019.10.23. (등록)	단독 출원 및 등록	출원 및 등록 완료
2	논문	Development of a Regional-Scale Landslide Early Warning System Applying Statistical and Physically based Approaches in Sequence	한국과 학기술 원	저자	Engineerin g Geology	3.909	2019.6.9	중복 사사	SCI
3	논문	Characteristics of Water Suction for a Korean Compacted Bentonite	한국과 학기술 원	저자	Nuclear Technolog y	0.953	2019.4.9	중복 사사	SCI
4	논문	A multi-objective optimization of initial conditions in a radioactive waste repository by numerical thermo-hydro-mechanical modeling	한국과 학기술 원	저자	Computer s and Geotechni cs	3.345	2019.5.22	중복 사사	SCI
5	논문	Hazard Assessment Based on the Combination of DAN3D and Machine Learning Method for Planning Closed-Type Barriers against Debris-Flow	한국과 학기술 원	저자	Water	2.524	2020.1.7	중복 사사	SCI
6	논문	Sensitivity analysis of influencing parameters on slit-type barrier performance against debris flow using 3D-based numerical approach	한국과 학기술 원	저자	Internation al journal of sediment research	1.970	under review	중복 사사	SCI
7	논문	Assessment of barrier location effect on debris flow based on smoothed particle hydrodynamics (SPH) simulation on 3D terrains	한국과 학기술 원	저자	Landslides	4.252	under review	중복 사사	SCI
8	논문	Shallow Landslide Susceptibility Models Based on Artificial Neural Networks Considering Filter Methods and Various Activation Functions	한국과 학기술 원	저자	Remote Sensing	4.118	under review	중복 사사	SCI
9	논문	Soil Water Content Regression Analysis of Measurement Data from Hyperspectral Camera in Weathered Granite Soils	한국과 학기술 원	저자	Remote Sensing	4.118	under review	단독 사사	SCI

10	논문	국내 벤토나이트 완충재의 함수특성곡선 평가	한국과 학기술 원	저자	방사성폐기 물학회	0.36	2019.1.21	중복 사사	KCI
11	논문	DAN3D 모형을 이용한 우면산 토석류 거동 수치모의	한국과 학기술 원	저자	한국방재학 회	0.47	2019.6.30	중복 사사	KCI
12	논문	초분광 근적외선 영상 기술을 이용한 흙의 함수비 측정 기술	한국과 학기술 원	저자	지반공학회	0.47	2019.12.6	단독 사사	KCI
13	논문	Estimation of debris-flow volumes by an artificial neural network model	한국과 학기술 원	저자	7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation	-	2019.6.	중복 사사	비SCI
14	논문	A study of the combination of risk analysis with a citywide landslide early warning system	한국과 학기술 원	저자	Risk Analysis XI	-	2018.9.	중복 사사	비SCI
15	소프트 웨어	토석류 AR 시각화 프로그램	한국과 학기술 원	저작 권자	한국저작권 위원회	-	2019.11	단독 저작권	-

제11장. 기타 사항

해당사항 없음

제12장. 참고 문헌

- 김창한 (1996) 식품분석, 고문사
- 김창성, 김용휘, 최선규, 고광범, 한경수 (2017) 단파장 적외선 분광분석법을 이용한 광물동정과 현장적용성, 대한자원환경지질학회, 50(1), 1-14.
- 권태혁, 박태형, 노동화, 이소정, 함수민, 최선규, 이기준, 김용민, 김경영, 차별님 (2015) (2세부)가변형 투과형 토사재해 방어시스템 개발, 국토교통기술연구개발사업, 연차(단계)실적·계획보고서
- 이성진, 김윤기, 이해지, 이승래 (2004) 국내 풍화토의 함수특성 곡선 및 불포화 투수계수 추정에 관한 연구, 한국 지반공학회, 2004, 334-341
- 우보명 (1983) 사방공학, 향문사
- 사방기술교본 (2014) 산림청
- 산악지 도로 설계 매뉴얼 (2007) 국토교통부
- 하천사방시설 설계기준 (KDS 51 50 40)
- Brayshaw, D. and Hassan, M.A. (2009) Debris flow initiation and sediment recharge in gullies, *Geomorphology*, 109, pp. 122-131.
- Chang, C.W., Lin, P.S., Tsai, C.L. (2011) Estimation of sediment volume of debris flow caused by extreme rainfall in Taiwan, *Engineering Geology*, 123, pp.83-90.
- Chein-I Chang (2003) Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification. *Springer Science & Business Media*.
- Clevers, J., Kooistra, L., Schaepman, M. (2010). Estimation canopy water content using hyperspectral remote sensing data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. pp.119-125
- Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994) Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal*, 31(4), pp.521-532.
- Hungr, O. and McDougall, S. (2009). "Two numerical models for landslide dynamic analysis" , *Computers & Geosciences*, 35, 978-992.
- Johnson, P. A., & McCuen, R. H. (1989). Slit dam design for debris flow mitigation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(9), 1293-1298. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1989\)115:9\(1293\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:9(1293))
- Kang, H. S., and Kim, Y. T. (2014). Physical vulnerability function of buildings impacted by debris flow. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 14(5), 133-143.
- Kang, S., Lee, S.R., Nikhil N.V, Park, J.Y., Lee, D.H. (2017) Development of an initiation criterion for debris flows based on local topographic properties and applicability assessment at a regional scale, *Engineering Geology* 230(29), pp.64-76.
- Kang, S., Lee, S.R., Nikhil N.V, Park, J.Y. (2015) Analysis of Differences in Geomorphological Characteristics on Initiation of Landslides and Debris flows, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 15(20), pp.249-258.
- Kim, K. and Hwang, K. (2012), "A Study on the Demand Forecasting and Efficient Operation of Jeju National Airport using seasonal ARIMA model", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol 13(8), pp. 3381-3388.
- Korean Society of Civil Engineers (2012). Research contract report: Addition and complement causes survey and restoration work of Mt. Umyeon landslide. (in Korean).
- Kwan, J.S.H. (2012) Supplementary Technical Guidance on Design of Rigid Debris-resisting Barrier, *Geo Report No. 270*, pp. 88.
- Lorente, A., Garcia-Ruiz, J.M., Begueria, S., and Arnaez, J. (2002) Factors Explaining the Spatial Distribution of Hillslope Debris Flows, *Mountain Research and Development*, 22(1), pp. 32-39.
- Marchi and D'Agostino (2004) Estimation of debris-flow magnitude in the eastern Italian Alps Earth, *Surf. Process. Landforms.*, 29, pp.207-220.
- McDougall, S. (2006). A new continuum dynamic model for the analysis of extremely rapid landslide motion across complex 3D terrain (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- McDougall, S., and Hungr, O. (2004) A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain, *Canadian Geotechnical Journal*, 41(6): 1084-1097, <https://doi.org/10.1139/t04-052>

- Mizuyama, T. (2008) Structural Countermeasures for Debris Flow Disasters, *International Journal of Erosion Control Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 38
- Moore, I.D. and Wilson, J.P. (1992) Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: simplified method of estimation, *Journal of Soil and Water Conservation*, 47, pp.423-428.
- O
- Osanai, N., Shimizu, T., Kuramoto, K. et al. Landslides (2010) Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network, 7: 325. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0229-5>
- Saito, H., Nakayama, D., and Matsuyama, H. (2010) Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity duration thresholds in Japan. *Geomorphology*, 118, pp.167-175.
- Suda, J., Hübl, J., and Bergmeister, K. (2010). "Design and construction of high stressed concrete structures as protection works for torrent control in the Austrian Alps." Proc., 3rd Int. Fib Congress, Precast Prestressed Concrete Institute (PCI), Chicago, 1-12.
- Takahashi, T. (1981) Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: Soft countermeasures for a disaster, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol. 3, No. 1, pp. 57-89
- Takahashi, T., Dilip K. Das (2014), Debris Flow Mechanics, Prediction and Countermeasures, 2nd edition, *CRC Press*, DOI: <https://doi.org/10.1201/b16647>, 572 pages.
- Remon, A., Sanchez, S., Bernabe, S., and Plaza, A. (2013) Performance versus energy consumption of hyperspectral unmixing algorithms on multi-core platforms, *Journal on Advances in Signal Processing*, pp. 12-27
- Rickenmann, D. and Zimmermann, M. (1993) The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis, *Geomorphology*, 8(2-3), pp. 175-189.
- Riley, S.J., DeGloria, S.D., and Elliot, R. (1999) A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity, *Intermountain Journal of Sciences*, 5(1-4), pp.23-27
- Rudolf-Miklau, F., and Suda, J. (2013). "Design criteria for torrential barriers." Dating torrential processes on fans and cones, M.Schneuwly-Bollschweiler, M.Stoffel, and F.Rudolf-Miklau, eds., Springer, Netherlands, 375-389.
- Van Genuchten, M. T. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Watanabe M, Mizuyama T, Uehara S (1980) Review of debris flow countermeasure facilities. *J Jpn Erosion Control Eng Soc* 115:40-45
- Wenbing H, Guoqiang O (2006) Efficiency of slit dam prevention against non-viscous debris flow. *Wuhan Univ J Nat Sci* 11:865-869. doi: 10.1007/BF02830178
- Wilson, J.P. and Gallant, J.C. (2000) Digital terrain analysis, In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain Analysis*, John Wiley & Sons, New York, 1-27.
- Zanchetta, G., Sulpizio, R., Pareschi, M.T., Leoni, F.M., and Santacroce, R. (2004) Characteristics of May 5-6, 1998 Volcaniclastic Debris-flows in the Sarno Area of Campania, Southern Italy: Relationships to Structural Damage and Hazard Zonation. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 133, pp. 377-393.
- Zollinger F (1985) Debris detention basins in the European Alps. International symposium on erosion, debris flow and disaster prevention, Tsukuba, Japan, pp 433-438.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.