

20CTAP-C
141846-03

복합재해발생
예상 시
지자체
도로관리
담당자가
재해취약지역
을 분석 및
대응할 수
있는
레질리언스
기반 원샷
소프트웨어
개발
최
종
보
고
서

2021

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

국
토
교
통
부

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

국토교통기술촉진연구 사업 제3차 연도 최종 보고서

R&D / 20CTAP-C141846-03

복합재해발생 예상 시 지자체 도로관리 담당자가 재해취약지역을 분석 및 대응할 수 있는 레질리언스 기반 원샷 소프트웨어 개발 최종보고서

2021. 02. 10

주관연구기관 / 강원대학교 삼척산학협력단
공동연구기관 / 충북대학교 산학협력단
공동연구기관 / 씨앤디

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘복합재해 발생 예상 시 지자체 도로관리 담당자가 재해취약지역을 분석 및 대응할 수 있는
레질리언스 기반 원샷 소프트웨어 개발’ (연구개발 기간 : 2018. 04. 17 ~ 2020. 12. 31)
과제의 최종보고서 9부를 제출합니다.

주관연구기관명 : 강원대학교 삼척산학협력단 김 병 식

2021. 02. 10
(인)

공동연구기관명 : 충북대학교 산학협력단장 이 영 성

(인)

공동연구기관명 : 씨앤디 장 창 덕

(인)

주관연구기관책임자: 전 계 원

공동연구기관책임자: 이 호 진

공동연구기관책임자: 장 창 덕

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C141 846-01	해당 단계 연구 기간	2018. 4. 17 - 2020. 12. 31 (33개월)	단계구분	3/3
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	복합재해 발생 예상 시 지자체 도로관리 담당자가 재해취약지역을 분석 및 대응할 수 있는 레질리언스 기반 원샷 소프트웨어 개발			
연구책임자	전계원	해당단계 참여연구원 수	총: 19 명 내부: 19 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 150,000천원 민간: 50,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 200,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 21 명 내부: 21 명 외부: 21 명	총 연구비	정부: 600,000천원 민간: 200,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 800,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	강원대학교 삼척산학협력단			참여기업명: 충북대학교 산학협력단 씨앤디	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음					
연구개발성과의 보안등급 및 사유					

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	Y	Y	Y	N	N	Y	N	N	N	N	N

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

○ 지자체 도로관리 담당자가 재해발생 예상 시 도로 재해취약지역을 분석 및 대응할 수 있는 사용자 중심 원샷 소프트웨어 개발	보고서 면수 125면
- 유역 레질리언스를 고려한 도로재해 위험지도 제작기술	
- 유형별 재해 확산 간편모형 개발	
- 사용자 중심 도로 재해 취약성 분석 소프트웨어 개발(SimpleX-Map)	

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 복합재해 발생 예상 시 지자체 도로관리자가 쉽게 사용할 수 있는 레질리언스를 고려한 도로취약지역 분석 S/W개발				
연구개발성과	○ End-User 업무프로세스 분석 - 업무담당자 설문 및 기존 업무체계 조사 ○ 레질리언스 기반 재해지도 분석 및 대응기술 개발 - 복합재해에 따른 레질리언스 개념 정립 - 재해에 대한 레질리언스 인자 도출, 평가 체계 구축 ○ 유형별 재해확산 간편 모형 개발 - 복합재해 모의를 위한 기본모형 알고리즘 개발 - 커플링 모형 해석을 통한 간편모형 개발 - Test-Bed에 대한 수치해석을 통한 S/W 적용성 검증 ○ End user 중심 도로재해 취약지역 분석 소프트웨어 개발 - 재해지도 및 GIS정보 입출력 인터페이스 개발 - 유역단위 복합재해지도 제작 S/W 개발 - 간편모형을 적용한 레질리언스 기반 도로취약지역 분석 S/W개발				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 복합재해에 대비 할 수 있는 재해지도를 제작 할 수 있음 ○ 도로관리자의 숙련도에 상관없이 재해지도를 쉽게 이해하고 활용 할 수 있음 ○ 간편모형의 적용으로 신속한 업무 프로세스로 재해취약지역에 대한 대책을 수립 할 수 있음 ○ 재해 레질리언스 개념의 도입으로 피해상황에 대한 효율적인 복구 및 복원 ○ 도로관리자가 위험지역의 사전파악 및 재해관련 예산집행 시 우선순위결정 가능 ○ SimpleX-Map 소프트웨어의 보급을 통한 복합재해 관련 시장형성 가능				
국문핵심어 (5개 이내)	복합재해	레질리언스	간편모형	재해지도	도로관리
영문핵심어 (5개 이내)	Complex disaster	Resilience	Simple model	Disaster map	Road management

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

〈 목 차 〉

제1장. 연구개발과제의 개요	6
1. 연구개발의 목적	6
2. 연구개발의 필요성	6
3. 국내·외 연구동향	9
가. 국내 연구동향	9
나. 국외 연구동향	10
제2장. 연구수행내용 및 성과	12
1. SimpleX-Map개발 전체 연구흐름도	12
가. 1차년도 연구요약	12
나. 2차년도 연구요약	13
다. 3차년도 연구요약	13
2. 최종년도 연구내용 및 성과	15
가. 유역 레질리언스를 고려한 도로재해 위험지도 제작기술	15
나. 유형별 재해확산 간편모형	23
다. 사용자 중심 도로재해 취약성 분석 소프트웨어 개발	59
라. 연구성과 검증	61
마. Test-Bed 해석	87
제3장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	116
1. 목표달성도	116
가. 목표	116
2. 관련 분야 기여도	119
3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)	119
제4장. 연구개발성과의 활용 계획	120
1. 연구개발성과의 사업화 진출계획	120

2. 사업화 전략	120
3. 추가 연구의 필요성	121
가. 도로의 복합재해에 수충부 등 하천영향 반영	121
나. 지방도 관리 시스템 구축으로 확대	121
붙임. 참고 문헌	

1. 연구개발의 목적

구분	내용
최종 목표	지자체 도로관리 담당자가 재해발생* 예상 시 도로 재해취약지역을 분석 및 대응할 수 있는 사용자 중심 원샷 소프트웨어 개발
세부 목표	○ 유역레질리언스를 고려한 도로재해 위험지도 제작기술 개발 ○ 유형별 재해확산 간편모형 개발 ○ 사용자 중심 도로 재해 취약성 분석 소프트웨어 개발

**복합재해를 고려한 도로취약 지역 분석 간편모형(SimpleX-Map : Simple complex disaster Map)



<그림 1-1> 복합재해 위험성 평가 모델 개발 개념도

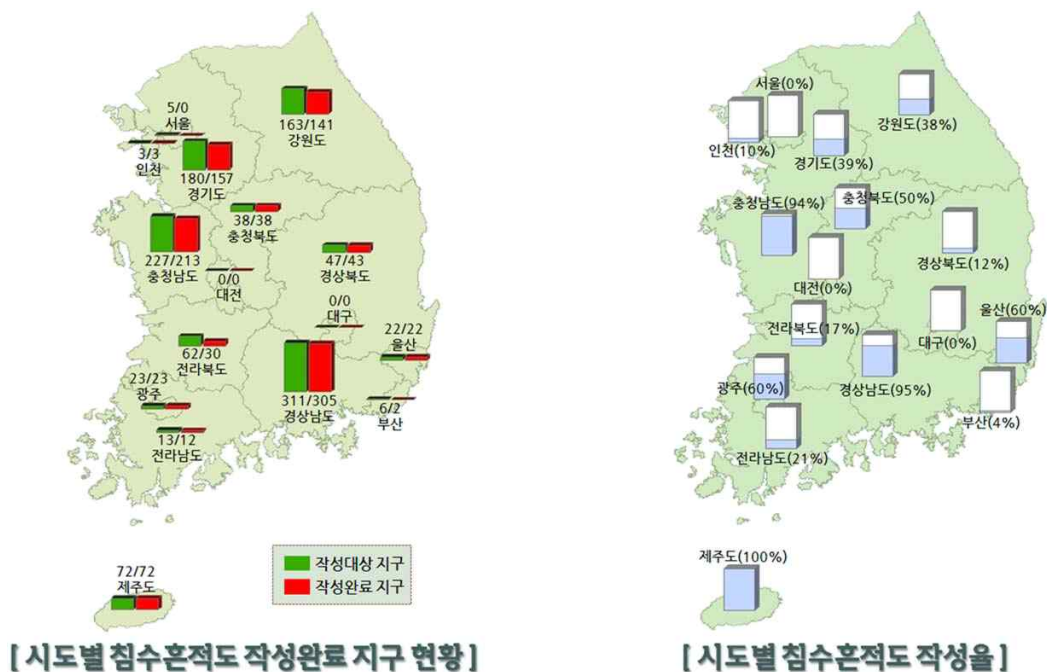
2. 연구개발의 필요성

- 국내지형의 특성상 국토의 64%이상이 산지로 구성되어 있고 도심지의 내부와 인근지역에 산지개발에 따른 급경사지 및 산지가 인접하고 있어 토석류를 동반한 복합재해의 위험성을 내포하고 있음
- 최근 10년간 산사태 피해면적과 복구비용을 분석해한 결과 산사태 및 토석류의 재해 특성상 발생 시 규모가 큰 피해가 생기며 도시화로 인하여 재해 피해가 가중되어 피해액이 높게 나타남
- 이러한 지진 및 토사를 동반한 재해를 예방하기 위해 토목, 수자원, 방재 등 각 분야에서 다양한 연구가 수행되고 있으나, 피해분석에 대한 연구가 주로 수행되고 있어 예방 및 피해복구의

제1장 연구개발과제의 개요

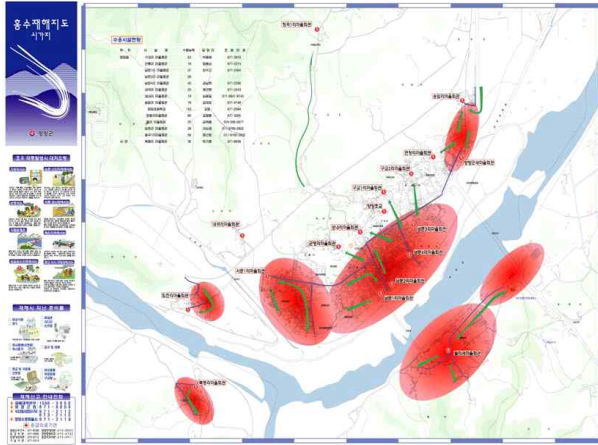
빠른 대처를 하기 위한 연구는 부족한 실정임

- 자연재해대책법 제 21조를 근거로 기초자치단체장이 하천범람 등 자연재해를 경감하고 신속한 주민대피 등의 조치를 취하기 위해 재해지도를 작성하며, 국내에서도 각 재해별 재해지도를 기반으로 하여 재해 위험성 대비를 실시하고 있음
- 국내의 풍수해 관련 재해지도의 경우 유사한 성격의 지도임에도 불구하고 표준모델이 없고 작성주체별로 서로 다른 형태의 지도를 작성·관리하고 있다, 이는 서로 연관 있는 지도들 간의 연계가 어려울 뿐만 아니라 중복작성 가능성이 내재되어 있어 통합적 홍수관리에 효과적으로 활용하기 어려운 상태임
- 기존 재해지도 연구들은 위험도를 격자단위로 구분하여 분석하고 있어 산악지형 및 유역의 특성을 효과적으로 나타내지 못하여 재해위험지도의 활용에 어려움이 있음
- 복합재해에 의한 각종피해를 예방 및 대처하기 위해 재해유형별 단일 재해지도를 제작하여 사용하고 있지만 작성실적이 적으며 기관별 재해지도 작성이 상이한 형태로 진행되고 있어 통합 활용이 어려운 실정임
- 재해지도의 활용성은 재해지도 관련 업무의 발생빈도가 낮아 업무경험이 충분하지 않다는 의견, 잦은 업무 이동, 재해지도 관련업무가 보조 업무라는 이유 등으로 활용성이 떨어지고 있으며 이 문제는 실제로 재해지도를 제작하고 사용하는 지자체 공무원의 재해지도 필요 인식도에도 큰 영향을 미침
- 재해지도 작성을 위한 표준 모델 및 가이드라인, 예산 부족으로 인한 이유로 재해지도 활용성이 낮아지고 있음

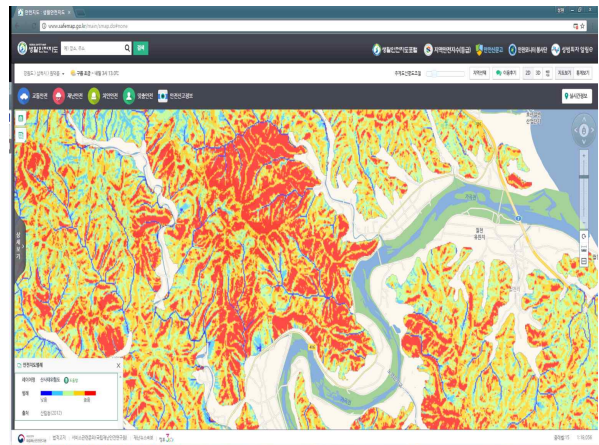


<그림 1-2> 시·도별 침수흔적도 작성 현황 및 작성율

제1장 연구개발과제의 개요



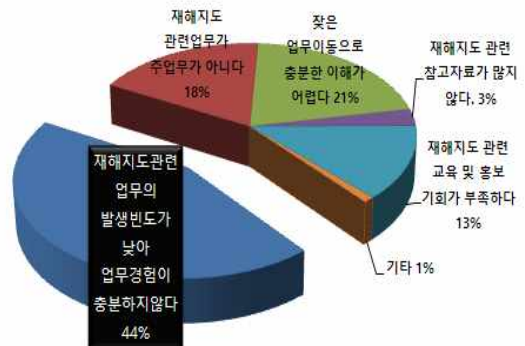
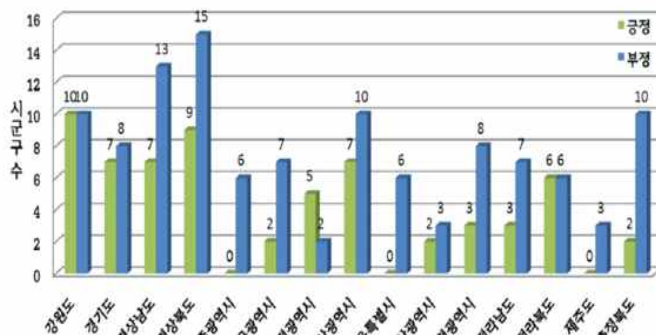
<그림 1-3> 홍수위험지도



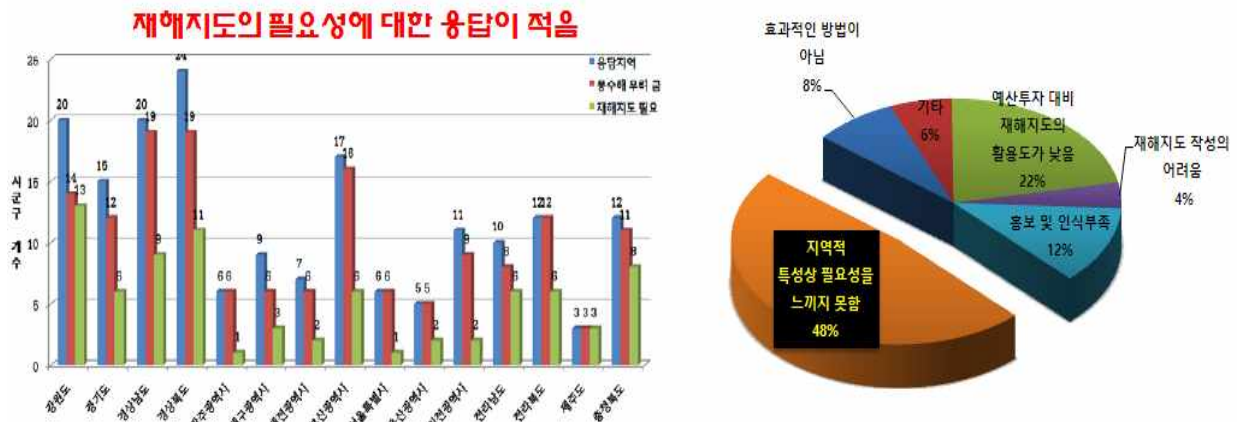
<그림 1-4> 생활안전지도

- 재해지도 활성화를 위해 우선적으로 개선해야 할 점으로 재해지도 표준 모델 제시가 필요하다는 의견이 다수를 차지하고 있음.
- 최근 선진 외국에서는 재난발생 가능성을 전제로 피해를 최소화하고 재난발생 후 일상으로 신속하게 돌아가는 방재 레질리언스(Resilience)에 관한 연구 및 정책이 활발하게 진행되고 있으며 방재 레질리언스의 개념을 적용하여 도로를 중심으로 한 복합재해 모형을 구축할 예정임
- 각종 재해지도가 다양한 형식으로 연구 및 제작되고 있지만 실무자가 활용하기에 어려움이 있음
- 지자체 도로관리자가 재해에 대비한 정책을 수립하기 위한 의사결정 시기 및 지역별로 매년 연구용역을 수립해야하는 시간적 경제적 부담이 따름
- 실무자가 관리지역에 대한 재해위험을 파악하기 위해 제작된 재해지도를 손쉽게 활용할 수 있는 도구가 필요함
- 이와 같이 복합재해* 재해지도를 실제 사용하는 사용자의 활용성에 중점을 두어 적합한 개선 방안을 찾는 것이 중요하며, 사용자가 쉽게 사용하고 접근할 수 있도록 재해 분석 모델의 개발이 필요함

대부분의 설문조사에서 재해지도의 이해도가 낮음



<그림 1-5> 재해지도의 이해도 설문조사



<그림 1-6> 재해지도 필요성 인식도 설문조사

3. 국내 · 외 연구동향

가. 국내 연구동향

(1) 재해지도 현황 분석 및 활성화 방안(국립방재교육연구원)

지방자치단체의 재해지도 작성 및 활용의 현황을 조사·분석하여 문제점을 도출하고 이 문제점들을 개선하고 재해지도 작성 및 활용을 활성화하기 위한 방안제시를 목적으로 하였다. 또한, 지방자치단체 및 유관기관에서 작성한 재해지도의 공유 및 통합활용을 위한 기초 GIS자료인 재해지도 컬렉션을 구축하여 향후 국가재난 정보와 공간정보의 통합·연계 활용의 근간 마련 및 재해지도 컬렉션의 발전방안 제시하였다.

(2) 집중호우를 고려한 급경사지 재해위험도 정밀평가기법 및 기반재해위험지도 개발(자연피해예측 및 저감연구개발사업)

집중호우로 인한 산사태 및 토석류 피해위험지역을 GIS 시스템 상에서 인한 산사태 위험지역 뿐만 아니라 토석류가 유하할 수 있는 위험물골과 토석류 피해위험지역을 정량적으로 분석하였으며, 산사태 위험지역과 토석류의 이동경로 및 토석류 피해예상지역의 범위를 평가할 수 있는 기반재해위험지도를 개발함

(3) GIS기반 기반재해위험지도의 현장 적용성 평가(류지협 외 2명)

서울시·부산시의 최근 4년간(2009~2012) 급경사지 피해사례를 조사·정리하여 기반재해위험지도의 적용성을 평가하였으며, 서울시·부산시 내 테스트베드 지역을 선정하여 관계 전문가들과 함께 현장 적용성 평가를 수행하였다. 연구 결과 기반재해위험지도의 위험등급은 실제 현장평가를 통해 확인한 위험등급과 같거나 높게 분석되는 것으로 확인되었다. 따라서 기반재해위험지도를 활용하여 재해위험 예비지구를 선정하고 전문가의 현장검증 및 평가를 통해 위험지구를 최종선정하는 등 재해위험지구대상 예비평가 할 수 있는 자료를 제시하였다.

(4) 구글어스와의 접목을 통한 위험지도 활용의 극대화(이창희 외 2명)

구글 어스와 위험지도를 연계과정, 구글 어스를 활용한 각종사례에 대한 정보를 제공하였으며 이 사례를 적용하여 재해지도의 완성도 및 활용도를 높이는데 효과적인 방법을 제시하였다. 또한 구글어스는 단순히 지역 정보를 전해주는 프로그램 이라기보다는 더없이 중요한 연구 장비 개념으로 활용하여 각종 재해지도를 다양한 현태를 표출하는데 이용될 수 있을 것이다.

(5) GIS기법을 이용한 산사태재해지도 제작에 관한 연구(전계원 외 1명)

GIS기법을 활용하여 산사태 위험지수 표에 의한 통계적 기법과 결정론적 기법인 SINMAP모형을 적용해 산지재해 발생 위험지와 산지에 주로 분포하고 있는 탐방로의 위험지역을 파악하고 위험도를 등급화하여 산지재해지도를 제작하는 기초연구를 실행하였다.

(6) 산지재해 연구를 위한 토석류 실험장치의 개발 방안(전병희 외 2명)

산지재해의 종류 및 특성을 파악하고 최근 발생빈도가 증가하고 있는 토석류에 의한 피해를 저감 하기 위한 국내외 연구성과를 검토하였고 토석류 흐름해석 및 제어시설 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있도록 다양한 토석류 실험장치를 검토하고 국내여건에 맞는 실험장치를 제안하였다.

(7) 가뭄재해 예방을 위한 수문학적 가뭄과 가뭄취약성의 이해(신지혜 외 1명)

일반국민들이 체감하는 수문학적 가뭄의 발생과 특성에 대해 살펴보고, 레질리언스를 도입하여 가뭄취약성 사전대응에 필요한 인자를 제시하였다. 또한 방재 레질리언스를 적용한 의사결정지원시스템 및 다기준의사결정기법을 활용한 가뭄관리에 대한 연구를 진행 중이다.

나. 국외 연구동향

(1) 미국

국가홍수보험제도(National Flood Insurance Program : NFIP)를 지원하기 위해 미국재난관리청(FEMA)의 주도하에 홍수보험요율지도(Flood Insurance Rate Map : FIRM)를 작성하여 이용하고 있다. 홍수지도는 크게 홍수위험경계지도와 홍수보험 요율지도로 나누어진다. 홍수위험경계지도는 개략적인 분석에 의해 특별한 위험을 갖는 홍수지역의 경계를 정의하는 지도이고, 홍수보험요율지도는 가장 폭 넓게 사용되는 지도로서 미국재난관리청이 특별홍수위험지역과 지역공동체의 보험을 적용할 위험지구를 표시한 지역공동체의 공식지도이다.

(2) 일본

일본은 홍수로 인한 범람의 피해를 줄이기 위해 사전에 지역주민에게 관련정보를 제공한다는 취지로 국토교통성에서 1993~1994년에 홍수범람구역도를 작성하였으며, 2001년부터는 침수상정구역도를 작성하고 있다. 침수상정구역도는 하천 관리자로부터 제공된 침수상정구역 및 상정되는 수심을 표시한 도면에 홍수예보 등의 전달방법, 피난장소, 그 외 홍수 시 원활하고 신속한 피난의 확보를 꾀하기 위해 필요한 사항등을 기재한 홍수위험지도이다.

(3) 프랑스

자연재해정보 및 자연재해 방지를 위해 과거 최대 홍수발생범위와 홍수발생 빈도에 따른 ‘예외적인’, ‘빈번한’, ‘매우 빈번한’ 빈도의 홍수 지역을 나타내는 지도를 제작하여 자료의 공동활용을 목적으로 인터넷을 통해 재해지도를 제공하고 있다. 해당 지역에 대한 상세건물 및 자료는 관련 기관과 보험회사 자체적으로 목적에 맞게 개발하여 구축하고 있다.

(4) 독일

독일보험협회에서 개발한 홍수지역 분류틀인 ZURS(Zoneierungssystemfur Überschwemmung, Hochwasser and Ruckstau)를 사용하여 홍수위험을 지도로 이용하고 있다. 총 4가지 지역으로 구분되며 높은위험(10년에 한번발생), 보통 위험(10~50년에 한번 발생), 낮은 위험(50~200년에 한번발생), 매우 낮은 위험(200년 이상에 한번 발생)으로 구분한다.

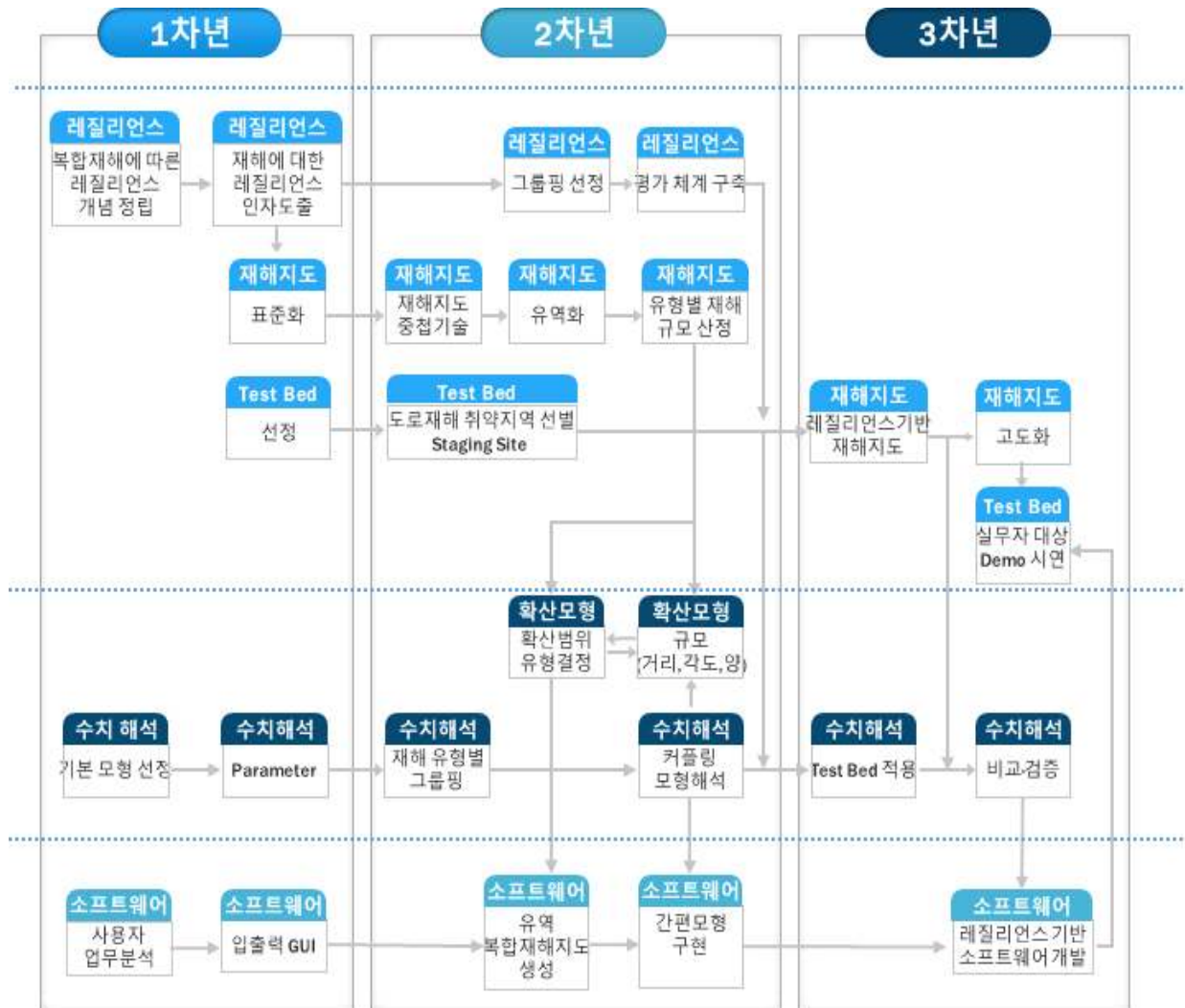
(5) 오스트리아

오스트리아에서는 2002년 폭우와 홍수에 의한 심각한 피해 발생 후, 보험업계와 오스트리아 농업부 산하 공공기관들, 오스트리아 보험협회가 홍수위험지역을 나타내는 GIS 기반의 HORA(Hochwasser Riskzonierung Austria)를 개발하여 인터넷을 통해 제공하고 있다. 홍수지역은 홍수의 재현기간에 따라 Zone 1(30년 빈도), Zone 2(100년빈도), Zone 3(200년 빈도)으로 구분된다

(6) 영국

지방자치단체연계부에서 주관하여 국가개발정책의 기술 매뉴얼을 2014년 3월에 영국전역에 대하여 공고하였다. 영국의 개발행위 제한방식으로 홍수위험도에 따른 풍수해 구역은 Zone 1, 2, 3a, 3b로 구분하였고, 필수 사회기반시설, 수자원연계개발지역, 고취약, 중취약, 저취약 등 홍수취약성에 따른 풍수해 구역을 설정하였다. 홍수위험도와 취약성을 고려하여 도시개발 및 구조물 설치시 토지이용에 따른 제한 및 규제를 실시하고 있다. 또한, 내수재해 위험지구, 하천 재해 위험지구, 저수지재해 위험지구 등을 인터넷을 통해 자료를 상세하게 제공하고 있다.

1. SimpleX-Map개발 전체 연구 흐름도



<그림 2-1> SimpleX-Map개발에 대한 전체 연구흐름도

가. 1차년도 연구요약

- 1차년도의 주요 연구내용은 크게 레질리언스 기반 재해지도 개발을 위한 체계 구축(강원대학교), 복합재해 모의를 위한 기본모형 알고리즘 개발(충북대학교), 재해지도 및 GIS정보 입출력 인터페이스 개발(SimpleX-Map)(씨앤디)로 구분할 수 있으며 1차년도 전체 연구흐름도는 <그림 2-1>과 같음.
- 1차년도의 주요 연구내용은 강원대학교-국내·외 문헌조사를 통한 복합재해와 개념정립, 재해지도의 방법론 결정, 레질리언스 인자도출을 위한 설문조사 및 Test-bed선정과 충북대학교-복합재해에 따른 재해유형별 특성분석과 수치해석 기본 모형결정 및 기본모형 모의를 위한 Parameter결정에 대한 연구, 씨앤디-사용자 업무분석을 통한 S/W(SimpleX-Map)의 인터페이스 및 입출력 GUI결정에 대한 연구를 진행함.

나. 2차년도 연구요약

- 2차년도의 주요 연구내용은 크게 유역단위 복합재해지도 제작기법 개발(강원대학교), 커플링 모형 해석을 통한 간편모형 개발(충북대학교), 유역단위 복합재해지도 제작 S/W개발(SimpleX-Map)(씨앤디)로 구분할 수 있음.
- 2차년도에는 1차년도의 연구자료를 바탕으로 산림청에서 개발된 산사태위험지도 및 토석류위험지도의 중첩을 통한 도로유역별 재해지도를 구축하였으며, 도로중심 재난레질리언스(DRR: Disaster Resilience focusing on the Road)인자의 그룹핑과 AHP분석을 통한 DRR인자의 가중치 결정을 실시하여 DRR평가체계를 구축함.
- 복합재해에 기인한 피해의 확산유형은 문헌조사 및 선행연구 결과 5가지 형태로 세분할 수 있었으며, 본 연구에서는 복합재해의 특성과 재해의 확산유형을 결합한 결과를 분석하여, 도로주변에서 발생할 수 있는 복합재해의 규모와 확산범위를 기하학적으로 결정할 수 있는 3가지 형태의 간편모형을 제시함.
- 복합재해위험지도에 복합재해 유형별 간편모형을 연계하고, 2차년도에 DB로 구축된 도로중심 재난레질리언스(DRR)인자의 속성 추출기능을 구현하여 도로위험등급을 산정할 수 있는 ‘복합재해와 레질리언스가 고려된 도로재해 취약지역 분석 간편모형 S/W(SimpleX-Map)’를 개발

다. 3차년도 연구요약

- 3차년도의 주요 연구내용은 본 연구의 핵심성과물인 SimpleX-Map모형의 성과확산을 위해 도로관리 실무자와 학계 및 전문가를 대상으로 데모시연을 진행하여 만족도 조사를 실시함.
- 2차년도에 개발된 SimpleX-Map모형의 검증을 위해 Test-bed(410, 415, 418, 446, 456지방도)를 대상으로 태풍 이후 현장조사를 실시하여 S/W의 피해규모 정확도와 재해확산특성 구현 정확도에 대해 비교분석을 실시함.

제2장 연구수행내용 및 성과

구분	년도	세부 연구목표	세부 연구개발 내용	평가목표 및 착안점	가중치 (연구비)	추진일정			
						1분기 (1/4)	2분기 (2/4)	3분기 (3/4)	4분기 (4/4)
1 차 년 도	2018	복합재해에 따른 레질리언스 평가 인자 도출	복합재해에 따른 레 질리언스 평가인자 도출	전문가 설문평가	51.1				
			레질리언스 인자 Grouping	전문가 평가	61.9				
		기본 알고리즘 개발	재해유형별 특성분석	재해유형별 피해 특 성 제시	16.4				
			프로그램 개발기술 현황	프로그램 특성분석 결과제시	20.6				
		입출력인터페이 스 구축	GUI 구현 만족도	사용자설문	50				
2 차 년 도	2019	유역단위 복합재 해지도 제작기법 수립	단일재해지도 중첩기 술 제시	모델 중첩결과 평 가	90.5				
			유형별 재해규모산정 방법 제시	전문가평가	90.5				
		간편모형 개발	재해유형 Coupling을 이용한 복합재해 구 현	복합재해 그룹별 특성분석 결과제시	35.8				
			복합재해 구현을 위 한 확산유형 결정	확산유형 결과제시	33.2				
		유역단위 복합재 해지도 제작 S/W	유역 및 하도생성 정 확도	WAMIS유역 및 하도 와 비교	70				
			간편모형 적용	유형별 간편모형 구현율	40				
			레질리언스 속성 추 출 기능구현	유역별 레질리언스 속성 추출율	40				
3 차 년 도	2020	Test-bed 적용	피해규모 산정 정확 도	실측자료와 비교	86				
		Test-bed 해석	재해확산특성 구현정 확도	Test-Bed측정결과 비교분석	34				
		SimpleX-Map 개 발	소프트웨어 개발	시연회	80				

2. 최종년도 연구 내용 및 성과

가. 유역 레질리언스를 고려한 도로재해 위험지도 제작기술



<그림 2-2> 유역 레질리언스를 고려한 도로재해 위험지도 제작기술 연구흐름도

- 국내·외 문헌조사와 전문가 설문조사 및 자문평가를 통해 도로중심 재난레질리언스의 인자도출과 그룹핑을 실시함.
- 지방도로관리 실무자 면담과 AHP(Analytic Hierarchy Process) 설문조사 및 전문가 자문을 통해 AHP분석의 진행과정 및 타당성을 검증하고, 도로중심 재난레질리언스 인자의 가중치를 결정하여 도로중심 재난레질리언스(DRR)의 평가체계를 구축함.
- 도로재해 위험지도 등급 평가의 검증을 위해 현장조사를 실시하여, 피해규모(등급) 산정 정확도를 비교·분석함.

(1) 도로중심 재난레질리언스 평가체계 구축

- 도로중심 재난레질리언스 인자 그룹핑과 AHP설문조사를 통한 지방도로 위험판단 가중치를 산정하여 DRR의 평가체계를 <표 1-6>와 같이 구축함.
- 여기서, 도로재난 직접영향인자 = 도로측방여유폭 가중치 + 도로교통량 가중치 + 배수시설 가중치 + 방호시설 가중치로 계산되며, 도로재난 간접영향인자 = 인구 가중치 + 재산 가중치 + 복구력 가중치로 계산됨.
- 본 연구에서는 강릉시 도로관리사업소에서 관리하는 5개 지방도로(410번, 415번, 418번, 446번, 456번)를 Test-Bed로 선정하여 각 인자들을 모두 GIS DB로 구축하였음.

<표 2-1> 도로중심 재난레질리언스 평가체계

Level 1	Lvel 2	Level 3	GIS DB	출처 / 기준년도	형태	지방도로 위험 판단 가중치												
도로중심 재난레질리언스 (1.000) <table><tr><th>등급</th><th>점수</th></tr><tr><td>1등급 매우높음</td><td>1.000~ 0.801</td></tr><tr><td>2등급 높음</td><td>0.800~ 0.601</td></tr><tr><td>3등급 보통</td><td>0.600~ 0.401</td></tr><tr><td>4등급 낮음</td><td>0.400~ 0.201</td></tr><tr><td>5등급 매우낮음</td><td>0.200~ 0.000</td></tr></table>	등급	점수	1등급 매우높음	1.000~ 0.801	2등급 높음	0.800~ 0.601	3등급 보통	0.600~ 0.401	4등급 낮음	0.400~ 0.201	5등급 매우낮음	0.200~ 0.000	도로재난 직접영향 인자 (0.742)	도로측방여유폭 (0.312)	인도 자전거도로	국토지리정보원 / 2018	shp, 선	有 0.312 無 0.000
	등급	점수																
	1등급 매우높음	1.000~ 0.801																
	2등급 높음	0.800~ 0.601																
	3등급 보통	0.600~ 0.401																
	4등급 낮음	0.400~ 0.201																
	5등급 매우낮음	0.200~ 0.000																
	안전지대	국토지리정보원 / 2018	shp, 면															
	도로교통량 (0.213)	500 미만 500~5,000 5001~10,000 10,001이상	국토지리정보원 / 2018	shp, 선	0.213 0.142 0.071 0.00													
	배수시설 (0.190)	암거 측구	국토지리정보원 / 2018	shp, 선	有 0.190 無 0.000													
방호시설 (0.286)	낙석방지책 방호벽 가드레일 옹벽 석축 경사보호망	국토지리정보원 / 2018	shp, 선	有 0.286 無 0.000														
도로재난 간접영향 인자 (0.258)	인구 (0.370)	0인 1~4인 5인이상	국토지리정보원 / 2018	-	0인 0.332 1~4인 0.166 5인이상 0.00													
	재산 (0.332)	0 1~4 5이상	국토지리정보원 / 2018	shp, 면	0가구 0.370 1~4가구 0.185 5가구 이상 0.000													
	복구력 (0.298)	우회도로 접근성 복구장비 보수팀	국토지리정보원 / 2018	-	有 0.298 無 0.000													

a. 도로교통량: 행정안전부 급경사지재해위험등급표 중 도로교통량 분류를 근거로 사용

b. 인구: USACE 건물당 인구 추정방법 사용, 인구=건물수*3, APPENDIX A USACE HURRICANE DEBRIS ESTIMATING MODEL

c. 재산: 행정안전부 급경사지재해위험등급표를 근거로 분류

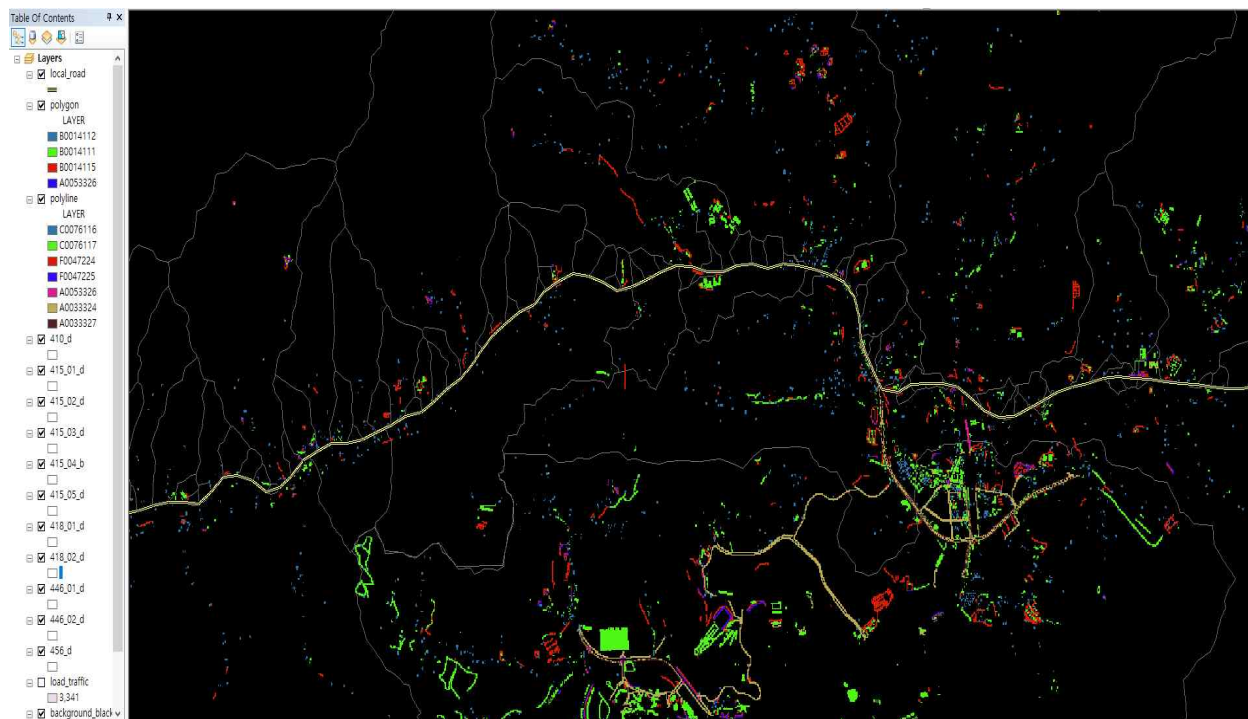
- 도로중심 재난레질리언스의 가중치는 <표 2-1>의 Level 1과 같이 5등급으로 구분되며, 1등급은 1.000~0.801의 범위를 가지고 있으며, 레질리언스 점수가 높을수록 해당 지방도로는 도로재난에 대해 레질리언스 요소가 잘 갖춰진(회복력이 높은) 도로를 의미함. 이에 반해 5등급은 0.2000~0.000의 범위에 해당하며, 레질리언스 점수가 낮을수록 해당 지방도로는 도로재난에 대해 취약한 도로를 나타냄.
- DRR의 1등급과 2등급은 재난에 대해 레질리언스 요소가 잘 갖춰진 도로로써 복합재해를 고려한 1차 재해위험도 결과를 1단계 하향시키고 3등급은 단계 유지, 4등급 및 5등급은 도로재난에 매우 취약한 도로로써 1단계를 상향시켜 평가함.
- <표 2-1>의 Level 2는 도로재난직접영향인자와 도로재난간접영향인자로 구성되며, 각 인자의 가중치는 AHP분석을 통하여 산정되고, AHP분석 결과 도로재난 직접영향인자는 0.742, 도로재난 간접영향인자는 0.258로 나타나 도로재난직접영향인자가 도로재난간접영향인자보다 더 중요한 것으로 분석됨.

제2장 연구수행내용 및 성과

- <표 2-1> Level 3의 도로재난직접영향인자는 도로측방여유폭, 도로교통량, 배수시설, 방호시설로 구성되고, AHP분석결과 도로측방여유폭(0.312), 방호시설(0.286), 도로교통량(0.213), 배수시설(0.190)순으로 도로중심 재난레질리언스 가중치가 높은 것으로 분석됨.
- <표 2-1> Level 3의 도로재난간접영향인자는 인구, 재산, 복구력으로 구성되고 AHP분석결과 인구(0.370), 재산(0.332), 복구력(0.298)순으로 도로중심 재난레질리언스 가중치가 높은 것으로 분석됨.

(2) 도로중심 재난레질리언스 DB구축

- 도로중심 재난레질리언스 인자는 도로재난 직접영향인자와 도로재난 간접영향인자로 분류되며 도로측방여유폭과 도로교통량, 배수시설, 방호시설, 인구, 재산 및 복구력 등으로 구성되어 있음.

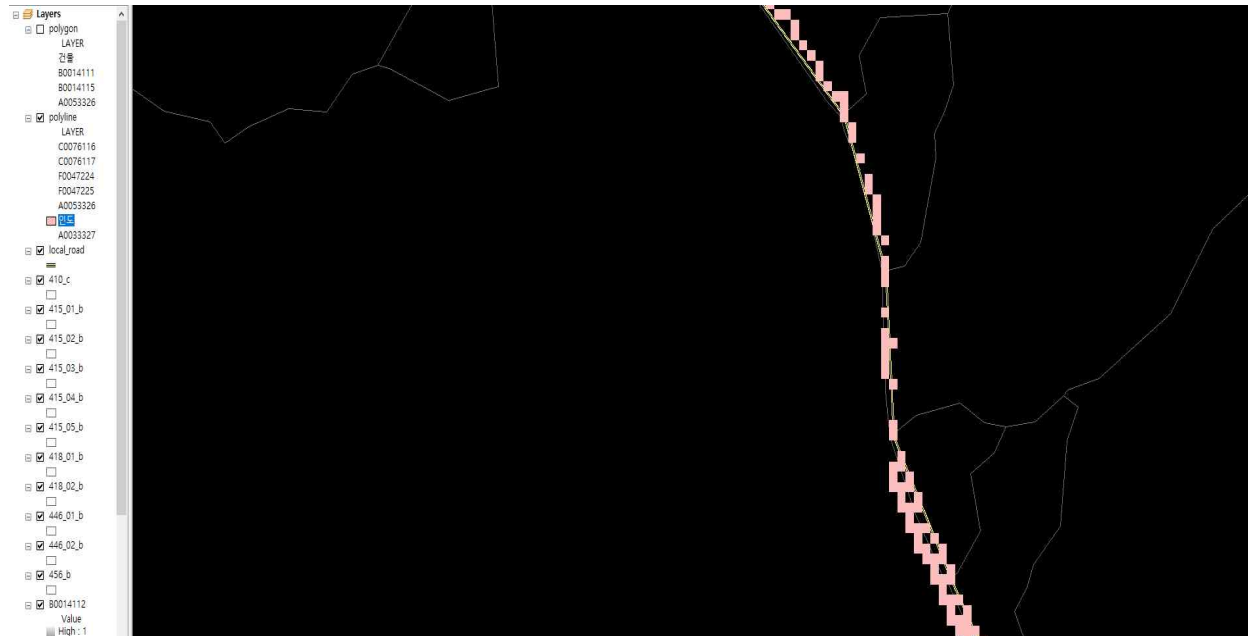


<그림 2-3> 도로중심 재난레질리언스 인자 구축화면

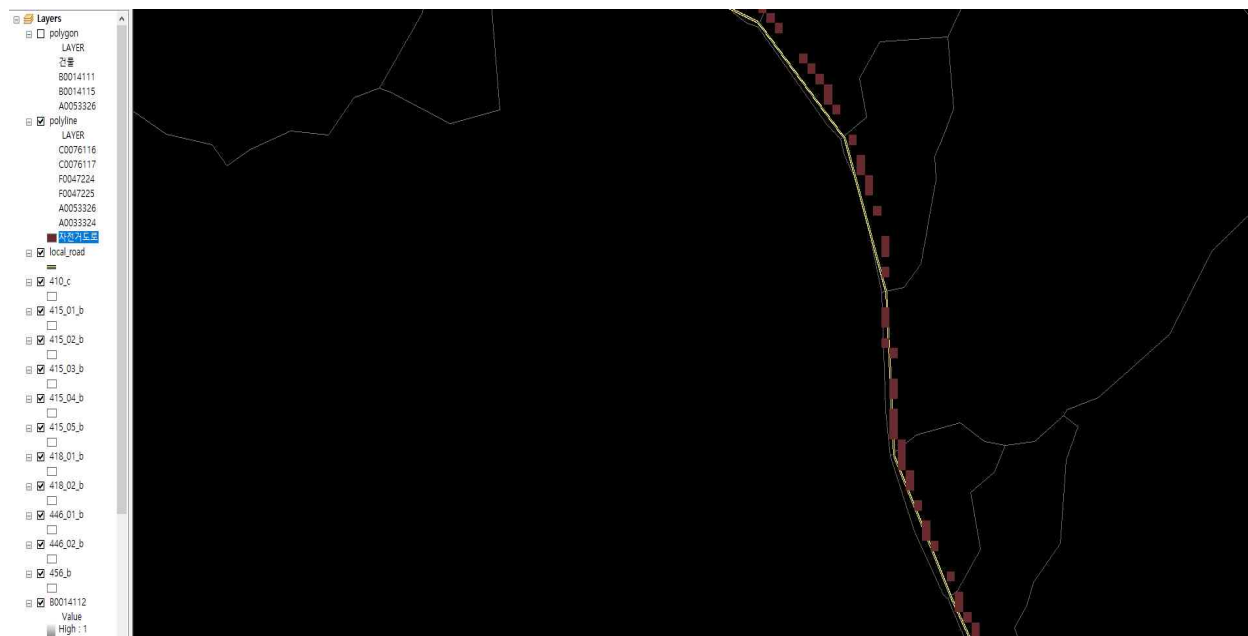
제2장 연구수행내용 및 성과

(가) 도로측방여유폭

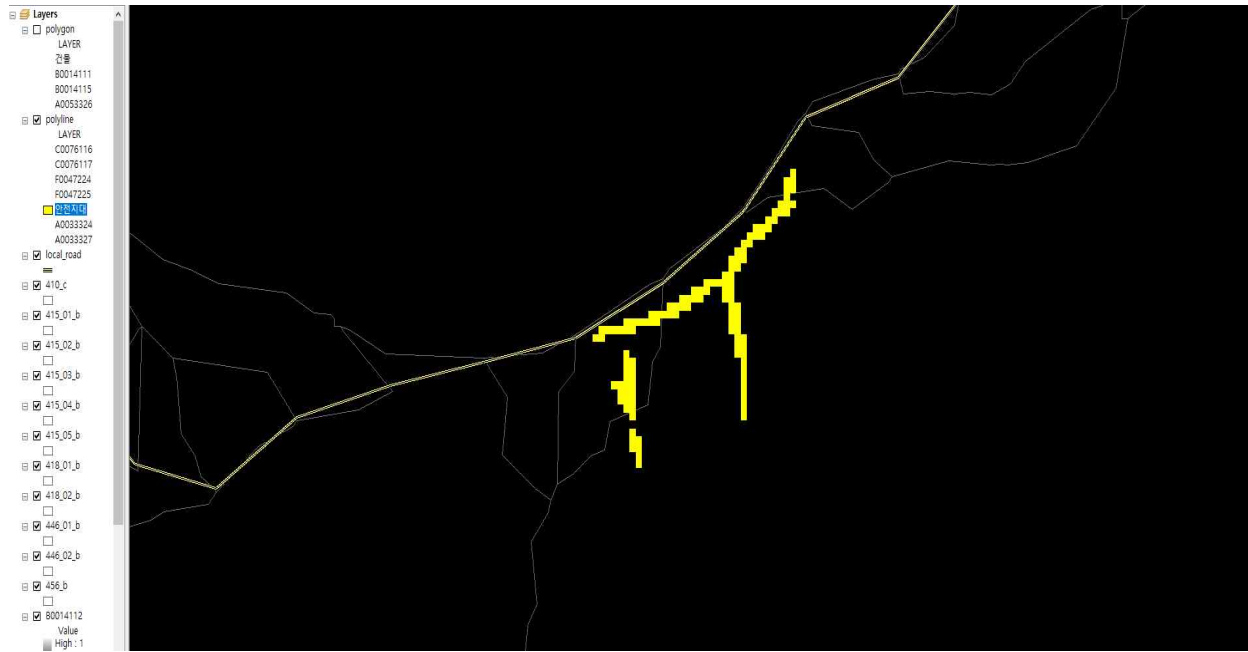
- 도로측방여유폭은 지방도로 주변에서 복합재해 발생 시 재난을 완충시킬 수 있는 요소로 도로 측방에 위치하고 있는 인도, 자전거도로, 도로주변 갯길 등에 해당함.



<그림 2-4> 도로측방여유폭(인도data)



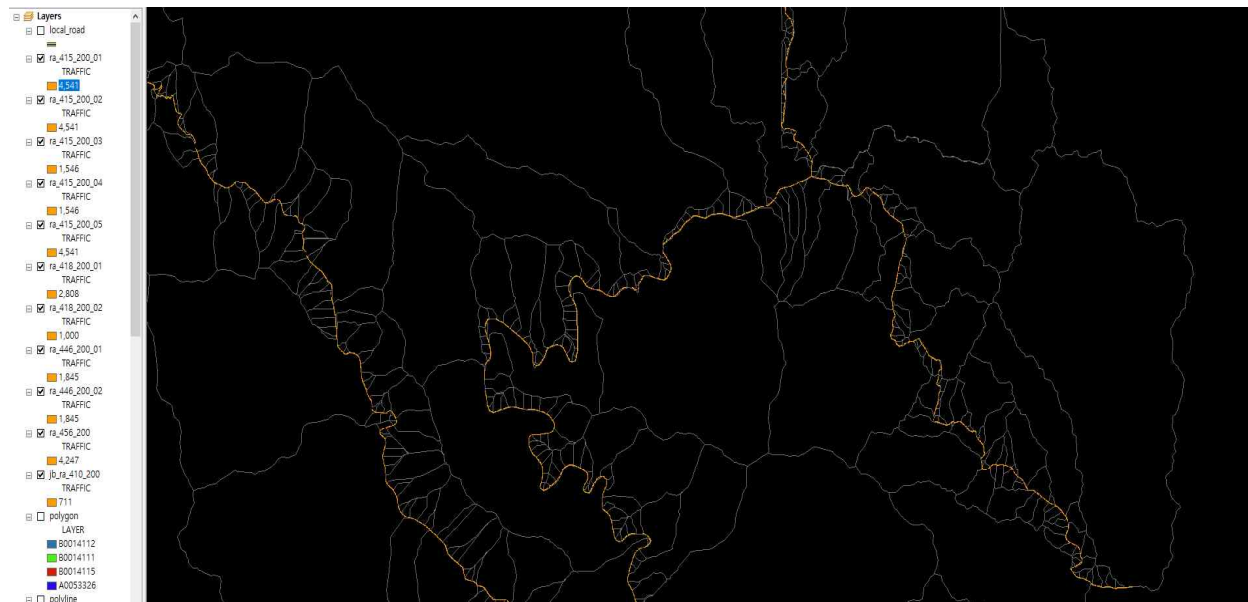
<그림 2-5> 도로측방여유폭(자전거도로)



<그림 2-6> 도로측방여유폭(안전지대)

(나) 도로교통량

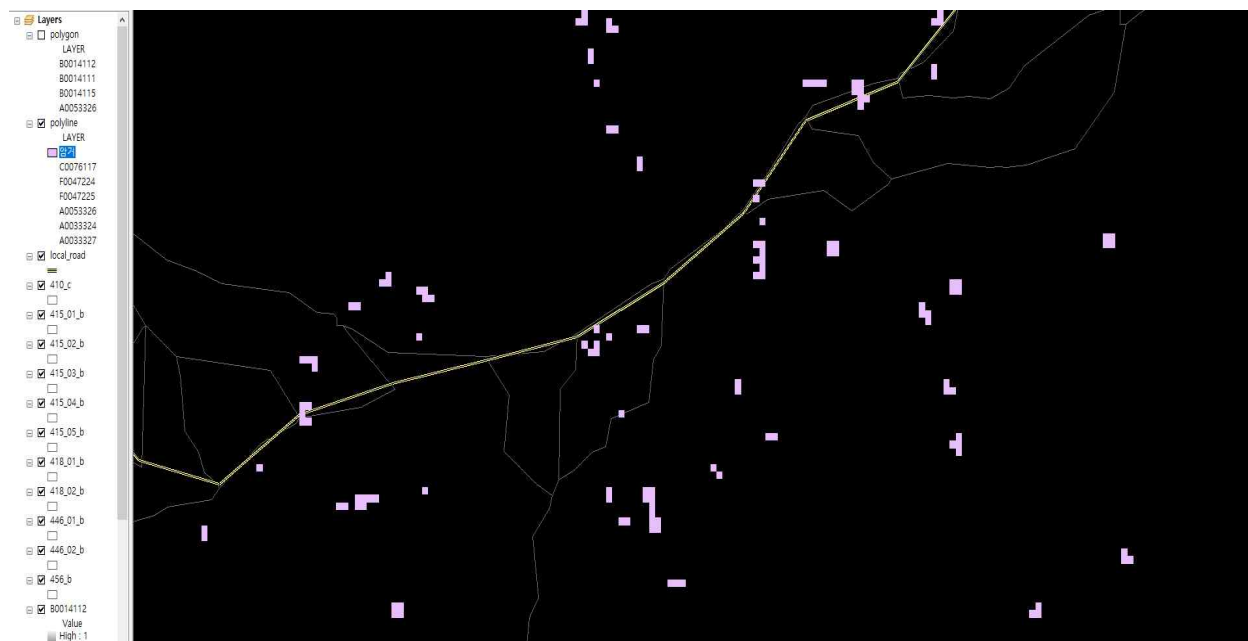
- 교통량정보제공 시스템에서 제공하는 2019년 지방도 교통량 데이터를 기반으로 DB를 구성하였으며, 도로교통량은 410번 지방도에서 711대/day, 415-1,2,5번 4,541대/day, 415-2,4번 1,546대/day, 418-1번 2,808대/day, 418-2번 1,000대/day, 446번 1.845대/day, 456번 4,247대/day로 나타남.



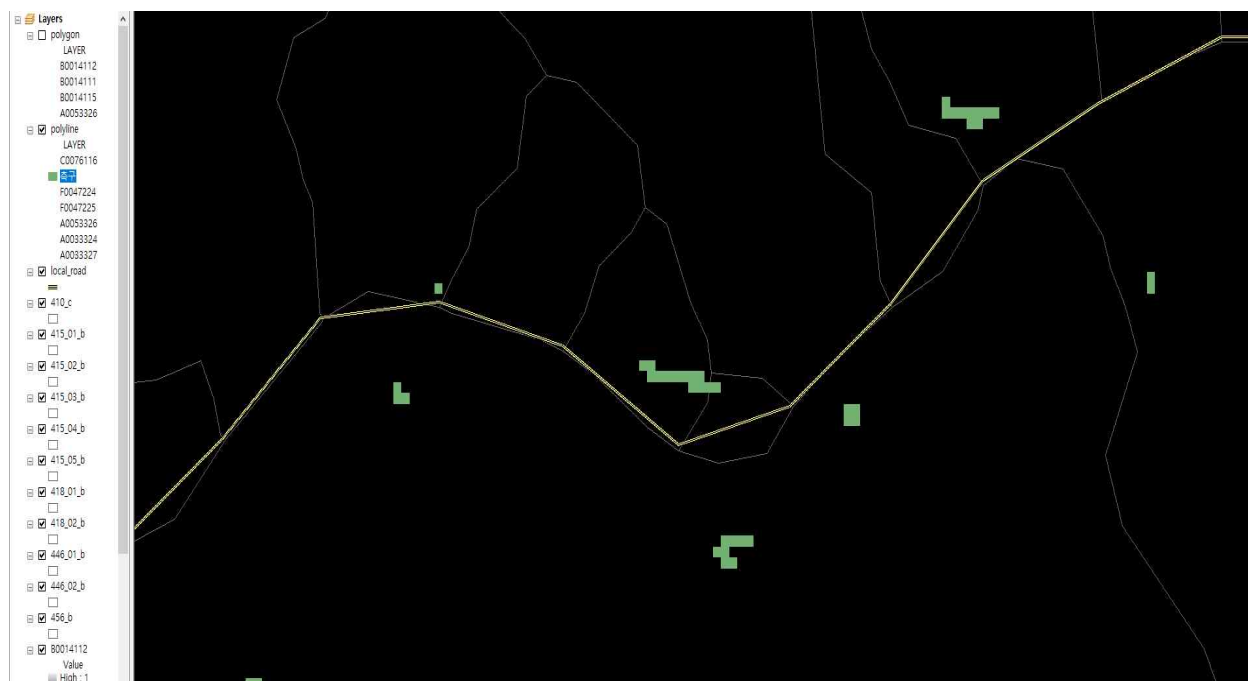
<그림 2-7> 도로교통량

(다) 배수시설

- 배수시설은 도로주변에 설치되어 있는 구조물로 암거, 측구, 교량등으로 구성되어 있음.



<그림 2-8> 배수시설(암거)

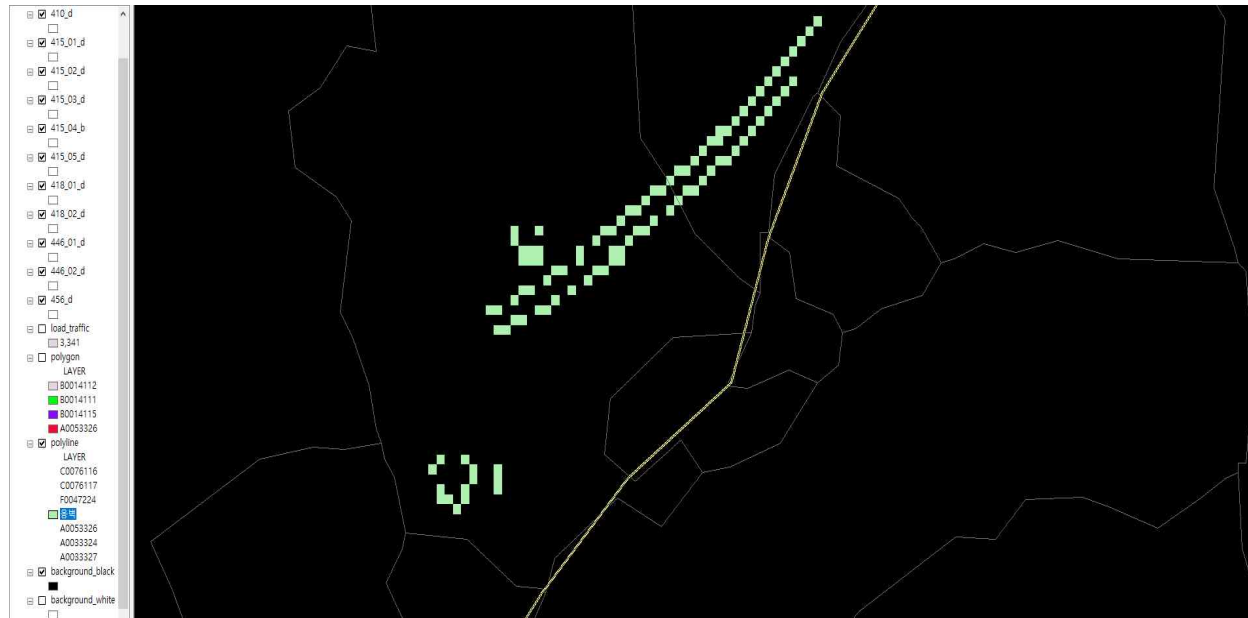


<그림 2-9> 배수시설(측구)

제2장 연구수행내용 및 성과

(라) 방호시설

- 방호시설 데이터는 낙석방지책과 방호벽, 가드레일, 콘크리트 옹벽, 석축, 경사보호망 등 지방도로에서 복합재해 발생 시 1차적으로 방어할 수 있는 구조물에 해당함.



<그림 2-10> 방호시설(옹벽)

(마) 인구

- 인구 데이터는 지방도로 하류지역에 거주하고 있는 인구 수로 미국 USACE에서 제시한 건물당 인구추정방법을 사용함.

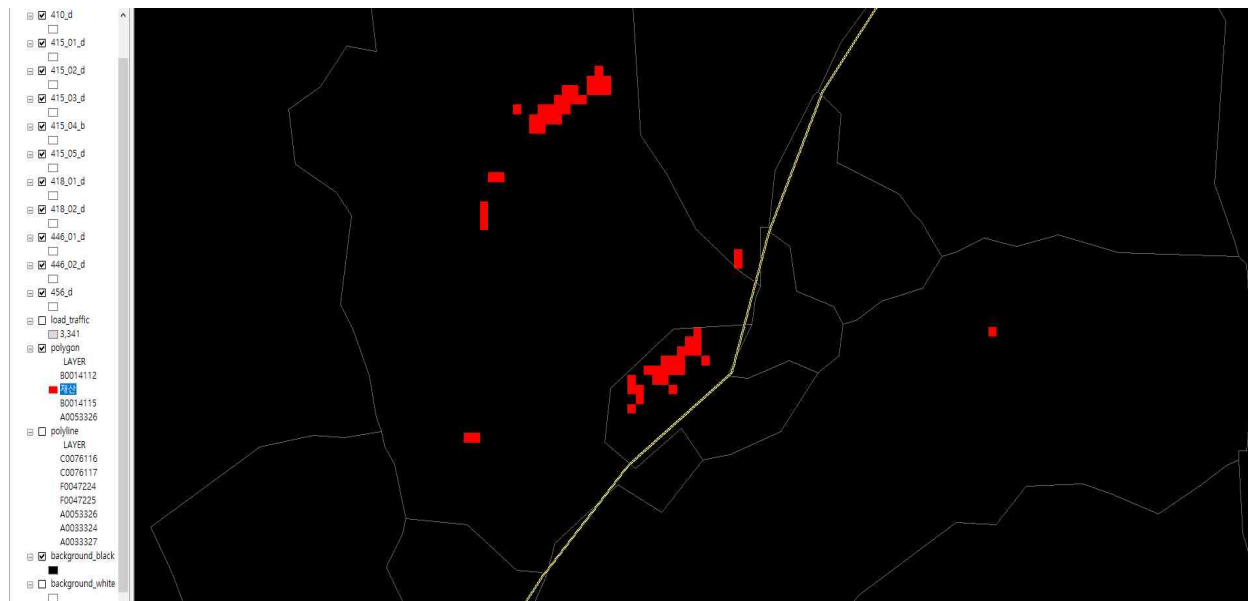


<그림 2-11> 인구(건물data, 인구=건물*3(USACE 인구산정방식))

제2장 연구수행내용 및 성과

(바) 재산

- 재산 데이터는 지방도로 하류지역에 위치하고 있는 주택과 주택외 건물로 구성됨.



<그림 2-12> 재산(건물data)

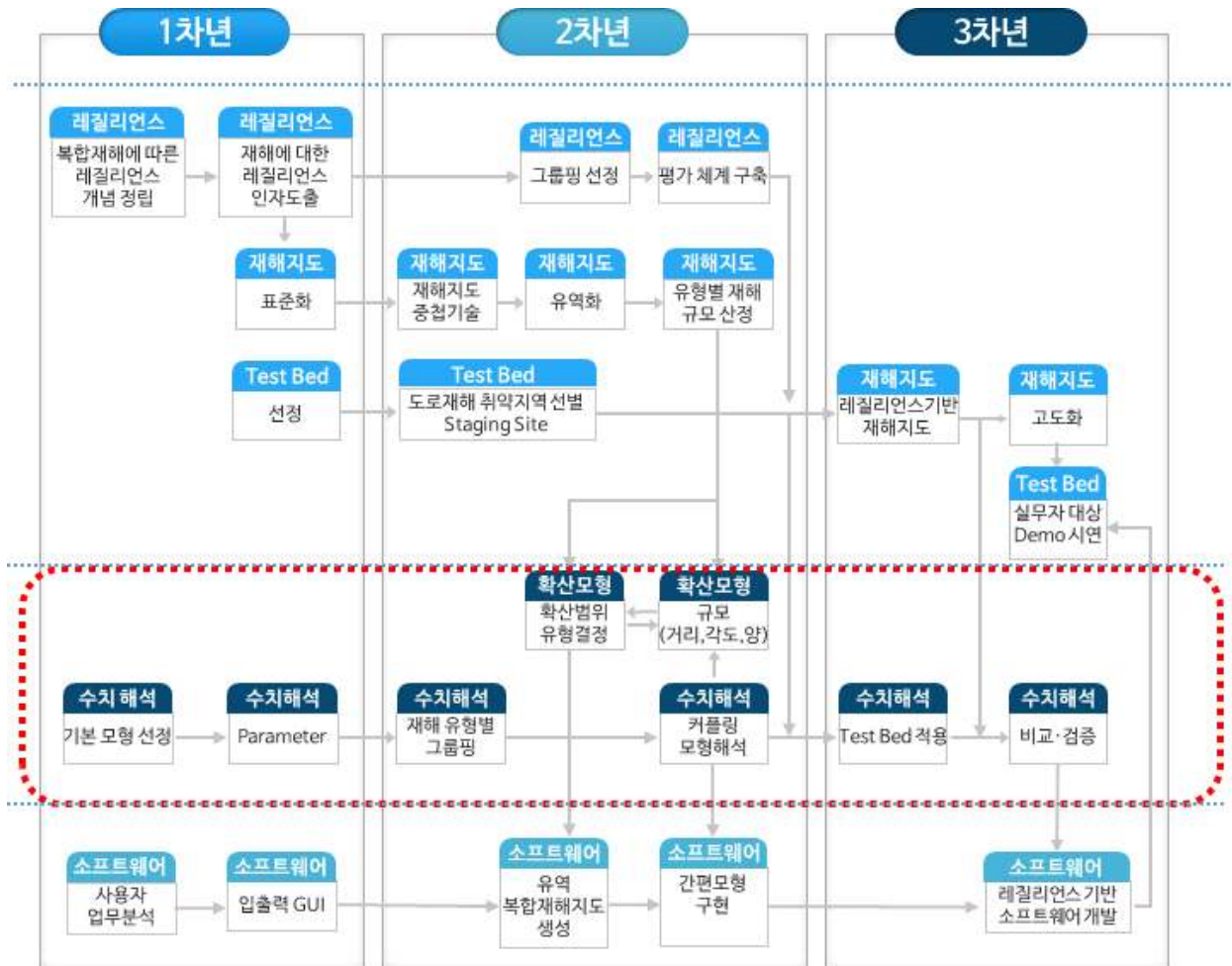
(사) 복구력

- 복구력은 복합재해 발생 시 신속히 복구할 수 있는 복구장비와 보수팀, 우회도로 및 접근성으로 구성됨



<그림 2-13> 복구력 data

나. 유형별 재해확산 간편모형



<그림 2-14> 유형별 재해확산 간편모형 개발 연구흐름도

(1) 기본 알고리즘 개발

(가) 재해 유형별 특성 분석

① 재해의 발생원인

- 최근 우리나라에서 지구 온난화에 의한 기후변화로 인해 슈퍼 태풍의 발생빈도가 높아짐
- 최근 기후 변화의 특징은 집중 호우의 발생빈도가 높아지고 있고, 강우강도가 탁월하게 높아짐으로 인한 강수량의 급격한 증가
- 예측하기 어려운 돌발홍수 및 국지성 호우의 발생과 강우패턴예측의 어려움

② 재해의 유형

- 태풍과 집중호우는 다양한 종류의 토사재해를 유발함
- 토사재해에는 산사태, 토석류, 급경사지 재해 등이 있음
- 토사재해에 관련된 지배방정식의 설정
- 검사체적의 접근방식을 기본으로 하여, 유체의 연속방정식, 유체의 운동량방정식, 토사체의 운동량 보존식을 적용

③ 재해의 전파특성

- 슈퍼태풍에 의해 발생한 집중호우는 토사재해를 야기하며, 토사에 의한 재해는 지방도로와 연결된 산지의 유역으로부터 지방도로 및 지방도로 배후의 주거지 및 산업단지 등으로 빠르게 전파됨
- 산지에서 발생한 토사재해는 주로 토사(흙과 암석)와 유체의 혼합물이 중력작용을 받아서 일종의 연속체처럼 빠르게 유동하는 현상
- 토사-유체 혼합물 외에 토사-물-나무의 혼합물도 자주 발생
- 토사-유체 혼합물의 입자간극은 유체 또는 슬러리로 가득채워져 있기 때문에 강한 유동성을 발휘하게 됨
- 토사-유체 혼합물은 산지유역의 상류부에서 하류부까지 침식과 퇴적을 반복하면서 빠르게 유하함
- 하류에 도달한 토사-유체 혼합물은 지방도로 및 그 배후로 방사형으로 확산 전파됨

(나) 재해모의를 위한 지배방정식

- 검사체적 접근 방식(레이놀즈 수송이론)
- 토사-유체 혼합물의 유동층을 라그랑지적으로 고려하면, 유동층의 질량, 체적, 밀도 등이 시간적으로 급격히 변화.
- 이 유동층의 변화에 착안한 형태의 토사-유체 혼합물의 지배방정식은 질량보존법칙을 만족하게 되며, 토사-유체 혼합물의 질량을 검사체적으로 취급해서 레이놀즈 수송이론에 적용하면, 다음과 같이 나타낼 수 있음

$$\frac{\partial(\rho_m h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon \rho_m v h) = m \quad \text{식 (2.1)}$$

- 여기서, h 는 수심, v 는 유속, ρ_m 은 토사-유체 혼합물 유동층의 평균 밀도, m 은 단위시간당 질량변화량(침식퇴적질량), ϵ 는 유동층의 평균 밀도와 관련된 형상계수
- 토사 입자에 대한 연속방정식을 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있음

$$\frac{\partial(c_m h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon' c v h) = c_* S \quad \text{식 (2.2)}$$

- 여기서, p 는 압력이고, 수심 방향의 농도를 일정하게 근사시키면 $p = 1/2 \rho_m g h^2 \cos \theta$ 가 되며, g 는 중력 가속도, θ 는 하상경사와 수평면이 이루는 각도, τ 는 저면 전단력, α 는 밀도와 속도에 관한 보정계수, α' 은 운동량 분포에 관한 보정계수임
- 식 (2.2)를 간단히 하기 위해서 모든 보정계수를 $\epsilon = \epsilon' = \alpha = \alpha' = 1$ 로 보고, Flux 변화를 식 (2.3)에 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있음

$$\rho_m \left\{ \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \nabla \cdot (v^2 h) \right\} + v h \left\{ \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (v \rho_m) \right\} = \rho_m g h \sin \theta - \nabla \cdot p - \tau \quad \text{식 (2.3)}$$

- 식(2.3)의 두번째 항을 질량 체적 보존식에 적용하여 해석하면, 식 (2.4)와 같이 나타낼 수 있음

$$\rho_m \left\{ \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \nabla \cdot (v^2 h) \right\} + v(m - \rho_m S) = \rho_m g h \sin \theta - \nabla \cdot p - \tau \quad \text{식 (2.4)}$$

- 운동 방정식 (2.4)와 (2.5)에 있어서의 두 번째 항의 밀도변화가 다른 항에 비해 무시할 수 있다고 하면, 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있음

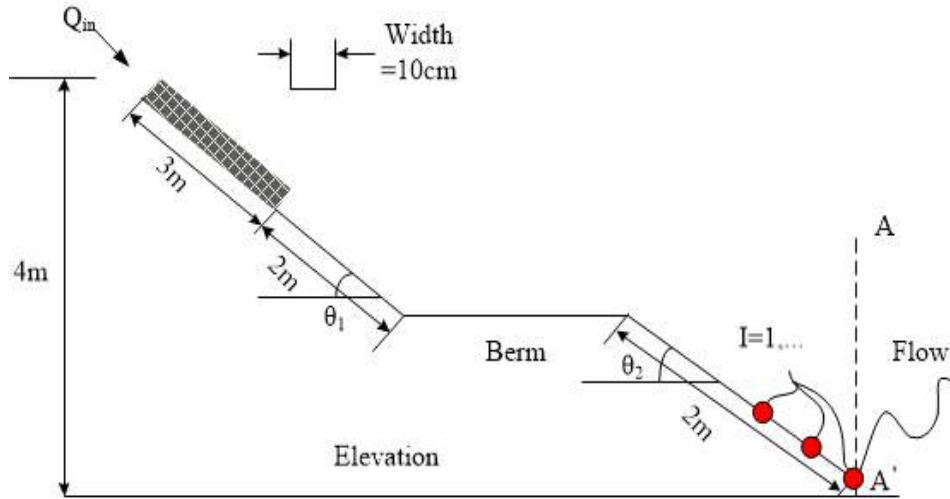
$$\rho_m \left\{ \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \nabla \cdot (v^2 h) \right\} = \rho_m g h \sin \theta - \nabla \cdot p - \tau \quad \text{식 (2.5)}$$

- 질량보존의 법칙을 만족하는 흐름의 연속식인 식(2.1) 및 식 (2.2)과 운동량 보존을 만족하는 운동방정식인 식 (2.5)를 지배방정식으로 하여 토사-유체 혼합물의 유동 해석

(다) 단일재해 기본모형

① 수치해석

- 시간 변화에 대하여 효율적 분석을 할 수 있는 유한차분법(Finite Differential element Method)을 이용하여 지배방정식 식(2.5)를 수치모델에 적용
- 토사-유체 혼합물의 단위폭당 유량과 유속은 수치 시뮬레이션 격자의 선상에 배치하였으며, 단위폭당 유량과 유속에 의하여 영향을 받는 토사체적농도와 수심은 격자의 중앙에 배치
- <그림 2-15>은 본 수치모델의 Diagram을 나타냄.



<그림 2-15> 토사-유체 혼합물 유동의 수치 시뮬레이션을 위한 Diagram

- <그림 2-15>을 참조하면, Channel상에서의 위치 격자는 10cm를 기준으로 해서 I 로 표시하였고 다음과 같음

- (a) 소단을 갖지 않는 Channel (직선 Channel)

a. $\sum_{\theta_1}^{Total} I = 80$; 수치계산을 위한 Channel 상에서의 전체 지점 수

b. (b) 소단을 갖는 Channel

c. $\sum_{\theta_2}^{상류부 전체} I = \sum_{\theta_2}^{모래포설부분} 30 + \sum_{\theta_2}^{상류부} 20 = 50$; Channel 상에서의 전체 상류부 지점 수(모래포설 지점 + 나머지 상류부)

d. $\sum_{berm} I = 5 \sim 15$; Channel 상에서의 소단의 지점 수 (5~15 지점)

e. $\sum_{\theta_2}^{하류부} I = 20$; Channel 상에서의 하류부 전체 지점 수

f. $\sum_{\theta_1}^{Total} I = 75 \sim 90$; 수치계산을 위한 Channel 상에서의 전체 지점 수

② 시간에 따른 입력조건

- 유한차분 수치모델은 시간 변화(Δt)에 대한 적용이 필수적.

- 수치계산을 수행하는 데 있어서의 시간 레벨을 설정

- 시간에 따른 수치모델 입력조건을 구분시

a. 유량의 공급시간(t_1)

b. 연속방정식 및 운동량 방정식의 수치모델의 계산수행 시간(t_2)

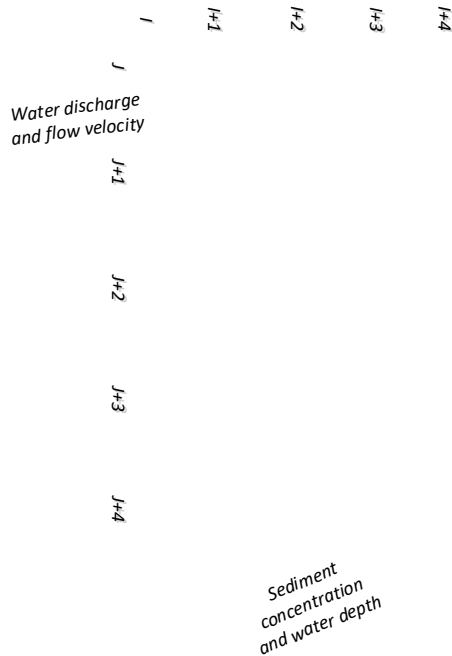
c. 토사-유체 혼합물의 유동체가 하류단 또는 특정위치에 도달한 이후의 계산 시간(t_3)

d. 수치모델이 계산을 수행하는 시간 간격(t_4)

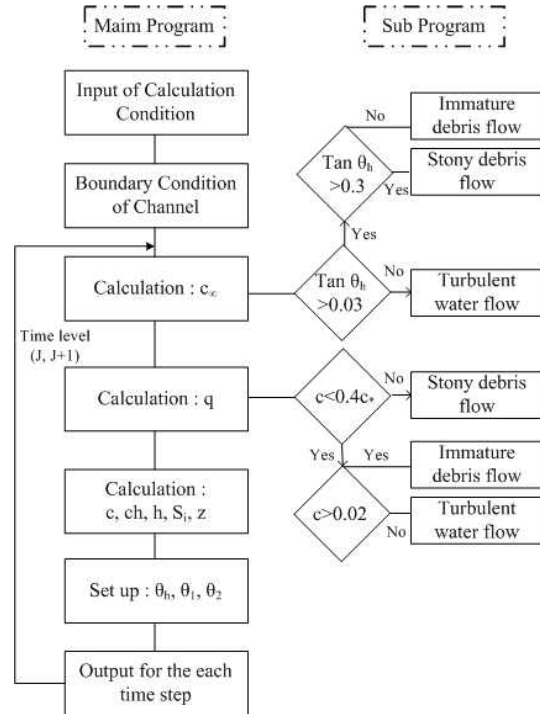
e. t_4 는 선형적으로 되는 일정 시간 간격

제2장 연구수행내용 및 성과

- 시간에 따른 본 과제의 수치모델에서는 4가지의 레벨을 갖는 시간항에 대하여 다양한 입력값을 적용함
- 위치격자에서의 토사-유체 혼합물의 거동을 재현
- <그림 2-16> 는 위의 Channel 상에서의 격자와 유량, 유속, 유동심에 대한 항과 시간 항에 대한 것을 잘 나타냄



<그림 2-16> 수치계산을 위한
입력조건 항의 격자위치



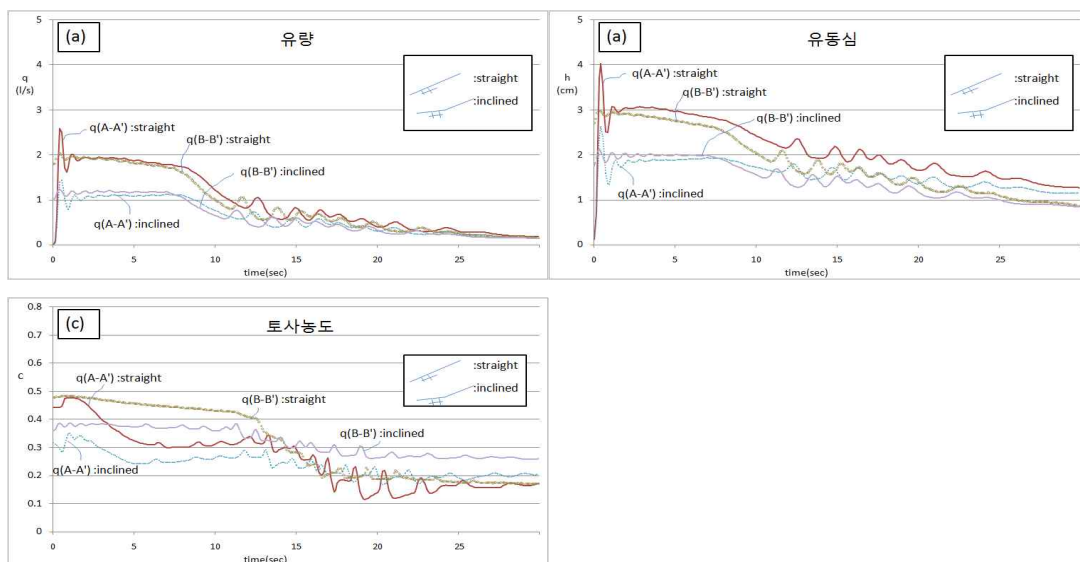
<그림 2-17> 컴퓨터 계산을 위한 플로우
차트

③ 수치계산을 위한 플로우 차트

- 본 과제 수치모델은 <그림 2-17>의 컴퓨터 계산 플로우 차트의 과정을 통해서 적용됨
- 재해 유형별 파라미터의 적용
- 재해 유형별 파라미터에서 선정된 파라미터들이 컴퓨터 수치계산의 입력조건으로서 선정됨
- 메인 프로그램 - 각각의 입력조건에 대해서 토사-유체 혼합물의 발생 가능량, 토사체적 농도, 토사-유체 혼합물의 유동심이 계산됨
- 부 프로그램
 - a. 수면경사 값에 따라 Stony 토사-유체 혼합물 유동, 소류사 집합 유동, Turbulent water 유동으로 나누어짐
 - b. 토사체적 농도 값에 따라 위의 3가지 분류로 나눌 수 있음

④ 수치분석

- 공급유량(태풍 카테고리, 강우강도의 집중호우 또는 강수 카테고리)변화에 대한 분석
- Channel 상에서의 변화(길이, 폭, 경사)에 따른 분석
- 토사입자의 재질의 변화에 따른 분석
- 분석 카테고리 선정



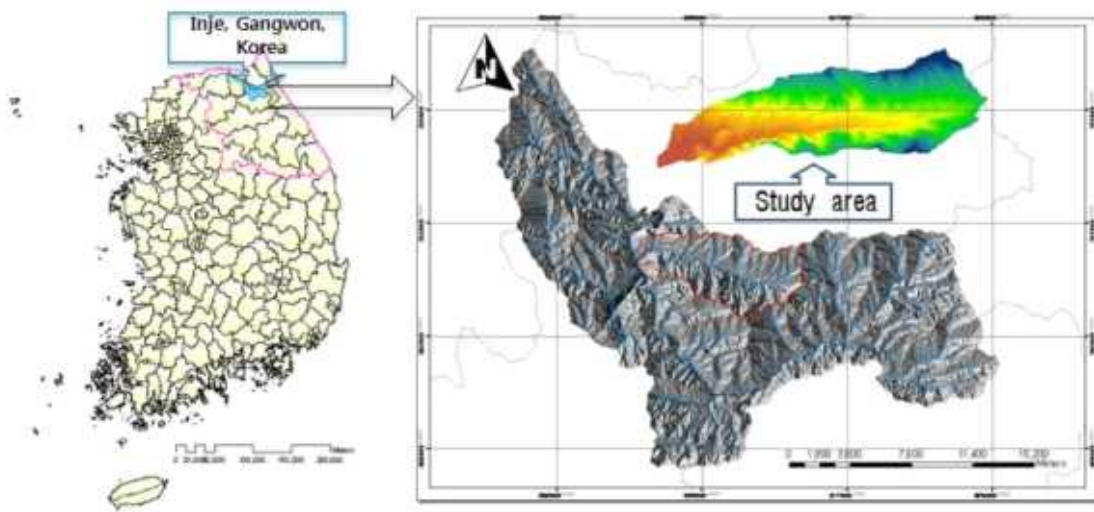
<그림 2-18> Channel 하류부에서 시간에 따른 유량변화, 유동심, 토사농도

(2) 프로그램 개발 기술현황

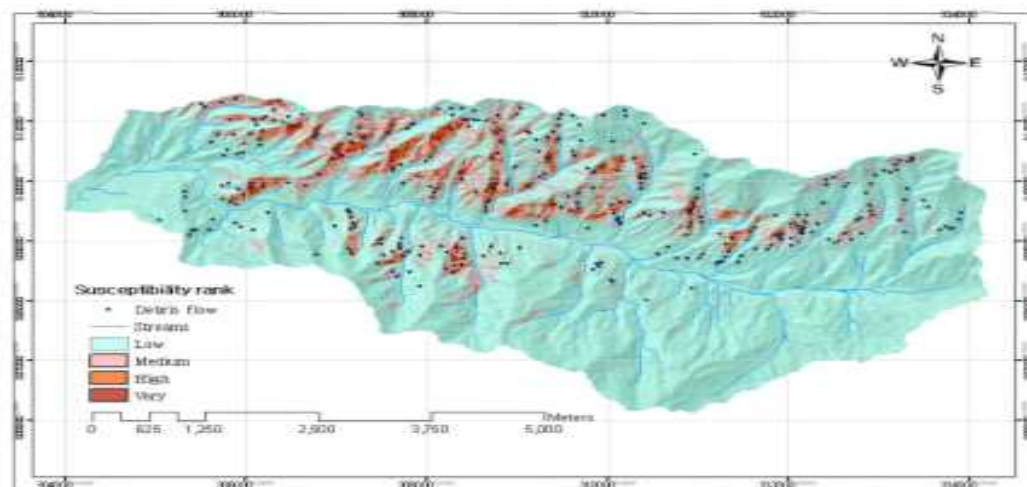
(가) 자연재해 파라미터

① 태풍의 파라미터 설정

- 토사재해의 예측 가능량의 설계를 위해서는 태풍의 파라미터와 그에 의한 카테고리가 설정되어야 함
- 초기계획 Data: 피해지역의 가장 안 좋은 상황을 가정함
- GIS와 Doppler radar를 이용하여 강우 강도 및 태풍의 눈의 정확한 트랙을 정의
- <그림 2-19>는 GIS를 이용한 현장 또는 연구영역 및 음영지도의 수치지도를 나타내며, <그림 2-20>은 산지재해 지역에서의 산사태 또는 토석류와 같은 토사재해의 민감도 지수를 수치지도로 나타낸 것

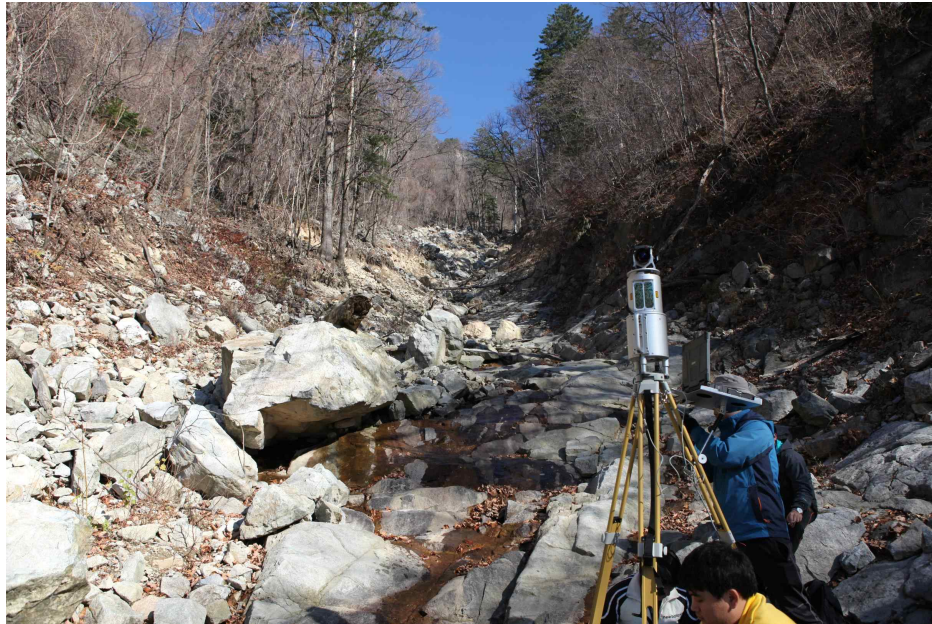


<그림 2-19> GIS를 이용한 연구영역 및 음영지도



<그림 2-20> GIS를 이용한 산사태 및 토석류 민감 지수지도

- <그림 2-21>은 토사재해 지역 또는 토사재해 발생 가능 지역에서 수치지도를 작성하기 위해서 Lidar를 이용한 현지관측을 하는 모습이며, 장소는 설악산



<그림 2-21> Lidar를 이용한 현지관측(설악산)

- 태풍의 경로 및 태풍의 눈으로부터 5-mile 폭의 밴드를 지역으로 설정하고 풍속을 측정(USACE의 허리케인 토사 예측 모델 이용)
- USACE에서 사용한 태풍의 카테고리 및 토사재해 발생 가능량
- <표 2-2>은 USACE에서 다양한 실험과 수치모의를 통해서 태풍 카테고리별 토사재해 발생 가능량을 나타냄
- USACE에서 사용한 폭풍카테고리 및 토사재해 발생가능량의 설정을 위해서는 다양한 파라미터의 가중치가 필요함

<표 2-2> 태풍 카테고리에 따른 토사재해 발생 가능량

태풍 카테고리	토사재해 발생 가능량
1	1.53 m ³
2	6.12 m ³
3	19.88 m ³
4	38.23 m ³
5	61.16 m ³

② 집중호우의 파라미터 설정

- 강우강도 식에 의한 강우의 정도를 설정(Caine(1980)이 North America의 데이터를 기초로 하여 초기 토사재해의 임계치값을 제안하였음 (식 (2.6))

$$I = 14.8D^{-0.39} \quad \text{식 (2.6)}$$

여기서, I는 강우강도(mm/hr), D는 강우지속시간(hr)

- Innes(1983)은 토사재해가 발생했을 때를 강우량-지속시간 관계 곡선으로 표시하여 식 (2.7)와 같이 나타냈음

$$T = 4.9355D^{0.5041} \quad \text{식 (2.7)}$$

여기서, T는 어떤 기간에서의 총 강우(mm)

- 강수의 집중도를 적용한 강수 카테고리 및 그에 따른 가중치
- 추후 토사재해 총 발생 가능량을 얻기 위하여 강수 카테고리 가중치는 태풍 카테고리에 의한 토사재해 발생 가능량에 ‘곱’을 하게 됨
- <표 2-3>는 강수의 집중도의 정도에 따라서 가중치 값을 설정한 것

<표 2-3> 강수 카테고리에 따른 가중치

강수 특성	가중치 값
NONE TO LIGHT	1.0
MEDIUM TO HEAVY	1.3

- 토사와 유체의 혼합물의 유동 특성은 3가지 이동 특성을 갖고 있는 데, 식 (2.8)~(2.10)와 같이 분류될 수 있음(Nakagawa 등, 2003)

a. $\tan\theta_h \geq 0.138$ 의 경우 : 토사-유체 혼합물 이동

$$c_\infty = \frac{\rho_s \tan\theta_h}{(\sigma - \rho_s)(\tan\psi - \tan\theta_h)} \quad \text{식 (2.8)}$$

b. $0.03 < \tan\theta_h < 0.138$ 의 경우 : 소류집합유동

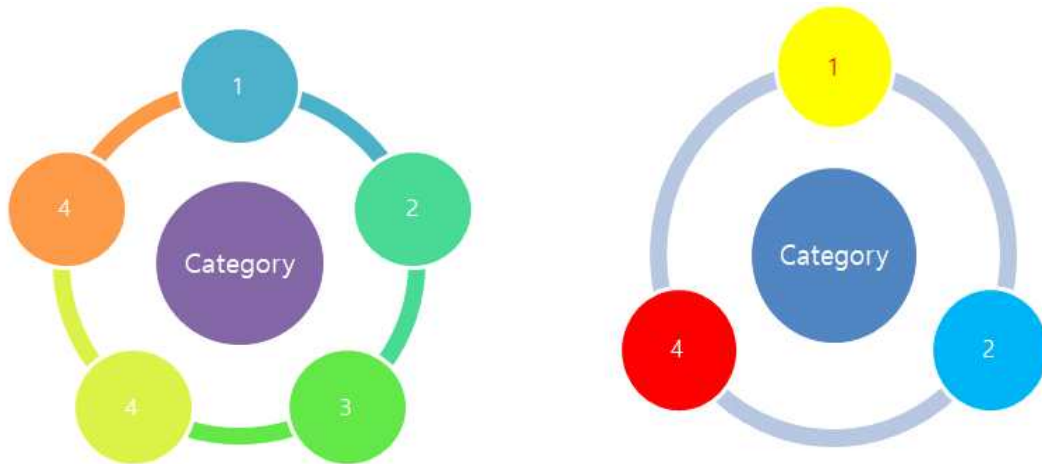
$$c_\infty = 6.7 \left\{ \frac{\rho_s \tan\theta_h}{(\sigma - \rho_s)(\tan\psi - \tan\theta_h)} \right\}^2 \quad \text{식 (2.9)}$$

c. $\tan\theta_h < 0.03$ 의 경우 : 소류 이동

$$c_\infty = \frac{(\tan\theta_h + 5 \tan\theta_h^2)}{(\sigma/\rho_s - 1)} \left(1 - \delta^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{\delta^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \quad \text{식 (2.10)}$$

여기서, θ 는 하상경사, σ 는 퇴적물 입자의 밀도

- <그림 2-22> 재해 모의 전 수치 계산을 통해서 태풍 카테고리 및 집중호우 카테고리의 통합적 설정.



태풍 카테고리

집중호우 카테고리

<그림 2-22> 계산식, USACE방식, 수치해석으로 태풍 및 집중호우에 대한 통합 카테고리 설정

(나) Numerical Calculation에 의한 요인특성

① 계산식에 의한 설정

- 침식 또는 퇴적 속도식 식(2.11), (2.12)

$$\eta = \epsilon \frac{c_{\infty} - c}{c_* - c_{\infty}} \frac{q}{d_m} \quad (\text{침식}) \quad \text{식 (2.11)}$$

$$\eta = \epsilon' \frac{c_{\infty} - c}{c} \frac{q}{d_m} \quad (\text{퇴적}) \quad \text{식 (2.12)}$$

여기서, η 는 침식 또는 퇴적속도, c 는 유체-토사 혼합물에 있는 토사입자의 체적농도, c_* 는 하상에서의 최대토사농도, q 는 단위폭당 유량, c_{∞} 는 토사-유체 혼합물의 평형농도, $\epsilon = 0.0007$, $\epsilon' = 0.01$

② Landslide rates of movement

- 토사-유체 혼합물의 이동 및 카테고리 설정
- 토사-유체 혼합물의 카테고리 설정을 통하여 가중치 부여
- 이는 토사-유체 혼합물의 퇴적 또는 침식 속도 식인 식 (2.11)과 식(2.12)의 결과를 토대로 이동속도의 카테고리 설정 <그림 2-23>
- 이를 바탕으로 토사재해의 발생 가능량의 어느 정도 영향을 미치는지를 분석하고, 발생 가능량에 대한 가중치의 설정

Movement Rate	Velocity Class	Velocity Limits	Rate (mm/sec)	Debris Flow Range
Extremely rapid	7	5m/sec 3m/min 1.8m/hour 13m/month 1.6m/year 16mm/year	5×10^3	
Very rapid	6		50	
Rapid	5		0.5	
Moderate	4		5×10^{-3}	
Slow	3		50×10^{-6}	
Very slow	2		0.5×10^{-6}	
Extremely slow	1			

<그림 2-23> 토사-유체 혼합물의 이동특성

③ 피해 현장특성에 대한 파라미터 설정

A. 현장파라미터의 분류

- Geological Parameter :

- Superficial and underlying condition
- Structural control(bedding and dip)
- Drift location and thickness
- Grading
- Rockhead profile
- Weathering
- Permeability
- Cohesion
- Grain size
- Pore pressure
- Soil properties
- Scale
- Glacial history
- Moisture content

- Geomorphic Parameter:

- Slope angle
- Slope aspect
- Slope height
- Instability features
- Paleo-landforms
- Stream issues
- Hydrological

- h. Breaks in slope
- l. Proximity of toe to carriageway
- j. Rock outcrops
- k. Natural barriers

B. 재해유형별 모의를 위한 파라미터 조건(현장의 지형조건)

- 수치시뮬레이션을 위한 파라미터로서 공급유량(강우강도식에 의한 강수)과 지속시간 Channel의 길이, 폭, 경사를 식으로 나타냄(Roughness : 토사재해에 관련된 Manning의 식, 식 (2.13))

$$\tau_b = \frac{\rho g n^2 u |u|}{h^{1/3}} \quad \text{식 (2.13)}$$

여기서, τ_b 는 저면 전단력, u 는 흐름의 단면평균 유속, ρ 는 물의 밀도, h 는 수심, n 은 Manning의 조도계수

- <그림 2-24>는 재해 유형별 모의를 위한 지형조건으로서 모두 입력값에 해당하며, 각 항의 내용은 위의 파라미터 항에서 각 지역별 특성치를 입력하는 것을 나타냄



<그림 2-24> 재해 모의를 위한 입력 파라미터(지형조건)

C. 재해유형별 모의를 위한 파라미터 조건(현장의 지역조건)

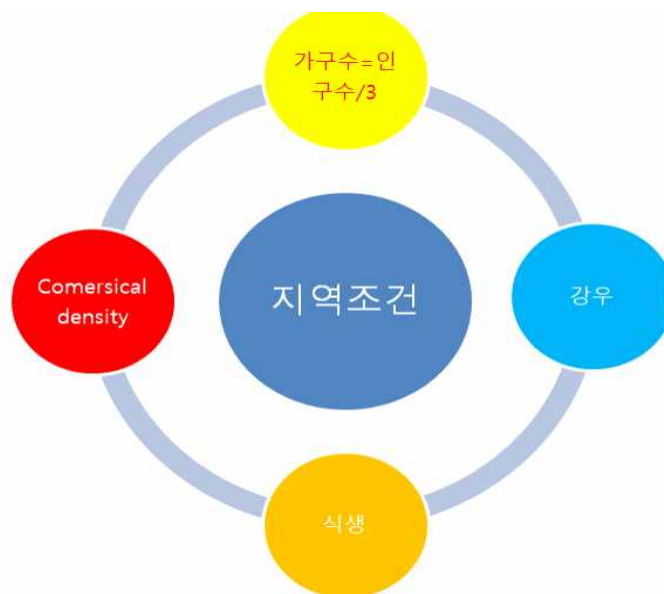
- 토사 재해 발생 가능량에 대한 가중치를 부여하기 위한 파라미터를 나타냄
- a. 취약성 인자로서 가구수(=인구수/3 또는 수치재해 지도상에서의 건물수로 구분할 수 있음)
- b. 식생 (Afforestation, Deforestation, Ground coverage, Type)
- c. <표 2-4>는 식생정도에 따른 가중치 값을 나타냄

<표 2-4> 식생 카테고리에 따른 가중치

Vegetative Cover	가중치 값
LIGHT	1.1
MEDIUM	1.3
HEAVY	1.5

d. Commercial Density (Agriculture, Forestry, Communities, Infrastructure, Utilities)

- <표 2-4>는 피해가능지역 특성에 대한 Commercial density의 가중치를 나타낸 것
- <그림 2-25>는 재해 모의 입력 파라미터로서 지역조건에 해당하고, 각 조건에 대한 입력값은 <표 2-4>에 나타냄



<그림 2-25> 재해 모의를 위한 입력 파라미터(지역조건)

D. 복합재해의 확산 파라미터

a. 재해확산의 파라미터

- Runout length: 식은 다양한 경험식이 제안되고 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다. (식 (2.14) ~ (2.17))

$$R = 8.6 (V \tan \theta_u)^{0.42} \quad \text{식 (2.14)}$$

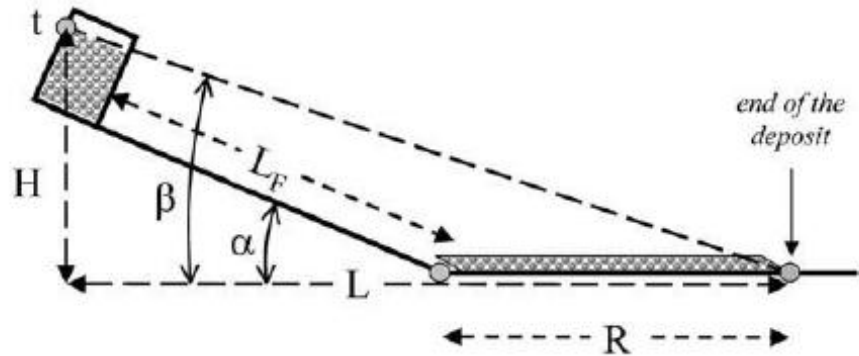
$$R = 25 (V)^{0.3} \quad \text{식 (2.15)}$$

$$R = 15 (V)^{1/3} \quad \text{식 (2.16)}$$

$$R = \omega \Delta H \quad \text{식 (2.17)}$$

여기서, R은 Runout length를 나타내며, V는 debris flow volume, θ_u 는 퇴적 초기의 상류부 Channel의 각도, ω 는 경험상수, ΔH 는 elevation difference

- <그림 2-26>은 복합재해 확산 파라미터를 도시화 함



<그림 2-26> 재해 모의를 위한 입력 파라미터(지역조건)

- The mobility ratio(H/L): 여러 연구자들에 의해서 제안되었으며, 식 (2.15)로 나타낼 수 있고, 식 (2.15)는 Zimmermann et al. (1997)이 제안함

$$(H/L)_{\min} = \tan \beta_{\min} = 0.20 (A_c)^{-0.26} \quad \text{식 (2.18)}$$

여기서, H는 Potential mass energy and total drop, L은 상류에서 하류까지 runout 거리 + 하류 이후의 확산 거리, β 는 상류에서 전체 이동 거리까지 경사각도, A_c 는 Catchment area

- Traveling distance : 식 (2.19)로 나타낼 수 있고, Rickenmann (1999)이 제안함

$$L = 1.9 V^{0.16} H^{0.83} \quad \text{식 (2.19)}$$

- Dynamic methods에 의한 R의 결정 : Hunger et al. (1984)와 Takahashi (1991)이 제안하였고, 식 (2.20)으로 나타냄

$$R = \frac{\{u_u \cos(\theta_u - \theta_d) [1 + (gh_u \cos \theta_u) / (2u_u^2)]\}^2}{g (S_f \cos \theta_d - \sin \theta_d)} \quad \text{식 (2.20)}$$

여기서, u_u 는 초기속도, θ_d 는 퇴적면적을 따른 경사각도, θ_u 는 초기 Channel 경사 각도, h_u 는 초기유동심, S_f 는 the friction slope

(3) 간편모형 개발

(가) 재해유형 Coupling을 이용한 복합재해 구현

- ① 단일 모형을 이용한 재해유형별 그룹핑
- ② 재해유형별 그룹핑 선정(3그룹)

A. 집중호우 + 토석류

- 2011~2014년 기준 태풍이 지나가지 않았던 2013년도를 제외하고 태풍의 이동경로 및 영향 범위가 사면재해(토석류, 산사태 등) 발생위치와 유사하게 나타남.
- 전체 사면 재해 185건 중 77건이 토석류
- 태풍이 우리나라를 가로질러가거나 서해 가까이 지나가서 위험반경 안에 들어갔을 때 토석류 재해가 가장 많았음.
- 산사태 및 토석류 발생지점에서의 지형학적 특성차이 분석
- 집중호우 발생 빈도는 70년대 평균 5.1회, 200년대 평균 12.3회로 약 2.4배 증가하였음.
- 2006년 강원도 진부지역에서의 토석류가 발생하였는데, 산림청 예보기준 산사태주의보에 해당하는 집중호우가 발생하였음.
- 2006년 강원도 인제지역에서 또한 집중호우에 의한 토석류 발생
- 지역적으로 매우 편중(인제, 양양, 평창)
- 시간적으로 매우 강한 강우강도 1~6시간 동안 500년 빈도 정도의 강우 발생.
- 국지성 집중호우로 인하여 지역별 강우량의 차이가 매우 크며, 피해가 일부지역에 집중적으로 발생하는 특성을 보였음<표 2-5>와 <표 2-6>, 이철주 등(2009)).

<표 2-5> 인제지역 강우발생 현황 (단위:mm)

날짜	평균	인제읍	남면	북면	기린면	서화면	상남면
06.07.12	143	166	165	151	136	83	157
06.07.13	33	9	56	8	41	3	84
06.07.14	31	61	13	48	20	30	14
06.07.15	163	174	191	176	194	135	111
06.07.16	106	110	123	94	105	79	127
06.07.17	147	135	174	128	179	90	175
계	623	655	722	605	675	420	668

<표 2-6> 인제 한계령지역 시간별 최대 강우량 및 강우강도 (2006.07.14.~07.20) (단위:mm)

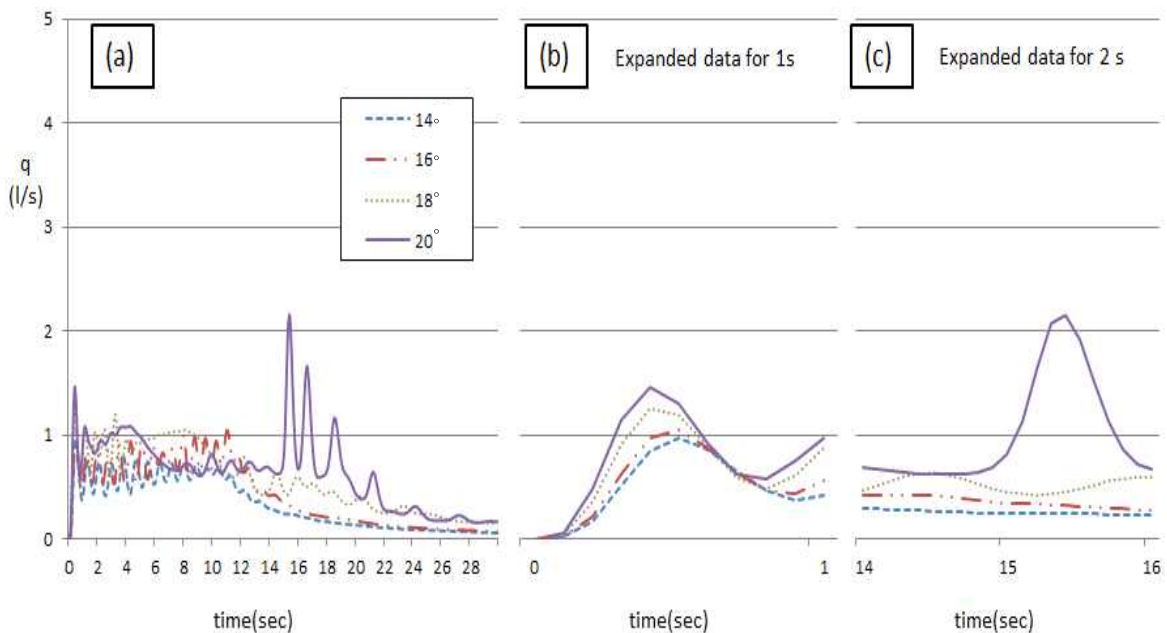
	1시간	3시간	6시간	12시간	24시간
강우량	113.5	241.0	265.0	288.0	355.0
강우빈도	500년	500년	500년	80년	80년

제2장 연구수행내용 및 성과

- 3일간 약 200mm 이상 집중호우로 자연사면에 많은 빗물 유입, 약 52시간동안 약 300m 집중 호우 내림. 총 500m 이상의 폭우가 내렸음.
- 이에 따라 자연사면 지반의 전단강도를 초과하는 전단응력이 발생하여 사면하부로 산사태 발생.
- 인제군 남면의 경우 총 722mm의 최대강우량 발생.
- 한계령 지역에는 최대시우량 113.5mm/hr 집중호우 발생.

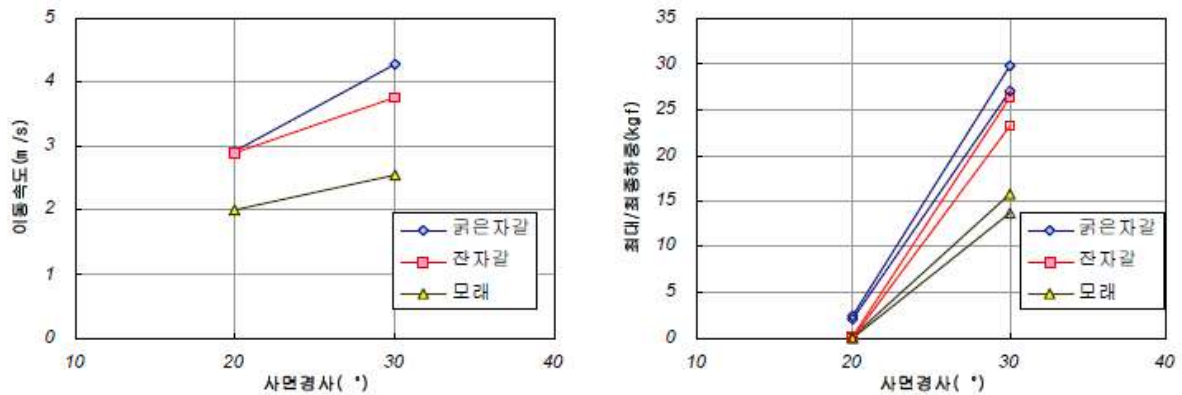
B. 급경사지 + 토석류

- 평행형 급경사지의 토양환경에서 경사면 변화에 따른 토석류 유동층의 해석이 필요함.
- 하상경사가 급할수록 토석류 유량이 상승하며, 상승시간이 더 오래 지속, 토석류 유량의 침 두값 및 고유량의 파동이 발생<그림 2-27>.
- 하상경사가 급할수록 토사농도의 급격한 상승, 토사농도의 변곡점 나타남.
- 공급유량을 증가시킨 경우, 발생초기의 토석류 유량의 2배 이상이 되는 침두값과 파동이 나타났고, 침두값의 발생이 빨라짐, 유동심은 그래프에서 파형경사가 더 급하게 나타났고 토사 농도는 공급유량의 증가로 인해 토사농도 변곡점이 발생하는 시점이 빨라졌으며, 더 낮은 단계의 하상경사에서도 변곡점이 발생하였음.



<그림 2-27> 급경사지의 경사각도에 따른 토석류 유량

- 사면경사에 변화에 따른 토석류의 거동분석에서 사면경사가 20도에서 30도로 증가할수록 이동속도는 모래는 27.6% 증가, 잔골재는 30% 증가, 굵은골재는 47% 증가. 입경이 커질수록 증가폭은 더 커짐.
- 사면경사에 따른 충격특성 실험결과, 지반구성물질에 대한 최대/최종 하중은 모래와 비교하여 굵은 골재 89% 잔골재 68% 증가<그림 2-28>, 박병수 등(2010)).



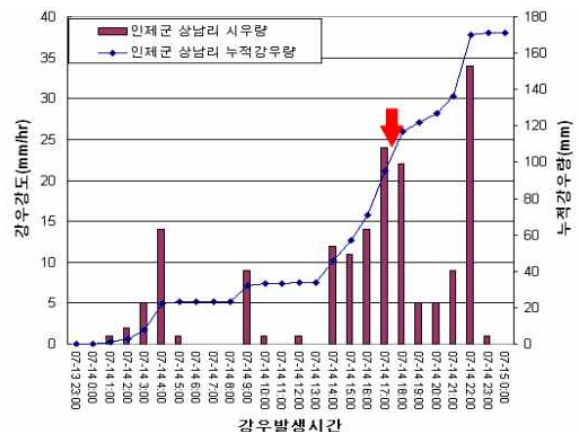
<그림 2-28> 사면경사에 따른 이동속도 분포 및 최대/최종하중 분포

C. 집중호우 + 급경사지 + 토석류

- 최근 엘리뇨, 슈퍼태풍 등으로 강우량이 매우 많고 예측이 어려움. 이 때 경사가 급한 산지에서 토석류 발생시 에너지가 매우 클 것임.
- 급경사지에서의 집중호우는 토석류 발생 확률을 상당히 높이며, 토석류 유량, 토석류 유동심, 토사체적 농도의 변화를 급격하게 발생시킴.
- 집중호우에 의한 토석류 및 비탈면 붕괴 사례 분석에서 2013년 강원도 횡성에서 장기간에 걸친 호우로 지반이 포화되어 있는 상태에서 집중호우로 인하여 급경사지 붕괴 및 토석류가 발생하였음.
- 급경사지에서 2009년 7월 14일에 일일강우량 171mm/day 일때 토석류가 발생하였고, 발생 전까지의 누적강우량은 526mm/day로 기록<그림 2-29>(a).
- 토석류 피해 당일의 시간강우량과 누적강우량을 나타내는 그래프로, 최대시간강우량은 34mm/hr이었으며, 171mm/day의 강우가 사실상 8~9시간만에 집중적으로 쏟아졌음을 알 수 있음. 선행강우량에 의한 누적강우량의 증가와 집중호우로 인한 시간당 강우량의 급격한 증가로 토석류가 발생한 것으로 알 수 있음<그림 2-29>(b), 최준식 등(2010).

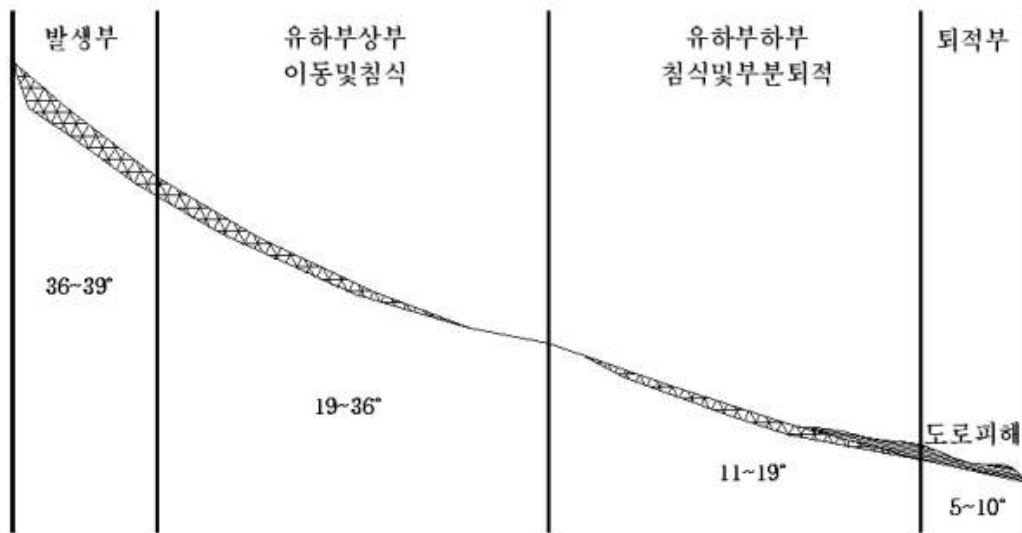


(a) 일일강우량 및 누적강우량



(b) 피해당일 시간강우량 및 누적강우량

<그림 2-29> 2009년 인제군 상남리 강우량



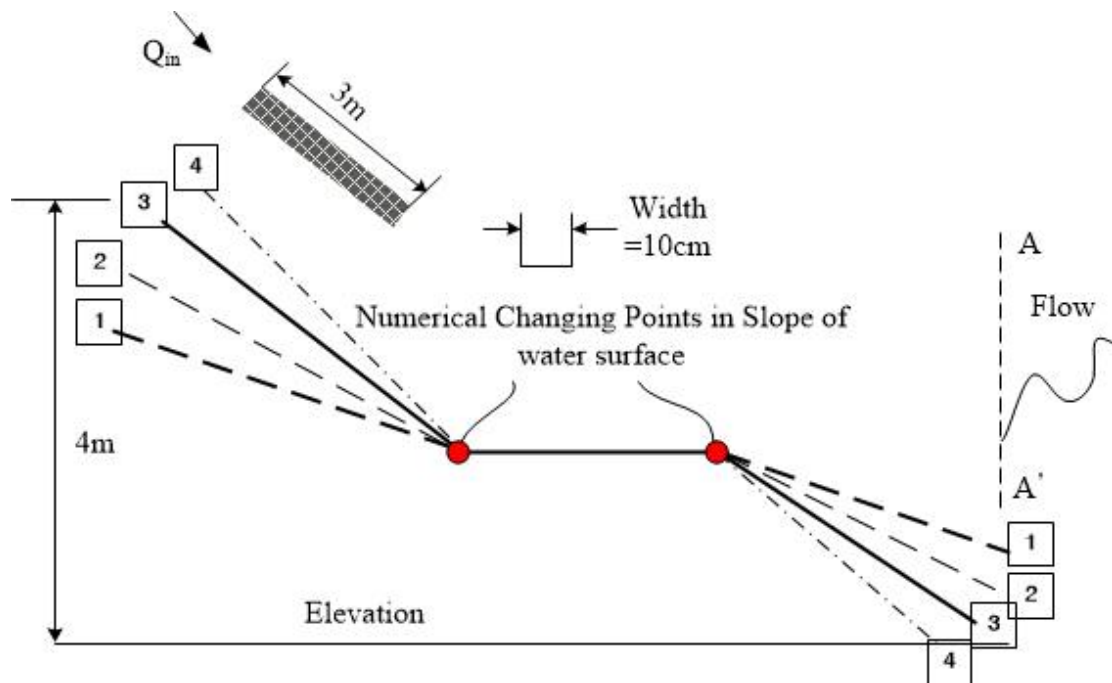
<그림 2-30> 상남리 토석류의 단계적 구분

- 급경사지 부근에서의 상남리 토석류의 단계적 구분<그림 2-30>
- 발생부
 - a. 발생부 사면은 부채꼴 형상을 나타내고 경사는 약 36~39도(일반적인 발생부 사면의 경사 25도)보다 큼
- 유하부
 - a. 유하부 상부 경사는 19~36도(일반적 15도이상), 유하부 하부 경사는 11~19도(일반적 15도이하)
- 퇴적부
 - a. 퇴적부 경사 5~10도

(나) 재해유형에 따른 Coupling을 이용한 복합재해 특성분석

① Coupling을 이용한 복합재해를 위한 최적의 수치모델 적용<그림 2-31>

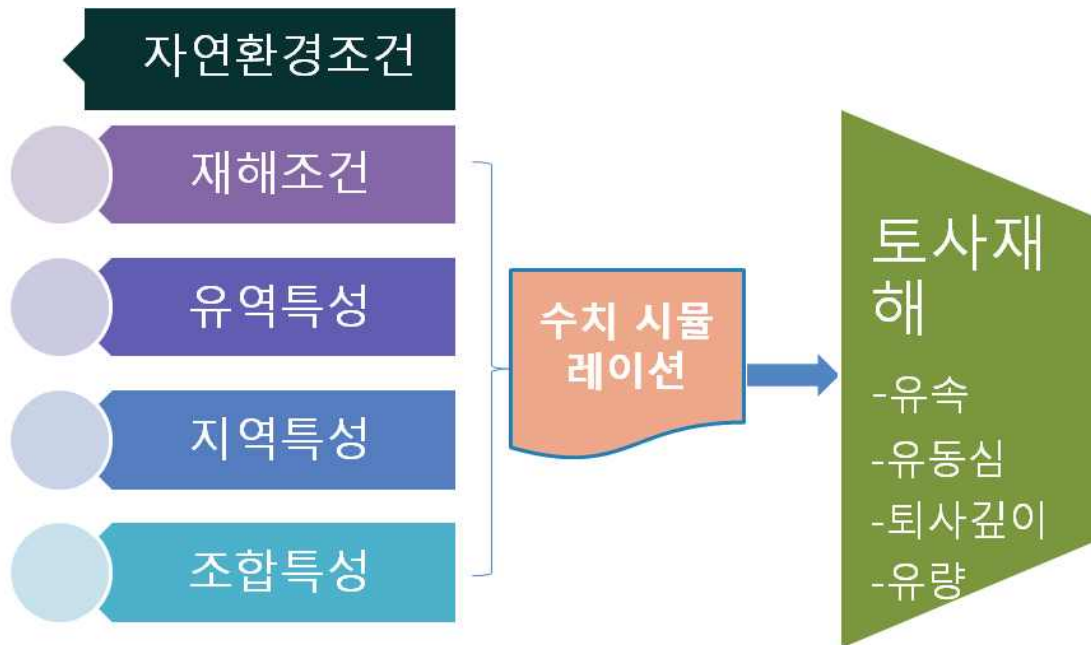
- 시간 변화에 대하여 효율적 분석을 할 수 있는 유한차분법을 이용하여 운동방정식을 수치모델에 적용함.
- 각각의 토사-유체 혼합물 특성에 따른 입자들을 수치모의 격자의 중심과 선상에 최적으로 배치.
- 수치실험 계산에 상용한 모래입자 밀도는 2.65 g/cm³, 최대토사농도는 0.65, 내부 마찰각의 값은 0.7로 설정.
- 표면 경사에서 수치계산 변화 지점을 기준으로 상류부 수로에서의 4가지 경사각도와 하류부 수로의 4가지 경사각도 설정. 이 때 각각의 경사각도는 2°씩 변화하며 설정.
- 경사지 상류부 구간은 전체 길이의 63%로 설정하고, 상류부 구간중 38%에 해당하는 구간에는 모래 포설. 평형구간은 전체길이의 13%, 경사지의 하류부는 25%로 구성.
- 경사지 상류부 모래가 포설된 위치에서 일정시간동안 유량을 공급하며, 공급유량의 변화에 대한 특성을 분석.



<그림 2-31> Coupling 이용한 복합재해를 위한 최적의 수치모델

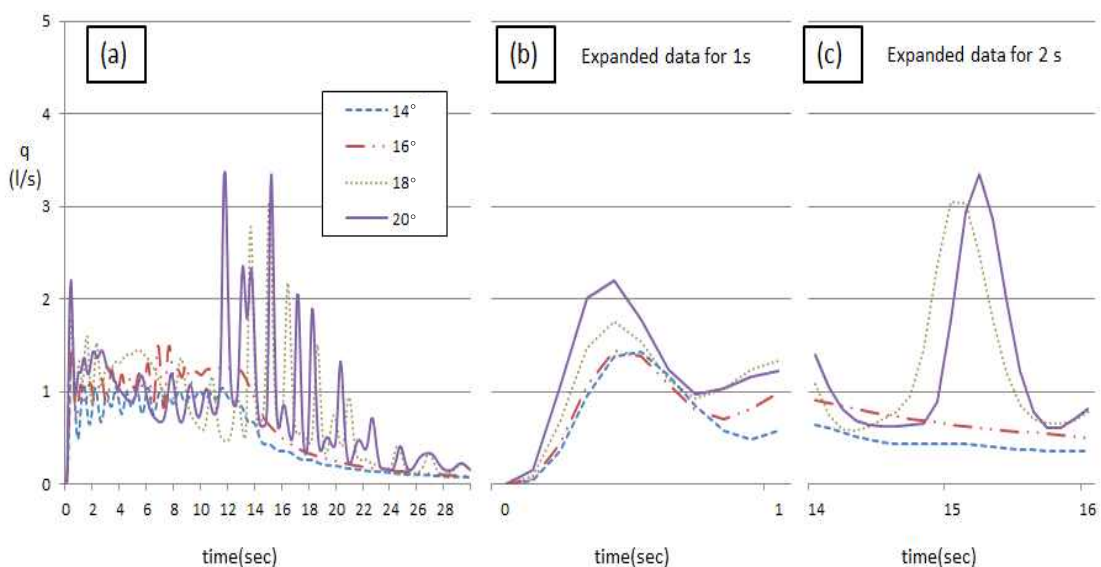
- 수치해석을 통한 다양한 재해 모의 및 확산범위와 유형 결정 및 규모의 선정(거리, 각도, 양)
- 재해유형에 따른 Coupling을 이용한 복합재해 특성분석을 위하여 수치모델의 입력값의 설정
 - a. 집중호우+토석류 : 강우강도, 공급유량, 강우지속시간, 토석류 발생가능성
 - b. 급경사지+토석류 : 급경사지 상류부 경사각도, 소단지역의 범위, 급경사지 하류부의 경사각도, 토석류 발생가능성
 - c. 집중호우+급경사지+토석류 : 강우강도, 공급유량, 강우지속시간, 급경사지 경사각도, 토석류 발생가능성.
- 단일 모형 프로그램 입력값과 연동되는 산지현장특성의 적용
 - a. 태풍 또는 집중 호우에 의한 강우의 지속시간
 - b. 유역의 형상 및 특성(길이, 폭, 경사, 높이)
 - c. Sediments의 특성 (퇴적 정도 및 입자 재질)
- 단일 모형 프로그램의 산지현장 특성과 연동되는 지역조건
 - a. 식생의 정도
 - b. 상업시설의 밀도
 - c. 인구수
 - d. 토사-유체 혼합물의 운동특성

- 자연환경 조건과 지역조건의 적용
- 수치시뮬레이션의 반복을 통한 토석류 재해의 특성분석



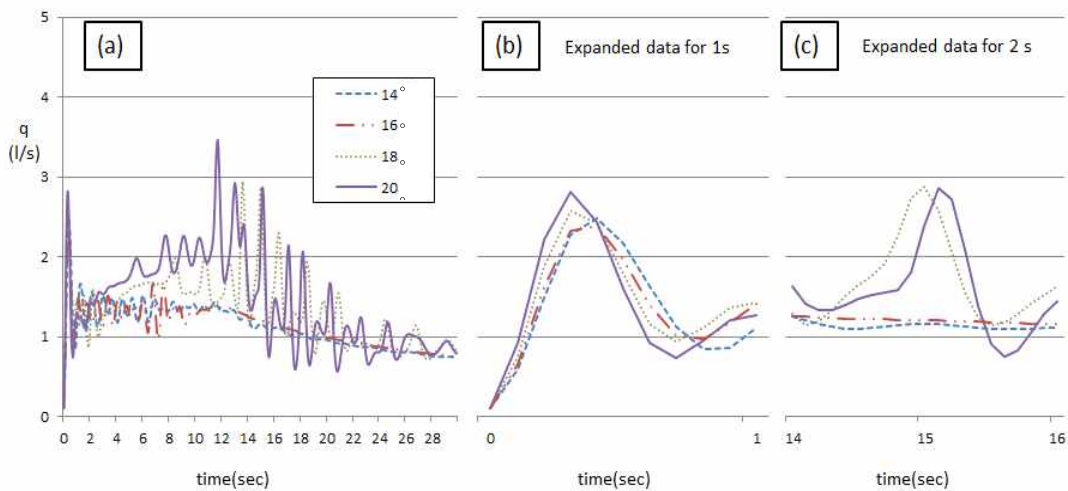
<그림 2-32> 자연환경조건 및 지역조건의 적용한 시뮬레이션

- ② 수치모의에 의해서 산출되는 토사-유체 혼합물의 거동(출력인자)의 특성
- 토사-유체 혼합물의 양<그림 2-33> : 집중호우의 변화 및 급경사지에서의 경사각도 변화에 따른 Coupling을 이용한 복합재해 특성분석(유량 + 토사량)((a): 전체 계산 시간 (b): 최초 토석류가 도달할 경우 토석류의 Peak가 나타나는 시간대에서의 확장 데이터 (c) 토석류의 fluctuation이 발생하며 토석류의 Peak가 나타나는 시간대에서의 확장 데이터)

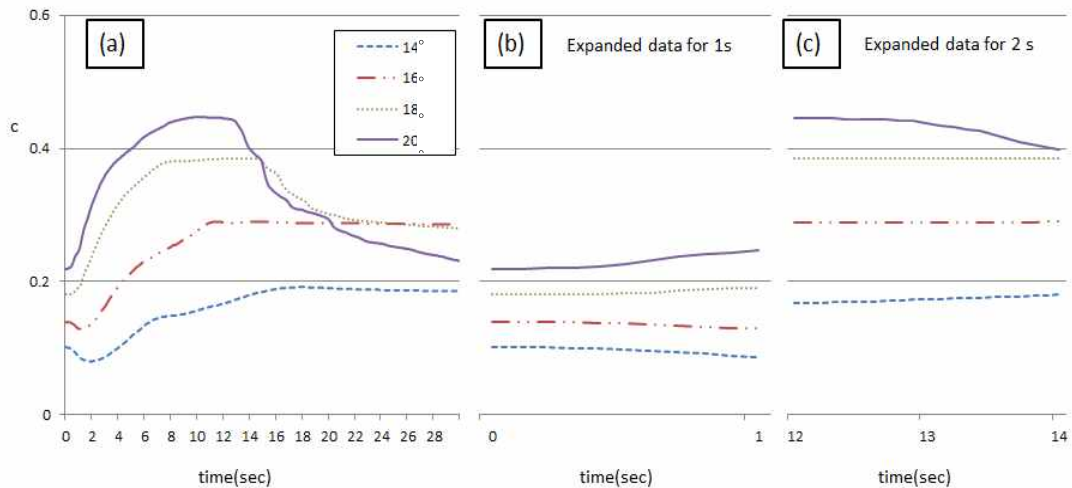


<그림 2-33> 집중호우 증가에 따른 급경사지에서의 토석류 유량의 변화

- 토사-유체 혼합물의 유동심과 토사체적농도의 결정<그림 2-34> & <그림 2-35> : 집중호우의 변화 및 급경사지에서의 경사각도 변화에 따른 Coupling을 이용한 복합재해 특성분석(유동심 + 토사체적 농도)((a): 전체 계산 시간 (b): 최초 토석류가 도달할 경우 토석류의 Peak가 나타나는 시간대에서의 확장 데이터 (c) 토석류의 fluctuation이 발생하며 토석류의 Peak가 나타나는 시간대에서의 확장 데이터)



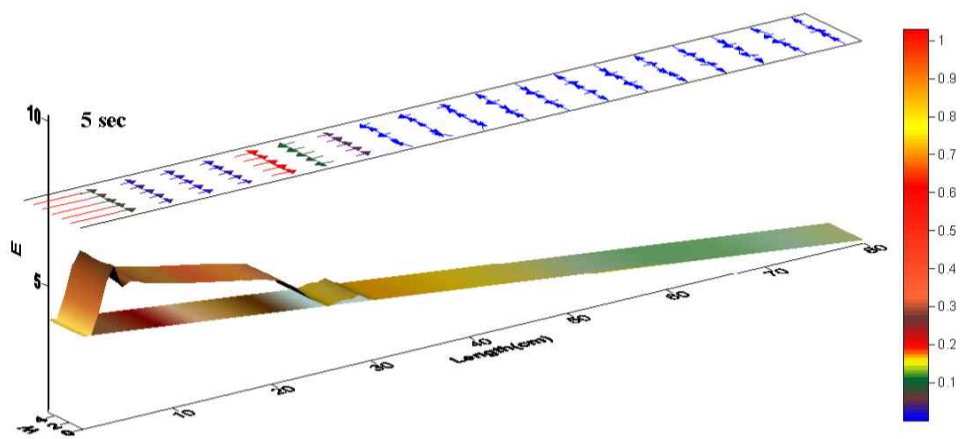
<그림 2-34> 집중호우 증가에 따른 급경사지에서의 토석류 유동심의 변화



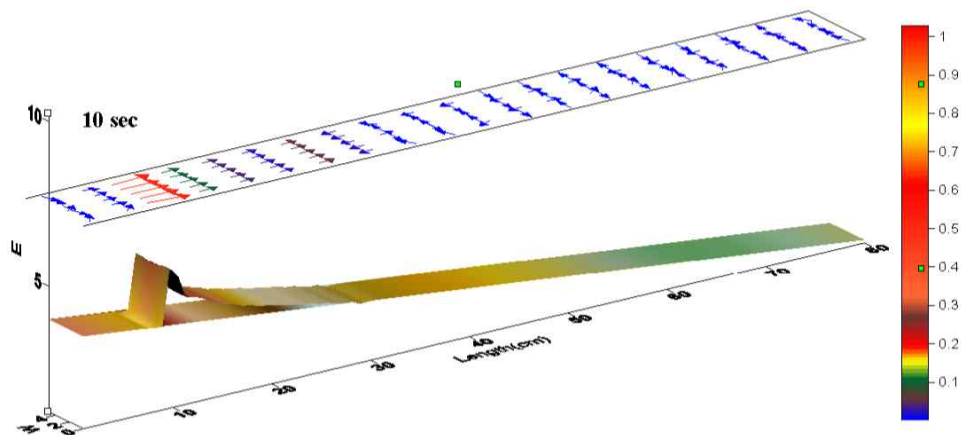
<그림 2-35> 집중호우 증가에 따른 급경사지에서의 토사체적 농도의 변화

제2장 연구수행내용 및 성과

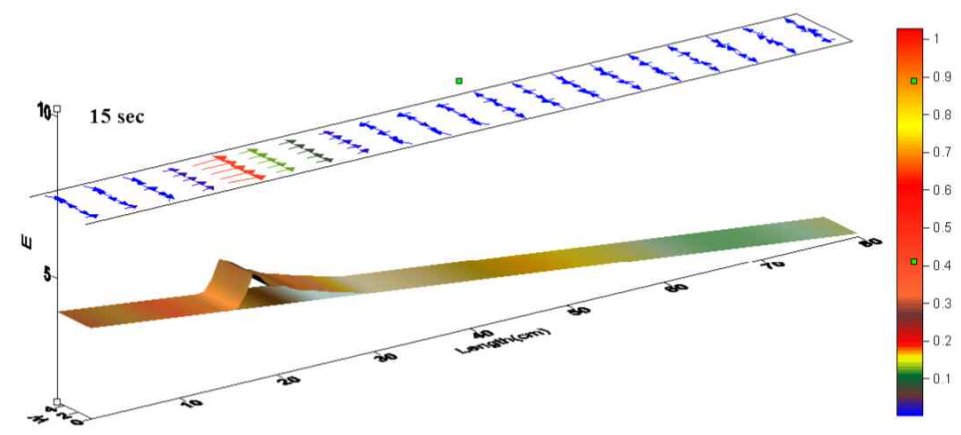
- 토사-유체 혼합물의 유속<그림 2-36>: 집중호우의 변화 및 급경사지에서의 Coupling을 이용한 복합재해 특성분석(유속)((a): 5초 (b): 10초 (c):15초 (d) 20초
- 집중호우가 가중 될 경우 최대침식 속도가 크게 나타났으며, 침식 및 퇴적의 변화 양상이 상대적으로 뚜렷이 나타나는 경향.
- 최대침식량 발생위치도 집중호우가 큰 경우가 좀 더 빨리 하류쪽으로 이동. 집중호우가 큰 경우에 토석류 발생량이 증가하여 중력의 영향을 더 크게 받아 더 빨리 이동.



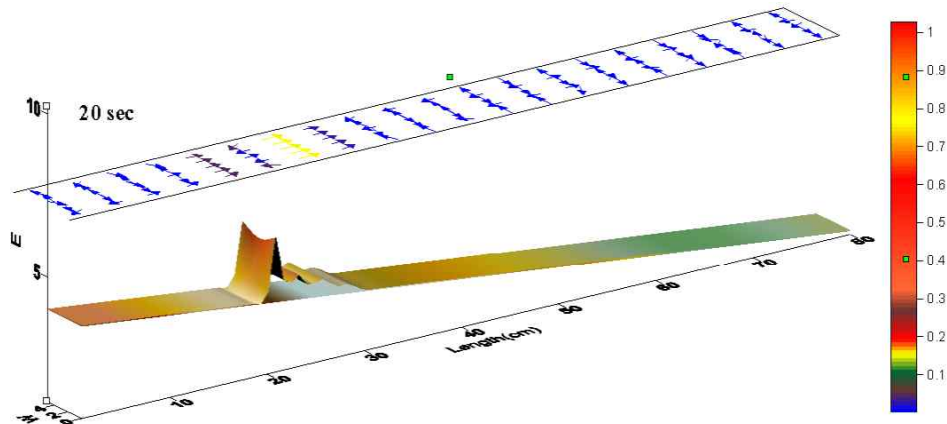
(a)



(b)



(c)

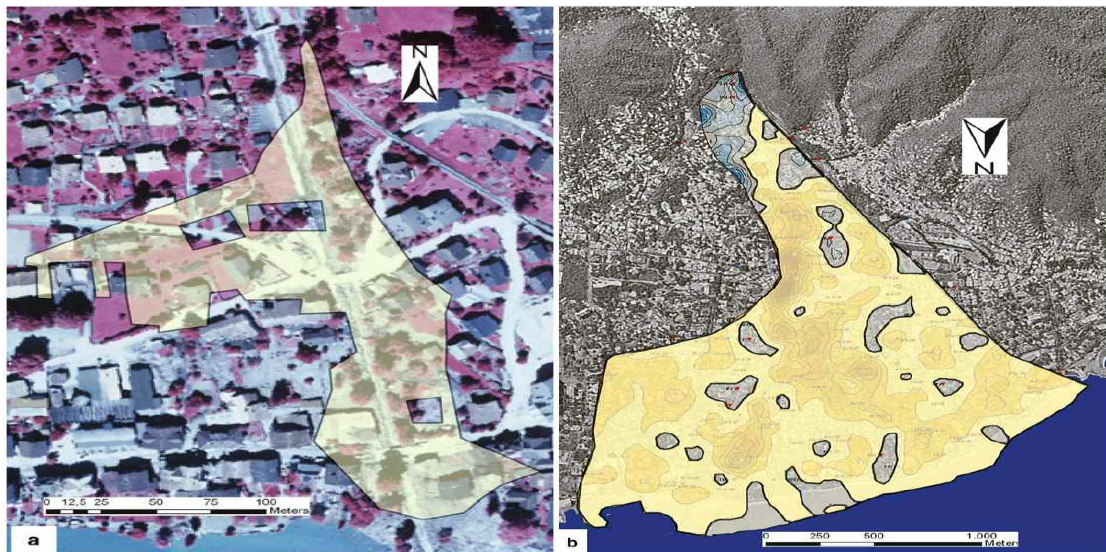


(d)

<그림 2-36> 집중호우 변화에 따른 침식 및 퇴적 속도벡터

(가) 복합재해에 따른 재해확산범위 유형결정

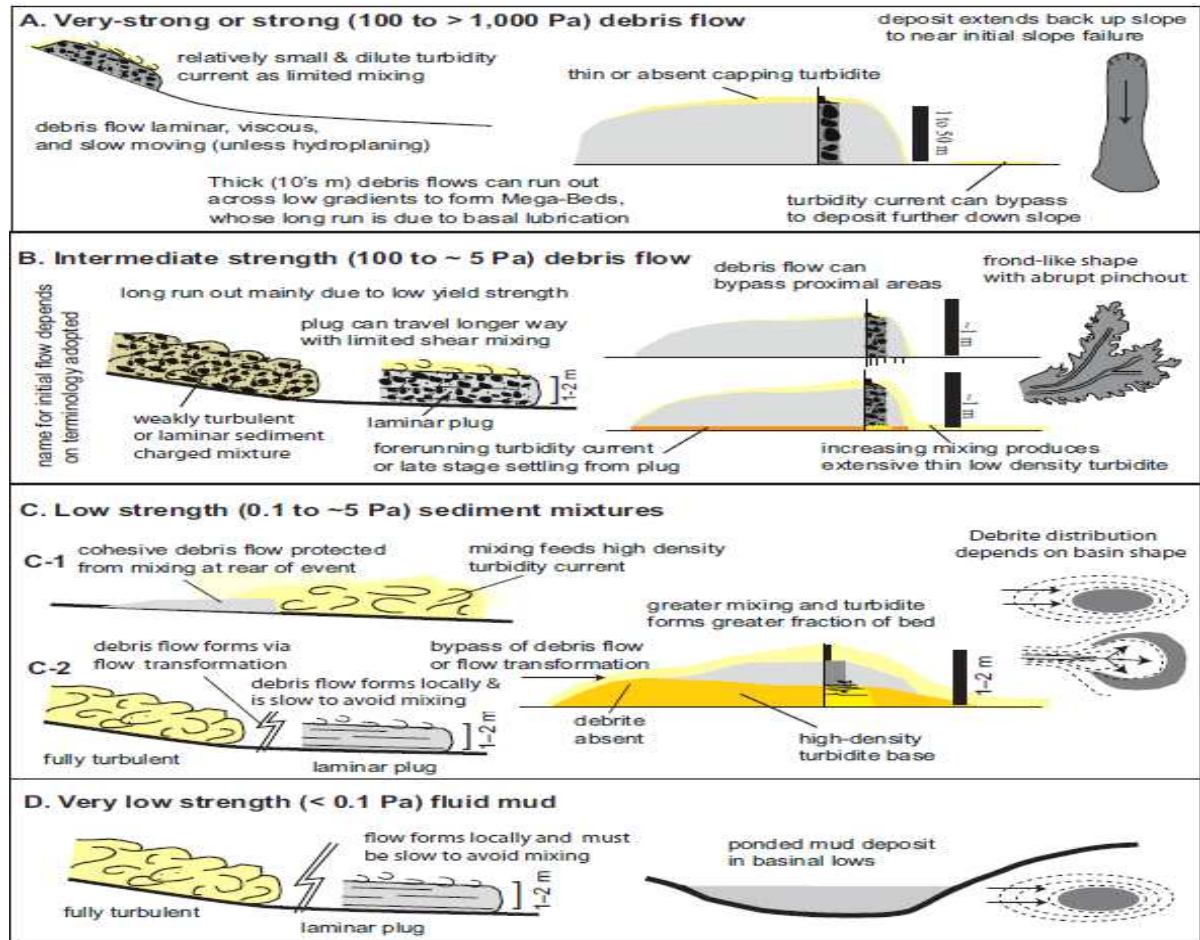
- ① 복합재해 확산유형 및 해석
- ㉠ 복합재해 확산 영향인자



<그림 2-37> (a) 2005년 8월 29~30일에 발생한 Trachtbach(스위스) 토석류.

(b) 1999년 발생한 Caraballeda(베네수엘라) 토석류

- 복합재해의 확산은 발달과정과 지형(산지, 호수, 바다 등) 및 인적 인프라(건물, 거리, 철도 등)에 영향을 받음- <그림 2-37> (a)의 경우는 건물의 영향을 받았고, (b)는 바다에 의한 영향을 받은 형태임
- 점착성 토석류가 복합재해 확산에 큰 영향을 미침



<그림 2-38> 점착성 토석류의 거동과 퇴적분석을 위한 일반화 모형

(A) 매우 강하거나 강한 점착성 토석류 (B) 중간 강도의 토석류

(C) 약한 강도의 토사 혼합물 (D) 매우 약한 mud형 유체

a. 매우 강하거나 강한 점착성 토석류(100~1,000 Pa)

→ 낮은 구배를 흐를 수 있으며, 퇴적물이 직선형태로 길게 이어짐

b. 중간 강도의 토석류(5~100 Pa)

→ 낮은 항복강도로 오래 확산하며, 퇴적물이 앞 모양으로 퍼짐

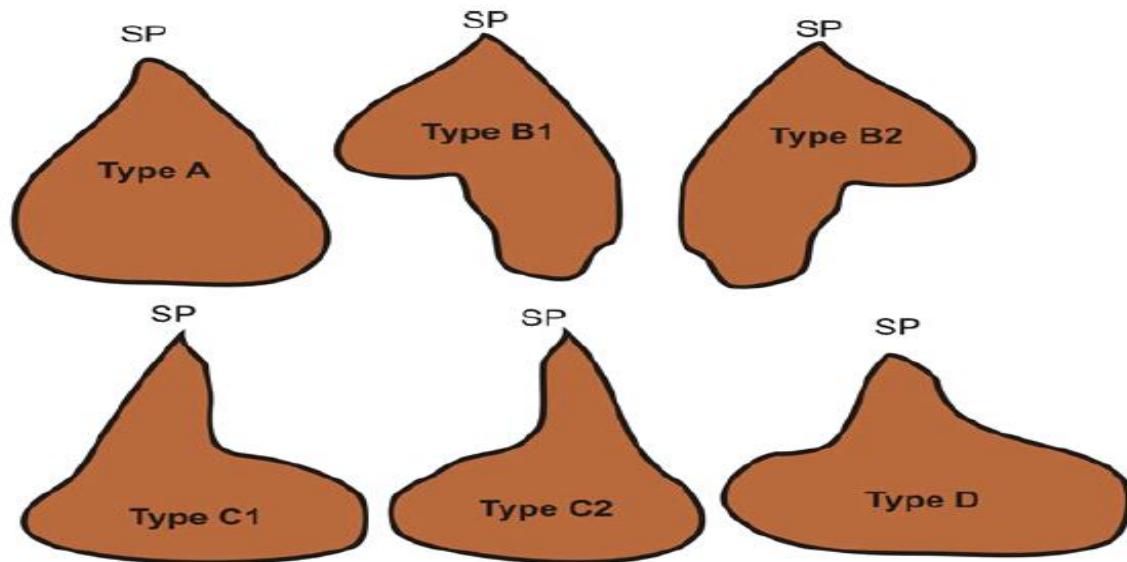
c. 약한 강도의 토사 혼합물(0.1~5 Pa)

→ 퇴적은 분지 모양에 따라 다르며, 더 많은 혼합과 탁류가 하상에 많은 층을 형성함

d. 매우 약한 mud형 유체(0.1 Pa 이하)

→ 흐름은 국부적으로 형성되며 유역의 하부에 진흙 혼합물이 퇴적됨

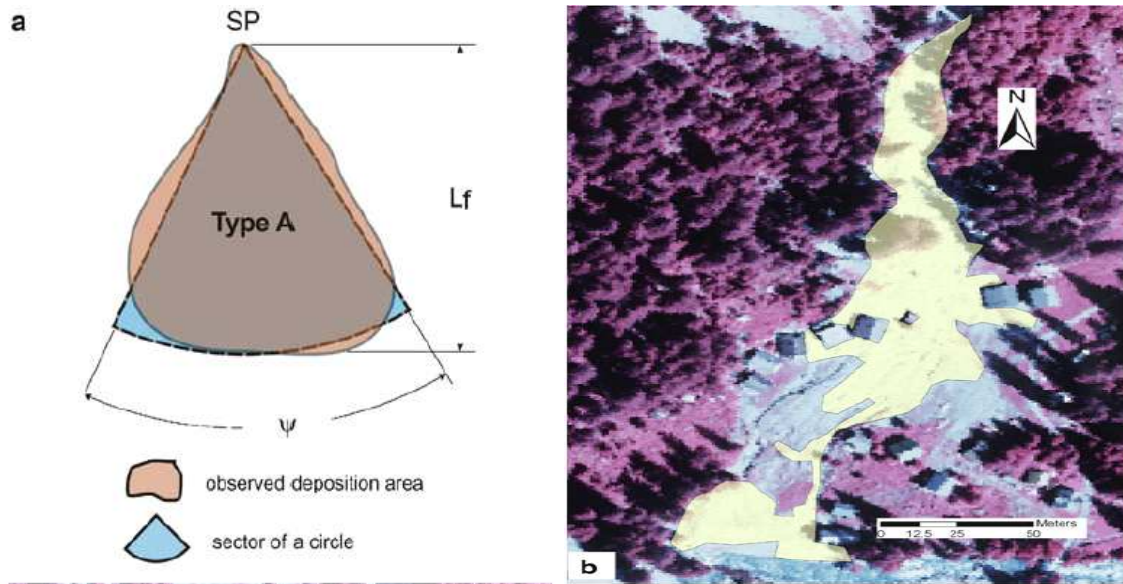
④ 복합재해의 확산유형



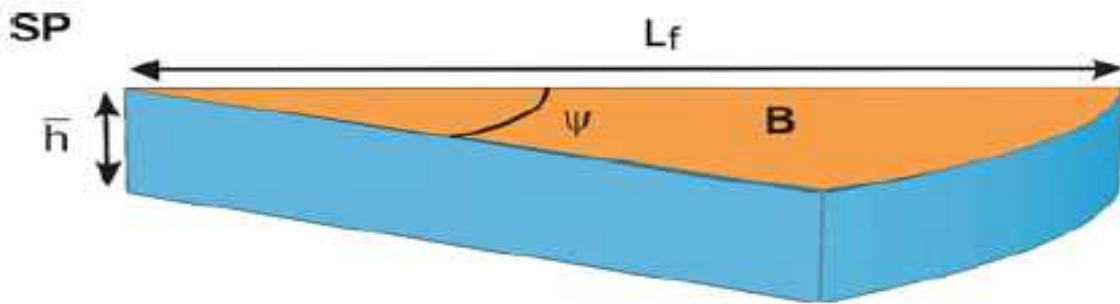
<그림 2-39> 최근 토석류 재해의 확산 유형. SP(Start Point)는 퇴적의 시작점

- 확산의 네 가지 유형(A, B, C, D)은 퇴적영역에서 영향을 받는 인프라의 양과 정도에 따라 추정됨
- A 유형은 팬의 장애물이나 다른 유로의 영향을 받지 않는 균일한 확산을 보여주는데, 퇴적물의 대다수는 주택이나 인프라에 의한 잠재적 영향이 없거나 중간 정도인 상황임
- B 유형은 퇴적영역의 하부에서 빌딩 또는 완화제와 같은 장애물의 영향을 받는 경우에 나타남
- C와 D 유형은 퇴적영역의 하부에서 뚜렷한 측면 확산을 담당하는 도로, 철도와 같이 퇴적영역을 가로 지르는 선형 구조물(횡단 구조물)의 영향을 받은 경우에 해당함

㉔ 복합재해 확산의 해석



<그림 2-40> (a) 토석류 A 유형. ψ 는 관측된 확산거리 L_f 와 동일한 반경을 가지는 호의 각을 나타냄. (b) 2005년 8월 29~30일에 발생한 Schisstalbach(스위스) 토석류



<그림 2-41> 퇴적유형을 설명하기 위한 원호형 섹터; SP는 퇴적의 시작점

- 확산거리 L_f 를 호의 각도 ψ 와 토석류 체적 V 의 함수로 표현할 수 있음

$$L_f \propto \psi^{-1/2} V^{1/3} \quad \text{식 (2.21)}$$

$$L_f = 65.3 \psi^{-1/2} V^{1/3} \quad \text{식 (2.22)}$$

- 유형 B, C 및 D의 경우, 흐름이 장애물에 의한 영향을 크게 받으므로 퇴적형상에 대한 상세한 기하학적 근사와 정량적인 분석을 필요로 함
- Clay weathering Index(CWI)에 따라 유역을 다음과 같이 분류할 수 있음
 - a. Excellent Clay Maker(ECM) : ECM 유역은 높은 점토 또는 점토와 같은 구성요소를 가진 많은 비압밀 물질을 생성하고 대규모 산사태 퇴적물을 제공함

- b. Good Clay Maker(GCM) : GCM 유역은 clast 또는 matrix-supported texture로 이루어진 다량의 비압밀 재료를 생성하며, 다량의 점토질 실트를 갖는 미세한 입자에서 거친 입자로 된 물질로 분류되지 않음.
- c. Bad Clay Maker(BCM) : BCM 유역은 다른 두 유역 유형보다 적은 양의 비압밀 물질을 생성한다. 대부분의 비압밀 재료는 boulder에 의해 형성된 사면으로 구성됨



<그림 2-42> An example of unconsolidated material generated by ECM catchments



<그림 2-43> An example of unconsolidated material generated by GCM catchments



<그림 2-44> An example of unconsolidated material generated by BCM catchments

-CWI에 따라 유역을 분류하면 팬에서의 복합재해 확산을 분석할 수 있음.

(나) 재해확산범위 및 규모 산정을 위한 간편모형 개발

- ① 재해확산 유출평가 방법
- ㉓ 체적 균형 접근법

$$A = kVd \quad \text{식 (2.23)}$$

(A: 유역면적, V: 전체 체적, k&d: empirical 계수)

$$A = 200 V^{2/3} \text{ (화산 이류)} \quad \text{식 (2.24)}$$

$$A = 6.2 V^{2/3} \text{ (이탈리아 알프스 토석류)} \quad \text{식 (2.25)}$$

- 토석류 체적 $V=50,000\text{m}^3$ (이탈리아 알프스 토석류 발생 유역)
- k: 토석류의 material 특성에 좌우되며 A와 V는 상당한 상관관계가 있음.

㉔ 한계지형 방법

- 확산경사(S_d) 또는 퇴적 경로에서의 에너지 소산과 관련이 있음
- 퇴적 후 각도는 2도~12도(가장 빈번 4도~6도): 확산 채널 폭 비율(확산 상류 채널 폭에 대한

퇴적 폭 사이의 비율)은 평균 5도이고 보통 10도보다 작음.

$$R = \omega \Delta H \quad \text{식 (2.26)}$$

- R: 유출거리, ΔH : 토석류 시점과 퇴적구간 시점의 elevation 차, ω : empirical coeff=0.4, 유출거리는 elevation 차이의 40%
- 토석류의 퇴적 조건

$$(4 \sim 10^\circ \text{의 이동거리}) > 0.4(10^\circ \text{ 초과하는 경사면 표고손실}) \quad \text{식 (2.27)}$$

- 10도 이상 경사: 토석류는 조건 없이 지속됨.
- 4도~10도 사이: 위의 조건이 충족되거나 4도에 도달하면 토석류는 멈춤.
- 4도 이하 경사: 토석류는 조건없이 멈추고 모든 재질이 퇴적됨.
- 4도와 10도 사이의 경사도에서 이동한 거리>0.4(경사면에서의 고도 상실>10도) -> 이 경우 토석류는 멈춤
 - a. 10도 이상 경사 : 토석류는 조건 없이 지속
 - b. 4도~10도 사이 : 위의 식으로 표현된 조건이 충족 또는 4도에 도달하면 토석류는 멈춤
 - c. 4도 이하 : 토석류는 조건없이 멈추고 모든 재질이 퇴적됨

㉔ Empirical equations

- V: 토석류 체적, H: potential 질량 에너지, $S_d = \tan \theta_d$, θ_u : 상류 경사, β : 평균 경사, A_c : 유역면적.
- $H/L = \tan \beta = 0.2$ (Takahashi, Bathurst), 0.19(Rickenmann and Zimmermann), Iverso n: mobility index는 토석류 체적과 상관이 있고, 토석류의 최대 가능유출 을 근사하는 데 사용됨. H/L: mobility ratio(유효 마찰각)

<표 2-7> 토석류의 유출거리 R과 총 이동거리 L을 구하기 위한 empirical equations

Variable	Empirical equation	Authors	Equation
Runout(R)	$R = 8.6(V \tan \theta_u)^{0.42}$	Ikeya(1989) ^a	식 (2.28)
	$R = 25 V^{0.3}$	Rickenmann(1994) ^b	식 (2.29)
	$R = 15 V^{1/3}$	Rickenmann(1999)	식 (2.30)
Travel distance(L)	$(H/L)_{\min} = \tan \beta_{\min} = 0.2(A_c)^{-0.26}$	Zimmermann et al.(1997)	식 (2.31)
	$L = 1.9 V^{0.16} H^{0.83}$	Rickenmann(1999)	식 (2.32)

- mathematical rearrangement from the original form (in Bathurst et al., 1997).
- Personal Communication in Bathurst et al.(1997).

㉔ 물리적 방법

- 토석류 시뮬레이션을 위해 질량, 운동량, 에너지 보존 이용함.
- 런아웃 거리 R은 Hungr et al.(1984)와 Takahashi(1991)에 의해 개발된 다음의 이론 방정식으로 기술될 수 있음.

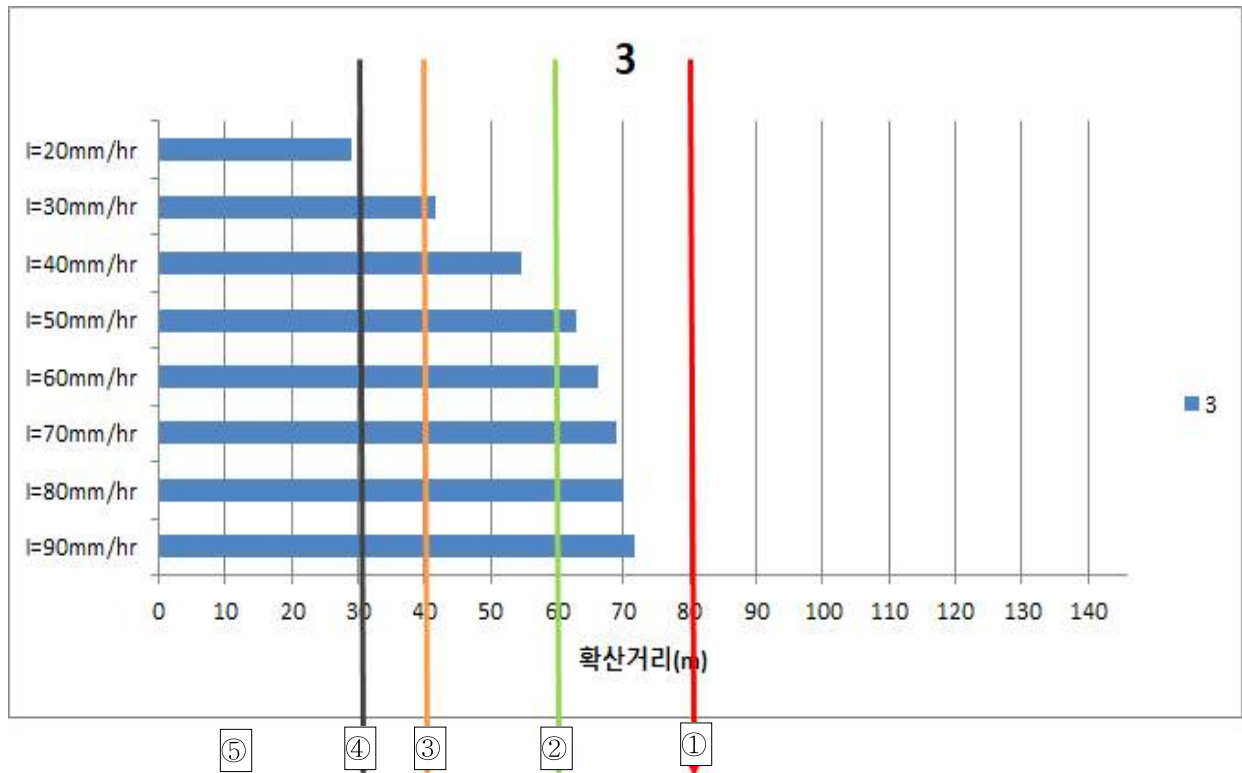
$$R = \frac{\{u_u \cos(\theta_u - \theta_d) [1 + (gh_u \cos \theta_u) / (2u_u^2)]\}^2}{g(S_f \cos \theta_d - \sin \theta_d)} \quad \text{식 (2.33)}$$

- (R: 유출거리, θ_d : 퇴적면적에 따른 지형경사, θ_u : 입구 수로 경사각도, u_u : 초기유속, h_u : 초기유동심, S_f : 마찰경사)
 - $S_f=10$ 도일 때 관측된 R값과 잘 맞음: Hungr (캐나다 5개의 토석류)
 - $S_f=10$ 도 보다 $S_f = f \tan \theta_d$ ($f=1.12$)일 때 R을 더 잘 예측: Okuda and Suwa (일본 14개 토석류)
 - 관측된 유동심이 entry 유속을 측정할 때, $S_f = 1.08 \tan \theta_d$ 일 때 R을 잘 예측함 Rickenmann (Swiss)
- 스위스와 일본에서 주요 토석류 surge가 가장 낮은 퇴적 지점에서 흐름의 폭은 변화가 없는 것을 가정하였음.

② 재해확산 범위 및 규모

㉠ 집중호우 + 토석류 Coupling

- 수로 끝단을 기준으로 경사각도를 고정하고, 집중호우 + 토석류의 복합재해 발생
- 집중호우 및 토석류 발생 변화량에 대한 확산범위



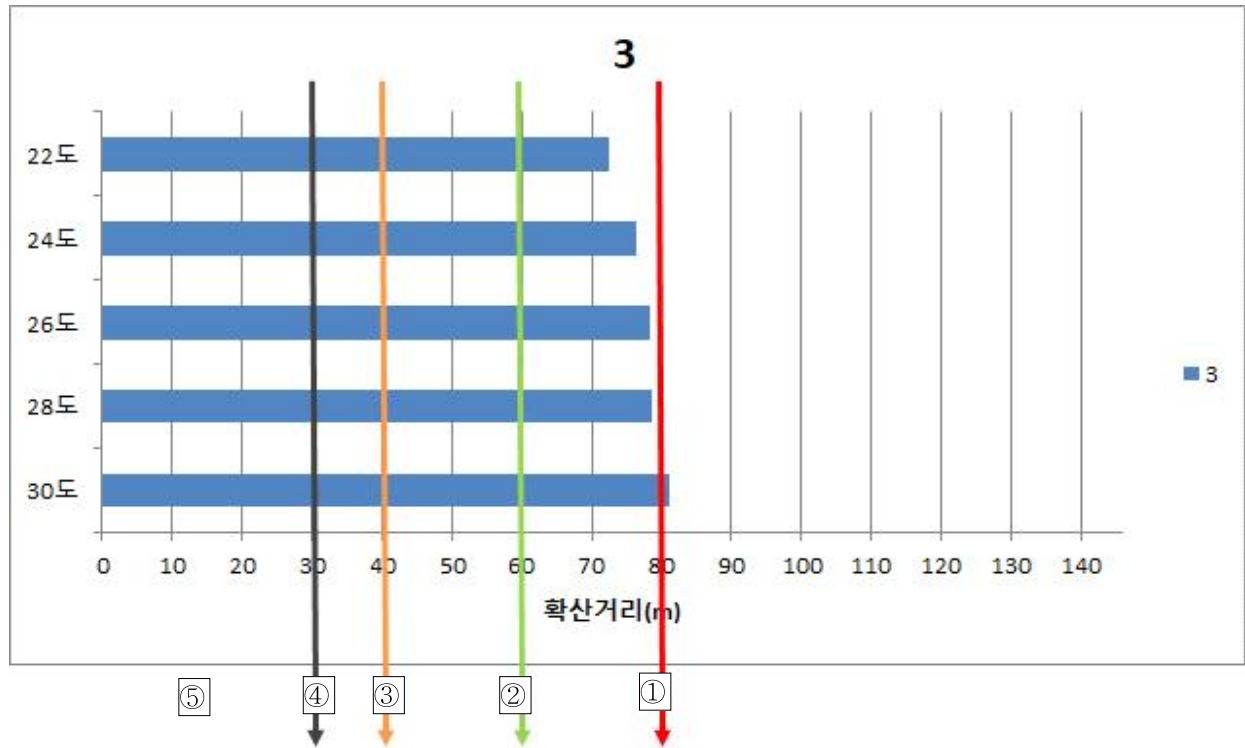
- ① : Peak형 확산
- ② : Radiated Peak형 확산(I=50~90mm/hr)
- ③ : Radiated형 확산(I=30~40mm/hr)
- ④ : Radiated Collapsing
- ⑤ : Collapsed형(I=20mm/hr)

제2장 연구수행내용 및 성과

④ 급경사지 + 토석류 Coupling

-수로 끝단을 기준으로 강우강도를 고정하고, 급경사지 + 토석류의 복합재해 발생

-급경사지의 경사각도 및 토석류 발생 변화량에 대한 확산범위



① : Peak형 확산(I=90mm/hr)

② : Radiated Peak형 확산(I=60~80mm/hr)

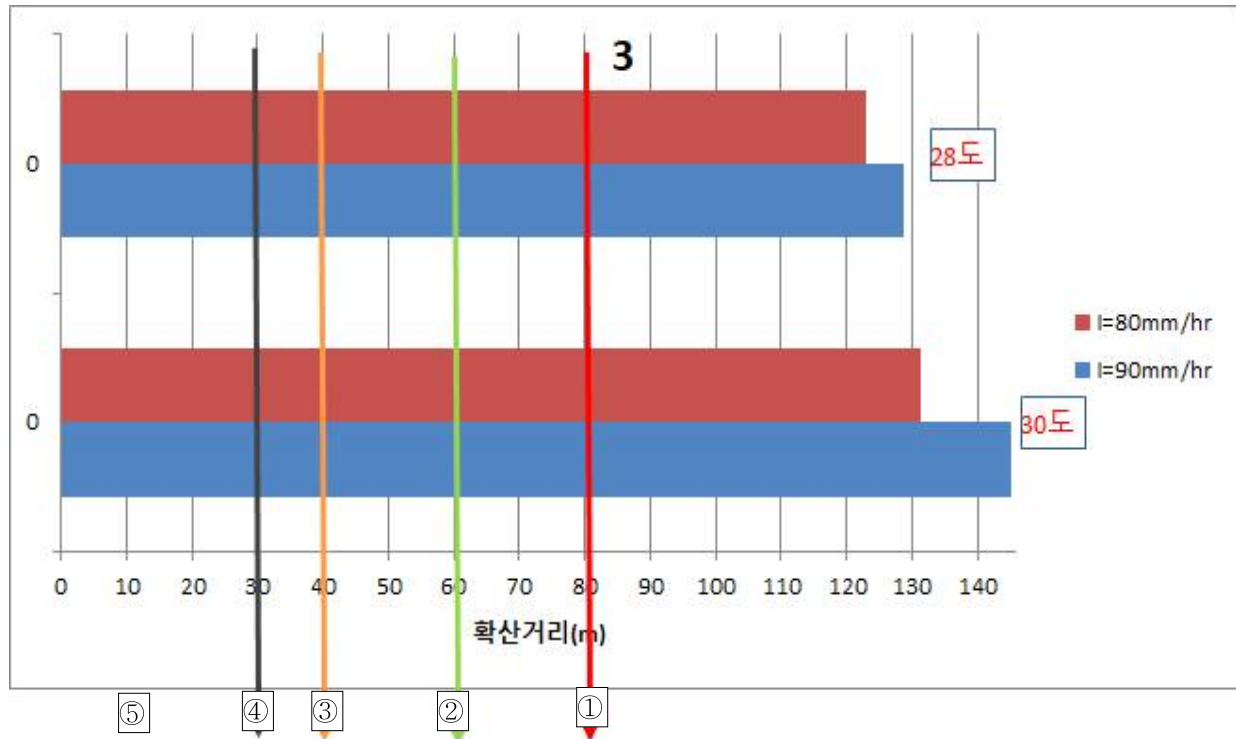
③ : Radiated형 확산(I=40~50mm/hr)

④ : Radiated Collapsing

⑤ : Collapsed형(I=20~30mm/hr)

㉔ 집중호우 + 급경사지 + 토석류 Coupling

- 수로 끝단을 기준으로 집중호우 + 급경사지 + 토석류의 복합재해 발생
- 집중호우, 급경사지의 경사각도, 토석류 발생 변화량에 대한 확산범위



- ① : Peak형 확산(30도)
- ② : Radiated Peak형 확산(22도~28도)
- ③ : Radiated형 확산
- ④ : Radiated Collapsing
- ⑤ : Collapsed형

③ 간편모형

㉕ 간편모형 프로그램 관련식

- 침식/퇴적 속도식에 기반한 침식/퇴적 모델에서의 토사체적 농도식

$$c_{\infty} = \frac{\rho_s \tan \theta_h}{(\sigma - \rho_s)(\tan \psi - \tan \theta_h)} \quad \text{식 (2.34)}$$

- 토석류 시뮬레이션을 위해 질량, 운동량, 에너지 보존 이용함. 일정 경사를 갖는 표면 위로 흐르는 유동에 대한 운동량을 고려하면(Hungr, Takahashi) 다음 식을 얻을 수 있음.

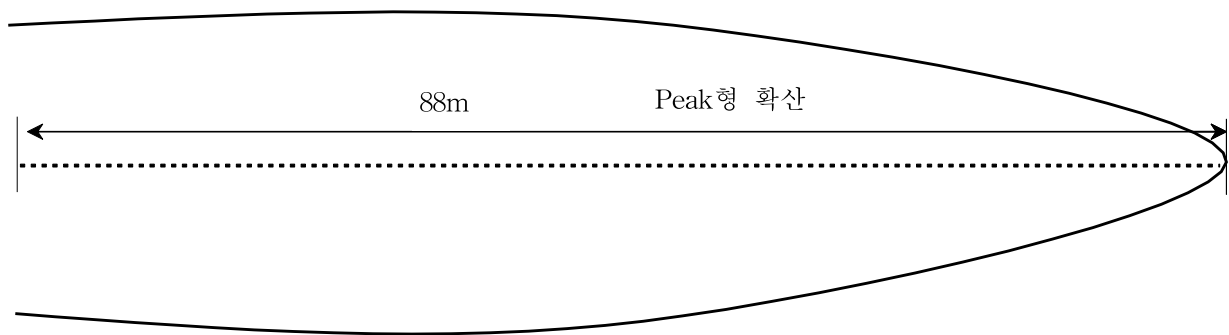
$$R = \frac{\{u_u \cos(\theta_u - \theta_d) [1 + (gh_u \cos \theta_u) / (2u_u^2)]\}^2}{g(S_f \cos \theta_d - \sin \theta_d)} \quad \text{식 (2.35)}$$

- 유효응력 원리를 이용함. 고체입자 체적농도에 주로 의존하는 확산과 같은 마찰 경사

$$S_f = \frac{(\sigma - \rho)C}{(\sigma - \rho)C + \rho} \tan \alpha \quad \text{식 (2.36)}$$

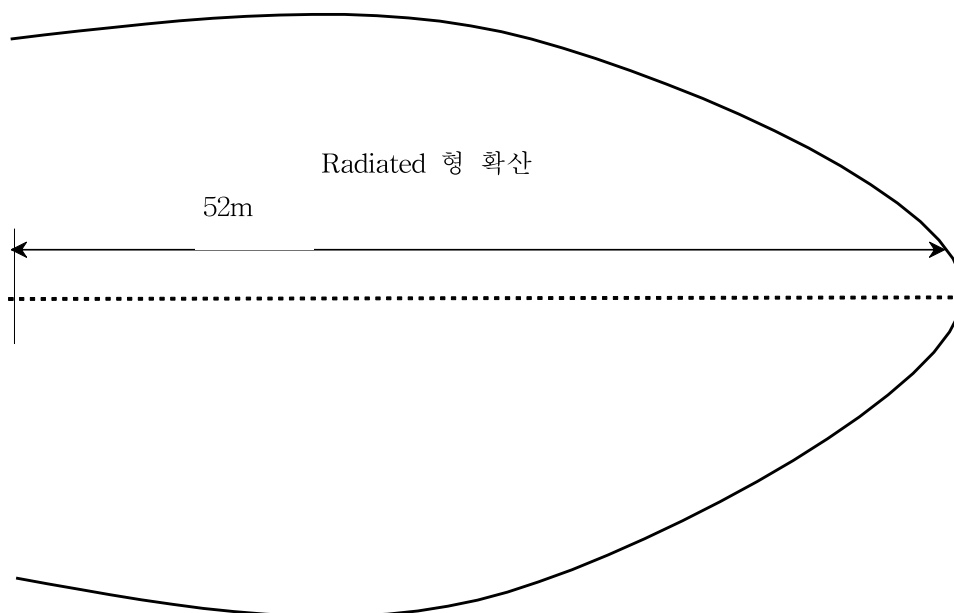
㉠ 확산유형의 결정

- Peak형 확산



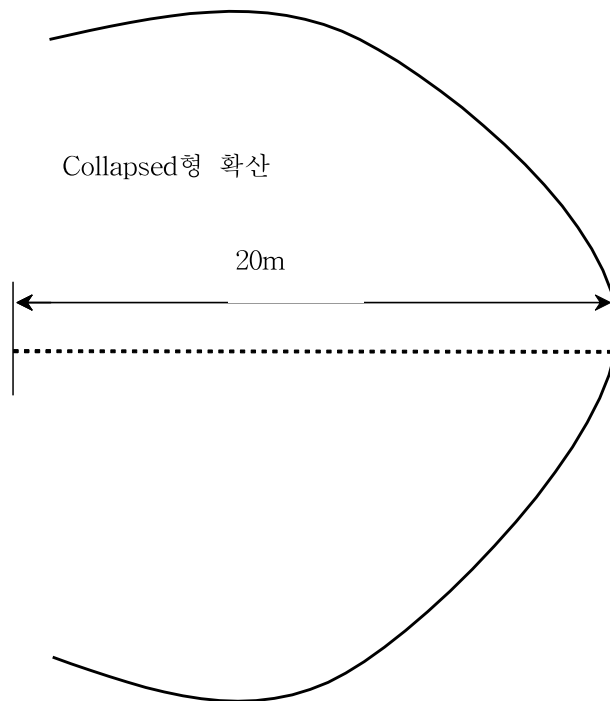
- Radiated Peak형 확산

- Radiated형 확산



- Radiated Collapsing

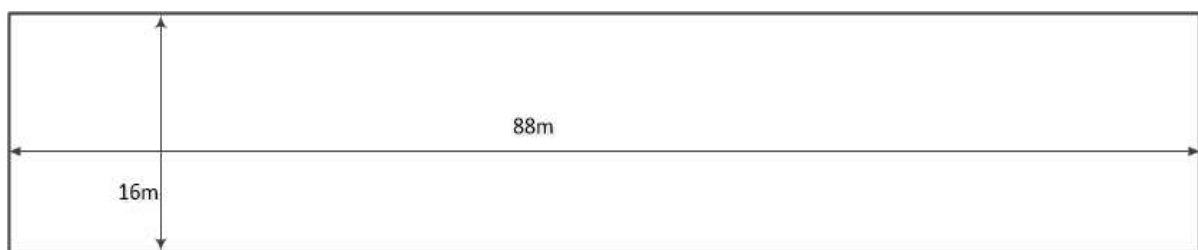
- Collapsed형



- Peak형 확산, Radiated 형 확산, Collapsed 확산으로 분류

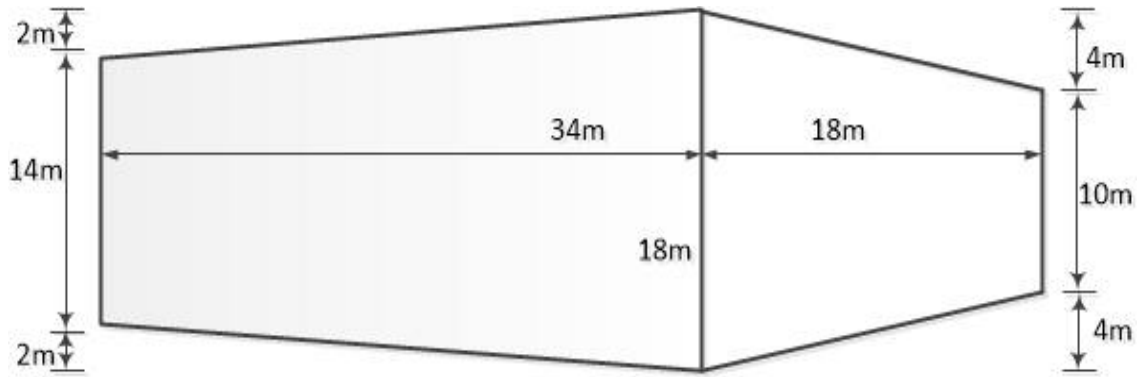
-개발 S/W 프로그램 비교검정을 통한 확산유형의 단순화 과정

a. Peak 형 확산 및 확산 범위(Test-bed 1)



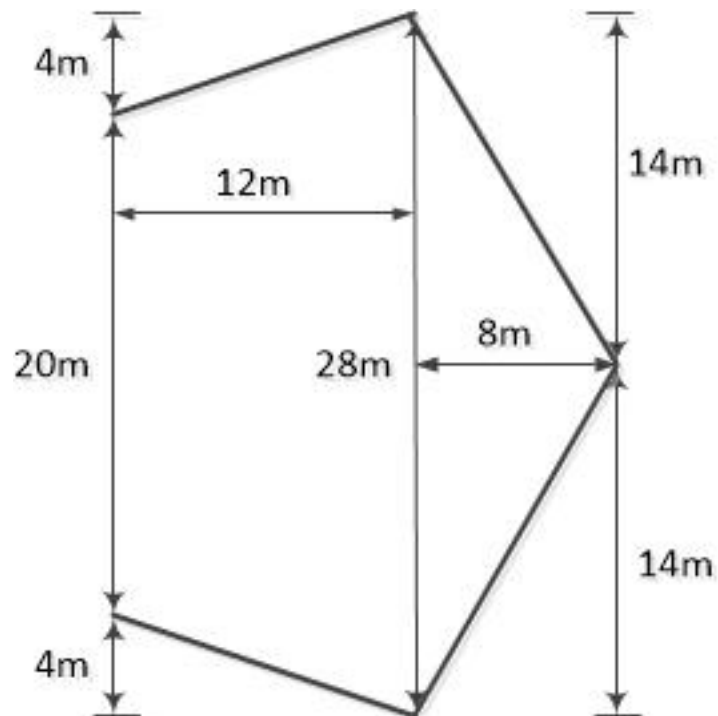
<그림 2-45> Peak 형 확산 및 확산 범위 예시

b. Radiated 형 확산 및 확산 범위(Test-bed 1)



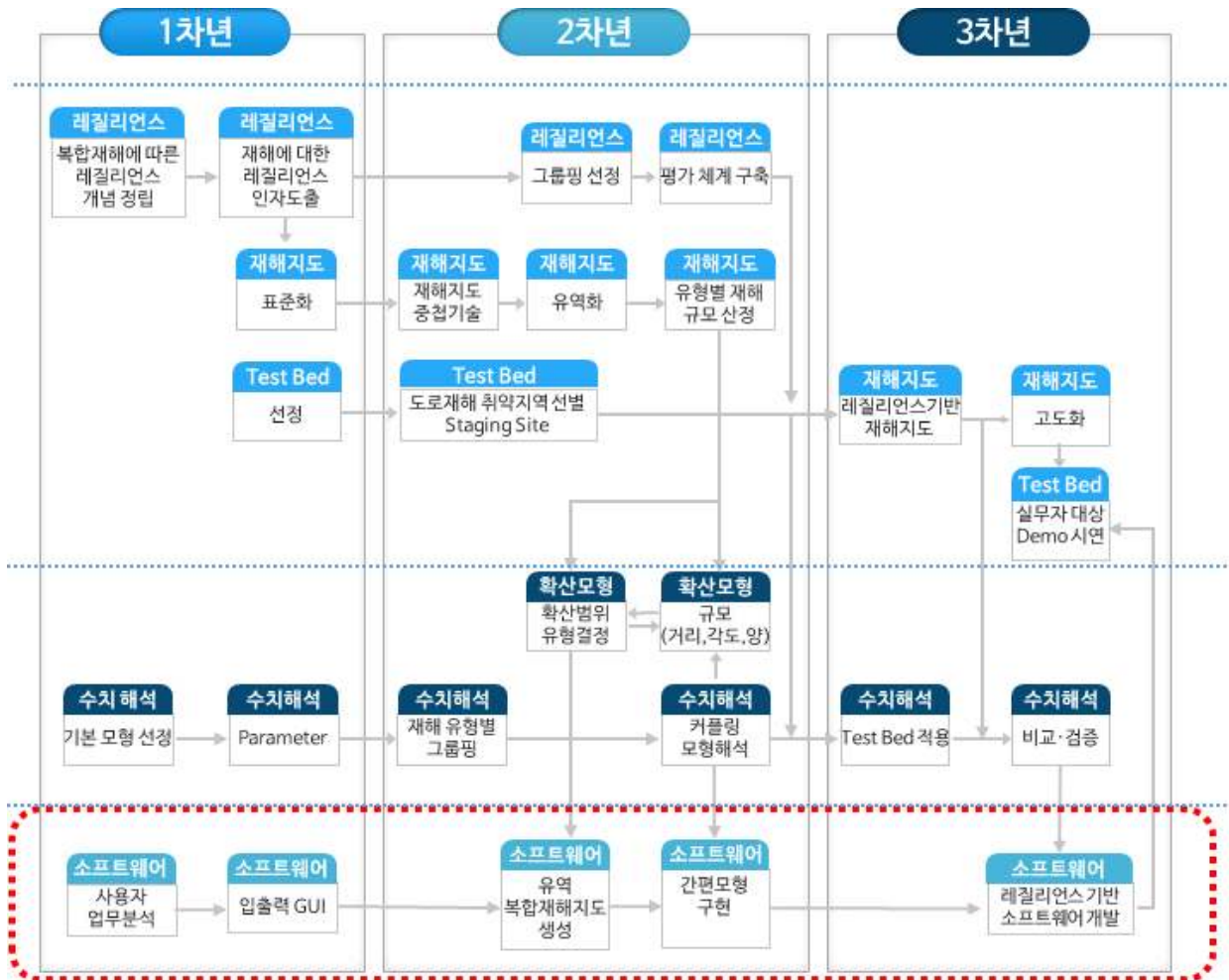
<그림 2-46> Radiated 형 확산 및 확산 범위 예시

c. Collapsed 형 확산 및 확산 범위(Test-bed 1)



<그림 2-47> Collapsed 형 확산 및 확산 범위 예시

다. 사용자 중심 도로재해 취약성 분석 소프트웨어 개발



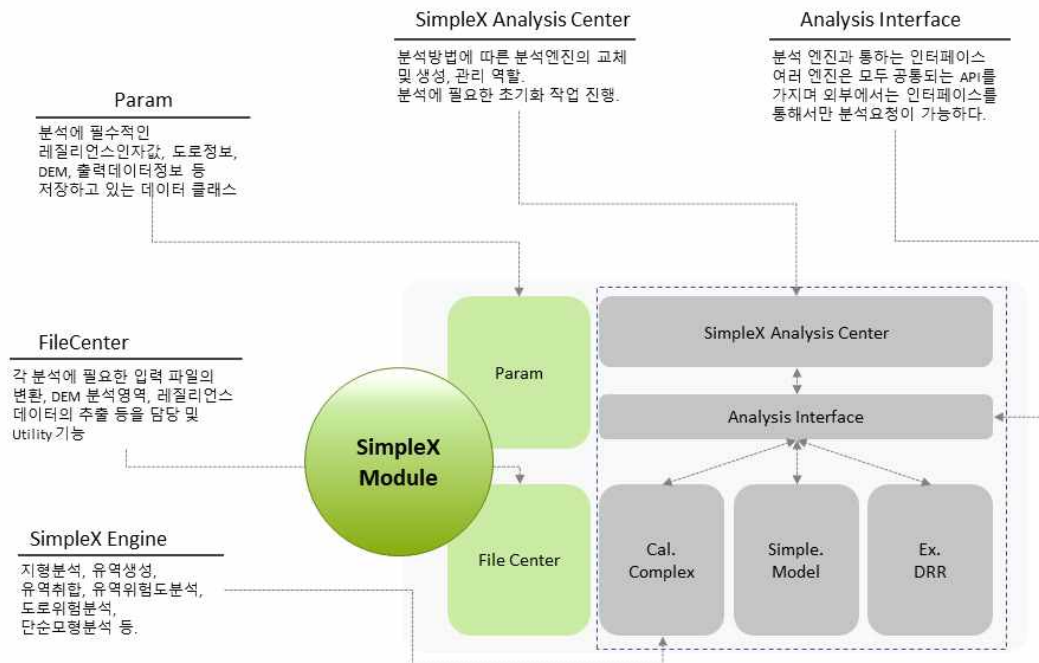
<그림 2-48> 사용자 중심 도로재해 취약성 분석 소프트웨어 개발 연구흐름도

(1) SimpleX-Map

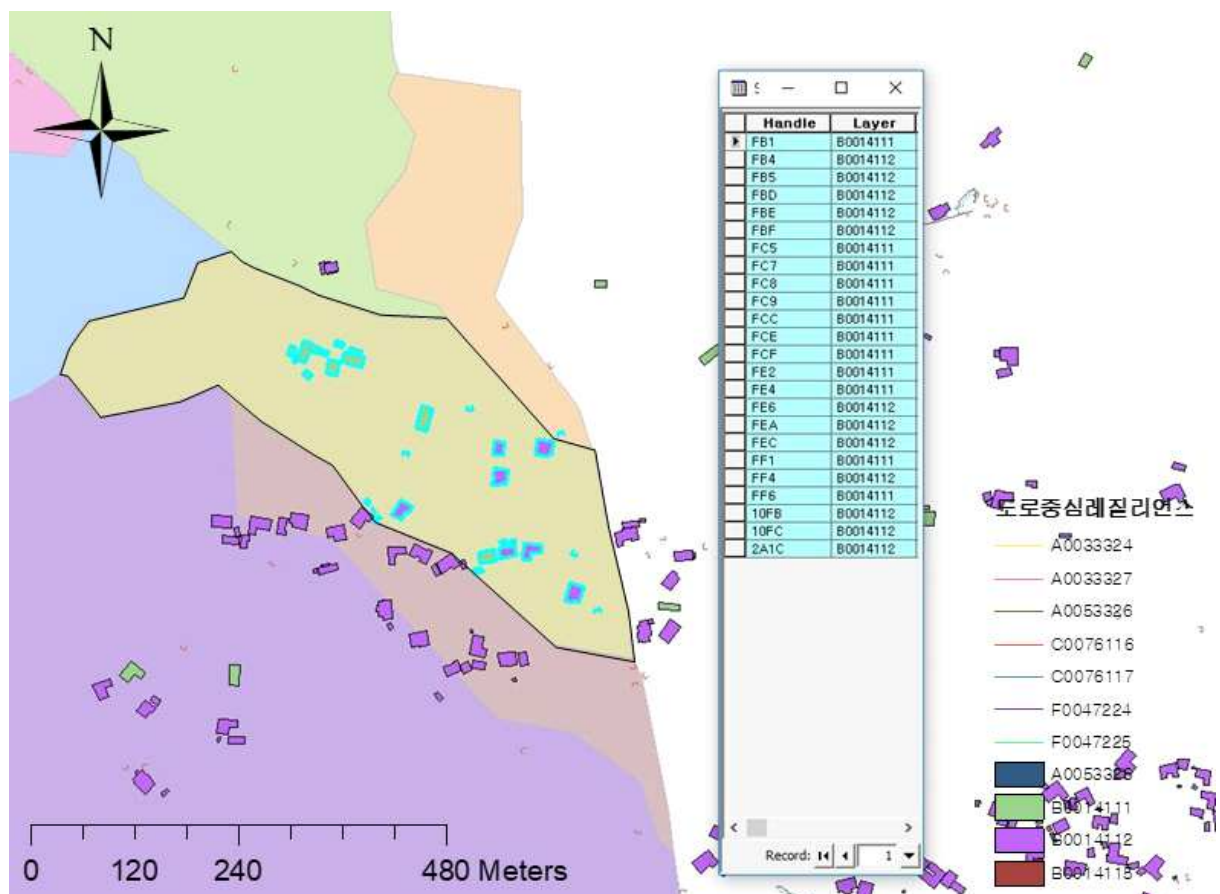
- 복합재해를 고려한 도로취약 지역 분석 간편모형(SimpleX-Map)에 레질리언스 기반의 재해지도를 고도화



<그림 2-49> 메뉴구성



<그림 2-50> SimpleX-Map 소프트웨어 아키텍처



<그림 2-51> 도로유역별 레질리언스 속성 추출 기능구현

<표 2-8> DRR인자들의 항목별 코드 및 가중치

구분	항목	항목	코드번호
도로중심 재난레질리언스 (DRR:Disaster Resilience focusing on the Road)	도로측방 여유폭	인도	A0033324
		자전거도로	A0033327
		안전지대	A0053326
	배수시설	암거	C0076116
		측구	C0076117
	방호시설	낙석방지책	C0536111
		방호벽	C0536112
		가드레일	C0536118
		콘크리트옹벽(상단)	F0047224
		콘크리트옹벽(하단)	F0047225
		석축(상단)	F0047226
		석축(하단)	F0047227
		경사보호망	F0047228
	인구 재산	주택외건물	B0014111
		주택	B0014112
		아파트	B0014115

- Test-Bed지역에 적용한 후 비교·검증하며 최종연구 결과물인 레질리언스 기반 소프트웨어(SimpleX-Map)의 실무자 대상 Demo시연

라. 연구성과 검증

- 본 연구의 최종성과물인 복합재해 발생 시 도로관리 취약성 분석 S/W인 SimpleX-Map의 검증을 위해 Test-Bed의 지방도를 대상으로 2020년 태풍 이후 지방도 피해지역 현장조사를 실시하였으며, S/W 활용성 및 성과확산을 위해 전문가 자문과 학술세미나 발표 및 도로관리 실무자를 대상으로 S/W시연 및 만족도 조사를 실시함.

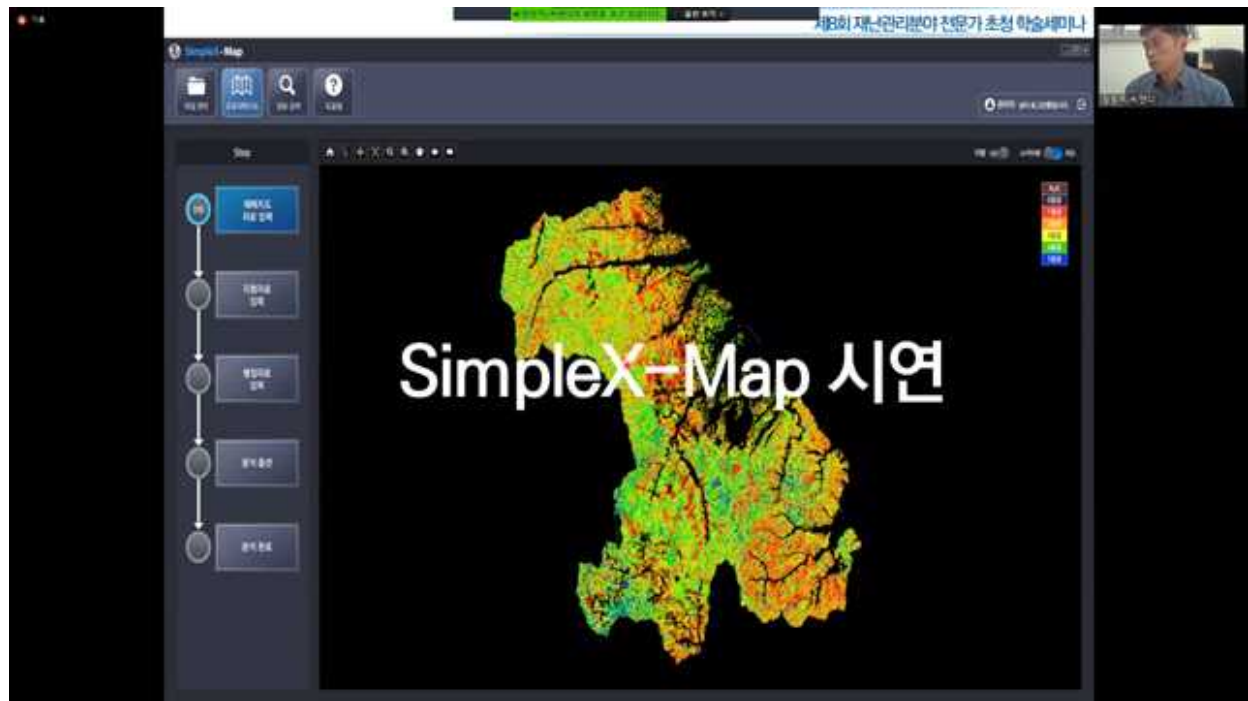
(1) 시연회

- SimpleX-Map 소프트웨어의 검증과 활용성 및 성과확산을 위해 전문가 자문과 행정안전부에서 주관하는 재난관리분야 전문인력양성사업 학술세미나에 참가하여 성과확산을 위한 S/W시연을 실시하였으며, 강원도와 충북 4개 도로관리사업소의 실무자를 대상으로 S/W시연 및 만족도 조사를 실시함.

(가) 학술세미나 온라인 시연회

- 행정안전부에서 주관하는 ‘재난관리분야 전문인력양성사업 온라인 학술세미나(2020.12.9.)’에 참가하여 대학원생 20명, 방재업종 종사자 15명, 교수 4명, 공무원 3명을 대상으로 SimpleX-Map의 소개 및 시연회를 진행하였으며 성과확산을 위해 노력함.





강	강배동/강원대학교 (공동 호스트, 나)	홍	홍
UNU	사회자 정세진 (호스트)	○	홍
장	장창덕/씨연디	■	홍
Byonghee Jun		홍	홍
김마정/강원대학교		홍	홍
김만호_방재관리전문		홍	홍
이유	김병식(삼척산학협력단장)	홍	홍
UNU	김성욱/강원대학교	홍	홍
김영환/강원대학교		홍	홍
김일동/경호연지니어링		홍	홍
주	김주/경기도청	홍	홍
김	김주호/건설기술단/강원대학교	홍	홍
김	김준석(경기도청)	홍	홍
김	김현규/강원대학교	홍	홍
노	노정수/(주)유신	홍	홍
류	류진규/강원대학교	홍	홍
박	박준호-강원대방재전문대학원	홍	홍
신	신우진 강원대 학부	홍	홍
신	신재성/(주)유신/강원대학교	홍	홍
만	만중수(강원대방재전문대학원)	홍	홍
이	이동혁/강원대학교	홍	홍
S	이상국/경기도청	홍	홍
S	이상국/경기도청	홍	홍
이	이승희/동부ENG/강원대학교	홍	홍
이	이시영/강원대학교 교수	홍	홍
이	이창섭/강원대 학부	홍	홍
이	이현종-강원과학	홍	홍
임	임형규 강원대학교	홍	홍
장	장태훈/강원대학교	홍	홍
전	전계환 교수님	홍	홍
정	정진우/강원대학교	홍	홍
조	조상기-역사과학	홍	홍
조	조항일/강원대 학부	홍	홍
최	최봉진 / 강원대학교	홍	홍
최	최윤정/강원대학교	홍	홍
최	최재희/강원대학교	홍	홍
최	최정규/광동양회	홍	홍
최	최종호/강원대학교	홍	홍
UNU	박원준/강원대학교	홍	홍
황	황성진/강원대학교	홍	홍
김	김기중/강원대학교	홍	홍
김	김현규/강원대학교	홍	홍
정	정태현/강원대 학부	홍	홍
최	최승민	홍	홍

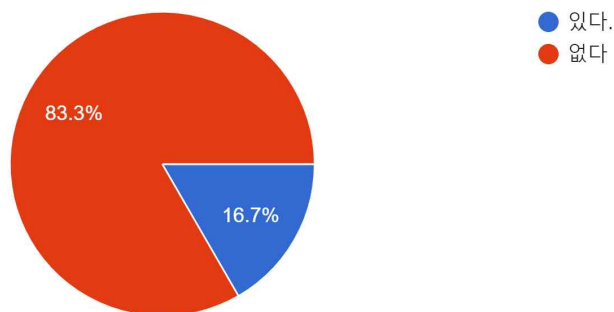
<그림 2-52> 재난관리분야 전문인력양성사업 온라인 학술세미나 참석자 명단

(나) 현장(담당자, 실무자)

- 강원도 및 충북 4개 사업소의 도로관리 실무자 12명을 대상으로 S/W시연 및 만족도 조사를 실시함.
- 도로관리 실무자 중 산사태위험지도와 토석류위험지도 등 재해지도의 활용 경험은 83.3%가 전무하다고 응답하였으며, SimpleX-Map의 접근 용이성에 대해 83.3%가 긍정적으로 응답함. 또한 91.7%의 실무자가 SimpleX-Map이 보급되면 업무에 도움을 줄 수 있다고 응답하였으며, S/W의 전반적인 만족도는 평균 81점으로 나타남.

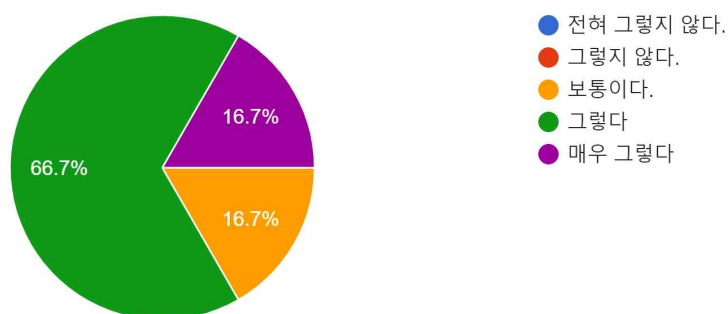
1. 기존 국내에서 개발된 재해위험지도(산사태위험지도, 토석류위험지도 등)를 업무에 활용한 경험이 있습니까?

응답 12개



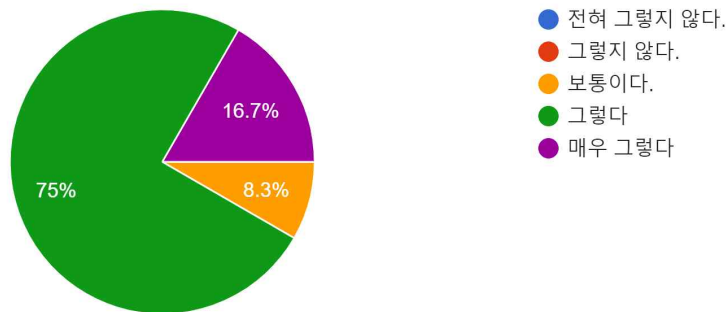
2. SimpleX-Map 소프트웨어가 기존 재해위험지도를 복합재해에 대한 도로의 재해취약도로 이해하기 쉽게 도움을 준다고 생각합니까?

응답 12개



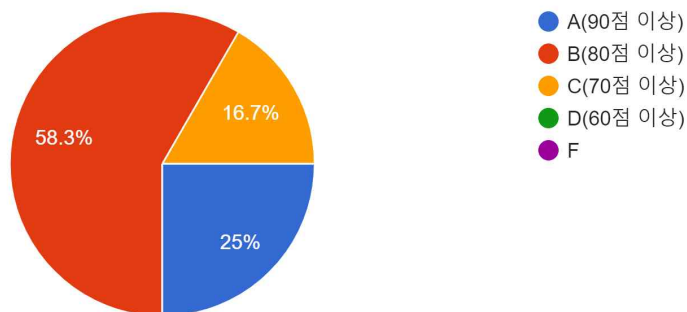
3. SimpleX-Map 소프트웨어가 업무에 도움을 줄 수 있습니까?

응답 12개



4. SimpleX-Map 소프트웨어의 전반적인 만족도는?

응답 12개



기타의견

- 수치지형도, 연속지적도와 연계하여 각종 토지정보 탑재, 카카오맵이나 네이버지도와 같은 로드 뷰 및 인터페이스 제공, 재난에 따른 도로 위험도 등급화 및 세부내역 제공
- 강원도 공간정보 포털과 연계 가능성 여부
- 지자체 공무원뿐만 아니라 중앙부처 및 재해관련 업무를 하는 공무원들이 사계절 해빙기 호우 제설 등 관련 업무 그리고 본연에 도로유지보수와 민원등에 항상 업무가 과부하되있는 상황입니다. 국민의 재산과 생명을 지키기위해 노력하여 개발하신 프로그램이 적극 활용될수 있도록 제가 부탁드립니다싶은건 인터페이스 및 메뉴얼 등을 쉽고 간단하게해주셔서 처음 프로그램 사용시 거부감이 없도록 제작 요청.
- 접근 및 사용이 쉽게 제작 요청. 위험도에 대한 기준의 구체화

(다) 전문가 자문

KAIA 3차년도 자문위원 의견서

○ 소속/직급 : 한려대학교/총장

성명 : 류 지 협

전문위원 의견

1. 본 연구의 최종성과물인 SimpleX-Map은 복합재해발생 예상 시 도로관리 담당자가 재해취약지역을 분석 및 대응할 수 있는 소프트웨어입니다. SimpleX-Map이 개발되면 실무에서 도로관리담당자가 재해취약지역을 분석할 때 활용성에 대한 의견

→ 본 연구를 통해 개발된 SimpleX-Map은 지방도로 관리자가 도로관리를 위해 기존에 관리하는 급경사지위험지역, 자연재해위험지역의 한정적인 점단위 정보 관리에서 벗어나 산사태, 토석류 위험지역 및 도로와 도로하류부 레질리언스 인자들을 고려한 효과적인 관리를 통해 도로위험지역 판단에 큰 도움을 줄 것으로 판단됨

2. 복합재해와 레질리언스의 프로그램 반영 여부

→ SimpleX-Map에 도로중심 재난레질리언스 인자들을 반영하기 위해 국내외 문헌조사와 전문가 AHP 분석을 실시하여 계층구조설정과 인자들간의 가중치 설정을 순서에 맞춰 적절히 진행한 것으로 판단됨

3. 추후 SimpleX-Map모형의 개선사항 및 보완점에 대한 의견

→ SimpleX-Map모형을 현재의 시범지역 적용에서 전국단위로 확대하여 개발할 수 있는 기반 마련이 필요하며 새로운 DB에 대한 업데이트 방안에 대한 검토가 필요함

KAIA 3차년도 자문위원 의견서

○ 소속/직급 : 한국방재안전학회 회장

성명 : 김 문 모

전문위원 의견

1. 본 연구의 최종성과물인 SimpleX-Map은 복합재해발생 예상 시 도로관리 담당자가 재해취약지역을 분석 및 대응할 수 있는 소프트웨어입니다. SimpleX-Map이 개발되면 실무에서 도로관리담당자가 재해취약지역을 분석할 때 활용성에 대한 의견

→ 최종성과물 SimpleX-Map 소프트웨어는 기존에 검증된 산림청의 산사태위험지도와 토석류위험지도를 기반으로 1차적인 지방도로위험도 산정과 더 나아가 레질리언스를 고려한 2차 지방도로 재해위험도 산정까지 고려해볼 수 있어 실무자가 업무에 사용할 경우 도로정비 우선순위나 재해취약지역 등의 의사결정시 도움을 줄수 있을 것으로 판단됨.

2. 복합재해와 레질리언스의 프로그램 반영 여부

→ 1~2차년도에 국내·외 문헌조사와 전문가 자문을 통해 구성된 복합재해(산사태 및 토석류)를 프로그램에 반영하기 위해 산림청에서 제공하는 산사태위험지도와 토석류위험지도를 중첩하여 프로그램에 입력함. 또한 도로중심재난레질리언스(DRR : Disaster Resilience focusing on the Road) 인자의 계층구조설정과 DRR인자들간의 가중치 설정을 위한 전문가 AHP분석은 타당하게 평가됨.

3. 추후 SimpleX-Map모형의 개선사항 및 보완점에 대한 의견

→ 프로그램에 구축되어 있는 수치지도와 산사태위험지도, 토석류위험지도, 레질리언스 DB등은 계속 업데이트되는 DB이므로 이에 대한 검토 필요

KAIA 3차년도 자문위원 의견서

○ 소속/직급 : 한국급경사지안전협회/사무국장

성명 : 이 문 세

전문위원 의견

1. 본 연구의 최종성과물인 SimpleX-Map은 복합재해발생 예상 시 도로관리 담당자가 재해취약지역을 분석 및 대응할 수 있는 소프트웨어입니다. SimpleX-Map이 개발되면 실무에서 도로관리담당자가 재해취약지역을 분석할 때 활용성에 대한 의견

→ 풍수해나 해빙기 등 지방도로의 정기점검 시기에 소프트웨어에서 분석된 도로위험등급에 대해 주의깊게 살펴보거나 예산집행 시 도로정비우선순위 선정 등 합리적인 의사결정이 가능할 것으로 판단됨. 또한 SimpleX-Map에서 재해의 2차피해(레질리언스)까지 분석되어 재해 확산까지 고려할 수 있기 때문에 활용성이 높을것으로 기대됨.

2. 복합재해와 레질리언스의 프로그램 반영 여부

→ 3차년도 최종성과인 SimpleX-Map 프로그램에 산사태위험지도와 토석류 위험지도 및 DRR(Disaster Resilience focusing on the Road) 인자들이 프로그램에 잘 반영되었으며, 추후 변화되는 수치지도 DB에 대한 검토가 필요할 것으로 보임.

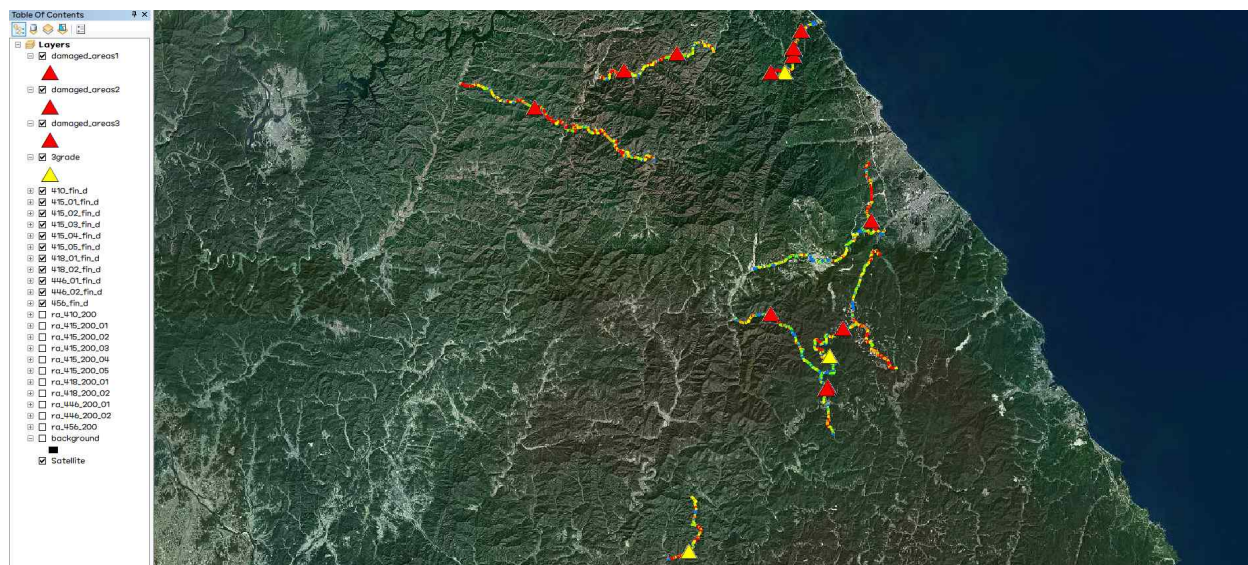
3. 추후 SimpleX-Map모형의 개선사항 및 보완점에 대한 의견

- 산사태 및 토석류위험지도 외 다른 재해지도의 활용 가능성 검토 필요
- 도로관리자가 재난발생전 도로주변 위험지역을 선제적으로 파악하여 관리할 수 있도록 개발된 소프트웨어에 대한 지속적인 업그레이드가 필요하다고 생각됨

(2) TEST-Bed 검증

(가) 현장조사

- 2020년 8월 태풍 발생 후 SimpleX-Map S/W의 검증을 위해 현장조사를 실시한 결과 사면붕괴, 토사유출, 낙석 등의 피해가 17개소에서 발생하였고, SimpleX-Map을 활용한 재해위험등급과 비교분석한 결과 17개소 중 14개소가 1·2등급에 해당하여 82.4%의 정확도를 나타냄.



<그림 2-53> 2020년 8월 태풍이후 지방도 현장조사 결과

<표 2-9> 지방도 현장조사 결과

No	지방도		거리(km)	특이사항	등급	
1	410		58.73	낙석이력, 방호시설물 설치	1	
2				사면붕괴, 토사유출, 방호시설물 미설치	1	
3				낙석이력, 암석이탈, 방호시설물 미설치	3	
4	415	1	14.25	사면붕괴, 낙석이력, 방호시설물 설치	2	
5		3	6.17	낙석이력, 사면보강, 방호시설물 설치	2	
6				낙석이력, 방호시설물 미설치	2	
7		5	15.53	사면붕괴, 토석류, 방호시설물 미설치	3	
8	418		1	26.87	사면 붕괴, 전도수목, 방호시설물 설치	1
9				토사유출, 방호시설물 미설치	1	
10			2	14.77	암반사면 절리발달, 낙석이력, 용수유출, 방호시설물 설치	1
11					토사로 덮혀진 방호시설물, 경사 급함	2
12					방호시설물 미설치 구간 토사유출	2
13					사면붕괴, 토사유출, 방호시설물 설치	2
14					사면붕괴, 토사유출 방호시설물 일부 훼손	2
15					사면붕괴, 방호시설물 일부 훼손	2
16					사면붕괴, 낙석이력, 전도수목, 방호시설물 설치	3
17	446	1	23.48	사면붕괴	1	

① 1번 지점 - 1등급



- 1번 지점은 지방도로 410번에 위치한 지점으로 방호시설물이 설치되어 있으나 크고 작은 낙석이 발생한 이력이 있음

② 2번 지점 - 1등급



- 2번 지점은 지방도로 410번에 위치한 지점으로 토사 및 낙석을 방호하는 시설이 없으며 일부 구간에서 사면붕괴와 토사가 유출한 흔적이 있음

③ 3번 지점 - 3등급



- 3번 지점은 지방도로 410번에 위치한 지점으로 암석이 이탈하여 도로 인근에 낙석이 발생한 이력이 있음

④ 4번 지점 - 2등급



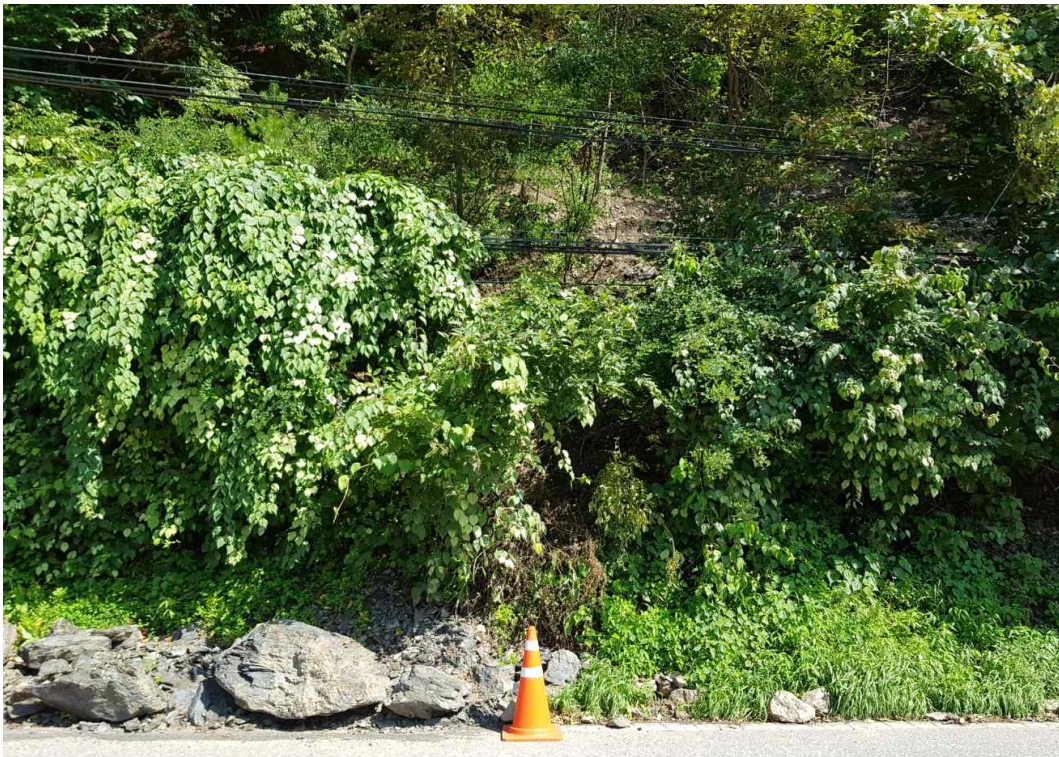
- 4번 지점은 지방도로 415번에 위치한 지점으로 돌망태형 옹벽이 설치되어 있으나 구조물 뒤로 사면이 붕괴된 흔적이 있음

⑤ 5번 지점 - 2등급



- 5번 지점은 지방도로 415번에 위치한 지점으로 슛크리트 공법으로 사면을 보강하였으며 낙석으로 인해 방호 구조물이 훼손되었음

⑥ 6번 지점 - 2등급



- 6번 지점은 지방도로 415번에 위치한 지점으로 인근에 방호 구조물이 없으며 낙석이 발생하여 적치되어 있음

⑦ 7번 지점 - 3등급



- 7번 지점은 지방도로 415번에 위치한 지점으로 많은 강우로 인해 사면붕괴와 토사유출이 발생하여 도로와 하천으로 유출되었으며 수목이 전도된 이력이 있음

⑧ 8번 지점 - 1등급



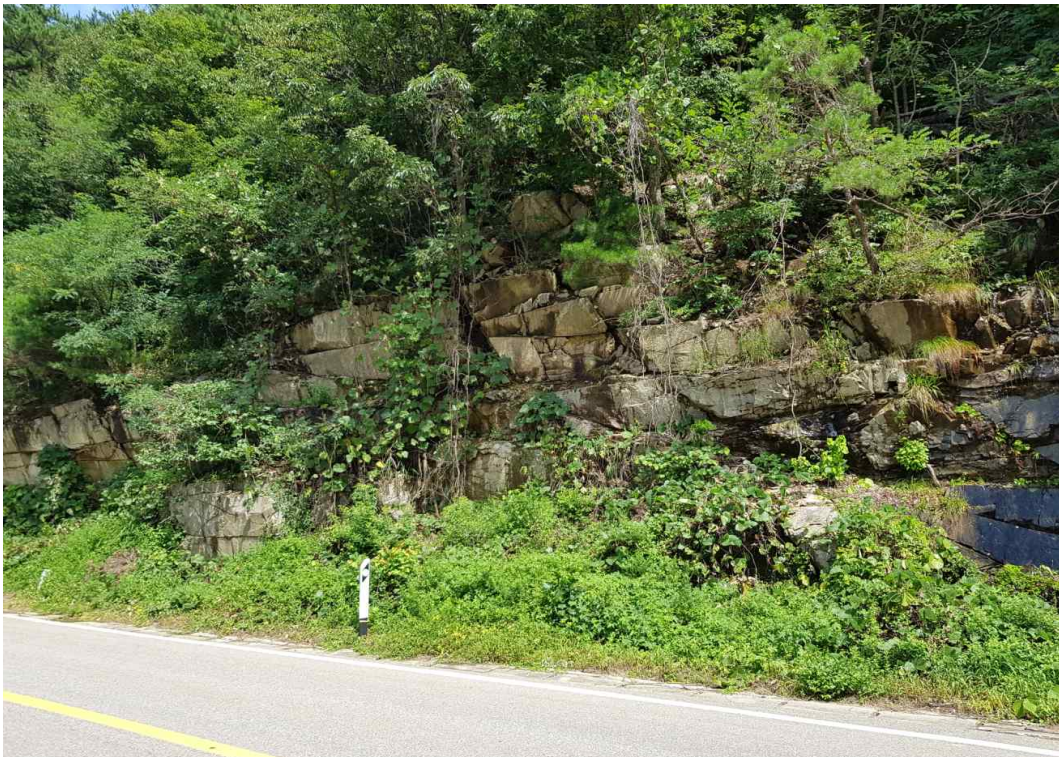
- 8번 지점은 지방도로 418번에 위치한 지점으로 돌망태형 옹벽이 설치되어 있으나 구조물 뒤로 사면이 붕괴하여 전도된 수목이 있음

⑨ 9번 지점 - 1등급



- 9번 지점은 지방도로 418번에 위치한 지점으로 많은 강우로 인해 토사 유출되어 도로에 유출되었음

⑩ 10번 지점 - 1등급



- 10번 지점은 지방도로 418번에 위치한 지점으로 사면이 암석으로 이루어져 있으나 경사가 급하며 절리가 발달하고 용수가 유출된 이력이 있음

⑪ 11번 지점 - 2등급



- 11번 지점은 지방도로 418번에 위치한 지점으로 방호 구조물이 설치되어 있으나 토사로 뒤덮혀있고 경사가 급함

⑫ 12번 지점 - 2등급



- 12번 지점은 지방도로 418번에 위치한 지점으로 많은 강우로 인해 도로에 다량의 토사가 유출되었음

⑬ 13번 지점 - 2등급



- 13번 지점은 지방도로 418번에 위치한 지점으로 많은 강우로 인해 사면붕괴와 토사유출이 발생함

⑭ 14번 지점 - 2등급



- 12번 지점은 지방도로 418번에 위치한 지점으로 많은 강우로 인해 사면붕괴와 토사유출이 발생하여 설치되어 있던 방호시설물이 훼손됨

⑮ 15번 지점 - 2등급



- 15번 지점은 지방도로 418번에 위치한 지점으로 많은 강우로 인해 사면붕괴와 토사유출이 발생하였으며 방호시설물이 일부 훼손됨

⑩ 16번 지점 - 3등급



- 16번 지점은 지방도로 418번에 위치한 지점으로 사면 상부에 붕괴가 발생한 이력이 있으며 전도된 수목도 있음

⑰ 17번 지점 - 1등급



- 17번 지점은 지방도로 446번에 위치한 지점으로 많은 강우로 인해 사면붕괴와 토사유출이 발생하였으며 방호시설물이 훼손됨

(나) 모형

마. Test-Bed 해석

(1) 재해확산특성 구현 정확도

(가) Test-Bed 내 재해발생지역 대상 수치해석 적용

① 재해발생 지역에 대한 재해 관련식의 적용

- 재해 해석을 위한 토석류 유동의 특성 분석이 중요함. 토석류의 특성은 토석류 우동, 소류집합 유동, 소류사 이동으로 구분할 수 있음

㉠ $\tan\theta_h \geq 0.138$ 의 경우 : 토석류 이동

$$c_{\infty} = \frac{\rho_s \tan\theta_h}{(\sigma - \rho_s)(\tan\psi - \tan\theta_h)} \quad \text{식 (2.37)}$$

㉡ $0.03 < \tan\theta_h < 0.138$ 의 경우 : 소류집합유동

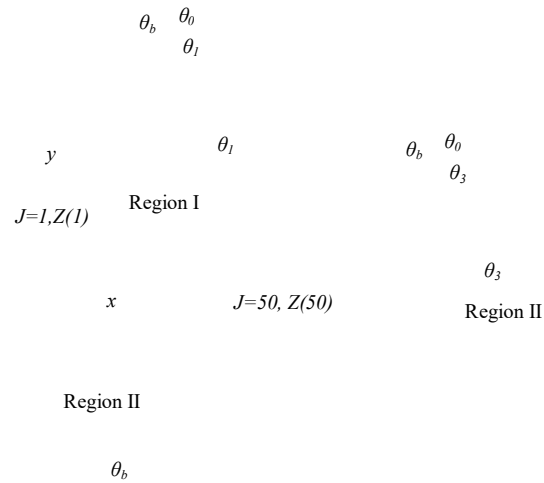
$$c_{\infty} = 6.7 \left\{ \frac{\rho_s \tan\theta_h}{(\sigma - \rho_s)(\tan\psi - \tan\theta_h)} \right\}^2 \quad \text{식 (2.38)}$$

㉢ $\tan\theta_h < 0.03$ 의 경우 : 소류 이동

$$c_{\infty} = \frac{(\tan\theta_h + 5 \tan\theta_h^2)}{(\sigma/\rho_s - 1)} \left(1 - \delta^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{\delta^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \quad \text{식 (2.39)}$$

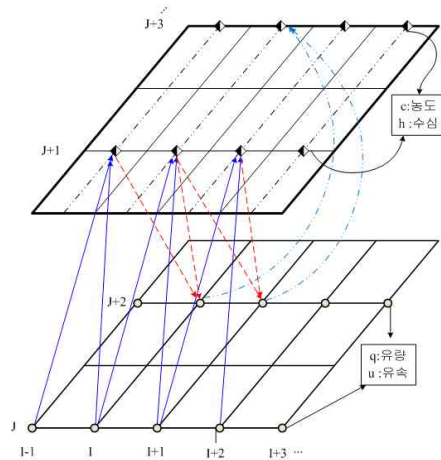
② 재해발생 지역에 대한 수치해석식의 적용

- 시간변화에 대하여 효율적인 유한차분법을 적용하며, 재해 발생지역에서의 이산화 과정을 진행함.
- 각각의 격자는 시간과 공간의 격자망을 이루며, 그 해석을 통해 결과값을 추출함.
- 재해발생 지역에 대상 수치해석 적용(그림 1과 2)



<그림 2-54> 각 수치해석 계산점에서의 유체표면경사의

설정



<그림 2-55> 토석류 유량, 유속, 유동심, 농도, 수심에 대한 격자의 설정

- 식 (2.40)~ (2.44)는 재해발생 지역에 대한 이산화과정에서 만들어진 식이며, 재해발생 지역에서 복합재해 관련 시간과 공간 격자망은 질량보존의 법칙과 운동량방정식을 만족함.

$$\frac{h_{I+1/2}^{J+3} - h_{I+1/2}^{J+1}}{2\Delta t} + \frac{q_{I+1}^{J+2} - q_I^{J+2}}{\Delta x} = i_{I+1/2}^{J+1} \quad \text{식 (2.40)}$$

$$\frac{(ch)_{I+1/2}^{J+3} - h_{I+1/2}^{J+1}}{2\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} [QC]_{I-}^{J+2} = i_{I+1/2}^{J+1} c_s \quad \text{식 (2.41)}$$

$$\frac{\{(1-c)c_f h\}_{I+1/2}^{J+3} - \{(1-c)c_f h\}_{I+1/2}^{J+1}}{2\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} [QF]_{I-}^{J-} = i_{I+1/2}^{J+1} (1-c_*)c_{*f} \quad \text{식 (2.42)}$$

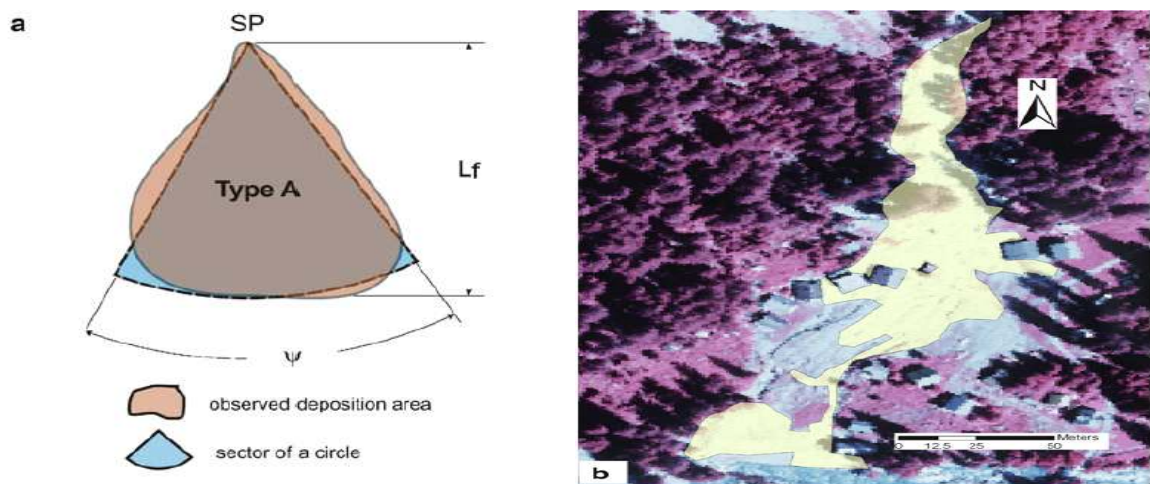
여기서,

$$\begin{aligned} [QC]_{I-}^{J-} &= c_{I+1/2}^{J+1} q_{I+1}^{J+2} - c_{I-1/2}^{J+1} q_I^{J+2} \quad \text{for } q_I^{J+2} \geq 0 \text{ and } q_{I+1}^{J+2} \geq 0 \\ [QC]_{I-}^{J-} &= c_{I+1/2}^{J+1} q_{I+1}^{J+2} - c_{I+1/2}^{J+1} q_I^{J+2} \quad \text{for } q_I^{J+2} < 0 \text{ and } q_{I+1}^{J+2} \geq 0 \\ [QC]_{I-}^{J-} &= c_{I+3/2}^{J+1} q_{I+1}^{J+2} - c_{I-1/2}^{J+1} q_I^{J+2} \quad \text{for } q_I^{J+2} \geq 0 \text{ and } q_{I+1}^{J+2} < 0 \\ [QC]_{I-}^{J-} &= c_{I+3/2}^{J+1} q_{I+1}^{J+2} - c_{I+1/2}^{J+1} q_I^{J+2} \quad \text{for } q_I^{J+2} < 0 \text{ and } q_{I+1}^{J+2} < 0 \end{aligned} \quad \text{식 (2.43)}$$

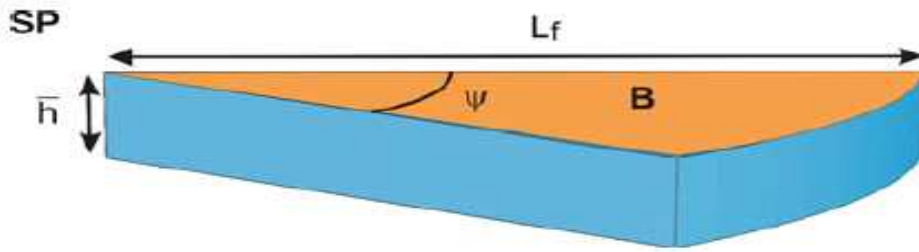
$$\begin{aligned} [QF]_{I-}^{J-} &= \{(1-c)c_f\}_{I+1/2}^{J+1} q_{I+1}^{J+2} - \{(1-c)c_f\}_{I-1/2}^{J+1} q_I^{J+2} \quad \text{for } q_I^{J+2} \geq 0 \text{ and } q_{I+1}^{J+2} \geq 0 \\ [QF]_{I-}^{J-} &= \{(1-c)c_f\}_{I+1/2}^{J+1} q_{I+1}^{J+2} - \{(1-c)c_f\}_{I+1/2}^{J+1} q_I^{J+2} \quad \text{for } q_I^{J+2} < 0 \text{ and } q_{I+1}^{J+2} \geq 0 \\ [QF]_{I-}^{J-} &= \{(1-c)c_f\}_{I+3/2}^{J+1} q_{I+1}^{J+2} - \{(1-c)c_f\}_{I-1/2}^{J+1} q_I^{J+2} \quad \text{for } q_I^{J+2} \geq 0 \text{ and } q_{I+1}^{J+2} < 0 \\ [QF]_{I-}^{J-} &= \{(1-c)c_f\}_{I+3/2}^{J+1} q_{I+1}^{J+2} - \{(1-c)c_f\}_{I+1/2}^{J+1} q_I^{J+2} \quad \text{for } q_I^{J+2} < 0 \text{ and } q_{I+1}^{J+2} < 0 \end{aligned} \quad \text{식 (2.44)}$$

③ 수치해석을 이용한 재해확산 범위

㉞ 복합재해 확산의 해석



<그림 2-56> (a) 토석류 A 유형. ψ 는 관측된 확산거리 L_f 와 동일한 반경을 가지는 호의 각을 나타냄. (b) 2005년 8월 29~30일에 발생한 Schisstalbach(스위스) 토석류

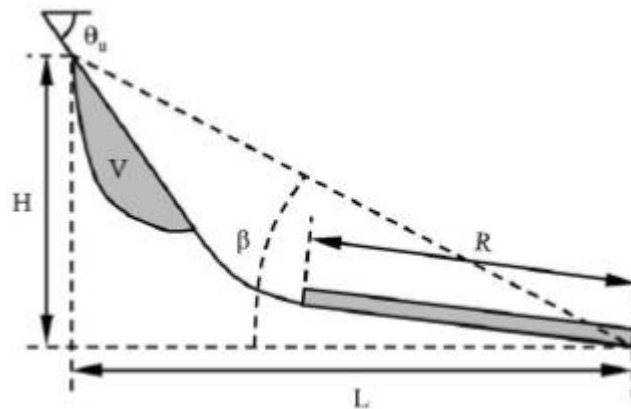


<그림 2-57> 퇴적유형을 설명하기 위한 원호형 섹터; SP는 퇴적의 시작점

- 확산거리 L_f 를 호의 각도 ψ 와 토석류 체적 V 의 함수로 표현할 수 있음

$$L_f \propto \psi^{-1/2} V^{1/3} \quad \text{식 (2.45)}$$

$$L_f = 65.3 \psi^{-1/2} V^{1/3} \quad \text{식 (2.46)}$$



<그림 2-58> 복합재해 확산길이

- 토석류 시뮬레이션을 위해 질량, 운동량, 에너지 보존 이용함.
- 런아웃 거리 R은 Hungr et al.(1984)와 Takahashi(1991)에 의해 개발된 다음의 이론 방정식으로 기술될 수 있음.

$$R = \frac{\{u_u \cos(\theta_u - \theta_d) [1 + (gh_u \cos \theta_u) / (2u_u^2)]\}^2}{g(S_f \cos \theta_d - \sin \theta_d)} \quad \text{식 (2.47)}$$

제2장 연구수행내용 및 성과

여기서, R : 유출거리, θ_d : 퇴적면적에 따른 지형경사, θ_u : 입구 수로 경사각도, u_u : 초기유속, h_u : 초기유동심, S_f : 마찰경사)

- $S_f=10$ 도일 때 관측된 R 값과 잘 맞음: Hungr (캐나다 5개의 토석류)
- $S_f=10$ 도 보다 $S_f = f \tan \theta_d$ ($f=1.12$)일 때 R 을 더 잘 예측: Okuda and Suwa (일본 14개 토석류)
- 관측된 유동심이 entry 유속을 측정할 때, $S_f = 1.08 \tan \theta_d$ 일 때 R 을 잘 예측함 Rickenmann (Swiss)
- 스위스와 일본에서 주요 토석류 surge가 가장 낮은 퇴적 지점에서 흐름의 폭은 변화가 없는 것을 가정하였음.

㉔ 재해유형 Coupling을 이용한 복합재해 구현

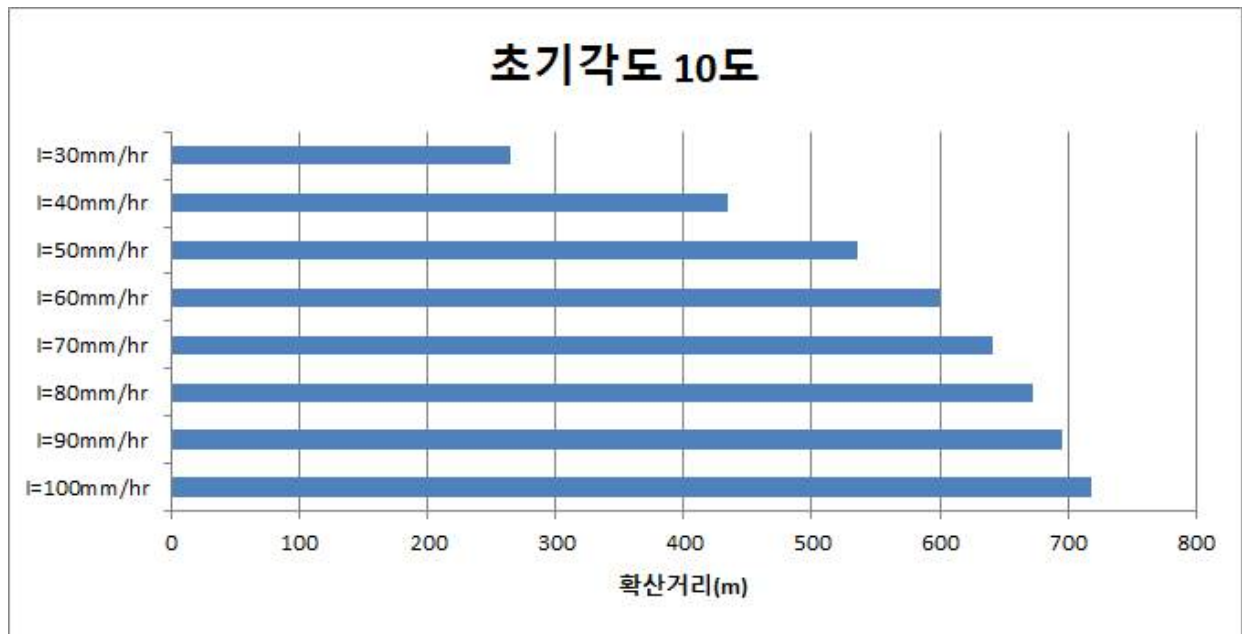
a. 집중호우 + 토석류 coupling - 수로 끝단을 기준으로(경사각도: 18도)

ㄱ. 토석류가 퇴적되기 시작하는 지역의 각도가 10도 일 때 확산범위

- <표2-10>과 <표 2-11>, <그림 2-59>와 <그림 2-60>은 집중호우와 토석류 커플링을 통해서 발생한 복합재해의 확산범위를 나타내며, 강우강도가 클수록 확산길이가 길어지고, 부채꼴의 사잇각이 작아짐.
- 이는 확산이 빠른 속도로 먼 거리에 도달함을 의미하며, 강우강도가 50mm/hr 이상일 경우 확산거리가 500m 이상 발생함을 알 수 있다. 따라서, 강우강도가 50mm/hr 이상의 집중호우 시에는 이에 대한 대비가 더욱 신속해야함을 의미함.
- 집중호우 + 토석류 coupling의 경우 강우강도가 강할수록 부채꼴의 사잇각이 작아지고, 확산거리는 길어짐을 나타냄.
- 이는 집중호우가 강하게 되면, 초기 확산범위는 좁혀지지만, 빠른 속도로 긴 거리를 유하하기 때문에 점점 확산이 방사형태로 진행되면서 확산범위 및 확산체적은 넓혀지는 것을 알 수 있음.

<표 2-10> 강우강도 변화에 따른 확산범위(초기각도 10도)

강우강도(mm/hr)	R(m)	초기각도(°)	부채꼴 사잇각(°)
I=100	718.893	10	54.13427
I=90	695.8175	10	60.73769
I=80	673.1797	10	64.26386
I=70	641.5611	10	70.75431
I=60	600.3555	10	75.76967
I=50	536.052	10	91.31024
I=40	434.8231	10	130.6316
I=30	265.2882	10	180
I=20	186.0079	10	180



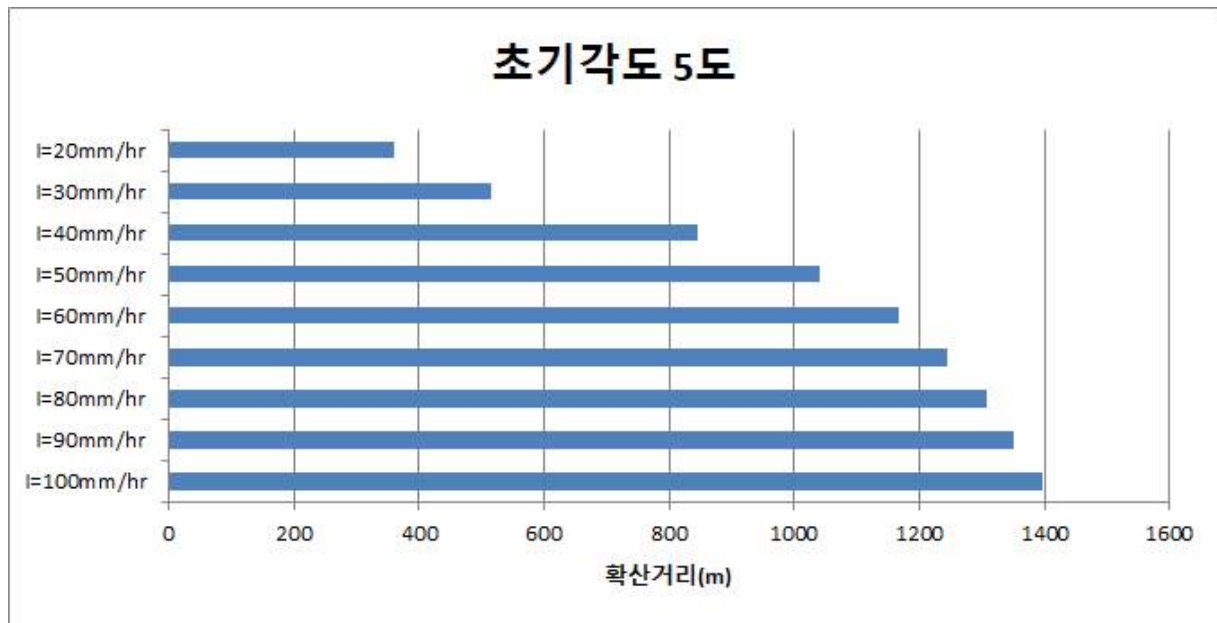
<그림 2-59> 강우강도 변화에 따른 복합재해 확산거리(초기각도 10도)

ㄴ. 토석류가 퇴적되기 시작하는 지역의 각도가 5도 일 때 확산범위

- <표2-11>과 <그림 2-60>는 초기각도가 5도인 경우 집중호우와 토석류 커플링을 통해서 발생한 복합재해의 확산범위를 나타내며, 초기각도가 5도인 경우 10도인 경우보다 부채꼴의 사잇각이 작고, 더 먼거리를 유하하는 것을 나타낸다.

<표 2-11> 강우강도 변화에 따른 확산범위(초기각도 5도)

강우강도(mm/hr)	R(m)	초기각도(°)	부채꼴 사잇각(°)
I=100	1396.03	5	14.35526
I=90	1351.219	5	16.10635
I=80	1307.259	5	17.04142
I=70	1245.858	5	18.76255
I=60	1165.84	5	20.09251
I=50	1040.968	5	24.21355
I=40	844.3901	5	34.64073
I=30	515.1676	5	84.00137
I=20	361.2119	5	131.8983



<그림 2-60> 강우강도 변화에 따른 복합재해 확산거리(초기각도 5도)

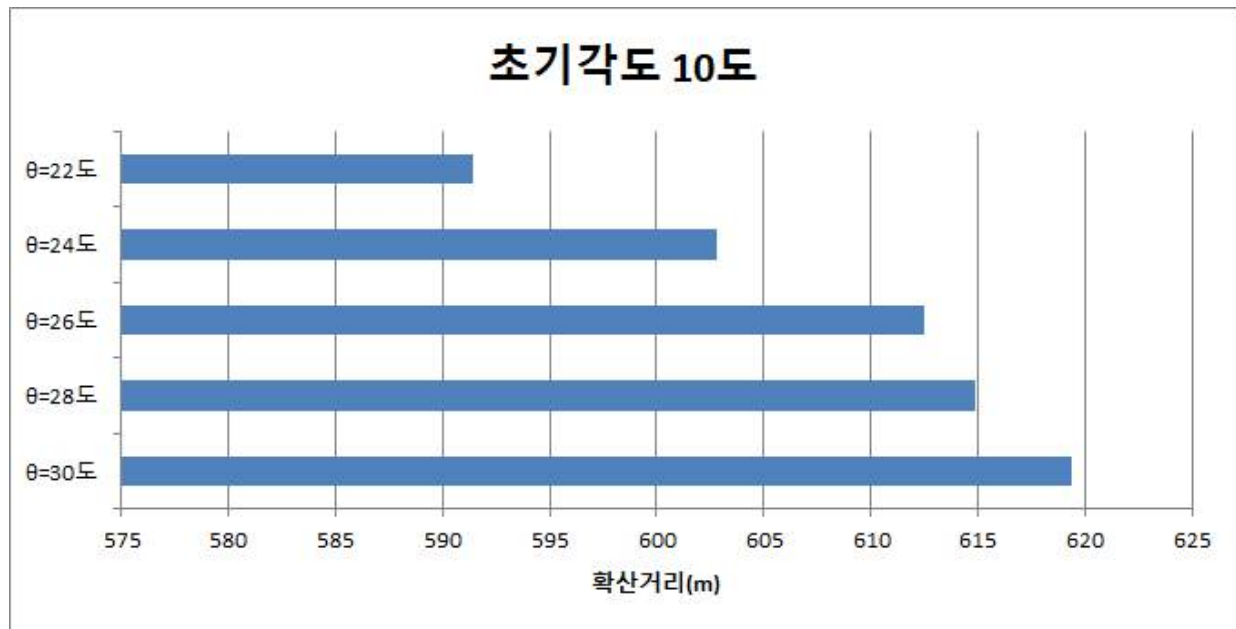
b. 급경사지 + 토석류 coupling - 수로 끝단을 기준으로(강우강도: 60mm/hr)

ㄱ. 토석류가 퇴적되기 시작하는 지역의 각도가 10도 일 때 확산범위

- <표 2-12>와 <표 2-13>, <그림 2-61>과 <그림 2-62>는 급경사지와 토석류 커플링을 통해서 발생한 복합재해의 확산범위를 나타내며, 복합재해가 대부분 590m 이상 유하하며, 경사각도가 큰 급경사지일수록 유하길이가 길고 부채꼴의 사잇각이 좁아지지만, 그 차이는 크지 않음을 알 수 있음.
- 집중호우와 토석류 커플링의 경우보다 부채꼴의 사잇각이 탁월하게 넓으며, 이는 급경사지에서의 복합재해의 확산범위는 초기부터 wide(넓게) 유하하는 것을 알 수 있으며, 산지 근처에서 상당한 피해를 야기할 수 있음을 나타낸다.
- 급경사지 + 토석류 coupling의 경우 경사각도에 상관없이 확산각도가 95도~110도 범위로 넓혀지며, 확산거리도 약 600m이상 길어지는 것을 알 수 있음.
- 이는 급경사지에서는 확산범위가 빠르게 넓혀지고, 확산길이가 길어지는 것을 의미하며, 급경사지에서의 토석류의 위험성을 잘 나타내고 있음

<표 2-12> 급경사지 각도 변화에 따른 확산범위(초기각도 10도)

경사각도(°)	R(m)	초기각도(°)	부채꼴 사잇각(°)
$\theta=30$	619.3744	10	95.90659
$\theta=28$	614.9167	10	98.8141
$\theta=26$	612.4994	10	100.4253
$\theta=24$	602.813	10	104.0083
$\theta=22$	591.4113	10	108.6159

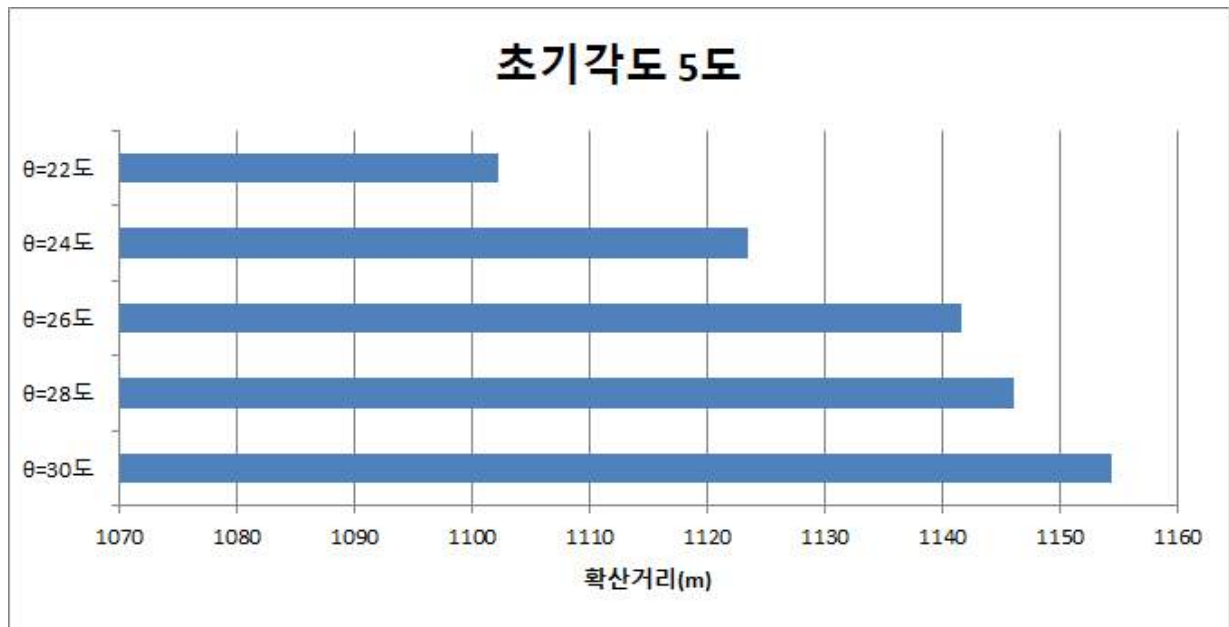


<그림 2-61> 급경사지 각도 변화에 따른 복합재해 확산거리(초기각도 10도)

ㄴ. 토석류가 퇴적되기 시작하는 지역의 각도가 5도 일 때 확산범위

<표 2-13> 급경사지 각도 변화에 따른 확산범위(초기각도 5도)

경사각도(°)	R(m)	초기각도(°)	부채꼴 사잇각(°)
θ=30	1154.348	5	27.61093
θ=28	1146.041	5	28.44798
θ=26	1141.535	5	28.91184
θ=24	1123.483	5	29.94337
θ=22	1102.233	5	31.26985



<그림 2-62> 급경사지 각도 변화에 따른 복합재해 확산거리(초기각도 5도)

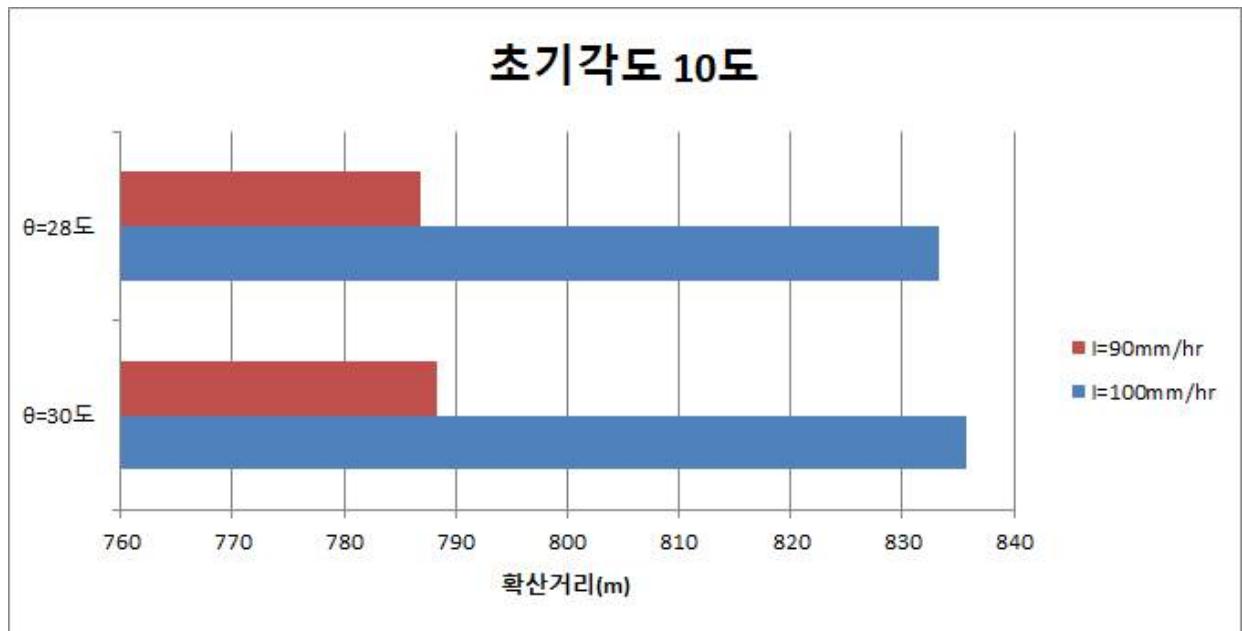
c. 집중호우 + 급경사지 + 토석류 coupling - 수로 끝단을 기준으로(강우강도: 90~100mm/hr, 경사각도 28~30도)

ㄱ. 토석류가 퇴적되기 시작하는 지역의 각도가 10도 일 때 확산범위

- <표 2-14>와 <표 2-15>, <그림 2-63>과 <그림 2-64>는 집중호우 및 급경사지와 토석류 커플링을 통해서 발생한 복합재해의 확산범위를 나타내며, 강우강도가 90mm/hr에서는 약 780m 이상 복합재해가 유하하며, 100mm/hr에서는 830m이상 유하하는 것으로 나타남. 경사각도 28도와 30도에서의 차이는 크게 나타나지 않았음. 이는 급경사지에서는 급경사지에 포함된 경사도에서는 비록 적은 경사도일지라도 복합재해에 의한 피해의 확산이 크게나타남을 알 수 있다.
- 집중호우 + 급경사지 + 토석류 coupling의 경우 확산각도는 45도~60도 범위를 유지하고, 확산거리는 800m 이상을 유하함을 알 수 있다.
- 위의 두 가지 coupling에 비해 확산각도는 좁아지지만, 확산거리가 상대적으로 길고 빠르게 유하함을 알 수 있음. 따라서, 좁은 각도를 유지하며 방사형태로 넓어지기 때문에 확산범위는 위의 두 가지 경우보다 훨씬 넓고, 길며, 토석류 양도 증대될 것으로 판단됨.

<표 2-14> 강우강도 및 경사각도 변화에 따른 확산범위(초기각도 10도)

강우강도(mm/hr)	경사각도(°)	R(m)	초기각도(°)	부채꼴 사잇각(°)
I=100	30	835.6485	10	45.98092
I=100	28	833.3196	10	46.83685
I=90	30	788.3941	10	59.63018
I=90	28	786.8449	10	59.72111



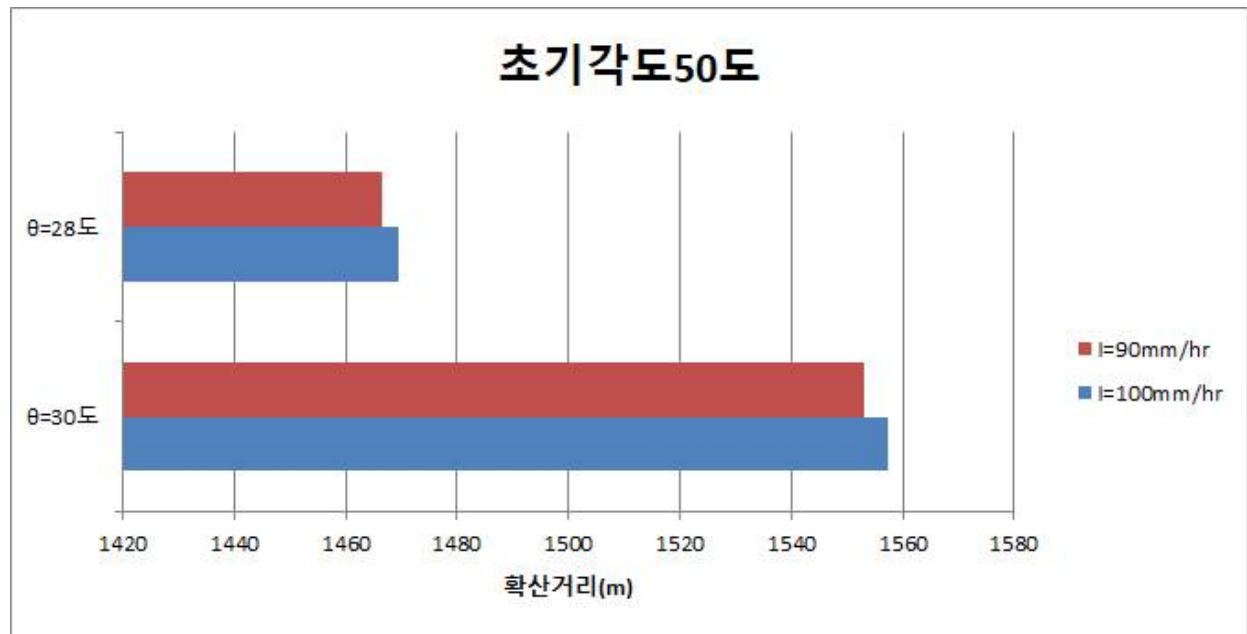
<그림 2-63> 강우강도 및 경사각도 변화에 따른 확산범위(초기각도 10도)

ㄴ. 토석류가 퇴적되기 시작하는 지역의 각도가 5도 일 때 확산범위

- <표 2-15>와 <그림 2-64>에서 보듯이 하류지역의 초기각도가 5도인 경우 집중호우의 차이에 따라 확산범위가 상당한 차이가 나타남을 알 수 있다. 즉 약 경사도를 갖는 하류지역은 집중호우가 강할수록 빠른속도로 유하하는 복합재해에 의한 토석류 피해를 크게 받을 수 있으므로 이에 대한 대비가 필요함.

<표 2-15> 강우강도 및 경사각도 변화에 따른 확산범위(초기각도 5도)

강우강도(mm/hr)	경사각도(°)	R(m)	초기각도(°)	부채꼴 사잇각(°)
I=100	30	1557.426	5	13.23763
I=100	28	1469.356	5	13.48405
I=90	30	1553.085	5	17.16717
I=90	28	1466.469	5	17.19335



<그림 2-64> 강우강도 및 경사각도 변화에 따른 확산범위(초기각도 5도)

(나) 개발 S/W 적용 결과와 비교검정

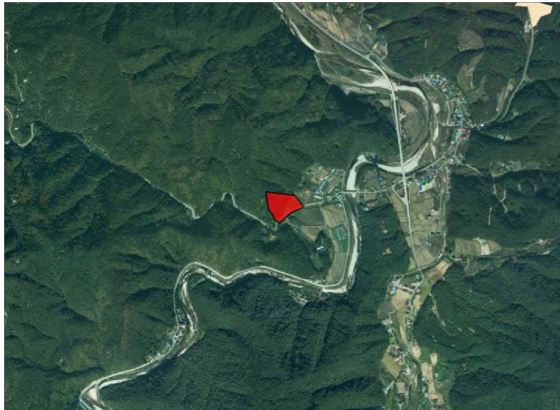
① 테스트 베드 선정

- 확산범위 및 피해정도를 비교검정하기 위한 테스트 베드를 선정함
- 강릉시 지방도 410번 및 418번 지역에서 소유역 4곳과 중유역 2곳을 선정함.

㉞ 소유역(강릉시 지방도 418, 410)

<표 2-16> 테스트 베드 제원(소유역)

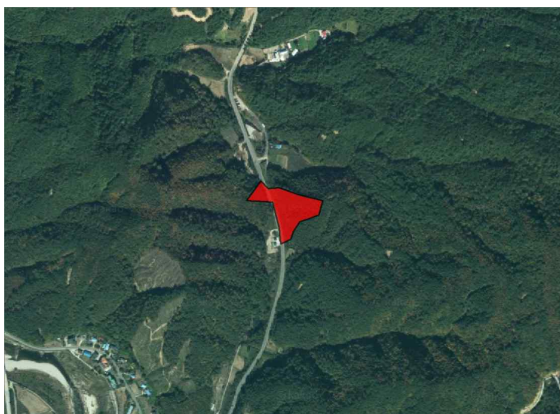
no.	유역면적 (km ²)	경사(°)			피해면적		유로연장 (m)
		최대(°)	최저(°)	평균(°)	(m ²)	(km ²)	
1	0.020	40.712	4.719	25.736	738.7938	0.000739	55.51267
5	0.079	46.058	10.687	32.303	14161.85	0.014162	290.2383
11	0.044	38.291	1.748	24.582	1259.317	0.001259	120.0382
12	0.013	46.375	2.913	27.033	1422.398	0.001422	49.95936



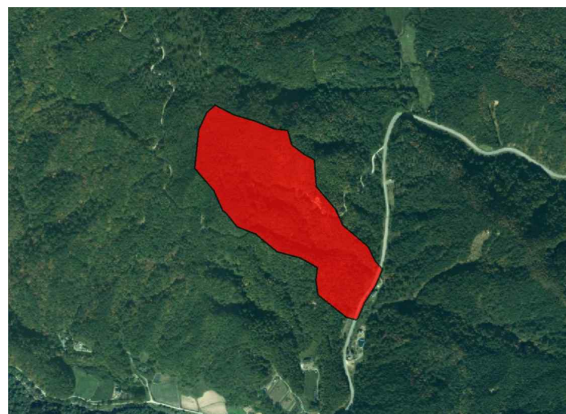
<그림 2-65> 테스트 베드 No. 1



<그림 2-66> 테스트 베드 No. 5



<그림 2-67> 테스트 베드 No. 11



<그림 2-68> 테스트 베드 No. 12

④ 중유역(강릉시 지방도 418)

<표 2-17> 테스트 베드 제원(중유역)

no.	유역면적 (km ²)	경사(°)			피해면적		유로연장 (m)
		최대(°)	최저(°)	평균(°)	(m ²)	(km ²)	
9	0.147	44.881	3.110	31.737	7065.566	0.007066	235.6484
10	0.129	48.354	0.987	35.981	8174.573	0.008175	231.4991



<그림 2-69> 테스트 베드 No. 9



<그림 2-70> 테스트 베드 No. 10

② 개발 S/W 프로그램 입력값 설정을 위한 수치프로그램

㉠ 입력값

- 입력값의 설정(집중호우의 강우강도, 도로에 인접한 유역 및 산지에서의 경사각도(급경사지), 집중호우의 지속시간, 지역특성, 지형특성, 자연환경 특성)
- 입력값의 조정
- Test-bed 내 재해발생 지역의 특성입력값의 설정
- 복합재해 coupling에 대한 프로그램 상에서의 입력값의 설정

㉡ 출력값

- 출력값의 설정(지방도로로 유출된 토석류 유량, 토석류 유동심, 토사체적농도, 지방도로까지의 확산거리, 확산유형, 확산범위)
- 출력값의 조정
- 복합재해 확산유형의 설정(부채꼴 형상의 각도)
- 복합재해 확산거리 및 범위의 설정

㉢ 개발 S/W 수치 프로그램 계산

- 임의의 설정(강우강도+토석류 커플링, 급경사지+토석류 커플링, 강우강도+급경사지+토석류 커플링)
- Test-bed 내 재해발생 지역 대상의 적용
- 시간 변화에 대한 계산 규모 또는 범위의 적용
- Test-bed 내 재해발생 지역 대상 수치해석 적용 결과와의 비교 검토

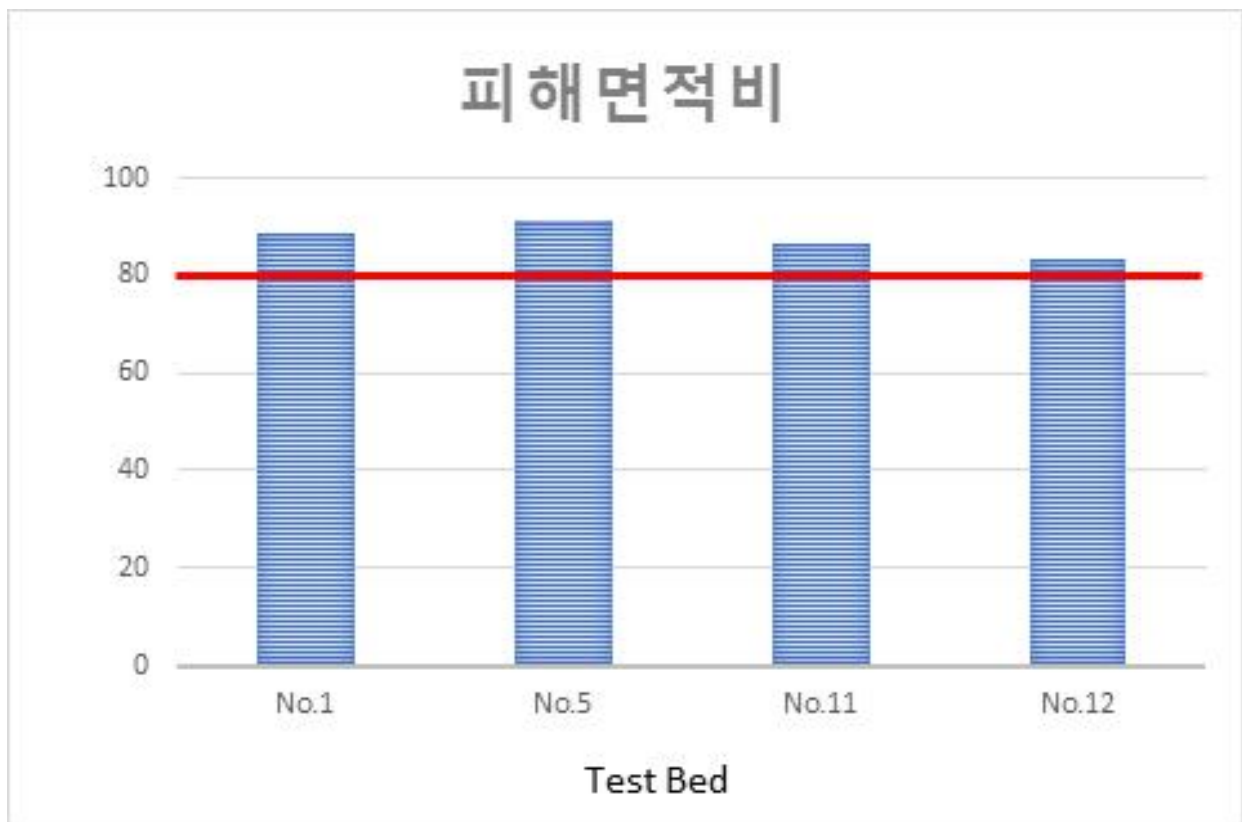
③ 테스트 베드와 비교검정

㉠ 소유역

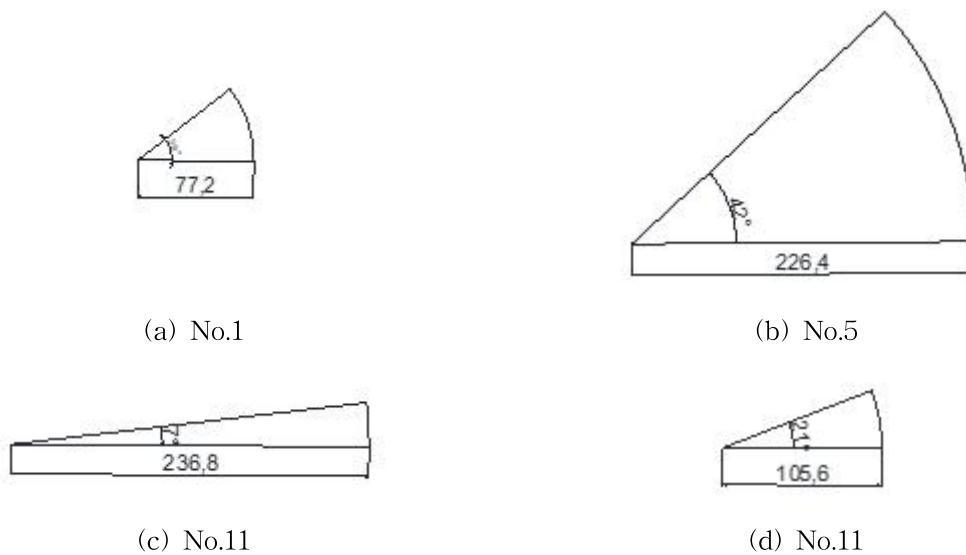
- <표 2-18>과 <그림 2-71> 소유역에서 테스트 베드에서의 실제피해면적과 수치해석 소프트웨어로 적용한 수치피해면적의 비를 분석한 결과이다. 결과분석에는 각각의 테스트 베드에서의 피해확산거리, 확산범위를 규명하기 위한 확산범위 각도(부채꼴 각도), 수치피해면적이다.
- 모든 테스트 베드에서 실제피해면적/수치피해면적의 비가 80%이상을 나타냈으며, No.5 지역에서는 91%의 높은 정확도를 나타냈다.

<표 2-18> 소유역에서의 비교검정 분석결과

No.	평균경사 (°)	확산거리 R(m)	부채꼴 각도(°)	수치피해 면적(m ²)	실제피해 면적(m ²)	실제피해면적/ 수치면적(%)
No.1	25.736	77.2	38	885.4378282	783.79	88.52004907
No.5	32.303	226.4	41.7	15507.27286	14161.85	91.32392347
No.11	24.582	236.8	7	1455.171103	1259.317	86.54081968
No.12	27.033	154.4	13	1189.05048	1422.398	83.59478



<그림 2-71> 소유역에서의 비교검정 분석결과



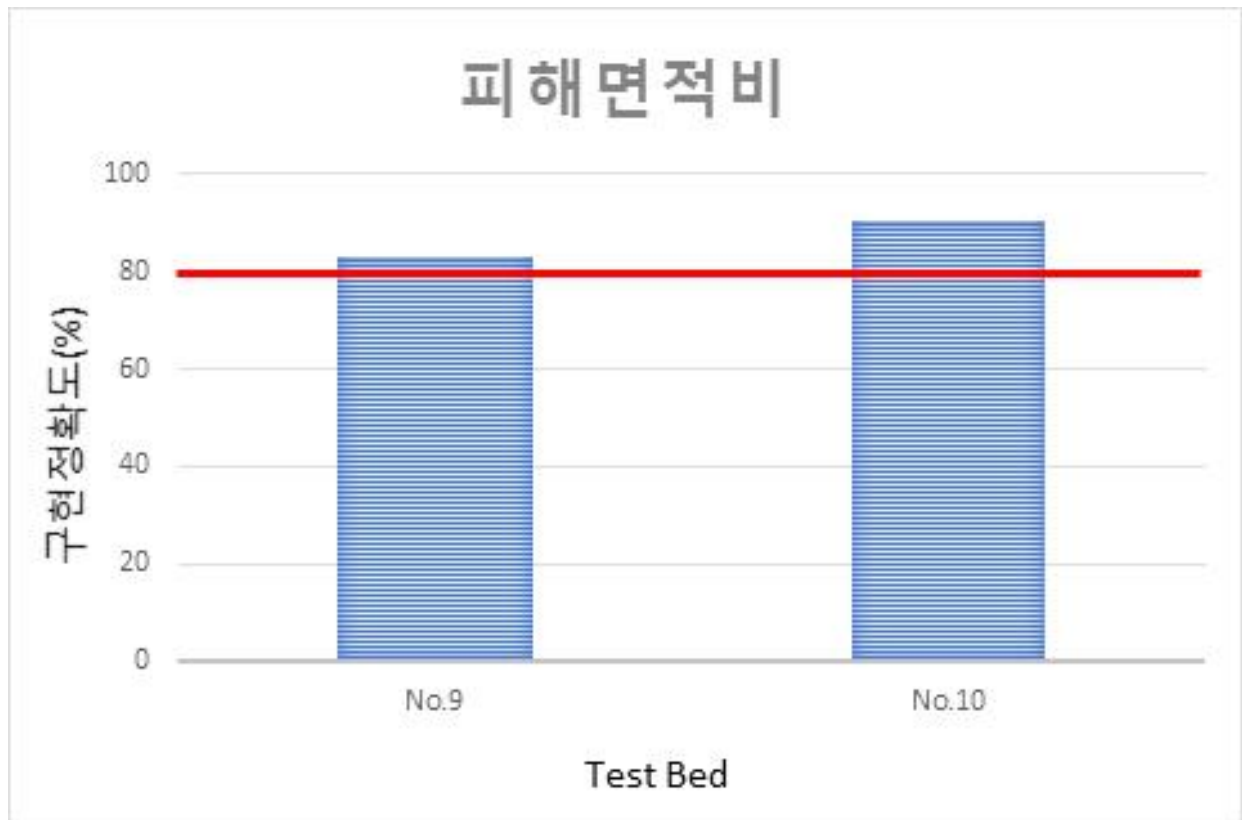
<그림 2-72> 소유역에서의 복합재해 확산각도와 확산거리

㉔ 중유역

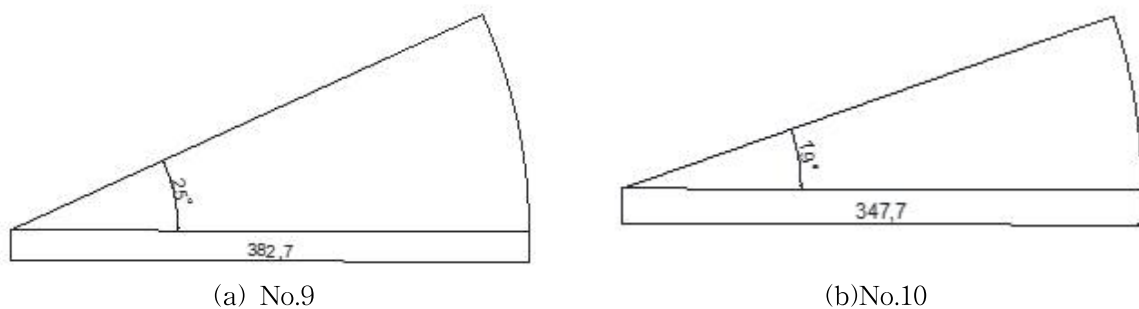
- <표 2-19>와 <그림 2-73> 중유역에서 테스트 베드에서의 실제피해면적과 수치해석 소프트웨어로 적용한 수치피해면적의 비를 분석한 결과이다. 결과분석에는 각각의 테스트 베드에서의 피해확산거리, 확산범위를 규명하기 위한 확산범위 각도(부채꼴 각도), 수치피해면적이다.
- 모든 테스트 베드에서 실제피해면적/수치피해면적의 비가 80%이상을 나타냈으며, No.10 지역에서는 91%의 높은 정확도를 나타냈다.

<표 2-19> 중유역에서의 비교검정 분석결과

No.	평균경사 (°)	확산거리 R(m)	부채꼴 각도(°)	수치피해 면적(m ²)	실제피해 면적(m ²)	실제피해면적/ 수치면적(%)
No.9	31.737	382.7	24.7	8487.9597	7065.566	83.24221898
No.10	35.981	347.7	19.2	9040.85911	8174.573	90.41809966



<그림 2-73> 중유역에서의 비교검정 분석결과



<그림 2-74> 중유역에서의 복합재해 확산각도와 확산거리

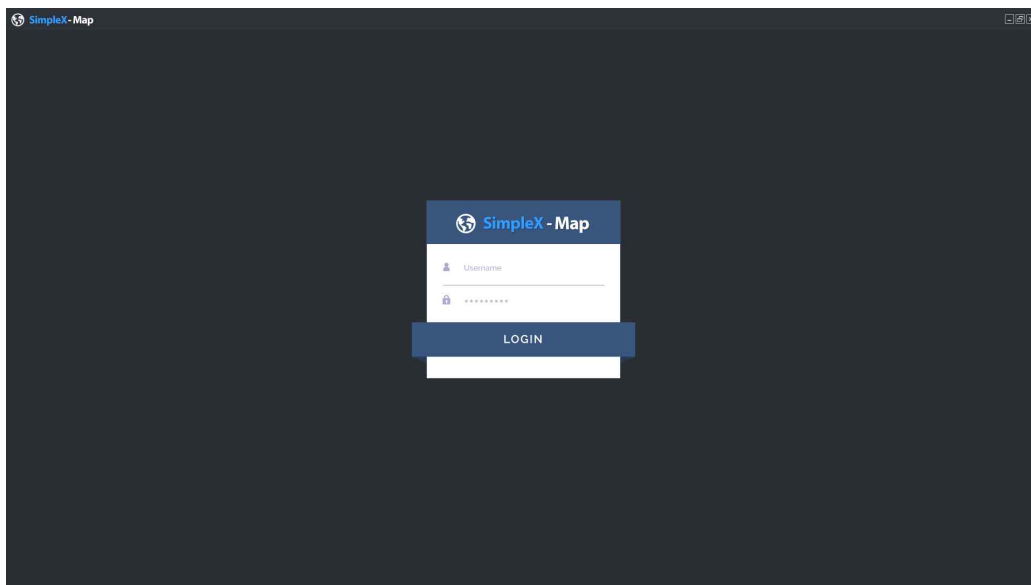
㉔ 분석결과

- 위의 분석결과 소유역과 중유역 구분없이 모든 테스트 베드에서 본 프로그램의 수치해석 소프트웨어는 재해확산특성 구현 정확도가 모두 80% 이상으로 나타났으며, 90%를 넘는 경우도 나타남.
- 따라서, 본 프로그램은 이 구현 정확도를 바탕으로 복합재해 확산의 피해범위를 규명하며, 그 피해 정확도를 높이는 데, 사용가능함.

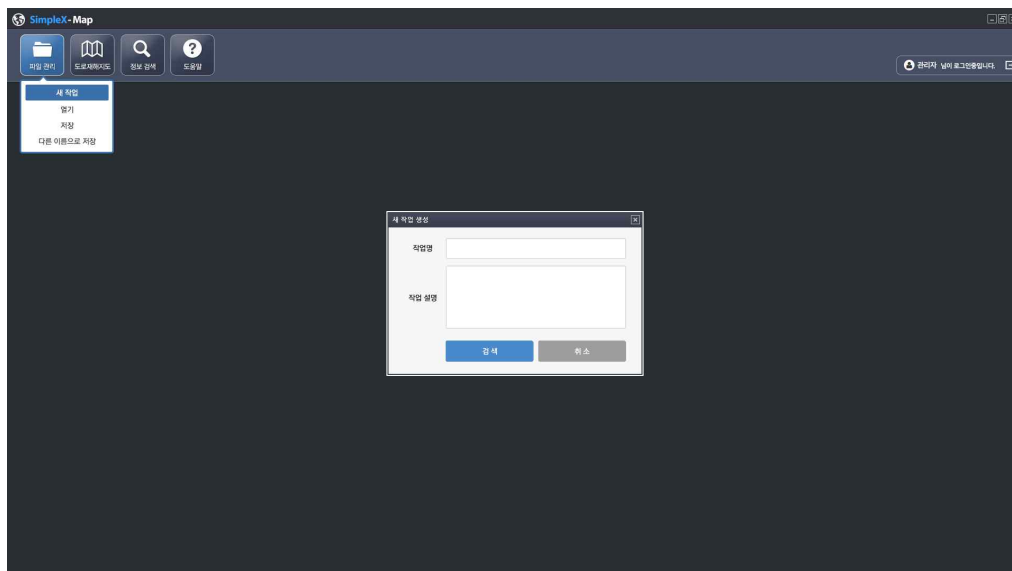
제2장 연구수행내용 및 성과

(다) 사용자중심 도로재해 취약성분석 S/W

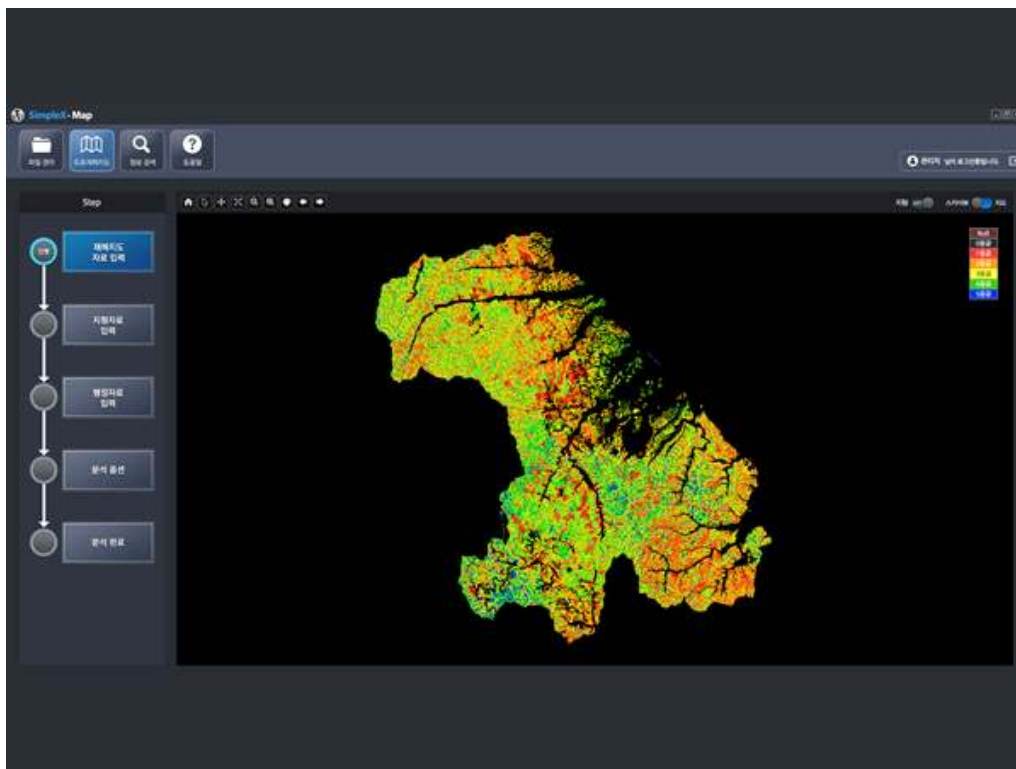
- 메뉴는 파일관리, 도로재해지도, 정보검색 및 도움말로 구성
- 따라하기의 절차에 따라 Default 값하여 손쉽게 정보를 확인 및 가공할 수 있음



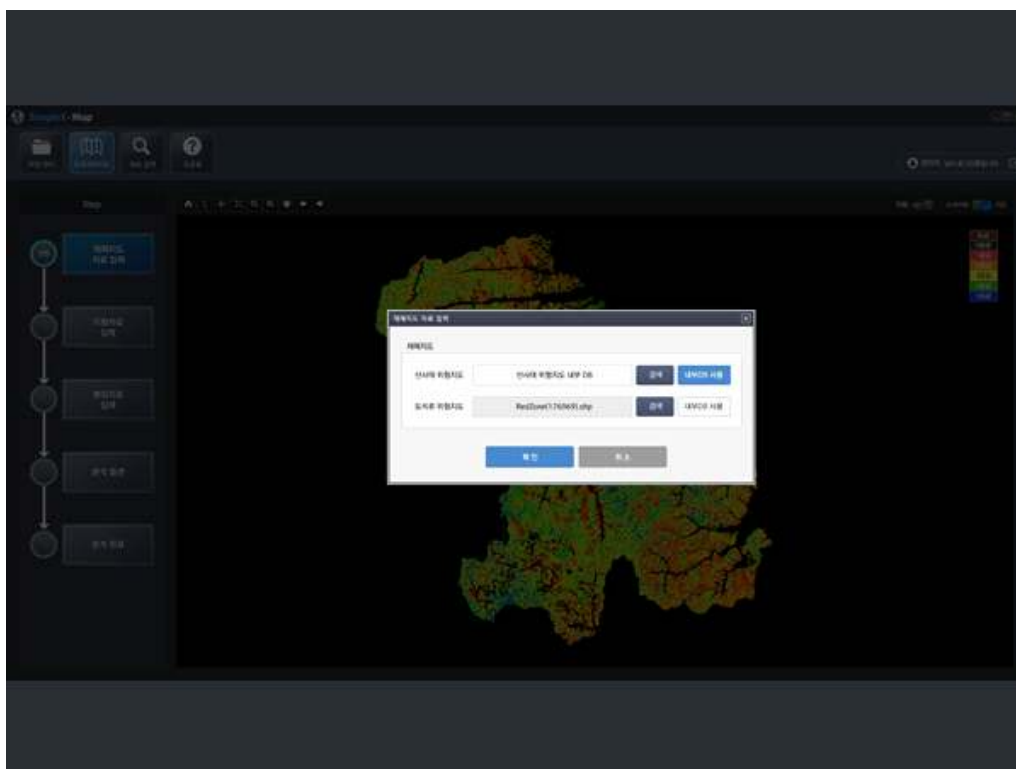
<그림 2-75> 로그인 팝업창



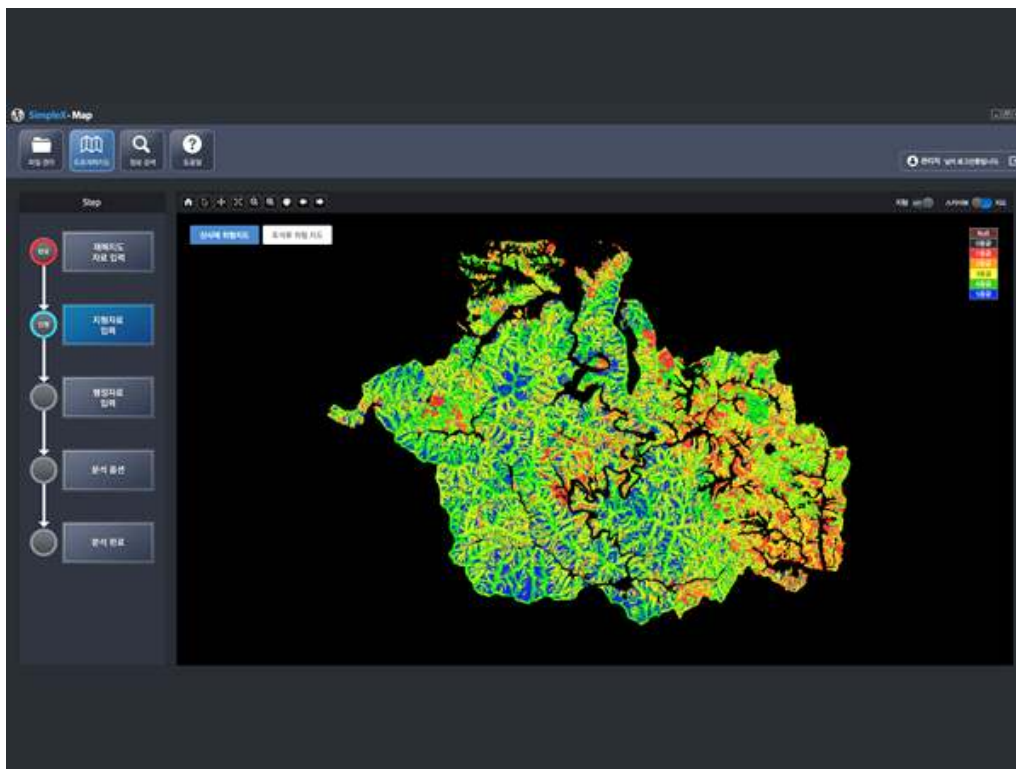
<그림 2-76> 파일관리 팝업창



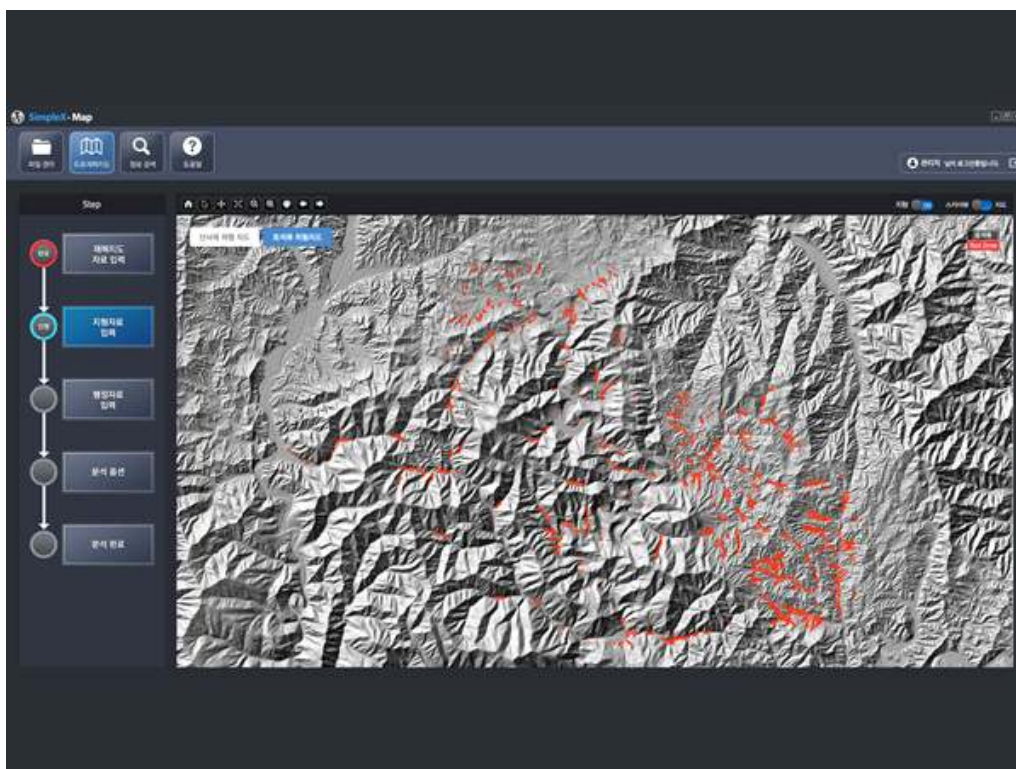
<그림 2-77> 재해지도 자료 입력(내부자료)



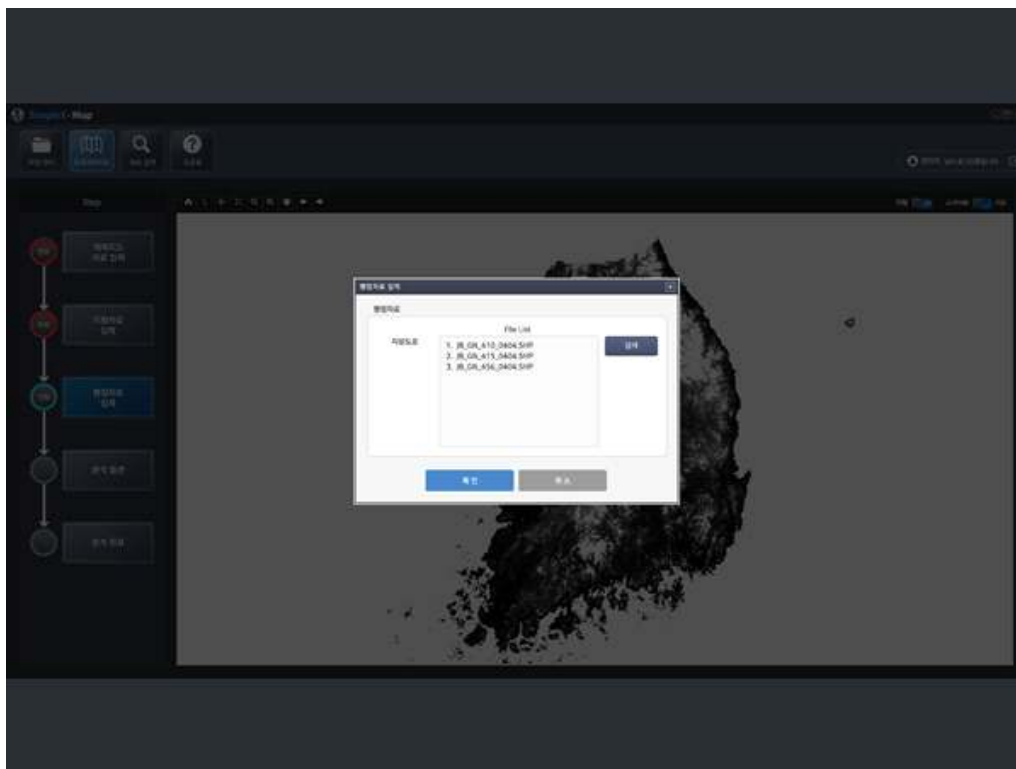
<그림 2-78> 재해지도 자료 입력 팝업창(산사태 재해지도, 토석류 재해지도)



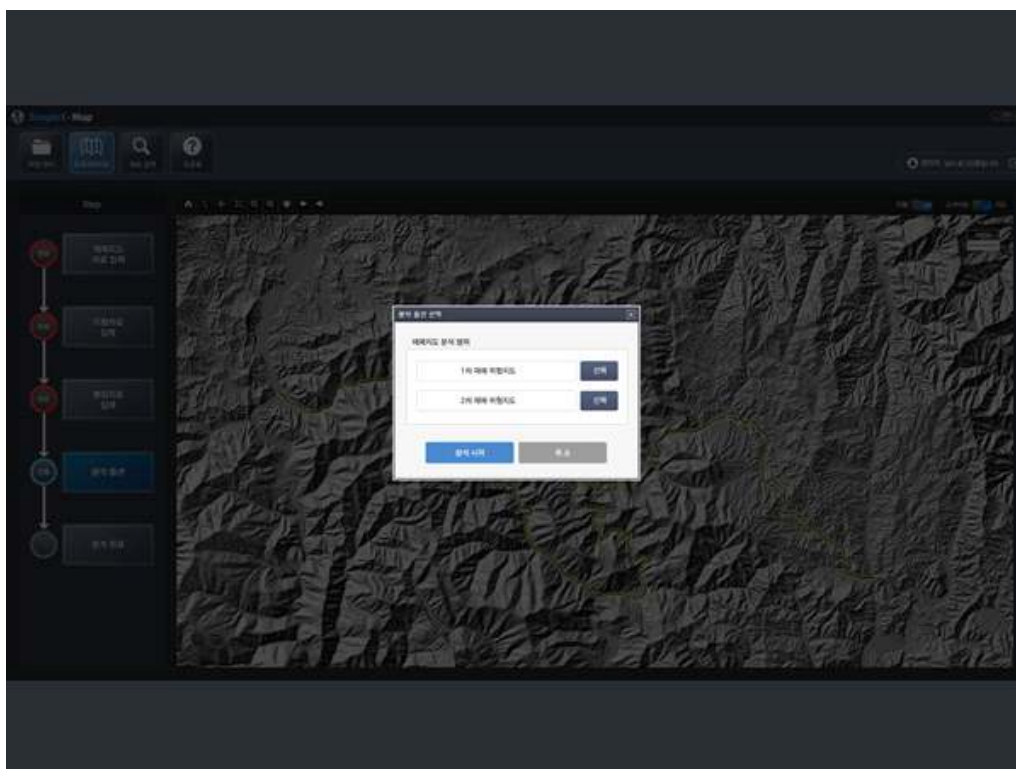
<그림 2-79> 재해지도(산사태 재해지도)



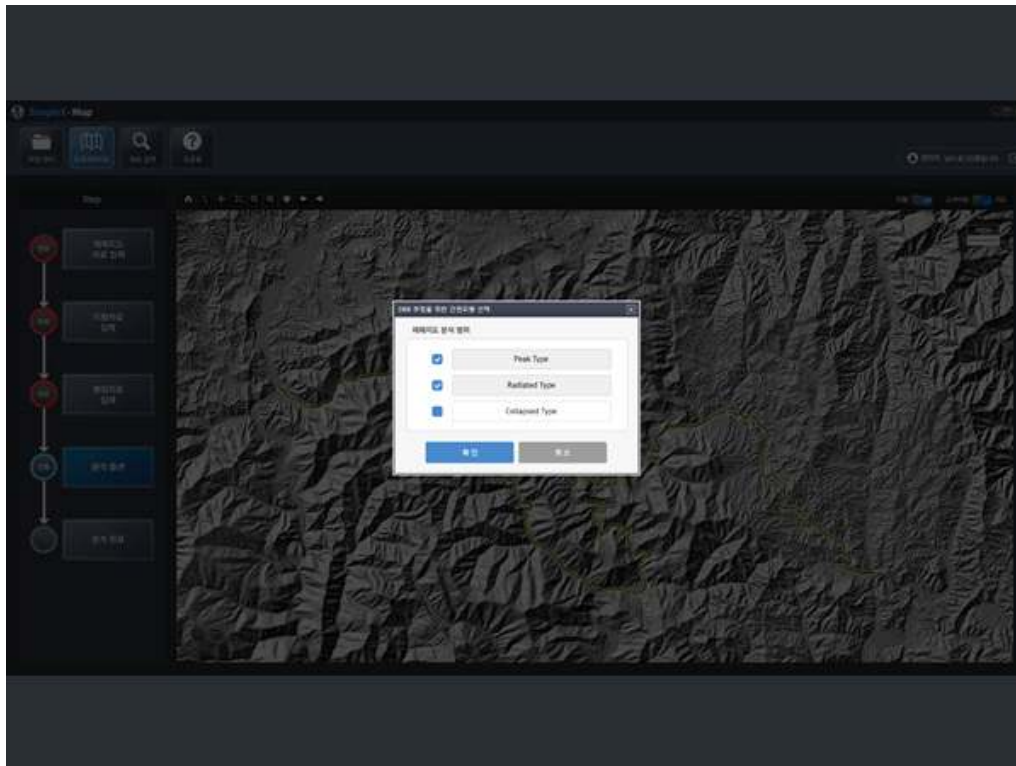
<그림 2-80> 재해지도(토석류 재해지도, 지형 ON)



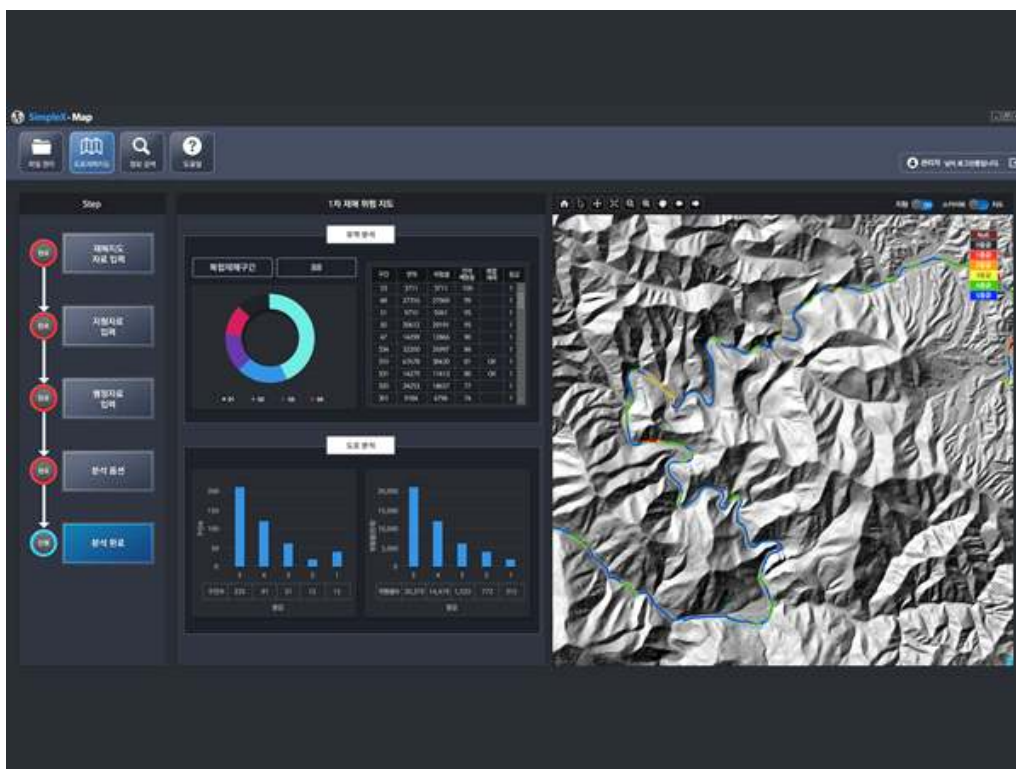
<그림 2-81> 행정자료 입력(내부자료 제공)



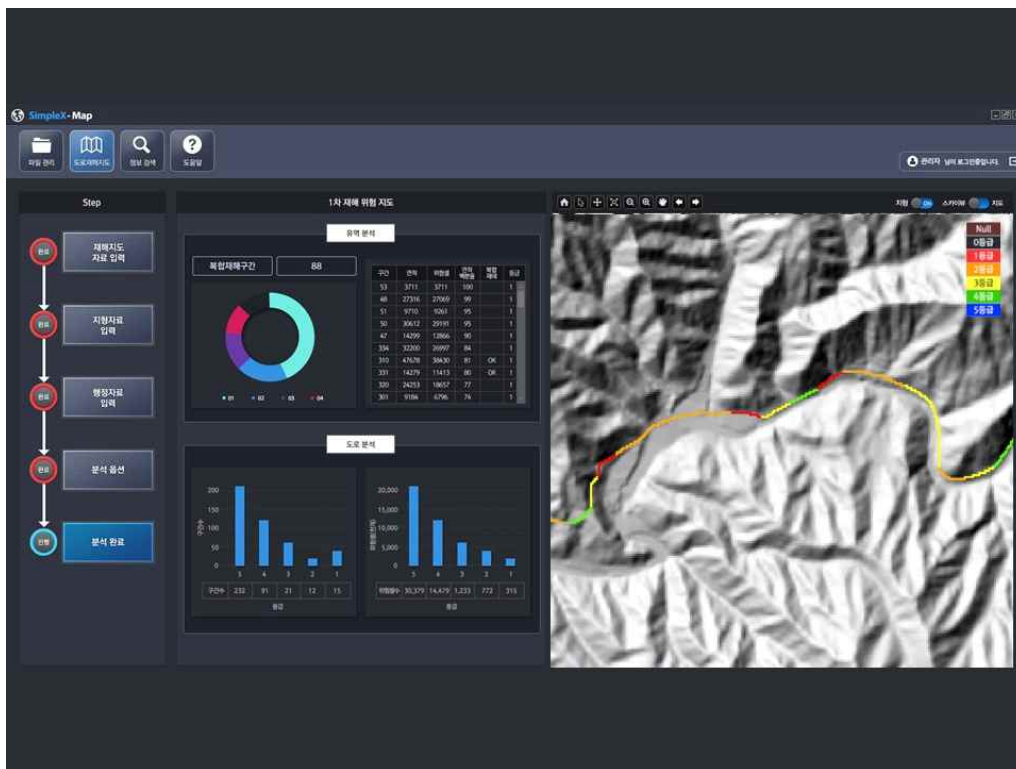
<그림 2-82> 분선 옵션 선택 팝업창(재해지도 분석 범위)



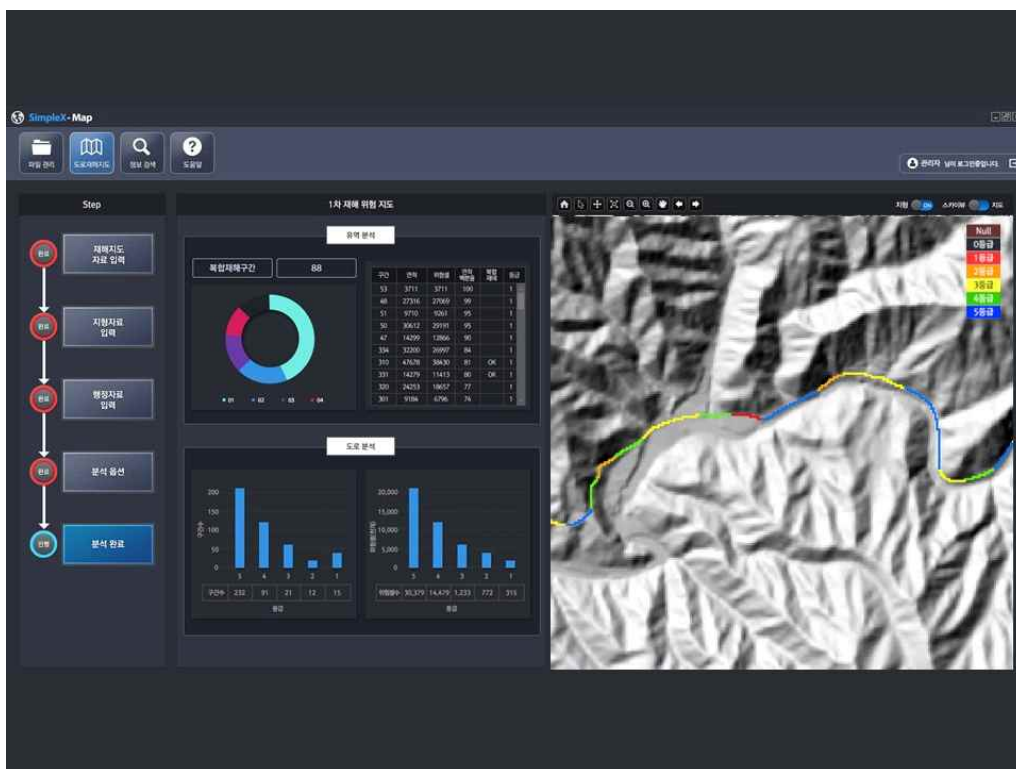
<그림 2-83> DPR 추정을 위한 간편모형 선택 옵션 팝업



<그림 2-84> 분석결과(정보표출 및 검색)



<그림 2-85> 1차 재해 위험지도



<그림 2-86> 2차 재해 위험지도

제2장 연구수행내용 및 성과

- 본 연구의 Test-bed인 지방도로는 410번, 415번, 418번, 446번, 456번으로 지방도의 총 연장은 234.69km에 해당함. 복합재해를 고려한 도로유역의 1차 재해위험등급은 1등급(위험)~5등급(안전)으로 분류되며, 1등급의 도로유역은 190개, 2등급 170개, 3등급 211개, 4등급 441개, 5등급 505개로 나타남.

<표 2-20> 지방도 1차 재해위험도 등급별 분류

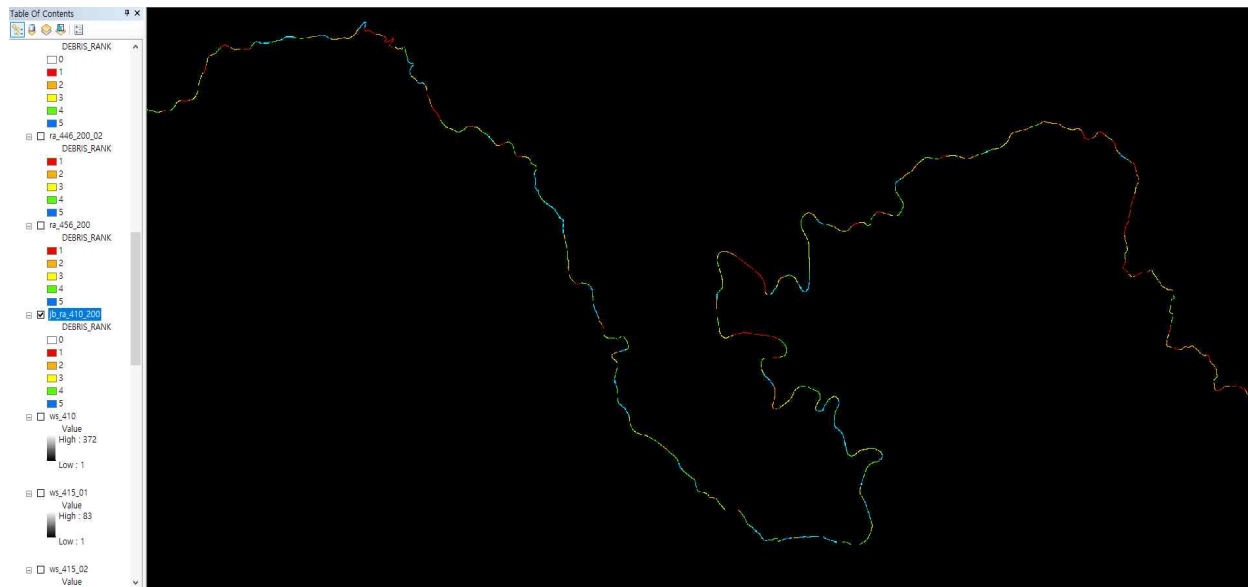
지방도		거리(km)	등급					계
			1	2	3	4	5	
410		58.73	40	31	45	98	157	371
415	1	14.25	30	11	11	19	12	83
	2	15.14	8	10	8	41	33	100
	3	6.17	0	1	3	15	21	40
	4	5.80	5	2	3	17	11	38
	5	15.53	7	21	26	23	24	101
418	1	26.87	18	25	37	48	50	178
	2	14.77	16	15	15	32	19	97
446	1	23.48	44	25	18	37	32	156
	2	24.86	18	21	23	54	46	162
456		28.99	4	8	22	57	100	191
계		234.59	190	170	211	441	505	1,513

- 도로중심 재난레질리언스를 고려한 도로유역의 2차 재해위험등급은 1등급(위험)~5등급(안전)으로 분류되며, 1등급의 도로유역은 188개, 2등급 174개, 3등급 234개, 4등급 424개, 5등급 493개로 나타남.

<표 2-21> 지방도 2차 재해위험도 등급별 분류

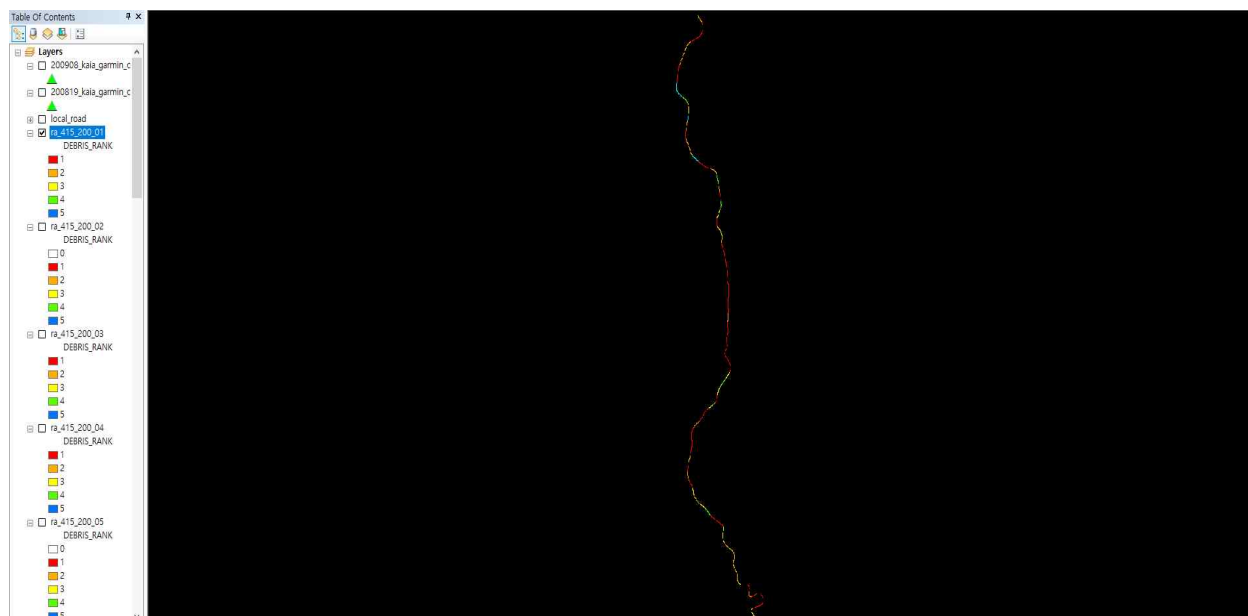
지방도		거리(km)	등급					계
			1	2	3	4	5	
410		58.73	48	29	63	103	128	371
415	1	14.25	26	15	12	16	14	83
	2	15.14	7	12	11	39	31	100
	3	6.17	0	1	3	17	19	40
	4	5.80	3	3	4	16	12	38
	5	15.53	10	19	27	20	25	101
418	1	26.87	18	24	36	47	53	178
	2	14.77	16	14	13	35	19	97
446	1	23.48	39	28	18	38	30	153
	2	24.86	17	21	25	48	50	161
456		28.99	4	8	22	45	112	191
계		234.59	188	174	234	424	493	1513

① 410번 지방도



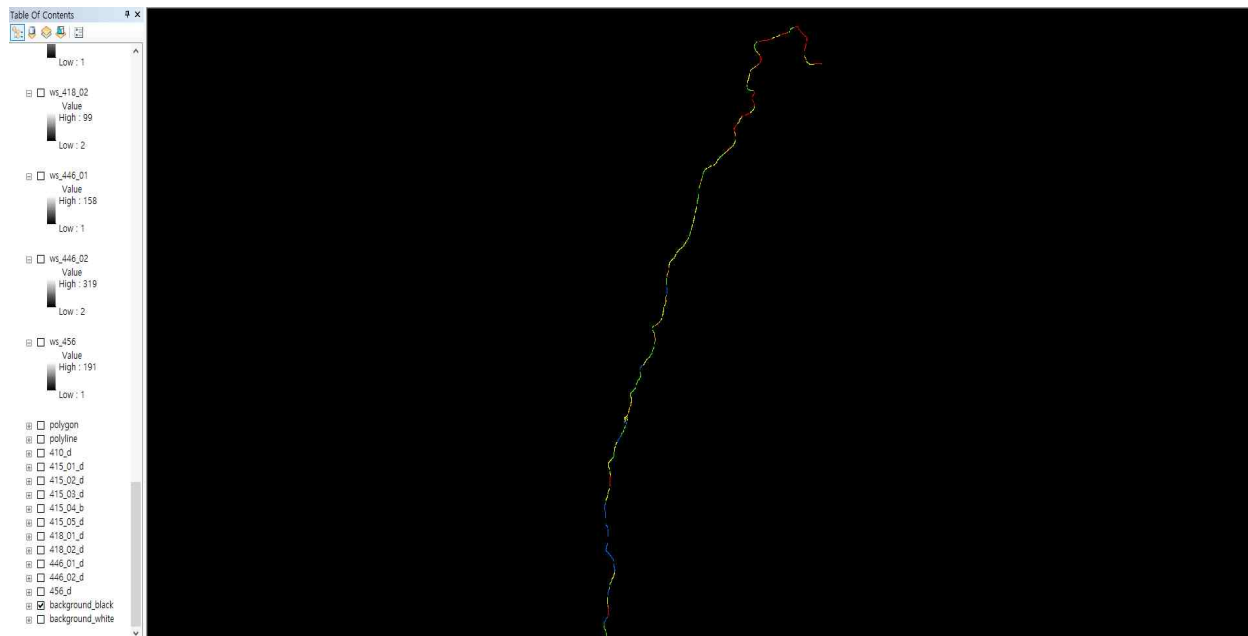
- 410번 지방도의 연장은 58.73km로, 1등급인 도로유역은 48개, 2등급 29개, 3등급 63개, 4등급 103개, 5등급 128개로 나타남.

② 415-1번 지방도



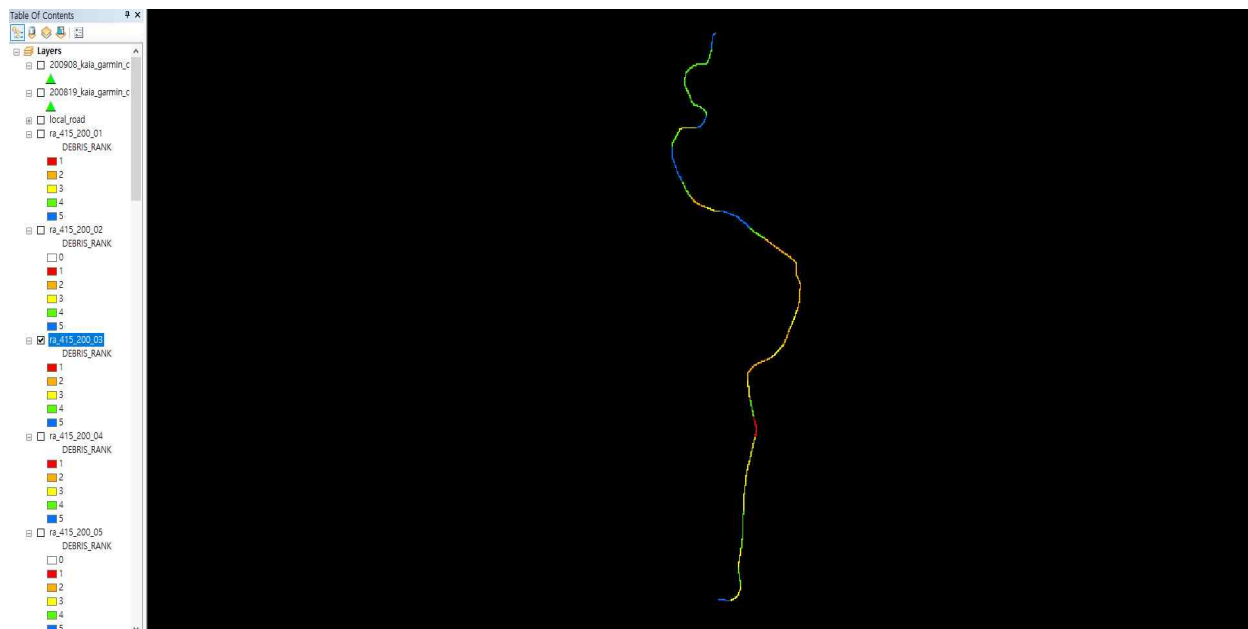
- 415-1번 지방도의 연장은 14.25km로, 1등급인 도로유역은 26개, 2등급 15개, 3등급 12개, 4등급 16개, 5등급 14개로 나타남.

③ 415-2번 지방도



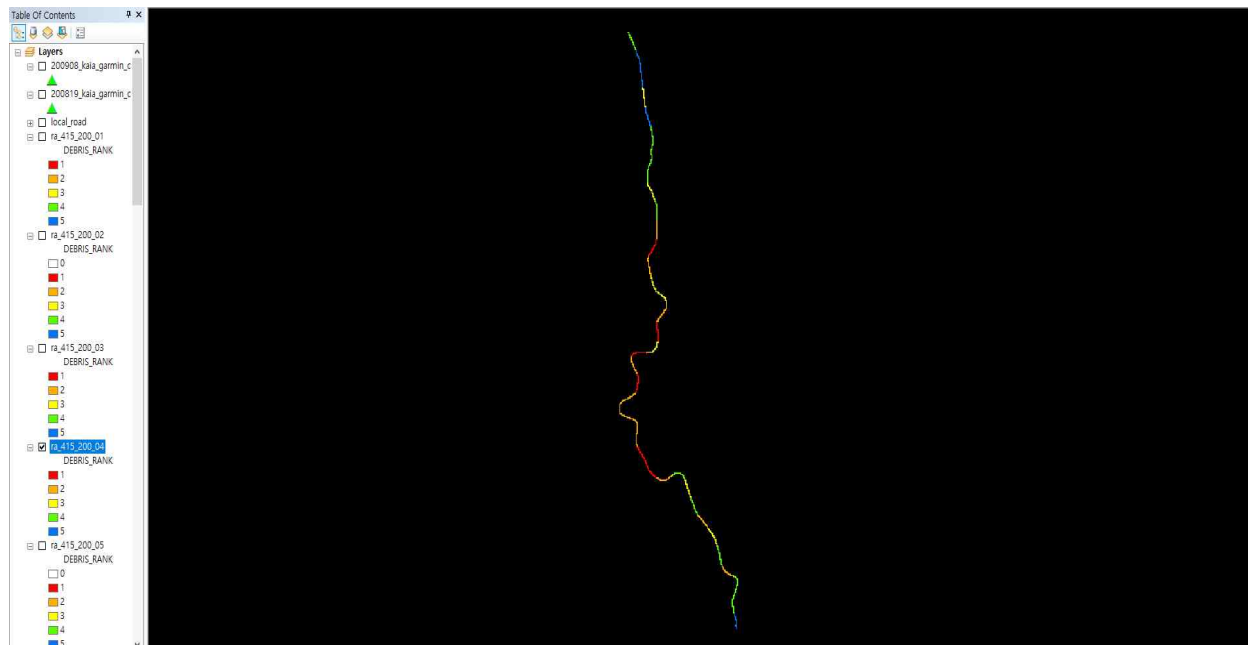
- 415-2번 지방도의 연장은 15.14km로, 1등급인 도로유역은 7개, 2등급 12개, 3등급 11개, 4등급 39개, 5등급 31개로 나타남.

④ 415-3번 지방도



- 415-3번 지방도의 연장은 6.17km로, 1등급인 도로유역은 0개, 2등급 1개, 3등급 3개, 4등급 17개, 5등급 19개로 나타남.

⑤ 415-4번 지방도



- 415-4번 지방도의 연장은 5.8km로, 1등급인 도로유역은 3개, 2등급 3개, 3등급 4개, 4등급 17개, 5등급 19개로 나타남.

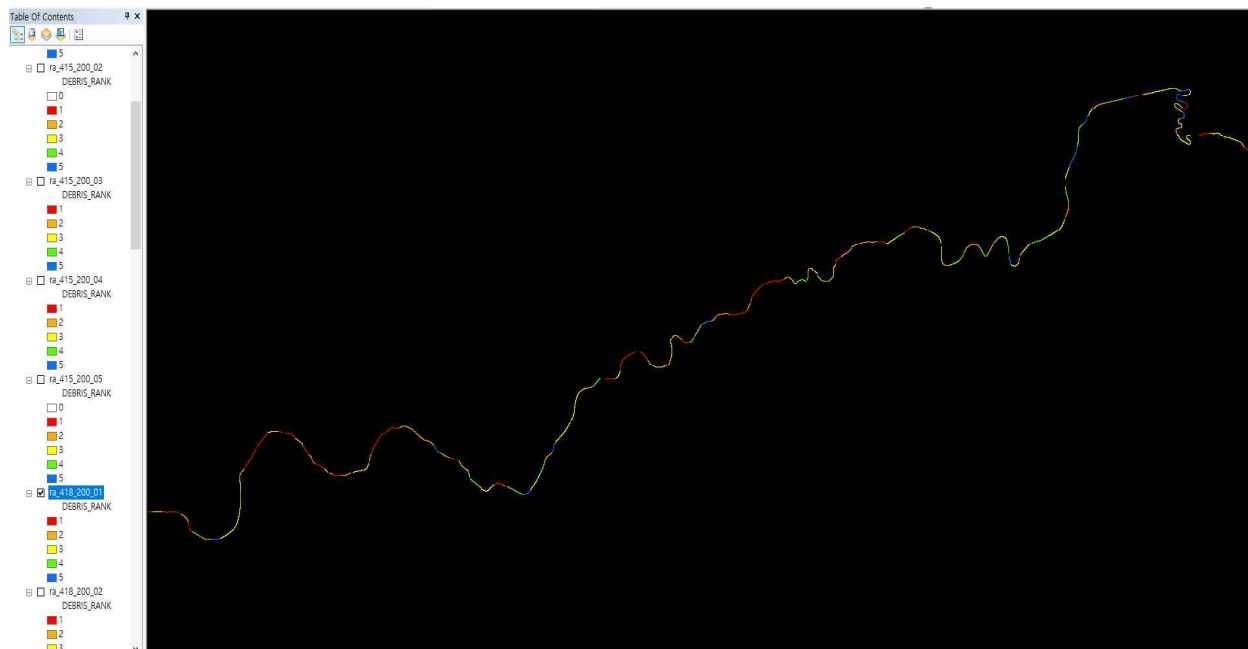
-

⑥ 415-5번 지방도



- 415-5번 지방도의 연장은 15.53km로, 1등급인 도로유역은 10개, 2등급 19개, 3등급 27개, 4등급 20개, 5등급 25개로 나타남.

⑦ 418-1번 지방도



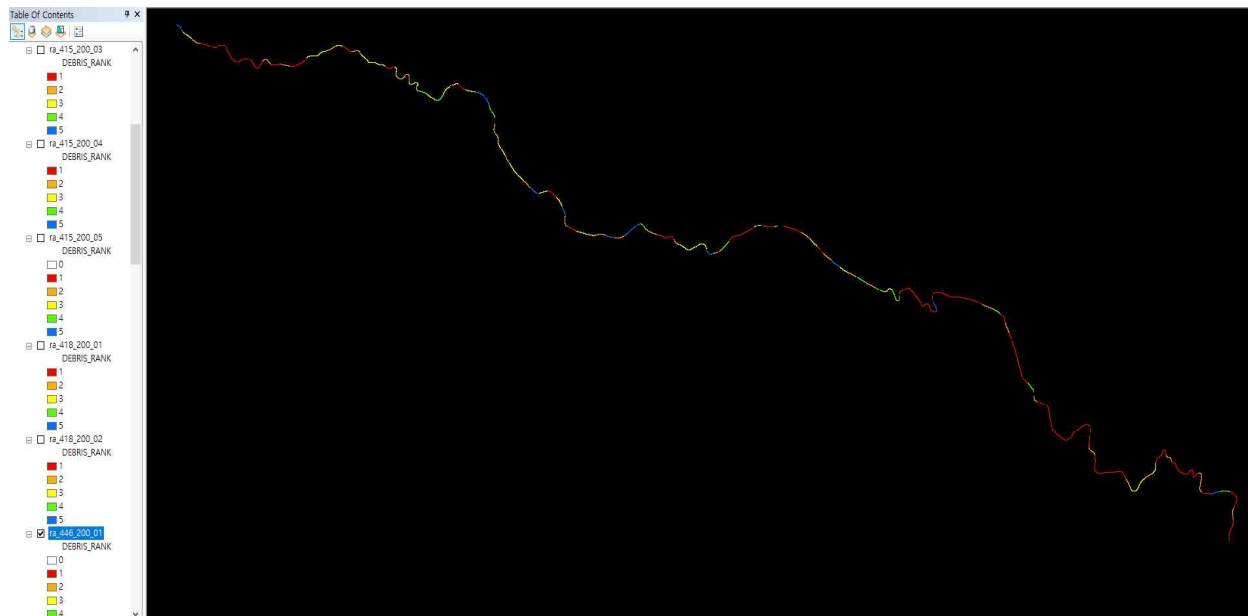
- 418-1번 지방도의 연장은 26.87km로, 1등급인 도로유역은 18개, 2등급 24개, 3등급 36개, 4등급 47개, 5등급 53개로 나타남.

⑧ 418-2번 지방도



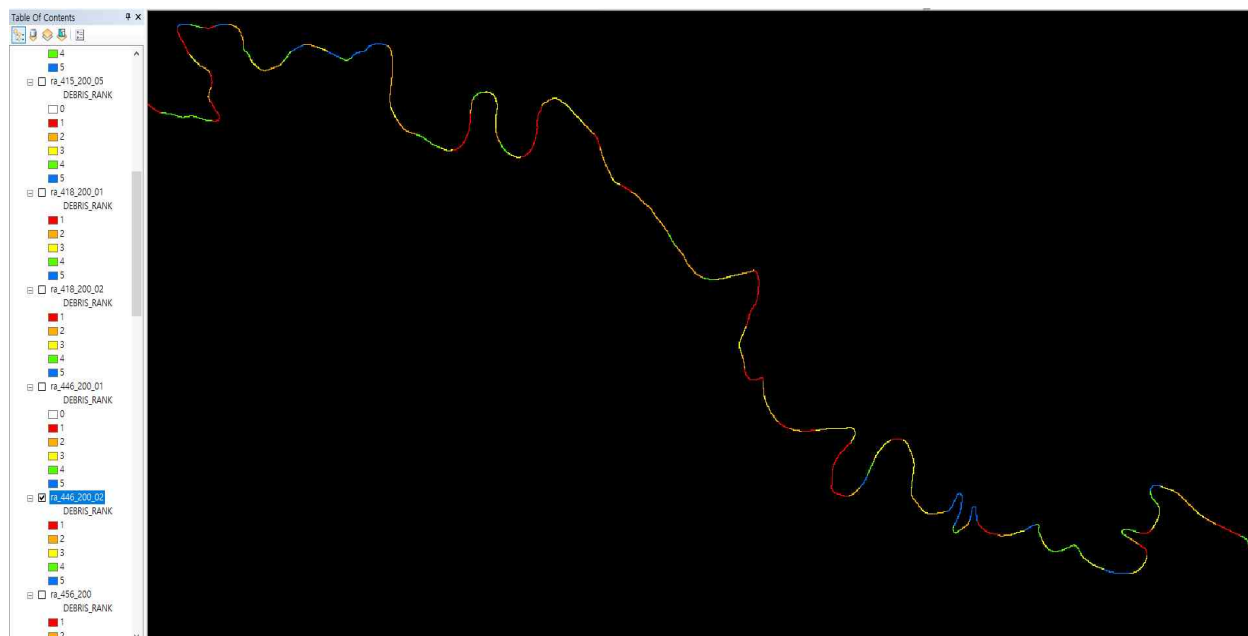
- 418-2번 지방도의 연장은 14.77km로, 1등급인 도로유역은 18개, 2등급 14개, 3등급 13개, 4등급 35개, 5등급 19개로 나타남.

⑨ 446-1번 지방도



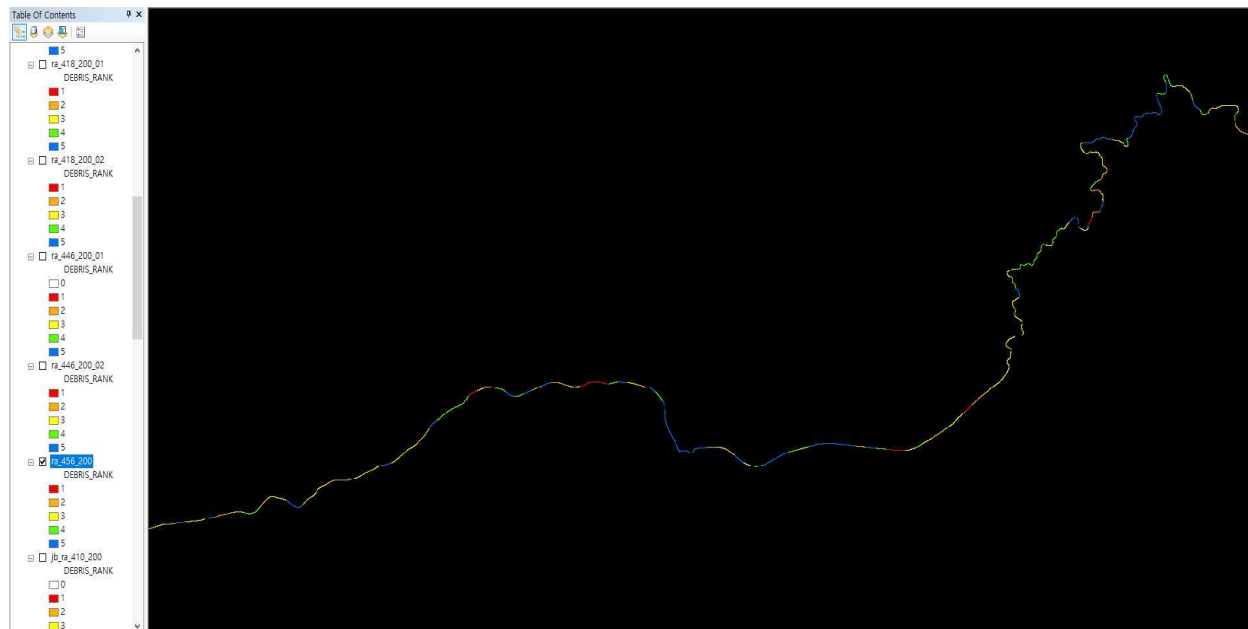
- 446-1번 지방도의 연장은 23.48km로, 1등급인 도로유역은 39개, 2등급 28개, 3등급 18개, 4등급 38개, 5등급 30개로 나타남.

⑩ 446-2번 지방도



- 446-2번 지방도의 연장은 24.86km로, 1등급인 도로유역은 17개, 2등급 21개, 3등급 25개, 4등급 48개, 5등급 50개로 나타남.

⑪ 456번 지방도



- 456번 지방도의 연장은 28.99km로, 1등급인 도로유역은 4개, 2등급 8개, 3등급 22개, 4등급 45개, 5등급 112개로 나타남.

제3장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 목표

(1) 최종연도 성과목표

구분	핵심 성과물 (CTE)	단위 성과물	성과점검기준								양적성과 현황		
			질적 성과지표	목표 치	달성 치	측정 방법	검증 방법	가중 치	해당 기관	목표치	달성치	가중치	
주관	A 유역 레질리언스를 고려한 도로재해 위험지도 제작 기술	A-3 Test-Bed 적용	① 피해규모 산정 정확도	80% 이상	82.4% 이상	실측자료 비교	정확도	27.8	강원대학교	논문 : 2건 학술대회 : 1건	논문 : 2건 학술대회 : 1건	28.6	
공동	B 유형별 재해 확산 간편모형	B-3 Test-Bed 해석	③ 재해확산특성 구현 정확도	80%	80% 이상	Test-Bed 측정결과 비교분석	보고서	38.8	충북대학교	논문 : 2건 학술대회 : 2건 기술보고서 : 1건	논문 : 2건 학술대회 : 2건 기술보고서 : 1건	28.6	
공동	C 사용자 중심 도로재해 취약성 분석 소프트웨어	C-3 SimpleX-Map 개발	① 소프트웨어 개발	시연 (3회)	3그룹 (5회)	시연회	설문 및 만족도 조사	33.4	씨앤디	학술대회 : 1건 S/W : 1건	학술대회 : 1건 S/W : 1건	42.8	
계								100		논문 : 4건 학술대회 : 4건 기술보고서 : 1건 S/W : 1건	논문 : 4건 학술대회 : 4건 기술보고서 : 1건 S/W : 2건	100	

(2) 목표 달성여부

- 성과점검기준표를 기준으로 질적인 성과 및 양적인 성과 모두 달성함
- 시연회 3회의 경우 코로나-19 상황으로 대규모 시연회 개최의 어려움으로 비대면 학술세미나에 참여하여 시연회를 실시하고 실무자, 전문가 그룹으로 구분한 개별 시연을 통해 설문 및 만족도를 조사하여 제시함(사전에 연구의 애로사항으로 건의하였음)

제3장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

(가) 핵심 연구성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형 1)	연구기관	해당연차	TRL
1	유역 레질리언스를 고려한 도로재해 위험지도 제작 기술	위험요인에 대한 격자기반 단일 재해지도를 복합재해를 구현할 수 있는 유역단위의 복합재해지도로 재생산하고 하류 재해확산지역의 레질리언스를 고려할 수 있는 평가체계 구축기술	기술	강원대학교	3	8
2	유형별 재해 확산 간편모형	유형별 재해에서 도로 재해취약지역 하류 재해영향지역의 피해범위를 산정하기 위해 수치해석, 재해이력 문헌조사를 통해 간편모형을 제시하여 레질리언스 인자 추출을 위한 범위를 산정할 수 있음	기술	충북대학교	3	8
3	사용자 중심 도로 재해 취약성 분석 소프트웨어	도로관리자가 따라하기식으로 간편하게 복합재해에 대한 위험도를 분석하고 대책수립을 위한 의사결정자료로 활용할 수 있는 정보를 표출할 수 있는 소프트웨어	소프트웨어	씨앤디	3	9

핵심성과 1	
정의	유역 레질리언스를 고려한 도로재해 위험지도 제작기술
목적	- 위험요인에 대한 격자기반 단일 재해지도를 중첩하여 복합재해를 구현할 수 있는 유역단위의 복합재해지도로 재생산하고 하류 재해확산지역의 레질리언스를 고려할 수 있는 평가체계 구축기술
성능목표	(기존기술 수준) - 단일 재해지도의 생산 및 해당 재해지도를 생산하기 위해 다수의 인자를 적용하고 있음 - 격자기반 재해지도 또는 일부 유역단위 재해지도를 제시하고 있음 - 피해 원(source)에 대한 위험지도 또는 확산범위 표출 재해지도가 생산되고 있으나 피해 원과 확산범위가 연계된 재해지도는 없음 (개발기술 수준) - 복합재해 발생 시 재해위험을 나타낼 수 있는 유역단위 재해지도 생산 - 확산지역에 대한 레질리언스를 고려하여 복합재해지도의 위험을 재평가 할 수 있는 평가체계 구축
성과달성 책임자 (소속기관)	전계원(강원대학교)
소요기간	'18.04 ~ '20.12(2년 9개월, 3년차)
성과달성 확인방법	- 단일재해지도의 유역단위 복합재해 생산기술의 제시 - 복합재해지도 레질리언스
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록 [출원 : 0건, 등록 : 건]
	논문 [국내 : 3건, SCI(E) 1건, 학술대회 : 4건]
	기타 DB구축 : 1건

제3장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

핵심성과 2		
정의	유형별 재해확산 간편모형	
목적	- 유형별 재해에서 도로 재해취약지역 하류 재해영향지역의 피해범위를 산정하기 위해 수치해석, 재해이력 문헌조사를 통해 간편모형을 제시하여 레질리언스 인자 추출을 위한 범위를 산정할 수 있음	
성능목표	(기존기술 수준) - 각 재해지역 별 개별 해석하여 확산범위를 산정하고 있어 추가적인 지역에 대한 분석을 위한 시간적 비용적 노력이 추가적으로 발생함 - 비숙련자가 활용 및 가공하기 어려움 (개발기술 수준) - 재해유형별 간단한 모형의 제시로 하류지역 피해범위를 파악할 수 있음 - 도로관리자가 손쉽게 활용할 수 있어 대상지역과 재해유형과 상관없이 짧은 시간에 취약지역에 대한 정보를 취득할 수 있음	
성과달성 책임자 (소속기관)	이호진(충북대학교)	
소요기간	'18.04 ~ '20.12(2년 9개월, 3년차)	
성과달성 확인방법	재해확산 범위 선정을 위한 Parameter 제시 - 유형별 간편모형 형식 제시	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	[출원 : 1건]
	논문	[국내 : 3건, SCI(E) : 1건, 학술대회 : 4건]
	기타	[기술보고서 : 1건]

핵심성과 3		
정의	사용자 중심 도로 재해 취약성 분석 소프트웨어 SimpleX-Map* *(SimpleX-Map : Simple complex disaster Map)	
목적	- 도로관리자가 따라하기식으로 간편하게 복합재해에 대한 위험도를 분석하고 대책 수립을 위한 의사결정자료로 활용할 수 있는 정보를 표출할 수 있는 소프트웨어	
성능목표	(기존기술 수준) - 전문가에 의한 해석을 위한 해석 소프트웨어 위주의 개발 - 단일 재해지도에 대한 재해지도 정보표출에 국한된 맵뷰 프로그램 - 재해원에 대한 위험도 위주 정보제공으로 재해대상에 대한 피해도를 파악하는데 어려움이 있음	
	(개발기술 수준) - 도로관리자가 사용하기 편리하게 비 숙련자 기준 활용성 - 다양한 방법으로 제작되는 단일재해지도를 즉시 입력자료로 활용가능하여 재해지도의 최신화 유리 - 복합재해지도에 대한 새로운 재해지도 제작가능 - 재해원과 재해대상에 대한 연계정보 표출로 도로관리자가 정책수립에 편리한 의사결정지원자료 제공	
성과달성 책임자 (소속기관)	장창덕(씨앤디)	
소요기간	' 18.04 ~ ' 20.12(2년 9개월, 3년차)	
성과달성 확인방법	- 소프트웨어 등록 - 프로그램 시연 및 도로관리자 데모체험	
성과달성에 따른 정량적 성과	논문	[학술지 : 1건]
	S/W	2건
	기타	End-User를 위한 소프트웨어 활용매뉴얼 1건

2. 관련 분야 기여도

- 도시, 지역사회 영역에 대한 위기관리 및 재해에 대한 레질리언스의 연구가 활발하게 진행되고 있으나 기반시설물인 도로와 같은 선형구조물의 재난에 관한 레질리언스 연구는 전무한 상황에서 접근법을 제시하고 적용함으로써, 관련 연구의 활성화 기대
- 단일재해에 대한 위험도, 취약도 등은 다양하게 연구되고 있지만 복합재해에 대한 위험평가는 다소 접근하기 어렵고 또한 그 연구성과 또한 활용성이 낮은 문제점이 있으나, 본 연구성과로 접근해본다면 다양한 단일재해에 대한 중첩을 통해 활용도 높은 위험평가 결과물로 도출할 수 있어 해당분야의 연구 및 사업성장에 기여함이 있다고 판단함
- 지방도로를 관리하는 데 있어 다양한 평가도구를 제시하여 사업의 우선순위를 결정할 수 있는 의사결정도구로 활용하고, 복합재해에 대한 선제적인 대처를 통해 보다 안전한 도로관리체계를 가질 수 있음

3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

- 해당사항 없음

1. 연구개발성과의 사업화 진출계획

구분		(2021 년) 개발 종료 후 1년	(2022 년) 개발 종료 후 2년	(2023 년) 개발 종료 후 3년
국 내	시장점유율(%)	1	5	20
	판매량(단위:Copy)	1	17	70
	판매 단가(원)	5,000,000	5,000,000	5,000,000
	국내 매출액(백만원)	5	75	350
당사 생산능력		소프트웨어	소프트웨어	소프트웨어

2. 사업화 전략

구분	구체적인 내용
형태/규모	- 개발제품은 소프트웨어로 관련 기술에 대한 지재산(특허 및 소프트웨어등록 및 상표권등록) 확보 - 초기 판매금액을 5,000천원으로 저가 보급 전략 후 업그레이드(주기적인 DB업데이트를 통한 유지관리 영업)를 통한 이익 창출 - 장기적으로는 스마트도로관리시스템(RMS)와 같은 시스템에 애드-온 형식의 추가기능 제공함으로써 사업영역 확장
	 <그림 3-1> 스마트도로관리시스템 개념도_국토교통부 - 전국 도로관리주체를 대상으로 기술을 보급할 수 있으며 국토부, 지자체, 도로공사 및 산지도로 관리자를 대상으로 초기 350개소의 영업대상지역을 선정함 - 도로정보 갱신 및 시스템구축사업으로 사업영역 확장

제4장 연구개발성과의 활용 계획

상용화 능력 및 자원 보유	- 재해지도 개발 연구과제 인력 참여 - 토석류 흐름 해석모형 개발 및 보유로 재해경로 파악기술 보유 - 강원도 및 충청도 도로재해 등급판정을 위한 DB보유
상용화 계획 및 일정	- 개발 초기부터 제품 상용화를 염두한 개발 진행함 - 도로단위구간별 유역생성 DB를 사업대상 사무소별로 제작하여 추후 전국에 대한 DB구축 및 주기적 갱신을 통한 유지보수사업 수행 - 사업화에 필요한 행정자료 및 도로자료DB 구축을 사전에 수행하고 사업화 대상인 도로관리사무소의 협조를 받아 Test-Bed 외 타 지역에 대한 DB확보 및 추가적인 필수정보 DB구축 계획 수립하겠음 - 사업화 시 본 소프트웨어의 적용성 검증을 위해 사업대상의 재해이력(사례)을 정량화하여 SimpleX-Map의 위험등급 도출 결과와 비교 검증자료를 추가 제시

3. 추가 연구의 필요성

가. 도로의 복합재해에 수충부 등 하천영향 반영

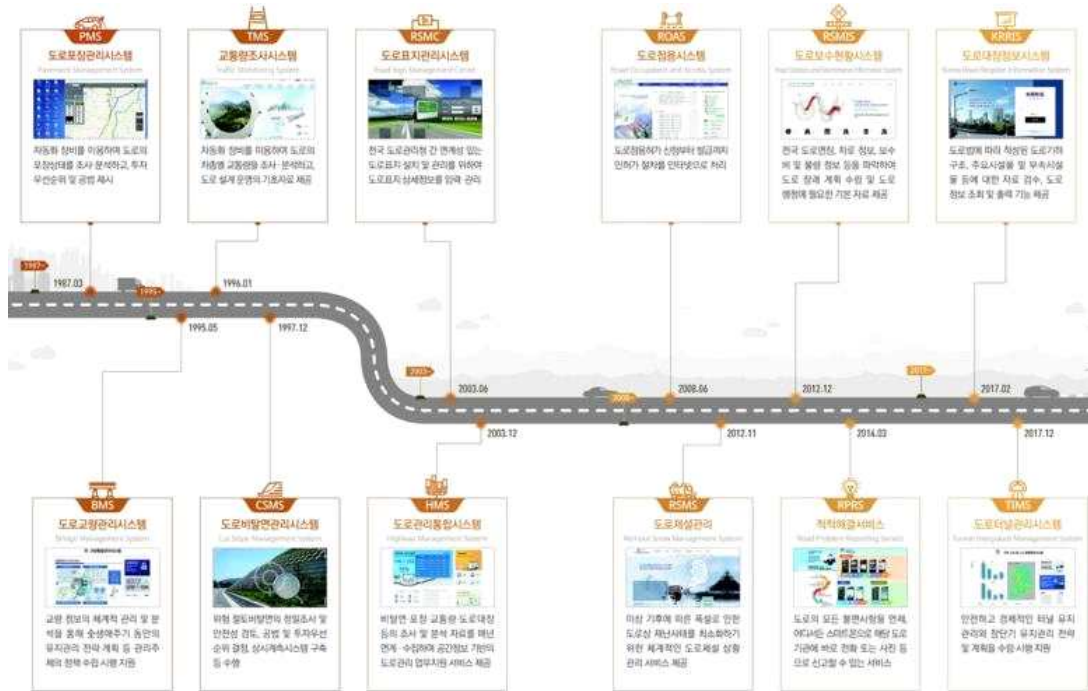
- 지방도의 경우 상류 산지로 부터의 재해영향과 더불어 인접한 하천 유수의 영향을 크게 받아 재해에 취약점이 발생함
- 복합재해로서 수충부 및 하천범람 등을 고려할 수 있는 위험등급이 필요함
- 이에 따라, 하천의 만곡 및 하천과의 거리 및 높이차 등을 고려한 복합재해 등급 산출을 통한 도로재해 취약지도 고도화 연구가 추가 수행될 필요가 있음



<그림 3-2> 하천범람에 의한 도로피해(강원도 인제군)

나. 지방도 관리 시스템 구축으로 확대

- 본 연구를 통해 개발된 도로재해지도의 입력자료는 시계열로 변화하는 행정자료 및 도로확장 및 선형 변경 등을 고려하기위해 전처리 작업이 필요하며, 특히 실시간 강우 및 수위를 반영하는 등의 최신자료를 직접 적용하는데 어려움이 있음



<그림 3-3> 국도관리를 위한 스마트 도로관리시스템(RMS)_국토교통부

- 레질리언스 인자의 활용을 위한 행정망 및 도로관리 자료와 직접 연동할 수 있는 지방도관리 시스템 구축사업으로 확장하여 국도를 관리하는 스마트 도로관리시스템(RMS), 도로비탈면관리시스템(CSMS)과 같은 관리시스템 필요

- 건설교통부(2002), NGIS 지원연구사업(2001년), 국가 GIS 사업의 수자원분야 활용지원 고도화 방안 연구.
- 국토교통부(2016), 수자원장기종합계획(2001~2020): 제 3차 수정계획, 국토교통부, 세종.
- 권정호(2013), 국내 토석류 입자구성을 고려한 모형실험연구, 석사학위논문, 서경대학교.
- 기상청(2017), 기상상태별 도로위험도 분석 및 도로위험 기상예측 기술개발, 한국기상산업진흥원.
- 김승현, 권오일, 김재정, 구호본(2017), 베트남 중부지방 도로비탈면 노출 특성 및 조사우선순위 결정연구, The Journal of Engineering Geology, Vol. 27, No. 3, pp. 275~292
- 김진환, 이용수, 조규태, 최원훈(2009), 토석류 충격력 산정을 위한 모형실험(건조시료 활용), 한국지반공학회 심포지엄, pp. 1271~1274.
- 성동권, 최영택, 고제웅, 조기성(2007), 유비쿼터스 도로재해관리시스템 개발연구, 한국측량학회 2007년도 춘계학술발표회 논문집 2007 Apr. 19 pp. 301~306
- 세이프타임즈, <http://www.safetimes.co.kr/news/articleView.html?idxno=81164>, 2020.04.
- 유병옥, 송평현, 정찬규(2006), 2006년 강원 인제, 양양, 평창지역 토석류발생사례분석, 한국지반공학회 학술발표회, pp. 615~625.
- 워터저널, <http://www.waterjournal.co.kr/news/articlePrint.html?idxno=5364>, 2007.12.04
- 유송(2016), 토석류 수로 실험을 통한 토석류 흐름 특성 분석, 석사학위논문, 서울대학교.
- 이창우(2014), 산지토사재해 방재시스템 개발 및 활용, 국립산림과학원, 서울.
- 이성재, 마호섭(2020), 산악형 설악산국립공원지역의 토석류 발생과 취약지역 특성 분석, 농업생명과학연구, 54 (6), pp. 39~48
- 이호진, 김성덕, 전계원, 이문세(2015), 소단 위치 변화에 따른 토석류 방재 모델링, Crisisno my, Vol. 11, No. 9, pp. 105~118.
- 장대원, 양동민, 김기홍(2009), 산지하천도로 재해지도 작성을 위한 SW개발, 한국재난관리표준학회 논문집, Vol. 2, No. 1, pp. 75~80
- 전병희, 전계원, 장창덕(2012), 산지재해 연구를 위한 토석류 실험장치의 개발 방안, Crisisno my, Vol. 8, No. 3, pp. 137~146.
- 정호용, 최승현, 도명식(2018), 재난 강도에 따른 도로 네트워크의 성능 및 회복력 산정 방안, International Journal of Highway Engineering, Vol. 20, No. 1 pp. 35~45
- 최정렬, 김동민, 지용근(2016), 도심지 도로의 인적취약성 지표를 고려한 토석류 위험도 평가 연구, J.Korean Soc. Hazard Miting, Vol. 16, No. 4, pp. 95~101
- Abbas Ostadtaghizadeh Ali Ardalan Douglas Paton Hossain Jabbari Hamid Reza Khankeh (2015), Community Disaster Resilience: a Systematic Review on Assessment Models and Tools, Ver.1, pp. 1~16.
- Aquino, D.H.; Wilkinson, S.J.; Raftery, G.; Potangaroa, R., and Chang-Richards, A., 2018. Challenges to building housing resilience: The case of Fiji post-cyclone Winston. Procedia Engineering, 212, 475~480.
- Archetti, R. and A. Lamberti(2003), Assessment of Risk due to Debris Flow Events, Natural Hazards Review, Vol. 4, No. 3, pp. 115~125.
- Barry E. Flanagan, Edward W. G., Elaine J. H., Janet L. Heitgerd., Brian L., A Social Vuln

-
- erability Index for Disaster Management, *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, Vol. 8, No. 1, pp. 1~24.
- Committee on Increasing National Resilience to Hazards and Disasters, Committee on Science, Engineering, and Public Policy The National Academies(2012), *Disaster Resilience: A National Imperative*, pp. 1~260.
 - Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E. and Webb, J. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global environmental change* 18 (4): 598 – 606.
 - Cutter, S. L., Burton, C. G. and Emrich, C. T.(2010). Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions. *Journal of Homeland Security and Emergency Management* 7 (1).
 - D’Agostino, V., M. Cesca and L. Marchi(2010), Field and Laboratory Investigations of Run out Distances of Debris Flows in the Dolomites (Eastern Italian Alps), *Geomorphology*, Vol. 115, No. 3, pp. 294~304.
 - Egashira, S.; Miyamoto, K., and Itoh, K., 1997. Constitutive equation of debris flow and their applicability. *Proceeding of 1st International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, pp. 340~349.
 - Fairfield, G.(2011), *Assessing the Dynamic Influences of Slope Angle and Sediment Composition on Debris Flow Behaviour: An Experimental Approach*, Master Thesis, Durham University.
 - Federal Emergency Management Agency(2013), *Fiscal Year 2013 Report to Congress, National Strategy Recommendations: Future Disaster Preparedness*.
 - Fiji Bureau of Statistics., 2018. 2017 Population and Housing Census. FBoS Release, No. 1, 2018.
 - Fiji Meteorological Service., 2006. *The Climate of Fiji. Information Sheet*, 35.
 - Fiji Meteorological Service., 2016. *Fiji Climate Summary February*. 37(02).
 - Ghilardi, P.; Natale, L., and Savi, F., 2001. Modeling debris flow propagation and deposition. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26, 651–656.
 - Godschalk, D. R. (2003). Urban hazard mitigation: creating resilient cities. *Natural hazards review* 4 (3): 136–143.
 - Greenbaum, D.; Bowker, M.R.; Dau. I.; Dropsy, H.; Grealley, K.B.; McDonald, A.; Marsh, S.H.; Northmore, K.J.; O’Connor, E.A.; Prasad, S., and Tragheim, D.G., 1995. *Rapid Methods of Landslide Hazard Mapping: Fiji Case Study*. British Geological Survey Technical Report WC/95/28, 107.
 - Grelle, G., Rossi, A., Revellino, P., Guerriero, L., Guadagno, F. M., & Sappa, G.(2019). Assessment of debris-flow erosion and deposit areas by morphometric analysis and a GIS-based simplified procedure: A case study of Paupisi in the southern Apennines. *Sustainability*, Vol. 11, No. 8, pp. 2382~2402.
 - Haas, T. D., L. Braat, J. R. F. W. Leuven, I. R. Lokhorst and M. G. Kleinhans(2015), *Efficient*

-
- cts of Debris Flow Composition on Runout, Depositional Mechanisms, and Deposit Morphology in Laboratory Experiments, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 120, No. 9, pp. 1949~1972.
- Han, W. S and Yu J. W (2015). Directions for Establishing Disaster Prevention Resilience in Response to Climate Change Disasters, *National Territorial Policy Brief*(518): 1~8.
 - Holling, C. S.(1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics* 4 (1): 1~23.
 - Hollnagel, E.(2011), RAG-The resilience analysis grid. *Resilience engineering in practice. A guidebook*. Farnham, UK: Ashgate, pp. 275~296.
 - Iturrioz, R.(2009). Agricultural insurance, *The World Bank*, Vol. 12, No. E20-77. pp. 1~29.
 - Iverson, R.M.; Reid, M.E.; Logan, M.; LaHusen, R.G.; Godt, J.W., and Griswold, J.P., 2011. Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment. *Nature Geosciences*, 4, 116~121.
 - Iverson R. M.(1997), *The Physics of Debris Flows*, *Review of Geophysics*, Vol. 35, No. 3, pp. 245~296.
 - Iverson, R. M.(2015), *Scaling and Design of Landslide and Debris-Flow Experiments*, *Geomorphology*, Vol. 244, pp. 9~20.
 - Jae Heon Shim, Chun-Il Kim(2015), *Measuring Resilience to Natural Hazards: Towards Sustainable Hazard Mitigation*, *Sustainability* 2015, Vol. 7, No. 10, pp. 14153~14185.
 - Jeon, E.Y and Byun, B.S.(2017), *A Study on the Development and Application of Community Resilience Evaluation Indicators for Responding to Climate Change*, *The Korean Association of Professional Geographers*, 51(1) : 47~58
 - Johnson, C. G., B. P. Kokelaar, R. M. Iverson, M. Logan, R. G. LaHusen and J. M. N. T. Gray(2012), *Grain-size Segregation and Levee Formation in Geophysical Mass Flows*, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 117, No. F1, pp. 1~23.
 - Kafle, Shesh Kanta(2012), *Measuring disaster-resilient communities: A case study of coastal communities in Indonesia*, *Journal of Business Continuity & Emergency Planning*, Vol.5. No. 4, pp. 316~326.
 - Kim, S.D. and Lee, H.J., 2015. Assessment of risk due to debris flow and its application to a marine environment. *Marine Georesources and Geotechnology*, 33(6), 572~578.
 - Kim, S.D.; Lee, H.J., and Jun, K.W., 2016. The impacts of debris torrents in caribbean coast of Honduras, Central America. *Journal of Coastal Research*, (sp75), 1347~1352.
 - Fei Liu, Hsin-Chi Li, Yu-Charn Hsu(2009), *Debris flow hazard assessment with numerical simulation*, *Natural Hazards*, Vol. 49, pp. 137~161.
 - ong, N., Millescamp, B., Guillot, B., Pouget, F., & Bertin, X.(2016), *Monitoring the topography of a dynamic tidal inlet using UAV imagery*. *Remote Sensing*, Vol. 8, No. 5, pp. 387~405.
 - Map of Rewa river and Navua River, Fiji, 2019. <http://maps.google.com>

-
- Ram, A.R.; Brook, M.S., and Cronin, S.J., 2018. Geomorphological characteristics of slope failures in northeast Viti Levu island, Fiji, triggered by Tropical Cyclone Winston in February 2016. *New Zealand Geographer*, 74, 64-76.
 - Maria Koliou, John W. van de Lindt, Therese P. McAllister, Bruce R. Ellingwood, Maria Dillard & Harvey Cutler(2018), State of the research in community resilience: progress and challenges, *Sustainable and Resilient Infrastructure*, Vol. 5, No. 3, pp. 131~151.
 - McAllister, T. P.(2015), Community resilience planning guide for buildings and infrastructure systems, volume I., NIST Special Publication 1190, Vol. 1, pp. 1~114
 - McAllister, T. P.(2015), Community Resilience Planning Guide for Buildings and Infrastructure Systems, Volume II., NIST Special Publication 1190, Vol. 2, pp. 1~258
 - Ministry of the Interior and Safety. (2018). Disaster risk assessment criteria for steep slopes, Korea
 - Nations, U.(2009). UNISDR terminology on disaster risk reduction. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Report.
 - Pelling, M.(2003). The vulnerability of cities. Natural disasters and social resilience London: Earthscan.
 - Proske, D., J. Suda and J. Hubl(2011), Debris Flow Impact Estimation for Breakers, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, Vol. 5, No. 2, pp. 143~155.
 - RAJIB SHAW and IEDM Team(2009), CLIMATE DISASTER RESILIENCE: FOCUS ON COASTAL URBAN CITIES IN ASIA, *Asian Journal of Environment and Disaster Management*, Vol. 1, pp. 1~15.
 - Rickenmann, D.(1999), Empirical Relationships for Debris Flows, *Natural Hazards*, Vol. 19, pp. 47~77.
 - Su-Chin Chen, Jhy-Wei Ferng, Yu-Ting Wang, Ting-Yeh Wu, Jieh-Jiuh
 - Wang(2008), Assessment of disaster resilience capacity of hillslope communities with high risk for geological hazards, *Engineering Geology* 98, Vol. 98, No. 3-4, pp. 86~101.
 - Susan L. Cutter, Lindsey Barnes, Melissa Berry, Christopher Burton, Elijah Evans, Eric Tate, Jennifer Webb(2008), A place-based model for understanding community resilience to natural disasters, *Global Environmental Change* 18, Vol. 18, No. 4, pp. 598~606.
 - Sylvia Kruse, Thomas A., Hugh D., Maureen F., John F., Sebastian J., A. Nuray
 - K., Christian K., Mark P., Lydia P., Stefan S.(2017), Conceptualizing community resilience to natural hazards – the emBRACE framework, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 17, No. 12, pp. 2321~2333.
 - Takahashi, T.; Nakagawa, H.; Harada, T., and Yamashiki, Y., 1992. Routing debris flows with particle segregation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(11), 1490-1507.
 - Takahashi, T.(2014), *Debris FLOW: Mechanics, Prediction and Countermeasures*, 2nd edition, CRC Press, Leiden, The Netherlands.
 - TangLIU, Rikuro URASHIMA and Hiroaki MATUKAWA(2015), Research on a Resilience Strc

-
- ture Model using the Text Mining Technique, J Jpn Ind Manage Assoc Vol. 66, No. 2, pp. 67-74
- Terry, J.P., 2007. Tropical Cyclones: Climatology and Impacts in the South Pacific. Springer Science & Business.
 - Timmerman, P.(1981). Vulnerability resilience and collapse of society. A Review of Models and Possible Climatic Applications. Toronto, Canada. Institute for Environmental Studies, University of Toronto.
 - U.S. Army Corps of Engineers.(2018). APPENDIX A USACE HURRICANE DEBRIS ESTIMATING MODEL.
 - UNISDR, M.(2009). UNISDR Terminology for Disaster Risk Reduction. United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR) Geneva, Switzerland.
 - Vincenzo D'Agostino, Matteo C., Lorenzo M.(2009), Field and laboratory investigations of runout distances of debris flows in the Dolomites (Eastern Italian Alps), Geomorphology, Vol. 115, No. 3-4, pp. 294~304.
 - White, R. A., Dietterick, B. C., Mastin, T., & Strohman, R.(2010), Forest roads mapped using LiDAR in steep forested terrain. Remote Sensing, Vol. 2, No. 4, pp, 1120-1141.
 - Xu Zhen 외(2011), GIS를 이용한 기후변화에 따른 산사태 취약성 평가, 한국기후변화학회지, Vol. 2, No. 1, pp. 43 ~ 54.
 - 兵庫県農政環境部農林水産局治山課(2009), 平成16年一連の台風災害による林地・林道施設の災害復旧事例集, 兵庫県治山林道協会
 - 藤井聡, 久米功一, 松永明, & 中野剛志.(2012). 経済の強靱性 (Economic Resilience) に関する研究の展望. RIETI Policy Discussion Paper Series 12-P-008.
 - 杉岡直人, 鈴木克典, & 畠山明子(2013).
 - 大規模災害におけるコミュニティリスクとレジリエンス. 北星学園大学経済学部北星論集, Vol. 53, No. 1, pp. 79-90.
 - 清水美香.(2012). 東日本大震災の教訓: 「レジリエンス」 と災害マネジメントおよび公共政策の連関性. 国際公共政策研究, Vol. 16, No. 2, pp. 105-120.
 - 尾野明未.(2014). 母親の子育てレジリエンスに関する研究: 子育てレジリエンス尺度の作成及び子育て支援プログラムの適用を通して (Doctoral dissertation, 桜美林大学).
 - 西村知晃, 伊藤智明, 福本俊樹, 貴島耕平, 高瀬進, 金井壽宏(2014),
 - 組織行動論へのレジリエンス概念の導入—マルチ・レベルで捉えるレジリエンス研究—.大矢根淳.(2012). 地域防災活動におけるレジリエンス: 川崎市多摩区中野島町会
 - 「防災マップ」 づくりの事例から (特集 東日本大震災から新たな防災へ). かながわ政策研究・大学連携ジャーナル, (3), 66-69.
 - 齊藤和貴, & 岡安孝弘.(2009). 最近のレジリエンス研究の動向と課題.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통과학기술진흥원에서 시행한 국토교통기술촉진연구 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통과학기술진흥원에서 시행한 국토교통기술촉진연구 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.