

도로함몰 위험도 평가 및 분석기술 개발 최종보고서

2019.07.13.

주관연구기관 / 세종대학교

공동연구기관 / 한국건설기술연구원

University of Central Florida

서울특별시 품질시험소

한국시설안전공단

동의대학교

인덕대학교

(주)로드텍

(주)지오메카이엔지

(주)동일기술공사

(주)유디엔에스

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'도로함몰 위험도 평가 및 분석기술 개발' (연구개발 기간 : 2015.07.14 ~ 2019.07.13) 과제의 최종보고서 6부를 제출합니다.

2019.07.13.

주관연구기관 : 세종대학교 산학협력단

백성욱 (인)

공동연구기관 : 한국건설기술연구원

한승현 (인)

University of Central
Florida Research
Foundation

Elizabeth
Klonoff (인)
Ph.D.

서울특별시 품질시험소

한휘진 (인)

한국시설안전공단

박영수 (인)

동의대학교 산학협력단

이임건 (인)

인덕대학교 산학협력단

정창삼 (인)

(주)로드텍

문형철 (인)

(주)지오메카이엔지

채취영 (인)

(주)동일기술공사

황주환 (인)

(주)유디엔에스

김성일 (인)

참여기관 : 국보환경

임종빈 (인)

주관연구기관책임자: 이현종

공동연구기관책임자: 박희문, 윤해범, 백종은,
성주현, 권기철, 이상염,
문형철, 채취영, 한상주,
조윤범

참여기관책임자: 임종빈

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19TLRP-C 099510-05	해당 단계 연구 기간	2019.01.01- 2019.07.13	단계구분	5/5
연구사업명	교통물류연구사업				
연구과제명	도로함몰 위험도 평가 및 분석기술 개발				
연구책임자	이현중	해당 단계 참여연구원 수	총: 47 명 내부: 26 명 외부: 21 명	해당연차 연구비	정부: 599.0 천원 민간: 199.6 천원 계: 798.6 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 187 명 내부: 91 명 외부: 96 명	총 연구비	정부: 8,991.0 천원 민간: 3,026.1 천원 계: 12,017.1 천원
연구기관명 및 소속 부서명	세종대학교 산학협력단			참여기업명: 국보환경(주)	
국제공동연구	상대국명: 미국			상대국 연구기관명: University of Central Florida	
위탁연구	연구기관명: 서울과학기술대학교 단국대학교 명지대학교			연구책임자: 문성호 박성완 김인태	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반등급
-------------------------	------

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	32	4	-	-	-	18	-	-	-	-	-

- 본 연구과제의 주요 연구목표는 도로함몰의 주요원인인 공동을 탐사하는 조사시스템 시작품 개발과 자동분석 프로그램 개발 그리고 위험도 평가 기준 및 대응 매뉴얼을 개발하는 것임
- 도로함몰 복합탐지 시스템 시작품은 도로표면 조사 센서와 3D 지표투과레이더를 탑재하여 도로하부 공동을 비롯한 종합적인 도로포장 상태조사가 가능한 국내 최초의 장비이며, 자동분석 프로그램은 국내 최초로 개발된 인공지능 기반 공동, 노면결함 분석 프로그램임
- 실대형 포장가속시험, 모형토조실험, 유한요소해석, 입자기반해석의 분석결과를 바탕으로 실증적인 공동 위험도 관리기준 ‘도로함몰 위험도 평가 기준(안)’을 제시하였으며, 도로함몰 또는 공동이 발생 시 실무자에게 대응/복구 가이드라인을 제공하기 위한 도로함몰 대응/복구 매뉴얼을 개발하였음

보고서 면수
118

요 약 문

연구의 목적 및 내용	• 국토해양부 R&D에서 미래도로의 지향점을 ‘재해 예방형 도로’로 설정하고 이의 위치와 역할을 분석하였으며 필요한 비전과 목표를 제시하였음. 이러한 재해 예방형 도로를 구축하여 보편적 사회복지에 공헌하기 위하여 「도로재해 저감을 통한 안전 대한민국 건설」을 본 연구의 비전으로 설정하였으며, 본 연구의 비전을 달성하기 위한 최종 목표를 「도로함몰 위험도 평가 및 분석기술 개발」로 수립하였음 • 기술 개발을 위해 「고도화」, 「기술자립」, 「실용화」를 비전으로 설정. 「고도화」는 첨단 기술 도입 및 개선을 통해 현 기술 수준을 세계 선도 수준으로 올리는 것이며, 「기술자립」은 장비에서 분석에 이르기까지 전반적으로 해외기술에 대한 의존도가 높은 상황에서 자체 기술을 확보하는 것임. 그리고 「실용화」는 현재 사회적 이슈가 되는 도심지 도로함몰 사고저감을 위해 현장에서 바로 적용 가능한 기술을 개발하는 것임 • 본 연구의 최종목표를 달성하기 위한 네 가지 핵심기술요소(Core Technical Element, CTE)를 설정, 각 CTE의 연구개발목표 및 내용은 다음과 같음 ① CTE 1 : 도로함몰 위험도 탐지 시스템 - 연속식 도로지지력 평가 장비 (Rolling Dynamic Deflectometer, RDD), 지표투과레이더 (Ground Penetrating Radar, GPR)의 복합 탐지 시스템 개발을 통해 도로공동 발생 유무 및 포장 지지력을 평가하는 시스템의 개발 ② CTE 2 : 도로함몰 위험도 분석 프로그램 - 복합 탐지 시스템 데이터로부터 도로함몰을 자동으로 진단할 수 있는 자동진단 프로그램의 개발 - 도로함몰 위험도에 따라 분석된 결과를 통한 도로함몰 위험도 평가 프로그램의 개발 ③ CTE 3 : 도로함몰 위험도 평가 기술 - 기존 도로함몰 사례 조사, 시뮬레이션을 통한 도로함몰 영향 인자 규명, 실내실험을 통한 도로함몰 유형별 위험도 요인 정립 및 평가기술 개발 - 도로함몰로 진행되는 예측 기술의 개발, 실험형 포장가속시험을 통해 검증 ④ CTE 4 : 재난예방형 도로관리시스템 - 위험도 기반 예방적 도로관리 시스템 구축을 위한 실용화 연구와 도로 진단/관리 수행 기관에서 마련해야하는 현장조사 자료 DB 구축 및 위험도 분석 조서를 작성 - 위험도 기준에 따른 도로함몰 복구대응 매뉴얼 작성 - 도로함몰 위험도 반영 포장관리시스템(PMS) 연계(안) 작성 • 본 연구의 정량적 달성 목표는 탐지속도 20km/hr이상, 도로심도 1.5m이내, 공동크기 50cm 이상, 탐지 정확성 80% 이상, 분석시간 12시간 이내를 목표로 함
연구개발성과	• 정성적 연구개발성과 ① CTE 1 : 도로함몰 위험도 탐지 시스템 - 도로함몰 복합탐지 시스템 시제품 - 연속식 도로지지력 평가 시스템 ② CTE 2 : 도로함몰 위험도 분석 프로그램 - 인공지능 기반 도로하부 공동 자동탐지 프로그램 - 인공지능 기반 도로 표면결함 자동분석 프로그램 - 도로함몰 위험도 평가 프로그램 ③ CTE 3 : 도로함몰 위험도 평가 기술 - 도로함몰 위험도 평가 기준(안)

	- 도로함몰 매커니즘 검증을 위한 실험형 테스트베드 - 도로함몰 발생확장 모형 ④ CTE 4 : 재난예방형 도로관리시스템 - 도로함몰 복구대응 매뉴얼 - 도로함몰 위험도 분석 조서 - 포장관리시스템(PMS) 연계방안 • 총괄 정량적 연구개발성과 SCI논문 게재 8건, 비SCI 논문 게재 23건, 국내학술발표 63건, 국내 특허등록 4건, 소프트웨어 등록 15건, 시제품 제작 7건, 테스트베드 구축 10건				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	• 기술적 기대효과 - 재해/재난에 대한 예방적 도로 관리 기술의 확보 - 첨단 복합장비를 활용하므로 도로함몰 위험도 평가의 정확도 및 신뢰성 향상 - 도로공동 탐지 및 위험도 진단 분야 세계 선도 기술 수준 확보 - 도로함몰 복구 및 대응 매뉴얼 개발을 통한 본 연구의 현장 적용성 증대 효과 - 탐지-분석-도로공학을 연계하는 융합 공학 분야의 발전 - 미래 건설 산업의 변화에 대처하는 첨단기술과 이와 관련한 연구 인력의 육성에 기여 • 사회·경제적 파급효과 - 국가적인 차원에서 최근 빈번히 발생하고 있는 도로함몰 사고를 예방하여 국민 불안 해소 및 안전 대한민국 건설에 기여 - 도로함몰 사고로 인한 인명손실 및 물적 피해 감소 - 관련 기술에 대한 대외 의존도 감소 - 도로하부 공동 탐지 및 도로지지력 판정을 통해 예방적 도로포장유지관리시스템 구축 가능 - 사후복구 방식에서 사전예방 방식으로의 패러다임 전환 - 선제적 보수 보강 계획 수립으로 사회간접자본의 경제성 제고 • 활용방안 - 도로함몰 위험구간 복합 탐지 시스템은 서울시, 한국시설안전공단에서 구축할 예정인 도로함몰 점검 시스템의 성능을 고도화 시키는 데에 활용 가능 - 복합 탐지 시스템 및 분석 프로그램을 도로조사 영역에 활용 서울시는 긴급한 현안문제 해결을 위해 매년 도로 조사 영역을 발주할 예정 국토부에서는 한국시설안전공단에 도로함몰 조사 전담을 위해서 지반탐사반을 신설하여 매년 도로 조사 영역을 발주할 예정 - 탐지 시스템 및 진단 분석 프로그램을 참여 기업에서 진단 업무에 활용 - 도로함몰 위험도 기준 지침 및 복구대응 매뉴얼은 국토부, 서울시, 한국시설안전공단 등 도로관리/점검 기관에서 활용 - 포장관리시스템 연계(안)은 한국건설기술연구원, 서울시 등과 같이 도로포장관리시스템(PMS)를 구축하여 운영하고 있는 기관에서 활용하여 위험도 기반 차세대 도로포장관리시스템 구축 가능				
국문핵심어 (5개 이내)	도로함몰	위험도 평가	복합 탐지 시스템	진단 프로그램	예방적 도로관리
영문핵심어 (5개 이내)	Road Sink	Risk Evaluation	Total Road Scanner	Assessment Software	Preventive Road Management

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
가. 연구개발 배경 및 필요성	1
나. 연구개발 목표	6
다. CTE별 세부연구목표	11
2. 연구수행내용 및 성과	15
가. 연구범위 및 연구추진전략	15
나. 연구 추진 체계	23
다. 연구 수행 내용	25
라. 연구 결과	80
마. 연구 개발 성과	91
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	95
가. 질적 성과 목표	95
나. 정량적 성과 목표	100
다. 관련 분야 기여도	101
4. 연구개발성과의 활용 계획	103
가. 연구개발성과의 활용방안	103
나. 관련시장 현황 분석	104
다. 향후 기술 활용 전략	105
라. 후속 연구과제 참여 현황	105
마. 기대효과	107
바. 향후 연구 방향	108
붙임. 참고문헌	109

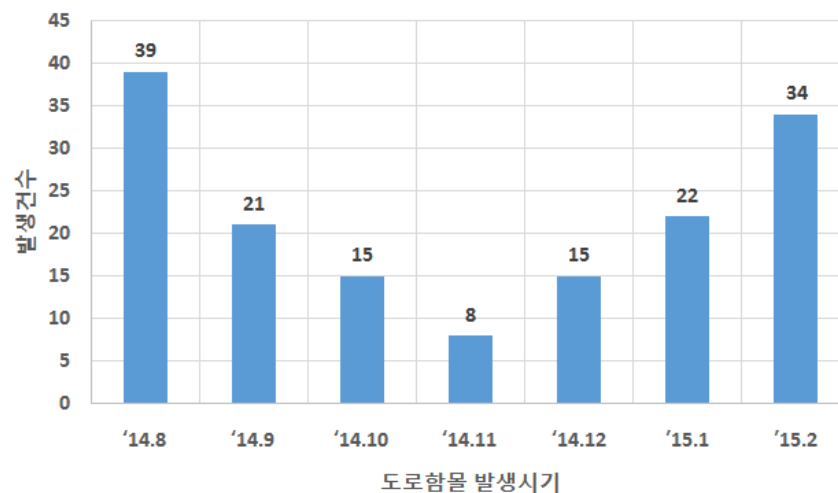
1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 배경 및 필요성

(1) 사회문화적 측면

- 도심지의 돌발적인 도로함몰은 인명 및 재산피해를 유발하며 시민들의 안전을 위협하고 불안감을 야기하는 중요한 사회적 이슈로 부각되고 있음
- 서울시에서 2010~2015년 동안 도로침하, 공동, 함몰 발생현황을 조사한 결과 총 3,328건이 발생하였으며, 연평균 665건이 발생
- 도로함몰 발생원인은 상하수관 손상 및 누수, 도로굴착 공사 불량, 지하수위 강하 등임. 특히, 발생한 도로침하 및 함몰 건수를 계절별 발생건수를 조사한 결과, 장마철인 여름과 해빙기에 발생건수가 매우 높은 것으로 밝혀짐

<출처: 서울시 도로함몰 관리정책과 대응 매뉴얼, 2015년 2월>



<최근 서울시 도로함몰 발생빈도>

- 최근 국내 도심부에서 주로 발생하는 도로함몰은 인위적인 원인에 의해 형성된 것이 대부분이며, 향후 주요 대도시에서의 각종 지하구조물 건설공사는 계속 될 것이므로 대규모 도로함몰 발생 위험이 항상 존재할 것임
- 도심지역 무분별한 지하공간의 개발 및 지하시설물 노후로 도로함몰 및 침하와 같은 다양한 안전사고가 빈번히 발생하고, 도심지 도로함몰 문제와 상하수도 누수 등이 사회적인 이슈로 제기되면서 도로함몰 위험도 평가 및 대응 방안 구축에 대한 필요성이 높아지고 있음

도로함몰 현황

- 빈번한 도로함몰 사고로 인한 사회문제 대두(서울시: 연간 665건 발생)
- 기후변화 및 지하구조물 설치 증가로 함몰사고 급격한 증가



여기도 폭삭, 저기도 폭삭... 범인은 자연이 아니라 사람

서울시에서 도로 함몰 사고가 빈번하게 발생하고 있다. 특히 도심지역에서 도로 함몰 사고가 빈번하게 발생하고 있다. 이는 도로의 노후화, 지하구조물 설치 증가, 기후변화 등 다양한 요인으로 인해 발생하고 있다. 도로 함몰 사고는 인명 피해와 재산 손실을 초래할 수 있으므로, 도로 함몰 위험도 탐지 기술 개발이 필요하다.

조선일보 2012년 4월 2일 보도

도로함몰 유형

- 도로 시공불량 및 지하공사 관리 소홀
- 상하수도 등 지하매설물 노후화에 손상
- 굴착공사로 인한 지하수위 저하



관련분야 연구

- 도로함몰 위험구간 탐지 및 자동 분석 시스템 기술 개발 시급
- 도로함몰 위험도 기준 및 등급 정립 필요
- 도로함몰 원인 규명 연구 필요



도로함몰로 인한 인명·재산 피해 저감을 위한
도로함몰 위험도 탐지, 분석, 평가 기술 개발 필요

<도로함몰 위험도 탐지 기술 개발 필요성>



(1) 서울



(2) 부산



(3) 인천



(4) 경기도



(5) 전라남도



(6) 강원도

<전국에서 발생한 도로함몰 사례 (출처 : 조선일보, 부산일보, Newsis)>

(2) 경제 · 산업적 측면

- 최근 5년간 도로부문 연평균 투자는 약 80,000억원이며 연평균 증가율은 1.48%임. 신설 도로건설 공사는 점차 감소하는 추세이나 기존 도로의 유지보수 예산은 늘어날 것으로 전망함.
- 2009년도 도로 전체 유지보수 예산은 24,852억원으로 2000년도 보다 41.1% 증가하였으며, 2018년에는 34,031억원으로 더욱 증가하였음. 각 지자체, 특히 광역시급의 도심지내 도로함몰대책이 최우선정책으로 부상 중임



<국내 도로 유지보수 비용 현황>

- 도로하부에 시공된 국내의 상하수도를 포함한 관로의 유지보수 비용이 연간 2조원 정도로 추산되고, 이중 하부기초 및 뒤채움재 등에 의한 유지보수 비율을 10% 수준으로 고려하면 약 2,000억원 정도임. 이중 도로하부에 시공된 비율을 50% 정도 고려하면 약 1,000억원 정도의 관련 분야 시장이 있는 것으로 추정됨.
- 국내의 노후화된 상수도, 하수도, 전기선로, 가스관로 교체공사 등으로 인하여 근접지역 도로함몰위험이 내재되어 있어 이에 대한 붕괴지역의 보수보강의 수요는 해마다 늘어날 것으로 예상됨
- 도심부 도로의 지하 매설물 관리를 위한 유틸리티 컷의 발생 빈도가 해가 갈수록 늘고 있고 이에 따른 소위 ‘누더기 도로’로 인한 주행안전성 결여로 인하여 시민들의 민원이 증가되고 있어 보다 체계적인 유지관리 기술이 필요함.
- 소파보수, 덧씌우기 및 재포장을 포함하여 상하수도, 도로함몰 복구와 같이 도로의 유지보수를 위해서 막대한 예산이 사용되고 있는 실정
- 본 연구를 통하여 도심부 도로에서 공동 발생 위치를 정확하게 파악할 수 있는 도로함몰 위험도 평가지표 및 기준을 제시함으로 도로함몰 및 침하, 지하매설구조물의 파손 등의 문제를 사전에 방지할 수 있음
- 본 기술을 활용하여 도로함몰 위험구간에서의 교통 및 지하시설물의 효율적인 안전점검/유지관리로 확보가능한 도로의 안전 효과에 대한 사회적인 편익은 금액으로 환

산할 수 없을 정도로 클 것으로 판단됨

(3) 국가정책적 측면

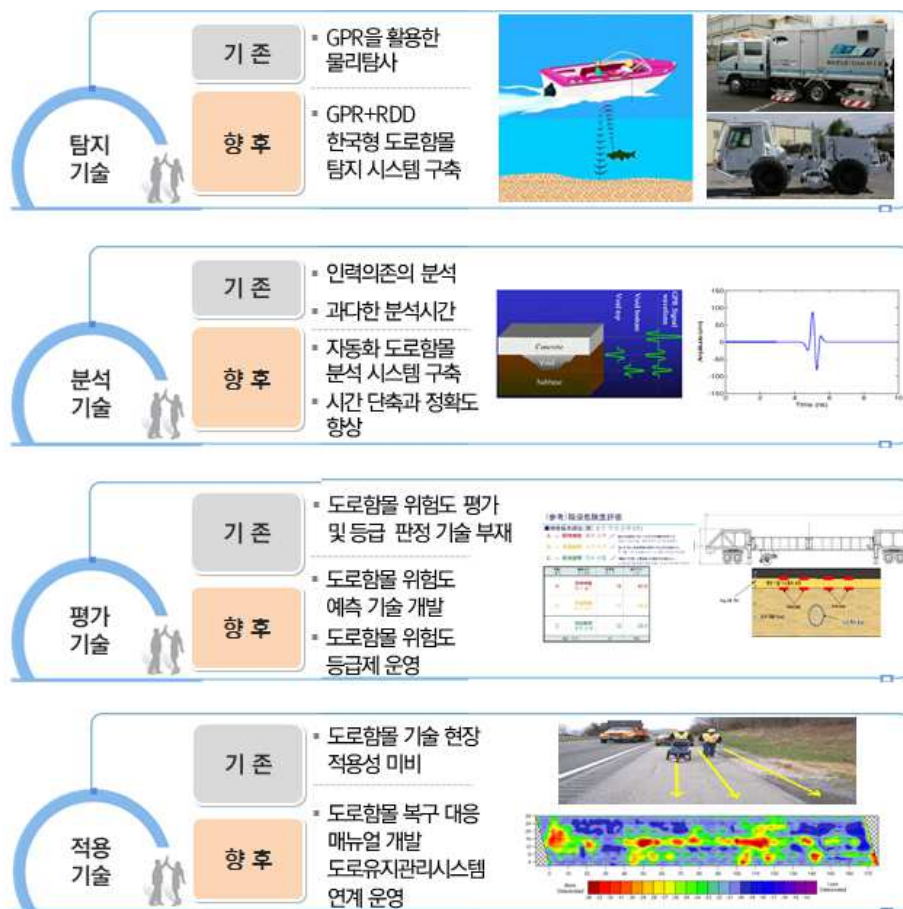
- 지하안전에 관한 특별법(2018.01)이 제정됨에 따라 지하시설물관리자 또는 시장·군수·구청장은 지하안전관리 실태점검을 정기적으로 수행하여야 함
- 안전점검대상 지하시설물 및 주변 지반을 중심으로 ①지반침하 육안조사 : 연 1회 이상 ②지표투과레이더 탐사를 통한 공동탐사 : 중전의 조사 완료일을 기준으로 매 5년마다 1회 이상 시행 필요
 - 지하안전관리에 관한 특별법 제34조 참조
 - 지하안전관리에 관한 특별법 시행령 제29조 참조
 - 지하안전관리에 관한 특별법 시행규칙 제16조 참조
- 서울시에서는 지난 2014년 11월 일본 지오서치사의 서울시 도심 도로공동탐사를 시작으로 매년 약 30억원 수준의 예산을 투입하여 자체개발 장비와 민간용역을 이용 지속적인 공동탐사를 수행하고 있음
- 2015년부터 공동발생 우려가 예상되는 서울시 주요도로를 대상으로 매년 수백km씩 정기조사를 실시하는 중이며 조사의 효과가 즉각적으로 나타나 실제 2016년에는 도로함몰 발생 수가 전년도에 비해 확연히 감소하였음
- 부산시에서는 2016년 8월 동래구 사직동에 도로함몰 사고가 발생한 이후 선제적 대응이 필요할 것으로 판단하고 자체 공동탐사 차량을 제작하여 조사에 활용 중임
- 향후 지하안전법에 의거하여 국내 모든 지방자치단체에서 도로하부 공동발생에 따른 도로함몰 피해를 최소화하기 위하여 정기적인 탐사 계획을 수립하고 이를 수행할 필요성이 있음

(4) 기술적 측면

- 주로 대규모 석회암 지역에서 석회암이 물에 녹아서 생기는 공동(空洞)으로 인해 발생하는 대규모의 싱크홀과는 달리, 도로함몰은 상하수도 관로 파손, 굴착공사 근접지역의 지하수위 변동, 지하철역 주변의 펌핑, 지하철 및 대형 차량에 의한 진동 등 여러 가지 원인이 복합적으로 작용하고, 또한 도로하부에서 발생되어 사전 예측도 어렵고 정확한 원인 파악이 어려운 실정임
- 도로함몰의 주요 원인은 도로하부 공동의 확장이며, 공동의 확장은 상수도관 파열로 인한 누수 발생(67%), 굴착복구 미흡구간(25%), 공사중 관리미흡 구간(8%)에서 주로 발생함. 추가적으로 지하구조물 매설에 따른 다짐불량, 지하수위 저감 및 해빙기 도로 하부구조에 지지력 약화, 장마철 집중호우에 따라 공동이 확장됨
- 본 연구에서는 지표투과레이더 (Ground Penetrating Radar, GPR)을 통한 물리적 지반탐사와 연속적 도로하부 지지력 조사를 통하여 도로하부 공동의 위치 및 크기를

정확하게 탐지하고, 도로함몰 위험구간 및 위험도를 평가하기 도로함몰 전용 탐지 시스템을 구축하고자 함

- 도로함몰과 같은 도심지 재난재해를 효율적으로 예방하고 대응하기 위해서는 도로함몰 탐지 및 진단 기술의 고도화, 도로함몰 위험도 평가 기술의 보유, 도로함몰 원인 분석 기술 확보를 통한 문제해결 추진이 필요
- 도로하부의 기반 시설물 설치 빈도 및 지하공간화 사업이 꾸준히 증가하고, 기후 변화로 인한 폭우 및 한파, 폭염 등 환경적 영향이 증가하고 있어 돌발성 도로함몰 사고는 지속적으로 증가할 것으로 판단됨
- 따라서 도로함몰로 인한 인명·재산 피해를 저감하기 위해서는 도로함몰 유형별 발생 메커니즘 및 원인을 규명하고, 도로함몰을 예측하기 위한 위험구간 탐지 및 분석 기술 개발 연구가 시급한 상황이며, 공동을 사전 탐지하고 규모에 따라 도로함몰 발생 시기를 예측하여 복구하는 도로 유지관리 시스템 개발이 필요함
- 현업에서 GPR을 활용한 공동 탐사 기술은 주로 인력에 의존하는 방식으로 정확성 측면에서 높은 성장속도를 보이고 있으나 분석에 많은 시간이 필요
- 도로함몰 위험도 평가를 위한 분석시간 단축 및 탐지정확도 향상을 위해서는 연구를 통하여 도로함몰 탐지의 자동화 기법의 개발 및 적용이 필요



<도로함몰 위험도 평가 및 분석 기술 개발의 필요성>

나. 연구개발 목표

(1) 본 연구의 비전 및 철학

- 국토교통부 R&D에서는 미래도로의 지향점을 ‘재해예방형 도로’로 설정하였고 이의 위치와 역할을 분석하여 본 연구에 필요한 비전과 목표를 제시
- 본 연구에서는 재해예방형 도로를 구축하여 보편적 사회복지에 공헌하는 「도로재해 저감을 통한 안전 대한민국 건설」을 본 연구의 비전으로 설정하고 이를 달성하기 위한 최종 목표를 「도로함몰 위험도 평가 및 분석기술 개발」로 설정하였음
- 본 연구에서는 최종 목표의 달성을 위한 연구 기본 철학을 「고도화」, 「기술자립」, 「실용화」의 3가지로 설정하였음
 - 「고도화」: 첨단 기술 도입 및 개선을 통해 현 기술 수준을 세계 선도 수준으로 올림
 - 「기술자립」: 장비에서 분석에 이르기까지 전반적으로 해외기술에 대한 의존도가 높은 상황에서 국내 자체 기술을 확보
 - 「실용화」: 현재 사회적 이슈가 되는 도심지 도로함몰 사고의 저감을 위해 현장에서 바로 적용 가능한 기술을 개발



<연구의 비전 및 철학>

As Is...

- 이상기후, 기반시설 노후화, 지하공사 증가



- 높은 해외 기술 의존도
- 인력에 의존한 수동적 진단 기술



- 도로함몰 사고 증가



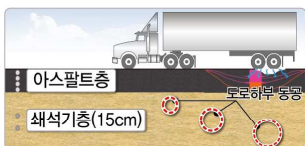
- 도로함몰 사후 복구



대책없는
도로함몰
사 고

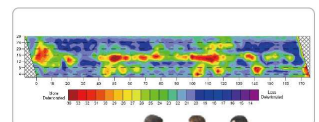
To Be...

- 도로함몰 탐지 전용 장비 구축



- 도로함몰 평가 원천 기술 확보

- 도로함몰 위험도 분석 기술 자립



안 전
대한민국
건 설



- 재난 예방형 도로관리

<연구과제의 미래상>

(2) 최종 연구목표

- 본 연구의 최종목적은 도로함몰 위험도 평가 및 분석 기술 개발을 통한 ‘도로함몰 사고 예방’으로 이를 달성하기 위하여 ① 탐지 시스템, ② 진단 프로그램, ③ 원인 및 검증, ④ 도로관리시스템이라는 네 가지 핵심기술요소(Core Technical Element, 이하, CTE)를 제시하고 각각의 연구목표를 설정
- CTE1의 연구목표 : 도로함몰 위험도 탐지시스템의 개발
 - 차량형 GPR, RDD 등의 복합 탐지 시스템 구축 및 성능 개선을 통해 도로하부의 공동 발생 유무 및 포장 지지력 평가. 1차적인 데이터 취득을 수행
- CTE2의 연구목표 : 도로함몰 위험도 분석프로그램의 개발
 - 취득된 탐지 데이터로부터 도로하부 공동의 위치 및 크기, 포장지지력을 진단하기 위한 프로그램. 탐지 시스템으로부터 취득된 데이터는 분석 프로그램을 통해 결과로 표출
- CTE3의 연구목표 : 도로함몰 위험도 평가기술의 개발
 - 도로함몰의 원인, 발생 확장 모형 및 실험형 테스트베드를 이용한 검증 연구와 도로함몰 위험도 판정 및 평가 기준을 위한 연구
- CTE4의 연구목표 : 재난예방형 도로관리시스템 연계
 - 재난예방 도로관리시스템: 도로함몰 위험도 기반 도로관리 시스템 구축을 위한 기초 연구. 대응복구 매뉴얼, 본 연구에서 개발된 연구성과물(시작품 및 소프트웨어)을 수요 기관에서 활용할 수 있는 방안 마련



<핵심기술요소(CTE)별 연구목표>

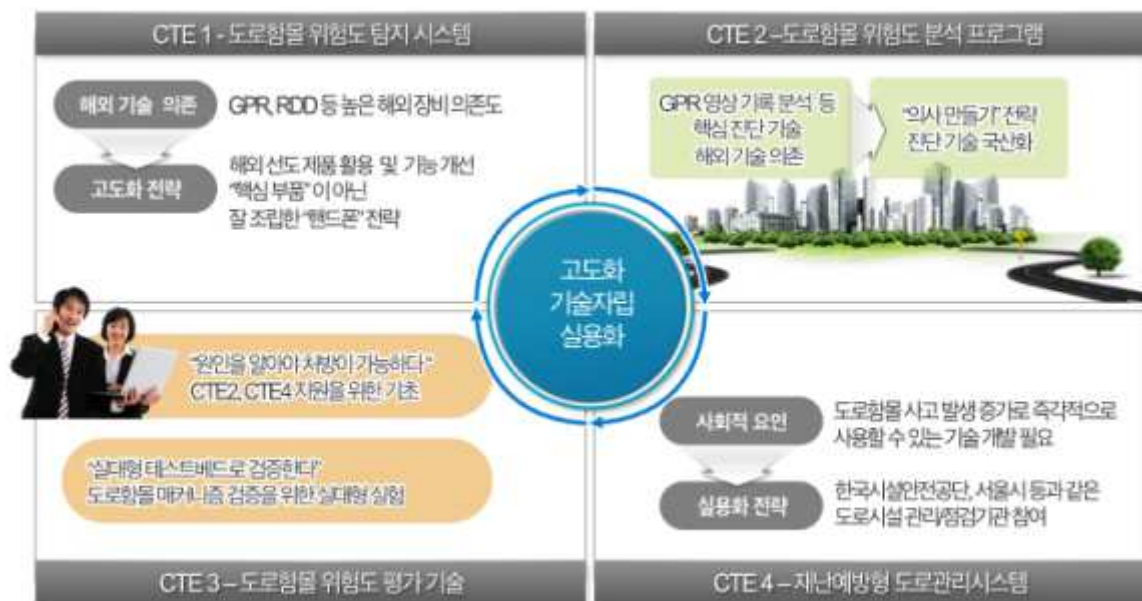
○ CTE별 지향하는 목표 기술 수준

탐지장비	CTE1 도로함몰 위험도 탐지시스템
기존 • GPR을 활용한 물리탐사	향후 • GPR+RDD+LRIS 첨단 도로함몰 탐지 시스템 구축
	세계 선도 기술 수준 대비 70% → 100%
분석기술	CTE2 도로함몰 위험도 분석 프로그램
기존 • 인력의존의 분석 • 과다한 분석시간	향후 • 자동화 도로함몰 분석 시스템 구축 • 시간 단축과 정확도 향상
	세계 선도 기술 수준 대비 70% → 90%
평가기술	CTE3 도로함몰 위험도 평가 기술
기존 • 도로함몰 위험도 평가 및 등급 판정 기술 부재	향후 • 도로함몰 위험도 예측 기술 개발 • 도로함몰 위험도 등급제 운영
	세계 선도 기술 수준 대비 60% → 90%
적용기술	CTE4 재난 예방형 도로관리시스템
기존 • 도로함몰 기술 현장 적용성 미비	향후 • 도로함몰 복구 대응 매뉴얼 개발 • 도로유지관리시스템 연계 운영
	세계 선도 기술 수준 대비 80% → 100%

<핵심기술요소(CTE)별 목표 기술 수준>

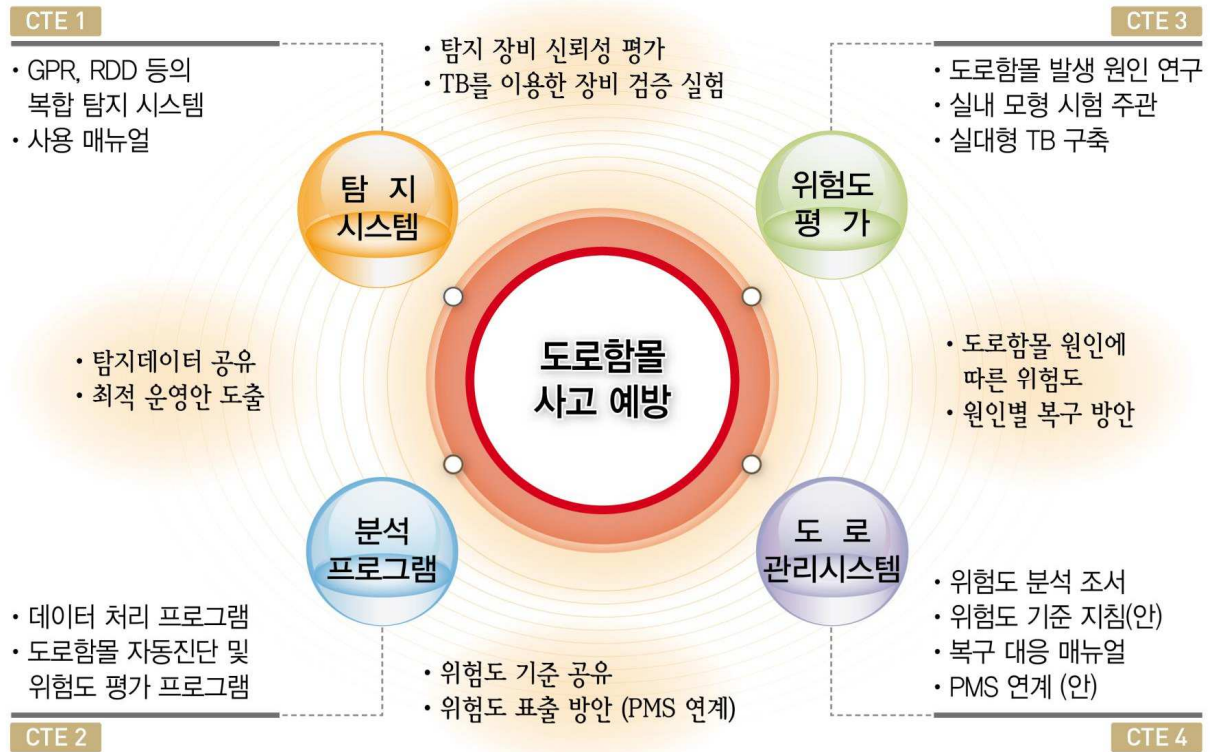
(3) 연구목표 설정배경과 연계성

- 도로함몰 위험도를 사전에 탐지하고 다양한 환경조건에 따른 도로함몰 위험도 평가 기술을 개발하기 위해 아래 그림에 명시된 설정 배경을 통해 4개의 CTE를 설정



<핵심기술요소(CTE)의 설정배경>

- 각 CTE는 독자적인 기술개발 및 연구뿐 만 아니라 타 CTE와의 정보, 연구시설, 개발기술 등의 공유를 통해 핵심 기술을 확보하여 목표를 달성하고자 함
- 최종목표를 달성하기 위한 각 CTE별 중점 연구 내용 및 CTE간의 연계성을 도식적으로 나타내면 다음과 같음



<핵심기술요소(CTE) 간 연계성>

다. CTE별 세부연구목표

(1) CTE1 : 도로함몰 위험도 탐지시스템

세부연구목표	- 도로함몰 위험성을 평가하기 위하여 도로하부의 공동 발생 유무를 파악하고 포장의 지지력을 평가할 수 있는 비파괴시험 및 분석 기법 개발 - Multi-data(지표투과레이더(GPR), 연속식 도로지지력 평가 시스템(RDD))를 활용한 최적의 도로함몰 탐지 시스템 개발
TRL목표	TRL7(실용화 단계) : 실제 환경 시제품 데모 단계
기술 내용	- 비파괴 기법을 이용한 도로포장 하부특성 자동화 탐지 기술 개발 - GPR등을 이용한 공동 탐지 기술, 도로지지력 평가 시스템을 이용한 도로함몰 위험구간의 구조적 지지력 평가 기술 등 다양한 종류의 비파괴 기법 활용 - 비정상 데이터 제거 기술 - 매립되어있는 지장물 조사 장비 등의 활용, 복합적인 데이터 처리 기술 등을 이용하여 비정상 데이터를 제거하기 위한 데이터 처리 기술 및 센싱 기술을 개발 - 개발된 도로함몰 위험도 탐지 시스템의 성능을 평가하기 위한 신뢰성 평가 지침 작성 <CTE1 개념도>
최종 성과물	- 공동 탐지를 위한 복합탐지 시스템 및 도로지지력 평가 시스템 - 탐지 시스템의 운용 및 데이터 취득 매뉴얼 - 개발된 자동탐지 기술 신뢰성 평가 지침(안)
최종성능목표	- 도로함몰 복합탐지 시스템 : 점검속도 20km/hr이상, 탐지심도 1.5m 이내, 최소 탐지 공동 크기 : 50cm - 매뉴얼 및 지침 : 개별 탐지시스템별 운용 및 데이터 취득 매뉴얼 작성

(2) CTE2 : 도로함몰 위험도 분석 프로그램

세부연구목표	• 도로하부 탐지 데이터 처리 프로그램 개발 • 도로함몰 자동진단 프로그램 개발 • 도로함몰 위험도 평가 프로그램 개발
TRL목표	• TRL7(실용화 단계) : 실제 환경 시제품 데모 단계
기술 내용	• 도로하부 탐지 데이터 처리 프로그램 개발 - Ground Penetrating Radar(GPR)과 Laser Road Imaging System (LRIS), 그리고 Rolling Dynamic Deflectometer (RDD) 데이터를 처리하기 위한 알고리즘 개발 • 머신러닝/데이터마이닝을 이용한 도로함몰 자동진단 프로그램 개발 - GPR, LRIS, RDD의 도로하부 공동 탐지시스템과 연동되어 사용될 수 있는 실행 가능한 소프트웨어 프로그램 개발 • 도로함몰 위험도 평가 프로그램 개발 - 도로함몰 자동진단 프로그램에서 제공되는 정보를 기반으로, 도로하부 공동의 위험도 등급을 분석 및 평가하는 소프트웨어 개발 The diagram illustrates the CTE2 concept. It shows two input sources on the left: '조사차량' (Investigation Vehicle) and '이동식 도로지지력 평가장치(RDD)' (Mobile Road Deflection Measurement Device). The investigation vehicle is labeled '도로함몰 복합탐지 조사차량' (Composite detection investigation vehicle for road collapse). The RDD is labeled '이동식 도로지지력 평가장치(RDD)'. Arrows from these sources point to three central processing blocks: 'LRIS 영상분석 프로그램' (LRIS Image Analysis Program), 'GPR 영상분석 알고리즘' (GPR Image Analysis Algorithm), and '도로지지력 데이터' (Road Deflection Data). The LRIS block lists: '도로균열 영상 확보' (Securing road crack images), '머신러닝 기반 자동균열조사 프로그램 개발' (Development of machine learning based automatic crack inspection program), and '도로표면 상태평가 데이터 (AASHTO, ASTM 등)' (Road surface condition evaluation data (AASHTO, ASTM, etc.)). The GPR block lists: '머신러닝 기반 자동공동탐사 프로그램 개발' (Development of machine learning based automatic void detection program), '탐지 동공 정보 데이터 (위치, 크기, 깊이, 형태)' (Detected void information data (location, size, depth, shape)), and '도로함몰 위험도 평가분류' (Road collapse risk evaluation classification). The Road Deflection Data block lists: '동공상부 포장의 도로지지력' (Road deflection of pavement above voids) and '이동식 도로지지력 프로파일' (Mobile road deflection profile). Arrows from these three blocks point to a final output box on the right: '도로함몰 위험도 분석 프로그램' (Road collapse risk analysis program). This box lists: '도로 조사 데이터 표시' (Display road investigation data), 'GPR/LRIS 데이터 통합 표시' (Integrated display of GPR/LRIS data), '도로 위험도 등급 표시 (균열+공동)' (Display road risk level (crack+void)), and '탐지동공 3차원 정밀 분석' (3D precise analysis of detected voids). <CTE2 개념도>
최종 성과물	• 도로하부 탐지 데이터 처리 프로그램 • 데이터마이닝을 이용한 도로함몰 자동진단 프로그램 • 도로함몰 위험도 평가 프로그램
최종성능목표	• 데이터마이닝을 이용한 도로함몰 자동진단 프로그램 : 탐지정확성 80% 이상, 1일 조사 데이터 분석 처리속도 : 12시간 이내 • 도로함몰 위험도 평가 프로그램 : 공동 정보에 따른 위험도 등급 분류 가능

(3) CTE 3 : 도로함몰 위험도 평가 기술

세부연구목표	• 도로함몰의 위험도 요인 평가 및 메커니즘의 규명을 통하여 도로함몰 발생의 근본적 원인을 규명하고 도로함몰 발생 모형을 개발하고자 함 • 실험형 포장가속시험을 통하여 도로함몰 발생 모형을 검증하고 현장 적용을 위한 도로함몰 위험도 기준을 개발하고자 함
TRL목표	• TRL5(시작품 단계) : 유사환경 시험 단계
기술 내용	• 도로함몰 원인 분석 및 메커니즘 규명 - 도로함몰 기존 사례 조사 - 시뮬레이션을 통한 도로함몰 영향 인자 규명 - 실내시험을 통한 도로함몰 유형별 위험도 요인 평가 • 도로함몰 위험도 예측 기술 개발 - 도로공동 위치 및 규모에 따른 도로파손 수명 예측 - 실험형 포장가속시험을 통한 도로함몰 모형 검증 및 위험도 평가 기술 개발 <CTE3 개념도>
최종 성과물	• 도로함몰 발생 확장 모형 • 도로함몰 메커니즘 검증을 위한 실험형 테스트베드 • 도로함몰 위험도 평가 기준
최종성능목표	• 도로함몰 발생 모형 및 실험형 테스트베드를 통한 원인 및 메커니즘 규명 • 도로함몰 위험도 평가등급설정 및 기준의 개발

(4) CTE 4 : 재난 예방형 도로관리시스템 개발

세부연구목표	- 도로함몰구간의 현장조사 자료 DB 구축 및 위험도 분석 조서 작성 - 도로함몰 구간의 신속한 안정성/사용성 확보를 위한 도로함몰 위험도 기반의 유형별 도심지/국도/지방도 복구대응방안 - 도로함몰 탐지를 통해 축적된 데이터를 도로포장 관리에 연계한 재난 예방형 도로관리시스템(안) 개발
TRL목표	TRL7(실용화 단계) : 실제 환경 시작품 데모 단계
기술 내용	- 도로함몰 구간 현장조사 - 위험도 기준검증을 위한 기초현장조사(GPR, 토질조사) 및 엑셀 DB 구축 - 타 조사결과(3차원 멀티 GPR, RDD, 실대형 실험) 결과와 비교·분석 - 도로함몰 대응복구 매뉴얼 개발 - 도심지 도로함몰 대응·복구 실무매뉴얼 제시 - 도로함몰 위험도 기반 도심지/국도/지방도 대응·복구 실무매뉴얼 제시 - 도로함몰 위험도 반영 포장관리시스템 연계 방안 제시 - 국내 도로 포장관리시스템 분석 및 도로함몰 DB 연계 방안 연구 - 도로 위험도(함몰DB)를 이용한 관리시스템 알고리즘 개발 - 도로함몰 DB를 활용한 포장관리 시스템(안) 제시 재난 예방형 도로관리시스템 구축 <CTE4 개념도>
최종 성과물	- 도로함몰 위험도 분석 조서 - 도로함몰 복구대응 매뉴얼 - 도로함몰 위험도 반영 포장관리시스템(PMS) 연계(안)
최종성능목표	- 도로함몰 위험도 평가 기준이 반영된 도로함몰 위험도 분석 조서 및 도로함몰 복구대응 매뉴얼 작성 - 도로함몰 위험도 평가 기준이 반영된 포장관리시스템(PMS) 연계(안)

2. 연구수행내용 및 성과

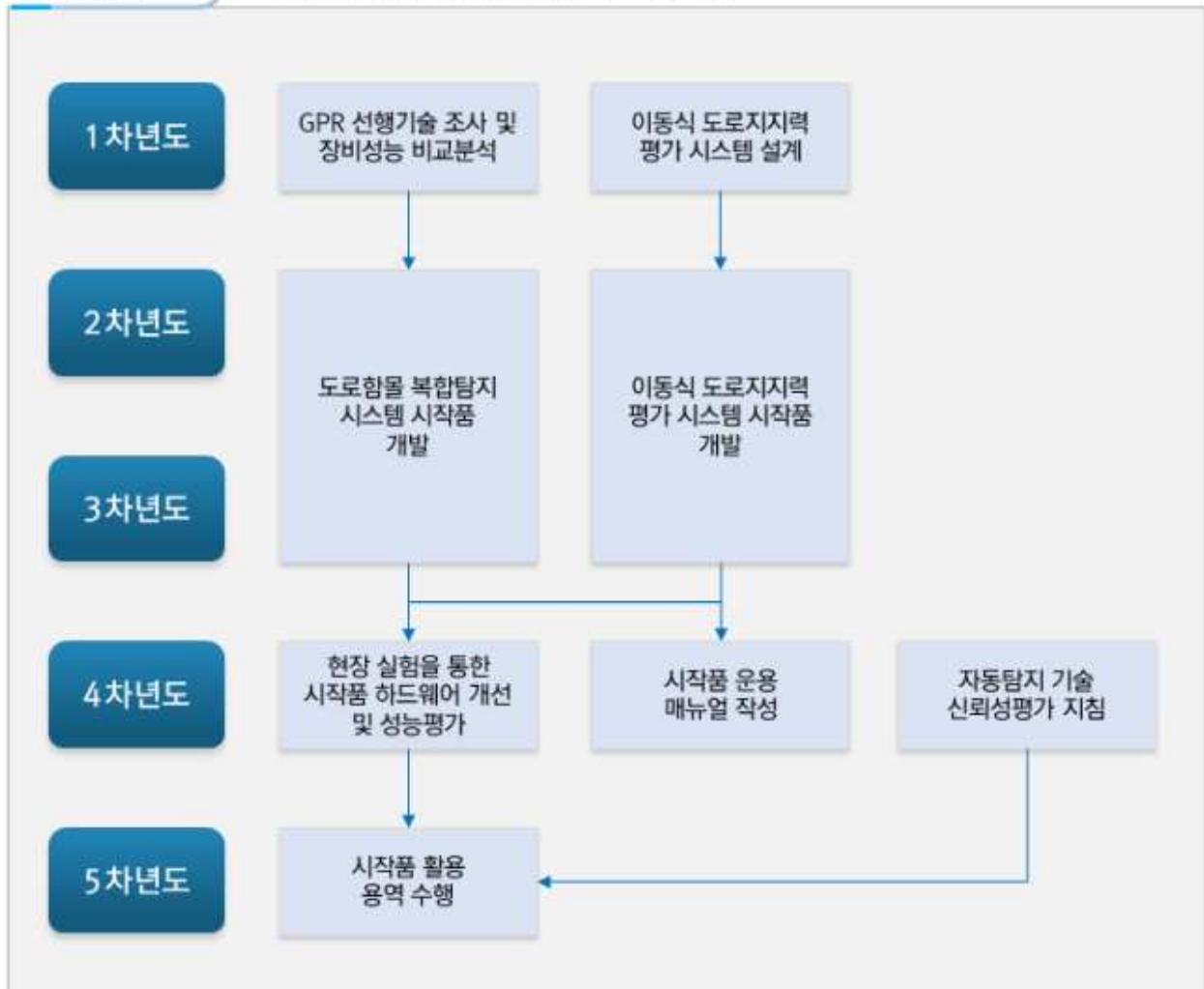
가. 연구범위 및 연구추진전략

(1) CTE1의 연구범위 및 추진전략

CTE1 : 도로함물 위험도 탐지 시스템		
구분 (연도)	세부 연구 목표	연구 범위 및 연구 방법
1차년도 (2015)	GPR 선행기술 조사 및 장비 성능 비교분석	- 국내·외 GPR 장비 및 기술의 최신동향 조사 - GPR 장비선정을 위한 실험 수행 및 성능비교 분석
	이동식 도로지지력 평가 시스템(RDD) 시작품 설계	- 이동식 도로지지력 평가 장비(RDD)를 적용사례 조사 및 메카니즘 연구 - 이동식 도로지지력 평가 시작품 설계
2차년도 (2016)	이동식 도로지지력 평가 시스템(RDD) 시작품 개발	- 도로처짐 계측기를 활용한 RDD 시작품 개선 및 최적화
	도로함물 복합탐지 시스템 시작품 개발	- 도로함물 위험도 조사를 위한 복합 계측시스템 개발 - 계측시스템을 위한 특장차량 설계 및 제작
3차년도 (2017)	이동식 도로지지력 평가 시스템(RDD) 시작품 개발	- RDD 실험형 실험을 통한 주파수별 도로 처짐 변화연구 - 현장실험을 통한 RDD와 FWD의 비교검증 - 현장실험을 통한 공동상부도로와 건전도로의 지지력 변화 측정
	도로함물 복합탐지 시스템 시작품 개발	- 도로함물 복합탐지 시스템 개발 및 성능평가 - 서울시내 시작품 현장적용 및 개선사항 도출
4차년도 (2018)	현장 실험 및 실험형 실험을 통한 시작품 하드웨어 개선 및 성능평가	- 개발된 시작품의 현장적용 및 성능검증 - 현장조사를 통한 시작품 검증 및 개선사항 도출
	복합 탐지시스템 시작품 운용 매뉴얼 작성	- 현장조사 경험을 통한 시작품 상세 운용 매뉴얼 작성
	개발된 자동탐지 기술 신뢰성평가 지침(안)	- 시작품을 활용한 현장조사와 자동분석 기술의 신뢰성평가 지침 개발
5차년도 (2019)	시작품 현장적용 용역 수행	- 도로함물 복합탐지 시스템, RDD를 활용한 서울시 또는 지자체 조사용역 참여
	시작품 고도화	- 지면 비접촉식 GPR을 활용한 도로포장 두께검출 시스템 개발

CTE 1

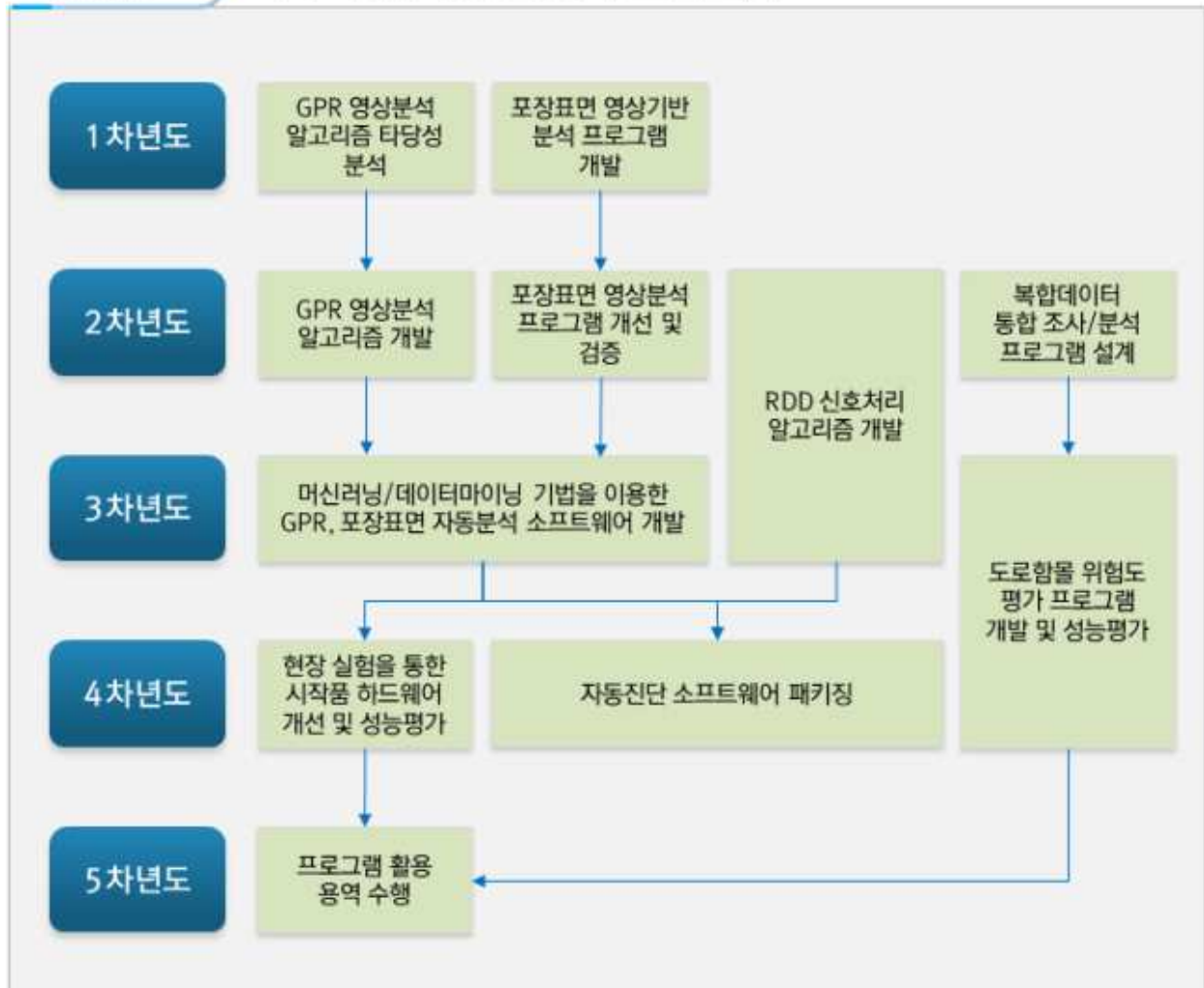
도로함몰 위험도 탐지 시스템



<CTE1 연구추진 흐름도>

(2) CTE2의 연구범위 및 추진전략

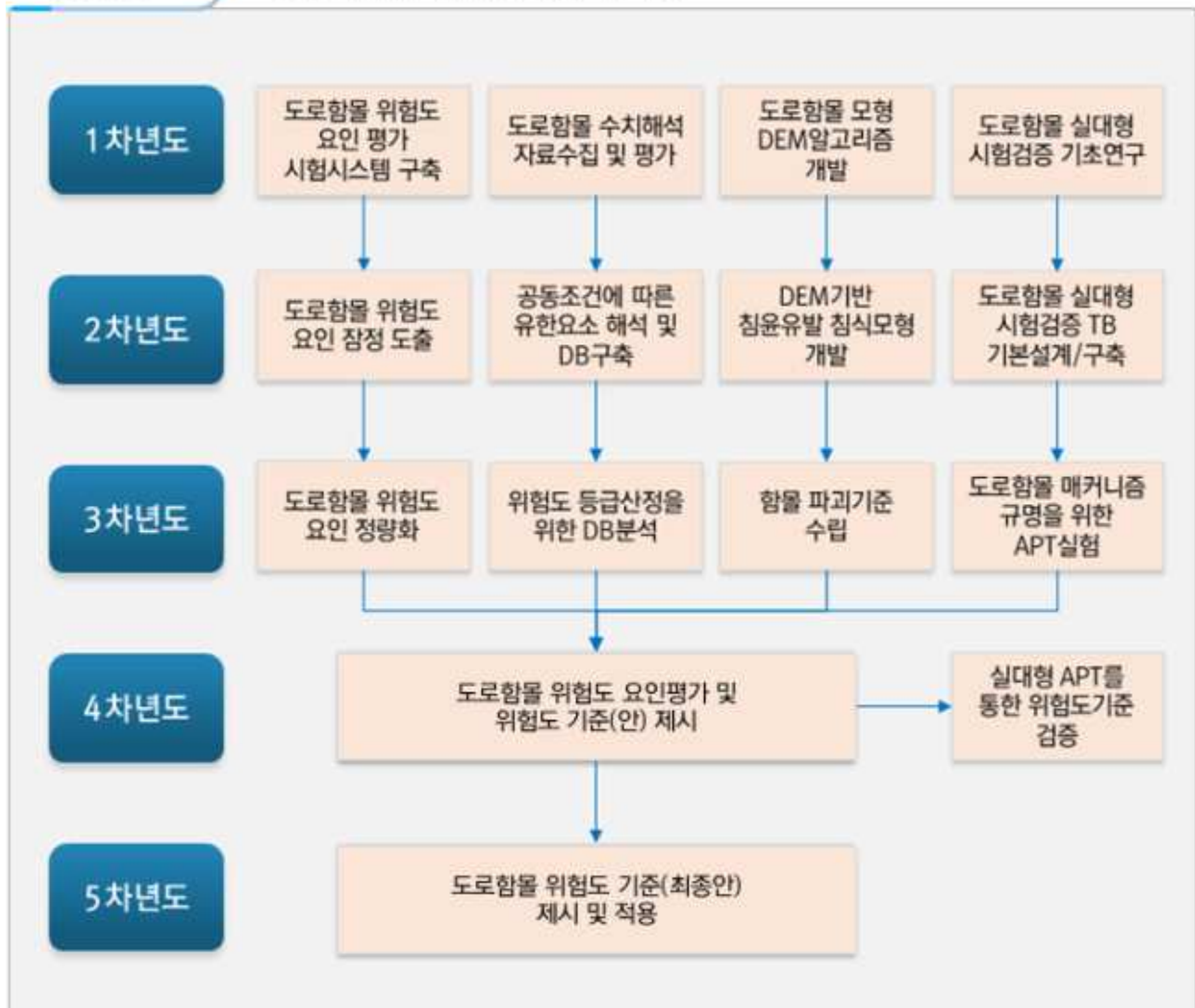
CTE2 : 도로함물 위험도 분석 프로그램		
구분 (연도)	세부 연구 목표	연구 범위 및 연구 방법
1차년도 (2015)	GPR 영상분석 알고리즘 타당성 분석	- 국내·외 3차원 GPR 장비별 구동 알고리즘 연구 - 현장 및 실내 GPR 조사 데이터 영상분석 알고리즘 연구 및 타당성 분석
	포장표면 영상기반 분석 프로그램 개발	- 포장표면 영상의 영상처리 기반 균열자동분석 프로 그램 개발
2차년도 (2016)	GPR 영상분석 알고리즘 개발	- 영상처리 기법을 이용한 GPR 알고리즘 개발
	RDD 신호처리 알고리즘 개발	- 계측 속도 향상을 위한 신호 처리 알고리즘 개발
	포장표면 영상분석 프로그램 개선 및 검증	- 노면 균열 탐지 및 대상물 탐지를 통한 알고리즘의 검증 및 최적화
	도로함물 복합데이터 통합 조사/분석 프로그램 설계	- 도로의 각종조사정보에 대한 복합 데이터를 표출, 저장하는 구동 소프트웨어의 설계
3차년도 (2017)	머신러닝/데이터마이닝 기법을 이 용한 GPR, 포장표면 자동분석 소 프트웨어 개발	- 머신러닝 기법을 활용한 공동자동탐지 GPR 분석 소프트웨어 개발 - 머신러닝 기법을 활용한 도로포장 균열자동탐지 분 석 소프트웨어 개발
	RDD 데이터 분석 알고리즘 개발	- RDD 신호데이터를 활용한 지지력 역산 방법 연구 - RDD 분석을 위한 프로그램 개발
	도로함물 위험도 평가 프로그램 개발	- 도로함물 위험도 평가 프로그램 작성: 프로그램 소 스코드 개발
4차년도 (2018)	현장실험 및 실험실 실험을 통한 소프트웨어 검증 및 성능평가	- 현장조사 데이터를 활용한 자동분석 수행 및 소프 트웨어 성능비교검증 - 소프트웨어 성능개선을 위한 데이터 추가 학습 수 행
	자동진단 소프트웨어 패키징	- 소프트웨어 사용자 편의를 위한 GUI개발 - 자동분석 소프트웨어(공동, 균열) 운용 매뉴얼 작성
	도로함물 위험도 평가 프로그램 개발/성능평가	- 실 계측 데이터의 분석프로그램 적용을 통한 추가 요구사항 분석 및 소스코드 개정 - 위험도 분석 프로그램 GUI 개발 고도화 - 위험도 평가 데이터베이스 구축
5차년도 (2019)	프로그램 현장적용 용역수행	- 공동 및 균열 자동분석 프로그램을 활용한 서울시 또는 지자체 용역 참여
	도로포장 두께 산정 알고리즘	- 지면접촉식 GPR 데이터를 활용한 도로포장 두께산 정 알고리즘 개발



<CTE2 연구추진 흐름도>

(3) CTE3의 연구범위 및 추진전략

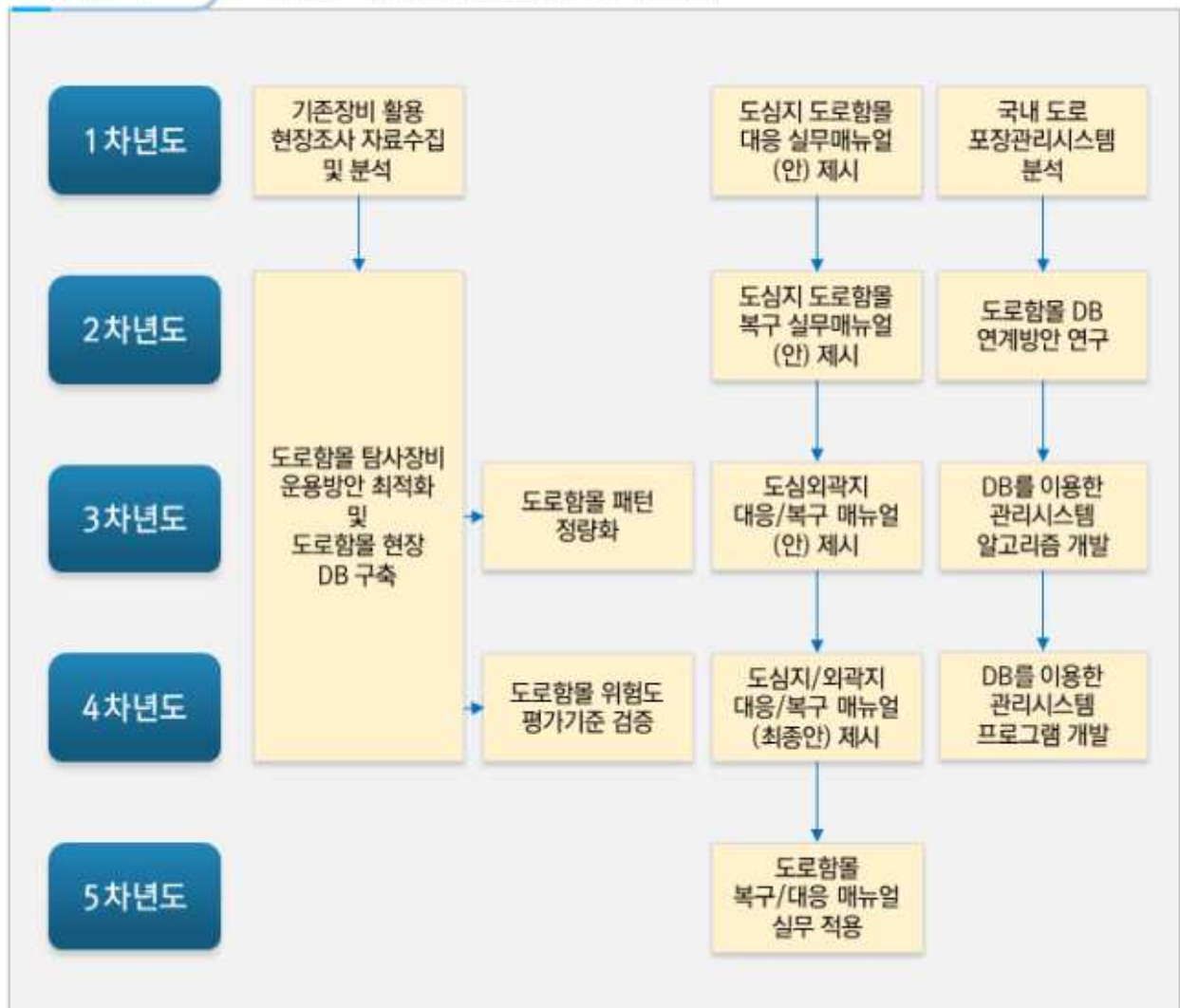
CTE3 : 도로함물 위험도 평가기술		
구분 (연도)	세부 연구 목표	연구 범위 및 연구 방법
1차년도 (2015)	도로함물 위험도 요인 평가 시험시스템 구축	- 도로함물 패턴분석 및 공동확장 가설 결정 - 도로함물 모사 모형토조 시스템 구축 및 예비시험
	도로 주변조건 및 하중조건에 따른 수치해석 자료수집 및 평가	- 도로 물성, 하중조건에 따른 유한요소해석 기본설계
	도로함물 모형개발을 위한 입자기반 해석 알고리즘 개발	- 입도분포 반영 알고리즘 수립 및 수치해석 수행 - 도로함물 발생 연구 조사
	도로함물 발생원인을 위한 실대형 시험검증 기초연구	- 도로함물 모형 검증을 위한 포장가속시험 영향인자 분석 - 실대형 포장가속시험 사례 조사
2차년도 (2016)	도로함물 위험도 요인 잠정 도출	- 패턴별 도로함물 모사 모형토조실험 - 모형토조실험을 통한 도로함물 영향요소 도출
	공동형태, 공동깊이 및 하중조건에 따른 유한요소 해석결과 DB구축	- 공동형태, 깊이 및 하중 조건을 적용한 공동발생 유 한요소모델 검증 및 다양한 조건을 적용한 해석결 과 DB구축
	침윤 유발 침식 모형 개발	- 도로함물 패턴별 도로함물 발생 해석 수치해석 모 델 수립
	실대형 포장 가속시험을 위한 테스트베드 기본 설계	- 도로함물 모사를 위한 실대형 테스트베드 기본 설 계 - 도로공동 위치와 크기에 따른 도로함물 발생 모사 및 실대형 포장가속시험 수행
3차년도 (2017)	도로함물 위험도 요인 정량화	- 패턴별 도로 함물 발생 및 확장 영향요소 정량화 - 도로함물 잠재적 위험도 요인 도출
	도로파손에 미치는 위험도 등급제시	- 도로함물 위험도 등급 산정을 위한 구축된 DB 분석
	함물 파괴기준 수립	- 함물 유형별 분류를 통한 입자기반 수치해석 - 공동상태와 지반특성에 따른 위험도 분류
	도로함물 발생 메커니즘 규명을 위한 포장가속시험 수행	- 실대형 포장가속시험을 위한 테스트베드 구축 - 도로공동 위치 및 크기에 따른 실대형 포장가속시 험
4차년도 (2018)	도로함물 위험도 요인 평가 및 기준(안) 제시	- 함물 위험도 평가 실험을 통한 도로함물 잠재적 위 험도 영향요소 정량화 - 영향요소별 도로함물 잠재적 위험도 평가 및 기준 제시 모형 도출 - 공동형태, 깊이 및 하중 조건을 적용한 공동발생 모 델 검증을 통해 위험도 평가식 제시
	실대형 포장가속시험을 통한 도로함물 모형 검증	- 실대형 포장가속시험을 위한 테스트베드 구축 - 도로공동 위치 및 크기에 따른 RDD, GPR 시험
5차년도 (2019)	도로함물 위험도 기준(최종안) 제시 및 적용	- 조사용역 분석에 도로함물 위험도 기준(안) 적용하 여 위험도 분류 - 국내 각 지자체에 대한 신규 도로함물 위험도 기준 (안) 적극 홍보



<CTE3 연구추진 흐름도>

(4) CTE4의 연구범위 및 추진전략

CTE4 : 재난 예방형 도로관리 시스템		
구분 (연도)	세부 연구 목표	연구 범위 및 연구 방법
1차년도 (2015)	기존 장비를 활용한 도로함몰 현장조사 자료 수집 및 분석	- 국내·외 위험도 기준 사례 수집 및 분석 - 도로함몰 현장조사 절차 수립
	도심지 도로함몰 대응 실무매뉴얼(안) 제시	- 서울시 도로함몰 사고 대응 및 관리기준 조사 - 도로함몰 사고 대응을 위한 사용자 수요 등 인프라 분석 및 전략과제 도출
	국내 도로 포장관리시스템 분석	- 국내 도로 포장관리 시스템 운영현황 조사 - 국외 도로함몰 조사, 관리 방법 분석
2차년도 (2016)	도로공동 탐사장비 현장자료 취득·분석·DB구축 및 도로함몰 장비 성능 개선방향 설정	- 서울시 도로공동 탐사장비 활용 현장자료 취득·분석 실시 - 위험도 등급별 핸디형 GPR 운용 방법 제시
	도심지 도로함몰 복구 실무매뉴얼(안) 제시	- 도로함몰 관련 지자체 자료 및 매뉴얼 조사·분석 - 도로함몰 발생 상황별 복구 행동절차 마련
	도로함몰 DB 연계 방안 연구	- PMS 및 도로함몰 DB 분석 - 도로함몰 관리 시스템의 최적화된 운영절차 연구
3차년도 (2017)	도로함몰 패턴 정량화 및 위험도 기준(안) 검토	- 도로함몰 패턴 정량화 - 기존(일본, 서울시) 위험도 기준(안) 검토
	공동 및 도로함몰 DB 구축	- 서울시 도로공동 탐사장비 활용 현장자료 취득·분석 및 DB구축
	도로함몰 위험도 기반 복구 매뉴얼(안) 제시 (도심지, 외곽(국도/지방도))	- 도심지 도로함몰 복구대응 매뉴얼(안) 수정보완 - 도심외곽지 도로함몰 복구 실무 매뉴얼(안) 작성
	도로 위험도(함몰DB)를 이용한 관리시스템 알고리즘 개발	- 도로함몰 관리 프로그램 구성요소 정립 - 함몰 DB를 이용한 관리 프로그램 프로토타입 설계
4차년도 (2018)	조사결과 검증 및 위험도 평가 기준 검증	- 현장조사결과를 활용한 위험도 평가기준 검증
	최종 개발된 도로함몰 탐사 장비 운용 및 성능평가/도로함몰 DB구축	- 도로함몰 DB구축 - 도로공동 탐사장비 활용 현장자료 취득·분석 실시
	도심지/도심외곽지 도로 도로함몰 복구대응 매뉴얼 개발	- 도시규모, 도로위치 특성을 반영한 통합 도로함몰 복구대응 매뉴얼(안) 작성
	도로함몰 DB를 활용한 포장관리 시스템 프로토타입 개발	- PMS DB와 연계 가능한 도로함몰 관리 프로그램 프로토타입 개발
5차년도 (2019)	도로함몰 복구/대응 실무 매뉴얼 현장적용	- 조사용역 중 공동 또는 도로함몰이 발견된 지역에 대한 개발 매뉴얼 실무적용 - 국내 각 지자체에 대한 매뉴얼 적극 홍보



<CTE4 연구추진 흐름도>

나. 연구 추진 체계



공동연구기관	공동연구기관	공동연구기관	공동연구기관	위탁연구기관	위탁연구기관	위탁연구기관
서울시품질시험소	한국시설안전공단	(주)동일기술공사	(주)유디엔에스	단국대학교	서울과학기술대학교	명지대학교
연구참여기간	연구참여기간	연구참여기간	연구참여기간	연구참여기간	연구참여기간	연구참여기간
1~4차 년도	1~5차 년도	1~4차 년도	1~5차 년도	1~4차 년도	1~4차 년도	1~4차 년도
담당연구개발내용	담당연구개발내용	담당연구개발내용	담당연구개발내용	담당연구개발내용	담당연구개발내용	담당연구개발내용
과제명 도로함몰 DB 구축 및 탐지장비 성능 검증	과제명 도로함몰 위험도 기반 복구대응매뉴얼	과제명 도로함몰 DB설계 및 PMS 활용 방안	과제명 도로함몰 위험 구간 복구 기술 연구	과제명 도로함몰 발생 해석 모델 개발	과제명 동공 발생에 따른 도로파손 영향평가	과제명 도로함몰 DB의 PMS 연계 방안 연구
탐지장비에 의해 동공의 규모 및 심도 등을 파악하고 도로함몰 DB 구축	도로함몰 유형별 특성을 고려하여 체계적·효율적 대응이 가능한 복구 대응매뉴얼 작성	- 국가차원의 도로함몰 R&D 전략 및 세부이행 계획 도출 - 도로함몰 탐지를 통해 축적된 데이터를 도로포장 관리에 활용	도로함몰 유형별 특성을 고려하여 체계적·효율적 대응이 가능한 복구 대응매뉴얼 작성	도로함몰 관련 인자들에 대한 이해를 통하여 침윤 유발 지반의 불안전성 평가모형을 수립	- 다양한 동공 형태에 따른 도로파손에 미치는 영향을 평가 - 동공에 대한 유지보수의 시기를 결정할 수 있는 활용기술 개발	- 도로함몰 탐지를 통해 축적된 데이터를 도로포장 관리에 활용 - 구조 및 기능에 대한 관리를 넘어 위험도에 대한 관리 개념 확대
단순참여기업	국보환경(주)					

다. 연구 수행 내용

(1) 1차년도 연구 수행 내용

(가) CTE1

CTE1의 1차년도 연구내용

- 지표투과레이더(GPR)에 대한 선행기술에 대해 조사하고 국내 타 기관 보유 GPR장비 비교실험
- 이동식 도로지지력 평가 시스템(RDD) 현황조사 및 기초설계

○ GPR 선행기술 조사 및 장비성능 비교분석

- 국내 타 기관 보유 GPR 장비 실험 수행
- GPR 장비성능 비교 및 장비선정 : 최종적으로 3D Radar DXG1820 GPR 선정



<IDS STREAM-X 200>



<3D Radar DXG1820>



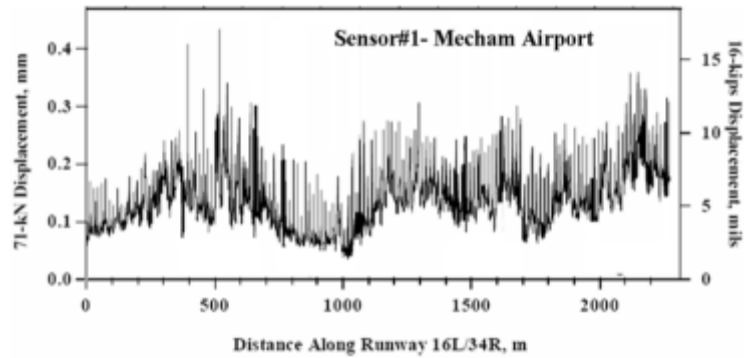
<MALA System 400>

<GPR 장비성능 비교표>

항목	MALA	3D Radar
제조사	MALA-GEOSCIENCE AB	NIITEK (3D Radar.)
GPR 장비명	MIRA System 400 (스웨덴)	DXG1820 (미국, 노르웨이)
GPR 방식	Impulse Type	Step-Frequency Type
주파수	400, 1300 MHz (장비당 단일주파수만 가능)	200MHz-3.0GHz (가변 주파수)
Resolution (분해능)	- 저심도(지표면에서 30cm이내의 경우) 분해능이 떨어져 작은 공동 탐지가 어려움 - 심도 2m의 공동 탐지 어려움	- 심도와 관계없이 분해능은 우수함 - 심도 2m의 공동 탐지 가능 (잡석과 같은 비타켓신호의 반사신호도 선명히 나타나 초보자들은 분석오류 가능성 있음)
데이터 적용	- 데이터 용량은 적당한 수준이며 Raw Data의 변환이 원활함 (다양한 소프트웨어에서 활용이 가능함)	- 데이터 용량이 매우 큼 (1km 연장, 폭 6m 경우 약 100 Gbyte) - 연구에 적용하기 위해서는 Raw Data의 변환이 필요함 - 데이터 변환은 3D Radar 프로그램에서만 가능함
적용성	- 단일주파수 (400MHz) 사용에 따라 공동 탐지에만 적용이 가능	- 가변주파수 사용에 따라 다양한 토목구조물 적용이 가능 (도로포장 두께, 교량 바닥판 열화 평가 등)

○ 이동식 도로지력 평가 시스템(RDD) 설계

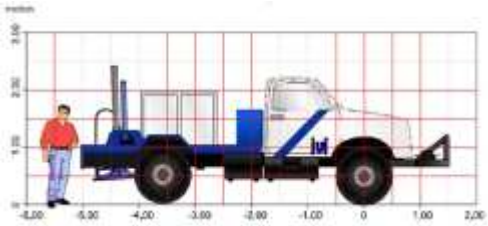
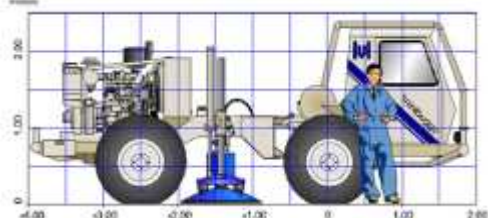
- 국내 · 외 RDD 적용사례 연구 및 테스트 메카니즘 분석



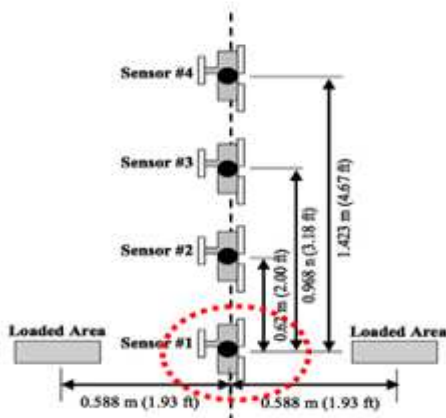
<RDD 적용사례분석1 (공항 콘크리트 포장하부 상태평가에 사용)>

- 상용 RDD 모델별 장 · 단점 분석 및 선정 : EnviroVib2

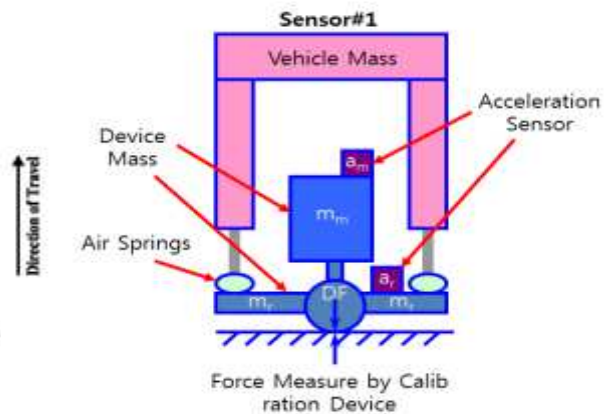
<RDD 모델별 장 · 단점 분석표>

모델명	장점	단점	장비전경
T-15000	- 이동시 고속주행 가능 - 센서 및 시스템 설치 공간 충분	- 특별 주문제작 - 일정한 속도 유지불가 - 높은 가격	
EnviroVib2	- 일정한 속도 유지 - 낮은 가격	- T-15000에 비해 상대 적으로 낮은 이동 속도 (20~30km/h): 목표(20km/h) 에는 부 합 - 센서 공간 협소	

- RDD 계측시스템 설계



<RDD 롤링센서 배치도>



<새로운 RDD계측센서 방안 설계(Sensor#1)>

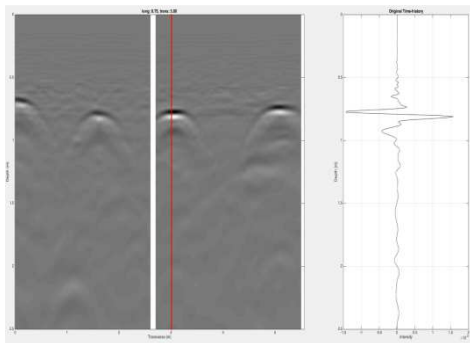
(나) CTE2

CTE2 1차년도 연구내용

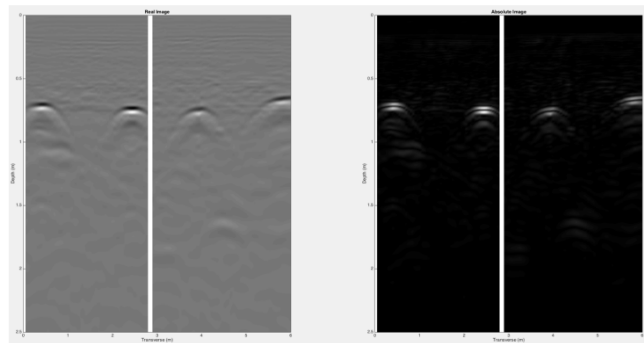
- 지표투과레이더(GPR)에 데이터 기초구조 이해를 위한 영상표출 알고리즘 개발
- GPR 상용 분석 프로그램 검토 및 실내 시험체 설계 및 구축
- 영상기반 포장표면 균열분석 프로그램 개발

○ GPR 알고리즘 타당성 분석

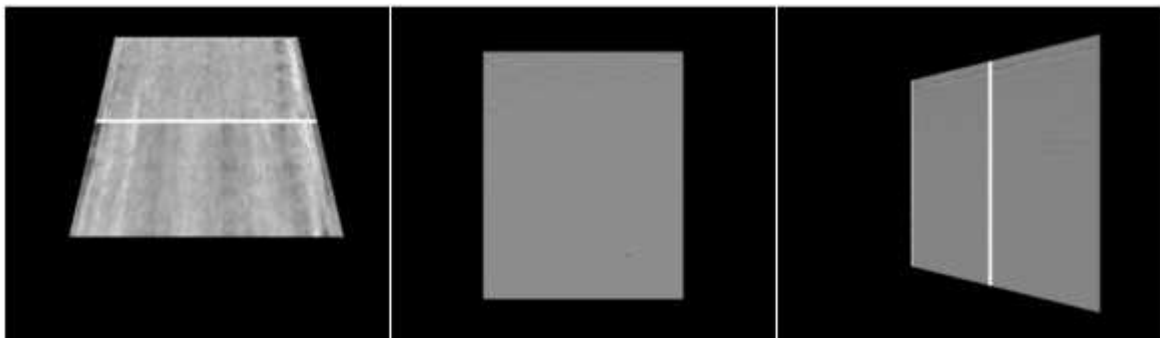
- 3D GPR 데이터 기초연구 및 분석을 위한 영상표출 알고리즘 개발



<GPR B-scan(종단면) 이미지>

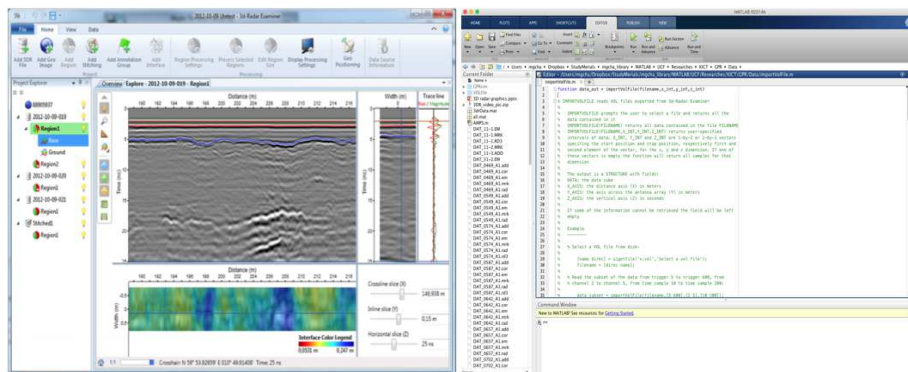


<GPR Real이미지와(좌) Absolute이미지(우) 비교>



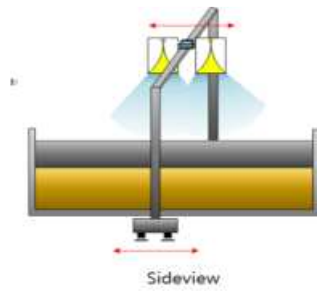
<GPR 3D(B,C,D-scan) 표출 알고리즘>

- 상용 3D GPR 분석 프로그램의 성능검토

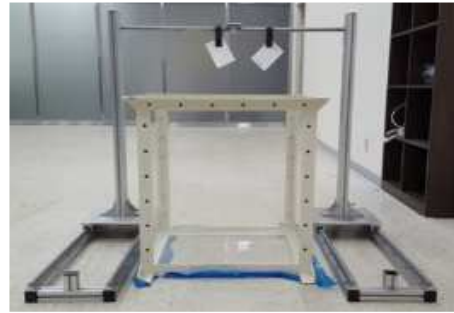


<상용 GPR 후처리 프로그램(좌)과, 개발 프로그램(우)>

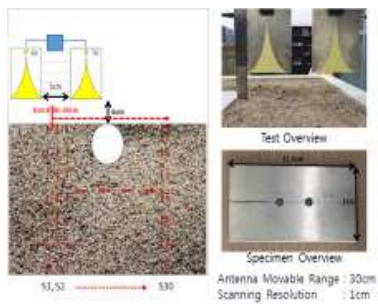
- GPR 영상분석 알고리즘 개발을 위한 실내시험체 구축 및 기초시험



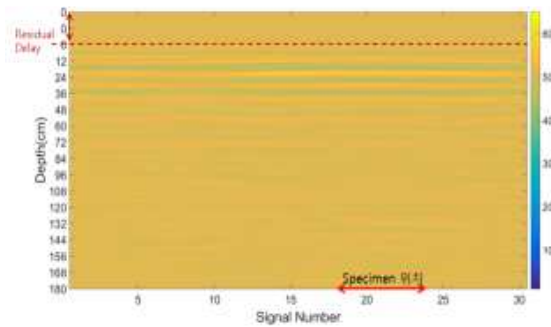
<GPR 실내 시험체 구축>



<GPR 실내 시험용 시험체 제작>

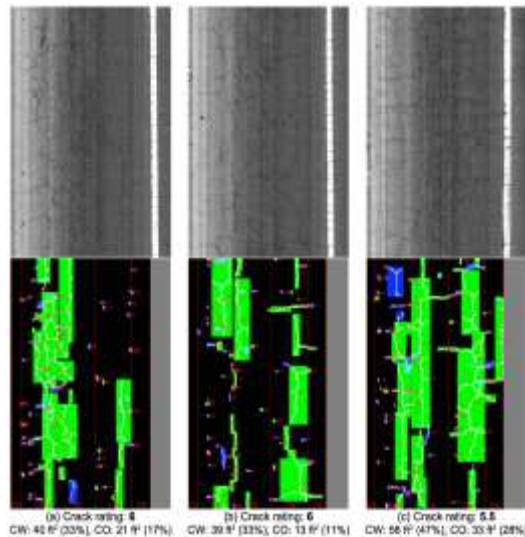


<공동모사 Case 선정>



<실내 실험결과 분석>

○ 영상기반 포장표면 균열분석 프로그램 기초개발



<영상기반 균열 탐지 소프트웨어 결과>

<도로 상태에 따른 균열 특성에 대한 분석 결과 (좌: 양호, 우: 비교적 다 균열)>

	Avg	Stdv	10 Quant	90 Quant		Avg	Stdv	10 Quant	90 Quant
Area (mm ²)	997.50	6237.70	43.00	1461.00	Area (mm ²)	1214.60	9345.50	36.00	1588.00
Length (mm)	174.58	518.97	12.00	353.00	Length (mm)	178.48	754.67	10.00	357.00
Width (mm)	3.95	8.19	2.23	5.72	Width (mm)	4.30	9.15	3.32	6.38
Orientation (deg)	3.45	76.60	-86.54	87.07	Orientation (deg)	2.74	75.28	-86.03	86.66

(다) CTE3

CTE3 1차년도 연구내용

- 도로함몰 발생 기본 메커니즘을 추론하고 이를 통한 최적 모형토조 시스템 설계 및 구축
- 다양한 조건의 공동발생 지반 유한요소해석 모델을 위한 자료 수집 및 기초해석
- 공동생성조건에 따른 입자기반 해석 기초모형 정립
- 도로함몰 발생원인 파악을 위한 APT활용 실험대형 시험 검증 기초 연구

○ 도로함몰 위험도 요인 평가 시험시스템 구축

- 도로함몰 기본 매커니즘 추론

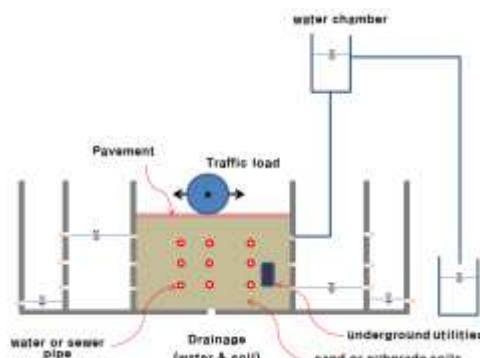


<불포화 모래>

<하수관거 손상(모래)>

<상·하수관거 복합손상(모래)>

- 도로함몰 모사 모형토조 시스템 구축 및 예비시험

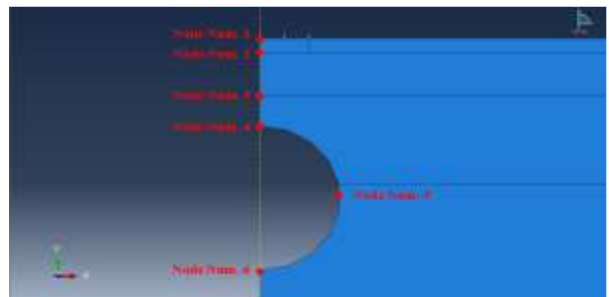
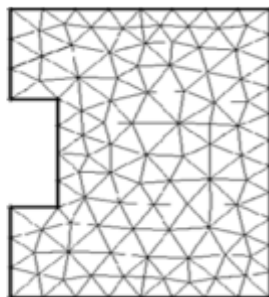
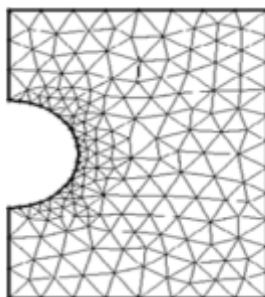


<도로함몰 모사 모형토조 시험장치 개념도>

<도로함몰 모사 모형토조 시험장치 전경>

○ 도로함몰 조건에 따른 수치해석 자료수집 및 평가

- 유한요소해석을 통한 공동 발생 기초 자료 수집 및 평가

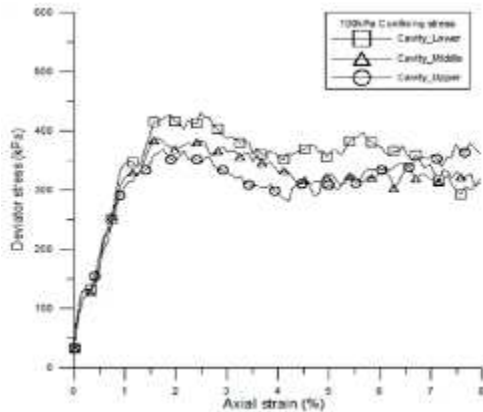


<공동형태 별 Axisymmetric FEM Model>

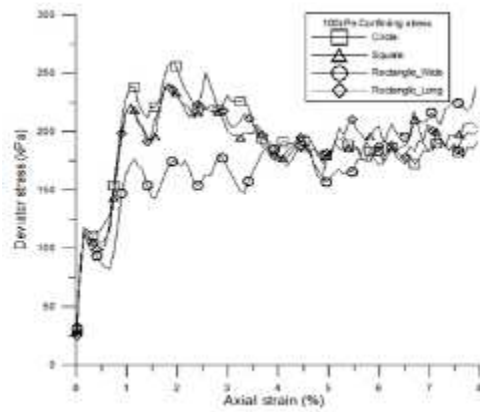
<Axisymmetric FEM Model 결과산출 Node 선정>

○ 도로함몰 모형개발을 위한 입자기반 해석 알고리즘 개발

- 흙입자의 관점에서 공동형성 및 확장, 도로함몰 발생 원리 파악
- 분석결과를 이용한 2차원 입자기반 해석 기초모형(안) 정립



<공동 생성 위치별 해석>



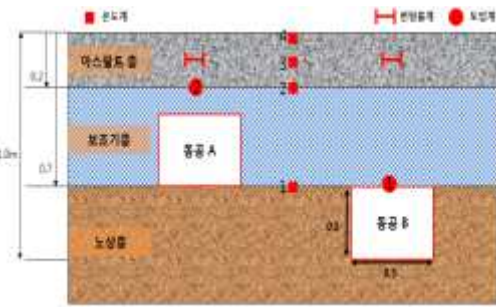
<공동 형상별 특성 비교>

○ 도로함몰 발생원인을 위한 실험형 시험 검증 기초 연구

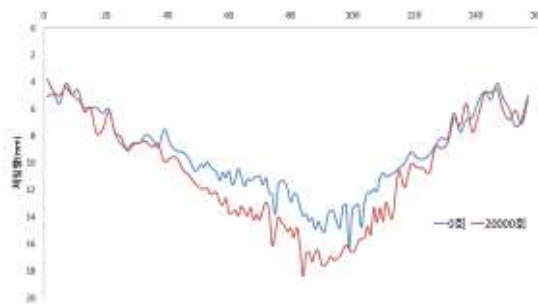
- 실험형 포장가속시험 : 포장가속시험기(APT)를 활용하여 실제 교통하중 재하하는 장치로 포장체의 파손을 가속시키는 장치
- 공동을 모사한 테스트베드에 포장가속시험을 수행하여 공동에서 도로함몰로 이어지는 원리를 실험으로 파악 가능
- 1차 테스트베드 구축 (건설기술연구원 안동 하천실험센터) : 3D GPR 기초연구로 활용
- 2차 테스트베드 구축 (건설기술연구원 일산본원 APT시험동) : 얼음으로 공동을 모사 후 APT실험을 통해 공동 유무에 따른 지지력 차이와 하중재하에 따른 공동확장 실험



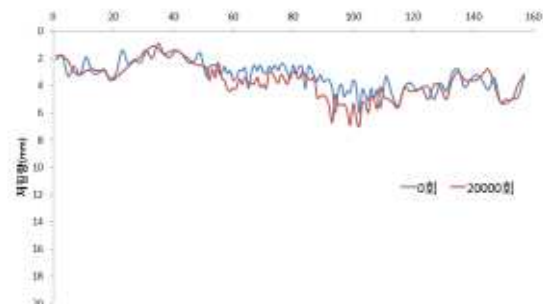
<포장가속시험기 전경>



<2차 테스트베드 단면도>



<APT시험결과 : 공동구간 소성변형량>



<APT시험결과 : 건전구간 소성변형량>

(라) CTE4

CTE4 1차년도 연구내용

- 기존 3차원 GPR 및 핸드형GPR을 활용한 공동현장조사 자료수집 및 특성분석
- 도심지 도로함몰 대응 실무매뉴얼 작성
- 국내·외 도로 포장관리 시스템 분석

○ 기존 3차원 GPR활용 현장조사 자료 수집 및 분석

- 반사파의 형상과 크기를 기준으로 공동 및 매설물의 GPR 신호 특성 파악
- 현장조사 결과 분석을 통한 공동유무 확인 및 공동탐사 보고서 작성

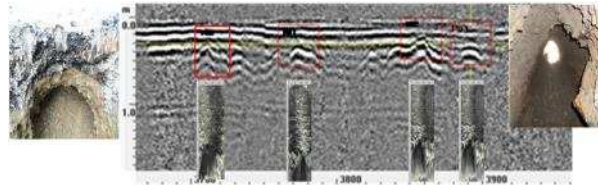


(a) 서울시 차량형 멀티 GPR 장비

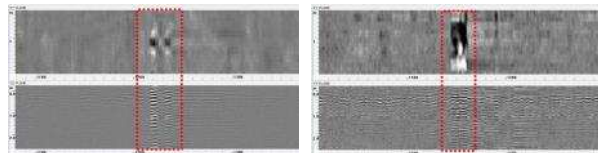


(b) GPR 안테나 박스 후면 (c) GPR 안테나 박스 측면

<서울시 도로하부 공동 조사장비>

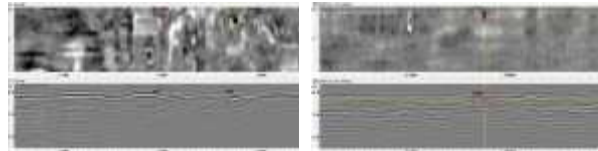


(a) 실제 공동 확인 신호



(b) 맨홀 신호

(c) 굴착 후 복구 구간



(d) 맨홀 구조물 경계

(e) 자갈 신호

<GPR 신호 형상>

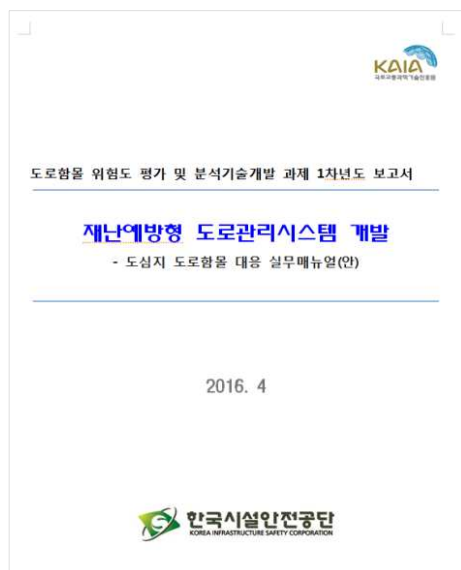
○ 도심지 도로함몰 대응 실무매뉴얼 제시

- 도로함몰 유지관리 기준, 가이드라인 등 참고문헌 분석
- 도로 안전관리 담당자 인터뷰를 통한 도로함몰 방지대책 및 사고대응체계 분석
- 도로함몰 사고 대응을 위한 사용자 수요 등 인프라 분석 및 우선순위 도출
- 우선순위에 따른 대응 실무매뉴얼 작성

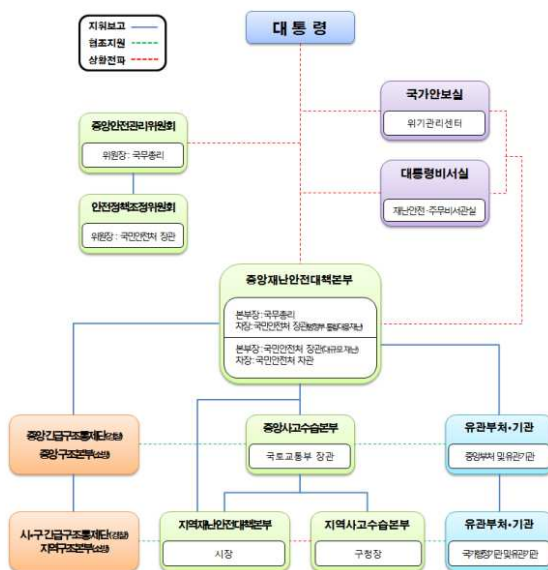
<도로함몰 사고 위험 단계별 조치내용 제시(3, 4단계)>

조치사항	세부내용
(가) 상황접수·전파	- 도로함몰 발생정보 접수 - 상황보고 및 전파

조치사항	세부내용
(나) 초동대응	- 유관기관에 초기대응 및 현장출동 지시 - 초기대응반 급파 - 현장 및 차량 통제 - 사고현장 상황파악 및 보고
(다) 대응조직 구성·운영	- 지역사고수습본부 구성 준비 - 상황 판단회의 개최 - 시·구 재난안전대책본부 구성 - 중앙사고수습본부 구성
(라) 사고수습·대응 조치	- 초동조치 확인 - 추가붕괴 등 2차 사고방지대책 점검 - 피해 및 사고수습상황을 신속하게 파악하여 실시간 보고·전파 - 사고수습 지원 및 협조체계 구축
(마) 복구 및 사후관리	- 원인조사 및 복구계획 수립 - 복구지원 및 통계관리 - 이재민 구호대책 - 사상자 치료·장례 등 대책 협의 추진 - 배상(보상)업무 추진
(바) 홍보·보도 대책	- 국민행동요령 등 대국민 홍보 - 긴급구조 활동 상황의 보도·안내



<도심지 도로함몰 대응 실무매뉴얼(안)>



<종합체계도>

○ 국내·외 도로 포장관리 시스템 분석

- 국내·외 PMS 운영현황 조사
- 국외 도로함몰 위험도 관리방법 조사
- 미국, 일본의 하수도 자산관리 시스템 조사

(2) 2차년도 연구 수행 내용

(가) CTE1

CTE1 2차년도 연구내용

- 3D GPR과 다양한 도로조사 센서가 결합된 도로함몰 복합탐지 시스템의 설계 및 개발 착수
- 이동식 도로지지력 평가 시스템 시제품 개발 착수

○ 도로함몰 복합탐지 시스템 시제품 설계 및 개발

- 도로함몰 탐지를 위한 복합 계측 시스템의 구성

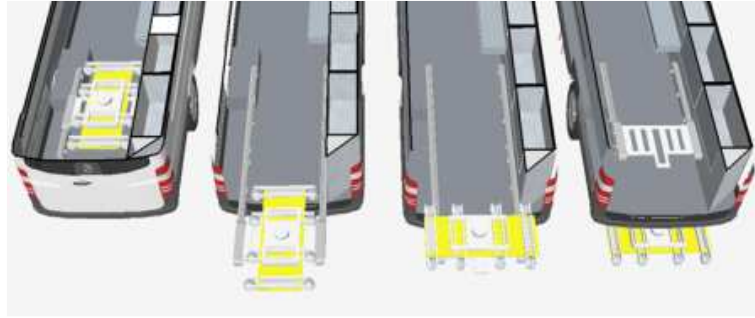
<시작품의 복합계측시스템 주요 목표사양 및 용도>

항 목	주요 사양	용 도
3차원 지표투과레이더 (GPR)	- 주파수범위 : 200~3000MHz - 채널 수 : 20개 - 채널간격 : 7.5m - 유효조사폭 : 1.5m	도로 주행방향으로 전자기파를 발생 및 반사파를 측정하여 지반내부의 구조나 물체를 탐지하는 장치로써 공동 탐사의 주요장치
포장표면영상 취득장치	- 조사 속도 : 0~80km/h - 측정 폭 : 3.7m이상 - 표면 영상 분해능 : 1mm 이하	도로포장표면에 발생한 결함을 조사속도 범위 이내에서 이동속도와 무관하게 영상자료를 취득하는 장치
종단평탄성 조사장치	- 조사 속도 : 0~80km/h - 조사지점 수 : 1개 지점 - 종방향 Sampling : 25mm - 노면 측정 파장 영역 : 120m	도로를 주행하면서 주행방향으로 일정간격의 요철높이를 획득한 후 특정 지수 (IRI) 형태로 변환하여 주행방향으로 도로의 평탄정도를 조사하는 장치
소성변형 조사장치	- 조사 속도 : 0~80km/h - 횡방향 Sampling : 2mm 이하 - 종방향 Sampling : 50cm 이하 - 수직프로파일측정 최대깊이 : $\pm 75\text{mm}(150\text{mm})$이상 - 수직변위 정확도 : 2mm 이하 - 조사 폭 : 3.7m 이상	아스팔트포장 표면에 발생하는 횡방향의 물리적인 굴곡을 조사하는 장치로서, 주행중 신속하게 1개의 차로폭에 대한 굴곡깊이를 측정하는 장치
도로현황 조사장치	- 영상 해상도 : 5M Pixel - 거리연동 등간격 영상취득 - 디지털 칼라 영상취득	조사차량을 기준으로 주행 중 조사노선의 km-post 및 기타 주요 이정시설물에 대한 영상자료를 획득하는 장치
위치확인 조사장치	- 구성:GPS+DMI - 거리정보연동 최대채널수 : 8개 - 거리오차:0.15%	각 조사장치에 위치 정보를 제공해주는 장치

- 복합탐지 시스템의 최적의 장비 설치안 선정 및 개발



<소성변형계측기의 대각조사로 인한 위치 편차 제거 및 노면모듈 일체화>



<센서 탑재 프레임 설계 방안>

○ 이동식 도로지지력 평가 시스템(RDD) 시작품 개발

<RDD 시작품 주요사양>

구 분	항 목	주요 사양
차량부	RDD 시작품 차량 중량 (minivib 2EV)	- 공차중량 : 17,500 lbs (7,938 kgf) - 축중량 - 전륜 7,875 lbs (3,572 kgf) - 후륜 9,625 lbs (4,366 kgf)
	타이어	14.9-24, 8 ply, R3 (BKT TR-391)
	차량치수	- 전장 : 238 in. (6045 mm) - 전폭 : 88.6 in. (2252 mm) - 전고 : 94.3 in. (2395 mm) - 축간거리 : 102 in. (2591 mm)
	엔진	- John Deere 4045HF (Tier 3, Stage 3) - 125 Horsepower (93 kW) - 2,500 RPM continuous rating - 연료 : 경유
	구동력	3단기어 2륜구동 1,2단기어 2,4륜구동 변환 가능
	변속기	3단 기어
하중부	재하하중	- 동적하중 : 14,940 lbs (6,777 kgf) - 정적하중 : 16,500 lbs (7,484 kgf) - 피스톤 면적 : 4.98 in² (31.1 cm²)
	질량체	- 중량 : 1750 lbs (794 kgf) - 상하 운동 거리 : 2.75 in. (6.99 cm)
	리프트 시스템	- 리프팅 거리 : 38 in. (96.5 cm) - 리프트 실린더 지름 : 2.5 in. (6.3 cm)



<RDD 하중롤러 제작>



<RDD 하중롤러와 결합한 시작품 전경>

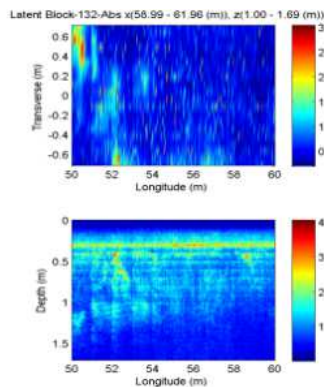
(나) CTE2

CTE2 2차년도 연구내용

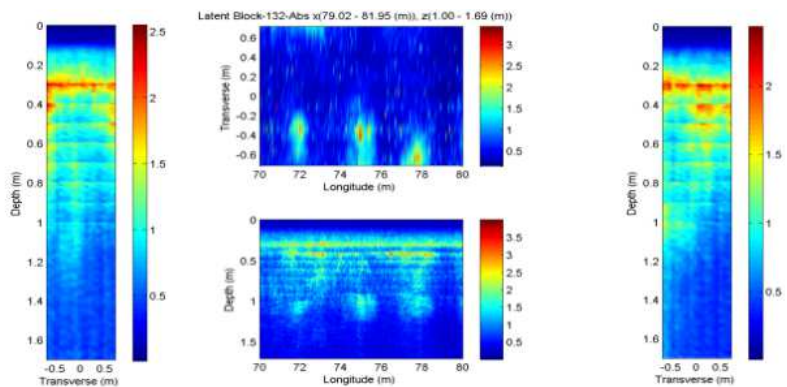
- GPR 데이터 개선을 위한 영상기반 분석 알고리즘 (BC-ICA, Basis Pursuit) 개발 및 적용
- RDD 실시간 신호 계측을 위한 모니터링 소프트웨어 개발 및 매뉴얼 작성
- 영상기반 포장표면 균열분석 프로그램 개발

○ 영상기반 GPR 데이터 분석 알고리즘 개발

- BW-ICA 알고리즘 개발 : 특정한 크기의 블록(Block)을 나누어 ICA를 적용하여 블록 내의 특이점을 강조하는 알고리즘

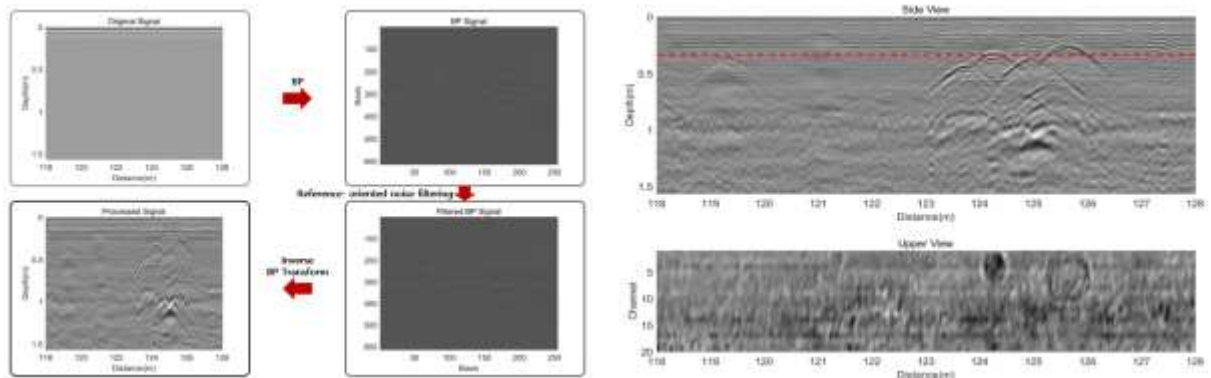


<BW-ICA 적용결과 예1>



<BW-ICA 적용결과 예2>

- Basis Pursuit 알고리즘 개발 : Basis pursuit (BP) Transformation을 통해 GPR 데이터 상 강하게 반사되는 신호를 제거하는 알고리즘



<GPR신호를 활용한 공동구간 BP 프로세싱 과정>

<공동 구간 BP 프로세싱 결과>

- 영상기반 GPR 분석 알고리즘은 맨홀, 포장층, 배관 등에서 강하게 반사되는 GPR 신호를 줄여주어 공동이 있는 지반영역의 가독성을 향상시킴

○ RDD 신호처리 알고리즘 개발

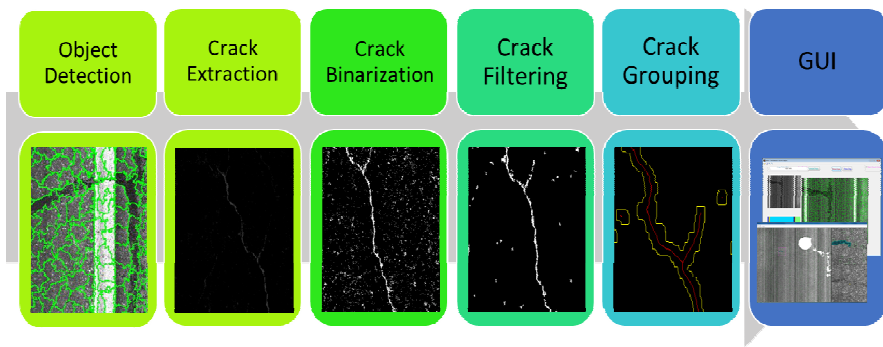
- 실시간 RDD 계측데이터 모니터링 소프트웨어 개발



<RDD 센서 모니터링 소프트웨어>

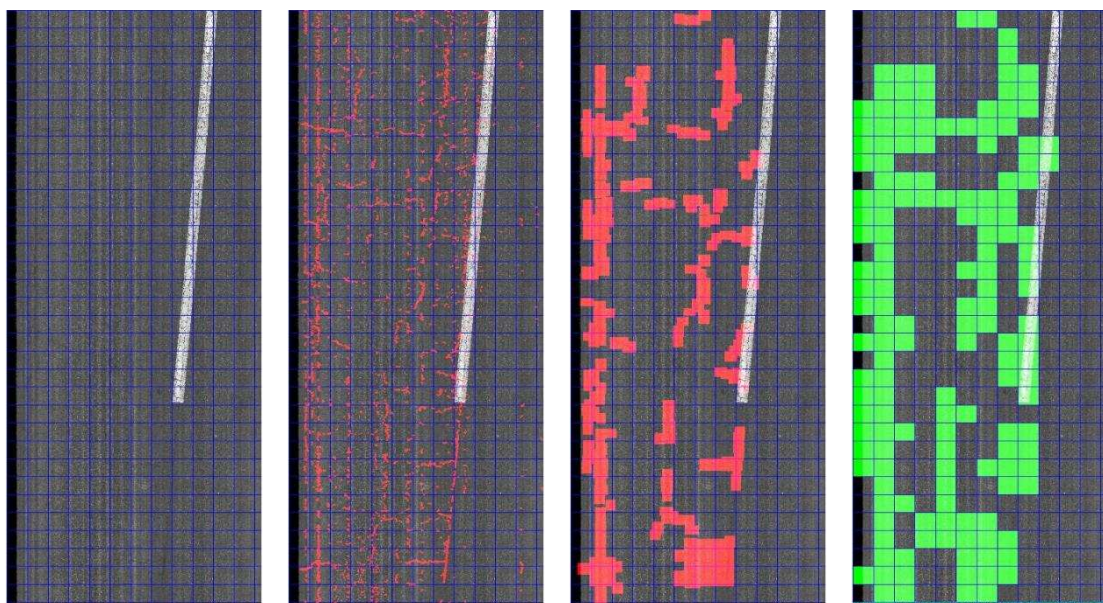
○ 영상기반 포장표면 균열분석 프로그램 개선 및 검증

- 자동 균열률 산정 알고리즘 모듈화



<영상기반 포장표면 균열분석 알고리즘 모듈>

- 자동균열 분석 알고리즘 적용 결과



(a) 원본영상

(b) 균열탐지

(c) 균열경계추출

(d) 균열률 산정

<샘플 도로 이미지의 분석 결과>

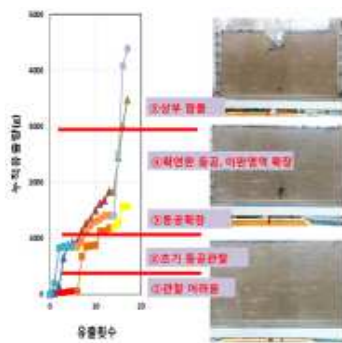
(다) CTE3

CTE3 2차년도 연구내용

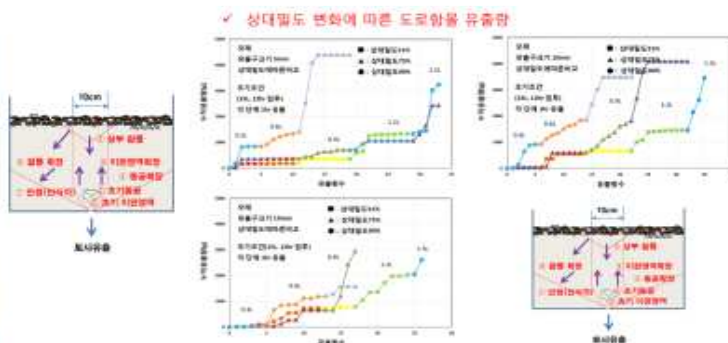
- 소형 모형토조실험을 통한 도로함몰 위험도 영향요소 잠정 도출
- 입자기반 해석을 통해 공동발생 심도, 크기에 따른 함몰 발생 위험 변화 측정
- 공동발생 지반에 대한 유한요소해석 모델 검증 및 DB구축
- 공동모사 테스트베드에 실대형 포장가속시험 적용 및 공동 확장과정 직접관찰

○ 도로함몰 위험도 요인 잠정 도출

- 모형토조실험을 통한 도로함몰 영향요소 도출 및 도로함몰 발생 확장 영향요소 평가
- 패턴별 도로함몰 모사 모형토조 실험



<모형토조실험 공동확장 매커니즘>



<상대밀도 변화에 따른 도로함몰 유출량 실험결과>

○ 침윤 유발 침식 모형 개발

- 도로함몰 분석 및 분류

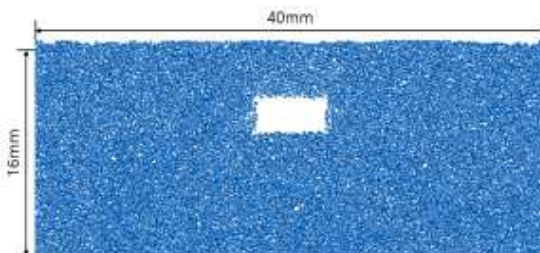


<연속침하에 의한 함몰 모식도>

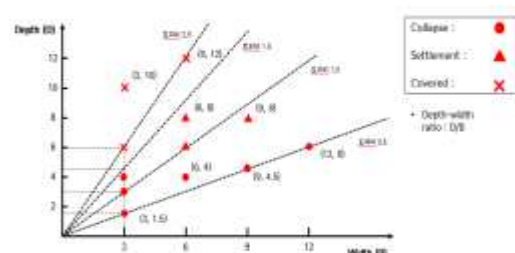


<불연속침하에 의한 함몰 모식도>

- 도로함몰 입자기반 수치해석 모델 구축 및 해석결과분석
 - 심도와 폭의 비(D/B)가 작을수록 함몰 발생 위험이 증가



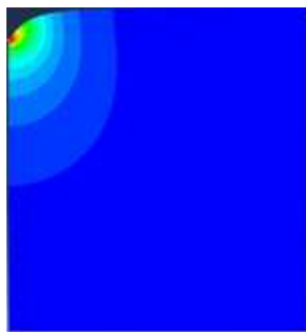
<불연속침하 수치해석 모델>



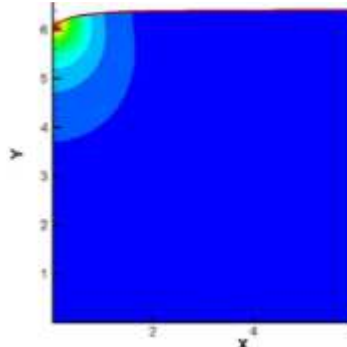
<불연속침하 수치해석 결과>

○ 공동형태, 공동깊이 및 하중조건에 따른 유한요소해석 및 DB구축

- 공동발생지반 유한요소모델 신뢰성 검증 및 유한요소해석 수행



(a) 유한요소해석 모델



(b) KICTPAVE

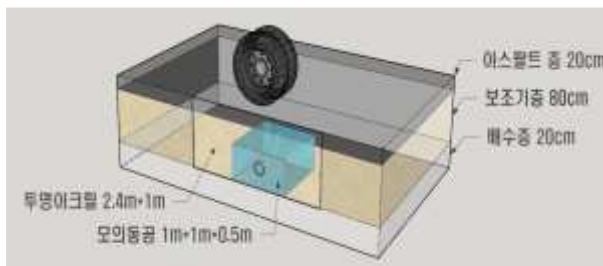


(c) KENLAYER

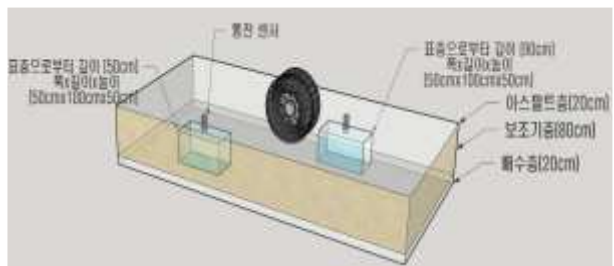
<공동발생 모델의 신뢰성 검증>

○ 실험형 포장가속시험을 위한 테스트베드 기본설계 및 실험

- 테스트베드 기본 설계
 - 1차 TB목적 : 도로함몰 발생을 육안으로 확인
 - 2차 TB목적 : 포장가속시험 하중횟수에 따른 공동확장시기 도출



<1차 테스트베드 3차원 설계도면>



<2차 테스트베드 3차원 설계도면>

- 1차 테스트베드 구축 및 포장가속시험기 운영결과



(a) 0회



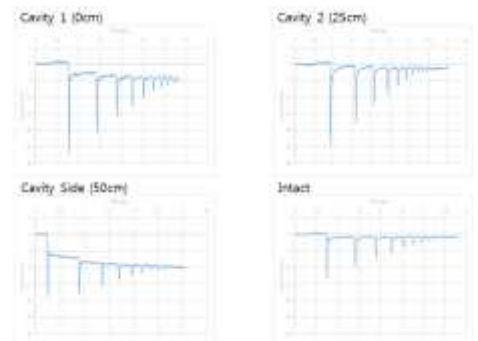
(b) 2000회



(c) 4000회



(d) 6000회



<공동, 건전지반 지지력 측정 비교>

<포장가속시험기 운영 횟수에 따른 포장층 하부 변형 및 파손과정과 분석결과>

(라) CTE4

CTE4 2차년도 연구내용

- 도로함몰 현장조사 자료수집 및 데이터 분석
- 현장조사자료를 통한 DB구축
- 도심지 도로함몰 복구 실무매뉴얼(안) 개발
- PMS와 도로함몰 DB의 연계방안 연구

○ 도로함몰 현장조사 자료수집 및 분석

- 도로공동 탐사 장비 최적 운용방안 도출
- 도로공동 탐사 현장자료 확보

<서울시 도로공동 탐사 절차 및 절차별 운용 장비>

구분	사용장비	용도
1차 조사	 (a) 차량형 GPR	공동의심구간 파악
2차 조사	 (b) 핸디형 GPR	천공위치(공동중심부) 파악
	 (c) 휴대용 시추기 및 시추공 영상촬영기	공동확인 및 공동두께 파악

○ 도로합몰 현장조사자료를 통한 도로합몰 DB 구축

[illegible][illegible]

<서울시 보유 공동정보 연구단 공유>

<인덕대학교 도로함몰 DB 구축>

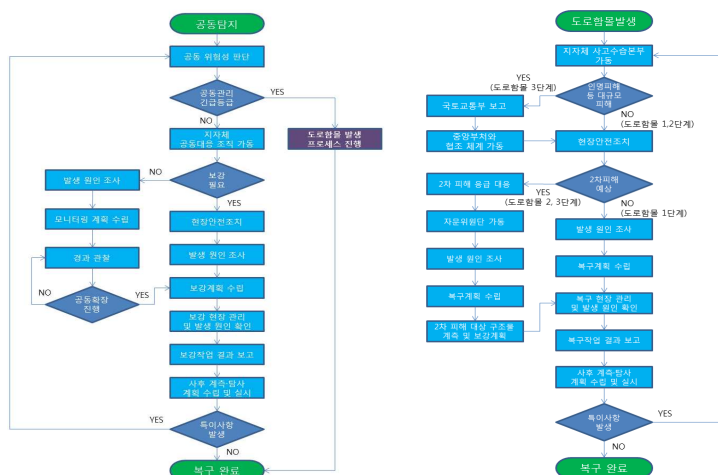
○ 도심지 도로함몰 복구 실무매뉴얼(안) 개발

- 서울시 공동관리등급(2016)을 기준으로 도로함몰 복구실무매뉴얼(안) 개발
- 도로함몰 사고 상황별 위험수준 정의

<도로함몰 사고 상황별 위험수준 정의>

위험도	판 단 기 준
1단계	◦도로함몰이 발생하였으나 발생규모가 경미하여 인명 및 차량(교통사고 등) 피해 없이 상황이 종료된 경우
2단계	◦도로함몰이 발생하여 인명 및 차량 사고는 없으나 극심한 교통정체, 2차(교통사고, 함몰범위 확대, 주변구조물 파손 등)피해 등이 예상되는 경우
3단계	◦도로함몰 발생으로 인해 주변구조물 파손, 인명 및 재산 등의 피해가 발생하고 2차 피해가 예상되는 경우 ◦보행자 추락, 교통사고, 주변구조물 파손, 또는 인프라 기능 마비 등

- 공동탐지 및 도로함몰 발생에 따른 보강/복구 흐름도 개발
- 도로함몰 위험도를 반영한 실무자용 보강/복구 체크리스트 개발



<공동탐지 및 도로함몰 발생에 따른 보강/복구 흐름도>

<보강/복구 체크리스트>

○ PMS와 도로함몰 DB의 연계방안 연구

- 서울시 PMS 및 도로함몰 운영관리 방법 조사
- 도로함몰 DB 구조 분석 및 도로함몰 관리 시스템의 최적화된 운영절차 제시



- ✓ Project Level 1 : 도로 통합 관리 시스템
 - 최대한 다양한 정보와 정량적인 수치를 반영한 도로 함몰 위험도 관리
- ✓ Project Level 2 : 도로함몰 DB와 PMS 연계 시스템
 - PMS와 도로함몰 위험도가 각기 다른 운영절차를 가지고 운영되나 하나의 프로그램 내에서 DB를 자유롭게 연계하여 사용가능
 - 포장 상태 및 조건을 도로함몰 위험도 등급에 반영 필수
 - 지하구조물 등 기타 정보 도로함몰 위험도 등급에 반영 권장
- ✓ Project Level 3 : 도로함몰 개별 관리 시스템
 - 도로함몰 단일 프로그램 내에서 도로함몰 관리
 - 포장 상태 및 조건을 도로함몰 위험도 등급에 반영 권장

<서울시 PMS 통합 뷰 프로그램 Data 입력 및 조회> <관리 수준에 따른 도로함몰 관리 시스템 운영방안>

(3) 3차년도 연구 수행 내용

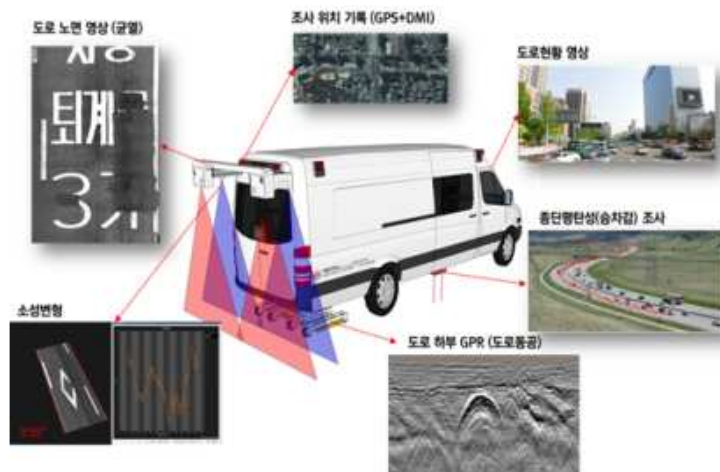
(가) CTE1

CTE1 3차년도 연구내용

- 도로함몰 복합탐지 시스템 시작품 개발 완료
- 이동식 도로지지력 평가 시스템 시작품 개발 완료
- 시작품을 활용한 기초시험 · 현장조사 수행 및 프로그램 개발을 위한 데이터 확보

○ 도로함몰 복합탐지 시스템 시작품 개발

- 시작품 개발 및 차량 등록

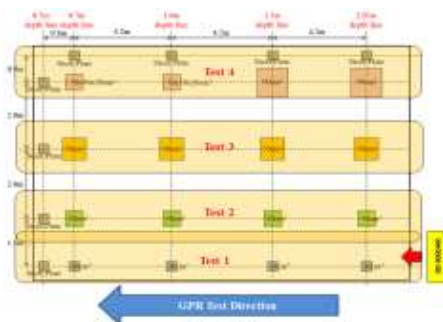


<도로함몰 복합탐지 시스템 시작품 복합 센서 체계>



<개발 완료된 도로함몰 복합탐지 시스템 전경>

- 테스트베드를 통한 성능검증



<시작품 시험절차>

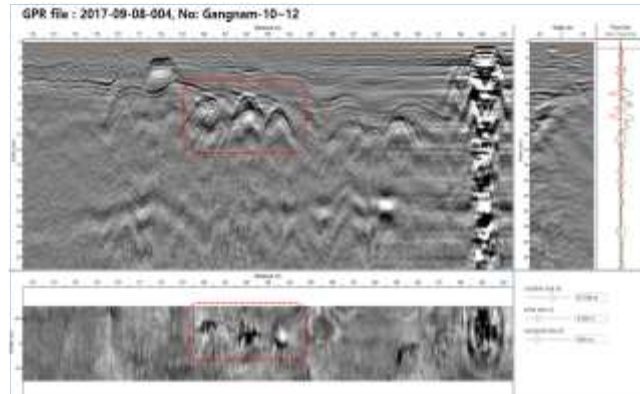


<테스트베드 현장실험 전경>

- 서울시 내 공동발생 현장 재조사를 통한 데이터 확보 (서울시 시도 13개 구간)



<현장조사 전경>



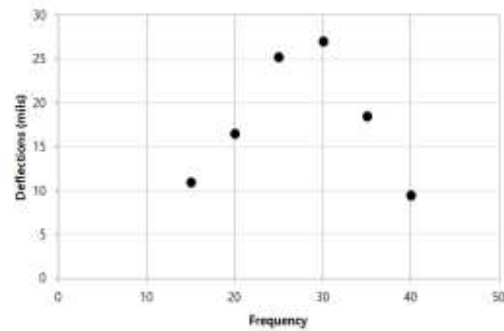
<복합탐지 시작품을 이용한 공동탐사 결과예시>

○ 이동식 도로지지력 평가 시스템(RDD) 시작품 개발

- RDD 주파수 변경 실험을 통한 도로처짐 민감도 분석



<RDD 민감도 실험전경>

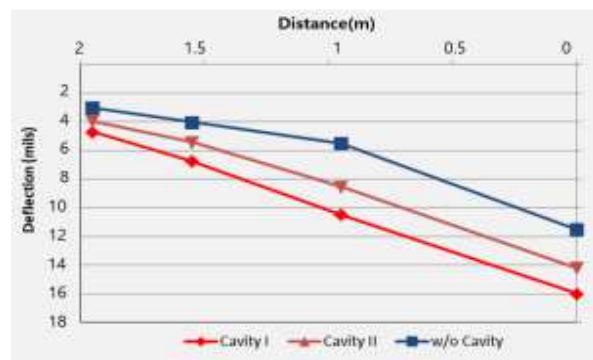


<주파수별 최대응답 비교>

- 공동발생도로, 건전도로 지지력 비교를 위한 RDD 현장실험결과 공동발생 위치에서 더 높은 처짐량 측정



<RDD 현장시험 전경>



<RDD 시험 결과>

<RDD적용 공동 추정크기>

공동	길이 (cm)	폭 (cm)	높이 (cm)
Cavity I	150	90	24
Cavity II	70	90	21

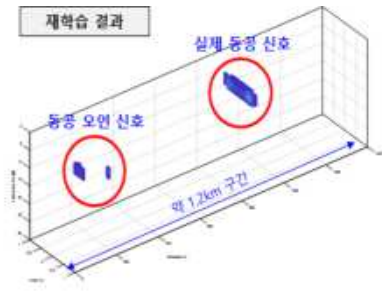
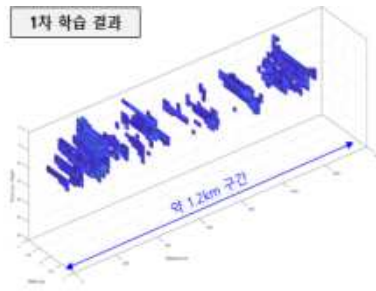
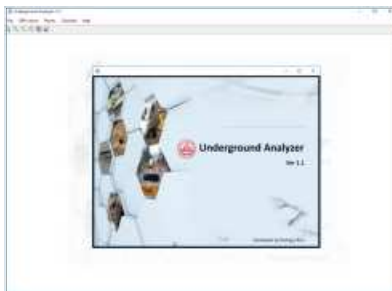
(나) CTE2

CTE2 3차년도 연구내용

- 공동자동탐지를 위한 인공지능(CNN) 기반 GPR 분석 소프트웨어 개발
- 기존 영상기반 균열탐지 프로그램의 한계점 인식 (조도차이, 해상도차이 등에 의한 오류)
- 인공지능(Faster-RCNN) 기반 균열 자동탐지 프로그램 개발
- RDD 신호처리 프로그램 개발 및 지지력 역산 알고리즘 개발
- 도로함몰 위험도 평가 프로그램 기본프레임 GUI 개발

○ 머신러닝 기반 공동 자동탐지용 GPR분석 소프트웨어 개발

- 서울시 GPR 현장조사를 통한 공동, 맨홀, 배관, 포장층 등 지하매설물의 GPR데이터 확보
- 인공지능 기반 자동공동탐사 프로그램 개발
 - 딥러닝 기반(CNN) 자동공동탐사 프로그램 개발
 - GPR 데이터 학습 및 프로그램 정확성 향상



<자동공동탐사 프로그램 초기화면>

<1차 학습과 2차 재학습의 결과비교>

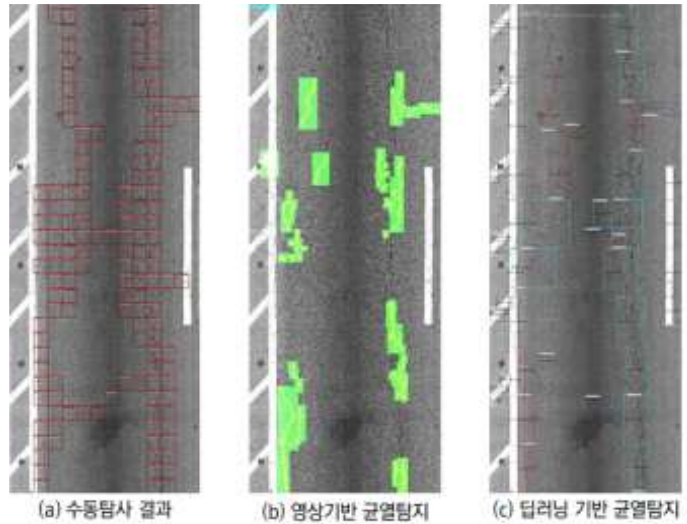
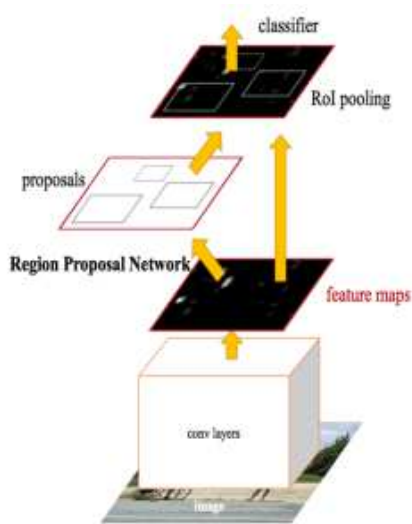
- 자동공동탐사 프로그램 성능 검증
 - 서울시 GPR현장조사 구간 데이터를 활용 블라인드 테스트 결과 정확도 78% 수준

<프로그램 성능검증 결과>

No.	탐색구간	연장 (m)	프로그램 자동탐사 소요시간(초)	공동탐지율 (탐지/실제)	추가 발견 공동 (개소)	총 탐색된 오인공동수 (개소)	100미터당 오인공동수 (개소)
1	송파구1	800	3,137	1/1	+1	15	1.875
2	송파구2	1,000	3,807	0/1		3	0.3
3	중랑구1	1,000	4,306	1/2		11	1.1
4	중랑구2	2,500	9,791	1/2		52	2.08
5	중랑구3	500	1,578	1/1	+1	9	1.8
6	중랑구4	300	879	0/1	+2	4	1.33
7	강남구5	500	2,685	0/1		9	1.8
8	강동구1	400	1,645	1/1		6	1.5
9	강동구2	1,200	4,743	1/2		5	0.42
10	강동구3	800	3,358	1/1		0	0
11	마포구2	700	3,213	1/2	+1	10	1.43
12	중구2	700	2,871	1/1		18	2.57
13	중구3	600	2,566	1/1		14	2.33
공동탐지 정확률 합계			10/14		+5	100 미터당 오인 공동 평균개수	1.43
			(10+5)/(14+5)x100 =78.9%				

○ 머신러닝 기반 도로포장 균열 자동탐지 소프트웨어 개발

- 기존 영상기반 균열탐지 방법의 한계점 파악
- 서울시 시작품 활용 현장조사를 통한 도로균열 데이터 확보
- 딥러닝(Faster-RCNN)을 이용한 자동균열탐사 알고리즘 개발
 - 균열 및 오브젝트의 자동탐사 성능이 좋으며, 균열 분류가 쉽게 가능한 장점이 있음
 - 딥러닝 알고리즘 적용결과 영상기반 프로그램에 비해 정확성, 분석시간 대폭 향상

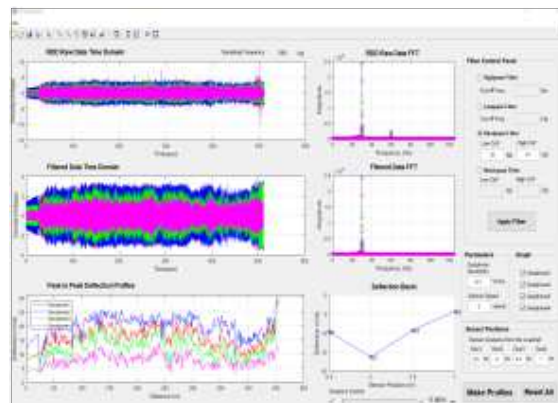
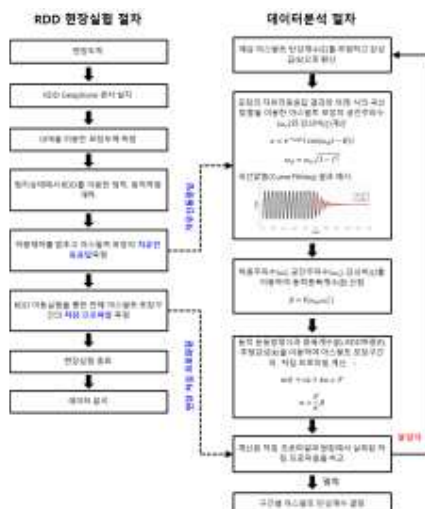


<Faster-RCNN 기법개요>

<균열탐사 프로그램별 검출결과비교>

○ RDD 데이터 분석 알고리즘 개발

- RDD를 활용한 도로포장 지지력 역산 방법 개념 제시
- 동적 데이터를 활용한 지지력 역산 알고리즘 개발



RDD 지지력 역산방법 흐름도(안)

<RDD 데이터 분석 프로그램>

○ 도로함몰 위험도 평가 프로그램 기본프레임 GUI 개발 착수

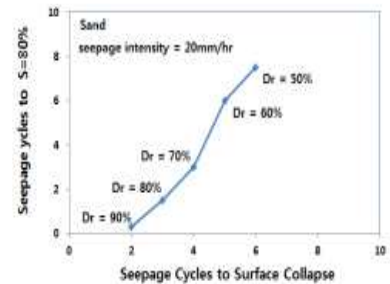
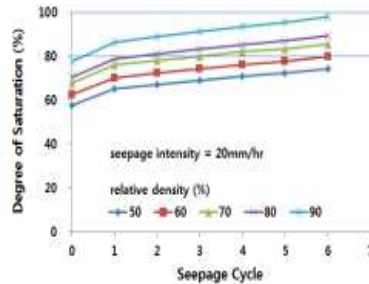
(다) CTE3

CTE3 3차년도 연구내용

- 모형토조실험 결과에 따른 위험도 요인 정량화
- 모형토조실험과 입자기반 모델을 현상학적으로 일치시키고 해석결과를 통해 도로함몰 위험도 기준 제시
- 실대형 규모 유한요소해석 결과를 기준으로 조건별 포장잔존수명 예측식 개발
- 실대형 포장가속시험을 통한 기존 공동위험도 등급의 검증 및 신규 도로함몰 위험도 등급 산정 데이터 도출

○ 모형토조실험에 따른 도로함몰 위험도 요인 정량화

- 패턴별 도로함몰 모사 모형토조 실험결과를 기반으로 각 영향요소 정량화
- 모형토조실험의 함몰 위험도 평가시험 기반 도로함몰 위험도 평가등급 도출
 - 공동의 크기, 공동의 발생 위치에 따른 함몰 위험도 평가시험 수행
 - 공동의 크기에 따른 변위측정 및 등급 도출



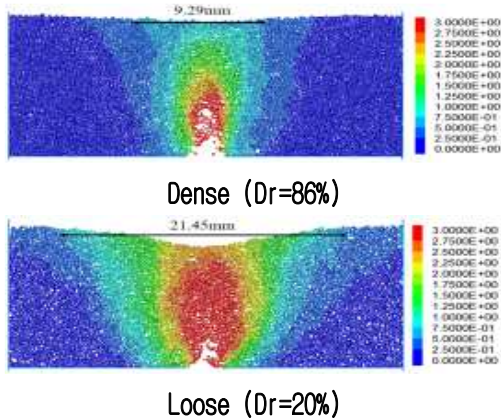
<함몰 위험도 평가시험 장치>

<상대밀도에 따른 포화도>

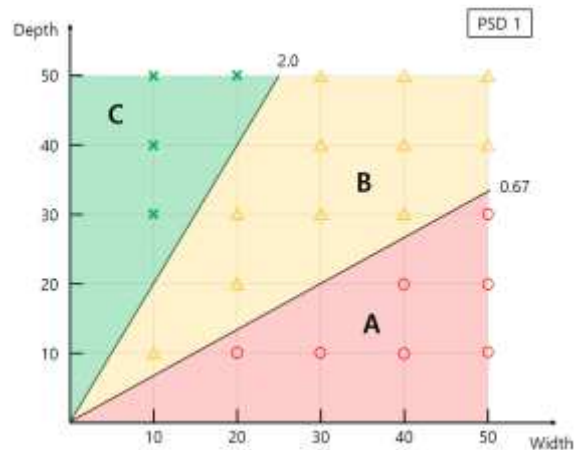
<표면함몰과 포화도의 상관관계>

○ 입자기반 해석에 따른 도로함몰 파괴기준 수립

- 모형토조실험 결과와 현상학적으로 일치하는 수치해석 모델 평가
- 입자기반 해석결과 기반 파괴기준 도출
 - 불연속침하 평가 결과, 공동의 폭과 심도에 따라 거동은 크게 세 가지로 분류됨
 - 심도/폭을 기준으로 재료 입도특성이 고려된 위험도 기준 제시



<상대밀도별 침하량과 침하 영향범위>



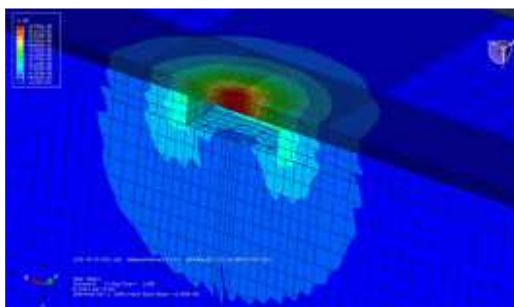
<입자기반 해석에 따른 함몰 위험도 등급>

○ 유한요소해석 기반 도로파손에 미치는 위험도 등급 제시

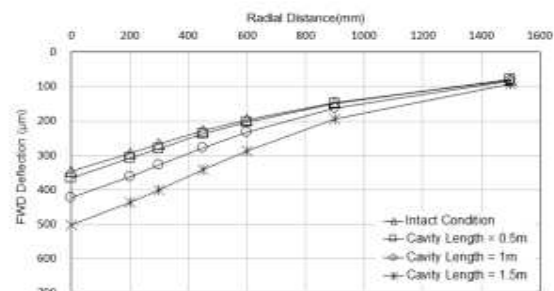
- 공동상부 아스팔트포장 파괴예측모형을 위한 유한요소해석
 - 서울시 현장조사를 통한 도로 공동구간 입력변수 결정 : 총 300Case의 해석수행

<유한요소해석을 위한 아스팔트 포장 구조체의 입력변수>

포장층	두께 (mm)	탄성계수 (MPa)	포와송비
아스팔트층	200,250,300	1000~6000	0.35
보조기층	400	275	0.4
노상층	5000	50	0.4
공동깊이 (mm)		공동길이 (m)	
0.2~1.0m		0.5~2.5m	



<공동이 있는 포장의 유한요소해석 모델>



<공동크기에 따른 아스팔트 포장표면 처짐>

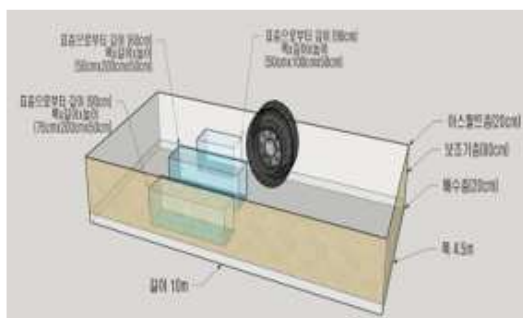
- 유한요소해석을 통한 잔존수명 예측식 제시
 - 공동구간 함몰 직전까지의 허용교통량 산정식 (N_f : 함몰 직전까지의 허용교통량, ϵ_t : 아스팔트 하부 인장변형률, E : 아스팔트 층의 탄성계수 (GPa))

$$N_f = 0.00432 \times \beta_{f1} \times C \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{3.9492} \left(\frac{1}{E} \right)^{1.281}$$

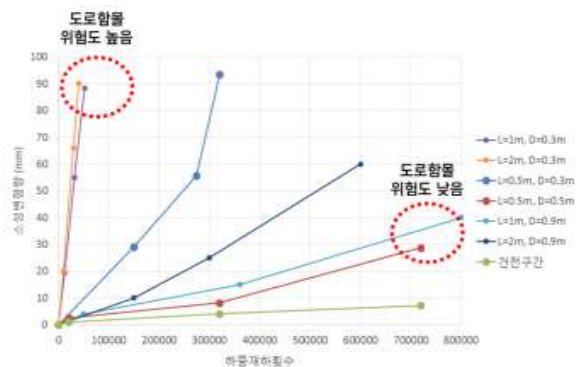
도로공동 확장을 고려한 인장변형률

○ 도로함몰 발생 매커니즘 규명을 위한 포장가속시험

- 기존 공동등급 A,B,C 기준에 따라 모의공동 테스트베드 구축 및 포장가속시험 수행
- 포장가속시험 운영 횟수(하중재하 횟수)에 따른 공동확장 매커니즘 파악



<테스트베드 단면도>



<포장가속시험을 통한 공동크기별 소성변형 발생속도 측정결과>

(라) CTE4

CTE4 3차년도 연구내용

- 도로함몰 현장조사 및 DB구축, 연구팀 자료제공
- 도로공동 GPR데이터 분석을 통한 패턴 분류 및 정량화
- 도심지/도심외곽지 도로함몰 복구 실무매뉴얼(안) 작성
- 도로함몰 DB기반 도로함몰 관리시스템 알고리즘 연구

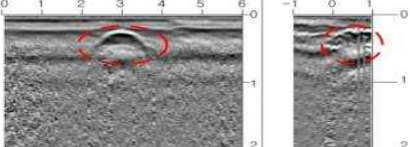
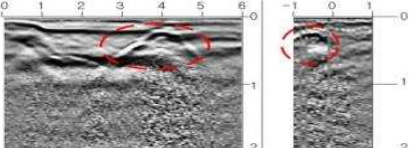
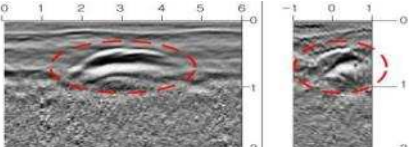
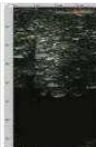
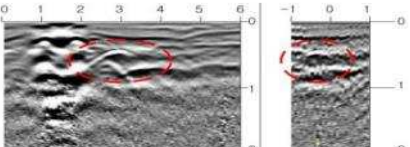
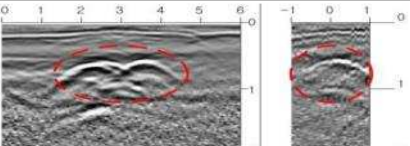
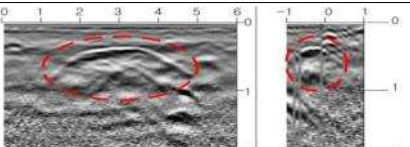
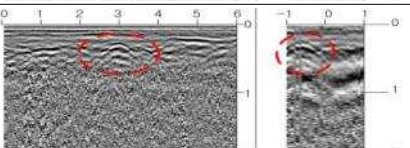
○ 도로함몰 현장조사 및 DB구축, 자료제공

- 서울시 도로공동 DB구축 및 공동정보 자료제공

– 도로함몰 현장자료(공동 27개소, 비공동 16개소, 공동규모 현황 목록 572개소) 연구진 제공

○ 도로함몰(공동) 및 유사신호 GPR데이터 신호패턴 정량화

<공동형태에 따른 GPR 신호패턴 분류>

유형	천공영상	GPR 탐사단면 (종단-횡단)	분석결과
대칭			공동반응신호가 대칭 Curve 형태로 아스콘 경계하부에 뚜렷한 극성을 보임
비대칭			불규칙한 Curve 형태로 극성변화가 하부까지 연장성을 보임
타원			타원형태의 파형이 관찰되며, 횡단도 유사형태가 나타남
맨홀 인접 발달			맨홀 분포에 따른 탐사반응과 인접하여, 대칭형 Curve 관찰
복합 분포			공동이 양방향으로 복합분포를 보임
모래층			비대칭 및 평행한 Curve형태, 경계하부 매질이 주변과 유사
자갈층 폐기물			종방향 신호는 대칭의 Curve형태로 뚜렷하나, 횡방향 신호 미약

○ 도심지 및 도심외곽지 도로함몰 복구대응매뉴얼(안)

- 지자체 및 전문가 자문을 통한 도심지 도로함몰 복구대응 매뉴얼(안) 위험수준, 보강·복구 업무흐름도 및 체크리스트 재정의

<도로함몰 위험수준 정의>

위험수준		정의
보강단계	A-1	- 도로하부에 공동은 발견되었으나 현재 상태에서는 도로함몰로 이어질 위험성이 없는 상황으로 정기적인 모니터링을 통해 위험성을 재평가해야 하는 단계 - 공동관리등급 : 관찰등급
	A-2	- 발견된 공동이 도로함몰로 이어질 수 있으므로 보강이 필요한 단계. 등급에 따라 신속한 조치계획 수립과 보강이 필요하거나, 우기철 이전까지 공동 보강이 필요 - 공동관리등급 : 일반등급, 우선등급
복구단계	B-1	- 발견된 공동이 짧은 시간 안에 도로함몰로 이어질 가능성이 높은 상황을 포함하여, 이미 소규모 도로함몰이 발생한 상황으로, 도로함몰이 직접적인 원인으로 작용하여 인명·재산 등의 피해가 발생하지 않았으며, 교통사고, 함몰범위 확대, 주변구조물 파손 등의 2차 피해가 우려되지 않는 단계 - 공동관리등급 : 긴급등급
	B-2	도로함몰로 인한 주변구조물 파손, 인명·재산 피해가 발생하였거나, 2차(교통사고, 함몰범위 확대, 주변구조물 파손 등) 피해로 이어질 수 있는 단계

- 도로하부 의심지역 탐사를 통해 발견된 공동 보강업무 흐름도 및 도심지/도심외곽지 도로함몰 발생상황에 적용 가능한 복구 업무흐름도 보완 제시
- 도로함몰 위험수준을 반영한 보강/복구 체크리스트 보완
- 도심지/도심외곽지 복구 실무매뉴얼(안) 제시

행동	말씀기반	종교 활동 일시
	주말 일요일	
	종교 활동기 취소	

일련번호	핵심사건	행위시간	결과 및 특이사항
중증 감염병에 노출 (당유아) : 1			
중증 노출			현상 확인 없음
- 용이 호접은 본조의 여동			
- 35기 불확유아 여동			
- 출산이 및 외출 등 인근 밀접유아 여동			
[필요시] 중증감염병진 상여 조유			
- 자출원한 경우			
경미 노출 (당유아) : 2			
기 수검된 중증 환자 접촉 기록 및 발수 검출 검출 (35기 환자 등)			
유동 기록의 정정률 저조정률 측정			
중증 진정성 여부 판단			
- [필요시] 자출원한 경우			
중증 조유 (당유아) : 3			
당유아 조유 조유 조유 (1회 중증 발수시 면제)			
중증발수에 대한 조유정률 10% 면제			
[중증 조유] 자출원(수검)률 중증 조유 조유조유 면제			



<공동 보강/복구 체크리스트 예시>

〈도심외곽지 도로함몰 복구 실무매뉴얼(안)〉

○ 도로합몰 위험도 DB를 이용한 관리시스템 알고리즘 연구

- 위치지정체계, DB, 위험도 지수를 활용한 도로함몰 관리시스템 운영절차를 도출
- 도로함몰 관리 프로그램 시작품 개발 착수

(4) 4차년도 연구 수행 내용

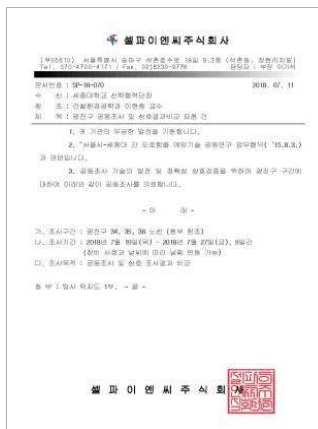
(가) CTE1

CTE1 4차년도 연구내용

- 현장실험 및 실험형 실험을 통한 시작품 하드웨어 개선 및 성능평가
- 복합 탐지 시스템 시작품 운용 매뉴얼 작성
- 자동탐지 기술의 신뢰성 평가 지침(안) 제시

○ 도로함몰 복합탐지 시작품의 성능검증을 위한 현장조사

- 도로함몰 복합탐지 시작품 활용 서울시도, 구도, 지방도 공동조사 및 성능평가
- 시작품 활용 공동탐사 수행 및 천공확인을 실시하여 시작품 성능검증



<전문탐사업체 공동조사 요청공문>

<서울시 공동조사 현장 전경>

<광진구 관리도로 조사구간 현황(2018.04.02~04.03)>

도로연번	도로연장 (km)	탐사연장 (km)
14	1.6	3.1
15	1.7	3.3
16	0.8	1.5
17	0.7	1.3
18	0.9	2.6
19	0.4	0.7
20	2.7	2.6
21	1.1	4.1
22	2.1	11.0
23	1.5	8.0
24	0.6	1.1
25	0.3	1.0
26	0.7	2.5
총계	15.1	42.8

<양천구 관리도로 조사구간 현황(2018.06.12~06.15)>



도로연번	도로연장 (km)	탐사연장 (km)
1	0.6	1.8
2	3.0	6.2
3	1.1	2.1
4	1.8	3.6
5	1.3	2.1
6	1.1	3.3
총계	8.9	19.1

<광진구 시도 조사구간 현황(2018.07.24~07.25)>



도로연번	도로연장 (km)	탐사연장 (km)
34	0.9	5.4
36	1.8	10.8
총계	2.7	16.2



<국도 공동조사 현장 전경>



<분석공동에 대한 천공확인 실험>

<국도 공동조사 현황(2018.07.26~09.10)>

도로 연번	지역	사무소	국도 호선	구간		도로연장 (km)	탐사연장 (km)
				시점	종점		
총 22 개 구간						107.1	214.2
함양	함양군	함양	26	거연정휴게소	중산교+0.60	0.4	0.8
함양2	함양군			교량하부	송계삼거리	0.5	1.0
4-1	경산시	포항	4	금락고가교 A1	교대사거리	5.4	10.8
4-2	경주시			천포교A1	건천3교 A2	1.3	2.6
4-3				와읍교+0.73	전촌삼거리	5.7	11.4
7-1	울산시		7	울산/경북경계	구어교+0.188	4.7	9.4
7-2	경주시			강동IC	남구효자동	5.6	11.2
7-3	포항시			성곡IC	칠포교차로	5.0	10.0
7-4				청하교차로	승라진입도	3.4	6.8
7-5	영덕군			20호선분기+0.67	덕곡교차로	6.9	13.8
7-6	울진군			삼율IC교	월송교	8.7	17.4
20-1	경주시		20	2신원교	의곡교+1.01	4.6	9.2
20-2		건천ic입구		경주터널	6.2	12.4	
28-1		28	강동IC	대련IC/JC(남측)	8.3	16.6	
31-1	포항시	31	관성1교 A1	나산천교 A2	6.5	13.0	
31-2			일반국도31분기뒤	금곡교	13.8	27.6	
31-3			죽장초등학교	죽장교A1	0.8	1.6	
31-4			거성교+1.249	도평삼거리+1.19	2.6	5.2	
35-1		35	복안천교	경주시구간	8.6	17.2	
35-2			북영천ic입구+0.74	선천교+0.72	4.1	8.2	
36-1	밀양시	36	36	수산교차로	건잠교+6.30	3.0	6.0
36-2	울진군			광천교+4.49	광천교+5.47	1.0	2.0

○ RDD를 활용한 서울시 도로 지지력 평가기술 현장적용

- RDD와 FWD를 활용하여 서울수도 도로포장 지지력 측정 및 비교

<서울수도 RDD 조사구간 현황(2018.05.01~05.07)>

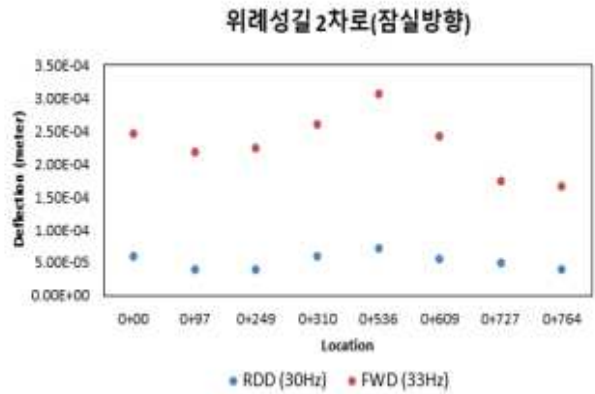
도로구간	조사내용	조사연장 (km)
위례성길1차로	지지력측정	0.9
위례성길2차로	지지력측정	0.9
강남역→인재개발원	지지력측정	1.9
인재개발원→강남역	지지력측정	0.4
대치우성아파트사거리→학여울사거리	지지력측정	0.4

- FWD 적용하중 : 42kN (약 9,442 lbs)
- RDD 적용하중 : Hold Down Static Force = 5,200 lbs, Peak-to-peak Dynamic Force = 8,400 lbs (Max.9,400lbs, Min.1,000lbs)
- 총 3번의 정지시험, 2번의 이동시험 수행

- 정지시험 처짐량 측정 결과 비교



<강남역 구간 RDD, FWD비교>

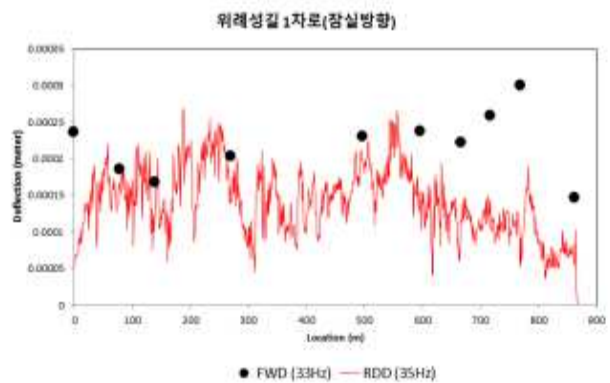


<위례성길 2차로 구간 RDD, FWD비교>

- 이동시험 처짐량 측정결과 비교



<위례성길 2차로 구간 RDD 이동식 조사결과>



<강남역 구간 RDD 이동식 조사결과>

- 실험결과 RDD에서 측정되는 처짐량이 FWD보다 대체로 작으나 유사한 트렌드를 보임
- 이는 동적하중을 이용하는 RDD와 정적하중을 이용하는 FWD의 차이로 아스팔트 포장의 동적특성에 의해 증폭 또는 감소되는 것으로 판단됨



<RDD 조사현장 전경>



<FWD 실험 전경>

○ 도로함물 복합탐지 시스템 시작품 개선 결과

- 우측방향의 건물, 상점 간판, 지상 시설물 등은 정확한 공동 위치 판단에 가장 중요한 요소이기 때문에 신규 우측방 현황카메라를 설치하여 공동탐사 효율성을 극대화

<우측방 현황카메라 사양>

구 분		규 격	비 고
우측방 현황촬영 장치	해상도	- 5M 픽셀 이상	
	촬영간격	- 주행거리와 연동된 1m 등간격 영상 획득	
	영상 획득 방식	- DMI 이동거리에 연동되는 방식	
	자동밝기조절	- 영상취득과 관련된 환경을 고려한 영상데이터 누락 없이 밝기 자동 조절	



<우측방 현황카메라 설치전경>



<우측방 현황 실제 촬영예시>

○ 복합 탐지 시스템 시작품 운용 매뉴얼 작성

- 3~4차년도 시작품 현장운용 경험을 통한 사용자 매뉴얼 작성

<시작품 운용매뉴얼 구성>

시작품명	매뉴얼 구성	
도로함물 복합탐지 시스템	- 도로함물 복합탐지 시스템 시작품 개요 - 센서 사양 및 관리방법 - 공동탐사시 운용방법 및 주의사항 - PMS조사시 운용방법 및 주의사항	
이동식 도로지지 력 평가 장치 (RDD)	- 이동식 도로지지력 평가장치 개요 - 장비, 센서 사양 - RDD 하중부 작동 매뉴얼 - RDD 계측부 운용매뉴얼 - RDD 차량 관리 매뉴얼	

○ 자동탐지 기술 신뢰성 평가 지침(안) [별첨3 참조]

- 패턴인식, 인공지능 등 통계적 분류 모델의 성능평가에 주로 활용되는 혼동행렬(Confusion Matrix)로 자동탐지 알고리즘의 성능평가를 수행

		자동탐지 프로그램 결과	
		Positive (공동으로 탐지)	Negative (비공동으로 탐지)
실제 공동	Positive (실제공동)	True Positive (TP)	False Negative (FN)
	Negative (비공동)	False Positive (FP)	True Negative (TN)

<자동공동탐지 신뢰성 평가를 위한 혼동행렬>

- 혼동행렬의 각각의 항목이 의미하는 바는 다음과 같음
 - True Positive(TP) : 실제공동을 공동으로 탐지하였을 경우의 개수
 - True Negative(TN) : 공동이 아닌 구간을 공동이 아닌 것으로 탐지하였을 경우의 개수
 - False Positive(FP) : 공동이 아닌 구간을 공동으로 탐지하였을 경우의 개수
 - False Negative(FN) : 실제공동을 공동이 아닌 것으로 탐지하였을 경우 개수
- 통계적 분류 분야에서 신뢰도 항목 정의
 - 정밀도(Precision) = $\frac{TP}{TP+FP}$: 탐지된 실제공동개수/프로그램이 탐지한 전체 개수-프로그램이 탐지한 전체 개수 중 실제 공동의 비율
 - 재현율(Recall) = $\frac{TP}{TP+FN}$: 탐지된 실제공동개수/실제공동 개수-실제 도로하부에 존재하는 공동 중 프로그램으로 탐지에 성공한 공동의 개수
 - 정확도(Accuracy) = $\frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}$: 정확히 분류된 공동, 비공동 전체개수/전체 분석 개수
- 정확도(Accuracy) 식의 사용이 부적절한 이유
 - GPR데이터는 수십~수백 km의 데이터이며 본 과제에서 개발한 인공지능 프로그램은 자동 분석 시 방대한 량의 TN(탐지된 비공동 개수)을 필터링 하고 이를 표출하지 않음
 - 즉, TN의 개수가 너무 많아 'TN >>> TP+FP+FN' 이 성립하고 정확도를 계산 시 100%에 항상 가깝게 되어 프로그램의 성능평가 척도로 사용하기에 부적절함
 - 이에 따라, 본 과제에서는 자동분석 프로그램의 기술 신뢰성 평가를 위해 정밀도(Precision)와 재현율(Recall)을 활용하여 나타내었음

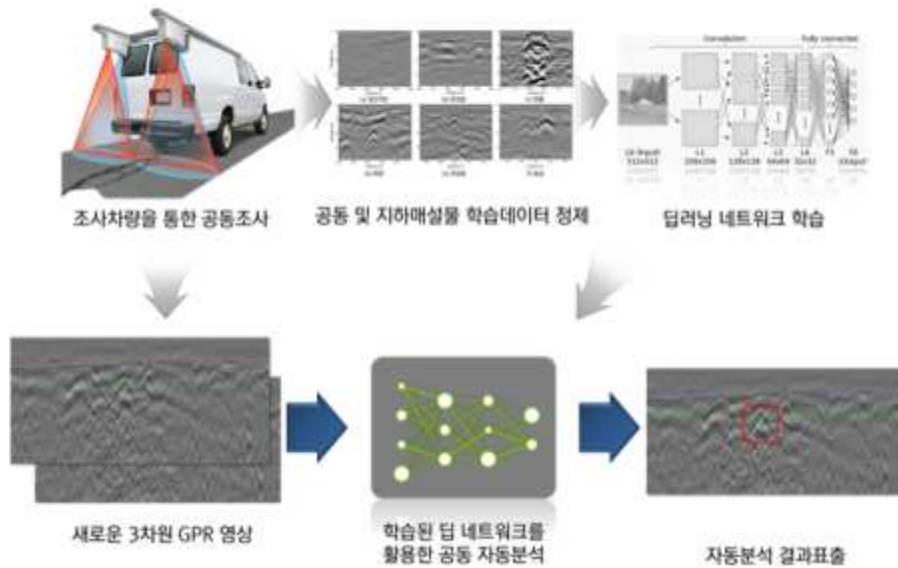
(나) CTE2

CTE2 4차년도 연구내용

- 지하공동 자동진단 소프트웨어 패키징
- 현장실험 및 실험실 실험을 통한 소프트웨어의 검증 및 성능평가
- 도로함몰 위험도 평가 프로그램 개발

○ 자동분석 프로그램 개선 [별첨4 참조]

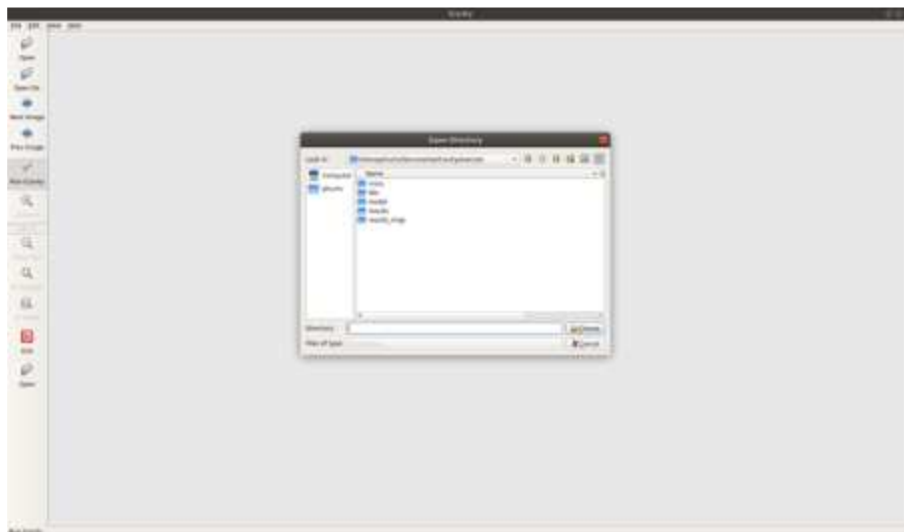
- 프로그래밍 언어 및 코어 인공지능 알고리즘 변경 개발 : CNN→ Faster-RCNN
- 공동, 균열 현장조사를 통한 추가 데이터 학습



<자동분석 프로그램 개발흐름도>

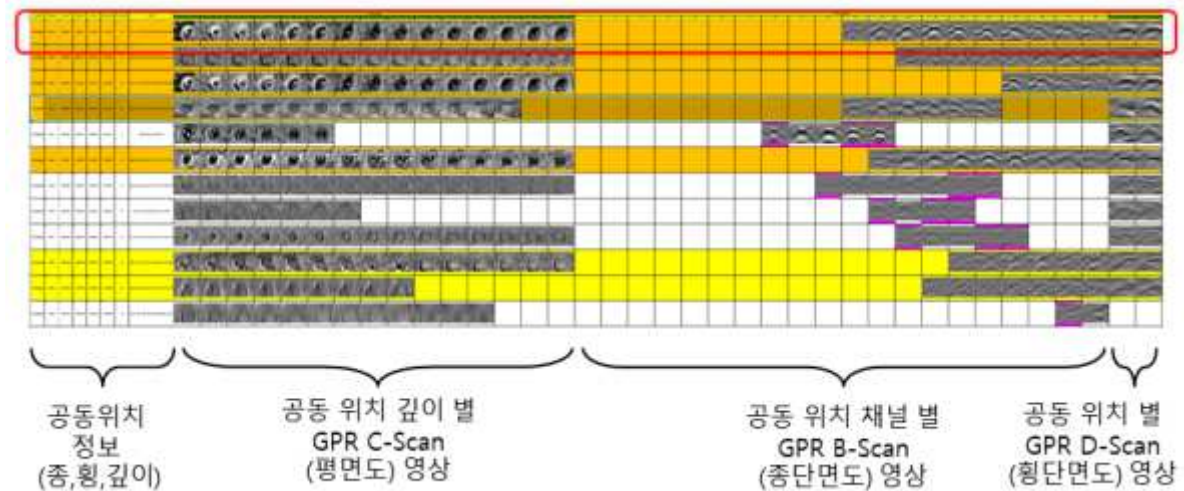
○ 지하공동 자동진단 소프트웨어 패키징

- 사용자 이용편의를 위한 프로그램 GUI개발



<자동분석 프로그램 GUI>

- 자동으로 분석된 공동탐사 위치표출을 위한 Spread Sheet 형태의 결과출력 기능 개발
- 분석된 공동의 위치를 기반으로 공동조사서를 자동으로 출력하는 기능 개발
- 인공지능 기반 공동 자동분석 프로그램 소프트웨어 등록 (프로그램명 : iCavity, 저작권 번호 : C-2018-022211)
- 인공지능 기반 균열 자동분석 프로그램 소프트웨어 등록 (프로그램명 : iCrack, 저작권 번호 : C-2018-022210)



<Excel Spread Sheet 형태의 자동 공동분석 결과 예시>

○ 자동진단 소프트웨어 운용 매뉴얼 작성

- 3~4차년도 개발 프로그램 사용방법에 대한 매뉴얼 작성

<시작품 운용매뉴얼 구성>

프로그램명	매뉴얼 구성	
자동 공동분석프로그램 (iCavity)	- GUI 설명 - 데이터 학습 절차 - 자동 공동 분석 절차	
자동 균열분석프로그램 (iCrack)	- GUI 설명 - 데이터 학습 절차 - 자동 균열 분석 절차	

○ 현장실험 및 실험을 통한 소프트웨어 검증 및 성능평가 [별첨2 참조]

- 서울시 광진구 구도로 공동조사 및 자동분석 소프트웨어 결과 (18.04.02.~04.03)
 - 광진구 관리도로에 대한 현장조사 결과를 자동분석 소프트웨어로 분석
 - 본 현장조사에서는 서울시 품질시험소가 조사했던 구간을 본 과제의 시작품으로 재탐사 하여 소프트웨어 성능을 비교검토 하였음
 - 자동 탐지된 분석공동개수(TP+FP) : 87개, 탐지된 실제공동개수(TP) : 13개. 정밀도 = 15%
 - 비공동 GPR데이터를 인공지능 학습에 사용

<광진구 관리도로(구도) 자동 분석프로그램 성능검증>

도로 연번	서울시 공동발견개수	공동번호	공동높이* (cm)	바닥깊이 (cm)	자동분석 프로그램 공동발견여부
14	1	GJ-04	24	52	O
17	3	GJ-05	31	58	O
		GJ-06	20	45	O
		GJ-07	20	55	O
		GJ-08	21	38	O
20	3	GJ-16	27	88	O
		GJ-17	20	40	O
		GJ-01	20	50	X
22	3	GJ-02	30	47	O
		GJ-03	20	45	O
		GJ-09	25	47	O
24	5	GJ-11	23	41	O
		GJ-12	22	42	X
		GJ-13	20	58	O
		GJ-14	28	49	O
총계	15	재현율 (13/15*100)			86.7%
		최소발견 공동높이			20cm
		총 분석시간 (분석량 : 42.8km)			약 14.3시간

※ 서울시 위험도 기준 상 공동등급 판정은 공동길이가 아닌 공동높이로 판단됨



<서울시 자체분석 공동조사 보고서(GJ-5)>



<자동분석 공동조사 보고서(GJ-5)>

- 서울시 양천구 구도로 공동조사 및 자동분석 소프트웨어 결과 (18.06.12.~06.15)
 - 양천구 관리도로에 대한 현장조사 결과를 자동분석 소프트웨어로 분석
 - 본 현장조사에서는 서울시 품질시험소가 조사했던 구간을 본 과제의 시작점으로 재탐사 하여 소프트웨어 성능을 비교검토 하였음
 - 분석 결과의 공동/비공동 데이터를 학습데이터로 활용
 - 자동 탐지된 분석공동개수(TP+FP) : 29개, 탐지된 실제공동개수(TP) : 10개. 정밀도 = 34%
 - 비공동 GPR데이터를 인공지능 학습에 사용

<양천구 관리도로(구도) 자동 분석프로그램 정확성 검증>

도로 연번	서울시 공동발견개수	공동번호	공동높이 (cm)	바닥깊이 (cm)	자동분석 프로그램 공동발견여부
2	3	YC-2-1	21	36	O
		YC-2-2	28	52	O
		YC-2-4	6	16	O
3	3	YC-3-2	12	30	O
		YC-3-4	23	43	O
		YC-3-7	14	43	O
4	3	YC-4-1	116	156	O
		YC-4-2	26	44	O
		YC-4-3	14	24	O
5	1	YC-5-1	도로침하로 긴급복구		O
총계	10	재현율 (10/10*100)			100%
		최소발견 공동높이			6cm
		총 분석시간 (분석량 : 38.2km)			약 12.7시간



<서울시 자체분석 공동조사 보고서(YC-4-1)>



<자동분석 공동조사 보고서(YC-4-1)>

- 서울시 광진구 내 시도 공동조사 및 자동분석 소프트웨어 결과 (18.07.24.~07.25)
 - 광진구 내 시도에 대한 현장조사 결과를 자동분석 소프트웨어로 분석
 - 본 현장조사에서는 전문탐사업체와 동일구간을 함께 조사하여 자동분석 소프트웨어의 성능을 상호검토 하였음
 - 자동 탐지된 분석공동개수(TP+FP) : 22개, 탐지된 실제공동개수(TP) : 11개, 정밀도 = 50%
 - 비공동 GPR데이터를 인공지능 학습에 사용

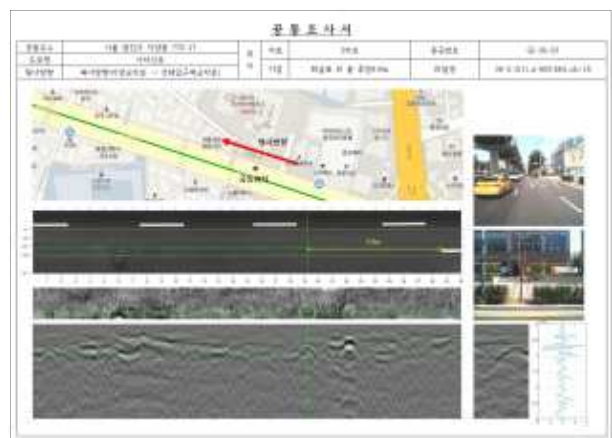
<서울시 광진구 내 시도 자동 분석프로그램 정확성 검증>

도로 연번	전문업체 공동발견개수	공동번호	토피 (cm)	자동분석 프로그램 공동발견여부
34	5	GJ-34-1	43	O
		GJ-34-2	26	O
		GJ-34-3	22	O
		GJ-34-4	26	O
		GJ-34-5	33	O
36	8	GJ-36-1	32	O
		GJ-36-2	18	O
		GJ-36-3	33	O
		GJ-36-4	37	X
		GJ-36-5	21	O
		GJ-36-6	45	O
		GJ-36-7	39	X
		GJ-36-8	35	O
총계	13	재현율 (11/13*100)		84%
		공동크기		복구 전 대외비※
		총 분석시간 (분석량 : 32.4km)		약 10.8시간

※ 금년도(18') 서울시 시도 공동조사용역 상세결과는 복구 전 대외비임



<자동분석 공동조사 보고서(GJ-34-4)>

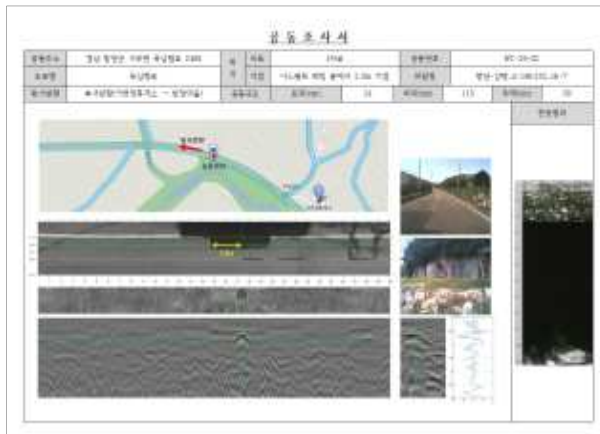


<자동분석 공동조사 보고서(GJ-36-1)>

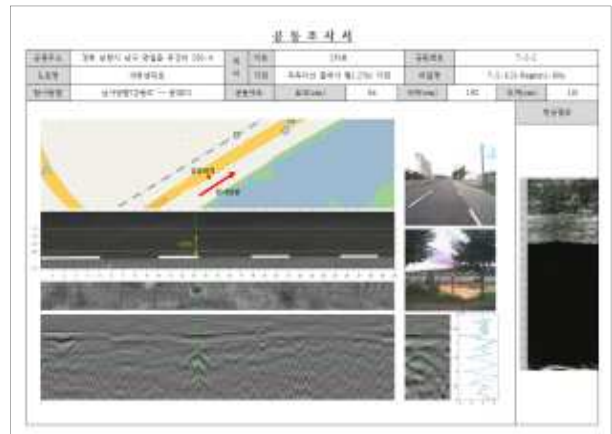
- 국도 공동조사 및 자동분석 소프트웨어 결과 (18.07.26.~09.10)
 - 포항시, 함양군 인근 국도에 대한 현장조사 결과를 자동분석 소프트웨어로 분석
 - 본 현장조사에서는 시작품을 활용하여 자체조사 및 분석을 수행하였음
 - 자동 공동분석 프로그램 활용 결과 총 12개의 공동을 확인하였으며, 국도의 경우 시가지 도로에 비해 공동의 개수가 현저히 적은 것을 확인
 - 자동 탐지된 분석공동개수(TP+FP) : 14개, 탐지된 실제공동개수(TP) : 12개. 정밀도 = 86%

<포항, 함양인근 국도 공동조사 자동 분석프로그램 정확성 검증>

도로 연번	공동번호	공동높이 (cm)	바닥깊이 (cm)	주변환경	예상발생원인
함양	HY-26-01	81	96	하천 근방	- 절토구간 배수시설 기능상실, 지하수에 의한 침식
	HY-26-02	89	113	하천 근방	- 절토구간 배수시설 기능상실, 지하수에 의한 침식
4-1	4-1-1	21	38	시가지	- 맨홀(관로) 근처, 상하수도 누수
	4-1-2	44	64	시가지	- 맨홀(관로) 근처, 상하수도 누수
	4-1-3	26	50	시가지	- 맨홀(관로) 근처, 상하수도 누수
4-3	4-3-1	44	82	시가지	- 맨홀(관로) 근처, 상하수도 누수
20-1	20-1-2	6	40	논밭	- 우수에 의한 침식 또는 지반교란
	20-1-3	6	59	논밭, 배수로	- 지반침하로 물고임 현상, 우수에 의한 침식
31-1	31-1-1	8	36	해안도로, 배수로	- 우수에 의한 침식 또는 지반교란
35-2	35-2-1	15	53	주거지역	- 상하수도 누수 또는 지반교란
7-2	7-2-2	118	192	시가지	- 성토구간 다짐불량 또는 지반교란
36-1	36-1-2	14	40	하천 근방	- 절토구간 배수시설 기능상실, 지하수에 의한 침식
최소 발견공동높이		6cm		총 분석시간 (분석량 : 428.4km)	약 6일



<자동분석 공동조사 보고서(HY-26-02)>



<자동분석 공동조사 보고서(7-2-2)>

○ 도로함몰 위험도 평가 프로그램 개발

- GIS 정보 활용을 위한 프로그램 개발 및 고도화
 - 도로함몰 위험도 평가 프로그램의 분석 결과들을 QGIS 3.0과 연계하여 위치정보 및 등급을 GIS MAP에 적용하여 표현
 - 조사 위치별 GIS MAP조회를 위해서 GUI 모듈 설계 및 개발
 - 공동 및 포트홀 등의 위치정보표시 방법에 대한 좌표, 차선, 기준점 등 고려



<서울시 여의도 구간 정밀도로지도 예시>

- 도로함몰 위험도 분석프로그램 GIS 관련 GUI 개발



< 도로함몰 위험도 GIS 분석 프로그램 GUI 패널 >

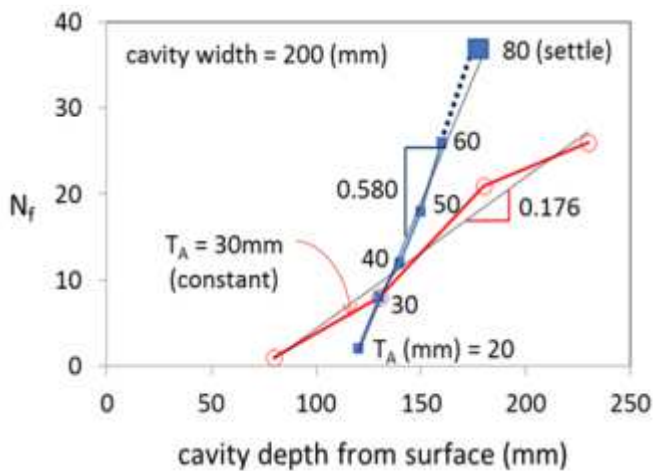
(다) CTE3

CTE3 4차년도 연구내용

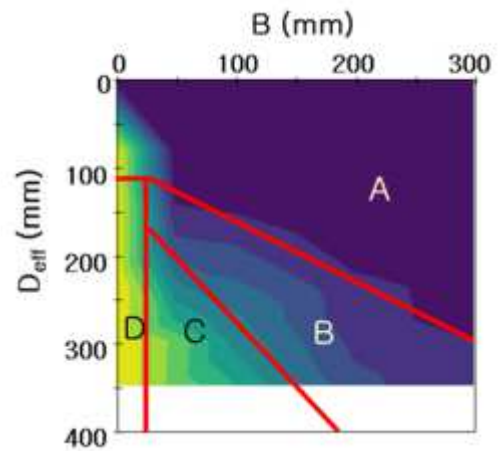
- 실내시험 및 시뮬레이션 결과를 활용한 도로함몰 위험도 요인 평가 및 기준(안1) 제시
- 유한요소해석 결과를 활용한 도로함몰 위험도 등급 기준(안2) 제시
- 실대형 테스트베드를 통한 도로함몰 확장 메커니즘 분석

○ 도로함몰 위험도 요인 평가 및 위험도 등급 기준(안1) 제시

- 모형토조 시험결과로 분석된 도로함몰 위험도 평가 기준 도출
- 공동유효심도와 공동폭으로 나타난 모형토조 실험 기반 도로함몰 위험도 등급도표 작성

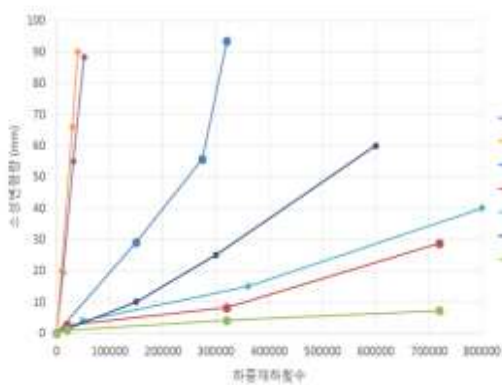


<포장두께가 함몰에 미치는 영향>

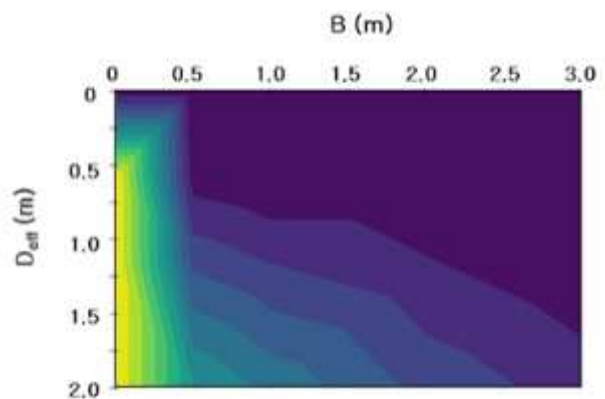


<모형토조실험 기반 위험도 등급 및 그래프>

- 실대형 포장가속시험 결과를 활용한 도로함몰 위험도 등급도표 확장
 - 실규모 공동모사 테스트베드에 대한 포장가속시험결과 도출 (우측 그래프-노란색 : 도로함몰 위험도 낮음, 남색 : 도로함몰 위험도 높음)



<포장가속시험 결과>

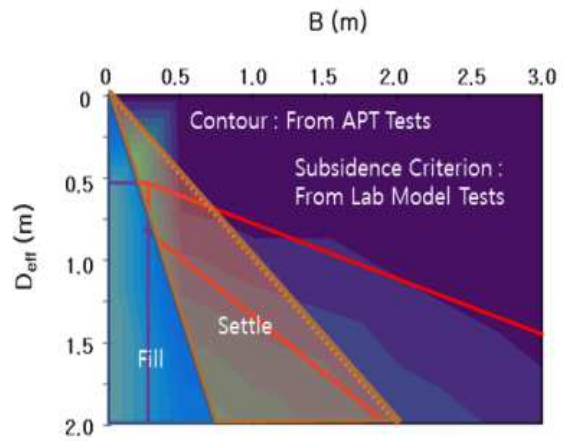
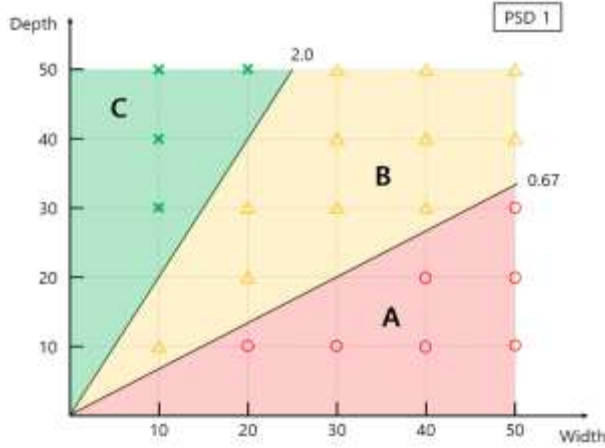


<포장가속시험 결과에 따른 위험도 그래프>

- 모형토조실험과 실대형 포장가속시험결과로 도출한 도로함몰 위험도 그래프는 동일한 트렌드를 보였으며 수치의 비교와 공학적 판단을 통해 공동의 폭과 심도에 대한 확장을 다음과 같이 정의하였음
 - 공동 심도와 폭에 대한 확장 식 : $D_{eff.field} = 5 \times D_{eff.lab}$, $B_{field} = 10 \times B_{lab}$

여기서, $D_{eff,field}$ 는 현장규모 공동유효심도, B_{field} 는 현장규모 공동폭
 $D_{eff,lab}$ 은 모형토조실험 공동유효심도, B_{lab} 는 모형토조실험 공동폭

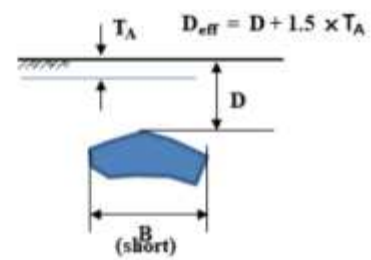
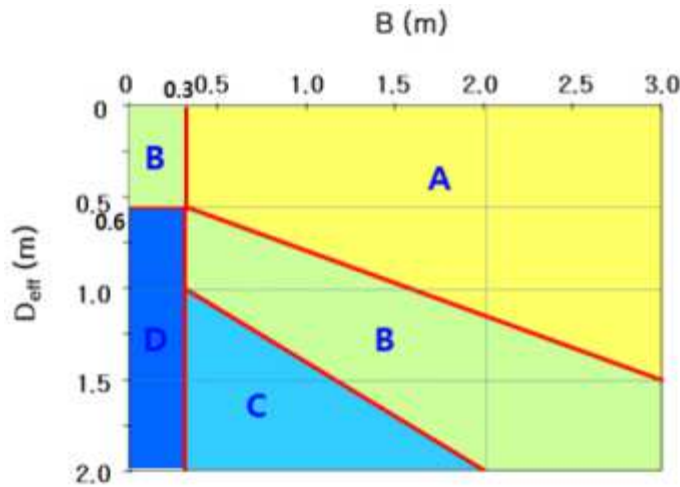
- 입자기반 해석의 역학적 함몰특성 반영한 도로함몰 위험도 기준의 수정보완



<공동 심도 폭에 따른 함몰 위험도 도표>

<입자기반 해석결과를 도로함몰 위험도 기준에 비교적용>

- 실내시험-실대형 포장가속시험-입자기반해석을 통한 도로함몰 위험도 등급(안1) 제시



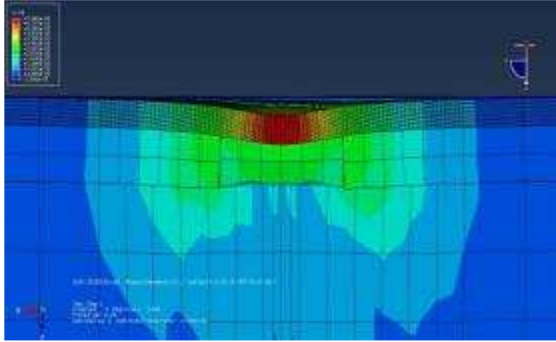
<도로함몰 위험도 등급 기준(안)>

<도로함몰 위험도 등급 기준에 따른 조치내용>

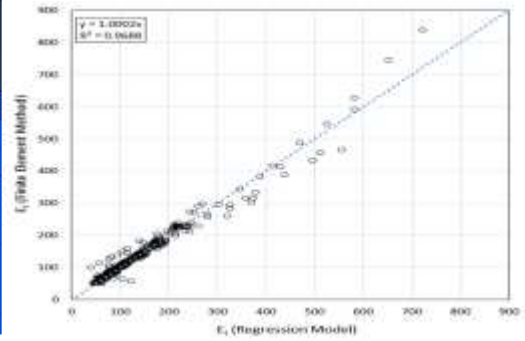
위험도 등급	관리기준	조치내용	비고
A	긴급복구	즉시복구 (4시간 이내)	- 발견 즉시 교통 차단
B	우선복구	신속한 조치계획 수립 및 복구	- 공동 발생원인이 상수도 파손인 경우 긴급복구(A) 등급으로 고려
C	일반복구	우기철 이전까지 복구	- 공동 발생원인 조사 시행
D	관찰대상	지속관찰	- 다음 탐사년도 재탐사 후 재판정

○ 유한요소해석을 통한 위험도 등급 기준(안2) 제시 [별첨7 참조]

- 본 절에서는 공동구간, 건전구간에 대한 유한요소해석 결과DB와 회귀모델 비교 분석을 통해 도로함몰 위험도 계수(Risk Factor, RF)의 개념을 제시
- 다양한 공동크기 및 포장체 물성 적용한 총 375개의 유한요소모델 해석 수행



<유한요소해석 모델>



<유한요소해석 결과와 회귀모델 비교>

- 위험계수는 공동부 및 건전부의 포장이 파괴에 이르는 허용하중재하 횟수의 비율을 1에서 뺀 값으로 다음과 같이 정의됨

$$RF = 1 - \frac{N_f(cavity)}{N_f(intact)}$$

- $N_f(cavity)$ 와 $N_f(intact)$ 는 각각 공동부와 건전부의 포장이 파괴에 이르는 허용하중재하 횟수를 의미하며 이는 아래 식으로 제한할 수 있음

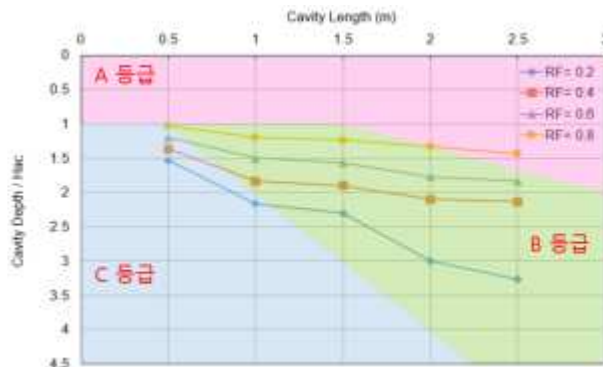
$$N_f = 0.00432 \times \beta_{f_1} \times C \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{3.9492} \left(\frac{1}{E} \right)^{1.281}$$

- 여기서, N_f = 허용 하중재하횟수, ε_t = AC층 바닥의 인장변형률, E = 아스팔트 포장의 탄성계수, β_{f_1} , C = 모형상수를 의미

- 공동부와 건전부의 아스팔트 포장에 대한 탄성계수는 동일하다고 가정할 경우 공동부와 건전부의 AC층 바닥의 인장변형률에 근거하여 다음과 같이 위험계수 산정함

$$RF = 1 - \left(\frac{\varepsilon_t(intact)}{\varepsilon_t(cavity)} \right)^{3.9492}$$

- 도로함몰 위험도 계수(RF)를 일본 공동관리등급과 비교한 결과 아래와 같음



<도로함몰 위험도 등급(안2) 검증>

<도로함몰 위험계수에 따른 등급>

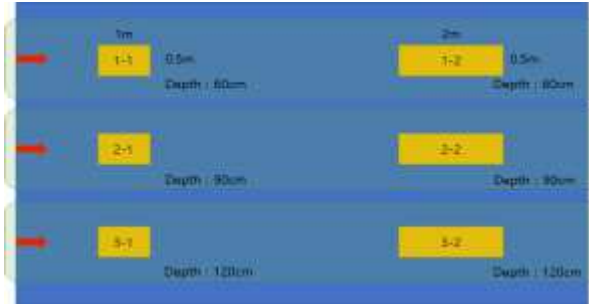
RF 범위	공동관리등급
$RF \geq 0.75$	A
$0.5 \leq RF < 0.75$	B
$0.25 \leq RF < 0.5$	C
$RF < 0.25$	D

○ 실험형 테스트베드를 통한 도로함몰 확장 메커니즘 분석

- 도로함몰 위험도 등급에 따른 모의공동 매설 테스트베드 구축



<테스트베드 구축>



<연천 테스트베드 단면도>

- RDD(Rolling Dynamic Deflectometer) 장비를 이용한 공동상부 반복하중재하
- 정적하중 4.5ton, 동적하중 4ton, 20Hz 동하중으로 실험하였음



<RDD 장비 전경>

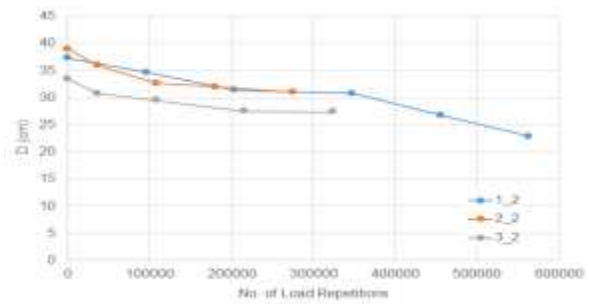


<공동상부 하중 재하 모습>

- RDD 반복 하중 재하 횟수에 따른 공동의 깊이 변화 파악
- GPR(Ground Penetrating Radar) 장비를 이용한 공동 확장 메커니즘 파악



<GPR 조사 전경>



<하중재하횟수에 따른 공동 위치 변화>

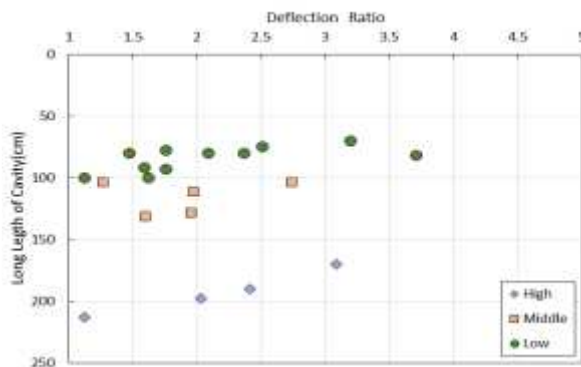
(라) CTE4

CTE4 4차년도 연구내용

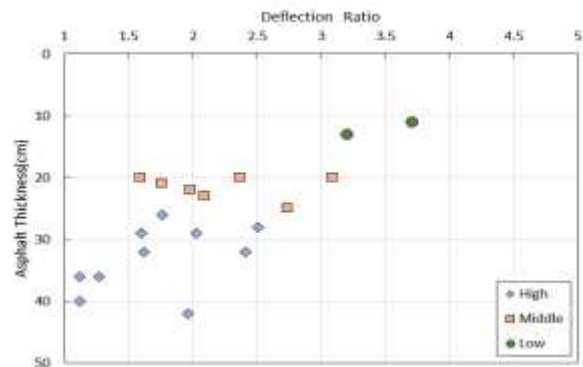
- 도로함몰 위험도 평가 기준 검증
- 도시규모를 고려한 도로함몰 복구대응 실무매뉴얼(안) 제시
- 도로함몰 현장조사 자료 수집 및 DB 구축, PMS적용 방안 제시

○ 도로함몰 위험도 평가 기준 검증 [별첨8 참조]

- LFWD 현장조사결과를 통한 위험도 계수 검증
 - 공동발생 아스팔트 포장에 LFWD 시험 후 처짐비를 계산 : 공동의 폭, 아스팔트 두께가 처짐비와 상관관계를 보임



<처짐비와 공동 긴 폭의 관계>



<처짐비와 아스팔트 두께와의 관계>

○ 도로함몰 위험도 등급(안2) 검증

- LFWD로 역산한 포장의 탄성계수와 공동심도를 활용하여 위험도 등급 산정

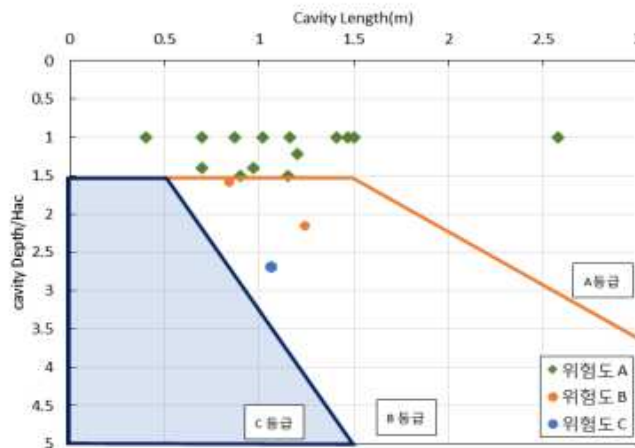
<도로함몰 위험도 계수에 따른 분류결과($T_A=300\text{mm}$ 이상)>

공동구간	RF	RF 등급	서울	일본
TB Site #1	0.99	A	우선	A
TB Site #3	0.82	A	우선	A
TB Site #4	0.98	A	우선	A
TB Site #5	0.97	A	우선	A
중곡동(1)	0.98	A	일반	A
중곡동(2)	0.99	A	일반	A
중곡동(3)	0.98	A	우선	A
중곡동(4)	0.99	A	우선	A
중곡동(5)	0.99	A	우선	A
중곡동(6)	0.99	A	우선	A
천호동(1)	0.99	A	우선	A
천호동(2)	0.99	A	우선	A
신월동	0.98	A	우선	A
한강로	0.99	A	우선	A

<도로함몰 위험도 계수에 따른 분류결과($T_A=300\text{mm}$ 이하)>

공동구간	RF	RF 등급	서울	일본
TB Site #2	0.52	B	일반	B
TB Site #6	0.38	C	일반	B
신정동	0.98	A	일반	C
신월동	0.87	A	일반	B
대치동	0.74	B	일반	B
문정동	0.84	A	일반	B
문정동2	0.85	A	일반	B

- 위험도 계수(RF)를 통하여 21개소의 공동에 대한 위험도 계수 적용결과 서울시 공동관리등급 보다 일본 기준과 더 유사한 결과를 보임



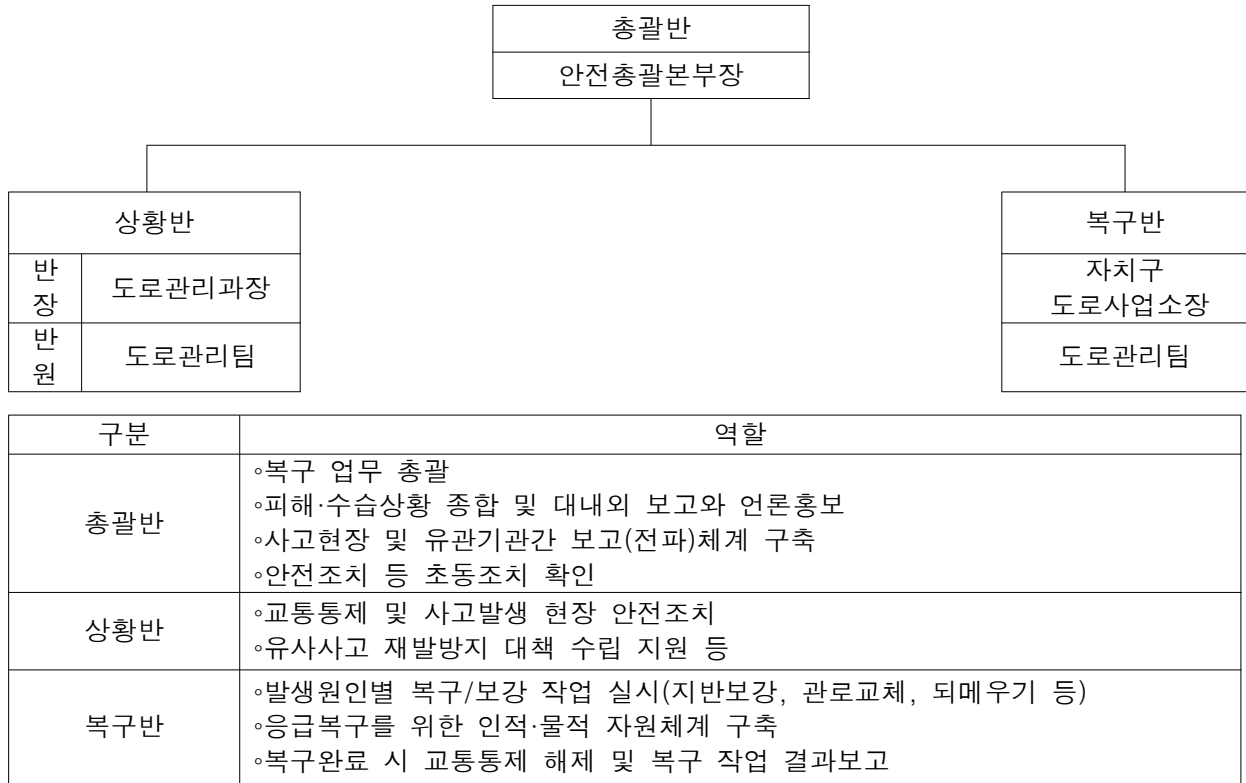
<도로함몰 위험도 계수와 일본의 공동관리등급 기준 비교>

- 도시규모를 고려한 도로함몰 복구대응 실무매뉴얼(안) [별첨11 참조]
 - 도시규모, 도로위치 특성을 고려한 통합 도로함몰 복구대응 매뉴얼(안) 제시
 - 지자체 및 전문가 자문의견을 반영한 도로함몰 복구대응 매뉴얼(안)의 위험수준, 보강·복구 업무흐름도 및 체크리스트 제시

<도로함몰 위험수준 정의>

위험수준	도시구분	정의
보강단계	중·소규모 도시	- 중소규모 도시에서 발생한 도로함몰 이어질 수 있으므로 신속한 현장 안전조치 후 보강(관찰, 일반, 우선 등급)이 필요한 단계
	대규모 도시	- 대규모 도시에서 발생한 공동이 도로함몰로 이어질 수 있으므로 신속한 현장 안전조치 후 보강(관찰, 일반, 우선 등급)이 필요한 단계
복구단계	중·소규모 도시	- 중·소규모 도시에서 발생한 도로함몰(긴급등급 포함)이 인명·재산 피해로 이어질 수 있는 단계
	대규모 도시	- 대규모 도시에서 발생한 도로함몰(긴급등급 포함)이 인명·재산 피해로 이어질 수 있는 단계

- 도시규모, 도로위치 특성, 사고규모를 고려한 도로함몰 복구대응 조직 구성(안) 제시



<대규모 도시 도로함몰 사고 복구대응조직>

- 도시규모, 도로 위치 특성을 고려한 도로함몰 복구대응 실무매뉴얼(안) 제시



<도시규모를 고려한 도로함몰 복구대응 실무매뉴얼(안)>

○ 도로함몰 DB의 적용 PMS 제시 [별첨12 참조]

- 도로함몰 DB를 활용한 포장관리 시스템 개발
 - DB에 포함된 필수 정보는 관리번호, 조사일, 조사위치, 상세위치, 공동규모, 발생원인, 원인정보, 지반, 포장, 교통량, 위험도, 복구정보, 관리기관으로 구성

[illegible]

<도로함몰 관리 프로그램 DB>

- PMS 및 외부 DB의 연계를 위한 위치정보체계 매칭

▲ 입출 Data Table(보양)

노선번호	STN
401	6730
401	6730
401	6740
401	6750
401	6760
401	6770
401	6780
401	6790
401	6800
401	6810
401	6730
401	6730
401	6740
401	6750
401	6760
401	6770
401	6780
401	6790
401	6800
401	6800
401	6810
401	6820
401	6830
401	6840

▲ 위치참조 Data Table(PMS)

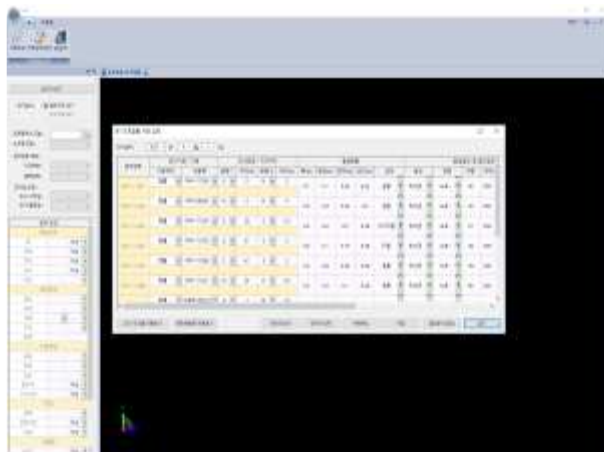
구분	이름	노선번호	이름	구분
401	6730	47801	401	6730
401	6730	67402	401	6730
401	6740	67602	401	6740
401	6750	67801	401	6750
401	6760	67702	401	6760
401	6770	67801	401	6770
401	6780	67902	401	6780
401	6790	68001	401	6790
401	6800	68102	401	6800
401	6810	68201	401	6810
401	6730	67301	401	6730
401	6730	67401	401	6730
401	6740	67601	401	6740
401	6750	67701	401	6750
401	6760	67802	401	6760
401	6770	67901	401	6770
401	6780	68002	401	6780
401	6800	68101	401	6800
401	6810	68202	401	6810
401	6820	68301	401	6820
401	6830	68401	401	6830

입출 Data의 노선코드는 PMS에서 사용하는 5-선코드의 줄임말로 구성

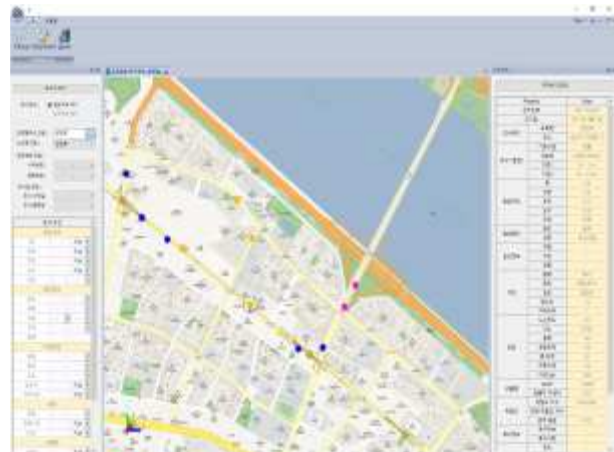
예전 노선표 기명에서 종방향 PMS에서 사용하는 Station 구분 간에도 차이를 공유의 위치를 표시

<함몰 DB와 PMS DB 매칭>

- 도로함몰관리 프로토타입 프로그램 개발



<도로환경관리 프로그램 공동 및 관리항목 정보조회>



〈도로함몰관리 프로그램 공동 등급에 따른 표시와 상세정보 GS〉

(5) 5차년도 연구 수행 내용

(가) CTE1

CTE1 5차년도 연구내용	
- 시작품 현장 적용성 평가 및 성능검증 - 시작품 성능 고도화를 위한 개선	

○ 시작품 및 자동분석 프로그램의 현장 적용성 평가 및 성능검증 [별첨2 참조]

- 서울시 주최 공동탐사 현장테스트 구간에 대한 참여 및 시작품 성능 검증
 - 서울시 동남로 구간 1차 현장테스트 결과

<서울시 동남로 구간 현장테스트 결과>

구분	현장테스트 참여업체(5개사)	세종대학교 현장테스트
시험일시	2019.3.5.(화) 주간	2019.3.5.(화) 야간
장소	동남로 (광평교 사거리 ~ 올림픽훼밀리타운 사거리)	
분석결과	총 9개소 (모든 업체 합산 개수) (A:2개, B:2개, C:1개, D:2개, E:1개)	1개소 (심도 0.45m 이상 → 분석범위 밖)
천공결과	공동 0개	공동 0개

- 서울시 양천로 구간 2차 현장테스트 결과

<서울시 양천로 구간 현장테스트 결과>

구분	현장테스트 참여업체(5개사)	세종대학교 현장테스트
시험일시	2019.3.7.(목) 주간	2019.3.7.(목) 야간
장소	양천로 (강서구청 별과입구 교차로 ~ 강서구 염창동 265-25)	
분석결과	총 20개소 (모든 업체 합산 개수) (A:4개, B:5개, C:3개, D:5개, E:3개)	5개소
천공결과	공동 7개	공동 4개(심도 0.45m 이내 공동3개)

- 서울시 공항대로 구간 3차 현장테스트 결과

<서울시 양천로 구간 현장테스트 결과>

구분	현장테스트 참여업체(5개사)	세종대학교 현장테스트
시험일시	2019.4.15.(월) 주간	2019.4.15.(월) 야간
장소	공항대로 (발산역 교차로 ~ 공항대로입구 교차로)	
분석결과	총 12개소 (모든 업체 합산 개수) (A:1개, B:4개, C:2개, D:5개)	4개소
천공결과	공동 2개	공동 2개

- 업체와 동일조건 비교 시, 시작품의 정확도 및 탐지능력은 2순위권으로 파악됨
- 기존 업체의 경우 분석속도가 5~10km/일, 최소 4인 이상의 전문 분석원이 상이 필요
- 시작품과 자동 프로그램 사용 시 15km/hr의 분석속도를 보이며, 분석원은 1인으로 충분



<19년도 서울시 현장테스트 전경>



<시작품 내 현장데이터 분석 전경>

○ 시작품 성능 고도화를 위한 개선

- 지면 비접촉식 3D GPR 구축
 - 구축 목적 : 포장두께를 측정 할 수 있는 새로운 센싱시스템의 개발
 - 기존 시작품의 지면 접촉식 3D GPR과 같은 제작사의 안테나로 본체 호환이 가능하며, 센서 배열의 자유로운 변경이 가능한 것이 특징

<시작품의 고도화를 위한 개선사항>

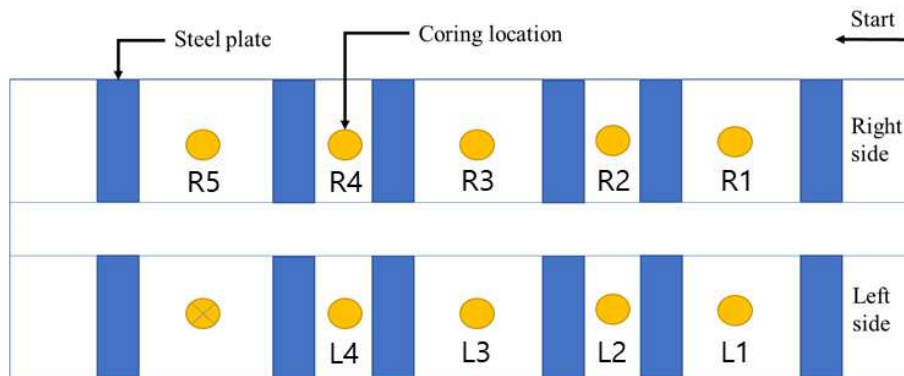
항 목	주요 사양	센서 전경
지면 비접촉식 3차원 지표투과레이더 (3D Radar DX1821)	• 지면 비접촉식 (Air-coupled) • 주파수범위 : 200~3000MHz • 채널 수 : 21개 • 채널간격 : 7.5m • 유효조사폭 : 1.575m • Size(mm) : 1830 x 580 x 230 • 무게 : 28kg	
	센서 횡단면 개념도 	

- 지면 비접촉식 3D GPR의 센서 탑재 치구 제작
 - 차량 탑재 치구 제작 및 차량 탑재



<비접촉식 3D GPR 차량 탑재 치구 제작>

- 실대형 TB를 활용한 현장실험
 - 경기도 연천 한국건설기술연구원 SOC 실증센터 TB 활용
 - 신규 탑재 센서를 활용하여 포장층 데이터를 확보하고 9개의 코어채취를 통해 두께 측정



<경기도 연천 TB 현장실험도>



<현장실험 전경>



<코어채취 후 포장두께 측정>

(나) CTE2

CTE2 5차년도 연구내용

- 도로함몰 위험도 평가 프로그램 현장 적용성 평가 및 성능검증
- 도로포장 유전율, 두께측정 알고리즘 개발

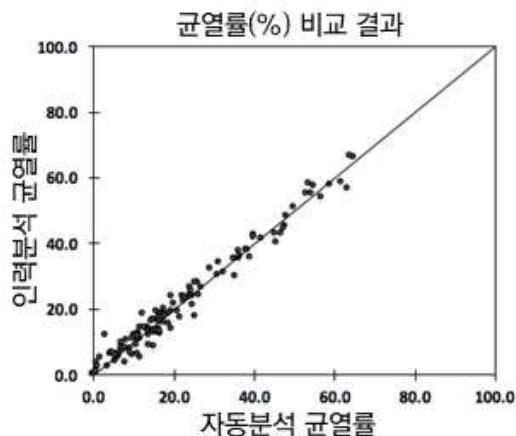
○ 인공지능 기반 자동분석 프로그램 성능검증

- 인공지능 기반 공동 자동탐지 프로그램 성능검증 결과 [별첨3 참조]
 - 4, 5차년도 도로하부 공동 탐사 결과를 통한 프로그램의 탐지율 85% 수준 검증완료

<시작품의 고도화를 위한 개선사항>

탐사 연도	공동탐사구간	총 탐사연장 (km·차로)	실제 공동개수	프로그램 탐지 공동개수	프로그램 탐지율(%)
4차년도 (2018년)	서울시 광진구 관리도로	42.8	15	13	87
	서울시 양천구 관리도로	19.1	10	10	100
	서울시 광진구 시도	16.2	13	11	84
5차년도 (2019년)	서울시 동남로	5.2	0	0	-
	서울시 양천로	6.2	7	4	57
	서울시 공항대로	11.0	2	2	100
합 계		100.5	47	40	85

- 인공지능 기반 자동 공동분석 프로그램의 데이터 분석 속도는 1시간 당 15km/h (1차로 데이터 기준) : 시연을 통한 검증 가능
- 확보되는 공동 데이터를 지속적으로 학습하여 프로그램 성능 개선 중
- 인공지능 기반 도로균열 표면결함 자동분석 프로그램 성능검증 결과 [별첨13 참조]
 - 기존의 인력 표면결함 분석결과와 비교하여 성능검증
 - 성능검증 결과 인력분석 대비 90%이상의 결과 일치로 성능 검증 완료



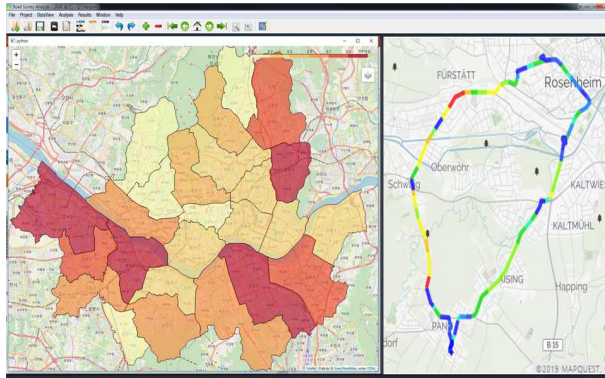
<인력분석과 자동분석의 결과 비교>

<인력분석과 자동분석의 결과비교>

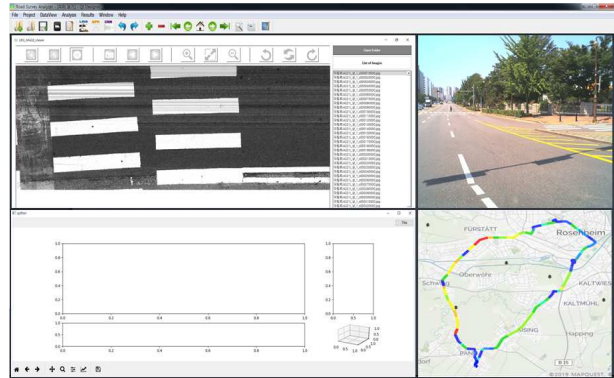
성능비교 대상	건설연 노면영상 데이터	타사 노면영상 데이터1	타사 노면영상 데이터2
비교연장 (m)	1,200	280	500
인력분석 대비 결과 일치율 (%)	90.6	90.9	91.3

○ 도로함몰 위험도 분석 프로그램 최종개발

- 서울특별시 내 도로조사 구간의 도로함몰 위험도 평가를 시각적으로 표현하기 위한 GIS 프로그램 및 Data Visualization 기법 적용
- 공동 탐사 위치 결과 데이터 변환 및 데이터 구조 정보 확정
- 도로노면 표면결함 조사 결과 데이터 변환 및 데이터 구조 정보 확정
- 도로함몰 위험도 분석 및 표출이 가능한 위험도 분석 프로그램 최종 버전 개발



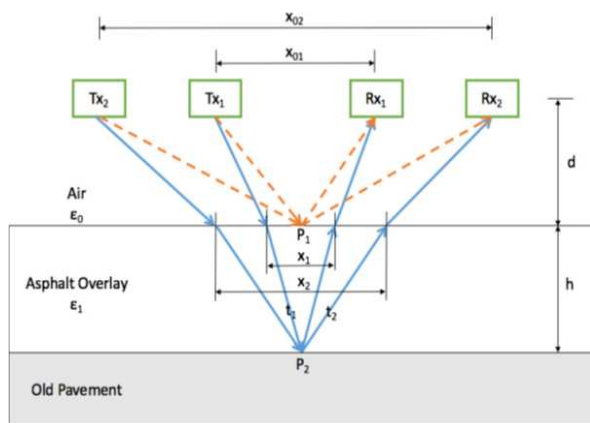
< 도로함몰 위험도 분석 프로그램 메인 화면 >



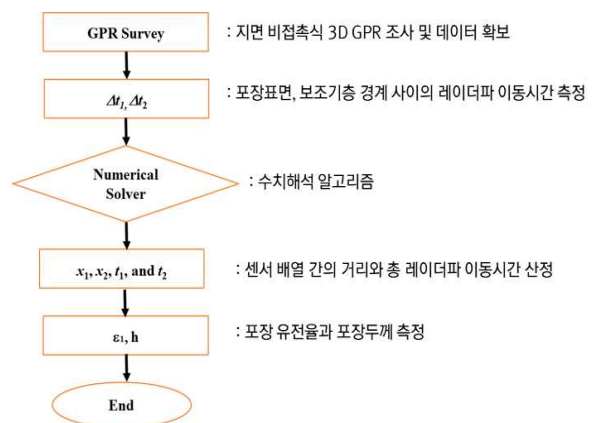
< 데이터 조회 프로그램 패널 >

○ 도로포장 유전율 및 포장두께 측정 알고리즘 현장적용결과

- XCMP(Extended Common Midpoint Method) 방법을 적용한 도로포장 유전율 및 포장두께 측정 알고리즘 개발

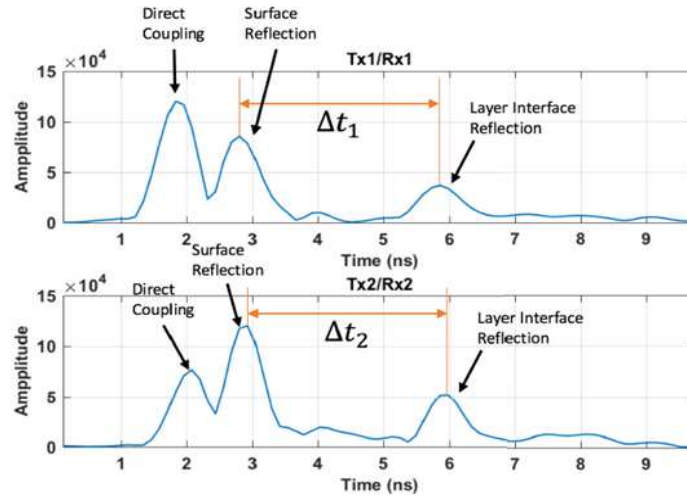


<XCMP 방법의 개념도>



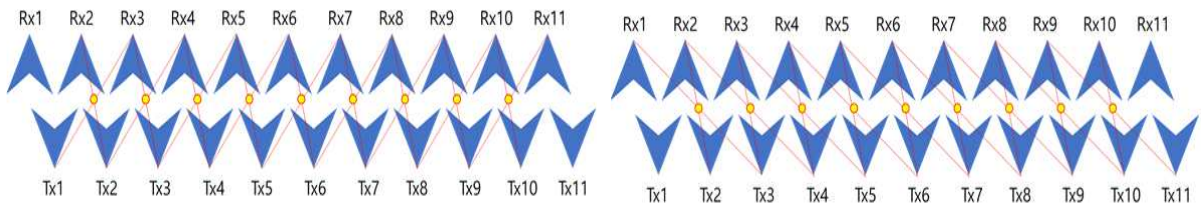
<포장 두께 측정 알고리즘 흐름도>

- 포장층 표면과 보조기층 경계부에서 나타나는 반사와 시간차(Δt_1 , Δt_2)를 측정방법



<반사파 시간차의 측정>

- 현장 적용을 위한 3D GPR 센서 배열 재배치
 - 반사파의 시간차를 구하기 위해 센서 배열의 재배치 : Case 1,2



<센서배열 Case1>

<센서배열 Case2>

- 현장 GPR 조사 및 코어채취를 통한 알고리즘 적용결과
 - 다양한 조사 옵션에 대한 포장 두께 측정 결과 Case2 배열의 측정간격 10cm, Dwell Time 5ns에서 평균 오차율 12%로 가장 적게 나타남
 - 아래 표의 데이터 중 빈곳은 주변 상황에 의한 신호잡음으로 인해 시간차를 정확히 측정하지 못한 부분임
 - 서울시내 도로현장에 대한 추가 현장실험 필요
 - 신호잡음 발생원인 파악 및 제거 방법에 대한 향후 연구 필요

<포장두께 알고리즘 적용결과 정확성 비교>

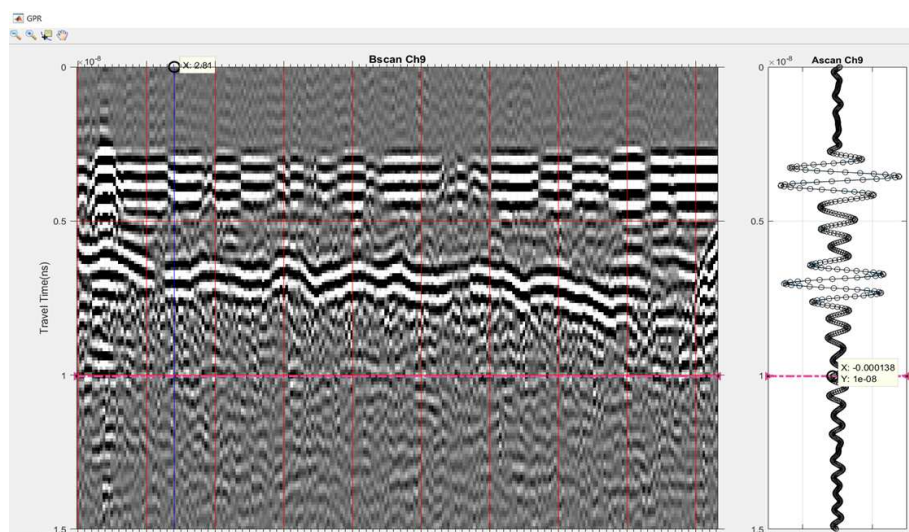
센서 배열	측정 간격 (cm)	Dwell time (ns)	현장 코어 측정 두께 (cm)									평균 오차 율
			17.5	20.5	19.0	21.5	19.0	17.0	20.0	21.0	20.0	
			L1	L2	L3	L4	R1	R2	R3	R4	R5	
Case1	5	1		12%	6%	54%	42%					29%
	5	3		31%	5%	14%						17%
	5	5		31%	6%	24%	42%				31%	27%
	7.5	1		9%	39%				8%			19%
	7.5	3		12%	7%			46%	11%			19%

센서 배열	측정 간격 (cm)	Dwell time (ns)	현장 코어 측정 두께 (cm)									평균 오차 율
			17.5	20.5	19.0	21.5	19.0	17.0	20.0	21.0	20.0	
			L1	L2	L3	L4	R1	R2	R3	R4	R5	
	7.5	5			39%			45%	32%			39%
	10	1	46%	12%		58%						39%
	10	3		12%	6%		43%					20%
	10	5	40%			25%				89%		51%
Case2	5	1	22%			7%		34%		15%	28%	21%
	5	3	5%	22%	71%		53%	6%		25%	3%	26%
	5	5	30%	22%					21%	5%	5%	17%
	7.5	1				55%		83%	92%			77%
	7.5	3			19%		28%	33%		25%		26%
	7.5	5	31%		93%			34%	3%			40%
	10	1		22%				8%	3%	13%		12%
	10	3	30%		28%	26%		8%	22%			23%
	10	5		23%				59%	21%			34%

<최적 조사음선 활용 포장 두께 비교 결과>

최적 조사음선	측정 방법	포장 두께 측정 값 (cm)			
센서배열 : Case2	코어채취	20.5	17.0	20.0	21.0
측정간격 : 10cm	알고리즘	25.0	18.4	20.6	23.7
Dwell Time : 1ns	산정				

- 포장두께 측정 알고리즘 및 프로토타입 프로그램 개발
 - 아스팔트 포장층의 상하부 신호의 반사시간 측정 가능
 - 측정된 반사시간을 활용하여 포장두께를 측정하는 알고리즘 및 프로그램 개발



<포장두께 측정 프로그램>

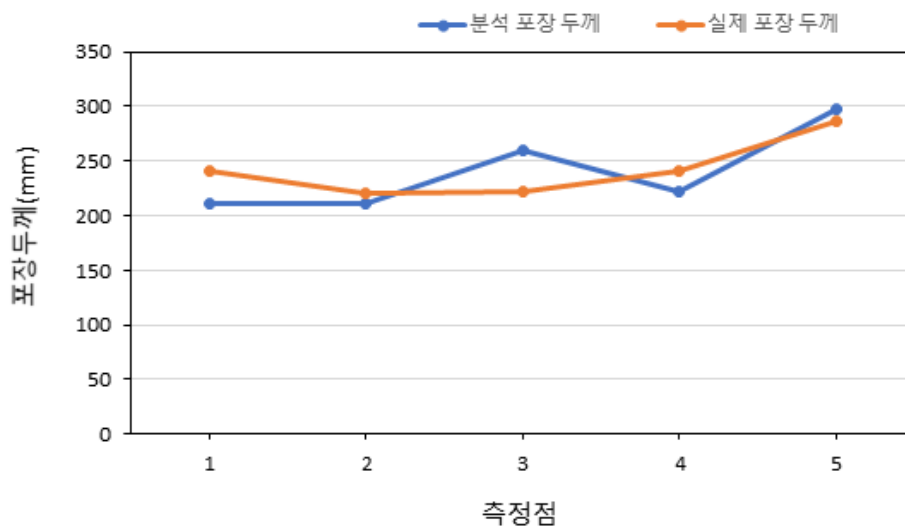
- 2차 현장 GPR 조사 수행 및 분석결과
 - GPR 신호 Peak Detection을 위한 최적 보간법 및 필터링 알고리즘 연구 및 적용
 - GPR 안테나의 송신 및 수신기 사이의 신호 측정 중심점 계산
 - 최종 알고리즘의 포장두께 측정오차는 9.1%내외
 - 기술 실용화를 위해서는 5%내의 정확성이 필요하며 추가 연구 필요



<2차 현장 GPR 조사 및 코어채취>

<2차 현장조사의 포장두께 측정 결과>

적용 옵션	측정점	유전율 계산결과	분석 포장두께 (mm)	실제 포장두께 (mm)	측정오차 (%)	평균오차 (%)
• 센서배열 : Case 2 • Hamming Window 적용 • 주파수 범위 : 800~1600MHz • Whittaker-Shannon 보간법 사용	1	5.2	210.5	241.3	12.7	9.1
	2	5.2	210.5	220.0	4.3	
	3	3.2	259.5	221.5	17.1	
	4	5.8	222.4	240.8	7.6	
	5	5	297.8	287.0	3.8	



<2차 현장조사의 포장두께 측정 결과>

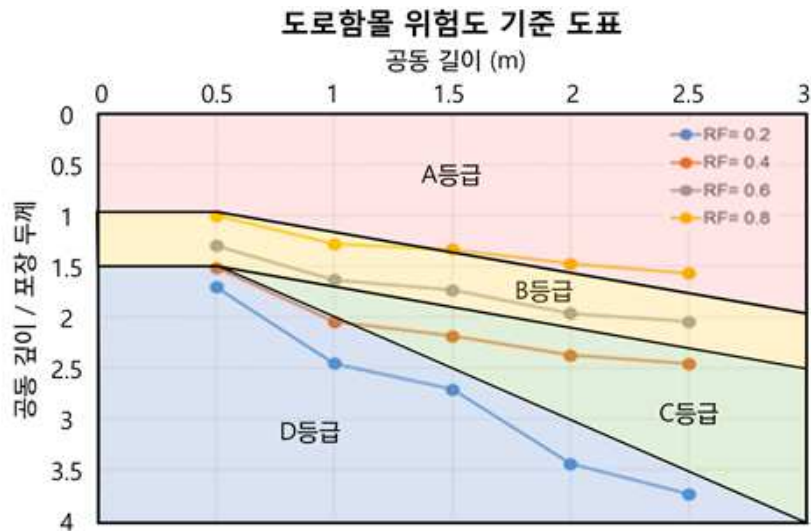
(다) CTE3

CTE3 5차년도 연구내용

- 도로함몰 위험도 평가 기준 최종 제시 [별첨 7참조]

○ 4차년도에 개발된 두 가지 도로함몰 위험도 등급 기준을 결합한 도로함몰 위험도 기준(최종안) 제시

- 도로포장의 탄성계수, 포장두께, 공동규모를 함께 고려한 과학적 등급 기준 제시
- 실험형 포장가속시험, 유한요소해석, 입자기반 해석, 실내 모형 토조 실험 데이터를 기반으로 포장의 잔존수명 및 위험도 계수(RF)를 예측식을 제시
- 일본의 공동관리 기준과 비교결과 매우 유사한 결과를 보임



<도로함몰 위험도 기준(최종안)>

<도로함몰 위험도 기준(최종안)의 등급분류 및 복구기준>

위험도 등급	관리기준	조치내용	비고
A	긴급복구	즉시복구 (4시간 이내)	발견 즉시 교통 차단
B	우선복구	신속한 조치계획 수립 및 복구	공동 발생원인이 상수도 파손인 경우 긴급복구(A) 등급으로 고려
C	일반복구	우기철 이전까지 복구	공동 발생원인 조사 시행
D	관찰대상	지속관찰	다음 탐사년도재탐사 후 재판정

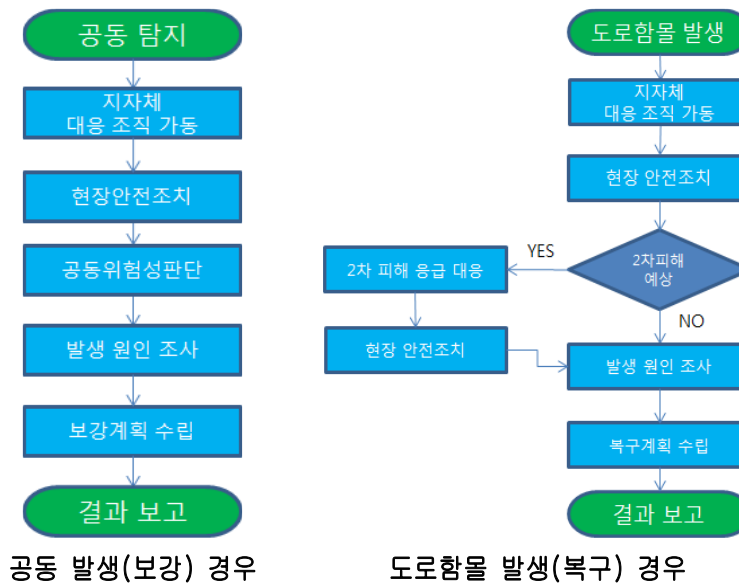
(라) CTE4

CTE4 5차년도 연구내용

- 도로함몰 통합 실무 매뉴얼 현장 적용성 검증 [별첨11 참조]

○ 매뉴얼의 현장 적용

- 국가 주요 도로함몰 발생사고 발생 시 현장지원 업무를 수행하는 한국시설안전공단 국가시설관리본부에 대한 매뉴얼 적용을 위해 협조 요청 중
- 최근에는 소규모의 공동 및 도로함몰 발생사례가 더 빈번하기 때문에 소규모 사고에 대한 단기 대응 복강/복구 흐름도를 추가



<소규모 사고 단기 대응을 위한 보강/복구 흐름도 제시>

- 지자체 공무원들의 매뉴얼 활용도를 높일 수 있는 현장 보고 양식 제시

도로함몰(공동) 발생 보고 양식(매설관도 파손)

부산 강서구 명지동 국제신도시(예시)
부산시 XX과 XXX 주무관

☐ 사고개요

○ 일 시 : 2019.00.00

○ 장 소 : 부산 강서구 명지동 국제신도시 조성지역

○ 함몰(공동)규모 : 지름 15m, 깊이 1.5m

○ 피해내용

- 인적피해 :

- 물적피해 :

☐ 발생원인

○ 지하 상수관로 파손에 따른 상부 토사 유출로 인한 도로함몰

☐ 조치사항 및 향후계획

○ 조치사항 : 현장사고, 유관기관 협조 내용 등 기입

○ 향후계획 : 사고 복구, 재발방지 등에 관한 내용 기입

붙임 : 도로함몰(공동) 발생 및 조치 사진 1부.

붙임 : 도로함몰(공동) 위치 및 현장 사진(예시)

위치

현장사진 1

현장사진 2

현장사진 3

현장사진 4

<현장 보고 양식 예시>

라. 연구 결과

(1) 기술적 성과

- 본 연구의 최종목적은 도로함몰 위험도 평가 및 분석 기술 개발을 통한 ‘도로함몰 사고 예방’ 으로 이를 달성하기 위하여 4가지 핵심 요소 기술(CTE)을 선정하였음
- 각 CTE의 연구개발에 따라 도출된 기술적 성과는 다음과 같음
 - CTE 1 : 도로함몰 위험도 탐지 시스템 : 연속식 도로지지력 평가 장비 (Rolling Dynamic Deflectometer, RDD) 및 지표투과레이더(Ground Penetrating Radar, GPR)와 포장상태 조사장치가 결합된 복합 탐지 시스템 시작품 개발
 - CTE 2 : 도로함몰 위험도 분석 프로그램 : GPR, RDD 등 취득된 복합 데이터로부터 도로 공동 위치 및 크기, 포장 결합 상태, 포장 지지력을 인공지능으로 자동 진단하는 프로그램을 개발 및 GIS 기반 위험도 분석 및 관리 프로그램 개발
 - CTE 3 : 도로함몰 위험도 평가 기술 : 기존 도로함몰 사례 조사, 시뮬레이션을 통한 도로함몰 영향 인자 규명, 실내실험, 실대형 포장가속시험을 통하여 도로포장 수명을 예측하고 도로함몰 위험도 등급 기준(안)을 개발
 - CTE 4 : 재난예방형 도로관리시스템 : 도로 진단/관리 수행 기관에서 마련해야하는 현장조사 자료 DB 구축 및 위험도 등급 기준에 따른 도로함몰 복구대응 매뉴얼, PMS 연계 프로그램 개발
- 각 CTE별로 개발된 기술적 최종 성과물은 아래 표와 같음

핵심 요소 기술	본 연구의 최종 성과물		별첨 보고서
[CTE1] 도로함몰 위험도 탐지 시스템	중요기술성과	- 도로함몰 복합탐지 시스템 (중요성과1) - 연속식 도로지지력 평가 시스템 (중요성과2)	별첨1
	일반성과	- 시작품 운용매뉴얼 및 신뢰성 평가 지침(안)	별첨2,3
[CTE2] 도로함몰 위험도 분석 프로그램	중요기술성과	- 인공지능 기반 도로하부 공동 자동탐지 프로그램 (중요성과3) - 인공지능 기반 도로 표면결합 자동분석 프로그램 (중요성과4) - 도로함몰 위험도 평가 프로그램 (중요성과5)	별첨4 별첨13
	일반성과	- 도로하부 탐지 데이터 처리 프로그램	
[CTE3] 도로함몰 위험도 평가 기술	중요기술성과	- 도로함몰 위험도 평가 기준(안) (중요성과6)	별첨7
	일반성과	- 도로함몰 발생확장 모형 - 매커니즘 검증을 위한 실대형 테스트베드	별첨5,6
[CTE4] 재난 예방형 도로관리시스템	중요기술성과	- 도로함몰 복구대응 매뉴얼 (중요성과7)	별첨11
	일반성과	- 도로함몰 위험도 분석조서 - 포장관리시스템(PMS) 연계 방안	별첨10, 12

※ 일반성과물은 중요 기술성과를 달성하기 위한 보조적인 성과임

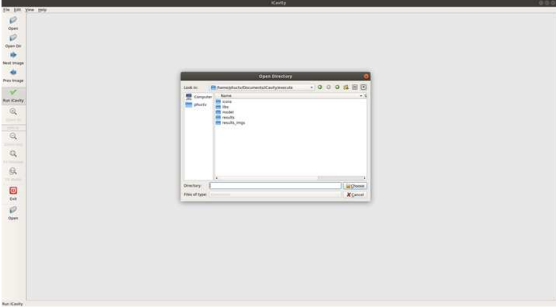
(가) 중요성과물1 : 도로함몰 복합탐지 시스템 시작품

성과물 전경	주요 성능	
	주요 기능	성능 및 정밀도
	3차원 지표투과레이더 (GPR)	- 주파수범위 : 200~3000MHz - 유효조사폭 : 1.5m
	포장표면영상 취득장치	- 측정 폭 : 3.7m이상 - 표면 영상 분해능 : 1mm 이하
	종단평탄성 조사장치	종방향 Sampling : 25mm
	소성변형 조사장치	- 수직변위 정확도 : 2mm 이하 - 조사 폭 : 3.7m 이상
	도로현황 조사장치	거리연동 등간격 영상취득
	최대조사속도	- 공동 및 포장조사 시 : 20km/h - 포장상태조사 시 : 80km/h
기존 기술과의 차별성 분석	- 기존 공동탐사와 포장상태조사는 개별적인 조사차량 (차량형 3차원 GPR, 로드스캐너)으로 구분되어 수행되고 있음 - 도로함몰 복합탐지 시스템은 공동조사와 포장상태조사를 동시에 수행가능한 차별성을 보유	
관련 등록특허	- 특허등록번호 : 10-1917374 - 특허등록명칭 : 3D 지표투과 레이더 신호 처리 장치 및 방법	

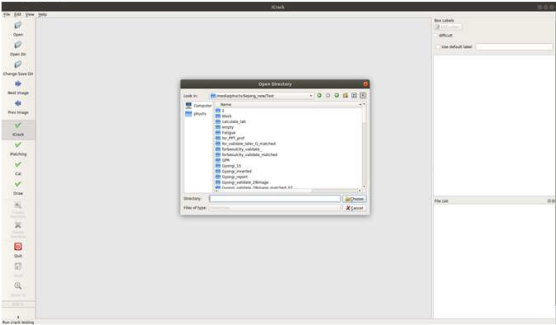
(나) 중요성과물2 : 연속식 도로지지력 평가 시스템(RDD) 시작품

성과물 전경	주요 성능	
	주요 기능	규 격
  	최대 동적하중	7.5 tonf
	최대 정적하중	6.8 tonf
	공차중량	7.9 tonf
	동적하중 주파수 대역	1~100 Hz
	처짐계측기	Geophone 4대
	전장	6.05m
기존 기술과의 차별성 분석	- 기존의 도로 지지력의 평가는 FWD(Falling Weight Deflectometer)로 수행되며, 이는 정적평가방식으로 도로포장의 지점별 지지력만 측정가능 - RDD는 롤러형태의 하중기와 계측기로 이동하며 도로의 연속지지력을 측정 가능한 국내 유일의 시스템	
관련 등록특허	- 특허등록번호 : 10-1922767 - 특허등록명칭 : 이동식 도로 지지력 평가장비	

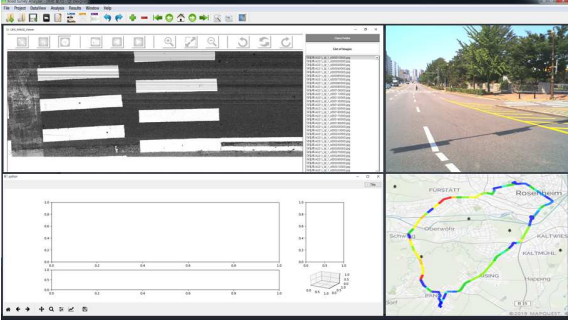
(다) 중요성과물3 : 인공지능 기반 도로하부 공동 자동탐지 프로그램

성과물 전경	주요 성능	
	주요 기능	성능
	도로하부 공동 자동분석	3D GPR 데이터 자동분석
	결과 표출	Spread Sheet 형태로 공동탐사 위치 표출
	공동조사서 출력	공동 탐사 위치정보를 기반으로 공동조사서 출력
	분석속도	1시간 당 10km·차로 분석가능 - GPU 개수에 따라 속도증가
	정확도	80%수준 (인력 분석과 동등)
기존 기술과의 차별성 분석	- 현업에서 인력을 통한 공동분석의 정확도는 80%수준으로 본 프로그램과 동등한 수준 - 그러나 인력 분석속도는 4인의 분석원이 1일 최대 10km 가능 - 본 프로그램의 경우 1대의 GPU로 1시간당 10km 가능하며 GPU가 많을수록 분석속도 배수로 증가됨	
저작권 등록	- 저작권 등록번호 : C-2018-022211 - 저작권 등록명칭 : iCavity (아이캐비티)	
관련 등록특허	- 특허등록번호 : 10-1944324 - 특허등록명칭 : 지표투과 레이더의 데이터 처리방법	

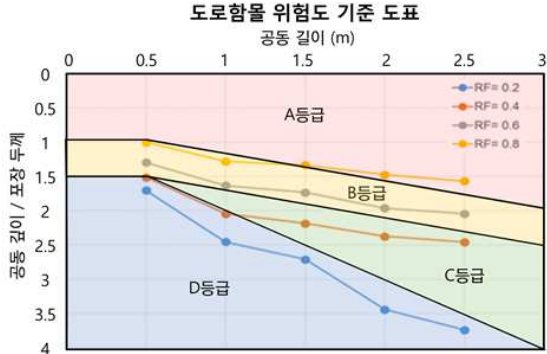
(라) 중요성과물4 : 인공지능 기반 도로 표면결함 자동분석 프로그램

성과물 전경	주요 성능	
	주요 기능	성능
	표면결함	9 Class의 표면결함 분석기능 - 종·횡 선형균열, 피로균열, 패칭, 맨홀, 포트홀, 미끄럼 방지포장, 시공균열, 차로폭
	균열 심각도 분류 기능	선형균열, 피로균열의 심각도를 상, 중, 하로 자동분류
	분석속도	1대의 GPU로 1일 170km
	정확도	95%수준 (인력 분석 이상)
기존 기술과의 차별성 분석	- 현업에서 인력을 통한 균열 분석은 심각도를 고려하기 어려우며, 분석결과와의 객관성과 일관성이 부족함 - 본 프로그램은 객관적이고 일관적인 분석이 가능하며 기존 격자모양의 균열 분석이 아닌 균열의 길이와 크기에 맞추어 정확히 분석됨 1대의 GPU로 1일 170km 표면영상의 분석이 가능하여 인력분석 방식 대비 15배 이상의 분석속도 성능을 보유했다	
저작권 등록	- 저작권 등록번호 : C-2018-022210 - 저작권 등록명칭 : iCrack (아이크랙)	

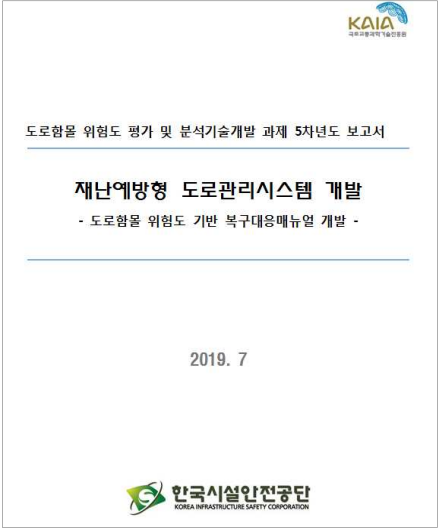
(마) 중요성과물5 : 도로함몰 위험도 평가 프로그램

성과물 전경	주요 성능	
	주요 기능	성능
	위치정보표출	• QGIS 3.0 연계
	공동위치표출	• GIS맵 상에 공동위치와 위험도 등급을 표출
	표면결함표출	• 도로포장의 노면결함 데이터를 사각형 폴리곤 형태로 등급별 색을 구분하여 표출
	위험도 분석	• 도로함몰 위험도 평가기준에 따라 위험도 분석
	도로함몰 DB	• 공동 및 표면결함 DB구축가능
기존 기술과의 차별성 분석	• 서울시와 국토부의 경우 GIS기반 PMS 관리 프로그램 개발 및 운영중 • 국내에는 공동 및 도로함몰 이력정보가 포함된 PMS 관리 프로그램이 없는 실정임 • 본 프로그램은 공동과 PMS정보를 함께 입력하여 관리가 가능 • 지자체에서 활용하기 위해서는 지자체 관련 DB 협조 필요	
저작권 등록	• 저작권 등록번호 : C-2018-030256 • 저작권 등록명칭 : 도로함몰 위험도 지리정보 분석 프로그램	

(바) 중요성과물6 : 도로함몰 위험도 평가 기준(안)

성과물 전경	주요 특징	
	구분	특징
	위험도 등급	• A,B,C,D의 4개의 등급으로 분류
	위험도 계수 (RF)	• 공동이 발생한 포장의 잔존수명을 예측하기 위한 위험도 계수 개념을 도입
	포장두께	• 아스팔트 포장의 포장두께를 고려한 등급기준
	포장 동탄성계수	• 아스팔트 포장의 동탄성계수를 고려한 등급기준
기존 기술과의 차별성 분석	• 기존 일본식, 서울시 공동관리 기준은 공학적인 분석이 없이 경험적인 방법으로 결정된 등급기준임 • 도로함몰 위험도 평가기준(안)은 유한요소해석, 실험형 포장가속시험 등의 데이터 분석을 통해 개발된 과학적 등급 기준 • 도로포장의 탄성계수를 고려한 최초 기준	
관련 SCI급 논문	• 논문명 : A Risk Assessment of Asphalt Pavement for Depression and Cave-in Caused by Subsurface Cavity (2018.09) • 주저자명 : 최연우 • 학술지명 : International Journal of Pavement Engineering, Vol19	

(사) 중요성과물7 : 도로함몰 복구 대응 매뉴얼

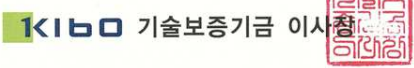
성과물 전경	주요 특징	
	구 분	특 징
	위험수준 정의	도시규모에 따른 도로함몰 위험수준의 정의
	조직 구성(안) 제시	도시규모에 따른 도로함몰 복구대응 조직 구성(안) 제시
	보강/복구 흐름도	공동 및 도로함몰 발생 시의 보강 및 복구업무 흐름도 제시
	체크리스트	도시규모, 도로위치 특성을 고려한 실무자를 위한 도로함몰 사고복구 체크리스트 제시
기존 기술과의 차별성 분석	- 국내에 도로함몰 및 공동에 대한 복구대응 절차는 서울시 정도만 보유중이며 정식 매뉴얼은 부재 - 본 매뉴얼의 지자체별 보급을 통해 도로함몰 대응팀의 업무 효율 상승가능	
관련 비SCI급 논문	- 논문명 : 도시규모를 고려한 도로함몰 사고 복구 행동절차 및 체크리스트 개발 (2018.10) - 주저자명 : 성주현 - 학술지명 : 한국방재학회논문집, Vol18, No.5	

(2) 경제적 성과

(가) 교내벤처회사 설립을 통한 기술이전

○ 주관연구기관 세종대학교의 교내벤처회사 설립 및 기술이전

- 교내벤처회사명 : 주식회사 IRIS Technology (대표이사 : 이현중)
- 세종대학교와 IRIS Technology 간의 포괄적 기술실시 계약 체결

교내벤처회사 정보	교내벤처회사 연혁				
 (주)아이리스 테크놀로지 서울시 광진구 능동로 209 세종이노베이션센터 301호 Tel 02-6217-2419 Fax 02-3408-4332 대표이사 이현중 (02-3408-3812)	• 2019.01.09. 창립 • 2019.02.14. 기술보증기금 벤처기업 선정 <table border="1"> <thead> <tr> <th>고용 현황</th><th>기술이전 사항</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td> • 정규직 : 5명 • 비정규직 : 3명 </td><td> • 본 연구과제의 기술성과에 대해서 세종대학교와 포괄적 기술실시 계약 체결 • 기술료는 총 매출액의 3% </td></tr> </tbody> </table>	고용 현황	기술이전 사항	• 정규직 : 5명 • 비정규직 : 3명	• 본 연구과제의 기술성과에 대해서 세종대학교와 포괄적 기술실시 계약 체결 • 기술료는 총 매출액의 3%
고용 현황	기술이전 사항				
• 정규직 : 5명 • 비정규직 : 3명	• 본 연구과제의 기술성과에 대해서 세종대학교와 포괄적 기술실시 계약 체결 • 기술료는 총 매출액의 3%				
교원창업허가 계약서	벤처기업확인서				
교원창업허가 계약서 (기술사업화 계약서) 본 계약은 세종대학교 산학협력단(이하 "갑"이라 한다)과 교원창업기업(이하 "을"이라 한다)의 창업허가 및 기술사업화에 관한 계약이다. 제1조(정의) 이 규정에서 사용하는 용어의 정의는 다음과 같다. 1. "대학기술"이란 세종대학교 지적재산관리규정 제2조 제4항의 지적재산권으로, 특허권, 상표권, 디자인권, 저작권, 컴퓨터프로그램과 노하우(Know-how) 및 기술정보 등을 말한다. 2. "기술이전"이란 특허기술 등의 양도, 실시권의 허락, 기술지도, 공동연구, 노하우이전, 합작투자 또는 인수·합병 등의 방법으로 기술이 기술보유자로부터 그 외의 자에게 이전되는 것을 말한다. 3. "기술사업화"란 "대학기술"을 실시(물건을 생산·사용·양도·대여 또는 수입하거나 그 물건의 양도 또는 대여의 청약 등)하는 일체의 행위를 말한다. 4. "창업"이란 「벤처기업육성에 관한 특별조치법」 제2조에서 정하는 벤처기업의 창업과 그 예비활동을 말하는 것으로 "대학기술"을 사업화하는 것을 말한다. 제2조(공간, 기간, 용도) ①갑은 을에게 다음의 공간을 창업목적으로 사용할 것을 승인한다. • 주소 : 서울시 광진구 능동로 209 세종대학교 내 • 위치 : 을곡관 702A호 • 면적 : 33㎡ ②사용기간은 2019년 1월 14일부터 2021년 1월 13일까지로 한다. ③을은 관련 규정에서 정한 공간의 용도를 창업공간으로써 그 용도에 따라 사용하여야 하며, 제3자가 사용할 수 없다. 제3조(제신청) ①을은 계약당일 5개월 전까지 관련 규정에 따라 갑에게 창업허가의 제신청 및 대학으로부터 경직 제출인을 득하여 계약기간을 연장할 수 있다. ②제출인은 2년 단위로 함을 원칙으로 한다. 제4조(포괄적/개별적 기술실시) ①을은 갑이 보유하고 있고, 창업교원이 발명자로 되어 있는 대학기술에 대해 포괄적인 통상의 기술실시권을 가질 수 있으며, 이에 따라 제5조 기술사업화에 따른 대가를 납부할 의무를 가진다. ②을이 본조 제1항의 포괄적인 통상의 기술실시가 아닌 개별기술실시를 원하는 경우, 갑과 을은 상호 합의한 수준에서 정한 기술사업화에 따른 대가를 납부하는 조건으로 개별적 기술이전(통상실시, 전용실시, 양도 등)계약을 체결할 수 있다.	제 20190101020호 벤처기업확인서 업 체 명 : (주)아이리스테크놀로지 대 표 자 : 이현중 소 재 지 : 서울특별시 광진구 능동로 209 을곡관 702A호 확 인 유 형 : 기술평가보증기업(기술보증기금) 평 가 기 관 : 기술보증기금 유효기간 : 2019년02월14일 ~ 2021년02월13일 위 업체는 벤처기업육성에관한특별조치법 제25조의 규정에 의하여 벤처기업임을 확인합니다. 2019년 02월 14일  기술보증기금 이사장				

- 교내벤처회사의 사업화 실적
 - 사업화에 따른 2019년도 총 예상 매출액 : 25억원

사업명	2019년 서울특별시 도로포장 상태조사 및 분석 용역	도로포장 장기공용성 추적조사 및 품질개선	2019년 포장관리시스템 조사결과 분석	2019년 일반국도 위해요소 정밀조사
발주처	서울특별시	서울특별시	경기도	한국건설 기술연구원
용역기간	2019.04 ~ 2019.12	2019.05 ~ 2019.12	2019.05 ~ 2019.12	2019.05 ~ 2019.12
계약금액	542,386 천원	324,904 천원	289,100 천원	841,500 천원
과업 진행	과업 수행 중	과업 수행 중	과업 수행 중	과업 수행 중
사업개요	• 서울특별시 도 3,600 km의 포장상태 조사·분석 • 보수대상구간과 보수공법 선정 등 유지보수 전략 수립	• 도로하부 공동조사 및 포장상태조사를 결합한 복합조사 방법의 개발 및 실제 조사수행 실시 • 서울시 장기공용성 추적조사를 수행	• 경기도 도로포장에 대한 표면 상태 분석 및 평가 • 경기도 아스팔트 도로포장의 보수 보강 공법 의사결정체계의 개선 연구	• 일반국도 위해요소(도로하부공동) 정밀조사 • 공동 발생의 발생원인 분석 및 복구 방안 마련
사업활용 핵심연구성과	• 핵심성과1, 4	• 핵심성과 1,2,3,4,	• 핵심성과 4	• 핵심성과 1,2,3,4,

- 교내벤처회사 향후 운영 계획
 - 서울시, 한국건설기술연구원을 위한 인공지능 기반 자동 분석 기술 개발 (수행 중)
 - 개발 자동분석 소프트웨어 패키징 및 성능 홍보를 통하여 공동조사 및 포장상태조사 업체에 대한 라이선스 계약
 - 탐사 시작품과 소프트웨어가 결합된 도로포장 상·하부 토털 솔루션 구성 및 관련 지자체에 대한 기술홍보
 - 지자체 공동 및 PMS 대응팀에 대한 기술 교육
 - 서울시, 일반국도 외 지자체에 대한 기술용역 참여
 - 신기술 등록

(나) 인공지능 자동분석 기술을 통한 경제적 효과

○ 기존 공동탐사 기술의 조사 및 분석단가

- 국내 도로하부 공동조사 데이터 분석은 대부분 전문 분석원의 인력분석을 통해서 수행되며 이에 따라 조사 및 분석 단가가 매우 높은 실정
- 서울시 기준 공동탐사를 위한 용역시행단가는 1km당 약 1,350,000원 수준으로 조사됨

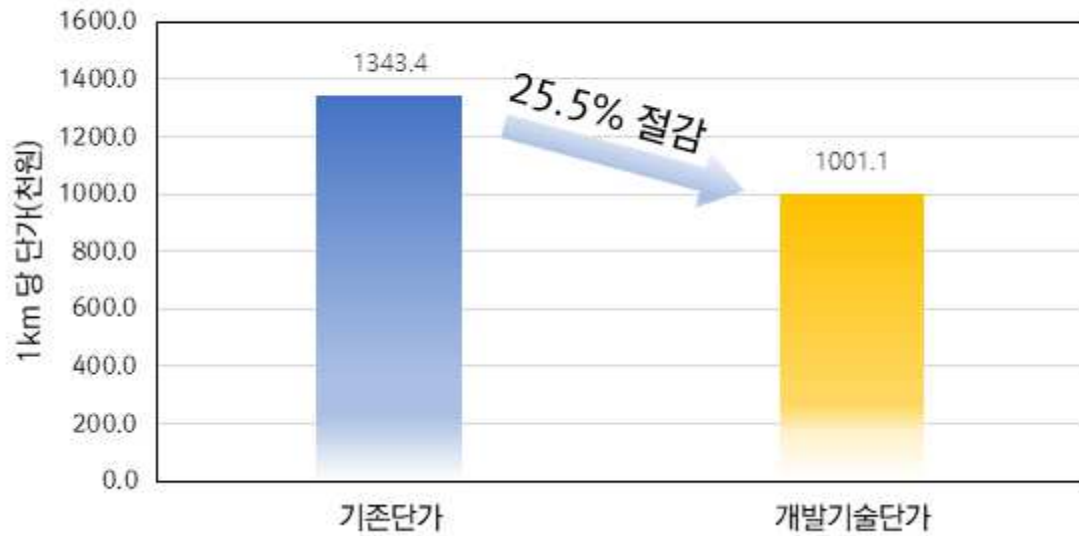
구분	단위	수량	인건비	경비	비고
			단가(원)	단가(원)	
도로 공동 1차 조사	km	1	51,875	24,893	
공동 자료 분석			450,100	-	
2차 조사비			-	47,998	공당 133,327원 공동발견 수량 기준(0.36개/km)
소계			501,975	72,891	
계			574,866		
제경비(인건비의 110~120%)			557,724		110% 적용
기술료(인건비+제경비의 20~40%)			210,830		20% 적용
합계			1,343,420		

○ 인공지능 기반 자동분석 기술 적용 시 조사 및 분석단가

- 조사단가의 경우 시작품 제작비용으로 경비 증가
- 인공지능 기반 자동 공동분석 방법을 적용한 용역단가는 1km당 약 1,001,094원 수준으로 기존 대비 25.5%의 절감된 단가로 용역수행가능

구분	단위	수량	인건비	경비	비고
			단가(원)	단가(원)	
도로 공동 1차 조사	km	1	58,762	55,115	
인공지능 공동 분석			297,580	-	프로그램분석(공동)
2차 조사비			-	47,998	공당 133,327원 공동발견 수량 기준(0.36개/km)
소계			356,342	103,113	
계			459,455		
제경비(인건비의 110~120%)			391,976		110% 적용
기술료(인건비+제경비의 20~40%)			149,663		20% 적용
합계			1,001,094		기존 대비 74.5%

기존기술과 자동분석기술의 단가비교



○ 도로포장 복합탐지 시스템을 통한 공동, 포장상태 조사 및 분석 시 단가

- 본 연구에서 개발한 도로함몰 복합탐지 시스템 시작품은 공동탐사와 도로노면 상태조사를 동시에 수행할 수 있음
- 본 연구의 복합탐사 기술을 적용할 경우 1km 당 1,276,000원 수준으로 기존 공동탐사 용역 단가의 95% 수준으로 공동탐사와 포장상태조사, 분석을 모두 수행 가능하므로 경제적인 효과 극대화 가능

구분	단위	수량	인건비	경비	비고
			단가(원)	단가(원)	
도로하부 공동 및 포장상태조사	km	1	58,762	55,115	
포장상태 분석			46,808	-	프로그램분석 (공동, 포장상태)
공동 데이터 분석			297,580	-	프로그램분석(공동)
2차 조사비			-	47,998	공당 133,327원 공동발견 수량 기준(0.36개/km)
소계			403,150	103,113	
계			506,263		
제경비(인건비의 110~120%)			556,889		110% 적용
기술료(인건비+제경비의 20~40%)			212,630		20% 적용
합계			1,275,782		기존 대비 95%

○ 도로관리 지자체(유관기관) 활용 시 발생하는 경제적 효과 분석

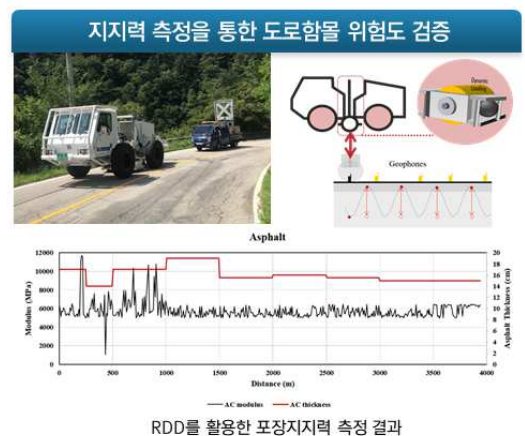
- 국내 도로관리를 중점 수행하고 있는 각 기관에서 본 연구 성과를 활용 시 발생하는 예상되는 경제적 효과를 아래 표와 같이 분석하였음

도로관리 기관	관리도로	1차로 환산기준 관리연장 (km·차로)	지하안전 특별법에 의거한 공동탐사 5년 기준 전수조사 시 비용 산출		연간 예상 절감 비용
			기존 기술 (백만원)	개발 기술 적용 (백만원)	
국토교통부	일반국도	30,230	8,122	6,053	21억원
도로공사	고속도로	22,571	6,064	4,519	15억원
서울시	서울시도	6,980	1,875	1,398	5억원
경기도	지방도	3,978	1,068	769	3억원

(3) 핵심 개발 기술의 연계성

○ 본 과업에서 개발된 각각의 요소 기술들은 아래와 같은 연계성을 갖고 기술의 실용화에 활용 가능

연계방안	주요활용분야	사용 핵심 기술	활용 내용
주요 연계방안	도로함몰(공동) 탐사 및 위험도 분석	도로함몰 복합탐지 시스템 (지면접촉식 GPR, 포장노면영상)	• 지면접촉식 GPR 데이터 측정 및 거리동기화 된 포장노면 영상 측정
		도로하부 공동 자동탐지 프로그램	• 공동 위치 자동탐지
		지면비접촉식 GPR을 통한 아스팔트 포장두께 측정	• 포장두께 측정을 통한 발견된 공동의 함몰 위험도 등급 결정
		도로함몰 위험도 등급기준	
		이동식 도로지지력 평가장치(RDD)	• 공동 발생구간의 지지력 측정을 통한 함몰 위험도 검증
추가 연계방안	아스팔트 포장상태 평가	도로함몰 복합탐지 시스템 (포장노면영상)	• 노면영상, 소성변형, 평탄성 데이터 측정
		도로 표면결합 자동탐지 프로그램	• 표면 균열 자동분석
		지면비접촉식 GPR을 통한 아스팔트 포장두께 측정	• 포장두께 및 지지력 측정을 통한 포장수명 측정
		이동식 도로지지력 평가장치(RDD)	• 재포장 설계



<개발 기술의 연계성>

마. 연구 개발 성과

(1) 논문 게재 성과

○ SCI급 논문 : 9건

논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	게재일
New Approach to Construct Master Curve of Damaged Asphalt Concrete Based on Falling Weight Deflectometer Back-Calculated Moduli	Journal of Transportation Engineering	Van Phuc Le	Vol. 142	미국	ASCE	2016.06
A numerical simulation of thermo-mechanical behavior of the intact rock in response to the Borehole Heater Test	Annals of Nuclear Energy	Syed Danial Ali	101	미국	ELSEVIER	2016.11
Effect of Suction Stress on Critical State of Compacted Silty Soils under Low Confining Pressure	International Journal of Geomechanics	Byeong-Su Kim	Vol. 16	미국	ASCE	2016.03
Comparison of Supervised Classification Techniques for Vision-Based Pavement Crack Detection	Journal of the Transportation Research Board	Haebum Yoon	Vol. 2595	미국	Transportation Research Record	2016.08
Decision Matrix Analysis of Impact Sounding Test Method to Determine Interlayer Condition of Concrete Bridge Deck	Journal of Sensors	Cristina Amor Rosales	Vol. 2017	미국	Hindawi	2017.08
A Risk Assessment of Asphalt Pavement for Depression and Cave-in Caused by Subsurface Cavity	International Journal of Pavement Engineering	Yeon Woo Choi	Vol.19	영국	Taylor&Francis	2018.09
Deep Learning-based Autonomous Underground Cavity Detection Using Three-Dimensional Ground Penetrating Radar	Structural Health Monitoring	Man-Sung Kang	I-13	영국	SAGE	2019.03
Deep Learning-Based Underground Object Detection for Urban Road Pavement	International Journal of Pavement Engineering	Namgyu Kim	Vol.19	영국	Taylor&Francis	2018.12
Novel 3D GPR Image Arrangement for Deep Learning-based Underground Object Classification	International Journal of Pavement Engineering	Namgyu Kim	Vol.20	영국	Taylor&Francis	2019.08

○ 비SCI급 논문 : 23건

논문명	학술지명	주저 자명	호	발행 기관	게재일
공용중인 아스팔트 포장의 아스팔트층 동탄성계수와 FWD 역산 탄성계수의 상관관계 분석	한국도로학회 논문집	박희문	제17권	한국도로학회	2015.10
도로동공 탐지를 위한 지표투과레이더의 적정 주파수 선정에 관한 연구	한국도로학회 논문집	김연태	제18권	한국도로학회	2016.04
한국형포장설계프로그램 및 유한요소해석을 이용한 동상방지층의 구조적 성능 평가	한국도로학회 논문집	김도완	제18권	한국도로학회	2016.04
지표투과레이더를 이용한 아스팔트 혼합물의 공극률 예측에 관한 연구	한국도로학회 논문집	김제원	제18권 제4호	한국도로학회	2016.09
도로함몰 위험도 평가를 위한 실대형 포장가속시험 기초 연구	한국도로학회 논문집	박희문	제18권 제5호	한국도로학회	2019.10
다단계 FWD 하중을 이용한 블록포장의 비선형 거동 분석	한국도로학회 논문집	박희문	제18권 제6호	한국도로학회	2019.12
개별요소법을 활용한 도로하부 동공 상태 평가	한국도로학회 논문집	김연호	제18권 제5호	한국도로학회	2016.10
실내모형시험을 통한 도로함몰 매커니즘에 대한 기초적 연구	한국도로학회 논문집	권기철	제18권 제5호	한국도로학회	2016.10
FIELD INVESTIGATION OF ROAD CAVITY AND CAVE-INS IN SEOUL, KOREA	Mairepav8	백종은	-	Research Publishing	2016.06
도로함몰 현상 대응을 위한 전략과제 도출	한국안전학회지	성주현	Vol.31	한국안전학회	2016.10
도로함몰 실태와 안전관리 개선 방안	한국산학기술학 회논문지	이상엽	Vol.18	한국산학기술학회	2017.01
도로동공 탐지에 적합한 GPR 타입 선정에 관한 연구	한국도로학회 논문집	김연태	제19권 제5호	한국도로학회	2017.09
FWD 처짐량 기반 도로 공동 및 함몰 위험도 평가 기초 연구	한국도로학회 논문집	김태우	제19권 제5호	한국도로학회	2017.09
개별요소법을 활용한 도로함몰 발생과 전개거동 예측	한국지반공학학 회논문집	김연호	제33권 제7호	한국지반공학학회	2017.07
도심지 개착식 굴착공사 붕괴사고 및 도로함몰 저감을 위한 우선 관리 요소 결정	한국터널지하공 간학회 논문집	성주현	제19권 제3호	한국터널지하공간 학회	2017.04
도로함몰관리체계 구성요소 최적화방안 연구	한국도로학회 논문집	연규민	제19권 제6호	한국도로학회	2017.12
불포화 사질토의 도로함몰 특성에 관한 실험적 연구	한국도로학회 논문집	권기철	제20권 제1호	한국도로학회	2018.02
3차원 유한요소해석을 이용한 공동부 아스팔트 포장의 반응 모델 개발	한국도로학회 논문집	최연우	Vol.20, No.5	한국도로학회	2018.10
개별요소법을 통한 지반의 포화도와 밀도가 함몰에 미치는 영향 평가	한국지반공학학 회논문집	김연호	제34권 8호	한국지반공학학회	2018.08
도시규모를 고려한 도로함몰 사고 복구 행동절차 및 체크리스트 개발	한국방재학회 논문집	성주현	Vol.18 No.5	한국방재학회	2018.10
도로공동 탐사를 위한 멀티채널 GPR 장비 비교연구	한국도로학회 논문집	윤진성	제20권 제6호	한국도로학회	2018.12
보도구간 지하매설물 조사에 대한 GPR적용성 평가	한국도로학회 논문집	이창민	제20권 제6호	한국도로학회	2018.12
처짐비를 활용한 도로함몰 위험도 평가 개선 연구	한국도로학회 논문집	김경수	제20권 제6호	한국도로학회	2018.12

(2) 특허 등록 및 출원 성과

○ 특허 출원 : 7건

번호	특허출원명칭	국명	출원정보		
			출원인	출원일	출원번호
1	동공 탐지용 복합장비	대한 민국	세종대학교 산학협력단	2016.04.07	10-2016-0042674
2	이동식 도로 지지력 평가장비	대한 민국	세종대학교 산학협력단	2016.04.07	10-2016-0042678
3	3차원 지표투과 레이더 신호 처리 장치 및 방법	대한 민국	세종대학교 산학협력단	2017.02.10	10-2017-0018772
4	지중탐사장치	대한 민국	주식회사 로드텍	2017.02.09	10-2017-0018032
5	3D 지표투과 레이더 신호 처리 장치 및 방법	대한 민국	세종대학교 산학협력단	2017.06.20	10-2017-0078026
6	지표투과 레이더의 데이터 처리방법	대한 민국	세종대학교 산학협력단	2017.10.24	10-2017-0138636
7	이동식 동적하중 재하장치 및 이를 이용한 아스팔트 도로 포장 상태 측정	대한 민국	세종대학교 산학협력단	2017.12.12	10-2017-0169945

○ 특허 등록 : 4건

번호	특허등록명칭	국명	등록정보		
			출원인	등록일	등록번호
1	3D 지표투과 레이더 신호 처리 장치 및 방법	대한 민국	세종대학교 산학협력단	2018.11.05	10-1917374
2	이동식 도로지지력 평가장비	대한 민국	세종대학교 산학협력단	2018.11.21	10-1922767
3	지표투과 레이더의 데이터 처리방법	대한 민국	세종대학교 산학협력단	2019.01.25	10-1944324
4	지중탐사장치	대한 민국	주식회사 로드텍	2019.02.01	10-1947015

(3) 소프트웨어 저작권 등록 성과

○ 소프트웨어 저작권 등록 : 총 18건

번호	저작권명	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명
1	3차원 지표투과레이더 데이터 로더	윤해범	2016.04.06	C-2016-008898	세종대학교 산학협력단
2	단일 레이더 칩 기반의 실시간 데이터 취득 프로그램	이종재	2016.04.06	C-2016-008899	세종대학교 산학협력단
3	RDD 데이터취득 프로그램	이종재	2017.01.25	C-2017-002230	세종대학교 산학협력단
4	도로노면 평탄성 분석을 위한 위치 및 방향 계측 프로그램	이종재	2017.02.01	C-2017-002903	세종대학교 산학협력단
5	동공자동탐사 프로그램	이종재	2017.12.07	C-2017-032151	세종대학교 산학협력단
6	균열자동탐사 프로그램	이현종	2017.12.07	C-2017-032160	세종대학교 산학협력단
7	도로함몰 위험도 평가 프로그램 (RSWS 1.0)	조윤범	2017.12.08	C-2017-032567	주식회사 유디엔에스
8	iCrack	이현종	2018.08.26	C-2018-022210	세종대학교 산학협력단
9	iCavity	이현종	2018.08.26	C-2018-022211	세종대학교 산학협력단
10	도로함몰 위험도 지리정보 분석 프로그램 (RSWS_GIS1.0)	조윤범	2018.11.05	C-2018-030256	주식회사 유디엔에스
11	도로함몰 관리 시스템	김인태	2018.10.30	C-2018-029580	명지대학교 산학협력단
12	도로차집분석기 (RDDanalyzer)	이현종	2018.11.19	C-2018-033356	세종대학교 산학협력단
13	균열자동탐사 프로그램_v2 (Pavement Crack)	이종재	2018.11.19	C-2018-033358	세종대학교 산학협력단
14	UndergroundAnalyzer_v2 (도로하부분석기)	이종재	2018.11.19	C-2018-033357	세종대학교 산학협력단
15	도로함몰 위험도 자료 변환 프로그램 (RSWS_CONVERT 1.0)	조윤범	2018.11.21	C-2018-034240	주식회사 유디엔에스
16	iCrack_v2(아이크랙)	이현종	2019.07.10	C-2019-019878	세종대학교 산학협력단
17	iCavity_v2(아이캐비티)	이현종	2019.07.10	C-2019-019879	세종대학교 산학협력단
18	도로함몰 위험도 분석 및 정보화 프로그램 (RSWS_GIS2.0)	주식회사 유디엔에스	2019.07.12	C-2019-019421	주식회사 유디엔에스

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 질적 성과 목표

(1) 1차년도 성과 지표 및 달성도

구분	핵심연구 성과 (level1)	단위성과 (level2)		1차년도 성과점검기준						해당 기관
				질적성과지표	목표 치	측정방법	검증방법	가중치	질적성과지표 달성도	
1차년도 (2015)	CTE 1	도로함몰 위험도 탐지 시스템	A-1 도로함몰 탐지용 복합탐지 시스템	① GPR 장비 및 기술 동향 조사	1권	동향조사 보고서 작성 여부	보고서	10	100%	세종대학교 UCF 광성지엠(주)로드텍
				② 도로 지지력 평가(RDD) 시작품 개발	1건	시제품 제작여부 및 특허출원	발표 특허출원	15	100%	
				③ GPR 실내시험 시험장비 구축	1건	실내시험 시험장비 구축여부	발표 (동영상)	5	100%	
	CTE 2	도로함몰 위험도 분석 프로그램	B-1 도로하부 탐지 데이터 처리 프로그램	① GPR 형식에 따른 구동 알고리즘 분석	1권	시뮬레이션 결과	발표 보고서	5	100%	세종대학교 UCF
				② 3D GPR 데이터 처리 소프트웨어 개발	2건	S/W 개발 건수	S/W등록증	15	100%	
				③ LRIS 영상분석 소프트웨어 개발	1건	도로 균열탐사 적용	발표 (동영상)	5	100%	
	CTE 3	도로함몰 위험도 평가 기술	C-1 도로함몰 발생 확장 모형	① 도로함몰 위험도 요인 평가 시험시스템 구축	2권	도로함몰 패턴분석 및 공동확장 가설 수립/ 도로함몰 모사 시스템 구축여부	보고서 발표 (동영상)	10	100%	단국대학교 동의대학교
				② 도로함몰 발생원인 선행연구 조사	1권	조사보고서 작성	보고서	5	100%	
				③ 도로함몰 발생과정 시뮬레이션	입도반영	시뮬레이션 결과	발표	5	100%	
		C-2 도로함몰 매커니즘 검증 위한 실험대형 테스트베드		① 도로함몰 모형 검증 항목 개발	1권	도로함몰 영향 항목 조사 작성	보고서	5	100%	한국건설기술연구원 서울과학기술대학교
				② 실험대형 포장가속시험 사례 조사	1권	실험대형 포장가속시험 사례 조사서 작성	보고서	5	100%	
				③ 공동과 도로파손 연관성 조사	1건	포장가속시험 시범 운영(시험시연)	발표 (동영상)	5	100%	
	CTE 4	재난 예방형 도로관리 시스템	D-1 도로함몰 위험도 분석 조서	① 도로함몰 현장조사(GPR, 지반조사)	1권	도로함몰 현장 조사서 작성	보고서	5	100%	인덕대학교 서울특별시
				② 도로함몰 DB 구축(GPR, 지반조사)	1권	도로함몰 DB 구축 보고서	보고서	5	100%	
			D-2 도로함몰 위험도 기준 지침(안) 및 복구대응 매뉴얼	① 도심지 실무 대응 매뉴얼(안) 제시	1권	도심지 실무 대응 매뉴얼 작성	보고서	5	100%	한국시설안전공단 서울특별시 탄탄(주)
			D-3 포장관리시스템 (PMS) 연계(안)	① 국내·외 PMS 운영현황 조사분석	1권	PMS 운영현황 조사분석 보고서	보고서	5	100%	명지대학교 동일기술공사

(2) 2차년도 성과 지표 및 달성도

구 분	핵심연구 성과 (level1)		단위성과 (level2)		2차년도 성과점검기준						해당 기관	
					질적성과지표	목표치	측정방법	검증 방법	가중치	질적성 과지표 달성도		
2 차 년 도 (2016)	C T E 1	도로 합몰 위험 도 탐지 시스 템	A-1	도로합몰 탐지용 복합탐지 시스템	①	도로합몰 복합탐지 시스템 시작품 제작(GPR, LRIS)	1건	시작품 제작여부 및 특허출원	시작품 제작 SCI논문	15	100%	세종대학교 UCF (주)지오메 카이엔지 (주)로드텍
					②	도로 지지력 평가(RDD) 시작품 개선 및 실험형 실험 검증	10km/hr	점검속도	학술발표 및 기술홍보	10	100%	
	C T E 2	도로 합몰 위험 도 분석 프로 그램	B-1	도로하부 탐지 데이터 처리 프로그램	①	GPR 영상분석 알고리즘 개선 및 검증	1.0m, 70cm/60%	탐지심도 및 크기/ 공동탐지 정확성	소프트웨어 등록	20	100%	세종대학교 UCF
					②	RDD 신호처리 알고리즘 개발 및 검증	24시간 이내	처리속도			100%	
					③	LRIS 영상분석 소프트웨어 개선 및 검증	3분(1차선 ,5m)/ 8%	균열탐지속도/ 균열오인식률	동영상 시연	5	100%	
	C T E 3	도로 합몰 위험 도 평가 기술	C-1	도로합몰 발생 확률 모형	①	도로합몰 위험도 요인 잠정 도출	1건/10회	도로합몰 공동확장 가설 검증/ 도로합몰 모사 시험 횟수	SCI논문 비SCI논문 보고서	5	100%	단국대학교 동의대학교
			②	도로합몰 발생과정 시뮬레이션	합몰발생 구현	원인별 시뮬레이션 수행	학술발표	5	100%			
			C-2	도로합몰 매커니즘 검증을 위한 실험형 테스트베드	①	테스트베드 기본 설계	1권	테스트베드 기본 설계도	보고서	5	100%	한국건설기 술연구원 서울과학기 술대학교
					②	실험형 포장가속시험 테스트베드 구축 및 기초시험	2건/2건	테스트베드 구축여부/ 도로합몰 모사 기초시험 건수	사진증빙 비SCI논문 학술발표	5	100%	
	C T E 4	재난 예방 형 도로 관리 시스 템	D-1	도로합몰 위험도 분석 조사	①	도로합몰 현장조사(계속)	1건	도로합몰 현장 조사서 작성	비SCI논문 기술홍보 학술발표	5	100%	인덕대학교 서울특별시
					②	도로합몰 DB 구축(계속)	1권	도로합몰 DB 구축보고서	보고서	5	100%	
					③	도로합몰 위험도 기준(잠정안) 제시	1건	위험도 기준 잠정안 작성	비SCI논문 교육성과 학술발표	5	100%	
			D-2	도로합몰 위험도 기준 지침(안) 및 복구대응 매뉴얼	①	도심지 실무 복구 매뉴얼(안) 제시	1건	도심지 실무 복구 매뉴얼 작성	보고서 비SCI논문 학술발표	5	100%	한국시설안 전공단 서울특별시 탄탄(주)
			D-3	포장관리시 스템 (PMS) 연계(안)	①	도로합몰 현장조사자료의 PMS 연계방안 연구	1건	PMS 연계방안 연구 보고서 작성	보고서 학술발표	5	100%	명지대학교 동일기술공 사

(3) 3차년도 성과 지표 및 달성도

구분	핵심연구 성과 (level1)	단위성과 (level2)		3차년도 성과점검기준						해당 기관
				질적성과지표	목표치	측정방법	검증방법	가중치	질적성과지표 달성도	
3차년도 (2017)	CTE 1	도로함몰 위험도 탐지 시스템	A-1	① 도로지리력 평가 시스템 운용 매뉴얼 작성	1권	매뉴얼 작성 여부	보고서	5	100%	세종대학교 UCF (주)지오메카 이엔지 (주)로드텍
				② 실대형 실험을 통한 시작품 하드웨어 개선 및 성능평가	15km/hr	점검속도	발표 및 시작품홍보 (동영상)	15	100%	
	CTE 2	도로함몰 위험도 분석 프로그램	B-1	① RDD 신호분석 알고리즘 개발 및 검증 (계속)	1.2m, 60cm/70%	탐지심도 및 크기/공동탐지 정확성	발표 및 시작품홍보 (동영상)	20	100%	세종대학교 UCF (주)유디엔에스
				② 머신러닝/데이터 마이닝을 통한 공동 자동진단 알고리즘 개발 및 검증	18시간 이내	처리속도	소프웨어홍보 (동영상)		100%	
				③ 도로함몰 위험도 평가 소프트웨어 개발	1건	S/W 개발 건수	S/W 등록증	10	100%	
	CTE 3	도로함몰 위험도 평가 기술	C-1	① 도로함몰 위험도 요인 정량화	1건/15회	도로함몰 잠재적 위험도 요인 도출/도로함몰 모사 시험 횟수	보고서 및 논문	5	100%	단국대학교 동의대학교
				② 도로함몰 확장 시뮬레이션	함몰확장 구현	함몰 확장 시뮬레이션 수행	발표(동영상)	5	100%	
				③ 도로함몰 발생 파괴기준 수립	1권	파괴기준 분류 보고서	보고서	5	100%	
		도로함몰 매커니즘 검증 위한 실대형 테스트베드	C-2	① 도로함몰 분석 및 평가를 위한 계측 시스템	1권	계측 시스템	보고서	5	100%	한국건설기술연구원 서울과학기술대학교
				② 환경을 고려한 실대형 포장기속시험 수행	2건/2건	테스트베드 구축건수/ 도로함몰 모사 시험건수	사진증빙 발표(동영상)	5	100%	
	CTE 4	재난 예방형 도로 관리 시스템	D-1	① 도로함몰 패턴 정량화 및 위험도 기준 분석	1권	도로함몰 패턴분석 보고서	보고서	5	100%	인덕대학교 서울특별시
				② 도로함몰 현장조사(계속)	1권	도로함몰 현장 조사서 작성	보고서		100%	
				③ 도로함몰 DB 구축(계속)	1권	도로함몰 DB 구축 보고서	보고서		100%	
				④ 도로함몰 위험도 기준(수정안) 제시	1권	위험도 기준 수정안 작성	보고서	5	100%	
		D-2	도로함몰 위험도 기반 복구 매뉴얼(안)	① 복구 매뉴얼 제시(도심지, 국도/지방도)	2권	위험도 기반 복구 매뉴얼 작성	보고서	5	100%	한국시설안전공단 서울특별시 (주)유디엔에스
		D-3	포장관리 시스템 (PMS) 연계(안)	① PMS 정량화 지표 연계 논리 연구	1권	연구 보고서 작성	보고서	5	100%	명지대학교 동일기술공사

(4) 4차년도 성과 지표 및 달성도

구 분	핵심연구 성과 (level1)		단위성과 (level2)		4차년도 성과점검기준							해당 기관
					질적성과지표		목표치	측정방법	검증 방법	가중치	질적성 과지표 달성도	
4 차 년 도 (2018)	CTE 1	도로함몰 위험도 탐지 시스템	A-1	① 복합 탐지시스템 시작품 운용 매뉴얼 작성	1권	매뉴얼 작성 여부	보고서	5	100%	세종대학교 UCF (주)지오메 카이엔지 (주)로드텍		
			② 실대형 실험을 통한 시작품 하드웨어 개선 및 성능평가	20km/hr	점검속도	발표 및 시작품홍보 (동영상)	5	100%				
		A-2	① 개발된 자동탐지 기술 신뢰성평가 지침(안)	1권	지침서 작성여부	보고서	5	100%	한국건설기술연구원			
	CTE 2	도로함몰 분석 프로그램	B-1	① 지하공동 자동진단 소프트웨어 패키징	1건	S/W 개발 건수	S/W 등록증	15	100%	세종대학교 UCF (주)유디엔 에스		
				② 실대형 실험을 통한 소프트웨어 검증 및 성능평가	1.5m/50cm/80%/12시간/30km	탐지심도 및 크기/공동탐지 정확성/처리속도	발표 및 소프트웨어 홍보	15	100%			
				③ 개발 프로그램 사용 매뉴얼 작성	1권	매뉴얼 작성 여부	보고서	5	100%			
	CTE 3	도로함몰 위험도 평가 기술	C-1	① 도로함몰 발생 확장 모형	1권	도로함몰 발생·확장 모형 개발	보고서 및 논문	5	100%	단국대학교 동의대학교		
			C-2	① 도로함몰 매커니즘 검증	1권	도로함몰 모형 검증 보고서	보고서	5	100%	한국건설기술연구원 서울과학기술대학교		
				② 도로함몰 위험도 평가 조서	1권	도로함몰 위험도 평가 보고서	보고서	5	100%			
	CTE 4	재난 예방형 도로관리 시스템	D-1	도로함몰 위험도 분석 조서	① 개발된 시작품 이용 도로함몰 현장조사	1권	현장조사 보고서	보고서	5	100%	인덕대학교 서울특별시	
					② 도로함몰 위험도 분석 조서 안 제시	1권	위험도 분석 조사 안 작성	보고서	10	100%		
			D-2	도로함몰 위험도 기준 지침(안) 및 복구대응 매뉴얼	① 도로함몰 대응/복구 실무 매뉴얼 안 제시	1권	대응/복구 매뉴얼 안 작성	보고서	10	100%	한국시설안전공단 서울특별시 (주)유디엔 에스	
					D-3	① 포장관리시스템 (PMS) 연계(안)	1권	도로함몰 DB 적용 PMS(안) 제시	1권	도로함몰 적용 PMS 적용 보고서	보고서	5

(5) 5차년도 성과 지표 및 달성도

구분	핵심연구 성과 (level1)	단위성과 (level2)	5차년도 성과점검기준							해당 기관
			질적성과지표		목표치	측정방법	검증 방법	가중치	질적성 과지표 달성도	
5차년도 (2019)	C T E 1	도로함몰 위험도 탐지 시스템 A-1 도로함몰 탐지용 복합탐지 시스템	①	시작품 현장적용	1권	용역수행 보고서	보고서	20	100%	세종대학교
			②	시작품 성능 고도화	60km/hr	포장두께 조사속도	현장시연	20	100%	
	C T E 2	도로함몰 위험도 분석 프로그램 B-1 도로함몰 위험도 분석 프로그램	①	프로그램 현장적용	1건	용역수행 보고서	S/W 등록증	20	100%	세종대학교 (주)유디엔 에스
			②	포장두께 측정 알고리즘 개발	90%	포장두께 측정 정확도	현장코어를 통한 포장두께 측정 및 비교	20	100%	세종대학교
					12시간/1일데이터	분석속도				
	C T E 4	재난 예방형 도로관리 시스템 D-1 도로함몰 위험도 기준 지침(안) 및 복구대응 매뉴얼	①	도로함몰 대응/복구 실무 매뉴얼 안 제시	1권	대응/복구 매뉴얼 안 작성	보고서	20	100%	한국시설안전공단

(6) 질적 성과목표 달성여부

- 1~5차년도의 질적 성과 목표는 달성 완료하였으며, 각 성과지표의 연구내용은 앞 절의 내용과 부록의 상세보고서를 참조
- 시작품과 자동분석 프로그램의 현장적용은 용역수행 보고서가 아닌 현장적용 보고서로 같음
- 현재 본 연구과제의 개발기술을 이전받은 교내벤처회사를 통해 시작품 및 자동분석 프로그램을 활용하는 4건의 용역사업을 수주 완료 및 과업 수행 중

나. 정량적 성과 목표

(1) 총괄 정량적 성과 목표 및 달성도

구분		목표	누적달성	달성도	비고
SCI 논문 게재		9	9	100%	-
비 SCI 논문 게재		13	23	100%	초과달성
국내·외 학술발표		19	63	100%	초과달성
국내 특허 출원		2	7	100%	초과달성
국내 특허 등록		2	4	100%	초과달성
등록·기타 대상 성과물	소프트웨어	3	18	100%	초과달성
기타	시작품	1	7	100%	초과달성
	신기술 등록	1	(1)	0	등록추진 중
	성과 홍보	2	28	100%	초과달성
	교육성과	1	14	100%	초과달성
	테스트베드 구축	5	10	100%	초과달성
	저작(매뉴얼 등록)	4	4	100%	-

(2) 정량적 성과목표 달성여부

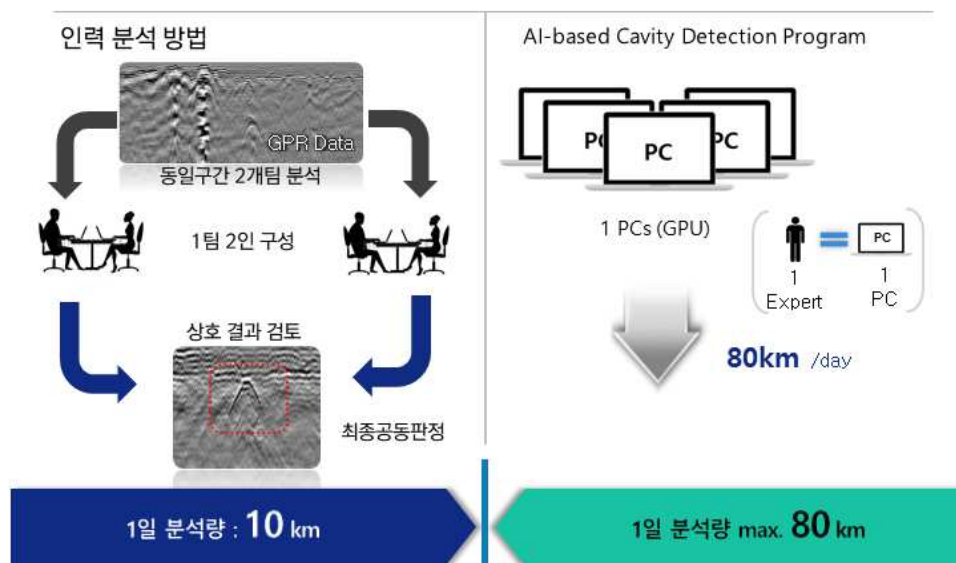
- 신기술 등록 1건 달성 건수 부족
- 신기술의 경우 주관기관인 세종대학교 및 교내벤처회사가 등록을 추진 중에 있으나 연구과제 종료 시점까지 달성이 어려울 것으로 판단됨
- 2019.10월 중 신기술 신청서 제출 예정
- 비SCI급 논문게재, 특허 출원 및 등록, 소프트웨어 등록 건수는 모두 초과 달성하였으며, 특히 특허등록 건수 는 총 4건으로 기존 계획 했던 목표 대비 200% 달성완료

다. 관련 분야 기여도

- 본 연구과제에서는 도로함몰 및 공동 탐사, 자동 분석, 위험도 평가, 유지관리 분야에 대한 연구를 수행하였으며 또한 도로 표면결함 자동분석, 연속식 지지력 측정 기술에 대한 기술개발을 수행하였음
- 이에 따라 개발된 기술의 수준 및 관련 분야에 대한 기여도는 다음과 같음

(1) 도로함몰(도로하부 공동) 탐사 및 자동분석기술

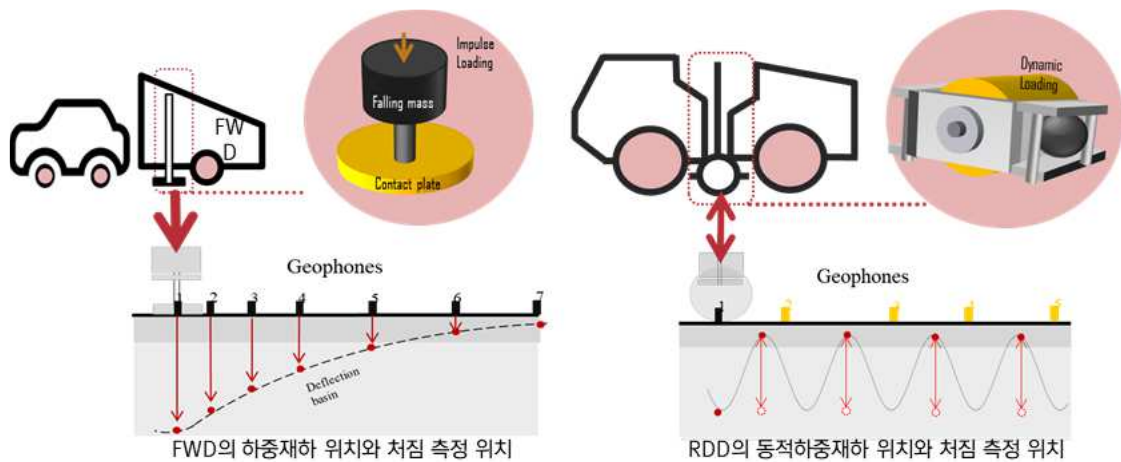
관련분야	기존 기술의 수준	개발 기술의 수준
공동탐사 및 분석기술	- 차량형 3D GPR이 탑재된 조사차량을 통한 도로하부 공동탐지 - 조사 데이터는 인력분석으로 수행됨 - 동일구간에 대하여 2개 팀이 분석하고 상호 결과 검토 (1팀 2인 분석원) 1일 분석량 평균 10km - 현업에서 공동탐지 정확도는 80% 수준	- 복합 탐지 장비를 통해 도로하부 공동과 포장상태 데이터를 동시 조사가 가능 - 인공지능 자동분석 프로그램을 통해 사람의 개입 최소화 가능 - 자동분석 결과를 분석원 1인이 검토 1일 최대 분석량 80km (1대 GPU로 8시간 구동 기준) - 인력분석과 동등한 정확도 수준 - 현장검증을 통한 성능 검증 완료
도로포장 표면결함 분석기술	- 포장상태조사차량(로드스캐너)을 통한 도로표면조사 - 인력분석을 통한 균열분석으로 1일 분석량 인당 7km 수준 - 균열의 심각도 고려가 어려움 - 분석원에 따라 주관적 판단이 개입가능	- 복합 탐지 장비를 통한 조사 - 인공지능 자동분석으로 1일 분석량 최대 170km 수준 - 균열의 심각도 상, 중, 하로 자동고려 - 인공지능 분석으로 객관적 분석결과



<공동탐사 기술의 성능 비교>

(2) 이동식 도로지지력 평가 기술

관련분야	기존 기술의 수준	개발 기술의 수준
도로지지력 평가기술	- FWD를 통한 정적 지지력 측정기술 - 도로포장 전반의 지지력 측정이 어려움 - 도로포장의 동적특성을 측정할 수 없어 하중 주기에 따른 영향을 탄성계수 역산에 고려할 수 없음	- RDD를 통한 동적 이동식 도로지지력 측정기술 - 도로포장 전반의 지지력을 프로파일 형태로 측정 가능 - 도로포장의 동적특성을 측정하여 하중 주기에 따른 영향을 탄성계수 역산에 고려 가능



<도로지지력 평가기술의 개념 비교>

(3) 도로함몰 위험도 평가 및 관리 기술

관련분야	기존 기술의 수준	개발 기술의 수준
도로함몰 위험도 등급	- 일본식, 서울식 공동관리등급 존재 - 공동 관리 경험에 의해 결정된 등급 - 일본식 관리등급의 경우 포장두께를 고려할 수 없음 - 서울시 관리등급은 포장두께를 고려 가능하나 탄성계수를 고려하지 못함	- 모형토조시험, 입자기반해석, 유한요소해석, 실험형 시험검증을 통해 개발된 과학적 위험도 등급 - 포장두께와 탄성계수를 고려한 최초의 위험도 등급
도로함몰 및 공동의 관리·복구 절차	- 통일 되어 있는 복구절차 매뉴얼 전무 - 서울시의 경우 각 도로사업소 별 도로함몰 및 공동 관리·복구 절차가 상이 - 최근 소규모 공동의 경우 채움재를 통한 현장복구를 하는 추세 - 서울시의 방법은 도심지에만 적합함	- 도시규모, 도심지/도심외곽지에 따라 분리된 관리매뉴얼 작성 - 대도시뿐만 아니라 일반국도, 중소도시에서 활용 가능 - 전국 각 지자체에 보급 예정

4. 연구개발성과의 활용 계획

가. 연구개발성과의 활용방안

연구결과물	활용방안	활용기관
도로함몰 위험구간 복합 탐지 시스템	도로 하부 점검	- 서울시, 한국시설안전공단 - 진단 회사
	기술이전	- 세종대학교 산학협력단 - 진단 회사 및 장비 회사
	첨단 복합 탐지 시스템을 이용한 도로 점검 전문 회사 설립	- 세종대학교 교내벤처회사 설립 - 진단 회사
	안전진단 용역 수행	진단 회사
도로함몰 진단 프로그램	도로 하부 점검 데이터 분석	- 서울시, 한국시설안전공단 - 진단 회사
	기술이전	- 세종대학교 산학협력단 - 소프트웨어 개발 회사 및 진단 회사
	전문 분석 시스템을 갖춘 컨설팅 회사 설립	- 세종대학교 산학협력단 등 관련연구진 - 컨설팅 회사
	소프트웨어 판매 및 안전진단 용역 수행	진단 회사 및 분석 컨설팅 회사
도로함몰 발생 모형 및 실대형 TB	추가 연구 제안 도로함몰 원인 및 발생 확장 모형에 대한 기초연구 추진	연구소, 대학 등의 연구기관
	실대형 TB를 이용한 관련 실험 및 추가 연구 추진	- 한국건설기술연구원 - 대학, 산업체 등 실험 의뢰 기관
지침, 매뉴얼	도로함몰 위험도 기준 지침 및 복구 대응 매뉴얼을 이용한 도로관리	- 국토부, 서울시 등 도로관리주체 - 한국시설안전공단 등 도로점검 기관
	포장관리시스템 (PMS) 개선	- 한국건설기술연구원, 서울시 등 PMS 구축 활용 기관 - DB 관리 및 PMS 구축 전문 업체

나. 관련시장 현황 분석

○ 국내 시장 현황 분석 (참조 : 공공기관 알리오(ALIO), 서울시 서울 계약 마당, 지하 안전관리에 관한 특별법 제 34조)

- 국내시장은 현재 건설침체기로 인해 신규건설 시장규모는 점차 감소 추세
- 그러나 인프라 구조물 노후화로 인해 향후에는 운영 및 유지보수 분야가 주요 시장이 될 것으로 전망됨
- 특히 도로의 경우 작년 2017년 한해 서울시는 공동조사에 약 35억원, PMS조사에 약 49억원의 용역을 발주하였으며, 국토교통부는 국도조사에 약 2억(건설연 자체조사 제외), 한국도로공사에는 약 22억원의 고속도로조사 용역을 발주
- 올해에도 7월 기준 총 87억원 이상의 공동 및 PMS조사 용역이 이미 발주된 상황
- 작년 지하안전에 관한 특별법(2018.01)이 제정되었으며, 지하시설물관리자 또는 시장·군수·구청장은 지하안전관리 실태점검을 정기적으로 수행하여야 함 (안전점검대상 지하시설물 및 주변 지반을 중심으로 - ① 지반침하 육안조사 : 연 1회 이상, ② 지표투과레이더 탐사를 통한 공동탐사 : 중전의 조사 완료일을 기준으로 매5년마다 1회 이상)
- 이와 같이 국내 도로포장 상하부 관련 조사·분석시장은 매년 꾸준히 확대될 것으로 판단됨

○ 국외 시장 현황 분석 (참조 : 일본 지오서치사 자료 인용)

- 일본 지오서치사는 일본 전 국토 대부분의 공동조사를 맡아 수행하는 대표적인 회사로써 서울시 등 다양한 국내 공동탐사 업체가 이를 벤치마킹 함
- 이 회사에 따르면 작년 한해 도로, 교량, 지하구조물 조사용역으로 31억 1백만 엔(한화 310억원)의 매출성과를 올렸으며, 그 외의 다른 조사업체 매출을 고려한다면 일본의 공동조사 및 분석 시장은 국내에 10배 이상(약 400억원) 될 것으로 판단됨
- 미국의 경우 도로포장 노면결함 분석을 대부분 중국회사에 외주를 주어 해결하고 있으며, 대부분 인력분석으로 수행되고 있음
- 인공지능 기반 자동 균열 분석 프로그램을 통해 인력분석 방식보다 저렴한 비용으로 분석이 가능하므로 해당 시장의 진출이 가능할 것으로 판단됨

국내·외 관련시장 특성		
구 분	국 내	국 외
시장상태(독점/경쟁)	경쟁	독점
안 전 성	고	고
지 속 성	고	고
성 장 성	고	고

국내·외 관련시장 시장규모 추정 (백만원)				
구 분	2019	2020	2021	2022
세계시장	40,000	42,000	44,000	46,000
국내시장	10,800	12,000	17,000	22,000

다. 기술 활용 전략

- 교내벤처회사, 과제 참여 기업, 도로포장 상·하부 진단회사의 기술 실시 계약 수립
- 국토교통부 신기술 등록을 통한 기술 경쟁력 확보, 관련시장의 우선권 확보
- 도로포장 상하부 복합탐지 시스템인 iScanner의 공동 및 도로상태 동시조사 기능의 장점(비용적, 시간적 절약)과 자동분석 프로그램을 각 지자체와 관리주체를 대상으로 적극 홍보하고 이를 바탕으로 조사용역 유치
- 인공지능 기반 자동 공동탐지 프로그램 iCavity와 자동 균열탐지 프로그램 iCrack을 활용하여 조사데이터 분석 신뢰도를 확보하고 분석업무에 대한 인건비 절약을 통한 순이익 극대화
- 소프트웨어 패키징을 통한 라이선스 판매 실시
- 일본 등 해외에 진출하여 기술홍보를 실시하고 현지 협력회사와의 협업을 통한 영업이익 확대
- 시멘트 콘크리트 포장 노면결함 분석이 가능하도록 iCrack 프로그램을 업그레이드하고 이를 통한 미국 포장 유지관리 시장 진출

라. 후속 연구과제 참여 현황

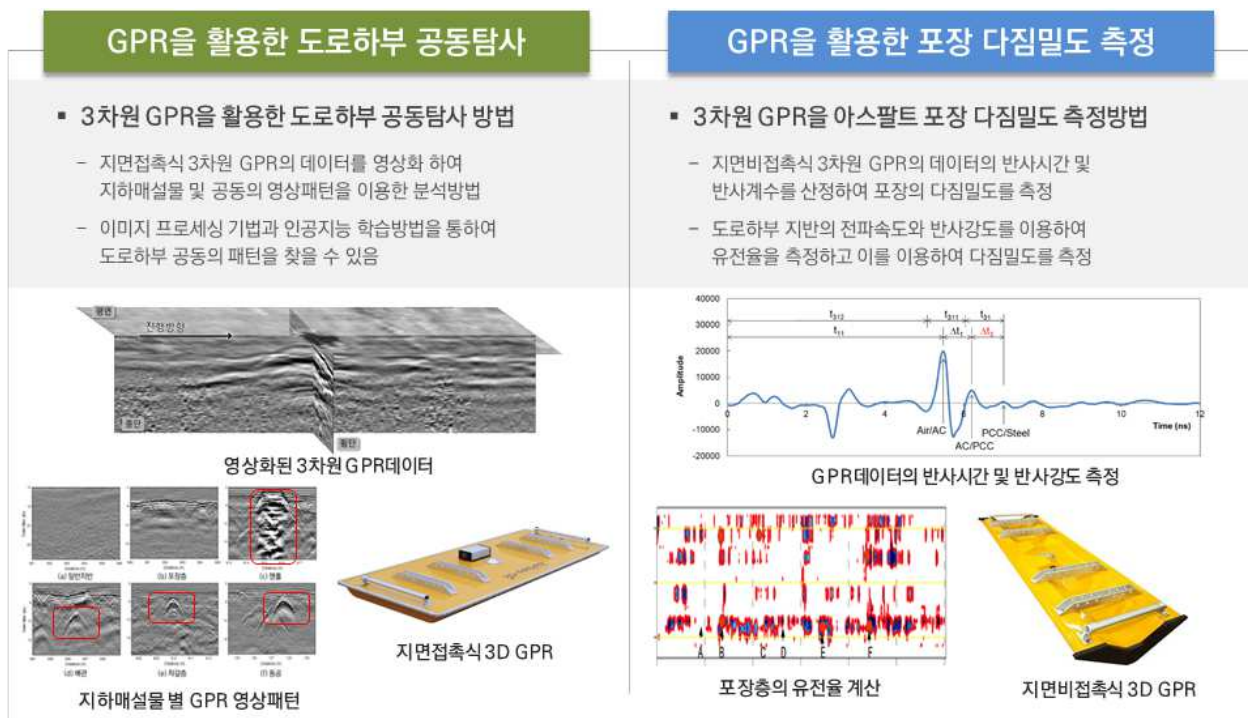
- 주관기관 교내벤처회사의 국가연구과제 참여현황
 - 연구과제명 : IoT 기술을 활용한 도로포장 현장 품질관리 시스템 개발
 - 연구기간 : 2019.04.30.~2023.12.31. (1~5차년도)
 - 참여형태 : 2-2세제부 공동연구기관 (1차년도 정부출연금 : 113,000 천원)
 - 세제부과제명 : IoT기반 아스팔트 콘크리트 현장 품질관리 핵심 모듈 구성장치 시제품 개발
- 후속연구과제에 대한 기존과제 연구성과 활용계획
 - 주관연구기관 세종대학교 산학협력단과 포괄적 기술실시계약을 통해 교내벤처회사인 아이리스 테크놀로지가 후속 국가연구과제에 본 과제의 연구성과를 활용 중
 - 아스팔트 포장의 다짐밀도 측정을 위해 도로함물 과제에서 구축한 지면비접촉식 (Air-coupled) 3차원 GPR센서 만을 활용하며, 후속과제에서 전용 시제품 차량을 개발
 - 아스팔트 포장 다짐밀도 측정 기술은 기존 연구의 분석기술과는 방향이 다른 새로운 연구
 - 본 기술이 완성되면 포장의 다짐밀도 측정이 가능하여 코어채취가 없는 시공품질 측정이 가능하며 이를 확장하면 교면포장 상판의 열화현상까지 측정이 가능할 것으로 판단됨

○ 후속연구 관련 국내 · 외 기술수준

- 국내의 경우 PQI 또는 방사선 측정장비를 통하여 1점 다짐밀도 측정방식을 사용 중이나 정확성이 부족하며, 포장층 전면 다짐밀도 측정 관련연구는 전무
- 최근 미국에서 3차원 GPR을 활용한 포장층 전면 다짐밀도 측정 기법을 연구하였으나, 이는 주변 환경에 의한 전파간섭이 통제된 실내 및 테스트베드에서 핸드형 카트로 수행된 연구로 실용화 기술수준에 도달하지 못함
- 기술의 실용화를 위해 다짐밀도 정밀 측정 기법과 전파간섭에 의한 노이즈 차폐, 흡수 기술을 연구 및 적용 필요
- 전파간섭 외에도 센서를 차량에 탑재할 경우 발생하는 진동과 도로 평탄성 불량에 의해 발생하는 오차를 제거하는 연구 필요

○ 본 연구과제와 후속 연구과제의 차이점

- 본 연구과제의 GPR 데이터 분석 방법은 GPR 데이터의 영상화를 통해 영상기반의 인공지능 분석임
- 그러나 후속 연구과제의 경우 GPR에서 방사되는 레이더파의 반사시간과 반사계수를 활용하는 신호처리 방식의 분석방법
- GPR 측정 데이터를 분석하는 방법론이 전적으로 다른 연구임



마. 기대효과

○ 기술적 측면

- 재해/재난에 대한 예방적 도로 관리 기술의 확보
- 기존 장비 외에 도로하부구조 점검을 위한 첨단 시스템 구축으로 세계적인 기술 수준 확보
- 복합 탐지 시스템을 활용하므로 위험도 평가의 신뢰성이 높아짐
- 분석 기술 자체 노하우 확보
- 손쉽게 사용 가능한 매뉴얼 제작으로 엔지니어 교육이 신속/용이
- 계측-분석-도로공학을 연계하는 융합 공학 분야의 발전
- 미래 건설 산업의 변화에 대처하는 첨단기술과 이와 관련한 연구 인력의 육성에 기여

○ 사회·경제적 측면

- 국가적인 차원에서 최근 빈번히 발생하고 있는 도로함몰 사고를 예방하여 국민 불안 해소
- 도로함몰 사고로 인한 인명손실 및 물적 피해 감소
- 안전 대한민국 건설에 기여하여 국가신임도를 높여 산업경쟁력을 강화하는데 기여
- 관련 기술에 대한 대외 의존도를 감소시킴으로서 국가의 외화낭비를 방지
- 도로하부 공동의 유무 이외에도 도로지지력 판정을 통해 효율적인 도로유지관리 및 보수·보강 계획을 수립할 수 있으므로, 사회간접자본의 수명 연장에 따른 경제성 제고
- 첨단 점검 시스템 산업의 국산화로 기술 역수출
- 복합 탐지 시스템을 활용한 도로 하부 점검 시장 개척

○ 전략적 측면

- 현재 한국시설안전공단 및 서울특별시에서 구축하고자 하는 점검 장비와 연계하여 분석 및 도로관리를 지원하는 종합적인 체계를 마련
- 핵심 부품이 아닌 ‘잘 조립한 핸드폰’ ‘전략으로 세계 수준의 선도 기술 확보
- 도로 관리 전문 인력 양성에 크게 기여 (현재는 분석 기술의 해외의존도가 매우 높음)
- 도로함몰 사고 증가에 따라 관련 연구개발이 활발히 수행되고 있음. 타 연구개발 사업 성과를 연계 활용하여 기술개발 속도 및 완성도를 높일 수 있음
- 서울시, 한국시설안전공단 등 도로관리/점검 주체가 직접 연구개발사업에 참여하여 도로관리/점검기관의 요구에 맞는 실용적인 연구개발 성과 도출

바. 향후 연구 방향

(1) 도로함몰 위험도 기준 고도화 연구

- 본 연구에서는 실무자의 실용적인 위험도 기준 사용을 위해 위험도를 평가하는 인자를 공동의 수평 길이(장축), 심도, 아스팔트층 두께로 한정하였음
- 그러나 공동이 발생한 도로포장의 위험도를 정확하게 평가하기 위해서는 공동의 심도, 체적, 발생원인, 도로포장의 지지력, 두께, 지반의 물성, 수분함량 등의 다양한 인자를 고려하여야 함
- 따라서 향후 다양한 인자를 고려한 정확한 도로함몰 위험도 산정 연구가 필요

구분	기존 연구	향후 연구 방향
위험도 산정을 위한 고려인자	• 도로하부 공동의 심도 및 수평길이 • 아스팔트 층두께	• 공동의 체적, 형상 • 도로포장 각 층 두께, 공용년수 • 아스팔트 층 지지력, 혼합물 물성 • 지질지반 특성(입자분포, 수분함량 등) • 지하수 특성 • 기후 등의 지역적 특성
연구목적	공동 관리 측면의 위험도 등급 산정	심층적인 도로함몰 위험도 평가

(2) 포장두께 측정 기술 검증 개선 방향

- 본 연구에서는 개발된 시작품의 성능 고도화를 위하여 아스팔트 층 두께 측정기술을 제시하였으며, 실대형 테스트베드를 활용하여 포장 두께 측정 오차를 10% 수준으로 검증
- 그러나 테스트베드에 시공된 시험포장은 아스팔트 포장 두께가 일정하고 동일한 혼합물, 동일한 지반조건을 가지고 있어 포장두께 측정기술을 정확하게 검증하기에 한계가 있음
- 따라서 아스팔트 혼합물, 입도 분포, 두께 등의 이력정보가 존재하는 현장시공 포장구간을 선정하고 개발된 기술을 재차 검증할 필요가 있음

구분	기존 검증실험의 한계	향후 연구 방향
검증실험	• 단일 조건의 시험포장을 활용하여 포장두께 측정기술을 검증하여 정확도 측정 방법의 신뢰도가 부족	• 아스팔트 혼합물, 입도, 포장두께, 노후화 정도가 다른 다양한 현장시공 포장구간을 선정하여 개발된 두께 측정기술을 재검증 필요

붙임. 참고문헌

1. 국토연구원, 기후변화에 따른 국토취약성 분석과 적용방안(1차년도), 주요 국가기반시설 재해 현황.
2. 국토해양부 (2010), 도로안전 개선사업 추진, 국토해양부 도로정책자료.
3. 권순민 외 2명 (2002), 동결심도를 고려한 포장 하부구조 개선방안 연구, 한국건설기술연구원.
4. 김성민, 이석근 (2008), “도로포장 표면평탄성에 따른 주행차량의 동적 하중 변화 특성” 한국도로학회 논문집, 제10권 제1호, pp. 135~144.
5. 김정호 (2010), "해외 도로성능 시험장 현황 및 국내도입 필요성", 도로정책 BROEF 제34호.
6. 김창훈 (2010), 지하굴착 주변에서의 지하수 영향범위 설정에 관한 연구, 석사학위논문, 서울시립대학교.
7. 류명찬 외 7명 (1996), 아스팔트 포장의 유지관리 시스템 개발에 관한 연구, 한국건설기술연구원.
8. 박희문 (2006), 아스팔트 포장체 구조적 적정성 및 상태평가 시스템 개발 연구, 한국건설기술연구원.
9. 서울시청 (2012), 서울시 첨단과학 장비로 스마트한 도로관리, 서울시청 보도자료.
10. 유현수 (2001), 노면의 건설 및 유지관리를 위한 FWD의 개발, 한국생산기술연구원.
11. 유현수 (2001), 도로구조물의 건설 및 유지 관리를 위한 시스템 개발: 노면의 건설 및 유지관리를 위한 FWD의 개발, 한국건설기술연구원.
12. 이관호 외 7명 (1997), FWD 정밀해석 및 포장구조체 하부구조 평가방법 연구(III), 한국건설기술연구원.
13. 이세현, 서원석, 추연옥, 김동수 (2008), “다짐지반의 모관흡수력 변화에 따른 탄성계수 평가를 위한 VPPE-BE 시험 시스템 개발”, 한국지반공학회 논문집, 24권 5호, pp. 117~127.
14. 이수곤 외 7인 (1992), 도로와 가옥주변의 절취면 붕괴위험 평가 및 보강대책 연구, 한국지질자원연구원.
15. 이찬중 (2009), 터널의 지하수 유출이 도심지하수 흐름에 미치는 영향, 석사학위논문, 동아대학교.
16. 이창호, 윤형구, 김준한, 이종섭 (2008), "전단파와 전자기파를 이용한 연약지반의 실내 압밀 특성 평가", 한국지반공학회논문집, 제24권 제8호, pp. 25~34.
17. 백종은, 최재순 (2014) GPR을 이용한 도로하부 탐사기술, 한국도로학회, 도로 16(3), 2014.9, 11-16
18. 정진덕, 이진호, 최명진, 이재선, 정종홍 (2015) 접촉식 GPR을 이용한 도로포장 침하구간 조사, 대한토목학회, 대한토목학회 학술대회, 2015.10, 115-116
19. 김연태, 김제원, 김부일, 박희문 (2015) GPR 장비를 이용한 일반국도 하부동공 의심구간

- 현장조사, 한국도로학회, 한국도로학회 학술발표회 논문집, 2015.10, 101-101
20. 이대영, 최연우, 최현 (2015) 도로함몰 원인조사를 위한 노면하부 동공조사, 대한토목학회, 대한토목학회 학술대회, 2015.10, 217-218
 21. 이대영, 김동민, 오재일, 윤종열 (2015) 하수관로 손상에 기인한 지반침하 평가기법 연구, 대한토목학회, 대한토목학회 학술대회, 2015.10, 215-216
 22. 오동욱, 공석민, 이대영, 유용선, 이용주 (2015) 하수관 누수에 의해 발생하는 공동 주변 지반의 거동에 대한 가소성유동화토의 보강효과, 한국지반환경공학회, 한국지반환경공학회논문집 16(12), 2015.12, 13-22
 23. 이성진, 이진욱, 정영남, 조호진, 임유진 (2015) 수치해석을 통한 도시철도 하부지반 공동의 변위발생 민감도 분석, 한국철도학회, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2015.10, 1480-1485
 24. 이성진, 이진욱, 조호진, 박재범, 임유진 (2015) 도시철도 하부지반 공동발생구간에 대한 LWD시험의 적용성 분석, 한국철도학회, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2015.5, 1095-1100
 25. 최준성, 김진오, 이찬희 (2015) 국내외 사례분석을 통한 도로함몰 구간의 조사 기법 구축, 한국도로학회, 한국도로학회 학술발표회 논문집, 2015.10, 86-86
 26. 백종은, 김부일, 홍재청, 박희문 (2014) 지표투과레이더를 이용한 도로 함몰 현장 조사, 한국도로학회, 한국도로학회 학술발표회 논문집, 2014.9, 42-42
 27. 이종범, 이정상, 정혁상, 천병식 (2015) 도로함몰 시 뒤통재인 유동액상화토 개발, 한국지반환경공학회, 한국지반환경공학회 학술발표회논문집, 2015.9, 323-326
 28. 일본도로학회 (2007), 투수성 포장 가이드북, 일본도로학회 포장위원회 포장설계시공 소위원회.
 29. 한국건설기술연구원 (2004), 아스팔트 포장체의 구조적 적정성 및 상태 평가 시스템 개발,
 30. 한국도로공사 (2006), 포장의 기능 및 구조적 평가기법 개발을 통한 사용성 및 내구성 진단, 한국도로공사 도로교통기술원.
 31. 박정준, 한중근, 유승경, 홍기권 (2015), 지반 내 공동 탐사를 위한 GPR 기술현황, 한국토목섬유학회지 14(3) p.12-17
 32. 김동규 (2015), 지중탐지 레이더 기술동향 분석, 한국전자통신연구원 ICT 융합기술 R&D동향 특집, p.22-27
 33. 강재모, 최창호, 김진영 (2015). 하수관내 공동 탐지를 위한 최적 물리탐사 기술에 대한 연구. 대한토목학회 학술대회, p.121-122.
 34. 최연우, 최현, 김종민 (2015). 서울시 동공발생 원인과 도로함몰 대응방안, 한국도로학회 학술발표회 논문집, p.107-107.
 35. 최연우(2018), 도심지 도로의 함몰 특성과 위험도 평가에 관한 연구, 세종대학교 대학원
 36. 박영진, 김관호, 이원태 (2005). 초광대역 임펄스를 이용한 고해상도 지반탐사 이미지 레이더, 전자공학회논문지-TC, 42(11), p.101-106.
 37. 이종출, 김희규, 장호식, 이현재 (2005). 효율적인 시공을 위한 지하공동구 위치 해석, 대한

토목학회 학술대회, p. 4655-4658.

38. 공혜정 (2013). 2005). 지면투과레이더(GPR) 기반 지뢰탐지 시스템을 위한 새로운 전처리 기법, 석사학위논문, 한국과학기술원
39. 서울특별시 (2015) “서울시 도로함몰 관리정책” .
40. 서울특별시 (2015) “도로함몰 예방을 위한 동공발생 매커니즘과 대응방안” .
41. 서울특별시 (2014) “석촌지하차도 동공 발생원인과 도로함몰 특별관리 대책” .
42. 서울특별시(2017), “서울시 도로포장 유지관리 기본계획”
43. Gurbuz, A.C., 2012. Determination of background distribution for ground-penetrating radar data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 9 (4), 544-548.
44. Hu, J., et al., 2016. Pavement thickness and stabilised foundation layer assessment using ground-coupled GPR. Nondestructive Testing and Evaluation, 31 (3), 267-287.
45. Kassem, E., et al., 2016. Application of ground-penetrating radar in measuring the density of asphalt pavements and its relationship to mechanical properties. International Journal of Pavement Engineering, 17 (6), 503-516.
46. Kaur, P., et al., 2016. Automated GPR rebar analysis for robotic bridge deck evaluation. IEEE Transactions on Cybernetics, 46 (10), 2265-2276.
47. Krizhevsky, A., Sutskever, I., and Geoffrey, E. H., 2012. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. NIPS' 12 Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems, 1, 1097-1105.
48. Lameri, S., et al., 2017. Landmine detection from GPR data using convolutional neural networks. In: 25th European signal processing conference, 538-542.
49. Le Bastard, C., et al., 2007. Thin-pavement thickness estimation using GPR with high-resolution and superresolution methods. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45 (8), 2511-2519.
50. Maas, C. and Schmalzl, J., 2013. Using pattern recognition to automatically localize reflection hyperbolas in data from ground penetrating radar. Computers and Geosciences, 58, 116-125.
51. Nunez-Nieto, X., et al., 2014. GPR signal characterization for automated landmine and UXO detection based on machine learning techniques. Remote Sensing, 6 (10), 9729-9748.
52. Pasolli, E., Melgani, F., and Donelli, M., 2009. Automatic analysis of GPR images: a pattern-recognition approach. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47 (7), 2206-2217.
53. Qiao, L., et al., 2015. Identification of buried objects in GPR using amplitude modulated signals extracted from multiresolution monogenic signal analysis. Sensors (Switzerland), 15 (12), 30340-30350.

54. Shangguan, P., et al., 2016. Algorithm development for the application of ground-penetrating radar on asphalt pavement compaction monitoring. *International Journal of Pavement Engineering*, 17 (3), 189-200.
55. Shrestha, S.M. and Arai, I., 2003. Signal processing of ground penetrating radar using spectral estimation techniques to estimate the position of buried targets. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2003 (12), 1198-1209.
56. Soldovieri, F., et al., 2011. Sparse reconstruction from GPR data with applications to rebar detection. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60 (3), 1070-1079.
57. Thitimakorn, T., et al., 2016. Subsurface void detection under the road surface using ground penetrating radar (GPR), a case study in the Bangkok metropolitan area. Thailand. *International Journal of Geo-Engineering*, 7 (2), 1-9.
58. 3d-radar company. <http://3d-radar.com/> (2001, accessed 19 July 2018).
59. 3d-radar examiner data processing rev 1.2 (2014)
60. Ga Zhang(2001), *Simplified Evaluation for Dynamic Layered Soils-Structure Interaction*, Missouri University of Science and Technology
61. Anders Gudmarsson, *Resonance Testing of Asphalt Concrete*
62. S.A Badsar et al. (2010), Determination of the material damping ratio in the soil from SASW tests using the half-power bandwidth method, *Geophysical Journal International*
63. Benedetto, A., & Pajewski, L. (2015). *Civil Engineering Application of Ground Penetrating Radar*. Springer International .
64. Krysiński, L., & Sudyka, J. (2013). GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks. *Journal of Applied Geophysics*, 27-36.
65. I. Al-Qadi, I., Leng, Z., & Larkin, A. (2011). In-Place Hot Mix Asphalt Density Estimation Using Ground Penetrating Radar.
66. Leng, Z. (2011). *Prediction of In-Situ Asphalt Mixture Density Using Ground Penetrating Radar: Theoretical Development and Field Verification*.
67. Utsi, E. C. (2017). *Ground Penetrating Radar*. Butterworth-Heinemann .
68. Zhao, S., & L. Al-Qadi, I. (2016). Development of an analytic approach utilizing the extended commom midpoint method to estimate asphalt pavement eith 3-D ground-penetrating radar. *NDT & E International*, 29-36.
69. Zhao, S., & L. Al-Qadi, I. (2019). Super-Resolution of 3-D GPR Signals to Estimate Thin Asphalt Overlay Thickness Using the XCOMP Method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 893-901.
70. Zhao, S., Shangguan, P., & L.Al-Qadi, I. (2015). Application of regularized deconvolution technique for predicting pavemen tthin layer thicknesses from ground penetrating radar data. *NDT&E International*, 1-7.

주 의

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