

2026 국토교통 R&D 우수성과

20선 사례집



“

국토교통 연구자들의 끊임없는 도전과 혁신으로 창출된 연구개발 성과는 우리 생활을 더욱 안전하고 편리하게 만들고, 미래 국토교통기술 발전을 이끄는 든든한 기반이 될 것입니다.

국토교통R&D의 우수한 성과가 국민에게 널리 알려지고, 대외적으로도 인정받을 수 있도록 국토교통과학기술진흥원이 적극 지원하겠습니다.

국토교통과학기술진흥원은 2010년부터 매년 국토교통 연구개발사업을 통해 창출된 우수성과를 발굴하여 사례집으로 발간·배포하고 있습니다.

또한, 매년 약 20건 내외의 우수성과를 선정하여 대국민 성과 홍보를 추진하고 있으며, 연구자의 자긍심을 높이고 국토교통기술에 대한 국민의 이해와 관심을 넓히는 데 기여하고 있습니다.

국토교통 우수성과 20선 선정 과정에서는 성과 증빙자료 검토, 자격요건 및 중복 여부 확인, 기술분야별 전문가 평가위원회 심사 등을 거쳐 우수성과 20선을 최종 선정하고 있습니다.

이번 「2026년 국토교통R&D 우수성과 20선」으로 선정된 연구진 모두에게 깊은 축하와 감사의 말씀을 드립니다. 이번 사례집을 통해 국토교통 연구개발의 우수성과와 기술적 가치가 국민에게 더욱 쉽게 전달되기를 바라며, 대한민국 국토교통 기술 발전을 위해 노력하고 있는 모든 연구자 여러분께 진심으로 감사드립니다.



CONTENTS

1. 국토교통 우수성과 20선이란	1
2. 2026년 국토교통 우수성과 20선 선정과정	1
3. 2026년 국토교통 우수성과 20선 주요 통계	2
4. 2026년 국토교통 우수성과 20선 분야별 성과목록	5
5. 2026년 국토교통 우수성과 20선 사례집	7

국토 분야

성능은 높이고 가격은 낮춘 국산 건축자재, 제로에너지 건축을 앞당기다	8
시가 철근 간격을 재고, 원격으로 확인하는 스마트 건설감리	12
약품은 줄이고 정화효율은 높인 고압세척기술, 해외시장까지 진출하다	16
영하 253℃ 수소액화 기술 국산화, '액체수소 시대'를 열다	20
페타이어 자원순환으로 탄소저감과 도로교통 소음저감, 장기 지속성능을 함께 실현하다	24
사람 대신 장비가 하수관을 보수해 작업자와 도로를 함께 지키다	28
공장에서 구조부재를 만들고 디지털로 조립하는 탈현장 건설기술	32
사족보행 로봇이 도면 없이 비계를 찾아 3차원으로 점검하다	36
AI 기반 지능형 건축설계 및 BIM 검토 플랫폼	40
수소와 탄소소재를 함께 만드는 무탄소 청정수소 공정	44

교통 분야

열차의 이동권한을 국산 기술로 제어하는 KTCS-2 무선폐색센터	50
도로 카메라가 자율주행차의 사각지대를 대신 보다	54
달리는 열차가 철도시설을 촬영하고 AI가 결함을 찾다	58
배터리의 한계를 넘는 하이브리드 항공기 통합설계 기술	62
화물차를 세우지 않아도 과적과 낙하물 위험을 찾아내다	66
좁은 도심 물류거점에서 하루 4만 상자를 자동 분류하다	70
세계 최초 예약하면 출퇴근길에 찾아오는 광역콜버스	74
실제 자율주행차를 가상도로에서 시험하는 VILS 검증기술	78
철도터널 사고현장에 5분 안에 도착해 승객의 피난을 돕다	82
자동차 해킹을 실제 차량에서 찾아내고 국제기준으로 평가하다	86

1

국토교통 우수성과 20선이란

▶ 국토교통R&D 우수성 전파 및 대외수상 연계를 위해 매년 국토교통R&D 우수성과를 선정하여 우수성과 사례집을 발간·배포 중

- '10년부터 매년 20건 내외의 우수성과를 선정하여 우수성과 사례집을 발간하고 대국민 성과 홍보
- 국토교통R&D 우수성과 20선 선정을 통해 연구자 자긍심 고취 및 국토교통기술에 대한 국민의 이해와 관심 제고
- 국가R&D 우수성과 100선 및 사회문제R&D 후보로 추천하여 국토교통R&D 우수성 전파

2

2026년 국토교통 우수성과 20선 선정과정

▶ 성과검증 및 기술분야별 전문가로 구성된 선정평가위원회 운영을 통해 우수성과 20선을 선정

〈선정 절차〉

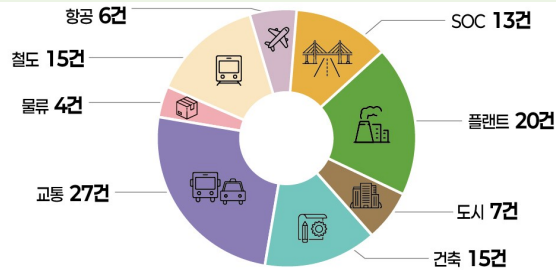


3

2026년 국토교통 우수성과 20선 주요 통계

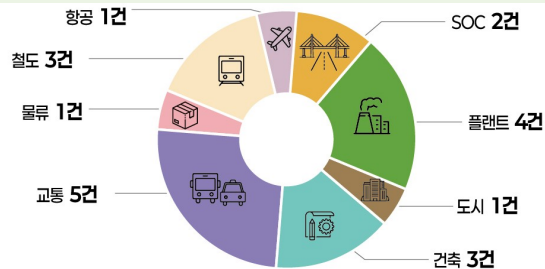
▶ 기술분야별 지원 현황

구분	SOC·플랜트		도시·건축		교통·물류		철도·항공		합계
	SOC	플랜트	도시	건축	교통	물류	철도	항공	
과학기술적 성과	9	14	4	8	20	1	8	5	69
경제사회적 성과	4	6	3	7	7	3	7	1	38
합계	13	20	7	15	27	4	15	6	107



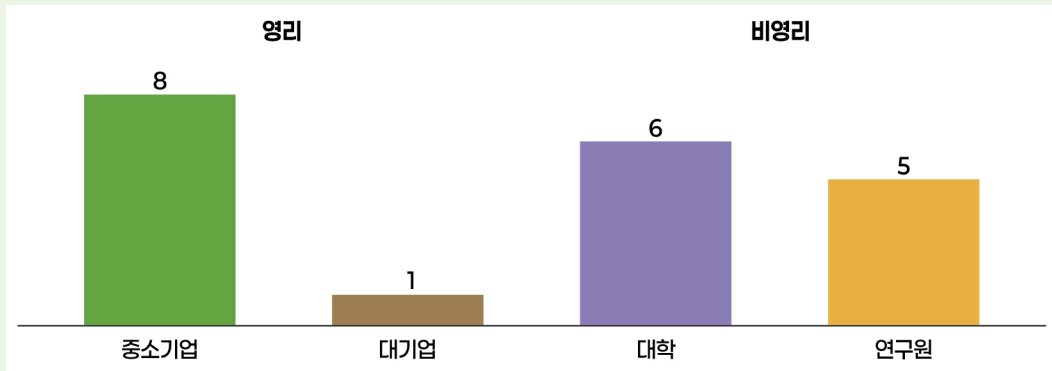
▶ 기술분야별 선정 현황

구분	SOC·플랜트		도시·건축		교통·물류		철도·항공		합계
	SOC	플랜트	도시	건축	교통	물류	철도	항공	
과학기술적 성과	1	2	-	-	3	-	-	1	7
경제사회적 성과	1	2	1	3	2	1	3	-	13
합계	2	4	1	3	5	1	3	1	20



▶ 수행주체별 선정 현황

구분	영리		비영리		합계
	중소기업	대기업	대학	연구원	
합계	8	1	6	5	20



구분		영리		비영리		합계
		중소기업	대기업	대학	연구원	
SOC	과학기술적 성과	-	-	1	-	1
	경제사회적 성과	-	-	-	1	1
플랜트	과학기술적 성과	-	-	2	-	2
	경제사회적 성과	2	-	-	-	2
도시	과학기술적 성과	-	-	-	-	-
	경제사회적 성과	1	-	-	-	1
건축	과학기술적 성과	-	-	-	-	-
	경제사회적 성과	-	-	2	1	3
교통	과학기술적 성과	2	-	1	-	3
	경제사회적 성과	1	-	-	1	2
물류	과학기술적 성과	-	-	-	-	-
	경제사회적 성과	-	-	-	1	1
철도	과학기술적 성과	-	-	-	-	-
	경제사회적 성과	2	-	-	1	3
항공	과학기술적 성과	-	1	-	-	1
	경제사회적 성과	-	-	-	-	-
합계		8	1	6	5	20

▶ 세부기관별 선정 현황

구분	기관명	신청부문	기술분야	건수
대기업	한화시스템	과학·기술적성과	항공	1
	소계			1
중소기업	대아티아이(주)	경제·사회적성과	철도	1
	아우토크립트(주)	과학·기술적성과	교통	1
	주식회사 포이닉스	경제·사회적성과	플랜트	1
	(주)싸인텔레콤	경제·사회적성과	교통	1
	(주)웅진고분자	경제·사회적성과	플랜트	1
	(주)유디엔에스	과학·기술적성과	교통	1
	지우이앤이(주)	경제·사회적성과	도시	1
	투아이시스(주)	경제·사회적성과	철도	1
	소계			8
대학	경북대학교	경제·사회적성과	건축	1
	국민대학교	과학·기술적성과	교통	1
	송실대학교	경제·사회적성과	건축	1
	연세대학교	과학·기술적성과	플랜트	1
	중앙대학교	과학·기술적성과	플랜트	1
	한국에너지공과대학교	과학·기술적성과	SOC	1
	소계			6
연구원	한국건설기술연구원	경제·사회적성과	건축	1
	한국교통연구원	경제·사회적성과	교통	1
	한국기계연구원	경제·사회적성과	SOC	1
	한국철도기술연구원	경제·사회적성과	물류 / 철도	2
	소계			5
총계				20

4

2026년 국토교통 우수성과 20선 분야별 성과목록

▶ 국토 분야

국토분야	연구자	페이지
성능은 높이고 가격은 낮춘 국산 건축자재, 제로에너지 건축을 앞당기다	강재식	8
시가 철근 간격을 재고, 원격으로 확인하는 스마트 건설감리	최경규	12
약품은 줄이고 정화효율은 높인 고압세척기술, 해외시장까지 진출하다	이재원	16
영하 253℃ 수소액화 기술 국산화, '액체수소 시대'를 열다	최병일	20
폐타이어 자원순환으로 탄소저감과 도로교통 소음저감, 장기 지속성능을 함께 실현하다	김병채	24
사람 대신 장비가 하수관을 보수해 작업자와 도로를 함께 지키다	김광선	28
공장에서 구조부재를 만들고 디지털로 조립하는 탈현장 건설기술	심창수	32
사족보행 로봇이 도면 없이 비계를 찾아 3차원으로 점검하다	김형관	36
AI 기반 지능형 건축설계 및 BIM 검토 플랫폼	추승연	40
수소와 탄소소재를 함께 만드는 무탄소 청정수소 공정	이영덕	44

▶ 교통 분야

교통분야	연구자	페이지
열차의 이동권한을 국산 기술로 제어하는 KTCS-2 무선폐색센터	이상용	50
도로 카메라가 자율주행차의 사각지대를 대신 보다	김용유	54
달리는 열차가 철도시설을 촬영하고 AI가 결함을 찾다	박종국	58
배터리의 한계를 넘는 하이브리드 항공기 통합설계 기술	박민준	62
화물차를 세우지 않아도 과적과 낙하물 위험을 찾아내다	김종우	66
좁은 도심 물류거점에서 하루 4만 상자를 자동 분류하다	김영훈	70
세계 최초 예약하면 출퇴근길에 찾아오는 광역콜버스	박준식	74
실제 자율주행차를 가상도로에서 시험하는 VILS 검증기술	유진우	78
철도터널 사고현장에 5분 안에 도착해 승객의 피난을 돕다	이덕희	82
자동차 해킹을 실제 차량에서 찾아내고 국제기준으로 평가하다	심상규	86

National Transportation Research and Development Outstanding Achievements Casebook



5.

국토교통 우수성과 20선 사례집

국토분야

1	성능은 높이고 가격은 낮춘 국산 건축자재, 제로에너지 건축을 앞당기다	8
2	AI가 철근 간격을 재고, 원격으로 확인하는 스마트 건설감리	12
3	약품은 줄이고 정화효율은 높은 고압세척기술, 해외시장까지 진출하다	16
4	영하 253℃ 수소액화 기술 국산화, '액체수소 시대'를 열다	20
5	폐타이어 자원순환으로 탄소저감과 도로교통 소음저감, 장기 지속성능을 함께 실현하다	24
6	사람 대신 장비가 하수관을 보수해 작업자와 도로를 함께 지키다	28
7	공장에서 구조부재를 만들고 디지털로 조립하는 탈현장 건설기술	32
8	사족보행 로봇이 도면 없이 비계를 찾아 3차원으로 점검하다	36
9	AI 기반 지능형 건축설계 및 BIM 검토 플랫폼	40
10	수소와 탄소소재를 함께 만드는 무탄소 청정수소 공정	44



대표연구자

강재식

한국건설기술연구원
건축에너지연구본부
선임연구위원
031-910-0353
jskang@kict.re.kr

연구진



정부지원내용

사업명

주거환경연구사업

과제명

제로에너지 주택 건축 활성화를 위한
고성능·저정비용 건축자재 개발

총 연구기간

2018.04~2022.12

총 연구비

총 6,130백만 원

* 정부출연금 4,782백만 원
민간부담금 1,348백만 원

01

성능은 높이고 가격은 낮춘 국산 건축자재, 제로에너지 건축을 앞당긴다

고성능 창호·초단열 방화문·진공단열재 개발로
‘국내 최초’ 제로에너지 건축물 3등급 달성

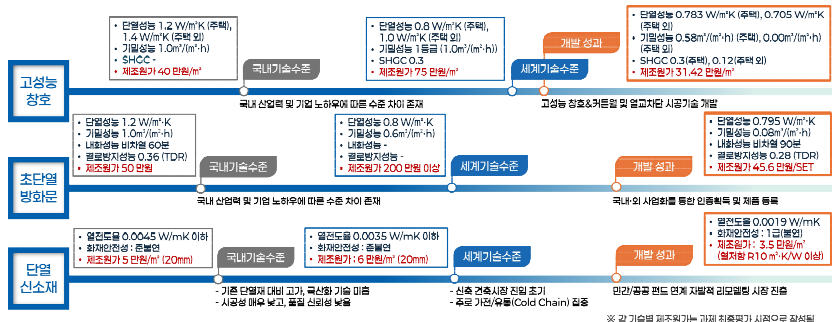
▶ 연구배경 및 필요성

비싸고 해외 의존도가 높은 제로에너지 건축자재의 국산화

탄소중립 목표를 달성하려면 산업과 수송뿐 아니라 건축물에서 사용하는 에너지도 크게 줄여야 한다. 이에 정부는 건물의 에너지 소비를 최소화하고 신재생에너지를 활용하는 제로에너지 건축물(Zero Energy Building, ZEB)의 의무 적용과 보급 확대를 단계적으로 추진하고 있다. 그러나 이를 뒷받침할 국내 핵심 건축자재 기술은 유럽·미국 등 선진국의 약 80% 수준에 머물러 있었고, 원천기술과 고성능 제품을 해외에 의존하는 구조도 계속 되고 있었다.

특히 창호와 방화문, 단열재는 건물 안팎으로 이동하는 열을 줄이는 핵심 자재지만, 기존 고성능 제품은 가격이 비싸고 여러 성능을 함께 만족시키기 어려웠다. 창호는 단열과 기밀성을 을 동시에 갖춰야 하고, 방화문은 열을 차단하면서도 화재를 견뎌야 한다. 진공단열재 역시 높은 단열성능뿐 아니라 화재안전성, 시공 편의성, 적절한 가격까지 확보해야 실제 건설현장에 적용할 수 있다. 이처럼 성능 간 균형과 높은 가격 문제로 인해 우수한 제품이 개발되더라도 현장 보급에는 한계가 있었다.

따라서 세계 수준의 에너지 성능과 가격 경쟁력을 동시에 갖춘 고성능 창호, 초단열 방화문, 진공단열 신소재를 국내 기술로 개발할 필요가 있었다. 또한 ZEB 의무화 정책을 안정적으로 뒷받침하고 해외 선진 제품의 국내시장 진입에 대응하려면, 국내 중소기업의 기술력을 바탕으로 소재 개발부터 설계, 성능시험, 현장 적용, 양산까지 이어지는 실용화 체계를 함께 마련해야 했다.



〈연구개발 세부목표〉

▶ 성과내용

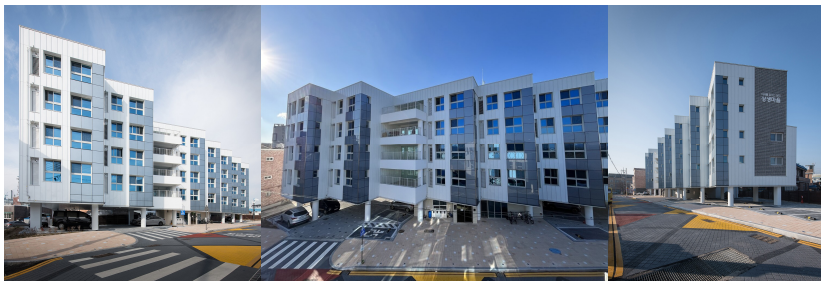
고성능 건축자재 개발부터 현장 적용과 사업화까지

연구진은 세계 수준의 성능과 가격 경쟁력을 갖춘 고성능 창호, 초단열 방화문, 진공단열 신소재를 개발하고, 실제 건축현장에서 성능을 검증해 제품 생산과 판매까지 연결하였다. 산·학·연 공동연구진은 신소재 개발과 제품 설계, 시스템 구성, 시제품 제작, 성능시험, 현장 실증 등 연구개발 전 과정을 함께 수행하였다. 이를 통해 개별 자재의 성능을 높이는 데 그치지 않고, 국내 건설환경에서 요구되는 시공성과 경제성까지 확보하였다.

연구 과정에서는 컴퓨터 시뮬레이션과 실물 크기의 목업(Mock-up) 시험, 실제 건축현장 적용을 단계적으로 진행하였다. 먼저 고성능 창호는 무레일 구조와 가변형 프레임을 적용해 단열성능 $0.783\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 와 기밀성능 1등급을 확보하였다. 또한 제조원가를 해외 선진 제품보다 50% 이상 낮춰 높은 성능과 가격 경쟁력을 동시에 갖췄다. 초단열 방화문은 단열·기밀·결로 방지성능과 화재안전성을 함께 만족하도록 설계했으며, 비차열 90분과 차열 65분의 내화성능을 달성하였다. 진공단열재 복합보드는 열전도율 $0.0019\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 를 기록해 기존 대비 10배 이상의 단열성능을 확보했고, 불연재료 등급을 충족한 제품으로 상용화하였다.

개발 성과는 실제 매출로 이어졌다. 고성능 창호와 커튼월, 초단열 방화문, 진공단열 신소재는 2020년부터 2025년까지 총 201.6억 원의 사업화 매출을 달성하였다. 이는 연구성과가 실험실 수준에 머무르지 않고 실제 건축시장에 진입했음을 보여준다. 또한 국내 중소기업이 고성능 건축자재를 직접 생산할 수 있는 기반을 마련해, 해외 제품 의존도를 줄이고 국내 산업의 경쟁력을 높였다.

개발 자재는 그린리모델링 사업, 1기 신도시 노후 공동주택, 스마트시티 등 다양한 건축물에 적용되었다. 특히 세종시 에너지자립형 공공임대 공동주택에 개발 기술을 적용해 에너지 자립률 60% 이상을 달성했으며, 국내 최초로 제로에너지 건축물 3등급을 획득하였다. 이처럼 소재 개발부터 현장 실증과 사업화까지 이어지는 체계를 구축함으로써 제로에너지 건축 확산을 위한 실질적인 기반을 마련하였다.



〈에너지자립형 ZEB 3등급 공동주택 전경〉

주요 연구 성과

매출실적
201.6억 원

연구자 한마디

본 연구를 시작할 때 가장 먼저 연구진 스스로에게 던진 질문은 "세계 최고 수준의 성능과 건설현장에서 실제 사업화 할 수 있는 경제성, 이 두 가지를 동시에 잡을 수 있는가"였습니다. 고성능 창호, 초단열 방화문, 진공 단열신소재의 경우 요소기술의 고성능만을 확보하는 것은 어렵지 않지만, 국내 건설현장에서 실제 적용 가능한 경제성과 시공성을 함께 확보하는 일은 매우 어려운 융합 기술에 대한 도전이었습니다.

특히 초단열 방화문은 단열성능과 내화 성능이 구조 재료적으로 서로 상충되는 특성을 지니고 있어, 이를 동시에 만족하는 설계안을 도출하기까지 수많은 시뮬레이션과 시제품 제작, 반복 시험을 거쳐야 했습니다. 그 과정이 결코 쉽지 않았지만 연구진과 참여 기업이 한 방향을 보며 끝까지 함께 해준 덕분에 세계 최초의 성과를 낼 수 있었다고 생각합니다.

앞으로 이 기술이 노후 건축물 그린리 모델링과 민간 신축 시장으로 확산되어 더 많은 국민이 에너지 비용 절감과 쾌적한 주거환경을 체험할 수 있기를 진심으로 바랍니다.

▶ 성과의 차별성/우수성

세계 수준의 성능과 현장 적용성을 함께 갖춘 국산 건축자재

1. 고성능 창호: 세계 수준의 성능과 절반 이하의 제조원가

고성능 창호는 창틀 하부의 레일을 없앤 무레일 구조와 건축물의 조건에 따라 조절할 수 있는 가변형 프레임 적용하였다. 그 결과 단열성능 $0.783\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 와 기밀성능 1등급을 확보했으며, 제조원가를 해외 선진 제품의 절반 이하로 낮췄다. 또한 조달청 우수제품 등록과 양산체계 구축까지 완료해 실제 공공·민간 건축현장에 공급할 수 있는 기반을 마련하였다.

2. 초단열 방화문: 단열·내화·기밀·결로 방지성능의 통합 구현

초단열 방화문은 단열성능을 높이는 재료와 화재를 견디는 재료의 특성이 서로 달라 두 성능을 동시에 확보하기 어렵다는 한계를 해결하였다. 발포가스켓 융합기술을 적용해 구조적 안정성과 화재안전성을 높였으며, 단열·기밀·결로 방지성능도 함께 확보하였다. 특히 비차열 90분과 차열 65분의 내화성능을 달성했고, 제조원가를 한 세트당 45.6만 원으로 낮춰 성능과 경제성을 동시에 갖췄다.

3. 진공단열 신소재: 세계 최고 수준의 열전도율과 복합보드 상용화

진공단열재는 열전도율 $0.0019\text{W/m}\cdot\text{K}$ 를 달성해 기존 대비 10배 이상의 단열성능을 확보하였다. 또한 불연재료 등급을 충족해 화재안전성을 높였으며, 벽체와 바닥 등 건축 부위별로 적용할 수 있는 맞춤형 복합보드 제품으로 상용화하였다. 제조원가도 3.5만 원/R10으로 낮춰 선진국 제품보다 40% 이상 절감하였다.

4. 조기 현장 실증과 상용화: 기술성숙도 TRL 9단계 달성

개발 자재는 세종시 공동주택과 스마트시티, 그린리모델링 현장 등에 적용되어 실제 건축환경에서 성능을 검증하였다. 이를 통해 제품 생산과 판매가 가능한 기술성숙도 TRL 9단계를 달성하였다. 특히 세종시 공동주택은 국내 최초로 ZEB 3등급을 획득했으며, 일부 노후 공동주택에서는 에너지 구입비용이 60% 절감되는 효과도 확인되었다. 개별 성능뿐 아니라 가격, 시공 편의성, 생산 가능성까지 함께 확보했다는 점이 본 성과의 핵심 차별성이다.



〈U value 0.8급 고성능 창호〉



〈초단열 방화문 상용화 기술〉

▶ 파급효과

에너지비용은 줄이고 국내 건축자재 산업은 키우다

1. 사업화 매출 창출과 건축자재 기술 자립

개발된 고성능 창호와 커튼월, 초단열 방화문, 진공단열 신소재는 2020년부터 2025년까지 총 201.6억 원의 사업화 매출을 기록하였다. 또한 해외 선진 제품보다 제조원가를 최대 50% 이상 낮춰 고성능 자재의 가격 부담을 줄였으며, 36종의 제품을 조달청 우수제품으로 등록해 공공시장 진입 기반과 제품 신뢰도를 확보하였다. 해외 의존도가 높았던 핵심 자재를 국내 기술로 생산함으로써 수입대체 기반을 마련하고 국내 건설산업의 기술 자립도를 높였다. 아울러 제로에너지 건축자재 플랫폼을 구축해 자재 정보와 에너지 성능을 제공하는 새로운 정보서비스 모델도 제시하였다.

2. 개발·실증·보급으로 이어지는 산업 생태계 조성

연구진은 소재와 설계, 시스템, 시공, 양산설비를 연계한 통합기술을 확보하였다. 비금속 외피재와 신소재, 3D 프린터 기반 금형 설계 등 서로 다른 분야의 기술을 결합하고, 건축에너지·신소재·시공 분야의 산·학·연 연구진과 중소기업이 공동으로 참여하였다. 이를 통해 연구개발 이후에도 시제품 제작, 현장 실증, 제품 생산, 조달시장 진입으로 이어질 수 있는 협력체계를 마련하였다. 또한 그린리모델링과 정책사업을 연계해 '개발-실증-보급'으로 이어지는 선순환 구조를 만들었으며, 건물 에너지 시뮬레이션과 온실가스 감축효과를 함께 제공하는 디지털 서비스 기반도 구축하였다.

3. 에너지비용 절감과 안전하고 쾌적한 주거환경

개발 자재를 1기 신도시 노후 공동주택에 적용한 결과, 에너지 구입비용이 최대 60% 줄었다. 이는 난방과 냉방에 필요한 에너지를 줄여 국민의 생활비 부담을 낮추고 에너지 복지를 높이는 효과로 이어진다. 또한 창호와 방화문의 단열·기밀성능은 실내 온도를 안정적으로 유지하고 결로 발생 가능성을 낮추며, 초단열 방화문의 내화성능은 화재 발생 시 안전성을 높일 수 있다. 특히 에너지자립률 60% 이상을 달성한 국내 최초 ZEB 3등급 공동주택은 정부의 제로에너지 건축 의무화 정책을 실제로 뒷받침하는 실증 모델이 되었다. 이 성과는 제로에너지 건축에 대한 사회적 신뢰를 높이고 저탄소 주거 문화를 확산하는 기반이 될 것으로 기대된다.



〈국제 BAU 건축전시회(세계 최대 건축자재 전시회) 출품〉

용어해설

제로에너지 건축물

(Zero Energy Building, ZEB)
건물에서 사용하는 에너지를 최대한 줄이고, 태양광 등 신재생에너지로 자체 생산하여 에너지 소비량을 0 (제로)에 가깝게 만든 건축물

열관류율

벽체, 창호, 문 등 건축 부재가 열을 얼마나 잘 통과시키는지 나타내는 수치로, 숫자가 낮을수록 단열성능이 우수

진공단열재

내부를 진공 상태로 만들어 열전달을 극도로 억제한 고성능 단열 소재

그린리모델링

기존 노후 건축물의 단열·창호·설비 등을 개선하여 에너지 효율을 높이고 온실가스 배출을 줄이는 건축물 성능 개선 사업



대표연구자

최 경 규

송 실 대학 건축 학 부 교 수

kkchoi@ssu.ac.kr

연구진



최하진



우욱용

정부지원내용

사업명

디지털 기반 건축시공 및 안전감리 기술개발

과제명

디지털 기반 건축감리 및 시공자동화 로봇 기술개발

총 연구기간

2022.04~2026.12

총 연구비

총 19,592백만 원

* 정부출연금 17,696백만 원
민간부담금 1,896백만 원

02

AI가 철근 간격을 재고, 원격으로 확인하는 스마트 건설감리

영상과 3차원 공간정보를 결합해
철근 간격을 최대 '98% 정확도'로 실시간 측정

▶ 연구배경 및 필요성

눈과 출자에 의존하던 철근 감리의 한계

건축물의 구조안전은 설계도서에 따라 철근이 정확한 간격과 위치로 시공되었는지에 크게 좌우된다. 특히 기초와 슬래브, 기둥 등 주요 구조부재의 철근 배근 상태는 건축물의 구조성능을 결정하는 핵심 감리 대상이다. 그러나 기존 공사감리는 현장 방문과 육안 확인, 출자 측정 등 인력 중심 방식에 크게 의존해 왔다. 이 때문에 감리자의 숙련도와 현장 여건에 따라 검측 결과가 달라질 수 있으며, 여러 현장을 동시에 관리해야 하는 구조기술자에게는 시간과 이동의 한계가 있었다.

포항지진 이후 건축구조기술사가 협력해야 하는 건축물은 크게 늘었지만, 실제 감리업무를 수행할 전문 인력은 제한적이다. 구조기술사 한 명이 담당해야 하는 현장이 많아지면서 현장 방문만으로 모든 구조물의 품질을 정밀하게 확인하기 어려워졌다. 최근 공동주택 시공과정에서 철근 배근 누락 사례가 잇따라 확인된 것도 인력 중심 감리체계의 한계를 보여준다.

이에 연구진은 감리자의 경험과 현장 방문에 의존하던 방식을 보완하기 위해 컴퓨터 비전 기반 스마트 감리기술을 개발하였다. AI와 3차원 공간정보를 활용해 철근 간격을 자동으로 측정하고, 감리자가 현장에 상주하지 않아도 원격에서 실시간으로 구조품질을 확인하는 것이 목표였다. 이를 통해 철근 검측을 객관적이고 정량적인 방식으로 전환하고, 건축물의 안전성과 건설산업의 생산성을 함께 높이고자 했다.

■ 공사감리 시기 및 대상(건축법 시행령 19조)

- ① 기초 공사 시 철근 배치를 완료한 경우
- ② 지붕 슬래브 철근 배근을 완료한 경우
- ③ 상부 슬래브 철근 배근을 완료한 경우



현장 중심형 감리, 휴먼 에러 발생 가능성 높음
주관적·현장집약적, 감리자의 역량에 의존

■ 현행 감리제도 한계(건축법 시행령 19조)

- 건축구조기술사 협력대상 건축물

신축 허가 건축 3,900건
3층 이상 아파트 건축물 포함 (공동주택 제외)

39,371건

- 건축사 및 건축 구조기술사 사무소 수(대한건축학회, 2018)

12,888

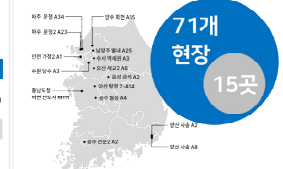
402

건축사 건축 구조기술사

기술사 1인당 협력대상 건축물 "약 70건"
구조기술사 수 대비 관리 현장 수 과다

<연구배경 및 필요성>

■ 철근 누락 사례(2023)



시공 중 "철근 누락사례" 지속 발생
현행 감리제도에서 나타나는 일련의 문제점

▶ 성과내용

철근 간격을 실시간으로 측정하는 포터블 스마트 감리시스템

연구진은 영상 데이터와 3차원 공간정보를 결합해 철근 간격을 자동으로 측정하고, 그 결과를 원격에서 확인할 수 있는 스마트 감리시스템을 개발하였다. 핵심은 깊이 카메라 (Depth Camera)로 수집한 RGB 영상과 3D 포인트 클라운드를 정합해 영상 속 픽셀 좌표를 실제 공간 좌표와 연결하는 기술이다. 이를 통해 철근 사이의 실제 거리를 실시간으로 계산하고 설계기준에 맞게 시공되었는지 확인할 수 있다.

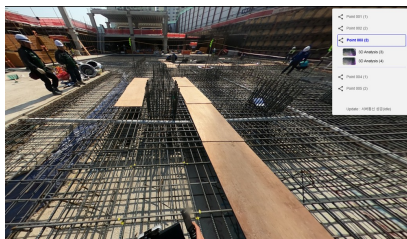
송실대학교 연구진이 개발한 철근 간격 측정 알고리즘을 바탕으로, 영상 취득부터 3D 포인트 클라운드를 정합, 간격 계산, 결과 표시까지 하나의 시스템으로 구현하였다. 별도의 고정식 계측장비를 설치하지 않고 태블릿과 이동형 카메라를 활용할 수 있어 현장에서 손쉽게 데이터를 수집할 수 있다. 취득한 데이터는 원격지로 전송되어 실시간으로 확인할 수 있으므로, 감리자의 현장점검을 보완하고 배근 상태를 원격에서 사전 확인할 수 있다.

기존 줄자 측정이나 단순 영상인식과 달리 3차원 공간정보로 실제 물리적 거리를 산출하기 때문에 측정 결과의 객관성과 정량성을 높였다. 또한 고정 카메라 없이 이동형 장비를 사용하는 구조로 설계해 슬래브와 기둥 등 다양한 시공환경에 적용할 수 있다. 건설현장의 조명과 배경, 작업자의 이동 등 변화가 많은 상황에서도 활용할 수 있도록 현장 실용성을 높인 것이 특징이다.

개발된 시스템은 실험실과 실제 건설현장에서 성능을 검증하였다. 약 1~2m 거리에서 90% 이상의 측정 정확도를 확보했고, 일부 조건에서는 98% 이상의 정확도를 달성하였다. 이를 통해 철근 배근 상태를 실시간으로 확인하고 설계기준과의 적합성을 판단할 수 있음을 입증하였다. 결과적으로 경험 중심의 품질관리 방식을 디지털 기반의 자동·정량 검측체계로 전환하고, 감리업무의 효율성과 신뢰성을 높일 수 있는 기술을 완성하였다.



〈AI 기반 실시간 자동 철근
간격 측정 시스템 하드웨어〉



〈원격 현장 전반 확인을 위한
Virtual tour 기능〉

주요 연구 성과

논문

Real-time rebar spacing measurement system for quality control in construction

특허(등록)

바치열 투여 기반 세그멘테이션 기술을 활용한 원격 구조감리 방법 및 장치

기술이전

실시간 원격 철근 간격 측정장치 및 실시간 원격 철근 간격 측정방법

매출실적

144백만 원

연구자 한마디

본 연구는 시와 컴퓨터비전 기술을 실제 건설현장에서 활용 가능한 스마트 감리 기술로 구현하는 데 중점을 두었다. 철근 배근 검측은 건축물 및 인프라 구조물의 구조 안전과 시공 품질관리를 위해 중요한 업무이며, 이를 보다 객관적이고 정량적인 방식으로 지원할 수 있는 기술적 기반이 필요하다. 연구진은 RGB 영상, 3D 포인트 클라우드, AI 기술을 결합하여 철근 간격을 자동으로 측정하고, 원격에서도 실시간으로 확인할 수 있는 스마트 감리 체계를 구현하고자 하였다. 앞으로 본 기술이 건설현장의 품질관리 방식을 데이터 기반으로 고도화하고, 구조 안전 확보와 스마트 건설 기술 확산에 기여할 수 있기를 기대한다.

성과의 차별성/우수성

저가형 이동장비로 구현한 구조물 단위의 정밀 감리

1. 저가형 이동장비로 구현한 실시간 정량 측정

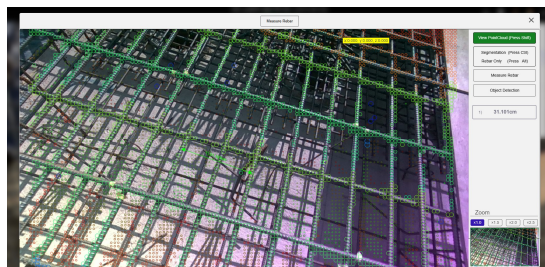
기존 국내외 기술은 영상을 촬영한 뒤 별도의 후처리를 하거나 고가의 고정식 장비를 사용해야 하는 경우가 많았다. 반면 이번 기술은 저가형 깊이 카메라와 태블릿 등 이동형 장비로 데이터를 취득하고, RGB 영상과 3D 포인트 클라우드를 실시간으로 정합해 실제 철근 간격을 계산한다. 실제 건설현장 검증에서 약 1~2m 거리 기준 90% 이상의 정확도를 확보했으며, 일부 시험조건에서는 최대 98% 이상의 정확도를 확인하였다.

2. 문서관리를 넘어 구조물 자체를 정밀하게 검측

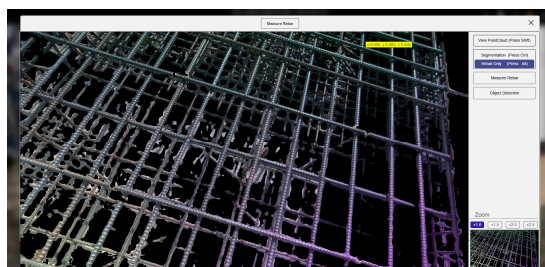
기존 디지털 감리 솔루션은 문서관리나 도면 공유 등 행정업무의 편의를 높이는 데 집중해 왔다. 이 기술은 감리의 핵심 대상인 철근 배근을 구조물 단위로 직접 측정한다는 점에서 차별화된다. AI 자동분석과 3차원 공간정보를 결합해 철근 사이의 실제 거리를 산출하며, 이동형 시스템을 통해 장소에 구애받지 않고 데이터를 실시간으로 공유할 수 있다. 이를 통해 디지털 감리를 단순 관리에서 정밀 계측 중심의 스마트 감리로 발전시켰다.

3. 알고리즘부터 현장장비까지 통합한 실용 시스템

이번 성과는 분석 알고리즘에 머물지 않고 실제 현장에서 사용할 수 있는 하드웨어와 소프트웨어 통합시스템으로 완성되었다. 깊이 카메라 기반 데이터 취득, RGB 영상과 3D 포인트 클라우드, 거리 산출 알고리즘, 사용자 화면을 하나의 시스템으로 구성하였다. 실험실뿐 아니라 실제 슬래브와 기둥 철근 현장에 적용해 성능검증을 완료함으로써, 정밀화·자동화·디지털화를 동시에 구현하고 향후 다른 구조물 검측으로 확장할 수 있는 기반도 확보하였다.



〈원격 철근 간격 측정 기능〉



〈AI 기반 철근 데이터 분리 기능〉

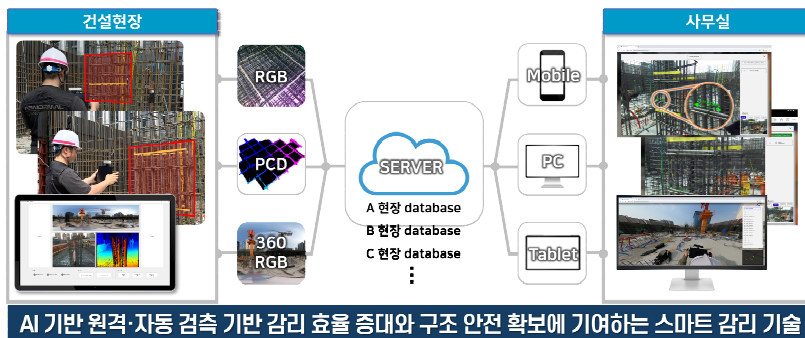
▶ 파급효과

건설 품질관리의 디지털 전환과 구조안전 강화

이 기술은 사람이 현장을 방문해 줄자로 철근 간격을 측정하던 업무를 자동화함으로써 현장 투입인력과 측정시간, 이동비용을 줄일 수 있다. 특히 저가형 장비를 활용해 시스템 도입비용을 낮췄기 때문에 대형 현장뿐 아니라 관리 사각지대가 발생하기 쉬운 중·소규모 건설현장에도 적용할 수 있다. 여러 현장을 담당하는 구조기술자는 원격으로 배근 상태를 확인해 업무효율을 높일 수 있으며, 관련 스마트 감리 서비스 시장의 성장도 기대된다.

또한 건설분야에 AI와 컴퓨터 비전, 3차원 공간정보 기술을 접목함으로써 건설과 ICT 산업의 융합을 촉진한다. 이번 연구에서 확보한 영상처리와 3D 모델링 기술은 향후 디지털 트윈과 드론, 로봇 등 무인 자동화기술과 연계할 수 있다. 축적된 현장 데이터는 철근 배근 검측기록을 체계적으로 관리하고, 향후 디지털 트윈 기반 품질관리 기술에 활용될 수 있다. 이는 결과적으로 노동집약적인 건설산업을 데이터 기반의 기술집약적 산업으로 전환하는 기반이 될 수 있다.

사회적으로는 철근 배근을 객관적이고 정량적으로 관리함으로써 시공오류를 조기에 확인하고 구조안전 확보를 지원할 수 있다는점이 손꼽힌다. 감리결과를 데이터로 기록 하면 검측 품질을 표준화하고 시공품질에 대한 국민의 신뢰도 높일 수 있다. 또한 원격점검과 자동측정을 통해 현장 작업자의 불필요한 이동과 위험한 측정작업을 줄여 작업환경 개선에도 기여한다. 결과적으로 이 기술은 건설 품질관리의 효율을 높이는 동시에 공공의 안전을 강화하는 미래형 건설안전 솔루션이다.



〈AI 기반 실시간 철근 간격 측정 및 원격 감리 시스템〉

용어해설

3D 포인트 클라우드

물체나 공간의 형상을 수많은 3차원 점 좌표로 표현한 데이터

Virtual Tour

360도 영상 등을 활용하여 건설 현장을 원격에서 둘러보고 기록·관리할 수 있는 기능



대표연구자

이 재 원

지우이앤이(주)

대표

02-3453-6114

jaewlee@jiuene.com

연구진



이승우



김희준



김재겸



유경민



박상헌

정부지원내용

사업명

국토교통기술사업화지원사업

과제명

표면분쇄기법을 이용한 중금속 오염토양 정화플랜트 설계기술

총 연구기간

2017.04~2019.12

총 연구비

총 760백만 원

* 정부출연금 440백만 원

민간부담금 320백만 원

03

약품은 줄이고 정화효율은 높은 고압세척기술, 해외시장까지 진출하다

고압수와 나노버블로 복합 오염토양과 유류슬러지를 정화하고 3년간 62.6억 원 사업화 매출 달성

▶ 연구배경 및 필요성

화학약품 중심 토양세척이 남긴 비용과 2차 오염 문제

토양오염은 유류와 석유화학물질, 비료·농약, 중금속, 산업공정에서 발생한 화학물질 등이 토양에 쌓여 자연적인 기능을 떨어뜨리는 현상이다. 오염물질이 장기간 남아 있으면 생태계를 훼손하고 주민의 건강에도 영향을 줄 수 있어 오염토양을 신속하고 안전하게 정화하는 기술이 필요하다.

토양세척은 오염된 토양 표면에서 오염물질을 떼어내는 대표적인 정화기술이다. 저농도 오염토양은 오염물질이 많이 붙어 있는 미세입자를 분리하는 물리적 세척방식을 주로 사용한다. 반면 중·고농도 오염토양은 화학용제를 사용해 토양 표면의 오염물질을 녹여 내는 화학적 세척방식이 많이 적용되어 왔다.

그러나 화학세척은 오염물질의 종류에 따라 서로 다른 약품을 사용해야 하고, 주로 무기 오염물질 처리에 적합하다는 한계가 있다. 유류와 중금속이 함께 포함된 유·무기 복합 오염은 열탈착과 세척 등 여러 기술을 함께 적용해야 하는 경우가 많다. 이에 따라 공정이 복잡해지고 약품비와 에너지 사용량이 증가하며, 세척 후 발생하는 폐액과 잔류약품으로 인해 2차 오염이 발생할 가능성도 있다.

따라서 화학용제 사용을 최소화하면서 유·무기 복합오염을 한 공정에서 처리할 수 있는 고도화된 정화기술이 필요했다. 또한 이 기술을 오염토양뿐 아니라 유류슬러지와 같은 폐기물의 무해화·자원화에도 활용한다면 강화되는 자원순환정책에 대응하고 새로운 환경 시장을 창출할 수 있다.



〈복합오염토양세척(국내)〉



〈유전슬러지무해화자원화(중국)〉

➤ 성과내용

고압수와 미세기포로 오염물질을 떼어내는 물리적 세척기술

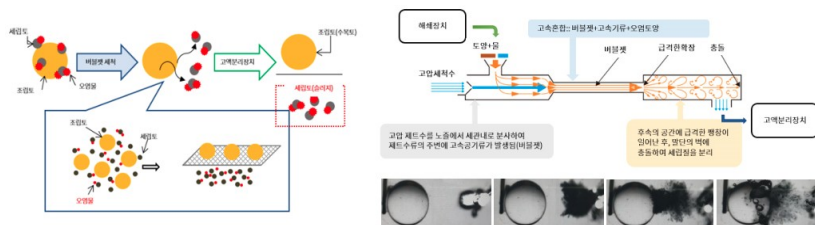
고압세척기술은 고압수가 좁은 관을 통과할 때 발생하는 캐비테이션 버블의 충격에너지로 토양 표면의 오염물질을 제거하는 물리적 정화기술이다. 화학적으로 오염물질을 녹이지 않아 오염물질의 종류와 특성에 따른 영향이 적고, 화학용제와약품 사용량을 줄여 정화공정의 환경성과 경제성, 녹색성을 높일 수 있다.

연구진은 2017년부터 2019년까지 국토교통기술사업화지원사업을 통해 수입파쇄를 활용한 표면분쇄형 고압세척의 기본 개념을 정립하였다. 이후 이젝터 구조를 개선하고 나노버블 기술을 결합해 세척효율과 현장 적용성을 높였다. 시험설비를 현장규모로 확대하고 실제 오염도양과 유류슬러지 처리에 적용해 기술성숙도 TRL 9단계와 사업화를 달성하였다.

기술성숙도	기간	세부개발내용
TRL3~4	'17.03~ '18.12	• 기존화학세척의약품사용, 폐액처리 문제해결을 위한 물리적 세척수립(표면분쇄) • 표면분쇄 방안으로 불밀과 수압 파쇄(고압세척)에 대한 시스템 설계 및 시험평가
TRL5~6	'19.01~ '19.12	• 전산유체해석을 통한 이젝터 (디퓨저파트)형상최적화 실시 • 0.6t/h Lab 설비구축(국내,중국) • 다양한 오염조건에 대한 시험평가 체계 구축 • 전후설비가 연계된 총체적 시스템화 완성
TRL7	'20.01~ '22.05	• 전산유체해석을 통한 이젝터(믹싱챔버파트)형상최적화 실시 • 시작품제작, 현장실증수행(3t/h) • 개선점확인, 추가 적용성 및 경제성 확대를 위한 방안 수립
TRL8~9	'22.06~ 현재	• 다양한 사업참여, 기술고도화 • 대규모플랜트 적용, 사업화완성

기술개발 과정에서 국내 특허 3건과 중국 특허 2건을 확보하고, 혁신제품 지정과 녹색인증을 취득하였다. 최근 3년간 국내 60.8억 원, 해외 1.8억 원의 매출을 달성해 시장성을 입증하였다. 또한 중국시장 진출을 위해 중국황금·중국석화 등과 현장실증체계를 구축하고, 제련소 오염토양과 유전슬러지를 대상으로 실증을 수행하였다.

국내 사업화 경험을 기반으로 현장조건별 기술규범을 정리하고, 중국황금 제련소와 중국석화 유전설리지 현장에서 성능을 검증하였다. 이를 통해 해외시장 진출의 교두보를 마련하고, 토양정화에서 폐기물 처리와 자원화까지 적용범위를 확대해 사업 포트폴리오를 다각화하였다.



〈표면분쇄 고압세척기술의 적용 원리〉

주요 연구 성과

매출실적

6,265백만 원

국내특허(등록)

토양정화를 위한

모듈형세척장치 외

국외특허(등록)

用于土壤淨化的模決型清洗裝置
(중국) 외

국제공동연구

오염토양녹색저탄소처리기술연구
(중국) 외

국제협력

승리유전 유전슬러지 처리 현장실증

연구자 한마디

고압세척 기술은 오염토양과 유전슬러지 등 토양정화효율을 높이는 동시에 자원 회수를 가능하게 하기 위해 개발되었습니다. 연구진은 반복적인 실험과 현장 실증을 통해 기술의 성능과 경제성을 확보하였으며, 국내 대규모 중점사업인 용산 미군기지 정화사업의 성공적 완수를 넘어, 현재는 중국 등 해외 시장 진출과 현장 실증사업까지 확대하고 있습니다. 앞으로도 환경복원과 자원순환을 선도하는 글로벌 환경기술로 발전시켜 나가겠습니다.

이번 연구는 지속적으로 Spin-off 되고 있습니다. 세계최대시장 보유국인 중국의 토양정화시장은 물론, 중국 중앙기업인 중국환경, 중국석화, 중국석유 등과의 협력을 통하여 제련소오염토양정화, 유전슬러지무해화 자원화 등으로 지속 발전시켜나가고 있습니다. K-푸드, K-컬처, K-방산, K-반도체를 넘어 K-환경으로서 전세계를 뚫어갈 수 있기를 바랍니다.

성과의 차별성/우수성

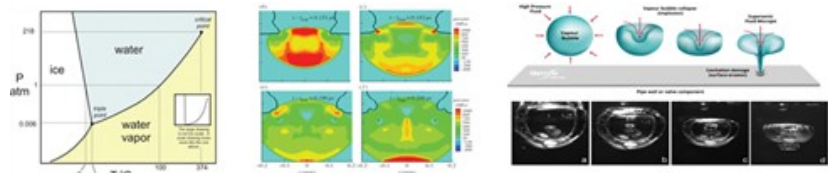
복합 오염토양을 동일한 고압세척 공정으로 처리할 수 있는 정화기술

이 기술은 고압수에서 발생하는 캐비테이션과 나노버블의 침투력을 결합해 토양 입자 표면의 오염물질을 물리적으로 박리한다. 화학용제로 오염물질을 녹이는 기존 세척방식과 달리 약품 사용과 폐액 발생을 줄여 2차 오염의 위험을 낮췄다. 또한 유류와 중금속 등 유·무기 오염물질이 함께 존재하는 복합 오염토양에도 적용할 수 있어 활용범위가 넓다.

중금속과 불소, 유류가 섞인 복합 오염토양을 대상으로 실증한 결과, 기존 기술보다 처리효율이 4.6~70.1% 높아졌다. 특히 유류(TPH) 오염에서 높은 정화성능을 보였으며, 모든 시험항목에서 토양오염우려기준 1지역 기준을 충족하였다. 약품의 반응성에 의존하지 않고 물리적 충격과 미세기포를 활용하기 때문에 오염물질의 종류가 달라져도 동일한 공정을 적용할 수 있다는 점이 강점이다.

또한 공정을 단순화하고 설비를 모듈화해 현장조건에 따라 규모를 조절할 수 있다. 일본의 기존 고압세척기술과 비교해 이젝터 구조와 나노버블 유입방식을 개선함으로써 처리 가능한 입자와 오염농도의 범위를 확대하였다. 토양정화에서 확보한 기술을 유류슬러지의 무해화와 자원회수 공정으로 확장했다는 점도 차별적이다. 이를 통해 정화효율과 환경성, 자원순환성을 동시에 확보하였다.

구분	기존기술	표면분쇄 고압세척
저약품 물리공정	• 화학약품 적용에 따른 2차오염 우려 발생 • 폐수발생과다, 중화공정 소요로 설비 비대화 및 경제성저하	• 고속고압의 수류의 캐비테이션 효과를 이용하여 오염물질을 물리적으로 박리 • 화학약품 최소화, 2차오염차단
높은 범용성	• 오염물질의 특성별 용제선택 • 유·무기 복합오염에 대하여 이원 기술 필요(특정오염물에만 선택적으로 적용 가능)	• 용출기작이 아닌 물리적 박리기작으로서, 오염특성에 비교적 영향을 적게 받아, 유·무기 복합오염에 효과적으로 적용 가능
경제성 및 효율성	• 약품투입, 교반, 폐액처리공정 필수 요구로 설비가 복잡하고 경제성 및 효율성이 떨어짐	• 공정이 단순하여 설비 간소화가 가능하고, 모듈화구성이 가능하여 경제성 및 효율성이 뛰어남
비교우위 경쟁력 (유류 슬러지 자원화)	• 유류슬러지 등 일반적인 토양정화에 적용 곤란 • 60도 온도유지 등을 위한 고에너지 소요	• 전후처리 연계공정 변화를 통한 유류 슬러지 재이용분야로의 확장성이 뛰어남 • 30도 온도적응 등 경제성 제고



〈캐비테이션버블에 의한 속에너지 발현 및 이를 통한 표면박리〉

▶ 파급효과

정화비용과 탄소배출을 낮추고 환경안전을 높인다

1. 정화비용 절감과 해외시장 진출

15만㎡ 규모의 오염토양을 처리하는 경우 기존 화학세척보다 공사원가를 약 41.1% 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 약품 투입과 중화, 폐액처리 공정을 줄이고 설비를 모듈화함으로써 초기 투자비와 운영비를 함께 절감하였다. 이러한 가격경쟁력을 바탕으로 최근 3년간 62.6억 원의 매출을 창출하였다.

구분	화학세척		표면분쇄 고압세척		공사원가 저감율(%)
	공사원가	처리비용/㎡	공사원가	처리비용/㎡	
공사원가	37,484,553	241.8	22,074,115	142.4	41.1

비고: 오염토양 155,011㎡ 적용사례기준

2. 약품과 에너지 사용을 줄이는 녹색 정화공정

15만㎡ 규모 적용사례에서는 기존 화학세척에 사용되던 산과 중화제를 사용하지 않아 약품 사용량을 100% 절감했으며, 전력소비량도 62.9% 낮췄다. 이를 탄소배출량으로 환산하면 연간 약 994톤의 이산화탄소를 감축하는 효과이며, 연간 15만 그루의 소나무를 심는 것과 같은 수준이다.

구분	화학세척		표면분쇄 고압세척		환경부하량 저감율(%)	비고
	총사용량	총비용	총사용량	총비용		
전력	6,337,282	608,379	2,349,857	225,586	62.9	오염토양
약품 산(황산)	6,825,320	614,279	-	-	100.0	155,011㎡ 적용사례기준
약품 중화제	10,902,512	3,712,974	-	-		

3. 오염토양정화기술에서 폐기물자원화기술로의 확대

20조원규모의 기금이 조성된 대규모의 중국 유전슬러지 처리에 관하여 최근 현장실증을 완료하고 기술성을 입증하였고, 경제성 검토에서 기존 처리비용 대비 30~50% 이상의 사업비 절감을 확인하였다. 이는 기존의 위험 폐기물 처분에서 중국 순환자원정책에 부합하는 자원순환을 의미하며 현재 사업화를 논의하는 등, 글로벌 시장 진출의 기반을 마련하였다.

4. 주민 건강과 생활환경 보호

대규모 오염토양과 산업폐기물에 포함된 유해물질을 제거하면 오염의 확산을 막고 토양과 지하수의 추가 오염을 예방할 수 있다. 이는 오염지역 주민의 정주환경을 개선하고 건강과 안전을 보호하는 효과로 이어진다. 또한 강화되는 환경규제와 자원순환정책에 대응할 수 있는 기술수단을 제공하며, 정화산업의 친환경 전환과 고부가가치화를 촉진한다.

용어해설

유기오염

석유계 탄화수소, BTEX, PAHs 등 유기화합물에 의해 토양·지하수가 오염된 상태

무기오염

납(Pb), 비소(As), 카드뮴(Cd) 등 중금속 및 무기물질에 의해 발생하는 오염

나노버블

나노크기의 초미세 기포로, 높은 비표면적과 장기 안정성을 통해 오염물질과의 반응 및 분리 효율을 향상

캐비테이션버블

기포가 생성·붕괴하면서 발생하는 강한 미세충격으로 오염물질을 박리·분리하는 에너지원



대표연구자

최 병 일

한국기계연구원
탄소중립기계연구소
소장
042-868-7405
cbisey@kimm.re.kr

연구진



김태훈



유화림



도규형



김창현



김민창



이근태



배준혁

정부지원내용

사업명

상용급 액체수소플랜트 핵심기술 개발

과제명

상용급 액체수소플랜트 핵심기술 개발

총 연구기간

2019.04~2026.12

총 연구비

총 24,739백만 원

* 정부출연금 18,920백만 원

민간부담금 5,819백만 원

04

영하 253℃ 수소액화 기술 국산화, '액체수소 시대'를 열다

국내 최초 0.5TPD급 수소액화 플랜트와
5대 핵심 기자재 개발·통합 실증

▶ 연구배경 및 필요성

소수 해외기업에 의존하던 수소액화 기술의 자립

수소는 탄소중립 시대의 핵심 에너지원으로 주목받고 있지만, 수소를 액화하는 핵심기술은 린데(Linde)와 에어리퀴드(Air Liquide) 등 소수 글로벌 기업이 지식재산권을 보유하고 기술이전을 제한하고 있다. 해외기술에 대한 의존이 계속되면 플랜트 도입과 유지보수에 많은 비용이 들고, 공급망이 불안정해질 경우 국가 에너지안보에도 영향을 줄 수 있다. 따라서 수소액화 공정과 핵심 기자재를 국내 기술로 확보하는 것은 수소경제 확대를 위한 중요한 국가과제다.

액체수소는 대용량 저장과 운송에 적합해 수소 모빌리티와 충전 인프라를 확대하는 데 필요한 공급기반이 된다. 안정적인 액체수소 공급망이 마련되어야 정부의 '수소경제 활성화 로드맵'과 '2050 탄소중립 전략'을 실제 산업현장에서 추진할 수 있다. 특히 수소액화 플랜트는 수소를 영하 253℃까지 냉각해야 하므로 고도의 극저온 공정설계와 정밀 기자재, 안전한 운전기술이 함께 요구된다.

이에 연구진은 해외 공정 라이선스에 의존하지 않고 국내 독자적인 수소액화 공정과 핵심 기자재를 개발하고자 했다. 또한 실제로 운전할 수 있는 실증플랜트를 구축해 기자재와 통합시스템의 성능을 검증하고, 향후 수십 톤급 상용플랜트 설계에 필요한 엔지니어링 데이터를 확보하는 것을 목표로 연구를 시작하였다. 이를 통해 수소액화 기술주권을 확립하고, 국내 기업이 글로벌 극저온·수소 인프라 시장에 진출할 기반을 마련하고자 했다.



〈해외기술로 구축된 수소액화플랜트〉



〈국내 기술로 구축된 수소액화플랜트〉
(김해 극저온기계실증연구센터)

▶ 성과내용

국내 최초 0.5TPD급 플랜트와 5대 핵심 기자재 통합 실증

연구진은 국내 최초로 하루 0.5톤의 액체수소를 생산할 수 있는 0.5TPD급 수소액화 실증플랜트를 구축하였다. 공정설계와 핵심 기자재 개발, 제작, 설치, 통합운전까지 연구 개발 전 과정을 국내 기술로 수행해 수소액화 플랜트의 기술 자립기반을 마련하였다. 주요 성과는 독자적인 극저온 공정설계, 5대 핵심 기자재 국산화, 실증플랜트 구축과 TRL 7단계 검증으로 구성된다.

1. 독자적인 극저온 공정설계

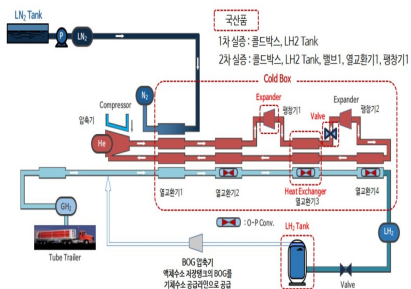
수소를 액화하려면 온도를 영하 253℃, 즉 약 20K까지 낮춰야 한다. 연구진은 액체질소를 이용한 예냉방식과 헬륨(He) 브레이튼 냉동사이클을 결합해 이 극저온 환경을 구현하는 공정을 독자적으로 설계하였다. 해외기업이 보유한 복잡한 냉동사이클을 단순히 도입하지 않고, 국내 엔지니어링 기술로 공정을 해석하고 최적화했다는 점에서 의미가 크다.

2. 5대 핵심 기자재 국산화

플랜트 성능을 좌우하는 극저온 터보 익스팬더, 알루미늄 브레이징 판형 열교환기, 진공 단열 콜드박스, 극저온 밸브, 비정형 액체수소 저장탱크를 자체 설계하고 제작하였다. 특히 터보 익스팬더와 열교환기는 글로벌 선도기업 제품과 동등 이상의 성능을 확보하였다. 저장공간의 효율을 높이는 비정형 저장탱크와 외부 열유입을 최소화하는 진공단열 콜드박스도 국내 독자기술로 개발해 초저온 장비 제조역량을 높였다.

3. 실증플랜트 구축과 TRL 7단계 검증

기초설계부터 기자재 제작, 플랜트 설치와 통합운전까지 수행해 실제로 작동하는 파일럿 플랜트를 완성하였다. 단순한 해석이나 시뮬레이션을 넘어 실제 환경에서 시스템을 운전하고 성능을 검증함으로써 기술성숙도 TRL 7단계를 달성하였다. 또한 플랜트 운전과정에서 확보한 엔지니어링 데이터는 향후 수십 톤급 상용플랜트로 규모를 확대할 때 필요한 핵심 설계자료로 활용할 수 있다.



〈수소액화 공정기술 개발〉



〈수소액화플랜트 국산화 구축〉

주요 연구 성과

특허(등록)

아이싱 방지 및 제거가 용이한 인쇄 회로기판형 열교환기(중국)

매출실적

1,943백만 원

연구자 한마디

이번 연구는 해외 기술에 의존하던 수소 액화 분야에서, 대한민국이 독자적인 기술력을 확보하여 에너지 기술 주권을 실현하겠다는 도전에서 시작되었습니다. 공정설계, 기자재 개발, 플랜트 구축에 함께 해주신 고객과 협력업체에 도움을 주신 산학연 관계자분들과, 안전규정에 도움을 주신 가스안전공사에 감사드립니다.

우리의 이 작은 성공이 대한민국이 탄소 중립 수소경제 강국으로 도약하는 데 든든한 밑거름이 되기를 바랍니다.

▶ 성과의 차별성/우수성

공정 라이선스부터 핵심 부품까지 완성한 수소액화 기술 패키지

1. 해외 라이선스 없이 완성한 국내 최초 통합 실증

이번 성과는 해외 공정 라이선스를 도입하지 않고 0.5TPD급 수소액화 파일럿 플랜트의 공정설계부터 시스템 구축까지 국내 기술로 수행하였다. 특히 영하 253℃의 극저온 환경을 안정적으로 유지하는 진공단열 쿨드박스를 자체 설계·제작해 통합시스템에 적용하였다. 국내 유일의 수소액화 테스트베드에서 실제 운전을 통해 공정과 제어시스템의 성능을 검증했으며, 축적된 실증데이터는 향후 상용플랜트 설계의 기술적 토대가 된다.

2. 5대 핵심 기자재 국산화와 실증이력 확보

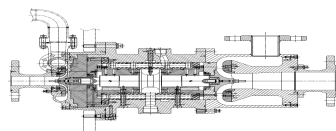
수소액화 플랜트의 핵심인 터보 익스팬더, 열교환기, 쿨드박스, 극저온 밸브, 저장탱크를 국내 기술로 개발하였다. 터보 익스팬더와 열교환기는 글로벌 선도제품과 같은 극저온 조건에서 성능을 확보하였다. 저장탱크는 일반적인 원통형·구형 구조와 달리 제한된 공간을 효율적으로 활용할 수 있는 비정형 구조로 개발했으며, 쿨드박스는 해외기술에 의존하지 않는 독자설계를 적용하였다. 이 기자재를 실제 테스트베드에 설치하고 운전해 신뢰성과 실증이력(Track Record)을 확보했다는 점이 중요하다.

3. 공정과 기자재를 하나로 묶은 국산 기술 패키지

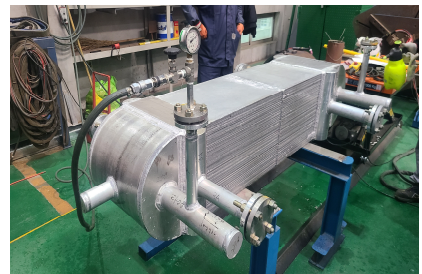
개별 부품만 개발한 것이 아니라 공정설계와 핵심 기자재, 통합제어, 실증플랜트를 하나의 기술패키지로 완성하였다. 이러한 통합기술은 향후 플랜트 구축과정에서 해외 라이선스 비용을 줄이고, 국내 기자재를 활용해 유지보수 비용과 공사기간을 낮출 수 있는 기반이 된다. 또한 국내 중소·중견 기자재 기업이 성능을 검증하고 해외시장에 진출할 때 활용할 수 있는 실증기반을 제공한다.

4. 수소 기술주권과 상용플랜트 확장기반 확보

수소액화 핵심 지식재산권과 엔지니어링 데이터를 국내에 축적함으로써 글로벌 기업의 기술독점과 이전 제한에 대응할 수 있게 되었다. 실증플랜트에서 확보한 데이터는 향후 대용량 상용플랜트의 설계기준과 안전기준을 마련하는 데 활용될 수 있다. 이는 수소경제와 탄소중립을 뒷받침하는 핵심 인프라를 국내 기술로 구축하고 글로벌 시장을 선도할 기반을 확보했다는 점에서 의미가 크다.



〈극저온 터보 익스팬더 국산화 개발〉



〈극저온 열교환기 국산화 개발〉

▶ 파급효과

액체수소 기술 자립과 극저온 신산업 생태계 조성

이번 연구는 설계와 제작, 설치, 통합운전까지 수소액화 플랜트의 전 과정을 국내 기술로 수행해 기술성숙도를 상용화 직전 단계까지 높였다. 0.5TPD급 파일럿 플랜트의 핵심 기자재를 국산화하는 과정에서 확보한 극저온 냉동기술과 헬륨 브레이튼사이클 운전 노하우는 수소산업뿐 아니라 LNG 재액화와 항공우주 등 연관 산업으로 확장할 수 있다. 특히 외산 제품이 주도하던 초저온 열교환기 시장에 국내 기업이 진입할 수 있는 기반을 만들고 수입대체 가능성을 높였다.

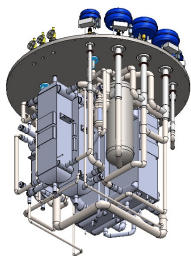
경제적 측면에서는 열교환기(Pre-cooler) 설계·제작 기술이전을 통해 약 19.4억 원의 매출을 달성하였다. 또한 수천억 원 규모의 외산 플랜트를 그대로 도입하는 대신 국내 공정과 기자재를 활용할 수 있어 향후 플랜트 구축비와 유지보수비를 줄일 수 있다. 연구과정에서 구축한 테스트베드는 국내 중소·중견기업이 극저온 기자재의 성능을 시험하고 실증할 수 있는 R&D 플랫폼으로 활용되고 있으며, 수소 모빌리티와 충전 인프라 분야의 민간 후속투자를 유도하는 역할도 하고 있다.

산업적으로는 극저온 공정과 정밀 기자재, 플랜트 EPC 기술을 연결해 에너지·기계·건설 기술이 융합된 새로운 산업생태계를 조성하였다. 국내 기자재 기업은 실제 운전환경에서 제품의 성능을 검증해 실증이력을 확보할 수 있으며, 이는 글로벌 시장 진출에 필요한 신뢰자료가 된다. 수소산업에서 확보한 기술은 LNG와 항공우주 등 연관산업에도 적용할 수 있어 국가 제조업과 플랜트산업의 경쟁력 향상에 기여한다.

사회·정책적으로는 고밀도 액체수소의 안정적인 공급기반을 구축하는 데 필요한 국산 기술을 확보해, 국가 탄소중립 목표 달성과 수소경제 확산을 지원한다. 또한 실제 플랜트 운전데이터를 바탕으로 ‘액화수소 추가 안전기준안’을 마련해 안전한 액체수소 생산과 저장, 운송을 위한 제도적 기반도 구축하였다. 결과적으로 이번 성과는 에너지 기술자립과 신산업 육성, 안전한 수소사회 구현을 함께 뒷받침한다.



〈수소액화용 콜드박스 국산화 개발〉



〈비정형 액체수소 저장탱크 국산화 개발〉

용어해설

수소액화

상온 기체 수소를 영하 253°C(20K) 이하의 극저온으로 냉각하여 액체 상태로 만드는 과정

터보 익스팬더

고압의 가스를 팽창시켜 온도를 급격히 낮추는 극저온용 터빈 장치. 영하 253°C의 환경을 구현하기 위한 냉동 사이클의 핵심 기자재



대표연구자

김 병 채

(주)포이닉스

대표이사

031-888-5530

poinixin@nate.com

연구진



김재원



김현진



김형욱



신언곤



오미란

정부지원내용

사업명

국도교통기술사업화지원사업

과제명

친환경 혼합물을 이용한 고내구성
복층 저소음배수성 동시포장공법의
개발 및 사업화

총 연구기간

2021.04~2023.12

총 연구비

총 2,100백만 원

* 정부출연금 1,260백만 원

민간부담금 840백만 원

05

페타이어 자원순환으로 탄소저감과 도로교통 소음저감, 장기 지속성능을 함께 실현하다

타이어 고무분말을 아스팔트 개질제로 활용한
친환경 GTR 저소음 포장의 현장 적용 및 사업화 성공

▶ 연구배경 및 필요성

소음은 줄지만 오래가지 못했던 기존 저소음 포장

도로 주변에 공동주택 등 주거지역이 확대되고 교통량도 증가하면서 도로교통 소음은 주요 생활환경 문제로 자리 잡았다. 지금까지는 방음벽과 방음터널이 대표적인 소음저감 대책으로 활용되었지만, 도시경관을 가리고 반사음을 만들며 겨울철 노면 결빙을 유발할 수 있다는 한계가 있다. 이에 차량 주행 시 타이어와 노면 사이에서 발생하는 소음을 줄이는 저소음 포장 기술이 효과적인 대안으로 주목받고 있다.

기존 배수성 저소음 포장은 아스팔트 혼합물 내부의 높은 공극률을 통해 차량 주행 시 발생하는 소음을 줄인다. 그러나 장기간 사용하면 공극이 먼지와 이물질로 막혀 소음저감 성능이 떨어지고, 골재가 떨어져 나가는 등 내구성 문제가 발생할 수 있다. 또한 기존 고무 개질 아스팔트는 내구성이 우수하지만 고무분말과 아스팔트를 미리 섞는 습식 생산 방식을 사용하기 때문에 별도의 저장·교반설비와 숙성과정이 필요하다. 생산조건에 따라 품질 편차가 발생하고 일반 아스팔트 플랜트에서 추가 설비 없이 생산하기 어렵다는 문제도 있었다.

한편 페타이어 발생량은 계속 증가하고 있지만 상당량이 열원으로 사용되고 있어 탄소배출과 환경부하가 발생한다. 따라서 페타이어에서 얻은 고무분말을 고무가가치 도로포장 재료로 활용하여 소음저감과 내구성 향상, 자원순환 및 탄소저감을 동시에 실현할 수 있는 새로운 도로포장 기술이 필요했다.

〈국내 페타이어 발생량 및 재활용 현황〉

구분	총 발생량		재활용				기타	
			가공이용		열이용			
2022년	383,563 ton	100 %	70,315 ton	18.3 %	246,086 ton	64.2 %	67,162 ton	17.5 %
2024년	400,150 ton	100 %	83,218 ton	20.8 %	226,553 ton	56.6 %	90,379 ton	22.6 %

▶ 성과내용

추가 설비 없이 생산하는 GTR 저소음 포장 기술 상용화

연구진은 페타이어를 재활용한 고무분말 GTR(Ground Tire Rubber)을 활용해 저소음 성능과 내구성을 동시에 갖춘 아스팔트 포장 기술을 개발하고 실제 도로에 적용해 상용화 하였다. 기존 저소음 포장이 공극구조에 의존했던 것과 달리, GTR 입자의 점탄성과 진동 감쇠 특성을 이용해 타이어와 노면의 접촉에서 발생하는 소음을 줄이는 방식을 적용하였다.

GTR이 아스팔트 혼합물 안에서 안정적으로 기능하도록 고무분말의 팽윤과 분산특성을 높이는 개질기술을 개발하였다. 고무입자가 아스팔트와 균일하게 결합하도록 함으로써 소음저감 효과와 포장의 강도, 균열 저항성을 함께 확보하였다. 이를 통해 공극 유지 상태에 따라 성능이 저하되는 기존 배수성 포장의 한계를 보완하였다.

생산방식도 개선하였다. 기존 고무 개질 아스팔트는 고무분말과 아스팔트를 미리 혼합하고 일정 시간 숙성해야 하는 습식공정을 사용해 별도의 저장·교반 설비가 필요했다. 연구진은 아스팔트 혼합물 생산과정에 바로 투입할 수 있는 건식 GTR 개질제를 독자적으로 개발 하였다. 이에 따라 추가 설비 없이 기존 아스팔트 플랜트에서 고무 개질 아스팔트 혼합물을 생산할 수 있게 되었고, 생산효율과 품질관리, 현장 적용성, 경제성을 높였다.

개발기술은 실제 도로에 적용해 장기 공용성능을 검증하였다. 시공 후 3년 이상 약 7dB의 소음저감 성능이 안정적으로 유지되었으며, 소성변형이나 균열 증가 없이 양호한 노면 상태를 유지하였다. 이러한 성능과 시장 적용성을 인정받아 녹색기술 인증과 혁신제품 지정을 획득하였으며 사업화에도 성공하였다. 이후 후속 연구를 통해 건식 생산기술을 고도화하고 관련 지식재산권을 추가로 확보하며 기술의 완성도를 높였다.



〈GTR 고무분말〉



〈GTR 개질제〉

주요 연구 성과

특허(등록)

친환경 GTR(Ground Tire Rubber)
개질 아스팔트 조성물 및 이의 제조
방법, 이를 이용한 개질 아스팔트
혼합물 및 포장공법

매출실적

536백만 원

연구자 한마디

기능성 아스콘 전문기업으로서 단순한 저소음 성능 확보를 넘어, 그 성능이 장기간 유지될 수 있는 기술 개발에 집중하였습니다.

특히 폐타이어를 고부가가치 도로포장 재료로 재활용함으로써 탄소저감과 자원순환을 실현하고, 국민이 체감할 수 있는 보다 쾌적하고 안전한 도로 환경을 만드는데 기여하고자 하였습니다.

▶ 성과의 차별성/우수성

공극이 아닌 GTR 특성으로 장기간 소음을 줄이는 저소음 포장

이번 성과의 가장 큰 차별점은 기존 저소음 포장의 성능저하 문제와 습식 고무아스팔트의 생산성 문제를 동시에 해결한 것이다.

기존 배수성 저소음 포장은 노면 내부의 공극을 이용해 소음을 줄이는 방식으로, 공극이 막히면 소음저감 효과가 떨어진다. 반면 GTR 저소음 포장은 타이어 고무입자의 점탄성과 감쇠 특성을 활용해 타이어와 노면 접촉 시 발생하는 진동과 충격음을 줄인다. 따라서 공극의 상태에 대한 의존도를 낮추고 장기간 안정적인 소음저감 성능을 확보할 수 있다.

비교 항목	기존의 배수성 저소음 포장 기술	GTR 저소음 포장 기술
소음 저감 원리	공극 기반 (공극 유지 상태에 따라 성능 좌우)	GTR 입자의 탄성 및 감쇠 특성
장기 성능	공극 막힘 시 성능 저하, 회전구간(교차로 등)에서 골재 탈리 우려	3년간 7dB 저감성능 유지, 소성변형 및 균열 증가 없음

또한 기존 고무 개질 아스팔트는 고무분말과 아스팔트를 미리 섞는 습식방식으로 생산해 별도의 저장탱크와 교반설비, 숙성과정이 필요했다. 이번 기술은 독자 개발한 건식 GTR 개질제를 기존 아스팔트 혼합물 생산공정에 직접 투입할 수 있도록 개발하였다. 추가 설비투자 없이 기존 생산공정을 그대로 활용할 수 있어 생산성과 경제성, 현장 적용성이 크게 향상되었다.

비교 항목	기존의 고무 개질 아스팔트 포장 기술	GTR 저소음 포장 기술
생산 공정 및 설비	별도의 고무 개질 설비 필수적 요구	GTR 개질제 적용으로 별도의 개질 설비 불필요
생산성 및 활용성	설비 제약으로 인한 생산성 한계 및 비용 증가	기존 아스팔트 플랜트 활용으로 생산성 및 현장 적용성 확대

기술의 우수성은 실제 도로 적용을 통해 검증되었다. 현장 적용 후 3년 동안 약 7dB의 소음저감 효과를 유지했으며, 소성변형과 균열 증가 없이 양호한 노면상태를 유지하였다. 녹색기술인증과 혁신제품 지정, 실제 사업화 성과를 통해 기술성과 환경성, 시장성을 모두 인정받았다. 또한 폐타이어를 아스팔트 개질제로 활용하면서 기존 아스팔트 생산 설비를 그대로 사용할 수 있어 기술의 현장 적용과 보급 확대가 용이하다.



〈현장 전경(고양 풍동지구, 잠실 미성크로바)〉

▶ 파급효과

생활소음을 줄이고 페타이어의 고부가가치 활용을 확대하다

① 경제적 파급효과

GTR 저소음 포장은 기존 배수성·저소음 포장보다 초기 투자비를 줄일 수 있어 한정된 도로 보수예산으로 더 넓은 구간에 적용할 수 있다. 연장 1km, 도로폭 20m를 기준으로 분석한 결과 기존 기술보다 초기 투자비를 약 22~28% 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 소음저감 성능과 포장의 내구성이 장기간 유지되어 재포장과 보수 필요성을 낮추고, 발주기관의 유지관리 부담을 줄일 수 있다. 페타이어 고무분말을 기존 고분자 개질제 대신 사용하므로 자재비 측면의 경제성도 확보하였다. 2025년부터 실제 사업화와 매출이 시작되었고 적용 예정 사업도 확대되고 있어 향후 적용 확대와 시장 성장이 기대된다.

② 산업적 파급효과

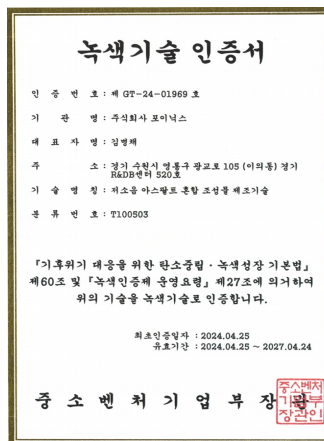
페타이어에서 생산한 GTR 개질제를 도로포장에 활용함으로써 폐기물 재활용산업과 건설 산업의 연계를 강화하여 순환경제 활성화에 기여한다. 별도의 고무아스팔트 전용설비 없이 기존 아스팔트 플랜트에서 생산할 수 있으므로 도로포장업체의 설비투자 부담을 낮추고 기술 확산 가능성을 높인다. 이는 페타이어를 단순 연료로 소비하는 방식에서 벗어나 고부가가치 건설재료로 활용하는 새로운 시장을 만들고, 친환경 도로포장산업의 확산을 이끌 수 있다.

③ 사회·환경적 파급효과

도로교통소음을 줄이기 때문에 공동주택과 학교, 병원 등 도로 인접지역의 생활소음 문제를 개선하고 주민의 삶의 질을 높일 수 있다. 또한 방음벽을 대체하거나 규모를 줄일 수 있어 도시경관을 개선하고 도로 주변 공간의 활용성을 높인다. 페타이어의 고부가가치 재활용을 확대함으로써 탄소배출과 환경부하를 줄이고 실질적인 자원순환률을 높일 수 있다. 결과적으로 이 기술은 도로교통소음 저감과 탄소저감, 자원순환을 동시에 실현하는 친환경 도로포장 기술이다.



〈인증서 : 혁신제품 제2024-199호〉



〈인증서 : 녹색기술 제GT-24-01969호〉

용어해설

GTR

타이어를 분쇄하여 만든 고무 분말, Ground Tire Rubber

개질제

아스팔트의 성능을 향상시키기 위해 첨가하는 재료

개질 아스팔트

일반 아스팔트에 개질제를 넣어 내구성을 향상시킨 아스팔트

저소음 포장

차량 주행 시 발생하는 소음을 줄이도록 설계된 도로 포장 기술

건식 생산 방식

고무분말 또는 GTR 개질제를 아스팔트, 골재와 동시 혼합하여 아스콘 혼합물을 생산하는 방식

습식 생산 방식

고무 분말을 아스팔트와 미리 혼합·숙성하여 개질 아스팔트를 제조한 후, 골재와 혼합하여 아스콘 혼합물을 생산하는 방식



대표연구자

김 광 선

(주)웅진고분자

기술연구소 이사

031-234-8924

woongjinpm@naver.com

연구진



이영숙



송현영



김태경

정부지원내용

사업명

국토교통기술사업화지원사업

과제명

ICT기반 유지관리 기술을 적용하여 노후 하수관 정밀진단이 가능하고 지반침몰을 관측하여 긴급 보수가 가능한 하수관 자동화 보수 로봇 개발

총 연구기간

2018.04~2019.12

총 연구비

총 667백만 원

* 정부출연금 400백만 원

민간부담금 267백만 원

06

사람 대신 장비가 하수관을 보수해 작업자와 도로를 함께 지키다

비굴착 무인 시공으로 공사기간을 60% 단축하고
공사비를 28% 절감

▶ 연구배경 및 필요성

위험한 하수관 내부 작업과 반복되는 지반침하

국내 하수관로의 노후화가 빠르게 진행되면서 하수관 파손과 누수로 인한 지반침하, 이른바 싱크홀 사고가 주요 사회문제로 떠오르고 있다. 특히 설치 후 20~30년 이상 지난 하수관은 균열과 이음부 손상이 발생하기 쉽고, 이를 통해 토사가 유실되면 관 주변에 빈 공간이 형성된다. 이러한 공동은 도로 함몰과 시설물 파손으로 이어져 시민의 안전을 위협할 수 있다.

기존 대형 하수관 보수는 CCTV로 손상 위치를 확인한 뒤 작업자가 직접 맨홀과 관 내부에 들어가 시공하는 방식이 일반적이었다. 그러나 하수관 내부에는 황화수소와 메탄 가스 등 유해가스가 존재하고 공간도 매우 좁아 질식과 중독, 추락사고의 위험이 크다. 실제로 맨홀과 오·폐수 시설은 건설·유지관리 분야의 대표적인 고위험 작업공간으로 분류된다.

기존 공법이 관 내부에 보강시트를 부착하는 데 집중되어 있다는 점도 한계였다. 관 자체의 손상은 보수하더라도 관 외부에 생긴 공동과 토사 유실은 그대로 남을 수 있어 지반침하 위험이 계속될 수 있다. 또한 손상부를 통해 지하수와 빗물 등이 하수관으로 유입되는 불명수는 하수처리량을 불필요하게 늘리고, 국가와 지방자치단체의 처리비용과 유지관리 예산 부담을 높인다.

이에 연구진은 ICT 기반 정밀진단과 자동화 보수장비를 결합해 작업자가 관 내부에 들어가지 않고도 대형 하수관을 안전하게 보수하는 비굴착 기술을 개발하였다. 관 내부의 손상을 보수하는 동시에 관 외부 공동을 채워 지반침하를 예방하고, 침입수를 차단해 하수처리비용까지 줄이는 예방 중심의 스마트 유지관리체계를 구축하는 것이 목표였다.



〈작업자를 통한 하수관 보수(인력 투입)〉



〈고 팽창 팩커 하수관 보수(장비 투입)〉

▶ 성과내용

진단부터 보수와 지반 안정화까지 한 번에 수행하는 무인시스템

연구진은 노후 하수관의 파손과 누수로 발생하는 지반침하와 작업자 질식사고를 예방하기 위해 ICT 기반 비굴착 자동화 보수기술을 개발하였다. CCTV 조사 후 작업자가 직접 관 내부에 들어가던 기존 방식과 달리, 지상에서 장비를 조작해 진단과 보수, 보강, 지반 안정화를 연속적으로 수행하도록 시스템을 구성하였다.

핵심기술은 친환경 지수재와 고폽창 기능성 팩커, 지수재 주입시스템, CCTV 진단장비, 굴절식 보수장비를 하나의 통합체계로 결합한 것이다. 카메라와 보수장비를 관 내부로 이동시켜 손상 위치를 정밀하게 확인하고, 해당 지점에 지수재를 주입한다. 작업자가 유해가스가 있는 관 안에 들어갈 필요가 없으므로 시공 안전성을 크게 높였으며, 손상 발견과 보수 사이의 시간차도 줄였다.

기존 부착식 공법은 보강시트를 관 벽면에 붙이는 방식이어서 재료가 수축하거나 들뜨고 떨어지는 문제가 발생할 수 있었다. 이번 기술은 손상부에 재료를 주입하는 방식으로 전환해 이러한 수축과 박리 문제를 줄였다. 또한 고폽창 기능성 팩커를 활용해 관 내부에서 손상 부위를 안정적으로 밀폐하고, 지수재가 필요한 곳에 정확히 주입되도록 했다.

특히 관 내부를 막는 데 그치지 않고 관 외부에 형성된 공동까지 채우는 샌드겔(Sand-Gel) 기술을 적용하였다. 지수재가 관 외부의 빈 공간으로 퍼져 토사를 고정하고 공동을 충전함으로써 지반침하의 원인이 되는 토양 유실을 사전에 차단한다. 이에 따라 한 번의 공정으로 누수 차단과 관 보수, 외부 공동 보강, 지반안정화를 함께 수행할 수 있다.

결과적으로 이 기술은 작업자가 직접 진입하는 사후 보수방식에서 벗어나 장비 중심의 예방형 스마트 유지관리체계를 구현하였다. 시공 안전성과 품질, 작업효율을 함께 높였으며, 하수관 누수와 지반침하를 동시에 관리할 수 있는 통합기술로 완성하였다.



〈대형 하수관 보수 팩커 제작〉



〈대형 하수관 보수 팩커 팽창 테스트〉

주요 연구 성과

특허(출원)

팽창 조절 구조의 굴절식 팩커 장치

매출실적

3,269백만 원

연구자 한마디

이영숙 대표이사

기술은 사람을 위험으로부터 보호할 때 가장 큰 가치를 가진다고 생각합니다. 본 기술은 작업자가 위험한 하수관 내부에 직접 진입하지 않고도 안전하게 보수 작업을 수행할 수 있도록 함으로써, 건설현장의 안전 수준을 한 단계 높이는 데 기여하였습니다. 연구 성과가 현장의 안전을 지키는 기술로 활용되고 있다는 점에 큰 보람을 느낍니다.

김광선 기술이사

본 기술은 단순한 시설물 보수를 넘어 하수관 누수로 인한 불명수 유입을 감소시켜 하수처리 비용을 절감하고, 국가와 지방자치단체의 유지관리 예산을 보다 효율적으로 활용할 수 있도록 기여한 기술입니다. 건설·환경·ICT 기술을 융합하여 국민 안전 확보와 국가 예산 절감이라는 두 가지 가치를 동시에 실현할 수 있었다는 점에서 큰 의미를 느끼며, 연구자로서 깊은 자부심을 가지고 있습니다.

성과의 차별성/우수성

작업자 무투입과 관 외부 공동 충진을 동시에 구현

1. 작업자 무투입 안전 중심 시공

CCTV 진단장비와 굴절식 보수장비를 지상에서 원격 운용해 손상 진단부터 보강까지 수행한다. 작업자의 관 내부 진입을 없애 질식, 유해가스 중독, 추락 등 산업재해 위험을 크게 줄였다.

2. 관 내부 보수와 외부 공동 동시 보강

친환경 지수재와 샌드겔 형성기술을 활용해 누수를 차단하고 관 외부의 공동을 동시에 채운다. 이를 통해 관의 손상을 복구하고 토사 유실과 지반침하를 예방한다.

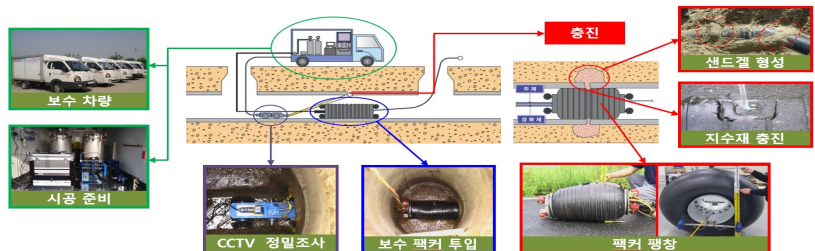
3. 진단·보수·지반안정화 공정 통합

진단장비와 팩커, 주입시스템을 연계해 기존의 개별 공정을 하나로 통합하였다. 작업시간을 단축하고 긴급 손상에 신속히 대응하며 유지관리 효율을 높였다.

4. 친환경성과 현장 적용성 확보

어류독성시험을 통과한 무독성 친환경 지수재를 적용해 지하수와 토양의 오염 가능성을 줄였다. 건설·환경기술 인증과 다수의 현장 적용을 통해 안전성, 보강능능 및 시공 기능성을 검증하였다.

비교 항목	기존 기술 (인력 투입 및 부착식 공법)	신기술 (ICT 기반 무인 보수 시스템)
시공 방식	작업자가 맨홀 내부에 직접 진입하여 시공	장비(CCTV 카메라, 굴절식 팩커)를 활용한 지상 원격 무인 시공
작업 환경	질식, 유해가스 중독, 추락 등 산업재해 위험 상존	작업자 무투입으로 근본적인 안전사고 위험 제거
보수 방식	부착식 공법 적용으로 재료 수축 및 박리 발생 우려	주입식 공법 적용으로 재료 수축 및 박리 현상 원천 방지
구조적 대응	단순 관 내부 표면 보수에 국한	관 내부 보수와 외부 동공 충전 (Sand-Gel) 동시 수행
지반침하 예방	사후 보수 위주로 토사 유실에 대한 선제적 대응 한계	토양 유실 사전 차단을 통한 지반침하(지반함몰) 근본적 예방
사용 재료	일반 보수 재료 사용	어류독성 시험 통과 무독성 친환경 지수재 적용
공정 및 경제성	진단과 보수 시공 간 시간차 발생 및 개별 공정 운영	진단-보수-보강 통합 체계로 공기 60% 단축, 공사비 28% 절감



〈지반침하 예방 및 침입수 저감을 위한 하수관 부분보수 지수재 주입공법 개발〉

▶ 파급효과

하수관 유지관리비를 줄이고 지반침하와 산업재해를 예방하다

1. 공사비와 장기 유지관리비 절감

비굴착 자동화 공법은 도로를 굴착하고 복구하는 작업을 줄여 공사기간과 공사비를 절감할 수 있다. 또한 관 내부 누수와 외부 공동을 함께 보강해 보수수명을 늘리고 반복적인 보수수요를 줄이므로 생애주기 유지관리비용(LCC)을 낮춘다. 손상부를 통한 불명수 유입을 차단하면 하수처리장에서 불필요하게 처리해야 하는 물의 양도 줄어 지방자치단체와 국가의 하수처리비용 절감으로 이어진다. 이러한 경제성과 현장성을 바탕으로 약 3년간 시공과 장비판매를 통해 약 32.7억 원의 사업화 매출을 달성하였다.

2. 건설·환경·ICT가 결합된 스마트 유지관리시장 확대

하수관 유지관리라는 전통적인 건설분야에 ICT 진단기술과 자동화장비, 친환경 재료를 결합해 새로운 스마트 인프라 관리시장을 만들었다. 노후 하수관이 증가하면서 정밀진단과 예방보수 수요도 계속 늘어날 것으로 예상된다. 장비와 재료, 진단서비스를 함께 제공하는 사업모델은 국내뿐 아니라 노후 인프라 문제가 큰 해외시장에도 적용할 수 있다. 또한 사후 복구에 집중하던 시장을 위험을 미리 차단하는 예방 중심 시장으로 전환하는 계기가 된다.

3. 지반침하와 산업재해 예방

하수관 누수로 인한 토사 유실을 차단하고 관 외부 공동을 채움으로써 도로 함몰과 지반침하 위험을 낮출 수 있다. 이는 시민의 생명과 재산을 보호하고 도시 기반시설의 안전성을 높이는 데 기여한다. 또한 작업자 무투입 시공을 통해 하수관 내부의 질식과 유해가스 중독 등 산업재해 위험을 줄일 수 있다.

4. 환경오염을 줄이는 지속가능한 인프라 관리

친환경 지수재와 비굴착 공법을 사용하면 굴착과 복구과정에서 발생하는 폐기물과 교통 불편, 소음, 분진을 줄일 수 있다. 지수재가 지하수와 토양에 미치는 영향도 최소화하였다. 결과적으로 이 기술은 안전과 예산절감, 환경보전을 함께 실현하는 지속가능한 도시 인프라 유지관리기술이다.



〈기술사업화 마케팅을 위한 전시회 및 설명회 참가〉

용어해설

불명수

하수관 균열이나 누수를 통해 하수관으로 유입되는 지하수 및 빗물

지반침하

지하의 빈 공간 발생 등으로 인해 지반이 내려앉는 현상(일명 싱크홀)

관 외부 공동

하수관 주변 토사가 유실되어 발생한 지반 내부의 빈 공간

팩커

하수관 내부에서 지수재를 원하는 위치에 주입하기 위한 팽창식 주입장치

지수재

물의 누수를 차단하거나 유입을 방지하기 위해 주입하는 보수 재료

샌드겔

지수재와 토사가 결합하여 형성된 충전체로, 공동을 메우고 지반을 안정화함



대표연구자

심 창 수

중앙대학교
사회기반시스템공학부 교수
02-820-5895
csshim@cau.ac.kr

연구진



최재웅 박세진 이순환



성택룡 윤기정 박천중



최성철 노기태 김태경

정부지원내용

사업명
스마트건설기술개발사업

과제명
디지털 기반 도로구조물 설계-제작-시공 지원기술 개발

총 연구기간
2020.04~2025.12

총 연구비
총 20,543백만 원
* 정부출연금 13,805백만 원
민간부담금 6,738백만 원

07

공장에서 구조부재를 만들고 디지털로 조립하는 탈현장 건설기술

BIM·증강현실·3D 콘크리트 프린팅을 연결해
설계부터 유지관리까지 디지털화

▶ 연구배경 및 필요성

인력 부족과 재난에 대응하는 탈현장 교량건설

생산인구 감소와 숙련기술자의 고령화로 건설현장의 전문인력 부족이 심화되고 있다. 동시에 교량을 비롯한 기반시설은 빠르게 노후화되고 있으며, 기후변화로 인한 재해·재난이 증가하면서 손상된 인프라를 신속하게 구축하고 복구하는 능력도 중요해졌다. 공장에서 부재를 미리 제작하고 현장에서 조립하는 프리패브 기반 탈현장건설(OSC)은 적은 인력으로 품질과 안전을 일정하게 유지하고 공사기간을 줄일 수 있는 대안이다.

그러나 탈현장건설을 제대로 구현하려면 설계와 제작, 운송, 조립, 유지관리 정보를 하나의 데이터로 연결하는 제조업형 생산체계가 필요하다. 건설산업에서도 BIM과 디지털 트윈이 활용되고 있지만, 사업 초기부터 유지관리까지 전 단계의 참여자가 동일한 데이터를 바탕으로 협업하고, 그 결과를 실제 고속도로 교량현장에서 검증한 사례는 거의 없었다.

특히 중소 건설기업은 고가의 상용 BIM 소프트웨어와 전문인력 부족으로 디지털 기술을 도입하는 데 어려움을 겪고 있다. 따라서 특정 소프트웨어에 대한 의존도를 낮추고, 데이터 기반으로 프리패브 부재의 설계와 제작, 검측, 가설, 유지관리를 지원하는 실용기술이 필요했다. 이를 통해 건설산업 공급망의 핵심인 중소기업의 디지털 전환을 지원하고, 재난 상황에서도 빠르게 복구할 수 있는 회복탄력성을 갖춘 교량 건설기술과 절차를 마련하고자 했다.



〈프리패브 교량 자동화생산 및 사전시공기술〉



〈로봇암을 이용한 디지털 디자인 구현 form free 생산기술〉

▶ 성과내용

디지털 모델과 증강현실, 3D 프린팅을 연결한 교량건설

이번 연구는 제작과 조립의 편의성을 고려하는 기존 DfMA(Design for Manufacture and Assembly) 개념에 유지관리까지 더한 DfMA&M(Design for Manufacture, Assembly and Maintenance) 기반의 프리캐스트 교량 엔지니어링기술을 개발하였다. 설계에서 제작, 검측, 현장조립, 유지관리까지 동일한 3차원 디지털 모델과 데이터를 활용하도록 기술을 구성하였다.

첫째, 상용 BIM 소프트웨어에 대한 의존을 줄이는 데이터 기반 모델 자동생성기술을 개발하였다. 기존 BIM 모델은 형상정보가 고정되어 실제 제작과 시공과정에서 발생하는 변경사항을 즉시 반영하기 어려웠다. 연구진은 설계데이터와 제작·검측데이터를 연동해 모델이 자동으로 갱신되도록 알고리즘을 구현하고, 참여기관 간 데이터 교환을 위한 표준화체계를 마련하였다. 경량화된 데이터를 활용해 대규모 인프라사업에도 적용할 수 있으며, BIM을 실제 운영데이터와 연결하는 Level-3 BIM, 즉 디지털 트윈의 기반을 확보하였다.

둘째, 공장에서 제작한 프리캐스트 부재의 형상을 디지털로 검측하고 증강현실(AR)로 사전 조립성을 확인하는 기술을 개발하였다. 부재의 3차원 형상을 측정한 데이터로 원본 설계 모델을 자동 업데이트하고, 현장으로 운반하기 전에 가상공간에서 부재 간 간섭과 조립 가능성을 검토한다. 이를 통해 제작오차를 현장에서 발견해 재작업하는 문제를 줄이고 품질과 안전을 높였다.

셋째, 프리캐스트 구조의 연구거꾸집을 자동으로 생산하는 로봇팔 기반 3차원 콘크리트 프린팅 기술을 확보하였다. 디지털 엔지니어링 모델에서 로봇의 이동경로를 제어하는 G-code를 추출하고, 로봇팔이 콘크리트를 적층하도록 했다. 재료배합과 굳지 않은 콘크리트의 면가공, 출력형상 품질관리기술도 함께 개발해 설계데이터가 실제 생산장비로 직접 연결되는 제조자동화를 구현하였다.

넷째, BIM 데이터와 게임엔진을 연계한 3차원 시각화·증강현실기술을 실제 대규모 교량 공사에 적용하였다. 현장 근로자가 모바일기와 AR 장비를 통해 제작과 운송, 가설순서, 시공상태를 직관적으로 확인하고 디지털 검측에 활용하도록 했다. 이를 통해 설계정보를 현장에 빠르게 전달하고 참여자 간 의사소통과 공정관리를 개선하였다.



〈건설근로자 모바일 증강현실 기술〉

주요 연구 성과

논문

Effects of 3D-printed concrete permanent formwork on the flexural behavior of reinforced concrete beams: Experimental and analytical investigations

특허(등록)

초기 압출재료 처리와 면가공 처리가 가능한 3차원 콘크리트 프린팅 시스템 및 프린팅방법

매출실적

437백만 원

인력양성

7명

소프트웨어

선형기반 현차부 및 철근 배치 자동화 알고리즘

수상실적

스마트건설 유공포상(국무총리상)

연구자 한마디

스마트건설기술개발사업은 현장에서 쓰일 수 있는 기술을 개발하는 것을 처음부터 목표로 설정하여 기술의 수요자가 개발에 참여하는 형태로 시작하였습니다. 인력수급과 디지털 전환의 어려움을 겪는 기업들과 엔지니어들이 이 연구개발 과정에 참여하면서 자발적인 기술 적용과 피드백을 제공하고 이를 통해 내재화하는 과정이 가장 큰 연구 성과로 고려되었습니다. 스마트기술이 반드시 실제 사업에 유효하게 적용되지 못하는 경우가 많아서 이러한 기업들의 노력이 실제 특허, 신기술, 사업 적용으로 이어지는 선순환 구조가 만들어지는 원동력이 되었습니다. 데이터기반의 연구를 중요한 틀로 설정한 것이 인공 지능 시대에 중요한 데이터 자산을 창출하는 성과로 이어지게 되기를 바랍니다.

➤ 성과의 차별성/우수성

실제 교량공사에서 검증한 DfMA&M과 증강현실 기술

1. 정적인 BIM을 실제 생산데이터와 연결한 Level-3 BIM

기존 BIM은 특정 상용 소프트웨어에 대한 의존도가 높고, 설계단계에서 만든 형상모델이 제작·시공 중 발생한 변화와 분리되는 경우가 많았다. 이번 연구는 제작오차와 검측결과, 시공정보를 데이터로 모델에 직접 연결해 3차원 모델이 계속 갱신되도록 하였다. 단순 시각화에 그치지 않고 시공·제작 시뮬레이션과 생산장비 자동화, 디지털 검측까지 하나의 모델을 활용할 수 있도록 기능을 확장하였다.

2. 대규모 실제 교량공정에 증강현실을 적용

건설현장에서 AR 장비가 홍보나 단순 시연에 사용된 사례는 있었지만, 실제 대규모 교량사업의 제작과 가설, 검측공정에 적용해 기존 업무를 대체할 수 있음을 검증한 사례는 드물었다. 이번 연구는 실제 고속도로 현장에 AR을 적용해 부재의 위치와 조립순서, 시공상태를 확인하였다. 또한 디지털기기에 익숙하지 않은 현장기술자도 사용할 수 있도록 모바일기반 시각화기술을 함께 개발해 현장 적용성을 높였다.

3. 3차원 콘크리트 프린팅을 활용한 영구거푸집 자동생산

디지털 설계모델에서 G-code를 자동으로 추출해 로봇팔을 제어하고, 콘크리트 적층과 먼가공을 연속적으로 수행하는 기술을 개발하였다. ‘초기 압축재료 처리와 먼가공 처리가 가능한 3차원 콘크리트 프린팅 시스템 및 프린팅방법’ 특허를 확보했으며, 출력 직후 표면을 정리해 후속작업을 줄일 수 있다. 3D 프린팅 영구거푸집이 철근콘크리트 보의 휨강도를 향상시킨다는 점도 실험과 해석을 통해 확인하였다.

4. 학술성과와 실제 사업화를 함께 달성

3D 프린팅 콘크리트 영구거푸집의 구조성능 연구는 Impact Factor 6.6 수준의 SCI급 국제학술지에 게재되어 학술적 타당성을 인정받았다. 또한 건설신기술 2건과 재난안전신기술을 확보하고, 실제 프리팹 교량공사에 적용해 사업화까지 연결하였다. 설계개념과 생산자동화, 현장실증을 하나의 체계로 완성했다는 점에서 기술적 완성도가 높다.



〈DfMA&M을 위한 디지털트윈 기술〉



〈3DCP 제작 구조부재 성능검증〉

▶ 파급효과

스마트건설 시장과 재난복구형 교량기술의 확산

기술적으로는 BIM과 증강현실, 로봇자동화, 3차원 콘크리트 프린팅을 연결해 설계-제작-시공-유지관리 전 과정의 디지털화를 실현하였다. BIM 데이터와 게임엔진을 연계한 시각화기술은 교량뿐 아니라 터널과 건축물 등 다른 기반시설에도 활용할 수 있다. 또한 제작과 검측데이터가 축적되면 시설물의 디지털 트윈을 구축하고 유지관리 단계에서 변형과 손상을 추적하는 데 사용할 수 있다.

경제적으로는 탈현장건설과 프리랩 교량시장의 확대를 촉진하였다. ‘조정·화명 광역도로 강관가로보 설치공사’ 등의 사업화를 통해 2024년부터 2025년까지 약 4억 3,700만 원의 매출을 달성하였다. 건설신기술과 재난안전신기술을 확보해 기업이 기술을 이전받고 실제 사업에 적용할 수 있는 신뢰기반도 마련하였다. 공장에서 부재를 표준화해 생산하면 현장 작업과 재작업을 줄여 공기와 비용을 절감할 수 있다.

사회적으로는 숙련인력 부족과 건설근로자 고령화에 대응할 수 있다. 3차원 모델과 AR을 활용해 복잡한 정보를 쉽게 전달하면 현장 의사소통 오류를 줄이고 적은 인력으로도 품질을 관리할 수 있다. 프리랩 구조물은 공장에서 품질을 관리해 내구성을 높이고 현장 위험작업을 줄이는 효과도 있다. 재해·재난으로 교량이 유실되었을 때 표준화된 부재를 이용해 신속하게 복구할 수 있어 인프라서비스의 회복탄력성을 높인다.

또한 중소 전문기업에 기술을 이전하고 실제 적용사례를 제시함으로써 BIM 전문인력과 투자여력이 부족한 기업의 디지털 전환을 지원하였다. 연구과정에서 양성된 석·박사급 인력이 관련 기업에 진출해 산업계의 전문인력 확보에도 기여하였다. 이러한 성과를 인정받아 행정안전부 국무총리상을 수상하는 등 기술의 사회적·산업적 가치를 대외적으로 인정받았다.



〈개발기술의 실제 고속도로 사업 적용〉

용어해설

탈현장건설기술

Off-site construction(OSC)는 현장에서의 작업을 최소화하기 위해 공장제조를 통한 생산자동화와 현장 조립 시공을 통해 급속시공을 구현하고 소요인력 최소화, 시공기간 단축을 통한 사업비 절감을 구현하는 기술

DfMA&M

설계자가 제작, 가설 시공, 유지관리를 포괄하는 마스터 엔지니어로 역할을 하도록 하는 기술개념으로 제조업에서 수직계열화되고 실시간으로 제품의 문제점을 보완 개선하는 체계를 건설 산업에 도입하기 위한 기술 개념

BIM

건설산업의 의사소통방식을 3차원 BIM 데이터로 전환하는 기술 개념 이고 관련된 절차의 혁신을 동반하는 개념

디지털 트윈

실제 물리적 객체와의 연동을 통해 가상모델이 데이터 혹은 시뮬레이션을 통해 업데이트되고 궁극적으로 평가 및 예측 기능을 갖는 기술 개념

회복탄력성

준비된 공급체계를 통해 신속한 인프라 서비스를 복구하도록 하는 개념



대표연구자

김 형 관

연세대학교
건설환경공학과 교수
02-2123-5799
hyoungkwan@yonsei.ac.kr

연구진



정두호



김주현



백선웅



임승현

정부지원내용

사업명

스마트건설기술개발사업

과제명

임시구조물 스마트 안전확보 기술 개발

총 연구기간

2020.04~2025.12

총 연구비

총 10,552백만 원

* 정부출연금 8,933백만 원
민간부담금 1,619백만 원

08

사족보행 로봇이 도면 없이 비계를 찾아 3차원으로 점검하다

자율 탐사·스캔계획·장애물 회피를 통합해
실제 건설현장 데이터 커버리지 96.8% 달성

▶ 연구배경 및 필요성

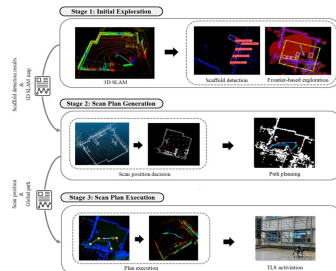
사람이 직접 스캔하던 비계 안전점검의 자동화

비계와 동바리 등 건설현장의 임시구조물은 작업자의 이동과 작업공간을 지지하는 필수 시설이다. 그러나 공사가 끝나면 철거되는 구조물이라는 이유로 BIM이나 상세 설계도면이 없는 경우가 많아 체계적인 안전관리가 어렵다. 특히 비계는 현장에서 가장 널리 사용되는 임시구조물이면서 추락과 붕괴 등 중대재해가 자주 발생하는 위험요소다. 부재의 간격과 치수, 연결상태가 안전기준에 맞는지 정확하게 점검해야 하지만, 지금까지는 작업자가 레이저 스캐너를 들고 현장을 이동하며 3차원 점군 데이터를 수집해 왔다.

사람이 직접 스캔하면 많은 시간과 인력이 필요하고, 작업자의 경험과 스캔위치에 따라 데이터의 범위와 품질이 달라질 수 있다. 또한 비계 주변에는 철근과 배관, 자재, 작업자가 계속 이동해 점검자의 안전을 확보하기도 어렵다. 따라서 위험구역에 사람이 들어가지 않고도 반복적으로 동일한 품질의 데이터를 수집하는 자동화기술이 필요하다.

이동형 로봇을 이용한 레이저 스캐닝 연구가 진행되어 왔지만 기존 기술은 스캔위치만 자동으로 계획하고 실제 촬영은 사람이 수행하거나, BIM과 사전도면, 드론 사전스캔과 같은 정확한 정보를 미리 제공해야 하는 경우가 대부분이었다. 건설현장의 비계는 위치와 형상이 계속 바뀌고 사전도면도 없어 이러한 기술을 적용하기 어렵다. 특히 대규모 실외 건설현장에서 탐사부터 대상인식, 경로계획, 데이터수집까지 모두 자동으로 수행한 사례는 부족했다.

이에 연구진은 사전정보가 없는 실제 건설현장에서 사족보행 로봇이 스스로 비계를 찾고, 최적의 스캔위치를 계획한 뒤, 장애물을 피해 이동하며 3차원 데이터를 수집하는 통합 시스템을 개발하였다.



〈비계 데이터 자동 수집 기술 개요〉



〈건설현장 비계구조물 전경〉

▶ 성과내용

도면 없이 탐사부터 스캔까지 수행하는 사족보행 로봇

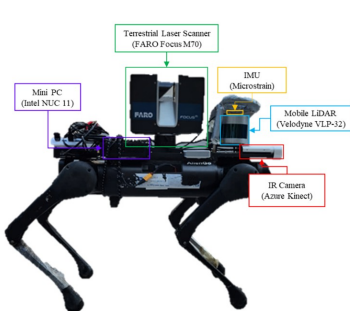
연구진은 사족보행 로봇과 라이다(LiDAR), 고정밀 레이저 스캐너를 결합해 현장도면 없이 비계의 3차원 점군 데이터를 자동으로 수집하는 ASPAR 시스템을 개발하였다. 로봇이 현장을 자율적으로 탐사하고 비계를 인식한 뒤, 스캔위치와 이동경로를 스스로 결정해 데이터를 수집하도록 전 과정을 통합하였다.

첫 번째 단계는 사전정보가 없는 환경에서의 자율탐사와 실시간 비계탐지다. 로봇은 현장을 이동하면서 라이다로 주변의 3차원 점군을 수집하고, 동시에 3D SLAM 기술로 지도를 만든다. 수집된 형상정보에서 비계의 반복적인 수직·수평 부재를 자동으로 찾아 내며, 실제 건설현장 실험에서 비계탐지 정확도 F1-score 0.985를 달성하였다.

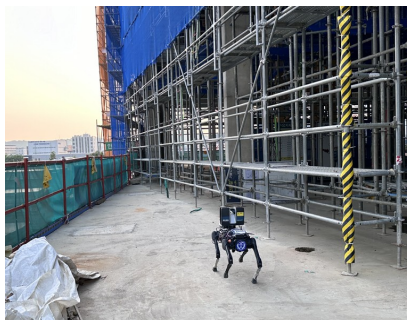
두 번째 단계는 탐지결과를 이용한 최적 스캔계획의 자동생성이다. 로봇은 확인된 비계의 위치와 크기, 주변 공간을 바탕으로 어느 지점에서 스캔해야 전체 구조를 빠짐없이 측정할 수 있는지 계산한다. 다층 격자지도와 경로최적화 알고리즘을 이용해 스캔위치를 선정하고, 모든 지점을 효율적으로 방문하는 이동경로를 생성한다. 이후 계획된 위치로 이동해 고정밀 레이저 스캐너를 작동시킨다.

세 번째 단계는 복잡한 실외 건설현장에서의 자율주행과 장애물회피다. 철근과 배관, 석재, 작업자 등 작고 움직이는 장애물이 많은 환경을 고려해 적외선 깊이카메라 기반의 실시간 장애물 탐지기술을 개발하였다. 이를 SLAM 내비게이션과 연계해 로봇이 장애물을 피해 안정적으로 이동하도록 했다. 현장실험 결과 소규모 현장에서는 사람이 직접 수행한 경우 대비 106.1%, 대규모 현장에서는 96.8%의 데이터 커버리지율을 확보하였다.

수집한 점군데이터는 비계의 3차원 CAD 모델을 복원하고, 실제 설치상태가 설계·안전 기준과 맞는지 확인하는 데 활용할 수 있다. 또한 시점별 데이터를 비교해 부재의 변형과 누락을 추적하는 디지털 트윈 구축에도 사용할 수 있다. 비계뿐 아니라 동바리와 갯폼 등 일정한 형상을 가진 다양한 임시구조물로 확장할 수 있어 건설현장 안전점검 자동화의 기반기술로 활용 가능성이 높다.



〈사족보행 로봇 하드웨어 구성〉



〈현장 주행 중인 사족보행 로봇〉

주요 연구 성과

논문

Automated system of scaffold point cloud data acquisition using a robot dog

특허(출원)

건설객체의 스캔 포지션 및 스캔 경로 자동 선정을 통한 건설현장의 모바일 로봇 자율 스캔 방법 및 스캔 시스템

연구자 한마디

이번 연구는 "건설현장에서 사족보행 로봇으로 3차원 데이터 수집을 자동화할 수 있다면 어떻게"라는 단순한 도전에서 시작했습니다. 논문을 쓰는 과정에서는 "더 큰 건설현장에서 실증해보라"는 심사 의견이 연이어 들어와 마음을 졸이기도 했는데, 막상 실제 현장에 나가 시스템을 실증하는 과정에서 가장 애를 먹은 것은 의외로 하드웨어였습니다. 센서 간 접촉 불량, 한여름 띄약별 아래서의 모터 과열 등 다양한 변수들과 끊임없이 씨름해야 했습니다.

그럼에도 이 모든 시행착오 끝에, 누구의 도움도 없이 로봇이 스스로 현장을 누비며 데이터를 수집하는 모습을 처음 지켜본 순간의 뿌듯함은 지금도 잊지 않습니다. 고생한 만큼, 건설현장 데이터 수집 자동화의 단단한 토대를 다졌다는 자부심도 함께 남았습니다.

이 성과가 건설현장에 모바일 로봇을 적용해 보려는 여러 연구자들에게 작게나마 보탬이 되기를 바랍니다.

성과의 차별성/우수성

사전 정보 없이 실외 현장을 완전 자동으로 스캔한 세계 최초 기술

1. 사전도면 없이 현장을 탐사하고 비계를 인식

기존 자율스캐닝 기술은 BIM과 도면, 드론 사전스캔 등 대상구조물의 위치와 형상을 미리 제공해야 했다. 그러나 임시구조물인 비계는 이러한 정보가 없는 경우가 많다. ASPAR는 로봇이 현장을 자율적으로 탐사하면서 3D SLAM 지도를 만들고 비계를 동시에 탐지한다. 실제 현장에서 F1-score 0.985의 높은 인식성능을 확보해, 사전정보가 없는 환경에서도 사용할 수 있음을 입증하였다.

2. 비계 형상에 맞춘 스캔위치와 경로 자동생성

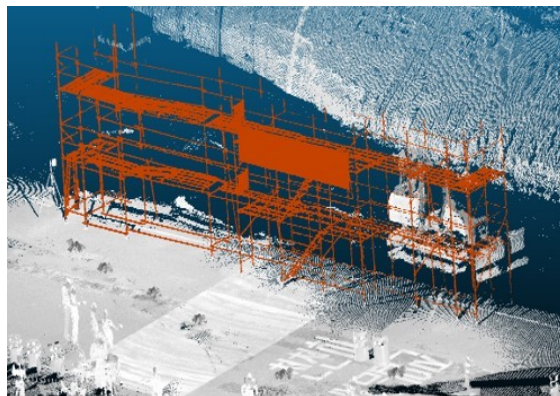
일반적인 로봇 스캐닝은 미리 정한 위치를 순서대로 방문하는 수준에 머무르는 경우가 많다. 이번 기술은 탐지한 비계의 크기와 구조를 분석해 필요한 스캔위치를 자동으로 선정한다. 다층 격자지도와 그리디 알고리즘, TSP 기반 경로최적화를 결합해 적은 이동으로 전체 구조를 측정하도록 계획한다. 실험결과 숙련작업자와 비슷한 수준의 효율과 데이터범위를 확보해 전문인력의 판단을 자동화할 가능성을 보여주었다.

3. 실제 대규모 실외 건설현장에서 완전자동 스캐닝

기존 연구는 실내나 통제된 실험환경에서 검증된 경우가 많았다. 이번 시스템은 적외선 깊이카메라 기반 장애물탐지와 SLAM 내비게이션을 결합해 철근과 자재, 작업자가 있는 실제 현장에서 자율주행을 수행하였다. 대규모 현장에서 96.8%의 커버리지를 기록했으며, 사족보행 로봇이 사전정보 없이 탐사와 비계탐지, 스캔계획, 데이터수집을 모두 자동으로 수행한 세계 최초 사례라는 점에서 차별성이 있다.

4. 안전점검과 디지털 트윈으로 이어지는 데이터 활용성

로봇이 수집한 고밀도 점군데이터는 단순 기록에 그치지 않는다. 비계의 3차원 모델을 자동으로 복원하고 부재간격과 연결상태를 정량적으로 검사항할 수 있다. 반복 측정데이터를 축적하면 구조물의 변화이력을 관리하는 디지털 자산이 되며, 향후 자동 안전점검과 현장 디지털 트윈의 핵심 입력자료로 활용할 수 있다.



〈자동 데이터 수집 시연내용〉

▶ 파급효과

위험구역 무인점검과 건설 데이터 자산화

기술적 파급효과: 무인 점검 패러다임과 데이터 자산화

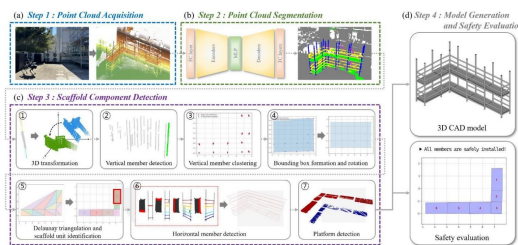
기술적으로는 사람이 직접 스캐너를 들고 현장을 이동하던 안전점검을 로봇 기반의 무인 데이터수집 방식으로 전환한다. 사전도면 없이 작동하기 때문에 비계와 동바리, 강풍 같은 임시구조물은 물론 교량과 터널, 플랜트 등 다양한 기반시설 점검으로 확장할 수 있다. 반복해서 수집한 3차원 점군데이터는 시공상태와 변화이력을 비교하는 디지털 자산으로 축적되며, 건설 디지털 트윈과 자동화 점검시스템의 기반이 된다.

경제적 파급효과: 점검 비용 구조의 전환

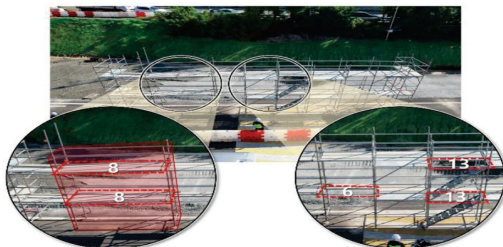
경제적으로는 숙련인력의 현장투입과 데이터수집 시간을 줄여 점검비용을 낮출 수 있다. 사람이 수행할 때마다 달라질 수 있는 측정범위를 표준화하고, 동일한 방식으로 반복점검 할 수 있어 데이터의 재현성도 높아진다. 수집된 자료로 안전기준 준수 여부를 정량적으로 확인하고 문서화하면 발주기관과 시공사의 행정·검토 부담을 줄일 수 있다. 일회성 점검을 상시 모니터링 서비스로 전환할 수 있어 로봇점검과 데이터분석 분야의 새로운 시장도 기대된다.

사회적 파급효과: 사망사고 저감과 안전 신뢰 기반 구축

사회적으로는 비계 설치불량을 조기에 발견해 추락과 붕괴사고를 예방할 수 있다. 비계 사고는 건설현장 사망사고의 주요 원인 중 하나이므로 객관적인 데이터에 기반한 반복 점검은 사람의 주관과 점검누락을 보완하는 중요한 안전망이 된다. 또한 위험구역에 점검자가 직접 들어가는 횟수를 줄여 점검종사자의 안전도 확보할 수 있다. 결과적으로 이 기술은 건설현장의 안전관리 수준과 산업 전반의 신뢰도를 높이는 데 기여한다.



〈연구응용: 임시구조물 디지털트윈 자동생성〉



〈연구응용: 비계구조물 안전규정 준수확인〉

용어해설

포인트 클라우드

레이저 스캐너나 라이다 센서로 측정된, 대상물 표면의 무수한 점들의 3차원 좌표 집합

SLAM

로봇이 미지의 공간을 이동하면서, 주변 환경의 지도를 만드는 동시에 그 지도 안에서 자신의 현재 위치를 실시간으로 파악하는 기술

LiDAR

레이저를 쏘아 물체에 반사되어 돌아 오는 시간을 측정해 거리를 계산하고, 이를 통해 주변 환경을 3차원 점군으로 인식하는 센서

TLS

한 지점에 고정된 상태에서 주변을 정밀하게 스캔해 고해상도 3차원 점군을 얻는 장비

BEV

3차원 점군 데이터를 하늘에서 내려다본 2차원 평면 영상으로 변환한 것



대표연구자

추 승 연

경북대학교
건축학부 교수
053-950-6414
choo@knu.ac.kr

연구진



정부지원내용

사업명

인공지능 기반의 건축설계 자동화 기술개발

과제명

인공지능 기반의 건축설계 자동화 기술개발

총 연구기간

2021.04~2025.12

총 연구비

총 24,903백만 원

* 정부출연금 23,050백만 원
민간부담금 1,853백만 원

09

AI 기반 지능형 건축설계
및 BIM 검토 플랫폼

기획설계부터 상세설계·공사비·인허가까지 연결한
AIBIM-Platform 공개

▶ 연구배경 및 필요성

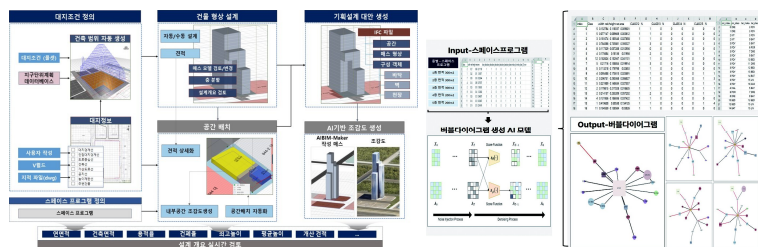
수작업과 외산 소프트웨어에 의존한 건축설계의 디지털 전환

건축설계는 건축물의 품질과 공사비, 안전, 이용자의 생활환경을 결정하는 기반산업이지만 지난 20년간 연평균 생산성 증가율은 1.0%에 머물렀다. 국내 건축사사무소의 80% 이상은 6인 이하의 소규모 업체로, 전문인력과 디지털 기술에 투자하기 어려운 구조다. 기획·계획설계부터 중간·실시설계까지 여전히 수작업과 2D 도면 중심으로 업무가 이루어져 반복작업과 오류가 많이 발생한다.

특히 전체 설계비의 75~80%가 투입되는 중간·실시설계 단계에서는 공종별 부재와 마감 정보를 사람이 직접 상세화한다. 변경사항을 여러 도면에 반복 반영해야 하므로 설계누락과 일정지연이 발생하기 쉽다. 수량과 공사비도 2D 도면과 수식에 의존해 계산하기 때문에 도면과 내역서의 연결성이 떨어지고, 평균 약 20%의 공사비 오차가 발생하는 문제가 있었다.

해외에서는 빅데이터와 딥러닝을 이용한 설계자동화 기술이 빠르게 발전하고 있지만, 국내 건축사사무소의 BIM 활용률은 8.8%에 불과하다. 범용 BIM 소프트웨어 시장의 94% 이상을 외산 제품이 차지해 기술과 비용 측면의 의존도도 높다. 국내 일부 기업이 특정 업무를 자동화하고 있으나 기획설계부터 상세설계, 공사비 산출, 인허가 검토까지 전 과정을 연결하는 AI 기반 통합기술은 부족했다.

이에 연구진은 건축설계 지식과 데이터를 AI·BIM과 결합해 계획단계의 의사결정을 지원하고, 상세설계 초안의 80% 이상을 자동 생성하며, 설계품질과 인허가 기준을 자동으로 검토하는 통합플랫폼 개발을 추진하였다. 이를 통해 중소 건축사사무소의 업무부담을 줄이고 국내 건축설계산업의 생산성과 글로벌 경쟁력을 높이하고자 했다.



〈대표성상 1: AIBIM-Mass Maker, SpaceMaker(Bubble)〉

▶ 성과내용

설계 전 과정을 지원하는 AIBIM-Platform 구축

1. AI 기반 기획설계와 공법 최적화

주소를 입력하면 대지의 법령과 토지정보를 자동 검토하고, 법적 범위 내에서 최적의 건축 매스(Mass)를 제안한다. GPT 기반 AI로 기획설계의 법규검토 업무비중을 약 40%에서 20%로 낮췄다. 또한 현장정보에 적합한 흙막이 공법과 설계 변수를 제시해 추천 정확도를 약 80%에서 95%로 높였다.

2. 중간·실시설계의 반복작업 자동화

중간·실시설계의 부담을 줄이기 위해 건축마감 자동상세화 모듈을 개발하였다. 총 19종의 내·외장 마감부재를 BIM 모델에 자동 배치하고 상세정보를 생성한다. 이를 통해 작업 시간을 97.6% 단축하고 생산성을 약 41.3배 높였으며, 누락과 도면 간 불일치를 줄였다.

3. BIM 기반 수량·공사비 예측

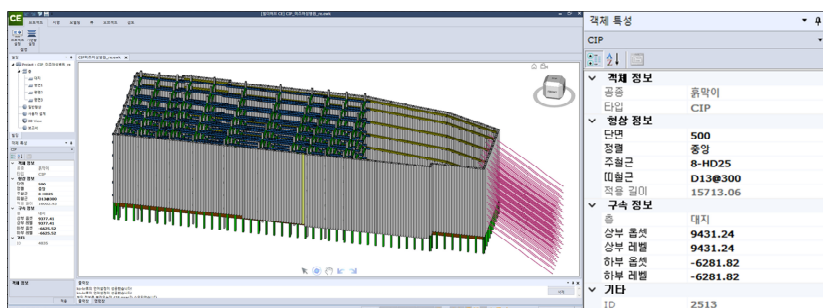
공사비 산출을 BIM 객체정보와 AI 예측방식으로 전환하였다. 국내 구조기준에 따라 철근 모델을 자동 생성하고 구조물의 형상과 부재정보로 수량과 공사비를 계산한다. 철근 수량산출 정확도 90%를 확보하고 면적당 공사비 오차율을 약 20% 줄였다.

4. 인허가와 설계인증 자동검토

45일 이상 소요되던 인허가·인증 검토를 BIM 모델 기반으로 자동화하였다. 건축법규, 에너지, BF 및 녹색건축 등 주요 인증항목의 약 90%를 자동 검토하는 룰셋을 구축하였다. 검토누락과 해석 차이를 줄이고 검토기간을 약 15일로 단축할 수 있는 기반을 마련하였다.

5. AIBIM-Platform을 통한 통합서비스 공개

기획·계획설계, 상세설계, 공사비 예측 및 법규·인증검토 기능을 AIBIM-Platform에 통합하였다. AI 건축설계 도구와 학습데이터는 2025년 12월 31일부터 공개되고 있다. 사용자는 웹에서 자동화 기능을 활용하고, 기업과 연구기관은 공개 데이터와 Open API로 새로운 서비스를 개발할 수 있다.



〈대표성과 2: AIBIM-Detailer(Excavation Support, ES)〉

주요 연구 성과

논문 145건

(대표) Generative AI in architectural design: Application, data, and evaluation methods

특허(등록) 17건

(대표) 딥러닝 모델 학습 방법, 딥러닝 모델을 이용한 공사기간 예측 방법 및 이를 수행하는 프로그램이 기록된 컴퓨터 판독이 가능한 기록매체

기술이전

BIM기반 도면생성 자동화 방법 및 시스템, 인공지능기반 건축골조 자동설계 프로세스, 인공지능기반 흙막이 자동설계 프로세스

사업화실적 11건

(대표) 제품 개발 - AIBIM Design, KBim Assess-lite

설계기준반영 7건

BIM 적용 지침서 개선을 위한 통합(안) 제안 제출

인력양성 59명

(박사:5명, 석사:43명, 학사:11명)

DB/시스템구축

AIBIM-Platform

소프트웨어 99건

(대표) 건축범위 매스 생성 모듈

기술 및 제품 인증

AIBIM-Spacemaker(평면 인식을 통한 버퍼다이어그램 변환 프로그램), AIBIM-Detailer v1.0, AIBIM-Integrity Checker (MEP) v1.0

연구자 한마디

본 연구는 건축설계라는 고도의 전문 지식과 경험이 요구되는 분야에 인공지능과 빅데이터를 접목하는 도전적인 시도였습니다. 가장 중점을 둔 부분은 '실무 활용성'이었습니다. 아무리 뛰어난 자동화 기술이라도 실제 설계 현장에서 쓰이지 않으면 의미가 없다는 생각으로, 개발 전 과정에서 현업 건축사와의 긴밀한 협업과 실증을 반복하였습니다. 특히 정성적 설계 지식을 데이터로 정량화하는 과정은 전례가 없는 작업이었기에, 연구팀 내 건축 전문가와 AI 전문가 간의 끊임없는 소통이 핵심이었습니다. 이번 성과가 대형 설계사무소뿐 아니라 기술 도입이 어려운 중소 건축사무소에도 실질적인 변화를 가져다주는 디지털 전환의 출발점이 되기를 바랍니다.

▶ 성과의 차별성/우수성

기획부터 인허가까지 연결한 국내 맞춤형 AI·BIM 통합기술

이번 성과는 건축기획부터 계획·상세설계, 공사비 산출 및 인허가 검토까지 AI와 BIM을 기반으로 하나의 흐름으로 연결했다는 점에서 차별화된다.

AIBIM-Design은 필지정보와 상·하위 법규를 분석해 건축규모와 형태를 자동 생성하고, 주변환경과 건축주 요구사항을 반영한 평면배치 대안을 제시한다. **AIBIM-Detailer**는 공공데이터와 설계지식을 활용해 흠막이 공법과 상세설계조건을 추천하고, 19종의 마감 부재를 BIM 모델에 자동 생성한다. **AIBIM-Cost Estimator**는 국내 구조기준에 따라 철근 모델링과 수량산출을 자동화하고 단계별 공사비를 예측한다.

AIBIM-Rule Checker와 **Design Certification Checker**는 법규 및 인증기준을 룰셋으로 구조화하고 BIM 객체정보와 LLM을 연계해 정량적으로 판단한다. 특히 BF 및 녹색건축인증의 정량·정성 평가를 통합 자동화하고 사용자가 기준을 수정할 수 있도록 구현하였다.

또한 외산 BIM 소프트웨어에 종속된 단일 프로그램이 아니라 웹 기반 통합플랫폼과 Open API, 학습데이터를 공개해 중소 건축사무소와 스타트업도 활용할 수 있도록 했다. 설계자동화뿐 아니라 표준·데이터·서비스 기반을 함께 제공해 산업 확산성을 높였다.

성과물 명	기술 경쟁력	주요 우수성 (실무 활용성)	국내외 차별성 핵심
AIBIM-Design (Mass / Space Maker)	국내 /국외	최적 매스 및 공간 배치 대안을 단시간에 도출하여 기획·계획 설계 주기 단축	상·하위 법규, 필지 정보, 외부 환경을 종합적으로 반영한 매스 및 레이아웃 자동 생성
AIBIM-Detailer (ES: 흠막이 시스템)	국내 /국외	기초 설계 단계 흠막이 공법 수량 산출 및 전문가 간 소통 지원	공공데이터 기반 입력정보 자동 수집을 통한 흠막이 공법 및 상세설계 자동 추천
AIBIM-Detailer (Arch: 마감 상세화)	국내	반복적인 설계 작업 자동화 및 직관적 사용 환경 (Revit Add-in) 제공	19종 마감 부재에 대한 실무 설계 지식을 반영한 정밀 자동 모델링 구현
AIBIM-Cost Estimator	국내 /국외	자재·형상별 초기 공사비 예측 및 상세 단계 항목별 물량 자동 산출	국내 구조기준 기반 철근 모델링 자동화 및 국내 데이터 최적화 맞춤형 AI 시스템
AIBIM-Rule Checker	국내 /국외	설계 단계 법규 검토 사전 시뮬레이션으로 검토 시간 단축 및 오류 감소	BIM 기반 RuleSet 및 LLM 연계를 통한 정량적 법규 판단 및 사용자 룰셋 수정 구조 구현
AIBIM-Design Certification Checker (Barrier Free, Green Building)	국내	BF 인증 및 녹색건축인증의 설계 단계 사전 검토 자동화로 설계 품질 향상	인증 기준의 룰셋 구조화를 통한 정량·정성 평가 통합 자동화 (국내 최초 수준 기술)

▶ 파급효과

중소 설계사무소의 생산성과 건축행정 서비스를 함께 혁신

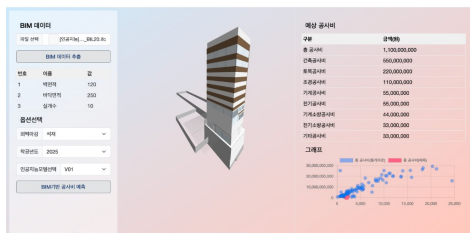
기술적으로는 설계자의 경험과 문서에 흩어져 있던 정성적 지식, 비정형 설계데이터를 수집해 시가 학습하고 활용할 수 있는 정량화된 데이터체계로 전환하였다. 이를 바탕으로 계획설계와 상세설계, 공사비 예측, 법규·인증검토에 사용할 수 있는 AI 모델과 모듈을 개발하였다. 확보한 데이터와 기능을 Open API와 빅데이터 플랫폼으로 공개해 다른 기업과 연구기관이 새로운 서비스를 개발할 수 있는 지능형 설계환경을 마련하였다.

산업적으로는 국산 설계소프트웨어와 자동화모듈을 중·소 건축사사무소에 제공해 반복 업무를 줄이고 설계생산성을 높일 수 있다. 외산 BIM 프로그램의 높은 비용과 전문인력 부족으로 디지털 전환에 어려움을 겪던 업체가 웹 기반 서비스를 통해 AI·BIM 기술을 활용할 수 있다. 또한 설계표준과 객체라이브러리, 마감부재 콘텐츠를 자재업계와 민간시장에 확산해 설계사와 자재기업, 소프트웨어기업이 함께 성장하는 선순환 생태계를 조성한다.

공공행정 측면에서는 BIM 기반 자동검토를 국가정보시스템과 연계해 인허가와 인증업무의 처리속도와 일관성을 높일 수 있다. 담당자마다 달라질 수 있는 기준해석과 반복적인 문서검토를 줄이고, 설계자도 신청 전에 오류를 스스로 확인할 수 있어 행정비용과 보완 기간이 줄어든다. 개발된 기능을 AIBIM-Platform에서 대국민 서비스로 공개함으로써 일반 사용자와 실무자가 AI 기반 설계자동화를 직접 활용할 수 있는 통합인프라를 구축하였다.

결과적으로 이 성과는 건축설계산업의 생산성 향상과 외산기술 의존도 완화, 중소기업의 디지털 전환, 건축행정서비스 개선을 동시에 지원한다. 공개된 데이터와 플랫폼을 중심으로 건축설계·소프트웨어·자재산업 간 새로운 사업과 서비스가 창출될 것으로 기대된다.

기술적 측면	- 건축산업 관점에서 설계업무 효율성, 생산성 혁신으로 설계 디자인 역량 및 경쟁력 강화, 민간과 공공에서의 BIM 저변 확대 - 정부행정 관점에서 건축가가 세움터 인허가 제출 전 사전 법규체크 및 인증 검토가 가능하기 때문에 인허가 시간 단축, 공무원 인허가 검토 용이
경제적·산업적 측면	- 계획설계 관점에서 최적 계획안 도출, 건축가-건축주-발주처 등 의사결정 지원, 초기 공사비 산정 예측 가능 - 상세설계 관점에서 정확한 설계 및 체계적 공사비 계획으로 설계비용 절감 및 공사비 증가방지, 무결점 시공으로 안전성 확보에 기여 - 설계평가 관점에서 발주관리 용이 및 행정업무 소요시간 절감
사회적 측면	- 정부행정 관점에서 건축 인허가 행정 효율화로 대민 행정서비스 확대 및 강화에 기여 - 건축산업 관점에서 새로운 건축 서비스 직능 발굴로 신규 일자리 창출 - 국가산업 관점에서 민간 건축서비스 수준 향상, 건축분야 디지털화 추진에 기여



〈대표성과 3: AIBIM-Cost Estimator〉

용어해설

LLM (Large Language Model)
대규모 텍스트 데이터를 학습하여 언어의 의미를 이해하고 생성·분석하는 인공지능 모델로, 본 연구에서는 법규 해석과 설계조건 분석 등에 활용

BIM (Building Information Modeling)
건축물의 기획, 설계, 시공, 유지 관리, 폐기까지의 모든 생애주기 동안 발생하는 정보를 3차원 디지털 모델에 통합하여 관리하는 건설 정보 모델링 기술

룰셋 (RuleSet)

건축 법규나 인증기준을 컴퓨터가 자동으로 검토·판단할 수 있도록 조건과 판단기준을 논리적인 규칙 형태로 구조화한 데이터 체계



대표연구자

이 영 덕

한국에너지공과대학교
에너지공학부 교수
061-320-9214
ydllee@kentech.ac.kr

연구진



이수용



박성호



최광순



이윤성



채대석

정부지원내용

사업명

대용량 청록수소 공급 시스템 기술
개발사업

과제명

대용량 청록수소 공급 시스템 기술
개발

총 연구기간

2025.04~2029.12

총 연구비

총 35,349.5백만 원

* 정부출연금 29,000.0백만 원
민간부담금 6,349.5백만 원

10

수소와 탄소소재를 함께 만드는 무탄소 청정수소 공정

메탄 열분해·이중개질·순산소연소를 결합해
수소 생산단가 최저 0.73달러/kgH₂ 제시

▶ 연구배경 및 필요성

탄소를 배출하는 기존 수소생산과 높은 생산비로 경제성 확보가 더딘 청정수소의 대안 필요

현재 가장 널리 사용되는 수소 생산방식인 수증기 메탄개질은 천연가스에서 수소를 대량으로 생산할 수 있지만 공정에서 많은 이산화탄소가 발생한다. 이를 보완하는 대안으로 메탄을 수소와 고체탄소로 직접 분해하는 청록수소 기술이 주목받고 있다. 그러나 메탄을 높은 온도로 가열하기 위한 에너지 소비가 크고, 열원을 공급하는 과정에서 다시 탄소가 배출될 수 있어 에너지 효율 향상과 무탄소 수소생산이라는 두 가지 요구조건을 만족하는 기술이 필요하다.

수소경제가 정부 지원에 의존하지 않고 민간 중심으로 성장하려면 생산단가도 낮아져야 한다. 기존 수증기 개질에 탄소포집·저장(CCS)을 추가하면 배출량을 줄일 수 있지만 별도의 포집설비와 저장공간이 필요해 비용과 에너지 사용량이 늘어난다. 따라서 수소를 생산하면서 공정에서 생기는 이산화탄소를 다시 원료로 활용하고, 타이어와 전도성 소재 등에 사용하는 고부가가치 고체탄소까지 함께 생산하는 다중 생산체계가 필요하다.

대용량 청록수소 생산에는 고온의 플라즈마를 안정적으로 발생시키고 제어하는 기술이 중요하다. 현재 대형 플라즈마 장비와 고주파 전원분야는 해외제품의 비중이 높아 장비도입과 유지보수에 대한 의존도가 크다. 향후 글로벌 청정수소 플랜트시장에서 경쟁하려면 고효율 플라즈마 공정과 전력전자 장비, 통합공정 설계기술을 국내 원천기술로 확보해야 한다.

이에 연구진은 메탄 열분해와 이중개질, 순산소연소를 하나의 시스템으로 결합해 외부로 배출되는 탄소를 최소화하고, 수소와 탄소소재를 동시에 생산하는 무탄소 통합공정을 설계하였다. 또한 플라즈마와 고효율 인버터를 국산화해 에너지효율과 모듈화, 경제성을 함께 높이고자 했다.



〈제작된 RF 전력변환장치〉

성과내용

탄소를 순환시키며 청정수소와 고체탄소를 동시 생산

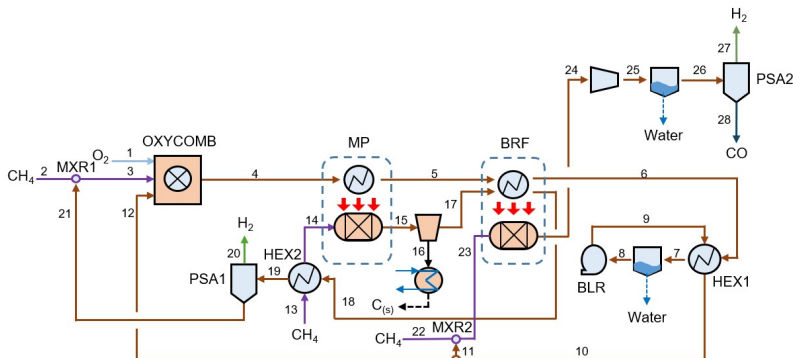
이번 연구는 메탄 열분해와 이중개질, 순산소연소를 하나의 시스템으로 결합해 수소와 고부가가치 탄소소재를 동시에 생산하는 청정수소 통합공정을 설계하였다. 기존 화석연료 기반 수소생산의 문제인 이산화탄소 배출과 낮은 열효율을 공정 내부의 탄소순환과 에너지 재활용으로 해결하는 것이 핵심이다.

먼저 메탄 열분해공정에서는 원료인 메탄을 고온에서 직접 분해해 수소와 고체탄소를 생산한다. 이 방식은 수증기 개질처럼 반응단계에서 이산화탄소를 직접 발생시키지 않으며, 부산물인 고체탄소는 타이어 제조와 전도성 소재, 이차전지·반도체 소재 등으로 활용할 수 있다. 수소만 생산하는 것이 아니라 판매 가능한 탄소소재를 함께 얻어 공정의 경제성을 높였다.

열분해 후 남은 미반응가스와 열에너지는 이중개질과 순산소연소 공정에 다시 투입된다. 순산소연소는 공기 대신 산소를 사용해 연소하므로 배기가스에서 이산화탄소를 고농도로 분리·회수하기 쉽다. 회수한 이산화탄소는 이중개질공정의 원료로 다시 사용한다. 이를 통해 공정 밖으로 배출되는 탄소를 줄이고 내부에서 계속 순환시키는 폐쇄형 탄소순환 구조를 구현하였다.

하드웨어에는 유도결합플라즈마(ICP)와 탄화규소(SiC) 전력반도체 기반의 고효율 고주파 인버터를 적용하였다. SiC 인버터로 플라즈마 전원을 정밀하게 제어해 전력변환손실을 줄이고, 대형 연소설비보다 장치를 소형화·모듈화할 수 있도록 했다. 전기를 기반으로 작동하기 때문에 빠른 가동과 정지가 가능하고, 재생에너지 출력변화에 맞춰 운전량을 조절할 수 있다.

또한 열역학적 엑서지(Exergy) 분석을 통해 공정 내부에서 실제로 활용 가능한 에너지의 흐름과 손실을 평가하였다. 그 결과 기존 수증기 메탄개질공정보다 엑서지 파괴율을 낮추고 시스템 전체의 열효율을 높였다. 이러한 통합설계는 국제학술지 논문과 특허를 통해 기술적 타당성과 독창성을 확보하였다.



〈메탄 열분해, 이산화탄소 개질, 순산소 연소 연계 청정수소 생산 통합 공정〉

주요 연구 성과

논문

Simulation and exergy-based analysis of novel CO₂-free hydrogen production: A cascade combination of methane pyrolysis, bi-reforming, and oxyfuel combustion

특허(출원)

안테나 구조체 및 상기 안테나 구조체를 포함하는 플라즈마 유도 장치

연구자 한마디

이번 연구는 “기존 화석연료 인프라를 활용하면서도 온실가스 배출을 완전히 차단하는 수소 생산이 과연 가능할까?”라는 근본적인 물음에서 출발했습니다. 기존 청록수소 공정들이 안고 있는 높은 수소 생산 비용을 해결하기 위해, 저해는 메탄 열분해, 이중 개질, 순산소 연소라는 세 가지 공정을 유기적으로 결합한 통합 공정을 설계했습니다.

수많은 조건 조정과 엑서지 분석 끝에, 연소 중 발생하는 이산화탄소를 재순환 시키고 수소 생산 단가를 획기적으로 낮출 수 있음을 경제성 분석을 통해 확인했을 때 큰 보람을 느꼈습니다.

이 성과가 향후 에너지와 화학, 첨단 소재 산업을 하나로 잇는 차세대 청정 수소 사회의 든든한 가교가 되기를 기대합니다.

성과의 차별성/우수성

탄소포집 설비 없이 공정 내부에서 배출을 막는 통합설계

1. 사후 포집이 아닌 공정 내부 탄소순환

기존 수증기 메탄개질은 수소를 생산하는 과정에서 많은 이산화탄소가 발생하고, 이를 줄이려면 별도의 CCS 설비를 추가해야 한다. 이번 기술은 메탄 열분해와 이중개질, 순산소연소를 하나의 시스템으로 연결해 탄소를 공정 내부에서 재활용하거나 고체형태로 회수한다. 배출된 탄소를 나중에 처리하는 방식이 아니라 공정설계 자체에서 외부배출을 줄이는 무탄소 청정수소 모델이라는 점에서 차별적이다.

2. 수소와 고부가가치 탄소소재의 동시 생산

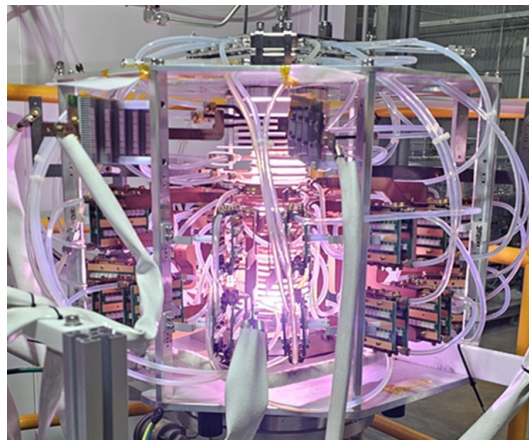
메탄 열분해에서 발생하는 고체탄소를 폐기하지 않고 이차전지와 반도체, 타이어, 전도성 소재 등에 활용할 수 있는 제품으로 회수한다. 이에 따라 수소판매 외에 탄소소재 판매수익을 확보할 수 있어 공정의 경제성을 높인다. ‘메탄 열분해, 이중개질 및 순산소 연소’ 공정이 결합된 수소 및 탄소소재 동시 생산 시스템’ 특허를 출원해 통합공정의 독창성도 확보하였다.

3. 세계 수준의 열역학적 효율

엑서지 분석으로 각 공정의 에너지 손실을 정밀하게 계산하고 열과 가스를 재활용하도록 시스템을 최적화하였다. 그 결과 기존 공정보다 엑서지 파괴율을 크게 낮췄다. 연구결과는 에너지분야 국제학술지 ‘Energy Conversion and Management’(IF 10.9, JCR 상위 2.0%)에 게재되어 기술의 타당성과 학술적 우수성을 인정받았다.

4. 재생에너지와 연계할 수 있는 전기 기반 모듈형 공정

ICP 플라즈마와 SiC 인버터를 적용해 공정을 전기 기반으로 구성하였다. 대형 중앙집중식 플랜트와 달리 장치를 모듈화할 수 있고 가동과 정지가 빠르기 때문에 태양광·풍력 등 출력력이 변하는 재생에너지와 연계하기 쉽다. 필요한 지역에 분산 설치할 수 있어 지역형 수소생산과 잉여전력 저장에도 활용할 수 있다.



〈플라즈마 방전장치〉

▶ 파급효과

청정수소 가격을 낮추고 에너지·첨단소재 산업을 연결하다

이 기술은 이산화탄소 배출이 거의 없는 수소생산체계를 제시해 수소경제 확대와 국가 온실가스 감축목표 달성에 기여할 수 있다. 기존 수증기 메탄개질이 가진 환경적 한계를 공정통합과 탄소순환으로 개선했으며, 별도의 대규모 탄소포집·저장설비에 대한 의존도를 낮출 수 있다.

1. 경제성 측면

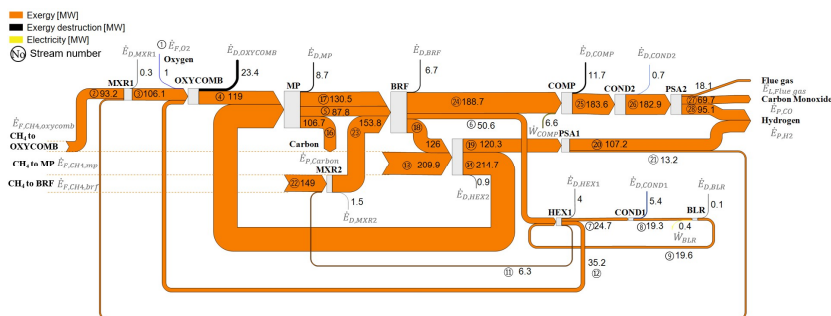
경제성 분석에서는 기존 SMR 공정의 수소생산단가가 약 4.01\$/kgH₂인 것과 비교해, 고체탄소와 일산화탄소 판매수익을 반영할 경우 통합공정의 생산단가를 최저 0.73\$/kgH₂ 까지 낮출 수 있는 것으로 나타났다. 청정수소의 보급을 가로막는 높은 가격문제를 완화 하면 수소차와 수소발전, 산업용 수소 등 전방산업의 성장도 촉진할 수 있다.

2. 산업성 측면

산업적으로는 탄소를 단순히 포집해 저장하는 데서 나아가 고부가가치 소재로 활용하는 CCU 전환을 촉진한다. 메탄 열분해에서 생산한 고체탄소는 이차전지와 반도체, 복합소 재산업의 원료로 사용할 수 있다. 따라서 에너지산업과 첨단소재산업이 결합된 새로운 시장을 만들 수 있다. 또한 공정의 엑서지 파괴율을 기존 27%에서 14%로 낮춰 자원이용 효율을 높였으며, 플라스마 장비와 전력전자, 플랜트 설계기술의 국산화와 해외수출 기반을 마련하였다.

3. 사회성 측면

사회적 측면에서는 재생에너지의 잉여전력을 수소로 저장하고 필요한 곳에서 생산하면 지역 간 에너지불균형을 완화하고 화석연료 수입의존도를 낮출 수 있다는 점이 손꼽힌다. 플라스마와 고온공정, 전력전자, 화학공정 등 여러 분야의 전문인력이 필요해 고숙련 일자리 창출에도 기여할 것으로 기대된다.



〈청정수소 생산 공정 내 엑서지 흐름도〉

용어해설

이중개질 (Bi-reforming)

수증기와 이산화탄소를 동시에 활용하여, 메탄 등으로부터 수소와 일산화탄소 같은 유용한 자원을 만들어내는 기술

유도결합플라스마

전극을 직접 접촉시키지 않고 안테나에서 발생하는 자기장을 이용해, 고온의 플라스마(기체가 높은 에너지를 받아 이온화된 상태)를 안정적으로 발생시키는 기술

엑서지 (Exergy)

단순한 에너지의 총량을 넘어, 해당 에너지가 실제로 우리에게 유용한 '일'로 얼마나 전환될 수 있는지를 나타내는 최대 유효 에너지

National Transportation Research and Development Outstanding Achievements Casebook



5.

국토교통 우수성과 20선 사례집

교통분야

11	열차의 이동권한을 국산 기술로 제어하는 KTCS-2 무선폐색센터	50
12	도로 카메라가 자율주행차의 사각지대를 대신 보다	54
13	달리는 열차가 철도시설을 촬영하고 AI가 결함을 찾다	58
14	배터리의 한계를 넘는 하이브리드 항공기 통합설계 기술	62
15	화물차를 세우지 않아도 과적과 낙하물 위험을 찾아내다	66
16	좁은 도심 물류거점에서 하루 4만 상자를 자동 분류하다	70
17	세계 최초 예약하면 출퇴근길에 찾아오는 광역콜버스	74
18	실제 자율주행차를 가상도로에서 시험하는 VILS 검증기술	78
19	철도터널 사고현장에 5분 안에 도착해 승객의 피난을 돕다	82
20	자동차 해킹을 실제 차량에서 찾아내고 국제기준으로 평가하다	86



대표연구자

이 상 용

대아티아이(주)
연구기획팀 차장
02-3430-7248
leesy@daeati.co.kr

연구진



류지훈



김우정



윤성완



신광호



김종용

정부지원내용

사업명

철도기술연구사업

과제명

일반 및 고속철도용 무선통신 및 제어시스템 실용화

총 연구기간

2014.12~2018.06

총 연구비

총 7,702백만 원

* 정부출연금 7,702백만 원

11

열차의 이동권한을 국산 기술로 제어하는 KTCS-2 무선폐색센터

LTE-R 기반 열차제어 핵심장치 개발로
SIL4 안전인증과 140.5억 원 매출 달성

▶ 연구배경 및 필요성

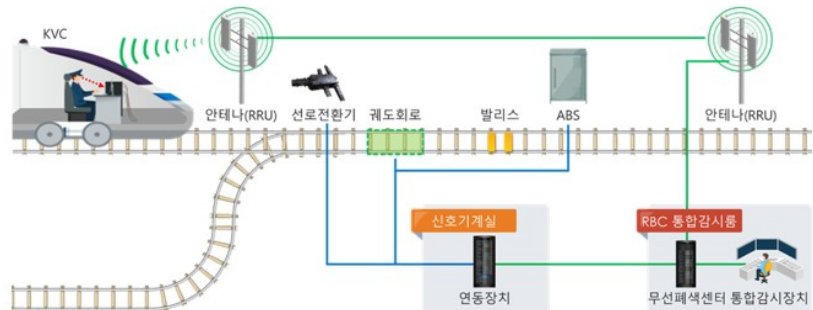
해외 신호기술에 의존하던 국내 철도제어의 자립

국내 철도는 열차검지와 운행속도 제어 등 핵심 신호기술의 상당 부분을 해외 시스템에 의존해 왔다. 반면 유럽을 중심으로 한 글로벌 철도시장은 국가와 운영기관이 달라도 열차가 원활하게 운행할 수 있도록 상호운용성을 반영한 표준 열차제어시스템을 확대하고 있다. 철도차량과 지상설비가 공통 규격으로 정보를 교환해야 국가 간 운행과 해외시장 진출이 가능하기 때문이다.

국내에서도 고속화와 수송능력 향상을 위해 선로와 노반을 개량하고 있지만, 열차의 위치와 속도, 운행권한을 관리하는 제어시스템은 여전히 외산기술에 의존하고 있었다. 해외기술을 그대로 도입하면 구축과 유지보수 비용이 높고, 국내 운행환경에 맞게 기능을 변경하거나 후속기술을 개발하는 데에도 제약이 생긴다.

따라서 유럽 열차제어 표준규격을 준수하면서 국내 철도환경과 철도전용 무선망에 맞는 한국형 열차제어시스템을 개발할 필요가 있었다. 특히 지상에서 열차의 위치를 확인하고 안전한 이동범위를 계산해 차량장치로 전달하는 무선폐색센터(RBC)는 시스템의 핵심 장치다.

연구진은 유럽 표준규격을 국내 실정에 맞게 최적화하고, LTE-R 기반 무선통신과 핵심 하드웨어·소프트웨어를 국산화하고자 했다. 이를 통해 국내 철도신호 기술의 자립도를 높이고, 국제표준에 대응할 수 있는 수출형 기술기반을 확보하는 것을 목표로 하였다.



〈한국형 열차제어시스템(KTCS-2) 구성〉

성과내용

열차 위치와 이동권한을 실시간 관리하는 국산 RBC

연구진은 한국형 열차제어시스템 KTCS-2의 핵심 지상장치인 무선폐색센터(Radio Block Center, RBC)를 국내 기술로 개발하였다. RBC는 열차가 어디에 있는지 실시간으로 확인하고, 전방 선로상태와 속도제한, 구배 등을 고려해 열차가 안전하게 이동할 수 있는 범위를 계산한 뒤 차상장치로 전달한다. 지상과 열차 사이의 데이터 교환에는 철도전용 무선망 LTE-R을 활용하였다.

먼저 무선통신 관리기능을 통해 열차 위치정보와 이동권한, 운행에 필요한 설정값을 실시간으로 주고받는다. 열차가 자신의 위치를 보고하거나 이동권한을 요청하면 RBC는 해당 노선과 운행조건에 맞는 파라미터를 적용해 제어정보를 생성한다. 국가와 노선별로 다른 운행환경을 반영할 수 있도록 설정값을 관리하는 기능도 구현하였다.

핵심기능인 이동권한(Movement Authority, MA)은 열차가 이동할 수 있는 거리와 속도를 차상장치에 전달한다. 선로의 점유상태와 신호조건, 구배, 제한속도 등을 종합해 안전한 주행구간을 설정하며, 전방 조건이 바뀌면 이동가능 거리를 즉시 줄여 충돌과 과속을 방지한다. 운전자 책임하에 제한적으로 운행하는 SR 모드 승인, 전방 선로가 비어 있는지 확인하는 Track Ahead Free 기능, 열차의 분리·결합과 적재작업을 지원하는 입환 승인·거절기능도 포함하였다.

비상상황에 대응하는 기능도 갖췄다. 관제센터의 비상정지 명령을 열차로 즉시 전송하고 해제할 수 있으며, 유지보수구간에는 임시속도제한(TSR)을 설정한다. 기관사에게 필요한 안내를 문자메시지로 제공하고, 열차가 한 RBC 관할구역에서 다른 구역으로 이동할 때는 핸드오버 기능으로 제어권을 안전하게 넘긴다. 제어영역 진입과 진출을 위한 레벨전환, 운행시작과 종료, 트립절차까지 전체 운행과정을 관리한다.

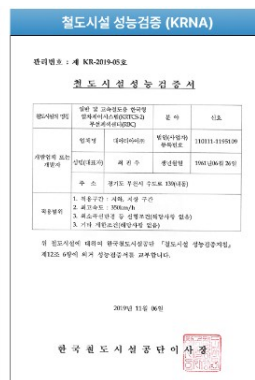
시스템은 이중계 구조로 설계해 한쪽 장치에 장애가 발생해도 안전하게 운행을 계속하거나 정지할 수 있도록 했다. 안전한 기동과 장애처리를 보장하는 시스템 모드를 구현해 열차 운행 전 과정에서 데이터와 제어기능의 무결성을 확보하였다.



〈KTCS-2 무선폐색센터(RBC)〉



〈SIL4 인증서, 철도시설성능검증서〉



주요 연구 성과

특허(등록)

KTCS-2 RBC간 핸드오버 시 링킹 정보를 활용한 이동권한 생성 장치 및 방법

매출실적

14,051백만 원

연구자 한마디

외산 기술에 의존하던 열차제어 신호의 핵심 자재를 우리 손으로 국산화하고 세계 수준으로 도약시켰다는 것에 큰 자부심을 느낍니다. 이번 KTCS-2 RBC 개발 성공이 한국형 열차제어 시스템의 완전한 상용화를 앞당기고 대한민국 철도산업의 글로벌 경쟁력을 강화하는 견고한 기반이 되기를 기대합니다.

수많은 밤을 지새우며 제로(Zero)에서 시작한 RBC 국산화 과제였습니다. 완벽한 안전성을 검증하고 세계 최고 수준의 기술력을 확보하기까지의 노력이 K-철도 상용화라는 결실로 이어져 기쁩니다.

우리가 구축한 이 기술 기반이 대한민국 철도 신호 산업을 세계 중심으로 이끄는 마중물이 되기를 바랍니다.

성과의 차별성/우수성

국제표준과 LTE-R을 결합한 완전 국산 열차제어장치

1. 국제표준을 준수한 한국형 지상장치 국산화

KTCS-2 RBC는 유럽 열차제어 표준규격인 ERTMS/ETCS를 준수해 국내외 차상장치와 상호운용할 수 있도록 개발되었다. 해외제품의 기능을 단순 모방한 것이 아니라 이동권한 생성과 열차 위치추적, 통신관리, 장애처리 등 핵심 로직과 하드웨어를 국내 기술로 구현하였다. 이를 통해 외산시스템에 의존하던 열차제어 핵심기술을 내재화하였다.

2. LTE-R을 세계 최초로 열차제어에 적용

유럽의 기존 ETCS가 GSM-R을 주로 사용하는 것과 달리, KTCS-2는 데이터 전송속도와 통신용량이 높은 LTE-R을 세계 최초로 열차제어시스템에 적용하였다. 빠른 통신을 활용해 위치와 이동권한, 비상명령을 실시간으로 주고받을 수 있으며 향후 자동운전과 고밀도 열차운행으로 확장할 기반을 마련하였다.

3. 국제 최고 수준의 안전성과 호환성

철도신호시스템의 최고 안전등급인 SIL4 인증을 획득하고, 고장 시 위험한 방향으로 동작하지 않도록 하는 페일세이프(Fail-Safe) 원칙에 따라 하드웨어를 설계하였다. 공인 TSI 시험소의 성적서를 통해 국내외 제조사의 차상장치와 호환성을 확인했으며, 철도시설 성능검증시험도 완료하였다. 국제표준과 국내 운행환경을 모두 만족하는 안전성과 신뢰성을 확보하였다.

4. 시범운행에서 실제 사업수주까지 연결

전라선 시범사업을 통해 실제 노선에서 시스템을 검증한 뒤 경부선 구축사업을 수주하였다. KTCS-2는 2032년까지 국내 96개 노선으로 확대될 예정으로, 이번 기술은 향후 사업의 핵심 기반이 된다. 또한 기존 시스템보다 지상장비 구성을 최적화해 초기 구축비와 유지 보수비를 절감할 수 있다.

KTCS에 전자연동장치까지...대아티아 이, 경부고속선 신호사업 휩쓸어

A. 최석영 기자 | © 승인 2025.10.28 19:26

신형 전자연동장치 2건 ...KTCS-2, 3곳 중 2곳 낙찰



* 철도경제 보도자료 발췌
〈KTCS-2 경부선 신호시스템 사업 낙찰〉

▶ 파급효과

철도신호 기술자립과 안전·수송효율 향상

1. 철도신호 기술자립과 시스템 완성도 확보

개발된 RBC는 한국철도기술연구원의 성능검증과 전라선 시범운영, 유럽 TSI 시험을 거쳐 실제 노선에 적용할 수 있는 수준으로 완성되었다. 국제 최고 안전등급인 SIL4를 충족해 시스템의 신뢰성을 확보했으며, 궤도회로와 외산 ETCS에 의존하던 구조에서 벗어나 LTE-R 기반 무선 열차제어와 이동폐색기술로 발전할 수 있는 기반을 마련하였다. 이동권한 생성과 위치추적 알고리즘, 안전제어 소프트웨어를 자체 개발해 핵심기술의 해외의존도도 크게 줄였다.

2. 철도안전과 정시성 향상

유럽철도 국제표준 안전성 평가기준에 따른 분석결과, KTCS-2는 기존 ATC 시스템보다 안전성이 약 5.81배 높아지는 것으로 나타났다. 열차 위치와 전방상태를 실시간으로 확인하고 운행권한을 조정하므로 사고위험을 낮추고 비상상황에 빠르게 대응할 수 있다. 신호정보의 정확성과 제어속도가 높아지면 불필요한 열차지연을 줄이고 정시성도 향상된다.

3. 수송능력과 경제적 편익 증대

열차 간격을 보다 정밀하게 제어하면 같은 노선에서 운행할 수 있는 열차 수가 늘어나 철도 수송용량이 증가한다. 분석결과 효율적인 간격제어를 통해 연간 약 1,492억 원의 경제적 가치를 창출하고, 실시간 진단과 안전제어로 연간 약 78억 원의 사고예방·대응 비용을 절감할 수 있을 것으로 예상된다. 열차운행을 최적화해 불필요한 정차와 가감속을 줄이면 대기오염과 탄소배출 관련 비용도 연간 약 1,052억 원 규모로 절감할 수 있다.

4. 해외시장과 차세대 철도기술로 확장

국제표준을 준수한 국산 시스템을 확보함으로써 해외 철도사업에 참여할 수 있는 수출 기반을 마련하였다. 국내 노선 확대를 통해 실증이력과 운영데이터가 축적되면 해외 발주처가 요구하는 신뢰성과 유지보수 역량도 확보할 수 있다. 또한 이번 기술은 KTCS-3와 자동운전(ATO), 이동폐색 등 차세대 열차제어기술 개발의 기반이 되어 국내 철도산업의 글로벌 경쟁력을 높인다.



* 국토매일, 철도경제 보도자료 발제
〈KTCS-2 지·차상 통합시험〉



〈KTCS-2 전라선 시범사업 RBC 설치〉

용어해설

RBC

(Radio Block Center) 무선폐색 센터

KTCS-2

(Korean Train Control System Level2) 한국형 열차제어 시스템 Level2

ATO

(Automatic Train Operation) 열차 자동운전



대표연구자

김 용 유

(주) 싸 인 텔레 콤
개발부 이사

funky@signtelecom.com

연구진



정현태



이국진



박형섭



진승현



조익현



최진영



김희애



엄순영



윤태연



김종현

정부지원내용

사업명

자율주행 기술개발 혁신사업

과제명

인프라 센서 기반의 도로 상황 인지
고도화 기술 개발

총 연구기간

2021.04~2027.12

총 연구비

총 10,184백만 원

* 정부출연금 8,800백만 원

민간부담금 1,384백만 원

12

도로 카메라가 자율주행차의 사각지대를 대신 보다

AI 엣지카메라로 객체 위치오차 1m 이하와
돌발상황 정검지율 98% 달성

▶ 연구배경 및 필요성

차량 센서만으로 보기 어려운 도로 사각지대

자율주행차는 카메라, 라이다, 레이더 등 차량 센서로 주변을 인식하지만, 대형차량과 도로시설물에 가려진 사각지대, 교차로 반대편의 돌발상황, 센서 검지범위 밖의 객체를 사전에 확인하기 어렵다. 비, 안개, 눈 등 악천후에서는 센서성능이 저하되어 안정적인 상황 판단에도 한계가 있다.

이를 보완하려면 도로 인프라가 차량과 보행자 등 주변 객체를 인식하고, 그 정보를 자율주행차와 관제센터에 실시간으로 제공해야 한다. 기존 ITS가 교통량, 평균속도 등 도로구간 단위의 정보를 수집했다면, 자율협력주행은 개별 객체의 종류, 위치, 이동방향, 속도와 상태를 정밀하게 생성하고 공유해야 한다.

그러나 도로변 카메라는 강풍과 구조물 진동으로 영상이 흔들리고, 야간과 악천후에는 객체 인식성능이 저하된다. 영상 속 객체를 실제 도로의 GIS 좌표로 변환하는 과정에서도 위치오차가 발생한다.

연구진은 AI 객체검출과 다중객체 추적, 영상좌표의 GIS 좌표변환, 영상흔들림 보정, 시정상태 판단기술을 통합한 도로 인프라 기반 동적객체정보 생성기술을 개발하였다. 본 기술은 차량, 보행자, 이륜차 등 개별 객체의 위치와 이동정보를 실시간으로 생성해 차량과 관제센터에 제공한다. 이를 통해 도로 인프라가 자율주행차의 외부센서 역할을 수행하여 차량 센서의 검지범위와 사각지대를 보완하고, 돌발상황 대응력을 높일 수 있다. 또한 스마트교차로, C-ITS, 교통안전 및 도로관제 서비스로 확장할 수 있다.



〈한국교통안전공단 K-City 내 설치된 Ai Edge Camera〉

▶ 성과내용

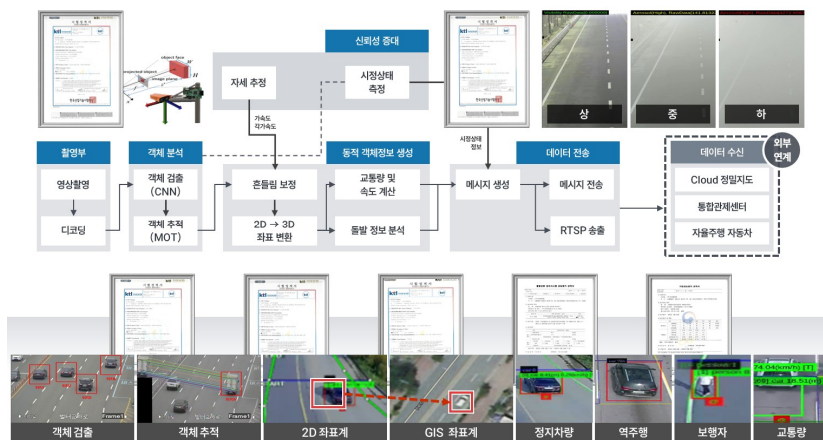
AI 엠티카메라가 실시간으로 만드는 도로 객체정보

연구진은 도로변에 설치하는 자체 개발 AI 엠티 카메라를 활용해 차량, 보행자, 이륜차 등 움직이는 객체를 실시간으로 인식하고, 각 객체의 실제 위치와 이동정보를 생성하는 기술을 개발했다. 영상 전체를 관제센터로 보내 분석하는 기존 방식과 달리, 카메라 내부에서 영상을 즉시 처리하므로 통신 데이터량과 처리 지연을 줄이고 필요한 정보만 빠르게 제공할 수 있다.

카메라는 AI로 객체의 종류를 구분하고, 여러 객체의 움직임을 연속해서 추적한다. 영상 속 2차원 픽셀 위치를 GIS 기반의 실제 도로 좌표로 바꾸어 객체별 위치와 속도, 이동방향을 계산한다. 생성된 정보는 자율주행차와 관제센터에 전달되며, 대형차에 가려진 구간이나 교차로 반대편처럼 차량 자체 센서로 확인하기 어려운 사각지대와 돌발상황을 미리 파악하는 데 활용된다. 이를 통해 차량은 자체 센서가 보지 못한 위험에도 더 빠르게 대응할 수 있다.

도로변 환경에서 정보의 정확성을 유지하기 위한 기능도 함께 적용했다. 강풍이나 대형 차량 통행으로 카메라 영상이 흔들리면 이를 자동으로 보정해 위치 오차를 줄인다. 비와 안개 등으로 가시거리가 낮아질 때는 현재 영상의 시정상태와 분석결과의 신뢰수준을 판단하여, 오점이나 부정확한 위치정보가 차량과 관제센터에 전달되는 것을 줄인다.

개발기술은 연구실 시험뿐 아니라 K-City와 ‘오픈 이노베이션 지향 Lv.4/4+ 자율주행 리빙랩’의 실제 도로환경에서 성능을 검증했다. 또한 ‘도로교통 안전관리 및 자율협력주행을 지원하는 도로 인프라 카메라 기반 동적객체정보 생성기술’로 교통통신기술 인증을 획득했다. 향후 자율주행 지원, 스마트교차로, C-ITS, 지자체 교통안전 및 도로관제 서비스에 폭넓게 활용할 수 있다.



〈기술의 동작 도식 및 기능 시험〉

주요 연구 성과

매출실적

4,394백만 원

교통통신기술지정

도로교통 안전 관리 및 자율협력주행을 지원하는 도로 인프라 카메라 기반의 동적객체정보 생성 기술

연구자 한마디

차량 센서의 인지 한계를 극복하고 도로 인프라 자체를 자율주행차의 '또 다른 눈'으로 전환시키는 데 모든 역량을 집중했습니다.

실제 현장 실증 과정에서 발생한 물리적 진동과 풀(지주대) 변형, 다양한 기상 변수들은 생각지 못한 큰 과제였습니다.

하지만 열악한 외부 환경과 제한된 엣지(Edge) 자원 속에서도 끝까지 치열하게 해답을 찾아낸 팀원들의 헌신 덕분에 이를 극복하고 기술적 신뢰성을 증명할 수 있었습니다.

본 기술이 당장 활용 가능한 도로 인프라이자 미래 자율주행을 위한 필수 요소로서, 국민의 안전한 이동에 기여하기를 바랍니다.

▶ 성과의 차별성/우수성

정밀 측위·환경보정·실시간 연산을 카메라 한 대에 통합

1. 객체 위치오차 평균 1m 이하의 정밀 측위

영상에서 검출한 객체를 실제 GIS 좌표와 연결하는 정밀 측위기술을 적용하여 위치오차를 평균 1m 이하로 확보해 기존 약 1.5m 수준보다 높은 정밀도를 달성하였다

2. 영상흔들림을 자동 보정하는 환경 적응기능

도로변 카메라는 바람과 진동으로 움직여 객체의 위치오차가 커질 수 있다. 이번 기술은 영상흔들림을 능동적으로 보정하여 별도의 수동 재설정 없이 설치환경 변화에 대응하고 안정적인 객체정보를 생성한다.

3. 악천후에서 정보 신뢰도를 스스로 판단

강우량과 안개 가시거리에 따라 영상분석 가능 여부를 판단하는 기능을 구현하였다. 강우량 10mm·50mm와 안개 가시거리 100m·200m 조건을 측정해 분석 신뢰도가 낮아지는 상황을 스스로 판단한다. 이를 통해 악천후에서 발생하는 오검지와 잘못된 주행판단을 줄일 수 있다.

4. 높은 객체검출 성능과 엣지 실시간 처리

객체검출 성능은 mAP 0.85718, F1-Score 0.91862를 달성하였다. 카메라 영상시간과 서버시간의 오차는 52ms로, 센터 집중형 처리보다 통신부하와 지연시간을 줄여 실시간 자율협력주행에 적합하다.

5. 기존 ITS 기능까지 통합한 복합 시스템

돌발상황 검지시스템(AIDS)은 정검지율 98%, 다른 유형 검지 및 오경보 0건을 기록하였다. 차량검지기(VDS)는 교통량·속도 정확도 98%, 점유율 정확도 95%를 확보하였다.

구분	주요 검증 결과	우수성 및 차별성
객체 위치 측위 정확도	위치 측위 오차 평균 1m 이하	• 객체의 실제 위치를 정밀하게 산출 • 높은 수준의 위치 정확도를 확보함.
흔들림 조정 기능	위치 측정 분산 20% 이하 감소 확인	• 흔들림이나 진동에 대응한 영상 정보의 신뢰도 • 실제로 환경에서도 신뢰성 높은 객체정보 생성
가시거리 확보 여부 확인 기능	강우량 10mm 50mm 시정거리 100m 200m	• 기상 변화에 따른 인지 가능 여부를 판단 • 악천후에서의 오검지 및 오판단 가능성 감소
객체 검출률	mAP 0.85718, F1-Score 0.91862	• 다양한 객체를 높은 정확도로 검출할 수 있는 AI 기반 인식 성능을 확보
엣지 카메라 연산 속도	서버 시간과 카메라 영상 시간 간 측정 오차 50ms 확인	• 엣지 단에서 객체정보를 신속하게 분석 및 생성 • 자율주행차량 또는 센터에 빠르게 전달 • 실시간 교통운영 및 협력주행 환경에 적합
돌발상황 검지 시스템 기본성능	정검지 98%, 오경보 0건	• 기존의 AIDS 및 VDS 기능을 통합 구현
차량 검지기 기본성능(VDS)	교통량 98%, 속도 98%, 점유율 95%	• 통합형 시스템임에도 각 단위 기능 성능 확보

▶ 파급효과

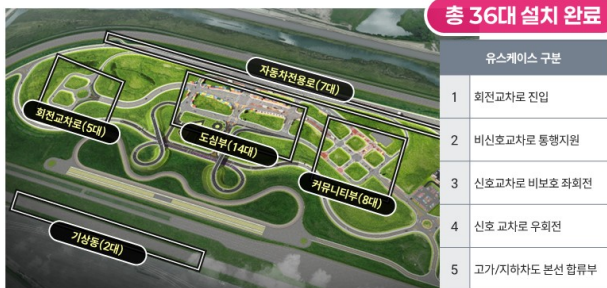
자율협력주행 인프라와 스마트 교통안전 서비스 확산

기술적으로는 기존 영상검지기술이 교통량이나 개별 돌발상황을 확인하는 수준에 머물렀던 것과 달리, 객체검출과 추적, 정밀 측위, 흔들림 보정, 가시거리 판단을 하나의 시스템으로 통합하였다. 측위 정밀도를 기존 1.5m 수준에서 1m 이하로 높였으며, 엷지단에서 실시간으로 정보를 처리해 데이터 전송 지연과 네트워크 부하를 줄였다. K-City와 자율주행 리빙랩에 적용하여 차량 센서가 확인하기 어려운 사각지대 정보를 실제로 보완할 수 있음을 검증하였다.

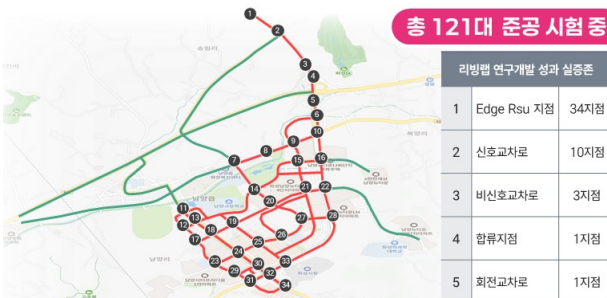
산업적으로는 스마트교차로와 C-ITS, 자율협력주행 인프라 구축에 필요한 핵심 센서와 분석 솔루션 시장을 확대할 수 있다. AI 카메라 한 대로 자율주행용 객체정보와 교통량, 속도, 돌발상황 정보를 함께 생성하므로 장비 구성과 운영비용을 줄일 수 있다. 자율주행 공유차와 수요대응형 미니셔틀 등 다양한 모빌리티 실증사업의 공동 인프라로 활용할 수 있으며, 지자체 교통안전사업과 도로관리 서비스로 확산될 가능성도 높다.

사회적으로는 교차로 사각지대와 역주행, 정지차량, 보행자 등 위험상황을 차량과 운전자에게 미리 알려 사고를 예방할 수 있다. 자율주행차뿐 아니라 일반 차량에도 위험 알림과 교차로 안전지원 서비스를 제공해 공공도로의 안전성을 높인다. 또한 정밀 측위와 실시간 영상분석기술은 실종자 추적과 재난안전, 스마트농업 등 다른 분야로도 확장할 수 있다.

결과적으로 이 기술은 도로 인프라를 수동적인 시설에서 주변 상황을 스스로 인식하고 정보를 제공하는 지능형 센서로 전환한다. 자율협력주행의 상용화를 앞당기고 미래 모빌리티 산업의 경쟁력과 국민이 체감하는 교통안전 편익을 함께 높인다.



〈Lv4/4+ 자율협력주행 테스트베드 환경 구축사업 설치 완료 및 운용 중〉



〈오픈 이노베이션 지향 Lv4/4+ 자율주행 리빙랩 구축사업 준공 시험 중〉

용어해설

자율협력주행

자율주행차가 차량 자체 센서만으로 주행하는 것이 아니라, 도로 인프라와 정보를 주고받으며 더 안전하게 주행하는 방식

도로 인프라

도로에 설치된 카메라, 신호기, 검지기, 통신장비, 관제설비 등 교통 운영을 위한 기반 시설

AI Edge 카메라

카메라가 영상을 촬영하는 것뿐 아니라, 카메라 내부 또는 현장 장비에서 AI 분석까지 직접 수행하는 지능형 카메라

동적 객체정보

도로 위에서 움직이는 차량, 보행자, 이륜차 등의 위치, 속도, 이동방향 등을 데이터로 만든 정보

객체 검출

영상 속에서 차량, 사람, 이륜차 등 특정 대상을 찾아내는 기술

위치추위

객체가 실제 도로의 어느 위치에 있는지를 계산하는 기술



대표연구자

박 종 국

투아이시스(주)

대표

031-360-7480

pjk@2iSYS.com

연구진



김정연

장순만

신정철



구자명

안아현

안유림

정부지원내용

사업명

철도기술연구사업

과제명

도시철도 선로(터널) 시설물 자율점검 분석시스템 개발

총 연구기간

2017.09~2019.12

총 연구비

총 2,733백만 원

* 정부출연금 2,050백만 원

민간부담금 683백만 원

13

달리는 열차가 철도시설을 촬영하고 AI가 결함을 찾다

운행 중 자동검측으로

국내외 475.9억 원 규모 사업화 실적 달성

▶ 연구배경 및 필요성

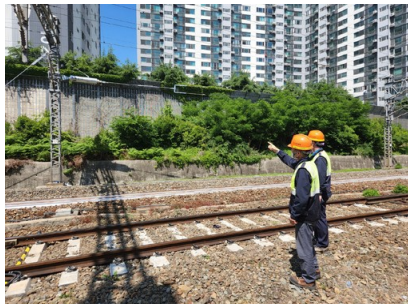
심야 육안점검에 의존한 도시철도 유지관리의 한계

국내 도시철도는 운행횟수와 이용객이 많아 선로와 터널, 전기·신호설비의 상태를 지속적으로 확인해야 한다. 작은 결함도 제때 발견하지 못하면 운행장애와 안전사고로 이어질 수 있어 정기적인 시설물 점검은 철도운영의 핵심업무다.

그러나 기존 점검은 작업자가 현장에 들어가 육안으로 시설물을 확인하는 방식에 크게 의존하였다. 점검자의 숙련도와 피로도, 현장조건에 따라 결과가 달라질 수 있고, 미세균열이나 초기 이상징후를 놓칠 가능성도 있다. 같은 구간을 여러 사람이 점검하면 기록방식이 달라 결함의 변화를 장기간 비교하기도 어렵다.

열차가 운행하는 동안에는 선로에 접근할 수 없기 때문에 대부분의 점검은 심야 운행종료 후 짧은 유지보수시간에 이루어진다. 점검할 수 있는 시간이 제한되어 전체구간을 자주 확인하기 어렵고, 결함이 발생한 시점과 실제 점검시점 사이에 공백이 생긴다. 위험한 터널과 선로에서 야간작업을 수행해야 해 작업자의 안전위험도 크며, 숙련인력의 고령화와 인건비 상승도 지속가능한 유지관리에 부담이 되고 있다.

이에 연구진은 열차가 정상적으로 운행하는 동안 고속영상을 촬영하고, AI가 시설물의 결함을 자동으로 분석하는 시스템을 개발하였다. 인력과 심야작업에 의존하던 사후점검을 상시·예측 기반의 유지관리체계로 전환해 점검정확도와 효율성, 작업자 안전을 함께 높이는 것이 목표였다.



〈육안점검 사례〉



〈2호선, 4호선 검측장치 설치사례〉

▶ 성과내용

주행 중 영상을 수집하고 AI가 결함을 자동 판별

이번 성과는 도시철도 열차가 주행하는 동안 선로와 터널 시설물을 촬영하고, 딥러닝으로 결함을 자동 판별하는 AI 기반 자율점검 분석시스템이다. 고속환경에서도 선명한 영상을 확보하는 전용 촬영장비와 대용량 데이터를 실시간으로 처리하는 분석·저장시스템을 결합하였다.

열차에 설치한 고속 영상장비는 정상 운행 중 선로와 터널벽, 전차선 주변 시설물을 연속적으로 촬영한다. 조명이 어두운 터널과 곡선구간, 열차진동이 있는 환경에서도 분석에 필요한 품질의 영상을 얻도록 카메라와 조명, 촬영주기를 최적화하였다. 수집된 영상은 위치정보와 함께 저장되어 결함이 발견된 지점을 정확하게 확인할 수 있다.

AI 분석알고리즘은 영상에서 균열과 파손, 체결상태 이상 등 시설물의 결함을 자동으로 검출한다. 사람이 모든 영상을 직접 확인하지 않아도 이상 후보를 선별하고, 이전 점검 자료와 비교해 상태변화를 관리할 수 있다. 이를 통해 결함을 발견한 뒤 대응하는 방식에서 벗어나 상태가 악화되기 전에 보수하는 예측 유지보수체계로 전환할 수 있다.

기술은 연구개발과 실증에 머물지 않고 실제 도시철도에 공급되었다. 한국철도공사 1호선·4호선·경의중앙선 광역전철 3개 편성에 약 280억 원 규모로 적용되었으며, 서울교통공사 4호선 약 34억 원, 8호선 약 34.8억 원의 추가 수주로 이어졌다. 서로 다른 노선과 운영환경에서 반복적으로 계약을 체결해 시스템의 안정성과 확산성을 입증하였다.

해외시장에서도 경쟁력을 확보하였다. 대만 국영철도에 약 140억 원 규모로 수주해 국내 개발기술이 글로벌 철도운영환경에서도 활용될 수 있음을 보여주었다. 국내외 계약을 합치면 약 475.9억 원의 사업화 실적을 달성했으며, 단일 시범사업이 아니라 반복수주와 해외진출이 이어지는 지속적인 사업구조를 마련하였다.

주요 연구 성과

매출실적

47,592백만 원



〈서울교통공사 4호선 선로시설 검측시스템〉

연구자 한마디

가장 고민했던 부분은 '흔들림'이었습니다. 시속 100km 이상으로 달리는 열차 위에서 선명한 영상을 안정적으로 취득 한다는 것은 생각보다 훨씬 어려운 과제였습니다. 카메라 각도, 조명의 세기, 셔터 속도 하나하나가 결함 감지물에 직결되었기 때문에 실제 선로 환경에서 수백 번의 반복 테스트를 거쳤습니다. 영상 품질이 확보된 이후에는 시가 그 데이터를 얼마나 정확하게 판단하느냐가 다음 과제였습니다. 결함 데이터는 워낙 희소하여 초기에는 학습 데이터 확보 자체가 난관이었고, 철도 전문가들과 긴밀히 협력하며 실제 결함 이미지를 수집하고 레이블링하는 과정을 오랜 시간 반복했습니다. 그 과정에서 깨달은 것은 '정확도'보다 '신뢰도'가 더 중요한 가치라는 점이었습니다. 사람의 안전이 달린 판단인 만큼, 오감지 하나도 허용할 수 없다는 긴장감으로 영상처리부터 AI 모델 설계까지 전 과정에 임했습니다.

➤ 성과의 차별성/우수성

운행 중 완전자동 점검과 국내외 반복 수주로 입증한 기술

1. 운행 중 점검이 가능한 완전자동 시스템

기존 점검은 열차운행이 끝난 뒤 작업자가 선로에 들어가야 했다. 이번 시스템은 영업 열차가 주행하는 동안 영상을 수집하므로 별도의 운행중단 없이 시설물 상태를 확인할 수 있다. 짧은 심야시간에 제한되던 점검횟수를 늘리고, 결함발생과 점검사이의 시간공백을 줄일 수 있다.

2. 고속·저조도 환경에 맞춘 전용 촬영기술

고속으로 이동하는 열차에서 흔들림 없는 영상을 얻고, 조명이 부족한 터널과 곡선구간에서도 일정한 품질을 유지하도록 전용 하드웨어를 설계하였다. 카메라와 조명, 데이터 저장장치를 통합해 실제 철도환경에서 안정적으로 작동하도록 했다. 일반 영상장비를 단순히 탑재하는 방식과 달리 시설물 검측에 필요한 해상도와 촬영속도를 확보하였다.

3. 딥러닝 기반 결함검출과 예측 유지보수

시가 방대한 영상을 자동으로 분석해 미세결함과 이상징후를 식별한다. 결함위치와 종류, 촬영시점의 데이터를 추적하면 같은 시설물의 변화를 장기간 비교할 수 있다. 단순 자동 검출을 넘어 결함의 진행상태를 예측하고 보수시점을 결정하는 예방적 유지관리체계로 발전할 수 있다.

4. 국내외 반복수주로 확인한 현장성과 신뢰성

서울교통공사와 한국철도공사의 여러 노선에 확대 적용되었으며, 4호선에서 8호선으로 추가 수주가 이어졌다. 서로 다른 차량과 노선에서 안정적으로 운영되면서 기술의 범용성을 검증하였다. 대만 국영철도 수주까지 달성해 국내시장에 한정되지 않는 글로벌 경쟁력도 확보하였다.

5. 국민안전과 직결되는 공공기술

철도시설물 점검은 사고예방과 운행안정성을 결정하는 공공서비스다. 이번 기술은 위험 구간에 작업자가 직접 진입하는 횟수를 줄이고, 더 자주·정확하게 시설상태를 확인함으로써 철도사고의 위험을 낮춘다. 점검의 자동화가 비용절감뿐 아니라 국민안전에 직접 높인다는 점에서 산업적·사회적 가치가 크다.



〈서울교통공사 4호선 선로시설 검측시스템〉

▶ 파급효과

철도사고 예방과 스마트 유지보수 시장의 글로벌 확산

기술적으로는 연구개발과 현장실증을 넘어 실제 도시철도 노선에 적용되고 반복수주로 이어져 높은 완성도를 확보하였다. AI 영상분석과 고속촬영, IoT 데이터관리기술을 결합해 기존 육안점검보다 정확도와 점검빈도, 작업안전성을 높였다. 축적된 영상과 결합데이터는 시설물의 상태변화를 분석하고 보수시기를 예측하는 스마트 유지보수체계의 기반이 된다. 철도뿐 아니라 도로와 터널, 교량, 플랜트 등 다른 기반시설 점검으로도 확장할 수 있다.

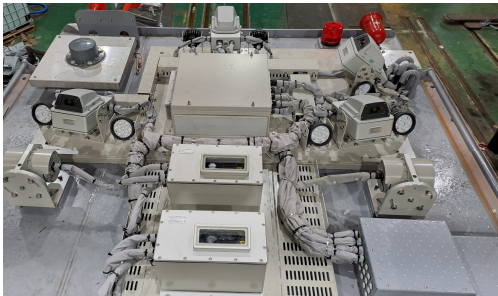
경제적으로는 한국철도공사 광역전철 3개 편성 약 280억 원, 서울교통공사 4호선 약 34억 원과 8호선 약 34.8억 원, 대만 국영철도 약 140억 원 등 국내외에서 약 475.9억 원 규모의 계약을 확보하였다. 단일 프로젝트가 아니라 여러 노선과 해외사업으로 수주가 이어져 안정적인 매출기반을 마련하였다. 이러한 사업화는 AI 기반 철도점검장비와 데이터 분석, 유지관리서비스 시장의 성장을 촉진하고 국내 철도기술의 수출경쟁력을 높인다.

운영 측면에서는 열차운행 중 점검해 별도의 선로차단과 심야작업을 줄일 수 있다. 결함을 조기에 발견하면 대규모 고장과 긴급복구를 예방해 유지보수비와 운행장애를 줄인다. 점검결과를 데이터로 표준화하면 노선과 작업자에 따라 달랐던 기록을 일관되게 관리하고 예산과 인력을 위험도가 높은 구간에 우선 배분할 수 있다.

사회적으로는 시설물의 이상을 조기에 찾아 철도사고를 예방하고 운행안정성을 높인다. 작업자가 어두운 터널과 선로에 직접 들어가는 횟수를 줄여 산업재해 위험도 낮춘다. 열차지연과 운행중단을 최소화해 이용자의 불편을 줄이고, 보다 안전하고 신뢰할 수 있는 대중교통서비스를 제공한다.



〈대만TRC 전차선 고속검측차(검측시스템 탑재 전용검측차)〉



〈대만TRC 전차선 고속검측차(차량상부 전차선 변형감사장치)〉

응용해설

AI 기반 자동검측 시스템

열차 주행 중 촬영한 영상이나 센서 데이터를 인공지능이 분석하여 철도 시설물의 이상 여부를 자동으로 점검하는 시스템

예측 유지보수

시설물 고장이 발생하기 전에 데이터를 통해 이상 징후를 사전에 파악하고 미리 정비하는 유지관리 방식

고속 영상 취득 기술

열차가 빠르게 주행하는 상황에서도 선로 및 터널 시설물의 영상을 안정적으로 촬영하는 기술



대표연구자

박민준

한화시스템
항공시스템개발팀
수석연구원

minjun.park@hanwha.com

연구진



김도영 노나현 박세환

정부지원내용

사업명

도심항공교통 가상통합운용 및
검증기술개발

과제명

가변형 UAM 항공기 모의 조종석
시스템

총 연구기간

2022.04~2025.12

총 연구비

총 38,096백만 원

* 정부출연금 27,180백만 원
민간부담금 10,916백만 원

14

배터리의 한계를 넘는
하이브리드 항공기 통합설계 기술

추진시스템·공력·소음·비행제어·AI 자율비행을
하나의 설계·검증 체계로 연결

연구배경 및 필요성

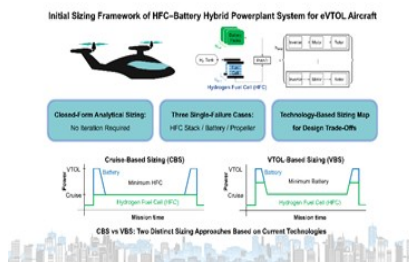
UAM 상용화를 위한 하이브리드 항공기 통합설계

전기추진 항공기는 탄소배출과 소음을 줄일 수 있어 미래 항공산업의 핵심기술로 주목받고 있다. 그러나 현재 배터리는 같은 무게의 항공유보다 저장할 수 있는 에너지가 적어 비행거리와 탑재중량에 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 배터리와 터보제너레이터(TG), 수소연료전지(HFC)를 결합한 하이브리드 추진시스템이 유·무인 항공기와 도심항공교통(UAM)의 현실적인 대안으로 떠오르고 있다.

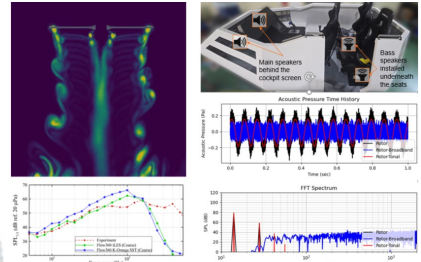
하이브리드 항공기는 여러 동력원을 함께 사용하기 때문에 기존 항공기보다 설계가 복잡하다. 기체의 공력과 무게, 로터성능, 소음, 비행제어, 에너지관리, 열관리기술이 서로 영향을 주며, 어느 한 요소만 최적화해서는 전체 성능과 안전을 확보하기 어렵다. 실제 운항에서는 추진계통 고장과 배터리 성능저하, 다양한 임무와 기상조건까지 고려해야 한다.

특히 UAM은 도심에서 수직이착륙하고 여러 항공기가 좁은 공간을 공유하므로 비행성능뿐 아니라 자율비행 안전성과 충돌회피, 조종성, 탑승감, 교통흐름을 함께 검증해야 한다. 초기 설계단계부터 고장상향과 감항성 요구를 반영하지 않으면 이후 설계를 반복하거나 시험비용이 크게 증가할 수 있다.

국내외에서 추진장치와 로터, 비행제어 등 개별 요소기술은 활발히 연구되고 있지만, 하이브리드 추진시스템과 공력·소음, 비행제어, AI 자율비행, 교통관리기술을 하나의 플랫폼에서 설계·검증하는 환경은 부족하다. 이에 연구진은 미래 UAM과 친환경 항공기 개발에 활용할 수 있는 국내 독자 통합설계 원천기술과 복합 시뮬레이션 환경을 구축하였다.



〈수소연료전지-배터리 하이브리드
추진시스템 사이징 프레임워크〉



〈로터 공력 소음 예측(좌),
비행훈련장치 음향시스템(우)〉

▶ 성과내용

하이브리드 추진부터 AI 비행계획까지 연결한 설계플랫폼

연구진은 하이브리드 항공기의 초기설계부터 공력·소음해석, 비행제어, 자율비행 및 교통 관리까지 연계하는 통합기술을 개발하였다. 핵심 성과는 하이브리드 추진시스템 초기 사이징 프레임워크 HYSIZE, 블레이드 최적화·성능해석, 비행제어·연동시스템, AI 4DT 기반 자율비행·교통관리기술로 구성된다.

1. 하이브리드 추진시스템 초기사이징

HYSIZE는 배터리와 터보제너레이터(TG) 또는 수소연료전지(HFC)를 결합할 때 동력원의 용량과 무게, 비용을 결정하는 설계프레임워크다. TG 시스템은 기술성숙도에 따른 질량비율, HFC 시스템은 임무조건과 고장상황을 반영해 최적 하이브리드비율과 연료전지팩 수를 제한한다. 또한 로터고장 시 안전하게 착륙할 수 있는 무게중심 범위를 계산해 생존성과 감항성을 초기설계에 반영한다.

2. 블레이드 형상최적화와 임무성능 해석

블레이드 수, 비틀림각, 시위길이, 끝단속도 등을 조정해 양력과 효율을 높이고 소음을 줄이는 최적형상을 도출하였다. SUAVE를 기반으로 하이브리드 추진, 무게추산, 비용 및 로터공력 모듈을 확장해 임무별 비행거리와 에너지소비를 분석한다. GUI 기반 플랫폼도 구축해 비전문가가 설계대안을 비교할 수 있도록 했다.

3. 비행제어와 실시간 조종·음향 검증

6자유도 운동모델과 모델기반 제어기를 활용하고, 조종을 자동화하는 SVO 개념을 적용해 전체 비행모드의 조종성과 안정성을 평가하였다. 고정형·모션형 비행훈련장치에 기술을 탑재해 조종사 검증을 완료하였다. 또한 로터 소음을 실시간으로 계산·재현하는 음향시스템을 개발해 훈련 몰입감과 탑승감 평가기능을 높였다.

4. AI 4DT 자율비행과 교통관리

위도·경도·고도에 시간정보를 더한 4차원 비행궤적(4DT)을 AI로 예측하는 기술을 개발하였다. 머신러닝 학습데이터를 활용해 비행계획과 스케줄, 충돌회피 경로를 최적화한다. 운항데이터가 축적될수록 예측정확도를 높여 다수 UAM 항공기가 운항하는 환경의 안전성과 효율을 지원한다.



〈AI 추천된 4DT 기반의 자율비행 궤적의 예〉

주요 연구 성과

논문

A weight fraction-based analytical method for initial sizing of hybrid powerplant systems in electric vertical take-off and landing aircraft

특허(등록)

최소 배터리로 구동하는 하이브리드 전기수직이착륙기 시스템 및 그 운용방법

연구자 한마디

이번 연구는 UAM 제너릭 기체의 개념 설계를 수행하던 중, 현재 배터리 기술 만으로는 요구 성능과 운항 범위를 만족 하기 어렵다는 한계를 체감하면서 시작 되었다. 이후 하이브리드 추진시스템의 필요성을 인식하게 되었고, 항공기에 적용 가능한 새로운 설계 방법을 고민 하면서 연구를 확장하게 되었다.

자동차 분야에서는 하이브리드 기술이 이미 보편화되어 있지만, 항공기는 안전성과 중량 제약이 훨씬 엄격하기 때문에 전혀 다른 접근이 필요하였다. 특히 추진시스템 고장 상황까지 초기 설계 단계에서 함께 고려해야 했기 때문에, 공력·비행제어·자율비행 기술을 통합적 으로 연결하는 과정이 가장 큰 도전이었다.

연구 과정에서 수많은 해석과 검증들 반복하였지만, 단순한 개별 기술 개발이 아니라 실제 미래 항공기의 운항 환경 까지 고려한 통합 플랫폼 기술을 구축 했다는 점에서 큰 의미가 있다고 생각한다.

성과의 차별성/우수성

안전요건을 초기설계부터 반영한 유·무인 항공기 통합기술

1. 여러 전문분야를 연결한 통합설계 플랫폼

기존 연구는 추진시스템과 공력, 비행제어 등 개별 요소를 각각 분석하는 경우가 많았다. 이번 성과는 초기사이징부터 형상최적화, 임무성능, 소음, 비행제어, 자율비행까지 하나의 흐름으로 연결하였다. 반복적인 수치계산을 단일 결정론적 해석구조로 개선해 계산시간과 비용을 줄였으며, 경량항공기부터 중형급 항공기까지 적용할 수 있는 범용성을 확보하였다.

2. 고장과 감항요건을 초기설계부터 반영

하이브리드 추진장치의 고장유형과 임무요구를 고려해 배터리·엔진·연료전지의 구성비를 결정하고, 로터고장 시 안전착륙이 가능한 무게중심 범위를 계산한다. 안전요건을 설계 후반의 검증단계가 아니라 초기 개념설계부터 반영함으로써 재설계 위험을 줄이고 실제 인증과 운항에 가까운 설계대안을 도출할 수 있다.

3. 물리 기반 실시간 소음과 비행검증

기존 비행훈련장치는 녹음한 항공기 소리를 재생하거나 변형하는 방식이 많아 새로운 기체의 소음을 정확히 구현하기 어려웠다. 이번 연구는 로터의 공력상태를 바탕으로 내·외부 소음을 실시간으로 계산하고 스트리밍하는 기술을 개발하였다. 아직 제작되지 않은 항공기의 소음과 탑승환경을 설계단계에서 검토할 수 있다는 점에서 차별적이다.

4. AI 기반 4DT 운항계획과 충돌회피

복잡한 비선형 제약과 여러 항공기의 운항조건을 AI로 처리해 4차원 궤적과 충돌회피 경로를 생성하였다. 비행데이터가 축적되면 예측성능을 스스로 개선할 수 있어 UAM 교통관리와 자율비행 검증에 활용할 수 있다. 비행제어와 교통관리까지 설계플랫폼에 연결해 기체개발과 운항서비스를 함께 검토할 수 있다.

5. 연구성과의 학술·지식재산 성과

국제 SCI 논문 6건과 국내 KCI 논문 4건을 게재하고 특허 7건을 등록해 기술의 진보성을 입증하였다. 개발한 알고리즘과 공력데이터베이스, 음향시스템을 비행시뮬레이터에 탑재해 조종성 평가와 조종사훈련, 탑승감 분석까지 수행할 수 있는 실시간 복합검증환경을 완성하였다.

유·무인 하이브리드 항공기 설계 원천기술



〈유무인 하이브리드 항공기 설계 프레임워크〉

▶ 파급효과

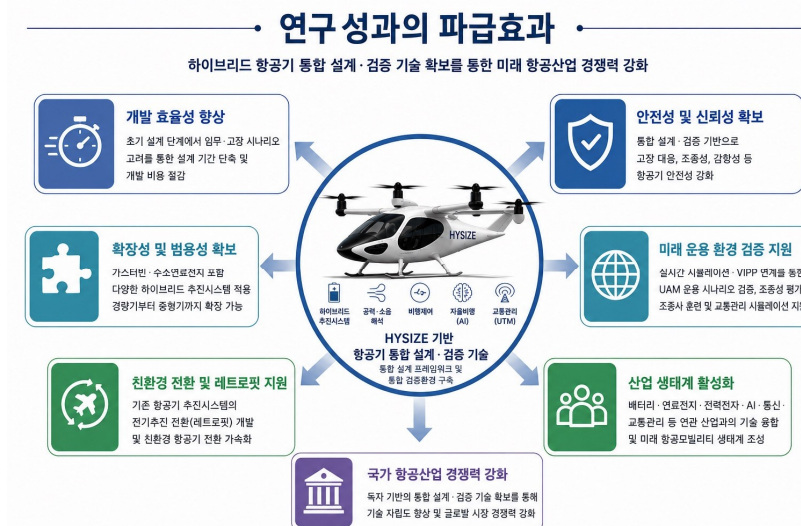
UAM 개발기간과 비용을 줄이고 국내 항공산업의 자립을 높인다

통합설계기술은 UAM과 전기추진 항공기의 초기 개발단계에서 여러 추진방식과 임무 조건을 빠르게 비교할 수 있도록 한다. HYSIZE를 이용하면 배터리와 터보제너레이터, 연료전지의 조합과 고장상황을 동시에 분석할 수 있어 설계반복과 시험횟수를 줄인다. 해석적·결정론적 구조로 계산효율을 높여 개발기간과 비용을 절감하고 중소 항공기업과 연구기관의 설계 접근성도 높일 수 있다.

기술은 가스터빈과 수소연료전지 등 다양한 하이브리드 추진방식에 적용할 수 있으며, 경량기체에서 중형급 항공기까지 확장 가능하다. 기존 항공기의 엔진을 친환경 전기·하이브리드 추진장치로 바꾸는 레트로핏 개발에도 활용할 수 있다. 이에 따라 신형 UAM 뿐 아니라 기존 항공기의 탄소배출을 줄이는 시장에도 적용할 수 있다.

비행제어와 공력데이터베이스, 실시간 음향기술을 연결한 검증환경은 비행시뮬레이터와 VIPP에 적용해 조종성 평가와 조종사훈련, 자율비행 알고리즘 검증, 교통관리 시뮬레이션에 활용할 수 있다. 실제 기체를 제작하기 전에 비행성능과 고장대응, 소음, 탑승감을 확인할 수 있어서 시험비용과 안전위험을 줄인다.

산업적으로는 배터리와 수소연료전지, 전력전자, AI, 통신, 교통관리 등 연관산업의 기술 융합을 촉진한다. 국내 독자적인 통합설계·검증기술을 확보하면 외산 해석도구와 설계 기술에 대한 의존도를 낮추고, 국내 항공기업이 UAM과 친환경 항공기 시장에 진입할 기반을 마련할 수 있다. 장기적으로는 글로벌 항공모빌리티 시장에서 국내 기술의 경쟁력과 주도권을 높이는 핵심 기반이 된다.



〈본 연구 성과의 예상 파급효과〉

용어해설

SVO

(Simplified Vehicle Operation)
조종사의 조작 부담을 줄이기 위해 복잡한 기체 제어를 자동화·단순화하는 비행 운용 개념

HYSIZE

(Hybrid powerplant SIZing Environment)
하이브리드 추진시스템의 초기 사이징 및 설계 분석을 수행하기 위한 자체 개발 프레임워크

4DT(4-Dimensional Trajectory)

위도, 경도, 고도에 시간 정보를 추가한 4차원 비행 경로 정보

감항성(Airworthiness)

항공기가 안전하게 비행할 수 있는 성능과 구조적 안전성을 만족하는 상태

BEMT

(Blade Element Momentum Theory)
로터 블레이드의 공력 성능을 예측하기 위해 사용하는 대표적인 해석 기법



대표연구자

김 종 우

(주)유디엔에스

대표이사 / CTO

070-4896-4320

roadload2014@gmail.com

연구진



강기원



윤일수



김정훈



박용주



김태상



이진우



임병철



최찬웅

정부지원내용

사업명

AI 데이터 중심의 화물차 운송안전 향상기술 개발

과제명

AI 데이터 중심의 화물차 운송안전 향상기술 개발

총 연구기간

2022.04~2026.12

총 연구비

총 8,976백만 원

* 정부출연금 8,295백만 원

민간부담금 681백만 원

15

화물차를 세우지 않아도 과적과 낙하물 위험을 찾아낸다

국산 로드셀과 시로 총중량 정확도 97.9%,
적재불량 검지율 91.72% 달성

▶ 연구배경 및 필요성

정차단속의 사각지대와 화물차 낙하물 사고

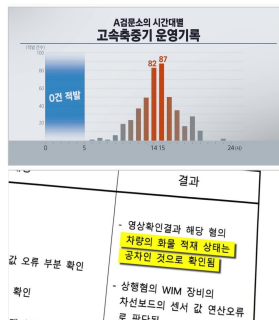
국내 화물차 과적단속은 고정식 검문소에서 차량을 정차시킨 뒤 측중기로 무게를 측정하는 방식에 크게 의존한다. 모든 화물차를 일일이 세우면 교통흐름이 느려지고 비(非)과적 운전자의 민원으로 단속인력의 부담도 커진다.

또한 과적차량이 검문소를 우회하면 단속을 피할 수 있어 사각지대가 발생한다.

과적 의심차량을 주행 중 선별하기 위해 고속측중기(HS-WIM)가 도입되었지만, 기존 장비는 온도와 속도, 주행위치에 따라 측정값이 달라질 수 있다. 정확도가 법적 단속기준에 충분하지 않아 현재는 정밀검사를 받을 차량을 미리 고르는 보조수단으로 주로 활용되고 있다. 해외 센서와 장비에 대한 의존도가 높아 구축비와 유지보수비도 부담이 된다.

화물의 적재상태 불량과 낙하물 위험은 더 큰 문제다. 현재는 단속인력이 육안으로 적재 높이와 고정상태를 확인하거나 차량을 세워 측정한다. 고속으로 주행하는 차량에서 화물이 기울거나 돌출된 상태를 미리 발견하기 어렵고, 낙하물이 발생한 뒤에야 대응하는 경우가 많다. 인명피해로 이어지는 낙하물사고가 계속되고 있지만 비정차 방식의 판별기술과 관련 법·제도는 충분히 마련되지 않았다.

또한 과적과 적재불량, 차량제원, 번호판 정보를 서로 다른 장비와 기관에서 관리해 반복위반차량을 추적하거나 정책에 활용하기 어렵다. 이에 연구진은 국산 고속측중기와 시 영상분석 통합플랫폼을 결합해 화물차를 세우지 않고 과적과 적재불량, 낙하물 위험을 실시간으로 관리하는 기술을 개발하였다.



〈과적 단속 관련 사회적 이슈 및 기존 체계의 한계〉

▶ 성과내용

국산 고속충중기와 AI 적재상태 분석을 하나의 플랫폼으로 통합

이번 연구는 고속주행 과적 의심차량 감지시스템과 AI 기반 적재불량·낙하물 판별기술, 통합관리플랫폼, 실도로 테스트베드에서의 실증과 법·제도 개선안을 함께 개발하였다. 개별 검측장비를 만드는 데 그치지 않고 차량이 주행하는 동안 중량과 크기, 적재상태, 번호판을 동시에 측정해서 위험차량을 선별하는 통합체계를 구축하였다.

1. 국산 로드셀 기반 고속충중기

기존 고속충중기는 저가형 Piezo와 고가의 Quartz 센서 등 해외기술에 의존해 차량의 하중을 추정하는 방식이 많았다. 연구진은 정확도와 내구성이 가장 우수하다고 알려진 로드셀로 차축의 하중을 직접 측정하는 국산 WIM 기술을 개발하였다. 경쟁력 있는 가격으로 다차로 고속주행환경에서도 차량의 총중량과 축하중을 측정하고, 과적 가능성이 높은 차량만 정밀검문 대상으로 선별하도록 했다. 이를 통해 검문소의 교통정체를 막을 수 있다.

2. AI 기반 적재불량과 낙하물 위험 판별

다차로를 고속으로 통과하는 화물차의 LiDAR 포인트 클라우드와 스테레오 카메라 영상을 실시간으로 분석해 차량의 높이와 길이, 폭을 측정하고 적재물이 기준을 초과하거나 불안정한 상태인지 판별한다. 일반 객체인식이 아니라 화물의 돌출과 기울기, 덮개상태, 낙하물 위험을 분석하도록 딥러닝 알고리즘을 특화하였다. 차량을 멈추지 않고도 위험 차량을 찾아 단속반과 관제센터에 전달한다.

3. 지능형 운송안전 통합플랫폼

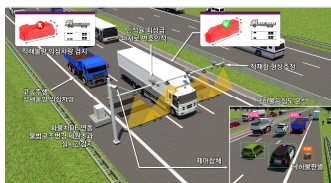
고속충중기와 AI 카메라, 차량번호 인식장비 등 서로 다른 하드웨어와 소프트웨어를 표준 인터페이스로 연결하였다. 차량 중량과 제원, 적재상태, 통과시간, 번호판 정보를 하나의 빅데이터 플랫폼에서 관리해 반복위반차량과 위험구간을 분석할 수 있다. 이동 단속반의 모바일장비에도 실시간으로 정보를 제공해 현장단속의 효율을 높였다.

4. 테스트베드 실증과 제도개선 기반 마련

전북 새만금 비공용 테스트베드에서 속도와 차로, 적재상태를 통제된 반복시험을 수행하고 일반 공용도로에서도 성능을 검증하였다. 이를 통해 실제 교통환경에서의 정확도와 안정성을 확인하였다. 또한 도로법과 도로교통법, 화물자동차 운수사업법 등 관련 법령을 분석해 무정차 단속과 비대면 관리체계를 도입하기 위한 개정방향과 단계별 로드맵을 제안하였다.



〈고속 주행 중 과적 의심차량
검지 시스템〉



〈고속 주행 중 적재불량 의심차량 검지
및 낙하물 판별기술〉

주요 연구 성과

특허(등록)

운행 제한 차량 선별 시스템 및 방법

기술이전

AI 데이터 중심의 미래 고성능 이차
전지 모빌리티 운송 안전 향상 기술

매출실적

1,387백만 원

설계기준반영(시방서)

국도 46호선 서면 안보리 안보검문소
고속충중기 시스템 제조구매(설치포함)

소프트웨어

AI-based Axle Load Signal
Detector v1.0

(인공지능 기반 축중 신호 디텍터
v1.0)

연구자 한마디

본 과제의 핵심 성과는 국내 환경 적용에 난항을 겪던 고속 무인 과적 단속 기술을 독자적으로 국산화했다는 점에 있습니다.

최고 수준의 성능과 국내 맞춤형 내구성·유지관리성을 동시에 확보하였으며, 사업화 기반의 시범 사이트 구축을 통해 고신뢰성 데이터를 확보하는 성과를 거두었습니다. 이는 단순한 기술 개발을 넘어, 향후 AI 데이터 기반의 분석 정확도 개선, 자동 보정 알고리즘 개발, 고장예측 시스템 확장 등 실효성 있는 후속 연구의 생태계를 조성했다는 점에서 의의가 큼니다.

성과의 차별성/우수성

외산 대비 높은 정확도와 40% 낮은 구축비용

1. 세계 수준의 국산 로드셀 고속충충기

국산 로드셀 기반으로 차량하중을 모든 속도구간에서 측정해 총중량 정확도 97.9%, 축하중 정확도 95.21%를 달성하였다. 스위스 Kistler 등 세계 선도기업과 동등 이상의 성능을 확보했으며, 차량의 회피주행 검지율과 데이터 매칭 정확도, 차량번호 인식률은 모두 100%를 기록하였다. 외산장비보다 구축비를 약 40% 이상 줄여 기술자립과 경제성을 함께 확보하였다.

2. 적재상태에 특화된 AI 판별

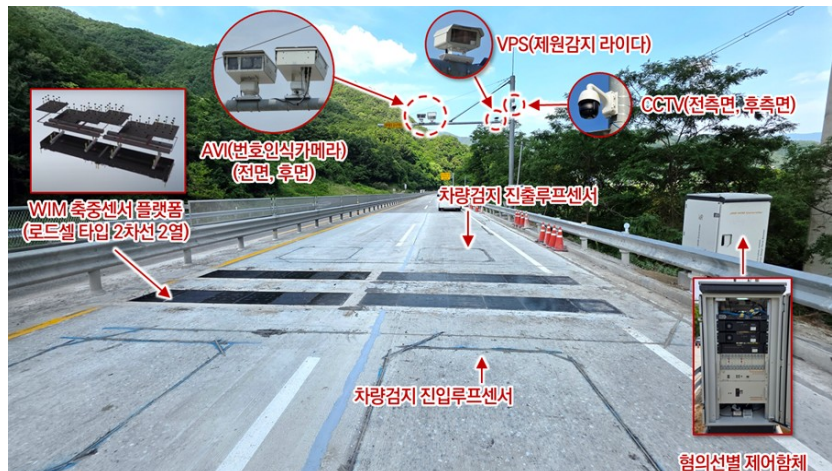
고속주행 화물차의 높이와 길이, 폭을 96% 이상의 정확도로 측정하고, 적재불량 검지율 91.72%, 낙하물 판별 정확도 90.90%를 달성하였다. 일반적인 차량인식이 아니라 화물의 적재상태와 낙하위험을 판단하도록 학습데이터와 알고리즘을 구성했다. 다차로와 고속환경에서도 작동해 정차·저속조건에 한정된 기존기술보다 현장 활용성이 높다.

3. 중량·제원·적재상태를 실시간으로 통합

개별 장비에서 따로 관리하던 차량 중량과 크기, 적재상태, 번호판정보를 하나의 플랫폼에서 연결하였다. 이동단속반 모바일장비로 정보를 전달하는 처리시간은 0.225초로, 세계 최고 수준인 1.5초보다 빠르다. 위험차량을 실시간으로 선별하고 과거 위반기록까지 확인할 수 있어 단속의 정확성과 대응속도를 높였다.

4. 기술개발과 제도개선을 함께 추진

공용도로와 비공용 테스트베드에서 성능을 검증하고, 무정차 단속을 실제 행정에 활용하기 위한 법령개정 방향도 제안하였다. 기술이 개발되어도 법적 근거가 없어 활용하지 못하는 문제를 줄이기 위해 도로법과 화물자동차운수사업법 등 관련 제도와 연계방안을 함께 마련했다는 점에서 차별성이 있다.



〈본 연구성과의 과적 검문소 사업화 현장〉

▶ 파급효과

과적사고를 예방하고 도로와 교량의 수명을 늘린다

국산 로드셀 기반의 WIM과 AI 적재불량 감지기술을 확보함으로써 해외장비에 의존하던 고속충중시스템을 국내 기술로 대체할 수 있게 되었다. 외산 대비 구축비를 40% 이상 절감하고 부품과 소프트웨어를 국내에서 유지보수할 수 있어 장기 운영비용도 줄일 수 있다.

기술은 실제 국도의 과적단속으로 빠르게 확산되었다. 2023년부터 2025년까지 영주와 흥천 국도검문소의 고속충전기, 용인 반도체클러스터 산업단지 과적관리시스템, 서울시 행주대교 사전선별시스템 등을 구축해 총 3,190백만 원의 누적매출을 달성하였다. 국도와 산업단지, 교량 등 서로 다른 환경에 적용해 시장성과 확장성을 입증하였다.

새만금 비공용 테스트베드는 실제 도로와 유사한 고속주행조건에서 속도와 차로, 차량
중량을 통제하며 반복시험할 수 있는 실증기반을 제공하였다. 여기서 축적한 데이터를
바탕으로 홍천과 문경 검문소, 행주대교 등 실제 운영현장에서도 일관된 성능을 확보하였다.
특정 노선이나 기후에 한정되지 않는 범용성과 신뢰성을 확인한 것이다.

사회적으로는 과적과 적재불량차량을 정차 전에 선별해 사고위험을 줄인다. 과적차량은 제동거리와 전복위험을 높이고 도로와 교량의 손상을 가속하며, 적재불량은 낙하물사고로 이어질 수 있다. 상시 모니터링으로 위험차량을 빠르게 관리하면 교통사고를 예방하고 기반시설의 수명도 연장할 수 있다.

또한 무정차 단속방식의 정의와 비대면 운영체계에 필요한 법·제도 개선방향을 제시해 기술을 정책으로 확산할 기반을 마련하였다. 기존 사후단속 중심체계를 데이터 기반의 예방적 관리체계로 전환하고, 지능형교통체계(ITS)의 기능과 국내 교통안전산업의 경쟁력을 높일 것으로 기대된다.



〈공용·비공용도로 테스트베드 구축〉

용어해설

축종기

차량을 정차시킨 상태에서 축하중
및 총중량을 측정하는 장비

WIM (Weigh-in-Motion)

차량이 주행하는 상태에서 축하중
및 총중량을 측정하는 시스템

로드셀

차량 하중을 전기 신호로 변환하여
측정하는 센서

적재불량

화물이 기준을 초과하거나 불균형하게 적재된 상태

회피주행 금지율

단속 회피를 위한 차로 변경 및 우회
주행 차량을 검지하는 성능 지표



대표연구자

김영훈

한국철도기술연구원
첨단물류시스템연구실
책임연구원
yhhkim @ krri.re.kr

연구진



정부지원내용

사업명

고부가가치 융복합 물류 배송·인프라
혁신기술개발 사업

과제명

도심 공동물류 택배터미널 구축
운영기술 개발

총 연구기간

2021.04~2027.12

총 연구비

총 8,715백만 원

* 정부출연금 7,470백만 원
민간부담금 1,245백만 원

16

좁은 도심 물류거점에서 하루 4만 상자를 자동 분류하다

AI 송장인식과 환형 분류시스템으로
일 최대 40,000박스 화물 통합 처리

▶ 연구배경 및 필요성

도심의 좁은 공간에서 더 많은 물류를 처리해야 하는 과제

온라인 주문과 새벽배송이 늘면서 도심에서 처리해야 하는 물류량은 빠르게 증가하고 있다. 그러나 대형 물류시설은 넓은 부지를 확보하기 어려워 도심 외곽으로 이전하는 ‘물류 스프롤(Logistics Sprawl)’ 현상이 심화되고 있다. 물류거점이 소비자와 멀어질수록 배송거리가 늘고 차량 운행과 물류비, 탄소배출도 증가한다. 따라서 도심의 유휴공간과 협소한 부지를 활용하면서도 많은 화물을 빠르게 처리할 수 있는 고밀도 물류시스템이 필요하다.

기존 분류설비는 직선형과 환형으로 구분된다. 직선형은 구조가 단순하지만 분류에 실패한 화물을 다시 투입하기 어렵고, 환형은 반복처리가 가능하지만 설치비와 공간이 많이 필요할 수 있다. 도심 공동물류에 적용하려면 두 방식의 장점을 결합해 좁은 공간에서도 처리량과 정확도를 확보해야 한다. 또한 입고부터 분류, 출고, 배송까지 서로 다른 시스템을 하나로 연결해 실시간으로 제어할 필요가 있다.

여러 택배사의 화물을 함께 처리하는 공동물류에서는 송장형식이 다르고 주문정보가 제공되지 않거나 일부가 누락되는 문제가 자주 발생한다. 바코드만으로는 다중송장과 훼손된 송장을 정확히 판독하기 어렵고, 작업자가 주소를 직접 확인하면 처리속도와 정확도가 떨어진다. 이에 바코드와 AI 기반 OCR을 결합해 송장의 문자정보까지 읽고 배송권역을 자동으로 판단하는 기술이 요구되었다.

연구진은 환형과 직선형 시스템의 장점을 결합하고, Cross-docking 방식으로 입고와 출고를 연결하는 도심형 공동물류 분류시스템을 개발하였다. AI 송장인식과 주문·창고·배송관리시스템을 통합해 B2C 택배뿐 아니라 크고 무거운 B2B 화물까지 자동으로 처리하는 것을 목표로 하였다.



〈개발 기술 및 구성 요소 개념도〉

▶ 성과내용

AI 송장인식과 무한루프 분류로 하루 4만 박스 처리

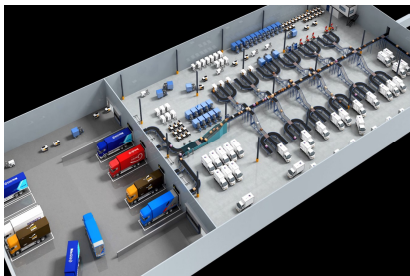
연구진은 도심의 제한된 공간에서 여러 물류사의 B2C·B2B 화물을 공동으로 처리하는 자동분류시스템을 개발하고 실제 물류터미널에 적용하였다. 도심형 공동물류터미널의 구조설계와 분류설비, 주문관리, 창고제어, 배송관리기술을 하나의 운영체계로 통합하였다.

핵심 설비는 리프트라인을 활용한 Loop형 분류시스템이다. 일반 직선형 설비에서는 목적지를 읽지 못한 화물이 끝단에 쌓이고 작업자가 다시 투입해야 한다. 이번 시스템은 분류에 실패한 화물을 환형라인으로 자동 회송해 정보가 확인될 때까지 다시 판독하고 분류한다. 이러한 무한루프 구조는 에러를 줄이고 작업자의 재투입업무를 최소화한다.

크고 무거운 기업물류 화물을 처리할 수 있도록 컨베이어와 분류장치의 구조를 강화하고, 협소한 부지에서도 처리효율을 높이도록 설비를 배치하였다. 스마트로지스 현장에 적용한 결과 일 최대 40,000박스의 물동량을 처리해 높은 처리성능을 입증하였다. 실제 터미널 구축과 운영을 통해 약 9.3억 원 규모의 사업화 실적도 달성하였다.

소프트웨어 측면에서는 주문정보를 수집·통합하는 주문관리시스템(OMS)을 개발하였다. 창고제어시스템(WCS)은 화물정보와 실시간 주문량을 분석해 배송권역을 설정하고 분류 장치를 제어한다. 배송관리시스템(TMS)은 배송차량과 경로를 관리하며, 터미널의 처리량과 오분류, 차량대기시간 등 핵심 운영지표(KPI)를 실시간으로 분석한다.

송장판독에는 바코드와 AI OCR을 함께 사용한다. 사전주문정보가 없는 송장이 붙은 화물은 OCR이 택배사명과 받는 사람의 주소 등 문자정보를 읽고 배송권역을 판단한다. 이를 통해 작업자의 개입 없이 화물을 분류할 수 있도록 했다. 입고부터 출고와 배송까지 데이터를 연결해 물류흐름 전반을 실시간으로 관리하는 End-to-End 자동화환경을 구축하였다.



〈도심 공동물류 택배터미널〉



〈택배사별 서버터미널 운영〉

주요 연구 성과

논문

도심 공동물류 택배터미널의 리소스 제약을 고려한 최대 처리량 산출을 위한 수리모델 연구

매출실적

930백만 원

연구자 한마디

도심 물류는 해결할수록 새로운 문제가 나타나는 분야입니다. 여러 택배사의 화물이 뒤섞이고, 주문 정보조차 주어지지 않는 환경에서 하루 수만 건을 오류 없이 분류해야 한다는 조건은 기존 시스템을 그대로 가져다 쓸 수 없다는 뜻이기도 했습니다.

분류에 실패한 화물을 어떻게 다시 흐름에 태울 것인가가 가장 오래 붙잡고 있던 문제였고, 그 답이 환형(Loop) 구조였습니다.

바코드와 AI OCR을 함께 엮는 방식도 지속적으로 테스트를 수행하고 있으며 향후 도심 공동물류 택배터미널에서도 이 기술이 자리를 잡을 것입니다. 사업화 현장에서 하루 4만 박스가 끊김 없이 처리되는 것을 처음 확인했을 때, 부딪힘보다 안도감이 먼저 밀려왔던 기억이 납니다.

앞으로 이 기술이 지하철 연계 배송, 카고바이크, 전기차로 이어지는 친환경 라스트마일의 기반 인프라로 자리잡고 도심 공동물류 자동화에 도전하는 연구자들에게 작은 실마리가 되기를 바랍니다.

성과의 차별성/우수성

정보가 부족한 화물도 분류하는 공동물류 통합시스템

1. 정보가 부족한 화물도 판독하는 AI 송장인식

기존 자동분류는 바코드정보가 정확하게 제공된다는 전제에서 작동했다. 그러나 개인정보 보호나 시스템연계 문제로 주문정보가 없거나, 여러 택배사의 송장이 붙은 화물은 사람이 직접 확인해야 한다. 이번 기술은 바코드 스캔과 AI OCR을 결합해 송장의 문자정보를 읽고, OCR과 LLM 구조로 주소와 택배사 정보를 해석한다. F1-Score 0.92의 인식성능을 확보해 데이터 공백이 있는 화물도 자동분류할 수 있다.

2. 분류 실패화물을 자동으로 재처리하는 무한루프 구조

환형 분류라인과 리젝트라인을 결합해 한 번에 분류되지 않은 화물을 자동으로 다시 판독한다. 작업자가 설비 끝에서 화물을 회수해 재투입하는 과정을 줄이고 분류성공률을 높였다. 좁은 공간에서 라인을 반복 활용할 수 있어 도심형 물류거점에 적합하며, 스마트 로지스 현장에서 하루 최대 40,000박스를 처리해 성능을 검증하였다.

3. 여러 물류사가 함께 사용하는 공동물류 플랫폼

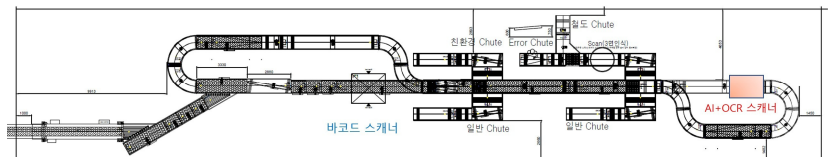
단일 택배사 전용시스템과 달리 여러 기업의 송장과 주문정보를 통합처리한다. 각 물류기업에는 분류와 배송과정에서 발생한 이벤트정보를 실시간으로 전달한다. 물류사마다 별도 설비를 구축하지 않고 하나의 거점을 공동으로 활용할 수 있어 공간과 투자비를 절감하고 도심 공동물류의 실현가능성을 높였다.

4. 주문량에 따라 바뀌는 배송권역과 경로

기존에는 미리 정한 고정권역에 따라 화물을 배분했지만, 이번 시스템은 실시간 주문량과 차량상태를 분석해 배송권역을 동적으로 조정한다. WCS와 TMS를 연결해 특정 지역의 물량이 급증해도 인력과 차량을 유연하게 배치할 수 있다. 철도와 전기차, 카고바이크, 로봇 등 친환경 말단배송수단도 연계할 수 있도록 운영구조를 설계하였다.

5. B2C와 B2B를 함께 처리하는 다층 집약형 설계

소형 택배뿐 아니라 크고 무거운 B2B 화물을 처리할 수 있도록 설비와 터미널구조를 설계하였다. 기존 1톤 화물트럭과 친환경 말단배송수단의 역할을 구분하고, 여러 운송수단이 한 거점을 공유하는 다층 집약형 인프라를 구현하였다. 도시의 제한된 부지에서 기업물류와 생활물류를 함께 처리할 수 있다는 점에서 확장성이 높다.



〈바코드+OCR 스캔 및 환형(Loop) 구조 분류시스템〉

▶ 파급효과

물류비와 탄소배출을 줄이고 현장근로를 안전하게 바꾸다

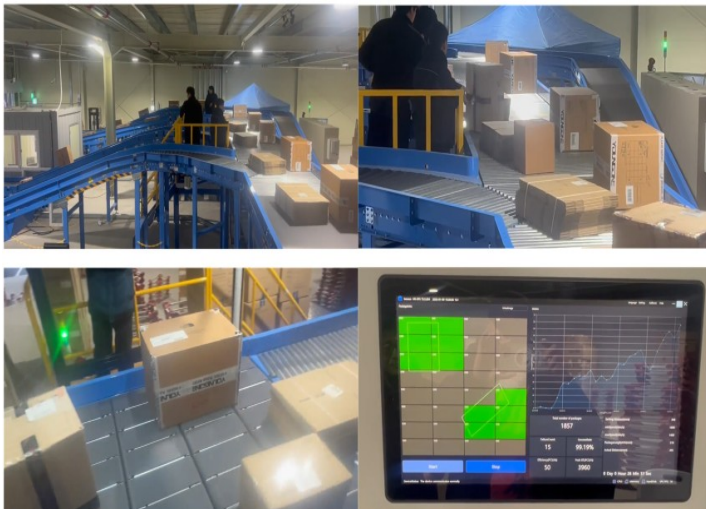
스마트로지스 실증을 통해 싱글레이터와 휠소터, 환형 컨베이어가 연계된 도심 공동물류 시스템의 현장성을 확인하였다. 도심 공간에 적합한 설비구성과 무한루프 분류방식으로 처리오차를 줄이고 물동량을 높였다. 향후 도심형 공동물류 택배터미널에서는 바코드와 AI OCR을 결합해 여러 택배사의 송장을 동시에 인식하고, 주문정보가 없는 화물도 자동으로 분류할 수 있다.

경제적으로는 반복 분류와 송장확인, 권역배정업무를 자동화해 인건비와 운영비를 절감한다. 하나의 공동거점을 여러 물류사가 공유하면 기업별 설비투자자과 도심부지 확보비용을 줄일 수 있다. 현장적용을 통해 약 9.3억 원의 사업화 실적을 달성했으며, 스마트팩토리과 항만, 항공화물 등 다중송장과 대량분류가 필요한 다른 산업에도 확산할 수 있다.

산업적으로는 주문·창고·배송관리 데이터를 통합해 물류산업의 디지털 전환을 촉진한다. 실시간 KPI와 주문량을 바탕으로 설비와 차량을 운영하므로 경험에 의존하던 의사결정을 데이터 기반으로 바꿀 수 있다. 분류장비와 AI 소프트웨어, 로봇, 친환경 배송수단이 결합된 새로운 물류자동화시장을 형성하고, 자율주행로봇을 활용한 공유배송 등 B2C 신사업으로도 확대할 수 있다.

환경·사회적으로는 배송권역과 경로를 최적화하고 차량대기시간을 줄여 도심 교통혼잡과 탄소배출을 낮춘다. 철도와 전기차, 카고바이크 등 저탄소 운송수단을 연계하면 화물차 중심의 말단배송구조를 개선할 수 있다. 무거운 화물을 반복적으로 옮기고 송장을 확인하던 작업을 자동화해 근로자의 근골격계 부담과 안전사고 위험도 줄인다.

결과적으로 이 기술은 단순노동 중심의 물류현장을 설비운영과 데이터관리 중심의 고부가가치 산업으로 전환하고, 소비자에게는 더 빠르고 정확한 배송서비스를 제공한다. 물류비 절감과 탄소중립, 근로안전을 함께 실현하는 지속가능한 도심물류모델이다.



〈입고라인 및 화물 정렬(싱글레이터)〉

용어해설

물류 스프롤

(Logistics Sprawl)

도심 물류시설이 외곽으로 이전해 배송 거리와 시간이 늘어나는 현상

도심 공동물류

여러 물류사의 화물을 도심 거점에서 함께 처리하고 배송하는 방식

Cross-docking

입고 화물을 보관하지 않고 바로 분류해 출고하는 물류 방식

WCS

(창고제어시스템)

물류센터 설비와 화물 이동, 분류 과정을 제어하는 시스템



대표연구자

박 준 식

한국교통연구원
광역도시교통연구본부
선임연구위원
044-211-3048
forejs@koti.re.kr

연구진



정부지원내용

사업명

대도시권 수요응답형 광역 모빌리티
서비스 실용화 기술개발

과제명

대도시권 수요응답형 광역 모빌리티
서비스 실용화 기술개발

총 연구기간

2022.04~2025.12

총 연구비

총 13,448백만 원

* 정부출연금 11,888백만 원
민간부담금 1,560백만 원

17

세계 최초 예약하면 출퇴근길에 찾아오는 광역콜버스

세계 최초 광역 수요응답형 교통서비스로
통행시간 30~46% 단축과 법제화·사업화 달성

▶ 연구배경 및 필요성

신도시의 낮은 교통대책과 광역버스 공급 부족

3기 신도시 조성과 수도권 광역교통망 개선계획이 발표된 이후, 2기 신도시의 광역교통 대책이 입주보다 늦게 추진되면서 ‘교통은 나중에 따라오는’ 문제에 대한 개선요구가 커졌다. 신도시 주민은 서울과 주요 업무지구까지 장거리를 이동해야 하지만 출발지가 여러 지역에 흩어져 있어 승용차 의존도가 높다. 자가용 이용을 대중교통으로 전환하려면 통행시간과 대기시간을 줄이고 원하는 시간에 이용할 수 있는 광역교통서비스가 필요하다.

그러나 신도시 입주 초기에는 주민과 통행수요가 충분하지 않아 민간 운송업체가 정규 광역버스를 안정적으로 운영하기 어렵다. 정부가 재정을 지원하더라도 시간대와 지역별 수요가 계속 달라져 차량이 부족하거나 빈 차로 운행하는 공급불균형이 발생한다. 이용자는 민차로 탑승하지 못하거나 긴 배차간격을 기다려야 하고, 입주가 진행되는 동안 통행패턴도 지속적으로 바뀐다.

이러한 지역에는 정해진 노선과 시간표를 그대로 운영하는 방식보다 이용자의 예약과 실제 수요에 따라 차량과 경로를 유연하게 조정하는 수요응답형 교통(DRT)이 적합하다. 다만 기존 DRT는 도시 내부나 농어촌의 짧은 이동, 퍼스트·라스트마일 지원에 주로 사용되었다. 시·도 사이의 장거리 광역통행은 이동범위가 넓고 광역급행버스와 택시 사이의 다양한 수요를 처리해야 해 노선과 배차 최적화가 훨씬 복잡하다.

연구가 시작된 2022년에는 광역 수요응답형 서비스가 여객자동차운수사업법상 허용되지 않았고, 장거리 통행에 맞춘 플랫폼기술도 없었다. 따라서 기술개발과 현장실증뿐 아니라 법률개정과 재정지원 근거 마련을 동시에 추진할 필요가 있었다.



〈연구의 필요성, As-Is(좌) To-Be(우)〉

▶ 성과내용

앱 예약과 수요분석으로 운행하는 세계 최초 광역콜버스

연구진은 이용자가 앱으로 출발지와 목적지, 탑승시간을 예약하면 실제 수요에 맞춰 차량과 정류장, 운행경로를 구성하는 광역콜버스 플랫폼을 개발하였다. 카카오모빌리티 앱에서 원하는 구간과 시간을 선택해 예약하고, 지정된 정류장에서 차량을 이용하는 방식이다. 수도권 대중교통 통합요금제에 광역버스와 같은 수단으로 포함해 무료환승과 거리비례요금을 적용함으로써 이용자의 비용부담도 줄였다.

서비스지역의 수요와 도로조건에 따라 대형·중형·소형 차량을 선택할 수 있도록 차종을 다양화하였다. 정류장도 항상 같은 위치에서 운행하는 고정형과 예약수요에 따라 운영하는 가변형을 혼합하였다. 장거리 출퇴근의 특성을 고려해 즉시 호출보다 사전예약방식을 중심으로 설계해 정시성과 예측가능성을 높였다.

관리자는 의사결정지원시스템에서 예약수요와 통행시간, 차량위치를 분석해 운행경로와 배차스케줄을 조정한다. 이용자의 출발지와 목적지가 달라도 비슷한 시간과 방향의 수요를 묶어 한 차량에 배정하고, 광역통행에 적합한 정류장조합과 경로를 생성한다. 이를 통해 택시 수준의 개별성과 광역버스 수준의 수송효율 사이에서 서비스조건을 최적화하였다.

경기도 5개 지역에서 18개월 이상 실증운행을 수행해 정시성과 안정성을 검증하였다. 기존 대중교통 경로와 비교해 모든 시간대의 평균 통행시간이 약 30~46% 줄었으며, 카카오톡 이용자 만족도는 약 91% 수준으로 나타났다. 장기간 운영을 통해 신도시의 변화하는 통행수요에 맞춰 노선과 차량을 조정할 수 있음을 확인하였다.

실증 이후에도 지방자치단체와 이용자의 높은 수요를 바탕으로 본사업과 연계해 서비스를 계속 운영하였다. 카카오모빌리티와 스튜디오갈릴레이는 주관기관인 한국교통연구원의 관련 특허를 무상실시 방식으로 이전받아 플랫폼 운영서비스를 유상으로 제공하였으며, 1.43억 원의 사업화 실적을 달성하였다.

〈경기도 내 5개 지역에서 실시한 실증 운영 결과(23.9~25.8)〉

구분	총 이용자 수 (명)	일평균 이용자 수 (명)	재차율		운송수지		통행시간 절감		만족도
			일평균	첨두시	월평균 운수수입	운송 수지율 (PI)	일평균	첨두시 (오전 상행)	
시흥시	138,217	206.3	33.4%	74.2%	1,511만원	22.0%	-34%	-22%	4.5점
광주시	21,144	47.3	15.1%	54.9%	172만원	4.1%	-33%	-27%	4.4점
화성시	31,149	75.0	9.5%	27.4%	336만원	8.8%	-30%	-26%	4.5점
용인시	113,290	299.3	31.5%	76.5%	1,015만원	29.6%	-46%	-50%	4.6점
수원시	110,227	318.7	17.5%	60.3%	1,133만원	20.0%	-35%	-28%	4.6점
전체	414,027	189.3	21.4%	58.7%	833.4만원	16.9%	-35.6%	-30.6%	4.53점 (약 91%)

주요 연구 성과

논문

Provision of metropolitan demand responsive transit and attitude's role in mode choice

특허(등록)

M-DRT의 정시성 및 신속성 개선 시스템 및 방법

기술이전

광역콜버스(M-DRT) 표준 플랫폼 기술

매출실적

143백만 원

법령반영

여객자동차운수사업법 개정

인력양성

2명

소프트웨어

M-DRT(광역콜버스) 의사결정 정책 지원 시스템의 실시간 운영관리 기능

연구자 한마디

기술적성과물인 '광역콜버스' 상표, 광역콜버스 플랫폼 기술 특허 등을 공공기관인 한국교통연구원에서 확보하여 무상으로 누구나 사용할 수 있도록 제공하고 있어, 현재 경기도에서 사용하여 시민들에게 광역콜버스 서비스를 제공하고 있습니다. 정부출연금으로 개발한 기술을 다시 사회에 환원하여 사회적으로 가치있는 일을 한 것에 자긍심을 갖게 되었습니다.

▶ 성과의 차별성/우수성

도시 내부를 넘어 시·도 간 장거리 이동에 DRT를 적용

1. 세계 최초 시·도 간 광역 DRT 상용화

기존 국내외 DRT는 도시 내부의 이동이나 농어촌 교통, 퍼스트·라스트마일 연결에 집중하였다. 미국 Circuit과 유럽 Padam Mobility, 국내 I-MOD와 과천콜버스도 대부분 지역 안에서 짧은 거리를 운행한다. 광역콜버스는 둘 이상의 시·도를 오가는 장거리 출퇴근에 수요응답형 서비스를 적용하고 실증과 상용화까지 완료한 세계 최초 사례다.

2. 광역통행에 맞춘 예약·배차 최적화

지역내 DRT는 실시간 호출과 가까운 차량배정이 중요하지만, 광역출퇴근은 정해진 시간에 목적지에 도착하는 것이 더 중요하다. 이번 서비스는 사전예약을 기반으로 통행수요를 묶고 차량과 정류장, 출발시간을 계획한다. 고정형과 가변형 정류장을 혼합하고 차종을 수요에 맞게 선택해 장거리 통행의 정시성과 수송효율을 높였다.

3. 법률과 재정지원 근거를 함께 마련

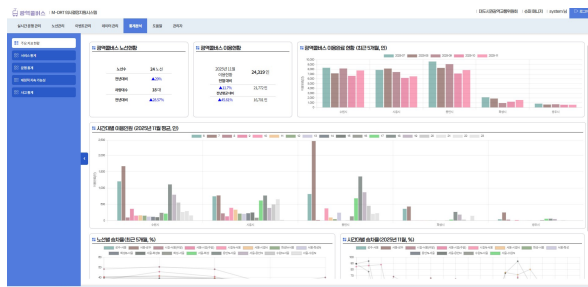
연구초기에는 광역 수요응답형 운송사업의 법적 근거가 없었다. 여객자동차운수사업법을 개정해 광역콜버스를 운송사업의 한 유형으로 운영할 수 있도록 했으며, 대도시권 광역교통 관리에 관한 특별법 개정으로 신도시 입주초기와 수익성이 낮은 지역에 재정을 지원할 근거를 마련하였다. 기술개발과 제도개선을 함께 추진해 실증종료 후 서비스가 중단되는 문제를 해결하였다.

4. 이용자·운송사업자·지자체가 지속할 수 있는 구조

이용자는 기존의 광역버스와 동일한 요금체계로 편리하게 서비스를 이용하고, 운송사업자는 지자체의 지원으로 수요가 부족한 초기에도 운영을 지속할 수 있다. 지자체는 의사결정 지원시스템으로 노선과 배차를 관리해 재정투입과 서비스수준을 조절한다. 2026년 4월 현재까지 서비스가 계속 운영되며 공공성과 사업성을 함께 확보하였다.

5. 다른 지역에 적용 가능한 표준 플랫폼

신도시 입주초기뿐 아니라 지방의 적자노선과 광역철도 비수혜지역에도 적용할 수 있도록 표준 플랫폼과 서비스모델을 마련하였다. 지역의 수요와 통행거리, 차량규모에 따라 운영 조건을 바꿀 수 있어 전국의 다양한 교통사각지대로 확장할 수 있다.



〈수요응답형 광역모빌리티 의사결정 지원시스템〉

▶ 파급효과

광역교통 사각지대를 줄이고 신도시 주민의 이동권을 보장

광역콜버스는 플랫폼사업자와 기존 버스운송업체가 경쟁하는 대신 역할을 나누고 협력하는 운영모형을 만들었다. 신규 모빌리티서비스 도입과정에서 발생할 수 있는 갈등을 조정하고, 기존 운송업체가 차량운행을 담당하면서 플랫폼기업이 예약·배차기술을 제공하는 구조를 마련하였다. 공급자가 정한 노선에 이용자가 맞추던 방식에서 차량규격과 정류장, 운행 시간을 수요에 맞추는 이용자 중심 체계로 전환하였다.

신도시 입주초기와 광역철도 비수혜지역에 서비스를 제공해 광역대중교통의 사각지대를 줄였다. 주민은 승용차나 비싼 택시에 의존하지 않고 수도권 통합요금과 무료환승을 이용할 수 있다. 경기도 5개 지역 실증에서 기존 경로보다 평균 통행시간이 약 30~46% 단축되었으며, 만족도 조사에서는 5점 만점에 4.53점, 만족도 기준 약 91%의 높은 평가를 받았다.

수요가 적은 지역에서도 예약정보에 맞춰 차량을 운영하므로 고정노선버스보다 빈 차 운행과 대기시간을 줄일 수 있다. 승용차 통행을 대중교통으로 전환하면 도로혼잡과 주차수요, 대기오염과 탄소배출을 낮춰 2050 탄소중립에 기여한다. 운송사업자도 수요에 맞는 차종과 배차를 적용해 운영비를 절감할 수 있다.

산업적으로는 플랫폼개발자와 데이터분석가, 서비스센터 운영인력, 운전직 등 새로운 일자리를 창출한다. 시와 빅데이터를 활용한 수요예측·배차기술은 다른 대중교통과 관광, 물류서비스에도 적용할 수 있다. 법·제도와 표준플랫폼을 함께 확보해 국내 모빌리티 기업이 새로운 공공교통시장을 확대하고 해외 수요응답형 교통시장에 진출할 기반도 마련하였다.

결과적으로 광역콜버스는 교통시설이 충분히 갖춰지기 전에도 주민에게 최소한의 광역이동권을 제공하고, 서비스가 입주와 수요변화에 따라 성장할 수 있는 지속가능한 교통복지 모델이다.



〈광역콜버스 시범사업 업무협약식〉



〈지자체 협의회 사진〉

용어해설

수요응답형 여객자동차 운송사업 (DRT)

운행계통·운행시간·운행횟수를 여객의 요청에 따라 탄력적으로 운영하여 여객을 운송하는 사업을 말하며, 여객자동차운수사업법에 해당하는 경우에 한함

광역교통

대도시권에서 둘 이상의 시·도를 연결하는 광역적인 통행수요를 담당하는 교통체계



대표연구자

유진우

국민대학교
자동차IT융합학과 부교수
02-910-4836
jwyoo@kookmin.ac.kr

연구진



최경진 이수현 한승재



박시명 원종빈 김주명



최민석 석지혜 최진혁

정부지원내용

사업명

자율주행 기술개발 혁신사업

과제명

실차 시뮬레이션 기반 자율주행
시스템 안정성 평가 기술 개발

총 연구기간

2021.04~2025.12

총 연구비

총 15,319백만 원

* 정부출연금 13,244백만 원
민간부담금 2,057백만 원

18

실제 자율주행차를 가상도로에서 시험하는
VILS 검증기술

실차와 시뮬레이션을 연결하고
결과의 신뢰성까지 합리적 수치로 평가

연구배경 및 필요성

모든 위험상황을 실제 도로에서 시험할 수 없는 자율주행

완전자율주행차가 상용화하려면 차량이 차선을 따라 주행하는 기능뿐 아니라 주변 차량과 보행자, 도로시설과 상호작용하는 모든 상황에서 안전하게 판단하고 대응한다는 점을 입증해야 한다. 자율주행 수준이 Lv.4이상으로 높아질수록 소프트웨어와 센서, 제어기의 구성이 복잡해지고 시험해야 할 도로와 기상, 교통상황의 조합도 기하급수적으로 늘어난다.

모든 위험상황을 실제 도로에서 반복시험하는 것은 현실적으로 어렵다. 사고위험이 큰 시나리오는 시험자와 주변 운전자에게 위험하며, 같은 조건을 정확히 다시 만드는 데에도 많은 비용과 시간이 든다. 따라서 시뮬레이션과 시험장, 실도로시험을 서로 보완하고, 다양한 시나리오를 안전하게 반복할 수 있는 가상검증의 역할이 커지고 있다.

다만 컴퓨터 안에서만 이루어지는 일반적인 시뮬레이션에는 한계가 있다. 시뮬레이션 안의 차량과 도로환경은 수학적 모델로 구현되기 때문에 차량의 타이어나 현가장치, 제어기 동작, 센서오차, 주변객체와의 상호작용을 어떻게 구현하는지에 따라 결과가 달라질 수 있다. 가상차량이 안전하게 주행했다고 해서 실제 차량도 동일 상황에서 안전할 것이라고 단정하기는 어렵다.

이러한 간극을 줄이기 위해 실제 차량을 시뮬레이션 안에 포함하는 VILS(Vehicle-In-the-Loop Simulation) 기술이 필요하다. 실제 차량은 시험장이나 통제된 공터를 주행하고 가상의 도로와 차량, 보행자정보가 입력되어 실제 차량이 가상 교통상황을 어떻게 인식하고 조향·가속·제동하는지를 안전하게 확인할 수 있다. 다만 VILS 실험 결과를 검증근거로 활용하려면 실제 도로시험을 얼마나 정확하게 재현하는지 객관적으로 평가해야 한다.

이에 연구진은 실제 차량 기반의 VILS 플랫폼과 함께 차량동역학, 제어, 환경, 인지센서 모델의 신뢰성을 정량적으로 평가하는 방법을 개발하였다. 반복가능성과 현실성을 동시에 확보하고, 시뮬레이션 결과의 적용범위를 수치로 제시하는 것이 목표였다.



〈자율주행차량의 VILS시험 및 실차 시험〉

▶ 성과내용

실차 기반 가상시험과 모델별 신뢰성 평가체계 구축

이번 성과는 실제 자율주행차와 가상도로환경을 실시간으로 연결해 위험상황을 시험하는 VILS 검증기술과, 시뮬레이션 결과가 실제 차량시험을 얼마나 정확하게 재현하는지 평가하는 신뢰성 검증기술로 구성된다.

VILS 시험에서는 실제 차량이 종합주행시험장(PG)이나 통제된 공터를 주행한다. 차량의 센서와 자율주행제어기에는 가상도로와 주변차량, 보행자, 신호정보가 실시간으로 입력된다. 제어기가 가상상황을 실제로 인식해 조향과 가속, 제동명령을 내리면 차량은 물리적으로 움직이고, 그 응답이 다시 시뮬레이션에 반영된다. 따라서 가상차량모델이 아니라 실제 차량의 동역학과 제어기, 전장시스템을 포함한 상태에서 시험할 수 있다.

실제 도로에서 재현하기 위험한 급정지차량과 끼어들기, 보행자 돌발진입, 충돌위험상황을 통제된 공간에서 반복적으로 시험할 수 있다. 가상객체는 실제 주행시험에서 수집한 목표 차량의 거동데이터를 바탕으로 생성하고, 카메라와 라이다 등 차량센서가 받아들이는 형식으로 변환해 입력한다. 이를 통해 같은 시나리오를 여러 번 정확하게 재현하면서 실제 차량의 반응을 측정한다. 국민대학교가 개발한 실차연계 VILS 기술은 독창성과 실용성을 인정받아 국내 특허로 등록되었다.

연구진은 플랫폼을 구축하는 데 그치지 않고 시뮬레이션 신뢰성 평가방법을 함께 개발하였다. 가상환경을 차량동역학과 제어, 환경, 인지센서의 네 가지 핵심모델로 구분하고, 실제 차량시험과 VILS 시험결과를 비교하였다. 실제 시험에서도 운전자와 노면, 기상 조건에 따라 결과가 달라지는 점을 고려해 실차시험의 변동범위를 기준으로 가상시험의 신뢰성을 판단하는 기준점을 제시하였다.

평가에는 횡방향과 종방향, 복합거동을 포함한 7개 대표시나리오와 14개 평가파라미터를 사용하였다. 단순한 평균오차뿐 아니라 시간에 따른 그래프형상과 진폭, 위상차를 함께 분석하는 복합지표를 적용하였다. 이를 통해 어떤 모델과 시나리오에서 가상시험이 실제를 잘 재현하는지, 어느 범위까지 결과를 신뢰할 수 있는지를 수치로 제시하였다.

결과적으로 실제 차량과 자율주행 ECU, 센서, 위치계측장비, 실시간 시뮬레이터를 하나의 검증루프로 연결하고, 실차적용과 정량평가, 특허와 학술성과까지 확보한 통합 검증체계를 구축하였다.



〈실제 차량이 가상환경 내 주변 차량을 인지하고 이에 대응하여 주행하는 장면〉

주요 연구 성과

논문

Model-Centric Quantitative Methodology for Evaluating Simulation Reliability in Autonomous-Vehicle Testing

특허(등록)

PG(Proving Ground) 기반 VILS (Vehicle-In-the-Loop Simulation) 테스트를 위한 시뮬레이션 장치 및 이의 시뮬레이션 방법

연구자 한마디

현재 자율주행 기술 패러다임이 변화하는 상황에서 차량 시뮬레이션 기반 검증은 기술 신뢰성 확보를 위해 필요성이 매우 증대되고 있는 상황입니다.

국민의 안전성 및 편의성 향상을 위해 반드시 실현되어야 할 자율주행 상용화를 위해 실제 자율주행 차량과 가상환경을 연결하여 검증할 수 있는 VILS 기술은 매우 중요한 핵심 기술입니다. 저희가 연구개발한 실제 자율주행차량과 가상환경을 연결하는 VILS 기반 신뢰성 평가 방법론을 통해 다양한 자율주행 차량들이 세상에 나오기 전에 합리적이고 세밀한 검증을 통해 안전성이 향상될 수 있다고 생각합니다.

저희의 차량 및 시뮬레이션 연구 결과 물들이 국내외를 불문하고 어느 차량 연구자에게 좋은 기술적 영감이 되기를 소망하며, 국토부 우수성과로 선정될 수 있도록 도움주신 한국교통안전공단 자동차안전연구원(KATRI) 및 컨소시엄 기업분들께 감사의 마음을 전해드립니다.

성과의 차별성/우수성

실도로시험과 순수 시뮬레이션의 한계를 함께 보완

1. 실제 차량의 물리적 응답을 포함한 검증

실도로시험은 위험하고 반복비용이 크며, 순수 시뮬레이션은 차량거동을 모델로만 계산한다. VILS는 실제 차량이 시험장을 주행하면서 가상교통상황에 반응하도록 해 두 방식의 한계를 보완한다. 조향과 가속, 제동, 차량진동 등 실제 물리적 응답이 검증에 포함되므로 가상차량 중심 시험보다 현실성이 높다.

2. 실제 주행데이터로 가상객체를 반복 재현

실제 차량시험에서 수집한 목표차량의 속도와 위치, 가속정보를 이용해 가상객체를 생성한다. 이 정보를 자율주행차의 센서입력형식으로 변환해 같은 끼어들기와 급제동상황을 반복적으로 제공한다. 실제 거동특성을 반영하면서도 시험조건을 정확히 반복할 수 있어 PG 기반 VILS의 재현성과 효율을 높였다. 관련 기술은 이러한 기술적 우수성을 입증받아 국내 특허로 등록되었다.

3. 시뮬레이션의 신뢰범위를 정량적 수치로 평가

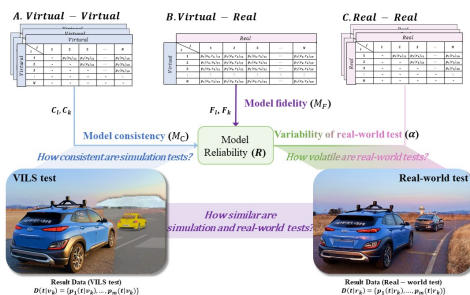
가상환경을 구축했다고 해서 결과를 그대로 신뢰할 수는 없다. 이번 연구는 차량동역학과 제어, 환경, 인지센서 모델별로 실차시험과의 차이를 평가한다. 7개 시나리오와 14개 파라미터의 형상유사도와 수치오차, 진폭, 위상특성을 종합해 신뢰성을 계산한다. 시뮬레이션이 실제를 어느 수준까지 반영하는지 객관적으로 제시한 점이 기존 플랫폼과 차별화된다.

4. 시험장과 가상환경을 연결한 통합플랫폼

실제 차량과 자율주행 ECU, 인지센서, RTK-GPS, CAN 계측장비, 실시간 시뮬레이터와 CarMaker 기반 가상환경을 하나로 연결하였다. K-City의 고정밀 지도와 가상시험장을 연계해 실제 시험장과 동일한 도로조건을 디지털로 구현할 수 있다. 향후 디지털 트윈 기반의 국가 자율주행 검증체계로 확장할 수 있는 구조라는 것이 장점이다.

5. 표준화와 제도화를 위한 평가방법론

실차기반 VILS 특허와 SCIE 논문을 통해 플랫폼과 신뢰성 평가방법의 기술적 근거를 확보하였다. 단순한 연구용 장비가 아니라 향후 인증기관과 완성차기업이 공통으로 사용할 수 있는 시험절차와 평가기준의 기초를 제시하였다.



〈시뮬레이션 신뢰성 정량화 프레임워크〉

▶ 파급효과

자율주행 검증비용을 줄이고 안전한 상용화를 앞당기다

자율주행 안전성을 실제 주행거리만으로 입증하려면 매우 많은 시간과 비용이 필요하다. VILS는 시험장이나 공터에서 위험시나리오를 안전하게 반복하고, 가상환경만 바꾸어 여러 교통상황을 빠르게 시험할 수 있다. 따라서 실제 도로시험의 횟수와 검증기간을 줄이고 차량개발과 소프트웨어 업데이트에 필요한 비용을 절감한다.

경제적으로는 시험·평가장비와 실시간 시뮬레이터, 가상도로·센서모델, 검증서비스시장의 성장을 촉진한다. 완성차와 부품기업은 자체 시험을 조기에 수행해 설계오류를 발견하고 실도로시험 전에 위험을 줄일 수 있다. 시험기관은 동일한 플랫폼에서 여러 차량과 자율주행시스템을 평가해 시설활용률과 서비스효율을 높일 수 있다.

산업적으로는 실제 차량과 ECU, 카메라·라이다, RTK-GPS, CAN 장비, 시뮬레이션 소프트웨어를 통합해 자동차와 센서, 제어, 시험인증산업의 협업을 확대한다. K-City와 가상시험장의 연계는 실제 테스트베드의 도로와 시설을 디지털 트윈으로 구축하고, 실험 결과를 가상환경 개선에 다시 활용하는 순환체계로 발전할 수 있다.

사회적으로는 충돌과 보행자 돌발진입 등 고위험상황을 일반도로에서 시험하는 횟수를 줄여 시험자와 시민의 안전을 높인다. 반복시험과 정량평가를 통해 자율주행차가 다양한 상황에서 일관되게 작동한다는 근거를 제공하면 기술에 대한 국민의 신뢰와 수용성도 높아진다.

또한 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 객관적으로 평가하는 방법은 향후 국가 안전검증표준과 인증제도를 마련하는 핵심기반이 된다. 검증결과를 기업마다 다른 방식으로 제시하는 문제를 줄이고, 자율주행 Lv.4 상용화를 위한 공통 평가언어와 기준을 제공한다.



〈VILS 검증용 자율주행 시험차량(임시운행허가 차량) 및 연구 구성원〉

용어해설

VILS

Vehicle-In-the-Loop Simulation, 실제 차량을 시뮬레이션 루프에 포함시켜 차량의 응답을 검증하는 시뮬레이션 기술

PG

Proving Ground, 실제 도로 대신 차량 시험과 검증을 수행하는 전용 시험장



대표연구자

이 덕 희

한국철도기술연구원
철도중대사고연구실 실장
031-460-5371
dhlee27@krri.re.kr

연구진



권태순 박원희 윤수환



강동호 진승현 이선효



오민석

정부지원내용

사업명

대심도 장대터널(GTX 등)의
재난 대응 복합훈련장 개발 사업

과제명

대심도 철도시설 고위험
재난 인지·예측·대응 기술 개발

총 연구기간

2023.04~2027.12

총 연구비

총 8,605백만 원
* 정부출연금 8,007백만 원
민간부담금 598백만 원

19

철도터널 사고현장에 5분 안에 도착해 승객의 피난을 돕다

시속 20km / 250℃ 1시간 내열성능을
갖춘 이동형 영상감시 로봇 개발

▶ 연구배경 및 필요성

깊은 철도터널에서 승무원만으로 대응하기 어려운 재난

GTX와 같은 대심도 철도는 지하 40m 이상의 깊은 터널을 운행한다. 이곳에서 화재나 탈선이 발생하면 지상으로 대피하는 거리가 길고 연기와 열이 빠르게 확산돼 대형 인명 사고로 이어질 수 있다. 사고 초기 몇 분 안에 현장상황을 파악하고 승객을 올바른 방향으로 안내하는 것이 중요하다.

열차 한 편성에는 500~1,000명 이상의 승객이 탑승하지만 보통 1~2명의 승무원으로 운영된다. 비상시 기관사는 관제실에 사고를 보고하고 열차를 정지시키는 동시에 초기 소화와 출입문 개방, 승객 피난안내까지 수행해야 한다. 혼자서 모든 업무를 처리하기 어렵고, 연기와 정전으로 시야가 제한되면 객실 밖 승객의 위치와 이동방향을 확인하기도 힘들다.

승객이 선로로 내린 뒤 후속열차가 진입하면 2차 사고가 발생할 수 있으므로 관제실은 공유선로의 열차를 즉시 통제해야 한다. 터널 환기팬도 연기를 승객의 대피방향 반대로 보내도록 운전해야 하기 때문에 실제 피난방향을 정확히 알아야 한다. 그러나 기관사의 음성보고만으로는 복잡한 현장과 승객의 이동상황을 실시간으로 파악하기 어렵다.

따라서 사고현장에 신속하게 이동해 영상과 음향을 관제실로 전송하고, 현장에서 승객에게 대피방향을 알려주는 무인시스템이 필요하다. 연구진은 터널 어느 지점에도 5분 이내 도착하고, 고온과 연기 속에서도 작동하며, 평상시에는 시설환경을 점검할 수 있는 이동형 영상감시시스템을 개발하였다.



〈이동형 영상감시시스템을 활용한 철도터널 내 승객피난지원(예시)〉

▶ 성과내용

고속 레일로봇과 AI·열화상 관제를 결합한 피난지원시스템

이번 연구에서는 대심도 철도터널과 지하역사에서 화재 등 재난이 발생했을 때 사고현장으로 이동해 영상과 음향을 관제실에 전송하고 승객의 피난을 지원하는 레일형 이동감시 시스템을 개발하였다. 소수 승무원이 다수 승객을 통제해야 하는 한계를 보완하기 위해 주행로봇과 전용궤도, 통신·제어시스템, 영상·열화상장비, 안내장치를 하나로 구성하였다.

로봇은 터널벽이나 상부에 설치한 전용궤도를 따라 시속 20km 이상으로 이동한다. 3km 간격으로 배치하면 터널 어느 지점에서 사고가 발생해도 5분 이내에 현장에 도착할 수 있도록 설계하였다. 고속주행 중 이탈하지 않도록 오목한 궤도구조를 적용하고, 궤도 안쪽의 급전선을 통해 전력을 공급하면서 PLC 통신을 수행한다.

정확한 위치확인을 위해 궤도마커와 UWB 위치추위방식을 함께 사용한다. 관제실은 로봇의 위치와 이동상태를 실시간으로 확인하고 사고지점으로 출동시킬 수 있다. 현장에 도착하면 광학카메라와 열화상카메라, 마이크로 승객과 연기, 열원의 상태를 확인하고 영상·음향을 철도운영 관제실로 전송한다.

재난환경에서 작동하도록 내열성과 내구성을 확보하였다. 시험결과 250℃의 고온에서 1시간 이상 정상 작동했으며, IP67 등급의 방수·방진 성능을 갖췄다. AI 영상분석으로 휠체어 이용자와 교통약자 등 구조가 필요한 인원을 인식하고, 시각·음향 안내장치로 안전한 대피방향을 알려준다. 관제실은 실시간 영상을 바탕으로 후속열차와 환기설비를 제어할 수 있다.

평상시에는 온도와 습도, 미세먼지 등 터널환경을 측정하고 시설물의 이상상태를 감시한다. 한국철도기술연구원 오송시험선 제2터널에 설치해 2023년부터 2025년까지 장기간 운전하며 성능과 신뢰성을 확인하였다. 2025년에는 인천지하철 1호선 인천시청역 승강장에 개선시제품을 시범설치했으며, 2027년까지 실제 철도현장 실증을 추진해 실용화기반을 마련할 예정이다.



〈개발 이동형 영상감시시스템 철도연 오송시험선 설치현황〉

주요 연구 성과

특허(등록)

자동 급수 연결장치가 구비된 화점 이동식 소화장치

매출실적

1,111백만 원

수상실적

국토교통발전기여(장관표창)

연구자 한마디

10년 전에 어떻게 하면 터널에서 발생 하는 사고를 관리할 수 있을까 고민 하다 그랬던, 달랑 상상 그림 한 장으로 시작했는데 우여곡절 끝에 어느덧 실제 터널에 시범 설치까지 이르게 되었네요. 감회가 큼니다. 10년 후에는 철도터널 뿐만 아니라 여러곳에서 실용화 되기를 기대합니다.

➤ 성과의 차별성/우수성

고속 이동·극한 내열·승객안내를 한 시스템에 구현

1. 5분 이내 현장 도착을 위한 고속 레일주행

철도터널 내 3km 간격 배치를 기준으로 시속 20km 이상의 주행성능을 확보하였다. 사고신호 수신 후 터널 내 어느 지점에도 5분 이내 도착해 초기상황을 관제실로 전달한다. 전용궤도를 이용해 장애물과 선로상태의 영향을 줄이고 안정적으로 이동한다.

2. 250℃에서 1시간 작동하는 극한 내열성

고온과 연기 속에서도 영상·통신 기능을 유지하도록 하드웨어를 설계하였다. 250℃ 환경에서 1시간 이상 정상 작동하는 세계 최고 수준의 내열성능을 검증했으며, IP67 방수·방진등급을 확보해 터널의 습기와 분진에도 대응한다.

3. 영상·열화상·음향을 이용한 실시간 관제

광학·열화상카메라로 승객 위치와 연기, 열원을 확인하고 음향정보까지 관제실에 전송한다. 현장의 피난 방향과 상태를 시각적으로 파악하여 후속열차 통제, 환기팬 운전 및 구조대 투입을 더욱 정확하게 결정할 수 있다.

4. AI 기반 교통약자 인식과 피난안내

AI 영상분석을 통해 휠체어 이용자, 움직임이 느린 승객 및 이상행동을 자동 감지한다. 화면과 조명, 스피커로 대피 방향을 안내하여 승무원이 접근하기 어려운 구간에서도 피난을 지원한다. 관제·안내·피난지원 기능을 함께 수행한다는 점에서 차별화된다.

5. 평상시 시설환경 모니터링까지 수행

평상시에는 온도, 습도, 미세먼지 등 터널환경을 측정하고 이상징후를 확인한다. 비상용 장비를 유지관리에도 활용해 이용효율을 높이고, 데이터 기반의 스마트 철도시설관리로 확장할 수 있다.

비교항목	해외 기술	본 연구 성과	수준비교
서비스	레일검측, 전차선, 결함탐지	철도터널 재난관제, 승객피난지원, 이상징후 감지	-
주행궤도	철도레일 또는 가선레일 활용	먼지 방지, 이탈방지 꺾형 궤도	동등
로봇 주행성능 (전력공급)	주행속도 5-15km/h 배터리 충전(4시간)	최고속도 20km/h 이상 궤도내 DC24V 동력선, 배터리150W 이중전력	최고
내열성능	사용온도 -20℃ ~ 50℃	250℃, 1시간	최고
방수방진	IP43, IP55	IP67	우위
피난안내	해당없음	음성, 광학(화살표) 안내	우위
영상/ 상태인지	실시간 결함탐지 음향,광학 알림	카메라 : FHD(1920*1080) 열화상 : 일반(160*120) 사람, 휠체어, 자전거 인지	우위
환경측정센서	-	온도, 습도, 먼지, 이산화탄소, 산소	동등

▶ 파급효과

대심도 철도의 골든타임을 지키고 공공 인프라 안전시장으로 확산

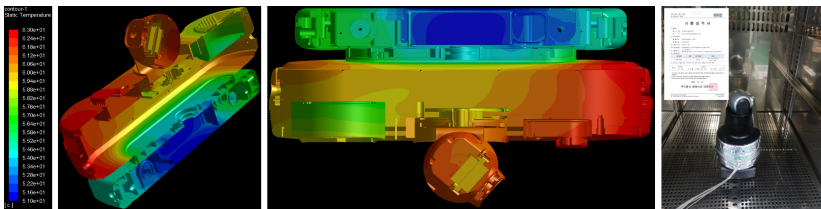
대심도 철도에서 화재가 발생하면 현장정보를 확보하는 시간이 인명피해를 좌우한다. 이동형 영상감시시스템은 5분 이내 사고현장에 도착해 관제실에 영상과 음향을 제공하고 승객의 피난을 안내한다. 이를 통해 후속열차 통제와 환기설비 운전, 구조대 투입을 빠르게 결정해 대형사고로 확산될 가능성을 줄인다. GTX 등 깊은 지하철도에 대한 국민의 안전우려를 완화하는 핵심기술이 될 수 있다.

평상시에는 AI 영상분석과 환경센서로 터널과 역사의 상태를 상시 감시한다. 사람이 정기적으로 순찰하는 방식의 한계를 보완하고 온도·습도·미세먼지 변화와 이상행동을 데이터로 관리한다. 유지관리인력을 위험구간에 투입하는 횟수를 줄이고, 점검이 필요한 위치를 미리 선별해 운영비와 인력부담을 줄일 수 있다.

철도환경에서 확보한 고속주행과 내열·통신·영상기술은 도로터널과 지하공동구, 하천교각, 플랜트 등 접근이 어려운 다른 기반시설에도 적용할 수 있다. 실제로 원천특허를 기반으로 기술이전 2건을 완료했으며, 하천교각의 수위·유량 모니터링 등 철도 외 공공인프라 분야로 활용범위를 확대하고 있다. 레일로봇과 원격관제기술을 활용한 새로운 기술도 기대된다.

사회경제적으로는 대형 철도사고에 따른 인명과 재산피해를 예방한다. 철도화재는 연평균 25.5건 발생하고 있으며, 대심도화될수록 구조와 복구비용이 커질 수 있다. 과거 대구지 하철화재와 같은 사고에서 발생한 약 7,000억 원 규모의 경제적 손실이 반복되지 않도록 초기대응체계를 강화한다. 안전한 철도운영은 서비스 신뢰와 이용률을 높이고 사회적 안전비용을 절감한다.

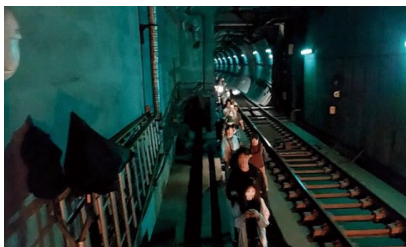
결과적으로 이 기술은 비상시에 골든타임을 확보하고 평상시에는 시설을 점검하는 이중 용도 시스템으로, 철도와 공공인프라의 스마트 안전관리를 동시에 발전시킨다.



〈내열성능시험 결과〉



〈5호선 방화사건〉



〈비상정차 후 터널 내 승객피난모습〉

용어해설

대심도 철도
통상 지하 40미터 이상 깊은 심도의 철도를 지칭

내열성
높은 온도의 환경에서 정상적인 기능을 유지하는 특성

궤도주행
정해진 경로를 달리는 이동방식



대표연구자

심 상 규

아우토크립트㈜
부사장 CTO
02-2125-4000
sgsim@autocrypt.io

연구진



정부지원내용

사업명

자율주행 기술개발 혁신사업

과제명

자동차 통합보안 안전성
평가기술 개발

총 연구기간

2021.04~2027.12

총 연구비

총 10,688백만 원
* 정부출연금 8,705백만 원
민간부담금 1,983백만 원

20

자동차 해킹을 실제 차량에서 찾아내고 국제기준으로 평가하다

CAN 통신 침입탐지와 실차 보안시험으로
삼국특허 4건 추진 및 글로벌 제품화 기반 확보

➤ 연구배경 및 필요성

연결되는 자동차를 지키는 국제 수준의 사이버보안

1. 초연결 모빌리티 시대의 새로운 사이버 위협

자율주행차와 커넥티드 카는 차량 내부 제어장치뿐만 아니라 외부 통신망, 스마트폰, 도로 인프라, 클라우드 서비스 등이 서로 긴밀하게 유기적으로 연결되어 작동한다. 이처럼 외부와의 연결성이 극대화될수록 새로운 사이버 위협이 차량의 조향·제동 제어권 및 운전자 개인정보에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 자동차 사이버 보안은 단순한 데이터 보호 차원을 넘어, 탑승자와 도로 위 보행자의 생명 및 안전과 직결되는 필수 생존 과제이다.

2. 단편적 보안 검증과 객관적 평가 체계의 한계

글로벌 자동차 보안 규제는 차량 제조사가 체계적인 보안 관리체계를 구축하도록 강제하고 있다. 하지만 기존의 국내의 기술은 특정 통신망이나 개별 부품의 취약점을 단편적으로 점검하는 수준에 그쳐왔다. 실제 환경에서 다각적인 공격 경로와 방어 성능을 종합적으로 검증하는 시험 체계는 미흡했으며, 규제 준수 여부를 객관적 지표로 정량화하여 평가하는 기법 역시 초기 단계에 머물러 있었다.

3. 지속적인 위협 대응을 위한 상시·반복 검증의 필요성

새로운 해킹 기법 역시 끊임없이 진화한다. 따라서 일회성 인증만으로는 매일 새롭게 등장하는 보안 위협에 유연하게 대처하기 어렵다. 차량 내부 통신과 외부 인터넷망, V2X(차량·사물 통신), IoT 기기까지 융합된 복잡한 커넥티드 환경에서 비정상 상태를 실시간으로 탐지하고, 잠재적 취약점을 상시·반복적으로 점검할 수 있는 고도화된 시험 기술이 시급하다.

4. 연구진의 개발 목표와 통합 보안 패러다임 수립

이에 연구진은 실제 차량 환경과 동일한 테스트베드에서 모의 해킹 공격과 방어 성능을 실증하고, 차량 소프트웨어의 보안 강도를 객관적인 수치로 평가하는 기술을 개발하였다. 이번 연구는 국제 규제가 요구하는 최소한의 보안 기준을 넘어 소비자가 신뢰할 수 있는 높은 기준을 지향한다. 궁극적으로는 단일 차량의 경계를 넘어 '차량-IT-IoT 생태계 전체'를 보호막으로 감싸는 통합 보안 패러다임을 확립하는 것을 최종 목표로 삼았다.

성과내용

글로벌 수준의 사이버보안을 확보하기 위한 실차 기반 평가기술

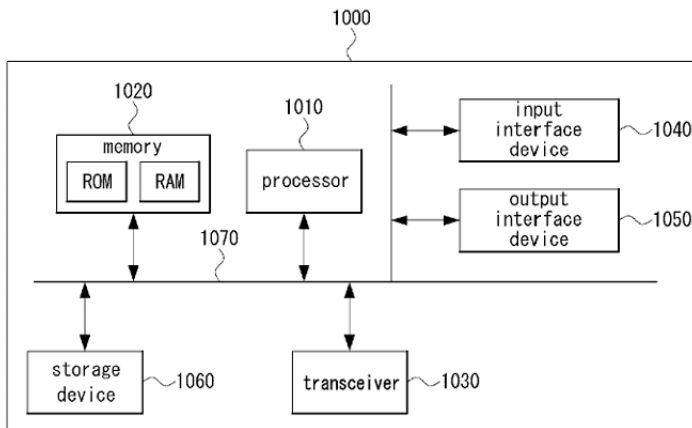
이번 연구의 핵심 성과 중 하나는 차량 내부 통신망(CAN Bus)의 정상 패턴을 학습해 해킹과 이상행동을 탐지하는 기술을 개발하고, 실제 차량 환경에서 검증할 수 있는 사이버 보안 평가체계를 구축한 것이다.

차량의 전자제어장치(ECU)들은 이 통신망을 통해 속도, 조향, 제동, 엔진상태 등 다양한 주행 정보를 메시지로 주고받는다. 연구진은 정상운행 중에 발생하는 메시지의 순서, 주기, 수치 값의 범위를 미리 학습시키고, 평소와 다른 통신 흐름이나 비정상적인 명령이 발생하면 이를 해킹 공격으로 판단해 즉시 탐지한다. 기존의 알려진 공격코드만 찾아내는 방식과 달리, 차량 고유의 정상행동을 기준으로 분석하므로 새로운 형태의 신종 공격에도 효과적으로 대응할 수 있다.

또한, 자동 취약점 탐지기술을 개발하여 차량 소프트웨어와 전장부품이 업데이트될 때마다 보안 취약점이 새로 생겼는지 반복 검사할 수 있게 했다. 실제 차량과 부품, 외부통신망을 연계한 시험환경에서 해킹 공격을 직접 재현하여 침입탐지와 보안정책이 제대로 작동하는지 평가한다. 이로써 이론적 분석을 넘어 상용화 직전 단계에서 적용할 수 있는 실차 수준의 보안 검증 기술을 확보하였다.

보안 범위 역시 차량 한 대의 내부망에 한정하지 않았다. 차량이 스마트폰, 클라우드, 도로인프라, 사물인터넷(IoT) 기기와 연결되는 커넥티드 환경에 맞춰 ‘차량 중심-IT-IoT 전체 생태계 보호’ 개념을 수립하였다. 국제규제가 요구하는 최소 기준과 소비자가 기대하는 안전 수준을 명확히 구분하고, 완성차 제조사와 부품 협력사가 보안목표와 검증 시험항목을 체계적으로 설정할 수 있도록 가이드를 제시하였다.

지식재산 측면에서는 국내 원천특허를 바탕으로 미국, 유럽, 일본 등 주요 시장에서 삼극특허 4건의 출원 및 등록을 추진하였다. 특히 EPO 특허 1건을 최종 등록함으로써 독일, 영국, 프랑스 등 유럽 주요 자동차 시장에서 권리를 확보할 수 있는 기반을 마련했으며, 이러한 국제 특허 포트폴리오를 통해 기술의 해외 사업화와 시장 진출 기반을 넓혔다.



〈CAN BUS에서 공격 탐지 장치 구성도〉

주요 연구 성과

논문

미래 모빌리티 사이버보안 기술 동향

특허(등록)

CAN BUS에서의 공격을 탐지하는 방법 및 장치(EPO)

연구자 한마디

자동차 사이버보안은 유럽을 시작으로 주요 국가에서 법제화되었으며, 국내에서도 자동차관리법 개정으로 적용이 본격화되었다. 그러나 현재 법제는 최소 수준에 머물러 소비자 기대와는 차이가 있다. 이에 국내 완성차 및 부품사는 글로벌 경쟁력 확보와 더불어, 자동차를 넘어 연결 환경 전반의 안전을 위한 사이버보안 확대가 요구된다. 본 연구는 이러한 변화 속에서 글로벌 경쟁력 강화에 핵심 기술로 활용되어 기여하고자 한다

▶ 성과의 차별성/우수성

글로벌 특허 포트폴리오 및 실차 기반 통합 보안 평가 기술을 확보

1. 정상행동 학습 기반의 CAN 공격탐지

기존 침입탐지기술은 알려진 공격패턴을 규칙으로 등록해 새로운 공격에 취약할 수 있다. 이번 기술은 차량 내부 통신의 정상적인 상호관계를 학습하고 차량별 운행특성을 반영해 미세한 이상 징후를 식별한다. 이를 통해 알려지지 않은 신종 공격에도 선제적으로 대응할 수 있다.

2. 실제 차량에서 수행하는 통합 보안평가

실제 차량에 부품과 외부 네트워크를 연결해 실시간 공격·방어 상황을 재현한다. 위협이 차량의 주행 기능과 안전에 미치는 영향을 검증하고 보안 기능의 차단 효과를 정량적으로 평가한다. 이를 통해 완성차 및 부품사의 글로벌 자동차 보안 규제 대응에 필요한 신뢰성 높은 시험 근거를 제공한다.

3. 미국·유럽·일본에서 인정받은 삼극특허

핵심 기술인 ‘CAN Bus에서의 공격을 탐지하는 방법 및 장치’는 유럽특허청(EPO)에 등록되어 독일, 영국, 프랑스 등 주요 시장에서 기술 권리를 확보하였다. 이와 함께 미국과 일본 등에서 총 4건의 삼극특허 포트폴리오를 구축해 기술의 독창성과 상용화 가치를 인정받았다.

4. 규제준수를 넘어 연결 생태계 전체를 보호

보안 범위를 차량 내부망에서 스마트폰, 클라우드 서버, V2X, 사물인터넷 기기까지 확장하였다. 다양한 경로로 위협이 차량 내부에 유입되는 커넥티드 카 환경을 고려해 다각적인 보안 정책과 평가 범위를 설계함으로써 연결 생태계 전반을 보호한다.

5. 국내 완성차와 부품사의 글로벌 대응기반

보안 목표 설정부터 시험 방법과 평가 기준까지 핵심 검증 기술을 국산화해 해외 인증기관과 보안 솔루션에 대한 의존도를 낮췄다. 국내 기업은 개발 초기부터 취약점을 발견하고 수출에 필요한 규제 대응 문서를 체계적으로 준비하여 글로벌 부품 공급망 진입 기반을 마련할 수 있다.

〈사이버보안 원천기술 확보 현황〉

No	지식재산권 명칭	출원	등록	삼극특허
1	CAN BUS에서의 공격을 탐지하는 방법 및 장치	한국/EPO/일본 /미국/중국	한국/EPO /미국	일본 등록 진행중
2	V2X 기반 전자 요금 징수 시스템 및 방법	한국/EPO /일본/미국	한국/일본 /미국	EPO 등록 진행중
3	컨트롤러 영역 네트워크 침입 탐지 시스템 및 그 작동 방법	한국/EPO /일본/미국	한국/일본	EPO/미국 등록 진행중
4	CAN 통신에 적용되는 침입 탐지 룰을 활용하는 침입 탐지 시스템 구축 장치 및 방법	한국/EPO/일본 /미국/중국	한국/EPO /일본/미국	삼극특허 완료

▶ 파급효과

자동차 보안시장을 확대하고 자율주행에 대한 국민 신뢰를 높인다

1. 비즈니스 활성화 및 리스크 비용 절감

차량 해킹 탐지 및 실차 평가 기술 확보는 완성차 제조사, 부품사, 보안 기업의 제품 개발과 보안 인증 수요 확대로 이어질 전망이다. 실제 차량과 부품을 결합한 환경에서 최신 공격과 잠재적 취약점을 지속적으로 검증하여 대규모 리콜과 보안 사고 대응 비용을 낮춘다. 또한 개발 초기부터 문제를 진단·조치하여 소프트웨어 업데이트와 유지 관리 효율성을 높인다.

2. 삼국특허 기반의 글로벌 시장 진출 촉진

미국, 유럽, 일본에서 획득한 삼국특허는 국내 모빌리티 기술의 해외 사업화와 수출을 뒷받침한다. 원천 특허와 실차 평가 기술을 기반으로 'AutoCrypt CSTP Compliance'를 상용화하고, 국제 표준에 부합하는 인증 및 검증 방법을 확립하였다. 이를 통해 해외 시험·인증 업무 수탁과 2026년 CES 참가 등 글로벌 판로 확대의 발판을 마련하였다.

3. 산업 생태계 융합 및 공급망 경쟁력 제고

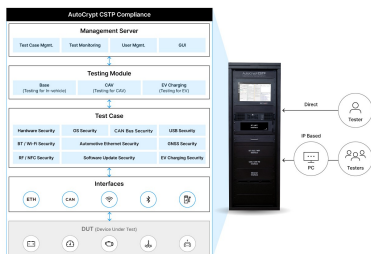
자동차, 정보 보안, 사물인터넷(IoT), 클라우드, 시험 인증 산업 간 기술 융합을 촉진한다. 자율주행과 커넥티드 서비스의 대중화에 따라 침입 탐지(IDS), 보안 관제(vSOC), 취약점 분석, 무선 업데이트 검증 시장도 성장할 전망이다. 글로벌 규제에 부합하는 보안 평가 기술을 확보하여 자동차 부품 공급망 내 수출 경쟁력을 강화할 수 있다.

4. 사회적 안전망 구축 및 사용자 신뢰 회복

차량 해킹으로 인한 조향·제동 오작동, 개인정보 유출, 커넥티드 서비스 마비 등의 사고를 예방한다. 국제 수준의 인증 체계와 실차 검증 인프라는 미래차 안전에 대한 불안감을 해소하고 사회적 수용성을 높인다. 이는 사후 수습에서 실시간 감시와 예방 중심의 선제적 보안 관리 체계로 전환하는 계기가 된다.

5. 온전한 모빌리티 생태계 통합 보호

이번 연구 성과는 단일 차량을 넘어 차량과 정보통신망(IT), 사물인터넷(IoT)이 연결된 전체 모빌리티 생태계를 보호하는 종합 보안망으로 완성된다. 이는 자동차 사이버 보안 시장 선점과 국민 안전, 완전 자율주행 시대의 사회적 신뢰 확보를 위한 핵심 기술 자산이다.



〈CSTP Compliance의 구상도〉



〈CES 부스 참여 홍보〉

용어해설

커넥티드카

차량이 외부 네트워크와 연결되어 다양한 정보와 서비스를 주고받을 수 있는 자동차

UN R155/R156

UN R155와 UN R156은 UN 유럽경제위원회(UNECE)에서 제정한 자동차 사이버보안 및 소프트웨어 업데이트 관련 국제 규정

삼국특허

OECD에서 정의한 미국·유럽·일본 3개 지역에 모두 등록된 특허. 글로벌 핵심 시장에서 권리를 확보한 특허

CSTP Compliance

Autocrypt가 제공하는 CSTP(Cyber Security Testing Platform) 기준에 따라 자동차 및 부품의 사이버보안 수준을 시험·평가하는 자동차 사이버 보안 검증 플랫폼



2026 국토교통 R&D 우수성과

20선 사례집



2026 국토교통 R&D 우수성과 : 20선 사례집

발행처 국토교통부
국토교통과학기술진흥원

발행일 2026년 9월

이 책에 수록된 내용 중 문의사항이 있으시면 아래로 연락 주시기 바랍니다.

국토교통과학기술진흥원

14066 경기도 안양시 동안구 시민대로 286(관양동 1600) 송백빌딩 2~7,9F

TEL 031-389-6413 FAX 031-381-4994

발간등록번호 11-1613000-100534-01

*이 책의 판권은 국토교통과학기술진흥원에 있습니다.

*이 곳에 담긴 모든 내용 및 자료는 허가 없이 어떠한 형태로든 무단으로 복사, 전재하거나 변형하여 사용할 수 없습니다.



9 791192 252292