

발 간 등 록 번 호

11-1721000-000804-01

**「건설현장 증강현실 기반 인간-로봇
현장 협업 기술 개발
[건설현장 다목적 고소작업을 위한
로봇 플랫폼 및 인간-로봇 협업 기술
개발]」
공동기획연구 보고서**

2023. 12. 23

서울대학교 산학협력단

제 출 문

과학기술정보통신부장관 귀하

본 보고서를 「건설현장 증강현실 기반 인간-로봇 현장 협업 기술 개발 (건설현장 다목적 고소작업을 위한 로봇 플랫폼 및 인간-로봇 협업 기술 개발)」에 관한 공동기획연구 보고서로 제출합니다.

2023. 12. 23.

기획연구기관명 :	서울대학교 산학협력단
기획연구책임자 :	안창범
공 동 연 구 원 :	박문서
참 여 연 구 원 :	윤성부
참 여 연 구 원 :	안민기
참 여 연 구 원 :	박진식

요 약 본

1. 다부처공동R&D 추진 필요성

□ 사업 추진 배경 및 필요성

- (사회적 측면) 전체 산업재해 발생현황의 46%를 차지하는 건설 작업의 안전성 확보를 위한 첨단로봇기술 적용 필요성 및 사회적 요구 증대
 - 산업안전보건법, 중대재해처벌법 등 정부의 다양한 정책 개선에도 불구하고, 건설업의 재해자 수는 증가하는 추세임
 - 추락사고에 의한 사고사망자는 건설업의 전체 사고사망 사례 중 절반 이상(53.5%)으로, 전체 재해유형 중 가장 많은 비율을 차지함
 - 숙련인력의 고령화와 생산연령 인구의 감소로 인한 인력부족으로 인해 건설업계의 현장에서는 디지털화 및 자동화를 통한 기능 계승에 대한 필요성이 증대되고 있음
- (정책적 측면) 지속 발생하는 건설현장 안전문제 해결을 위해 ‘제4차 재난 및 안전관리 기술개발 종합계획(2023-2027)’ 로봇, AI 등을 기반으로 진단·설계·시공 등 고도화 및 디지털화를 범부처 주요 정책으로 포함
 - 국정과제를 통해 **로봇기술개발**을 통한 디지털 전환으로 국민안전을 위한 산업재해 예방 강화, 건설산업 혁신, 국가경쟁력 제고 등을 강조(국정과제 24·28·49·75번)
 - 국내 건설 분야 재난안전산업 육성 및 안정화를 위해 범정부 협업 필요
- (기술적 측면) 극한 환경(소음, 진동, 비산먼지, 온도 등) 속 고정밀·고신뢰성이 요구되는 건설 고소작업용 로봇 시스템 개발과 실증을 통해 조선, 항공, 플랜트 등 초고층·비평탄 환경의 타 산업 분야로 확장 가능

□ 다부처공동R&D 추진 타당성

- 산업부의 3차 지능형로봇 기본계획 및 지능형 로봇 실행계획('22.02) 등 4대 로봇강국 도약을 위한 기술개발 및 서비스로봇·표준공정 보급을 지원 중이나, 특수목적 로봇 기술의 대한 타산업분야 현장 적용을 위한 지원은 다부처/부처협력 사업 외에는 추진하기에는 한계
 - 스마트건설 얼라이언스 간담회('23.11)를 통해, 삼성물산, 포스코이앤씨, GS건설 등 국내 건설사의 연구개발 참여 및 수요의향을 확보하는 등 사업추진의 필요성과 당위성을 확보
- ※ 스마트건설 얼라이언스 내 건설 자동화 분과에서는 건설현장 실질적 적용 및 보급 활성화를 위한 최신 기술 공유 및 기술 협력 목표
- 부처별 건설시공/로봇 관련 품질·안전·확산 관련 기준/인증/표준 등이 구분되어 있어 현장 적용 가능한 R&D추진과 사업화 성공을 위해서는 다부처 협업이 필요
 - 복수 부처에 걸친 다양한 법률 및 제도에 대한 종합적 조정 필요
 - 스마트 건설기술에 관한 규제·제도 개선방안 제안, 표준 제정 지원 등은 스마트건설 얼라이언스의 주요 사업 내용임
- ※ 스마트건설 얼라이언스 건설 자동화 분과에서는 건설 로봇 관련 안전 인증제도 개선, 조달청 입찰참가자격사전심사기준 개정 등 확산을 위한 선제적 제도/규제 개선 목표 (2건/년)
- 국토부의 스마트건설 얼라이언스 등 건설사의 실제적 수요와 생태계에 대한 종합적 분석을 기반으로 산업부의 다양한 로봇 원천기술의 응용개발 추진 등, 참여 부처의 명확한 역할 분담과 동시에 “기술 공급-현장 테스트-최종 수요”로 구성되는 프로세스로 건설산업의 경쟁력 강화와 지능형 로봇의 보급 확대 달성 가능

2. 사업 목표 및 내용

- 건설현장의 고소작업 3종* 수행을 위한 다목적 표준 로봇 플랫폼 및 Level2 반자율화 수준 원격작업 구현을 위한 확장현실 기반 인간-로봇 커뮤니케이션 기술 개발 *용접, 내화뿔칠, 도장 작업

사업 목표

건설현장의 고소작업 3종* 수행을 위한 다목적 표준 로봇 플랫폼 및 Level2 반자율화 수준 원격작업 구현을 위한 확장현실 기반 인간-로봇 커뮤니케이션 기술 개발 **용접** **내화뿔칠** **도장**

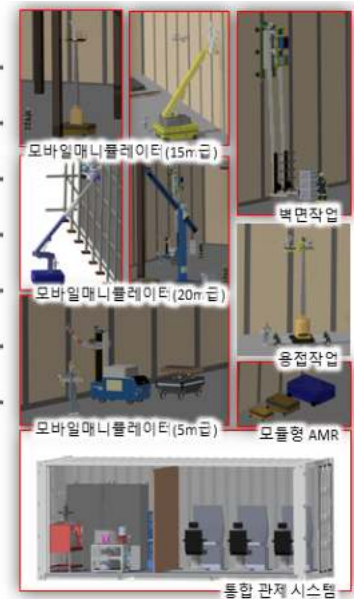
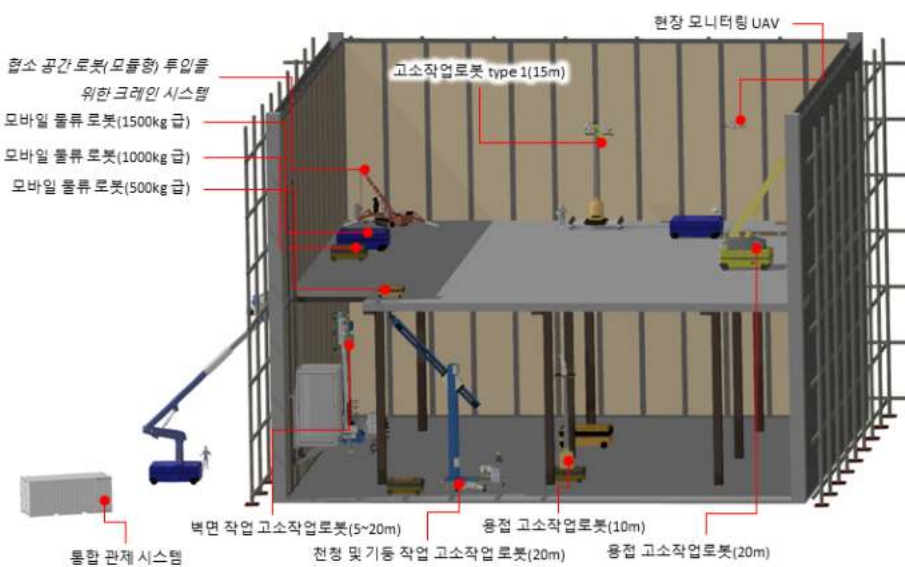
① 고소작업 투입인원 기존 대비 50% 이상 절감

② 로봇 고소작업 속도 현장 작업자 수준 이상으로 향상

As-is



To-be



□ 수요측 요구 조건(기능)

- 기술수요조사 기반 건설로봇 개발 및 수요기업 요구조건 정의
 - (대상 공종) 고소작업 3종(용접, 내화뿔칠, 도장) 대상 로봇 개발
 - (개발 방식) 완전 자동화가 어려운 비정형화된 부위까지 시공 가능하도록 하는 원격제어 기술 개발
- 심층 반구조화 인터뷰를 통한 건설로봇 사용자(작업자) 인식 분석
 - (사용자 인식) 건설현장 작업자 로봇 인식에 관한 연구진의 선행연구에 따르면, 작업자 안전과 직결된 작업의 로봇 도입에 대해서는 대체로 공감

□ 기술 개발 컨셉 및 방향

- (표준화 건설 로봇 플랫폼) 수요작업에 따른 최적화가 가능한 표준화 건설 로봇 플랫폼 개발
 - 기존 건설 로봇 플랫폼과의 차별성: 기존 특정 환경/단일 작업을 위한 로봇 플랫폼 설계가 아닌 여러 가지 건설 작업에 따라 최적화하여 활용할 수 있는 다목적·가변형·모듈형 건설 로봇 플랫폼



주요 개발 방향 1 : 표준화 건설 로봇 플랫폼

○ (건설로봇 원격제어 기술) 건설작업에서의 Level2* 반자율화 수준 원격작업 구현

※ Level 2(부분 자동화): 작업자가 작업위치 설정에만 개입, 로봇이 자율작업 수행

- 완전 자동화가 어려운 **비정형화된 부위**(코너 부위, 빔-거더연결부위, 빔스피트너설치 부위 등)원격제어를 통해 유연성 확보
- XR을 통한 시각/촉각/청각적 피드백을 통해 로봇의 인식 결과, 의사결정, 작업 프로세스 등을 시각화하는 **몰입형 양방향 커뮤니케이션**
- 기존 건설 로봇 작업 기술과의 차별성: 기존 건설 로봇은 프로그래밍된 경로를 재현하는 수준으로, 비정형화된 부위에 대한 대응 능력이 부족하며, 상용 건설기계의 단순 주행/조작보다 높은 수준의 고정밀/반자율화 작업을 위한 건설로봇 제어/작업지능 개발을 목표로 함

반자율화 원격작업: 완전 자동화 및 원격제어 혼합 형태



주요 개발 방향 2 : 건설로봇 원격제어 기술

○ (공종 특성화) 각 공종에 최적화된 시스템 통합 및 실증

- 각 공종별로작업 특성(작업 환경조건, 자동화 요구사항, 작업 정밀도/속도, 후속작업, 품질검사항목 등)이 다양함
- 공종별 요구조건을 파악하고 각 공종에 최적화된 시스템 통합이 필수적임

고소작업 표준화 로봇 플랫폼

	고소용접작업	고소내화뿔칠작업	고소도장작업
목표 가용 높이	최대 20m	최대 20m	최대 20m
적용 부위	강구조물 보-기둥 단순접합 및 강접합, 보 이음 및 기둥 이음	강구조물 보, 기둥	육상 교량(상부 및 하부), 해상 교량(상부), 건물 상부
개발 기능	가스메탈아크용접(GMAW) 및 플럭스코어드아크용접(FCAW) 기능, 용접선 추적 기능, 용접부 사전처리 기능, 레이저 스캐닝 기반 용접검사 기능, 시기반 비파괴검사 기능	뿔칠부 사전처리 기능, 뿔칠 기능, 시기반 뿔칠 작업/비작업부 인식 기능, 시기반 외관 검사(고른 색상, 탈락 등) 기능, 시기반 뿔칠두께검사 기능	에어리스 스프레이 도장 기능, 대상 목적물별 도장재료 분사노즐 개수 및 배치 최적화 기능, 도장재료 최적(속도/분사량/간격 등) 분사 기능, 도장시 미세먼지농도 측정 및 저감 기능, 영상인식 기반 도장 구역 식별 및 경로 생성 기술, 시7만 도장 품질검사 기능
로봇 구성	- 모듈형 건설 로봇 플랫폼 및 XR 인터페이스 - 용접 장치 EOAT : 용접기, 용접 토치 등 - 작업 보조 로봇 : 와이어 피더, 가스 공급 시스템(옵션) - 비접촉 센싱 시스템	- 모듈형 건설 로봇 플랫폼 및 XR 인터페이스 - 뿔칠 장치 EOAT : 분사기 등 - 작업 보조 로봇 : 뿔칠재료 막상 및 공급 시스템 - 비접촉 센싱 시스템	- 모듈형 건설 로봇 플랫폼 및 XR 인터페이스 - 도장 장치 EOAT : 에어리스 스프레이 노즐 - 작업 보조 : 도장재료공급 시스템 - 비접촉 센싱 시스템, 도막두께 측정장치
작업 정밀도	강구조공사 표준시방서(용접)(KCS 14 31 20)의 비파괴시험의 범위	구조부재에 시공하는 내화 뿔칠재의 두께 및 밀도 시험방법(KS F 2901)	도막두께(KS M ISO 2808), 부착력(KS M ISO 4624)
작업 생산성	파이프(15cm/min 이상), 철골(20cm/min 이상)	H형강(700* 900*13*24) 1개소 기준 25분 이하	교량(3㎡/min 이상), 건물(6㎡/min 이상)

개발 로봇의 자동화 수준(공통)	XR기반 목적지 인식 후 자율 주행/추종적 주행	현장 이동	품질검사	로봇 비접촉 센싱 기반 원격 육안검사 및 비파괴검사 지원
	충돌방지를 위한 외부 센싱 수행	고소작업대 고도 변경	본 작업	반자율화 원격제어

주요 개발 방향 3-1 : 공중 특성화 기술

- (테스트베드 구축 및 실증) 개발 로봇의 환경별/공종별 실증을 위한 실환경을 1:1스케일로 모사한 스마트 사이트(테스트베드) 구축
 - 건설사가 임대 가능한 건설로봇 테스트베드를 제공함으로써 개발 단계의 건설로봇 현장 테스트 시 오시공, 품질저하 및 안전사고 등 재산상/사회적 리스크 완화
 - 테스트베드 활용 기술 실증 및 시험인증 체계 구축을 통해 국내 기업의 기술애로 및 인증규제 대응 지원
 - 기존 (제조)로봇 테스트베드와의 차별성: 건축면적 1000m²/작업높이 최대 20m의 대공간, 비정형/비포장 노면 구현, 건설현장에 맞도록 성능평가 장비/시스템 설치 및 운영 방식, 데이터 표준 등 최적화하여 데이터 수집 및 관리시스템 개발

스마트사이트 예상도

목표성능

- 구조 S조+RC조
- 작업높이 최대 20m
- 건축면적 1000㎡ 이상
- 동시 실증 로봇 수 3대 이상
- 데이터 수집 지연 시간 2ms 이내
- 노면 경사 ±7% 이내



지능형무인이동체연구동 (서울대학교 시흥캠퍼스)



극한환경 테스트베드 (호주 퀸즐랜드 공과대학)

주요 개발 방향 3-2 : 테스트베드 구축 및 실증

- (다중 로봇 시스템) 여러 대의 로봇의 동시/통합적 운용을 통해 여러 곳에 분산되어 있는 고소작업을 효율적으로 수행
 - 기존 다중 로봇 관제 시스템과의 차별성: 기존 방식은 설계단계 As-planned BIM기반으로 실제 시공 정보 반영 제한, 제조업 생산 라인, 실외 토공현장보다 상대적으로 비정형화되고 복잡도가 높은 (실내)건축현장 대상

다중 로봇 실시간 통합 관제	다중 로봇 임무할당 및 운용	실시간 대응형 다중 로봇/UAV 자율주행	작업지능 기반 자율작업/원격제어
<ul style="list-style-type: none"> ○ 다중로봇/UAV 통합 지도(BIM) 구축 기술 ○ 클라우드 기반 작업현황 및 로봇상태 업데이트 기술 ○ 위치고정 UAV 활용 로봇 작업 모니터링 기술 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 최적 작업 시퀀스 기반 임무계획/할당 기술 ○ 컨텍스트 기반 실행 가능성 판단/수정 기술 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 다중로봇/UAV 전역 경로 생성기술 ○ 건설 현장 실시간 주행 환경 인식 기술 ○ 지역적 자율주행 경로 수정/추종 기술 	<ul style="list-style-type: none"> ○ (자율작업) 정밀 작업제어 및 작업지능 기술 ○ (원격제어) XR기반 원격제어 기술
<p>다중로봇/UAV 통합 매핑</p> <p>클라우드 기반 모니터링</p> <p>다계층 전역 지도</p> <p>위치고정형 UAV</p>	<p>최적 작업 시퀀스</p> <p>실행 가능성 판단/수정</p> <p>다중 로봇 임무 할당</p>	<p>다중로봇/UAV 전역경로 생성</p> <p>작업자 행동 예측 및 건설 환경 인식</p> <p>지역적 자율주행 경로 수정</p> <p>충돌 회피를 위한 경로 수정예시</p>	<p>원격제어</p> <p>자율작업</p>

주요 개발 방향 4 : 다중 로봇 시스템

□ 사업 성과목표 및 평가방법

[중점과제]	핵심과제	최종 성과물	현재 최고 기술수준	개발 목표치	평가방법
고소작업 특성화 기술 및 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술 개발	고소 용접 작업 특성화 기술 개발 및 실증	용접 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업생산성	15cm/min(KISWEL)	파이프: 15cm/min 이상 철골: 20cm/min 이상	시작품 현장 실증 (작업시간 측정)
		용접 작업 고정밀 HITL 품질검사 시스템	-	NDT(영상, 초음파, 방사선) 정확도 (98% 이상)	시작품 현장 실증 (정답 비율)
	고소 내화봉칠 작업 특성화 기술 개발 및 실증	내화봉칠 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업속도	H형강(700*900*13*24) 1개소 기준 25분	H형강(700*900*13*24) 1개소 기준 25분 이하	시작품 현장 실증 (작업시간 측정)
	고소 도장 작업 특성화 기술 개발 및 실증	도장 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업속도	-	교량: 3m ² /min 이상 건물: 6m ² /min 이상	시작품 현장 실증 (작업시간 측정)
		공정별 실환경/XR환경 작업시연 수	150건 (미국, 워싱턴대)	실환경: 100건 이상 XR: 150건 이상	사용자 테스트
	고소작업 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술 개발	현실-XR가상공간 정합 오차	10mm 이하	5mm 이하	자체평가
		단위작업 거리오차	4.82mm 이하 (캐나다, University of Saskatchewan)	5mm 이하	사용자 테스트
NASA-TLX 작업 인지부하 감소율		43.1% (미국, WPI)	20% 이상	사용자 테스트	
실환경 기반 테스트베드 구축	실환경 모사 스마트사이트	-	3층 이상, 1000m ² 이상, 철골구조 + 철근콘크리트구조, 동시 실증 가능 로봇 수 3대 이상, 노면 경사 ±7% 이내	테스트베드	
제도/공법/교육 개선 및 실용화	고소작업 로봇 플랫폼 교육과정 프로그램	-	1건 이상	교육과정 프로그램	
	산업체 대상 기술강연회	-	3건 이상	기술강연회	
	MOU 체결	-	6건 이상	MOU 체결	



[중점과제]	핵심과제	최종 성과물	현재 최고 기술수준	개발 목표치	평가방법
작업환경 센싱모듈 및 통합관제시스템 개발	실시간 다중 로봇/UAV 통합 지도 작성 기술 개발	다중 로봇/UAV 통합 지도 작성의 정확도	10mm (Hitech)	5mm	시원결과서 테스트베드 검증
	다중 로봇 통합 관제시스템 개발	다중 로봇 통합 관제시스템	-	SW등록, 시제품 출시	등록증
고소 건설공정 작업-주행 기능 개발 및 다중로봇 제어 기술 개발	원격 고소 정밀 작업 제어 및 작업 기능 기술 개발	복합 자율작업 효율성	-	95% 이상	복합 작업 제어를 이용한 작업시간과 현장 작업자의 작업시간을 비교
		원격작업자 작업 자율화 성공률	-	95% 이상	원격작업 자율 수행 성공률
		고소 매니플레이터 반복 정밀도	-	1mm 이하	20m 높이에서 매니플레이터 반복 정밀도 측정
	모듈형 건설 로봇 플랫폼 개발/건설 현장 실시간 대응형 다중 로봇/ UAV 자율 주행 기술 개발	자율주행 플랫폼 가반하중/ 모듈형 매니플레이터 가반하중	1,500kg (KUKA, 독일)	1,500kg 이상/15kg 이상	최대 0.7m/s의 속도로 이송 가능한 중량물/ 최대 작업 범위(1500mm) 기준 가반하중 측정
		자율주행 플랫폼 경사 극복 능력/리프트 모듈 최대 작업 높이	-	±7% 이상/ ±20°/m 이상	최대 가반 하중 상태에서 경사 극복 여부 확인/ 작업 수행 성공
		로봇 플랫폼 주행 정밀도/ UAV 실내 주행 정밀도	26mm (MIR, 덴마크)	±20mm 이하/ ±50mm 이하	KOROS 1079-2



3. 사업 추진방법

□ (추진체계) 본 사업 참여부처는 국토교통부를 주관으로, 산업통상자원부 협조



□ (통합관리형 관리체계) 총괄형 또는 사업단 형태를 통해 다부처 과제들 및 도출된 결과물을 통합적으로 관리



□ (부처 협력체계) 주관부처, 협조부처 관련 인사들이 참여하는 부처협의체 구성

□ (연계방안) 부처간 협력이 필요한 대표 연구분야를 지정하여 중점 지원할 수 있도록 부처간 연계방안(안) 마련

- 연구 주체별 협력체계 강화를 위해 연구위원회 구성 및 분기별 협의를 통한 협력 추진 및 성과 검토

대분류	중분류	소분류	세부내용	
자율주행	SLAM (국토부)	지도 생성	<ul style="list-style-type: none"> 로봇/UAV 등을 활용한 실내 데이터 수집 및 전처리 기술 다계층 지도와 통합 관제시스템을 위한 고해상도 BIM 맵 반자동화 구축 기술 BIM의 의미론적 매칭을 통한 AI-사용자 통합형 다계층 지도 작성 기술 	
		지도 업데이트	<ul style="list-style-type: none"> 로봇/UAV 데이터의 클라우드 기반 BIM 매칭 및 통합 지도 업데이트 기술 	
	Navigation (산업부)	임무모듈	<ul style="list-style-type: none"> 건설현장 주행 임무 시나리오 구축 기술 	
		경로생성(전역/지역)	<ul style="list-style-type: none"> 다중 로봇/UAV 전역 경로 생성/스케줄링 기술 	
	자율작업	임무 및 SW프레임워크 (국토부)	장애물 인지	<ul style="list-style-type: none"> 실시간 주행 환경 인식기술
			경로 수정/추종	<ul style="list-style-type: none"> 지역적 자율주행 지도 작성 및 지역 경로 수정/추종 기술
작업학습 (국토부)		SW 프레임워크	<ul style="list-style-type: none"> 작업자-로봇 협업 SW 프레임워크 설계 	
		임무모듈	<ul style="list-style-type: none"> 최적 작업 시퀀싱을 통한 작업자-로봇 임무할당 기술 컨텍스트(환경정보, 할당임무 등)기반 실행 가능성 판단 및 수정 기술 	
작업지능 (산업부)		학습 데이터셋	<ul style="list-style-type: none"> 고소작업 공정별 작업자 실환경/XR(가상) 시연을 통한 대용량 데이터셋 구축 	
		작업제어	<ul style="list-style-type: none"> XR기반 환경, 작업공정 모델링-시각화 및 시뮬레이션 기술 XR기반 물입형 고정밀 원격 제어 SW모듈 및 조작 인터페이스 단위작업 스킬셋 및 계층형 복합 작업 지능 기술 개발 안정적 저지연 통신 시스템 및 실시간 원격 제어 인터페이스 위치 유지 제어 및 진동 제어를 통한 정밀 작업 제어 기술 실시간 원격 정밀 수동 제어기술 	
관제시스템	관제시스템 (국토부)	다중 로봇 모니터링	<ul style="list-style-type: none"> 객체 인스턴스 분할 등 실시간 데이터 마이닝 기술 전역/지역 고정밀 작업 모니터링 시스템 	
		관제시스템	<ul style="list-style-type: none"> 고품질/저지연 다중로봇 통합 관제시스템 	
통합 로봇 플랫폼	로봇 플랫폼 및 EOAT (산업부)	주행 플랫폼	<ul style="list-style-type: none"> 다목적 자율 주행 로봇 플랫폼 	
		리프트 모듈	<ul style="list-style-type: none"> 고소 작업을 위한 모바일 플랫폼 탑재형 리프트 모듈 	
	품질관리 시스템 및 시스템 통합 (국토부)	매니플레이터/EOAT	<ul style="list-style-type: none"> 범용 작업 매니플레이터 및 공종 특화 EOAT 기술 	
		품질관리 시스템	<ul style="list-style-type: none"> 고소작업 공정별 고정밀 HITL 품질검사 시스템 	
실증 및 제도개선	테스트베드 및 실증 (국토부)	특성화 로봇 플랫폼	<ul style="list-style-type: none"> 고소작업 공정별 특성화 통합 로봇 플랫폼 	
		테스트베드	<ul style="list-style-type: none"> 실환경 모사 스마트 사이트 설계 및 구축 	
	제도/공법/교육 및 실용화 (국토부)	실증	<ul style="list-style-type: none"> 원격제어-로봇플랫폼 사용자 경험 평가 실증 및 통합 성능 평가 	
		제도/공법/교육	<ul style="list-style-type: none"> 공법/제도 개선 및 기술표준/인증 개발 교육과정 개발 및 인력 양성 	
		실용화	<ul style="list-style-type: none"> 실용화 전략 	

4. 성과 활용방안 및 기대효과

☐ 실용화 및 사업화 방안

- **(성과활용 계획)** 스마트건설 얼라이언스 등 민간 수요기업과 연계하여 고소작업용 건설로봇 연구 성과 사업화 생태계 구축, 수요맞춤형 기술 이전, 시범사업 및 실증을 통한 현장보급 활성화 추진
- **(표준화)** XR기반 고소 작업용 모듈형 건설 로봇 기술 연구 성과 및 현장 도입 데이터를 기반으로 건설 로봇의 공통된 기준을 정의하고, 수요처별 요구사항을 고려한 상호 운용성을 보장하여 건설 산업 전반에서의 협력을 촉진
- **(기타)** 주요 성과물과 기술수요처별 요구사항(현장환경, 운용장비, 표준시방서, 등)에 부합하는 BM 개발하고 산업부·국토부·중기부 보급사업/R&BD 연계 후속 사업화 추진

☐ 기대효과

과학/기술적 측면	☑ 고소작업로봇의 고신뢰성·정밀 자율작업/주행 기술개발을 통해 다양한 건설현장 실증-민간 파일럿 프로그램 연계로 실용화 수준의 건설 공정 자동화 토달 솔루션 기술 확보
경제적 측면	☑ 효율적인 건설 프로세스로 인한 생산성 증가에 따른 국가 경제 성장 촉진 기대
사회적 측면	☑ 건설 작업의 안전성을 향상시켜 사고 감소 및 노동자의 안전 보장을 통해 사회적인 안전망 구축 기대

➤ 건설사

- ☑ 건설 로봇 플랫폼 및 작업 툴 공동개발을 통해 공공공사(민간참여사업) 입찰에서 경쟁우위 확보
 - 2024년 LH 발주 사업에 대해 현장 로봇 적용 기술력 계량평가 배점 (로보틱스 기술 적용 사업비)을 신설(의무적용)
- ☑ 공정별 특성화 가능한 표준화 로봇 플랫폼 개발을 통해 건설 로봇 개발 비용/시간 절감
 - LH는 배점 신설과 함께 사업지 별로 공종별 특화 로봇 지정 예정



➤ 로봇 개발사

- ☑ 개발 로봇(연구 성과물)의 실시권 확보를 통해 상용화 및 시장 진입

목 차(안)

제1장 다부처공동R&D 추진 필요성	1
제1절 사업 추진배경 및 필요성	1
제2절 국내외 관련 정책·기술·산업·사업 동향	13
제3절 다부처공동R&D 추진 타당성	62
제2장 사업목표 및 내용	70
제1절 사업목표	70
제2절 성과목표 및 지표(공통/개별)	96
제3절 사업내용	101
제3장 사업 추진방법	145
제1절 사업 추진전략	145
제2절 사업 추진체계	149
제3절 사업 기간 및 소요예산	160
제4장 성과 활용방안 및 기대효과	162
제1절 사업 성과 활용방안	162
제2절 기대효과	165

그림 목 차

[그림 1-1] 건설현장 고소작업 관련 주요 통계	1
[그림 1-2] 건설업 사망사고 발생 추이	2
[그림 1-3] 건설 고소작업 안전사고 보도자료	3
[그림 1-4] 고소작업 주요 사고사례	4
[그림 1-5] 건설산업 노동생산성 추이	4
[그림 1-6] 업종 및 규모별 지능형 건설장비 및 로봇기술 활용수준 및 활성화 전망	9
[그림 1-7] 국내 조선소 로봇 개발현황	11
[그림 1-8] 단일 작업자-다중 로봇 시스템의 생산성 개선 효과	12
[그림 1-9] 스마트건설 얼라이언스 구성도	19
[그림 1-10] 건설로봇 관련 ISO 국제표준 현황	20
[그림 1-11] 미국 사코스 테크놀로지 로봇	23
[그림 1-12] 일본 맨-머신 시너지 이펙터스 로봇	24
[그림 1-13] 드릴링 작업 로봇	25
[그림 1-14] 독일의 건축 현장용 비계 조립 로봇	24
[그림 1-15] 국내 건설 로봇 기술개발 단계	30
[그림 1-16] 삼성물산 내화뿔칠 작업 로봇	30
[그림 1-17] 현대건설 로봇	31
[그림 1-18] 현대엔지니어링 AI미장로봇	31
[그림 1-19] 미국 독셀의 건설현장 내부 검사로봇	33
[그림 1-20] GS건설 Spot 현장 실증	33
[그림 1-21] 미시간대학교 HRC 시스템 프레임 워크 및 시스템 워크 플로우	34
[그림 1-22] Tap Strap 및 시스템 개요	34
[그림 1-23] SAI 시뮬레이션 및 제어 환경 아키텍처	35
[그림 1-24] AR 기반 인터페이스를 활용한 목재 조립 로봇 동작 제어	35
[그림 1-25] 기존 인간 중심 작업의 디지털화, 최적화 생산 프로세스 시뮬레이션	36

[그림 1-26] 타워크레인 자율화를 위한 가상환경 플랫폼 개발에 관한 연구	37
[그림 1-27] 건설로봇 시장 지도	40
[그림 1-28] 건설로봇시장 전망	41
[그림 1-29] 국내 건설기업의 스마트 건설기술 활용 수준	42
[그림 1-30] 국내 건설 노동생산성 및 숙련인력 수급 전망 등	43
[그림 1-31] 글로벌 XR 시장 규모 전망	43
[그림 1-32] 글로벌 AR/VR 산업별 점유율 및 산업별 사용자 당 매출	44
[그림 1-33] 국내 XR 콘텐츠 시장규모 및 정부 XR+a 관련 투자 규모	45
[그림 1-34] 스마트건설 얼라이언스 구성도	46
[그림 1-35] 한국건설기술연구원 SOC 실증연구센터(천)	47
[그림 1-36] 스마트 건설기계 시험연구센터(새만금)	47
[그림 1-37] 인력(취업현황): 직무별/학력별(연구개발직)	48
[그림 1-38] 스마트건설 활성화 방안	50
[그림 1-39] 본 사업과 연관된 중점과학기술별 국토부/산업부 연구비 현황	66
[그림 1-40] 다부처 추진 시너지효과	67
[그림 1-40] 건설 로봇 관련 국토부/산업부 연구비 현황(2013~2023)	68
[그림 1-41] 건설 로봇 관련 연구개발 키워드 동시출현 다이어그램	69
[그림 2-1] 사업목표 및 비전	70
[그림 2-2] 로봇 도입 대상 건축 고소작업 우선순위	71
[그림 2-3] 건설고소작업 로봇 개발방식 우선순위	71
[그림 2-4] 주요 개발 방향 1: 표준화 건설 로봇 플랫폼	74
[그림 2-5] 주요 개발 방향 2: 건설로봇 원격제어 기술	74
[그림 2-6] 주요 개발 방향 3: 공중 특성화 및 실증-1	75
[그림 2-7] 주요 개발 방향 3: 공중 특성화 및 실증-2	75
[그림 2-8] 주요 개발 방향 4: 다중 로봇 시스템	76
[그림 2-9] 최종 성과물 기능 기반 연구내용 구분 및 핵심기능(대분류) 내 기술 연계	81
[그림 2-10] 기술개발 활용 개념도	82
[그림 2-11] 고소작업차, 굴절형 고소작업대, 시저형 고소작업대	83

[그림 2-12] 중점과제 1 연구개요	101
[그림 2-13] XR기반 반자율화 원격제어 기술 개념도	107
[그림 2-14] 실환경 기반 작업 시연을 통한 학습용 대용량 데이터셋 구축 예시 1	107
[그림 2-15] 실환경 기반 작업 시연을 통한 학습용 대용량 데이터셋 구축 예시 2	107
[그림 2-16] 핵심기술 1-1 성과물 기반 TRM	119
[그림 2-17] 핵심기술 1-2, 1-3 성과물 기반 TRM	119
[그림 2-18] 중점과제 2 연구개요	120
[그림 2-19] 중점과제 2 연구 개념도	121
[그림 2-20] 핵심기술 2-1 성과물 기반 TRM	130
[그림 2-21] 핵심기술 2-2 성과물 기반 TRM	130
[그림 2-22] 중점과제 3 연구개요	132
[그림 2-23] 다중, 다중 모듈/지능형 건설 로봇 운영 시나리오	134
[그림 2-24] 핵심기술 3-1 성과물 기반 TRM	143
[그림 2-25] 핵심기술 3-2 성과물 기반 TRM	143
[그림 2-26] 핵심기술 3-3 성과물 기반 TRM	144
[그림 3-1] 부처별 중점과제 및 연계방안	145
[그림 3-2] 부처별 역할분담 및 세부과제 분류	149
[그림 3-3] 부처 협업사업 관리체계(통합관리형)	150
[그림 3-4] 사용성 평가 및 실증 그룹(안)	151
[그림 3-5] 국토부(중점과제 1) 단계별 핵심 성과물 및 다부처공동연구	153
[그림 3-6] 국토부(중점과제 2) 단계별 핵심 성과물 및 다부처공동연구	154
[그림 3-7] 산업부(중점과제 3) 단계별 핵심 성과물 및 다부처공동연구	155
[그림 3-8] 스마트건설얼라이언스 기술분과 및 실용화 방안	162
[그림 3-9] 기대효과	165

표 목 차

[표 1-1] 타 산업현장(조선소 및 생산라인) vs. 건설현장 환경적/작업적 특징 비교	10
[표 1-2] 유럽 Horizon Europe 기본프레임	15
[표 1-3] 스마트 건설 기술 로드맵 (요약)	17
[표 1-4] 로봇 및 건설산업 관련 윤석열 정부 국정과제 주요 내용	18
[표 1-5] 건설 기계 및 로봇 분야 유관 국제 표준화 동향	20
[표 1-6] 건설 기계 및 로봇 분야 유관 국내 표준화 동향	21
[표 1-7] 건설작업로봇 주요제품	25
[표 1-8] 미국 인간-로봇 커뮤니케이션 관련 기술 개발 과제 현황	34
[표 1-9] 국내 인간-로봇 커뮤니케이션 관련 기술 개발 과제 현황	36
[표 1-10] 다중 로봇 시스템 개발 현황	38
[표 1-11] 확장현실 시장 주요 기업 현황	44
[표 1-12] 국내 로봇 연구기관 현황	48
[표 1-13] 산업부 기존사업과의 차별성	54
[표 1-14] 국토부 기존사업과의 차별성	58
[표 1-15] 과기부 기존사업과의 차별성	59
[표 2-1] 로봇 자율화 수준 정의 (Level 0~5)	73
[표 2-2] 목표 기능 및 기술 개발 방향	76
[표 2-3] 고소작업 3종 현행 공정 프로세스	84
[표 2-4] 용접작업 작업자-로봇 협업 공정 정의	86
[표 2-5] 비파괴시험의 범위	87
[표 2-6] 내화뿔칠작업 작업자-로봇 협업 공정 정의	90
[표 2-7] 도장작업 작업자-로봇 협업 공정 정의	93
[표 2-8] 사업 성과 목표 및 평가방법	96
[표 2-9] 개발 로봇 상세사양	99
[표 2-10] 사업 성과 지표 및 가중치	100
[표 3-1] 기획위원회 명단	147
[표 3-2] 참여의향서 제출 기업	147

[표 3-3] 사업비 투입 계획	160
[표 3-4] 기술수요처별 실용화 및 사업화 전략	163

제1장 다부처공동R&D 추진 필요성

제1절 사업 추진배경 및 필요성

1. 사업 추진배경

가. 사회적 배경

개요

○ 전체 산업재해 발생현황의 46%를 차지하는 건설 작업의 안전성 확보를 위한 첨단로봇기술 적용 필요성 및 사회적 요구 증대

- 산업안전보건법, 중대재해처벌법 등 정부의 다양한 정책 개선에도 불구하고, 건설업의 사고사망자수는 감소되고 있으나 재해자 수는 증가하는 추세임
- 추락사고에 의한 사고사망자는 건설업의 전체 사고사망 사례 중 절반 이상(53.5%)으로, 전체 재해유형 중 가장 많은 비율을 차지함
- 숙련인력의 고령화와 생산연령 인구의 감소로 인한 인력부족으로 인해 건설업계의 현장에서는 디지털화 및 자동화를 통한 기능 계승에 대한 필요성이 증대되고 있음

※ 근로자공제회에 따르면, 건설현장 근로자 중 50대 이상이 약 61%에 이르며 점차 증가하고 있는 추세('23.4)

건설현장 고소작업의 위험성

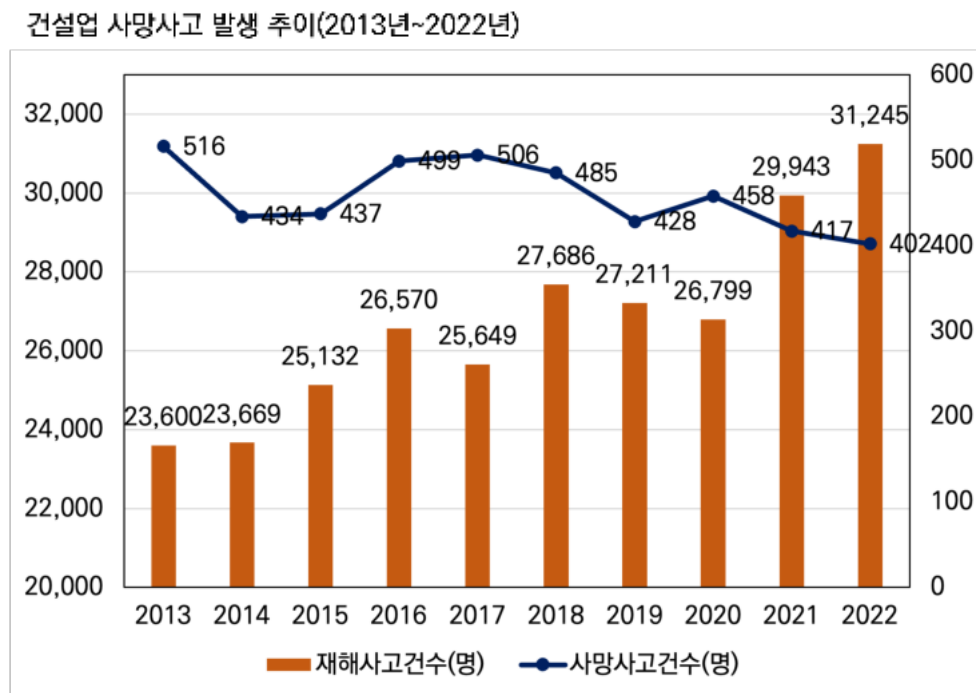


출처 (고용노동부 '산업재해현황(2023)')

[그림 1-1] 건설현장 고소작업 관련 주요 통계

○ 고용노동부 ‘산업재해현황(2023)’에 따르면 2022년 기준 전체 사고사재 해 발생현황 중 사고사망자는 건설업(402명, 전체의 46.0%)에서 가장 많이 발생하였음

- 국내 산업재해로 인한 사망자는 사고로 인한 사망자와 질병으로 인한 사망자로 구분할 수 있으며, 건설업은 사고사망자 비율(74.6%)이 매우 높은 특징을 가짐
- 산업안전보건법과 중대재해처벌법 등 정부의 건설업 사고에 대한 다양한 정책의 개선에도 불구하고, 고용노동부 ‘산업재해 현황분석(2023)’에 따르면 건설업의 재해자 수는 2013년부터 지속적으로 증가하는 추세임



[그림 1-2] 건설업 사망사고 발생 추이(2013~2022년)(고용노동부, 2023)

○ 한국건설산업연구원 ‘건설동향브리핑(2023)’에 따르면, 2022년 사고사망만인율은 건설업이 1.61‰로 전년 대비 0.14%p 감소하였으나, 전체 산업 평균(0.43‰)보다 약 3.7배 높은 수준임

- 50인 이상 사업의 사고사망자와 사고사망만인율이 각각 167명과 0.21‰로 전년 대비 9명과 0.01%p 증가하였음

○ 특히, 건설작업 중 고소 작업*은 작업 특성상 추락의 위험이 높은 작업으로, 사고발생 시 중대재해로 이어지는 경우가 빈번하게 발생함

※ 한국산업안전보건공단 ‘안전작업허가지침’에 따르면 고소작업(허가대상)을 다음과 같이 정의: ① 2m 이상의 높이에서 정비, 점검 작업; ② 2m 이상 시설물 또는 설비의 도장, 보온 작업; ③ 높이가 2m 미만이지만 고열물, 강산 등 위험물의 상부에서 행하는 작업

- 고용노동부 ‘산업재해현황(2023)’에 따르면 추락사고에 의한 사고사망자는 2022년 기준 215명(전체의 53.5%)으로, 건설업의 전체 사고사망 사례 중 절반 이상이 추락에 의한 사고임을 확인할 수 있으며, 추락사고는 전체 재해유형 중 가장 많은 비율을 차지함

○ 건설현장의 고소작업 중 대부분의 경우 작업 수행을 위해 작업자가 고소작업대에 올라가 작업을 수행해야 하나, 고소작업대 역시 사고사망 주요 원인 중 하나임

- 2012~2020년 사이 고소작업대로 인한 사고사망자는 172명으로, 건설업(135명, 전체의 78.5%)에서 발생 빈도가 가장 높았음

- 위험요인으로는 안전난간 미설치로 떨어짐, 작업대 상승 중 운행하여 구조물에 끼임, 구조부(봄, 선회부) 파단에 따른 재해 등이 있음

※ 한국산업안전보건공단은 줄어들지 않는 고소작업대 사고(최근 2년간 54명 사고사망자 발생)에 대응하고자 ‘고소작업대 안전관리 매뉴얼(2022)’을 제작 및 배포하고 있음



[그림 1-3] 건설 고소작업 안전사고 보도자료



물류센터 차량탑재형 고소작업대 전도로 인한 근로자 추락 사망사고 ('22.12)



굴절식 고소작업대 앞으로 넘어짐 ('22.07)



터널 피난연락갱에서 전선 거치대 고정앵커 작업 중 고소작업차에서 중심을 잃고 추락 ('21.03)

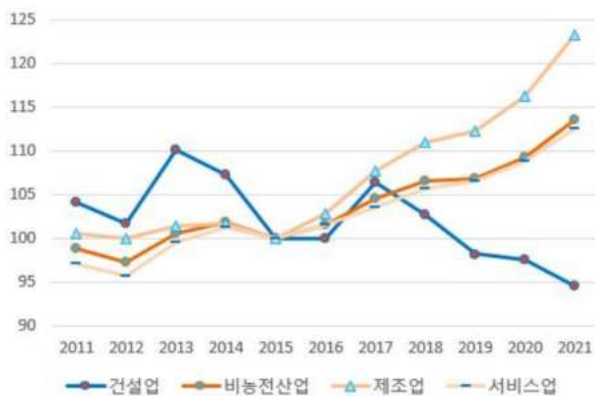


지하4층 하부 띠장 작업 구간에서 7단 띠장에 협착되어 오른손 검지 손가락 절단 ('23.07)

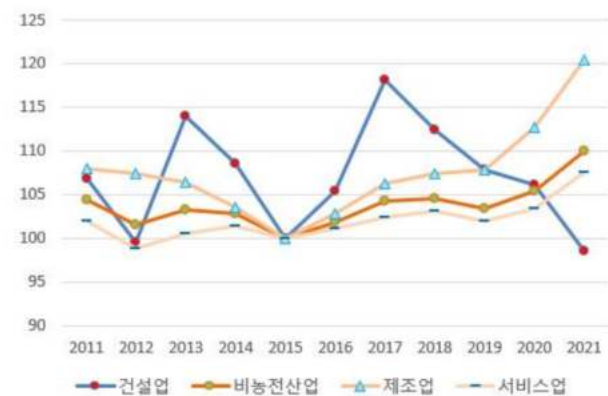
[그림 1-4] 고소작업 주요 사고사례(국토부 건설공사 안전관리 종합정보망)

□ 건설산업의 낮은 노동생산성 개선을 위한 디지털화·자동화의 필요성

(a) 부가가치 기준 노동생산성 지수



(b) 산업생산 기준 노동생산성 지수



[그림 1-5] 건설산업 노동생산성 추이(2011~2021년)(한국건설산업연구원, 2022)

○ 한국건설산업연구원 ‘한국 건설산업 생산성 분석(2022)’에 따르면 최근 10년(2011년~2021년)간 건설산업의 노동생산성은 전반적으로 하락해왔으

며, 다른 산업과의 노동생산성 격차가 커지고 있음

- 건설산업의 부가가치 기준 노동생산성 지수는 2011년에서 2021년 사이 104.1에서 94.5로 감소하였고, 산업생산 기준 노동생산성 지수는 106.9에서 98.6으로 감소한 반면, 동기간 우리나라 전산업의 노동생산성은 두 기준 모두 증가함
- 특히, 코로나19의 영향으로 2020~2021년 사이 우리나라 전산업에서 노동생산성이 향상된 반면, 산업생산 노동생산성 지수는 전년 대비 7.2%로 큰 폭 감소했음
 - 산업생산 노동생산성은 노동자의 숙련도, 기술 수준, 설비 고도화 등에 영향을 받으며, 한국건설산업연구원에 따르면 해당 기간 건설산업의 생산과정의 비효율성이 커진 것으로 해석됨
- 건설산업의 생산성 향상은 건설경기 상승, 투입 노동 감소, 부가가치 증대, 생산 효율성 개선의 4가지 방향에서 가능하며, 특히 건설산업의 자동화·디지털화를 통해 해결할 수 있음(한국건설산업연구원 2022)
 - McKinsey의 보고서(2017)에 따르면 일반적으로 산업의 디지털화와 생산성 증가율은 양의 비례관계를 가지며, 건설산업은 전체 산업 중에서 디지털화 지수와 생산성 증가율 모두 최하위에 위치함
- ※ 국내 디지털 건설기술은 선진국 대비 70%, 기술격차는 약 4년 뒤쳐진 것으로 평가되고 있음
 - McKinsey의 보고서(2022)에 따르면 산업 자동화의 효과로 전체 산업 평균 2030년까지 자동화로 인한 인력 감소 대비 110% 이상 기술 혁신에 의한 일자리 창출, 20% 이상 완전히 새로운 일자리 창출이 예상되며, 건설 산업의 자동화 잠재력은 전체 투입 시간 대비 49%로, 30%인 제조업보다 높은 수치로 예측됨
 - 국제 로봇 연맹(IFR)의 보고서(2020)에 따르면 지난 10년간 전체 산업 평균적으로 로봇 밀집도의 1% 증가는 노동 생산성의 0.8%의 증가를 가져옴

□ 건설 로봇·자동화 기술

- 건설 로봇은 공공 인프라, 상업용 및 주거용 건물 등에서 인력 투입을 최소화하거나 완벽히 대체하기 위해 활용되는 모든 완전 자동화 혹은 반자동화 기계 및 장비를 포함함
 - 로봇 공학은 오랜 기간 동안 주로 제조업 분야에서 널리 사용되었지만, 건설 자동화에 대한 수요가 늘어나면서 건설 산업에서의 활용이 점차 확대됨
 - 노동력 고령화로 인해 숙련공들의 수가 감소하고 있는 상황에서, 건설 로봇은 노동력 부족 문제를 완화하고 해결할 수 있는 대안으로 부각됨
 - 건설 로봇은 철거 및 고소작업과 같은 위험한 환경에서 작업하는 작업자를 대체하여 안전성을 향상시키며, 높은 시공 정확도로 공사비를 절감할 수 있을 것으로 기대됨
- ※ 미국의 건설노동자 평균 연령은 38.6세(2000년)에서 42.5세(2015년)로 증가하였으며, 국내 건설노동자 평균 연령은 50.2세(2015년)에서 53.9세(2019년)로 증가함

나. 정책적 배경

□ 개요

- 지속 발생하는 건설현장 안전문제 해결을 위해 ‘제4차 재난 및 안전관리 기술개발 종합계획(2023-2027)’ 로봇, AI 등을 기반으로 진단·설계·시공 등 고도화 및 디지털화를 범부처 주요 정책으로 포함
 - 국정과제를 통해 로봇기술개발을 통한 디지털 전환으로 국민안전을 위한 산업재해 예방 강화, 건설산업 혁신, 국가경쟁력 제고 등을 강조(국정과제 24·28·49·75번)
 - 국내 건설 분야 재난안전산업 육성 및 안정화를 위해 범정부 협업 필요

□ 정부 차원의 건설 자동화 추진

○ 정부는 스마트 건설기술 확산으로 산업의 고부가 가치화 추진*계획을 통해 건설 디지털화·자동화에 적극적인 관심을 보임

※ 제20대 윤석열 정부 국정과제 28번

- 국토교통부 ‘스마트 건설 활성화 방안(2022)’에 따르면 생산시스템 선진화를 목표, 건설기계 자동화 및 로봇 도입을 위해 굴착기 등 건설기계를 자동화하고, 고위험/고반복 작업에 로봇을 도입하기 위해 건설기준 정비 로드맵 수립 및 제·개정함
- 또한, 원격조종, 완전 자동화 등 무인운전에 대한 특례인정 근거를 마련하고, DMZ 내에서 공사가 시행되는 문산-도라산 고속도로 사업 수행 시 지뢰를 안전하게 제거하기 위해 건설기계 원격조종을 시행할 계획임
- 국토교통부는 ‘제1차 국토교통과학기술 연구개발종합계획(2018)’에서, 국토교통 8대 혁신성장동력 중 하나로 스마트시티, 자율주행차 등과 함께 자율구동 건설 장비, 로봇 기술을 포함한 '건설 자동화 분야'를 선정하였음
- 국토교통과학기술진흥원은 ‘2023년도 국토교통과학기술 연구개발사업 시행계획(2023)’에서 국가전략기술 중 하나로 첨단로봇*에 집중 투자 계획임

※ 건축 내부 바닥 미장공사 자동화 로봇 등

다. 과학기술적 배경

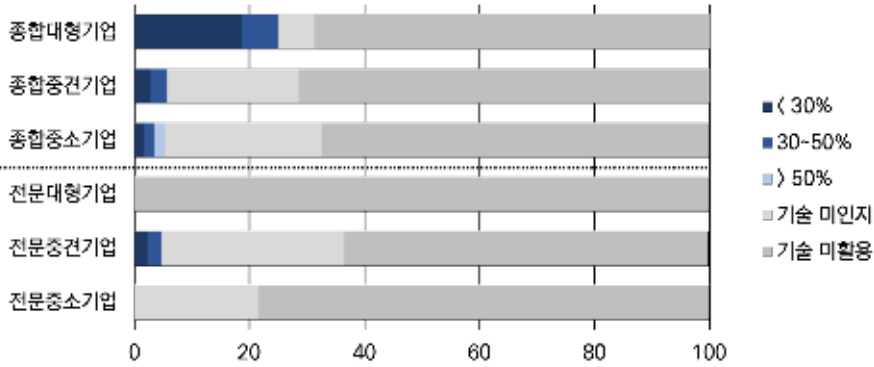
□ 개요

- 극한 환경(소음, 진동, 비산먼지, 온도 등) 속 고정밀·고신뢰성이 요구되는 건설용 다중 로봇시스템 개발과 실증을 통해 조선, 항공, 플랜트 등 초고층·비평탄 환경의 타 산업 분야로 확장 가능

□ 건설 로봇·자동화 기술

- 해외에서는 미국, 일본 등 로보틱스 선진국을 중심으로 정부 주도 하에 지속적으로 건설 로봇 연구개발에 투자해왔으며, 민간 기업에서도 다양한 건설로봇의 상용화 추진
 - 국내의 경우, 대형 건설사 중심으로 건설 로봇 기술개발이 진행되고 있으나, 활용도가 매우 낮고 선진국에 비해 건설 로봇에 대한 전문 기술력이 부족한 실정임
 - 한국건설산업연구원 ‘국내건설기업의 스마트 기술 활용 현황과 활성화 방향(2019)’에 따르면, 지능형 건설장비 및 로봇기술을 ‘전혀 활용하지 않는다’고 응답한 기업이 조사 대상 201개 기업 중 71.1%를 차지했으며, ‘관련 기술에 대해 모른다’로 응답한 기업이 23.4%로, 해당 기술을 모르거나 활용하지 않는 기업이 약 94.5%에 달함
- ※ 2021년 ABB Robotics가 1,900여 개의 해외 건설기업을 대상으로 시행한 설문 조사에 따르면 로봇을 활용하는 비율이 55%로 자동차제조업, 제조업의 84%, 79%에 비해 낮은 수준이나, 5.5%인 국내 건설기업과는 대조됨

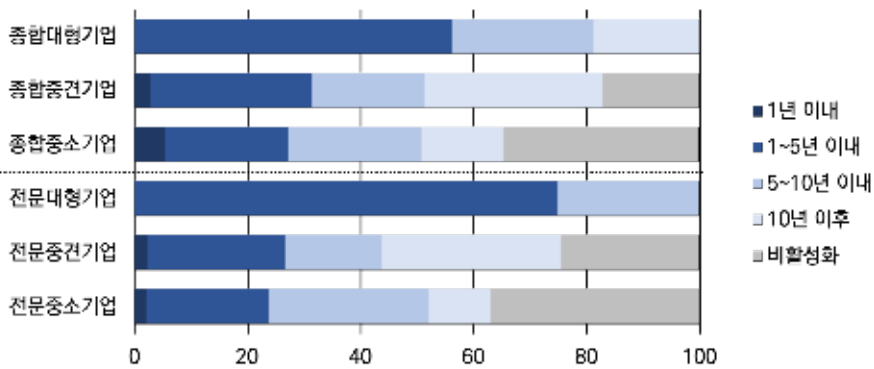
지능형 건설장비 및 로봇기술 활용 수준 (한국건설산업연구원, 2022)



94.5%
 지능형 건설장비 및
 로봇기술을 모르거나
 활용하지 않는 국내
 건설기업 비율

100%
 지능형 건설장비 및
 로봇기술이 10년 이내
 활성화될 것이라고
 인식하는 국내
 전문대형기업 비율

지능형 건설장비 및 로봇기술 활성화 전망 (한국건설산업연구원, 2022)



[그림 1-6] 업종 및 규모별 지능형 건설장비 및 로봇기술 활용수준 및 활성화 전망 (한국건설산업연구원, 2022)

- 가까운 미래에는 건설현장에서 인간과 로봇이 공존하며 협업하는 환경이 형성될 것으로 예상됨
 - 동 보고서에 따르면, 지능형 건설장비 및 로봇기술이 ‘1~5년 이내’ 활성화 될 것으로 응답한 비율이 가장 높았으며, 전문대형기업의 경우 조사 대상의 100%가 10년 이내 활성화 될 것으로 전망하였음

2. 사업 추진 필요성

□ 특수 산업환경인 건설현장에서 4차 산업혁명의 핵심기술인 자율로봇, 자율주행 플랫폼, 확장현실, AI, 디지털 트윈의 기술 결합을 통한 성장 잠재력 확보 및 기술위상 제고

- 현장시공 로봇 기술 선점으로 기술위상 제고 및 산업 부가가치 증대
 - 로봇기술은 최근 AI의 발전으로 인해 다시 한번 현저하게 성장하였으나, 건설산업은 본질적으로 작업이나 공정의 자동화 난이도가 매우 높아 타 산업에 비해 건설 로봇의 개발이 상대적으로 더딘 상태

[표 1-1] 타 산업현장(조선소 및 생산라인) vs. 건설현장 환경적/작업적 특징 비교
(Manuel Davila Delgado and Oyedele 2022)

조선소 및 생산라인	건설현장
환경적 특징 - 구조화/정적 환경 - 통제가 쉬움 - 인간과의 상호작용이 많지 않음 - 실제 환경에서의 검증이 어렵지 않음 - 프로젝트 간 변화 폭이 크지 않음	환경적 특징 - 비구조화/동적 환경 - 통제가 어려움 - 인간과의 상호작용이 많음 - 실제 환경에서의 검증이 어려움 - 프로젝트 간 변화 폭이 큼
작업적 특징 - 복잡성이 높지 않음 - 낮은 다양성 - 낮은 상호의존성 - 높은 구획화 - 숙련자의 지식을 학습하기 어려움 - 환경 및 에이전트 모델이 존재 - 시뮬레이션 환경 모델 존재	작업적 특징 - 복잡성이 높음 - 높은 다양성 - 높은 상호의존성 - 낮은 구획화 - 숙련자의 지식을 학습하기 어려움 - 환경 및 에이전트 모델이 부재 - 시뮬레이션 환경 모델 부재

- 가장 도전적인 환경인 건설현장에서의 로봇 도입 실증으로 시스템 성능 및 안정성 확보
- 특히, 현장시공 로봇은 현재 세계 각국별 개발을 진행하고 있는 단계로 상용화 성공 시 세계적으로 국내 기술력을 인정받을 수 있음
- ※ 3D 프린팅, 준공 검측 로봇(Spot), 무인 건설기계장비 등은 이미 선진국이 선점한 부문으로 현장 시공 부문에 대해서는 기회요인이 있음
- 또한, 본 사업을 통해 비정형화된 특수 작업환경(예: 극지 및 우주기지 건설 등) 및 건설산업과 같이 자동화가 더딘 산업환경(예: 농업, 어업 등)으로 기술 적용 확대 도모

□ 지능형 로봇을 활용한 건설현장 고소작업의 자동화 필요

- 현재 인력에 의존하는 건설현장의 고소작업은 건설현장 안전사고의 가장 많은 재해유형을 차지하는 추락사고의 대표적인 원인이며 작업자의 안전성 확보를 위한 자동화가 필요한 상황
 - 원전소, 조선소 등에서는 이미 현장의 고소작업에 로봇을 도입하여, 연간 20억원의 비용 절감 및 작업자들의 안전성 향상에 효과를 나타냄 (대우조선해양)



(a) 선체 블라스팅용 로봇



(b) 용접 협동 로봇(현대삼호중공업)

[그림 1-7] 국내 조선소 로봇 개발현황

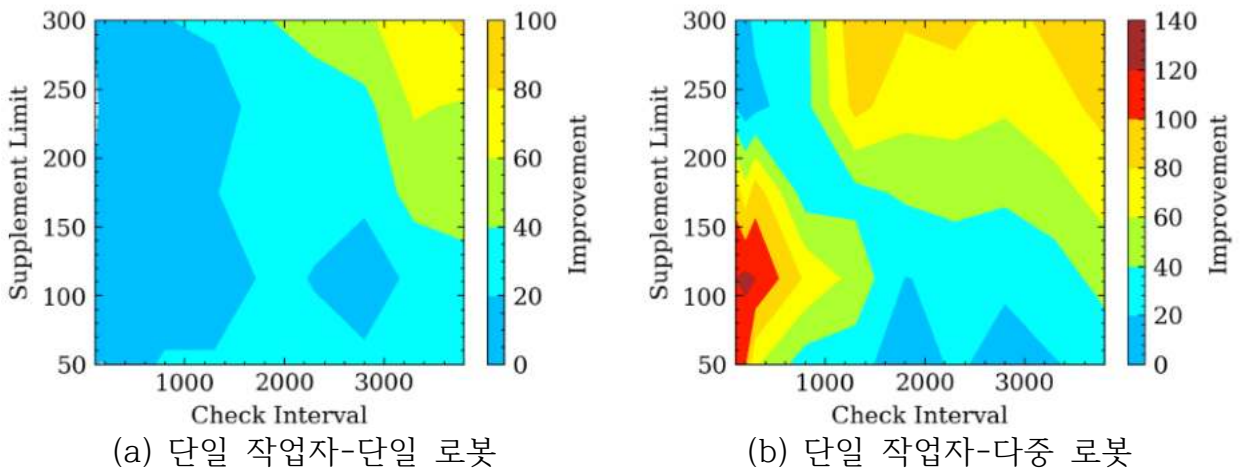
- 미국, 일본 등 선진국에서는 고소작업을 위한 로봇을 개발하여 건설현장에 도입하려는 움직임을 보이고 있으나 아직 현장 실증은 이루어지지 않음
 - ※ 제1장 2절 “2. 국내·외 기술개발 및 산업 동향” 참조
- 시공사 입장에서는 고소작업의 자동화를 통해 안전관리 인력의 부담을 줄이고, 작업자의 전체 작업 시간 중 보다 안전하고 효율적인 작업에 할당하는 시간을 증가시켜 노동생산성 향상 효과를 기대할 수 있음

□ 건설현장 다중 로봇 시스템 연구개발 필요

- 일반적으로 단일 작업자-다중 로봇 시스템이 건설현장의 낮은 노동생산성 개선에 효과적인 것으로 알려져 있으나, 건설현장 다중 로봇시스템의 제어 및 관제를 위한 연구는 전세계적으로 아직 매우 초기 단계임

※ 제1장 2절 “4. 기존 사업과의 유사성 및 차별성” 참조

- 미국 미시간대학 연구진(Wu et al. 2022)에 따르면, 건설현장에서 단일 작업자-단일 로봇의 생산성 대비 단일 작업자-다중 로봇의 생산성은 평균 11% 이상 증가하는 것으로 나타났음



[그림 1-8] 단일 작업자-다중 로봇 시스템의 생산성 개선 효과(Wu et al. 2022)

제2절 국내외 관련 정책·기술·산업·사업 동향

1. 국내·외 정책 동향

□ 미국

- 미국은 대표적인 로봇 산업 육성정책인 국가 로봇틱스 이니셔티브(NRI)를 2011년부터 추진중
 - 2020년 발표된 NRI 3.0은 협동 로봇, 보조 로봇(assistive robotics), 재난 대응 로봇, 조작성(manipulation)과 이동성(mobility), 인간-로봇 상호작용, 소프트웨어 및 정보의 융합 등 6개의 주요부문에 초점
- 미국 NSF 주관 ‘4차 로봇틱스 로드맵(2020)’은 재료·통합 센서·계획 및 제어 방법 연구, 상황 인지 성능 향상, 신기술 활용을 위한 인력 훈련을 포함

□ 일본

- 일본 국토교통성에서는 2015년부터 ‘생산성향상 프로젝트 20’ 중 하나로서, 건설 산업 현장에 드론 및 IoT, ICT 등 최신 기술을 활용하여 생산성을 향상시키기 위한 목표로 i-construction 스마트 건설정책을 추진
 - 미국의 80% 수준인 일본 건설 산업의 낮은 생산성을 50%이상 향상시키고자 추진되었으며, ‘16년에 전체 공공공사의 약 20%(5~6천억 엔)에 적용되어 점차 확대됨
 - ※ 측량, 시공, 검사 등 모든 프로세스에서 3차원 데이터가 활용되도록 공공공사 기준(제도·환경 개선)을 정비하였고, 토공분야에서 ‘16년부터 ICT를 전면적으로 적용함
- 2021년 9월 일본의 주요 건설회사를 중심으로 건설로봇과 IoT분야의 연구개발을 공동으로 실시하는 ‘건설 RX 컨소시엄’을 설립하여 운영
 - 시공단계에서 고된 작업, 위험한 고소작업, 반복 작업의 로봇화에 대해 연구개발을 우선적으로 진행하기 위해 12개 테마로 분과회를 운영
 - ※ 종합건설사, 로봇제조사, 시공사 등 총 213개사가 참여하고, 분과 테마로 타워크

레인 원격조작, 건설폐기물 AI분류처리, 먹줄로봇, 콘크리트 로봇 등을 포함

○ 2019년 ‘로봇기반 사회변혁추진계획’을 발표하고 파괴적 혁신을 달성한 문샷형 연구개발방식으로 AI와 로봇 지원

- 2050년까지 인간과 상생하는 AI로봇 실현을 목표

□ 유럽

○ 2019년 발표한 Horizon Europe(2021-2027)은 EU의 연구혁신 분야의 재정 지원 프로그램으로, 건설업의 디지털 전환, 노동자 지원을 위한 자율 솔루션, 인간-로봇 간 협력, 인지능력의 증진 등을 목표로 프로젝트 추진

- 지속가능한 성장을 위해 로봇 산업을 차세대 핵심 전략 산업으로 선정하여 지능형 로봇 산업 분야로의 시장 확대 계획

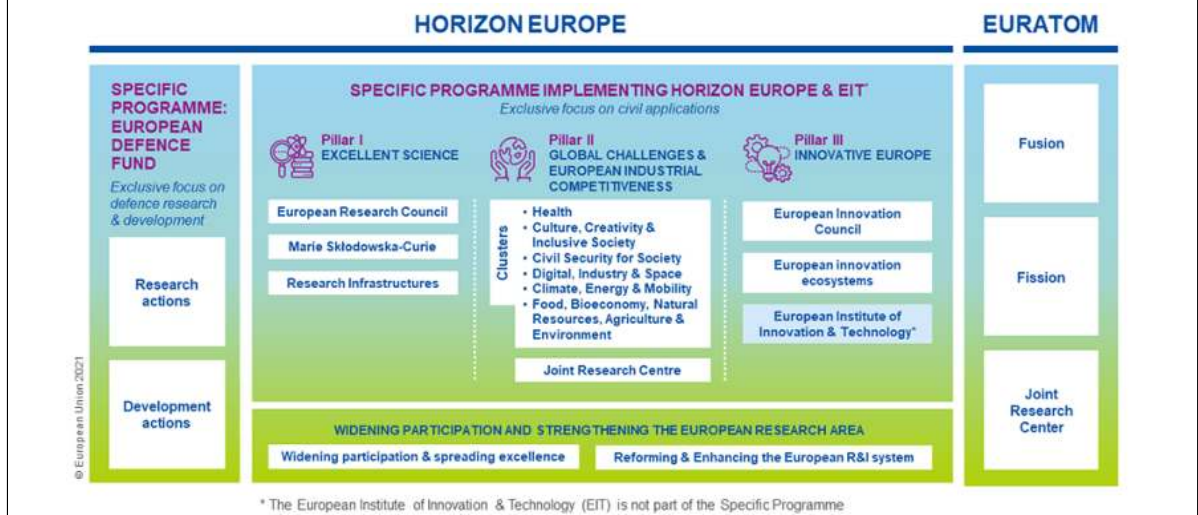
- 숏크리트 디지털화 및 자동화를 위한 인간-로봇 협업 건설시스템, 건설용 웨어러블 기술 등 인간 중심 스마트 건설기술 개발을 목표로 추진

※ 세계 최대 규모 민관합작 로봇 프로그램으로, 2014년부터 2022년까지 총 28억 유로를 투자하여 로봇시장 점유율을 높이기 위해 2012년 183개 조직이 참여하는 차세대 로봇 개발 사업 추진 발표

○ (독일) 2018년 ‘하이테크 전략 2025’를 발표하고 인간-로봇 협업, 인간 지원을 위한 외골격 로봇 등의 개발 촉진 및 서비스로봇, 물류 등 로봇 대중화 프로젝트 추진

[표 1-2] 유럽 Horizon Europe 기본프레임

구분	주요 목표 및 내용
Pillar 1 (우수과학)	'우수 과학 : 기초연구, 인력교류'로 'Horizon Europe 프로그램 참여 및 성과확산 구조'를 내용으로 함
Pillar 2 (기후변화 및 유럽 산업경쟁력)	- 분야별 공동연구'로 '특정 연구 프로그램을 구성하는 주제별 클러스터'를 내용으로 함 - 기후변화와 산업경쟁력을 위한 Pillar 2는 6개 Cluster*로 구성됨 * ①보건/의료, ②문화, 포용적 사회, ③사회를 위한 시민 안전, ④디지털, 산업, 우주, ⑤기후, 에너지, 모빌리티, ⑥식품, 바이오경제, 천연자원, 농업, 환경
Pillar 3 (혁신적 유럽)	EU 산업계 지원'으로 '향후 연구 및 혁신활동 장려를 위한 제도'를 내용으로 함



* 출처 : 과학기술정보통신부, 한국연구재단, European Union, EU HORIZON EUROPE, 2020.

□ 영국

○ ‘Constructing the Team’(1994)과 ‘Rethinking Construction’(1998)을 시작으로 건설산업 혁신 운동을 지속적으로 추진하고 있으며, 2013년에는 영국 건설산업의 비전과 목표, 세부 추진과제를 제시한 산업 전략으로 ‘Construction 2025’를 발표

- 영국 정부와 건설업계가 공동으로 달성해야 할 10대 책무를 선정하고, 목표로 비용, 공사기간 등에 대한 감축을 포함하고 있음
- 디지털 설계, 첨단재료, 신기술 분야의 연구와 혁신을 통해 디지털 경제로의 전환과 스마트 건설로의 변화를 선도하고자 함

※ 원가 및 생애주기 비용의 33% 절감, 공사기간의 50% 단축, 탄소가스 50% 저감 등의 목표 달성을 위해 건설 산업의 스마트화를 통한 생산성 향상과 효율화를 추구

- ‘영국 로보틱스전략(RAS 2020)’에 따라 2025년까지 세계 로봇시장의 10% 점유 목표

※ ‘UK디지털 전략(2022)’과 연계, AI와 로봇 융합 추진

□ 싱가포르

- 싱가포르의 건설산업은 전통적인 현장 시공 중심의 산업구조로, 근로자의 낮은 숙련도 문제, 생산성 저하, 안전사고 증가 등의 문제를 해결하기 위해 국가 차원에서 스마트 건설을 강력하게 주도함
 - 모듈러 등을 활용한 DfMA(Design for Manufacturing & Assembly)와 BIM과 ICT기술을 기반으로 사업 참여자와 절차를 통합하는 IDD(Integrated Digital Delivery) 방식을 추진
 - 건설청(BCA) 주도로 건설 생산성 로드맵에 근거한 BIM로드맵을 발표하고, 가이드라인, 인센티브 및 교육제도를 시행하고 있음
- ※ 건설청은 세계 최초로 5,000m²이상 프로젝트의 BIM전자 제출을 의무화하고, 다수의 BIM 가이드라인과 라이브러리를 개발·발표함

나. 국내 정책 동향

- 최근 5년간 정부는 산재예방을 위해 「산업안전보건법」 전면개정, 「중대재해 처벌법(2022)」 제정·시행 등 안전사고에 대한 규제강화 정책을 적극 추진
 - 이 외에도 기존보다 건설공사 참여주체(발주처)의 안전책무를 확대하고 벌칙을 강화하는 「건설안전특별법」이 ‘21년 9월 발의된 상태
 - 건설현장에서 사업주와 기업의 책임이 대폭 강화됨에 따라 안전관리시스템 강화 및 스마트 안전기술 도입이 증가하는 추세
- 스마트 건설자동화를 위해 각 부처별로 기술개발을 위한 정책 추진 중
 - (범부처, 제4차 재난 및 안전관리 기술개발 종합계획(2023-2027)) 로봇, AI 등을 기반으로 건설현장 문제해결 및 안전확보를 위한 진단·설계·시공 등 고도화 및 디지털화를 주요 정책으로 포함

- ※ 국내 건설 작업 안전을 위한 3D기반 스캔기술, BIM기반 설계, 시공 자동화 로봇 등 디지털 기반 건축시공 및 안전 감리 기술개발 포함
- (국토부, 제7차 건설기술진흥 기본계획(2023-2027)) 건설업 디지털 전환(DX)을 비전으로 건설업이 직면한 생산성·안전성 과제를 획기적으로 개선하기 위한 5대 추진전략 및 15개 중점과제를 제시
- ※ 5대 추진전략은 ①디지털 전환을 통한 스마트건설 실현, ②건설 엔지니어링 산업 경쟁력 제고, ③국민들이 안심할 수 있는 건설공사/시설물 안전 확보, ④청년 등 건설기술인 육성, ⑤핵심기술 개발, 데이터 개방 등 건설산업 고도화
- (국토부, 스마트 건설기술 로드맵(2018)) ‘30년까지 빅데이터, 로봇, 드론 등으로 건설 자동화를 완성하는 것을 목표로 기술 혁신을 추진하기 위해 로드맵 수립
- ※ BIM 전면도입, 건설기계 자동화 및 로봇 도입, 스마트 건설산업 육성 등을 포함한 ‘스마트 건설 활성화 방안 : S-Construction 2030’을 발표(‘22.7)

[표 1-3] 스마트 건설 기술 로드맵 (요약)

단계	현재	2025년	2030년
설계	•현장측량2D 설계	•드론측량BIM 설계 정착	•설계 자동화
시공	•수동장비, 검측현장 타설현장 안전관리	•자동시공·검측공정제작 조립, 정밀제어시스템 가상 시공 → 리스크 관리	•AI기반 통합관제 로봇을 활용한 자동시공, 예방적 통합 안전관리
유지 관리	•육안점검, 개별시스템 운영	•드론, 로봇 활용 점검, 빅데이터 구축	•로보틱 드론 자율진단 디지털 기반 관리

* 출처 : 국토교통부, 2018

- (산업부, 제3차 지능형 로봇 기본계획(2019-2023)) 서비스로봇 분야에서 니치마켓형 10대 분야 중 안전로봇과 검사/유지보수 분야를 핵심분야 중 하나로 선정함
- (고용부, 제5차 산재예방 5개년 계획(2020-2024)) 산재 사망 감축 및 안전·보건 격차 완화를 목표로 산업현장 사각지대 해소를 위하여 밀폐 공간 작업관리 강화를 위한 로봇, 센서 등의 혁신기술 도입 등 정책 제시

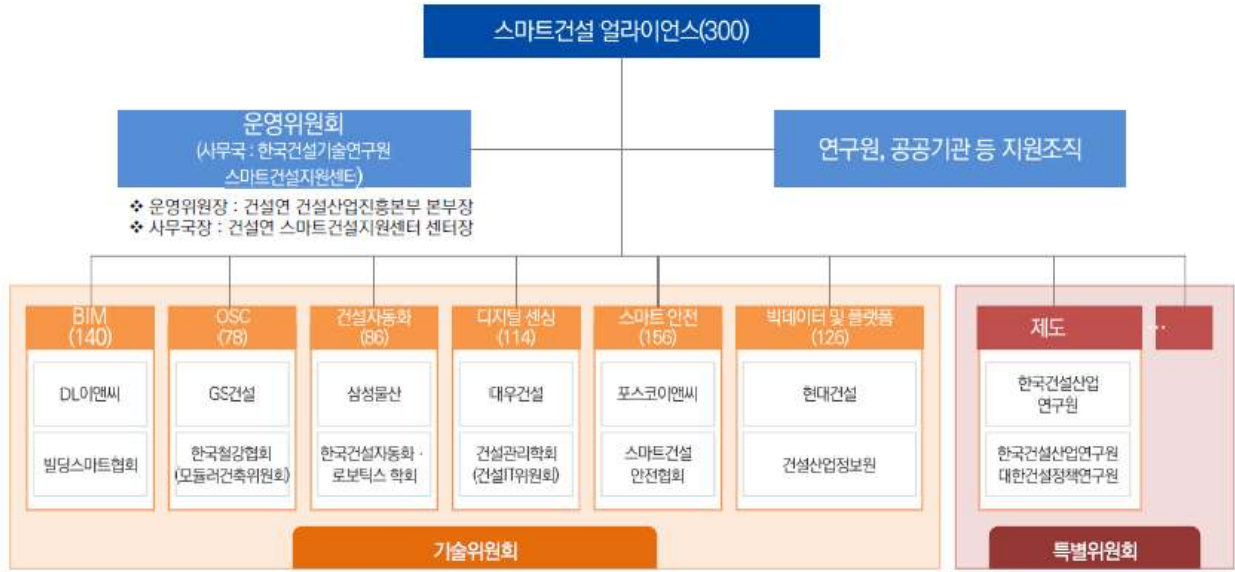
- 정부는 국정과제를 통해 로봇기술개발을 통한 디지털 전환으로 국민안전을 위한 산업재해 예방 강화, 건설산업 혁신, 국가경쟁력 제고 등을 강조

[표 1-4] 로봇 및 건설산업 관련 윤석열 정부 국정과제 주요 내용

국정목표	국정과제	
2. 민간이 끌고 정부가 미치는 역동적 경제	23	<p>제조업 등 주력산업 고도화로 일자리 창출 기반 마련</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ (디지털 혁신) 디지털 기술의 접목으로 주력산업의 생산성·부가가치 혁신 - 가상 협업공장 구축(27년까지 50개), 제조현장의 로봇 개발·보급 등을 통해 생산 공정의 최적화 ※ 산업 현장에 제조·안전 로봇 1만대 보급 기대
	24	<p>반도체·AI·배터리 등 미래전략산업 초격차 확보</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ (4차 산업혁명) 로봇, 반도체 등 디지털 실현산업* 수요연계·R&D 강화 * 로봇, AI 반도체, 전력 반도체, 센서, IoT 가전 등 ※ 로봇 세계 3대 강국 도약 기대 ▪ (사회문제 해결) 팬데믹·인구구조·기후위기 등 문제해결형 신산업 육성
	28	<p>모빌리티 시대 본격 개막 및 국토교통산업의 미래 전략산업화</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ (물류·건설산업 혁신) AI 기반 화물처리 등 스마트 물류시설을 확대하고, 드론 등을 활용한 무인배송 법제화를 통해 물류산업의 첨단화 지원 - 스마트 건설기술(BIM, OSC 등) 확산으로 산업의 고부가 가치화, 페이퍼컴퍼니 근절 노력 등 비합리적 관행이 없는 공정한 건설 환경조성
3. 따듯한 동행, 모두가 행복한 사회	49	<p>산업재해 예방 강화 및 기업 자율의 안전관리체계 구축 지원</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ (산재예방 인프라 혁신) 스마트 안전장치·설비(웨어러블 로봇 등) 개발·발굴 및 소규모 사업장 보급·확산 지원
	69	<p>국민이 안심하는 생활안전 확보</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ (안전한 국토 조성) IoT 등 스마트 기술과 로봇·드론 등을 활용하여 시설물 안전 관리를 강화하고, 싱크홀 예방을 위한 장비·인력확충
4. 자율과 창의로 만드는 담대한 미래	75	<p>초격차 전략기술 육성으로 과학기술 G5 도약</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ (전략기술 투자확대) 경제성장과 안보차원에서 주도권 확보가 필수적인 전략 기술*을 지정하여, 초격차 선도 및 대체 불가 기술 확보를 목표로 집중 육성 * 예시) 반도체·디스플레이, 이차전지, 차세대 원전, 수소, 5G·6G, 바이오, 우주·항공, 양자, AI·로봇, 사이버보안 등

* 출처 : 제20대대통령직인수위원회(2022), 윤석열정부 110대 국정과제

- 국토부는 민간기업 주도의 스마트 건설 확산과 생태계 조성을 위한 산·학·연·관 ‘스마트건설 얼라이언스’ 출범(‘23.7)
 - 대형 건설사를 포함한 민간기업이 스마트 건설기술 표준 제정, 선도프로젝트 선정, 제도개선(안) 마련 등 혁신을 주도하고, 정부에서 건설현장의 실질적인 변화로 이어지도록 정책적으로 지원



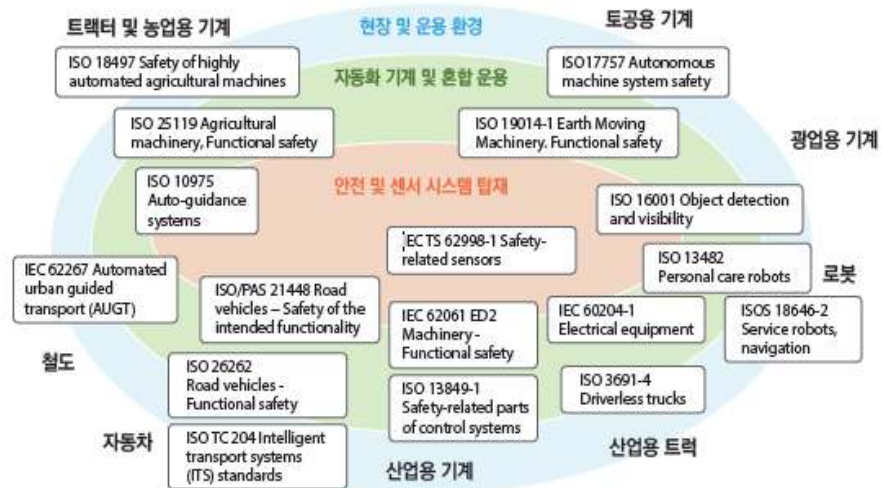
[그림 1-9] 스마트건설 얼라이언스 구성도(한국건설기술연구원, 2023)

다. 국내·외 표준화 동향

□ 국제 표준화 동향

- ISO에서 다양한 로봇 표준을 개발하고 있으나, 건설 로봇에 명확히 부합하는 표준이 부재하며 현재 안전 관련 표준은 안전 관련 표준은 장비 제조업자가 지켜야 할 항목이 대부분으로 안전에 대한 책임과 건설 공정 및 건설현장의 작업 환경 등의 관점은 고려하지 않은 것으로 분석됨
- 자동화 건설 장비와 관련된 대표적인 표준은 ISO 17757(자동화 장비 시스템 안전성), ISO 19014-1(토공 기계, Earth moving machinery, 기능안전성), ISO 16001(객체 감지 및 가시성), ISO 3691-4 (무인 트럭), ISO 10218-1:2011(로봇 및 로봇기기-산업용 로봇의 안전요건) 등이 있음

[그림 1-10] 건설로봇 관련 ISO 국제표준 현황



* 출처: 한국건설기술연구원, 건설로봇 시장 및 기술동향 (Smart Construction Report Vol4 2020.10)

[표 1-5] 건설 기계 및 로봇 분야 유관 국제 표준화 동향

표준화 기구		표준화 현황
ISO	TC59	건축 및 토목 공사 표준화 추진 - 건물 건물 요소 및 구성 요소에 대한 일반적인 기하학적 요구 사항, 조인트, 공차, 샐런트 등 표준 - BIM을 포함한 건물 및 토목 공사에 관한 정보의 구성 및 디지털화 분과 위원회 운영
	TC127	토공 기계 표준화 추진 - 굴삭기 등 토공 및 채광 작업에 사용되는 원격 운전자 제어 시스템(ISO 15817:2012) - 자율 및 반자율 기계 시스템 (ISO17757:2019) 등에 관한 안전 표준
	TC124	승강 작업 플랫폼 - 이동식 승강 작업 관련 설계 안전 요구 사항 및 테스트 방법 등 표준 - 고소 작업대 내용이 포함됨 (ISO 166523-1:2008, 16653-2:2021)
	TC159	인간 공학 - 로봇 및 자율 차량 사용자 인터페이스 등을 활용한 인간-시스템 상호작용(ISO 9241-810:2020) - 제스처 상호작용을 위한 프레임워크(ISO 9241-60:2017) - 증강 현실 및 가상 현실을 포함한 몰입 환경에서의 상호 작용에 대한 인체공학적 지침 (ISO/DIS 9241-820) 등 개발 중
ASTM	F45 로봇 공학 자동화 및 자율 시스템 위원회 - 스마트 인프라 첨단 제조 물류 및 기타 자동화 관련 자율 차량, 로봇 팔 조종기 및 센서 표준화	

□ 국내 표준화 동향

- 한국정보통신기술협회(TTA), 한국로봇산업진흥원의 스마트로봇표준포럼(KOROS)를 중심으로 다양한 로봇의 표준화를 추진 중이나, 주로 산업 및 개인 서비스 로봇 위주의 개발로 건설 로봇에 대한 표준 부재

[표 1-6] 건설 기계 및 로봇 분야 유관 국내 표준화 동향

표준화 기구		표준화 현황
TTA	PG413	(지능형로봇 표준화) S/W 프레임워크, 안전성 기술, 인간-로봇 상호작용, 응용 서비스 분야에 대한 98종의 단체표준 개발
KOROS		로봇 안전관련 표준, 성능평가 관련 표준 등을 비롯하여 다양한 분야에서 119종의 포럼표준을 개발하며 표준 제정 및 활성화, 보급화 등을 위해 활발히 활동
KS		(토공기계) 토공 및 광산 작업에 사용되는 자율 장비와 반자율 장비 시스템 (ASAMS)에 대한 안전 요구사항 규정
		(산업용 트럭) 무인 산업용 트럭 및 시스템의 안전 요구사항 및 검증 수단 명시
		(고소작업대) 설계, 계산, 안전 요구사항 및 시험 방법, 조종사 교육, 검사 및 유지 보수 등 규정 명시

2. 국내 · 외 기술개발 및 산업 동향

□ 건설 로봇

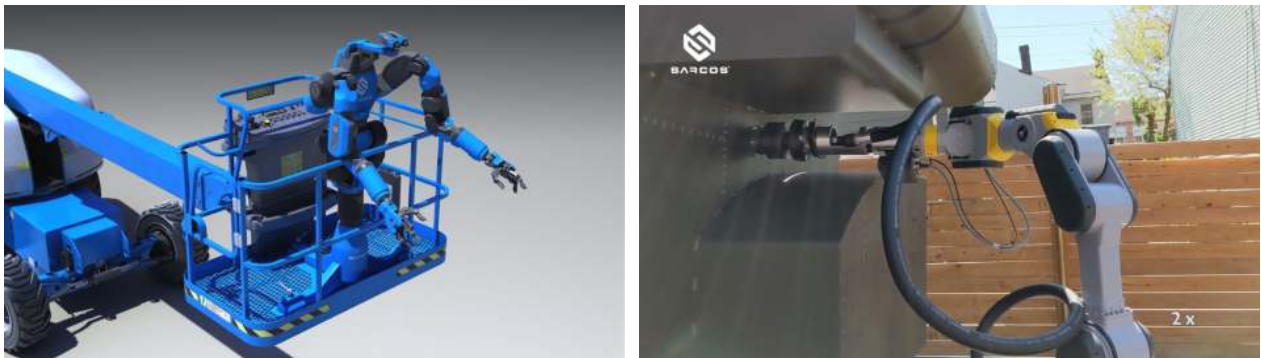
- 건설로봇은 다양한 형태가 제시되고 있으나, 다음의 로봇들이 대표적임
 - (현장 시공 로봇) 조적식 구조물을 자동으로 시공하는 로봇인 Hadrian X, 용접 로봇인 Robo-Welder, 그리고 3D 프린팅 로봇 등이 활발히 개발되고 있음
 - (현장 검측 로봇, Surveying Robot) 일반적으로 현장 관리는 많은 인력과 시간을 소요하는 과정임. 이러한 문제 해결을 위해 보스턴 다이내믹스의 스팟 로봇 등과 같이 자율적으로 현장을 스캔하고 검측할 수 있는 기술 개발이 활발히 진행
 - (조립식 건설 로봇) 기존 건설 공사 형식을 벗어나 제조업에서 활용되는 로봇 암 등을 활용하여 조립식 주택 혹은 구조물에 접목하여 건설 산업에 적용
 - (자율주행 건설 기계장비) 미국의 Trimble, Built Robotics 등에서는 굴삭기, 도저, 그레이더, 진동롤러 등의 건설장비 무인화를 목표로 생산성 향상 및 공기 단축이 가능한 정밀 시공 기술을 개발
 - (철거 로봇) 건설로봇의 범위는 앞선 건설작업 뿐만 아니라, 위험성이 높은 철거 작업 등에서도 활용이 확대됨
- 본 기술개발 동향에서는 본 사업과 연관성이 높은 현장 시공 로봇 및 현장 검측 로봇 기술을 중심으로 분석 결과를 제시함

□ 현장 시공 로봇 기술

- (국외) 기존 단일작업 및 반복작업 대체 수준에서 고소현장 위험 작업, 작업자 보조기능으로 건설로봇 활용범위를 점차 확대하는 추세이며, 미국, 일본 등에서 다양한 형태의 건설로봇이 일부 상용화되고 있음
 - (미국) 미국 ‘사코스 테크놀로지(Sarcos Technology)’의 ‘Guardian

XT'와 'Guardian XM'은 건설현장 고소작업 수행을 위한 원격조종 방식의 로봇 매니플레이터임. Guardian XT는 양팔 로봇, Guardian XM은 단일 매니플레이터의 형태로, 다양한 모바일 플랫폼에 탑재가 가능하며, 2022년에 두 로봇 플랫폼 모두 상용화함

※ Guardian XT는 스테레오 VR 헤드셋과 모션 캡처 슈트를 사용하는 원격조종 방식으로, 5G를 통합하여 원격 시야 시스템의 빠른 응답 시간을 통해 원활한 원격 조종을 지원함



[그림 1-11] 미국 사코스 테크놀로지 Guardian XT(좌), Guardian XM(우)
(사진 출처: Sarcos Technology)

- (일본) 일본 벤처기업 '맨-머신 시너지 이펙터스(Man-Machine Synergy Effectors)'은 2024년 실용화를 목표로 고소작업차에 탑재가 가능한 원격제어형 휴머노이드 양팔 로봇을 개발 중이며, 철도 작업을 위한 다기능 철도 중장비로서 전동차에 전력을 공급하기 위해 설치한 고압의 가선(높이 약 4-5m)의 유지보수 작업이 가능함

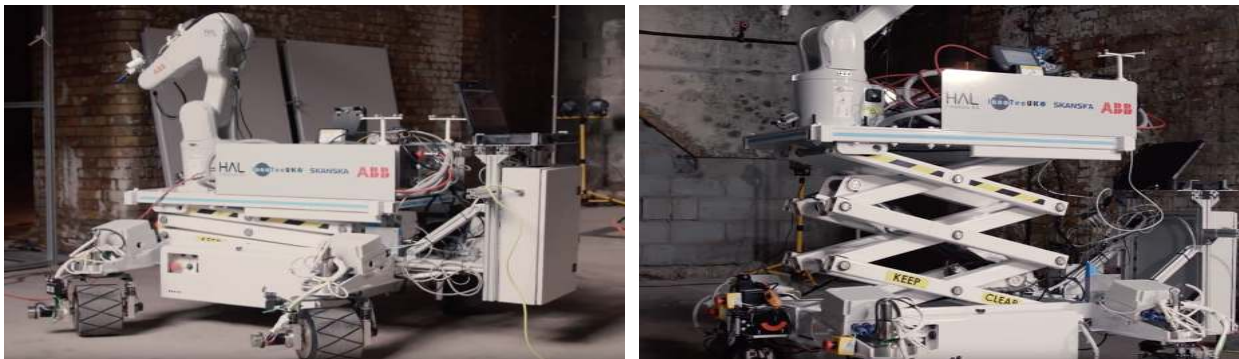
※ 로봇 플랫폼은 2개의 로봇팔과 머리를 갖는 상반신 휴머노이드 로봇(인간의 2-3배 크기)으로, 고소 작업차의 암(Arm) 선단 부분에 탑재하여 운영하고 최대 100kg의 가반하중을 갖고 있음

※ 마스터/슬레이브로 구성되는 원격조종(teleoperation) 방식으로, 조종사는 가상현실(VR) 헤드셋을 통해 로봇 머리에 있는 2대의 카메라에서 송출되는 스테레오스코픽(입체) 이미지를 확인 가능함. 또한 로봇의 엔드 이펙터는 물체의 무게, 충돌 시 반동 등 햅틱 피드백을 제공함. 이러한 직관적인 조종 방식을 통해 20-30분 내외로 조종기술 습득이 가능하도록 함



[그림 1-12] 일본 맨-머신 시너지 이펙터스의 ‘다기능 철도 중장비’의 프로토타입(좌), VR을 활용한 조종 모습(우)(사진 출처: JR서일본)

- (스웨덴) 스웨덴의 다국적 건설사인 SKANSKA는 Innovate UK 자금지원프로젝트로 ABB, HAL Robotics, InnoTech UK, SKYiack 등 다수의 기업들과 함께 건설현장 드릴링 작업을 위한 모바일로봇을 개발



[그림 1-13] 드릴링 작업 로봇(사진 출처: HAL Robotics Ltd)

- (독일) 독일의 케바조(Kewazo)는 건설현장에서 비계 조립에 필요한 자재를 비계 조립자에게 효율적으로 전달하는 로봇을 개발, 2020년부터 건설현장에 시험적으로 적용하고 있으며 인건비 33% 절약 및 비계 설치기간 42% 단축 가능할 것으로 제시

※ 발판을 사용해 짐을 실은 채 건물을 따라 위아래로 움직이며, 주변을 볼 수 있으며 경로찾기 알고리즘을 사용해 기둥이 필요한 작업자를 찾아내고, 특히 머신러닝으로 로봇은 작업자가 어떻게 움직이고 작업하는지 더 잘 파악할 수 있음



[그림 1-14] 독일의 건축 현장용 비계 조립 로봇(사진 출처: Kewazo)

- 이 외에도 철근작업 로봇, 용접로봇, 조립식 건설로봇, 자율주행 건설 장비 등 다양한 형태의 건설로봇이 제시되고 있으며, 다음과 같은 로봇이 대표적임




[표 1-7] 건설작업로봇 주요제품

업체명 (국가)	이미지	특징
Advanced Construction Robotics (미국)		<ul style="list-style-type: none"> • 타이봇(철근 결속 로봇), 아이언봇(철근 자율 운반 및 배치) 등 개발 • TyBOT은 자체 탐색, 자체 연결이 가능하며 작업 승무원의 프로그래밍 또는 BIM 계획 입력이 필요하지 않은 철근 묶음 로봇 • IronBOT은 철근을 들어 올리고, 운반하고, 설치하는 로봇
Built Robotics (미국)		<ul style="list-style-type: none"> • 기존의 중장비에 설치하여 자율시공(AI 안내 시스템) 하는 시스템으로 각종 건설 기계 및 장비에 인공지능(AI)과 자율 주행 기술을 적용하여 건설 현장에서의 작업을 자동화하고, 더욱 효율적이고 안전한 작업을 수행할 수 있도록 지원 • 자율 시공 굴삭기, 자율 시공 도저 등 Machine Control(MC) 모듈 개발
Meyco ME5 Logica		<ul style="list-style-type: none"> • 메이코(Meyco) ME5 로지카는 3M 빌딩 안전 제품군에 속하는 콘크리트 뿌리기 시스템 중 하나로서, 터널 및 지하공사 작업에서 사용되는 고급스러운 콘크리트 뿌리기 장비 • 레이저 스캐너 센서는 방향 형상을 측정하고 이 정보를 사용하여 스프레이 제트의 스탠드오프 거리와 각도를 자동으로 제어

업체명 (국가)	이미지	특징
Taisei		<ul style="list-style-type: none"> • T-iROBO는 로딩 기계와 협력하여 토양운송 및 제거, 클롤러 덤프, 콘크리트 스프레이 원격작업, 굴삭, 콘크리타마감, 자율제어 진동롤러, 파쇄작업 등 다양한 형태의 자율제어 로봇을 출시 • 각 제품은 기능에 맞춰 서비스를 제공
Aist (일본)		<ul style="list-style-type: none"> • AIST HRP-5P는 일본 AIST에서 개발한 휴머노이드 로봇으로 3D 카메라, 레이저 거리 측정기, 힘 센서 등 다양한 센서가 장착 • 용접, 도장 및 제품 조립과 같은 특정 작업을 수행하도록 프로그래밍 할 수 있음
Construction Robotics (미국)		<ul style="list-style-type: none"> • Mule135(135lb의 자재 취급용 리프트 장치) 및 SAM100(조적식 구조물 시공용 벽돌 쌓기 로봇 등을 개발 • SAM100은 컨베이어 벨트, 로봇 팔 (Robot arm) 및 콘크리트 펌프가 부착되어 한 시간에 300 ~ 400 개의 벽돌을 배치가능
FBR - Fastbricks Robotics (호주)		<ul style="list-style-type: none"> • Hadrian X(트럭 등에 장착 가능한 건설 로봇), Fastbrick Wall System(건설 자재) 등 개발 • Hadrian X는 시간당 최대 1,000개의 벽돌을 쌓을 수 있으며, 3D 스캐너와 특수 접착제를 사용하여 각 블록을 정밀하게 배치가능
Scaled Robotics (스페인)		<ul style="list-style-type: none"> • 건설 로봇, 인공지능을 활용한 프로세스 개발 • 3D 스캔, 현실 시간 데이터 분석, 비즈니스 인텔리전스 등 다양한 기술을 활용하여 건축 현장 진행 상황을 실시간으로 모니터링하고 각종 서비스를 제공하는 로봇개발
OKIBO (이스라엘)		<ul style="list-style-type: none"> • 로봇, 컴퓨터 비전, 3D 모델링, 모션제어 알고리즘, AI 등 다양한 경험 보유 • 벽체 미장(회반죽 도초)용 자율 시공 로봇으로, 페인팅 및 코팅 응용 분야뿐만 아니라 건식 벽체 마감(페인트, 석고 또는 다른 유형의 마감재)을 활용한 적용 가능
Les Companions		<ul style="list-style-type: none"> • 환경의 3D 스캔을 수행하여 완전하고 정확한 측정을 수행하고, 페인팅 작업을 프로그램에 정의하면, 로봇은 관련 작업을 수행 • PACO는 자동 에어리스 스프레이 시스템이 장착되어 있으면서 협업 어시스턴트가 자율적인 페인팅을 수행

업체명 (국가)	이미지	특징
Isybot		<ul style="list-style-type: none"> • Isybot은 다양한 건설 작업에서 인간과 함께 작동하도록 설계된 모바일 협업 로봇 • 3D 스캐너, 카메라, 레이저 거리 측정기 등 다양한 센서가 장착되어 있으며, 이 센서를 통해 로봇은 환경을 매핑하고 경로를 계획
Kajima robot		<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트 바닥을 매끄럽게 하고 평평하게 하는 이 로봇으로 다른 콘크리트 마감 로봇과 달리 Kajima는 콘크리트의 경도와 요철을 결정가능
nLink		<ul style="list-style-type: none"> • nLink 모바일 드릴링 로봇은 콘크리트 천장에서 정확하고 효율적인 드릴링을 제공하는 모바일 로봇 • 전기공, 배관공, 천장 설치공 등이 콘크리트 천장에서 측정 및 드릴링하는 데 도움을 주며, 전체 센서 범위가 장착되어 있어 방 안에서 자신의 위치를 확인
Schindler AG		<ul style="list-style-type: none"> • R.I.S.E. 시스템은 드릴과 다양한 센서가 장착된 이동식 로봇으로 로봇은 환경을 매핑하고 경로를 계획할 수 있으며 정확한 정확도로 구멍을 뚫을수 있음 • 이 시스템은 또한 드릴링하는 재료에 따라 속도와 토크를 조정가능하며, 특히 엘리베이터 승강로 구멍에 뚫는 역할을 목적으로 설계
Hilti		<ul style="list-style-type: none"> • Jaibot이라고 하는 이 로봇은 기계, 전기 및 배관(MEP) 계약자가 천장에 구멍을 보다 정확하고 효율적으로 뚫을 수 있도록 설계 • 빌딩 정보 모델링(BIM) 데이터를 사용하여 경로를 계획하고 올바른 위치에 콘크리트 표면에 드릴링하고, 앵커를 삽입하며, 콘크리트를 청소하는 등의 과정을 자동화
Brokk (아이슬란드)		<ul style="list-style-type: none"> • 건설 분야에서 다양한 유형의 로봇을 제공하는 업체로 16가지 유형의 로봇 붐과 드릴 또는 톱과 같은 다양한 부착 장치를 제공 • 다양한 크기와 용량으로 출시되고 있으며, 고객의 요구에 맞는 로봇을 선택

업체명 (국가)	이미지	특징
Dusty Robotics (미국)		<ul style="list-style-type: none"> • BIM 모델의 정보를 현장에서 매칭시킬 수 있는 레이아웃 로봇 개발 • 레이아웃 로봇인 Field Printer와 데이터 플랫폼인 Amber 등 개발 • 공간 내의 장애물을 인지하고 회피할 수 있는 센서 기술과 정교한 로봇 제어 시스템을 결합하여 작업 현장에서 건축 도면이나 작업 지침을 자동으로 출력하거나 전달
Rugged Robotics (미국)		<ul style="list-style-type: none"> • 현장 레이아웃, 자재 취급 및 품질 관리와 같은 건설 현장에서 다양한 작업을 수행하도록 설계된 모바일 로봇인 RuggedBot을 개발 • 레이아웃, 자재 취급 및 품질 관리와 같은 건설 현장에서 다양한 작업을 수행하도록 설계된 모바일 로봇인 RuggedBot
Baubot (오스트리아)		<ul style="list-style-type: none"> • 모바일 로봇은 콘크리트 3D 프린팅, 재료 취급, 용접, 밀링, 페인팅 및 기타 여러 작업을 수행 • 고급 센서와 충돌 감지 시스템 등의 탁월한 안전 기능으로 설계되어 있어, 동적인 환경에서 안전한 작업이 가능
Canvas Construction (미국)		<ul style="list-style-type: none"> • 벽돌 쌓기, 용접, 도장 등 다양한 건설 작업을 수행하도록 설계된 모바일 로봇인 Canvas를 제작 • 로봇은 사람보다 정확하고 빠른 작업을 수행할 수 있으며, 일정한 패턴과 기준에 따라 일관성 있게 작업을 진행 • 자율주행, 모니터링, 유지보수 등에 대한 역할을 수행
Hitachi (일본)		<ul style="list-style-type: none"> • ASTACO-SoRa는 2011년 원전 사고 이후 후쿠시마 다이이치 원자력 발전소의 청소를 지원하기 위해 설계 • 카메라, 선량계, 온도계, 습도계, 수소계, 산소 측정기 및 적외선 카메라를 포함한 다양한 센서가 장착되어 있으며 이를 통해 위험한 환경에서 작동하고 공장의 방사능 수준 및 기타 조건에 대한 데이터를 수집
Conjet (스웨덴)		<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트 제거 수압 철거 로봇을 제조하여 철거 서비스를 제공하는 로봇으로 다양한 표면에서 콘크리트, 타르 및 기타 재료를 제거하는 데 사용 • 콘크리트 수압 철거 로봇은 최대 22,000psi(1500bar)의 고압수를 사용하여 미리 결정된 품질 수준에서 콘크리트를 선택적으로 제거
Autonomous Solutions		<ul style="list-style-type: none"> • 건설과 관련된 모든 주요 차량 제조업체의 대다수를 원격 또는 자율주행을 통한 작업 수행이 가능하도록 지원 • 원격 굴삭기, 원격도저, 자율운반트럭 등 자율 건설 차량의 명령 및 제어 기술 보유

업체명 (국가)	이미지	특징
Caterpillar		<ul style="list-style-type: none"> Cat Command 기술을 기반으로 건설을 위한 완전한 원격 제어 및 반자동 제품 라인을 출시
Blue RoboSky (러시아)		<ul style="list-style-type: none"> 건물에서 석면 및 기타 유해 물질을 제거하도록 설계된 소형 이동식 로봇인 Demorobot은 위험한 환경에서 안전하게 탐색하고 석면 및 기타 유해 물질을 식별하여 작업 카메라, 레이저 스캐너, 가스 감지기 등 다양한 센서가 장착되어 있으며, 이를 통해 기타 유해물질을 수집하거나 제거 가능
Epiroc (스웨덴)		<ul style="list-style-type: none"> 지하 및 지상 광업, 인프라스트럭처 개발 및 건설 산업을 위한 기계 및 장비를 제조하는 기업으로, 광산과 건설 모두에서 드릴 로드를 추가하거나 드릴 비트를 교체하는 것과 같은 기능을 자동화하여 특정 제품을 맞춤화 장비 제어 시스템(RCS)과 같은 플랫폼을 사용하면 로컬 센서와 카메라를 모니터링하는 제어판을 통해 기계를 원격으로 작동하며, 최적이 작업이 이루어질 수 있도록 데이터 기반 의사결정시스템 적용

○ (국내) 최근 대형 건설사 중심으로 시공단계에 활용되는 단일작업 및 현장점검을 위한 건설로봇 개발을 시작하였으나, 로봇플랫폼의 시스템통합 문제, 플랫폼 무게제한, 인력대비 작업속도 저하 등의 현장 이슈로 인하여 실용화에 어려움이 있음

- 작업 공간별 최적 주행 플랫폼 개발이 필요로 하며, 이에 따른 고소작업대 상부에서 검사, 볼팅, 드릴링 등의 다기능을 포함하는 건설현장용 매니플레이터 개발을 통한 국내 현장 맞춤형 개발이 필요로 함

※ 현재는 작업자가 미리 표시해둔 천장 위치에 구멍을 내는 수준의 앵커링 작업만 가능하며, 볼트체결과 같은 인간수준의 고정밀 작업이 가능한 로봇은 개발되지 않음

※ 제한적 이동, 인식기능이 가능한 수준으로, 자율적 인지, 판단, 제어, 학습 기능이 적용된 건설로봇 개발이 필요함

분야	핵심 기술	기술 개발 단계
건설기계 자동화 및 관제	건설기계 자동화	<ul style="list-style-type: none"> 굴삭기/도저/롤러 머신 가이던스/머신 컨트롤 기술 상용화 현대건설기계 MG/MC 시스템
	건설기계 통합 운영 및 관제	<ul style="list-style-type: none"> 굴삭기/도저/롤러 통합운영 및 관제기술 상용화 (대규모 현장) 두산인프라코어 XiteAuto + XiteCloud
현장 시공 자동화 및 적층 공정	현장 시공 자동화	<ul style="list-style-type: none"> 드릴링/앵커링/내화뿔칠/용접/엑세스플로어 시공/도장/미장용 로봇 프로토타입 개발 및 시범 적용 현대엔지니어링 AI 미장 로봇
	적층 공정	<ul style="list-style-type: none"> 3D 프린터 장비/재료/시공 기술 개발 및 관련 제도 정비
현장관리 고도화	ICT 기반 현장 안전관리	<ul style="list-style-type: none"> 드론, 3D 스캐너 등 ICT 기반 안전관리 상용화 4축 보행 로봇 등 모바일 로봇/이동형 CCTV 활용 안전관리 시범 적용 현대건설 현장순찰 로봇
	BIM 기반 공사관리	<ul style="list-style-type: none"> 드론 활용 주요 공종 실시간 공정체크 등 BIM 기반 공사관리 상용화 4축 보행 로봇 활용 품질/공정관리 시범 적용

기초연구/실험

..... 적층 공정 (Additive Manufacturing)

..... **현장 시공 자동화**

..... 4축 보행 로봇 기반 안전/공정관리

..... 건설기계 통합 운영/관제

..... 드론 기반 안전/공정관리

..... 건설기계 자동화 (MG/MC 시스템)

↓ 상용화/실용화

[그림 1-15] 국내 건설 로봇 기술개발 단계

- (삼성물산) 내화뿔칠 작업을 대체하는 로봇을 개발하여 현장에 적용함. 내화뿔칠은 건물의 철골 기둥, 보 등에 내화재를 덧칠해 높은 열에도 견딜 수 있게 하는 필수작업이지만 유독성 물질을 포함하고 있어 밀폐 공간에서 작업하는 것이 위험함

※ 내화뿔칠 작업에 대한 현장수요는 많으나, 하부플랫폼, 고소작업대, 상용 로봇 매니플레이터의 시스템 통합이 되지 않아 현장 활용이 불가능한 상황



[그림 1-16] 삼성물산 내화뿔칠 작업 로봇

- (현대건설) 현대로보틱스와 함께 실내 현장 자율주행이 가능한 천장 드릴 타공 로봇을 개발하고, 천장 드릴 타공 뿐만 아니라 페인트, 용접 등 작업범위 확대 예정. 뿐만 아니라 건설 현장을 자율주행하며 각종 정보를 수집하고 원격으로 현장 상황에 대응하는 순찰로봇을 개발함

- ※ 현대건설은 '고소작업용 로봇 및 이를 이용한 동작방법'에 대한 특허 출원 및 등록: 로봇을 이동시키기 위한 주행구동부, 작업을 위한 동작을 수행하는 로봇 구동부로 구성되며, 로봇 구동부는 천장카메라를 통해 천장의 마커를 파악하여 작업을 수행함



[그림 1-17] 현대건설, 양카링 자동화 로봇(좌) 및 건설현장 순찰 로봇(우)

- (현대엔지니어링) '로보블럭시스템'과 함께 작업자의 별도 추가 조작 없이 콘크리트 바닥면을 자동으로 고르게 해주는 'AI 미장로봇'을 개발

- ※ 타설된 콘크리트 바닥면을 3D스캐너로 정밀 측량하고 평활도가 기준치를 벗어나는 부분에 대한 지리적 정보를 로봇에 전송해 작업자의 조작없이 그 부분에 대해 자동으로 미장작업을 수행함



[그림 1-18] 현대엔지니어링 AI미장로봇

□ 현장 검측 로봇(Surveying Robot) 기술

- 4족 보행 로봇, 주행 로봇 등을 통한 현장 검측 및 관리 기술은 현장 관리자가 기존에 수행하던 안전관리, 품질관리, 공정관리 등을 대체할 수

있는 수준의 현장 관리 기술과 다이내믹한 건설현장을 자유롭게 이동할 수 있는 자율 주행 기술로 구분됨

○ 모바일 로봇이 미지의 환경에서 다양한 센서들을 이용하여 위치를 추정하고 3차원 환경 지도를 생성하는 기술을 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)은 건설 현장의 현장 검측 로봇에 필수적인 기술 요소임

- 다양한 센서(카메라, 라이다(LiDAR), IMU, GPS 등)을 통해 수집되는 센싱 정보를 토대로 자율 주행 로봇의 위치를 추정하고 주변 지도를 생성하는 과정에서 센서 데이터 처리 방법이 SLAM의 핵심 기술임

- 데이터 처리 방식은 현재 전통적인 기하학적 방법론에서 입력 이미지에 CNN(Convolutional Neural Network) 혹은 입력 영상을 RNN(Recurrent Neural Network) 모델로 학습하는 딥러닝 기반의 데이터 처리방식으로 발전함

- Semantic SLAM은 Object Identification을 SLAM과 결합한 형태로 주변 환경에서의 사물을 인식하여 객체에 대한 정보를 포함한 환경 지도를 생성하는 기술

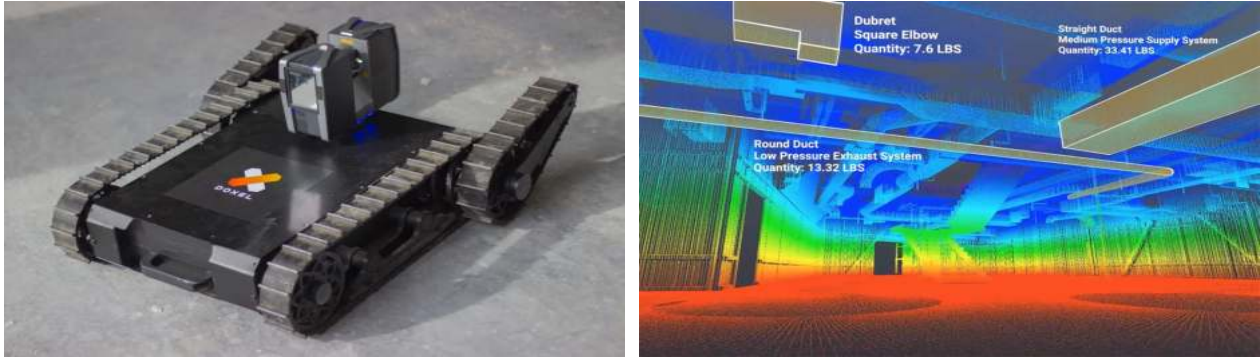
※ Semantic SLAM의 객체에 대한 정보는 다중 로봇 시스템에서 로봇 간의 연결성을 확보할 수 있는 핵심 정보임

※ 현재 Semantic SLAM의 기술적인 한계는 지도 생성을 위해 관측된 객체에 대한 방대한 정보량의 통합 과정에서 발생하는 오류와 가림 현상(Occlusion)에 대처하지 못하는 알고리즘에 있음

○ 국내외 기술개발 현황

- (미국) 2018년 로봇 스타트업 ‘독셀(Doxel)’은 딥러닝 기술과 LiDAR를 탑재한 자율로봇인 ‘건설 프로젝트 관리용 AI로봇을 개발함, 건설 현장 내부를 스캔하여 BIM 대비 실시간 공정율 및 공사오류 정보를 제공함으로써 노동 생산성을 크게 향상시킴

※ 건설자재의 형태, 위치, 사이즈 등 데이터를 수집하며 클라우드에 저장하고, 3D 시맨틱 딥러닝 알고리즘 기반 방대한 데이터를 처리 및 학습함



[그림 1-19] 미국 독셀의 건설현장 내부 검사로봇

- (GS건설) 스타트업 ‘큐픽스’와 함께 4족 보행 로봇 ‘스팟(SPOT)’을 건설현장에 도입, 수집된 데이터는 GS건설이 기존에 활용중인 BIM 데이터와 통합해 후속 공사인 전기·설비공사의 간섭 여부확인과 안전관리 계획 수립에 성공적으로 활용됨

※ 스팟에 LiDAR, 360도 카메라, IoT 센서 등을 탑재하여 국내 건축 및 주택 현장에서 실증시험을 진행 중



[그림 1-20] GS건설 Spot 현장 실증

□ 인간-로봇 커뮤니케이션 기술

- (국외) 인간-로봇 커뮤니케이션 기술은 협동 로봇, 서비스 로봇, XR 등에 적용되어 활발한 연구가 진행되고 있으나, 건설 분야의 경우 저조한 로봇의 도입 및 환경적 제약 등으로 인한 초기 연구 단계로 실제 활용된 사례가 없음
- (미국) 미시간 대학교에서 3D 스캐너를 활용한 디지털 트윈 구현을 통해 ROS 기반 인간 작업자의 작업 계획 변환 및 전달하여 로봇과 인간

의 원활한 상호작용을 지원하는 연구 수행

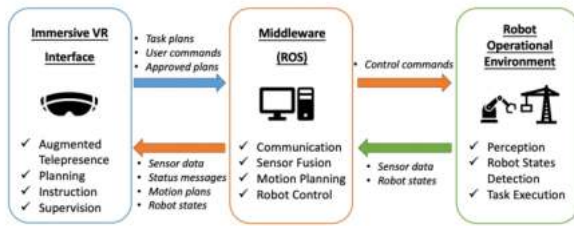


Fig. 1. HRC system framework.

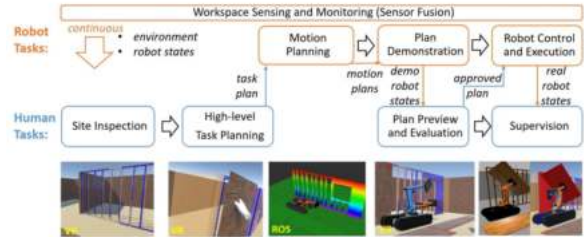
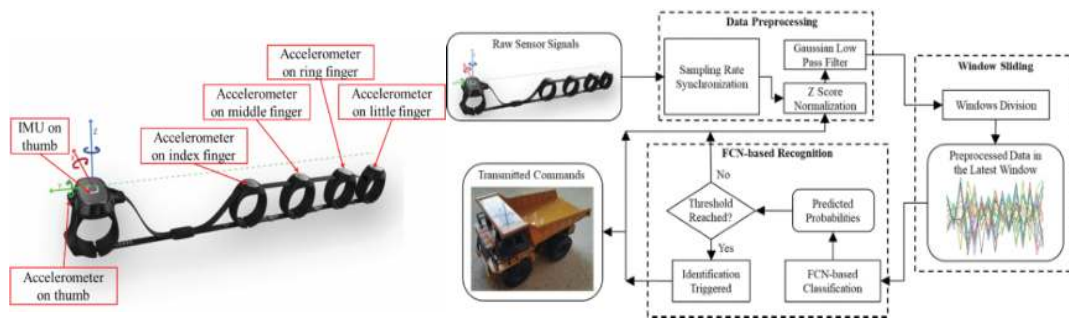


Fig. 2. System workflow and human-robot roles distribution.

[그림 1-21] 미시간대학교 HRC 시스템 프레임 워크 및 시스템 워크 플로우 (Wang et al. 2021)

- (미국) 위스콘신 대학에서 웨어러블 센서 IMU 기반 Tap Strap 시스템을 제안하며 작업자의 손 제스처 인식을 통한 자재 운반 장비 제어 기술 연구 수행



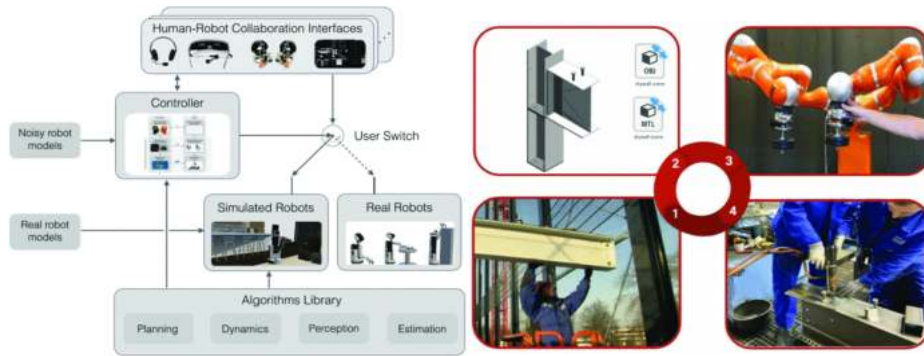
[그림 1-22] Tap Strap 및 시스템 개요 (Wang et al. 2022)

※ 퍼듀, 미시간, 샌디에이고 대학교 등에서 다양한 건설로봇 인간상호작용 기술 개발 진행 중에 있으며, 24~26년 기술 개발 종료 예정

[표 1-8] 미국 인간-로봇 커뮤니케이션 관련 기술 개발 과제 현황

연구기관	인간-로봇 커뮤니케이션 관련 기술 개발 과제
퍼듀대학교 (22.10-24.05)	건설 작업의 미래를 위한 상호작용형 다중 인간 다중 원격 로봇 작업 - 이기종 건설 로봇과 협업 할 수 있는 상호작용형 MHMRR 협업 프레임워크 구축
미시간대학교 (22.01-24.12)	작업자와 상호작용형 로봇 보조의 협력을 통해 미래 건설 작업의 혁신 유도 - 건설 작업자와 로봇이 자연스러운 상호작용과 특정 작업 수행을 가르치는데 활용 가능한 기술 개발
샌디에이고대학교 (21.01-26.03)	작업자-로봇 상호 작용에 대한 공동 적응 및 신뢰 : 건설에서 협동 로봇의 확장 가능한 채택 - 건설 노동자 활동 및 의도 인식에 대한 기본 지식 발전 및 새로운 데이터 세트와 모델 생성

- (미국) 스탠포드 대학교에서 로봇 시뮬레이션 및 능동 인터페이스 “SAI”를 활용하여 벽체 설치, 도장, 용접, 볼트 체결 및 콘크리트 타설 5가지 작업에 대해 사용자가 햅틱 인터페이스를 통해 로봇의 동작 제어 및 테스트 가능한 사실적 시뮬레이션 환경 연구 수행



[그림 1-23] SAI 시뮬레이션 및 제어 환경 아키텍처
(Brosque et al. 2020)

- (독일) 슈트가르트 대학교에서 목재 조립식 건축 공예 작업 시 혼합 현실 헤드 장착 디스플레이를 통해 제스처 기반 작업 지도로 로봇 동작 제어 및 변환하는 연구 진행



Figure 2. Human wearing an HMD controls the robotic fabrication setup



Figure 4. Platform representation in Unity

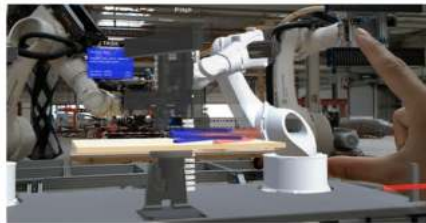


Figure 5. Hololens-Visualized forecast of the fabrication sequence and gesture-based instruction of the robotic fabrication platform

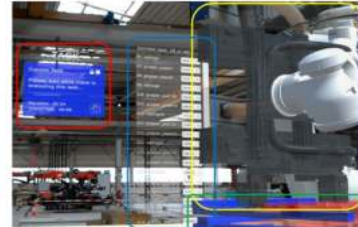


Figure 6. Visualization of the task window (red) and task list (blue) and the digital twins of the robots (yellow) and the work object (green)

[그림 1-24] AR 기반 인터페이스를 활용한 목재 조립 로봇 동작 제어(Amtsberg et al. 2021)

- (독일) imk Industrial Intelligence GmbH에서 인간 중심 설계 프로세스를 위한 ema WD 시뮬레이션 프로그램 개발 및 BIM 기반 계획 방법론을 활용하여 AEC 산업 연계 연구 진행



Figure 5: Initial production process (software: emaWD).

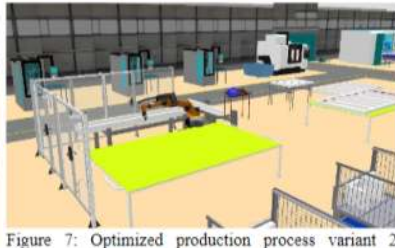


Figure 7: Optimized production process variant 2 (software: emaWD).



Figure 8: Optimized production process variant 2 and initiated machine-robot control (software: HAL Robotics Framework).

[그림 1-25] 기존 인간 중심 작업의 디지털화(좌), 최적화 생산 프로세스 시뮬레이션(중, 우)(사진 출처: imk Industrial Intelligence GmbH)

- (국내) 건설 로봇 관련 정부과제의 경우, 로봇 성능 위주 개발에 초점이 맞추어져 있으며, 인간-로봇 커뮤니케이션 기술 개발의 경우 대부분 소셜 로봇, 위험 지역 유지 보수 등을 위한 연구로 해당 기술로만으로는 건설 현장에서 정밀 작업을 하는 로봇과 작업자의 원활한 협업을 기대하기 어려운 상황

[표 1-9] 국내 인간-로봇 커뮤니케이션 관련 기술 개발 과제 현황

주관기관	인간-로봇 커뮤니케이션 관련 기술 개발 과제
(주)다산네트웍스 (22.05-25.12)	스마트건설 대응을 토공 건설기계용 원격제어시스템 및 기술 개발 (굴삭기)
서울대학교 (21.04-22.12)	건설현장 자동화를 위한 4D 시뮬레이션 및 강화학습 기반 타워크레인 자율운행 기초 기술 개발 (타워크레인)
한국과학기술원 (23.04-26.12)	초실감 텔레프레즌스 로봇의 비정형 작업 고도화를 위한 원격자율 공유제어 프레임워크 원천기술 및 인공지능 요소기술 개발 (원자력 발전소, 배선 유지보수 등)
전남대학교산학협력단 (23.04-29.12)	원격 상호작용 및 경험공유 기술을 적용한 XR 기반 극한지역 유지보수 아바타 플랫폼 개발
(주)버넥트 (21.12-24.11)	디지털트윈 기반의 지능형 무인화 설비 점검 솔루션 개발
(주)써로마인드 (18.12-22.03)	인간을 물리적 상호작용을 통해 지원하는 로봇을 위한 가상현실 환경 인간시연을 모방하는 학습 기술 개발 (치매 환자를 위한 집안 및 쇼핑 활동 보조)
한국전자통신연구원 (23.04-26.12)	사용자와의 장기 상호작용(Longterm Interaction)을 위한 행동기반 서비스 로봇 HRI 자동생성 AI 기술 개발

- (주)다산네트웍스 주관으로 “스마트건설 대응을 토공 건설기계용 원격제어시스템 및 기술 개발” 과제 진행 중이나, 토공건설기계(굴삭기)에 한정된 기술 개발로 타 건설 기계 플랫폼과 큰 기능적·기술적 차이 존재
- 서울대학교에서 “건설현장 자동화를 위한 4D 시뮬레이션 및 강화학습 기반 타워크레인 자율운행 기초 기술 개발”과제를 수행하였으나, 타워

크레인 작업을 위한 실외 현장 시뮬레이션에 국한한 연구로 보다 복잡한 실내 건설현장 작업에 대한 시뮬레이션 기술 개발 필요

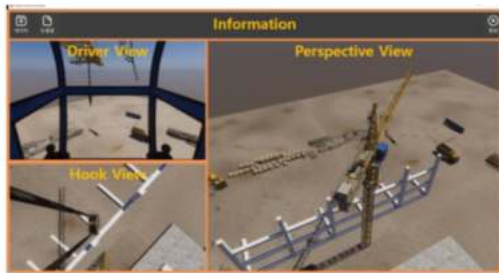


Fig. 12. User interface developed in this study

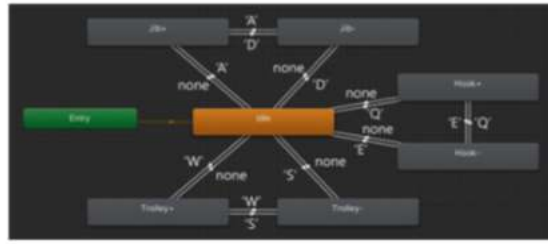


Fig. 11. Keyboard mapping for tower crane motion

[그림 1-26] 타워크레인 자율화를 위한 가상환경 플랫폼 개발에 관한 연구

- 한국과학기술원 주관으로 “초실감 텔레프레즌스 로봇의 비정형 작업 고도화를 위한 원격자율 공유제어 프레임워크 원천기술 및 인공지능 요소기술 개발”이 수행 중에 있으나 원자력 발전소, 배선 유지보수 등 작업을 타겟으로 한 요소 기술개발로 끊임없이 작업환경 변화 및 부재 변형을 고려한 건설 현장과는 상이한 기본 환경으로 건설 현장을 위한 작업 작업자-로봇 커뮤니케이션 요소기술 별도 개발 필요
- 전남대학교 산학협력단 주관으로 “원격 상호작용 및 경험공유 기술을 적용한 XR 기반 극한지역 유지보수 아바타 플랫폼 개발”과제가 시작 단계에 있으나, 비정형 환경 중에서도 고난이도에 속하는 건설 작업은 유지보수 작업과는 큰 차이 존재
- (주)버넥트 주관으로 “디지털트윈 기반의 지능형 무인화 설비 점검 솔루션 개발”연구가 수행 중에 있으나, 4족 로봇을 활용한 현장 점검 및 정보 수집 기술 개발로 정밀 작업에 대한 디지털 트윈 기술과는 무관함
- (주)써로마인드 주관으로 “인간을 물리적 상호작용을 통해 지원하는 로봇을 위한 가상현실 환경 인간시연을 모방하는 학습 기술 개발”과제를 수행하였으나, 치매 환자의 집안 및 쇼핑 활동 보조 도우미 로봇 솔루션 개발로 일상생활에서 보조적 역할을 위한 기술 개발로 위험 및 정밀 작업에 적용하기에는 한계 존재
- 한국전자통신연구원 주관으로 “사용자와의 장기 상호작용(Long-term Interaction)을 위한 행동기반 서비스 로봇 HRI 자동생성 AI 기술 개발”

과제가 시작단계에 있으나, 전시관 등에서 활용되는 소셜로봇의 모션/표정 생성 기술 개발을 위한 비언어적 상호작용 연구로 제조, 건설 등 특정 작업에 적용되기에는 한계가 있음

□ 건설용 다중 로봇 시스템(Multi-Robot System, MRS)



- 다중 로봇 시스템, 또는 MRS는 여러 대의 로봇이 협력하여 공동 작업을 수행하는 자동화 시스템을 의미하며, 로봇들의 연결성과 상호작용이 강조됨
- 크게 동종(Homogeneous) MRS, 이기종(Heterogeneous) MRS로 구분되며, 이동 형태에 따라 고정식, 반고정식, 이동식 MRS가 있음
- 시스템을 구성하는 로봇의 역할에 따라 리더-팔로워(Leader-follower) 및 P2P (Peer-to-peer)로 구분
- ※ 동종 다중 로봇 시스템(Homogeneous MRS)


[표 1-10] 다중 로봇 시스템 개발 현황

개발 주체	이미지	특징
난징대학교 (중국)		<ul style="list-style-type: none"> • 고정식 MRS • 두 대의 용접 보조 로봇과 한 대의 용접 로봇이 파이프 용접을 수행 • 용접 보조 로봇은 파이프를 위치시키고 고정하는 역할, 용접 로봇이 용접을 수행하는 리더-팔로워 형태의 MRS
CMA 로보틱스 (이탈리아)		<ul style="list-style-type: none"> • 고정식 MRS • 플라스틱 도장 작업을 수행하며 협업 능력보다는 각 로봇의 개별적 작업 수행을 통한 병렬적 구성이 주요
ETH Zurich (스위스)		<ul style="list-style-type: none"> • 반고정식 MRS • 스위스 ETH Zurich의 바빌론 공중정원 프로젝트 '세미라미스'는 다중 로봇이 구조물을 들고 옮기고, 배치하는 과정까지 자동화를 수행하는 프로젝트 • 머신러닝을 활용한 디자인, 하중지지를 고려한 구조 설계, 증강현실을 활용하여 설계안 변경 및 미세조정, 다중 로봇 충돌 방지 알고리즘 등이 도입

개발 주체	이미지	특징
Center Construction Robotics		<ul style="list-style-type: none"> Crane-lifted robotic arms 타워크레인의 하단부에 다중 로봇 시스템을 설계하여 타워크레인을 통해 시스템에 이동성을 부여한 반고정식 MRS 방식
시미즈건설(일본)		<ul style="list-style-type: none"> 이동식 MRS 일본 시미즈 건설의 용접 로봇(로보-웰더) 및 천정 시공 로봇(로보-버디) 용접 로봇은 동일한 두 작업을 다른 위치에서 동시에 수행하는 방식. 천정 시공 로봇은 한 대의 로봇이 석고보드 핸들링, 다른 한 대가 볼팅 수행
AML-UCL(미국-영국)		<ul style="list-style-type: none"> 이동식 MRS Applied Off-site and On-site Collective Multi-Robot Autonomous Building Manufacturing 3D BIM(Building Information Modeling)을 기반으로 데이터 수집, Off-site에서의 부재 제작, On-site에서의 조립 등 다양한 작업을 자동으로 수행하는 것을 목표로 하는 연구 프로젝트
ETH Zurich(스위스)		<ul style="list-style-type: none"> 혼합현실(MR) 기반 동종 MRS 상호작용 건설현장의 군집 로봇(Swarm robotic system)의 이동, 자재 운반을 컨트롤하기 위한 홀로렌즈 기반 혼합현실 인터페이스 개발 군집 로봇은 총 3가지 작업을 수행: (1) 지정된 위치로 이동; (2) 자재 운반; (3) 방 탈출

※ 이종 다중 로봇 시스템(Heterogeneous MRS)

개발 주체	이미지	특징
삼성물산(국내)		<ul style="list-style-type: none"> 삼성물산의 '플로어 로봇'의 MRS는 액세스 플로어 시공 로봇과 해당 로봇이 시공 시, 따라다니며 패널을 공급하는 모바일 베이스로만 이루어진 자재 운반 로봇으로 구성됨.
시미즈건설(일본)		<ul style="list-style-type: none"> 시미즈 건설의 '로보 캐리어'는 수평 컨베이어 로봇으로, 적재된 자재를 수직화물 엘리베이터에 배치해 각 층으로 보내고, 해당 층에서 또 다른 로보 캐리어가 자재를 픽업해 작업장으로 운반함. 또한, 반송 경로를 자동으로 다시 찾아 수정하는 기능을 갖추고 있음

개발 주체	이미지	특징
국내외 연구기관 다수		<ul style="list-style-type: none"> • UAV-UGV 시스템 • UAV를 주로 UGV의 보조로 활용. 최근 연구 동향을 살펴보면, 환경 매핑을 위한 MRS가 가장 활발히 연구되고 있으며, 매핑에서 나아가 tether를 물리적으로 연결하여 UGV 혼자서는 할 수 없는 불가능한 업무(절벽 오르기) 등을 물리적으로 보조하는 UAV도 연구되고 있음 • UAV-UGV MRS의 연구 방향은 다섯가지로 분류됨: (1) UAV-UGV의 상대적 위치 추정; (2) 리더-팔로워 시스템; (3) 목표물 인식 및 추적; (4) UAV 매핑 결과를 통해 UGV의 자율 주행 능력 향상; (5) 환경 매핑과 동시에 협업 감시 (collaborative surveillance)

나. 국내 · 외 시장 동향

□ 건설 로봇 시장



[그림 1-27] 건설로봇 시장 지도(Zacua Ventures, 2023)

○ (국외) 건설 로봇의 시장 규모는 2023년 331.70백만 달러 달러에서 2028년까지 연평균 15.50% 성장하여 681.80백만 달러 수준으로 성장

※ 철거, 벽돌건설, 3D프린팅 시장을 포괄한 시장규모



[그림 1-28] 건설로봇시장 전망(Mordor Intelligence, 2023)

- 미국, 일본 등 고령화로 인한 노동력 부족 및 안전성 문제 해결이 필요한 선진국에서 건설 로봇 시장을 선도하고 있으며, 미국, 유럽 등은 로봇 기업 주도로 개발 및 상용화를 적극 추진하는 반면, 일본, 중국, 싱가포르 등은 정부 정책과 대형 건설업체 또는 로봇기업과의 협력을 통해 기술 개발 및 상용화를 추진함
- ※ 네덜란드, 호주, 싱가포르 등 건설현장에서 외국인 노동자 의존도가 높은 국가에서도 적극적으로 건설로봇 개발 중
- 건설 중 건축 자재의 자원과 자재 낭비를 줄이는 데 건설 조직의 관심이 높아짐에 따라 건설 로봇 시장의 채택이 촉진
- ※ 건설 분야에 3D 프린팅 기술이 도입되면서 건설 로봇 활용의 새로운 가능성을 창출하고, 세계적인 도시화 추세가 건설 로봇 시장의 성장을 가속화 함
- 또한 프로젝트의 건설 시간을 단축하는 것은 건설 로봇의 성장을 돕고 다양한 작업에 로봇 투입을 허용하고 있음
- 새로운 인프라에 대한 요구가 증가함에 따라 자동화된 건설 솔루션은 향후 몇 년 동안 추진력을 얻고 시장에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 예상
- 인구의 증가는 건설 장비의 수요를 증가시키는 것으로 나타나며, 농촌에서 도시로 이주하는 사람들이 증가하면서 건설 장비의 수요를 더욱 빠르게 증가시킬 것으로 예상(Market and Market)
- ※ UN에 따르면 세계 인구는 2025년까지 95억 명에 이를 것으로 예상되며, 이 중

도시에서 거주하는 인구는 최소 64%를 차지할 것으로 예상 됨

○ (국내) 국내 건설 로봇시장은 2018년 160만 달러에서 2023년 340만 달러로 연간 16.8%의 성장률 예상(Market and Market, 2018)

- 2010년 후반 들어 대형 건설사, 엔지니어링 회사를 중심으로 건설기계 자동화(토공 부문), 드론을 활용한 스마트 현장관리 등 기술 개발 및 상용화가 본격화되고 있으며, 기업 간 활발한 협력시도가 이루어지고 있음
- 하지만, 국내 건설기업의 스마트 건설기술 활용수준에 따르면, 드론, BIM, 모듈러, 빅데이터 및 AI순으로 활용 수준이 높으나, ‘지능형 건설 장비 및 로봇기술’은 활용수준이 가장 낮게 나타남

※ 건설현장 로봇도입 활성화를 위해, 국내 건설산업의 특성을 고려한 기술개발과 구체적인 환경적·제도적 지원 정책을 연계한 세부적인 계획 수립이 필요함



[그림 1-29] 국내 건설기업의 스마트 건설기술 활용 수준
(한국건설산업연구원, 2019)

- 외부적으로는 SOC(사회간접자본) 예산 감소 등 건설시장의 축소 기조와 해외건설 수주가 감소하고 있고, 내부적으로는 인구 감소와 청년층의 3D 업종 기피 현상으로 인하여 한국인 기능 노동자를 찾기 힘들고, 건설 기술자 또는 기능자들이 고령화되어 가는 등의 문제가 발생
- 특히 국내 건설은 생산성이 낮은 상황에서 고령화 및 숙련인력 감소가 빠르게 진행되고 있어 디지털화 및 자동화 필요성이 증대되고 있음

※ 근로자공제회에 따르면, 건설현장 근로자 중 50대 이상이 약 61%에 이르며 점

차 증가하고 있는 추세('23.4)



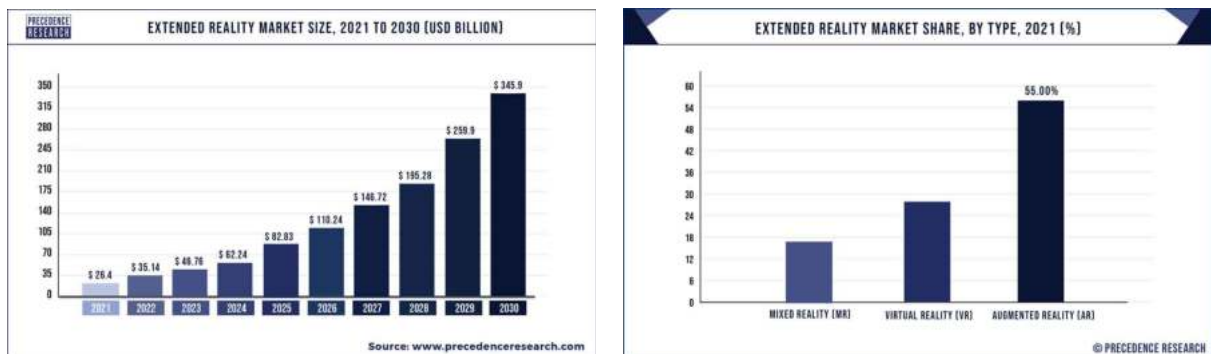
* 출처 : 국토교통부, 2018

[그림 1-30] 국내 건설 노동생산성 및 숙련인력 수급 전망 등

□ 확장현실 기술 시장

- (국외) 글로벌 XR 시장 규모는 2022년 351억 4천만 달러에서 2030년에는 약 3,459억 달러 수준으로 연평균 약 33% 높은 성장률 기대 (Precedence Research, 2022)

※ VR, AR, MR의 HW/SW/서비스 산업을 모두 포함한 시장규모



[그림 1-31] 글로벌 XR 시장 규모 전망

- XR 시장의 성장 주요 요인은 5G, 가상·증강현실, 스마트폰, 커넥티드 디바이스 간 협업 등이 급증한 결과이며, 동작기반컴퓨팅에 대한 집중도 증가로 꼽을 수 있음
- 기존에 메타(META)와 HTC, PICO 등의 중화권 업체들 등 소수 업체만 참여하던 XR 시장은 2023년부터 본격적인 글로벌 빅테크의 참여를 통해 시장이 개편될 것으로 전망(하나증권, 2023)

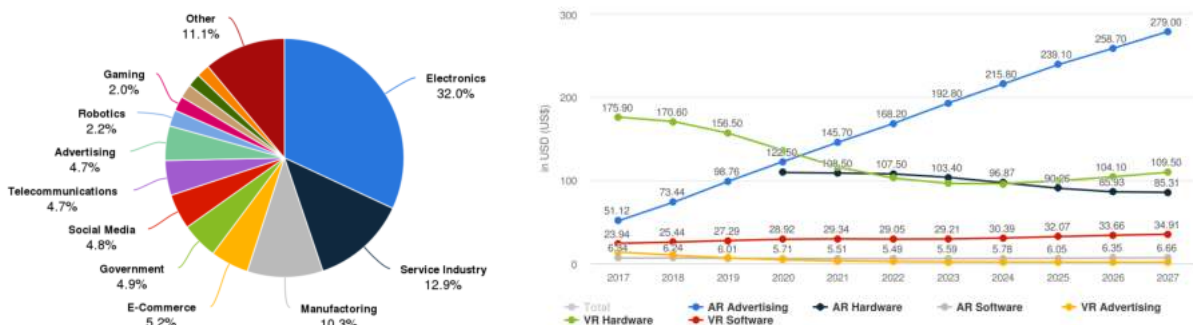
[표 1-11] 확장현실 시장 주요 기업 현황(하나증권, 2023)

기업명	내용
삼성전자	<ul style="list-style-type: none"> 과거 오클러스와 삼성 Gear VR을 출시했으나 저조한 수요에 단종 최근 구글, 퀄컴과 함께 차세대 XR 폼팩터로 시장 진출 선언하여 구글의 OS, 퀄컴의 칩셋과 삼성전자의 디바이스의 결합이 기대됨 삼성전자의 디스플레이 향 XR 진출 전략은 국내 다수의 벤더사에 긍정적인 영향 줄 것으로 예상
마이크로소프트 (Microsoft)	<ul style="list-style-type: none"> 산업용 AR 기기인 XR 제품 Holoens 판매하여 현실 오브젝트 인식을 통한 산업 생산성 증대에 기여함 추가적인 디바이스 개발 보다 기업 및 산업용 소프트웨어에 집중하며, 메타가 VR을 업무에 사용할 수 있도록 마이크로소프트 사의 Team, Windows, Workrooms 등을 제공하여 게임 뿐만 아니라 업무 및 소셜 기능을 확보하고 있음 앞으로 XR 시장 규모 확대에 따라 게임 산업 진출 또는 기기 생산 사업으로 확대 가능성이 큼
구글(Google)	<ul style="list-style-type: none"> Google Glass를 시작으로 AR시장을 선도하였으나 사생활 침해문제 등으로 판매가 중단 2022년 새로운 Google Glass를 공개하고 실시간/시각화 번역을 제공 최근 삼성전자와 차세대 XR 폼팩터 협력 계획을 발표하여 앞으로 역량이 주목받을 수 있을 것으로 예상
피코(PICO), 디피비알(DPVR), 에이치티시(HTC) 등 중화권 기업	<ul style="list-style-type: none"> 빠르게 시장 규모를 확대하여 2016년 약 68억 위안에서 2020년에는 약 413억 위안 수준까지 증가할 것으로 예상됨 높은 기술력에 약 500달러 미만의 가격 등 시장을 리드하고 있으나 내수시장 위주의 점유율을 가지는 것에 그침

- 글로벌 AR/VR 시장 매출은 2023년 311억 2000만 달러에 이를 것으로 예측되며 수익은 13.72%의 연간 성장률을 보여 2027년까지 520억 5천만 달러를 기록할 것으로 전망(Statista, 2023)

※ 이중 가장 큰 시장은 AR 소프트웨어로, 2023년 시장 규모 115억 8000만 달러

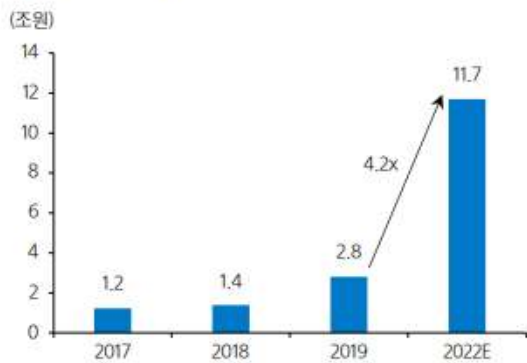
- 글로벌 AR/VR 6가지 시장(AR 광고, AR 하드웨어, AR 소프트웨어, VR 광고, VR 하드웨어, VR 소프트웨어) 중 사용자 당 매출 부분에서 AR광고의 성장이 예상되며 하드웨어 장비 및 서비스가 AR/VR 시장 전반의 과반수를 차지하고 있음(Statista, 2023)



[그림 1-32] 글로벌 AR/VR 산업별 점유율(좌) 및 산업별 사용자 당 매출(우)

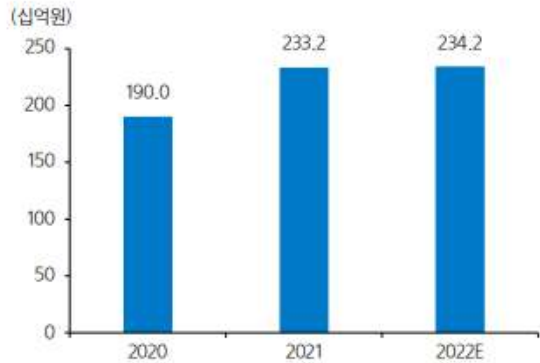
- (국내) 문화체육관광부에 따르면, 국내 XR 콘텐츠 시장 규모는 '19년 2.8조원에서 '22년 11.7조원으로 성장할 것으로 예상
- 정부는 AR/VR 콘텐츠 산업을 집중육성하고 공공서비스, 산업, 과학기술 분야와 실감콘텐츠를 결합한 'XR+α프로젝트'를 시행하고 있으며, 2020년에는 659억 원이 투자되었고 2025년까지 3,300억 원 이상을 투자할 계획 발표

국내 XR 콘텐츠 시장규모



자료: 문화체육관광부, 삼성증권

정부 XR+a 관련 투자 규모



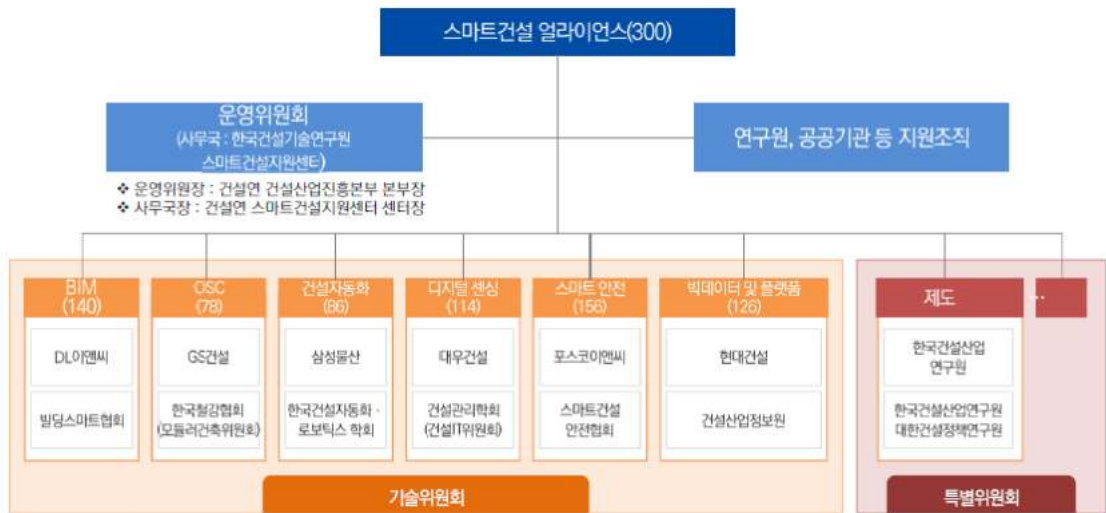
자료: 과학기술정보통신부, 삼성증권

[그림 1-33] 국내 XR 콘텐츠 시장규모(좌) 및 정부 XR+a 관련 투자 규모(우)

3. 국내 활용 자원 및 기반 구축 현황

☐ 건설로봇 관련 국내 연구인력 및 인프라 현황

- (건설분야) 종합건설, 전문건설, BIM 모델 제작, SW 개발 관련 대기업과 중소기업, 벤처기업 및 연구원, 협회, 학회 등이 있음
- (스마트건설 얼라이언스) 현대건설, 포스코이엔씨, 대우건설, 삼성물산, GS건설, DL이엔씨 등 총 300개 기업 참여(23.07.26 출범)하여 스마트건설 기술 관련 표준 제정, 선도 프로젝트 선정, 규제 및 애로사항에 대한 제도 개선 마련 등 역할



[그림 1-34] 스마트건설 얼라이언스 구성도(한국건설기술연구원, 2023)

- (한국건설기술연구원, 연구직 683명) 디지털 트윈 기반 건설자동화를 위한 BIM, 가상건설 기술 및 스마트 건설정보화와 공간정보 기반의 융복합 기술 연구 수행

※ 경기도 연천군 692,110㎡, 스마트 건설, MMS 등 연구과제 테스트베드 보유



[그림 1-35] 한국건설기술연구원 SOC 실증연구센터(연천)
(사진 출처: 한국건설기술연구원)

- (건설기계부품연구원) 국내 유일의 건설기계 신뢰성인증기관으로 국내기업 제품의 국산화·상용화에 필요한 시험 및 해석 인프라 보유



[그림 1-36] 스마트 건설기계 시험연구센터(새만금)
(사진 출처 : 건설기계부품연구원)

- (국가로봇테스트필드, 가상화 기반 실증평가 인프라) 가상-실환경 양방향 실증평가 기반 구축 내용이 포함되어 있으며 가상화 플랫폼 1식 (Co-op 클라우드 기반 로봇 서비스별 최적의 실증평가 체계 구축) 및 3년간 서비스별 실증 건수 45개 목표를 포함하고 있음
- o (로봇분야) 2022년 발표된 로봇산업 실태조사에 따르면, 로봇산업 7대 분야 전체 인력 48,719명 중 연구개발직은 13,026명에 해당함

표 V-37 인력(취업)현황_직무별/학력별(연구개발직)

(단위 : 명, %)

구분	인원	구성비	구분	인원	구성비
사무직 및 기타	10,925	22.4	고졸 이하	28	0.2
영업/마케팅	6,836	14.0	전문대 재학/졸업	535	4.1
연구개발	13,026	26.7	대학교 재학/졸업	8,848	67.9
기술직(생산)	17,657	36.2	석사 재학/수료/졸업	3,288	25.2
기타 단순근로	276	0.6	박사 재학/수료/졸업	327	2.5
총 계	48,719	100.0	총 계	13,026	100.0

[그림 1-37] 인력(취업현황): 직무별/학력별(연구개발직)(로봇산업진흥원, 2021)

※ 로봇산업 7대 분야 : 제조업용로봇, 전문가서비스용로봇, 개인서비스용 로봇, 로봇부품 및 소프트웨어, 로봇시스템, 로봇임베디드, 로봇서비스

- (6대 연구기관) 국내 로봇 연구기관으로는 과학기술연구원, 기계연구원, 로봇융합연구원, 생산기술연구원, 전자부품연구원, 전자통신연구원이 있으며 5,000명 이상의 국내 연구인력을 보유하고 있음

[표 1-12] 국내 로봇 연구기관 현황

주관기관	연구직(명)	연구 개발
한국과학기술연구원	2,377	- 상호작용 및 복합대응이 가능한 로봇 지능화 원천기술 개발을 최종 목표로 비정형 환경 대응 로봇 조작 기술 연구 수행
한국기계연구원	270	- 로봇과 스마트 융합으로 공장, 물류, 오프로드 등 비정형 환경/공정의 작업 자율화 핵심기술 확보 목표로 비정형 실내환경 협동로봇 기술 연구 수행
한국로봇융합연구원	176	- 국내 유일 로봇 전문 연구원으로 로봇융합산업전반의 연구개발, 연구인력 양성 및 기술 개발 진행하며 작업 지원을 위한 로봇기술 및 작업 현장 안전 특수 목적 로봇 연구개발 수행
한국전자기술연구원	451	- 정밀 기계가공 산업용 디지털 트윈 기술 및 스마트팩토리 구현 로보틱스, XR 디바이스 등 기술 개발 연구 수행
한국전자통신연구원	1,982	- 로봇인공지능, 휴먼증강, 감각디바이스 등 인간-로봇 상호작용 관련 원천기술 개발 연구 수행
한국생산기술연구원	-	- 생산시스템 스마트화 및 친환경화를 통한 미래산업 환경 대응을 위해 인간-로봇 공존을 위한 자율 서비스를 제공하는 작업파트너 로봇 핵심기술 개발 연구 수행

□ 원격제어 건설로봇 등록 기준 마련¹⁾

- 원격제어 건설로봇(무인지게차 등)은 조종자를 필수로 가정하는 기존 정의에 맞지 않아 등록 및 기존 면허제도 적용이 불가능한 현황을 고려하여, 관계부처인 국토부 및 산업부는 아래와 같은 세 가지 정비방향을 수립함
 - 안전성 검증 및 기준 개발(~'23, 산업부·국토부)
 - ※ 고위험 건설기계 안전관리 체계 고도화 과제('23~'27, 국토부), 로봇산업핵심기술('24~, 산업부) 병행
 - 건설기계 형식승인·신고 개선(~'25, 국토부)
 - 등록제 개선방안 마련(~'27, 국토부)

□ 스마트 건설기술 활성화를 위한 국토교통부 차원의 추진 체계

- 국토교통부는 2018년「스마트 건설기술 로드맵」을 수립하여, '25년까지 스마트 건설기술 활용 기반을 구축하고, '30년까지 건설 자동화 완성을 목표로 설정하여 추진 중임
 - 「스마트 건설기술 로드맵」에 포함된 스마트 건설기술에는 BIM, 빅데이터·인공지능, 드론, 모듈러, 가상현실·증강현실, 3D 프린팅, 지능형 건설장비, 로봇기술 등임
 - 이들 중 BIM, 빅데이터·인공지능, 드론, 가상현실·증강현실, 지능형 건설장비, 로봇기술 등은 본 과제의 핵심 요소기술로, 본 과제의 수행이 스마트건설 기술 로드맵의 목표 달성에 일조가 가능함
- 국토교통부는 스마트 건설기술 로드맵의 성공적인 추진을 위하여, 2022년 7월「스마트건설 활성화 방안」을 수립하여 시행 중임
 - 수립 이유는 건설 전 과정에 스마트 기술이 활성화될 수 있는 환경을 구축하여 생산성, 안전·환경 등 건설산업이 직면한 과제를 해결하고, 해외 스마트 건설시장에서 경쟁력을 확보할 수 있도록 하기 위함

1) 산업통상자원부 '첨단로봇 규제혁신 방안'

입

- 이를 위하여, 건설산업 디지털화(BIM 안착 등), 생산시스템 선진화(건설기계 무인조종이 가능하도록 건설기준 제/개정 등), 스마트 건설산업 육성(기업 애로사항 해결 등 산업 육성)의 3대 중점과제 아래 10개 기본과제, 46개 세부과제를 구성하여 추진 중임



[그림 1-38] 스마트건설 활성화 방안(국토교통부, 2022)

○ 스마트 건설기술의 도입 및 확산을 위한 건설기준의 제정

- 최근 건설산업의 생산성 향상과 안정성 확보를 위한 스마트건설기술 (건설자동화, OSC 등)의 개발 및 적용이 점차 확대되고, 관련 국토교통부 정책*이 추진되는 상황에서 스마트건설기술의 현장 적용 활성화를 위한 건설기준이 장기 계획을 기반으로 개발('21~) 중임

* 스마트건설기술 로드맵('18.10), 스마트건설 활성화 방안('22.7)

- KCS 10 70 00 건설자동화 건설공사 코드 제정(기술혁신과) 현황

- KCS 10 70 05 : 2023 건설자동화 일반
- KCS 10 70 10 : 2023 머신가이던스 및 머신컨트롤 시공 일반
- KCS 10 70 20 : 2021 지능형 다집공
- KCS 10 70 50 : 2023 OSC 건설공사 시공기준

4. 기존 사업과의 유사성 및 차별성

□ 개요

유사과제						
과제명	주관 부처	총 연구 기간	총 연구 비 (백만원)	유사점	차별성	연계·활용 방안
지능형 건설장비 관계기술 개발 (스마트건설기술개발사업)	국토 교통 부	'20.0 4~ '25.1 2	14,408	원격조종 및 관계 기술 (토공/포장장비)	레이더, 도저, 롤러, 페이퍼 및 덤프트럭 등 토공/포장장비의 원격조종 및 관계에 관한 연구로, 양팔 매니플레이터를 포함한 자율주행 로봇 플랫폼의 원격조종 및 관계	현장 원격조종을 위한 클라우드 네트워크 등 연계
도로구조물 원격·자동화 시공 기술 개발 (스마트건설기술개발사업)	국토 교통 부	'20.0 4~ '25.1 2	10,744	3차원 영상 및 BIM 모델 정보를 활용한 원격 로봇 제어 기술	고소작업 3층에 대한 사전준비/본작업/사 후작업 전과정에 대한 무인화 시공 목적, 교각 위치 조정작업(3차원 이동) 대비 고도화된 로봇 제어 기술이 요구됨	3차원 센싱, BIM 모델 정보 기반 부재, 환경 인식 기술 연계, 공통 작업자 원격제어 교육 시스템 개발 후 연계
스마트건설 대응을 위한 토공 건설기계용 원격제어시스템 및 기술 개발	산업 통상 자원 부	'22.0 5~ '25.1 2	2,802	원격제어 운영/관계시스템 개발 (토공현장 건설기계용)	토공현장보다 상대적으로 비정형화되고 복잡도가 높은 건축현장 대상	원격제어 운영/관계시스템의 XR 기능 등 연계
초실감 텔레프레즌스 로봇의 비정형 작업 고도화를 위한 원격자율 공유제어 프레임워크 원천기술 및 인공지능 요소기술 개발	산업 통상 자원 부	'23.0 4~ '26.1 2	948	원격 이동형 매니플레이터 작업 구현을 위한 자율성 공유제어 기술	단일 로봇 원격제어보다는 작업자-멀티로봇이 정밀한 자율작업 구현에 집중	공유제어 기술 등 AI 핵심 원천기술 연계
AI 및 로봇을 활용한 조선/항공/건설 도장 공정 자동화 플랫폼 기술 개발	산업 통상 자원 부	'23.0 4~ '25.1 2	1,437	AI 기반 도장공정 자동화 솔루션	5가지 높은 수준의 작업이 통합된 건설현장 자율 로봇 시스템	실내외 도장이 가능한 매니플레이터 플랫폼 연계
벽체 천장 등 실내 고소 도장 로봇 기술 개발	산업 통상 자원 부	'21.0 4~ '23.1 2	3,665	정형화된 실내 수조 밀폐형 고소 도장작업이 가능한 원격 도장 로봇	비정형화된 작업공간 내 작업, 구체적인 작업지시(개입)	구조물 영상인식을 통한 자율 작업 기술 등 연계
초대형 멤브레인 LNG 화물창 제조용 이동형 용접로봇 기술 개발	산업 통상 자원 부	'21.0 4~ '24.1 2	397	용접공정 지원이 가능한 용접로봇 플랫폼 개발 (최대 3m LNG 화물창 내부)	최대 20m 높이의 비정형화된 환경에서의 용접 자동화 솔루션 개발	레이저 하이브리드 용접 공정기술 등 연계
촉각센싱 엔드이펙터 기반의 모방학습 기술을 활용한 자율조작 및 파지기술 개발	산업 통상 자원 부	'22.0 4~ '26.1 2	900 ('22년)	사물 파지/조작에 대한 계획, 툴 제어 기술	단순 파지 공정보다는 고소 정교 작업에 집중	영상 기반 인간 동작 학습 기술 등 연계

인간을 물리적 상호작용을 통해 지원하는 로봇을 위한 가상현실 환경 인간시연을 모방하는 학습 기술 개발	산업통상자원부	'18.12~'22.03	731	AR/MR기반 인간동작 모방학습 기술	작업 행동을 단순 모방하는 모방학습보다는 작업자 의도 기반 자율작업에 집중	딥러닝 기반 모방학습 기술 및 지식표현-추론 융합기술 연계
클라우드 환경에서 AR/MR 기반 로봇팔 모방 학습 제어 기술 개발	산업통상자원부	'20.12~'24.15	1,054			강화학습 기반 로봇팔 움직임 학습 알고리즘 등 연계
XR 환경에서의 공유 자율성 기반 인간-로봇 실시간 원격 제어 및 협업 기술개발	과학기술정보통신부	'22.11~'26.12	2,012	공유 자율성 기반 원격 인터랙션 협업을 위한 XR 기반 소프트웨어	비정형 건설 환경의 작업자 인지능력 및 XR기반 원격 협업 효율성 증대를 위한 실시간 고해상도 의미론적 BIM 기반 사용자 인터페이스 개발	범용적인 공유 자율성 모델을 본 연구의 Level2 원격제어에서 참조 및 조정 후 활용
열악 환경 비정형 작업을 위한 3D협업 텔레오퍼레이션 기술 개발	과학기술정보통신부	'21.04~'24.12	4,081	작업자와 원격로봇 간 동기식 3D 객체인지 증강현실 및 정밀제어 기술	실환경/XR 시연 데이터셋 수집 기술 개발을 통해 건설고소작업에 특화된 로봇 협업 모델 개발 및 실증 목표, 용접 등 고정밀 작업 및 품질검사를 위한 XR 기술 추가	시연 데이터셋 및 학습 모델 공유 및 연계를 통해 다양한 산업환경 조건에서의 모델 범용성 확보
XR 사용자 상호작용 평가 및 적용 기술 개발	과학기술정보통신부	'22.04~'25.12	2,492	XR기반 상호작용 및 시뮬레이션 기술을 통한 사용자 경험 향상 목표	XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술 및 인터페이스 개발에 초점 (사용자 경험 측정 프레임워크 개발 초점 대비)	XR 사용자 경험 품질(QoE) 측정 프레임워크 이용 원격제어-로봇플랫폼 사용자 경험 평가, 작업자 교육 프로그램 개발에 활용

□ 기존유사사업 현황 도출 방법

○ NTIS 검색 방법

- NTIS를 통해 본 사업과 관련 키워드 검색: 건설/로봇/AI/고소/원격제어/자율화/가상현실/증강현실/혼합현실/확장현실
- 10년간(2013~2023년) 본 사업과 직접적으로 관련된 국가 연구개발과제를 대상으로 검토

□ 기존사업과의 차별성

○ 산업부 기존사업과의 차별성

- 기존 로봇산업기술개발은 특정 환경/단일 작업을 위한 로봇플랫폼기술로 설계 및 엔지니어링 되어있어서 건설현장에 적용이 불가하며, 실시간 변화하는 건설작업환경-작업자가 상호작용하는 적응형 제어 기술 등 작업지능 및 자율주행 기술개발이 별도로 이루어져야함
- 또한, 기존 건설기계자동화기술개발은 상용 중장비기계와 IoT기술을 결합하여 단순 주행/운용/조작을 사용자 가시환경 내에서 조작기로 제어하는 수준이며, 본 사업에서 요구하는 고소현장/고정밀/반자율화 작업을 위한 지능형 건설로봇 작업/주행지능/제어 기술개발과는 기술 수준 및 개발범위가 상이함
- 픽애플레이스 등 단순 작업을 넘어서 여러 가지 높은 수준의 작업이 통합된 다목적 건설현장 자율로봇, 그리고 이러한 자율로봇들이 산재되어 있는 환경에서 단일 작업자가 로봇 군집을 통제하기 위한 다중 로봇 시스템 개발에 관한 연구개발과제는 아직까지 없는 것으로 판단됨

[표 1-13] 산업부 기존사업과의 차별성

분야	과제명(사업명)	주요 연구내용	차별성
초실감, 텔레프레즌스 로봇 제어기술	초실감 텔레프레즌스 로봇의 비정형 작업 고도화를 위한 원격자율 공유제어 프레임워크 원천기술 및 인공지능 요소기술 개발 (로봇산업기술개발)	- 원자력발전소/배전선로 유지보수 작업을 사람을 대신하여 안전하고 정확한 원격 이동형 매니플레이터 작업 구현을 위한 자율성 공유제어(autonomy shared control) 및 원격 작업 데이터 기반 자율 작업 전환을 위한 AI 핵심 원천기술 개발	- 기존 과제는 초실감 감각피드백 기반 단일 로봇 원격제어에 대한 연구로, 건설현장에서 작업자-멀티로봇이 정밀한 자율작업을 구현해야하는 본 과제목표와는 차이가 있음 (ex) 용접 정밀도 0.1mm 이하

분야	과제명(사업명)	주요 연구내용	차별성																
		<ul style="list-style-type: none"> * 자율성 공유제어 : 원격 로봇 작업자의 작업 피로도를 낮추고, 정확한 작업이 가능하도록 로봇의 오토노미와 원격조작을 지능적으로 융합하는 제어 기법 * 로봇의 오토노미 작업 수행을 위한 인공지능 기반 그래스핑 포즈 인식 기술 개발 - 원격 작업자의 감각(시각, 촉각 등) 증강을 위한 HMI(Human-machine interface) 장치 구현 및 초실감 클라우드 XR 기술 * 초실감 촉각 피드백을 위한 HMI 설계(햅틱 글로브) * 운동 시차(Motion parallax) 및 지연 완화 기법을 통한 초실감 시각 피드백 개발 * 원격 작업 레이턴시 최소화 및 고용량 데이터 처리를 위한 고속 엣지 클라우드 네트워크 구축 기술 - 원격제어를 통한 비정형 단위작업 행동 모방 학습 기술 개발 - 다수의 작업자 간 협동하는 작업은 제외함 <table border="1" data-bbox="284 1144 1027 1397" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="2">핵심 성능지표</th> <th>단위</th> <th>달성 목표</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>원격입력 응답지연 시간(MTP¹) Latency)</td> <td>ms</td> <td>≤ 20</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>공유제어 적용 시 원격작업 시간감소비율²⁾</td> <td>%</td> <td>≥ 50</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>원격 작업 로봇 자율 재현 성공률</td> <td>%</td> <td>≥ 80</td> </tr> </tbody> </table> <p data-bbox="284 1429 967 1460">* 총연구기간/총괄연구기관 : '23.04~'26.12 / 한국과학기술원</p>	핵심 성능지표		단위	달성 목표	1	원격입력 응답지연 시간(MTP ¹) Latency)	ms	≤ 20	2	공유제어 적용 시 원격작업 시간감소비율 ²⁾	%	≥ 50	3	원격 작업 로봇 자율 재현 성공률	%	≥ 80	<ul style="list-style-type: none"> - 건설현장은 건설단계에서 끊임없이 작업환경 변화와 부재변형*이 발생하므로, 3D 자율 스캐닝을 통한 실시간 피드백이 필요함 * 비틀림, 압축, 부식 등 (ex) 복잡한 환경에서도 빠르고 정확한 공간/재료정보 수집이 가능한 3D 고속 자율 스캐닝 로봇플랫폼 및 3차원 포인트 클라우드 모델 개발 - 고정밀 자율 건설작업을 구현하기 위해서, 고속 엣지 컴퓨팅을 적용한 디지털트윈 구현이 필요함 * 국외에서도 물리-가상공간 간의 시공간 정보 오차를 줄이기 위한 연구 수행 중 - 구조화되지 않은 환경에서 발생하는 복잡한 조작작업에 작업자(전문가)의 의사결정은 여전히 필요함, 따라서 작업수행 중 작업자(전문가)의 피드백을 통한 로봇의 동작계획 수정이 필요함 (ex) 직관적인 인터페이스를 통해 작업자(전문가)의 지식/경험을 바탕으로 로봇 제어 단순화
핵심 성능지표		단위	달성 목표																
1	원격입력 응답지연 시간(MTP ¹) Latency)	ms	≤ 20																
2	공유제어 적용 시 원격작업 시간감소비율 ²⁾	%	≥ 50																
3	원격 작업 로봇 자율 재현 성공률	%	≥ 80																
도장 자동화	AI 및 로봇을 활용한 조선/항공/건설 도장 공정 자동화 플랫폼 기술 개발 (로봇산업기술개발)	<ul style="list-style-type: none"> - 항공/조선/건설 대형기계 및 건설 구조물 등의 도장 공정에 활용 가능한 AI 기반 도장공정 자동화 솔루션과 리프트 기능이 포함된 모바일 머니플레이터가 결합된 도장 공정 자동화 플랫폼(TRL 8) * 실내/외 도장이 가능한 머니플레이터 결합형 로봇 시스템 설계 * 고소작업용 장비(크레인, 고소차, 곤돌라 등)와 결합형 기구부 설계 	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 과제는 크레인 등 중장비를 활용하여 스마트리프트에 머니플레이터를 씌는 형태로, 실제 건설현장에서는 경제성이 떨어져 활용하기 어려움 (ex) 로봇 이송, 배치, 조작 등이 용이한 가변형 통합플랫폼 개발 필요 - 단일 건설작업이 아닌, 3가지 높은 수준의 작업이 통합된 건설현장 자율로봇시스템을 위해서는 용접, 내화뿔칠, 도장 등 작업별 로봇팔 및 엔드이펙터의 자율 동작계획 개발 및 최적화 필요함 																

분야	과제명(사업명)	주요 연구내용	차별성																																																						
	핵심 성능지표		단위																																																						
			달성 목표																																																						
	1	적용 가능 도장 공간 (Work-space)	m×m 30×12																																																						
2	도장 균일도	%	≤±5																																																						
3	이동형 매니플레이터 주행 경로 정밀도	mm	≤ 30																																																						
* 총연구기간/총괄연구기관 : '23.04~'25.12 / 마젠타로보틱스																																																									
	벽체 천장 등 실내 고소 도장 로봇 기술 개발 (로봇산업기술개발)	<ul style="list-style-type: none"> - 밀폐 공간 내의 벽체/천장에 대해 無비계 고소 도장작업이 가능한 자율 주행 기반의 원격 도장로봇 * 구조물 영상인식을 통한 자율 작업/주행 기술이 통합된 형태 * 수직다관절 로봇과 XY 스테이지 형태를 조합하여 도장면적 극대화 구현 																																																							
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>평가 항목</th> <th>단위</th> <th>개발 목표치 (1단계)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1. 이동형플랫폼 위치정밀도</td><td>mm</td><td>≤50</td></tr> <tr><td>2.이동형 플랫폼 이동 속도</td><td>mm/s</td><td>≥300</td></tr> <tr><td>3. 상/하 리프트 이동 속도</td><td>mm/s</td><td>≥100</td></tr> <tr><td>4. 도장모듈 이송 속도</td><td>mm/s</td><td>≥800</td></tr> <tr><td>5. 도장 도막 균일성</td><td>%</td><td>≤20</td></tr> <tr><td>6. 회전반경</td><td>m</td><td>≤ 0.5m</td></tr> <tr><td>7. 상단작업높이</td><td>m</td><td>≥12</td></tr> <tr><td>8. 적용가능 도료수</td><td>종</td><td>≥4</td></tr> <tr><td>9. 로봇팔 가반하중</td><td>kg</td><td>-</td></tr> <tr><td>10. 상탑진동폭</td><td>cm</td><td>≤5</td></tr> <tr><td>11.레이저비전 측정 정밀도</td><td>mm</td><td>±1.5</td></tr> <tr><td>12. 도장 가능 면적</td><td>mxm</td><td>2.5x1.5</td></tr> <tr><td>13. 이동플랫폼 주행범위</td><td>mxm</td><td>30x30</td></tr> <tr><td>14. 방수/방진</td><td>-</td><td>IP53</td></tr> <tr><td>15. 도장작업 속도</td><td>m²/h</td><td>≥100</td></tr> <tr><td>16. 로봇 AI 연구데이터 제출</td><td>-</td><td>유</td></tr> <tr><td>17. 도장 로봇 이송 시 고장진단 기능</td><td>-</td><td>유</td></tr> </tbody> </table>	평가 항목	단위	개발 목표치 (1단계)	1. 이동형플랫폼 위치정밀도	mm	≤50	2.이동형 플랫폼 이동 속도	mm/s	≥300	3. 상/하 리프트 이동 속도	mm/s	≥100	4. 도장모듈 이송 속도	mm/s	≥800	5. 도장 도막 균일성	%	≤20	6. 회전반경	m	≤ 0.5m	7. 상단작업높이	m	≥12	8. 적용가능 도료수	종	≥4	9. 로봇팔 가반하중	kg	-	10. 상탑진동폭	cm	≤5	11.레이저비전 측정 정밀도	mm	±1.5	12. 도장 가능 면적	mxm	2.5x1.5	13. 이동플랫폼 주행범위	mxm	30x30	14. 방수/방진	-	IP53	15. 도장작업 속도	m ² /h	≥100	16. 로봇 AI 연구데이터 제출	-	유	17. 도장 로봇 이송 시 고장진단 기능	-	유	<ul style="list-style-type: none"> - 정형화된 실내 수조 밀폐형 큐브형태 작업공간*에서 도장작업만 가능 * 실내 환경 상온(5도~35도) 조건 - 로봇팔 HMI에 대한 연구 부족 (작업속도 조절, 작업 일시정지 및 작업재개 기능정도만 구현되어, 디테일한 작업지시(개입)은 불가능)
평가 항목	단위	개발 목표치 (1단계)																																																							
1. 이동형플랫폼 위치정밀도	mm	≤50																																																							
2.이동형 플랫폼 이동 속도	mm/s	≥300																																																							
3. 상/하 리프트 이동 속도	mm/s	≥100																																																							
4. 도장모듈 이송 속도	mm/s	≥800																																																							
5. 도장 도막 균일성	%	≤20																																																							
6. 회전반경	m	≤ 0.5m																																																							
7. 상단작업높이	m	≥12																																																							
8. 적용가능 도료수	종	≥4																																																							
9. 로봇팔 가반하중	kg	-																																																							
10. 상탑진동폭	cm	≤5																																																							
11.레이저비전 측정 정밀도	mm	±1.5																																																							
12. 도장 가능 면적	mxm	2.5x1.5																																																							
13. 이동플랫폼 주행범위	mxm	30x30																																																							
14. 방수/방진	-	IP53																																																							
15. 도장작업 속도	m ² /h	≥100																																																							
16. 로봇 AI 연구데이터 제출	-	유																																																							
17. 도장 로봇 이송 시 고장진단 기능	-	유																																																							
* 총연구기간/총괄연구기관 : '21.04~'23.12 / (주)로보프린트, KIRO																																																									
용접 자동화	초대형 멤브레인 LNG 화물창 제조용 이동형 용접로봇 기술 개발 (총괄과제) (로봇산업기술개발)	<ul style="list-style-type: none"> - (1세부) LNG 화물창 내에서 무레일 방식으로 이동 가능한 로봇 플랫폼과 최대 1mx3m급 면적의 초대형 멤브레인을 대상으로 용접 정밀도 0.1mm의 용접공정 지원이 가능한 용접로봇 플랫폼 개발 - (2세부) 이동형 용접로봇에 탑재되어 Corrugation이 있는 대면적 멤브레인 시트를 3m/min 이상 용접속도로 용접하여, 선급 요구 품질을 구현할 수 있는 레이저 하이브리드 용접 장비와 	<ul style="list-style-type: none"> - LNG 화물창 내부에 적용되는 특수용접에 정형화된 용접자동화솔루션으로, 건설현장에 적용 불가 - 건설현장 철골구조물에 사용되는 용접기를 활용한 용접자동화솔루션개발이 필요함 - 기존 과제는 30kg 이상의 고가반하중 1.5m 롱리치형 용접용 로봇팔 형태로, 최대 3m 높이로 고소작업 제약이 있음 																																																						

분야	과제명(사업명)	주요 연구내용	차별성
		<p>공정기술을 개발</p> <p>* 고속, 고정밀, 저진동, 정밀 궤적 추적</p>	<p>* 실제 LNG화물창 높이 30m이상</p> <p>- 건설현장은 작업환경이 구조화되지 않으므로, 작업높이에 관계없이 로봇플랫폼은 유연한 작업수행이 가능해야함</p>
		<p>* 총연구기간/총괄연구기관 : '21.04~'24.12 / 한국기계연구원</p>	
모방학습	<p>촉각센싱 엔드이펙터 기반의 모방학습 기술을 활용한 자율조작 및 파지기술 개발 (로봇산업기술개발)</p>	<p>- 다양한 서비스 환경에서 사전 학습되지 않은 사물 또는 작업에 대하여 카메라 및 촉각센서를 이용하여 사물의 재질과 형태를 파악하고, 파지/조작에 대한 계획, 톨 제어를 스스로 판단하여 수행하는 기술 개발(TRL 5)</p> <p>* 영상기반 사람의 동작을 학습하여 복잡하고 낯선 환경에서의 정교한 조작동작에 대한 학습시간을 단축하고 성공확률을 높이기 위한 기술</p>	<p>- 단순 픽업플레이스 공정을 넘어서 고소작업 위치에서 용접, 도장 등 정교한 작업이 필요</p> <p>- 본 건설로봇과제에서 작업자 의도 기반 자율작업을 목표로 하여, 작업 행동을 단순 모방하는 모방학습보다 발전된 형태</p>
		<p>* 총연구기간/총괄연구기관 : '22.04~'26.12 / 한국전자기술연구원</p>	
굴삭기 원격제어	<p>스마트건설 대응을 위한 토공 건설기계용 원격제어시스템 및 기술 개발 (기계장비산업기술개발)</p>	<p>- 원격제어 운영/관제시스템의 영상 스트리밍 고도화 및 AR 기능 개발</p> <p>- 이동형 원격제어 스테이션 시제품 제작</p> <p>- 건설기계용 원격제어 텔레매틱스 게이트웨이 시제품 제작</p> <p>- 영상 송수신 장치 연결서버 개발</p> <p>- 영상 송수신 보드 UHD급 개발</p> <p>- Retrofit 밸브 1차 시제품 개발</p> <p>- 굴착기 원격제어 안전성 확보 제어 개발</p> <p>- Bucket-Soil Interaction 모델 강인성 검증</p> <p>- 원격제어 네트워크 기술 개발</p> <p>- 건설기계용 기능안전 (ISO 19014) 교육</p> <p>- 굴착기/휠로더용 원격제어시스템 상세 기능 요구사항 수립 및 평가</p>	<p>- 시공현장은 토공현장보다 상대적으로 비정형화되고, 실내 복잡도가 높은 건축현장 대상</p> <p>- 원격제어 운영/관제시스템의 사용자 경험 부문을 포함한 XR 정밀 몰입 기능으로 일부 차이가 있음. 기본적 AR원격제어 프레임워크는 연계가 가능할 것으로 판단</p>
		<p>* 총연구기간/총괄연구기관 : '22.05~'25.12 / (주)다산네트웍스-한국생산기술연구원, 한국기계연구원 등 (공동)</p>	

○ 국토부 기존사업과의 차별성

- 본 과제와 연관성이 높은 국토부의 주요 연구개발과제(사업)를 분석한 결과, 주로 토공현장에서 원격으로 건설장비를 자동화하기 위한 원격조종 및 관제기술 개발에 집중된 것으로 분석
- 기존 MR기반 원격작업은 교각 위치 조정작업 등 단순 2차원 혹은 3

차원 이동을 위한 제어 수준이며, 본 사업에서 요구하는 용접 등 복잡한 건설고소작업을 위한 고도의 제어 기술 개발, 작업자의 사용 편의성을 높이기 위한 XR기반 상호작용 기술 개발과는 기술 수준 및 개발범위가 상이함

- 건설장비의 이동 및 부재의 거치 등 단순 작업을 넘어서 여러 가지 높은 수준의 작업이 통합된 다목적 건설현장 자율로봇, 지능형 로봇의 학습능력을 결합한 Level2 반자율화 제어를 위한 연구개발과제는 아직까지 없는 것으로 판단됨

[표 1-14] 국토부 기존사업과의 차별성

분야	과제명(사업명)	주요 연구내용	차별성
건설장비 자동화 및관제기술	지능형 건설장비 관제기술 개발 (스마트건설기술개발사업)	<ul style="list-style-type: none"> - 지능형 건설장비 관제 플랫폼 개발을 위한 클라우드 BIM, 빅데이터 기반 최적경로 네비게이션 - 다양한 건설장비 자동화 수준(유인, MG/MC, 무인 원격, 자율 등)을 고려한 AI 기반 상황 인지 및 판단 기술 개발 - IoT센서 네트워크 및 엣지컴퓨팅을 기반으로 한 스마트 네트워크 환경에서 AR/VR 등을 활용하여 건설장비를 원격 조종 환경 개발 	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 과제는 토공/포장장비(레이더, 도저, 롤러, 페이버 및 덤프트럭 등)의 원격조종 및 관제에 관한 연구로, 6자유도를 갖는 두 개의 팔과 모바일 플랫폼으로 이루어진 모듈형 로봇플랫폼을 원격조종 및 관제하기 위한 본 과제와는 차이가 있음 * 토공/포장장비는 해외에서도 활발히 진행되고 있는 모바일 로봇의 원격조종과 같은 매커니즘이며, 기술적 진보가 상대적으로 많이 이루어진 분야임 - 건축현장은 토공현장 대비 건설단계에서 끊임없이 작업환경 변화와 부재변형이 발생함을 고려해야함
		* 총연구기간/총괄연구기관 : '20.04~'25.12 / 한양대학교산학협력단	
도로 구조물스마트 건설기술	도로구조물 원격·자동화 시공 기술 개발 (스마트건설기술개발사업)	<ul style="list-style-type: none"> - 실감형 VR·AR을 활용한 원격 시공 기술 및 머신러닝 기반 TBM 자동화를 바탕으로 교량, 터널 원격·자동화 시공 기술 개발 * 3차원 센싱, BIM 모델 정보를 기반으로 부재의 위치/형상/자세, 환경을 인식하여 원격 로봇을 이용하여 부재를 최종 위치에 반자율적으로 정밀하게 거치시키기 위한 기술 개발 * 고소/고위험 공종인 교각 현장시공을 무인으로 수행하기 위한 원격시공 장비(로봇, 작업대, 거푸집)와 3차원 영상 및 BIM 모델 정보를 활용하여 MR환경에서 원격으로 제어하는 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 과제는 사람의 조종 능력에 의존하는 원격 제어 기술에 대한 연구로, 본 과제는 원격조종, 자율형 공유제어 기술을 더욱 확장하여 작업자의 직접교시를 학습에 기반한 지능형 로봇의 의사결정 능력을 결합한 감시제어(supervisory control) 기술을 개발하는데 목표를 둠 - 기존 과제는 토공현장의 한 가지 고소 공종에서 상대적으로 정형화되고 복잡도가 낮은 작업을 대상으로 하나, 본 과제에서는 건축현장의 다양한 고소 작업을 대상으로 함

분야	과제명(사업명)	주요 연구내용	차별성
	* 총연구기간/총괄연구기관 : '20.04~'25.12 / 한국건설기술연구원		* 건축현장은 다수의 골조 등 작업 방해요소가 많고 여러 공종이 동시에 진행되는 비정형화되고 복잡도가 높은 현장임

○ 과기부 기존사업과의 차별성

- 기존 과기부 연구개발과제는 공유 자율성 기반 인간-로봇 협업을 위한 XR 기반 원격제어 기술 개발이라는 연구 목표 상의 유사성이 있으나, 건설작업에 특화된 기술개발은 아직까지 없는 것으로 파악됨.
- 본 사업은 이를 위해 공종 특성화 기술 개발, 특히 실환경/XR 시연 데이터셋 수집 기술 등 로봇 학습 기반 반자율화 기술 개발에 건설 고소작업에 특화된 데이터 활용 및 최적화 목표

[표 1-15] 과기부 기존사업과의 차별성

분야	과제명(사업명)	주요 연구내용	차별성
XR기반 원격제어 기술	XR 환경에서의 공유 자율성 기반 인간-로봇 실시간 원격 제어 및 협업 기술개발	<ul style="list-style-type: none"> - 공유 자율성 기반 원격 인터랙션-협업을 위한 XR 기반 소프트웨어 개발 - 원격로봇을 위한 현장 직업지식 학습 및 재현 기술 개발 - 공유 자율성 기반 인간-로봇 원격 상호작용 기술 개발 - 공유 자율성 기반 공유 제어 및 다기능 로봇 엔드 모듈 개발 - 저지연·고신뢰 데이터 송수신을 위한 원격 작업용 통신망 기술 	<ul style="list-style-type: none"> - 비정형 건설 환경의 작업자 인지능력 및 XR기반 원격 협업 효율성 증대를 위한 실시간 고해상도 의미론적 BIM 기반 사용자 인터페이스 개발
	* 총연구기간/총괄연구기관 : '22.11~'26.12 / 한국과학기술연구원		
	열악 환경 비정형 작업을 위한 3D협업 텔레오퍼레이션 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> - 3종 테스트베드(재난, 공장, 축사 등)에서 비정형 작업(손동작 제스처 22자유도 이상, 반복 정확도 95% 이상)이 가능한 원격 협업(손가락 반복 정밀도 0.006rad 이내, 절대 정밀도 1mm 이내, 조작기 영상 재생률 70Hz 이상, 조작기 제어명령 생성 주기 60Hz 이상) 텔레오퍼레이션(실시간 객체인식 검출률 95%이상, 동적 객체 추적률 68% 이상, Semantic segmentation 68mIoU 이상) 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> - 실환경/XR 시연 데이터셋 수집 기술 개발을 통해 건설고소작업에 특화된 로봇 협업 모델 개발 및 실증 목표, 용접 등 고정밀 작업 및 품질검사를 위한 XR 기술 추가
	* 총연구기간/총괄연구기관 : '21.04~'24.12 / 한국전자기술연구원		

분야	과제명(사업명)	주요 연구내용	차별성
	XR 사용자 상호작용 평가 및 적용 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> - XR QoE 측정 프레임워크 및 DB 구축 기술 개발 - XR QoE 정량화 모델링 및 교육효과성 분석 기술 개발 - XR 학습 성취도 관리 및 증진형 인터랙션 기술 개발 - 실가상통합 메타버스 교육/훈련 서비스 구축 및 적용 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 과제는 XR기반 상호작용 및 시뮬레이션 기술을 통한 사용자 경험 향상에 초점을 두고 있으며, 본 사업은 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술 및 인터페이스 개발에 초점
* 총연구기간/총괄연구기관 : '22.04~'25.12 / 한국전자통신연구원			

□ 기존사업과의 차별화 전략

○ 기존 건설 로봇 연구개발과제 성과물의 현장 적용 한계

- 완전히 통제된 정형화된 환경에서 BIM 설계모델에 의존, 현장 상황 업데이트에 대한 반영이 이루어지지 않음
- 복잡한 구동 방식으로 로봇 기술에 대한 비전문가인 현장 작업자의 진입장벽
- 전적으로 작업자의 조종에 의존하거나, 완전 자동화를 시도함으로써 로봇 작업에서 작업자를 배제
- 특정 환경/단일 작업을 위한 로봇플랫폼기술로 설계 및 엔지니어링 되어있어서 건설현장에 적용이 불가하며, 실시간 변화하는 건설작업환경-작업자가 상호작용하는 적응형 제어기술 등 작업지능 및 자율주행 기술개발이 별도로 이루어져야함

○ 지능형 로봇의 학습 능력을 바탕으로, 사전 학습된 작업은 로봇이 자율적으로 수행하고, 필요시 작업자가 개입하는, 건설 현장의 반자동화된 인간-로봇 협업 방식의 구현이 가능함

- 다중 센서 융합을 통한 3차원 정밀측위를 바탕으로 비정형 환경을 정밀하게 인식하고, 이러한 비구조화된 환경에서 사전 학습(Pre-trained)된 작업을 반자율적으로 수행할 수 있도록 함
- 사전 학습 방법론의 경우, 전통적 시연 학습은 주어진 행동 범위 내에

서만 동작하므로 작업자가 시연한 경로를 복제하는데 그치나, 강화학습 기반 시연 학습을 통해 탐색적 행동과 같은 새로운 상황에 대한 대응 능력을 향상시킬 수 있음

- 확장현실(XR) 기반의 인간-로봇 협업 기술을 바탕으로 인공지능 기반의 작업 수행 기술 및 고소 작업 특화 공통 로봇 플랫폼을 활용하여 건설 현장에서의 다양한 고소 작업을 신뢰성 있게 수행할 수 있음
 - 확장현실 기반의 인간-로봇 협업 기술을 통해, 사용자 친화적인 인터페이스로 현장 작업자가 직관적으로 작업을 지시할 수 있음
 - 다양한 작업을 아우르는 통합 인터페이스로 일관성 있는 사용자 경험을 제공할 수 있음
 - 인공지능기반 작업물/환경/장애물 인식 및 사용자 의도 파악을 통해 비정형 환경에서 비정형 작업 수행을 고도화할 수 있음
 - 다목적 고소 작업에 특화된 공통 로봇 플랫폼을 기반으로 신뢰성 있는 작업 시스템을 구성할 수 있음

제3절 다부처공동R&D 추진 타당성

1. 문제 해결 이슈 및 해결 방향

개요

- 건설 로봇 도입 문제는 수요 영역(관련 인증/표준, 수요자 니즈, 적용 작업 등) 및 공급 기술개발 영역(로봇 플랫폼, 제어 기술 등)의 상호 연계성을 기반으로 해결해야 하는데, 분야별 소관부처의 역할이 명확히 구분되어 있어 뚜렷한 성과를 거두지 못함
 - 가시적인 성과 도출, 효율적인 예산 활용을 위해서는 다부처가 소통하고 협력하는 공동 R&D사업으로 추진해야 할 필요가 있음
- 해당 분야의 이슈뿐 아니라 분야 간 협력이 필요한 이슈의 해결을 위해서는 네트워킹에 기반한 부처 간 긴밀한 협력이 필요

정책적 측면

- 국내 건설 로봇 관련 연구개발과제 분석 결과, 주로 토공현장에서 원격으로 이동형 건설장비를 자동화하기 위한 원격조종 및 관제기술 개발에 연구개발 투자가 집중적으로 이루어진 것으로 분석
- 스마트 건설 및 자동화에 대한 정부의 높은 관심에도 불구하고, 건설 로봇에 대한 표준이나 관련 법규 및 제도, 상용화에 필요한 테스트 인프라 등이 선진국 대비 부족한 실정

경제·사회적 측면

- 높은 초기투자 비용 및 ROI 평가 방법의 부재로 인한 리스크는 전세계적으로 건설업계의 로봇 도입에 대한 부정적 인식의 가장 높은 원인이 되는 것으로 분석(Pan et al. 2020; Huang et al. 2021; Bademosi and Issa 2021; Law et al. 2022)
- 고소작업은 건설현장에서 빈번히 발생하는 공중이나, 건설업의 전체 재해유형 중 가장 많은 비율을 차지하는 추락사고로 이어질 수 있으므로 위험성이 높음

□ 기술적 측면

- 타 산업현장에 비해 건설현장은 자동화가 매우 더딘 현장이며, 특히 고소작업의 자동화를 위한 연구개발이 부족함
 - 자율주행 리프트 탑재형 매니플레이터를 통해 고소작업 3종(용접, 내화뿔칠, 도장)의 자동화를 목표로 함
- 기존 건설 로봇 기술은 컴퓨터를 통해 사전 입력된 부재, 작업 파라미터를 바탕으로 프로그래밍된 경로를 재현하는 수준으로, 정형화되지 않은 부위에 대한 (실시간) 대응능력이 부족하여 로봇 도입 효과가 미미함
 - 로봇을 도입하더라도 비정형화된 부위(예: 코너 부위, 빔-거더 연결부위, 빔 스피트너 설치 부위 등)는 여전히 인력 100%에 의한 작업 수행
 - 다중 로봇 센서 융합을 통한 실시간 정밀 센싱, 확장현실 인터페이스를 통한 원격제어를 통해 비정형 작업 부위에 대한 대응능력을 향상시키고 완전한 무인화를 목표로 함
- 다양한 건설 작업을 위한 로봇 플랫폼의 유연성이 부족하며, 플랫폼 구성요소 간 시스템 통합이 미비하고, 건설 작업을 위해 표준화된 플랫폼이 부족함
 - 일반 건설 작업에 활용 가능한 범용 매니플레이터 개발을 통해 플랫폼 표준화를 확보하고, 고소작업 3종 특화 작업 툴 개발 및 모듈화를 통해 유연성을 확보함
- 기존 건설 로봇은 티치 펜던트(Teach pendant)에 기반한 복잡한 구동방식으로 인해 사용법 교육이 어렵고 로봇 구동을 위한 추가 인력 요구
 - 사용자 경험 디자인 접근에 기반한 작업자-로봇 원격제어 기술 개발을 통해 작업자가 친숙한 방식으로 즉시 사용이 가능하도록 함
- 건설 공종별로 작업 특성(작업 환경조건, 자동화 요구사항, 작업 정밀도, 후속작업, 품질검사항목 등)이 다양하여 표준화된 로봇 플랫폼 및 제어기술만으로는 한계가 있으므로, 공종별 요구조건을 파악하고 각 공종에 최적

화된 시스템 통합 및 실증이 필수적임

- 예를 들어, 도장 및 내화뿔칠 작업은 작업 건(Gun)과 빔(Beam)과의 일정 이격거리 조절이 요구되나, 용접 작업은 mm단위 이격 정확도로 용접기를 조절해야하므로 요구되는 로봇 작업 정밀도 혹은 작업 속도 등이 달라질 수 있음
- 또한, 도장 및 내화뿔칠 작업은 노즐 청소 혹은 잔여 물질 처리 등 후속 작업이 추가적으로 요구되므로, 로봇 작업 시나리오에 있어 이러한 후속 작업을 반영해야 함

2. 사업추진 및 정부지원 필요성

□ 정부의 재난안전 대응 및 국가전략기술 육성 등 부합

- (윤석열 대통령, '120대 국정과제', '22.7) 120대 국정과제 중 초격차 전략기술 육성으로 과학기술 G5 도약, 반도체·AI·배터리 등 미래전략산업 초격차 확보 등에 부합
- (범부처, '제4차 재난 및 안전관리 기술개발 종합계획('23~27)', '22.12) 건설업 현장 추락 등 중대재해 예방을 위한 관리 지능화 및 고위험 작업 대체 로봇 개발 지원에 부합
- (과학기술정보통신부, '국가전략기술 선정(안)', '23.12) 12대 국가전략기술 및 50개 세부 중점기술 중 첨단로봇의 고난도 자율조작 기술 및 인간-로봇 상호작용 기술에 해당
- (국토교통부, '제2차 국토교통과학기술 연구개발 종합계획('23~32)(안)', '23.9*) 4가지 전략 중 하나인 지속가능한 국토교통 기반시설 고도화 중 스마트 디지털 건설(자동화·로보틱스)에 부합
*국가과학기술자문회의 의결
- (국토교통부, '스마트 건설 활성화 방안 S-Construction 2030', '22.7) '2030년 건설 전 과정 디지털화·자동화'라는 목표를 제시하며 3대 중점 과제로 ① 건설산업 디지털화, ② 생산시스템 선진화(건설기계 자동화

및 로봇 도입 등), ③ 스마트 건설산업 육성을 제시하였으며 생산시스템 선진화에 부합

- (산업통상자원부, '제3차 지능형 로봇 기본계획('19~'23)', '19.8) 2023년 로봇산업 글로벌 4대 강국 도약을 비전으로 설정하고 2020년에는 로봇 1,500대 보급 등 1,271억원, 2021년에는 1,944억원 투자
- (산업통상자원부, '첨단로봇 산업 비전과 전략', '23.12) 3가지 주요전략으로 2030년까지 ① 민관합동 3조원 이상 투자해 기술, 인력, 기업 경쟁력 강화, ② 전산업 영영에 100만대 이상 로봇 보급, ③ '지능형 로봇 개발 및 보급 촉진법' 전면 개편 제시

□ 민간 단독 추진의 어려움

- 건설현장의 노무 의존도를 낮추면서 생산성을 확보할 수 있는 자동화/로봇 시공 기술은 대규모 투자가 소요되어 초기 정부의 마중물 투입이 요구
 - 건설산업 생태계는 종합건설사-전문시공사 등 복잡한 이해관계에 따른 공기 단축-원자재 의존성이 높고 서비스/장비 활용 중심으로 장기적 관점의 자동화 기술개발 추진에 한계
 - 건설산업계에서 장기적 본 사업에서 제시하는 고소 작업 3종(용접, 내화뿔칠, 도장)은 타 공종 대비 노무 의존도가 높은 작업이며 작업자의 작업 숙련도에 따라 품질 및 생산성이 크게 상이하므로 첨단기술 투자에 대한 ROI 리스크가 상당함
 - 건설현장 자동화/로봇화 기술은 현재 성장기에 막 진입한 초기 전환기술로 정부 지원을 통해 민간기업의 투자 및 적용 활성화를 유도
- 건설산업의 전통적 지식과 로봇, 인공지능 등 첨단분야 지식이 융합된 건설 로봇의 개발은 다학제 전문가 및 산학연관 협업이 필요하며 이를 효과적으로 추진하기 위해 정부의 구심점 역할 필요
 - AI·컴퓨팅·로봇·고소 작업 자동화 툴·제어 및 시스템 통합 등 시스템 복잡성, 원천기술 부재, 비용, 기간, 성능/신뢰성 문제로 인한 민간 주도로 추진이 어려운 등 건설 산업 경쟁력과 로봇산업 육성을 위해서 정

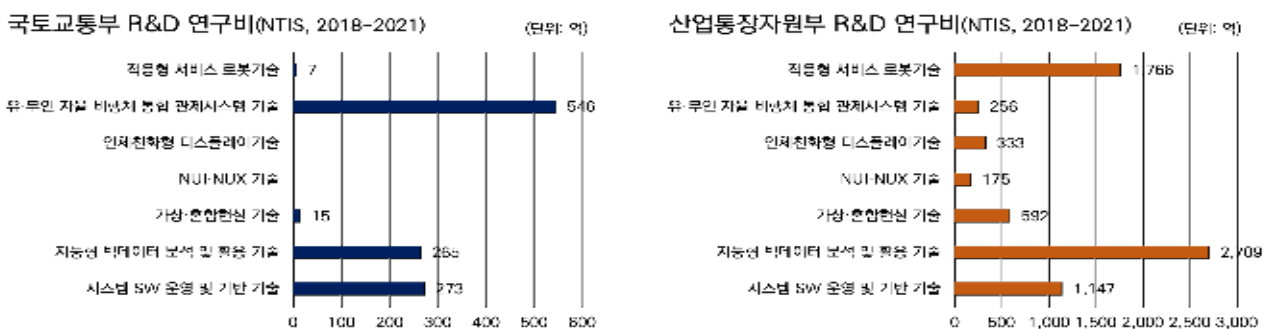
부 부처의 적극 지원 필요

- 우리나라 국내총생산의 5.22%(2020년 기준)를 차지하는 건설산업의 로봇화/자동화를 통해 생산성을 확보하면서 중대 산업재해를 저감함으로써, 자율과 창의로 만드는 담대한 미래라는 정부의 국정목표 및 공익적 가치 달성에 기여

3. 다부처 추진 타당성(기존 단일 부처 추진 대비 시너지 효과)

□ 기존 단일 부처 추진 시 한계

- 국토부의 「스마트 건설기술 로드맵('18.10)」, 「스마트 건설기술 개발 R&D사업 추진('20.04)」, 「스마트 건설기술 활성화 지침('21.11)」등 건설산업 스마트화 추진 중이나 ICT·AI기술 융합 및 DATA 디지털화 등에 집중 투자, 「스마트 건설 활성화 방안('22.07)」을 통해 건설로봇 적용 자동화에 대한 부문을 계획 중이나 세부 기술적 목표 수립에 한계
 - 본 사업과 연관된 중점과학기술에 따른 국토부 R&D 연구비를 살펴보면, ‘적응형 서비스 로봇기술’, ‘인체친화형 디스플레이기술’, ‘NUI·NUX 기술’, ‘가상·혼합현실 기술’의 연구개발이 절대적으로 부족



[그림 1-39] 본 사업과 연관된 중점과학기술별 국토부/산업부 연구비 현황 (NTIS, 2018~2021)

- 산업부의 3차 지능형로봇 기본계획 및 지능형 로봇 실행계획('22.02) 등 4대 로봇강국 도약을 위한 기술개발 및 서비스로봇·표준공정 보급을 지원 중이나, 특수목적 로봇 기술의 대한 타산업분야 현장 적용을 위한 지원은 다부처/부처협력 사업 외에는 추진하기에는 한계

- 로봇산업핵심으로 단독 추진 시 수요자가 특정 건설사 1개에 국한될 수 있으므로, 국토부의 스마트건설 얼라이언스와의 협력을 통해 다양한 수요그룹을 확보하고 로봇보급 확대 달성 필요
- ※ 스마트건설 얼라이언스 내 건설 자동화 분과(건설 자동화/로보틱스 분야 리딩社 삼성물산, 간사 건설자동화 로보틱스학회, 참여社, 건설기계부품연구원 등 유관 기관으로 구성)에서는 건설현장 실질적 적용 및 보급 활성화를 위한 최신 기술 공유 및 기술 협력 목표
- 스마트건설 얼라이언스 간담회('23.11)를 통해, 삼성물산, 포스코이앤씨, GS건설 등 국내 건설사의 연구개발 참여 및 수요의향을 확보하는 등 사업추진의 필요성과 당위성을 확보
- 부처별 건설시공/로봇 관련 품질·안전·확산 관련 기준/인증/표준 등이 구분되어 있어 현장 적용 가능한 R&D추진과 사업화 성공을 위해서는 다부처 협업이 필요
- 본 연구개발은 TRL 8단계를 목표로 하여 공정별 고신뢰성이 요구되며, 이를 위해 사용자 요구사항 도출을 위한 수요기업, 스마트건설 제도/규제 행정기관인 국토부 및 세부 자동화로봇기술 개발기관인 연구진(산업부)의 유기적인 연구개발 협업이 필요

□ 다부처 추진 시너지 효과

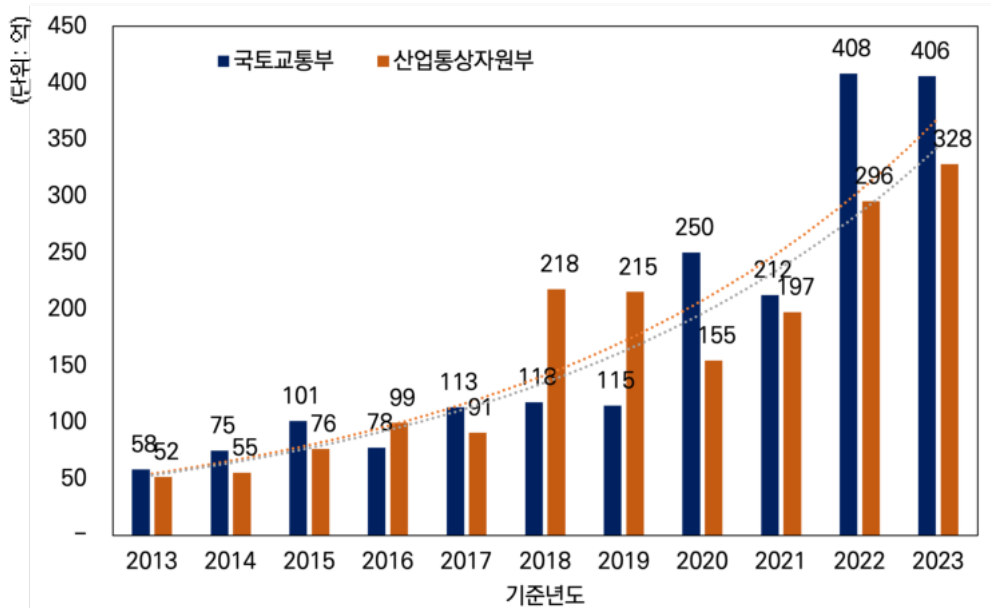


[그림 1-40] 다부처 추진 시너지효과

- 국토부/산업부의 전문산업분야에 대한 이해, 유사 R&D에 대한 중복성 해소와 기술적 차별성 도출 및 적정 예산규모 산정 등으로 R&D 투자

효율화 기대

- 건설 로봇 관련 국토부/산업부의 연구비 예산은 2013년부터 동일한 추세로 증가해왔으며, 2023년 양 부처 합계 734억원의 예산이 투입됨
- 부처 간 협업 가능한 다부처 사업 추진을 통해 중복 투자 방지를 통한 해당 예산 절감 가능



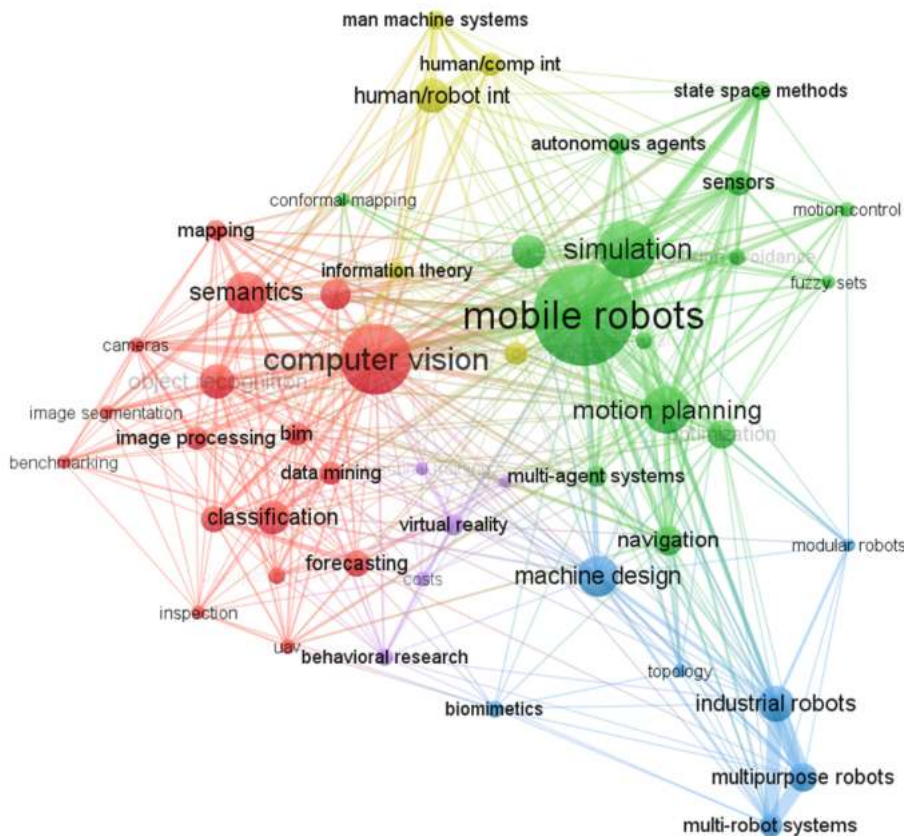
[그림 1-41] 건설 로봇 관련 국토부/산업부 연구비 현황(2013~2023)

* 출처 : NTIS 검색, '건설 로봇'

- 참여 부처의 명확한 역할 분담과 프로세스 구성을 통한 건설산업의 경쟁력 강화 및 지능형 로봇의 보급 확대
 - 국토부의 스마트건설얼라이언스 등 건설사의 실제적 수요와 생태계에 대한 종합적 분석을 기반으로 산업부의 다양한 로봇 원천기술의 응용개발 추진 등, 참여 부처의 명확한 역할 분담과 동시에 “기술 공급-현장 테스트-최종 수요”로 구성되는 프로세스로 건설산업의 경쟁력 강화와 지능형 로봇의 보급 확대 달성 가능
- 지능형 건설 로봇 연구에 대한 다학제적 접근 필요
 - 지능형 건설 로봇은 다학제적 접근을 통한 융복합적 연구개발이 필수인 분야로 정부의 전폭적인 투자와 다부처의 긴밀한 협력하에 공동 연구개발 추진이 필요

- Manuel Davilla Delgado(2022)에 따르면, 2020년까지의 지능형 건설 로봇 관련 795개의 연구논문을 분석한 결과(키워드: 로봇틱스, 건설, 머신러닝), 총 다섯 개의 클러스터*로 구분할 수 있으며, 각 클러스터는 본 사업의 핵심 기술과 일대일로 연관됨

※ △모바일 로봇(모션 계획, 내비게이션, 충돌 방지, 시뮬레이션 등), △컴퓨터 비전, △기계 설계(다목적 로봇, 멀티로봇시스템, 모듈형 로봇 등), △인간-로봇 상호작용(인간-컴퓨터, 인간-기계 상호작용), △가상 현실



[그림 1-41] 건설 로봇 연구개발 키워드 동시출현 다이어그램
(Manuel Davilla Delgado and Oyedele 2022)

- 건설 현업의 실황 및 요구 사항을 고려한(국토부) 실사용 검증된 로봇 및 자율주행 원천 기술(산업부)을 바탕으로 스마트 건설 로봇 기술의 표준화 필요
- 추후 과학기술정보통신부 등의 주도로 개발된 고도화된 자율 주행 및 자율 로봇 원천기술을 실제 건설 현장에 민첩하고 유연하게 적용하기 위한 ‘기술개발→도입’ 표준 프로세스 고려

2장 사업목표 및 내용

제1절 사업목표

1. 문제 해결 목표

사업 목표

건설현장의 고소작업 3종* 수행을 위한 다목적 표준 로봇 플랫폼 및 Level2 반자율화 수준 원격작업 구현을 위한 확장현실 기반 인간-로봇 커뮤니케이션 기술 개발 (용접) (내화봉칠) (도장)

① 고소작업 투입인원 기존 대비 50% 이상 절감

② 로봇 고소작업 속도 현장 작업자 수준 이상으로 향상

As-is



To-be



[그림 2-1] 사업목표 및 비전

□ 기술수요조사

○ 기술수요조사 개요

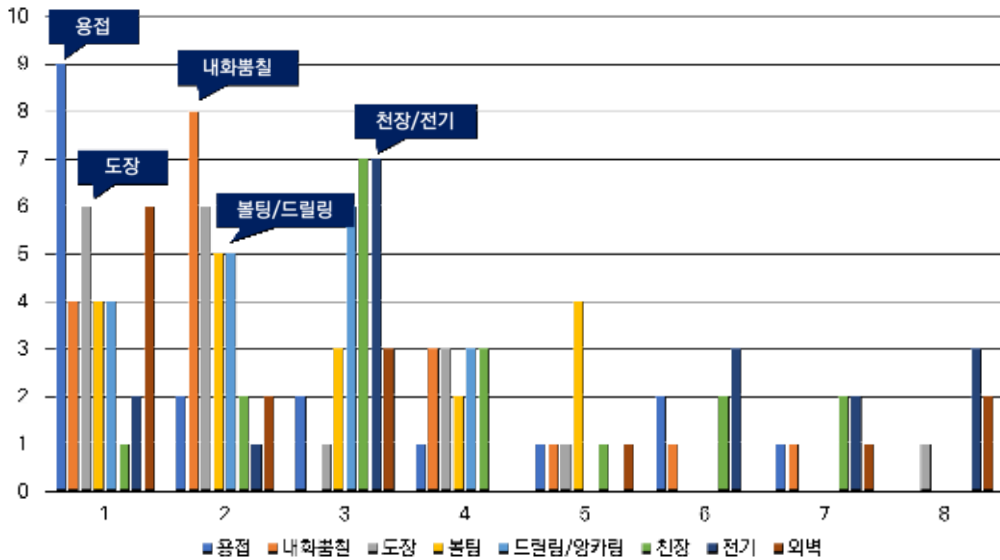
- (조사 목적) 기술수요조사는 건축 및 토목현장의 고소건설작업 로봇의 대상 공종/공정, 개발방식에 대한 산학연의 니즈를 수집/조사하기 위하여 수행하였음
- 본 기술수요조사에서 조사된 기술 니즈는 기획위원회 검토를 통해 대상 공종 및 개발방식에 관한 연구방향을 도출하는데 근거자료로 활용됨
- (조사 방법) 스마트건설 얼라이언스 및 한국건설자동화·로보틱스학회

소속 13개 기관 18명의 산학연 전문가 온라인 설문조사 수행

○ 기술수요조사 결과

- 로봇 도입 대상 건축 고소작업 우선순위

※ (1) 용접, (2) 도장(외벽), (3) 내화뽀칠, (4) 볼팅/드릴링, (5) 천장/전기

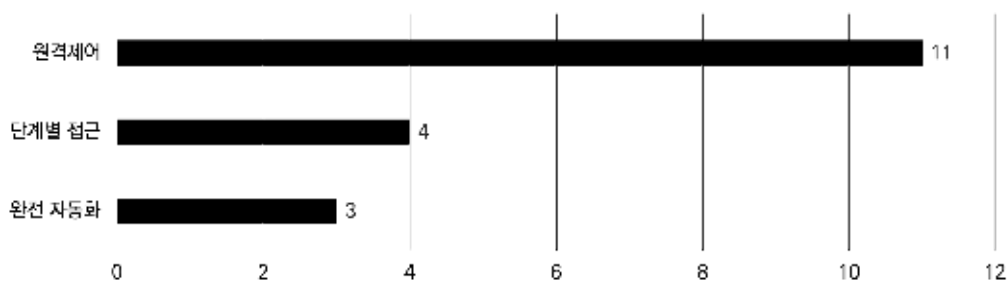


[그림 2-2] 로봇 도입 대상 건축 고소작업 우선순위

※ 상기 작업 외 외부 마감(비계 작업), 터널 슛크리트 작업, 터널 막장면 드릴링, 터널 락볼팅, 터널 다이어마이트 장약, 터널 지보재 설치, 교각 보수 작업, 아파트 외벽 균열보수 작업, 가설작업대 설치해체작업, 콘크리트 타설 작업, 사장교 또는 현수교 콘크리트 주탑 균열 등 보수작업, 건물, 교량 등 유지관리 작업 등이 현재 또는 향후 자동화를 필요로 하는 고소작업으로 조사되었음

- 건설고소작업 로봇 개발방식 우선순위

※ (1) 원격제어, (2) 단계별 접근 (단기:원격제어/장기:완전 자동화), (3) 완전 자동화



[그림 2-3] 건설고소작업 로봇 개발방식 우선순위

2. 사업 지원 범위

□ 수요측 요구 조건(기능)

- 기술수요조사 기반 건설로봇 개발 및 수요기업 요구조건 정의
 - (대상 공종) 고소작업 3종(용접, 내화뿔칠, 도장) 대상 로봇 개발
 - (개발 방식) 건설로봇 XR기반 원격제어 기술 개발 : 완전 자동화가 어려운 비정형화된 부위(코너 부위, 빔-거더 연결부위, 빔 스피트너 설치 부위 등)까지 시공 가능하도록하는 원격제어 기술 개발
 - 건설로봇 테스트베드 구축 : 건설사 입장에서 개발 단계의 건설로봇의 현장 테스트는 생산성, 안전성 등 측면에서 리스크를 수반하므로 임대 가능한 건설로봇 테스트베드 구축이 필요
 - 현장정보 수집 및 분석, 최적 작업 계획수립 기능 개발
 - Force feedback 등 다양한 형태의 피드백을 원격 조종에 포함, 품질검사 등도 로봇 기술에 통합해야 함
 - 고소작업 결과물 검사, 작업 주변환경 모니터링에 대한 기술 개발 또한 이루어져야 하며, 확장현실을 통해 구현 가능할 것
- 심층 반구조화 인터뷰를 통한 건설로봇 사용자(작업자) 요구조건 정의
 - 건설현장 작업자 로봇 인식에 관한 연구진의 선행연구²⁾에 따르면, 직종, 경험 등에 따라 로봇 인식이 다양하나, 작업자 안전과 직결된 작업의 로봇 도입에 대해서는 대체로 공감
 - 로봇 자율성에 관한 상반된 니즈 존재 : 일부 작업자는 인간의 개입이 적은 로봇의 높은 자율성을 선호하였으나, 일부 작업자는 인간의 적극적인 개입을 허용하는 로봇의 낮은 자율성을 선호

2) Kim, Y., Kim, H., Murphy, R., Lee, S., & Ahn, C. R. (2022). Delegation or collaboration: Understanding different construction stakeholders' perceptions of robotization. *Journal of Management in Engineering*, 38(1), 04021084.

□ 기술 개발 컨셉 및 방향

○ 수요작업에 따른 최적화가 가능한 표준화 건설 로봇 플랫폼 개발

- 현재 국내 건설로봇 연구개발은 단일 작업을 위한 로봇 솔루션 개발에 초점을 두었으나*, 표준화된 건설 로봇 플랫폼을 개발하여 다양한 건설 작업 조건과 수요에 맞춰 최적화할 수 있는 유연한 솔루션을 제공

※ 제1장 2절 “4. 기존 사업과의 유사성 및 차별성” 참조

○ 건설고소작업 표준공정 3종(용접/내화뿔칠/도장)에서의 Level2* 반자율화 수준 원격작업 구현

- 인간의 최소한의 개입으로 자율 로봇 작업을 수행함과 동시에, 필요시 작업자가 원하는 시점에 개입이 가능한 유연성 필요 : 인간-로봇 상호작용 기능 필요
- 구조화되지 않은 환경에서 발생하는 복잡한 조작작업에 숙련 작업자의 의사결정은 여전히 필요하므로, 작업수행 중 작업자의 피드백을 통한 로봇의 동작계획 수정이 필요함
- 즉 건설 로봇 자율성의 원활한 전환이 요구되며, 이를 실현하기 위해서는 작업자가 로봇에게 개입할 수 있는, 커뮤니케이션이 가능한 상호작용 기술이 필요함

[표 2-1] 로봇 자율화 수준 정의 (Level 0~5)

자율화 수준	정의
Level 0 (비자동화)	작업자가 로봇 작업 전 과정을 통제 및 원격제어
Level 1 (보조제어)	작업자가 로봇 작업의 대부분을 통제 및 원격제어, 로봇이 원격제어의 일부를 보조
Level 2 (부분자동화)	작업자가 작업위치(점/선/면 등) 설정에만 개입, 로봇이 자율작업 수행
Level 3 (조건부자동화)	제한된 조건 하에 로봇이 자율 작업, 작업자는 로봇이 전송하는 작업 정보의 모니터링만 담당
Level 4 (고등자동화)	정해진 조건 하에 로봇이 자율 작업, 작업자 개입 필요시 로봇이 요청
Level 5 (완전자동화)	작업자 개입 없이 로봇이 모든 것을 스스로 결정하고 행동

[그림 2-4] 주요 개발 방향 1 : 표준화 건설 로봇 플랫폼

주요 개발 방향① : 표준화 건설 로봇 플랫폼

- 수요작업에 따른 최적화가 가능한 표준화 건설 로봇 플랫폼 개발

기존 건설 로봇
작업 기술과의
차별성

· 기존 특정 환경/단일 작업을 위한 로봇 플랫폼 설계가 아닌 여러 가지 건설 작업에 따라 최적화하여 활용할 수 있는 다목적/가변형/모듈형 건설 로봇 플랫폼

굴삭기 구성요소

건설고소작업 자율로봇 구성요소



[그림 2-5] 주요 개발 방향 2 : 건설로봇 원격제어 기술

주요 개발 방향② : 건설로봇 원격제어 기술

- 건설고소작업의 Level2* 반자율화 원격작업 구현

* Level 2(부분 자동화): 작업자가 작업위치 (점/선/면 등) 설정에만 개입, 로봇이 자율작업 수행

기존 건설 로봇
작업 기술과의
차별성

· 기존 건설 로봇은 프로그래밍된 경로를 재현하는 수준으로, 비정형화된 부위에 대한 대응 능력 부족
· 상용 건설기계의 단순 주행/조작보다 높은 수준의 고정밀/반자율화 작업을 위한 건설로봇 제어/작업지능

- 완전 자동화가 어려운 비정형화된 부위(코너 부위, 빔-거더 연결부위, 빔 스피트너 설치 부위 등) 원격제어를 통해 유연성 확보
- XR을 통한 시각/촉각/청각적 피드백을 통해 로봇의 인식 결과, 의사결정, 작업 프로세스 등을 시각화하는 몰입형 양방향 커뮤니케이션

반자율화 원격작업: 완전 자동화 및 원격제어 혼합 형태



[그림 2-6] 주요 개발 방향 3 : 공중 특성화 및 실증-1

주요 개발 방향③ : 공중 특성화 및 실증

▶ 각 공종에 최적화된 시스템 통합 및 실증

- 각 공종별로 작업 특성(작업 환경조건, 자동화 요구사항, 작업 정밀도/속도, 후속작업, 품질검사항목 등)이 다양함
- 공종별 요구조건을 파악하고 각 공종에 최적화된 시스템 통합이 필수적임

고소작업 표준화 로봇 플랫폼

	고소용접작업	고소내화봄칠작업	고소도장작업
목표 가용 높이	최대 20m	최대 20m	최대 20m
적용 부위	강구조물 보-기둥 단순접합 및 강접합, 보 이음 및 기둥 이음	강구조물 보, 기둥	육상 교량(상부 및 하부), 해상 교량(상부), 건물 상부
개발 기능	가스메탈아크용접(GMAW) 및 플럭스코어드아크용접(FCAW) 기능, 용접선 추적 기능, 용접부 사전처리 기능, 레이저 스캐닝 기반 용접검사 기능, 시기반 비파괴검사 기능	봄칠부 사전처리 기능, 봄칠 기능, 시기반 봄칠 작업/비작업부 인식 기능, 시기반 외관 검사(고른 색상, 탈락 등) 기능, 시기반 봄칠두께검사 기능	에어리스 스프레이 도장 기능, 대상 목적물별 도장재료 분사노즐 개수 및 배치 최적화 기능, 도장재료 최적속도/분사량/간격 등 분사 기능, 도장시 미세먼지농도 측정 및 저감 기능, 영상인식 기반 도장 구역 식별 및 경로 생성 기술, 시기반 도장 품질검사 기능
로봇 구성	- 모듈형 건설 로봇 플랫폼 및 XR 인터페이스 - 용접 장치 EOAT : 용접기, 용접 토치 등 - 작업 보조 로봇 : 와이어 피더, 가스 공급 시스템(옵션) - 비접촉 센싱 시스템	- 모듈형 건설 로봇 플랫폼 및 XR 인터페이스 - 봄칠 장치 EOAT : 분사기 등 - 작업 보조 로봇 : 봄칠재료 믹싱 및 공급 시스템 - 비접촉 센싱 시스템	- 모듈형 건설 로봇 플랫폼 및 XR 인터페이스 - 도장 장치 EOAT : 에어리스 스프레이 노즐 - 작업 보조 : 도장자재공급 시스템 - 비접촉 센싱 시스템, 도막두께 측정장치
작업 정밀도	강구조공사 표준시방서(용접)(KCS 14 31 20)의 비파괴시험의 범위	구조부재에 시공하는 내화 봄칠재의 두께 및 밀도 시험방법(KS F 2901)	도막두께(KS M ISO 2808), 부착력(KS M ISO 4624)
작업 생산성	파이프(15cm/min 이상), 철골(20cm/min 이상)	H형강(700* 900*13*24) 1개소 기준 25분 이하	교량(3㎡/min 이상), 건물(6㎡/min 이상)

개발 로봇의 자동화 수준(공통)	XR기반 목적지 인식 후 자율 주행/추종적 주행	현장 이동	품질검사	로봇 비접촉 센싱 기반 원격 육안검사 및 비파괴검사 지원
	충돌방지를 위한 외부 센싱 수행	고소작업대 고도 변경	본 작업	반자율화 원격제어

[그림 2-7] 주요 개발 방향 3 : 공중 특성화 및 실증-2

주요 개발 방향③ : 공중 특성화 및 실증

기존 (제조)로봇 테스트베드와의 차별성

- 건축면적 1000㎡/작업높이 최대 20m의 대공간, 비정형/비표장 노면 구현
- 건설현장에 맞도록 성능평가 장비/시스템 설치 및 운영 방식, 데이터 타입 등 최적화하여 데이터 수집 및 관리시스템 개발 필요

▶ 건설로봇 테스트베드 구축 및 실증

- 개발 로봇의 환경별/공종별 실증을 위한 실환경을 1:1스케일로 모사한 스마트 사이트(테스트베드) 구축
- 개발 단계의 건설로봇 현장 테스트 시 오시공, 품질저하 및 안전 사고 등 재산상/사회적 리스크 완화
- 테스트베드 활용 기술 실증 및 시험인증 체계 구축을 통해 국내 기업의 기술애로 및 인증규제 대응 지원

스마트사이트 예상도

목표성능

- 구조 S3+RC조
- 작업높이 최대 20m
- 건축면적 1000㎡ 이상
- 동시 실증 로봇 수 3대 이상
- 데이터 수집 지연 시간 2ms 이내
- 노면 경사 ±7% 이내



지능형무인이동체연구동 (서울대학교 시흥캠퍼스)



극한환경 테스트베드 (호주 퀸즐랜드 공과대학)

[그림 2-8] 주요 개발 방향 4 : 다중 로봇 시스템

주요 개발 방향④ : 다중 로봇 시스템 (Multi-Robot System)

▶ 여러 대의 로봇의 동시/통합적 운용을 통해 여러 곳에 분산되어 있는 고소작업을 효율적으로 수행

**기존 다중 로봇
관제 시스템과의
차별성**

• 기존 방식은 설계단계 As-planned BIM기반으로 실제 시공 정보 반영 제한
• 제조업 생산라인, 실외 토공현장보다 상대적으로 비정형화되고 복잡도가 높은 (실내)건축현장 대상

다중 로봇 실시간 통합 관제	다중 로봇 임무할당 및 운용	실시간 대응형 다중 로봇/UAV 자율주행	작업지능 기반 자율작업/원격제어
<ul style="list-style-type: none"> 다중로봇/UAV 통합 지도(BIM) 구축 기술 클라우드 기반 작업현황 및 로봇상태 업데이트 기술 위치고정 UAV 활용 로봇 작업 모니터링 기술  <p>다중로봇/UAV 통합 매핑 클라우드 기반 모니터링 다계층 전역 지도 위치고정형 UAV</p>	<ul style="list-style-type: none"> 최적 작업 시퀀스 기반 임무계획/할당 기술 컨텍스트 기반 실행 가능성 판단/수정 기술  <p>최적 작업 시퀀스 실행 가능성 판단/수정 다중 로봇 임무 할당</p>	<ul style="list-style-type: none"> 다중로봇/UAV 전역 경로 생성 기술 건설 현장 실시간 주행 환경 인식 기술 지역적 자율주행 경로 수정/추종 기술  <p>다중로봇/UAV 전역경로 생성 작업자 행동 예측 및 건설 환경 인식 지역적 자율주행 경로 수정 충돌 회피를 위한 경로수정예시</p>	<ul style="list-style-type: none"> (자율작업) 정밀 작업제어 및 작업지능 기술 (원격제어) XR기반 원격제어 기술  <p>자율작업 원격제어</p>

□ 현재의 문제점에 대한 기술 개발 방향

[표 2-2] 목표 기능 및 기술 개발 방향

목표 기능	현재 기술 및 개발 필요 기술		기술 개발 방향		
	현재 구현된 기술	구현해야 할 기술	기존 기술 적(활)용	기존 기술의 개발/확장	새로운 기술 개발
다목적 모듈형 건설 로봇 플랫폼 기반 원격 및 자율 용접 기술	용접토치 위빙 기술	고급 숙련자의 위빙 모션 및 자세, 작업 데이터셋 수집	XR환경 내 용접 작업 수행 및 실 환경 내 직접 작업 수행 혹은 리적 교사를 통해 숙련자의 모션을 디지털 형태로 기록	실환경/XR 내 작업모션, 용접 전류, 전압 값 포함 작업 데이터셋 구축 및 해당 데이터셋 기반 용접 품질 분석	고품질 용접 위빙 모션 구현 기술
다목적 모듈형 건설 로봇 플랫폼 기반 원격 및 자율 내화뿔칠	반자동 철골보 뿔칠 작업 수행 기술 (고소작업대 위에 올려진 다축 로봇 팔에 뿔칠 분사기를 고정한 형태/ 보를 대상으로 하며 보의 단부는 작업 어려움/ 작업	다목적/다기능 로봇에 호환가능한 뿔칠 특성화 모듈 보의 단부 및 기동 작업 기능 작업 전 준비 및 작업 후 품질검사 기능	기존 차량 자율주행 기술을 고소작업대 이동 플랫폼에 적용하여 목적지 이동에 활용	기존 원격조종 건설로봇을 참고하여 자재 공급부 및 환경오염 저감 장치 설계 특정 사이즈 보에 대한 뿔칠 분사속도/압력/패턴 등 로봇팔 제어 등	다목적/다기능 로봇에 호환가능한 뿔칠 특성화 모듈 영상인식 기반 뿔칠 구역 식별 알고리즘 개발 뿔칠 상세 계획 기반 최적 뿔칠 작업 경로 생성

목표 기능	현재 기술 및 개발 필요 기술		기술 개발 방향		
	현재 구현된 기술	구현해야 할 기술	기존 기술 적(활)용	기존 기술의 개발/확장	새로운 기술 개발
기술	전 준비 및 작업 후 품질검사는 작업자가 수행)			작업 데이터를 참고하여 최적 뿔뿔 작업 방안 도출	알고리즘 개발 최적 뿔뿔 작업 경로 기반 고소작업대 이동 플랫폼의 위치 제어 기술 개발 반자율 뿔뿔 작업 수행 기술 개발 작업 전 준비 및 작업 후 품질검사 기술 개발
다목적 모듈형 건설 로봇 플랫폼 기반 원격 및 자율 도장 기능	원격조종 기반 건물 외벽 도장 특화 기술	여러 건설 작업에 활용될 수 있도록 제작된 다목적 모듈형 건설 로봇 플랫폼에 탑재될 수 있는 도장 하드웨어 건물 외벽에 더해 교량 상부, 교량 하부와 같이 보다 복잡한 대상물에 적용 가능한 영상인식 기반 도장 구역 식별 알고리즘 자율 주행 기반 도장 작업 반자율화 기술	기존 차량 자율 주행 기술을 고소작업대 이동 플랫폼에 적용하여 목적지 이동에 활용	기존 원격조종 건물 외벽 도장 로봇을 참고하여 자재 공급부 및 환경오염 저감장치 설계 도장을 직접 수행하는 데 활용되는 에어리스 스프레이 노즐의 개수 및 배치는 도장 대상물에 따라 최적 설계 다목적 모듈형 건설 로봇 플랫폼에 탑재될 수 있도록 하드웨어의 형태 및 크기 설계	영상인식 기반 도장 구역 식별 알고리즘 개발 도장 상세 계획 기반 최적 도장 작업 경로 생성 알고리즘 개발 최적 도장 작업 경로 기반 고소작업대 이동 플랫폼의 위치 제어 기술 개발 반자율 도장 작업 수행 기술 개발
	육안 및 영상 기반 원격 도장 작업 수행 기술	XR 기반 몰입형 원격 도장 작업 수행 기술	도장 로봇의 원격 제어 프로토타입 구현 기술	기존 건설 및 제조업계에서 적용 중인 XR 기반 원격 작업 기술 사례 조사 후 도장 작업에 최적화되도록 소프트웨어 최적화	고소작업대의 이동, 도장 작업 수행 등 XR 기반 작업자-로봇 협업 기술
고소작업 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술	다수의 2D 모니터를 활용한 비디오 영상 기반 기계장비 원격제어 기술	XR기반 환경, 작업 공정 모델링-시각화 및 시뮬레이션 기술 XR기반 몰입형 고정밀 원격 제어 SW모듈 및 조작 인터페이스		XR, DT, AI를 결합한 모델링, 시각적 피드백을 통해 로봇의 인식 결과, 의사결정, 그에 따른 작업 프로세스 등을 시각화하는 데이터 중심 양방향 커뮤니케이션 기술 개발	현실 환경-가상공간 정합 기반 XR 모델링 기술(정합 오차 5mm이내) 로봇 작업부위/주변환경 실시간 시각화 기술(지연 200ms이내, 거리 5km이상) XR 기반 작업 시뮬레이션 기술 XR 기반 원격제어 인터페이스(단위작업 정밀도 5mm이내)

목표 기능	현재 기술 및 개발 필요 기술		기술 개발 방향		
	현재 구현된 기술	구현해야 할 기술	기존 기술적(활)용	기존 기술의 개발/확장	새로운 기술 개발
					몰입형 원격제어를 위한 촉각/시각/청각 피드백 기술
실환경 기반 테스트베드	제조로봇 장비 및 시스템·AI 로봇 리빙랩·체험존 등 로봇공정 테스트베드 제조로봇 관련 인증 및 성능평가 장비	건축현장 실환경 모사 테스트베드 건설로봇 시험평가 체계		제조로봇 관련 성능평가 장비를 건설현장에 맞도록 설치 및 운영 방식, 데이터 타입 등 최적화하여 성능평가 데이터 수집(IoT센서 등) 및 관리 시스템 개발 제조로봇 관련 인증 및 성능평가 방식을 벤치마킹하여 건설로봇 시험평가체계 개발	건축현장 실환경 모사 스마트 사이트 (3층 이상, 1000m ² 이상, RC/S조 복합구조, 동시 3대 이상 실증 가능)
실시간 다중 로봇/UAV 통합 지도 작성 기술	설계단계에서 생성되는 As-planned BIM 기반의 로봇/UAV용 지도 작성 기술(실제 시공된 정보를 반영 못함) 10mm 정도의 오차를 가지는 As-built BIM 생성 기술 CCTV, UAV 기반 작업 현황 모니터링 기술(실시간성이 낮고, BIM 업데이트 내용은 고려하지 않음)	로봇/UAV 등을 활용한 실내 데이터 수집 및 정확도 개선을 위한 전처리 기술 고해상도 BIM 맵 반자동화 구축 기술 다중 로봇/UAV의 활용을 위한 AI-사용자 통합형 다계층 지도 작성 기술 BIM 업데이트 및 작업 현황 모니터링을 위한 객체 인스턴스 분할 등 실시간 데이터 마이닝 기술 로봇/UAV 데이터의 클라우드 기반 BIM 매칭 및 통합 지도 업데이트 기술	로봇/UAV 등을 활용한 실내 데이터 수집 기술 실시간 작업 현황 모니터링 시스템 구축을 위한 HW (ex. UAV 앵커링 기술 등)	Scan-to-BIM 관련 상용화된 SW와 고해상도/반자동화 BIM 맵 구축을 위한 자체 개발 알고리즘의 적용 및 개발	BIM 맵 정밀도 개선을 위한 PCD전처리 기술 개발 로봇/UAV가 요구하는 지도의 생성 기술을 포함한 통합형 다계층 지도 생성 기술 고해상도 BIM 맵 반자동화 구축을 위한 방법론 개발 작업 현황 모니터링을 위한 실시간 인스턴스 분할 등의 실시간 데이터 마이닝 기술 실시간성 취득 데이터를 활용한 통합 지도 및 BIM 업데이트 기술 개발
건설현장 실내/고소 작업을 수행하는 다중 로봇의 실시간 고정밀 통합 관제기술	실내 제조업에서 사용되는 산업용 로봇의 통합 관제 기술 (제조업에 특화되어 있어 비정형적인 건설현장에서 적용하기 어려움) 실외 토공 건설현장에서 사용되는 다중 건설장비에 대한 통합 관제기술 (실외 공종을 대	건설현장 실내/고소 작업을 수행하는 다중 로봇(UAV포함)의 실시간 고정밀 통합 관제기술	실내/외 다중 로봇의 데이터 통신 기술 다중 로봇의 위치 및 자세 모니터링을 위한 가상환경 구축 기술	통합 관제 시스템의 실시간성 개선을 위한 데이터 경량화 기술 BIM과 가상환경 매칭을 통한 고정밀 가상환경 업데이트 기술	건설현장 실내/고소 작업에 최적화된 주행 임무 시나리오 구축 기술 최적작업 시퀀싱을 통한 작업자-로봇 임무할당 기술 컨텍스트(환경 정보, 할당임무 등) 기반 실행 가능성 판단 및 수정 기

목표 기능	현재 기술 및 개발 필요 기술		기술 개발 방향		
	현재 구현된 기술	구현해야 할 기술	기존 기술 적(활)용	기존 기술의 개발/확장	새로운 기술 개발
	상으로 하고있어 넓은 tolerance를 가짐)				<p>술</p> <p>건설현장 실내/고소 작업에 최적화된 고품질/저지연 다중로봇 통합 관제 기술</p>
모듈형 건설로봇 플랫폼	리프트형 모바일 매니플레이터 플랫폼 및 제어 기술	<p>리프트형 모바일 매니플레이터 모듈화 기술</p> <p>모듈별 독립 및 통합 제어 기술</p>	리프트형 모바일 매니플레이터를 기반으로 모듈별 기능 정의 및 구분	<p>고 가반하중 자율주행 플랫폼 기술 개발</p> <p>외력에 강건한 20m 리프트 모듈 설계</p>	<p>고소 작업에 적합한 고정밀 저진동 매니플레이터 기술 개발</p> <p>공종별 작업 특성을 고려한 공종특화 End Of Arm Tool(EOAT) 개발</p>
다중 로봇/UAV 자율주행 기술	단일 주행 로봇의 자율주행 제어 기술	<p>환경 요소별 위험도를 고려한 자율주행 제어 기술</p> <p>단일 UAV 자율주행 제어 기술</p> <p>다중 로봇/UAV 동시 자율 주행 제어 기술</p>	단일 주행 로봇 자율주행 제어 기술을 위험도를 고려한 지역 지도에 적용	<p>기존의 라이다, 비전 센서데이터 기반 자율주행 지도 기술에 작업자, 환경 인식 정보를 통합하여 안전 및 적응 주행을 위한 지역 지도 작성 기술 개발</p>	<p>단일 UAV 자율주행 기술 개발</p> <p>UAV 위치 고정 및 자세 제어 기술 개발</p> <p>실시간 다중 로봇/UAV 경로 수정/추종 기술 개발</p>
원격고소 정밀제어 기술	고정 베이스 기반의 mm 이하 정밀도의 매니플레이터 정밀 제어 기술	<p>고소 매니플레이터 위치 제어 기술</p> <p>실시간 고소 원격 제어 기술</p>	기존 고정 베이스 기반의 매니플레이션 기술을 활용하여 원격 제어 기술 개발	<p>기존 제어 알고리즘에 적응 제어 및 시간 지연 제어를 적용하여 진동 및 외부 영향에 강건한 고소 위치 제어 기술로의 확장</p>	<p>실시간 원격 제어를 위한 통신 기술 및 데이터 처리 기술 개발</p> <p>고소 위치 제어 기술 및 고속 통신 기술을 통합하여 실시간 고소 원격 제어 기술 개발</p>
단위 작업 스킷셋 및 제어기술 계층형 복합작업 지능기술	직선 용접물에 대한 파라미터 기반 용접 작업 기술	<p>직선 외의 면, 점 등의 단위 작업 스킷셋 및 제어 기술</p> <p>자율 주행, 리프트제어에 대한 단위 작업 스킷셋</p> <p>계층형 복합 작업</p>		<p>직선 단위작업을 병합하여 면 작업에 대한 coverage path 작업 확장</p>	<p>자율 주행, 리프트 제어 관련 통합 작업 인터페이스 개발</p> <p>자율 주행, 리프트 제어 관련 단위 작업 스킷셋 정의</p>

목표 기능	현재 기술 및 개발 필요 기술		기술 개발 방향		
	현재 구현된 기술	구현해야 할 기술	기존 기술 적(활)용	기존 기술의 개발/확장	새로운 기술 개발
		지능 기술			단위 작업을 계층적으로 통합한 복합 작업 구조 단위작업 통합형 복합작업을 위한 연결 작업셋

□ 기술 개발 범위 및 연계

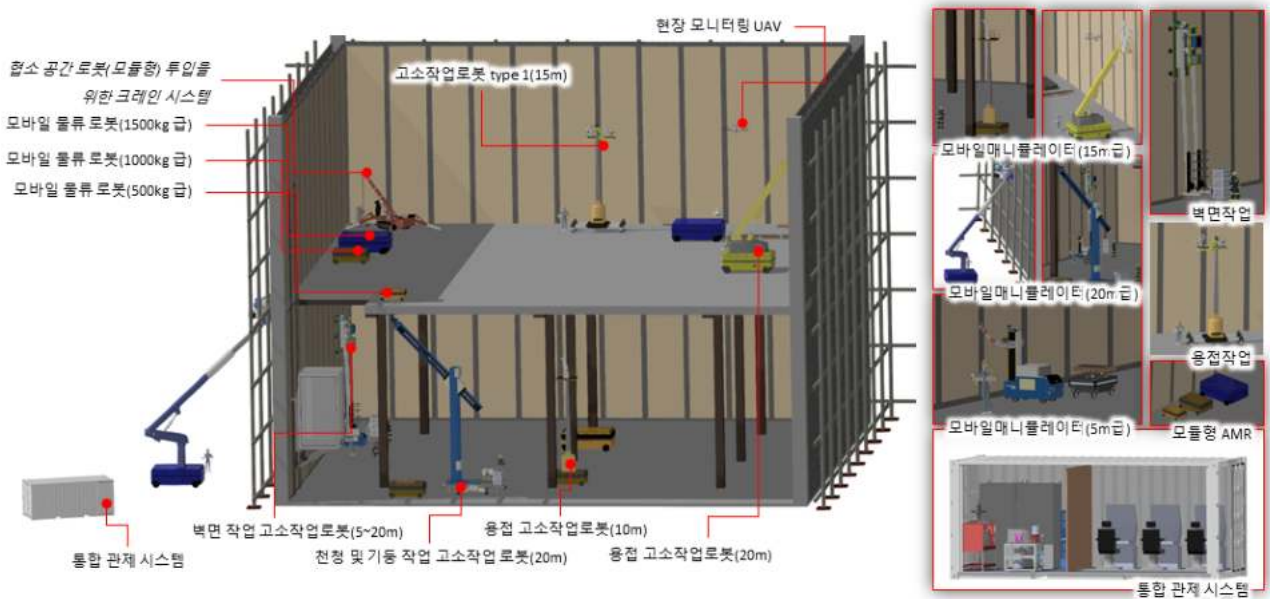
- 본 사업의 최종 성과물의 핵심기능(대분류)을 정의하고 핵심기능 구현을 위해 요구되는 기술 개발 항목을 그룹화함으로써 핵심기능 내 부처간 기술 연계가 유기적으로 이루어지도록 함
 - **핵심기능(대분류)** : (1) 자율주행, (2) 자율작업, (3) 관제시스템, (4) 통합 로봇 플랫폼, (5) 실증 및 제도개선
 - 각 핵심기능(대분류)에 대한 기술 분류(중분류) 및 세부기능(소분류)를 세분화함
 - **기술 분류(중분류)**를 통해 각 부처 역할 명시, 기술 분류 간 다부처 기술 연계를 통해 핵심 기능 구현

[그림 2-9] 최종 성과물 기능 기반 연구내용 구분 및 핵심기능(대분류) 내 기술 연계

대분류	중분류	소분류	세부내용	
자율주행	SLAM (국토부)	지도 생성	로봇/UAV 등을 활용한 실내 데이터 수집 및 전처리 기술 다계층 지도와 통합 관제시스템을 위한 고해상도 BIM 맵 반자동화 구축 기술 BIM의 의미론적 매칭을 통한 AI-사용자 통합형 다계층 지도 작성 기술	
		지도 업데이트	로봇/UAV 데이터의 클라우드 기반 BIM 매칭 및 통합 지도 업데이트 기술	
		임무모듈	건설현장 주행 임무 시나리오 구축 기술	
	Navigation (산업부)	경로생성(전역/지역)	다중 로봇/UAV 전역 경로 생성/스케줄링 기술	
		장애물 인지	실시간 주행 환경 인식기술	
		경로 수정/추종	지역적 자율주행 지도 작성 및 지역 경로 수정/추종 기술	
자율작업	임무 및 SW프레임워크 (국토부)	SW 프레임워크	작업자-로봇 협업 SW 프레임워크 설계	
		임무모듈	최적 작업 시퀀싱을 통한 작업자-로봇 임무할당 기술 컨텍스트(환경정보, 할당임무 등)기반 실행 가능성 판단 및 수정 기술	
	작업학습 (국토부)	학습 데이터셋	고소작업 공정별 작업자 실환경/XR(가상) 시연을 통한 대용량 데이터셋 구축	
		Real2Sim	XR기반 환경, 작업공정 모델링-시각화 및 시뮬레이션 기술	
		Sim2Real	XR기반 물입형 고정밀 원격 제어 SW모듈 및 조작 인터페이스	
	작업지능 (산업부)	작업모델(스킬)		단위작업 스킬셋 및 계층형 복합 작업 지능 기술 개발
			작업제어	안정적 저지연 통신 시스템 및 실시간 원격 제어 인터페이스 위치 유지 제어 및 진동 제어를 통한 정밀 작업 제어 기술 실시간 원격 정밀 수동 제어기술
		관제시스템 (국토부)	다중 로봇 모니터링	객체 인스턴스 분할 등 실시간 데이터 마이닝 기술 전역/지역 고정밀 작업 모니터링 시스템
			관제시스템	고품질/저지연 다중로봇 통합 관제시스템
통합 로봇 플랫폼	로봇 플랫폼 및 EOAT (산업부)	주행 플랫폼	다목적 자율 주행 로봇 플랫폼	
		리프트 모듈	고소 작업을 위한 모바일 플랫폼 탑재형 리프트 모듈	
		매니플레이터/EOAT	범용 작업 매니플레이터 및 공중 특화 EOAT 기술	
	품질관리 시스템 및 시스템 통합 (국토부)	품질관리 시스템	고소작업 공정별 고정밀 HITL 품질검사 시스템	
특성화 로봇 플랫폼		고소작업 공정별 특성화 통합 로봇 플랫폼		
실증 및 제도개선	테스트베드 및 실증 (국토부)	테스트베드	실환경 모사 스마트 사이트 설계 및 구축	
		실증	원격제어-로봇플랫폼 사용자 경험 평가 실증 및 통합 성능 평가	
	제도/공법/교육 및 실용화 (국토부)	제도/공법/교육	공법/제도 개선 및 기술표준/인증 개발 교육과정 개발 및 인력 양성	
		실용화	실용화 전략	

□ 기술 개발 활용 개념도

- 작업자를 대신하여 고소 위험 건설현장에 용접, 내화뿔칠, 교량도장 자율작업을 위한 XR기반 모듈/지능형 건설로봇시스템 활용
 - 현장별 작업 환경(작업 영역, 고도, 필요하중 등)과 공종(용접, 내화뿔칠, 도장 등)에 적합한 모듈로 재구성하여 작업자의 안전 및 공중 자동화 가능



[그림 2-10] 기술 개발 활용 개념도

□ 대상 작업 및 작업 환경 조건

- 일반적으로 고소작업이란 1) 2m 이상의 높이에서 정비, 점검 작업 2) 2m 이상 시설물 또는 설비의 도장, 보온 작업 3) 높이가 2m 이하이나 고열물, 강산 등 위험물의 상부에서 행하는 작업으로 정의됨
- 고소작업대(mobile elevated work platform; MEWP)란 작업대, 연장구조물(지브), 차대로 구성되며 근로자를 작업위치로 이동시켜주는 설비를 지칭함
- 고소작업은 건설공사 수과정에서 철골보, 비계, 고소작업대, 이동식 비계, 고층건물 단부 등 다양한 위치에서 발생하며 중대재해 발생률이 가장 높은 작업임
- 건설현장 고소 작업 3종(용접, 내화뿔칠, 도장)은 건설현장에서 가장 많이

발생하는 고소작업으로 고소작업대에서 작업하는 기능공 2~3인과 고소작업대 밑에서 신호 및 작업보조하는 보조공1인으로 구성되며, 동일한 작업도 작업환경(지면조건, 작업높이, 밀폐 여부, 기상조건)에 따라 생산성, 품질이 상이함

- 고소작업을 수행하기 위해 복수의 사전작업이 수행되며, 대부분의 사전작업은 고소작업대에 위에서 발생하기 때문에, 고소작업을 로봇으로 수행하기 위해서는 주작업 뿐만 아니라 보조작업을 함께 수행할 수 있는 기술을 개발하여야 함



[그림 2-11] 고소작업차(좌), 굴절형 고소작업대(중), 시저형 고소작업대(우)

- 복수의 작업을 수행하기 위해서는 다중기능을 수행할 수 있는 동종로봇을 복수로 운용하는 방안과 주작업과 보조작업을 각기 수행할 수 있는 이기종 다중로봇 운용하는 방안 모두를 고려할 수 있으며, 운용방안은 공종의 특성에 따라 선택할 수 있어야 함

[표 2-3] 고소작업 3종 현행 공정 프로세스

분류	내용
용접	<p>1) 공정 프로세스 : 용접준비 → 신호수, 화재감시자 배치 → 고소작업대 상승 → 용접 → 고소작업대 하강 → 이동</p> <p>2) 現시공 현황 : 고소용접 기준 1팀당 4명 구성, 고소용접 기준 1일 용접 물량 평균 20m(현장용접)</p> <p>3) 작업 시간 : 현장마다 상이</p> <p>4) 관련사진 용접작업 - 탑다운 스티드 블럭 용접</p>  <p>스티드 블럭 설치 위치 미경 설치 위치 그라인팅 스티드 블럭 용접 스티드 블럭 용접</p> <p>용접작업 - 탑다운 모멘트 전합부 용접</p> 
내화뿔칠	<p>1) 공정 프로세스 : 기둥 하부/배관 등 보양 → 신호수 배치 → 믹서기, 몰탈 펌프 등 장비 및 자재준비 → 고소작업대 상승 → 뿔칠 → 고소작업대 하강 → 이동</p> <p>2) 現시공 현황 : 고소 뿔칠 기준 1팀당 6명 구성, 고소뿔칠 기준 1일 뿔칠 물량 평균 1000평방미터</p> <p>3) 작업 시간 : 대상 목적물마다 상이</p> <p>4) 관련사진 내화뿔칠 : 철골조의 기둥/보/내력벽</p>  <p>노량 지지준비 내외방진</p>
도장	<p>1) 공정 프로세스 : 자재준비 → 신호수 배치 → 고소작업대 상승 → 외벽도장 → 고소작업대 하강 → 이동</p> <p>2) 現시공 현황 : Storage Tank 외부 도장 기준 1팀당 3명 구성, 고소도장 기준 1일 도장 물량 평균 370평방미터</p> <p>3) 작업 시간 : 대상 목적물마다 상이</p> <p>4) 관련사진</p>  <p>자재준비 상도작업 도막두께 확인 하도작업</p>

□ 작업자-로봇 협업 시나리오(안)

1) 고소 용접 작업

가. 현황 및 목표

○ 개발 목표

- 다목적 모듈형 건설 로봇 플랫폼 용접 기술 개발
 - > 목표 가용 높이 : 최대 20m
 - > 적용 강재 : 일반구조용 압연강재(KS D 3503, SS400 등)³⁾ 및 용접구조용 압연강재(KS D 3515, SM 400/490 등)
 - > 적용 부위 : 강구조물 보-기둥 단순접합 및 강접합, 보 이음 및 기둥 이음
 - > 가스메탈아크용접(GMAW) 및 플럭스코어드아크용접(FCAW) 기능, 용접선 추적 기능, 용접부 사전처리 기능, 레이저 스캐닝 기반 용접검사 기능, AI기반 비파괴검사 기능

○ 시공 현황

- 공정 프로세스 : 용접준비 → 신호수, 화재감시자 배치 → 고소작업대 상승 → 용접 → 고소작업대 하강 → 이동
- 現시공 현황 : 고소용접 기준 1팀당 4명 구성, 고소용접 기준 1일 용접 물량 평균 20m(현장용접)
- 작업 시간 : 현장마다 상이

나. 개발 컨셉

○ 성능 조건

- 목표 가용 높이 : 최대 20m
- 적용 대상 : 강구조물 보-기둥 단순접합 및 강접합, 보 이음 및 기둥

3) 판 두께가 일정 두께(예: 22 mm)를 초과하지 않을 경우

이음

- 용접재료의 종류 및 허용오차는 다음의 한국산업표준을 따름

> 용접방법 : 가스메탈아크용접(GMAW) 및 플릭스코어드아크용접(FCAW)

- ① 연강용 가스 용접봉: KS D 7005
- ② 내후성강용 탄산가스 아크용접 플릭스 충전 와이어: KS D 7109
- ③ 연강 및 고장력강 마그용 용접 솔리드 와이어: KS D 7025
- ④ 연강, 고장력강 및 저온용 강용 아크용접플릭스코어선: KS D 7104
- ⑤ 내후성강용 탄산가스 아크용접 솔리드와이어: KS D 7106

o 작업자-로봇 협업 공정 정의

[표 2-4] 용접작업 작업자-로봇 협업 공정 정의

단계	세부작업	내용 (개발기술 적용)
용접준비	사전준비	- (작업자) 철골 구조물의 설계 도면, 시공상세도 (shop drawing), 용접절차사양서(WPS) 등 작업 계획을 참고하여 상세 계획(용접 전류, 아크전압, 가스유동, 용접 순서 및 방향 등) 수립 - (작업자) XR 인터페이스 활용, 수립된 용접 상세 계획 로봇에 입력
	이동 및 운송	- (작업자) XR기반 고소작업대 이동 플랫폼 목적지 설정(예: 홀로렌즈 Waypoint 설정을 통한 경로 지정, 추종적 주행 등) - (로봇) 건설 변화 대응형 자율 주행, 추종적 주행 (보조작업 로봇)
	용접준비	- (작업자) 용접재료 준비, 예열 등 - (로봇) 모재의 표면 및 밀변 부근 수분, 불순물 등 모재 상태 확인 (로봇 센서를 통해 측정), 용접부 사전 청소 및 건조
고소작업대 상승	- (작업자) XR 인터페이스 활용 고소작업대 제어 - (로봇) 상승시 충돌 방지 (LiDAR 등 로봇 센싱 활용)	
본용접 (Level2 반자율화 원격제어)	- (로봇) 작업 계획 수립 및 제안, 시뮬레이션 (XR 시각화) - (작업자) XR기반 몰입형 원격조종을 통해 작업 계획 수정 - (작업자) 작업계획 상 자세 미세조정이 필요하여 사람의 개입이 필요한 부분에 대해 XR 인터페이스를 통해 원격제어	

		- (로봇) GMAW 혹은 FCAW 용접장치 활용 용접 작업 수행
검사 및 보수	용접검사	- (작업자) XR 비전 활용 원격 육안검사 수행 (균열, 용접비드 표면의 피트/요철, 언더컷 깊이, 오버랩, 필릿용접의 크기 검사) - (로봇) XR기반 육안검사 수행시 육안검사 항목에 대해 검사결과 제공 (카메라와 레이저 스캐너 등 비접촉 센싱 활용) - (로봇) AI기반 비파괴검사 수행 ⁴⁾ (아래 표 참조) (카메라와 레이저 스캐너 등 비접촉 센싱 활용) - (작업자) 비파괴검사 결과 검토
	결합부의 보수	- (작업자) 용접결합부 보수 수행 ⁵⁾
고소작업대 하강		- (작업자) XR 인터페이스 활용 고소작업대 제어 - (로봇) 하강시 충돌 방지 (LiDAR 등 로봇 센싱 활용)

[표 2-5] 비파괴시험의 범위

용접부 종류 ¹⁾	품질관리 구분				시험 방법
	가	나	다	라	
인장응력을 받는 완전용입 또는 부분용입 횡방향 맞대기 용접부	해당 없음.	10%	20%	100%	RT, UT
완전용입 또는 부분용입 횡방향 맞대기 용접부 - 십자이음부 - T-이음부	해당 없음.	10% 5%	20% 10%	100% 50%	UT
인장 또는 전단을 받는 횡방향 필릿용접부 - $a > 12 \text{ mm}$ or $t > 20 \text{ mm}$ - $a \leq 12 \text{ mm}$ and $t \leq 20 \text{ mm}$	해당 없음.	5% 0%	10% 5%	20% 10%	MT
종방향 용접과 보강재 용접부	해당 없음.	0%	5%	10%	MT

주 1) 이 표에서 종방향 용접은 부재의 축방향과 평행인 용접이며, 그 이외의 경우에는 횡방향 용접으로 간주한다. 또한 a는 용접의 목두께이며, t는 모재의 두께 (mm)

4) 비파괴검사의 범위는 강구조공사 표준시방서 '표 3.11-1 비파괴시험의 범위'를 따름.

5) 용접결합부의 보수 방법은 강구조공사 표준시방서 '표 3.12-1 용접결합부의 보수'를 따름.

○ 자동화 수준

- 자동화 대상 구조물 : 강구조물 보-기둥 단순접합 및 강접합, 보 이음 및 기둥 이음 (그외 작업 대상 구역은 차단계 공정 개발 필요)
- 각 공정 자동화 수준 : 작업 대상 환경 인식 후 원격조종에 의한 직접 교시 지원 (감시제어에 의한 자율 작업 가능)
- 현장 이동 및 고소작업대 고도 변경 : XR기반 목적지 인식 후 자율 주행/추종적 주행, 충돌방지를 위한 외부 센싱 수행
- 용접 검사 : 로봇 비접촉 센싱 기반 원격 육안검사 및 비파괴검사 지원
- 로봇 구성 : 용접 부위와 관계 없이 아래 공통 구성, 용접 특수 구성을 포함
 - > 공통 : 모듈형 건설 로봇 플랫폼(자율 주행 로봇 플랫폼, 리프트 모듈, 매니플레이터 모듈), XR 인터페이스 및 장치(HMD 등)
 - > GMAW 및 FCAW 용접 장치 End-of-Arm-Tool(EOAT) : 용접기, 용접 토치 등 포함
 - > 작업 보조 로봇 : 와이어 피더, 가스 공급 시스템(옵션)
 - > 센싱 시스템 : 비접촉 센서(예: LiDAR, 레이저 스캐너, 카메라 등)

2) 고소 내화뿔칠 작업

가. 현황 및 목표

○ 개발 목표

- 다목적 모듈형 건설 로봇 플랫폼 내화뿔칠 기술 개발
 - > 목표 가용 높이 : 최대 20m
 - > 적용 부위 : 강구조물 보, 기둥

- > 뽐칠부 사전처리 기능, 뽐칠 기능, AI기반 뽐칠 작업/비작업부 인식 기능, AI기반 외관 검사(고른 색상, 탈락 등) 기능, AI기반 뽐칠 두께검사 기능

○ 시공 현황

- 공정 프로세스 : 기둥 하부/배관 등 보양 → 신호수 배치 → 믹서기, 몰탈 펌프 등 장비 및 자재준비 → 고소작업대 상승 → 뽐칠 → 고소작업대 하강 → 이동
- 現시공 현황 : 고소 뽐칠 기준 1팀당 6명 구성, 고소뽐칠 기준 1일 뽐칠 물량 평균 1000평방미터
- 작업 시간 : 대상 목적물마다 상이

○ 개발 로봇 기반 시공 예상

나. 개발 컨셉

○ 성능 조건

- 목표 가용 높이 : 최대 20m
- 적용 대상 : 강구조물 보, 기둥
- 뽐칠재료의 종류 및 허용오차는 다음의 한국산업표준 및 표준시방서를 따름

> 뽐칠재료 및 방법 :

- ① 건축물 강구조공사 내화피복: KCS 41 31 50
- ② 내화피복공사: KCS 41 43 02

> 내화뽐칠 피복두께 품질판정기준 :

- ① 구조부재에 시공하는 내화 뽐칠재의 두께 및 밀도 시험방법: KS F 2901

6.1.6 판정기준

두께 측정 결과가 다음과 같으면 두께 결함인 것으로 한다.

- a) 측정값이 설계값보다 6mm 또는 25% 이상 작은 경우
- b) 평균값이 설계값보다 작은 경우

○ 작업자-로봇 협업 공정 정의

[표 2-6] 내화뿔칠작업 작업자-로봇 협업 공정 정의

단계	세부작업	내용 (개발기술 적용)
뿔칠준비	사전준비	<ul style="list-style-type: none"> - (작업자) 철골 구조물의 설계 도면, 시공상세도 (shop drawing), 뿔칠절차사양서(WPS) 등 작업 계획을 참고하여 상세 계획(토출량, 뿔칠 순서 및 방향 등) 수립 - (작업자) XR 인터페이스 활용, 수립된 뿔칠 상세 계획 로봇에 입력
	이동 및 운송	<ul style="list-style-type: none"> - (작업자) XR기반 고소작업대 이동 플랫폼 목적지 설정(예: 홀로렌즈 Waypoint 설정을 통한 경로 지정, 추종적 주행 등) - (로봇) 건설 변화 대응형 자율 주행, 추종적 주행 (보조작업 로봇)
	뿔칠준비	<ul style="list-style-type: none"> - (작업자) 뿔칠재료 준비 등 - (로봇) 강재면의 녹, 기름, 먼지 등 상태 확인 (로봇 센서를 통해 측정), 강재면 사전 청소
고소작업대 상승		<ul style="list-style-type: none"> - (작업자) XR 인터페이스 활용 고소작업대 제어 - (로봇) 상승시 충돌 방지 (LiDAR 등 로봇 센싱 활용)
뿔칠작업 (Level2 반자율화 원격제어)	(Option #2) 감시제어	<ul style="list-style-type: none"> - (로봇) 작업 계획 수립 및 제안, 시뮬레이션 (XR 시각화) - (작업자) 뿔칠 자세(각도/이격거리), 속도, 결과 검토 후 필요시 재교시 혹은 상세계획 변경 (XR 인터페이스 활용) - (작업자) 결과 검토 후 작업 미흡 구역 보강(XR기반 원격제어) - (로봇) 뿔칠 작업 수행
검사 및 보수	뿔칠검사	<ul style="list-style-type: none"> - (작업자) XR 비전 활용 원격 육안검사 수행 (색상의 균일성, 탈락 검사) - (로봇) XR기반 육안검사 수행시 육안검사 항목에 대해 검사결과 제공 (카메라와 레이저 스캐너 등 비접촉 센싱 활용) - (로봇) AI기반 비파괴검사(피복두께) 수행 (카메라와 레이저 스캐너 등 비접촉 센싱 활용) - (작업자) 비파괴검사 결과 검토
	결함부의 보수	- (작업자) 뿔칠 결함부 보수 수행 ⁶⁾
고소작업대 하강		<ul style="list-style-type: none"> - (작업자) XR 인터페이스 활용 고소작업대 제어 - (로봇) 하강시 충돌 방지 (LiDAR 등 로봇 센싱 활용)

6) 뿔칠 결함부의 보수 방법은 건축물 강구조공사 내화피복: KCS 41 31 50를 따름.

○ 자동화 수준

- 자동화 대상 구조물 : 강구조물 보, 기둥
- 각 공정 자동화 수준 : 작업 대상 환경 인식 후 원격조종에 의한 직접 교시 지원 (감시제어에 의한 자율 작업 가능)
- 현장 이동 및 고소작업대 고도 변경 : XR기반 목적지 인식 후 자율 주행/추종적 주행, 충돌방지를 위한 외부 센싱 수행
- 뿔칠 검사 : 로봇 비접촉 센싱 기반 원격 육안검사 및 비파괴검사 지원
- 로봇 구성 : 부위와 관계 없이 아래 공통 구성, 뿔칠 특수 구성을 포함
 - > 공통 : 모듈형 건설 로봇 플랫폼(자율 주행 로봇 플랫폼, 리프트 모듈, 매니플레이터 모듈), XR 인터페이스 및 장치(HMD 등)
 - > 뿔칠 장치 End-of-Arm-Tool(EOAT) : 분사기 등
 - > 작업 보조 로봇 : 뿔칠재료 믹싱 및 공급 시스템
 - > 센싱 시스템 : 비접촉 센서(예: LiDAR, 레이저 스캐너, 카메라 등)

3) 고소 도장 작업

가. 현황 및 목표

○ 개발 목표

- 다목적 모듈형 건설 로봇 플랫폼 도장 기술 개발
 - > 목표 가용 높이 : 최대 20m
 - > 대상 목적물 : 육상 교량(상부 및 하부), 해상 교량(상부), 건물 외벽
 - > 도장 방법 : 에어리스 스프레이 도장

> 개발 요소 기술

- 1) 대상 목적물별 도장재료 분사 노즐 개수 및 배치 최적화 기술
- 2) 도장재료 최적(속도/분사량/간격 등) 분사 기술
- 3) 도장 시 미세먼지 농도 측정 및 저감 기술
- 4) 작업자 시점 실환경/XR 데이터셋 구축 기술
- 5) 영상인식 기반 도장 구역 식별 및 경로 생성 기술
- 6) 도장 작업 고정밀 HITL 품질검사 시스템

○ 시공 현황

- 공정 프로세스 : 자재준비 → 신호수 배치 → 고소작업대 상승 → 외벽 도장 → 고소작업대 하강 → 이동
- 現시공 현황 : Storage Tank 외부 도장 기준 1팀당 3명 구성, 고소도장 기준 1일 도장 물량 평균 370평방미터
- 작업 시간 : 대상 목적물마다 상이

나. 개발 컨셉

○ 성능 조건

- 목표 가용 높이 : 최대 20m
- 대상 목적물 : 육상 교량(상부 및 하부), 해상 교량(상부), 건물 외벽
- 도장재료의 종류 및 품질, 성능평가 기준은 다음의 표준을 따름

> 도장 재료 : 도로교 표준시방서, 건축공사 표준시방서

> 도장 방법 : 에어리스 스프레이 도장

> 성능평가 기준

- ① 도막두께: KS M ISO 2808
- ② 부착력: KS M ISO 4624
- ③ 도장 소요 시간: 건설공사 표준품셈

○ 작업자-로봇 협업 공정 정의

[표 2-7] 도장작업 작업자-로봇 협업 공정 정의

단계	세부작업	내용 (개발기술 적용)
자재준비		<ul style="list-style-type: none"> - (작업자) 도장에 활용할 도료의 종류 검토 및 자재공급부에 도료 주입 - (작업자) 에어리스 스프레이 노즐 막힘 등 로봇 장치의 하자 점검 - (작업자) XR 인터페이스를 활용하여 수립된 도장 상세 계획을 로봇에 입력 - (로봇) 도장 상세 계획에 기반하여 최적 도장 작업 경로 생성(XR 시각화)
	고소작업대 상승	<ul style="list-style-type: none"> - (로봇) 최적 도장 작업 경로에 따라 고소작업대 높이 제어(XR 시각화) - (로봇) 고소작업대 이동 및 상승 시 충돌 방지(LiDAR 등 로봇 센싱 활용) - (작업자) XR 기반 몰입형 원격조종으로 고소작업대 상세 위치 조정
본도장 (Level2 반자율화 원격제어)		<ul style="list-style-type: none"> - (로봇) 영상인식 기반 자율 도장 작업 수행(XR 시각화) - (작업자) 도장 결과 검토 후 작업 미흡 구역 보강(XR기반 원격제어)
검사 및 보수	도장검사	<ul style="list-style-type: none"> - (작업자) XR 비전 활용 원격 육안검사 수행 (기포, 흠집, 주름, 뭉침, 도장얼룩, 도막의 균일성, 색상, 마감) - (로봇) XR 기반 육안검사 수행 시 육안검사 항목에 대해 검사결과 제공(카메라, 레이저 스캐너 등 비접촉 센싱 활용) - (로봇) 도막두께 검사 수행(다이얼게이지, 버니어캘리퍼스, 자기 유도 방식, 초음파 방식 등 활용) - (작업자) 도막두께 검사 결과 검토
	결함부의 보수	<ul style="list-style-type: none"> - (작업자) 도장결함부 보수 수행
고소작업대 하강		<ul style="list-style-type: none"> - (로봇) 작업 종료 시 고소작업대 하강 및 다음 장소로 자율 주행(XR 시각화) - (로봇) 고소 작업대 이동 및 하강 시 충돌 방지(LiDAR 등 로봇 센싱 활용) - (작업자) XR 기반 몰입형 원격조종으로 고소작업대 상세 위치 조정

7) 도막두께 검사 방법은 도로교 표준시방서 '1.14.2 도막두께'를 따름.

○ 자동화 수준

- 각 공정의 자동화 수준 : 도작업 대상 환경 인식 후 원격조종에 의한 직접교시 및 감시제어 기반 반자동화 작업 가능
- 자재준비 : 도료의 검토, 주입 등 사전준비 진행 후 로봇에 도장 상세 계획 입력 시 최적 도장 작업 경로 자동 생성
- 고소작업대 제어 : 최적 도장 작업 경로 기반 자율 주행 및 고소작업대 높이 제어, XR 기반 원격조종으로 고소작업대 상세 위치 조정, 충돌방지를 위한 외부 센싱 수행
- 본도장 : 영상인식 기반 자율 도장 작업 수행, 도장 결과 검토 후 원격조종으로 작업 미흡 구역 보강
- 검사 및 보수 : 로봇 비접촉 센싱 기반 원격 육안검사 및 도막두께 검사 지원
- 로봇 구성 : 도장 대상 목적물과 관계 없이 아래의 구성을 지님
 - > 모듈형 건설 로봇 플랫폼(자율 주행 로봇 플랫폼, 리프트 모듈, 매니퓰레이터 모듈), 에어리스 스프레이 노즐, 자재공급부, XR 인터페이스 및 장치(HMD 등), 비접촉 센서(예: 카메라, 레이저 스캐너 등), 도막두께 측정 장치(다이얼게이지, 버니어캘리퍼스, 자기 유도 방식, 초음파 방식 등)

3. 수혜 대상 및 이해관계자

시공사, 전문건설업체, 건설 작업자 및 관리자, 건설로봇 개발사, 관계 부처가 본 사업의 수혜 대상

○ 건설사(종합건설업체 및 전문건설업체)

- 현장 요구조건에 따라 최적화 가능한 표준화 플랫폼 제공 및 작업 툴(EOAT) 공동개발

- 건설사가 임대 가능한 건설로봇 테스트베드를 제공함으로써 개발 단계의 건설로봇 현장 테스트에 있어 생산성, 안전성 등 측면에서 리스크 완화
 - 테스트베드 기반 시험평가체계 개발과 건설 로봇 인증/표준 개선을 함께 추진함으로써 반복적이고 비효율적인 건설 로봇 인증 제도 개선
 - 건설고소작업의 자동화 및 로봇 기술의 도입을 통한 무인화(투입인원 기존 대비 50% 이상 절감 목표)를 통한 생산성 향상(현장 작업자 대비 능률 100% 이상 향상 목표)
 - 고위험 건설고소작업 중 발생하는 안전사고 발생률을 획기적으로 감소시키는 데에 기여(고소작업대 관련 사고사망자수를 절반 이상 절감 기대)
 - 단순 실증 외 로봇 개발 과정에 건설사가 참여할 경우 과제 종료 이후 개발 로봇 사용료 할인 등 실질적 혜택 제공 검토
- 건설작업자 및 관리자
- 고소작업대 관련 작업을 지상에서 원격으로 수행하여 안전한 근로환경 보장
 - 로봇 자동화로 관리자의 효율성 증가, 관제시스템의 효율성을 향상하여 현장의 효율적인 관리 가능
- 건설로봇 개발사
- 개발 로봇(연구 성과물)의 실시권 확보를 통해 상용화 및 시장 진입
 - 로봇 시스템에 필요한 소프트웨어 및 하드웨어 개발 기술을 제공함으로써 건설 로봇 시장의 규모 성장
- 관계부처(고용노동부, 국토교통부, 산업통상자원부 등)
- 스마트 건설기술 관련 정책 수립시 과학적 근거자료로 활용
 - 지침, 가이드라인 등의 정책적 활용

제2절 성과목표 및 지표(공통/개별)

1. 사업 성과 목표 및 성과지표(부처 공통)

□ 성과목표

[표 2-8] 사업 성과 목표 및 평가방법

범위	평가 항목 (성능지표)	단위	현재 최고 기술수준		개발 목표치	평가방법
			국내 (보유기관)	해외 (보유기관)		
고소작업 특성화 기술 및 XR기반 작업자-로 봇 원격제어 기술 개발	용접 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업생산성	cm/ min	15 ¹⁾ (KISWEL)	-	파이프: 15이상 철골: 20이상	시작품 현장 실증 (작업시간 측정)
	용접작업 고정밀 HITL 품질검사 시스템 정확도	%	-	-	NDT(영상, 초음파, 방사선) 정확도 98% 이상	시작품 현장 실증 (정답 비율)
	내화뿔칠 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업속도	H형 강 1개소 /min	25 ²⁾ (기존방식)	-	H형강(700* 900*13*24) 1개소 기준 25분 이하	시작품 현장 실증 (작업시간 측정)
	내화뿔칠 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업인원 감축	%	100 (기존방식)	-	50% 이상	시작품 현장 실증 (작업인원 체크)
	내화뿔칠 고정밀 HITL 품질검사 시스템 품질검사 정확도	%	-	-	90% 이상	시작품 현장 실증 (정답 비율)
	도장 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업속도	m ² / min	-	-	교량: 30이상 건물: 60이상	시작품 현장 실증 (작업시간 측정)
	도장 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업인원 감축	%	기존 방식 투입 인원 대비 50% (한국기계연 구원)	-	50% 이상	시작품 현장 실증 (작업인원 체크)
	도장 고정밀 HITL 품질검사 시스템 품질검사 정확도	%	-	-	90% 이상	시작품 현장 실증 (정답 비율)
	공정별 실환경/XR환경 시연 작업자 수	명	-	10 ¹⁵⁾ (미국, 워싱턴대)	실환경:10 XR:10이상	사용자 테스트
	공정별 실환경/XR환경 작업시연 수	건	-	150 ¹⁵⁾ (미국, 워싱턴대)	실환경:100 XR:150이상	사용자 테스트
	현실-XR가상공간 정합 오차	mm	≤ 10 (한국과학기술 연구원)	-	5 이하	자체평가

	원격 제어 지연	ms	10 ³⁾ (ETRI)	300 ⁴⁾ (캐나다, University of Saskatche wan)	200 이하 ⁵⁾	자체 평가
	원격 운용 거리	km	280 ³⁾ (ETRI)	-	5 이상	자체 평가
	단위작업 거리오차	mm	-	≤ 4.82 ⁴⁾ (캐나다, University of Saskatche wan)	5 이하	사용자 테스트
	NASA-TLX 작업 인지부하 감소율	%	-	≥ 43.1% ⁶⁾ (미국, WPI)	20 이상	사용자 테스트
	SUS 사용성 평가 개선율	%	-	≥ 35.1% ⁶⁾ (미국, WPI)	10 이상	사용자 테스트
	XR 인터페이스 Throughput 개선율	%	-	-	10 이상	사용자 테스트
	고소작업 로봇플랫폼 인증(안)	건	-	-	1	인증(안)
	3개 공중 고소작업 로봇플랫폼 표준시방서/지침 (안)	건	-	-	3	표준시방서/지침 (안)
	건설현장 자율주행/자율작업 학습데이터 표준(안)	건	-	-	2건 (각 1건 이상)	국가표준(안)
	건설현장 자율주행/자율작업 학습데이터 적합성	건	-	-	2건 (각 1건 이상)	공인인증 품질검증결과서 ¹⁸⁾
	고소작업 로봇 플랫폼 교육과정 프로그램	건	-	-	1건 이상	교육과정 프로그램
	산업체 대상 기술강연회	건	-	-	3건 이상	기술강연회
	MOU 체결	건	-	-	6	MOU 체결
작업환경 센싱모듈 및 통합관제시 스템 개발	다중 로봇/UAV 통합 지도 작성의 정확도	mm	-	10 (Hitech) ⁷⁾	5	시험결과서 테스트베드 검증
고소작업 공중별 로봇 작업지능	복합 자율작업 효율성	%	-	-	100% 이상	복합 작업 제어를 이용한 작업시간과 현장 작업자의 작업시간을

						비교 ^{8,9)}
	복합 자율작업 성공률	%	-	-	95% 이상	원격작업 자율 수행 성공률 ^{8,10)}
	고소 매니플레이터 반복 정밀도	mm	-	-	1이하 ¹¹⁾	20m 높이에서 매니플레이터 반복 정밀도 측정 ¹²⁾
고소작업 로봇 모듈 개발	자율주행 플랫폼 가반하중/ 범용작업 매니플레이터 가반하중	kg	1,000 (티라로보틱스)/ -	1,500 (KUKA, 독일)/ -	1,500 이상/ 15 이상	최대 0.7m/s ¹³⁾ 의 속도로 이송 가능한 중량물/ 최대 작업 범위(1500mm)기준 가반하중 측정
	자율주행 플랫폼 경사 극복 능력/ 리프트 모듈 최대 작업 높이	°/ m	-	-	±7 이상 ¹⁴⁾ / 20 이상 ¹⁵⁾	최대 가반 하중 상태에서 경사 극복 여부 확인/ 작업 수행 성공
	로봇 플랫폼 주행 정밀도/ UAV 실내 주행 정밀도	mm	30mm (마젠타로보틱스)/ -	26mm (MIR, 덴마크)/ -	±20 이하/ ±50 이하	KOROS 1079-2 ¹⁶⁾
	동적/정적 장애물 회피율	%	-	-	100%	KS B 7312 ^{16,17)}

- 1) SMAW / E7016 / 3.2MM / AC / 80~120A / 36V 기준
- 2) 김건우(2021), 건설현장 로봇도입에 적합한 공중 선정을 위한 타당성 평가 및 사례 연구-반도체 제조시설 건설 사례 중심으로-
- 3) 초 저지연, 고신뢰 5G 유무선 네트워크 기반 가상현실(VR) 장비를 이용한 원격 제조공정 관제
- 4) 가상현실 미적용, VLAN 적용
- 5) Madder et al. (2019)의 연구에 따르면, 250ms 이하에서는 사용자가 지연을 인지하지 못하며, 0~400ms 사이에서는 작업 정밀도에 차이가 거의 없음
- 6) 근거리에서 나무도막을 집는 매우 간단한 작업에 적용되었음
- 7) <https://www.hitechbimservices.com/bim-projects.php>
- 8) 현장 작업자 고소 자율 작업(용접, 내화뿔칠, 도장) 분석 및 요구사항 분석을 통해 정의한 자율 작업 검증 시나리오로 평가 수행
- 9) 효율성 = 현장작업자 작업시간/복합 작업제어 작업시간 * 100%
- 10) Level 2(작업자가 작업위치 설정에만 개입, 로봇이 자율작업 수행) 수준의 자율화 성공률
- 11) 높이 20m 이상 / 정확도 1mm 이하급 사양 개발 최초
- 12) ISO9283
- 13) 작업대가 적체위치를 벗어난 상태 기준 (KS B ISO 16368 이동식 승강작업대(MEWP) - 설계, 계산, 안전 요구사항 및 시험방법 참조)
- 14) 1/18(6.4°)
- 15) 높이 20m 이상 / 정확도 1mm 이하급 사양 개발 최초
- 16) 건설 현장 주행 환경 요소(단차, 장애물, 작업자 등) 분석을 통한 주행 환경 요구사항을 만족하는 실내환경에서 평가 수행
- 17) 건설현장의 작업자 안전성 보장을 위해 KS B 7312 표준 시험 기준 100%를 목표로 함
- 18) 인공지능 학습용 데이터 품질관리 가이드라인 및 구축안내서 ('23.03, 과기부, NIA, TTA)의 품질관리 지표 및 검사방법을 따름

□ 개발 로봇 상세사양

[표 2-9] 개발 로봇 상세사양

		1종	2종	3종
자율주행 플랫폼	가반하중 (ton)	0.5	1.0	1.5
	경사 극복 능력 (%)	±7 이상		
	최고 속도 (m/s)	0.7 이상		
	정지거리 (m)	0.5 이내		
	주행 정밀도 (mm)	±20 이하 (KOROS 1079-2 인증)		
	동적/정적 장애물 회피율 (%)	100 (KS B 7312 인증)		
리프트 모듈 (m)		5	10	20
범용작업 매니플레이터	가반하중 (kg)	15 이상		
	작동반경 (mm)	1500 이상		
	무게 (kg)	250 이하		
	반복 정밀도 (mm)	1 이하		
원격제어	운용 거리 (km)	5 이상		
	제어 지연 (ms)	200 이하		
작업 정밀도	고소용접작업	강구조공사 표준시방서(용접) 비파괴시험의 범위(KCS 14 31 20)		
	고소내화뿔칠작업	구조부재에 시공하는 내화 뿔칠재의 두께 및 밀도 시험방법(KS F 2901)		
	고소도장작업	도막두께(KS M ISO 2808), 부착력(KS M ISO 4624)		
작업 생산성	고소용접작업 (cm/min)	15 이상(파이프), 20 이상(철골)		
	고소내화뿔칠작업	H형강(700*900*13*24) 1개소 기준 25분 이하		
	고소도장작업 (m ² /min)	3 이상(교량), 6 이상(건물)		

□ 숙련 작업자 대비 개발 로봇의 우수성 검증 방안

- 고소작업 3종(용접, 내화뿔칠, 도장) 분석 및 요구사항 분석을 통해 정의한 작업 검증 시나리오를 활용하여 테스트베드 내 각각 개발 로봇과 숙련 작업자가 반복하여 수행 및 평가
- 성과목표 및 개발로봇 상세사양에서 제시한 작업 정밀도, 작업 생산성, 품질검사 정확도 등을 측정, 비교·분석하고 평가결과와 작업인원 감축 효과 등을 종합적으로 고려하여 개발 로봇의 우수성 검증 후 결과 보고

□ 성과지표

[표 2-10] 사업 성과 지표 및 가중치

성과 구분	성과지표명	가중치
과학적 성과	SCI급 논문 평균 mnrIF(국가평균 이상)	0.05
기술적 성과	등록 특허 SMART 지수	0.05
	개발기술 성능목표 달성도(테스트베드 결과)	0.05
	표준 개발 건수	0.1
경제적 성과	기술이전 건수	0.05
	부품 및 기술 국산화율	0.15
건설현장 실용화 성과	기술개발품의 적합성평가 이행률	0.15
	고소작업 기술의 현장활용 건수	0.2
	사용자 대상 시제품 만족도 조사	0.2
합계		1

(목표치 설정근거는 제3절 사업내용 참조)

구분	항목	개발 목표치	평가방법	
논문	학술회의 발표 논문건수(국내/국외)	65	발표 횟수	
	학술지 게재 논문건수(국내/국외)	35	개체 편수	
	SCI(E)급 학술지 게재 논문건수	27	논문 건수	
지식 재산권	국내	출원	38	출원서
		등록	20	등록서
	국외	출원	2	
		등록	1	
	소프트웨어(S/W) 등록건수		19	등록증
상용화	현장시험 건수	30	보고서	
	시제품 출시 건수	12	등록여부	
	MOU건수	8	MOU 체결	
	인증 제안	1	인증(안)	
	표준시방서/지침 제안	3	표준시방서/지침(안)	
	데이터 표준	2	국가표준(안)	
	교육과정 프로그램	1	교육과정 프로그램	
	산업체 기술교육 지원	3	기술강연회 개최	

- 표준화 로봇모듈 및 용접/내화뿔칠/도장 작업 특성화 기술 통합
- 개발 기술 테스트베드 실증 및 통합 성능 평가
- 건설현장의 고소작업의 작업자-로봇 협업 시 Level2* 반자율화 원격제어를 구현하기 위한 확장현실 기반 협업 시스템 개발
 - ※ Level 2(부분 자동화): 작업자가 작업위치(점/선/면 등) 설정에만 개입, 로봇이 자율작업 수행. 로봇 자율화 수준의 정의는 '제2장 1절 2. 사업 지원 범위' 참조
 - 지능형 로봇의 자율성을 활용하고, 필요시 작업자의 개입이 원활하게 이루어지도록 하는 Level2 반자율화 작업 방식의 적용을 위한 인간-로봇 상호작용 기술 개발
 - 로봇이 고소작업 부위를 실시간으로 3D 센싱하고, 작업자의 눈앞에 시각화하여 작업자가 전역 작업 할당보다 더 미세한 지역 작업 할당이 가능하도록 하는 XR 기반 작업영역 시각화 기술 개발
 - 실시간 로봇 작업 데이터(작업환경의 장애물 등 위험요인, 로봇 및 작업자 의도, 작업 경로 및 작업 결과 등)를 표현할 수 있는 XR기반 시뮬레이션 기술 개발
 - 작업자가 원격(고소)에 위치한 로봇의 양팔을 로봇 시점에서 직접 조종하여 직접교시 및 작업 미세조정이 가능하도록 하는 XR기반 몰입형 원격제어 기술 개발
- 실증 테스트베드 구축 및 실환경 기반 운영 성능 검증
 - 실 환경 기반 고소작업 환경(바닥조건, 높이 등)/공종 별 실증이 가능한 스마트 사이트 구축
 - 기술 실증 및 시험인증 체계를 구축하고 국내 기업의 기술애로 및 인증규제 대응 지원
- 건설로봇플랫폼 기술의 확산 및 지속적 발전을 위해 제도 정비 및 인력 교육 등 제반 인프라 구축과 실용화 방안 마련
 - 현장 적용을 위한 규제 개선 및 로봇 플랫폼 표준/인증 개발

- 공법 개선 및 적용/운영/교육 프로그램 개발
- 세부기술별 사업화/성과활용 세부전략 수립 및 실행

나. 기술개발 필요성

- 건설 고소작업 중 용접, 내화뿔칠, 도장 작업은 전 과정에서 인간 노동에 의존하고 있어 균일한 품질 확보가 어렵고, 높은 위치에서 작업이 이루어져 안전사고 발생 위험이 높음
 - 용접 작업은 그 특성상 고온, 스파크, 강한 빛 등으로 인해 작업 안정성이 떨어지며, 특히 고소작업 시 이러한 요인들이 더해져 안전사고 위험성이 크게 증가함
 - 철골 구조의 내화성능 확보를 위해 널리 사용되는 내화뿔칠 공법은 뿔칠 시 소음, 분진, 자재의 튀는 현상, 고소작업으로 인한 추락 사고 발생 가능성 등 작업환경이 열악하고, 기능인력의 숙련도에 따라 내화피복 두께 등의 품질이 좌우되어 균일한 품질확보가 어려움
 - 건물 및 교량 등의 도장 작업은 대체로 사다리차나 로프를 활용한 열악한 작업환경에서 이루어지며 도장공의 숙련도가 달라 균일한 작업 생산성과 품질을 확보하기 어렵고, 전체 건설 사망재해의 3%를 차지하는 고위험 공종임
- 그러나 각 공종별로 작업 특성(작업 환경조건, 자동화 요구사항, 작업 정밀도, 후속작업, 품질검사항목 등)이 다양하여 표준화된 로봇 플랫폼 및 제어기술만으로는 한계가 있으므로, 공종별 요구조건을 파악하고 각 공종에 최적화된 시스템 통합 및 실증이 필수적임
 - 예를 들어, 도장 및 내화뿔칠 작업은 작업 건(Gun)과 빔(Beam)과의 일정 이격거리 조절이 요구되나, 용접 작업은 mm단위 이격 정확도로 용접기를 조절해야하므로 요구되는 로봇 작업 정밀도 혹은 작업 속도 등이 달라질 수 있음
 - 또한, 도장 및 내화뿔칠 작업은 노즐 청소 혹은 잔여 물질 처리 등 후속 작업이 추가적으로 요구되므로, 로봇 작업 시나리오에 있어 이

러한 후속 작업을 반영해야 함

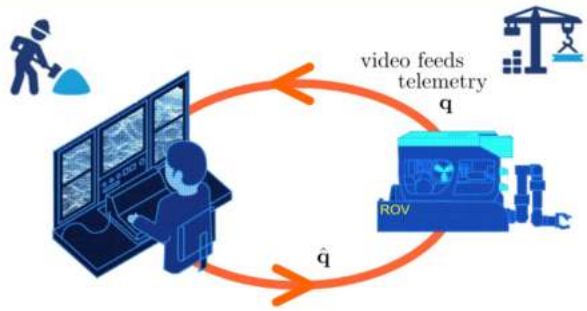
- 건설 현장의 인간-로봇 협업 능력 향상을 위한 효과적인 커뮤니케이션 기술 필요
 - 건설 산업 뿐만 아니라 의료, 제조, 우주 탐사, 농업 등 다양한 핵심 산업 분야에 대한 로봇의 적용성을 저하시키는 가장 큰 원인은 인간 작업자와의 협업 문제이며, 제한적인 협업 능력은 곧 로봇 현장 도입 시 생산성 저하, 안전성 저하로 이어짐
 - 인간-로봇 커뮤니케이션 기술의 개발을 통해 로봇의 협업 능력을 향상시키고 현장 적용성을 높일 수 있음
- 건설 작업자가 기술자의 도움 없이 즉석에서 손쉽게 사용 가능한 상호작용 디자인 필요
 - 정밀도가 요구되는 건설 작업에, 머리 착용 디스플레이(HMD) 디바이스를 통해 제스처, 시선, 음성 등 작업자가 친숙한 방식으로 건설 로봇을 제어할 수 있는 멀티모달 상호작용 방식의 개발 필요
- 실시간 인간-로봇 양방향 커뮤니케이션이 가능한 실시간 데이터 중심 사용자 인터페이스 개발 필요
 - 기존 인간-로봇 협업과정에서 인간은 로봇의 의도를 예측하는 데 어려움을 겪으며, 동시에 로봇은 인간과의 효과적인 협업을 위해 본질적으로 요구되는 복잡한 인간 행동에 대한 추론 능력이 부족함
 - 작업 환경, 부재, 작업 목표 관련 정보와 같은 다양한 데이터 소스를 집계, 시각화, 시뮬레이션하여 작업자의 복잡한 의사 결정을 지원하기 위한 사용자 인터페이스 설계가 필요함
 - 몰입형 데이터 분석 및 실시간 데이터 시각화 기술 등을 차용하여 건설 고소작업에 최적화된 확장현실 인터페이스 설계가 필요함
 - 로봇의 인식 결과, 의사결정, 그에 따른 작업 프로세스 등을 시각화하여 설명 가능한 인간-로봇 협업 기술 개발이 필요함

- 고소작업이 주로 이루어지는 대규모 실내외 환경의 적용성을 고려한 사용자 중심 디자인 및 평가방법 개발 필요
 - 기존의 로봇공학 분야에서 개발된 확장현실 기반 인간-로봇 상호작용 기술은 주로 완벽히 통제된 실험실 환경에서만 검증되었으며, 건설현장과 같은 비구조화되고 비정형화된 대규모 공간에서는 시도된 적이 없으나, 실제 대규모 건설현장 적용에 있어서는 실험실과는 완전히 새로운 기술적 접근이 요구됨(예를 들어, 로봇 주변 환경에 투영하는 프로젝션 방식은 실제 현장에 적용될 시 광조건 변화 등 외부 환경 변화에 영향을 받아 활용도가 저하될 수 있음)
 - 실제 현장 적용성을 고려한 상호작용 시스템 개발을 위해서는 수요자인 건설 작업자의 니즈를 고려한 사용자 중심 디자인이 요구되며, 이러한 기술 프로토타이핑 및 평가 프로세스에 확장현실이 개입 가능함
- 실 현장을 모사한 시뮬레이션 환경과 실 환경 기반 로봇의 운영 및 성능을 평가 할 수 있는 1:1 스케일의 테스트베드 구축 필요
 - 건설현장은 타 산업과 다른 생산의 일회성이라는 특성으로 현장을 개발 단계의 작업로봇으로 실증하는 것은 오시공, 품질저하 및 안전사고 등 재산상/사회적 손실을 야기할 수 있음
 - 실 현장을 모사한 테스트베드 구축을 통해 기술 실증 및 시험인증체계를 구축하고 국내 기업의 기술애로 및 인증규제 대응 지원 필요
 - 고소작업의 빈도가 높은⁸⁾ 철골구조 테스트베드 구축 필요(단기), 다양한 건설로봇의 검·인증을 위한 철골콘크리트구조를 포함한 테스트베드 구축 필요(장기)
- ※ 국토안전관리원 '건설안전사고사례('23.04)'에 따르면, 최근 5년간(2019~2023) 안전사고 중 추락사고의 비중이 가장 높은 공종은 철골공사(30.2%)으로, 동기간 철근콘크리트공사(16.0%), 건축 토공사(14.0%), 해체 및 철거공사(28.5%)보다 높은 것으로 나타남

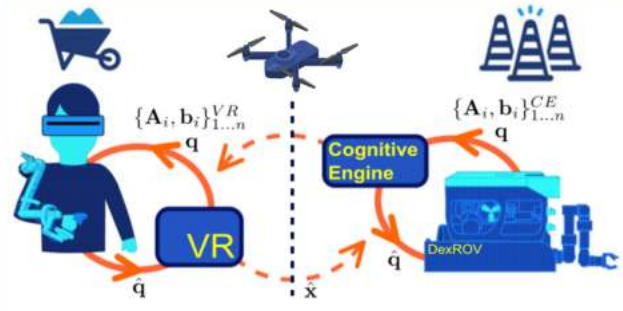
8) 한국산업안전보건공단(2019), 현장 작업자를 위한 철골 작업안전

- 고소작업 로봇플랫폼 기술의 확산 및 지속적 발전을 위해 제도 정비 및 인력 교육 등 제반 인프라 구축과 실용화 방안 마련 필요
 - (법제도/표준/인증) 건설로봇 플랫폼 기술의 표준 부재로 인한 시장의 기술 적용 불안감 및 비효율성 제거를 위해 제작 및 품질관리 기준, 표준시방서, 인증 등 수립 필요
 - (인력 교육) 기존 작업자 의존 생산 방식에서 건설로봇 협업 기술 및 자동화 기술 도입으로 예측되는 건설로봇 인력 수급 한계를 극복하기 위해 재보수 교육 방안 마련 및 재보수 교육 필요
 - (실용화 전략) 개발 기술의 건설산업 정착을 위한 수요처 맞춤형 사업화 및 성과활용 전략 수립 및 실행 필요
 - (데이터 표준) 건설현장의 다양한 작업환경 및 고소작업 3종을 고려한 자율주행 및 자율작업 학습 데이터 관련 로봇-로봇 간, 로봇-환경 간 데이터 표준 개발 필요

기존 원격제어 기술



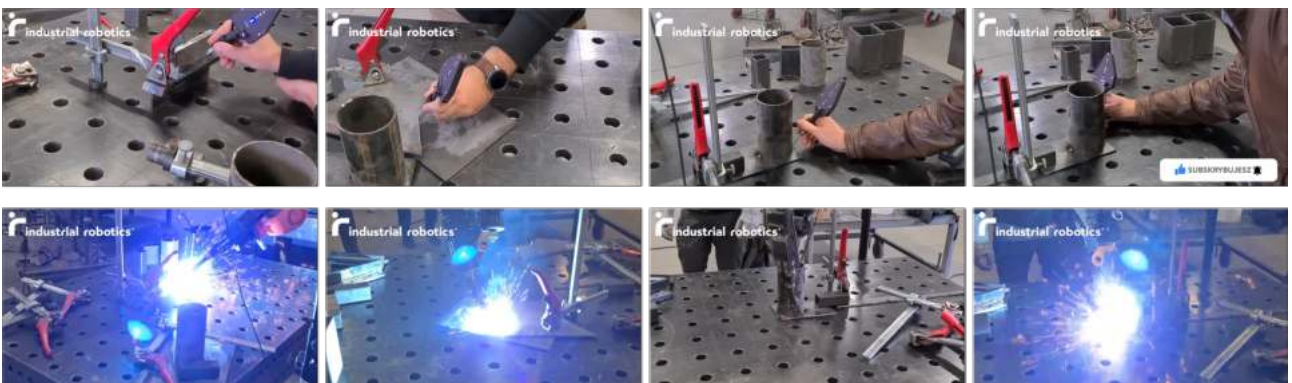
XR 기반 반자율화 원격제어



[그림 2-13] XR기반 반자율화 원격제어 기술 개념도(Havoutis and Calinon 2019에서 수정): (왼쪽) 작업자가 건설현장의 로봇을 제어하는 기존 원격제어 시나리오. 로봇의 카메라에서 수집한 일련의 비디오 피드를 시각화하는 다수의 2D 모니터를 기반으로 주변환경을 인지하고 정밀한 작업을 수행해야함. (오른쪽) XR기반 반자율화 원격제어 시나리오. 로봇 센싱을 바탕으로 가상 환경에 실시간 시각화하고, 몰입형 XR 인터페이스(로컬)에서 작업을 명령 및 시연하여 원격로봇이 작업지능을 바탕으로 학습 및 작업할 수 있도록 함.



[그림 2-14] 실환경 기반 작업 시연을 통한 학습용 대용량 데이터셋 구축 예시 1: (위) 자동차 부품 도장 시연 과정, (아래) 시연 학습을 통한 로봇 작업 수행. 작업자 시연 시 외부 센싱 시스템이 완벽히 구축되어 있는 환경에서만 시연이 가능하며, 시연된 경로만 단순 재현이 가능하다는 한계가 있음(출처: 리투아니아 Industrial robotics사).



[그림 2-15] 실환경 기반 작업 시연을 통한 학습용 대용량 데이터셋 구축 예시 2: (위) 제조라인 용접 시연 과정, (아래) 시연 학습을 통한 로봇 작업 수행. 작업자 시연 시 외부 센싱 시스템이 완벽히 구축되어 있는 환경에서만 시연이 가능하며, 시연된 경로만 단순 재현이 가능하다는 한계가 있음(출처: 리투아니아 Industrial robotics사).

다. 상세기술개발 내용

□ 중점과제 구성 및 기술 확보 전략

○ 중점과제 구성

구분	과제명
중점과제 1	고소작업 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술 개발 및 실용화
핵심과제 1-1	고소 용접 작업 특성화 기술 개발 및 실증
핵심과제 1-2	고소 내화뿔칠 작업 특성화 기술 개발 및 실증
핵심과제 1-3	고소 도장 작업 특성화 기술 개발 및 실증
핵심과제 1-4	고소작업 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술 개발
핵심과제 1-5	실환경 기반 테스트베드 구축
핵심과제 1-6	제도/공법/교육 개선 및 실용화

○ 중점과제 기술 확보 전략

핵심과제명	핵심기술	확보전략		
		자체 개발	기술 도입	글로벌 협력
고소 용접 작업 특성화 기술 개발 및 실증	용접 작업 특성화 통합 로봇 플랫폼	○		
	용접 작업 고정밀 HITL 품질검사 시스템	○	○	
고소 내화뿔칠 작업 특성화 기술 개발 및 실증	내화뿔칠 작업 특성화 통합 로봇 플랫폼	○	○	
	내화뿔칠 작업 고정밀 HITL 품질검사 시스템	○	○	
고소 도장 작업 특성화 기술 개발 및 실증	도장 작업 특성화 통합 로봇 플랫폼	○	○	
	도장 작업 고정밀 HITL 품질검사 시스템	○	○	
고소작업 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술 개발	작업자-로봇 협업 SW 프레임워크 설계	○		
	XR기반 환경, 작업공정 모델링-시각화 및 시뮬레이션 기술	○		○
	XR기반 몰입형 고정밀 원격 제어 SW모듈 및 조작 인터페이스	○		○
실환경 기반 테스트베드 구축	실환경 모사 스마트 사이트 설계 및 구축	○	○	
	원격제어-로봇플랫폼 사용자 경험 평가	○		
제도/공법/교육 개선 및 실용화	법제도 개선 및 기술표준/인증 개발	○		
	교육과정 개발 및 인력 양성	○		
	실용화 전략	○		

□ 핵심과제 1-1 : 고소 용접 작업 특성화 기술 개발 및 실증

○ 연구정의 및 목표

연구정의 (개요)	로봇 플랫폼을 활용하여 고소 용접 작업의 인력을 대체하면서도 균일한 작업 품질을 확보할 수 있는 용접 작업 특성화 기술을 개발하고, 이를 실제 환경에서 실증함
연구목표	<ul style="list-style-type: none"> ■ 용접 작업 작업자-로봇 협업 임무 시나리오 및 특성화 모듈 설계 ■ 용접 작업 환경, 시각, 작업정보 등 대용량 데이터셋 구축 및 특성화 모듈 제작 ■ 용접 작업 고정밀 HITL 품질검사 시스템 개발 ■ 표준화 로봇모듈 및 특성화 기술 통합 ■ 실증 및 통합 성능 평가

○ 연차별 연구목표 및 연구내용

연차	연구목표	연구내용
1차년도	용접 작업 작업자-로봇 협업 임무 시나리오 및 특성화 모듈 설계	<ul style="list-style-type: none"> - 건축/토목 용접작업 적용 시나리오 발굴 - 용접 작업 작업자-로봇 협업 임무 시나리오 설계 - 인력기반 작업과 용접로봇 작업 비교 분석을 통한 품질검사 개념 설계
2차년도	용접 작업 환경, 시각, 작업정보 등 대용량 데이터셋 구축	<ul style="list-style-type: none"> - 작업자 시점 용접 실환경/XR(가상)환경 영상 데이터셋 구축 및 품질검증 - 용접기 Programmable Logic Controller(PLC) Log 데이터셋 구축 및 품질검증 - Non-Destructive Testing(NDT, 사진, 방사선, 초음파) 데이터셋 구축 및 품질검증
3차년도	용접 작업 특성화 모듈 제작 및 고정밀 HITL 품질검사 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> - AI기반 용접검사/NDT 시스템 개발 - 고정밀 HITL 품질검사 시스템 프레임워크 구축 - 고정밀 HITL 품질검사 시스템 학습 및 테스트 - 고정밀 HITL 품질검사 시스템 시제품 제작 및 테스트
4차년도	표준화 로봇모듈 및 특성화 기술 통합	<ul style="list-style-type: none"> - 시스템 통합 및 테스트 - 시스템 보완
5차년도	실증 및 통합 성능 평가	<ul style="list-style-type: none"> - 건축/토목 테스트베드 적용 및 통합 성능 평가 - 매뉴얼 작성

□ 핵심과제 1-2 : 고소 내화뿔칠 작업 특성화 기술 개발 및 실증

○ 연구정의 및 목표

연구정의 (개요)	로봇 플랫폼을 활용하여 고소 내화뿔칠 작업의 인력을 대체하면서도 균일한 작업 품질을 확보할 수 있는 내화뿔칠 작업 특성화 기술을 개발하고, 이를 실제 환경에서 실증함
연구목표	<ul style="list-style-type: none"> ■ 내화뿔칠 작업 작업자-로봇 협업 임무 시나리오 및 특성화 모듈 설계 ■ 내화뿔칠 작업 환경, 시각, 작업정보 등 대용량 데이터셋 구축 및 특성화 모듈 제작 ■ 내화뿔칠 작업 고정밀 HITL 품질검사 시스템 개발 ■ 표준화 로봇모듈 및 특성화 기술 통합 ■ 실증 및 통합 성능 평가

○ 연차별 연구목표 및 연구내용

연차	연구목표	연구내용
1차년도	내화뿔칠 작업 작업자-로봇 협업 임무 시나리오 및 특성화 모듈 설계	<ul style="list-style-type: none"> - 건축/토목 내화뿔칠작업 적용 시나리오 발굴 - 내화뿔칠 작업 작업자-로봇 협업 임무 시나리오 설계 - 피복두께별 최적 뿔칠 조건(속도/분사량/간격 등) 및 패턴 도출 - 내화뿔칠 자재공급부 및 피복두께 검사장치 설계
2차년도	내화뿔칠 작업 환경, 시각, 작업정보 등 대용량 데이터셋 구축 및 특성화 모듈 제작	<ul style="list-style-type: none"> - 작업자 시점 내화뿔칠 실환경/XR(가상)환경 영상 데이터셋 구축 및 품질검증 - 내화뿔칠 작업자의 원격제어(실환경/XR) 작업정보 데이터셋 구축 및 품질검증 - 내화뿔칠 자재공급부 및 피복두께 검사 장치 시제품 제작 및 시범운용을 통한 데이터셋 구축 및 품질검증
3차년도	내화뿔칠 작업 고정밀 HITL 품질검사 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> - 고정밀 HITL 품질검사 시스템 프레임워크 구축 - 고정밀 HITL 품질검사 시스템 학습 및 테스트 - 고정밀 HITL 품질검사 시스템 시제품 제작 및 테스트
4차년도	표준화 로봇모듈 및 특성화 기술 통합	<ul style="list-style-type: none"> - 시스템 통합 및 테스트 - 시스템 보완
5차년도	실증 및 통합 성능 평가	<ul style="list-style-type: none"> - 건축/토목 테스트베드 적용 및 통합 성능 평가 - 매뉴얼 작성

□ 핵심과제 1-3 : 고소 도장 작업 특성화 기술 개발 및 실증

○ 연구정의 및 목표

연구정의 (개요)	로봇 플랫폼을 활용하여 고소 도장 작업의 인력을 대체하면서도 균일한 작업 품질을 확보할 수 있는 도장 작업 특성화 기술을 개발하고, 이를 실제 환경에서 실증함
연구목표	<ul style="list-style-type: none"> ■ 도장 작업 작업자-로봇 협업 임무 시나리오 및 특성화 모듈 설계 ■ 도장 작업 환경, 시각, 작업정보 등 대용량 데이터셋 구축 및 특성화 모듈 제작 ■ 도장 작업 고정밀 HITL 품질검사 시스템 개발 ■ 표준화 로봇모듈 및 특성화 기술 통합 ■ 실증 및 통합 성능 평가

○ 연차별 연구목표 및 연구내용

연차	연구목표	연구내용
1차년도	도장 작업 작업자-로봇 협업 임무 시나리오 및 특성화 모듈 설계	<ul style="list-style-type: none"> - 건축/토목 도장작업 적용 시나리오 발굴 - 도장 작업 작업자-로봇 협업 임무 시나리오 설계 - 대상 구조물별(교량, 건물 등) 도장재료 분사 노즐 최적 개수 및 배치 도출 - 도장 자재공급부의 최적 도장재료 분사 조건(속도/분사량/간격 등) 도출 - 도장재료 분사 시 발생하는 미세먼지 저감 장치 설계
2차년도	도장 작업 환경, 시각, 작업정보 등 대용량 데이터셋 구축 및 특성화 모듈 제작	<ul style="list-style-type: none"> - 작업자 시점 도장 실환경/XR(가상)환경 영상 데이터셋 구축 및 품질검증 - 도장 작업자의 원격제어(실환경/XR) 작업정보 데이터셋 구축 및 품질검증 - 도장재료 분사 노즐 및 자재공급부 시제품 제작 및 시범운용을 통한 데이터셋 구축 및 품질검증
3차년도	도장 작업 고정밀 HITL 품질검사 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> - 고정밀 HITL 품질검사 시스템 프레임워크 구축 - 고정밀 HITL 품질검사 시스템 학습 및 테스트 - 고정밀 HITL 품질검사 시스템 시제품 제작 및 테스트
4차년도	표준화 로봇모듈 및 특성화 기술 통합	<ul style="list-style-type: none"> - 시스템 통합 및 테스트 - 시스템 보완
5차년도	실증 및 통합 성능 평가	<ul style="list-style-type: none"> - 건축/토목 테스트베드 적용 및 통합 성능 평가 - 매뉴얼 작성

□ 핵심과제 1-4 : 고소작업 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술 개발

○ 연구정의 및 목표

연구정의 (개요)	확장현실(XR)을 활용하여 인간의 개입이 필요한 건설현장의 고소작업에서 인간의 지능과 로봇의 작업 능력을 결합한 효과적인 작업 수행을 지원하는 인간-로봇 상호작용 기술
연구목표	<ul style="list-style-type: none"> ■ 작업자-로봇 협업 SW 프레임워크 설계 ■ XR기반 환경, 작업공정 모델링-시각화 및 시뮬레이션 기술 ■ XR기반 몰입형 고정밀 원격 제어 SW모듈 및 조작 인터페이스

○ 연차별 연구목표 및 연구내용

연차	연구목표	연구내용
1차년도	작업자-로봇 협업 SW 프레임워크 설계 및 스켈레톤 인터페이스 개발	<ul style="list-style-type: none"> - 공정별 작업자-로봇 협업 임무 시나리오 기반 공통 XR 협업 프레임워크 설계 및 스켈레톤 인터페이스 개발 - 라이브러리 및 단위 기능 개발 - 파라미터 및 데이터 구조 설계 - API 구성 및 표준화 - 학습 모델 정의
2차년도	XR기반 환경, 작업공정 모델링-시각화 및 시뮬레이션 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> - 현실환경-가상공간 정합 기반 XR 모델링 기술 개발 - 로봇 작업부위/주변환경 실시간 시각화 기술 개발 - XR 기반 작업 시뮬레이션 기술 개발 - 실험실/현장 환경에서의 성능 평가 및 기술 보완
3차년도	XR기반 몰입형 고정밀 원격 제어 SW모듈 개발	<ul style="list-style-type: none"> - XR 기반 원격제어 인터페이스 개발 - 몰입형 원격제어를 위한 촉각/시각/청각 피드백 기술 개발
4차년도	XR기반 몰입형 고정밀 원격 제어 SW모듈 고도화	<ul style="list-style-type: none"> - 고정밀 작업을 위한 센싱 및 제어 시스템 통합 - 실험실/현장 환경에서의 성능 평가 및 기술 보완
5차년도	기술 검증 및 고도화	<ul style="list-style-type: none"> - 사용자 그룹 정의 및 테스트 시나리오 설계 - 평가지표 정의 및 데이터 분석 방법 도출 - 시스템 통합 및 실증 테스트베드 적용을 통한 원격제어 기술 성능 검증 및 최적화

□ 핵심과제 1-5 : 실환경 기반 테스트베드 구축

○ 연구정의 및 목표

연구정의 (개요)	개발 로봇 모바일 플랫폼/리프트/매니플레이터/툴의 환경별/공종별 실증을 위한 실환경을 1:1스케일로 모사한 스마트 사이트(테스트베드) 구축 및 건설로봇 시험평가체계 개발
연구목표	<ul style="list-style-type: none"> ■ 실환경 모사 스마트 사이트 설계 및 구축 ■ 원격제어-로봇플랫폼 사용자 경험 평가 ■ 건설로봇 시험평가체계 개발

○ 연차별 연구목표 및 연구내용

연차	연구목표	연구내용
1차년도	실환경 모사 스마트 사이트 조사	<ul style="list-style-type: none"> - 유사 로봇 스마트사이트 사례 조사 및 분석 - 스마트사이트 요구사항 정의 및 분석
2차년도	실환경 모사 스마트 사이트 설계	<ul style="list-style-type: none"> - 개발 로봇 사양 및 기능 성능평가를 고려한 스마트사이트 상세설계 - 성능평가 데이터 수집(IoT센서 등) 및 관리 시스템 요구사항 정의
3차년도	실환경 모사 스마트 사이트 시범구축	<ul style="list-style-type: none"> - 스마트사이트 개발 및 시범운영 - 성능평가 데이터 수집 및 관리 시스템 검증 및 안정성 평가
4차년도	실환경 모사 스마트 사이트 구축	<ul style="list-style-type: none"> - 스마트사이트 운영 - 통합 테스트베드 시스템 최적화
5차년도	건설로봇 시험평가체계 개발	<ul style="list-style-type: none"> - 스마트사이트 활용 건설로봇 성능평가기술 개발 및 시험평가 - 스마트사이트 활용 건설로봇 안전평가기술 개발 및 시험평가

□ 핵심과제 1-6 : 제도/공법/교육 개선 및 실용화

○ 연구정의 및 목표

연구정의 (개요)	건설로봇플랫폼 기술의 확산 및 지속적 발전을 위해 제도 정비 및 인력 교육 등 제반 인프라 구축과 실용화 방안 마련
연구목표	<ul style="list-style-type: none"> ■ 현장 적용을 위한 규제 개선 및 로봇 플랫폼 표준/인증 개발 ■ 공법 개선 및 적용/운영/교육 프로그램 개발 ■ 세부기술별 사업화/성과활용 세부전략 수립 및 실행 ■ 건설환경 자율주행 및 자율작업 관련 데이터 표준 개발

○ 연차별 연구목표 및 연구내용

연차	연구목표	연구내용
1차년도	인프라 및 실용화 현황 조사	- 고소작업 로봇플랫폼 관련 규제/표준/인증 점검 - 건설환경 자율주행 및 자율작업 데이터 표준 관련 현황 분석 - 건설로봇 관련 교육과정 조사 및 연계방안 도출
2차년도	인프라 및 실용화 기초 설계	- XR(가상) 등 교육과정 프로그램(안) 설계 - 관련 규제 개선(안) 도출 - 건설환경 자율주행 및 자율작업 개념적 데이터 표준 수립
3차년도	인프라 및 실용화 기반 시범구축	- 교육과정 프로그램 개발 및 시범운영 - 세부기술별 사업화/성과활용 세부전략 수립 - 건설환경 자율주행 및 자율작업 상세 데이터 표준 수립
4차년도	인프라 및 실용화 기반 구축	- 교육과정 프로그램 운영 - 3개 공종 고소작업 로봇플랫폼 표준시방서(안) 제안 - 세부기술별 사업화/성과활용 세부전략 실행 - 건설환경 자율주행 및 자율작업 관련 데이터 표준 검증 및 보완
5차년도	인프라 및 실용화 성과 확산 및 고도화	- 고소작업 로봇플랫폼 교육과정 프로그램 운영 확대 - 고소작업 로봇플랫폼 표준/인증(안) 제안 - 건설환경 자율주행 및 자율작업 관련 데이터 표준 제안

라. 추진전략

목표성과물 및 평가방법

핵심과제	최종 성과물	주요 특징(요구 성능, Spec)	평가방법
고소 용접 작업 특성화 기술 개발 및 실증	용접 작업 특성화 통합 로봇 시스템	파이프 작업생산성 (15cm/min 이상) 철골 작업생산성 (20cm/min 이상)	시작품 현장 실증 (작업시간 측정)
		영상/PLC/모션데이터 (350시간 이상 확보)	구축 데이터 관련 보고서 작성 (품질검증결과서)
	용접 작업 고정밀 HITL 품질검사 시스템	NDT(영상, 초음파, 방사선) 정확도 (98% 이상)	시작품 현장 실증 (정답 비율)
고소 내화뿔칠 작업 특성화 기술 개발 및 실증	내화뿔칠 작업 특성화 통합 로봇 시스템	작업속도 (H형강(700*900*13*24) 1개소 기준 25분 이하)	시작품 현장 실증 (작업시간 측정)
		작업인원 절감 (기존 방식 4인 대비 50% 이상)	시작품 현장 실증 (작업인원 체크)
	내화뿔칠 작업 고정밀 HITL 품질검사 시스템	품질검사 정확도 (90% 이상)	시작품 현장 실증 (정답 비율)
고소 도장 작업 특성화 기술 개발 및 실증	도장 작업 특성화 통합 로봇 시스템	작업속도 (예시. 건물: 6m ² /min 이상, 교량: 3m ² /min 이상)	시작품 현장 실증 (작업시간 측정)
		작업인원 절감 (기존 방식 투입 인원 대비 50% 이상)	시작품 현장 실증 (작업인원 체크)
	도장 작업 고정밀 HITL 품질검사 시스템	품질검사 정확도 (90% 이상)	시작품 현장 실증 (정답 비율)
고소작업 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술 개발	XR 기반 작업자-로봇 원격제어 SW 모듈	XR 현실-가상공간 정합 오차 (5mm 이내)	시험결과서
		원격 제어 지연 (200ms 이내) 원격 운용 거리 (5Km 이상)	시작품 확인 시험결과서
		단위작업 거리오차 (5 mm 이내)	시작품 확인 시험결과서
		NASA-TLX 작업 인지부하 감소율 (20% 이상) SUS 사용성 평가 개선율 (10% 이상) XR 인터페이스 Throughput 개선율 (10% 이상)	시험결과서
실환경 기반 테스트베드 구축	실환경 모사 스마트사이트	스마트사이트 규모 (3층 이상) 스마트사이트 건축면적 (1000m ² 이상) 스마트사이트 구조 (철골구조 + 철근콘크리트구조) 동시 실증 가능 로봇 수 (3대 이상)	시작품 확인
		건설로봇 시험평가체계	시험평가 가이드라인
		데이터 수집 지연 시간 (2ms 이내)	시험결과서
제도/공법/교육 개선 및 실용화	법제도/표준/인증	인증(안) 개발 건수 (1건)	인증(안)
		표준시방서/지침(안) 개발 (3건)	표준시방서/지침(안)
		건설환경 데이터 표준 개발 (2건)	국가표준(안)
	교육과정 및 인력양성	고소작업 로봇 플랫폼 교육과정 프로그램 개발 (1건 이상)	고소작업 로봇 플랫폼 교육과정 프로그램
		산업체 대상 기술교육 지원 (기술강연회 3건 이상)	기술강연회
실용화 전략	MOU 체결건수 (6건)	MOU체결	

□ 성과지표

구분	항목		개발 목표치	평가방법	설정근거
논문	학술회의 발표 논문건수(국내/국외)		36	발표 횟수	연차별 국내학회 연 5회 이상 발표 연차별 국제학회 연 2회 이상 발표
	학술지 게재 논문건수(국내/국외)		18	개체 편수	- 작업자-로봇 협업 임무 시나리오 및 특성화 모듈 설계 - 실환경/XR(가상)환경 데이터셋 구축 - 분사형 장비의 환경오염 저감 장치 설계 및 제작 - 작업자-로봇 협업 SW 프레임워크 - XR기반 시뮬레이션, 원격제어 기술 - 원격제어-로봇플랫폼 사용자 경험 평가
	SCI(E)급 학술지 게재 논문건수		18	논문 건수	- 작업자-로봇 협업 용접/내화뿔칠/도장 시스템 - 고정밀 HITL 품질검사 시스템 - 로봇모듈 및 특성화기술 통합 방법 - 작업자-로봇 협업 SW 프레임워크 - XR기반 시뮬레이션, 원격제어 기술 - 원격제어-로봇플랫폼 사용자 경험 평가
지식 재산권	국내	출원	27	출원서	- 공종별 작업 특성화 모듈 - 고정밀 HITL 품질검사 시스템 - 건설공사용 로봇 원격 제어 시스템 - 분사형 장비의 환경오염 저감 장치 - 작업자-로봇 협업 SW 프레임워크 - XR기반 시뮬레이션, 원격제어 기술
		등록	13	등록서	작업자-로봇 협업 SW 프레임워크 XR기반 시뮬레이션, 원격제어 기술
	국외	출원			
		등록			
	소프트웨어(S/W) 등록건수		9	등록증	- 고정밀 HITL 품질검사 시스템 - 건설공사용 로봇 원격 제어 시스템 - 작업자-로봇 협업 SW - XR기반 시뮬레이션, 원격제어 인터페이스 SW
상용화	현장시험 건수		18	보고서	- 작업 로봇 H/W 및 S/W - 고정밀 HITL 품질검사 시스템 - 로봇모듈 및 특성화 기술 통합 시스템 - 핵심과제별 매뉴얼 - 스마트사이트 구축 및 운영
	시제품 출시 건수		7	등록여부	- 작업로봇 H/W 및 S/W - 고정밀 HITL 품질검사 시스템
	MOU건수		6	MOU 체결	수요처 기업과 고소작업 로봇플랫폼 실용화 MOU체결
	인증 제안		1	인증(안)	고소작업 로봇플랫폼 인증(안) 개발
	표준시방서/지침 제안		3	표준시방서/지침(안)	3개 공종 고소작업 로봇플랫폼 표준시방서/지침 개발
	데이터 표준		2	국가표준(안)	건설환경 자율주행 및 자율작업 관련 데이터 표준 개발
	교육과정 프로그램		1	교육과정 프로그램	고소작업 로봇플랫폼 교육과정 프로그램
	산업체 기술교육 지원		3	기술강연회 개최	3차년도 이후 매년 1건 이상 기술강연회 개최

□ 연차별 성과목표

구분	성과유형	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	합계
고소 용접 작업 특성화 기술 개발 및 실증	학술회의 발표	1	1	1	1	1	5
	특허 출원		1	1			2
	특허 등록			1	1		2
	S/W 등록		1		1		2
	현장시험				1	1	2
	시제품				1		2
고소 내화뿔칠 작업 특성화 기술 개발 및 실증	학술회의 발표	1	1	1	1	1	5
	학술지 게재		1	1	1	1	4
	SCIE급 논문 게재		1	1	1	1	4
	특허 출원	2	2	2	2		8
	특허 등록		1	1	1	1	4
	S/W 등록			1			1
	현장시험		1	1	1	1	4
시제품		1	1			2	
고소 도장 작업 특성화 기술 개발 및 실증	학술회의 발표	1	1	1	1	1	5
	학술지 게재		1	1	1	1	4
	SCIE급 논문 게재		1	1	1	1	4
	특허 출원		1	1	1	1	4
	특허 등록				1	1	2
	S/W 등록		1	1			2
	현장시험		1	1	1	1	4
	시제품			1	1		2
고소작업 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술 개발	학술회의 발표	3	3	3	3	3	15
	학술지 게재	1	1	2	2	2	8
	SCIE급 논문게재			2	2	2	6
	특허출원	1	2	2	2	2	9
	특허등록			1	1		2
	S/W등록		1	1	1		3
	현장시험		1	1	1	1	4
시제품				1	1	2	
실환경 기반 테스트베드 구축	학술회의 발표	1	1	1	1	2	6
	학술지 게재				1	1	2
	SCIE급 논문게재				2	2	4
	특허출원		1	1	1		3
	특허등록			1	1		2
	S/W등록			1			1
	현장시험				1	1	2
시제품							
제도/공법/교육 개선 및 실용화	MOU건수			2	2	2	6
	인증 제안					1	1
	표준시방서/지침				3		3
	데이터 표준					2	2
	교육과정프로그램		1				1
	산업체 기술교육			1	1	1	3
합계	학술회의 발표	7	7	7	7	8	36
	학술지 게재	1	3	4	5	5	18
	SCIE급 논문게재		2	4	6	6	18
	특허출원	3	7	7	6	4	27
	특허등록		1	5	5	2	13
	S/W등록		3	4	2		9
	현장시험		3	3	6	6	18
	시제품		1	2	3	1	7
	MOU건수			2	2	2	6
	인증 제안					1	1
	표준시방서/지침				3		3
	데이터 표준					2	2
	교육과정프로그램		1				1
	산업체 기술교육			1	1	1	3

□ 연구개발 추진상 위험요인/대응방안

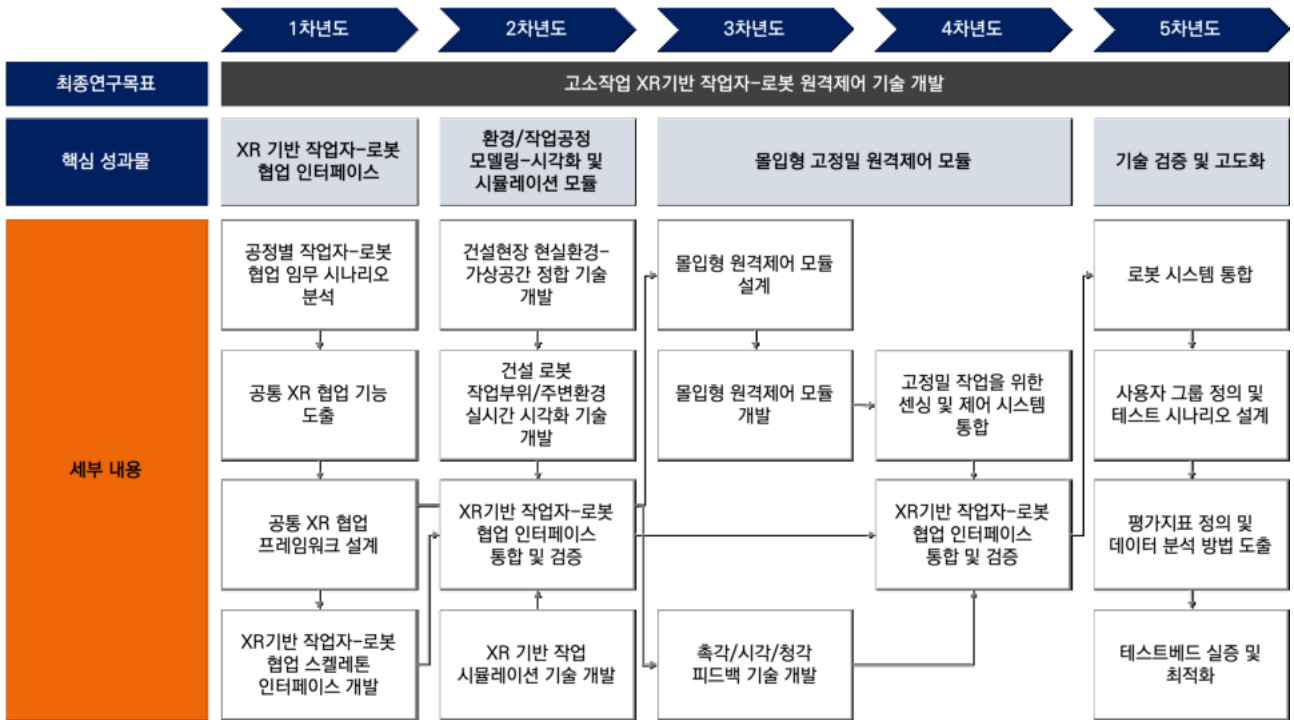
	위험요인	대응방안/해결방안
대내	<ul style="list-style-type: none"> - 표준로봇 플랫폼을 이용한 용접/ 내화뿔칠/도장 작업 특성화 기술 개발 선례 부족 - 용접, 내화뿔칠, 도장 로봇을 단일 플랫폼으로 통합하는 과정에서 발생할 수 있는 기술적 호환성 문제 - 제한된 건설로봇 관련 전문인력 풀로 인해 원활한 교육프로그램 운영 제약 발생할 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 로봇 연구 업체와의 긴밀한 협업을 통해 상용화가 가능한 건설 작업 로봇 기술 확보 - 각 로봇의 모듈화 및 기술 표준화를 통해 시스템 간 원활한 연동성 확보 - 다부처/다분야 간 긴밀한 협업을 통한 다양한 작업환경 맞춤형 로봇모듈 개발 - 국내/외 건설로봇 전문가 풀 구성하여 프로그램 운영
대외	<ul style="list-style-type: none"> - 건설 및 로봇 기술 관련 법규 및 안전 규정의 변화 - 고용 시장에 대한 자동화 로봇 도입의 부정적 인식 - 신기술 도입에 대한 저항으로 기술 상용화 어려움 - 기존 스마트건설 등 교육프로그램, 기준/표준과 중복될 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> - 지속적인 정책 변화 모니터링 및 연구 결과 검증 시 법적 요구사항 충족 여부 평가 - 작업자-로봇 협업 기술이 일자리 축소는 최소화하면서도 일자리의 질과 안전은 대폭 향상시킬 수 있음을 강조 - 현장 수요 중심의 로봇 기술 개발 및 인력양성 교육을 통해 로봇 기술에 대한 작업자의 친밀도 향상 - 신기술 창업, 신시장 창출 등을 통한 일자리 창출 - 기존 교육프로그램, 기준/표준과 연계하여 고도화 및 효율화

□ 기술성숙도(TRL) 목표

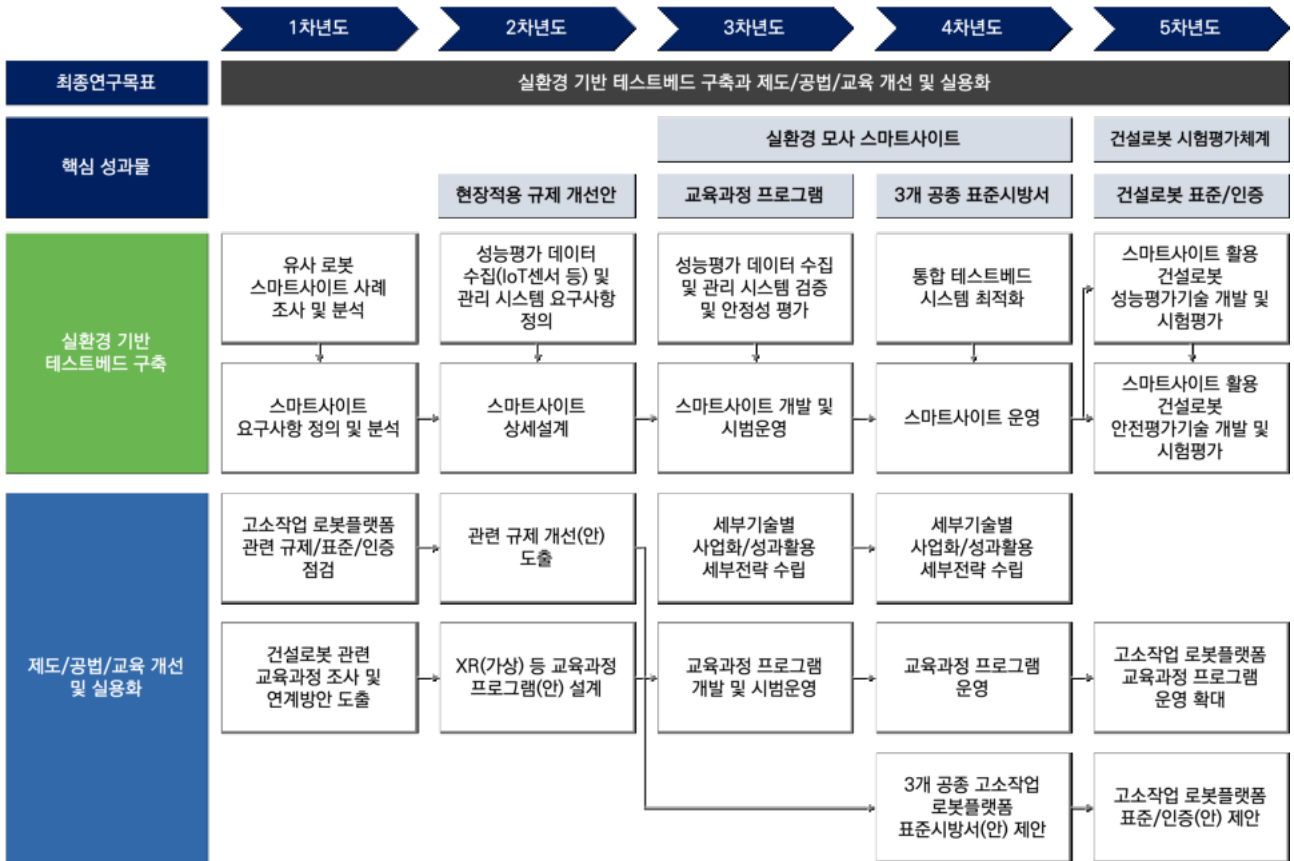
과제명		As-is 기술성숙도(TRL)	To-be 기술성숙도(TRL)
핵심과제 1-1	고소 용접 작업 특성화 기술 개발 및 실증	4	7
핵심과제 1-2	고소 내화뿔칠 작업 특성화 기술 개발 및 실증	4	7
핵심과제 1-3	고소 도장 작업 특성화 기술 개발 및 실증	4	7
핵심과제 1-4	고소작업 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술 개발	2	7
핵심과제 1-5	실환경 기반 테스트베드 구축	2	7
핵심과제 1-6	제도/공법/교육 개선 및 실용화	2	7

□ 과제별 성과물 기반 TRM

[그림 2-16] 핵심기술 1-1 성과물 기반 TRM



[그림 2-17] 핵심기술 1-2, 1-3 성과물 기반 TRM



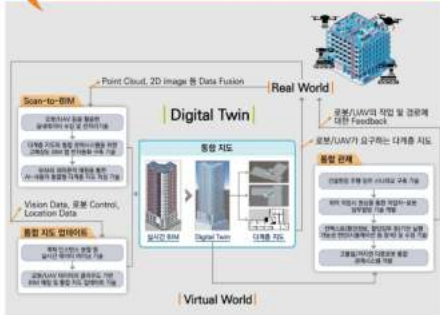
2. 작업환경 센싱모듈 및 통합관제시스템 개발

실시간 다중 로봇/UAV 통합 지도 작성 기술

- ☑ 로봇/UAV 등을 활용한 실내 데이터 수집 및 전처리 기술
- ☑ 다계층 지도와 통합 관제시스템을 위한 고해상도 BIM 맵 반자동화 구축기술
- ☑ BIM의 의미론적 매칭을 통한 AI-사용자 통합형 다계층 지도 작성 기술
- ☑ 객체 인스턴스 분할 등 실시간 데이터 마이닝 기술
- ☑ 로봇/UAV 데이터의 클라우드 기반 BIM 매칭 및 통합 지도 업데이트 기술



작업환경 센싱모듈 및 통합관제시스템 데이터 흐름도



건설현장 실내 다중 로봇 통합 관제시스템



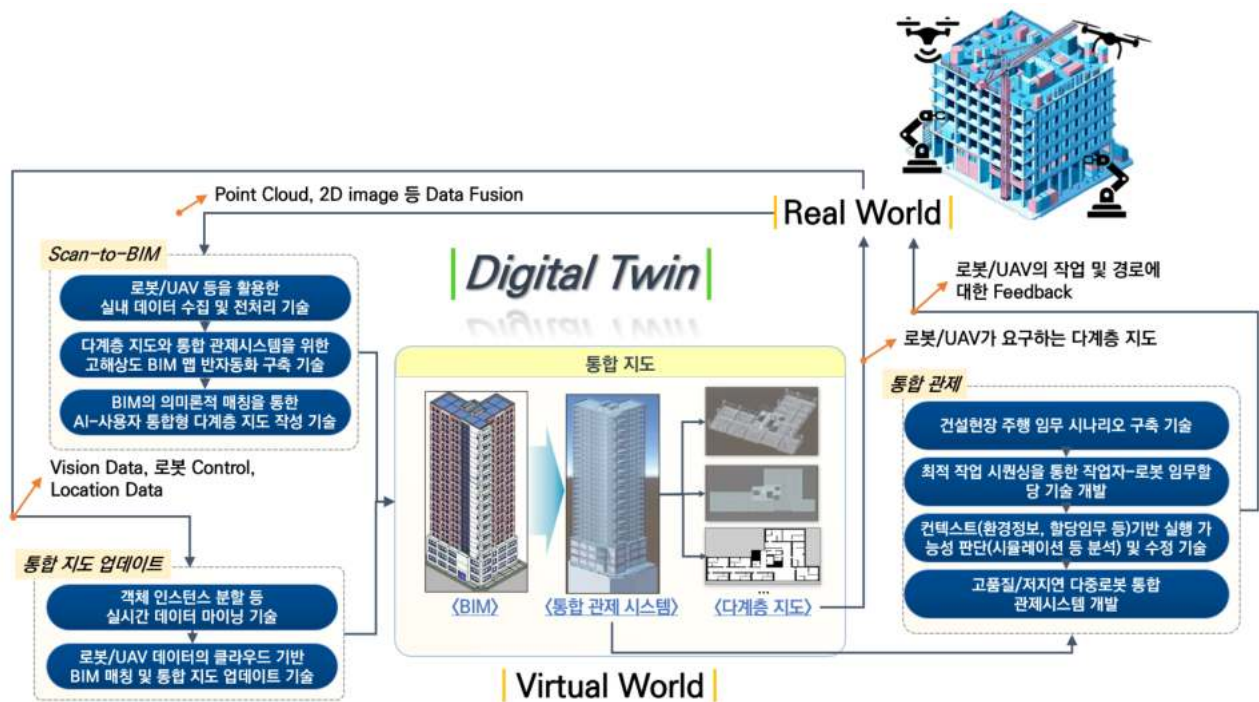
- ☑ 건설현장 주행 임무 시나리오 구축 기술
- ☑ 최적 작업 시퀀싱을 통한 작업자-로봇 임무할당 기술
- ☑ 컨텍스트(환경정보, 할당임무 등) 기반 실행 가능성 판단(시뮬레이션 등 분석) 및 수정 기술
- ☑ 고품질/저지연 다중로봇 통합 관제시스템

[그림 2-18] 중점과제 2 연구개요

가. 기술개발 개요 및 정의

- 고소작업 로봇/UAV의 건설현장 적용을 위한 실시간 다중 로봇/UAV 통합 지도 작성 기술 및 건설현장 실내 다중 로봇 통합 관제시스템 개발
 - 로봇/UAV를 활용한 실내 포인트 클라우드 데이터 수집 및 정밀도 개선을 위한 데이터 전처리 기술 개발
 - 포인트 클라우드 데이터 기반의 고해상도/고정밀 BIM 구축 반자동화 기술(Scan-to-BIM) 개발
 - BIM의 의미론적 매칭을 통한 AI-사용자 통합형 다계층 지도 개념의 통합 지도 구축 기술 개발
 - 고소작업 로봇/UAV 작업 모니터링을 위한 객체 인스턴스 분할 등 실시간 데이터 마이닝 기술 개발 (UAV 앵커링 관련 포함)

- 통합 지도의 작업현황 업데이트 및 시각화를 위한 클라우드 기반 BIM 매칭 및 통합 지도 업데이트 기술 개발
- 통합 지도 기반 고소작업 로봇/UAV의 건설현장 주행 임무 시나리오 구축 기술 개발
- 통합 지도와 고소작업 로봇/UAV 최적작업 시퀀싱을 활용한 작업자-로봇 임무할당 기술 개발
- 고소작업 로봇/UAV의 컨텍스트(환경정보, 할당임무 등)기반 작업실행 가능성 판단(시뮬레이션 등 분석) 및 수정 기술 개발
- 고소작업 로봇/UAV의 고품질/저지연 통합 관제 시스템 개발



[그림 2-19] 중점과제 2 연구 개념도

나. 기술개발 필요성

□ 실시간 다중 로봇/UAV 통합 지도 작성 기술 개발

- 다수/다종의 로봇/UAV의 작업순서, 자율주행 등 전반의 구동 계획에 있어서 Map 정보는 기초 데이터로 활용되기 때문에 본 과제의 수행에 있어 실시간 다중 로봇/UAV의 통합 지도 작성 기술은 필수적임

- 통합 지도의 작성을 위해서는 Scan-to-BIM 기술을 통해 고해상도와 높은 정밀도를 갖춘 BIM 모델을 생성할 수 있어야 하며, 이를 토대로 만들어지는 통합 지도는 다중 로봇/UAV가 요구하는 지역, 상세수준, 포맷 등을 반영한 Map을 생성해서 제공할 수 있는 다계층 구조*로 생성되어야 함
 - * 로봇의 실내 자율주행을 위해서는 자율주행 공간 주변의 주행가능 영역에 대한 Map이 필요하며, 작업 로봇은 작업하는 대상 지역의 높은 상세수준의 정보가 포함된 Map이 필요함. 즉, 개별 로봇/UAV가 요구하는 Map의 지역, 상세수준, 포맷은 다름
- 현재의 Scan-to-BIM 기술은 자동화율이 낮으며, 로봇/UAV의 정확한 자율주행 및 작업 계획을 위해서는 BIM의 치수적 정확도 개선* 및 고해상도이 필요한 것으로 분석되었음. 또한 As-Planned BIM이 아닌 As-Built BIM을 토대로 로봇/UAV가 요구하는 Map을 효율적으로 생성하는 통합 지도의 개념은 추가적인 연구개발이 필요함
 - * Hitech, BIMSrv, Qebim, UNITED BIM 등 Scan-to-BIM 기술 서비스를 제공하는 기업들이 있으나, 최종 BIM의 모델 정확도는 10mm 내외로 파악되었음
- 통합 지도의 활용을 위해서는 실시간으로 로봇이 수행하는 작업을 모니터링하고 통합 지도에 이를 업데이트하는 기술이 필요하나, 작업특성을 고려한 작업현황 데이터 취득 및 분석과 같은 모니터링의 실시간성 확보와 통합 지도의 의미적/형상적 정보의 정밀한 업데이트를 수행하는 기술은 추가적인 연구개발이 필요함
 - * Aritra Pal et al.의 연구에 따르면, 건설현장 디지털 트윈 기술 개발에 있어 작업 모니터링의 실시간성 확보와 관련된 연구가 필요하며, 모니터링의 정확성, 신뢰성, 보안 등에 대한 연구의 필요성도 함께 언급함⁹⁾

9) Pal, A., Lin, J. J., Hsieh, S. H., & Golparvar-Fard, M. (2023). Automated vision-based construction progress monitoring in built environment through digital twin. *Developments in the Built Environment*, 100247.

□ 건설현장 실내 다중 로봇 통합 관제시스템

- 건설 실내/고소작업을 위한 건설 자동화로봇의 효율적이고 안전한 운용을 위해서는 작업중인 다수/다종의 로봇을 모니터링하고 제어하는 다중 로봇 통합관제 기술이 필수적임
- 현재 로봇의 통합관제 기술은 실내 제조업에서 높은 수준의 기술력을 보유하고 있으며 건설업에서는 토공 자동화를 위한 실외 건설장비의 통합관제 기술*이 개발되었음
 - * 예를 들면, 엔비디아 옴니버스는 다양한 기업과 협력하여 디지털 트윈 공장 구축을 진행중이며, 토공자동화는 Caterpillar, Trimble 과 같은 기업들이 일부 상용화를 달성하였으며, 국내에서도 관련 기술이 개발되어 상용화되고 있음
- 그러나 건설 현장 실내/고소에서 운용되는 다중 로봇 통합관제 기술은 제조업과 비교하여 운용되는 현장이 비정형적*이고, 토공과 비교해서는 높은 정밀도/정확도와 실시간성을 요구**하므로, 기술의 난이도가 높아 현재의 기술로는 적용이 한계가 있음
 - * 도시 및 건설 분야는 제조업과 달리 공정이 반복적이지 않고 여러 공정이 동시에 이루어지는 비정형적 특징으로 인해 디지털 트윈 기술의 적용에 있어 다른 접근 필요, 도시/건설 분야 디지털 트윈 기술 기획 연구(2019)
 - ** 토공 자동화 통합관제 기술은 Tolerance가 cm 단위이고, 실시간성이 낮음
- 따라서 고소 건설현장에서 운용되는 다수/다종 로봇의 안전 및 생산성 향상을 위해 이들 로봇에서 수집된 데이터를 활용한 작업환경 파악 기술, 준수시간 업데이트를 통한 모니터링 기술, 로봇의 군집 운영을 위한 의사결정 기능, 최적 임무할당 기능 등을 탑재한 통합관제 시스템이 필요함

다. 상세기술개발 내용

□ 중점과제 구성 및 기술 확보 전략

○ 중점과제 구성

구분	과제명
중점과제 2	작업환경 센싱모듈 및 통합관제시스템 개발
핵심기술 2-1	실시간 다중 로봇/UAV 통합 지도 작성 기술 개발
핵심기술 2-2	건설현장 실내 다중 로봇 통합 관제시스템

○ 중점과제 기술 확보 전략

핵심기술	세부과제	확보전략		
		자체 개발	기술 도입	글로벌 협력
실시간 다중 로봇/UAV 통합 지도 작성 기술 개발	로봇/UAV 등을 활용한 실내 데이터 수집 및 전처리 기술 개발	○	○	
	다계층 지도와 통합 관제시스템을 위한 고해상도 BIM 맵 반자동화 구축 기술 개발	○	○	
	BIM의 의미론적 매칭을 통한 AI-사용자 통합형 다계층 지도 작성 기술 개발	○		
	객체 인스턴스 분할 등 실시간 데이터 마이닝 기술 개발(UAV 앵커링 관련 포함)	○	○	
	로봇/UAV 데이터의 클라우드 기반 BIM 매칭 및 통합 지도 업데이트 기술 개발	○		
건설현장 실내 다중 로봇 통합 관제시스템 개발	건설현장 주행 임무 시나리오 구축 기술	○	○	
	최적 작업 시퀀싱을 통한 작업자-로봇 임무할당 기술 개발	○	○	
	컨텍스트(환경정보, 할당임무 등)기반 실행 가능성 판단(시뮬레이션 등 분석) 및 수정 기술 개발	○	○	
	고품질/저지연 다중로봇 통합 관제시스템 개발	○	○	

□ 핵심기술 2-1 : 실시간 다중 로봇/UAV 통합 지도 작성 기술 개발

○ 연구정의 및 목표

연구정의 (개요)	실시간 다중 로봇/UAV를 위한 다계층 구조의 통합 지도 작성 기술 및 통합 지도 업데이트를 위한 작업현황 모니터링 기술의 개발
연구목표	(1) 로봇/UAV 등을 활용한 실 내 데이터 수집 및 전처리 기술 (2) 다계층 지도와 통합 관제시스템을 위한 고해상도 BIM 맵 반자동화 구축 기술 (3) BIM의 의미론적 매칭을 통한 AI-사용자 통합형 다계층 지도 작성 기술 개발 (4) 객체 인스턴스 분할 등 실시간 데이터 마이닝 기술 (UAV 앵커링 관련 포함) (5) 로봇/UAV 데이터의 클라우드 기반 BIM 매칭 및 통합 지도 업데이트 기술

○ 연차별 연구목표 및 연구내용

연차	연구목표	연구내용
1차년도	기술 설계	(1) 로봇/UAV 등을 활용한 실내 데이터 수집 및 전처리 기술 설계 (2) PCD 기반 고해상도 BIM 맵 반자동화 구축 기술 설계 (3) BIM 데이터의 다계층 구조화 기술 설계 (4) 실시간 작업 모니터링 기술의 설계 (5) 클라우드 기반 BIM 매칭 및 통합 지도 업데이트 기술 설계
2차년도	요소기술 개발	(1) 실내 로봇/UAV 등을 활용한 실내 데이터 수집 및 전처리 요소기술 개발 (2) PCD 기반 고해상도 BIM 맵 반자동화 구축 요소기술 개발 (3) BIM 데이터의 다계층 구조화 요소기술 개발 (4) 실시간 작업 모니터링 요소기술 개발 (5) 클라우드 기반 BIM 매칭 및 통합 지도 업데이트 요소기술 개발
3차년도	프로토타입 개발	(1) 실내 로봇/UAV 등을 활용한 실내 데이터 수집 및 전처리 기술 프로토타입 개발 (2) PCD 기반 고해상도 BIM 맵 반자동화 구축 기술 프로토타입 개발 (3) BIM 데이터의 다계층 구조화 기술 프로토타입 개발 (4) 실시간 작업 모니터링 기술 프로토타입 개발 (5) 클라우드 기반 BIM 매칭 및 통합 지도 업데이트 기술 프로토타입 개발
4차년도	기술 통합	(1,2) 실내 데이터 수집 및 전처리 기술과 BIM 맵 반자동화 구축 기술을 통합한 Scan-to-BIM 기술 개발 (3) BIM 데이터의 다계층 구조화 기술과 Scan-to-BIM 기술의 통합 및 파일럿테스트 (4,5) 실시간 작업 모니터링 기술과 클라우드 기반 BIM 매칭 및 통합 지도 업데이트 기술의 통합 및 파일럿테스트
5차년도	검증 및 고도화	(1,2,3) 실시간 다중 로봇/UAV를 위한 다계층 구조의 통합 지도 작성 기술 검증 및 고도화 (4,5) 통합 지도 업데이트를 위한 실시간 작업 모니터링 통합 기술의 검증 및 고도화

□ 핵심기술 2-2 : 다중 로봇 통합 관제시스템 개발

○ 연구정의 및 목표

연구정의 (개요)	다수/다종의 건설현장 실내 로봇을 준수시간으로 모니터링하고 로봇작업에 대한 feedback이 가능한 통합 관제시스템의 개발
연구목표	(1) 건설현장 주행 임무 시나리오 구축 기술 개발 (2) 최적작업 시퀀싱을 통한 작업자-로봇 임무할당 기술 개발 (3) 컨텍스트(환경정보, 할당임무 등)기반 실행 가능성 판단(시뮬레이션 등 분석) 및 수정 기술 개발 (4) 고품질/저지연 다중로봇 통합 관제 시스템 개발

○ 연차별 연구목표 및 연구내용

연차	연구목표	연구내용
1차년도	기술 설계	(1) 건설현장 주행 임무 시나리오 구축 기술 설계 (2) 최적작업 시퀀싱을 통한 작업자-로봇 임무할당 기술 설계 (3) 컨텍스트(환경정보, 할당임무 등)기반 실행 가능성 판단(시뮬레이션 등 분석) 및 수정 기술 설계 (4) 고품질/저지연 다중로봇 통합 관제시스템 설계
2차년도	요소기술 개발	(1) 건설현장 주행 임무 시나리오 구축 요소기술 개발 (2) 최적작업 시퀀싱을 통한 작업자-로봇 임무할당 요소기술 개발 (3) 컨텍스트(환경정보, 할당임무 등)기반 실행 가능성 판단(시뮬레이션 등 분석) 및 수정 요소기술 개발 (4) 고품질/저지연 다중로봇 통합 관제시스템 요소기술 개발
3차년도	프로토타입 개발	(1) 건설현장 주행 임무 시나리오 구축 기술 프로토타입 개발 (2) 최적작업 시퀀싱을 통한 작업자-로봇 임무할당 기술 프로토타입 개발 (3) 컨텍스트(환경정보, 할당임무 등)기반 실행 가능성 판단(시뮬레이션 등 분석) 및 수정 기술 프로토타입 개발 (4) 고품질/저지연 다중로봇 통합 관제시스템 프로토타입 개발
4차년도	기술 통합	(1,2) 주행 임무 시나리오 구축 기술 및 임무할당 기술 통합 및 파일럿테스트 (3,4) 실행 가능성 판단(시뮬레이션 등 분석) 및 수정기술을 탑재한 고품질/저지연 다중로봇 통합 관제 시스템 개발 및 파일럿테스트
5차년도	검증 및 고도화	(1,2,3,4) 다중로봇 통합 관제시스템 검증 및 고도화

라. 추진전략

□ 목표성과물 및 평가방법

핵심과제	최종 성과물	주요 특징(요구 성능, Spec)	평가방법
작업환경 센싱 모듈 및 통합관제시스템 개발	실시간 다중 로봇/UAV 통합 지도 작성 기술	Scan-to-BIM을 통해 생성한 BIM의 치수 정확도 (주요 구조체 기준, 정밀 계측한 치수값 대비 오차 5mm 이내)	시험결과서 테스트베드 검증

□ 성과지표

구분	항목	개발 목표치	평가방법	설정근거	
논문	학술회의 발표 논문건수(국내/국외)	10	발표 횟수	- 연차별 국내학회 연 1회 이상 발표 - 2,3,4차년도 과제별 국제학회 연 1회 이상 발표	
	학술지 게재 논문건수(국내/국외)	6	게재 편수	- 세부과제별 1회 이상 학술지 게재	
	SCI급 학술지 게재 논문건수	5	논문 건수	- 세부과제별 자체개발 내용에 대해 1회 이상 SCI급 학술지 게재	
지식 재산권	국내	출원	6	출원서	- 자체개발 내용에 대한 특허 출원
		등록	3	등록서	- 출원된 특허의 등록
	국외	출원	-	출원서	-
		등록	-	등록서	-
	소프트웨어(S/W) 등록건수	5	등록증	- 로봇/UAV 등을 활용한 실내 데이터 전처리 SW - 고해상도 BIM 맵 반자동화 구축 SW - 다계층 지도 작성 및 통합 지도 업데이트 SW - 통합 관제 시스템 SW	
상용화	현장시험 건수	6	보고서	- 로봇/UAV 등을 활용한 실내 데이터 수집 - 통합지도 작성 및 작업 모니터링 - 통합 관제시스템 적용	
	시제품 출시 건수	2	등록여부	- 통합 지도 관리 모듈 - 통합 관제시스템	
	인증 취득		인증여부		
	MOU건수		건수		

□ 연차별 성과목표

구분	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
핵심과제 2-1	학술발표 1건	학술발표 1건	학술발표 1건	학술발표 1건	학술발표 1건
		학술지 게재 1건	학술지 게재 1건	학술지 게재 1건	
			SCI급 논문 게재 1건	SCI급 논문 게재 1건	SCI급 논문 게재 1건
		특허출원 1건	특허출원 1건	특허출원 1건	
					특허 등록 2건
		SW 등록 1건	SW 등록 1건	SW 등록 1건	
				시제품 출시 1건	
				현장시험 1건	현장시험 2건
핵심과제 2-2	학술발표 1건	학술발표 1건	학술발표 1건	학술발표 1건	학술발표 1건
			학술지 게재 1건	학술지 게재 1건	학술지 게재 1건
			SCI급 논문 게재 1건	SCI급 논문 게재 1건	
		특허출원 1건	특허출원 1건	특허출원 1건	
					특허 등록 1건
			SW 등록 1건	SW 등록 1건	
				시제품 출시 1건	
				현장시험 1건	현장시험 2건

□ 연구개발 추진상 위험요인/대응방안

위험요인		대응방안/해결방안
대내	로봇/UAV를 위한 다계층 지도 개념이 적용된 통합 지도 기술 개발 선례가 없으며, 건설 로봇/UAV의 실내 고품질/저지연 통합 관제 시스템의 개발 선례도 부재함	<ul style="list-style-type: none"> - BIM 플랫폼 개발 업체, 로봇 기술 개발 기관과의 긴밀한 협력을 통하여 다계층 지도의 개념 확립 및 이를 적용한 통합 지도의 구축 기술 개발 - 이미 디지털 트윈 기술이 활발히 개발되어 있는 제조업분야의 기술들을 벤치마킹하여 실내까지 고려한 건설현장 로봇/UAV의 고품질/저지연 통합관제 시스템 기술 개발
대외	국외에서도 Scan-to-BIM, 시공자동화 로봇의 통합 관제에 대한 기술 개발이 진행되고 있어, 선제적으로 원천기술의 확보가 필요한 상황	<ul style="list-style-type: none"> - 실내/고소작업의 특성을 반영하여 기존 기술과의 차별점을 확보하고, 고품질/저지연의 실시간성의 구현을 통해 기술격차 확보

□ 기술성숙도(TRL) 목표

과제명	As-is 기술성숙도(TRL)	To-be 기술성숙도(TRL)
핵심과제 2-1 실시간 다중 로봇/UAV 통합 지도 작성 기술 개발	3	7
핵심과제 2-2 건설현장 실내 다중 로봇 통합 관제시스템	3	7

□ 과제별 성과물 기반 TRM

[그림 2-20] 핵심기술 2-1 성과물 기반 TRM

	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
최종연구목표	실시간 다중 로봇/UAV 통합 지도 작성 기술 개발				
핵심 성과물	기술 설계도	요소기술	프로토타입	기술 통합	기술 검증 및 고도화
로봇/UAV를 활용한 실내 데이터 수집 및 전처리 기술 개발	로봇/UAV를 활용한 실내 데이터 수집 및 전처리 기술 설계	실내 로봇/UAV를 활용한 실내 데이터 수집 및 전처리 기술 요소기술 개발	실내 로봇/UAV를 활용한 실내 데이터 수집 및 전처리 기술 프로토타입 개발	실내 데이터 수집 및 전처리 기술과 BIM 맵 반자동화 구축 기술을 통합한 Scan-to-BIM 기술 개발	실시간 다중 로봇/UAV를 위한 다계층 구조의 통합 지도 작성 기술 검증 및 고도화
다계층 지도와 통합 관계시스템을 위한 고해상도 맵 반자동화 구축 기술 개발	PCD기반 고해상도 BIM 맵 반자동화 구축 기술 설계	PCD기반 고해상도 BIM 맵 반자동화 구축 요소기술 개발	PCD기반 고해상도 BIM 맵 반자동화 구축 기술 프로토타입 개발		
BIM의 의미론적 매칭을 통한 AI-사용자 통합형 다계층 지도 작성 기술 개발	BIM 데이터의 다계층 구조화 기술 설계	BIM 데이터의 다계층 구조화 요소기술 개발	BIM 데이터의 다계층 구조화 프로토타입 개발	BIM 데이터의 다계층 구조화 기술과 Scan-to-BIM 기술의 통합 및 파일럿테스트	
객체 인스턴스 분할 등 실시간 데이터 마이닝 기술	실시간 작업 모니터링 기술 설계	실시간 작업 모니터링 요소기술 개발	실시간 작업 모니터링 기술 프로토타입 개발	실시간 작업 모니터링 기술과 클라우드 기반 BIM 매칭 및 통합 지도 업데이트 기술의 통합 및 파일럿테스트	
로봇/UAV의 클라우드 기반 BIM 매칭 및 통합 지도 업데이트 기술	클라우드 기반 BIM 매칭 및 통합 지도 업데이트 기술 설계	클라우드 기반 BIM 매칭 및 통합 지도 업데이트 요소기술 개발	클라우드 기반 BIM 매칭 및 통합 지도 업데이트 기술 프로토타입 개발		

[그림 2-21] 핵심기술 2-2 성과물 기반 TRM

	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
최종연구목표	다중 로봇 통합 관제 시스템 개발				
핵심 성과물	기술 설계도	요소기술	프로토타입	기술 통합	기술 검증 및 고도화
건설현장 주행 임무 시나리오 구축 기술 개발	건설현장 주행 임무 시나리오 구축 기술 설계	건설현장 주행 임무 시나리오 구축 요소기술 개발	건설현장 주행 임무 시나리오 구축 기술 프로토타입 개발	주행 임무 시나리오 구축 기술 및 임무할당 기술 통합 및 파일럿테스트	다중로봇 통합 관제시스템 검증 및 고도화
최적작업 시퀀싱을 통한 작업자-로봇 임무할당 기술 개발	최적작업 시퀀싱을 통한 작업자-로봇 임무할당 기술 설계	최적작업 시퀀싱을 통한 작업자-로봇 임무할당 요소기술 개발	최적작업 시퀀싱을 통한 작업자-로봇 임무할당 기술 프로토타입 개발		
컨텍스트(환경정보, 할당임무 등) 기반 실행 가능성 판단 (시뮬레이션 등 분석) 및 수정 기술 개발	컨텍스트 기반 실행 가능성 판단 및 수정 기술 설계	컨텍스트 기반 실행 가능성 판단 및 수정 요소기술 개발	컨텍스트 기반 실행 가능성 판단 및 수정 기술 프로토타입 개발	실행 가능성 판단 및 수정기술을 탑재한 고품질/저지연 다중로봇 통합 관제 시스템 개발 및 파일럿테스트	
고품질/저지연 다중로봇 통합 관제시스템 개발	고품질/저지연 다중로봇 통합 관제시스템 설계	고품질/저지연 다중로봇 통합 관제시스템 요소기술 개발	고품질/저지연 다중로봇 통합 관제시스템 프로토타입 개발		

□ 사업비 투입 계획

(단위: 억 원)

구분	2024년	2025년	2026년	2027년	2028년	합계
핵심 기술 2-1	4.0	6.0	6.0	4.0	3.0	23
핵심기술 2-2	2.5	4.5	5.0	2.5	2.5	17
합계	6.5	10.5	11.0	6.5	5.5	40

3. 고소 위험현장의 다목적 작업에 특화된 자율/반자율 지능 기반 모듈형 건설 로봇 시스템 개발

① 모듈형 건설 로봇 플랫폼

- 다목적 자율주행 로봇 플랫폼
- 고소작업을 위한 모바일 플랫폼 탑재형 리프트 모듈
- 범용 작업 매니플레이터 및 공중 특화 EOAT 기술

다중 모듈형 건설 로봇 플랫폼 및 운영 시나리오



② 건설 현장 실시간 대응형 다중 로봇/UAV 자율주행 기술

- 건설 현장 실시간 주행 환경 인식 기술
- 다중 로봇/UAV 전역 경로 생성/스케줄링 기술
- 지역적 자율주행 지도 작성 및 지역 경로 수정/추종 기술
- UAV의 위치 고정(벽면, 철골 부착) 및 자세 제어 기술

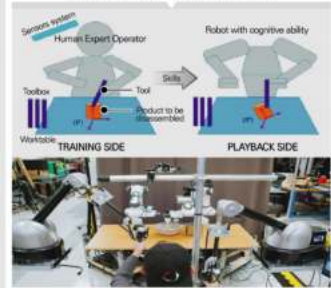
건설 현장 다중 로봇/UAV 자율주행 기술 사용 예시



③ 원격 고소 정밀 작업 제어 및 작업지능 기술

- 안정적 저지연 통신 시스템 및 실시간 원격제어 인터페이스
- 위치 유지 제어 및 진동 제어를 통한 정밀 작업 제어 기술
- 단위작업 스킵셋 및 계층형 복합 작업지능 기술
- 실시간 원격 정밀 수동제어 기술

숙련 작업자 스킵셋 학습 예시



[그림 2-22] 중점과제 3 연구개요

가. 기술개발 개요 및 정의

□ 작업 높이(5m, 10, 20m)에 따라 사람을 대신하여 고소 작업(용접, 내화뿔칠, 도장 등)을 수행할 수 있고 표준 시공 기술에 특화된 다목적 작업, 협업운용, 다중시스템 로봇 공정 작업 구현을 위한 모듈형 건설 로봇 시스템 개발

□ 자율 주행 로봇 플랫폼, 리프트 모듈, 매니플레이터 모듈, End Of Arm Tooling(EOAT) 로 구성된 “모듈형 건설 로봇 플랫폼” 개발

○ 라스트마일형 물류 이송 및 건설 현장 험지 주행을 위한 다목적 자율주행 로봇 플랫폼 개발

- 소규모 자재(0.5ton), 중규모 자재(1.0ton), 대규모 자재(1.5ton)급 3종

- 경사 극복 $\pm 7^\circ$, 최고 속도 0.7m/s¹⁰, 정지거리 0.5m¹¹) 이내

10) 작업대가 적재위치를 벗어난 상태 기준 (KS B ISO 16368 이동식 승강작업대(MEWP) - 설계, 계산, 안전 요구사항

- 고소 작업을 위한 모바일 플랫폼 탑재형 리프트 모듈 개발
 - 거주형 실내 공간(5m), 다목적 시설 실내 공간(10m), 대규모 시설 실내 공간(20m)급 3종
- 다양한 건설 공종에 활용 가능한 범용 작업 매니플레이터 및 공종 특화 EOAT 기술 개발
 - 가반하중 15kg 이상, 작동 반경 1500mm 이상, 무게 250kg 이하
 - 용접, 도장, 내화뿔칠 등 건설 현장의 고소 공종에 특화된 EOAT

□ 건설 현장 실시간 대응형 다중 로봇/UAV 자율주행 기술 개발

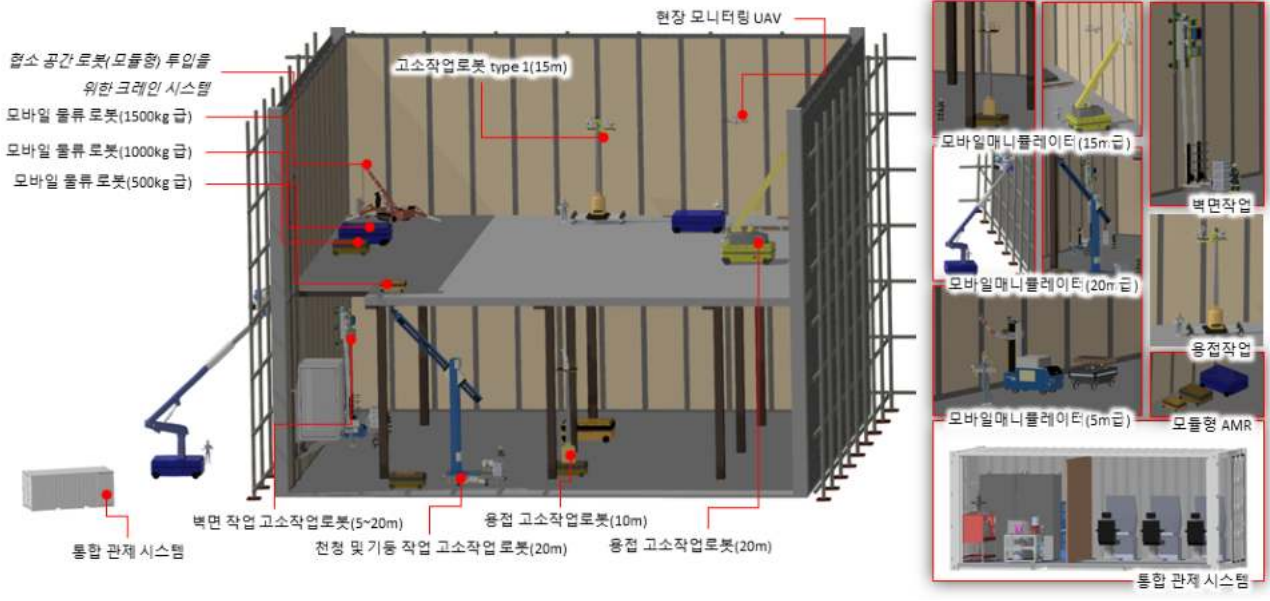
- 실시간 주행 환경 인식(단차, 장애물, 작업자, 작업자 행동예측, 안전 거리 추정 등) 기술 개발
- 다중 로봇/UAV 전역 경로 생성/스케줄링 기술 개발
- 건설 현장 주행 환경 대응을 위한 지역적 자율주행 지도 작성 및 지역 경로 수정/추종 기술 개발
- 건설 작업 모니터링을 위한 UAV의 '위치 고정(벽면, 철골 부착) 및 자세 제어 기술' 개발

□ 원격 고소 정밀 작업 제어 및 작업 지능 기술 개발

- 로봇-로봇/인간-로봇 연결을 위한 안정적 저지연 통신 시스템 및 실시간 원격 제어 인터페이스 개발
- 고소 작업 시 위치 편향 보정, 진동 제어를 통한 정밀 위치 제어 기술 개발
- 정밀 단위작업(이동, 검출, 고도 변경, 점/선/면 작업 등) 스킷셋 및 단위작업을 통합한 계층형 복합 작업 기술 개발
- 비정형 작업 지시를 위한 실시간 원격 정밀 수동 제어기술 개발

및 시험방법 참조)

11) 최대 허용 경사에서 최대 주행속도로 주행 시 제동거리 (KS B ISO 16368 이동식 승강작업대(MEWP)- 설계, 계산, 안전 요구사항 및 시험방법 참조)



[그림 2-23] 다종, 다중 모듈/지능형 건설 로봇 운영 시나리오

나. 기술개발 필요성

- 동적 비정형 건설 환경에 적용할 수 있는 유연한 건설 로봇 플랫폼 기술 및 건설 작업 기술이 필요
 - ‘건설 로봇 플랫폼의 모듈화’를 통한 플랫폼 유연성 확보 필요
 - 비정형 환경에 대응하기 위해 로봇/UAV 등 첨단기술 솔루션을 활용한 ‘환경 변화 실시간 인지 및 정밀 제어 기술’ 필요
- 건설현장에서 종래 사용되는 작업자 탑승형 리프트 고소작업차(직진분형, 굴절분형, 바스켓 부착형)와 고소작업대(직진분형, 굴절분형, 시저형)는 로봇을 이용한 정밀 고소작업에 적합하지 않음
 - 고소 위험 작업에 로봇을 적용하기 위해 접근하여야 하는 높이는 최대 20m가 예상되며 종래 사용되는 장비는 고소 작업 시 강성, 진동 등의 영향으로 말단 작업시 지속적인 움직임이 있어 로봇 매니플레이션을 적용 시 자율 제어 운용 시 작업이 불가능할 것으로 예상
 - 종래 사용되는 고소작업대의 구조를 기반으로 건설 고소 작업에 특화된 리프트 모듈을 개발을 통한 고소 위험 현장 다목적 작업에 특화된 로봇 시스템 개발이 요구되며 리프트 모듈의 말단에 매니플레이터를 탑재하여 원격 작업 및 자율작업 시 작업 위치 유지를 위한 제어(위치 유지 제어, 진동 제어 등) 기술이 요구됨

다. 상세기술개발 내용

□ 중점과제 구성 및 기술 확보 전략

○ 중점과제 구성

구분	과제명
중점과제 3	고소 위험현장의 다목적 작업에 특화된 자율/반자율 지능 기반 모듈형 건설 로봇 시스템 개발
핵심과제 3-1	모듈형 건설 로봇 플랫폼 개발
핵심과제 3-2	건설 현장 실시간 대응형 다중 로봇/UAV 자율주행 기술 개발
핵심과제 3-3	원격 고소 정밀 작업 제어 및 작업 지능 기술 개발

○ 중점과제 기술 확보 전략

핵심과제명	핵심기술	확보전략		
		자체 개발	기술 도입	글로벌 협력
모듈형 건설 로봇 플랫폼 개발	다목적 자율 주행 로봇 플랫폼 개발	○		
	고소 작업을 위한 모바일 플랫폼 탑재형 리프트 모듈 개발	○		
	범용 작업 매니플레이터 및 공중 특화 EOAT 기술 개발	○		
건설 현장 실시간 대응형 다중 로봇/UAV 자율 주행 기술 개발	다중 로봇/UAV 전역 경로 생성/스케줄링 기술 개발	○		
	실시간 주행 환경 인식기술 개발	○	○	
	지역적 자율주행 지도 작성 및 지역 경로 수정/추종 기술 개발	○	○	
원격 고소 정밀 작업 제어 및 작업 지능 기술 개발	UAV의 위치 고정 및 자세 제어 기술 개발	○		
	안정적 저지연 통신 시스템 및 실시간 원격 제어 인터페이스	○	○	
	위치 유지 제어 및 진동 제어를 통한 정밀 작업 제어 기술 개발	○	○	
	단위작업 스킵셋 및 계층형 복합 작업 지능 기술 개발	○		
	실시간 원격 정밀 수동 제어기술 개발	○		

□ 핵심과제 3-1 : 모듈형 건설 로봇 플랫폼 개발

○ 연구정의 및 목표

연구정의 (개요)	자율 주행 로봇 플랫폼, 리프트 모듈, 매니플레이터 모듈, End Of Arm Tooling(EOAT) 로 구성된 “모듈형 건설 로봇 플랫폼” 개발
연구목표	<ul style="list-style-type: none"> ■ 라스트마일형 물류 이송 및 건설 로봇 주행 베이스를 위한 다목적 자율 주행 로봇 플랫폼 개발 ■ 고소 작업을 위한 모바일 플랫폼 탑재형 리프트 모듈 개발 ■ 다양한 건설 공종에 활용 가능한 범용 작업 매니플레이터 및 공종 특화 EOAT 기술 개발

○ 연차별 연구목표 및 연구내용

연차	연구목표	연구내용
1차년도	모듈형 건설 로봇 플랫폼 개념 설계	<ul style="list-style-type: none"> ■ 모듈형 건설 로봇 플랫폼 단위기능/인터페이스 정의 ■ 자율 주행 로봇 플랫폼 개념 설계 및 1ton급 자율 주행 로봇 플랫폼 설계 ■ 리프트 모듈 개념 설계 및 5m급 리프트 모듈 설계 ■ 범용 매니플레이터 개념 설계
2차년도	모듈형 건설 로봇 플랫폼 개발	<ul style="list-style-type: none"> ■ 1ton급 자율 주행 로봇 플랫폼 제작 ■ 5m급 리프트 모듈 제작 ■ 범용 매니플레이터 상세 설계 ■ 고소 용접용 EOAT 및 보조 장비 개발
3차년도	모듈형 건설 로봇 플랫폼 확장	<ul style="list-style-type: none"> ■ 2ton급 자율 주행 로봇 플랫폼 제작 ■ 10m급 리프트 모듈 제작 ■ 범용 매니플레이터 제작 ■ 고소 도장용 EOAT 및 보조 장비 개발
4차년도	모듈형 건설 로봇 플랫폼 고도화	<ul style="list-style-type: none"> ■ 3ton급 자율 주행 로봇 플랫폼 제작 ■ 20m급 리프트 모듈 제작 ■ 범용 매니플레이터 안정화 및 고도화 ■ 고소 내화뿔칠용 EOAT 및 보조 장비 개발
5차년도	통합 건설 로봇 플랫폼 실증	<ul style="list-style-type: none"> ■ 모듈형 건설 로봇 플랫폼 통합 하드웨어 안정화 ■ 모듈형 건설 로봇 플랫폼 통합 하드웨어 실증 ■ 고소 공종별 EOAT 및 보조 장비 안정화 ■ 고소 공종별 EOAT 및 보조 장비 실증

□ 핵심과제 3-2 : 건설 현장 실시간 대응형 자율 주행 기술 개발

○ 연구정의 및 목표

연구정의 (개요)	건설 현장 실시간 대응형 다중 로봇/UAV 자율주행 기술 개발
연구목표	<ul style="list-style-type: none"> ■ 실시간 주행 환경 인식(단차, 장애물, 작업자, 작업자 행동예측, 안전거리 추정 등) 기술 개발 ■ 다중 로봇/UAV 전역 경로 생성/스케줄링 및 자율 주행 제어 기술 개발 ■ 건설 현장 주행 환경 대응을 위한 지역적 자율주행 지도 작성 및 지역 경로 수정/추종 기술 개발 ■ 건설 작업 모니터링을 위한 UAV의 '위치 고정(벽면, 철골 부착) 및 자세 제어 기술' 개발

○ 연차별 연구목표 및 연구내용

연차	연구목표	연구내용
1차년도	건설 현장 주행 환경 모델 정의	건설 현장 주행 환경 요소(단차, 장애물, 작업자 등) 분석을 통한 자율 주행 검증 시나리오 및 사양 정의 주행 환경 인식용 센서 통합 시스템 개발 실시간 주행 환경 요소별 인식기 개발
2차년도	실시간 주행 환경 인식 기술 개발	실시간 주행 환경 요소별 인식기 고도화 실시간 주행 환경 통합 인식기 개발 건설 현장 주행 환경 대응을 위한 지역 지도 작성 기술 개발
3차년도	동적 환경 대응형 단일로봇 자율 주행 기술 개발	자율주행용 전역 지도 기반 다중 로봇 주행 스케줄링 및 경로 계획 기술 개발 환경 요소 위험도별 대응 기반 주행 알고리즘 개발 지역 지도 기반 실시간 로봇 경로 수정/추종 기술 개발
4차년도	다중 로봇/UAV 자율 주행 기술 개발	실시간 UAV 경로 수정/추종 기술 개발 건설 작업 모니터링을 위한 UAV 위치 고정 및 자세 제어 기술 개발 다중 로봇/UAV 통합 자율주행 제어 시스템 개발
5차년도	다중 로봇/UAV 자율 주행 기술 실증	다중 로봇/UAV 통합 자율주행 제어 시스템 실증 다중 로봇/UAV 통합 자율주행 제어 시스템 안정화

□ 핵심과제 3-3 : 원격 고소 정밀 작업 제어 및 작업 지능 기술 개발

○ 연구정의 및 목표

연구정의 (개요)	원격 정밀 고소 작업 제어 및 작업 지능 기술 개발
연구목표	<ul style="list-style-type: none"> ■ 로봇-로봇/인간-로봇 연결을 위한 안정적 저지연 통신 시스템 및 실시간 원격 제어 인터페이스 개발 ■ 고소 작업 시 위치 편향 보정, 진동 제어를 통한 정밀 위치 제어 기술 개발 ■ 단위작업(이동, 검출, 고도 변경, 점/선/면 작업 등) 스킷셋 및 단위작업을 통합한 계층형 복합 작업 제어 기술 개발 ■ 비정형 작업 지시를 위한 실시간 원격 정밀 수동 제어기술 개발

○ 연차별 연구목표 및 연구내용

연차	연구목표	연구내용
1차년도	실시간 제어를 위한 고속 통신 인터페이스 구축	현장 작업자 고소 자율 작업(용접, 내화뿔칠, 도장) 분석을 통한 자율 작업 검증 시나리오 및 사양 정의 제어 안정성 확보를 위한 고속 로컬 통신 환경 구축 저지연 원격 제어를 위한 제어 프로토콜 정의
2차년도	실시간 원격 정밀 수동 제어 기술 개발	실시간 EOAT 위치 검출 기술 개발 적응 제어 및 시간 지연 제어 기반 고소 위치 제어 기술 개발 실시간 고소 원격 제어 기술 개발
3차년도	단위 작업 스킵셋 개발	고소 작업을 위한 단위 작업 및 작업별 인터페이스 정의 단위작업 별 작업 환경 및 작업 영역 인식기 개발 단위작업 자동 제어 기술 개발
4차년도	계층형 복합 작업 기술 개발	계층형 복합 작업 구조 정의 계층형 복합 작업 명령 인터페이스 개발 복합 작업 자동 제어 기술 개발
5차년도	실시간 원격 제어 기술 및 복합 작업 제어 기술 실증	실시간 원격 정밀 수동 제어 기술 실증 계층형 복합 작업 지능 기술 실증

라. 추진전략

□ 목표성과물 및 평가방법

핵심과제	최종 성과물	주요 특징(요구 성능, Spec)	평가방법
모듈형 건설 로봇 플랫폼 개발	자율주행 로봇 플랫폼	가반하중 1ton, 2ton, 3ton	시작품 확인 시험결과서
		경사 극복 $\pm 7^\circ$, 최고 속도 0.7m/s, 정지거리 0.5m 이내	시작품 확인 시험결과서
	리프트 모듈	작업 높이 5m, 10m, 20m	시작품 확인 시험결과서
	범용 매니플레이터	가반하중 15kg 이상, 작동 반경 1500mm 이상, 무게 250kg 이하	시작품 확인 시험결과서
	공중별 EOAT	용접, 도장, 내화뿔칠용 EOAT	시작품 확인 시험결과서
건설 현장 실시간 대응형 다중 로봇/UAV 자율주행 기술 개발	다중 로봇/UAV 자율주행 기술	로봇 주행 정확도 20mm 이하	시험 결과서
		UAV 주행 정확도 50mm 이하	시험 결과서
		로봇 3대, UAV 1대 동시 주행 가능	시험 결과서
원격 고소 정밀 작업 제어 및 작업 지능 기술 개발	원격 고소 정밀 제어 기술	위치 제어 정밀도 1mm 이하	시험 결과서
		통신 지연 시간 5ms 이하	시험 결과서
	원격 복합 작업 제어 기술	현장 작업자 대비 능률 100% 이상	시험 결과서

□ 성과지표

구분	항목		개발 목표치	평가방법	설정근거
논문	학술회의 발표 논문건수(국내/국외)		19	발표 횟수	- 연차별 국내학회 연 1회 이상 발표 - 과제별 국제학회 연 1회 이상 발표
	학술지 게재 논문건수(국내/국외)		11	게재 편수	- 로봇/UAV 단일 개체 정밀 주행 기술 - 고소 작업 계층 구조 설계 및 분석 - 건설 현장 주행 환경 인식 기술 - 단위작업 환경 및 영역 인식 기술
	SCI급 학술지 게재 논문건수		4	논문 건수	- 모듈형 건설 로봇 플랫폼 기술 - 다종 다수 로봇 UAV 통합 주행 기술 - 원격 고소 정밀 제어 기술
지식 재산권	국내	출원	5	출원서	- 모듈형 건설 로봇 플랫폼 - 다종 자수 로봇/UAV 통합 주행 기술 - 고소 건설 복합 작업 기술
		등록	4	등록서	- 출원된 특허 등록
	국외	출원	2	출원서	- 모듈형 건설 로봇 플랫폼 - 부착형 UAV를 이용한 모니터링 기술
		등록	1	등록서	- 출원된 특허 등록
	소프트웨어(S/W) 등록건수		5	등록증	- 모듈형 건설 로봇 플랫폼 원격 제어 프로그램 - 건설 현장 주행환경 인식 프로그램 - 다종 다수 로봇/UAV 통합 주행 프로그램
상용화	현장시험 건수		6	보고서	- 과제별 2회 현장시험 진행
	시제품 출시 건수		3	등록여부	- 모듈형 건설 로봇 플랫폼 시제품
	인증 취득			인증여부	
	MOU건수			건수	

□ 연차별 성과목표

구분	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
핵심과제 1-1		학술발표 1건	학술발표 1건	학술발표 1건	학술발표 1건
			학술지 게재 1건		
					SCI급 논문 게재 1건
			특허 출원 1건	특허 출원 1건	특허 출원 1건
				특허 등록 1건	특허 등록 1건
					S/W 등록 1건
					현장시험 2건
핵심과제 1-2	학술발표 1건	학술발표 2건	학술발표 2건	학술발표 2건	학술발표 2건
		학술지 게재 1건	학술지 게재 1건	학술지 게재 2건	학술지 게재 2건
				SCI급 논문 게재 1건	SCI급 논문 게재 1건
				특허 출원 1건	특허 출원 1건
					특허 등록 1건
				S/W 등록 1건	S/W 등록 1건
					현장시험 2건
핵심과제 1-3		학술발표 1건	학술발표 1건	학술발표 2건	학술발표 2건
			학술지 게재 1건	학술지 게재 1건	학술지 게재 2건
					SCI급 논문 게재 1건
				특허 출원 1건	특허 출원 1건
					특허 등록 1건
				S/W 등록 1건	S/W 등록 1건
					현장시험 2건

□ 연구개발 추진상 위험요인/대응방안

위험요인		대응방안/해결방안
대내	건설 환경의 복잡성, 다양성, 비정형성 등의 이유로 기존 로봇 기술의 단순 적용이 어려움	<ul style="list-style-type: none"> - 비정형 환경에 대응하기 위해 로봇/UAV를 이용한 인공지능 기반 실시간 환경 변화 인식 및 정밀 제어 기술 등 첨단 기술 솔루션을 활용 - 건설 로봇 플랫폼을 모듈화 함으로써, 다양하고 복잡한 건설 환경에 유연하게 적용
대외	기존 연구 개발 단계를 거친 타 건설 로봇들의 상용화 부진	<ul style="list-style-type: none"> - 실증 환경에서 용접, 내화뿔칠, 도장 공정을 시연하여 신뢰성을 확보 - 다양한 건설 환경에 따른 작업의 비정형성 문제를 해결하고, 건설 로봇 표준화를 통해 기술 활용 영역을 확장하여 건설 로봇 상용화에 대한 우려를 불식

□ 기술성숙도(TRL) 목표

과제명		As-is 기술성숙도(TRL)	To-be 기술성숙도(TRL)
핵심과제 3-1	모듈형 건설 로봇 플랫폼 개발	2	7
핵심과제 3-2	건설 현장 실시간 대응형 다중 로봇/UAV 자율 주행 기술 개발	2	7
핵심과제 3-3	원격 고소 정밀 작업 제어 및 작업 지능 기술 개발	2	7

□ 과제별 성과물 기반 TRM

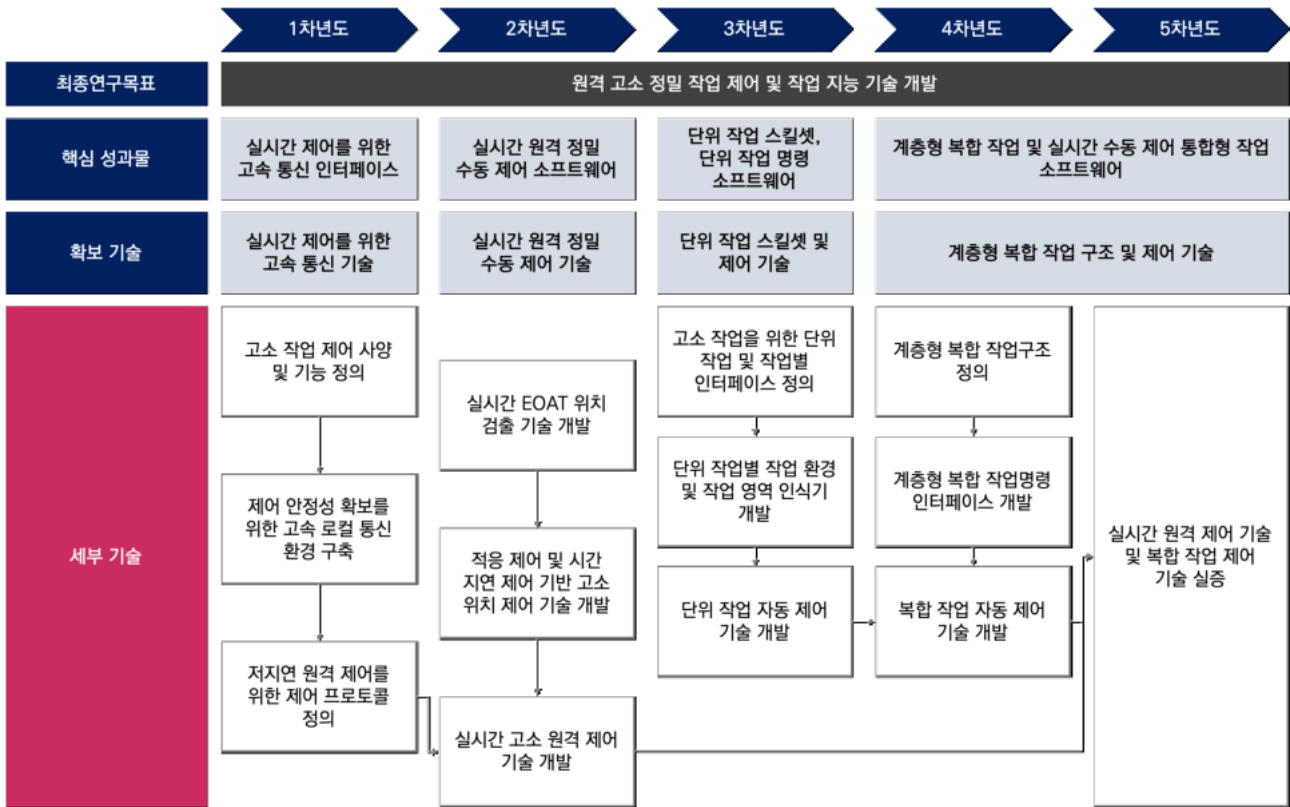
[그림 2-24] 핵심기술 3-1 성과물 기반 TRM

	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
최종연구목표	모듈형 건설 로봇 플랫폼 개발				
핵심 성과물		모듈별 1종 통합 건설 로봇 플랫폼 시제품	모듈별 2종 통합 건설 로봇 플랫폼 시제품	모듈별 3종 통합 건설 로봇 플랫폼 시제품	
확보 기술	모듈형 통합 건설 로봇 플랫폼 기본 사양 및 인터페이스	모듈별 1종 통합 건설 로봇 플랫폼 제어 기술	모듈별 2종 통합 건설 로봇 플랫폼 제어 기술	3종 모듈 통합형 건설 로봇 플랫폼 제어 기술	
세부 기술	자율 주행형 로봇 플랫폼 기본 설계	소규모 자재(0.5ton급)용 자율 주행형 로봇 플랫폼 개발	중규모 자재(1ton급)용 자율 주행형 로봇 플랫폼 개발/고도화	중규모 자재(1.5ton급)용 자율 주행형 로봇 플랫폼 개발/고도화	모듈형 건설 로봇 플랫폼 실증
	고소작업을 위한 리프트 모듈 기본 설계	거주형 실내 공간용 리프트 모듈(5m급) 개발	다목적 시설 실내 공간용 리프트 모듈(10m급) 개발	대규모 시설 공간용 리프트 모듈(20m급) 개발	
	범용 매니플레이터 기본 설계	범용 매니플레이터 상세 설계	범용 매니플레이터 제작	범용 매니플레이터 안정화 및 고도화	
	EOAT 인터페이스 정의 및 공용 API 개발	고소 도장 및 내화뿔칠용 EOAT 및 보조장비 개발	고소 용접용 EOAT 및 보조장비 개발	EOAT 및 보조장비 안정화 및 고도화	

[그림 2-25] 핵심기술 3-2 성과물 기반 TRM

	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
최종연구목표	건설 현장 실시간 대응형 다중 로봇/UAV 자율 주행 기술 개발				
핵심 성과물	주행환경 요소별 인식기	주행환경 통합 인식기	단일 로봇 자율주행 소프트웨어	다중 로봇/UAV 자율주행 소프트웨어	
확보 기술	건설현장 주행환경 모델	실시간 주행환경 인식 기술	동적 환경 대응형 단일 로봇 자율주행 기술	다중 로봇/UAV 자율주행 기술	
세부 기술	건설현장 주행환경 요소 특징 조사	실시간 주행환경 요소별 인식기 고도화	전역 지도 기반 다중 로봇 스케줄링 및 경로 계획 기술 개발	실시간 UAV 경로 수정/추종 기술 개발	다중 로봇/UAV 자율주행 기술 실증 및 고도화
	주행환경 인식용 센서 통합 시스템 개발		환경 요소 위험도별 대응 기반 주행 알고리즘 개발	다중 로봇/UAV 자율 주행 제어 시스템 개발	
	실시간 주행환경 요소별 인식기 개발	실시간 주행환경 통합 인식기 개발	지역 지도 기반 실시간 로봇 경로 수정/추종 기술 개발	UAV 위치 고정 및 자세 제어 기술 개발	
		건설현장 주행환경 대응을 위한 지역 지도 작성 기술 개발			

[그림 2-26] 핵심기술 3-3 성과물 기반 TRM



제3장 사업 추진방법

제1절 사업 추진전략

1. 사업 추진전략

□ 다부처 추진체계



[그림 3-1] 부처별 중점과제 및 연계방안

- 부처간 협력이 필요한 연구분야를 지정하여 중점 지원할 수 있도록 부처간 연계방안(안) 마련
 - 연구 주체별 협력체계 강화를 위해 기획위원회 구성 및 분기별 협의를 통한 협력 추진 및 성과 검토
- (국토부) 건설로봇에 적용 가능한 XR 기반 원격제어 기술 확보, 현장 적용을 위한 고소 건설현장 연계 프레임워크 설계 및 활용성, 품질검사 기술 개발
 - 고소 건설현장에 대한 현장-공정-로봇-사용자 연계 프레임워크 설계를 통해 XR기술과 로봇기술개발을 연계하고, 현장에 적용할 수 있도록

관련 제도 및 공법 등 개선

- 건설현장 정보 수집을 위한 작업환경 센싱모듈 및 통합관제시스템 개발
- 개발된 로봇시스템의 현장적용을 위한 시스템 통합 및 실증 테스트베드 구축·운영
- (산업부) 비정형 건설환경에서 고소 공정에 적용 가능한 지능형 다중작업 로봇 기술 및 다중 로봇 제어 기술개발
 - 지속적으로 변화하는 건설현장에 대응하기 위한 다중 로봇 경로 생성 및 스케줄링, 실시간 위험성 인지 등 자율 주행 기술 개발
 - 고소 작업을 위한 다중 로봇 제어 기술 및 모듈형 자율로봇시스템 개발을 통한 용접, 내화뿔칠, 도색 등의 작업 무인화
- ※ 향후 세부기획 시 사업 성공을 위한 전략 차원의 연차별 세부 추진계획(예: 상세기획(1차년도), 기술개발 및 1차 시제품 제작 후 검증(2~5차년도), 표준화 및 교육프로그램 추진(5~6차년도)) 추가 검토 예정

□ 현장수요자 및 이해관계자 참여체계

- 산·학·연이 참여하는 스마트건설 얼라이언스 내의 자동화 위원회와의 협업을 통하여 고소작업 로봇 수요자자문위원회 신설하여 정례적으로 과제 추진 계획 및 현황 공유, 관련 요구사항 수렴
- 특히 해당 자문위원회에는 관련 고소 3종 작업을 시행하는 전문건설업체와 작업자들을 포함하여, 관련 작업의 세부사항 파악 및 실제 사용자들의 요구사항을 수렴

□ 핵심 분과별 산학연 전문가로 구성된 기획위원회 구성

- (고소작업 공중 특성화 기술 및 XR 원격제어 기술) 서울대학교, 현대건설
- (작업환경 센싱모듈 및 통합관제시스템) 인하대학교, 서울과학기술대학교
- (고소작업로봇 작업지능 및 모듈) 한국로봇융합연구원, 건설기계부품연구원, 서울과학기술대학교

[표 3-1] 기획위원회 명단

분과	소속	성명
고소작업 공중 특성화 기술 및 XR 원격제어 기술	서울대학교 건축학과	안창범
	서울대학교 건설환경공학부	지석호
	현대건설 건설자동화연구팀	김동구
작업환경 센싱모듈 및 통합관제시스템	인하대학교 건축학부	김정렬
	서울과학기술대학교 건축학부	김태훈
	한국로봇융합연구원 통합로봇시스템연구본부	이재열
고소작업로봇 작업지능 및 모듈	한국로봇융합연구원 기획조정실	박규희
	건설기계부품연구원 스마트기술연구그룹	조기용
	서울과학기술대학교 기계·자동차공학과	김진현

□ 스마트건설 얼라이언스 참여 기업 중 14개사의 수요 및 연구개발 기업으로의 참여 의향 확인 ([붙임 2] 기관별 참여의향서 참조)

- (종합건설사) 현대건설, 삼성물산 등 10개사
- (전문건설사) 영신 등 2개사
- (로봇개발사) KNR시스템 등 2개사

[표 3-2] 참여의향서 제출 기업

No	구분	기업명
1	종합건설사	롯데건설
2		GS건설
3		DL E&C
4		포스코이앤씨
5		대우건설
6		현대엔지니어링
7		현대건설
8		삼성물산
9		SK에코플랜트
10		HDC현대산업개발
11	전문건설사	영신
12		영신디앤씨
13	로봇개발사	KNR시스템
14		레드원테크놀러지

2. 법·제도적 위험요인 및 대응방안

□ (추진방식) 연구성과 간 긴밀한 연계 및 통합 현장 실증 수행 등을 위해 다부처 사업 통합 공고 추진

- 혁신법 및 공동관리규정 및 지침을 따르되, 다부처 협의체를 통해 공고 및 과제 및 성과 관리 등을 위한 별도 규정 마련 검토 예정

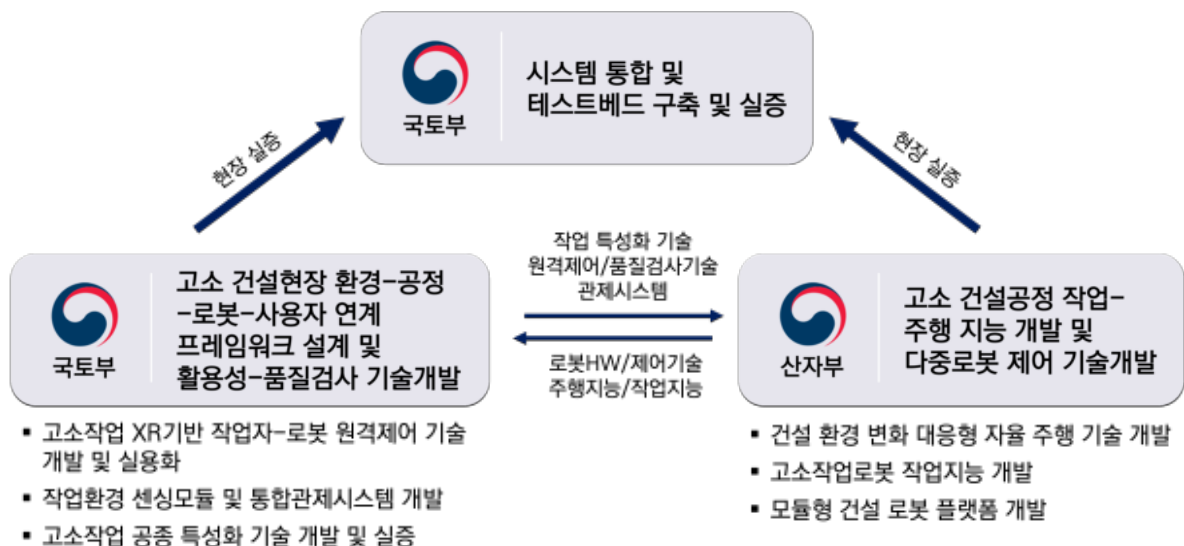
추진절차	시행주체	절차내용
① 사업기획	국토교통부, 산업통상자원부	○ 사업기획(기술위원회/PD 과제기획전담팀)
② 사업시행 통합공고	국토교통부, 산업통상자원부	○ 사업 세부추진계획 확정·공고 - 사업안내서, 과제제안요구서(RFP) 포함
③ 과제신청·접수	연구기관·국토교통과학기술진흥원, 한국산업기술기획평가원	○ 연구기관 : 신규과제 연구개발계획서 작성·신청 ○ 국토교통과학기술진흥원/한국산업기술기획평가원 : 접수
④ 과제선정·평가	국토교통과학기술진흥원·한국산업기술기획평가원·평가위원회	○ 사전검토 → 전문가 평가(발표심사) → 선정결과 확정(국토교통부/산업통상자원부)
③ 협약체결	연구기관·국토교통과학기술진흥원, 한국산업기술기획평가원	○ 연구개발과제 협약 체결
④ 진도점검	국토교통과학기술진흥원, 한국산업기술기획평가원	○ 진도점검(중간평가, 현장점검 등)
③ 최종평가	국토교통과학기술진흥원, 한국산업기술기획평가원	○ 연구결과 단계·최종평가
④ 성과활용 평가	정부·민간 기타	○ 성과활용 보고 및 평가 등 사후관리(기술이전 등)

제2절 사업 추진체계

1. 부처 간 역할분담

□ 사업 추진체계 및 기관별 업무분장

- 본 사업 추진을 위하여 산·학·연·관 협력체계를 구축하여 유기적인 연계를 수행할 예정임
- 컨소시엄은 대학, 연구소, 산업체(R&D)와 더불어 수요자인 시공사, 전문건설업체, 건설로봇 개발사 등을 포함
- 본 사업 참여부처는 국토교통부를 주관으로, 산업통상자원부 협조
 - 국토교통부(주관): ① 고소 건설현장 환경-공정-로봇-사용자 연계 프레임워크 설계 및 활용성-품질검사 기술개발, ② 시스템 통합 및 테스트베드 구축 및 실증
 - 산업통상자원부(협조): 고소 건설공정 작업-주행 지능 개발 및 다중로봇 제어 기술개발



[그림 3-2] 부처별 역할분담 및 세부과제 분류

2. 사업 추진 및 관리운영 체계

□ (통합관리형 관리체계) 총괄형 또는 사업단 형태를 통해 다부처 과제들 및 도출된 결과물을 통합적으로 관리

※ 총괄과제형 또는 사업단형태의 추진체계는 전문기관 및 부처협의를 통해 확정 예정



[그림 3-3] 부처 협업사업 관리체계(통합관리형)

※ 다부처공동사업은 통합관리형으로 관리하도록 권고하고 있으나 부처 협의에 따라 변경 될 수 있음

○ 총괄주관기관 또는 사업단을 통하여 각 부처별 과제의 성과 분석, 성과 평가 등을 진행하며, 관련 결과를 참여부처와 공유. 공정한 성과평가를 위하여 외부 심사위원으로 구성된 성과평가 심사위원회를 구성

○ 연구기관, 수요기업 등이 참여하는 자문위원회를 통해 수요자의 요구사항, 사용성 평가 등을 R&D 과제 기획/R&D/실증/기술이전/사업화까지 반영

※ 스마트건설 얼라이언스를 활용한 수요자 사용성 평가 및 실증 그룹 운영



[그림 3-4] 사용성 평가 및 실증 그룹(안)

- 기술개발부터 성능·신뢰성 고도화, 상용화까지 전주기를 통합 지원하기 위해 국토부 및 산업부가 공동 기획·협력 추진
 - 실효성 있는 기획결과 도출을 위해 사업 기획 추진 시부터 국토부-산업부-민간(로봇연구기관, 종합건설사 등)이 참여하여 정례적으로 요구사항 수립 등 추진
- ※ 건설·안전 관련 로봇전문가 및 수요기관 관계자 대상 Bottom-Up 기술수요 조사실시 예정

□ (부처 협력체계) 사업 추진을 위하여 주관부처, 협조부처 관련 인사들이 참여하는 부처협의체를 구성

- 부처협의체에는 주관부처인 국토부 및 협조부처인 산업부의 실무담당 공무원뿐만 아니라 각 부처 산하 연구관리기관인 국토교통과학기술진흥원, 한국산업기술평가관리원의 관련 담당자들을 포함할 예정임
- 사업의 추진과 관련한 주요사항 및 실무조정을 부처협의체를 통해 심의 및 의결, 분기별 1회의 정기회의를 개최하는 것을 원칙으로 함

- 필요시 앞서 논의하였던 고소작업 로봇 수요자자문위원회의 자문위원을 초청 및 활용하여 기술 수요조사 및 자문 실시
 - 다부처 사업의 원활한 연계를 위해 부처별 사업 담당자가 참여하는 ‘고소건설작업 자율로봇 다부처협의체(가칭)’를 구성하고 기획 및 사업관리 협력
 - 다부처 공동개발 필요성을 고려한 정부 관련 부처 및 담당기관 간 협의체 운영
- ※ 분기별 요구사항, 중간점검, 정책사항 등에 대하여 관(국토부, 산업부) 협의 예정

3. 부처간 연계방안

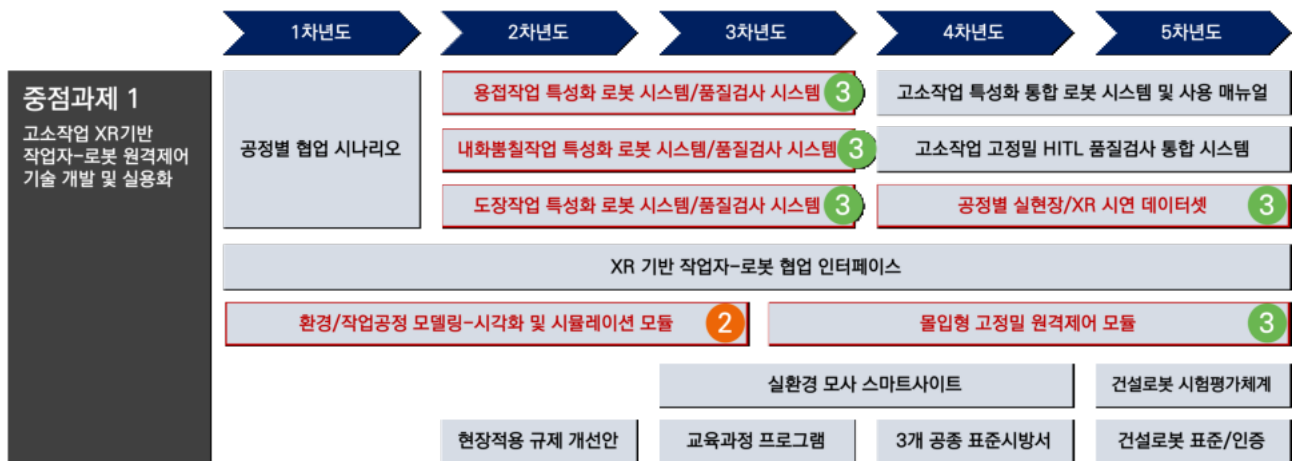
부처간 협력이 필요한 대표 연구분야를 지정하여 중점 지원할 수 있도록 부처간 연계방안(안) 마련

- 연구 주체별 협력체계 강화를 위해 연구위원회 구성 및 분기별 협의를 통한 협력 추진 및 성과 검토

연구로드맵에 따른 부처별 연계사업

○ 국토교통부(중점과제 1)

[그림 3-5] 국토부(중점과제 1) 단계별 핵심 성과물 및 다부처공동연구(붉은색으로 표시, 원안의 숫자는 중점과제 번호)



○ 국토교통부(중점과제 2)

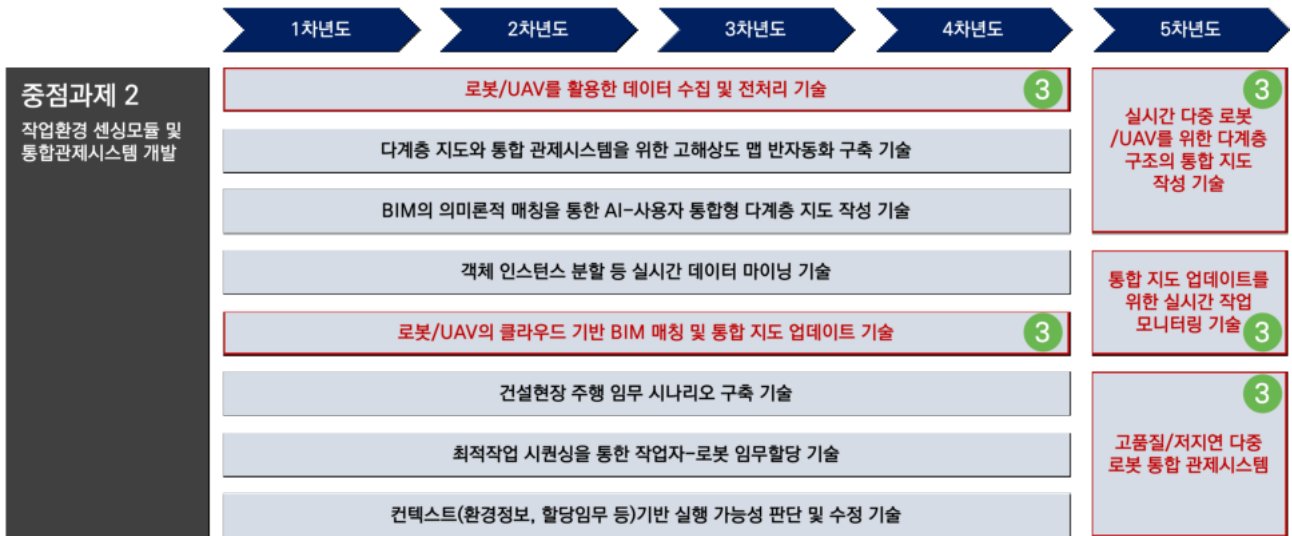
- 실시간 다중 로봇/UAV 통합 지도 작성 기술을 통해 로봇 주변환경/작업공정의 의미론적 시각화 데이터 제공

○ 산업통상자원부(중점과제 3)

- 자율 주행 로봇 플랫폼, 리프트 모듈, 범용 작업 매니플레이터, 공중 특화 EOAT 기술, 제어 기술 시스템 통합 및 작업 최적화
- XR 기반 몰입형 고정밀 원격제어 모듈 공동 개발
- 위치 유지 제어 및 진동 제어와 XR 인터페이스 연동 기술

○ 국토교통부(중점과제 2)

[그림 3-6] 국토부(중점과제 2) 단계별 핵심 성과물 및 다부처공동연구(붉은색으로 표시, 원안의 숫자는 중점과제 번호)

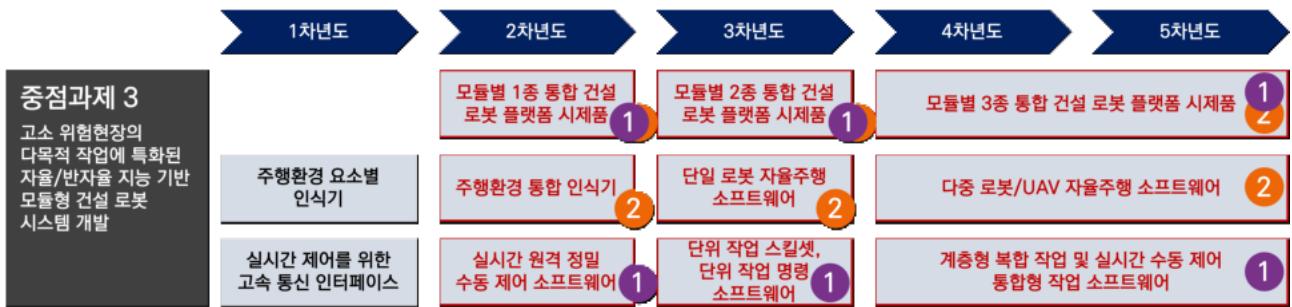


○ 산업통상자원부(중점과제 3)

- 건설현장 환경 데이터 수집을 위한 자율 주행 로봇 연동
- UAV 앵커링 기술을 통한 실시간 작업 모니터링
- 실시간 주행 환경 인식기술 연동, 고해상도 맵 구축
- 다중 로봇 통합 관제 시스템 공동 개발

○ 산업통상자원부(중점과제 3)

[그림 3-7] 산업부(중점과제 3) 단계별 핵심 성과물 및 다부처공동연구(붉은색으로 표시, 원안의 숫자는 중점과제 번호)



○ 국토교통부(중점과제 1)

- 공정별 작업자-로봇 협업 임무 시나리오 기반 로봇 플랫폼 시제품 설계
- 공종별 작업자 원격제어(실환경/XR) 기반 작업시연 데이터셋 활용 작업지능 공동 개발
- XR 인터페이스 기반 작업자 원격제어 입력 데이터 제공
- 스마트사이트 실증 기반 (사용자) 피드백 제공

○ 국토교통부(중점과제 2)

- 다중 로봇 주행 임무 할당 및 모니터링
- 최적 작업 시퀀싱 기반 다중 로봇 임무 할당 및 모니터링
- 자율주행을 위한 실시간 다중 로봇/UAV 통합 지도 제공

4. 관련부처와의 협의 진행상황

('23.08~09) 대내외 환경분석 및 추진전략 수립

- ('23.08.30) 사업 Kick-off 회의 (서울대-KIRO-현대건설)
- ('23.09.08) 분과회의 (서울대-KIRO-현대건설)

('23.09~10) 현장 수요조사 및 기술분과위원회 운영

- 국토교통부 및 산업통상자원부 부처 사업 담당관 협의 진행

('23.09.12) KEIT 로봇PD 및 기획위원 킷오프 회의

○ 추진개요

- (일시/장소) '23.09.12(화) 12:00~14:00/서울대학교 39동 교수회의실
- (참석자) 한국산업기술평가관리원(KEIT, 산업부 산하기관) 우현수 PD, 기획과제 책임자 및 기획위원 총 7명

○ 주요 논의 내용

- 로봇 플랫폼 구체화(이동식 리프트에 듀얼 암 매니퓰레이터 탑재 형태) 및 고소작업 5종 후보 선정(용접, 내화뿔칠, 도장, 불팅, 드릴링)
- 다중로봇시스템(MRS)를 사업 범위에 포함
- 다부처공동기획 사업 향후 일정 및 계획 수립
- 각 부처별 역할* 협의

* 원천기술개발(국토부, 산업부, 과기부(최종 제외)), 현장고도화(국토부)로 부처별 역할 검토

('23.09.18) 국토부 담당사무관 및 기획위원 회의

○ 추진개요

- (일시/장소) '23.09.18(월) 14:00~15:00/정부세종청사 국토교통부
- (참석자) 국토부 김진우 사무관, 기획과제 책임자 및 기획위원 총 3명

○ 주요 논의 내용

- 다부처공동기획 사업 향후 일정 및 계획 수립
- 주관부처(국토부), 협조부처(산업부)로 부처별 역할 협의

□ ('23.10.25) KEIT 로봇PD 2차 기획 회의

□ ('23.11.20) 산업부 및 KEIT 로봇PD 사업보고

☞ 산업부 의견 검토 및 수정·보완	
당초 의견	수정(안)
<ul style="list-style-type: none"> - 국토부와 산업부의 역할이 불분명함 <ul style="list-style-type: none"> · (국토부) 공정/적용환경/시나리오 분석 등 국토부 고유역할 제시 필요 · (산업부) 자율작업에 대한 SW개발 추가 필요 	<ul style="list-style-type: none"> - 국토부 및 산업부 역할 조정 <ul style="list-style-type: none"> · (국토부) 국토부 고유역할 포함 세부과제 보완 <ul style="list-style-type: none"> * 공정/환경 분석을 통한 협업 임무 시나리오 설계, 제도/공법/교육 개선, 작업시연 데이터셋 구축, 품질 검사 시스템 개발 등 * 공정 특성화 기술 개발 중점과제로 분리 · (산업부) 자율작업에 대한 SW개발 내용 보완, 자율주행(navigation) 및 자율작업(작업지능) 보완 및 국토부와의 역할 분리/재정의
<ul style="list-style-type: none"> - 기존 사업 및 기술과의 차별성 및 중복성 검토 필요 <ul style="list-style-type: none"> · 해외 고소작업 로봇과의 차별성 검토 · 기존 산업부 개발기술기반의 실용화 수준으로 목표 설정 필요 	⇨ <ul style="list-style-type: none"> - 해외 고소작업 로봇과의 차별성 검토 (일본 맨-머신 시너지 이펙터스 철도 중장비 로봇) <ul style="list-style-type: none"> · 모듈형 건설 로봇 플랫폼 개발을 통한 다목적 작업 가능, 작업 최적화 로봇 툴 개발 · 모바일 플랫폼의 건설현장 자율주행 능력 · 적응형 모델 기반 작업지능
<ul style="list-style-type: none"> - 자율화 개발수준의 정의 및 목표 설정 필요 	<ul style="list-style-type: none"> - 사용자가 모니터링 및 임무할당하는 Level2의 반 자율화 수준을 목표로 설정 - 대상 공종 고려 매니플레이터 요구 스펙 정의(안) <ul style="list-style-type: none"> · 가반하중 15kg 이상, 작동반경 1500mm이상 · 무게 250kg 이하(20m 고소작업대 정격하중 기준)
<ul style="list-style-type: none"> - 건설현장에 도입하기 위해 험지주행을 고려한 하부플랫폼 개발이 필요 	<ul style="list-style-type: none"> - 공정별 현장실증 포함으로 현장 주행환경 극복 포함 - 건설현장 환경 고려 하부플랫폼 요구 스펙 정의(안) <ul style="list-style-type: none"> · 지면경사도 $\pm 7^\circ$ 이내의 평탄한 노면 주행 · 최대 주행속도 0.7m/s 이내, 정지거리 0.5m 이내

□ ('23.11.28) 국토부 분과 기획위원 회의

○ 추진개요

- (일시/장소) '23.11.28(화) 11:00~12:00/서울대학교
- (참석자) 기획과제 책임자 및 기획위원 3명 및 실무진

○ 주요 논의 내용

- 간담회 개최결과 공유
- 중간컨설팅 이후 부처 회의, 간담회 등 결과 반영하여 최종 연구내용 수정보완

□ ('23.12.06) 기획위원회 및 핵심 참여기관 총괄 협의 진행

○ 추진개요

- (일시/장소) '23.12.06(수) 09:30~11:00/비대면

<참석자 목록>

- (서울대학교 건축학과) 안창범, 윤성부
- (서울대학교 건설환경공학부) 지석호, 이기택
- (현대건설 건설자동화연구팀) 김동구, 김경태
- (인하대학교 건축학부) 김정렬, 배성재
- (서울과학기술대학교 건축학부) 김태훈
- (한국로봇융합연구원 통합로봇시스템연구본부) 이재열, 김한결
- (한국로봇융합연구원 기획조정실) 박규희, 박민정, 김희진
- (건설기계부품연구원 스마트기술연구그룹) 조기용
- (서울과학기술대학교 기계·자동차공학과) 김진현

○ 주요 논의 내용

(1) 간담회 개최결과 공유

- 2023.11.22. 비대면 진행, 산학연 관계자 30여명 참석
- 간담회 후 참석자들에게 기술수요조사 (온라인 설문) 공유
- 기술수요조사 결과 공유

(2) 핵심기술별 주요 연구내용(안) 공유

- 검토 후 최종 연구내용 수정보완

(3) 세부 기획 내용 공유

- 고소작업 3종 (용접, 내화뿔칠, 교량 도장)
- 로봇 자율화 수준 (Level2 반자율화)
- 다중 로봇 시스템 제어의 범위

☐ 스마트건설 얼라이언스 공개 간담회 ([양식 3] 다부처 공동기획 과제별 간담회/세미나 주요내용 참조)

☞ 포스코이앤씨, 삼성물산, GS건설 등 산학연 의견수렴 및 17개사 기술수요조사

주요 의견	결과 및 반영(안)
<ul style="list-style-type: none"> - 고소작업 종류, 개발 방식에 대한 현장의 기술 개발 수요 수렴 - Force feedback 등 다양한 형태의 피드백을 원격 조종에 포함시켜야 하며 품질검사 등도 로봇 기술에 통합해야 함 - 토목 분야 (대단면 터널 등)의 고소작업도 포함 요청 - 국제공동과제 형식으로서의 확장에 대한 고려 요청 - 고소작업 결과물 검사, 작업 주변환경 모니터링에 대한 기술 개발 또한 이루어져야 하며, 확장현실을 통해 구현 가능할 것 - 툴 개발 부분이 건설사 입장에서 중요한 요소가 될 것으로 보이며, 툴을 매개로 특허 등 재산권, 참여에 대한 권리를 보호받을 수 있을 것 	<ul style="list-style-type: none"> - 산학연 참석자들은 본 사업의 중요성과 필요성을 공감하였으며, 사업 추진 시 참여 가능한 기술, 시나리오 등을 마련해보기로 합의함 - 기술수요조사 설문을 통해 고소작업 '용접(1순위), 도장(2순위), 내화뿔칠(3순위) 작업' 3종 검토 및 선정 - 기술수요조사 설문을 통해 '원격제어(1순위) 및 완전 자동화(2순위)' 자율화 수준 검토 및 선정 - 스마트건설 얼라이언스 참여 기업 중 수요 및 연구개발 기업으로서의 참여 의향 확인 * 건설사(현대엔지니어링, 포스코이앤씨, 삼성물산 등), 건설IT사(영신디앤씨, 아이티원 등), 로봇개발사(레드원테크놀러지, 평선베이, 케이엔알 시스템 등) 등

제3절 사업 기간 및 소요예산

1. 사업기간 및 추진일정

□ 사업 기간 및 소요예산

- 총 사업기간: 2025.01.01. ~ 2029.12.31. (5년)
- 총 소요예산: 정부 300억원 (비예타 규모, 총 500억원 미만)
 - 국토부 : 건설기술혁신(R&D) 세부사업 신설/스마트건설기술개발사업(내역)
 - 산업부 : 로봇산업핵심기술개발(내역)
- 년차별 소요예산

[표 3-3] 사업비 투입 계획

(단위: 억원)

부처	내역사업명	세부연구내용	구분	연도별 소요예산					합계	
				'25	'26	'27	'28	'29		
국토교통부 (주관)	고소작업 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술 개발 및 실용화	고소 용접 작업 특성화 기술 개발 및 실증	국비	3	4	4	5	4	20	
		고소 내화뿔칠 작업 특성화 기술 개발 및 실증		3	5	5	4	3	20	
		고소 도장 작업 특성화 기술 개발 및 실증		3	4	5	4	4	20	
		고소작업 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술 개발		4	4	4	4	4	20	
		실환경 기반 테스트베드 구축		5	5	10	15	15	50	
		제도/공법/교육 개선 및 실용화		2	2	2	2	2	10	
	작업환경 센싱모듈 및 통합관제시스 템 개발	실시간 다중 로봇/UAV 통합 지도 작성 기술 개발	국비	4	6	6	4	3	23	
		다중 로봇 통합 관제시스템 개발		2.5	4.5	5	2.5	2.5	17	
	산업통 상자원 부 (참여)	고소작업에 특화된 자율/반자율 지능 기반 모듈형 건설 로봇 시스템 개발	모듈형 건설 로봇 플랫폼 개발	국비	8	11	14	10	7	50
			건설 현장 실시간 대응형 다중 로봇/UAV 자율 주행 기술 개발		5	7	10	7	6	35
원격 고소 정밀 작업 제어 및 작업 지능 기술 개발			5		6	11	8	5	35	
합계				44.5	58.5	76	65.5	55.5	300	

2. 사업규모 및 투자계획

□ 재원조달 방안

- 현재 국토교통부, 산업통상자원부의 신규 R&D 투자 규모 및 사업예산과 정부 투자방향을 고려 시, 재원 조달 가능
 - (국토부) 국토교통 분야 미래혁신 기술의 획기적 진보와 국민안전 확보를 지원하는 '23년 국토교통 R&D사업 총 108개, 6,149억원 투자(건설안전 분야 포함 신규사업 20건, 478억원)
 - ※ '23년 국토 기술 분야: 건설 기술 534억원, 도시건축/공간정보/스마트시티 기술 575억원 수준
 - (산업부) 다양한 로봇 응용분야의 범부처 수요와 연계하고 성장·유망분야 핵심 로봇제품 및 다양한 로봇제품의 기반이 되는 원천 및 공통기술개발을 지원하는 '24년 로봇산업기술개발 R&D 1,174억원 투자
 - ※ '24년 로봇산업핵심기술개발 1,054.3억원('23년 대비 153억원 증액, 다부처 협업사업 포함)
- 민간 및 수요처 기술개발 참여 및 민간대응자금 확보
 - 기획연구를 통해 다양한 기술개발 수요자 그룹을 기획초기 단계에서부터 자문위원으로 참여를 유도하여 기술수요는 물론 향후 R&D 및 리빙랩 연구 참여의향을 확인하는 등 연구개발성과의 실용화와 대응자금 확보방안을 모색할 예정임
 - 현재까지 민간기업은 현대건설 등이 기술분과위원회에 참여하였으며, 향후 국토부 스마트건설얼라이언스 등 민간 건설사의 실제적 수요에 기반하여 민간대응자금을 최소 30억원 이상 확보할 예정임
 - 또한 R&D 단계에서의 민간 수요기업 및 수요처(국토부) 참여는 시장에서 요구하는 상용화 수요에 대응함으로써 기술개발 성과물이 즉시 시장에 진입될 수 있는 주요한 요인으로 작용할 것으로 판단됨

제4장 성과 활용방안 및 기대효과

제1절 사업 성과 활용 방안

□ 실용화 및 사업화 방안

○ 스마트건설 얼라이언스 연계하여 현장 실용화 요구수준의 XR기반 고소 작업용 모듈형 건설 로봇 연구성과 기술이전 및 현장실증·시범사업 추진

- (사업화 생태계) 종합·전문 건설사 활용 시나리오·요구사항 → R&D·실증 → 로봇·건설산업 인증·규제·공법·제도 개선 → 민간 사업화

※ 본 과제 참여 수요 기업의 경우 스마트건설얼라이언스 리딩 및 참여기업으로 자동화 기술 보급 및 사업화 확대의 목표로 활동 중

- (시범사업 연계) 개발된 기술 및 시제품은 본 과제 참여 수요 기업 현장에 설치하여 Track-Record 확보

※ 건설 자동화분과 : 삼성물산 시범사업 추진 및 고정밀 실외 측위시스템 현장 실증 사이트 조사 중

기타 BIM, 디지털센싱, 빅데이터·플랫폼 분과 등 기술위원회 적극 활용 추진



[그림 3-8] 스마트건설얼라이언스 기술분과 및 실용화 방안

- (기술이전) 주행/작업지능 SW 및 고정밀 HITL 품질검사 시스템 등 개발 요소기술 및 모듈별·시제품 기술이전 추진

- (신뢰성 확보) 수요 기업의 현장 도입 시 기술지원 및 현장 데이터 수집/분석에 따른 개선을 통한 기술 신뢰성 확보

- (표준화) XR기반 고소 작업용 모듈형 건설 로봇 기술 연구 성과 및 현장 도입 데이터를 기반으로 건설 로봇의 공통된 기준을 정의하고, 수요처별 요구사항을 고려한 상호 운용성을 보장하여 건설 산업 전반에서의 협력을 촉진
- (기타) 주요 성과물과 기술수요처별 요구사항(현장환경, 운용장비, 표준시방서, 등)에 부합하는 BM 개발하고 산업부·국토부·중기부 보급사업/R&BD 연계 후속 사업화 추진

[표 3-4] 기술수요처별 실용화 및 사업화 전략

목표성과물	기술수요처	실용화 및 사업화 전략
용접/내화뿔칠/도장 작업 특성화 장치(로봇플랫폼 통합)	[민간] 종합/전문 건설사 [공공] 정부, LH, SH 등 공공 발주기관	- 건물 외벽, 교량 상·하부의 도장공사 및 유지보수 시 개발 성과물 활용 - 개발 기술의 건설 도장 관련 규제 및 표준 준수 여부를 평가하여 법적 제약 극복 - 다목적 모듈형 건설 로봇 플랫폼의 구독형 서비스로 수익 창출 모델 설계
용접/내화뿔칠/도장 작업 고정밀 HITL 품질검사 시스템	[민간] 종합/전문 건설사 [공공] 정부, LH, SH 등 공공 발주기관	- 안전 문제로 고소용접/내화뿔칠/도장 작업의 품질관리가 어려움을 강조하여 개발 기술을 적극 활용하도록 마케팅 전략 수립 - 품질관리 관련 표준 인증을 획득하여 건설업에서의 기술 도입 촉진
고소작업 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술	[민간] 종합/전문 건설사 [공공] 정부, LH, SH 등 공공 발주기관	기존 건설사가 개발중인 건설로봇 장비, 혹은 철거, 토공 및 광산 작업에 사용되는 자율장비와 반자율장비시스템(ASAMS) 등에 XR기반 반자율화 원격제어 기술을 Add-on하여 기술 고도화, 생산성, 안정성 향상
	과학기술정보통신부	실환경/XR 시연 데이터셋 수집을 통해 건설 고소작업에 특화된 로봇 협업 모델 및 숙련 작업자 데이터베이스 확보
실환경 기반 스마트사이트 공법/표준/인증/제도/교육 개선	[민간] 종합/전문 건설사 [공공] 정부, LH, SH 등 공공 발주기관	- 임대 가능한 건설로봇 테스트베드를 제공함으로써 개발 단계의 건설로봇 현장 테스트에 있어 생산성, 안전성 등 측면에서 리스크 완화 - 테스트베드 기반 시험평가체계 개발과 건설 로봇 인증/표준 개선을 함께 추진함으로써 반복적이고 비효율적인 건설 로봇 인증 제도 개선
	국토교통부	3개 공종 로봇 표준 시방서를 통해 로봇을 활용한 토목/건설 공정 표준화에 대한 과학적 근거자료 마련
실시간 다중 로봇/UAV 통합 지도 작성 기술	건설자동화 로봇 자율주행 기술 개발 기업 및 종합건설사	다종의 로봇/UAV가 요구하는 다른 형태의 다계층 지도를 통합하여 관리 및 제공할 수 있는 기술의 개발 및 로봇/UAV의 적절한 Map 제공할 수 있는 서비스의 개발
건설현장 실내 다중	[민간] 종합/전문	- 건설현장 특성 및 적용 로봇/UAV에 따른 최적의

로봇 통합 관제 시스템	건설사 [공공] 정부, LH, SH 등 공공 발주기관	통합 관제 시스템 활용 솔루션 제공 - 향후 개발될 로봇 뿐 아니라 기존에 개발된 로봇을 시스템 내에 탑재할 수 있도록 지원
고소작업용 모듈형 건설 로봇 플랫폼	시공사	- 현장 요구조건에 따라 최적화 가능한 표준화 플랫폼 제공 및 작업 툴(EOAT) 공동개발 - 단순 실증 외 로봇 개발 과정에 건설사가 참여할 경우 과제 종료 이후 개발 로봇 사용료 할인 등 실질적 혜택 제공 검토 - 고소 작업으로 인한 작업자의 위험도를 낮추고, 표준화된 작업 공정 및 검사를 통해 작업 신뢰성 확보
	지자체/지방경찰청	고소작업용 모듈형 로봇 플랫폼 기술을 도로안전시설(신호등, 도로 표지판 등)의 유지관리에 활용
고가반하중 자율주행 로봇 플랫폼	물류업체	고가반하중 자율주행 플랫폼을 활용하여 투자비용 절감, 생산 효율 증진, 노동 강도 감소 및 안전 확보 기대
	농촌진흥청	개발 성과물을 농업의 제초, 파종, 관수, 방제, 수확, 운반 작업 등에 적용하여, 농업 종사자의 노동 강도를 줄이고 농촌 고령화 문제 해결
다중 로봇/UAV 자율 주행 기술	국방부	다중 로봇/UAV 자율 주행 기술을 국방 기술에 적용하여 정찰, 수송 등의 작전에 투입되는 병력을 획기적으로 줄일 것으로 기대
	소방청	화재 및 재난 현장에서 다중 로봇/UAV 자율 주행 기술을 이용한 소화, 생존자 수색, 구조 작업으로 효과적인 재난 대응 가능
	보안업체	다중 로봇/UAV를 이용한 보안 관리 시스템으로 효과적/지속적인 보안 서비스 제공
원격 고소 정밀 제어 기술	발전소/제철소	원격 고소 정밀 제어 기술을 이용하여 위험시설 설비의 유지 보수 작업의 위험성을 줄이고 효율성을 증진
복합 작업 제어 기술	제조업체	원격 복합 작업 제어 기술을 활용한 반자율 작업으로, 완전 자율화가 불가능한 비정형 작업의 효율을 증진

제2절 기대효과

과학/기술적 측면	☑ 고소작업로봇의 고신뢰성·정밀 자율작업/주행 기술개발을 통해 다양한 건설현장 실증-민간 파일럿 프로그램 연계로 실용화 수준의 건설 공정 자동화 토털 솔루션 기술 확보
경제적 측면	☑ 효율적인 건설 프로세스로 인한 생산성 증가에 따른 국가 경제 성장 촉진 기대
사회적 측면	☑ 건설 작업의 안전성을 향상시켜 사고 감소 및 노동자의 안전 보장을 통해 사회적인 안전망 구축 기대

○ 건설사

- ☑ 건설 로봇 플랫폼 및 작업 툴 공동개발을 통해 공공공사(민간참여사업) 입찰에서 경쟁우위 확보
 - 2024년 LH 발주 사업에 대해 현장 로봇 적용 기술력 계량평가 배점 (로보틱스 기술 적용 사업비)을 신설(의무적용)
- ☑ 공정별 특성화 가능한 표준화 로봇 플랫폼 개발을 통해 건설 로봇 개발 비용/시간 절감
 - LH는 배점 신설과 함께 사업지 별로 공종별 특화 로봇 지정 예정



○ 로봇 개발사

- ☑ 개발 로봇(연구 성과물)의 실시권 확보를 통해 상용화 및 시장 진입

[그림 3-9] 기대효과

가. 기대효과

1. XR 기반 작업자-로봇 원격제어 기술 개발 및 실용화

□ 과학·기술적 기대효과

- 건설 작업에서 로봇 적용을 통한 자동화 범위 확대
 - 정형화되지 않은 부위에 대한 (실시간) 대응능력이 부족한 기존 건설 로봇 기술을 비정형화된 부위(예: 코너 부위, 빔-거더 연결부위, 빔 스피트너 설치 부위 등)까지 원격제어에 의하여 시공 가능하도록 확대
 - 건설 작업의 다양한 특성과 범위에 맞게 조절할 수 있는 확장성을 갖춘 표준화된 인간-로봇 협업 기술 개발
- 작업자 친화적 인간-로봇 협업 시스템 제시
 - 작업자가 원격에서 로봇 제어를 통해 고소작업을 수행할 수 있도록 하여 숙련공의 경험은 최대한 활용하면서도 추락과 같은 안전사고

발생 위험 최소화

- 건설 공사에서 작업자들의 역할을 유지함으로써 건설 산업에서의 로봇 도입에 대한 저항 최소화
- 작업 구역 식별, 품질검사 등 인공지능 기반 작업 보조 시스템을 통해 시공의 정밀도와 품질을 높임
- 고소작업 결과물의 비접촉 품질검사 표준 제시
 - 레이저 스캐너, 카메라와 같은 비접촉 방식을 활용한 고소작업 결과물의 품질검사 관련 표준 제시
 - 작업자가 직접 수행하여 많은 시간과 위험을 수반하던 기존 품질검사 방식을 최신 센서 및 로봇 기술로 대체하여 검사의 신뢰성 및 작업자 안전 확보
- 작업자 중심 건설 자동화 패러다임 제시
 - 본 사업에서 제안하는 인간 친화적인 협업 방식은 로봇의 제어를 로봇 기술자·운전자가 아닌 건설 작업자가 가능하게 함
 - 건설 작업자들의 건설 로봇 도입에 대한 저항을 줄여 건설 로봇의 도입을 더욱 가속화
 - 숙련공들의 지식과 경험을 로봇을 이용한 시공에서도 활용가능하게 함으로써 시공의 정밀도와 품질을 높임
 - 향후의 건설 로봇은 구조화된 작업은 자율적으로 수행하고, 미세 조정이 필요한 비구조화된 작업은 숙련공의 원격(직접)제어를 받는 형태로 발전할 수 있을 것으로 기대됨

□ 경제적 기대효과

- 고소작업의 생산성 및 경제성 증대
 - 열악한 작업 환경으로 인해 투입 인력 대비 낮은 생산성을 보이는 고소작업에 로봇을 도입하여 작업 시간 단축 및 비용 절감

- 불필요한 인력 노동을 최소화하여 인건비 및 안전 관리 비용을 절감함으로써 장기적인 관점에서 건설 산업의 지속 가능성 확보

○ 신시장 및 비즈니스 모델 창출

- 원격제어 및 반자율 작업 기술과 관련된 신시장 선점을 통해 국내외 건설 시장에서의 경쟁력 확보
- 고소 용접/내화뿔칠/도장 작업 로봇의 하드웨어를 판매하고, 원격제어 및 반자율 작업을 위한 소프트웨어를 구독형 서비스로 제공하여 지속적인 수익 확보
- 복잡한 용접/내화뿔칠/도장을 요하는 산업 분야로 비즈니스 모델을 확장하여 새로운 수익 창출 기회 마련

□ 사회적 기대효과

○ 건설 산업의 안전성 및 작업 환경 개선

- 건설현장의 주요 재해인 추락 사고를 대폭 줄여 안전한 작업 환경을 조성함으로써 건설 산업 전반의 안전 기준 강화
- 작업 환경에서의 스트레스와 신체적 부담을 완화함으로써 전반적인 직업 만족도를 높임

○ 신규 일자리 창출 및 전문 인력 양성

- 기술 중심의 신규 일자리를 창출하여 건설 산업의 디지털 전환을 촉진하고, 이를 통해 고용 안정성에 기여
- 로봇 기술의 도입과 운용을 위한 신규 기술 교육을 통해 기존 건설 작업자들을 전문 인력으로 양성함으로써 건설 산업의 전문성을 높이고 국가 경쟁력을 강화함

2. 작업환경 센싱모듈 및 통합관제시스템 개발

□ 과학·기술적 기대효과

- 다수/다종의 로봇/UAV의 작업순서, 자율주행 등의 기반이 되는 고정밀, 고해상도 통합 지도의 실시간 제공
 - 고정밀, 고해상도 Scan-to-BIM 기술을 통해 작업 현장 BIM 모델을 생성하고, 통합 지도를 작성하여 다중 로봇/UAV가 요구하는 지역, 상세수준, 포맷 등을 반영한 다계층 구조의 Map 제공
 - 자동화율을 높인 Scan-to-BIM 기술의 개발을 통해 로봇/UAV가 요구하는 다계층 Map의 효율적 생성 및 제공
- 비정형 작업환경에서 고정밀/고정확도를 요구하는 건설현장 고소작업 다중 로봇을 위한 통합관제 기술 제공
 - 제조업 대비 현장이 비정형적이고, 실외 토공 자동화 통합관제 기술 대비 높은 정밀도/정확도와 실시간성을 요구하는 고소 건설현장에서 운용되는 다중 로봇을 위한 통합관제 기술 제공

□ 경제적 기대효과

- 고정밀, 고해상도 Map 기반 통합관제 기술을 이용한 다중 로봇의 효율적 운영을 통한 고소 건설작업의 생산성 확보, 안전성 향상
- 고정밀, 고해상도, 자동화율이 높아진 Scan-to-BIM 기술은 건설 진도를 측정, 감리(품질 확인) 등 타 업무 활용도가 높으며 이를 통한 건설 현장 전반의 효율성 증대가 가능함
 - 고정밀, 고해상도, 자동화 Scan-to-BIM 기술은 타 현장 업무의 효율성 증진을 통한 경제적 효과와 더불어, 기술 자체의 상용화를 통한 수익 창출도 가능함

□ 사회적 기대효과

- 고정밀, 고해상도 맵 기반 실시간 다중 로봇의 통합관제를 통해 작업 안전성 확보, 건설현장 고령화, 숙련공 부족 대응 가능

3. 고소작업로봇 작업지능 및 모듈 개발

□ 과학·기술적 기대효과

- 모듈형 고소작업로봇의 고신뢰성·정밀 자율작업 및 자율주행 기술개발을 통해 다양한 건설현장 실증-민간 파일럿 프로그램 연계로 실용화 수준의 건설 공정 자동화 토털 솔루션 기술 확보
 - 건설공종별 환경정보·공정 프로세스, 고속런 작업자 노하우 데이터 구축
 - 실·내외 비정형·동적·고위험성 건설현장 객체 인식 기술 및 AI기반 주행 경로 추종 제어 기술 확보
 - AI기반 고속런 작업자 mm급 모션 특성 분석 및 협업 동작 생성 기술 확보
 - 현장 BIM-시멘틱 맵과 작업맥락이해 모델 연계 협업 작업자 안전기술 확보
 - 기 인프라·장비 활용 연계 재구성 가능한 모듈식 로봇 시스템 기술 확보
 - 산업/서비스 로봇에 비해 부진했던 건설 로봇 기술 표준화를 촉진

□ 경제적 기대효과

- 효율적인 건설 프로세스로 인한 생산성 증가에 따른 국가 경제 성장 촉진 기대
 - 모듈형 건설 로봇 플랫폼 기술과 자율/반자율 작업 기술은 다양한 건설 현장에서의 작업 효율을 향상시키고, 자원 관리를 최적화하며, 안전성을 향상시킴으로써 건설 프로세스를 혁신할 것으로 예상
 - 건설 프로세스의 혁신으로 작업 일정을 최적화하고 비용을 절감하여 생산성이 증가될 것으로 예상되며, 건설업의 생산성 증가는 국가 경제 성장을 촉진시킬 것으로 기대

□ 사회적 기대효과

- 건설 작업의 안정성을 향상시켜 사고 감소와 더불어 노동자의 안전을 보장하여 사회적인 안전망 구축에 일조할 것으로 예상

- 건설 현장에서 사고위험성이 높은 고소 협소공간의 작업을 로봇 작업으로 대체함으로써 위험 작업을 안전하게 효과적으로 수행 가능
- 다양한 정책 개선에도 불구하고 증가하는 재해자 수 감소 및 노동집약적 산업에서 기술 집약적 산업으로 인식 개선 촉진 가능
- 건설현장의 노동 강도를 최소화시키는 동시에 효율적인 작업 수행을 가능케 하여, 건설 노동자의 고령화 문제를 해결
 - 고령 노동자의 이동 제약성을 극복하고 및 고소 협소 공간 작업의 신체적 부담을 줄여 고령 노동자들의 건설 현장 활동 기간을 늘릴 수 있음
- 기존의 수동적 예방에서 로봇 활용을 통한 적극적 예방 및 대응책 도입으로 안전한 건설 환경 구축 예상
 - 안전수칙 준수, 장비 점검 등 작업자에 의존하는 예방적 차원의 대책에서 고소작업지능 로봇 도입으로 사고 위험 가능성 차단 가능

나. 경제성 분석

- 본 사업 추진을 통해 건설로봇 관련 연구의 고부가가치화와 신규 일자리 창출 효과가 높아질 것으로 전망
 - 건설현장 다목적 고소작업을 위한 로봇 기술개발을 통해 2025~2029년의 기간 동안 300억원이 투입되어 나타나는 생산유발효과는 586.6억원, 부가가치유발효과는 244.4억원, 취업유발효과 250.7명, 고용유발효과 324.6명으로 나타남¹²⁾
 - 건설현장 다목적 고소작업을 위한 로봇 기술개발 사업의 생산유발효과(계수)는 1.955로 전산업(1.791), 공산품(1.903), 서비스(1.684) 부문 대비 높음

12) 산업연관표 2019, ISTANS(www.istans.or.kr) (2023.12.20.에 접속)

양식 1

23년도 다부처공동기획연구 기술규제 진단 Toolkit

- 연구 핵심 프로세스의 해당하는 부분 중심으로 기술

연구개발과제		관련 기술규제				애로사항 및 쟁점			해결전략
핵심 프로세스 (or Module)	TRL	구분	규제기관	내용	해외사례	애로사항	유형	최근 동향	
건설현장 다목적 고소작 업을 위한 로봇 플랫폼 및 XR 기반 인간로 봇 협업 기술 개발	5~7	법령·고시 (가이드라인 포함)	국토교통부	원격제어 건설로봇 정의, 등록 및 면허제도 부재 - 건설기계관리법 제2조 정의 등 - 건설기계관리법 제26조 건설기계조종사면허	-	원격제어 건설로봇(무인지게차 등)은 조종자를 필수로 가지는 기존 정의에 맞지 않아 등록 및 적용 불가	1	관계부처인 국토부 및 산업부는 아래와 같은 세 가지 정비방향을 수립 - 안전성 검증 및 기준 개발(~'23, 산업부-국토부) - ('24-, 산업부) 병행 - 건설기계 형식승인·신고 개선(~'25, 국토부) - 등록제 개선 방안 마련(~'27, 국토부)	건축현장 원격제어 건설로봇 특례 인정방안 마련 - 원격제어 건설로봇 등록·인정범위 제시 - 건설로봇 등록제 개선방안 마련 - 건설로봇 형식 승인·신고 개선방안 마련 - 원격제어 건설로봇 면허제도 및 면허취득을 위한 교육제도 마련
			고용노동부	원격제어 건설로봇 정의, 등록 및 면허제도 부재 - 산업안전보건기준에 관한 규칙 제12절 건설기계 등 제1관 차량계 건설기계 등	-				
		표준·인증·규격	한국표준협회 (KS)	- 토공 및 광산 작업에 사용되는 자율장비와 반자율장비시스템(ASAMS)에 대한 안전 요구사항 - 무인 산업용 트럭 및 시스템의 안전 요구사항 및 검증 수단 - 고소작업대 설계, 계산, 안전 요구사항 및 시험 방법, 조종사 교육, 검사 및 유지 보수 등 규정	- 무인트럭(ISO 3691-4) - 굴삭기 등 토공 및 채광 작업에 사용되는 원격 운전자 제어 시스템(ISO 15817:2012) - 자율 및 반자율 기계 시스템 등에 관한 안전 표준(ISO17757:2019)	-	-	-	
인허가	-	-	-	-	-	-	-	-	

양식 2

기존 검토의견 반영현황 [공동기획 선정/중간컨설팅 검토의견]

※ 반영하기 어려운 지적사항 및 검토의견은 해당 사유를 제시

□ 서류평가 검토의견

보완사항 주요내용	반영 현황
<p>기존 기술 활용하여 건설현장 로봇 적용 가능한지 활용성 검토 필요</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기존 기술 검토 결과, 대형 건설사 중심으로 시공단계에 활용되는 단일작업 및 현장점검을 위한 건설로봇 개발을 시작하였으나, 로봇플랫폼의 시스템 통합 문제, 플랫폼 무게제약, 인력대비 작업속도 저하 등의 현장 이슈로 인하여 실용화에 어려움이 있는 것으로 판단 ○ 현재는 작업자가 미리 표시해둔 천장 위치에 구멍을 내는 수준의 앵커링 작업만 가능하며, 볼트 체결과 같은 인간수준의 고정밀 작업이 가능한 로봇은 개발되지 않음 <ul style="list-style-type: none"> - 기존 건설 로봇은 제한적 이동, 인식기능이 가능한 수준으로, 자율적 인지, 판단, 제어, 학습 기능 등이 적용된 건설로봇 개발이 필요함
<p>다부처 협력의 필요성은 인정되나 국토부의 스마트건설기술개발사업의 세부사업내용과의 중복성은 다시 체크해 보아야 함</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국토부의 스마트건설기술개발사업은 주로 토공현장에서 원격으로 건설장비를 자동화하기 위한 원격 조종 및 관계기술 개발에 집중된 것으로 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 토공/포장장비는 해외에서도 활발히 진행되고 있는 연구분야로, 기술적 진보가 상대적으로 많이 이루어짐 ○ 기존 과제는 토공현장의 한 가지 고소 공종에서 상대적으로 정형화되고 복잡도가 낮은 작업을 대상으로 하나, 건축현장은 다수의 골조 등 작업 방해요소가 많고 여러 공종이 동시에 진행되는 비정형화되고 복잡도가 높은 현장으로 로봇 도입을 통한 자동화의 도전성이 토공현장에 비해 높은 것으로 판단
<p>해당 기술의 현장 적용 유효성에 대한 설득력이 부족함</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 추락·전도사고로 이어질 수 있는 고위험 작업인 고소작업에 대해 로봇 도입을 통해 무인화 실현 가능한 기술로서 현장의 안전성을 개선시킬 수 있을 것으로 예측됨 ○ 현장 적용 유효성을 높이기 위해 스마트건설 얼라이언스 내의 자동화 위원회와의 협업을 통하여 고소작업 로봇 수요자자문위원회를 신설하고, 고소 3종 작업을 시행하는 전문건설업체와 작업자들을 포함하

	여, 관련 작업의 세부사항 파악 및 실제 사용자들의 요구사항을 수렴하고 이를 과제 기획/R&D/실증까지 반영
--	--

□ 발표평가 검토의견

보완사항 주요내용	반영 현황
실험 및 적용 가능한 로봇 기술과 결합하여 실증을 추진하여, 결과물의 구체적인 성과를 확인할 수 있는 방안 강구	<ul style="list-style-type: none"> ○ 병렬·혼합형 부처 협업사업 운영을 통해 부처별로 실험 및 적용 가능한 로봇 요소 기술을 개발하고, 이를 결합하여 실증을 추진할 예정임 ○ 개발 성과물의 테스트베드 실증을 위한 구체적 연구 내용 수립 및 실증에 요구되는 성능지표 제시 <ul style="list-style-type: none"> - 실 환경을 모사한 XR기반의 디지털 트윈을 구축하여 가변적인 환경에서 가상 부재를 대상으로 복수의 시뮬레이션 수행 - 실 현장을 모사한 1:1 스케일의 소규모(3층) 테스트베드를 구축 ○ 실증 테스트베드는 소관 부처 및 기관과의 조율을 통해 지속적으로 업데이트 예정 <ul style="list-style-type: none"> - 필요시 한국건설기술연구원, 건설기계부품연구원, 국가로봇테스트필드 등 활용 검토
평가가 가능한 성능목표 제시와 상용화/활용화 추진 방안 포함	<ul style="list-style-type: none"> ○ 양적/질적 성능목표, 평가 가능한 성과지표 및 개발 기술 성능목표 제시 ○ 기술개발부터 성능·신뢰성 고도화, 상용화까지 전주기를 통합 지원하기 위해 국토부 및 산업부가 공동 기획·협력 추진 예정 ○ 성능목표 및 상용화/활용화 추진방안은 소관 부처 및 관과의 조율을 통해 지속적으로 업데이트 예정
건설현장의 비정형적 환경에 대해 협업을 할 수 있는 로봇 플랫폼이 정확하지 않으며 건설작업과 로봇의 매칭 역시 제안한 기관에서 이해가 낮아 로봇 분야 전문가의 역할 확대가 필요함	<ul style="list-style-type: none"> ○ 건설현장의 비정형 환경 및 대상 고소작업 특성을 고려, 자율 주행 로봇 플랫폼, 리프트 모듈, 매니퓰레이터 모듈, End Of Arm Tooling(EOAT)으로 구성된 "모듈형 건설 로봇 플랫폼" 개발을 연구내용에 포함 ○ 제안 기관의 로봇 분야에 대한 이해가 낮은 것을 고려, 로봇 분야 전문가를 포함한 기획위원회 구성 <ul style="list-style-type: none"> - 건설 로봇을 포함한 다수의 산업 현장 로봇 연구 개발 경험을 보유한 한국로봇융합연구원(KIRO) 및 현대건설 건설자동화연구팀 포함
특정작업에 대한 로봇을 명	<ul style="list-style-type: none"> ○ 다부처 협력 역할을 명확히 설정하기 위해서 소관

<p>확히 하고 관련 로봇의 개발이 필요하면 산업부 컨택, 건설 마이스터 인력의 노하우에 대한 내재화적 측면이라면 빅데이터 관점과 AR 기술은 과기부 그리고 현장의 적용확대는 국토부로 다부처 협력 역할을 가지면서 추진할 필요가 있음</p>	<p>부처와 아래와 같은 부처별 업무분담 협의</p> <ul style="list-style-type: none"> - 국토부(주관): 고소작업 XR기반 작업자-로봇 원격 제어 기술 개발 및 실용화, 작업환경 센싱모듈 및 통합관제시스템 개발 - 산업부(참여): 고소 위험환경 다목적 작업에 특화된 자율/반자율 지능 기반 모듈형 건설 로봇 시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> ○ 주관기관인 국토부의 요구로 과기부의 참여 대신 국토부가 관련 연구개발을 수행하기로 협의 ○ 다부처 협력 역할은 소관 부처 및 기관과의 조율을 통해 계속적으로 업데이트 예정
<p>기술개발 내용을 명확히 하여 기획기간 동안 부처 협력이 진행되어야 함</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기획기간 동안 소관부처들의 참여, 예산 확보 및 협력을 이끌어내기 위해 부처 협력회의 수행 <ul style="list-style-type: none"> - 중간컨설팅 이전까지 각 부처 개별 수행 - 중간컨설팅 이후 국토부 및 산업부 참석 다부처 통합 회의 수행 ○ 다부처 협력회의 및 공청회 실시
<ul style="list-style-type: none"> ○ 건설 환경 안에서 작업자와 협업 보조할 수 있는 지능형 로봇의 공통 핵심 원천 기술 추진 과제로 정부 지원은 타당하나 제안서 내의 개발 내용 및 파급 효과가 매우 작은 범위로 되어있음 ○ AR기반의 작업 현장 시연이 전동 드릴, 샌딩 툴, 볼트 조임 툴 등 범위의 효과가 너무 미미하다고 판단 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 고소작업 3종에 대한 사전준비/본작업/사후작업 전 과정에 대한 무인화 시공 목적
<ul style="list-style-type: none"> ○ 다부처 사업의 필요성 미미함. 제안서 내에서는 국토부의 역할만 제시되어 있어, 산업부의 역할 및 연구 범위의 구체성 제시 필요 ○ 본 제안은 대부분 인간의 지시에 의한 건설현장의 로봇의 협업기술 관련 기술이므로, 기술의 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 다부처 추진 타당성 제시 <ul style="list-style-type: none"> - 특수목적 로봇 기술의 대한 (제조업 외)타산업분야 현장 적용을 위한 지원은 다부처/부처협력 사업 외에는 추진하기에는 한계 - 현장 적용 가능한 R&D추진과 사업화 - 유사 R&D에 대한 중복성 해소와 기술적 차별성 도출 및 적정 예산규모 산정 등으로 R&D 투자 효율화 - "기술 공급-현장 테스트-최종 수요"로 구성되는 프로세스로 건설산업의 경쟁력 강화와 지능형 로봇

<p>대부분이 국토부와 연계되어 있고 산업부의 참여 부문은 매우 미약할 것으로 전망되어, 다부처 과제로는 당위성과 필요성이 부족하다고 판단됨</p>	<p>의 보급 확대</p> <ul style="list-style-type: none"> - 지능형 건설 로봇 연구에 대한 다학제적 접근 필요 ○ 모듈형 건설로봇 플랫폼 개발 및 군집 제어 기술 개발을 위한 국토부 및 산업부의 역할, 구체적 연구내용 및 성과물 제시
--	--

□ 중간컨설팅 의견

보완사항 주요내용	반영 현황
<p>사업의 목표를 정하기 위해 수요자의 명확한 반영이 되지 않은 것으로 보임</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 스마트건설 얼라이언스 및 한국건설자동화·로보틱스 학회 소속 13개 기관 18명의 산학연 전문가 기술수요조사를 통해 건축 및 토목현장의 고소건설작업 로봇의 대상 공종/공정, 개발방식에 대한 산학연의 니즈를 수집/조사하고, 기획위원회 검토를 통해 대상 공종 및 개발방식에 관한 연구방향을 도출하는데 근거자료로 활용하였음
<p>고소작업 5종의 다목적 자동화가 목적으로 제시되었는데, 현재 단일작업에 대한 연구가 추진되고 있으므로 본 연구와 단일작업 연구 간 성능기능의 우수성(다양한 작업 환경 고려)을 검증하는 것이 요구됨</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 현재 단일작업에 대한 연구가 추진되고 있으나 작업자 대비 작업속도가 상대적으로 떨어져 현장 적용이 미미한 상태 ○ 본 사업의 우수성은 단일 작업 대비 다중 작업의 성능 개선보다는 표준화 건설 로봇 플랫폼을 개발하고, 수요작업에 따른 최적화가 가능하도록 함에 있음. 특히, 기술수요가 높은 고소 3종(용접, 내화뿔칠, 도장)에 대해 특성화 통합 로봇 플랫폼을 개발하고, 각 공정에 대해 숙련 작업자의 수준으로 로봇 작업 속도를 향상시키는 것을 목표로 함
<p>최초 기획에 비해 고소 5종 작업으로 구체화한 것은 좋은 방향이나 다중 로봇의 작업 종류를 줄이는 대신 다양한 환경 적용 능력을 확대하는 방향의 개발을 추천함</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기술수요가 높은 고소 3종(용접, 내화뿔칠, 도장)으로 한정하고, 공종별 요구조건을 파악하고 각 공종에 최적화된 시스템 통합 및 실증하는 방향으로 수정하였음
<p>현재 5개의 작업 영역에 적용이 가능한 멀티 로봇을 적용한다고 되어 있음</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기술수요가 높은 고소 3종(용접, 내화뿔칠, 도장)에 대한 작업 환경 조건 및 공정 프로세스 분석, 이에 기반한 작업자-로봇 협업 시나리오(안) 제시

<p>나 각 작업별로 Depth를 더 들어가면 다양성이 많아 짐</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 각 작업에 대한 특성화 기술 개발 및 실증 연구내용 추가 ○ 각 작업 자동화에 대한 현재 구현 기술 및 개발 필요 기술, 기술 개발 방향 제시
<ul style="list-style-type: none"> ○ 하이브리드 형태로 접근한다면 본 결과물의 효율적 활용을 위해 유저 교육시스템을 추가 할 필요가 있음 ○ 본 제품을 원활하게 활용하기 위한 교육 자료 과정을 개발하는 것이 요구됨 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 핵심과제 1-6을 '제도/공법/교육 개선 및 실용화'로 설정하고, 고소작업 로봇 플랫폼 교육과정 프로그램 개발 (1건 이상), 산업체 대상 기술교육 지원 (기술강연회 3건 이상)을 성과목표로 설정함
<ul style="list-style-type: none"> ○ 본 기술을 활용하는 수혜자(작업자) 만족도 조사, 자율주행 성능 등 관련 성과지표 추가가 필요함 ○ 자율주행로봇 관련, 주행성능에 대한 목표를 제시할 필요가 있음 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 관련 내용 성과목표에 추가함 <ul style="list-style-type: none"> - 사용자(작업자) 경험 평가 기법에 기반한 성과지표 추가 (NASA-TLX 작업 인지부하 감소율, SUS 사용성 평가 개선율, XR 인터페이스 Throughput 개선율) - 자율주행 성능 추가 (자율주행 플랫폼 가반하중/모듈형 머니플레이터 가반하중, 자율주행 플랫폼 경사 극복 능력/리프트 모듈 최대 작업 높이, 로봇 플랫폼 주행 정밀도/UAV 실내 주행 정밀도) ○ 관련 내용 성과지표에 추가 <ul style="list-style-type: none"> - 사용자 대상 시제품 만족도 조사
<p>각(5가지) 작업 별 목표 정밀치를 제시하여야 함</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 공종 3종으로 변경하였으며, 각 작업별 현재 최고 기술수준(국내/해외)를 기반으로 개발 목표치 및 평가방법을 제시함 <ul style="list-style-type: none"> - 용접 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업생산성 - 내화뿔칠 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업속도, 내화뿔칠 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업인원 감축 - 도장 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업속도. 도장 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업인원 감축
<p>성과지표의 초기 목표치 설정값에 대한 근거자료가 필요함</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 제2절 성과목표 및 지표에 현재 최고 기술수준(국내/해외)를 기반으로 개발 목표치 및 평가방법을 제시함
<p>기술적 타겟팅을 통한 성과지표 가중치 설정이 필요해 보임</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 사업 성과지표 및 가중치를 제시함 <ul style="list-style-type: none"> - 본 사업이 목표로 하는 “실용화 수준의 건설 공정 자동화 토탈 솔루션 기술 확보”를 고려, 고소작업

	기술의 현장활용 건수, 사용자 대상 시제품 만족도 조사
성과지표 평가가 자체평가 위주로 진행되는데, 공인 인증을 통한 검증이 요구됨	<ul style="list-style-type: none"> ○ 스마트건설 얼라이언스와 연계하여 고소작업 로봇 플랫폼 기술 실증 및 시험인증 체계를 구축하고 이에 기반한 개발 기술의 검증 예정 ○ 시험인증체계가 구축되어 있는 자율주행 플랫폼에 대해 KOROS 1079-2 등 공인인증을 통한 검증 예정
숙련된 작업자 대비 본 제품의 우수성도 검증하는 방안이 요구됨	<ul style="list-style-type: none"> ○ 로봇 고소작업의 속도를 현장 작업자 수준 혹은 그 이상으로 향상시키는 것을 목표로 하며, 관련하여 작업별 개발 목표치 및 평가방법을 제시함 <ul style="list-style-type: none"> - 용접 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업생산성 - 내화뿔칠 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업속도, 내화뿔칠 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업인원 감축 - 도장 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업속도, 도장 작업 특성화 통합 로봇 시스템 작업인원 감축
작업에 대한 학습 데이터 확보 및 자율 작업에 대한 구체적인 목표치 등에 대해 정의가 필요함	<ul style="list-style-type: none"> ○ 작업자 시점 공정별 실환경/XR환경 대응량 데이터셋 구축 목표치 제시 <ul style="list-style-type: none"> - 공정별 실환경/XR환경 시연 작업자 수 - 공정별 실환경/XR환경 작업시연 수 ○ 자율 작업 목표치 제시 <ul style="list-style-type: none"> - 복합 자율작업 효율성, 원격작업자 작업 자율화 성공률
현장 적용을 위한 교육 훈련 및 현장 상황을 반영하기 위한 계획 보완이 필요함	<ul style="list-style-type: none"> ○ 핵심과제 1-6을 '제도/공법/교육 개선 및 실용화'로 설정하고, 고소작업 로봇 플랫폼 교육과정 프로그램 개발 (1건 이상), 산업체 대상 기술교육 지원 (기술강연회 3건 이상)을 성과목표로 설정함 ○ 핵심과제 1-5를 '실환경 기반 테스트베드 구축'으로 설정하고, 현장 상황을 반영하기 위해 실 환경을 모사한 스마트사이트를 설계, 개발 및 운영하기 위한 연구내용을 추가함
<ul style="list-style-type: none"> ○ 건설현장의 공간 다양성과 작업의 다양성이 있기 때문에 현재 개발하고자 하는 부문의 적용 범위를 제시할 필요가 있음 ○ 본 제품이 효과적으로 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 고소작업 3종으로 한정하고, 각 작업에 대해 적용 시나리오 개발을 통해 적용 범위를 제시 <ul style="list-style-type: none"> - 개발 목표(목표 가용 높이, 적용 부재, 적용 부위, 기능 등) - 성능 조건(목표 가용 높이, 적용 대상, 재료의 종류 및 허용 오차, 성능평가 기준 등) - 자동화 수준(자동화 대상 구조물, 각 공정 자동화 수준, 품질검사 내용, 로봇 구성 등)

<p>적용(고소작업 5종)될 수 있는 건설환경을 구체화하여 해당 건설 환경부터 본 제품을 적용 및 검증하는 방안이 요구됨(본 제품 고도화에 따른 건설환경 적용 분야 확대 추진 검토 포함)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 고소 3종(용접, 내화뿔칠, 도장)에 대해 공종 개별적으로 요구조건을 파악 및 각 공종에 최적화된 시스템 통합 및 실증에 대한 연구과제 추가 <ul style="list-style-type: none"> - 공정별 작업 특성화 기술 개발 및 실증 핵심과제를 통해 공정별 작업자-로봇 협업 임무 시나리오 및 적용 범위 구체화
<p>XR 및 AI(자율) 관련 연구 내용 및 목표치의 보완이 필요함</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ XR기반 원격제어, 자율작업을 위한 로봇 작업지능의 성능목표 추가 <ul style="list-style-type: none"> - 현실-XR가상공간 정합 오차, 원격 제어 지연, 원격 운용 거리, 단위작업 거리오차 - 복합 자율작업 효율성, 원격작업자 작업 자율화 성공률, 고소 매니플레이터 반복 정밀도
<p>XR 원천기술 차별점 (Semantic SLAM 등) 기술 전략 구체화 필요함</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 과기부 기존 사업과의 차별성 제시를 통해 과기부의 기존 XR 원천기술과의 차별점 및 기술 전략 구체화 <ul style="list-style-type: none"> - 비정형 건설 환경의 작업자 인지능력 및 XR기반 원격 협업 효율성 증대를 위한 실시간 고해상도의 미론적 BIM 기반 사용자 인터페이스 개발 - 실환경/XR 시연 데이터셋 수집 기술 개발을 통해 건설고소작업에 특화된 로봇 협업 모델 개발 및 실증 목표, 용접 등 고정밀 작업 및 품질검사를 위한 XR 기술 추가
<p>자율로봇 시스템의 인공지능 알고리즘 훈련 및 평가검증을 위한 학습 데이터 확보가 필요함</p>	<p>핵심과제 1-1~1-3을 통해 공정별 작업자 시점 실환경/XR(가상)환경 대용량 데이터셋을 구축하고, 이를 기반으로 작업지능을 학습 및 평가검증 예정</p>
<p>본 사업 대비 유사사업(국토부 스마트건설기술개발사업 등) 세부내용을 비교 검토하여 구체적인 차별성 및 연계성 제시가 미흡함 기존사업과의 연계 및 차별화에 대한 내용을 조금 더 보완할 필요가 있음</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 스마트건설기술개발사업 내 유사과제 분석 및 차별성/연계성 제시 <ul style="list-style-type: none"> - 본 과제와 연관성이 높은 국토부의 주요 연구개발 과제(사업)를 분석한 결과, 주로 토공현장에서 원격으로 건설장비를 자동화하기 위한 원격조종 및 관제기술 개발에 집중된 것으로 분석 - 기존 MR기반 원격작업은 교각 위치 조정작업 등 단순 2차원 혹은 3차원 이동을 위한 제어 수준이며, 본 사업에서 요구하는 용접 등 복잡한 건설고소작업을 위한 고도의 제어 기술 개발, 작업자의 사용 편의성을 높이기 위한 XR기반 상호작용 기술 개발과는 기술 수준 및 개발범위가 상이함

	<p>- 건설장비의 이동 및 부재의 거치 등 단순 작업을 넘어서 여러 가지 높은 수준의 작업이 통합된 다목적 건설현장 자율로봇, 지능형 로봇의 학습능력을 결합한 Level2 반자율화 제어를 위한 연구개발과제는 아직까지 없는 것으로 판단됨</p>																																																												
<p>기존 유사사업 예산을 고려한 본 사업의 예산규모 적절성에 대한 근거자료 제시가 필요함</p>	<p>○ 아래 표와 같이 기존 유사사업 연간 평균 예산규모를 근거자료로 본 사업의 예산규모 적절성을 제시함 (단위: 억원)</p> <table border="1" data-bbox="587 600 1428 1131"> <thead> <tr> <th rowspan="2">부처</th> <th rowspan="2">사업명</th> <th rowspan="2">유사과제 수</th> <th colspan="2">연도별 평균 예산규모</th> <th rowspan="2">연간 평균 소요 예산</th> </tr> <tr> <th>최소</th> <th>최대</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>국토교통부</td> <td>스마트건설기술사업</td> <td>2</td> <td>26.9</td> <td>36.0</td> <td>31.4</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">산업통상자원부</td> <td>로봇산업핵심기술개발사업</td> <td>5</td> <td>1.3</td> <td>14.4</td> <td>9.8</td> </tr> <tr> <td>기계장비산업기술개발</td> <td>1</td> <td>14.0</td> <td>14.0</td> <td>14.0</td> </tr> <tr> <td>산업기술국제협력(R&D)</td> <td>2</td> <td>1.8</td> <td>3.5</td> <td>2.7</td> </tr> <tr> <td>과학기술정보통신부</td> <td>미래유망융합기술파이오니아사업 ICT융합산업혁신기술개발사업 실감콘텐츠핵심기술개발</td> <td>3</td> <td>10.1</td> <td>13.6</td> <td>12.0</td> </tr> </tbody> </table> <p>(단위: 억원)</p> <table border="1" data-bbox="587 1169 1428 1720"> <thead> <tr> <th>부처</th> <th>내역사업명</th> <th>연간 평균 소요 예산</th> <th>범위</th> <th>예산규모 적절성</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">국토교통부</td> <td>고소작업 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술 개발 및 실용화</td> <td>28</td> <td>범위 내</td> <td>국토부 주관 스마트건설기술개발사업 중 유사과제의 연도별 평균 예산 규모 범위 내</td> </tr> <tr> <td>작업환경 센싱모듈 및 통합관제시스템 개발</td> <td>8</td> <td>범위 내</td> <td>유사과제의 연도별 평균 예산규모 범위 내</td> </tr> <tr> <td>산업통상자원부</td> <td>고소작업에 특화된 자율/반자율 지능 기반 모듈형 건설 로봇 시스템 개발</td> <td>24</td> <td>범위 외</td> <td>모듈형 로봇 플랫폼의 개발과 실시간 다중로봇 자율주행기술 개발이 통합된 내역 사업으로 기존 산업부 주관 로봇산업핵심기술개발사업에 비해 물리적인 로봇 플랫폼의 개발에 보다 큰 소요예산이 요구됨.</td> </tr> <tr> <td colspan="2">합계</td> <td>60</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	부처	사업명	유사과제 수	연도별 평균 예산규모		연간 평균 소요 예산	최소	최대	국토교통부	스마트건설기술사업	2	26.9	36.0	31.4	산업통상자원부	로봇산업핵심기술개발사업	5	1.3	14.4	9.8	기계장비산업기술개발	1	14.0	14.0	14.0	산업기술국제협력(R&D)	2	1.8	3.5	2.7	과학기술정보통신부	미래유망융합기술파이오니아사업 ICT융합산업혁신기술개발사업 실감콘텐츠핵심기술개발	3	10.1	13.6	12.0	부처	내역사업명	연간 평균 소요 예산	범위	예산규모 적절성	국토교통부	고소작업 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술 개발 및 실용화	28	범위 내	국토부 주관 스마트건설기술개발사업 중 유사과제의 연도별 평균 예산 규모 범위 내	작업환경 센싱모듈 및 통합관제시스템 개발	8	범위 내	유사과제의 연도별 평균 예산규모 범위 내	산업통상자원부	고소작업에 특화된 자율/반자율 지능 기반 모듈형 건설 로봇 시스템 개발	24	범위 외	모듈형 로봇 플랫폼의 개발과 실시간 다중로봇 자율주행기술 개발이 통합된 내역 사업으로 기존 산업부 주관 로봇산업핵심기술개발사업에 비해 물리적인 로봇 플랫폼의 개발에 보다 큰 소요예산이 요구됨.	합계		60		
부처	사업명				유사과제 수	연도별 평균 예산규모		연간 평균 소요 예산																																																					
		최소	최대																																																										
국토교통부	스마트건설기술사업	2	26.9	36.0	31.4																																																								
산업통상자원부	로봇산업핵심기술개발사업	5	1.3	14.4	9.8																																																								
	기계장비산업기술개발	1	14.0	14.0	14.0																																																								
	산업기술국제협력(R&D)	2	1.8	3.5	2.7																																																								
과학기술정보통신부	미래유망융합기술파이오니아사업 ICT융합산업혁신기술개발사업 실감콘텐츠핵심기술개발	3	10.1	13.6	12.0																																																								
부처	내역사업명	연간 평균 소요 예산	범위	예산규모 적절성																																																									
국토교통부	고소작업 XR기반 작업자-로봇 원격제어 기술 개발 및 실용화	28	범위 내	국토부 주관 스마트건설기술개발사업 중 유사과제의 연도별 평균 예산 규모 범위 내																																																									
	작업환경 센싱모듈 및 통합관제시스템 개발	8	범위 내	유사과제의 연도별 평균 예산규모 범위 내																																																									
산업통상자원부	고소작업에 특화된 자율/반자율 지능 기반 모듈형 건설 로봇 시스템 개발	24	범위 외	모듈형 로봇 플랫폼의 개발과 실시간 다중로봇 자율주행기술 개발이 통합된 내역 사업으로 기존 산업부 주관 로봇산업핵심기술개발사업에 비해 물리적인 로봇 플랫폼의 개발에 보다 큰 소요예산이 요구됨.																																																									
합계		60																																																											
<p>○ 현재 XR 및 작업현장의 빅데이터와 자율주행, 로봇 등의 기술은 과기부의 기능이 많은데 고려해 볼 필요가 있음</p>	<p>○ 주관부처(국토부)의 건설로봇용 XR기반 원격제어 기술 개발 관련 의지가 분명함 ○ “초실감 텔레프레즌스 로봇의 비정형 작업 고도화를 위한 원격자율 공유제어 프레임워크 원천기술 및 인공지능 요소기술 개발”, “촉각센싱 엔드이펙터 기반의 모방학습 기술을 활용한 자율조작 및 파지기술 개</p>																																																												

<ul style="list-style-type: none"> ○ 군집 자율로봇을 위한 학습데이터 수집과 해당 데이터 기반 인공지능 알고리즘 개발을 위해 과기부 및 관련 기관의 참여가 필요할 것으로 판단됨 	<p>발” 등 기존 산업부에서도 XR 및 로봇 지능, 자율주행 원천기술 개발 관련 사업이 다수 진행된 바, 국토부 및 산업부로 협조부처를 선정</p>
<p>국토부와 산업부의 건설로봇에 대한 접근이 공동으로 이루어 지기 때문에 이에 대한 다부처 타당성의 논리를 더욱 명확히 할 필요가 있음</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 특수목적 로봇 기술의 대한 타산업분야 현장 적용을 위한 지원은 다부처/부처협력 사업 외에는 추진하기에는 한계 <ul style="list-style-type: none"> - 스마트건설 얼라이언스 간담회('23.11)를 통해, 삼성물산, 포스코이앤씨, GS건설 등 국내 건설사의 연구개발 참여 및 수요의향을 확보하는 등 사업추진의 필요성과 당위성을 확보 ○ 부처별 건설시공/로봇 관련 품질·안전·확산 관련 기준/인증/표준 등이 구분되어 있어 현장 적용 가능한 R&D추진과 사업화 성공을 위해서는 다부처 협업이 필요 ○ 부처간 협업 가능한 기술 연계 방식 제시 <ul style="list-style-type: none"> - 본 사업의 최종 성과물의 핵심기능(대분류)을 정의하고 핵심기능 구현을 위해 요구되는 기술 개발 항목을 그룹화함으로써 핵심기능 내 부처간 기술 연계가 유기적으로 이루어지도록 함 - 부처간 협력이 필요한 대표 연구분야를 지정하여 중점 지원할 수 있도록 부처간 연계방안(안) 마련
<p>로봇 작업에 유리한 형태로 건설 작업의 프로토콜 자체를 점검 하는 방향으로 국토부의 역할이 필요함</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국토부의 스마트건설 얼라이언스 등 건설사의 실제적 수요와 생태계에 대한 종합적 분석을 기반으로 산업부의 다양한 로봇 원천기술의 응용개발 추진 등, 참여 부처의 명확한 역할 분담과 동시에 “기술 공급-현장 테스트-최종 수요”로 프로세스 구성 ○ 3개 공종 고소작업 로봇플랫폼 표준시방서(안) 제안 성과 목표
<p>다중로봇 기술 측면에서 산업부 역할 확대가 필요함</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산업부의 역할을 “고소 건설공정 작업-주행 지능 개발 및 다중로봇 제어 기술개발”로 정의, 건설 현장 실시간 대응형 다중 로봇/UAV 제어 및 자율주행 기술 개발 목표 <ul style="list-style-type: none"> - 실시간 주행 환경 인식(단차, 장애물, 작업자, 작업자 행동예측, 안전거리 추정 등) 기술 개발 - 다중 로봇/UAV 전역 경로 생성/스케줄링 기술 개발 - 건설 현장 주행 환경 대응을 위한 지역적 자율주행 지도 작성 및 지역 경로 수정/추종 기술 개발

	<ul style="list-style-type: none"> - 건설 작업 모니터링을 위한 UAV의 '위치 고정(벽면, 철골 부착) 및 자세 제어 기술' 개발
<p>주관부처가 현재 미선정됨에 따라 이에 대한 보완이 요구됨</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 본 사업 참여부처는 국토교통부를 주관으로, 산업통상자원부 협조
<ul style="list-style-type: none"> ○ 다양한 건설현장을 고려하여 실제 실증을 통한 효과성 검증뿐만 아니라 문제점 및 애로사항을 도출하여 성과활용성을 제고하는 것이 요구됨 ○ 사용자와 구체적인 연계 방안 부족 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 스마트건설 얼라이언스 연계하여 현장 실용화 요구수준의 XR기반 고소작업용 모듈형 건설 로봇 연구성과 기술이전 및 현장실증·시범사업 추진 <ul style="list-style-type: none"> - (사업화 생태계) 종합·전문 건설사 활용 시나리오·요구사항 → R&D·실증 → 로봇·건설산업 인증·규제·공법·제도 개선 → 민간 사업화 - (시범사업 연계) 개발된 기술 및 시제품은 본 과제 참여 수요 기업 현장에 설치하여 Track-Record 확보 - (기술이전) 주행/작업지능 SW 및 고정밀 HITL품질 검사 시스템 등 개발 요소기술 및 모듈별·시제품 기술이전 추진 ○ 주요 성과물과 기술수요처별 요구사항(현장환경, 운용장비, 표준시방서, 등)에 부합하는 BM 개발하고 산업부·국토부·중기부 보급사업/R&BD 연계 후속 사업화 추진

양식 3

다부처 공동기획 과제별 간담회/세미나 주요내용

회의일시 및 장소	2023년 11월 22일 (수) 14:00~15:30
행사명	다부처 공동기획(건설 고소작업 자율로봇) 간담회
참석 인원	안창범 교수(서울대학교), 김정렬 교수(인하대학교), 이재열 본부장, 김한결 선임연구원(이상 한국로봇융합연구원), 김진현 교수(서울과학기술대학교), 김석 교수, Mahmood Bilawal 박사(이상 국립한국교통대학교), 최평호 전무(영신디앤씨), 문용선 대표이사(레드윈테크놀러지), 이창용 팀장(현대엔지니어링), 이성재 팀장, 이상헌 프로 외 1인(이상 삼성물산), 조기용 실장, 최승준 선임연구원 (이상 건설기계부품연구원), 류성무 CTO(케이엔알시스템), 홍성훈 연구실장(차세대융합기술연구원), 김영평 대표(아이티원), 김민관 연구원, 이원종 연구원(이상 한국건설기술연구원 국가건설기준센터), 이용석 상무(엠에프알), 차태로 본부장(평선베이), 정영도 팀장(포스코이앤씨), 정동민 책임 외 4명(지에스건설), 성범규 책임연구원(롯데건설) 등 산학연 관계자 30여명 참석
행사 주요 순서	<ul style="list-style-type: none"> ○ 인사말씀 ○ 기획사업 소개 ○ 질의응답 및 의견청취 ○ 기술수요조사 설문
발표내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기획과제 추진 배경 및 필요성 ○ 대상 고소 건설작업(안) ○ 문제 해결 이슈 ○ 기획사업 개요(안) ○ 부처별 역할 분담
질의응답	<ul style="list-style-type: none"> - 고소작업 종류, 개발 방식에 대한 현장의 기술개발 수요 수렴 - Force feedback 등 다양한 형태의 피드백을 원격 조종에 포함시켜야 하며 품질검사 등도 로봇 기술에 통합해야 함 - 토목 분야 (대단면 터널 등)의 고소작업도 기획사업에 포함 요청 - 국제공동과제 형식으로서의 확장에 대한 고려 요청 - 고소작업 시 본 작업 외에도, 작업이 잘 이루어졌는지 혹은 작업이 이루어지는 주변환경이 어떤지를 파악하는 부분이 잘 구현되었는지에 대한 기술 개발이 이루어져야 하며, 확장현실을 통해 구현 가능할 것 - 툴 개발 부분이 건설사 입장에서 중요한 요소가 될 것으로 보이며, 툴을 매개로 특허 등 재산권, 참여에 대한 권리를 보호받을 수 있을 것 - 국토부 스마트건설 연구과제의 연구결과를 본 과제에 연계 도입 가능한지 검토가 필요함 - 산학연 참석자들은 본 사업의 중요성과 필요성을 공감하였으며, 사업 추진 시 참여 가능한 기술, 시나리오 등을 마련해보기로 합의함