

스마트 시공기술 기반 건설공사 생산시스템 혁신 방안 수립

연구관리 2025-077호

스마트 시공기술 기반 건설공사 생산시스템 혁신 방안 수립

지은이 송상훈, 이동건
발행인 정창무
발행처 한국토지주택공사 토지주택연구원
주 소 (34047) 대전 유성구 엑스포로 539번길 99
홈페이지 <http://lhri.lh.or.kr>

이 출판물은 우리 공사의 업무상 필요에 의하여 연구·검토한 기초자료로서 공사나 정부의 공식적인 견해와
관계가 없습니다.

우리 공사의 승인 없이 연구내용의 일부 또는 전부를 다른 목적으로 이용할 수 없습니다.

연구관리 2025-077

스마트 시공기술 기반 건설공사 생산시스템 혁신 방안 수립

Innovation Plan of Construction Production System
Using Smart Work Technologies

송상훈·이동건

LH 토지주택연구원

참여연구진

연구책임

송상훈 LH 토지주택연구원 연구위원

연구진

이동건 LH 토지주택연구원 수석연구원

연구심의위원 (가나다순)

남성훈 LH 토지주택연구원 수석연구원

노준오 LH 주거혁신처 차장

이동훈 한밭대학교 교수

이창용 경북대학교 교수

전주영 LH 토지주택연구원 선임연구위원

정종석 LH 토지주택연구원 연구위원

진상운 성균관대학교 교수

연구요약 Summary

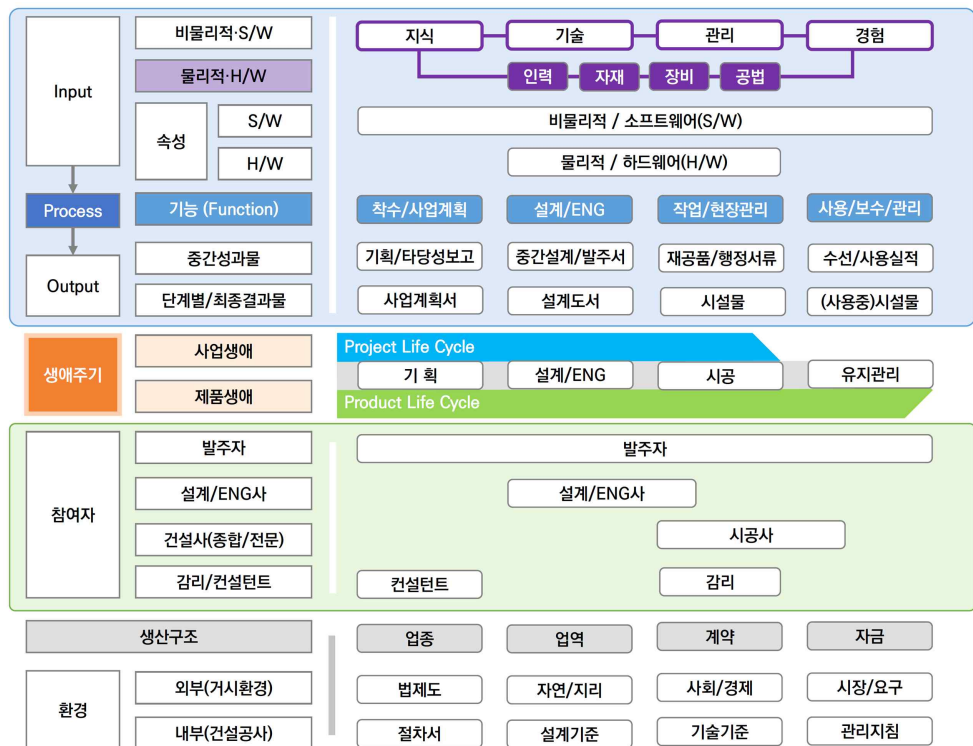
■ 스마트건설과 건설자동화, 스마트 시공기술

건설자동화는 스마트건설의 부분 영역으로서 ‘건설 장비의 자동화된 작업 지원과 함께 통신 기술과 소프트웨어적 기술을 적용한 건설관리, 현장 무선관리 체계, 감리까지 포함하는 모든 건설 활동’을 대상으로 함

- 스마트 시공기술은 “시설물 건조와 관련되어 물리적인 작업을 동반하는 건설 생산 기술”로서 OSC 공법, 로봇틱스, 자동화장비, 3D 프린팅 등이 해당됨

■ 스마트 시공기술과 건설생산체계

스마트 시공은 건설생산체계의 입력요소 가운데 인력, 자재, 장비, 공법 등 물리적 요소들에 있어 인력의 대체, 무인화, 자재의 변경, 장비의 자동화, 공법의 신규화 등을 도모하는 것임



[건설생산체계와 구성요소]

■ 스마트 시공기술의 특징

스마트 시공기술은 해당 기술의 결과물이 최종시설물에 포함되는지, 생산활동 시점에 임시적 도구로 사용되었는지 여부에 따라 유형이 구분됨

- OSC 공법, 3D 프린팅의 경우 작업 결과물이 시설물의 일부가 되고, 계획과 설계단계에 해당 기술의 적용 여부가 결정되며 발주자(건축주, 시행자)가 주관이 됨 (☞ 유형 A)
- 건설로봇, 자동화장비의 적용은 종합건설사 또는 전문건설사 주관 하에, 발주자의 기준에 적합하도록 진행하며, 경우에 따라 설계에 필요한 사항 반영 (☞ 유형 B)

[스마트 시공기술 특성 비교]

구 분	유형 A		유형 B	
	OSC	3D 프린팅	건설로봇	자동화장비
설계포함 여부	●	●	▲	▲
기술적용 주관	발주자	발주자	종합·전문건설사	전문건설사
인력대체 효과	하	상	상	중

건설자동화는 ①완전 수작업에서부터 ②연장, 공구를 사용하는 단계, ③수동 조정 장비를 사용하는 단계, ④원격 조정 장비를 활용하는 단계, ⑤사전 프로그램 설정으로 운용되는 장비를 사용하는 단계, ⑥장비 자체가 주변 환경을 인지하여 작업을 하는 단계까지 진행될 수 있음

■ 국내외 생산시스템 전환 추진 정책 동향과 적용 수준

국내에서는 『스마트 건설기술 로드맵(2018)』, 『스마트 건설 활성화 방안(2022)』, 『제2차 국토교통과학기술 연구개발 종합계획(2023~2032)』 등에서 건설기계 자동화, 로봇 도입, 제조업 기반 탈현장 건설(OSC) 활성화 등의 중장기적 실현과 관련 산업 육성을 추진함
영국에서는 생애주기비용 절감(33%), 사업기간 단축(50%) 등을 목표로 『Construction 2025』을 추진하고, MMC 개념을 통해 건설생산 혁신 도구들을 통합적으로 관리함

일본 국토교통성은 ‘i-Construction 2.0’을 통해 2040년까지 건설현장 노동력 절감 30%를 위한 ‘자동화’를 적극 추진하며, 싱가포르의 ITM 하에서 DfMA, 로봇틱스를 전략적으로 추진하고 의무화 사항과 다양한 인센티브를 병행하고 있음

스마트 시공기술은 국내 주요 대형건설사업자 중심으로 기술개발과 적용이 시도되고 있으며, OSC(평균 31.3%), 시공자동화(평균 7.8%) 외에는 활용 실적이 부진한 상황임

- 향후 공장제작, 모듈화, 시공자동화, 건설로봇에 대한 투자 비율 증대 계획 보유

■ 스마트 시공기술 동향과 활성화 요구

기술명	OSC, 모듈러, 공업화주택	
주요 동향	시장 동향	• 모듈러 시장 2024년 5,637억원(2023년 8,064억원), PC 시장 연간 1.5조원
	적용분야 다양화	• 공공/민간, 건축/토목, 주거/비주거, 부대시설, 임시, 수출용, 재료/공법 복합
	고층화/대공간화	• 구조성능 확보와 중고층 사례 확대, 재료와 제작범위 반영 요구사항 최적화
	한국형모델 확립	• 바닥난방, 우수한 주거성능 기반으로 K-Modular Housing 발전
	공공주도 활성화	• 공공물량 점진 증대, 표준화 추진, 제품화로 대량생산/비용절감 기반 마련
		
장애 요인	<ul style="list-style-type: none"> • 고층화 관련 기술력 한계 및 인력 부족 • 규모의 경제 미확보, 높은 공사비에 의한 경제성 부족 • 현장생산 기반 제도 환경에 의한 OSC 사업 추진 어려움 	
추진 전략	<ul style="list-style-type: none"> • 분리발주, 공사용자재구매, 감리, 인증 관련 제도 정비 • 사업성 향상을 위한 인센티브 부여, 금융 지원 • 건설산업 밸류체인 혁신 및 민간부문 활성화 추진 	

기술명	건설로봇, 로봇틱스	
주요 동향	시장 동향	• 국내 시장 규모는 점진적으로 성장하여 2030년 2,920억원 수준으로 예측
	현장 적용 확대	• 기술개발, 현장실증에서 나아가 국내외에서 대형사 중심 상용화, 적용 확대
	활용 범위 확대	• 단일작업, 반복작업 대체에서 다용도, 보조, 범용로봇 개발 및 적용 노력 확산
	로봇 유형 변경	• 인간과 동일 공간에서 협력하는 협동로봇 확대, 휴머노이드 적용 가능성 검토
공공 기대 효과	• 생산성 증대, 일정 단축, 근로자부족/고령화 대응, 재해 방지 및 고품질 지향	
장애 요인	<ul style="list-style-type: none"> • 초기 투자비용, 기술성숙도 미흡 등으로 산업 전반의 참여 부진 • 현장의 특성이 반영된 건설형 안전·성능 기준 미비 • 공공부문 입찰평가제도 부재 및 개발기술의 실증 기반 부족 	
제도 개정 요구	<ul style="list-style-type: none"> • 공공발주 및 입찰제도 개선을 통한 로봇 적용 활성화 도모 • 건설로봇 관련 안전기준 및 인증체계 마련 • 기술 개발 및 현장 실증 지원 체계 강화 	

기술명	3D 프린팅, 적층 제조, AM	
주요 동향	시장 동향	• 세계 건설분야 3D 프린팅 시장은 2030년 42억달러 예측(연평균 111% 성장)
	적용사례 증가	• 미국, 유럽, 중국, 두바이 등 적극 개발, 상용화로 건축물, 교량 등 사례 증가
	초기 관심단계	• 국내는 정부, 산·학·연이 비주거조형물, 소규모 건축물 중심 개발, 실증 추진
	기술개발 지속	• 프린팅 재료, 장비, 적용 대상, 품질관리 체계 등 측면에서 연구개발 지원
공공 기대효과	• 기간 단축, 인건비·건설비 절감, 친환경 건축, 맞춤형 건축, 설계/디자인 혁신	
장애 요인	<ul style="list-style-type: none"> • 적층 소재, 대형장비, 검증 체계 등 기술적 요소 보완 필요 • 법적 구조물 인정을 위한 건축법, 기술기준, 표준화 미비 • 투자비 과다, 수요부족, 생태계 미성숙 등 경제·사회적 요인 미흡 	
제도 개정 요구	<ul style="list-style-type: none"> • 건축법 개정을 통해 '적층 제조 기반 건축물' 인정 • 검증기준(강도, 내진), 안전기준(내구성, 화재), 표준 제정 • 유망기술 정책적 지원, 공공부문 선도 및 생태계 구축 	

기술명	자동화장비, 머신가이던스, 머신컨트롤	
주요 동향	시장 동향	• 완전자동화시스템 기반 건설기계 전체작업 수행은 2040~50년 가능으로 예측
	실증사업 수행	• 스마트건설기술개발사업에서 디지털 기반 도로 건설장비 자동화 기술 실증 완료
	시범사업 실시	• 스마트시티 국가시범도시(5-1생활권)에서 건설자동화 시범사업 실시, 성과 분석
	후속작업 진행	• 기술 적용대상 공사 점진적 확대, 건설기계 통합관리 솔루션 개발 등 고도화
	공공 기대효과	• MG 시범사업에서 작업소요시간 단축, 생산성 향상, 원가 절감 효과 검증
기술 보완	<ul style="list-style-type: none"> • 원격조종, 완전 자동화 등 무인운전에 대한 제약 해소 필요 • 대기업 위주의 적용에서 중소기업, 스타트업 기술력 강화 도모 • 현장별 맞춤형 건설자동화 장비 적용 및 통합 관리 기술 개발 	
추진 사항	<ul style="list-style-type: none"> • 건설기계 무인운전 특례, 장비 인증 제도 마련 • 안정적 장비 운영을 위한 전문인력 양성 • 기업 차원의 현장적용 부담 완화를 위한 제도적 장치 제공 	

■ 생산시스템 전환 미래상과 추진 목표

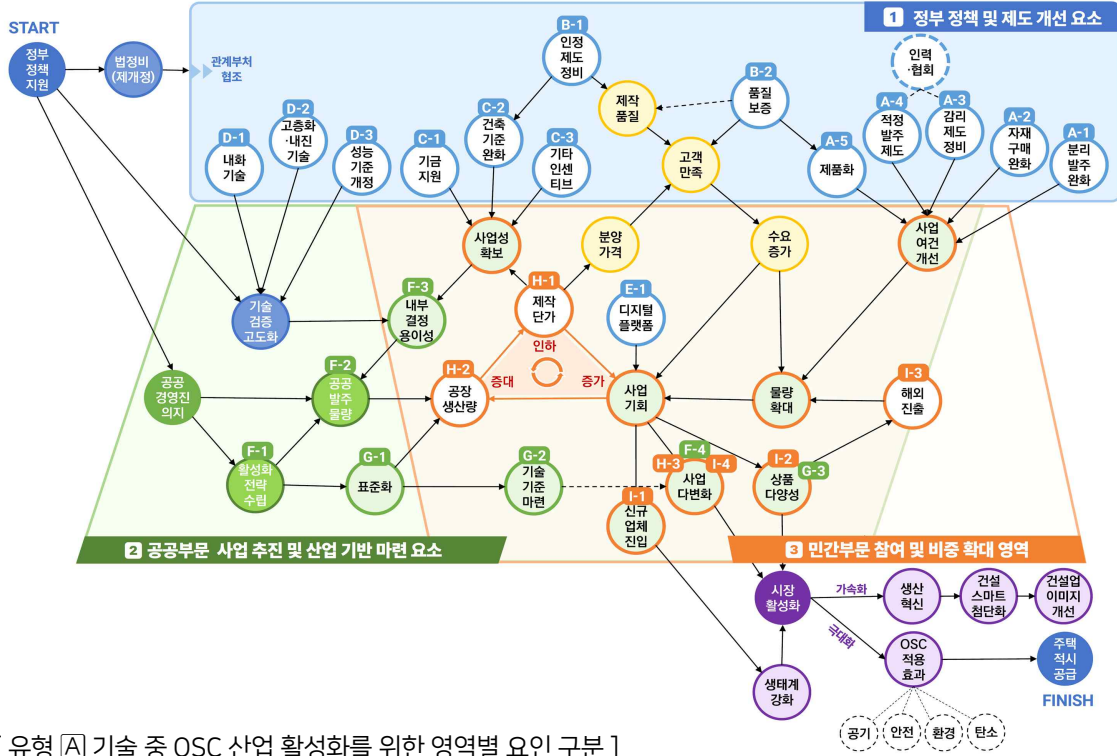
‘첨단생산’ 실현을 위해 탈현장, 무인화, 자율화, 창의적 등의 핵심주제를 두고 공장화, 부품화, 무인로봇, 3D 프린터 도입, 자율형 장비 등의 적용을 전략목표 하에 추진하도록 함

구 분	가치 변화		생산 및 일하는 방식	
	과거 가치	미래 가치	현재 방식	미래 방식
스마트한 첨단생산 OSC 건설로봇 3D 프린팅 자동화장비	노동집약	기술집약	• 노동집약적 비효율적 생산	• 기술집약/자본집약적 생산 변모 • 건설 생산성 제고
	현장생산	탈현장	• 현장 중심 공사 진행	• 공장화, 부품화, 제품화 • 현장 작업 최소화
	성력화	무인화	• 인력 기반 작업	• 자동 무인로봇, 장비 인력 대체 • 연중무휴, 24/7 현장 운영
	획일적	창의적	• 제한된 공법, 재료 사용	• 자유롭고 다양한 구조물 공급 • 스마트시공 최적 재료·공법
	인력 통제	자율화	• 탑승 운전자 조작 운영	• 원격 장비 운영 • 자율주행 지능형 장비 활용 지향
	일회성/고정	다회성/이동	• 공간 점유 및 단기 내용연수	• 장수명 개념의 스마트건축 지향

전략목표	전략과제	총괄 실행과제	추진목표
<ul style="list-style-type: none"> • 생산 혁신을 통한 건설의 재정적 • 건설 이미지 전환 • 업계 전반에서 생태계 조성 	<ul style="list-style-type: none"> • 생산기술 적용 물량 지속 확대 • 기술적 검증을 통한 적용가능 대안 확보 • 법제도적, 인적, 조직적 환경 조성 	<ul style="list-style-type: none"> • 탈현장, 탈인력을 위한 기술 적용 확대 (검토, 검증, 확대, 표준화) 	[총 괄] <ul style="list-style-type: none"> • 2035년 자동화를 50% <ul style="list-style-type: none"> ➔ 스마트 시공기술 적용 작업비용 비율 [단계별 OSC 적용 사업비율] <ul style="list-style-type: none"> • (중기) 전체 6% • (장기) 전체 10% • (정착기) 전체 15~20% [생산성] <ul style="list-style-type: none"> • (장기) 상승(+) 반전 ➔ (정착기) 30% 증가

■ 스마트 시공기술 활성화 방안

유형 A(OSC, 3D 프린팅) 기술이 건설업계에서 자리잡기 위해서는 정책/제도환경 마련, 공공부문 사업여건 개선, 민간부문 비중 확대 등이 병행될 필요가 있음



[유형 A 기술 중 OSC 산업 활성화를 위한 영역별 요인 구분]

유형 B(건설로봇, MG/MC)에 대해서는 중장기 계획을 기반으로 생산 패러다임 전환 초기 단계 개발 지원, 수요 견인, 기술적·제도적 기반 마련 등 공적 역할을 설정할 수 있음

① 중장기 적용 계획 수립	② 기술 개발 지원
<ul style="list-style-type: none"> • (취지) 생산혁신 기술 공공건설 적용 중장기 전략 작성 • (내용) 기술수준, 공사유형 등 적용 확대 계획 제시 • (대상) 기술 숙성 반영 현장 무인화, 자동화 실현 • (방식) 시장생애주기에 따라 물량 확대, 파급효과 예측 	<ul style="list-style-type: none"> • (취지) 혁신기술 개발을 위한 수요 확인 및 여건 지원 • (내용) 공공건설 적용가능성 높은 분야 니즈 반영 유도 • (직접) 정부기관 연계 유망기술 개발 프로그램 참여, 지원 • (간접) 여건별 실증현장 제공·기술검증, 우수기술 선정
③ 기술 적용 기회 확대	④ 기술 기반 마련 및 생태계 조성 참여
<ul style="list-style-type: none"> • (취지) 초기시장 물량 제공 및 민간 확대 기반 마련 • (초기) 기술형입찰, 민간참여사업 평가항목 신설 • (확대) 일반공사 가점·정규항목 추가, 인센티브 제공 • (방식) 스마트기술 활용비율, 무인화·자동화기술 특경 	<ul style="list-style-type: none"> • (취지) 설계/시공기술 표준화, 적정 거버넌스 구축 지원 • (기술) 자체 전문시방서 내용 개정, 비용산정기준 신설 • (산업) 공급/수요 주체 사이의 네트워크 구축 • (효과) 수요자 자발적 채택 유도 및 시장 활성화 지원

[유형 B 활성화 방안 및 공공의 역할]

차례 Contents

제1장 서론

1. 연구의 배경	1
1.1 대내외 주요 동향	1
1.2 디지털 LH 실현을 위한 연구 요구사항	4
2. 연구의 목적	5
3. 연구의 범위와 내용	5
4. 연구의 방법과 절차	7
4.1 연구수행 방법	7
4.2 연구수행 절차	7

제2장 스마트 시공기술 관련 이론과 정책 동향

1. 스마트건설의 개념과 기술 분류	9
1.1 스마트건설의 개념	9
1.2 스마트건설기술 유형과 분류	10
2. 스마트 시공기술 정의와 특징	13
2.1 스마트건설과 건설자동화	13
2.2 스마트 시공기술의 개념과 논의대상	13
2.3 건설 생산체계와 스마트 시공기술	14
2.4 스마트 시공기술의 특징	16
3. 국내외 생산체계 전환 관련 정책 동향	19
3.1 스마트건설 관련 국내 정책	19
3.2 주요 정책에서의 스마트 생산 관련 내용	20
3.3 LH 내부 스마트건설 혁신과제 추진	24
3.4 해외 주요국 추진 정책	26
4. 스마트 건설기술 활용 방식	34

제3장 스마트 시공기술 현황과 적용 전략

1. 스마트 시공기술의 국내 적용 현황 총괄	35
1.1 유망기술로서의 전망	35
1.2 건설분야에서의 기술별 수요와 적용 현황	36
2. 건설 로봇 관련 현황과 적용 방안	38
2.1 건설 로봇 개념과 기술 구성요소	38
2.2 건설로봇 필요성과 기대 효과	47
2.3 국내외 기술개발, 시장, 정책 동향	49
2.4 국내외 적용 현황과 사례	72
2.5 로봇 활성화 장애요인 및 생애주기 측면의 고려 사항	76
2.6 발주자 측면의 로봇 적용 전략	80
3. 3D 프린팅 관련 현황과 적용 방안	82
3.1 3D 프린팅 개념과 기술 구성요소	82
3.2 3D 프린팅 필요성과 기대 효과	88
3.3 국내외 기술개발, 시장, 정책 동향	93
3.4 국내외 적용 현황과 사례	100
3.5 3D 프린팅 적용의 장애요인과 생애주기 측면의 고려 사항	110
3.6 발주자 측면의 3D 프린팅 적용 전략	118
4. 자동화장비 관련 현황과 적용 방안	121
4.1 자동화장비 개념과 기술 구성요소	121
4.2 자동화장비 필요성과 기대 효과	124
4.3 국내외 정책 동향	126
4.4 국내외 적용 현황과 사례	128
4.5 제도 개선 및 도입 방안	129
5. OSC 관련 현황과 적용 방안	130
5.1 OSC 개념과 기술 구성요소	130
5.2 OSC 필요성과 기대 효과	132
5.3 국내외 시장, 정책 동향	134
5.4 국내외 적용 현황과 사례	145
5.5 OSC 적용의 장애요인	151

제4장 스마트 시공기술 기반 생산시스템 혁신 전략

1. LH 내부 생산체계 혁신 추진 현황	153
1.1 총괄 실적	153
1.2 기술별 내부 추진 실적	154
2. 시공단계 작업별 적용가능성 검토	158
2.1 검토 기준 확인	158
2.2 공종 특성에 따른 적용가능성 예비 검토	160
2.3 작업별 대체 기술 검토	163
3. 미래 건설생산시스템 구상	168
3.1 생산시스템 전환에 의한 미래상 총괄	168
3.2 [하드웨어] 무인화, 자동화, 탈현장	169
3.3 [소프트웨어] 스마트 시공 통합 플랫폼 구축	169
3.4 [생태계] 생산체계 변경	171
4. LH 건설공사 생산시스템 전환 전략	172
4.1 생산시스템 혁신 총괄	172
4.2 추진 목표와 총괄 과제	173
4.3 실행과제	174
4.4 제도 측면의 인프라 정비	175
5. 생산체계 전환에 따른 영향	185
5.1 산업 생태계와 생산체계 전환	185
5.2 생산체계 전환과 건설산업 구조 변화	189
5.3 스마트 시공기술 활성화 방안	193
5.4 건설인력에 대한 영향	198

제5장 결 론

1. 연구 주요 결과	201
2. 향후 연구 사항	205

표 차례 List of Tables

[표 1-1] 스마트 시공기술 관련 최근 정부 정책	2
[표 1-2] 내부 중장기 전략 하에서의 생산시스템 혁신 추진 사항	3
[표 1-3] 『공공건설 품질혁신 방안』 중 스마트 시공 관련 과제	4
[표 2-1] 스마트건설의 속성	10
[표 2-2] 첨단기술과 건설단계별 업무의 연계	11
[표 2-3] 스마트 시공기술의 구성 요소와 발전 방향	11
[표 2-4] 스마트 건설기술 기본 분류 및 기능	12
[표 2-5] 스마트 시공기술 특성 비교	16
[표 2-6] 기능인력과 활동의 분류	17
[표 2-7] 건설산업에서 기계화/자동화 저해 요인	18
[표 2-8] 스마트건설 관련 정부 정책 목록	19
[표 2-9] 『스마트 건설기술 로드맵』 핵심기술과 이행전략	20
[표 2-10] 『스마트 건설 활성화 방안』 중 “생산시스템 선진화” 주요 내용	21
[표 2-11] ‘자동화 & 로보틱스’ 분야 주요 내용	21
[표 2-12] ‘건설 프로세스의 제조업화’ 분야 주요 내용	22
[표 2-13] 건설경쟁력 확보를 위한 건설전주기 자동화 플랫폼 5.0 사업 중점기술	22
[표 2-14] 『공공건설 품질혁신 방안』 중 스마트 시공 관련 과제(음영)	25
[표 2-15] 싱가포르의 자동화 추진 현황과 인센티브	32
[표 2-16] 주요국의 생산체계 전환 관련 정책 요약	33
[표 2-17] 『스마트건설기술 활성화 지침』 상의 스마트 건설기술 활용 예	34
[표 3-1] 민간부문 주요 건설사의 중점 투자 대상 기술 (1순위 기준)	36
[표 3-2] 주요 건설사업자 스마트 시공기술 활용	37
[표 3-3] 건설로봇 유형별 특징과 주요 기술	40

[표 3-4] 국외 건설작업 로봇 주요 제품	57
[표 3-5] 국내 건설작업로봇	63
[표 3-6] 건설로봇 개발 기술 목록	66
[표 3-7] 일본의 건설 RX 컨소시엄 분과회 구성 및 목적	71
[표 3-8] 건설로봇 관련 주요 이슈	76
[표 3-9] 기존 제조공정과 3D 프린팅 공정 비교	82
[표 3-10] ISO 표준에 따른 7개의 3D 프린팅 기술군	84
[표 3-11] 재료형태별 3D 프린팅 기술 분류	84
[표 3-12] 3D 프린팅 출력방식에 따른 장비 종류	86
[표 3-13] 건설에서 주로 활용하는 재료에 따른 세부 분류	87
[표 3-14] 건설산업 디지털화에 따른 부가가치 전망	88
[표 3-15] 국내 3D 프린팅 시장 규모 추이	94
[표 3-16] 국내 3D 프린팅 산업별 매출 비중	95
[표 3-17] 『삼차원프린팅산업 진흥법』 제정 이유	97
[표 3-18] 법령 상의 3D 프린팅 관련 용어 정의	97
[표 3-19] 국내 3D 프린팅 관련 정책 주요 내용	98
[표 3-20] 국외 3D 프린팅 적용 주요 사례	105
[표 3-21] 자동화장비 관련 기술 유형	121
[표 3-22] MG, MC 장비 구성요소	124
[표 3-23] 건설시공 자동화, 원격화 추진 계획	127
[표 3-24] MG, MC 관련 표준시방서 구성	127
[표 3-25] OSC 공법의 구분	130
[표 3-26] 공법에 따른 모듈러 공법 유형 구분	131
[표 3-27] 재료에 따른 유형 구분	131
[표 3-28] 이동 유무에 따른 모듈러 공법 유형 구분	132
[표 3-29] PC 공법 관련 시장 규모	135
[표 3-30] 스마트 건설 활성화 방안 중 관련 내용	138
[표 3-31] 장수명주택 관련 인정기준 개정 동향	139
[표 3-32] 제7차 건설기술진흥기본계획 중 관련 내용	139
[표 3-33] 9.7 대책 중 모듈러 주택 관련 내용	140
[표 3-34] 국내 OSC 건축 관련 제도	142

[표 3-35] 인정 공업화주택 주요 내용(1)	143
[표 3-36] 인정 공업화주택 주요 내용(2)	144
[표 3-37] 국내 주요 사업 목록	145
[표 3-38] 국내 주요 모듈러주택 건설사업 사례	145
[표 3-39] 국내 모듈러 건축 현황	146
[표 3-40] 최근 일본 프리패브 주택의 비율	147
[표 3-41] 싱가포르 DAR 수치 추이	148
[표 3-42] 국외 주요 모듈러 건축 사례	149
[표 3-43] 국외 모듈러 건축 주요 사례	150
[표 4-1] 스마트 시공기술별 현황	153
[표 4-2] 시연·전시 자동화 로봇 품목	154
[표 4-3] LH 공급 OSC 주택 현황	156
[표 4-4] 모듈러 주택사업 준공 지구	157
[표 4-5] 모듈러 주택사업 진행 지구	157
[표 4-6] 건설자동화 적용 시 주요 고려사항	158
[표 4-7] 건설자동화 장비 도입 시 영향요인	159
[표 4-8] 로봇 개발 우선순위 선정 기준 사례	159
[표 4-9] 공동주택 건설공사 작업별 로봇화 우선순위 도출 결과	161
[표 4-10] 공종별 인력 대체 효과 검토	162
[표 4-11] 토목 현장 작업 대체 기술 검토	163
[표 4-12] 건축 현장 작업 대체 기술 검토	166
[표 4-13] 스마트 시공기술 조합의 사례	169
[표 4-14] 생산 혁신 추진에 따른 미래의 주체별 역할 예상	171
[표 4-15] 생산시스템 혁신의 핵심가치와 총괄 실행과제	173
[표 4-16] 생산시스템 전환 추진 실행과제	174
[표 4-17] 생산시스템 전환 요소 영역별 실행과제 검토	176
[표 4-18] 건설사업 진행과정에서 관련 법 목록	177
[표 4-19] 시공단계 유관 법령과 스마트 시공기술 개정 요구	178
[표 4-20] 기술 간 공통 개정 사항	181
[표 4-21] 다행위자 네트워크에서의 인공지능 생태계 사례	188

[표 4-22] 모듈러주택 건설사업의 종합건설업체 영향	189
[표 4-23] 모듈러주택 건설사업의 전문건설업체 영향	191
[표 4-24] 유형 A 기술 활성화를 위한 요인	194
[표 4-25] 모듈러 확산에 따른 인력에의 영향	198
[표 4-26] 스마트 시공기술별 인력 측면의 신규 수요 검토	199

그림 차례 List of Figures

[그림 1-1] LH 내부 스마트 건설기술 관련 인식과 적용 현황	6
[그림 1-2] 연구 총괄 프로세스	8
[그림 2-1] 건설기업 스마트건설 범위 검토	9
[그림 2-2] 건설생산체계와 구성요소	14
[그림 2-3] 현장 내 생산 참여자와 상호 관계	15
[그림 2-4] 건설자동화와 인력 수요의 변화	18
[그림 2-5] 사업단계 및 중점분야별 스마트 시공 관련 기술 니즈	23
[그림 2-6] 디지털 건설의 미래상	26
[그림 2-7] 영국 MMC 유형 분류	27
[그림 2-8] MMC 구분과 세부 유형	28
[그림 2-9] 일본 i-construction 2.0의 특징	29
[그림 2-10] 건설현장 자동화를 위한 로드맵	30
[그림 3-1] Gartner Hyper Cycle에서의 디지털 기술별 현황	35
[그림 3-2] 센서 시스템, 매니플레이터, 모바일 모듈(좌로부터)	41
[그림 3-3] LiDAR, RGB-D, IMU(좌로부터)	42
[그림 3-4] SLAM(좌), LIO-BIM(우)	42
[그림 3-5] 데카르트 로봇, SCARA 로봇, 다관절 로봇(좌로부터)	43
[그림 3-6] HUSKY(좌), KUKA omniMove(우)	44
[그림 3-7] 콘크리트 3D 프린팅 로봇, 무인 자재 운반 로봇, Concept-X	45
[그림 3-8] 국내 산업용 로봇 시장 전망(Grand View Research, 2024)	49
[그림 3-9] 국내 휴머노이드 로봇 시장 전망(Grand View Research, 2024)	49
[그림 3-10] 미국 휴머노이드 Helix, Digit, Optimus (좌로부터)	51
[그림 3-11] 위로보틱스 ALLEX(좌), 에이로봇 Alice(우)	52

[그림 3-12] 미국 SPROUT(좌), 서울대학교 SIMM(우)	53
[그림 3-13] 글로벌 건설로봇 시장 전망(Grand View Research, 2024)	54
[그림 3-14] 국내 건설로봇시장 전망(Grand View Research, 2024)	55
[그림 3-15] 미국 독셀의 건설현장 내부 검사로봇	65
[그림 3-16] 한국건설기술연구원의 터널 크롤러 점검 로봇	65
[그림 3-17] 2025년도 통상총회(6월)	70
[그림 3-18] 2024년 RX 컨소시엄 전시회	70
[그림 3-19] HP SitePrint	73
[그림 3-20] TyBOT(좌), Hilti Jaibot(우)	73
[그림 3-21] 현대건설 Spot(좌), UGV(우)	75
[그림 3-22] 삼성물산 철골 볼트 조임 자동화 로봇, 외벽 도장 로봇 ‘Rollot’	75
[그림 3-23] 3D 프린팅 기술 개념도	82
[그림 3-24] 출력방식에 따른 3D 프린팅 분류	83
[그림 3-25] 3D 프린팅 건설 시장 동향	96
[그림 3-26] ICON 레일형 3D 프린터 장비 및 소형 주택 출력	100
[그림 3-27] ICON-NASA 우주건설 협업 프로젝트	101
[그림 3-28] 미국 국방부 ACES프로그램을 통해 시공된 군용 구조물	101
[그림 3-29] COBOD 프린팅 장비 및 3층 규모 임대용 아파트 출력	102
[그림 3-30] Constructions-3D의 작업 모습과 이동을 위한 모습	102
[그림 3-31] 낭트대학교의 3D 프린팅 건축물 시공 사례	103
[그림 3-32] 이동형 크레인 타입 3D 프린터 및 세계 최대 규모 3D 프린팅 출력물	103
[그림 3-33] 네덜란드 아이트호벤 공대에서 제작한 3D 프린팅 보도교량	104
[그림 3-34] 중국 WinSun의 3D 프린팅 중국 고유건물 및 정원 구축 사례	104
[그림 3-35] 한국건설기술연구원의 3D 프린팅 건축물 사례	106
[그림 3-36] 하이시스에서 3D프린팅 기술로 시공한 건축물 시공 사례	107
[그림 3-37] 삼성엔지니어링의 사우디 현장 대피소	108
[그림 3-38] 아파트 단지 내 조형시설물 설치 예	109
[그림 3-39] 굴착기 MG 기술 적용 예	122
[그림 3-40] 증강현실 기반 MG 운영 사례	123
[그림 3-41] 건설장비 운용 모습	128
[그림 3-42] 자동화장비 기술 발전 사항	129

[그림 3-43] 국내 모듈러 시장 동향	134
[그림 3-44] 시설물 유형별 PC 공법 관련 시장 규모	135
[그림 3-45] LH 2030 OSC 주택 로드맵	137
[그림 3-46] 공업화주택 공공발주 물량 확대 목표(사업계획승인 기준)	138
[그림 4-1] 자동화 시범사업 진행 범위	155
[그림 4-2] 스마트건설이 가져올 건설생산 측면의 미래상	168
[그림 4-3] OSC 기반의 미래의 건설 생태계 모습	188
[그림 4-4] 공종별 금액 변화	190
[그림 4-5] 일반주택과 모듈러주택의 전문건설업종 규모 차이	191
[그림 4-6] 공종별, 전문건설업종별 금액 변화	192
[그림 4-7] OSC 산업 활성화를 위한 영역별 요인 구분 및 연계	193
[그림 4-8] 유형 A 기술 중 OSC 산업 활성화 추진 전략	196
[그림 4-9] 유형 B 활성화 방안 및 공공의 역할	197

제1장 서론

1. 연구의 배경

1.1 대내외 주요 동향

1) 국내 건설산업 동향

- 청년기술인 유입 급감, 기능인력·기술인 고령화에 따른 건설부문 생산성 저하
 - 건설산업 노동생산성은 선진국 대비 70% 수준으로 국내 제조업이 92% 증가할 때 20년간 34% 감소
 - 청년기술인 유입 급감, 기능인력·기술인 고령화에 따라 건설노무자 구조에 변화
- 국내 건설시장 축소에 따른 경쟁 심화, 변별력이 실종된 입찰시스템, 고부가가치 부문 역량 미흡으로 산업의 국제경쟁력 부족
- 건설공사에서 안전에 대한 관심도와 투자가 늘어남에 따라 각종 안전 관련 지표가 개선되고 있으나, 여전히 많은 근로자가 현장에서 사망하고 있음
 - 전체 산업에서 사고사망자는 건설업(328명, 39.7%), 5인~49인 사업장(361명, 43.7%), 60세 이상 근로자(404명, 48.9%), 떨어짐(278명, 33.6%)이 가장 많이 발생
 - 2020년을 기준으로 국내 건설업 사고사망(십)만인율은 OECD 주요 10개국 평균의 약 2~3배 수준
- 그에 따라 산업 차원에서는 노동생산성 저하, 반복되는 안전재해의 악순환 근절, 기능인력과 기술인 고령화 등에 대한 대응이 시급한 상황임
 - 건설공사에서 품질, 안전을 높은 수준에서 확보하기 위한 노력의 차원에서 “기술 중심” 산업으로의 전환을 통해 생산성, 품질 제고와 안전사고 저감 추진

2) 건설 분야 최신 기술 동향

- 국내 전 산업에서 디지털 전환에 대한 관심이 높아지고 있으며, 대형 건설사업자를 중심으로 스마트건설기술 적용을 통한 고품질, 안전성, 생산성 향상 사례 증가

- 업계 내부적으로 스마트 건설기술을 바탕으로 하는 디지털화, 자동화, 생산체계 전환 등의 패러다임 변화를 통한 건설사업 혁신 시도
 - 최근에는 소프트웨어적 기술 외에도 현장 작업을 대체할 수 있는 하드웨어 측면의 생산 기술에 대한 관심 급증
 - OSC로 분류되는 모듈러공법, PC공법에 대한 활발한 논의와 별개로 장비자동화 (MG/MC), 건설로봇 분야에서도 상용화된 사례가 늘어나고, 3D 프린팅 영역에서도 지속적으로 기술개발이 이루어지고 있음
 - 스마트 시공기술은 AI, 센서, BIM 등 타기술과 복합되어 기능이 고도화되고 있으며, 테스트베드를 통한 기술검증을 거쳐 실질적 수요처를 마련해야 하는 숙제가 있음
- **스마트 시공(생산)기술**은 스마트건설기술 중 전통적 시공방식을 대체할 수 있는 **OSC, 로봇릭스, 3D 프린팅, MG/MC** 등의 **첨단기술**로서 공장제작, 자동화, 무인화 등이 가능한 공법, 장비, 시스템 개발에 활용되는 기술을 의미함
- 그에 따라 스마트 시공기술의 비중이 확대되는 상황을 고려하여 해당 기술의 현황을 바탕으로 중장기적인 전략과 함께 생산체계 전환을 위한 공공부문 역할 검토 필요

[표 1-1] 스마트 시공기술 관련 최근 정부 정책

추진 전략 (시점)	주요 내용
스마트 건설 활성화 방안 (2022.07)	<p>[건설기계 자동화 및 로봇 도입]</p> <ul style="list-style-type: none"> • (건설기준 정비) 현장 수요가 많은 자동화 기술을 중심으로 표준시방서 등 건설기준 정비 로드맵을 수립하고, 제·개정 추진 • (건설기계 제도 정비) 운전자 탑승을 전제로 하는 안전법령에 특례 근거를 우선 마련하고, 추후 제작·운용상의 세부기준 규정 • (기술개발 등 지원) 기업들이 기술개발 초기 단계부터 개발 이후 실·검증까지 자유롭게 시험할 수 있는 SOC 성능시험장 조성 • (인센티브 등 상용화 지원) 자동화 장비 장착한 건설기계, 로봇에 대한 세제 감면, 구입·운영비용 대출이자 지원 등 추진
제7차 건설기술진흥 기본계획('23~'27) (2023.12)	<p>[기술별 기술개발 지원]</p> <ul style="list-style-type: none"> • (건설기계) 자동화 수준별로 요구되는 핵심기술을 고도화할 수 있도록 R&D 및 테스트 베드(공공공사 현장) 제공 등 지원 • (로봇) 고위험/고반복 등 안전·생산성 향상 가능한 분야를 발굴하고, 분야별 표준공정모델 개발 및 성능 인증체계 마련 등 추진 • (3D 프린팅) 프린팅 장비 표준 및 설계기준(재료배합, 구조 등)을 개발하고, 상대적으로 기준이 낮은 비주택 건축물에 시범적용 추진

3) 국내 정책 동향

- 스마트 시공기술을 통한 생산시스템의 선진화, 자동화는 『스마트 건설기술 로드맵(2018.10)』, 『스마트 건설 활성화 방안(2022.07)』, 『제7차 건설기술진흥 기본계획(2023.12)』 등에서 주요 과제로 정리한 핵심 전략요소임
 - 정부 차원에서 건설기계, 로봇, 3D 프린팅 관련 기술의 확산을 위해 기준과 제도의 정비, 기술개발 지원, 상용화를 위한 인센티브 마련 등을 추진하고 있음
- 정책적인 동향을 종합하면 정부가 추진하는 ‘2030 건설생산시스템 자동화’의 실현가능성을 확인하고, 선진화 정책에 따른 기술적용과 확산을 위한 방안 검토 필요

4) LH 내부 환경 동향

- LH는 사업부문별로 BIM, 드론웍스, 스마트 안전기술 등 4차산업혁명 기술의 적용을 추진해 왔음
 - 최근 설문조사 결과에 따르면 LH 현장 직원은 스마트 건설기술에 대해 3.43(5점만점) 수준의 지식을 보유하고 있으나, 실제 관련 경험을 보유한 직원은 20.8%에 불과
 - 전체 건설현장 중 72.0%는 드론을 사용하고 있으며, BIM은 34.0%, IOT/센서는 30.0%, 자동화장비는 15.0%, VR은 12.0%의 현장에서 적용하고 있음
- LH의 사고사망 비율은 전체 건설산업과 공공부문 대비 낮은 수준이나 여전히 개선이 요구됨
- 스마트 생산방식을 중장기전략계획, 회사 중기목표, 중장기 R&D 추진계획, 유관본부 혁신전략 등에 반영하고 있음

[표 1-2] 내부 중장기 전략 하에서의 생산시스템 혁신 추진 사항

전략명	주요 내용
중장기 전략계획	• ‘건설산업 미래변화 선도’를 목표로 국민체감 주택건설, 품질·안전 중심 건설관리 추진
중장기 R&D계획	• 전략목표 「미래사업 선도」 중 핵심과제 스마트혁신기술 개발 추진계획
공공건설 품질혁신	• 스마트건설본부는 공공건설 품질혁신 방안에서 노동력 절감형 시공기술, LH형 로봇 개발과 테스트베드 운영, 무인건설장비 도입 등을 추진과제로 설정

- 그 중 대외적으로 공표된 『공공건설 품질혁신 방안(2023.12)』에 따라 기술책임 혁신, 품질관리 혁신, 건설풍토 혁신, 인적자원 혁신, 디지털 혁신 등 5대 전략을 추진 중이며, 스마트 시공기술 관련 추진과제는 [표 1-3]과 같음

[표 1-3] 『공공건설 품질혁신 방안』 중 스마트 시공 관련 과제

전략	주제		내용
건설풍토 혁신	OSC 확대		• PC주차장 시범도입, 모듈러주택, 3D프린팅 확대 적용
	로봇시공		• 연구개발, 현장실증 지원 테스트베드 운영
디지털 DX 혁신	디지털 시공	스마트관계	• AI 안전관리, IoT 공사관리 플랫폼 구축
		레미콘	• 레미콘 스마트관리시스템 개발 및 전과정 모니터링
		무인장비	• ICT와 센서에 기반한 건설장비 지능화 기술 개발
	디지털 관리	영상기록	• 주요 공종 시공확인 과정 영상데이터 기록 보존
		건설 GPT	• 최적 의사결정을 위한 대화형 건설챗봇 보급
		디지털 검측	• 페이퍼리스 품질검측 시스템 구축
	디지털 설계	BIM	• 건설 전과정 BIM 공공플랫폼 구축과 정보제공
		5D 건설	• 3D BIM, 4D(Time), 5D(Cost) 지속 확장
		AR 검측	• AR 철근검측 시범추진 및 AI 자동검측 개발 지원

- 내부적으로 디지털 LH, 스마트 LH라는 전략 하에서 공공부문에서의 스마트건설 달성을 위한 하드웨어 차원의 세부방안 필요

1.2 생산시스템 혁신을 위한 연구 요구사항

- 스마트건설 실현에 있어 디지털화와 생산시스템 혁신의 균형있는 추진 요구
 - 건설환경의 급격한 변화 속에서 업계의 근본적 체질 개선을 위해서는 생산방식의 전환이 동반되어야 하며, LH는 공공부문의 스마트발주자로서 변화를 선도하는 공적 역할 수행 필요
- 건설생산시스템 혁신을 위해 파급력있는 공공부문의 스마트 시공기술 도입전략 필요
 - 「2030 LH OSC 주택 로드맵」을 통해 적극적으로 시장 확대와 기반 마련을 추진하고 있는 OSC 부문에 로보틱스, 3D 프린팅, 장비자동화 등을 포함하여 실행계획 수립
 - 현재 스마트 시공기술의 경우 특정 작업을 중심으로 하는 기술 개발, 시범적용이 진행되는 단계에 있으며, LH 입장에서 지속적 모니터링, 기술평가·검증, 적용확대 등을 포함한 전략 필요

2. 연구의 목적

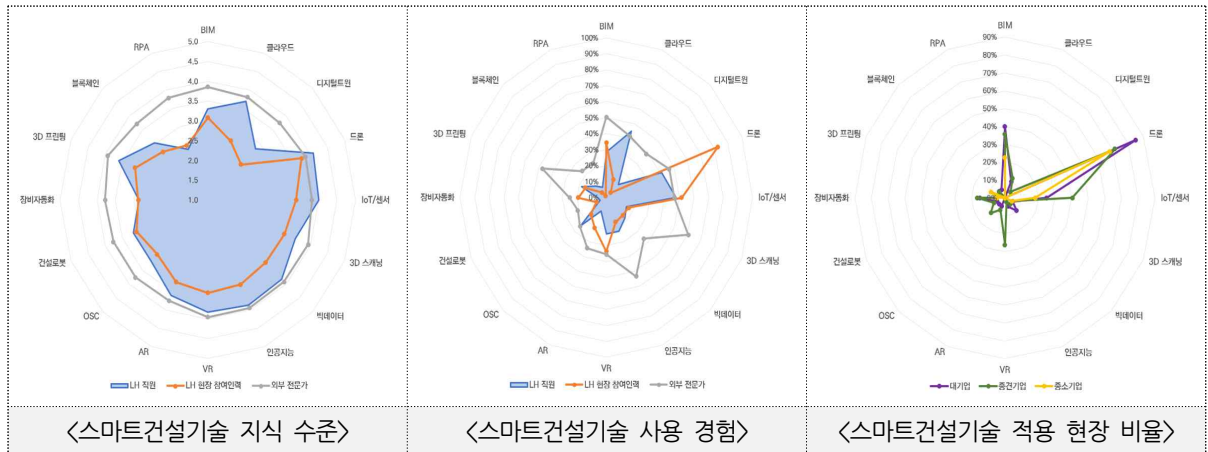
- LH 시설공사 효율화를 위해 “스마트 시공기술 기반 건설생산 혁신 방안”을 마련하고, 점진적 건설산업 체질 전환 및 공공부문 스마트건설 실현 기여
 - 현장 내 자동화, 무인화를 통해 생산시스템 전환을 가속화하여, 인력 부족, 부실·재해 리스크 등 현안 해결방안을 모색하고, 대외 참여자와 개발사 연계를 통해 건설산업 패러다임 전환에 기여
- 상기 목적 달성을 위하여 아래와 같이 세부 목표를 설정함
 - ① LH 건설공사에 대한 스마트 시공기술 적용성 평가를 기반으로 적용방안 수립
 - ② 스마트 시공기술 기반 중장기 생산시스템 혁신 추진전략 마련 및 기대효과 검토

3. 연구의 내용

- 연구의 내용을 다음의 3가지로 구분하여 연구를 수행함

현황검토 국내외 스마트 시공기술 관련 정책 동향 및 현황 분석

- 국내외 건설시공 자동화, 무인화 관련 정책 동향 및 시장 검토
 - 건설분야에서 적용가능한 스마트 시공기술 정의 및 분류
 - 국내외 생산체계 전환을 위한 스마트건설 관련 정책 추진 경위 및 구체적 내용 검토
- 스마트 시공기술 개발·적용 현황 검토 및 미래기술 예측
 - 건설공사 시설물 유형별, 참여자별 스마트 시공기술 활용 현황
 - 국내외 건설분야 스마트 시공기술 관련 기술 개발 업체 동향 파악
 - 현장 작업 자동화, 무인화 등 스마트화 적용 가능 타 분야 기술 검토
- 스마트 생산시스템 주요 적용 사례 조사
 - 국내외 건설공사 스마트 시공기술 적용 사례 검토, 시사점 발굴
 - 주요 공공부문 발주기관 기술별 적용 검토 사례 조사
 - 민간부문 선도기업 기술 개발 및 적용 사례 조사
 - 국내외 성공적 추진 사례에서의 기술 내용, 적용 환경 검토



[그림 1-1] LH 내부 스마트 건설기술 관련 인식과 적용 현황

요구분석 건설공사 작업별 스마트 시공기술 적용성 평가 및 수요 조사

- 시공단계 공종·작업별 스마트 시공기술, 생산시스템 적용성 검토
 - 건설로봇, 3D 프린팅, 장비자동화 기술의 적용분야 검토
 - 단지건설공사, 주택건설공사의 일반적 분류체계 상의 작업 수준에서 파악
- 미래 건설 생산시스템 구상
 - 현행 생산방식으로부터 완전 자동화, 무인화가 실현된 건설 현장, 공장 미래상 검토
 - 생산시스템 전환에 따른 공종, 작업의 양상 변화 추적
- 기술 적용과 확대를 위한 기술적, 제도적 요구사항 조사 및 주체별 역할 정의
 - LH 건설공사에 적용하는 경우 요구되는 물리적, 제도적 인프라 확인
 - 스마트 시공기술 활용 주체, 관리 주체 등 공사 참여자별 역할 정의

전략수립 스마트 시공기술 기반 중장기 건설공사 생산시스템 혁신 추진방안 작성

- 총괄 전략 및 단기/중장기 실행과제 정리
 - LH 건설공사 생산시스템 혁신의 전략, 실행과제 설정
 - 단기, 중장기 전략의 단계별, 연차별 목표(지표), 세부 실행계획, 추진방법 정의
 - 기술 개발 현황, 적용 가능성, 기대효과에 따라 도입전략 검토
 - 중장기 전략의 시행을 위한 인프라 확보방안 검토

- 개별 발주기관 차원에서 확장하여 건설산업 내 생태계 조성에 필요한 사항 개략 검토
 - 기술 실증(테스트베드) 지원방안, 민간부문과의 협력관계 구축방안, 행사 공동개최 방안 등 포함
- 건설공사 생산시스템 혁신 기대효과, LH사업 및 산업 영향 분석
 - 생산시스템 혁신에 따른 기대효과 정리
 - 스마트 시공기술의 점진적 확대 적용에 따른 LH와 건설산업 내 영향 검토

4. 연구의 방법과 절차

4.1 연구수행 방법

■ 문헌조사

- 스마트건설, 생산체계 전환 기술 및 정책 동향 등 관련 자료 조사
- 국내외 주요 추진 현황, 적용 사례 관련 문헌 정리

■ 설문조사 및 인터뷰

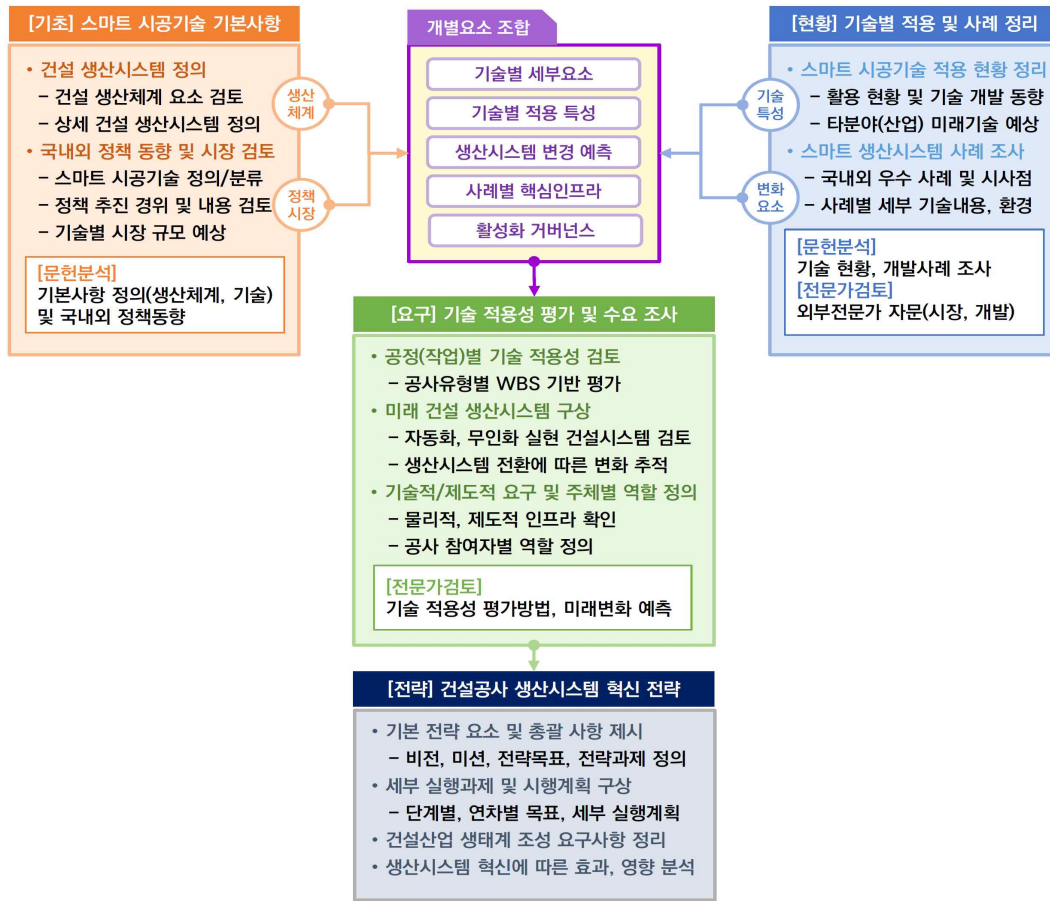
- 건설업계 스마트 생산체계 관련 건설사업자, 개발사 등 부문별 사외 전문가 인터뷰
- 스마트 시공기술 적용 현황, 생산체계 전환 관련 업계 의견 검토
- 민간부문 대형 건설사업자, 공공부문 주요 발주기관 조사

■ 실무부서 협력 및 사내외 전문가 활용

- 연구 진행에 따라 현황 조사, 데이터 확보 등 유관부서 협력 및 사내 기술인 의견 수집

4.2 연구수행 절차

- 본 연구를 수행한 전체 절차를 도식화하면 [그림 1-2]와 같음



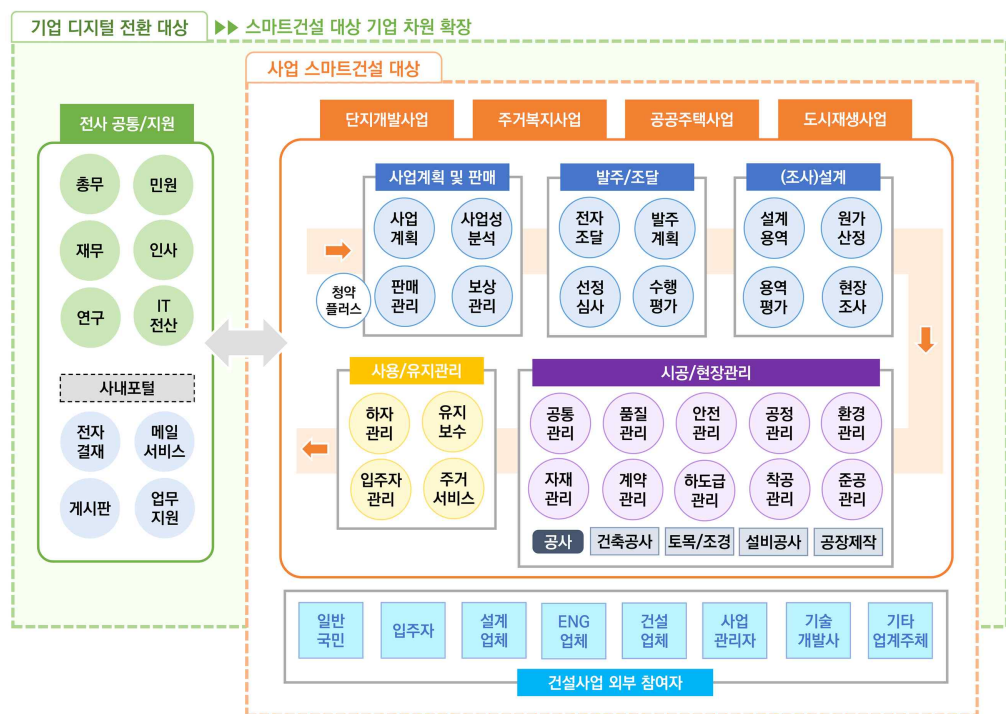
[그림 1-2] 연구 총괄 프로세스

제2장 스마트 시공기술 관련 이론과 정책 동향

1. 스마트건설의 개념과 기술 분류

1.1 스마트건설의 개념

- 스마트건설은 “전통적인 건설기술에 첨단 디지털 기술을 접목·활용함으로써 건설공사의 생산성, 안전성, 품질 등을 향상시키고, 공사 모든 단계의 디지털화, 자동화, 공장제작 등을 통해 산업의 발전을 목적으로 하는 건설방식”을 의미함
- 동일한 맥락에서 『스마트건설기술 활성화 지침』(2021.11.30)에서는 “스마트건설기술”을 공사기간 단축, 인력투입 절감, 현장 안전 제고 등을 목적으로 전통적인 건설기술에 로봇틱스, AI, BIM, IoT 등의 첨단 디지털 기술을 적용함으로써 건설공사의 생산성, 안전성, 품질 등을 향상시키고, 건설공사 모든 단계의 디지털화, 자동화, 공장제작 등을 통한 건설산업의 발전을 목적으로 개발된 공법, 장비, 시스템 등으로 정의함



[그림 2-1] 건설기업 스마트건설 범위 검토

- [그림 2-1]은 건설사업 수행을 본원적 활동으로 하는 조직 내에서 개별사업부터 기업차원까지의 스마트건설 대상을 도식화한 것이며, [표 2-1]은 스마트건설에 대한 기본적인 속성을 보여줌

[표 2-1] 스마트건설의 속성

구분	내용
정의	• 전통적 건설기술에 첨단 디지털 기술을 접목·활용함으로써 건설공사의 생산성, 안전성, 품질 등을 향상시키고, 모든 단계의 디지털화, 자동화, 공장제작 등을 통해 산업의 발전을 목적으로 하는 건설방식
주요기술	• 클라우드, 네트워크, 디지털트윈, IoT, 드론, 로봇, 3D 프린팅, 3D 모델링도구 등
목표	• 생산성·안전성·품질제고, 비용절감, 인력대체 등
명칭	• 국외에서는 Digital Construction, Construction 4.0, i-construction, IDD 등 사용
적용범위	• 주로 건설사업에 동반되는 업무와 건설기술이 개입되는 사업을 대상으로 함 • 기업(조직), 산업 포함 가능 - 기업 전체 수준, 조직, 인력 등까지 포괄 - 산업차원의 스마트건설 생태계 용어 사용
유형	• 디지털화, 지능화, 자동화, 모듈화 등
기타	• 동일한 디지털 기술을 적용함에 따라 디지털 전환의 목표와 같이 비즈니스 모델, 가치사슬, 생태계에 있어서의 변화 지향

자료 : 관련 자료 종합 정리

1.2 스마트건설기술 유형과 분류

- 건설사업 각 단계에서의 스마트건설기술 역할이 증대되고 있으며, 빅데이터, VR·AR, BIM, 추적기술, 3D 스캐너, 드론, 센서 등 설계·엔지니어링, 시공, 운영단계별로 적용가능한 디지털 기술을 정리할 수 있음
- 『스마트 건설기술 로드맵』(국토교통부, 2018)에서도 첨단기술과 건설단계별 업무 사이의 연계를 확인할 수 있으며, 이를 [표 2-2]와 같이 정리할 수 있음
 - 건설단계는 계획 및 설계, 시공, 유지관리 등 3개로 구분함
 - 각 단계에서의 주요 업무를 나열하였으며, 스마트 시공기술이 적용되는 시공단계에서는 ‘작업영역’으로서 토공사, 구조체공사, 마감공사가 있고, ‘관리영역’ 중 자재 관리, 공정/기성관리, 안전관리 등에 있어 스마트 건설기술들의 복합적인 적용가능성을 검토하였음

[표 2-2] 첨단기술과 건설단계별 업무의 연계

단계	건설단계별 업무	BIM	VR/AR	드론	로봇/장비	영상인식	3D프린팅	자율주행	사물인터넷	센서	데이터/AI	디지털트윈	계
		8	3	4	5	3	1	2	3	3	5	2	
계획/설계	계획 및 각종 평가	●	●									●	3
	측량			●		●							2
	기본/실시설계	●									●		2
시공	토공사	●		●	●			●	●	●	●		7
	구조/골조공사	●			●		●						3
	부대/마감공사	●			●								2
	자재관리	●				●							2
	공정/기성관리	●	●	●	●	●							5
	현장 안전관리		●						●	●	●		4
유지관리	시설물 점검/진단			●	●			●	●	●	●		6
	유지관리 계획	●									●	●	3

- 송상훈 등(2024)은 전체 스마트 건설기술을 플랫폼기술, 데이터수집기술, 데이터분석기술, 데이터시각화기술, 스마트 시공 기술, 특화기술 등 6개 영역으로 분류함
 - [표 2-3]은 전체 분류 중 스마트 시공 해당 기술들의 구성요소와 기술 발전 방향을 보여줌
 - [표 2-4]에서는 전체 스마트 건설기술에 있어 기술별 기본적인 특성과 제공가능한 기능을 정리하였음

[표 2-3] 스마트 시공기술의 구성 요소와 발전 방향

유형	기술명	구성요소	기술 발전 방향 및 유망기술
스마트 시공기술	로봇틱스	제어·교시기술, 센서·인식기술, 이동·네이게이션기술, 통신·네트워크기술	AI 강화, 원격 제어, 협동, 반자동, 완전 자동 로봇 등으로 기술 개발
	자동화장비	측정장치, 해석장치, 입력장치, 출력장치, 제어기, 조종장치	완전 무인화 지능형 장비, 기계 자율이동, 다수 기계 통합운영 등 기술 개발
	3D 프린팅	장비·기계(입찰, 적층, 소결 등), 재료(콘크리트, 플라스틱 등), 시공 방법,	소재·장비·소프트웨어 고도화, 지능형 통합 플랫폼 확보
	OSC	공장제작 환경, 운송장비, 양중장비, OSC 공법 적용 시설물 설계기술	표준화, 공장 자동화에 따른 대량 생산, 생산성 증대 도모, 고성능화, 제품화

자료 : 저자 작성

- 스마트 시공기술은 기술의 발전에 따라 타 유형의 스마트 건설기술과 융·복합되어 고도화되는 양상을 보이게 됨

[표 2-4] 스마트 건설기술 기본 분류 및 기능

유형 구분	핵심 기능	단위 기술명	기술 기본 특성			제공 기능
			기반 기술	융복합 기술	장비 연계	
플랫폼 기술	통합 기술	BIM	●			3D 모델링, 도면생성, 설계공유플랫폼
		클라우드	●			컴퓨팅서비스, 데이터공유, SaaS, PaaS
		디지털 트윈		●		초연결, 초지능, 초성능, 초실감
		메타버스		●	●	초실감
데이터 수집 기술	연결 기술	IoT		●	●	초연결, 데이터수집, 서비스전달, 통합관리(초융합), 초지능
		드론		●	●	접근(계약없음, 위치정보), 경로설정, 촬영/인식/수집, 전송
		3D스캐너	●		●	촬영, 형상 측정 (포인트 클라우드)
		CCTV	●		●	촬영, 객체추적, 상황인식, 전송
		스마트센서	●		●	감지, 정보처리, 전송(통신)
데이터 분석기술	지능화 기술	빅데이터	●			수집/유통, 저장/처리/관리, 분석/예측, 시각화/활용
		AI	●			분석/예측, 자동화
데이터 시각화 기술	공간 기술	VR	●		●	시뮬레이션
		AR		●	●	현실에 가상의 정보 제공
		MR		●	●	가상과 현실의 상호작용 지원
스마트 시공기술	생산 기술	로봇틱스		●	●	무인화, 자동화, 효율화, 안전성, 정밀도(품질)
		자동화장비		●	●	무인화, 자동화, 안전성
		3D 프린팅		●	●	무인화, 자동화, 효율화, 안전성, 정밀도(품질)
		OSC	●	●	●	효율화, 안전성, 정밀도(품질)
특화 기술	부가 기술	RPA	●			자동화, 효율화
		블록체인	●			정보보호, 신뢰성
		안전장비		●	●	안전성

자료 : 저자 작성

2. 스마트 시공기술 정의와 특징

2.1 스마트건설과 건설자동화

- 스마트건설기술의 활용을 통해 건설현장 전면 자동화를 계획할 수 있으며, 이 때 건설 자동화는 넓은 의미에서 ‘건설 장비의 자동화된 건설 작업 지원과 더불어 통신 기술과 소프트웨어적인 기술을 적용한 건설 관리, 현장 무선관리 체계, 시공 감리까지 포함하여 모든 건설 활동’을 범위로 할 수 있음
- 일반적으로 건설자동화는 IT기술을 이용한 건설 자동화와 건설현장 관리 보다는 열악한 작업 환경과 인력 의존도가 높은 건설 공사의 현장에서 근로자 안전문제 및 작업환경 개선과 생산성 향상을 위한 방법으로써 인력 지원이나 대체를 위한 기계적인 장비나 설비의 적용으로 한정할 수 있음
- 건설자동화에는 ①굴착기, 도로포장장비, 크레인 등에 부착하여 사용하는 자동화 도구, ②건설작업을 자동으로 수행할 수 있는 독립적인 기계장비와 로봇 시스템, ③건설현장의 관제, 모니터링, 관리데이터 수집 등을 위한 로봇 등 다양한 유형의 기계·설비가 포함됨

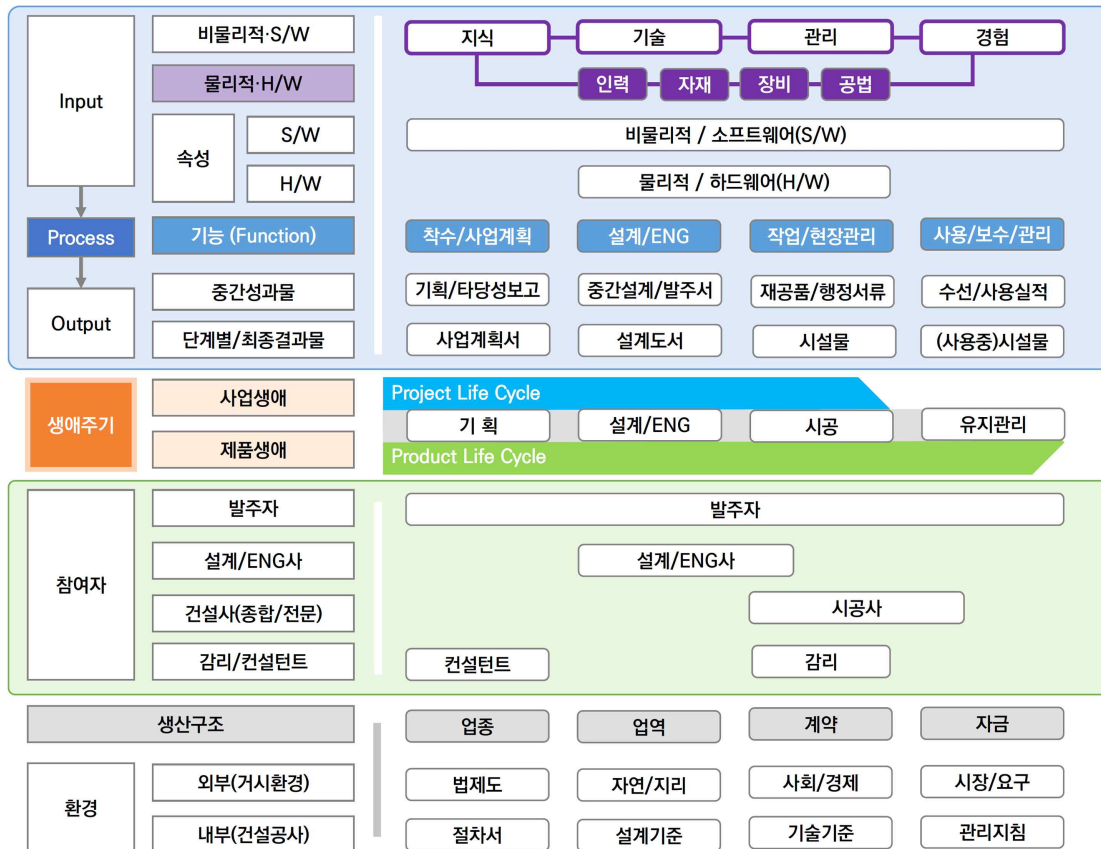
2.2 스마트 시공기술의 개념과 논의대상

- 스마트 시공기술은 스마트 건설기술 또는 디지털 요소기술 가운데 “시설물 건조와 관련되어 물리적인 작업을 동반하는 건설 생산과 관련된 기술”을 의미함
- 앞서 [표 2-4]의 분류에 따르면 생산기술에 해당하는 로봇틱스, 자동화장비, 3D 프린팅, OSC 공법 등이 해당됨
- 아울러 본 연구에서는 직접적으로 작업과 관련된 기술로 스마트 시공기술로서의 검토 대상을 제한하고자 하였음
 - 예를 들어 건설로봇에는 크게 SPOT과 같은 순찰로봇, 무인드론 관제, 수중드론 등과 같이 현장관리를 지원하는 로봇과 인력을 대체하여 작업을 수행하는 용접로봇, 물류로봇 등이 폭넓게 해당될 수 있음
 - 여기서는 후자에 해당하는 현장시공로봇만을 검토 대상으로 하였으며, 전자의 현장관리 지원 로봇은 전체적인 스마트 생산 플랫폼 구축을 논의하는 과정에서 언급될 수 있음

2.3 건설 생산체계와 스마트 시공기술

1) 건설 생산체계

- 건설 생산체계는 작업 또는 업무라고 하는 처리(process)를 중심으로 정립할 수 있음
- [그림 2-2]에서 보는 바와 같이 전체적인 건설 생애주기는 사업(project) 측면과 제품(product) 측면으로 구분하여 정리할 수 있으며, 이를 기준으로 건설의 흐름을 생산체계 개념에 따라 확인할 수 있음
- 스마트 시공기술은 입력요소(input) 가운데 물리적인 속성을 지닌 인력, 자재, 장비, 공법과 관련이 있음
- 이러한 물리적 요소들에 있어 인력의 대체, 무인화, 자재의 변경, 장비의 자동화, 공법의 신규화 등을 도모하는 것임

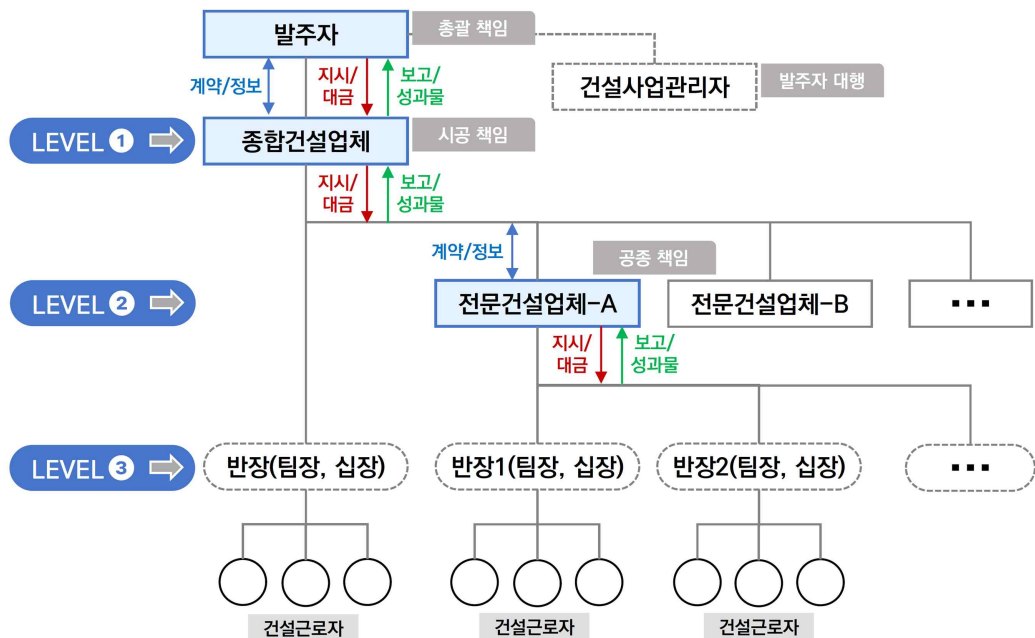


[그림 2-2] 건설생산체계와 구성요소

- 아울러 스마트 시공기술 도입으로 물리적 입력 요소에 변경이 생기는 경우, 작업의 수행을 지원하는 지식, 기술, 관리, 경험 등을 바탕으로 효율적인 방안을 마련하는 것이 요구될 수 있음
- 도식화된 건설 생산체계에서 하단의 영역은 인프라에 해당하는 것으로 제도 상의 생산구조, 외부 거시환경과 건설공사에 한정하여 적용되는 내부 기준이 포함됨
- 스마트 시공기술의 원활한 적용을 위해서는 이러한 인프라 측면의 요소들이 정비되어 관련 내용들이 준비될 필요가 있음

2) 현장 내 작업 시행 위계

- 스마트 시공기술은 시공단계 건설현장 또는 현장 외 장소에서 작업이 이루어지는 것과 관련이 있으며, 그에 따라 현장 내에서 작업 수행과 관련된 조직적 위계를 확인하고 스마트 시공기술 적용이 가져올 변화를 검토함
- 자동화장비는 건설근로자에게 다소의 변화를 동반하면서 장비에 한정하여 변화를 수반하고, 건설로봇은 기본적으로 건설근로자 수준에서의 대체를 가져옴
- 3D 프린팅은 기술력을 보유한 전문업체의 참여자 전제가 된다는 점에서 구조체 공사 담당 작업조 또는 전문건설업체가 대체될 수 있음



[그림 2-3] 현장 내 생산 참여자와 상호 관계

2.4 스마트 시공기술의 특징

1) 기술 유형 분류

- 스마트 시공기술 4가지는 해당 기술의 결과물이 최종 시설물에 포함되는지, 생산활동 시점에 임시적 도구로 사용되었는지 여부에 차이가 있음

■ 유형 A: OSC 공법과 3D 프린팅

- OSC 공법과 3D 프린팅의 경우 작업 결과물이 시설물의 일부가 되고, 계획과 설계단계에 해당 기술의 적용 여부가 결정될 필요가 있음
 - 이러한 두 가지 기술의 적용여부 결정과 적용 시의 모니터링 주관은 발주자(건축주, 시행자)가 되며, 이를 유형 A로 분류함

■ 유형 B: 건설로봇과 자동화장비

- 건설로봇과 자동화장비의 적용은 종합건설사 또는 전문건설사가 주관하고, 발주자가 제시하는 기준이 적합하도록 진행하게 되며 이를 유형 B로 분류함
 - 건설로봇은 시공단계에 독립적으로 적용될 수도 있으나, 경우에 따라 로봇의 원활한 활용을 위해 설계에서 필요한 사항은 반영할 수도 있음

[표 2-5] 스마트 시공기술 특성 비교

구 분	유형 A		유형 B	
	OSC	3D 프린팅	건설로봇	자동화장비
설계포함 여부	●	●	▲	▲
기술적용 주관	발주자	발주자	종합·전문건설사	전문건설사
인력대체 효과	하	중	상	중

2) 건설업 기능인력의 속성과 자동화 영향

■ 건설 기능인력의 속성

- 건설산업에서 기능인력이 수행하는 생산활동은 직접 생산 활동, 간접 생산 활동, 그리고 비생산 활동으로 분류할 수 있음
 - 각 활동은 직접 생산 활동이 50%, 간접 생산 활동과 비생산 활동이 각각 25% 수준으로 구성되어 있음

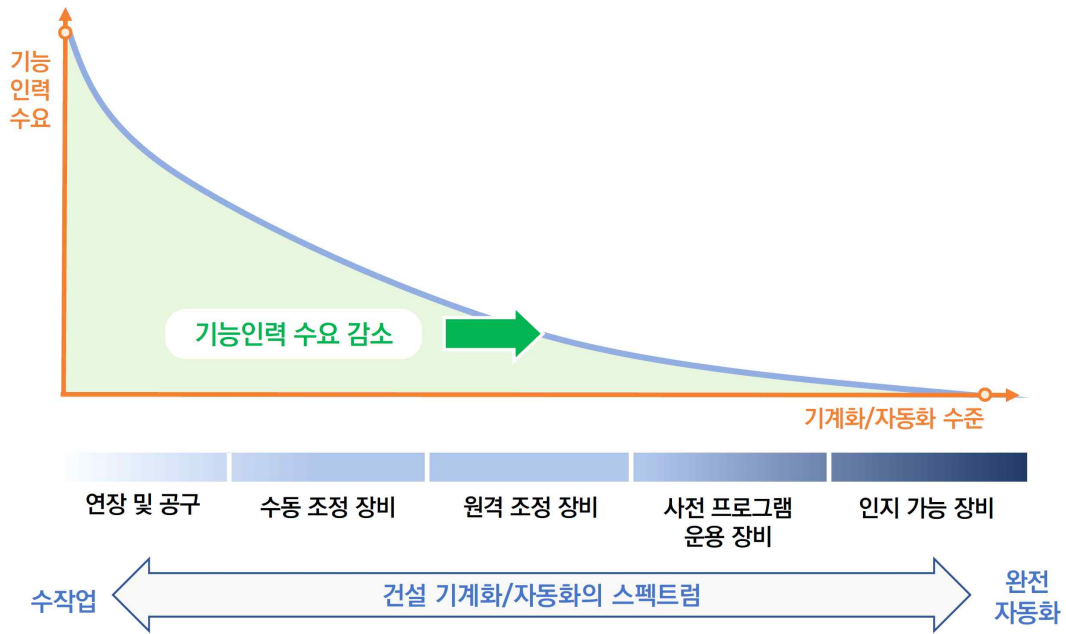
- 그에 따라 75%에 달하는 직접 생산 활동, 간접 생산 활동에서 건설자동화를 추진하여 인력 대체 효과와 기능인력 수요 절감을 도모하는 방안을 검토할 수 있음
- 장비의 활용도가 생산성에 미치는 영향에 대해 다수의 선행 연구가 논의한 바 있었으며, 동일한 작업에 대해 충분한 장비가 활용되는 경우와 그렇지 못한 경우의 생산성 비교 시 약 15% 정도의 차이가 있는 것으로 나타난 바 있음

[표 2-6] 기능인력과 활동의 분류

분 류	기준 및 예시
직접 생산 활동	건축물이 완성에 직접 관계되는 가공 및 조립 등의 작업 - 예) 콘크리트 타설, 거푸집 조립, 철근 조립, 칸막이벽 공사 등
간접 생산 활동	건축물의 완성에 간접적으로 필요한 작업 - 예) 청소, 자재 운반, 도면 검토, 작업 토론, 작업장 이동 등
비생산 활동	건축물의 완성에 비생산적인 작업 - 예) 작업 대기, 공구 없이 이동, 휴식

■ 건설자동화와 인력 수요

- 건설자동화는 ①완전 수작업에서부터 연장, ②공구를 사용하는 단계, ③수동 조정 장비를 사용하는 단계, ④원격 조정 장비를 활용하는 단계, ⑤사전 프로그램 설정으로 운용되는 장비를 사용하는 단계, ⑥장비 자체가 주변 환경을 인지하여 작업을 하는 단계까지 진행될 수 있음
- 이러한 스펙트럼 사이에서 기능인력의 수요와 공급이 이루어지게 되는데, [그림 2-4]에서 보는 바와 같이 현상이 완전 자동화 수준에 이르게 되면, 기계장비를 운용하는 인력을 제외한 순수 건설근로자를 수급할 필요가 없어질 수 있음
- 본 연구는 인력을 포함한 생산체계의 변동을 다루게 되며, 건설로봇, 자동화장비, OSC 등에 있어 인력 대체 양상과 영향도는 기술별로 상이할 수 있음
- 향후 건설근로자 수급이 원활하지 않을 수 있으며, 현재 수준 또는 그 이상의 매출, 기성 규모를 유지함에 있어 줄어드는 근로자를 스마트 시공기술을 통해 대체할 수 있을 것으로 판단됨
- 건설산업에서 고도의 기계화, 자동화 실현이 어려운 이유는 건설의 복잡화, 다양화, 작업에 대한 낮은 예측가능성 등을 들 수 있으며, 이를 종합하면 [표 2-7]과 같음



[그림 2-4] 건설자동화와 인력 수요의 변화

[표 2-7] 건설산업에서 기계화/자동화 저해 요인

영역		저해 요인
[T] 기술적 측면	T1	건물의 종류와 형태가 다르고, 반복성이 없음
	T2	개별적인 설계로 반복성이 적음
	T3	제조업과는 달리 대형공사이고, 중량물을 사용함
	T4	공사가 이루어지는 곳이 일정하지 않음
	T5	한 공사장에서 동시다발적으로 작업이 이루어짐
	T6	설계·시공시 시공측에서 설계측으로 정보 피드백이 불충분함
	T7	작업내용이 불명확하여 불안정한 현장 상태에서 작업원의 판단에 많이 좌우됨
[M] 경영적 측면	M1	부가가치가 적고, 고급 장비의 사용이 곤란함
	M2	작업 시간의 제한이 강하고, 설비 가동률이 낮음
	M3	낮은 자동화·기계화 인식수준, 높은 하도급자 의존도, 기업 고유 기술·개발 육성이지 부족
[S] 구조적 측면	S1	자동화·기계화에 관련된 기술자가 적음
	S2	건설공사비에 연구개발비를 포함시키기 힘든 상황임
	S3	자동화·기계화의 추진에 대한 공공의 지원이 약함

3. 국내외 생산체계 전환 관련 정책 동향

3.1 스마트건설 관련 국내 정책

- 국가차원 디지털 전략과 산업 디지털 전환 계획은 과학기술정보통신부, 중소벤처기업부, 산업통상자원부 등이 주관하여 수립
- 국토교통부는 2010년대 후반부터 다양한 정책을 통해 스마트건설 실현을 도모하였으나, BIM 등 핵심기술별 활성화 전략 부재 등에 따라 실제 현장의 적용 성과 미흡

[표 2-8] 스마트건설 관련 정부 정책 목록

추진 전략 (시점)	주요 내용
제6차 건설기술진흥 기본계획(2018~2022)	<ul style="list-style-type: none"> • BIM 활용 가상 시공(pre-con) 활성화 • 스마트건설 자동화 기술 2025년까지 개발 추진
스마트건설기술 로드맵 (2018.09)	<ul style="list-style-type: none"> • BIM 확산 여건 조성 주력, 툰키 제도화 추진, 설계도서 작성 지침 등 기준 개정 • BIM 설계 의무화 대상 제시 및 공공사업 단계적 확대
공공건설 분야 BIM 로드맵 및 활성화 전략(2018)	<ul style="list-style-type: none"> • 공공분야에서 공통적으로 활용할 수 있는 국가 차원의 BIM 활용 전략 제시 • 4단계 성숙도에 따라 제도, 인력, 기술, 의무화 등 4개 영역 실행계획 정의
건축 BIM 활성화 로드맵 (2020.12)	<ul style="list-style-type: none"> • 건축분야 BIM 정책방향 제시, 공공건축물 BIM 의무화, 민간 설계 지원 확대 • 발주처별 가이드라인 제개정 및 BIM 모델 제출 지침 마련 등 추진
BIM 기반 디지털 전환 로드맵 (2021.06)	<ul style="list-style-type: none"> • 2030년까지 전분야 BIM 활용, 설계 자동화율 100%, DX 전환율 80% 목표 • 디지털 전환을 위한 BIM 관련 제도 정비, 기술개발 촉진, 인력 양성 방안
스마트건설기술 활성화 지침 제정(2021.10)	<ul style="list-style-type: none"> • 융복합 건설기술 보급·활용 촉진, 스마트건설기술 활성화를 통한 산업발전 도모 • 건설공사 발주 시 발주청의 스마트건설기술 활용 적극 검토 조항 명시
스마트 건설 활성화 방안(2022.07)	<ul style="list-style-type: none"> • 2030년까지 전과정 디지털화·자동화, 2026년부터 500억 이상 공사 BIM 적용 • 건설산업 디지털화, 생산시스템 선진화, 스마트건설 산업 육성 등 전략 추진
제7차 건설기술진흥 기본계획('23~'27)	<ul style="list-style-type: none"> • “첨단기술 확산을 통해 다시 도약하는 건설산업”을 비전으로 5대 전략 추진 • ‘디지털 전환을 통한 스마트건설 확산’은 『스마트 건설 활성화 방안』 내용과 유사

자료 : 각 정책자료 종합 정리

- 최근에는 『건설기술 진흥법』의 개정이나 『스마트건설 관련 특별법』을 제정하고자 하는 움직임이 있었으며, 2023년 7월 31일 상정된 『건설기술 진흥법』 일부개정 법률안은 다음의 취지를 중심으로 개정안을 제시함
 - 스마트 건설기술의 활용 촉진과 활성화를 유도하기 위한 규제 개선 및 지원 확대
 - 기술 개발 연구지원, 전문인력 양성 등 스마트 건설사업 활성화 제도적 기반 마련

3.2 주요 정책에서의 스마트 생산 관련 내용

■ 『스마트 건설기술 로드맵』과 『스마트 건설 활성화 방안』의 관련 내용

- 『스마트 건설기술 로드맵(2018)』은 2025년까지 스마트 건설기술 활용기반 구축, 2030년까지 건설 자동화 완성이라는 목표 하에 핵심기술의 단계별 달성목표 제시
 - 아울러 목표 달성을 위한 이행전략을 ①민간 기술개발 유도, ②공공 역할 강화, ③ 스마트 생태계 구축 등 3개 영역에 대해 추진과제 형식으로 정리함

[표 2-9] 『스마트 건설기술 로드맵』 핵심기술과 이행전략

비전	스마트 건설기술 육성을 통해 글로벌 건설시장 선도			
목표	2025년 스마트 건설기술 활용기반 구축, 2030년 건설 자동화 완성			
2025년 계획 목표	건설 생산성	건설 안전성 향상	고부가가치 스타트업	
	50% 향상	사망만인율 1.66 → 1.0	500개 창업	
로드맵	단계	2025년	2030년	
	설계	드론측량, BIM 전면활용	자동 지반모델링, 설계자동화	
	시공	자동장비 활용, 가상시공	로봇시공, AI 공사·안전관리	
	유지관리	IoT·드론 모니터링, 빅데이터 구축	로봇 자율진단, 디지털트윈 관리	
단계	중점분야	핵심기술	2025년 목표	2030년 목표
설계 단계	BIM기반 스마트 설계	드론 기반 지형·지반 모델링 자동화	형상 모델 및 지반속성 정보 연계	AI 기반 BIM 연계 지반 모델링 자동화
		BIM 적용 표준	데이터 교환 공유를 위한 BIM 표준 구축	축적된 BIM 빅데이터의 활용을 위한 표준 구축
		BIM 설계 자동화	건설 전단계 고려 BIM 설계 최적화	AI 기반 BIM 설계 자동화
시공 단계	건설기계 자동화 및 관계	건설기계 자동화	실시간 머신 가이던스, 건설기계 자율이동	건설기계 자동화 (AI를 활용한 건설기계 통합 운영 및 관계)
		건설기계 통합운영 및 관계	센서 IoT 기반 정보 실시간 수집을 통한 건설기계 통합운영	
	공정 및 현장관리 고도화	시공 정밀제어 및 자동화	조립시공 정밀제어, 부분 자동화(정밀정합, 이음부타설 등)	로봇 등을 활용한 조립시공 자동화
ICT 기반 현장 안전사고 예방		실시간 센싱 기반 안전관리 (Smart Wearable, 센서 등)	예방적 통합 안전관리 (위험 예측, 장비·인력 통합관계)	
유지 관리 단계	시설물 점검 진단 자동화	IoT 센서 기반 시설물 모니터링	대규모 대용량 IoT 정보수집 분석	초연결형 IoT 정보수집 분석
		드론·로봇 기반 시설물 진단	다기능 드론 및 로봇을 활용한 시설물 상태 진단	로보틱드론을 활용한 시설물 자율 점검 및 진단
	디지털트윈 기반 유지관리	시설물 정보 통합 및 표준화	건설 전단계 개방형 통합 DB 및 빅데이터 구축	디지털트윈 기반 스마트 시설물 유지관리
AI 기반 최적 유지관리	빅데이터 AI 기반 예측형 유지관리			

- 2018년에는 시공단계에 있어 ‘건설기계 자동화’와 ‘건설기계 통합운영 및 관제’ 측면에서 2025년, 2030년의 목표를 설정함
- 나아가 『스마트 건설 활성화 방안』(2022)에서는 ‘생산시스템 선진화’라는 전략 하에서 ①건설기계 자동화 및 로봇 도입, ②제조업 기반 탈현장건설 활성화 등을 추진과제로 설정하였음

[표 2-10] 『스마트 건설 활성화 방안』 중 “생산시스템 선진화” 주요 내용

전략	추진과제	세부 사항
생산시스템 선진화	① 건설기계 자동화 및 로봇 도입	<ul style="list-style-type: none"> • 건설기준 등 관련 제도 정비 • 기술 실증, 검증 시험장 구축 • 공공기관 적극 활용 유도 • 상용화 지원
	② 제조업 기반 탈현장 건설(OSC) 활성화	<ul style="list-style-type: none"> • 시장초기 붐업 공공발주 확대 • 민간 확산 제도 정비(인센티브, 기준 정비, 인정제도 개선 등) • 기술개발 지원, 실적관리 강화, 인식 개선 활동
	③ 스마트 안전장비 확산	<ul style="list-style-type: none"> • 시공부문 안전장비 지원대상 확대 • 안전장비 비용 계상 기준 마련 • 유지관리 안전점검 첨단장비 사용

■ 『제2차 국토교통과학기술 연구개발 종합계획(2023~2032)』

- 제2차 국토교통과학기술 연구개발 종합계획(2023~2032)에서는 5개 추진 전략 중 지속가능한 국토교통 기반시설 고도화 전략에서 “스마트 디지털 건설”을 추진하기로 하고, ①자동화 및 로봇틱스, ②고효율 스마트 재료, ③건설 프로세스의 제조업화, ④ 건설 디지털화 등 4개 영역을 설정함

[표 2-11] ‘자동화 & 로봇틱스’ 분야 주요 내용

구분	주요 내용	
총괄	<ul style="list-style-type: none"> • 건설 전 공정의 디지털화를 통해 지능화·자동화된 제작, 이동, 가설, 검측 및 안전관리를 위한 로봇 및 제어·관제 기술 확보 - 로봇, 자동화 기술의 현장 적용을 위한 제도(인증, 관리 기준 등) 확보, 민간기업의 기술개발 및 현장적용, 전문인력 양성 등을 포함, 건설산업 전반의 활용성 제고 	
분야-1	공정 자동화	<ul style="list-style-type: none"> • 디지털화된 공정별 정보를 바탕으로 제작, 시공, 관리에 대한 건설장비의 무인화, 자동화 및 관제 구현
분야-2	재해위험 대응	<ul style="list-style-type: none"> • 근로자, 시민의 중대재해 방지를 위해 무인·원격 수행이 가능한 로봇 기반으로 고위험 작업의 무인화 추진
분야-3	생산성 향상	<ul style="list-style-type: none"> • 건설현장의 노동생산성 향상을 위해 작업자의 신체적 부담 완화 및 단순 반복 공정의 효율성 향상

- 그 중 '자동화 & 로봇틱스' 분야와 '건설 프로세스의 제조업화(모듈화)'의 추진 방향은 각각 [표 2-11], [표 2-12]와 같음

[표 2-12] '건설 프로세스의 제조업화' 분야 주요 내용

구분	주요 내용	
총괄	<ul style="list-style-type: none"> • 부재·모듈 제작부터 자동화 시공까지 제조업 프로세스를 도입한 탈현장 건설(OSC, Off-Site Construction) 기술 개발 추진 - (건축) PC 공동주택, 중고층 모듈러 건축기술, 주택/비주택 공공발주 활성화 등 - (토목) 교량 일부 부재(바닥판 등) 위주에서 교량 및 도로시설물 확대 및 표준화 등 	
분야-1	부재 제작·설치	<ul style="list-style-type: none"> • 부재 표준화, 생산설비 설치·운영, DfMA 기반 설계, 제작·설치 및 성능 평가
분야-2	이동형 모바일 팩토리	<ul style="list-style-type: none"> • 구조물 대응 가변형 거푸집, 부재 양생·시공 자동화 기술 등 이동형 부재 제작·시공 팩토리(Factory)
분야-3	테스트베드	<ul style="list-style-type: none"> • OSC 기반 건축·토목 구조물에 대한 부재 설계·제작·이동·시공 등 소과정 현장 적용성 검증을 위한 테스트베드 추진

- 아울러 국토교통 12개 STAR 프로그램을 지정하였으며, 건설산업의 디지털 전환과 관련하여 디지털 트윈 공간정보, 스마트 건설이 STAR 프로그램으로 선정됨
 - 스마트 건설은 건설·SOC 시설물의 전 생애주기 디지털화를 통해 건설산업의 ICT 기반 비즈니스 모델로의 전환을 위한 핵심기술이며, '건설 공정 제조업화 기술개발' 과 '건설 시공 및 장비 자동화 기술 개발'이 개별 영역으로 포함됨

[표 2-13] 건설경쟁력 확보를 위한 건설전주기 자동화 플랫폼 5.0 사업 중점기술 (시공단계)

연번	주요 내용	예산(억원)
중점기술-1	건설 현장의 고정밀 가상화를 통한 실사형 탈현장 디지털 협업기술	2,814
중점기술-2	로봇 중심 자동화 건설 기술	8,596
중점기술-3	클라우드 기반 설계/시공/유지관리 정보 공유 디지털 플랫폼 개발	3,360
중점기술-4	빅데이터 및 인공지능을 활용한 건축 설계 및 현장관리 기술개발	3,360
중점기술-5	데이터기반 건설 엔지니어링 인공 지능 설계 및 시공 자동화 기술	1,499
중점기술-6	건축 프로젝트 디지털 전환을 위한 설계/시공 솔루션 개발	2,997
중점기술-7	건설 현장에서의 작업자-로봇 협업 및 자동화/무인 시공 기술	8,596
중점기술-8	설계모델 기반 현장 계측을 위한 디지털트윈 기술개발	2,814
중점기술-9	로봇틱스 현장활용 설계 자동화 및 스마트 OSC 생산 라인 구축 기술	4,058
중점기술-10	디지털 트윈 기반 지능형 로봇 통합 관제 및 프로젝트 관리 플랫폼 구축	7,319

자료 : 국토교통과학기술진흥원(2023) 관련 중점기술로만 재구성

■ 국토교통 2050 미래기술 전략로드맵

- 당해 로드맵의 내용 중 ‘건설 경쟁력 확보를 위한 건설전주기(설계·시공·유지관리) 자동화 플랫폼 5.0’이 스마트 건설 추진과 직접적인 연관성이 있음
 - “디지털 플랫폼화: 무인화, 자동화, 자율화로 생산성 및 안전성 혁신”을 목표로 하는 디지털 대전환 영역에 포함되며, 중점기술 중 관련 기술은 [표 2-13]과 같음

■ 스마트건설기술 중장기 로드맵 수립¹⁾

- 스마트건설기술의 핵심 니즈에 기반하여 미래 유망기술을 파악하여 실용적이고 시의적절한 기술 기반의 중장기 로드맵을 수립하고자 하였음
- 스마트건설기술 핵심 니즈를 9가지로 구분하고 핵심 니즈를 기반으로 디지털화, 지능화, 자동화, 제조업화 등과 관련한 요소기술을 활용하여 단기, 중기, 장기적으로 구현 및 활용이 가능한 미래 유망기술분야 24개를 도출하고, 세부기술 44개를 매칭함
- 활용가능한 요소기술을 디지털화, 지능화, 자동화, 제조업화로 그룹핑하고 건설단계에 따라 니즈를 정리하였으며, 자동화, 제조업화 주요 내용은 [그림 2-5]와 같음

분야	건설 자동화	건설산업 제조업화
기술 분야	<ul style="list-style-type: none"> • 건설장비 자동화 • 3D 프린팅 • 건설로봇 • 기타 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 부재·모듈 설계 • 모듈 제작공정 자동화 • 부재·모듈 제작·조립 • 기타 기술
기술	건설로봇, 3D 프린팅	DFX, PnP, OSC
기획/설계	<ul style="list-style-type: none"> • 반복 수집·문서작업 자동화 	<ul style="list-style-type: none"> • DFX 기반 건설요소 설계 표준화 • 생애주기 고려 최적화 설계 • MEP PnP 시스템 현장 설치 자동화
시공	<ul style="list-style-type: none"> • 반복 수집·문서작업 자동화 확대 • 단순·복잡 작업 전자동화 확대 • 무인화 작업 공중 확대 • 원격제어 공사관리 • 현장 구조물·부재 3D 프린팅 • 중고층 3D 프린팅 	<ul style="list-style-type: none"> • 맞춤형 모듈 제작 • 생산 데이터 통합관리 (PLM) • PnP 시스템 현장 설치 자동화 • OSC 스마트팩토리 시스템 • 모듈 QA/QC 자동화 모니터링 • 모듈 야적/운송계획 자동화
운영/관리	<ul style="list-style-type: none"> • 반복 수집·문서작업 자동화 • 작업 무인화 	<ul style="list-style-type: none"> • 생산 데이터 통합관리 (PLM)

[그림 2-5] 사업단계 및 중점분야별 스마트 시공 관련 기술 니즈

1) 강고운 등(2025), 진경호(2024), 강고운 등(2024), 전영훈 등(2024), 이주희 등(2023) 등의 문헌 내용을 재정리함

3.3 LH 내부 스마트건설 혁신과제 추진

1) 내부 스마트건설 추진 총괄

- LH는 내부적으로 스마트건설 추진 담당부서에서 전체적인 추진 전략을 수립한 바 있으며, 전사적으로 디지털플랫폼 구축이 진행 중임
- 각 수요 부서는 단지분야 Civil BIM, 건축 BIM, 건설로봇, 스마트 안전장비, 영상기록 활용 등 기술별, 기능별 세부 전략을 수립하고, 단계적으로 기술 적용 확대 추진²⁾

2) 공공건설 품질혁신 전략 추진

■ 전략 수립 총괄

- 주택건설사업 시공단계에서 시도할 수 있는 디지털 기술의 활용방안에 대해서는 대표적으로 2023년 『공공건설 품질혁신 방안』의 내용을 언급할 수 있음
 - 국내외 모두 건설산업의 디지털 전환(DX)을 추진하고, 각 단계 참여주체들의 책임과 역할을 강화하는데 집중하고 있다는 배경 하에서 작성

■ LH 건설관리 체계 혁신의 방향과 내용

- 혁신방안을 통해 LH 건설품질에 대한 근본적인 국민 불신을 해소하면서 품질·안전 등 건설문화 혁신의 새로운 청사진을 제시하고자 하였음
 - ‘스마트한 LH’, ‘튼튼하고 안전한 LH’, ‘건설산업 선도 LH’ 등 3대 중점목표를 두고 심사, 설계, 시공, 감리, 사후관리 등 5개 단계에서의 품질·안전성 제고 과제 설정
- 총 5개 전략 가운데 다음 표와 같이 ‘건설풍토 혁신’과 ‘디지털 DX’에서 스마트 시공 기술과 관련된 실행과제를 정의하고 있음
- ‘건설풍토 혁신’ 전략에서는 OSC 공법, 로봇틱스, 건설장비 등을 통해 노동력을 절감할 수 있는 시공기술의 도입, 확산을 위한 과제를 검토함
- ‘디지털 DX’ 전략에서는 디지털 융합 시공, 스마트 관리, BIM 기반 플랫폼 구축 등 작업관리, 업무지원 등에 필요한 과제를 설정함
 - 디지털 융합 시공에 있어서는 AI와 IoT를 활용한 통합관계 플랫폼, 레미콘관리시스템, 무인건설장비 구축에 대해 검토함

2) 개별 기술 관련 적용 현황은 3장의 내용 참조

- 스마트 관리 영역에는 주요공종 시공확인 영상기록, 생성형 AI 기반 대화용 건설챗봇, 시공확인 효율화 등이 해당됨
- BIM 기반 플랫폼의 경우 BIM 활용 정보서비스, 공정과 비용이 추가된 nD 체계, 증강현실, AI, 3D 스캐닝을 활용한 검측 자동화 등을 검토함

[표 2-14] 『공공건설 품질혁신 방안』 중 스마트 시공 관련 과제(음영)

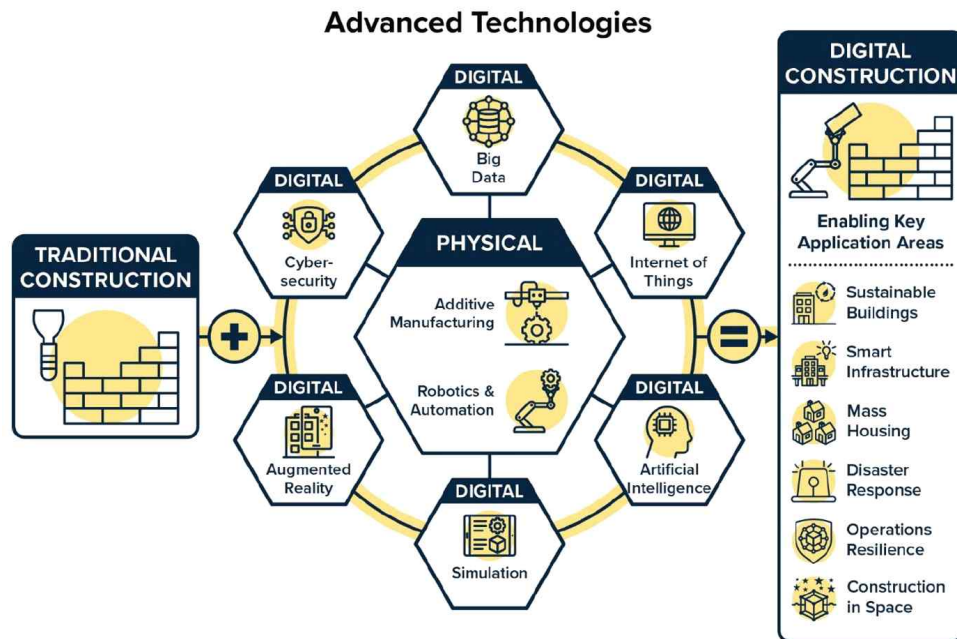
전략	추진과제	실행사항	세부 내용
건설품질 혁신	OSC/로봇 시공 등 노동력 절감형 시공기술 확산	① OSC 공법 확대	• 표준화, 품질기준수립, 품질인증 이행
			• PC 지하주차장 등 적용부위 및 규모 확대
			• 모듈러주택 공사비 현실화 및 물량 확대
			• 부대시설, 조경시설물 3D 프린팅 검토
		② LH로봇베드	• LH형 로봇 고도화 및 컨설팅
			• 공동주도 R&D 지원 사업 지속
③ 골조 공사	• 적용가능 로봇 발굴 및 시범사업 지속		
	• 로봇기술 적용 가점 부여 등 민간 참여 유도		
생산체계 혁신	① 원도급 직접생산; ② 감리용역 컨소개편; ③ 우수지급자재 사용		
건설 생태계 육성	① 공사기간; ② 공사원가; ③ 저가하도급 예방; ④ 현장 불법행위 근절		
디지털 DX	인력, 자재, 장비 디지털 융합 시공	① 스마트 통합관제	• AI 안전관리 플랫폼 - AI 기반 안전위험요소 사전 알림 시스템
			• IoT 공사관리 플랫폼 - 위치 모니터링, AR 공정관리, 가상시공
		② 레미콘 스마트 추적	• 레미콘 추적, 품질관리 시스템 개발
	③ 무인건설장비	• 건설장비 지능화 관련 센서 등 기술개발	
	영상기록, GPT, 디지털검측 등 스마트 관리	① 영상기록관리	• 주요공종 시공확인 영상기록 관리
		② 건설Chat GPT	• 머신러닝 기술 활용 대화용 건설챗봇
		③ 디지털 검측	• 모바일 앱 기반 페이퍼리스 검측 시스템
	• 주요업무 DB화로 실시간 모니터링 및 민원대응		
	BIM 기반 통합공정 및 품질관리 구축	① BIM 플랫폼 구축	• BIM 공공플랫폼 정보서비스 제공
		② 5D 가상건설 품질관리	• 3D부터 공정(4D), 비용(5D)의 품질관리체계
		③ AR기반 철근 검측	• 증강현실 활용 검측으로 누락, 오시공 확인
	• AI, 3D 스캐닝으로 검측 자동화		

자료 : LH 보도자료(2024.01.21) 및 내부 자료

3.4 해외 주요국 추진 정책

1) 미국 관련 정책 동향

- ASTM(2023)는 NIST의 Advanced Manufacturing Technology Roadmap (MFGTech) 프로그램의 일환으로 선진기술을 활용한 건설산업 디지털화 로드맵을 제시하였으며, 작성 배경은 생산성 저하, 건설사업 성과 부진 등으로 국내의 스마트 건설 촉진 여건과 유사함
- 미국은 디지털화 지원을 통한 유망기술 적용효과 확보를 매우 중요하게 인식함
 - 건설부문의 디지털화는 미국 제조업, 건설혁신, 그리고 생산성, 안전, 지속가능성, 교육·인력양성, 우주건설 등에서의 경쟁력에 상당한 영향을 가져올 것으로 기대함
- 로드맵은 8개 기술과 6대 적용분야를 정의하고 있으며, 우선 8대 기술은 3D 프린팅, 로보틱스·자동화, 빅데이터, IoT, AI, 시뮬레이션, AR, 사이버보안을 의미함
 - 6대 적용 분야는 지속가능 건축물, 스마트 인프라, 대단위 주거시설, 재난 대응, 운영회복력(operational resilience), 우주건설 등임
 - 기술에 있어 3D 프린팅 방식에는 OSC와 유사한 방식을 포함하고 있으며, 로보틱스자동화에는 MG/MC 기술이 포함되어 있음

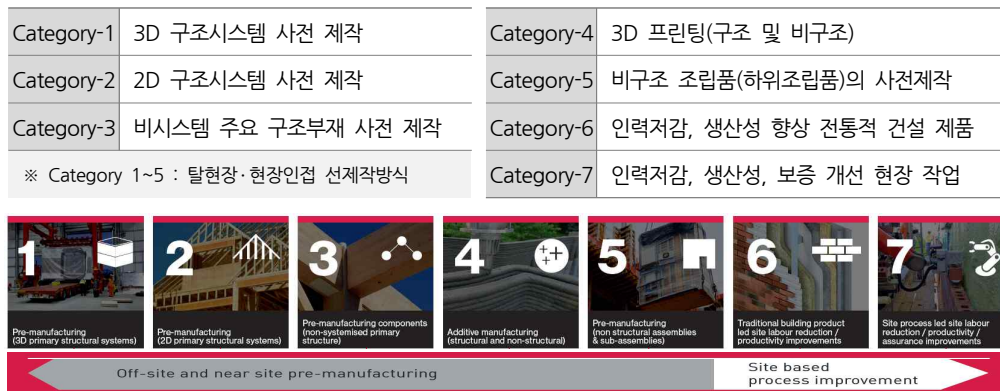


[그림 2-6] 디지털 건설의 미래상

자료 : ASTM(2023)

2) 영국 정책 추진 현황

- 영국 건설생산의 25% 이상은 공공부문에서 나오고, 중앙정부가 가장 큰 단일 발주자 중 하나임에 따라 정부가 국민들에게 더 높은 효율성과 더 나은 가치를 보장할 수 있도록 협업을 촉진할 수 있는 역할을 하고자 함
- 영국의 건설산업 혁신 전략은 1990년대 Constructing the Team, Rethinking Construction 등의 운동으로 구체화되었으며 2013년 국가 산업 전략 중 하나로 발표된 『Construction 2025』로 이어지고 있음
 - 초기투자비와 생애주기비용 33% 절감, 신축·정비사업 전체 기간 50% 단축, 온실가스 배출 50% 저감, 건설 상품·자재 수출입 격차 50% 축소 등을 목표로 함
 - 사람, 스마트, 지속가능성, 성장, 리더십 등 5개를 비전으로 설정되었으며, ‘스마트’는 스마트 건설과 디지털 설계 구현을 위한 정부 투자 확대를 강조하고, 디지털 건설 경쟁력 확보를 위한 Digital Built Britain 추진
- ‘Smart’라는 비전은 산업이 효율적이고 기술적으로 발전된 것으로 의미하며, Digital Built Britain을 통해 스마트 건설, 디지털 설계에 있어 경제 우위를 확보하고자 함
 - 학연과 공조하여 더많은 연구개발, 시범사업을 업계에 광범위하게 배포하고, 혁신에 대한 장애요인 제거
 - 디지털 경제의 부상에 따른 급격한 변화는 영국 건설산업에 심도있는 영향을 가져올 것으로 예상하고, 스마트 건설, 디지털 설계에 투자 증대하
 - 녹색건설, 스마트 건설, 디지털 설계에 의한 영국과 글로벌 기회를 충족하기 위해 인력과 기술에 투자



[그림 2-7] 영국 MMC 유형 분류

- 생산방식의 전환과 관련하여 MMC(Modern Method of Construction)를 추진하고 있으며, MMC는 전통적인 건설방식을 대체할 수 있는 다양한 대안을 통칭함
 - 2022/23 회기 중 준공된 사회주택 가운데 25.24%에 MMC가 적용되었고, MMC 적용 주택 중 51.92%는 Category-2로 41.30%는 Category 2와 5를 조합하여 건설
- MMC는 영국을 비롯한 유럽에서 통용되는 개념으로 건설현장에서 혁신을 도모할 수 있는 기술 유형을 7가지로 구분하여 이해할 수 있는 통합적인 개념임
 - 스마트 시공기술 가운데 OSC는 Category 1, 2, 3, 5에 해당하고, 3D 프린팅은 Category-4, 건설로봇과 자동화장비는 Category-7에 포함되어 있음

Category-1	Category-2	Category-3	Category-5	Category-6	Category-7
					
3D 구조시스템	2D 구조시스템	구조부재	비구조 부재/부위	인력저감/생산성 향상 기존공법	인력저감/생산성보증 향상 현장프로세스
탈현장/근현장 사전제작			현장기반공법개선		
구조부재/시스템			비구조 관련		
4개 하위 유형	3개 유형	7개 유형	12개 유형(2개 범주)	5개 유형	9개 유형
<ul style="list-style-type: none"> • 모듈 • 모듈+내부 • 모듈+내부+클래딩, 지붕 • 모듈+Pod 	<ul style="list-style-type: none"> • 프레임(벽, 바닥, 지붕, 계단) • 프레임+단열, 라이닝 • 프레임+단열, 라이닝 + 창호, 외부클래딩 	<ul style="list-style-type: none"> • 파일 • 파일캡 또는 링빔 • 기둥, 벽, 보 • 바닥 • 통합 기둥/벽/보 • 계단 • 지붕 	<ul style="list-style-type: none"> • 3D (예 : Pod) <ul style="list-style-type: none"> - 욕실 Pod - 주방 Pod - 욕실/주방 조합 - M&E Pod • 2D (예 : 전면 외장, 바닥, 벽) <ul style="list-style-type: none"> - 파사드 조립물 - 지붕 조립물 • M&E 조립물 <ul style="list-style-type: none"> - 세대 내 조립물 - 수직 라이저 - 중앙 플랜트 - 바닥 카세트 - 벽 카세트 - 선조립 문 세트 	<ul style="list-style-type: none"> • 대형 제품(large format product) <ul style="list-style-type: none"> - 내벽 - 외벽 - 지붕 마감 • 기타 <ul style="list-style-type: none"> - 특정 규격으로 재단된 자재 (사전에 정해진 크기의 석고보드) - 설치가 용이하도록 조정된 자재 (브릭 슬립) 	<ul style="list-style-type: none"> • 현장여건 보호/개선 <ul style="list-style-type: none"> - 기상의 영향을 받지 않도록 (전천후) 현장 보호(밀봉) - 가설작업 표준화 (모듈러 비계) • 디지털 프로세스 개선 <ul style="list-style-type: none"> - 현장 작업과 연계된 BIM 활용 • 현장 작업자 지원 <ul style="list-style-type: none"> - 시각적 지원 (VR/AR) - 신체적 지원 (웨어블) - 생산성 도구(GPS) • 현장 관리 도구 <ul style="list-style-type: none"> - 로봇 (벽돌쌓기) - 자율장비 (무인크레인) - 디지털 검증 (디지털 스캐닝)

[그림 2-8] MMC 구분과 세부 유형

3) 일본 정책 추진 현황

- 건설사업의 단계를 기획, 계획, 설계, 시공 등 4단계로 구분할 때, 일본 국토교통성의 건설분야 디지털 전환은 주로 설계, 시공에서 ICT기술이나 로봇, 드론, 레이저 스캐너 등을 적용하여 현장을 ‘자동화 공장’으로 변혁하는 것에 중점을 두고 있음
- 건축과 토목분야의 BIM/CIM을 디지털 전환 실현에 가장 중요한 수단으로 인식하였으며, ‘인프라·물류분야의 디지털전환(2021.2)’에서 소규모 건설공사를 제외한 모든 공공사업에 BIM·CIM 적용 원칙 확립
 - BIM·CIM의 활용 범위 확장을 위해 정부는 빅데이터 관리를 중요시하고, 인력육성을 포함하여 데이터 활용, 첨단기술 현장실증, 기술개발을 담당하는 거점 재정비
- 일본 정부는 2021년 ‘인프라 DX 종합추진실’을 설치하였으며, 국토기술정책종합연구소(NILIM)의 ‘건설DX 실험필드’를 정비하여 ‘DX 데이터센터’를 신설함
 - ‘건설DX 실험필드’는 시공의 자동화, 무인화 관련 산·관·학 기술개발 추진체계를 갖추고, 정부 공사와 업무의 3D 데이터를 통합관리·분석하는 환경을 조성함
- 국토교통성은 최근 ‘i-Construction 2.0’을 책정하여 2040년까지 건설현장 노동력 절감 30%를 목표로 디지털 기술을 활용한 건설 과정 3개 ‘자동화’ 추진을 시행함
 - 기존의 ‘i-Construction’은 ICT 활용을 통한 작업 효율화가 중심이었지만, 2.0에서는 작업 자체의 자동화를 목표로 하고 있음
- ‘시공’, ‘데이터연계’, ‘시공관리’의 자동화를 통해 현장 전체의 생산성 향상 도모
 - 시공 자동화에서는 AI에 의한 시공 계획의 자동 작성, 1명의 오퍼레이터가 여러 건설기계의 동작을 관리하는 것 등을 목표로 하고, 2025년부터 ICT 시공 원칙화
 - 조사부터 설계, 시공, 유지관리까지 사용할 데이터를 필요할 때 얻을 수 있는 환경을 구축하는 것이 데이터 연계 자동화



자료 : 国土交通省(2024), 조재용(2024) 참조하여 정리

[그림 2-9] 일본 i-construction 2.0의 특징

- 시공 관리의 자동화에서는 부재 제작을 현장 이외의 장소로 옮기는 ‘오프사이트화’나, 원격지에서 감독·검사를 하는 ‘리모트화’ 등 추진
- 아래 그림은 시공 자동화, 데이터 연계 자동화, 시공관리 자동화 등 건설현장에서 자동화를 실현하기 위한 단기, 중장기 로드맵을 보여줌
- 5년 이내 현장의 실시간 데이터 활용, 중기적으로 일정 여건 하에서 자동 시공의 표준화, 장기적으로는 대규모 현장에서 자동시공과 최적실현을 목표로 함
- ‘데이터 연계 측면에서의 디지털화, 페이퍼리스화’의 경우 ①BIM/CIM을 통한 건설 생산 프로세스 전체의 데이터 연계, ②3차원 모델의 표준화와 계약도서로서 활용을 위한 대처, ③디지털트윈 활용에 의한 현장작업의 효율화, ④시공 데이터 활용의 효율화, ⑤데이터 활용을 통한 서류 저감 등의 방식으로 목표 달성 추진

구 분	단기(5년 이내)	중기(6~10년)	장기(11~15년)	실 현
① 시공 자동화 로드맵				
자동시공	기술기준 수립 담시공 현장 도입 확대	대규모 토공현장 시범 도입 기술 개발	도입 공종 순차 확대	<ul style="list-style-type: none"> • 대규모 현장 자동시공 실현 • 최적시공 실현
원격시공	사방현장 활용 확대	통상 공사 활용 확대		
시공데이터 활용	데이터 공유기반 정비	시공데이터 활용 최적화	AI 활용 현장 최적화	
② 데이터 연계 자동화 로드맵				
3D데이터 표준화	3D설계표준화(주요구조물) BIM·CIM 속성정보 표준화	3D설계표준화		<ul style="list-style-type: none"> • 건설현장 페이퍼리스 • 공백없는 데이터 공유 및 연계
디지털 트윈	디지털 트윈 시공계획		자동설계기술 개발·도입	
데이터 공유기반 정비	현장데이터 공유 기반 프로젝트 전체 데이터 공유			
데이터 활용 도구 개발	시공관리·감독·검사를 위한 애플리케이션 개발 BI 도구를 활용한 감독·검사·서류저감(페이퍼리스)			
③ 시공관리 자동화 로드맵				
원격 시공관리 감독·검사	기술검증·실증	설비점검 일부 원격(리모트화)		<ul style="list-style-type: none"> • 인력작업 저인력화 • 쾌적한 오피스 작업판단 실현
고속네트워크 정비	100Gbps 네트워크 장비	사무소·출장소 고속화		
프리캐스트	프리캐스트 활용 촉진	구조물 표준화·모듈화		

자료 : 국토교통부(2024), 조재용(2024) 참조하여 정리

[그림 2-10] 건설현장 자동화를 위한 로드맵

4) 싱가포르 정책 추진 현황

■ 싱가포르 관련 정책 일반

- 건설산업의 실천 전략으로서 'Construction 21'를 내세워 건설산업의 생산성 향상을 위해 자동화 장비 및 로봇, BIM과 가상설계 기술 등 7대 핵심기술분야 제시
- BCA는 2017년 10월 Construction Industry Transformation Map(Construction ITM)을 발표하고 건설 생산성 향상 정책을 진행 중임
 - Construction ITM의 비전은 건설 분야의 발전과 통합, 진보적이고 협력적인 기업, 싱가포르 국민을 위한 좋은 일자리로 설정됨
 - 건설산업 혁신을 위한 3가지 핵심 영역으로는 사전 제작 및 조립(Design for Manufacturing & Assembly, DfMA), 그린 빌딩(Green Building), 통합 디지털 기술 활용체계(Integrated Digital Delivery, IDD) 등이 있음
- 건물 생애주기 관점의 혁신을 위해 건설과 시설관리를 통합하여 정의하는 BE ITM(Built Environment Industry Transformation Map)과 관련하여 ①통합적 계획과 설계(IPD), ②첨단 제작 및 조립(AMA), ③지속가능 도시 시스템(SUS) 등이 3대 혁신 영역으로 지정되어 있음(BCA, 2025)³⁾
 - IDD는 IPD와 관련되어 있으며, IDD 적용률은 2023년 58%, 2024년 67%를 기록하였고 2025년 연면적 기준 전체 신규 개발 물량에서의 적용 목표를 70%로 설정함
 - AMA와 관련하여 DfMA 적용률은 2023년 61%, 2024년 68%로 나타났으며, 연면적 기준 신규 개발 물량에 있어 목표수치를 70%로 설정하였음

■ 생산 혁신 관련 정책적 활성화 방안

- 싱가포르는 국가적으로 건설산업 내부 인력난이 심각하고 국토가 좁아 생산성 향상이 시급하게 요구되는 상황이며, 그에 따라 가장 강력하고 강제적인 'Top-down' 방식을 적용하고 있음
- DfMA, IDD와 연계된 ITM 추진 과정에서 의무화 조항을 추가하여 토지를 매각하고, 재무적인 지원 방안도 마련함

3) IPD, AMA, SUS는 싱가포르 ITM의 3대 주요 혁신 영역으로서 Integrated Planning and Design, Advanced Manufacturing and Assembly, Sustainable Urban Systems 등의 약어임

- 공공 토지 매각 조건 의무화 : 정부가 건설 용지를 민간에 매각할 때, '해당 용지에 건물을 지으려면 반드시 PPVC나 자동화 기술을 65% 이상 사용해야 한다'는 조건을 계약서에 명시하도록 하고, 이를 준수하지 않으면 토지 구매가 되지 않음
- 생산성 혁신 펀드 (PIP) : 기업이 건설 로봇이나 자동화 장비를 도입하면 비용의 최대 70%를 정부가 현금으로 지원

[표 2-15] 싱가포르의 자동화 추진 현황과 인센티브

<p>1) 싱가포르의 국가 비전·목표</p> <ul style="list-style-type: none"> • 싱가포르 정부(BCA, MND 등)는 건설 생산성 향상, 인력 저감을 위해 DfMA, IDD를 핵심 축으로 하고, Built Environment Robotics & Automation(R&A)를 전략 기술로 지정 • BCA는 Built Environment Robotics R&D Programme(2020~2030 로드맵)을 통해, 제조·현장조립·시설관리 전 주기에 로봇을 넣는 장기 계획을 수립함 <p>2) 기술적 추진 내용</p> <p>(1) 적용 영역을 3가지로 명확히 규정</p> <ul style="list-style-type: none"> • BCA에서는 로봇·자동화의 중점 분야를 ① 공장 제조(예: PPVC, PBU 조립/마감), ② 현장 조립·시공(예: 자동화 중장비, 현장 작업 로봇), ③ 시설·인프라 유지관리(inspection-FM 로봇)로 명시 <p>(2) BE Robotics R&D 프로그램 내 세부 주제 예시</p> <ul style="list-style-type: none"> • BCA, NRP(National Robotics Programme)는 연구개발과제로서 중장비 자율 플릿 기반 토공 최적화, 지능형 예측·검사를 위한 로봇 기반 센싱, 이미징 시스템 등의 주제 공고 • 대학, 연구기관이 당해 프로그램을 통해 UGV 기반 자율 측량·검측, 로봇+AI 기반 공사현장 상태 추정·경로계획 연구 수행 중 <p>(3) DfMA 공장과 로봇의 결합</p> <ul style="list-style-type: none"> • BE Robotics 프로그램 문서에서는 PPVC, PBU 모듈 제작·조립·마감 공정에 로봇을 투입하여 공장 내 ICPH(인당 생산량) 향상을 목표로 설정 <p>3) 정책·제도적 수단</p> <p>(1) 전용 로봇 R&D 펀드 및 로드맵</p> <ul style="list-style-type: none"> • BE Robotics R&D 프로그램은 멀티-에이전시(다부처) 프로그램으로서 싱가포르 내 대학, 연구소, 기업에 프로젝트별 18개월(6개월 현장적용 포함)까지 연구비를 지원하고, 연구기관에는 100%, 기업에는 최대 70%까지 직접비 보조 <p>(2) 규제정비, 평가 및 인증 지원</p> <ul style="list-style-type: none"> • BCA는 “Robotics and Automation in BE” 이니셔티브에서 R&A 솔루션에 대해 평가·규제 인허가를 신속하게 처리하는 체계를 강조하고, 시범 적용될 수 있도록 규제 클리어런스, 성능검증 지원 등 제공 <p>(3) 건설생산성·변혁 기금(Transformation Fund) 연계</p> <ul style="list-style-type: none"> • 로봇 도입은 단독이 아니라, 생산성 향상 목표, DfMA와 IDD 의무화, BIM, 디지털 전환 정책 등과 병행하여 건설 생산성, 변혁 패키지로 운영되며, BE Robotics는 이 패키지에서 로봇 축에 해당됨 <p>(4) 로드맵 레벨에서의 전략 정리</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2020~2030 BE Robotics 로드맵(외부 컨설팅, 전문가 참여)을 통해 다음의 사항 분석 <ul style="list-style-type: none"> - ①어떤 공정에 로봇을 우선 적용할지; ②어떤 수준의 자동화가 어느 정도 비용, 효율성을 갖는지; ③ 단기, 중장기 채택 시나리오 및 비용 구조 • 상기 분석 결과를 연구개발 투자 및 정책 결정의 기준으로 사용

5) 주요 국가의 생산체계 전환 인센티브

- 영국, 일본, 싱가포르 등 주요국에서 생산체계 전환을 위해 제공하는 의무화 관련 사항, 인센티브를 정리하면 다음과 같음
 - 영국에서는 공공발주 공사에서의 공장제작, 자동화 공법 적용을 원칙화하고, 펀드 위주로 기술 개발과 실증을 지원함
 - 일본은 ICT 장비 사용을 위한 적산 기준을 제공하고, 중소건설사 대상의 보조금 지급으로 업계 내 자연스러운 기술 확대 도모
 - 싱가포르는 BTF, CPCF 등 다양한 인센티브 프로그램 운영

[표 2-16] 주요국의 생산체계 전환 관련 정책 요약

구 분	영 국	일 본	싱가포르
정책 브랜드	Construction Sector Deal	i-Construction	Construction ITM (IDD, DfMA)
기술 초점	제조업화 및 부품화 (공장 생산 라인 자동화, 플랫폼 공법)	현장 시공 자동화 (토공 장비, 원격 제어, 드론)	조립 및 데이터 통합 (조립 로봇, DfMA, 통합 디지털 플랫폼)
의무화 사항	[조달 원칙(Comply or Explain)]	[발주 의무화]	[토지 매각 조건 & 인허가]
	<ul style="list-style-type: none"> • 보건, 교육, 교통 등 5개 중앙 부처 발주 공사는 공장 제작, 로봇 자동화 공법을 “기본”으로 채택하도록 함 • 기존 방식을 쓰려면 ‘신기술을 사용하지 않는 사유’에 대해 소명해야 함 	<ul style="list-style-type: none"> • ICT 토공 의무화 : 공공 토목 공사 중 일정 규모 이상 (3억 엔 이상 등) 드론 측량, ICT 건설기계(MG/MC) 의무 사용 • 미이행 시 입찰 참가 제한이나 벌점보다는, 이행 시 가점을 주는 형태로 시작해 점차 의무로 전환됨 	<ul style="list-style-type: none"> • GLS 조건 : 정부 토지 매각 시 특정 구역은 DfMA (모듈러, 자동화) 공법의 65% 이상 적용 의무 • 시공성 평가(B-Score): 건물 설계 시 자동화, 표준화 점수가 낮으면 건축 허가 불허 (Buildability Framework)
보조금 및 기타 인센티브	[R&D 및 매칭 펀드]	[공사비 현실화 및 세계 혜택]	[직접 자금 지원 (펀드)]
	<ul style="list-style-type: none"> • IUK (Innovate UK) : 2,500억 원 규모의 ‘Transforming Construction Challenge’ 펀드를 통해 산학연 컨소시엄의 기술 개발비 지원 • 개별 장비 구매 보조보다는 기술 개발 및 실증 프로젝트 단위의 자금 투입 	<ul style="list-style-type: none"> • 적산 기준 개정 : 로봇, ICT 장비 사용 시 사람보다 비싼 단가를 인정하여 공사비를 증액해 줌 (기존 품셈 대신 시공 패키지형 적산 도입) • IT 도입 보조금 : 중소 건설사의 하드웨어, 소프트웨어 구입비 지원 	<ul style="list-style-type: none"> • BuildSG 전환 기금(BTF) : 탈현장 부과금 제도 인센티브, 투자 공제 제도(ISA) 등 운영 • CPCF (생산성 펀드) : 로봇, 자동화 장비 도입 시 비용의 최대 70~80%를 현금 지원 • WTF (인력 개발 펀드) : 신기술 교육비 지원 • 중소기업뿐 아니라 대기업 프로젝트에도 파격적 지원

4. 스마트 건설기술 활용 방식

- 국내에서 스마트 건설기술을 건설단계, 부문별로 활용하는 방식에 대해서는 『스마트건설기술 활성화 지침』 과 기존에 정부가 공표한 정책에서 예시를 찾을 수 있음
- 해당 지침에서 시공단계와 유지관리단계에서 스마트 건설기술 활용 예시는 [표 2-17]과 같으며, 건설장비 자동화, 시공 정밀제어, 모듈리와 같은 공장제작·현장조립, 로봇 활용 조립시공 기술 등이 해당됨

[표 2-17] 『스마트건설기술 활성화 지침』 상의 스마트 건설기술 활용 예

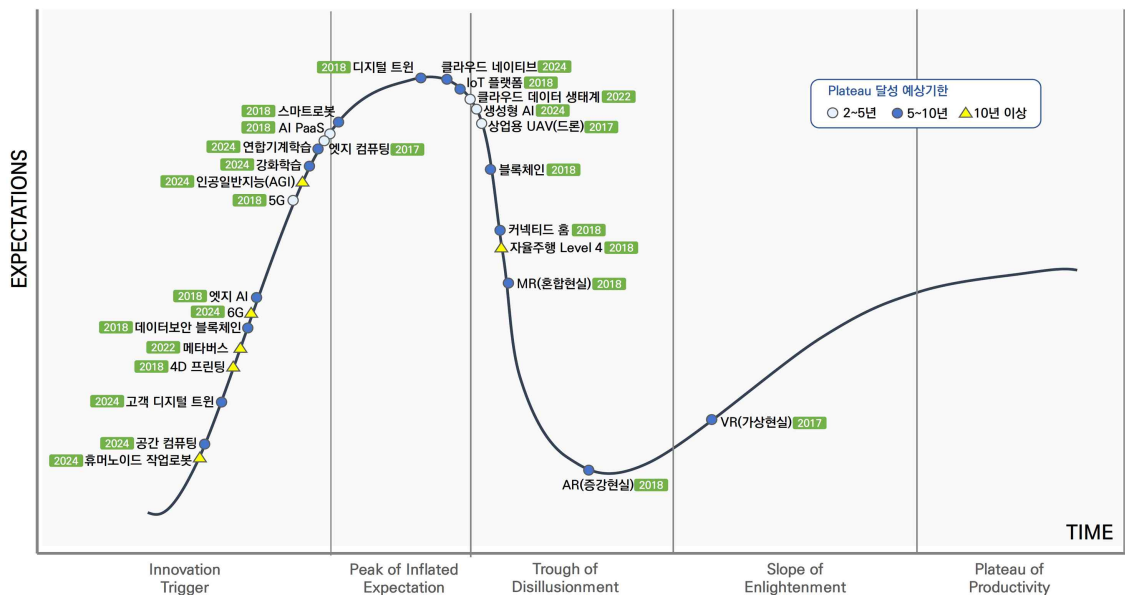
단계	스마트 건설기술	기술 내용
시공	<ul style="list-style-type: none"> • (자동화시공) 건설자동화 및 제어기술 <ul style="list-style-type: none"> - 건설장비의 자동화 - 시공 정밀제어 기술 - 공장제작·현장조립(Modular 또는 프리팹) 기술 - 로봇 등을 활용하여 조립시공 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 굴착기 등 건설기계 탑재 센서·제어기·GPS 등을 통한 위치·자세·작업범위 정보 • 조립 및 시공시 부재 위치를 정밀 제어하고, 접합부 자동 시공 • 드론·로봇 등 취득정보와 연계한 공정 절차 확인
	<ul style="list-style-type: none"> • (운영관계기술) 건설기계 제어, 시공현장 관계 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 건설현장 내 건설기계의 실시간 통합 관리·운영 - 건설자동화·제어 실시간 고정밀 측위서비스 지원 - 센서 및 IoT를 통해 현장의 실시간 공사정보 - AI 활용 최적 공사계획, 건설기계 통합 운영 	<ul style="list-style-type: none"> • 무인기기 운용 및 관계, 검측을 위한 실시간 고정밀 측위서비스 제공 • 사업목적·계약조건 등을 고려한 공사관리 • 건설시공 간섭 요인 확인 • 건설현장 데이터 통합 관리 플랫폼기술
	<ul style="list-style-type: none"> • (건설공정) 스마트 공정 및 품질 관리 <ul style="list-style-type: none"> - 3차원 및 AI를 활용한 공사 공정관리기술 - 무인비행장치, 레이저스캐너 등 첨단 측량기술을 이용한 시공품질의 실시간 관리기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 무인비행장치, 레이저스캐너, 로봇 등을 활용한 공정관리 및 품질관리
유지관리	<ul style="list-style-type: none"> • 드론·로보틱스 기반 시설물 상태 진단 기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 다중·다수 드론의 군집관제, 카메라와 물리적 실험 장비를 장착한 다기능 드론(접촉+비접촉 정보수집)을 통해 시설물을 진단 • 드론-로봇 결합체가 시설물을 자율적으로 탐색하고 진단 • 디지털 연속 촬영에 의한 터널 안전진단

제3장 스마트 시공기술 현황과 적용 전략

1. 스마트 시공기술의 국내 적용 현황 총괄

1.1 유망기술로서의 전망

- 건설과 같이 특정산업과 무관한 일반적인 기술의 수준을 검토함에 있어 우선 2016년 이후 Gartner가 매년 제시한 ‘Hype Cycle for Emerging Technologies’를 참조하여 스마트건설 관련 기술의 총괄적인 수준을 개략적으로 파악할 수 있음
- [그림 3-1]은 주요기술에 대해 사이클 상의 위치와 발표년도를 표시한 것임
 - 2024년을 기준으로 휴머노이드 작업로봇 등은 △로 표시되어 실제 적용에 10년 이상 장기가 소요될 것으로 판단할 수 있음
 - 추가로 ●로 표기된 스마트로봇(2018), △로 예상된 4D 프린팅(2018) 등의 경우에도 ‘안정기’ 진입 시기를 예측할 수 있음



자료 : Gartner의 연도별 'Hype Cycle for Emerging Technologies'를 참조하여 일부 기술의 위치와 연도를 저자가 표시 (위치가 부정확할 수 있음)

[그림 3-1] Gartner Hyper Cycle에서의 디지털 기술별 현황

1.2 건설분야에서의 기술별 수요와 적용 현황

- 2021년부터 조사된 SCCI에서 주요 건설사들이 조사시점과 5년 후 최우선 중점 투자 대상으로 응답한 스마트건설기술을 연차별로 정리하면 [표 3-1]과 같음
 - 2025년 기준으로 최우선 투자 기술은 BIM 및 디지털트윈(40.9%)였고, AI 및 빅데이터(19.3%), 건설드론(14.0%), 공장제작 및 모듈화(7.6%) 등의 순으로 나타남
 - 5년 후에 중점 투자할 기술에 대해서는 AI와 빅데이터(36.3%)가 가장 높았고, 시공 자동화 및 건설로봇(17.5%), BIM 및 디지털트윈(15.2%), 공장제작 및 모듈화(14.6%) 등의 순위가 높았음
 - 스마트 시공기술에 해당하는 ‘공장제작 및 모듈화’는 연간 투자 비율이 다소 줄어들고 있으나, ‘시공자동화 및 건설로봇’의 경우 장기적으로 투자 목록에 올려놓은 기업이 늘고 있는 상황임
 - ‘시공자동화 및 건설로봇’에 대해서는 시간을 두고 투자를 고려한다는 응답이 2022년 6.5%에서 2025년 17.5%까지 상승함
- [표 3-2]는 주요 건설사업자들의 건설자동화, OSC 적용 현황을 요약 정리한 것임

[표 3-1] 민간부문 주요 건설사의 중점 투자 대상 기술 (1순위 기준)

대상 기술 구분 및 응답비율(%)	2022년		2023년		2024년		2025년	
	현재	5년후	현재	5년후	현재	5년후	현재	5년후
BIM 및 디지털트윈	38.0	16.7	45.7	16.0	43.9	19.3	40.9	15.2
공장제작 및 모듈화	18.5	10.2	16.0	12.3	12.3	10.5	7.6	14.6
건설드론	7.4	1.9	11.1	0.0	14.0	-	14.0	-
건설현장 자동 관제 및 디지털 사업관리 기술	9.3	13.0	9.3	10.5	10.5	9.9	-	5.8
AI 및 빅데이터 기술	7.4	25.0	8.0	35.8	14.0	37.4	19.3	36.3
클라우드 컴퓨팅	8.3	15.7	5.6	8.0	-	-	-	3.5
AR/VR	1.9	0.0	2.5	2.5	-	-	-	2.3
건설IoT 및 센서 네트워크	9.3	11.1	1.9	4.3	-	-	-	4.1
시공자동화 및 건설로봇	0.0	6.5	0.0	8.6	-	11.1	-	17.5
3D 프린팅	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.6
기 타	-	-	-	1.9	-	-	-	-

자료 : 연간 SCCI 조사결과 관련 언론 보도자료, 기사, 보고서 등을 종합하여 재구성함 (공란은 해당 정보 없음)

[표 3-2] 주요 건설사업자 스마트 시공기술 활용

구분	건설자동화	OSC·모듈러	구분	건설자동화	OSC·모듈러
a	<ul style="list-style-type: none"> 설계/시공자동화 현장 비율 증가 자동 용접, 패널 모듈화 시공장비, 철근 자동 결속 공구, A/F 운반용 전동트롤리 등 시공자동화 건설로봇은 앵커로봇, 철골볼팅 시공 로봇, 벽체 타공 로봇 위주 	<ul style="list-style-type: none"> 하이테크 대블록화, 모듈러 Mock-up 제작 등에 적용 제1호 스마트터키사업 성공적 준공 	h	<ul style="list-style-type: none"> 시공자동화, 건설로봇, 3D 프린팅 적용 기술 도입 단계 	<ul style="list-style-type: none"> 건축부문 지하층, 벽식구조, 옥탑구조 모듈러 토목부문 교량구조물 모듈러 플랜트부문 Tank, 배관 Spool 제작, PKG Module 적용
b	<ul style="list-style-type: none"> 3D 프린팅 활용 비율 상승 UGV, 로봇 SPOT, MG 등 시공자동화 기술 활용 3D 프린팅을 활용한 어린이 놀이시설물 개발 등 다양한 시도 	<ul style="list-style-type: none"> 해외 플랜트 현장을 중심으로 MEP 모듈 등에 기술 적용 중 	i	<ul style="list-style-type: none"> 시공자동화기술은 시범적으로 굴삭기와 도저에 대한 MG·MC 적용 자재운반 관련 로봇이용 검토 중 	
c	<ul style="list-style-type: none"> 건설로봇은 도장, 미장, 사족보행, 웨어러블 로봇 파일럿 테스트 및 현장 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 건축모듈러 공공기관 실증사업 수행 플랜트 현장 모듈화, 건축 PC 적용 	j	<ul style="list-style-type: none"> 파일관입량 장비사용 자동 측정, 크램셀 하강 및 상승 자동 감지 등 활용 	
d	<ul style="list-style-type: none"> 일부 현장 시범 적용 시공자동화는 인프라 공사 토공 장비 MG 및 장비관제시스템 적용 교량 케이블 점검용 이동 로봇, 지하 밀폐공간 가스검출 확인용 사족로봇 활용 	<ul style="list-style-type: none"> 강건재 기반 공동주택 Pre-fabrication 적용 (옥탑구조물, 재활용 보관소 등) 플랜트 설비 모듈러 제작 활용 	k	<ul style="list-style-type: none"> 4족보행로봇, 청소로봇 적용 제조용 3D 프린터 장비를 비정형 구간, 거푸집, 토공현황 등에 출력 	<ul style="list-style-type: none"> 경비동·화장실 모듈러, MEP 모듈러 등 적용
e	<ul style="list-style-type: none"> 3D 프린팅은 주택건설공사의 설계 검토 및 시공이해도 향상을 위해 시범 적용 	<ul style="list-style-type: none"> EPC 현장 중심 모듈설계·사전제작 적용, 공동주택 옥탑, 부위별 모듈러 시공 적용 저층형 모듈러 주택 시공 	l	<ul style="list-style-type: none"> 2020년 로봇 도장 시범 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 공장제작 스마트폼과 DH보(데크형)를 시범 적용 및 효과 검증
f	<ul style="list-style-type: none"> 시공자동화는 직영 현장 중심 MC 장비 실증 및 현장 운영 자체 로봇운용 시스템에 기반하여 다양한 로봇 시범 적용 	<ul style="list-style-type: none"> M&A를 통한 국외 전문 모듈러사 기술력 도입 및 국내 모듈 사업 적용 국내 모듈 자동화 생산설비 공장 기술 고도화 및 목조 모듈러 구조 최적화 	m	<ul style="list-style-type: none"> 시공자동화 기술은 파일관입 자동측정 시스템 활용 	<ul style="list-style-type: none"> 지하주차장 PC 시공, 가설사무실 모듈러, 옥실시스템 모듈러 활용
g	<ul style="list-style-type: none"> 건설로봇은 자동인양 갱공, 콘크리트 미장 로봇 등 활용 웨어러블 로봇에 대한 시범 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 부분적 모듈 설치 등에 활용 철골 모듈러 옥탑, 지하주차장 PC 등에 활용 	n	<ul style="list-style-type: none"> 시공자동화는 단지 조성공사의 백호, 롤러 등에 활용 3D 프린팅 현장 주요 구조물 목업 작업에 활용 건설로봇 실적 없음 	<ul style="list-style-type: none"> 건축물 화장실(PBU), PC 교량 등에 일부 활용
			o	<ul style="list-style-type: none"> 건설자동화 실적 없음 	<ul style="list-style-type: none"> 지하주차장 PC, DH보, HCS 등 부분 적용
			p	<ul style="list-style-type: none"> 소수 현장에 시범적용 및 효과 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 실드 TBM 현장의 세그먼트 라이닝에 부분 적용
			q	<ul style="list-style-type: none"> 백호, 롤러 머신가이던스 일부 현장 활용 3D 프린팅, 건설로봇 적용사례 없음 	<ul style="list-style-type: none"> PC 공법 활용
			r	<ul style="list-style-type: none"> 건설자동화 실적 없음 	<ul style="list-style-type: none"> 공동주택 옥탑 모듈러, 물류센터 및 공동주택 지하주차장, 토목 교량 등 PC 사용

2. 건설 로봇 관련 현황과 적용 방안

2.1 건설 로봇 개념과 기술 구성요소

1) 건설 로봇의 개념

- 건설산업에서 로봇 활용 건설 자동화는 공공 인프라, 상업용·주거용 건물, 원자력 발전소 등 다양한 분야에서 인력 투입을 최소화하거나 완전히 대체하는 것을 의미함
 - 로봇 공학은 그동안 자동차, 가전제품, 가사지원 로봇 등 제조업에서 폭넓게 적용되어왔으나 건설 자동화 수요 증가에 따라 건설산업으로의 적용이 확대되는 추세임
 - 단순 반복 작업의 자동화 등을 통해 생산성 및 안전성 향상에 기여할 것으로 예측됨
- 학술적으로 로봇의 특성은 사물을 느낄 수 있고(sense), 사고할 수 있고(plan), 행동할 수 있어야(act) 한다는 등 감각, 사고, 행동으로 요약할 수 있음
- 국제 규격 ISO 8373에서 로봇은 이동, 조작 또는 위치 지정을 수행할 수 있는 자율성을 갖춘 프로그래밍된 작동 메커니즘을 의미함
 - RPA를 포함하는 소프트웨어, 원격통제 드론/UAV, 음성지원체계, 자율주행차량, 스마트 가전 등은 로봇이라 할 수 없음

2) 건설 로봇 종류

■ 유형 구분 총괄

- 현장 내에서 로봇이 수행하는 기능을 중심으로 현장 시공 로봇, 검측·측량 로봇, 철거 로봇 등으로 구분할 수 있음
- 추가로 로봇이 작업을 수행하는 방식에 따라 자율주행 건설 기계 장비, 협동로봇, 휴머노이드 로봇, 착용형 외골격 로봇 등으로 파악할 수 있음
- 로봇 유형의 구분은 연구자나 구분 목적에 따라 상이할 수 있으며, 자동화장비나 3D 프린팅은 다수의 문헌에서 별도로 분리되지 않고 로봇의 유형 중 하나로 분류되는 경우도 있음

■ 기능상 분류

① 현장 시공 로봇 (Construction / Installation Robots)

- 조적, 용접, 3D 프린팅, 타설, 도장 등의 반복적이고 노동 집약적인 작업을 자동화해 생산성과 품질을 향상시킴
- 벽돌 조적/조립 로봇, 용접/조립 로봇, 3D 프린팅 로봇 (콘크리트 포함), 타설/마감 로봇, 도장/미장 로봇 등이 현재 개발 중에 있음

② 현장 검측측량 로봇 (Surveying / Site Layout / Reality Capture Robots)

- 스캔, 측량, 3D 매핑, 시공 진행 상황 모니터링을 수행함
- 자율적으로 현장 스캔 및 검측 수행하는 Boston Dynamics의 Spot이 대표적이며 항공 촬영, 3D 맵 제작, 현장 상태 파악을 위해 주로 드론이 사용됨

③ 철거 로봇 (Demolition Robots)

- 구조물 철거 작업에서 인간의 안전을 확보하며 정밀하고 효율적으로 수행함
 - 안전 확보를 위해 원격 제어 기반 철거 로봇이 개발 중임

■ 운용방식상 분류

㉠ 협동로봇 (Cobots)

- 인간 작업자와 함께 작업
- 보조적·반복적 업무 수행, 안전제어 가능함

㉡ 휴머노이드 로봇 (Humanoid Robots)

- 인간의 작업도구·환경을 그대로 활용해 복합 작업 수행함
- 인간 형태의 몸체를 지니며 다양한 작업이 가능함

㉢ 자율주행 건설 기계 장비 (Autonomous Mobile Construction Machinery)

- 굴착기·불도저 등의 장비를 자율 주행 및 자동화함

㉣ 착용형 외골격 로봇 (Exoskeleton Robots)

- 근로자의 근력을 지원하며 피로 및 부상 리스크 감소함
- 강화된 팔, 허리, 전신 외골격을 통해 무거운 도구를 조작, 반복 작업 지원함

- 건설로봇 유형에 따른 특징과 기술요소는 [표 3-3]과 같이 정리할 수 있음

[표 3-3] 건설로봇 유형별 특징과 주요 기술

유형	특징과 주요 기술
AI 기반 로봇	인공지능을 활용하여 작업 데이터를 학습 및 분석하고, 최적의 작업 계획을 자동 생성 딥러닝, 머신러닝(ML), 데이터 분석 기술
완전 자동 로봇	설정된 작업 데이터를 기반으로 사전에 프로그래밍된 경로와 작업을 계획하고 자율적으로 수행 자율 제어 기술, 자동 경로 설정 알고리즘
반자동 로봇	작업자의 입력과 명령에 따라 일부 공정을 자동 수행하며, 단순 반복 작업을 지원 자율 제어 시스템, 프로그램 기반 작업 제어, 유압 및 전기식 액추에이터
협동 로봇	작업자와 협력하여 안전한 작업환경을 제공하고, 인간과 로봇의 인터페이스를 강화 힘/토크 센서, 충돌 감지 시스템, 인간/로봇 상호작용(HRI) 기술, 자동 작업 조율 기술
원격 제어 로봇	원격 조작을 통해 위험작업을 수행하며, 실시간 영상과 센서 데이터를 활용한 제어기능 제공 원격 통신 기술(5G, Wi-Fi), 실시간 스트리밍시스템, 원격 로봇 조작
센서 기반 로봇	다양한 센서를 활용하여 실시간 환경을 분석/수집을 하고, 정밀성과 안정성 강화 LiDAR, 초음파/적외선 센서, 온도/습도 센서

자료 : 이재명(2025)

[웨어러블 로봇]

- 건설현장 부담작업 및 근골격계 질환에 필수적인 웨어러블 로봇
 - 가장 많은 질환부위는 허리, 팔꿈치, 발꿈치로 사람이 직접 위험한 자세로 무거운 중량물 작업을 수행하는 형틀목공, 철근공, 전기공 등이 해당
 - 기술자의 작업 노하우가 필요하면 건설현장의 특성상 장비 등을 이용하기 어려운 작업
 - 작업자가 직접 착용하고 원하는 대로 동작이 가능한 건설현장 최적화 웨어러블 로봇은 근골격계 질환 예방에 도움이 될 수 있음
 - 작업자의 노하우 + 로봇의 물리적 능력 + 건설현장 환경



3) 건설 로봇 세부 구성요소

- 건설 로봇 구성요소에는 크게 센서·인지 시스템, 매니플레이터, 모바일 모듈이 있음
- 센서·인지 시스템은 현장 형상과 위치를 이해하고 충돌 회피·경로계획·품질/진도 검측 같은 상위 기능의 기반 데이터를 수집함
 - 이러한 체계 하에서 레이저 스캐닝 기반 공정·진도 모니터링, 자율주행을 통한 장애물 회피/경로 생성, BIM 좌표계와의 전역 일치 확보로 현장 자동화의 신뢰도 향상
- 매니플레이터는 링크와 조인트로 구성된 ‘로봇 팔’로, 작업 도구(엔드이펙터)를 통해 실제 작업(픽애플레이스, 도포, 용접 등)을 수행함
 - 산업용 로봇 시스템은 이 로봇 팔과 도구, 제어기, 전원, 센서가 함께 묶여 동작함
- 모바일 모듈은 로봇을 작업 위치까지 안전하고 정확하게 옮기는 하부 차대(이동 플랫폼)임

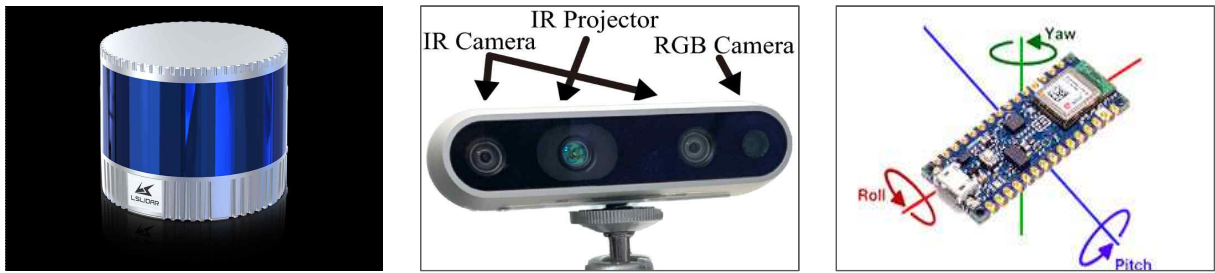


[그림 3-2] 센서 시스템, 매니플레이터, 모바일 모듈(좌로부터)

■ 센서 및 인지 시스템

- 건설 현장에서 정밀한 3D 모델링, 측량을 위해 주로 사용하는 LiDAR 센서는 레이저 펄스를 발사해 왕복 시간(ToF)을 측정하고 밀도 높은 3D 포인트클라우드를 생성함
 - 실외 대공간에서 구조물 형상·정밀 거리 획득에 강하고 야간에도 가능함
 - 포인트클라우드는 정밀 시공 검측·진도관리·충돌회피의 기반 데이터가 됨
 - 하지만 비, 안개, 먼지, 분진에서 산란/흡수로 정밀도와 정확도 저하될 수 있음
- RGB-D 카메라는 구조광, ToF, (액티브) 스테레오 등 방식으로 깊이를 추정하고 컬러(RGB)를 결합함
 - 로봇 비전 시스템에서 물체 인식, 거리 측정, 3D 재구성을 통해 작업물 식별이나 장애물 회피, 자율 네비게이션에 널리 활용되며 가볍고 저전력·저비용임

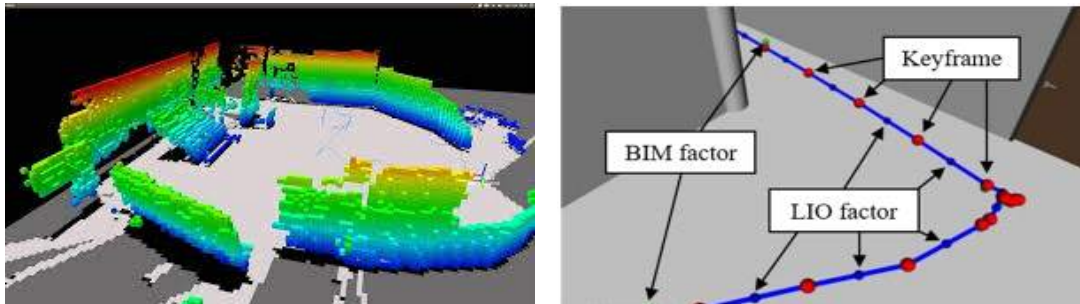
- 강한 햇빛/광원, 반사·투명 재질, 멀리 떨어진 표적에서 깊이 품질 저하가 발생함
- IMU(Inertial Measurement Unit) 센서는 3축 가속도계·자이로(±자력계)를 묶어 선가속도·각속도를 고주파로 측정함
- GPS 신호가 없는 옥내·지하·복잡 환경에서 로봇의 자세 추정과 이동 궤적 보정(Dead-reckoning)을 위해 사용하나 바이어스/드리프트와 잡음(화이트 노이즈, 바이어스 불안정도 등)이 필연적이라 센서 융합·보정이 필수적임



[그림 3-3] LIDAR, RGB-D, IMU(좌로부터)

■ 인지 시스템

- SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)은 미지 환경에서 ‘동시 위치추정 및 지도작성’을 수행하는 추정 프레임워크임
- 자율주행, 실내외 로봇 네비게이션에 핵심 기술로 활용됨



[그림 3-4] SLAM(좌), LIO-BIM(우)

- LIO-BIM(LiDAR-Inertial Odometry + BIM)은 현장의 LiDAR-IMU 오도메트리 결과(또는 온라인 서브맵)를 BIM(as-planned) 좌표계에 정합·앵커링해 드리프트 억제·전역 일관성 확보를 노리는 프레임워크임
 - BIM을 “준 기준 지도”로 사용하면 전역 정합과 공정/검측 데이터의 도면 좌표 일치 가 쉬워지며 최근 건설 로봇틱스 SLAM 리뷰·연구들이 이 방향을 적극 다룸

■ 매니플레이터

- 로봇 매니플레이터는 로봇 본체에 결합된 팔 모양의 구조로 작업을 실행하는 데 사용됨. 이러한 이유로 로봇 매니플레이터는 로봇 팔이라고도 알려져 있음
- 매니플레이터는 내부구조에 융합된 일련의 조인트와 링크로 구성됨
 - 링크는 로봇의 여러 부분을 결합하는 견고한 구성요소이며 선형, 회전 운동을 위해 미끄러지며 이동 가능한 구성요소로 조인트가 추가됨
- 갠트리/데카르트 로봇은 서로 직교하는 3개의 선형(프리즘) 축(X-Y-Z)으로만 움직이며, 직육면체 형태의 작업공간을 갖는 로봇임
 - CNC, 3D프린팅 등에 사용됨
- 다음으로 SCARA 로봇은 XY 수평면에는 유연하며 Z축은 강성을 갖는 4축 구성을 이루고 있음
 - 고속·정밀 조립/픽애플레이스에 강함
- 다관절(articulated, 6축) 로봇은 여러 회전 조인트로 구성되어 6자유도 동작이 가능해 용접, 도장 등 범용성이 가장 높음



[그림 3-5] 데카르트 로봇, SCARA 로봇, 다관절 로봇(좌로부터)

■ 모바일 모듈 : 이동 플랫폼 유형

- AGV(Automated Guided Vehicle)는 바닥 테이프·QR/마커·자기/레이저 리플렉터 등 외부 유도 수단을 따라 주행하는 무인지게차/운반차 계열임에 따라 정해진 경로 외에는 이동이 불가능하다는 단점이 있음
- AMR(Autonomous Mobile Robot)는 LiDAR·카메라·IMU로 자연특징 기반 내비게이션(SLAM)을 수행하며, 장애물이 생기면 자율 우회 경로를 재계획함에 따라 경로 선택에 있어서 보다 유연함



[그림 3-6] HUSKY(좌), KUKA omniMove(우)

■ 모바일 모듈 : 이동 방식 및 기구 구조

- 차동·스키드스티어의 경우 좌우 측 각 바퀴(또는 트랙)를 동일 축속으로 묶고, 양측 속도차로 선회함
 - 조향기구가 없어서 단순내구성이 높고, 야외 거친 지면에서 견고하며, Clearpath Husky 로봇이 해당됨
- 전방위 구동의 경우 이동 플랫폼의 전방향 구동을 가능하게 하는 메카넘 휠은 서비스 로봇, AGV 등 자율주행 로봇 플랫폼을 소형·경량화하고, 협소한 공간에서도 운용할 수 있도록 함
 - 조향장치 없이 좌·우 이동 및 회전이 가능해 구조·비용 효율이 높고, KUKA omniMove는 메카넘 휠 기반으로 중량물 이송에 사용 중임

4) 국내 건설 로봇 기술 수준

■ 무인 자재 운반 로봇

- 삼성물산과 현대건설은 2025년 7월 인천 청라 하나드림타운 현장에서 사람이 탑승하지 않는 무인 자재 운반 로봇을 시연함
- 이는 삼성물산 건설부문과 현대건설이 2023년 4월에 체결한 ‘건설 로봇 분야 에코시스템 구축 및 공동 연구개발’ MOU의 성과물임
- 건설 현장 내 물류 자동화 실현하기 위한 시도로 평가됨

■ 무인 자율 건설 현장 관리

- 두산인프라코어는 드론 기반 3D 지형 스캔 → 토목 계획 → 굴삭기 및 휠로더 등의 장비를 자동 제어하는 무인 자율 건설현장 통제 솔루션 Concept-X로 2020년 국토교통부 스마트건설 챌린지 대상을 수상함
 - 아울러 해외 스타트업에 투자도 활발히 진행하여 세계 자율건설장비 시장에 있어 주요 기업에 오름



[그림 3-7] 콘크리트 3D 프린팅 로봇, 무인 자재 운반 로봇, Concept-X (좌로부터)

■ 건설현장 고소작업 인간-로봇 협업 기술 및 통합운영 시스템 개발 (진행중)

- 국토교통부와 산업통상자원부가 공동으로 추진하는 다부처 과제에 4년 9개월 기간에 걸쳐 국가연구개발사업을 진행함
- 현장 다목적 고소작업 로봇 플랫폼과 XR(확장현실) 기반 HRI(인간-로봇 상호작용) 기술을 개발하여 인력의존적·고위험 공정을 안전·표준화 로봇 작업으로 전환

■ 건설사 파일럿 프로젝트와 협업 기술 개발 (진행중)

- 현대건설은 전담 조직을 통해 로봇 도장, 파쇄기 등 현장 로봇을 시험 중이며, 삼성물산은 자체 개발한 층간자재 운반 로봇을 아파트 현장에 투입하는 등 개발 기술의 파일럿 적용을 시작함
- 로봇 제조사 측면에서는 현대로보틱스, 두산로보틱스 등의 업체가 협동로봇 기술을 보유하고 있어, 건설사들과의 협업을 통해 건설 현장 자동화 솔루션을 개발 중임

5) 해외 기술 수준과의 비교

■ 상용화의 폭과 깊이

- 해외에서는 먹메김, 철근배근, 드릴링 등 특정 공종에서 반복적 대여 또는 직접판매가 활성화되어 현장 루틴에 편입된 반면, 국내의 경우 동일 공종의 표준화된 레퍼런스·구매 모델 축적이 상대적으로 적어 시험·실증 중심 비중이 높은 상황임

■ 표준·안전 프레임

- ISO 10218(2025), ISO 3691-4(2023)의 적용 해석 가이드와 현장 위험성 평가 체계가 해외에선 구매·보험 조건과 연결돼 도입 장벽을 낮추는 역할을 함
 - 국내의 경우에도 발주·감리 단계에서 표준 적합성(성능·안전기능) 체크리스트의 제도화가 필요
- 국내 시장은 아직 미국, 중국에 비해 규모가 작고, 대형건설사 위주의 보수적인 업계 문화로 인해 현장 적용 속도는 더딘 편임
 - 이를 극복하기 위해 국내 기업들은 해외 로봇기업과 제휴하거나, 민관 공동으로 실증사업을 늘려가는 방향으로 전략을 잡고 있음

2.2 건설로봇 필요성과 기대 효과

1) 배경 및 필요성

- 특히 국내 건설은 생산성이 낮은 상황에서 고령화 및 숙련인력 감소가 빠르게 진행되고 있어 디지털화 및 자동화 필요성이 증대되고 있음

2) 국외 적용 효과 및 기대효과

■ 기대효과

- 바닥에서 장시간 앉거나 몸을 굽혀 작업하는 것을 줄여 반복 스트레스 부상 예방 기여
- 무릎이나 손목 등에 부담이 큰 철근 결속 작업 대신, 감독자가 로봇을 조정만 하는 방식으로 안전하고 효율적으로 수행함
- 작업자의 신체적 피로와 부상 위험을 크게 줄여 작업자 작업 수명 연장 효과도 있음

■ 사례1 : HP SitePrint(현장 레이아웃/마킹 자동화 확대)

- 수작업 대비 최대 10배 이상 빠른 생산성 향상이 가능함
- 실제 프로젝트에서는 7시간 걸리던 레이아웃 작업을 단 45분으로 단축한 사례가 있으며, 또 다른 현장에서는 작업을 3주에서 3일로 단축했다는 보고도 있음
- 평균적으로 약 30% 생산성 향상 효과가 확인됨(특히 MEP 작업은 이보다 더 높음)
 - ±3 mm 수준의 레이아웃 정밀도를 확보해 실제 검증 결과 '1/16인치 또는 1/64인치 이내' 정밀도가 유지되어 설계 의도에 더 가까운 시공이 가능했다는 평가가 있음

■ 사례2 : TyBOT(철근 결속 자동화)

- 시속 1,100개 이상의 결속 수행 속도를 보여줌
- 위스콘신 교량 현장에서 2교대에 걸쳐 17,823개 결속 수행했고, 이는 인간 인력 대비 50% 이상 작업 시간 절감 사례로 평가됨
- 기존 수작업 대비 4~5명의 작업자를 1명(감독자) 및 로봇 구조로 대체 가능하며, 일정 25~30% 일정 단축 효과도 보고됨
- 플로리다 Gateway 프로젝트에서는 하루에 11,044개 결속, 시속 평균 1,100개 이상을 기록함

■ 사례3 : Hilti Jaibot(드릴링 자동화)

- 연구에 따르면 구멍당 작업 시간을 270초에서 48초로 단축하여 약 5.6배 빠른 수행 효과를 가지고 있음
- 종합 평가 연구에서는 건설 현장 내 로봇 도입으로 작업 일정이 평균 2.3배 단축됨

3) 국내 적용 효과 및 기대효과

■ 시공 공정 특화 로봇의 현장 테스트 증가

- 고소 작업이 로봇으로 대체되며 추락 등 안전사고 리스크를 원천적으로 제거할 수 있는 대안으로 기능함
- 철골 조임은 30% 생산성 향상을 보였으며 외벽 도장 로봇은 분당 최대 10m까지 작업 가능해 현장 인력 대비 2.5배 빠른 작업 속도를 보임
- 또한 롤러 방식은 스프레이 도장 대비 분진과 화학물질 비산이 적어 친환경적임

■ 현장 데이터화와 안전 중점

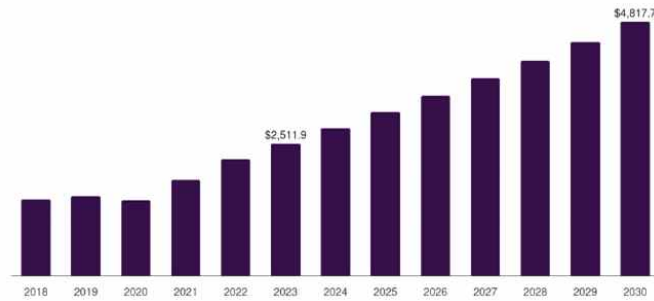
- 하루에 최대 20,000회에 달하는 현장 사진 촬영 및 비교 분석 자동화가 가능해져 현장 관리 품질이 균일해지고, 투입 인력이 크게 절감될 것으로 기대됨
- 특히, 사람이 힘들었던 사각지대나 위험 지역의 점검이 가능해지면서 안전 사고 발생률이 줄어들 것으로 전망됨

2.3 국내외 기술개발, 시장, 정책 동향

1) 국내외 로봇 시장 동향

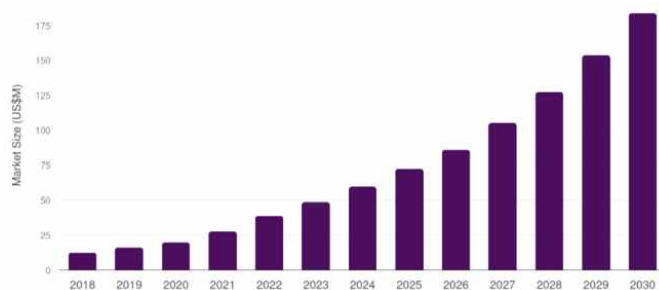
■ 글로벌 로봇 시장

- 국외 로봇 시장 규모는 2024년 약 478억 달러에서 2034년까지 연평균 16.6% 성장하여 약 2,111억 달러 수준으로 성장
 - 소프트 로보틱스 시장은 2024년 약 19억 달러에서 2034년까지 연평균 34.8% 성장하여 약 353억 달러 수준으로 성장 (Global Market Insights, 2025)
 - 휴머노이드 시장은 2025년 약 29.2억 달러에서 2030년까지 연평균 39.2%로 성장하여 약 152.6억 달러 수준으로 성장 (MarketsandMarkets, 2025)
- 국내 산업용 로봇 시장 규모는 2023년 2,511.90백만 달러에서 2030년까지 연평균 9.2% 성장하여 4,817.80백만 달러 수준으로 성장



[그림 3-8] 국내 산업용 로봇 시장 전망(Grand View Research, 2024)

- 휴머노이드 로봇 시장 규모는 2023년 48.4백만 달러에서 2030년까지 연평균 20.6% 성장하여 183.5백만 달러 수준으로 빠르게 성장할 것으로 예상



[그림 3-9] 국내 휴머노이드 로봇 시장 전망(Grand View Research, 2024)

2) 국내외 로봇틱스 기술 개발 동향

■ 동향 총괄

- 최근 로봇틱스 기술은 ‘인간 중심 환경에서 로봇이 얼마나 자연스럽게 안전하게 융합될 수 있는가’를 중요하게 여기고 있음
- 휴머노이드 로봇은 인간과 유사한 외형 덕분에 기존 인프라, 도구, 공간 구조를 그대로 활용할 수 있어 건설 및 공공 현장에 즉시 적용 가능한 범용성을 제공함
 - 향후 저비용, 고위험 환경 대처가 가능해 노동력 위기 해소에 기여할 수 있음
- 한편, 소프트 로봇틱스는 부드러운 소재 구조를 통해 인간과의 접촉에서 안전성과 유연성을 보장하며 복잡하고 민감한 환경에서도 뛰어난 적응성을 보임
- 최근 시장 규모도 급성장 중이며 의료, 재난 구조, 돌봄 등 공공서비스 분야에서 응용 기대가 높음

■ 휴머노이드 로봇 기술 관련 일반

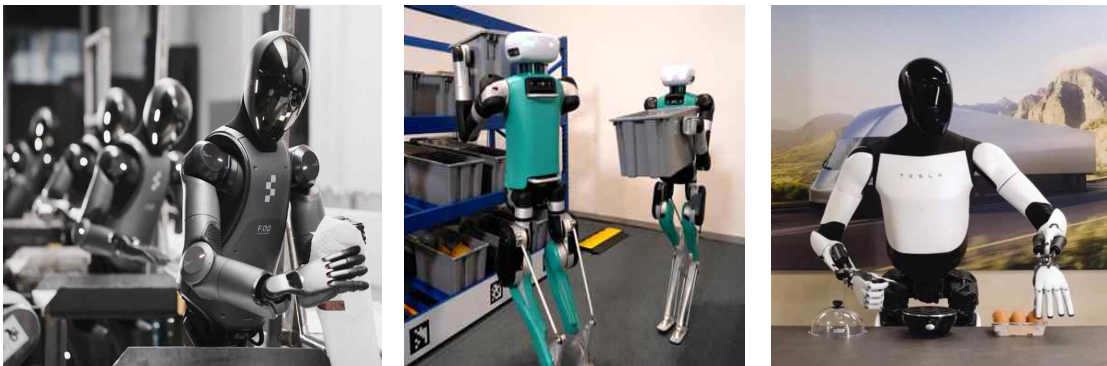
- 현재 휴머노이드 기술은 시범·파일럿 단계에서 특정 작업을 실제 환경에 제한적으로 투입하는 국면으로 들어섬
- 물류, 제조 현장에서의 초기 적용은 주로 반복적이고 구조화된 작업에 한정되며 대규모 상용화에 앞서 신뢰성, 안전 인증, 단가·운영 비용 검증이 병행되는 중임
- 업계에서는 특히 물류창고가 휴머노이드의 첫 대규모 수용처가 될 가능성이 높다고 보며, 실제로 주요 기업들이 창고 업무에 대한 파일럿을 확장하고 있음
- 동시에 시각-언어-행동(VLA) 기반 정책학습과 고도 촉각·손기술(핸드 텍스터리티), 배터리·구동 효율 개선이 빠르게 진전하면서 “사람 중심 공간에서의 안전한 협업”을 목표로 한 기능 통합이 가속화되고 있음

■ 국외 휴머노이드 로봇 기술

- 미국 Figure AI는 2025년 VLA 모델 Helix를 공개함
 - “로봇 운영 두뇌” 역할을 하며 다양한 작업을 범용적으로 수행하도록 설계됨
 - Figure의 2세대 휴머노이드 ‘Figure 02’에 탑재되어 실제 작업 시연과 함께 물류 패

키지 선별·트리아지 등 현실 과업으로 응용 범위를 넓히고 있음

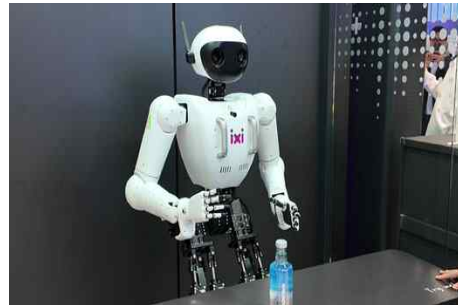
- 제조업 응용 측면에선 BMW 스파턴버그 공장에서 Figure 02의 생산 환경 테스트와 상용 도입을 위한 협약이 2024년 1월 18일에 발표되었고, 2024년 9월 자동차 조립 공정에서의 파일럿 적용 테스트가 성공적이었음
- 미국 Agility Robotics에서는 이족 보행 휴머노이드 Digit를 개발해 물류창고용 실제 업무에 가장 먼저 투입함
 - 2023년 말 아마존이 공식적으로 테스트 착수를 발표했고, 2024년에는 기업 GXO의 애틀랜타 인근 시설에서 RaaS(Robotics as a Service) 형태의 상업 운영 배치가 최초로 이루어짐
 - 적용 과업은 초기에는 반복적인 작업이 주였지만 ‘사람 설비·공간에의 적응성’을 앞세워 기존 창고 프로세스에 끼워 넣는 방식으로 확장 중임
- 미국 Tesla에서는 범용 휴머노이드로 Optimus를 개발함
 - 공장 내 반복·단조·위험 작업을 대체하고, 향후 가정 보조를 목표로 하고 있으며 현재 외부 판매는 하지 않지만 자사 공장에서의 기초 작업 수행 등 내부 적용/시범 단계임
 - 업계 전문 매체들은 Optimus의 장기 잠재력을 인정하면서도, 산업 현장 전반에 걸친 신뢰성, 안전성, 생산성 입증과 표준/인증 체계 정착이 상용 전개에 관건이라고 평가함



[그림 3-10] 미국 휴머노이드 Helix, Digit, Optimus (좌로부터)

■ 국내 휴머노이드 로봇 기술

- 위로보틱스에서 안전성, 정밀한 힘 제어, 그리고 유연한 모션 구현이 가능한 휴머노이드 ALLEX를 개발함
 - 산업 현장 및 사람과의 협업 환경에서 요구되는 정밀 제어 성능과 안전성 확보에 초점을 맞춘 설계로, 학회·전시회에서 산업용 협업 시나리오(반복 조립, 간단한 물체 취급 등)를 시연하며 잠재력을 보여주고 있음
 - ALLEX는 특히 힘 제어 기반 조작(force control)을 통해 섬세한 작업을 수행할 수 있어, 향후 제조·물류 보조뿐 아니라 건설·재난 대응 분야로 활용 영역이 확장될 가능성이 검토됨
- 에이로봇은 보행 안정성, 균형 제어능력을 갖춘 이족보행 휴머노이드 Alice를 개발함
 - Alice는 다양한 보행 알고리즘과 센서 융합 기술을 적용해 인간과 유사한 방식으로 이동할 수 있으며, 이는 협소하거나 복잡한 환경에서도 이동성이 중요한 역할을 하는 응용에 적합함
 - 현재는 연구 개발 및 시연 중심이지만, 장기적으로는 서비스 로봇, 교육 연구 플랫폼, 위험 환경 점검과 같은 분야에서 활용 가능성이 큼



[그림 3-11] 위로보틱스 ALLEX(좌), 에이로봇 Alice(우)

■ 소프트 로보틱스 기술 관련 일반

- 소프트 로보틱스(soft robotics)는 기존의 금속 기반 강체 로봇과 달리, 실리콘·고분자·하이드로겔 등 유연하고 부드러운 소재를 활용해 제작된 로봇 기술을 의미함
- 이 기술은 문어나 지네와 같은 생물의 구조와 움직임을 모방해 개발되었으며, 충돌이나 외부 접촉이 빈번한 환경에서 안전성을 크게 높일 수 있다는 장점이 있음

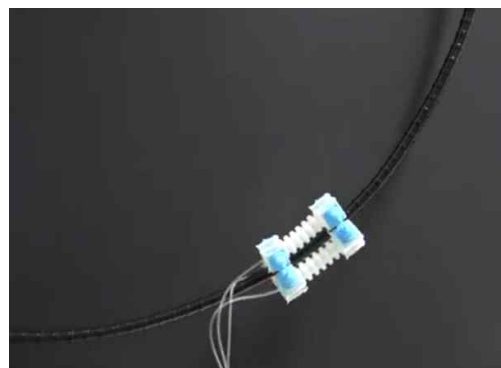
- 또한 소프트 로봇은 형태가 변형 가능하고 높은 순응성을 보유하여, 딱딱한 로봇이 접근하기 어려운 좁고 불규칙한 공간에서도 효과적으로 작업을 수행할 수 있음
- 이러한 특성에 따라 의료용 기기, 재난 구조, 고위험 작업 환경 등 사람과의 직접 상호작용이 중요한 영역에서 큰 주목을 받고 있음
- 전통적인 산업용 로봇과 달리 아직 상용화 초기 단계에 머물러 있으나, 다양한 연구 성과와 프로토타입을 통해 실질적 적용 가능성이 빠르게 확대되고 있음

■ 소프트 로보틱스 기술 : 국외

- 미국의 MIT와 노터데임 대학교에서 무너진 구조물 아래 좁은 틈을 통과할 수 있는 덩쿨 형태의 소프트 구조 로봇 SPROUT를 개발함
 - 무너진 건물 잔해 속이나 배관 내부 등 사람이 접근하기 어려운 공간에 투입해 탐색·지도 작성·구조 지원 등을 할 수 있음

■ 소프트 로보틱스 기술 : 국내

- 서울대학교는 2025년 공기 입력 하나로 워처럼 기어가거나, 줄에 기어 올라가고, 순간적으로 형태를 바꿔 방향을 전환할 수 있는 소프트 로봇(SNU Snap Inflatable Modular Metastructure, SIMM)을 개발함
 - 소프트 로봇의 적응성과 제어 효율성을 동시에 향상시킨 사례로 재난 구조, 의료용 내삽형 로봇, 가변구조 지원 장치 등 공공·건설·의료 분야에서 응용 가능성 높음

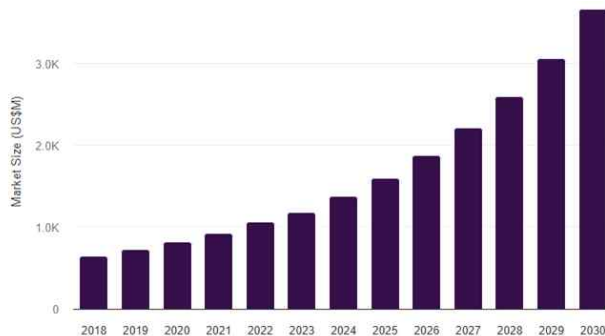


[그림 3-12] 미국 SPROUT(좌), 서울대학교 SIMM(우)

3) 건설분야 로봇 시장

■ 글로벌 건설분야 로봇 시장 동향

- 시장조사업체 Grand View Research에 따르면 건설 로봇의 시장 규모는 2024년 1,373.0백만 달러에서 2030년까지 연평균 18.00% 성장하여 3,662.6백만 달러 수준으로 성장할 것으로 전망됨
 - Mordor Intelligence에서도 연평균 15.50%의 성장률을 보일 것으로 예측함
 - 향후 건설로봇 시장은 5년 내 규모가 2배 이상 확대되며 빠르게 성장할 것임
 - 2024년 기준 로봇 암이 가장 높은 매출 비중을 차지하며 외골격 로봇도 시장에 포함되어 있음
 - MarketsandMarkets와 Market Research Future에 따르면 협동 로봇은 연간 약 30% 성장할 것으로 예측하고 3D 프린팅 로봇은 장기적으로 연간 약 28.5% 성장할 것으로 예측됨
 - 앞으로 5~10년은 빠르게 성장하는 신규 카테고리로 인해 응용 분야가 다변화될 것이며 이는 건설 로봇 산업의 도입기에서 성장기로 넘어가는 변곡점으로 시장 규모가 빠르게 상승할 것임



[그림 3-13] 글로벌 건설로봇 시장 전망(Grand View Research, 2024)

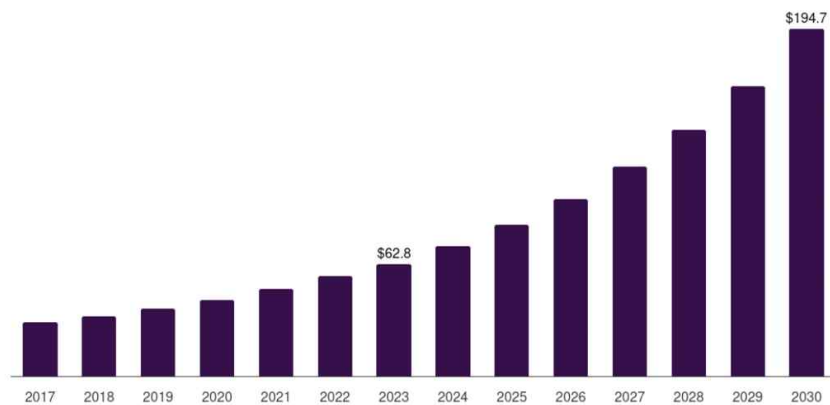
- 지역별로 시장의 성장세를 보면, 아시아 태평양 시장이 글로벌 매출의 33% 비중으로 가장 존재감이 큼
 - 2024년도에는 일본이 6.5% 비중, 중국이 9.4% 비중을 차지하고 있지만 각각 연평균 19.2%, 19.4% 성장할 것으로 기대돼 가장 높은 수치를 가지고 있음
 - 일본의 경우 고령화에 따른 노동력 부족 문제가 심각하여 로봇의 수요가 꾸준했으

며 일찍부터 건설 자동화를 시도해왔음

- 또한 일본 정부 목표에 따르면 2025년까지 주요 공정의 25% 이상을 로봇 및 자동화로 수행하도록 하는 계획도 거론됨
- 중국의 경우 정부 정책 지원으로 산업 생태계가 빠르게 형성되는 중임

■ 국내 건설분야 로봇 시장 동향

- 건설 로봇 시장 규모는 2024년 73.0백만 달러에서 2030년까지 연평균 18.00% 성장하여 194.7백만 달러 수준으로 성장함
- 정부 차원의 로드맵에 따라 로봇을 개발하면서 시장 성장을 도모하고 있으나, 현재 규모는 수백억 원대로 초기 단계임



[그림 3-14] 국내 건설로봇시장 전망(Grand View Research, 2024)

- 국내 건설기업의 스마트 건설기술 활용수준의 경우 드론, BIM, 모듈러, 빅데이터 및 AI 순으로 높은 것으로 조사되었으며, 상대적으로 ‘지능형 건설장비 및 로봇기술’은 활용수준이 낮게 나타남
 - 최근 스마트건설기업지수(SSCI) 산정에 참여한 기업들의 평균 수준은 지속적으로 상승하고 있는 추세이며, 대형 건설업체 중심이라는 제약이 있으나 전반적으로 건설산업 내에서 스마트 건설기술의 활용이 점진적으로 확대되고 있다는 긍정적인 동향을 파악할 수 있음

4) 건설분야 국내외 로봇틱스 기술 개발 동향




- 건설현장의 자동화 추세는 인력 부족과 안전 강화 요구에 따라 가속화되고 있음
 - AI는 로봇의 의사결정·경로계획의 핵심으로 자리잡았고 로봇의 자율성 향상에 기여하고 있음
 - AI의 접목을 통해 건설 로봇은 지능화되고 있으며 업계 전문가들은 AI와 하드웨어 결합이 건설생산성 혁신의 열쇠가 될 것으로 기대하고 있음
- 협동로봇(Cobot)은 인간과 동일 작업 공간에서 협력하도록 설계된 로봇으로, 건설 분야에서도 점차 존재감을 높이고 있음
 - 인간의 육체적 부담을 덜어주고 정밀 작업을 보조하는 외골격 로봇이나 소형 로봇 팔이 대표적임
 - 협동로봇은 사람의 창의성과 로봇의 정밀성을 결합하여 생산성과 안전성을 동시에 높이는 역할을 수행함
- 휴머노이드는 아직 실증 단계지만, Boston Dynamics가 개발한 Atlas의 공구 가방 전달·자재 취급 시연, 일본 AIST HRP-5P의 석고보드 취급 등으로 건설 작업에 있어서의 보조 가능성을 보여주고 있음
- 최근에는 기술 개발을 넘어 실제 현장 적용이 점차 확대되고 있음
 - 미국에서는 석재 채석장과 광산에서 무인 운반 기술이 상용화되어, 자율 덤프트럭이 수억 톤의 토사를 무인으로 운반하는 성과를 내고 있음
 - 또한 철근 결속 로봇(TyBOT), 철근 반입·배치 자동화 로봇(ironBOT), 천장 드릴링 로봇(Hilti Jaibot) 등 현장 시공 로봇이 교량·건축 현장에 투입되어 생산성과 안전성 개선 효과를 입증하고 있음
 - 먹메김 로봇 HP SitePrint나 Canvas의 마감 로봇은 도면 표시와 미장 작업 시간을 절반 이하로 단축시키며, 실제 건설 프로젝트에서의 실용성을 보여주고 있음
- 국내에서도 기술 도입이 실제 현장에 점차 확대되고 있음
 - 최근 삼성물산과 현대건설은 공동 개발한 스마트 자재 운반 로봇은 SLAM 기반 자율주행, 3D 영상 인식, 자동 충전 도킹, 원격 관제 시스템 등을 탑재해 복잡한 현장에서도 자재를 정확하고 안전하게 운반할 수 있음을 입증함
 - 또한 삼성물산은 건설용 앵커 자동화 로봇을 개발하여 평택, 아산, 부산 등 주요 현

장에서 파일럿 테스트를 진행하고, 최근에는 재건축 현장까지 적용을 확대하였으며, 이를 통해 반복적이고 고위험한 앵커 설치 작업을 자동화하여 시공 품질의 균일화와 작업 효율성 향상을 입증함





■ 국외 현장 시공 로봇 기술





- 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






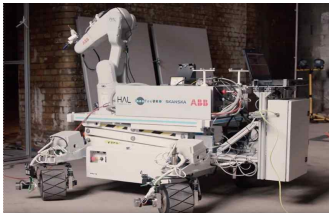
[표 3-4] 국외 건설작업 로봇 주요 제품

업체명 (국가)	이미지	특징
Advanced Construction Robotics (미국)		<ul style="list-style-type: none"> • 타이봇(철근 결속 로봇), 아이언봇(철근 자물 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 (스웨덴)		<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
Taisei (일본)		<ul style="list-style-type: none"> • T-iROBO는 로딩 기계와 협력하여 토양운송 및 제거, 클롤러 덤프, 콘크리트 스프레이 원격작업, 굴삭, 콘크리타 마감, 자율제어 진동롤러, 파쇄작업 등 다양한 형태의 자율제어 로봇을 출시 • 각 제품은 기능에 맞춰 서비스를 제공

업체명 (국가)	이미지	특징
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 접촉제를 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 Compagnons (프랑스)		<ul style="list-style-type: none"> • 환경의 3D 스캔을 수행하여 안전하고 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 (프랑스)		<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 (일본)		<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 (노르웨이)		<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 (스위스)		<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 (리히텐슈타인)		<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 매칭시키는 먹메김 로봇 • 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

업체명 (국가)	이미지	특징
Auto- nomous Solutions (미국)		<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
Caterpillar (미국)		<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, 최적의 작업이 이루어질 수 있도록 데이터 기반 의사결정시스템 적용
Sarcos Technolo gy (미국)		<ul style="list-style-type: none"> • 건설현장 고소작업 수행을 위한 원격조종 방식의 로봇 매니퓰레이터 'Guardian XT'와 'Guardian XM'을 개발함 • Guardian XT는 양팔 로봇, Guardian XM은 단일 매니퓰레이터의 형태로, 다양한 모바일 플랫폼에 탑재가 가능하며, 2022년에 두 로봇 플랫폼 모두 상용화함
SKANSKA (스웨덴)		<ul style="list-style-type: none"> • ABB, HAL Robotics, InnoTech UK, SKYjack 등 다수의 기업들과 함께 건설현장 드릴링 작업을 위한 모바일로봇을 개발





업체명 (국가)	이미지	특징
Kewazo (독일)		<ul style="list-style-type: none"> • 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
ICON (미국)		<ul style="list-style-type: none"> • Phoenix는 단층을 넘는 복층 구조를 인쇄할 수 있는 로봇 암 기반 시스템으로 설계

■ 국내 건설현장시공 로봇

- 최근 대형 건설사 중심으로 스마트건설에 대한 투자가 늘면서 시공단계에 활용되는 단일작업 및 현장점검을 위한 건설로봇 개발이 시작됨
- 삼성물산은 2022년 4월 건설로보틱스팀을 신설하고, 2023년에는 현대건설과의 로봇 생태계 구축 MOU를 체결함
 - 중복투자 최소화, 안전 특화 로봇 공동개발을 통해 상시 R&D·현장 상호 실증을 확대하고, 스마트건설얼라이언스 의장사로 실증과 기술 확산을 주도하고 있음
 - 2025년 “데이터·디지털 트윈·AI 기반 단계적 고도화로 자체 기술력 확보” 공식화
- 2019년 로봇 전담조직 Robotics Lab을 만든 현대건설은 2026년까지 산업용 로봇의 본격 투입을 목표로 현장 적용 로봇군(순찰·3D 프린팅 등)을 확장해 왔으며, 2025년 AMR 실증을 계기로 수직 운반·복합 동선 대응까지 개발 범위를 넓힐 계획임
 - 더불어 ‘로봇 친화형 단지’를 통해 엘리베이터, 자동문, 통신망을 로봇과 연동시키는 운영 인프라 일체화 전략으로 적용 무대를 시공 단계에서 운영 단계까지 확장하고 있음.
- 건설산업 차원에서 검토해보면, 로봇 플랫폼의 시스템통합 문제, 플랫폼 무게제한, 인력대비 작업속도 저하 등의 현장 이슈와 대형건설사 위주의 보수적인 업계 문화로 인하여 실용화에 어려움이 있음

- 산업 구조적으로는 사용 주체(현장) - 개발 주체(기업·연구기관) - 관리 주체(공공·원도급)가 분리되어 있어 도입 인센티브가 약하고, 다단계 하도급 관행 속에서 비용·성과 책임이 불분명함
- 비용 측면에서도 초기 투자비와 유지관리 비용에 비해 생산성 향상이 아직 불확실해 ROI(투자수익률) 확보가 쉽지 않음
- 이러한 요인들이 복합적으로 작용해 국내 건설로봇의 본격적 실용화는 더디게 진행되고 있음

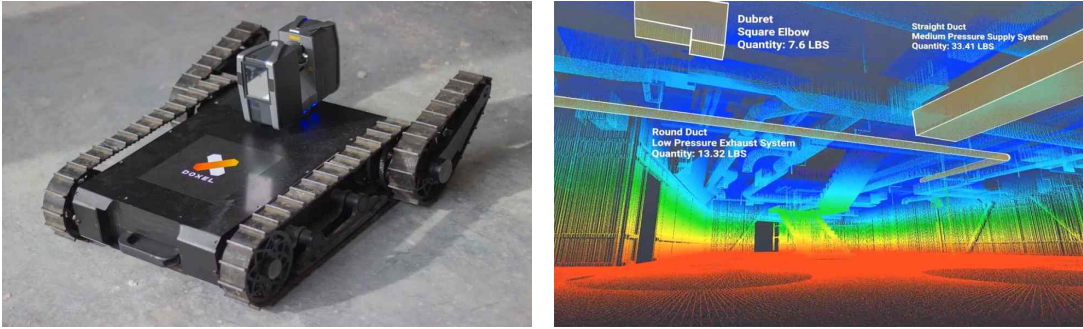
[표 3-5] 국내 건설작업로봇

업체명	이미지	특징
삼성물산		<ul style="list-style-type: none"> • 내화뿔칠 작업을 대체하는 로봇을 개발하여 현장에 적용 • 로봇은 이동식 플랫폼을 기반으로 설계되어, 작업 위치까지 이동한 후 브레이크로 고정하고 승강하여 뿔칠 작업을 수행 • 작업자는 원격 리모컨을 통해 프로그램 명령으로 조작
삼성물산		<ul style="list-style-type: none"> • SDR-Smart Drilling Robot은 협동로봇, 드릴링 제어 시스템, 그리고 모빌리티를 결합한 BIM 기반의 앵커 홀 천공 전용 로봇임 • 무선 제어 시스템을 통해 안전거리를 유지하며, 최대 8시간 연속 작동이 가능하고, 시간당 약 30개 앵커홀 드릴링 작업을 수행
삼성물산		<ul style="list-style-type: none"> • 엠에프알(MFR)과 삼성물산이 공동으로 개발한 이 로봇은 세계 최초로 철골 구조물의 볼트 조임 작업을 자동화한 건설 로봇임 • 전자식 고정 및 베이스 위치-방향 오차 보정 기능을 통해, 흔들림 억제와 다양한 작업 환경에서도 안정적 작업 수행이 가능
삼성물산		<ul style="list-style-type: none"> • 이중바닥(Access Floor) 구조물 설치를 자동화하는 로봇을 개발해 현장에 상용화했음 • AMR(Autonomous Mobile Robot) 기술을 활용해 스스로 이동하며, 무게 약 10 kg에 달하는 상부 패널을 반복적으로 설치

업체명	이미지	특징
현대건설		<ul style="list-style-type: none"> • 협동로봇(Manipulator Arm)과 비전 센싱 솔루션, 그리고 자율주행 및 리프트 제어 기술을 결합한 앵커링 자동화 로봇을 개발 • 로봇을 이동시키기 위한 주행구동부, 작업을 위한 동작을 수행하는 로봇 구동부로 구성되며, 로봇 구동부는 천장카메라를 통해 천장의 마커를 파악하여 작업을 수행함
현대엔지니어링		<ul style="list-style-type: none"> • '로보블럭시스템'과 함께 작업자의 별도 추가 조작 없이 콘크리트 바닥면을 자동으로 고르게 해주는 'AI 미장로봇'을 개발 • 3D 스캐닝으로 바닥 표면의 높낮이를 정밀 측정 후, 4개의 미장날이 장착된 2개의 모터를 회전시켜 요철 부위를 자동으로 고르게 다듬음
현대엔지니어링		<ul style="list-style-type: none"> • 와이어를 따라 수직 승하강하며 외벽을 자동으로 도장하는 로봇을 개발 • 일반 작업자 대비 3배 빠른 속도로 작업이 가능하며, 날씨나 숙련도에 관계없이 항상 균일한 우수 품질을 유지할 수 있음
마젠타로보틱스		<ul style="list-style-type: none"> • 자율주행 기반 도장 로봇인 GT3 PAINTER를 개발 • 내장 배터리로 4시간 이상 무정지 도장 작업이 가능하며 최대 높이 3.4 m의 공간까지 도장 가능
로보프린트		<ul style="list-style-type: none"> • 사람이 접근하기 어려운 초고층 설비에도 자동으로 작업이 가능한 도장 로봇 개발 • 복잡한 외벽 표면에 대해 3축(X, Y, Z축) 운동 제어가 가능한 정밀 디지털 도장 기술을 갖추고 있어 비정형 구조물이나 요철면에서도 정교한 도장을 가능하게 함
고레로보틱스		<ul style="list-style-type: none"> • 아파트, 플랜트 등 현장 성격에 맞춰 자재 형태별로 최적화된 운송 기능을 제공하는 건설 현장 전용 자율주행 자재 운반 로봇을 개발 • 엘리베이터 자율 탑승 및 층간 자재 적재 기능을 갖추고 있으며 야간 작업 자동화로 생산성 및 안전성 개선

■ 현장 검측 로봇 기술

- 미국의 '독셀(Doxel)'에서 건설 현장 내부를 스캔해 공정율과 공사오류 정보를 제공하는 건설 프로젝트 관리용 AI 로봇을 개발함



[그림 3-15] 미국 독셀의 건설현장 내부 검사로봇

- 한국건설기술연구원은 터널내부의 균열을 검사하는 자율주행 크롤러 로봇을 개발함



[그림 3-16] 한국건설기술연구원의 터널 크롤러 점검 로봇

■ 건설 로봇 개발 기술 목록

- 국내외 문헌에서 파악한 건설로봇을 [표 3-6]과 같이 공사별, 공종별, 기능별로 정리

[표 3-6] 건설로봇 개발 기술 목록

공종	공사	국가	관련업체	로봇명(기능)
공 통	현장 모니터링	미국	Doxel	건설프로젝트 관리용 인공지능 로봇
		스페인	Scaled Robotics	현장 모니터링 로봇
		한국	GS건설 - 큐픽스	4족 보행 로봇 스팟
		한국	롯데건설 - 컨위스	로봇 스팟 활용 건설 현장용 데이터 플랫폼
		한국	포스코건설	자율보행 모니터링 로봇
	웨어러블	미국	Hilti	EXO-01(웨어러블, 천장 작업)
		미국	Desk Research	Suit X(웨어러블, 천장 작업)
		미국	Ekso	Ekso Vest(웨어러블, 천장 작업)
		미국	Lockhead Martin	Fortis(웨어러블, 치핑/코어링)
		일본	Comau	외골격 로봇
		한국	현대자동차	VEX(웨어러블 로봇)
가설공사	먹매김	미국	DPR	먹매김 로봇
		미국	Dusty Robotics	Field Printer(바닥먹매김 로봇)
		캐나다	Mechasys	FramR(먹매김 로봇)
		벨기에	Bimprinter	Bimprinter(먹매김 로봇)
		이스라엘	Lightyx	BeamerONE(먹매김 로봇)
		한국	Landor Arch.	Archibot(먹매김 로봇)
	운송	일본	시미즈 건설	Carrier(수평운반 로봇)
		일본	도큐 건설	건설 기자재 자율 이송 로봇
		한국	삼성물산, 현대건설	운송 로봇
		한국	고레로보틱스	현장 내 자율 이송 로봇
비계공사	일본	Kewazo	건축 현장용 비계조립 로봇	
파일공사	두부정리	미국	Civ Robotics	CivDot+ (파일 두부정리 로봇)
		핀란드	MotoCut	Q-500/p-630
		한국	인하대학교	파일 커팅 로봇
구조체 공사	철근결속	미국	Advanced Cons. Robotics	Tybot(철근 결속 로봇)
		미국	Toggle Robotics	철근 결속 로봇
		일본	시미즈 건설	철근 결속 로봇
		일본	Furo, 다이세이 건설	T-irobo Rebar(철근 결속 로봇)
		일본	Tomo Robo	Tomo Robo RTM1-X1-A1(철근 결속 로봇)
		노르웨이	Rebartek	철근 결속 로봇
	용접	일본	시미즈 건설	Robo-Welder(용접로봇)
		일본	카지마 건설	철골용접로봇
		중국	Botsing Tech	용접로봇
		한국	삼성물산	철골 용접로봇
한국	현대로보틱스	용접로봇		
마감공사	실내마감	미국	Bechtel	내부 마감 작업 로봇
		중국	Bozhilin Robot	실내 마감 로봇(5종)
	뿔칠공사	미국	DPR	뿔칠 로봇
		일본	카지마 건설	내화피복 뿔칠 로봇

공종	공사	국가	관련업체	로봇명(기능)
공중		일본	오야야시구미	내화피복 뿔칠 로봇(2.5t)
		일본	후지타 건설	내화피복 뿔칠 로봇(1.4t)
		한국	삼성물산	내화 뿔칠 로봇
	내장공사	일본	시미즈 건설	Robo-buddy ceiling(천장 패널)
		일본	시미즈 건설	Robo-buddy floor(이중바닥 패널)
		일본	카지마 건설	Mighty Hand 3호기(커튼월, 석재, ALC 외장패널)
		일본	다이세이 건설	콘크리트 바닥 작업용 로봇
		영국	GGR Group	OSCAR 외(커튼월, 석재, 강판, 석고보드)
		호주	Robomate	RM-400+(커튼월, 석재, ALC 외장패널)
		덴마크	GMV	Winlet(커튼월, 석재, 강판, 석고보드)
		덴마크	Smart Lift	SL Series(커튼월, 석고보드)
		덴마크	Kobots A/S	Amigo 912/925(석고보드, 목재)
		EU	(연구개발과제)	Hephasestus(고층 커튼월 설치)
		중국	Gujian Robot	바닥타일 설치 로봇
		한국	삼성물산	이중바닥 패널(플로어) 로봇
	드릴링	미국	Hilti	Jaibot(천공, 드릴링 로봇)
		영국	Scanska UK	COSCR PJT(천공/앵커설치)
		한국	빌딩포인트코리아	SDR(천공, 드릴링 로봇)
		한국	삼성물산	드릴링 로봇 (천공/앵커 설치)
		한국	현대건설	Legend(드릴링 로봇, 천공)
	조적공사	미국	Construction Robotics	SAM(조적 로봇), MULE(조적 로봇)
		일본	패스트브릭 로보틱스	벽돌쌓기 로봇
		영국	FBR	Hardrian(조적 로봇)
		영국	Construction Automation	ABLR(조적 로봇)
	미장공사	미국	Tibroc	CF-40(바닥미장 로봇)
		일본	카지마 건설	바닥미장 로봇
		일본	타이세이 건설	T-Irobot Slab Finisher(콘크리트 바닥 작업 로봇)
		중국	TLANX Equipment	RC-60T/80T(콘크리트 바닥)
		중국	Bozhilin Robot	바닥 미장 로봇
		한국	현대엔지니어링	바닥 미장 로봇
외벽도장	미국	Apellix	Spray Painting Drone(외벽도장 로봇)	
	영국	Hausbots	HB1(외벽도장 로봇)	
	중국	Bozhilin Robot	Outobot(외벽도장 로봇)	
	한국	로보프린트	P-BOT 2.1/Art bot (외벽 도장 로봇)	
	한국	현대엔지니어링, J2ENC	H-BOT(외벽 도장 로봇)	
실내도장	미국	Canvas	Canvas(실내도장 로봇)	
	일본	카지마 건설	분사/도장 로봇	
	싱가폴	Transforma Robotics	Pictobot(실내도장 로봇)	
	이스라엘	Okibo	Okibo(실내도장 로봇)	
	중국	Bozhilin Robot	실내 도장 로봇(6종)	
	한국	마젠타 로보틱스	실내 도장 로봇	
철 거	철거공사	미국	Flour	벽체 철거 원격 로봇

5) 국내 건설 로봇 활성화를 위한 관련 정책 동향

- 국내에서는 최근 산업재해 예방과 건설안전 강화를 위해 「산업안전보건법」을 전면개정하고, 「중대재해처벌법」을 본격 시행한 바 있음
 - 또한 건설공사 발주자 포함 모든 주체들의 안전책무를 확대하고 벌칙을 강화하는 「건설안전특별법」이 발의되어, 건설현장에서는 사업주와 기업의 책임이 대폭 강화되었음
 - 이러한 규제 강화는 현장의 안전관리시스템 강화와 스마트 안전기술 도입 증가로 이어짐
- 산업 전반의 안전성 제고 움직임을 반영하여 정부는 스마트 건설자동화를 위한 기술 개발 정책도 적극 추진하고 있음
 - 범부처 차원에서 『제4차 재난 및 안전관리 기술개발 종합계획(2023-2027)』에 로봇과 AI 기반의 진단·설계·시공 분야의 고도화와 디지털 전환을 핵심 과제로 포함시켰음
- 이러한 기조는 개별 부처의 중장기 계획에도 반영되었음
 - 국토교통부가 2018년 발표한 『스마트 건설기술 로드맵』은 2030년까지 빅데이터, 로봇, 드론을 활용한 건설 자동화를 완성하겠다는 목표를 제시함
 - 또한 국토교통부는 『제7차 건설기술진흥 기본계획(2023~2027)』을 통해 건설업의 디지털 전환(DX)을 비전으로 설정하고, 생산성과 안전성 향상을 위한 5대 전략과 15개 중점과제를 제시하였음
 - 관계부처가 합동으로 공표한 『제4차 지능형로봇 기본계획(2024~2028)』에서는 원격제어 건설로봇과 로봇 활용 건축물 원격점검 기술을 언급한 바 있음
 - 고용노동부의 산재예방 5개년 계획에서는 밀폐 공간 등 고위험 작업에 로봇과 센서를 활용해 안전 사각지대를 해소하려는 방향을 제시하였음
- 각 부처는 국정 과제와 연계하여 로봇 기술을 통한 디지털 전환으로 산업재해 예방, 건설산업 혁신, 국가경쟁력 제고를 동시에 달성하고자 했음
 - 2023년 7월에는 민간 주도의 스마트 건설 확산을 뒷받침하기 위해 ‘스마트건설 얼라이언스’가 출범했음
 - 대형 건설사가 중심이 되어 스마트 건설기술 표준 제정, 선도 프로젝트 선정, 제도

개선을 주도하게 되었으며, 정부는 이를 정책적으로 지원함으로써 2025~2028년에는 사람과 로봇이 공존 가능한 건축 공간 구현 기술개발을 본격 추진하고 있음

- 2024년 이후에는 보다 구체적인 실행 계획과 투자 확대가 이어지고 있음
 - 산업통상자원부는 『제4차 지능형 로봇 기본계획(2024-2028)』을 확정하고, 지능형로봇 전문기업 지정제도 재설계, R&D·금융·판로·인력 수급 지원 확대 등 로봇 산업 육성을 위한 종합적 정책을 내놓았음
 - 정부는 2030년까지 22.4억 달러 이상을 투자해 부품 국산화율을 44%에서 80%로 높이고, 51개의 규제 장벽을 해소하는 목표도 수립했음
- 종합적으로 국내 건설 산업의 로봇 활성화는 법제도 정비, 대규모 R&D 투자, 민관 협력 생태계 조성, 실증 기반 마련이라는 네 축을 중심으로 꾸준히 추진되고 있음
 - 이러한 정책 흐름은 단순한 기술개발을 넘어, 지속 가능한 스마트 건설 산업 생태계 구축과 현장 생산성 및 안전성의 동시 향상을 목표로 하고 있음

6) 일본의 건설 로봇 개발 및 적용 지원

■ RX 컨소시엄

- 건설근로자의 고령화로 인한 인력난에 따라 인력을 대체할 수 있는 방안이 시급한 상황에서 로봇, IoT 애플리케이션을 공동으로 개발하고, 개량하며 실용화까지 협력
- 건설 RX 컨소시엄은 2021년 9월 설립되어 현재 정회원 30개사, 협력회원 282개사 등 총 312개사가 활동 중임
- 매월 건설로봇 보고서 발간, 기술 개발 및 실증 내용 공유 등의 활동 지속
 - 주요 건설사 및 로봇제작사 유입을 통한 건설로봇 생태계 구축
 - 건설로봇 현황 공유, 개발로봇 시연회 개최 및 실증
- ‘건설 RX 컨소시엄’은 건설 로봇, 최신 건설사업관리 솔루션 등 IoT 기반 어플리케이션 기술 확산에 초점을 맞추고 있으며, 이를 지원하기 위한 총 14개의 세부 분과회를 운영하고 있음
 - ‘자재 자동 이동 시스템’, ‘타워크레인 원격 조작’, ‘건설 현장 폐기물 처리 기술’, ‘건설 레이어아웃(먹줄) 작업 자동화 로봇’, ‘조도 측정 로봇’, ‘시공 BIM’, ‘기술 상호 운용’, ‘상용 도구 활용(드론, 바이탈센서, 어시스트 슈트)’, ‘풍량 측정 로봇’에 관한 분과회를 운영하고 있으며, 최근 ‘AI를 활용한 안전장비 미착용 감지 시스템’, ‘ICT 기반 철근 검사 효율화’ 분과를 새롭게 추가함



[그림 3-17] 2025년도 통상총회(6월)



[그림 3-18] 2024년 RX 컨소시엄 전시회

[표 3-7] 일본의 건설 RX 컨소시엄 분과회 구성 및 목적

분과회		설치 목적
자재 자동 이송 시스템 분과		<ul style="list-style-type: none"> • 건설 현장 내 다양한 자재를 필요한 시기에 필요한 장소로 지연 없이 공급 • 건설 현장 내 자재 이송을 자동화하여 건설 근로자의 핵심 업무 투입 시간, 생산성 향상 도모
타워크레인 원격 조작 분과		<ul style="list-style-type: none"> • 작업 사무소나 원격지의 컨트롤센터 등 지상에 타워크레인 조종석을 설치함으로써 장소에 영향을 받지 않고 타워크레인 조작할 수 있는 환경 구축
건설 현장 폐기물 처리 기술 분과		<ul style="list-style-type: none"> • 오랜 기간 인력에 의존해 온 건설 현장 산업 폐기물 처리 방식의 효율화 목표 • 건설 현장 산업 폐기물의 분리, 압축, 회수 등 개별 단계별 효율화를 위한 기술개발
콘크리트 시공 효율화 분과		<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트 공사의 심각한 인력 부족과 기술 단절 등 현행 한계를 보완하기 위한 건설 로봇 등 관련 기술개발
건설 레이아웃 (먹줄) 작업 자동화 로봇 분과		<ul style="list-style-type: none"> • 건설 현장에서 요구되는 다양한 먹줄 작업을 자동화하는 로봇의 개발 및 실용화 추진 • 레이아웃(먹줄) 작업 자동화 로봇의 실제 현장 적용 및 평가, 개선을 통한 보급 활성화 유도
조도 측정 로봇 분과		<ul style="list-style-type: none"> • 설비공사가 이루어지는 내장 공사부터 준공까지 조도 측정 작업(야간 등)을 지원하는 로봇 개발 (현재 기술 개발 단계를 마치고 실용화보급 전개 단계로 이행)
시공 BIM 분과		<ul style="list-style-type: none"> • 사업별 BIM 데이터 연계 방식과 BIM 기반 작업 관련 모범 사례 공유 • ‘건설 RX 컨소시엄’에서 추진하는 각종 건설 로봇 및 IoT 어플리케이션과 BIM 데이터 간 연계를 통한 고도화 유도
기술 상호 운용 분과		<ul style="list-style-type: none"> • 렌탈 회사를 통해 운용되고 있는 제품을 포함하여 개별 기업에서 이미 개발한 로봇과 기계 등을 대상으로 참여기업 작업장에서 시험 운용 실시 • 사용자 관점의 시험 운용 결과를 토대로 지속적 기능 개선 등 고도화 추진, 기술 범용성 확보
상용 도구 활용 분과	드론 워킹그룹	<ul style="list-style-type: none"> • 상용 드론의 제품 사양, 특징, 현장 활용 평가 등에 관한 정보를 수집·정리하고, 현행 문제점과 개선 필요사항을 제조사 및 벤더와 공유함으로써 건설 현장 사용성 향상 유도
	바이탈센서 워킹그룹	<ul style="list-style-type: none"> • 현장 열사병 재해 방지를 위해 상용 도구인 바이탈센서를 활용한 현장관리 시스템 구축 목표 • 건설 현장에 적합한 바이탈센서의 선정, 관리시스템 사례 소개 등을 통한 의견 수렴 과정을 수행하고 서비스 제공 기업에 제언
	어시스트 슈트 워킹그룹	<ul style="list-style-type: none"> • 상용 어시스트 슈트에 대한 공동 착용 체험회 실시 및 평가 의견 수렴 • 사용자 관점의 어시스트 슈트의 기능, 안전성, 가격 등에 대한 의견을 제조사 및 관련 업계에 전달함으로써 건설 현장에 적합한 어시스트 슈트 개발 촉진
풍량 측정 로봇 분과		<ul style="list-style-type: none"> • 공조 공사의 시험 운전 조정의 품질 보증 항목인 풍량 측정 업무 지원 • 풍량 측정 업무 효율화를 위해 측정 작업 및 보고서 작성의 자동화 목표

* 최근 AI 기반 안전띠 미사용 감지 시스템 분과, ICT 기반 배근 검사 효율화 분과, 설비 검사 로봇 분과 등 추가

2.4 국내외 적용 현황과 사례

1) 국외 건설 현장에서의 로봇 적용 현황

■ 중국 : 국가 주도 '스마트 건설현장'과 다기능 로봇 투입

- 국가 차원의 '스마트 건설현장' 정책과 민간 대형 개발사의 투자를 기반으로 로봇 도입을 적극 추진하고 있음
- 컨트리가든은 벽돌쌓기, 미장, 용접, 운반, 청소 등 30종 이상 로봇을 현장에 투입해 인력 30% 감축 효과를 입증했으며, CSCEC·웅안 신도시 등 대형 프로젝트에서는 무인 굴착기, 정밀 측량 로봇, 자율 운반 로봇이 종합적으로 활용되고 있음
- 이는 인건비 상승과 품질 향상 요구에 대응하는 동시에, 정부의 보조금·규제 완화 정책과 맞물려 대규모 프로젝트 중심의 종합적 로봇화를 실현하고 있음

■ 일본 : 인력감소 대응을 위한 '현장 특화형' 자동화와 무인화

- 고령화와 숙련공 부족을 배경으로 대형 건설사가 개별 공정 특화 로봇을 꾸준히 개발·도입해 옴
- 시미즈건설의 'Smart Site'는 천장 보드 시공·자율·운반 로봇을 통해 생산성을 약 50% 향상시켰으며, 카지마의 A⁴ CSEL은 불도저·덤프·롤러 등 장비를 무인 통합 운용해 댐 공사에서 24시간 시공을 실현함
- 또한 NEXCO 등은 터널·교량 유지관리 로봇을 활용해 위험 노출을 줄이고 점검 효율을 높이고 있음
- 일본은 특정 과제지향형 로봇 개선, 이해관계자 협조를 통한 안정적 도입이 특징임

■ 미국 및 기타 국가 : 스타트업 주도의 '공정 특화' 로봇이 실전 성능 검증

- 스타트업 중심의 '공정 특화 로봇'이 상용 현장에서 빠르게 성과를 내고 있음
- Canvas의 미장 로봇은 공정 기간을 최대 60% 단축하고, Dusty Robotics의 먹메김 로봇은 도면 표시 시간을 절반 이상 줄임
- TyBOT 철근결속 로봇은 시간당 1,000여 개의 타이를 묶으며 교량 시공 속도를 개선했고, Spot 로봇은 3D 스캐닝·안전 점검에 활용되고 있음
- 호주의 Hadrian X 벽돌 시공 로봇, 스위스 ETH의 DFAB House 등도 대표적임

2) 국외 건설 현장에서의 로봇 적용 사례

■ 현장 레이아웃/마킹 자동화 확대

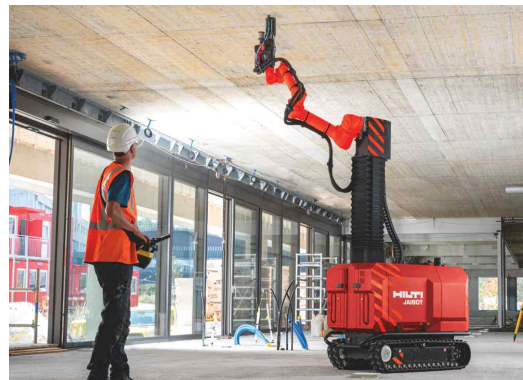
- 바닥에 1:1 도면을 프린팅하는 로봇(HP SitePrint)이 상용화되며 실내 파티션, MEP, 거푸집 등으로 사용영역이 확장됨
- 대형 시공사(스칸스카 등) 사례 기준 수 시간 작업을 수십 분으로 단축했다는 보고가 다수 있음

■ 철근·천공 등 '단일 공정 특화' 로봇 상용

- 철근 결속(TyBOT), 천장 천공(Hilti Jaibot) 등 반복·고위험 공정에서 생산성 및 안전성 개선 사례가 누적



[그림 3-19] HP SitePrint



[그림 3-20] TyBOT(좌), Hilti Jaibot(우)

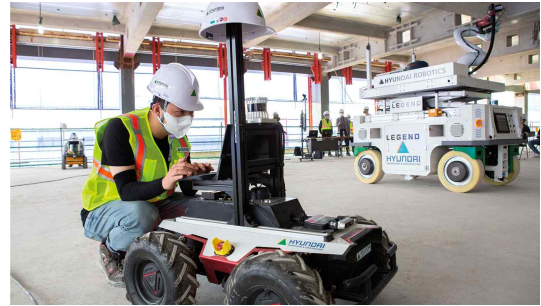
3) 국내 건설 현장에서의 로봇 적용 현황

- 한국은 현재 정부 주도형 실증 단계에 있음
 - 국토교통부는 2020년부터 ‘스마트건설 챌린지’를 연례화해 공공·민간의 실증과 현장 적용을 유도하고 있으며, 최근부터는 안전, 단지, 도로, 철도, BIM 등 다섯 분야로 경연을 고도화했음
 - 이는 『제6차 건설산업진흥 기본계획(2023~2027)』, 『스마트 건설 활성화 방안(S-Construction 2030)』 등과 맞물려 위험 공종의 무인·자동화, BIM/디지털화 의무화, 실증 보급 지원을 체계화하는 흐름을 형성했음
- 이러한 정책적 기반 위에서, 현장 관리·검측 분야에서는 로봇 실증이 활발히 진행되고 있음
 - 예컨대 현대건설은 사족보행 로봇(Spot)에 자체 데이터수집·레이저 스캐닝 기능을 결합해 주택·터널 등에서 정기 순찰·3D 형상 취득·원격 모니터링을 실증했음
 - 이 접근은 사람이 접근하기 어려운 구간의 상황 인지, 야간·협소 공간의 안전 점검, BIM 기반 시공 오차 확인 등에 유효성을 보였으며, 품질·안전 관리의 무인화 절차를 성숙시키는 데 기여하였음
- 더 나아가 공정 특화 로봇도 등장하고 있음
 - 2023년 스마트건설 챌린지의 단지·주택 부문에서는 천장 앵커 자동 설치 로봇이 수상하여 고소·반복 작업의 자동화 가능성을 입증했음
 - 이어 2025년에는 삼성물산-현대건설이 공동 개발한 자재 운반 로봇이 현장 시연을 통해 SLAM 자율주행, 팔레트 형상 인식, 관제·충전 자동 도킹 등 기술 패키지의 현장 적합성을 점검했음
 - 이러한 사례는 단일 공정에서의 속도·안전성 개선뿐 아니라, 로봇 운용·관제·동선 분리 등 운영 설계 체계의 축적을 촉진했음
- 지원 인프라 확장도 진행되어, 정책-R&D-실증 인프라가 결합되면서 개별 기업의 산발적 도입을 프로그램형 실증으로 전환하려는 시도가 늘고 있었음

4) 국내 건설 현장에서의 로봇 적용 사례

■ 현장 데이터화와 안전 중점

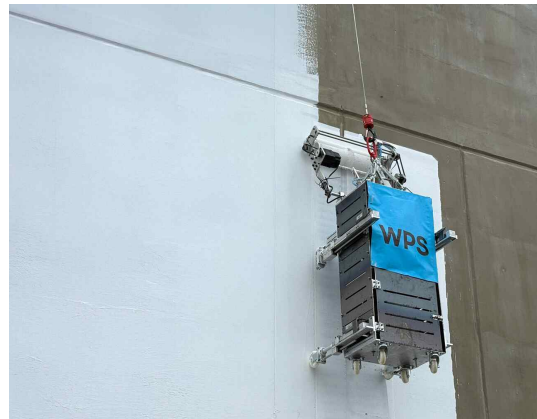
- 현대건설 4족 보행로봇(Spot)·UGV를 활용한 무인 순찰/스캔·모니터링이 시범→ 상용 단계로 확산(자율주행·SLAM·AI비전 결합)



[그림 3-21] 현대건설 Spot(좌), UGV(우)

■ 시공 공정 특화 로봇의 현장 테스트 증가

- 벽체 타공·볼트 체결·도장 등 반복·고위험 공정에서 국산/해외 솔루션 병행 검토 및 실증함



[그림 3-22] 삼성물산 철골 볼트 조임 자동화 로봇(좌), 호반건설 × WPS - 외벽 도장 로봇 'Rollot' (우)

2.5 로봇 활성화 장애요인 및 생애주기 측면의 고려 사항

1) 건설 로봇 관련 주요 이슈

- 건설 로봇의 도입은 위험한 환경에서 작업하는 작업자를 대체하여 안전성을 향상시키며, 높은 시공 정확도로 공사비를 절감할 수 있을 것으로 기대됨
- 로봇 활성화는 건설산업과 로봇 공학을 융합하여 젊고 유능한 인력의 유입을 촉진시켜 건설산업의 체질 개선에 기여할 것으로 기대됨
- 건설 로봇의 도입은 건설현장의 업무 방식을 크게 변화시킬 것으로 예상되지만 이러한 변화가 반드시 기존 건설 분야의 일자리가 줄어드는 것을 의미하는 것은 아님
 - 건설 전문가는 창의적이고 섬세한 부분을 담당하게 될 것이며 로봇은 대규모의 단순 작업을 처리하는데 도움을 줄 것으로 예상됨
- 한편으로 건설로봇과 관련하여 다음과 같은 이슈가 논의되어 왔음

[표 3-8] 건설로봇 관련 주요 이슈

이슈 항목	내 용
복잡성	• 로봇은 대량생산을 위해 동일한 환경의 반복작업에 최적화되어 있으나, 현장은 기상변화가 심하고 건물, 교량 등 구조물마다 디자인이 다양함
비 용	• 건설 로봇을 직접 도입하기 위해서는 연구개발을 포함하여 높은 초기 비용이 필요하나, 다수의 건설 회사는 낮은 수익률로 운영되기 때문에 높은 초기 투자비용을 감당하기 어려움
기 술	• 현장에서 검증된 기술을 선호하는 건설산업의 특성상 아직 초기단계인 건설 로봇을 도입하기 위해서는 기술의 발전과 검증이 요구됨
법제도	• 건설 현장은 항상 사고가 발생할 가능성이 존재하므로 건설 로봇을 적용하기 위해 작업자의 건강 및 안전과 관련된 법, 제도 정비 필요함

자료 : 한국건설기술연구원 스마트건설지원센터(2020) 내용 재구성

2) 국내 건설 로봇 적용에 있어서의 장애요인

■ 기술적 장애요인

- 국내 건설 로봇의 현장 적용은 빠르게 확대되고 있었음
 - 대형사들이 4족 보행 로봇(Spot)과 UGV·드론·3D 스캐너를 결합해 공정·품질·안전 데이터를 일상적으로 수집·분석하는 체계를 시범 운용하여, 특정 환경과 과업

에서 성과를 보였음

- 다만 비정형 지형, 기상 변화, 가설·중장비 혼재, 통신 음영 등은 센서·알고리즘의 견고한 적응성을 요구했음
- 이러한 “현장 환경의 복잡성-자동화 필요-안전성 제고”의 연결고리는 국내 기술 동향 보고에서도 반복적으로 제시됐음

○ 또한 안전과 HRC(인간-로봇 협업) 이슈도 존재했음

- 국내에서 산업용·모바일 로봇의 안전 가이드 보급과 자동화 기술의 현장 적용 논의가 진행됐지만, 건설 현장처럼 작업 경계가 수시로 바뀌고 다중 공정·장비가 동시 진행되는 환경에 대한 현장형 기준·절차의 보완 필요가 지적됐음
- 관련해 국토부가 건설기계 자동화(MG/MC)의 표준 시공기준(표준시방서)을 제정하며 디지털 도면 제출, 장비 교정, 시공검사 기준 등을 규정한 것은 건설 자동화 기준의 출발점이었음
- 그러나 이는 특정 장비·공정의 기준에 한정되어 있어, 로봇 전반의 HRC·감지·정지거리 등 세부 안전·성능 절차는 추가 축적이 필요했음

■ 제도적·법적 장애요인

○ 기술적 제약과 더불어, 제도·법적 기반의 미비도 큰 과제로 지적됨

- 국내는 국제 안전 요구를 수용한 KS 체계를 운영하고 있으나, 건설현장 특유의 임시·야외·다중 장비 협업 환경에 대한 현장형 안전·성능 기준의 보완 필요가 정책 문서에서 직접적으로 제기됐음
- 특히 정부의 첨단로봇 규제혁신 방안(관계부처 합동)은 ① 모빌리티, ② 세이프티, ③ 협업·보조, ④ 인프라 등 4대 축으로 총 51개 개선과제를 제시하고, 그중 다수 과제를 2024년까지 신속 개선하며(39개, 76%), 성능-안전성 실증 및 기준 마련 → KS 고시와 같은 단계적 정비를 명시했음(재난·안전 로봇 성능평가 기준 마련, 이동·협동 로봇 안전기준 도입, 테스트필드 구축·인증경로 확충 등)
- 이는 “안전/성능 기준 부재 → 기준(안) 개발 및 표준 고시”라는 현행 인프라 보완 필요를 정부가 공식화한 근거였음

3) 제도적 개정사항

■ 공공발주 및 입찰 제도 개선

- 국토교통부는 2023년 기술형 입찰에서 스마트 건설기술 최소 배점(7점 이상)을 도입하고, 단독 응찰 절차 신설
- 스마트 턴키에서는 BIM 2점 이상 별도 반영을 명시했음
- 다만, 로봇 적용을 독립 평가항목으로 세분화하고, 현장 실증 성과와 안전·교육 이행을 정량 점수화해 기획-설계-시공-유지관리로 이어지는 전주기 평가 가이드가 보완될 필요가 있음

■ 건설 로봇 관련 안전기준 및 인증체계 마련

- 현장의 변동성과 다종 장비 협업을 반영한 현장형 안전·성능 기준이 필요했음
- 정부의 규제혁신 방안은 성능·안전성 실증-평가기준 마련-표준(고시)-조달·보험·이력관리 등 제도 인프라 연계를 명시함
- 건설 로봇에 적용할 경우, 작업유형별 시험·평가 기준(정지거리, 힘, 압력, 감지성능 등)의 구체화를 통해 발주·감리와 연동되는 인증·검증 경로를 제도화하는 것이 타당했음

■ 기술개발 및 현장 실증 지원 정책 강화

- 국토부는 MG/MC 표준시방서('KCS 10 70 10') 제정으로 건설 자동화의 기준 기반을 마련했고, 이후 다양한 장비·시설물로 시공기준 고도화 및 확대 적용 방침을 밝힌 바 있었음
- 동시에 스마트건설 챌린지·얼라이언스 등 생태계형 플랫폼을 통해 실증-확산-제도 개선 연계를 추진해 왔음
- 향후에는 사전상용화(PCP)형 구매나 조달 혁신제품과의 연계를 통해 우수 실증기술에 평가 가점·판로를 구조적으로 부여하는 방향 검토 필요

4) 건설공사 생애주기 고려 사항

■ 설계 및 기획 단계

- BIM/CIM, 드론 기반 측량, 가상현실(VR), 빅데이터, 인공지능(AI), 3D 프린팅 등 디지털 기술이 핵심 역할을 함
 - 이를 통해 초기 설계 시 로봇의 활용 가능성과 최적화 방안을 사전에 검토할 수 있으며, 공정 시뮬레이션과 로봇 기능 요구사항을 명확하게 정의할 수 있음
 - BIM/CIM 기반의 건설 생애주기 디지털 전환을 통해 시공 자동화와 표준화된 프리캐스트 활용 등을 추진하며 생산성과 안전성을 동시에 추구한 대표적인 사례로 일본의 'i-Construction 2.0' 정책 활용 가능
- 로봇 투입을 전제로 한 로봇 친화형 설계(Design-for-Robotics) 도입 추진
 - 공동주택 등 건축 분야는 BIM-to-Field 자동 레이아웃을 위한 모델 표준화, 로봇 작업반경·공차·접근 폭을 고려한 평면·상세 설계, 프리팹·모듈러 기준 치수와 조인트 표준화가 필요함
 - 토목 분야는 철근 배근·데크 상부의 평탄·균질 작업면 확보, 가설물 최소화, 교량 케이블·거더 등 정기 점검을 위한 레일·고정점·접근창 등 내장형 유지관리 설계를 포함함

■ 시공 단계

- 로봇을 적용하기 위한 현실적 실행과 안전이 핵심임
- 건설 현장에서는 벽돌 쌓기, 철근 타이잉, 용접, 3D 프린팅, 원격 제어 철거, 드론 기반 현장 모니터링 등 다양한 로봇 기술이 적용 가능하며, 이를 통해 작업 속도와 정밀도, 현장 안전 모두 개선할 수 있음

■ 유지관리 및 운영 단계

- 로봇의 안전성, 정기 유지보수, 장애 위험 관리가 중요함
- 로봇 사용 과정에서 발생할 수 있는 충돌, 감전, 부품 고장 등 안전사고를 예방하기 위해 방호 울타리, 센싱 장치, 경고 시스템 등 안전 설계 요소가 필수적이며 정기적인 위험 평가와 유지보수 체계 수립도 반드시 포함되어야 함

■ 공사 후 평가 및 생애마감 단계

- 로봇 도입이 전체 생애주기 비용(LCC) 절감 및 공정 단축, 탄소 배출 저감 등의 성과로 이어질 수 있는지 검증
- 디지털 기술 기반 건설 전 단계에서 LCC 33% 절감, 공사기간 50% 단축, 탄소 배출 50% 저감 등 구체적인 목표가 제시되어 있음

2.6 발주자 측면의 로봇 적용 전략

- 공공 건설 발주자의 입장에서는 건축과 토목을 아우르는 건설분야 전반에 로봇 기술을 도입하기 위한 전략이 필요함
 - 이러한 전략은 설계 단계에서부터 로봇 활용을 고려하는 방식으로 구상되어야 함
 - 우선 현장 자재 운반, 반복 작업 등 고위험 작업을 자율주행 로봇과 자재 핸들링 로봇으로 전환함으로써 작업 효율성과 안전성을 동시에 확보할 수 있음
 - 실제로 최근 삼성물산과 현대건설이 SLAM 기반 자율주행, 팔레트 인식, 로봇 관제 기술을 집약한 자재 운반 로봇을 실증한 바 있으며, 이 사례는 작업자와 자재의 동선을 분리해 효율뿐 아니라 현장 안전까지 고려한 전략적 접근으로 평가됨
- 이러한 사례는 곧 설계 단계에서의 로봇 적용 준비의 필요성과도 연결됨
 - 설계 초기부터 로봇 기반 시공 가능성을 염두에 두고 BIM과 자동화 시뮬레이션을 활용하는 방식은 공사 품질 향상과 오류 최소화에 크게 기여함
 - 미국 텍사스 A&M 대학의 연구에 따르면, 설계·계획 단계에서 AI와 로봇 기술을 반할 경우 프로젝트 기획, 시공, 품질 관리 전반에서 효과가 검증됨
- 나아가 설계·기술적 준비만으로는 충분하지 않았으며, 이를 뒷받침할 경제적·조직적 인프라 구축이 병행되어야 함
 - 국내에서는 현대건설과 삼성물산이 로봇 분야 에코시스템 구축을 위한 전략적 MOU를 체결하여 공동 R&D, 기술 네트워크 확대, 현장 실증 협력을 추진함
 - 또한 포스코이앤씨는 수중 드론을 활용해 해저 지반 탐사와 시공 품질 점검에 활용함으로써 현장 자동화와 안전성 강화를 동시에 실현함

- 공공 발주자는 이러한 민간의 시도와 성과를 벤치마킹하여, 로봇 도입을 위한 일정 지원과 조달 방식 설계, 중소 시공사 대상 인센티브 프로그램, 기술 교육 및 인증 체계 마련 등을 통해 초기 적용 부담을 줄이고 산업 전반의 확산 기반을 마련할 필요가 있음
 - 이는 국내 차원의 전략적 대응일 뿐만 아니라, 해외에서 확인된 성과를 적극적으로 참고할 필요성으로 이어짐
- 실제로 영국에서는 AI 기반 로봇이 디지털 설계된 목조 구조 부재를 자동 제작해 현장 조립하는 시스템을 통해 공사 기간 단축, 비용 절감, 환경 친화성을 동시에 달성함
 - 이러한 선진 사례는 국내 공공 조달 및 설계 프로세스에 로봇 활용을 제도적으로 반영하는 데 유용한 인사이트를 제공함
- 마지막으로, 로봇 협업 환경을 위한 안전·윤리 체계 수립이 필수적임
 - 로봇과 인간이 공존하는 현장의 안전사고 예방, 책임소재 명확화, 데이터 보안 및 투명성 보장을 위한 제도적 장치는 로봇 활용의 지속 가능성을 확보하는 기반이 됨
 - 특히 자동화 도입으로 발생할 수 있는 직업 안정성, 프라이버시, 신뢰 문제, 책임 구조에 대한 고려는 학계와 산업계 모두에서 강조되었으며, 공공 발주자가 주도적으로 논의의 방향을 잡아야 함

3. 3D 프린팅 관련 현황과 적용 방안

3.1 3D 프린팅 개념과 기술 구성요소

1) 3D 프린팅 기술 개요

- 3D 프린팅 기술은 2013년 Economist가 제4차 산업혁명을 촉발시킬 기술로 소개했으며, 2014년 미국에서 거의 모든 생산 방식을 바꿀 잠재력을 가진 기술로 언급됨
- 3D 프린팅 기술은 제조업의 혁신을 주도하는 대표적인 디지털 제작 방식으로 기존의 전통적 가공 방식과는 다른 새로운 패러다임을 제시하는 기술이라고 할 수 있음



[그림 3-23] 3D 프린팅 기술 개념도

- 전통적 제조방식이 절삭, 주조를 기반으로 하여 불필요한 소재 낭비를 수반하는 반면 3D 프린팅은 필요한 부분에만 재료를 적층(additive manufacturing)하여 제작함
- 이로 인해 자원 절약 효과가 크고, 자유로운 형상 구현이 가능하며, 디지털 설계 데이터만 있으면 다양한 맞춤형 제작이 가능함

[표 3-9] 기존 제조공정과 3D 프린팅 공정 비교

구분	금형을 활용한 전통 제조공정	3D 프린팅을 활용한 공정
강점분야	대량생산 분야에서 강점 (생산량 감소 → 제품원가 증가)	맞춤형 생산 분야에서 강점 (생산량 감소 → 제품원가 동일)
제조방식	부품생산 후 조립하여 제품 완성 부품/완제품 적정 재고운영 필요	재고 없이 조립된 형태의 제품 생산가능
생산비용	제품 구조가 복잡할수록 생산비용증가	제품의 복잡도와 생산비용 무관
조달	공장에서 제품을 생산하여 물류를 직접 수송	제품대신 디지털도면을 조달하고 원하는 장소에서 출력
공장유형	제품별 서로 다른 생산라인 필요	하나의 3D 프린터가 여러 종류의 제품을 생산

2) 3D 프린팅 기술의 종류

■ 적층하는 방식에 따른 분류

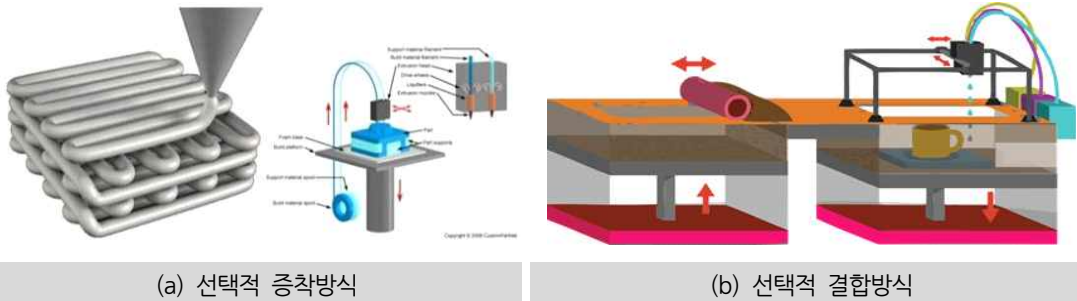
- 적층하는 방식에 따라 선택적으로 증착하는 방식과 선택적으로 결합하는 방식으로 나눌 수 있음

① 선택적 증착방식 (selective deposition)

- 원료를 얇은 층으로 쌓아가는 방식의 프린터를 지칭
- 주로 주사기나 노즐을 통해 액체를 분출하거나, 뿌리거나, 액체 원료를 짜내서 바르거나, 가루 형태의 원료를 뿜어내는 방식
- 레이저나 산업용 열선총을 사용하며 너무 약하거나 위험해서 가정용이나 사무용으로 사용되는 대부분의 프린터는 증착방식 사용

② 선택적 결합 방식 (selective binding)

- 원료를 레이저나 접착제를 사용해서 결합하는 방식
- 열이나 빛으로 분말이나 빛에 민감한 감광성 수지를 사용해 굳히는 방식



출처: <https://m.blog.naver.com/makingbrothers/220912669371>

출처: <https://about3dprintcapston.wordpress.com>

[그림 3-24] 출력방식에 따른 3D 프린팅 분류







■ ISO 표준에 따른 3D 프린팅 기술 분류

- 3D 프린팅 기술은 다양한 상용기술이 제시되어 있으며 이를 [표 3-10]과 같이 ISO 표준에 따라 7개의 기술군으로 분류할 수 있고 이는 장비기술과 일치함
- 7개의 기술군 중에서 가장 많이 활용되는 방식은 소재압출방식(material extrusion), 광중합방식, 소재분사 방식 등임
- 건설분야에서는 주로 콘크리트 재료를 기반으로 하는 소재압출방식을 활용하여 건

축물이나 조형물 시공에 활용 중임

- 모래 등을 활용해서 서포터를 기반으로 하는 비정형 조형물을 시공하는 경우에 소재 분사 방식이나 결합제 분사 방식을 사용하는 경우도 있음

[표 3-10] ISO 표준에 따른 7개의 3D 프린팅 기술군

연번	분 류	개 념 도	정 의	상 용 기 술
1	소재 압출		소재를 노즐 등을 통해 압출하여 선택된 위치에 적층하는 AM 공정기술군	FDM
2	광중합		용기 내의 액상 광경화폴리머를 광원을 이용하여 선택적으로 경화하는 AM 공정기술군	SL, DLP
3	소재 분사		적층소재를 액정의 형태로 분사하여 선택된 위치에 적층하는 AM 공정기술군	HJ, IPP
4	결합제 분사		액상 바인더 소재를 분말소재에 선택적으로 분사하는 AM 공정기술군	BJ, IPP, 3DP
5	분말 융합		배열된 분말소재에 열에너지를 이용하여 선택적으로 녹이는 AM 공정기술군	SLS, SLM, EBM, DMLS, SHS
6	다층 라미네이션		Sheet 형상의 소재를 적층하여 제품화하는 AM 공정기술군	LOM, UAM
7	고에너지 직접주사		레이저, 전자빔, 플라즈마 아크 등 고밀도 에너지를 이용하여 소재를 용융하여 적층하는 AM 공정기술군	EBDM, LENS, IFF, LPF, EBF3, SMD

[표 3-11] 재료형태별 3D 프린팅 기술 분류

분 류	기 술 명	정 의	비 고
액체 기반	SLA	<ul style="list-style-type: none"> • 저전력, 고밀도 UV 레이저 이용 • 빛을 받으면 고체로 변하는 폴리머 액체에 물체의 모양대로 레이저를 쏘아 얇은 막 생성 • 층을 모두 쌓아 형체가 완성되면 완전한 고체로 굳힘 	가장 널리 사용
파우더 기반	SLS	<ul style="list-style-type: none"> • SLA와 유사한 방식을 거치며, 파우더 형태의 폴리머나 메탈 원료에 레이저를 쏘서 고형화시켜 막 형성 • 막 형성 후 파우더를 얇게 뿌리고 다시 레이저를 쏘서 새로운 막 형성 	조형속도 빠름
고체 기반	FDM	<ul style="list-style-type: none"> • 고체 필라멘트 형태의 플라스틱, 왁스 원료가 노즐을 통해 분사되어 얇은 막 형성 • 노즐은 플라스틱을 녹일 정도의 고열을 발산하며, 노즐을 통과한 원료는 신속히 경화되어 막부분에 층층히 쌓임 	조형속도 느림
선형 기반	반중력 객체 모델링	<ul style="list-style-type: none"> • 서포트 구축이 필요없이 제약이 없는 공간에서 조형 가능 • 사용자가 정의한 그대로 거의 모든 곡선, 직선 가능 	열가소성 수지 사용

■ 재료형태별 3D 프린팅 기술 분류

- 3D 프린팅 재료는 [표 3-11]에서 보는 바와 같이 크게 액체 기반, 파우더 기반, 고체 기반, 선형 기반 등으로 구분
- 폴리머 계열의 재료인 고체기반 재료는 교육기관에서 주로 활용 중이며 의료분야 등에서는 액체기반 재료를 주로 활용하고 있음
- 고체기반의 재료는 조형속도가 느린 반면 액체기반의 재료는 출력속도가 빠르고 강도가 우수하여 산업분야에서 가장 많이 활용되는 기술임

3) 건설 3D 프린팅 세부 구성 요소

- 건설 분야 3D 프린팅 기술은 크게 설계 소프트웨어, 하드웨어, 소재, 품질관리 및 후처리 기술이라는 네 가지 구성요소로 구분됨

■ 설계 소프트웨어

- BIM 기반 3차원 모델링이 필수적이고, 최근에는 AI 기반 자동설계 최적화 도구와의 융합도 진행 중이며 주로 다음과 같은 소프트웨어가 필요함
 - 3D 모델링, CAD/BIM 연계 : BIM과 직접 연계해 설계→출력 자동화. 복잡한 비정형 건축도 추가 거푸집 없이 구현 가능
 - 슬라이싱 알고리즘(Slicing Software) : 구조 모델을 층별(레이어)로 변환. 층 두께, 적층 경로, 내부 채움(퍼센트, 패턴) 결정
 - 출력 제어(Printing Path & Control) : G-code 기반 경로 제어. 로봇 제어기/PLC가 프린터와 연동. 출력 중 변형, 수축 균열을 최소화하기 위한 실시간 제어 알고리즘
 - 시뮬레이션 및 구조해석 : 유동해석(CFD) 및 적층 안정성(FEM) 사전 검토. 내하력, 열응력, 균열 발생 등을 예측하여 설계 최적화

■ 하드웨어 (Hardware System)

- 3D 프린팅 장비는 건설현장에서 콘크리트나 복합재를 직접 출력할 수 있는 장비체계로서 출력장비, 프린트 헤드, 자재 공급시스템 등으로 분류할 수 있음

① 3D 프린팅 출력장비

- 장비의 구조 및 출력방식에 따라 [표 3-12]와 같이 크게 3가지로 분류 가능
 - 갠트리(gantry) 방식 : 대형 구조물 시공에 적합하고 미국의 ICON이나 COBOD가 대표적이며, 레일 추가시공으로 여러 개의 구조물 또는 건축물 동시 시공 가능
 - 크레인형/모바일형(mobile crane/vehicular): 대형·소형 현장에서 모두 사용 가능 하지만 좁은 현장에서 사용하는 것이 유리, 장비 이동하면서 연속 출력 가능, 설치 및 해체가 용이하여 산악지형이 많고 아파트 시공이 많은 국내 현장에 적합 등
 - 로봇 암형(robotic arm type) : 낭트대학교 사례가 대표적이며 다관절 로봇을 활용해 곡면 및 자유곡선 구조를 유연하게 출력하고, 소규모 현장이나 모듈 제작에 적합

[표 3-12] 3D 프린팅 출력방식에 따른 장비 종류

구분	갠트리	크레인	로봇 암
사진			
사례	<ul style="list-style-type: none"> • 아인트호벤 대학 • Contour Crafting 	<ul style="list-style-type: none"> • Apis Cor • MIT DCP 	<ul style="list-style-type: none"> • 낭트 대학교 • XtreeE
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 안정적 이동 및 출력 • 단순한 알고리즘 	<ul style="list-style-type: none"> • 작은 크레인으로 큰 작업 공간 확보 가능 • 좁은 현장에서 사용가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 다수 축으로 자유로운 움직임 • 좁은 현장에서 사용 용이
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 출력물이 커지면 큰 로봇 필요 • 현장 설치에 많은 시간 소요 • 공장 환경에 적합 	<ul style="list-style-type: none"> • 크레인 링크가 처지는 문제 발생 	<ul style="list-style-type: none"> • 기존 산업용 로봇은 하중조건, 암 길이가 3D 프린팅에 특화된 구조가 아님 • 좁은 작업 공간

출처: 이동현 등(2018)

② 프린트 헤드 (Nozzle System)

- 콘크리트, 모르타르를 균일하게 압출
- 토출량 제어, 압출 압력 제어, 토출구 직경 가변 기술 적용
- 일부는 다중노즐 시스템으로 출력 속도 향상

③ 자재 공급 시스템 (Material Feeding & Pumping System)

- 믹서(Mixer), 펌프(Pump), 호퍼(Hopper)로 구성
- 일정한 점도 유지 및 토출 안정성이 핵심
- ICON, ACES, Apis Cor 등의 회사는 자동 혼합·이송·세척 시스템 통합

■ 프린팅 소재(Printable Materials)

- 3D 프린팅에 주로 활용되는 재료는 시멘트 계열이며 적층성, 경화성, 유동성을 동시에 충족해야 하기 때문에 전통적 콘크리트와는 다르고, 아래 재료가 많이 활용됨
 - 콘크리트 기반 : 고유동성 & 빠른 초기강도 발현. 일반 시멘트 + 섬유보강재(Fiber Reinforced Mortar) 조합. 인쇄 중 처짐/균열 방지를 위한 점도 조절 첨가제 사용
 - 복합재료(Composite Materials) : 석분, 석고, 지오폴리머(Geopolymer), 섬유강화 플라스틱(FRP). 친환경·저탄소 소재 개발 활발
 - 현지 자원 활용(ISRU: In-situ Resource Utilization) : 달/화성 건설 프로젝트 (Project Olympus, ACES 연계)에서 연구. Regolith(토양 유사체)를 결합재와 함께 프린팅 재료로 활용
- 이를 좀더 세분화 하면 [표 3-13]과 같이 정리할 수 있음

[표 3-13] 건설에서 주로 활용하는 재료에 따른 세부 분류

분 류	주요구성	장 점	한 계
시멘트 기반	시멘트+혼화제	구조강도 우수, 실용적	대기중 CO ₂ 배출
천연기반	흙, 벚짚, 균사체	친환경, 현지재료	구조 안전성 검증 필요
복합소재	플라스틱+섬유	경량화, 디자인 자료	구조용엔 한계
금 속	알루미늄, 강재	고강도 부품 가능	비용, 설비 부담 큼
재활용	폐콘크리트, 플라스틱	순환경제 실현	균질성 확보 어려움

■ 품질관리 및 후처리 기술

- 적층 과정에서 발생하는 강도 불균일 문제 해결을 위해 실시간 모니터링 필요하며, 후 처리 과정에서 표면 마감, 단열·방수 보강 작업이 필수적임
 - 보강 : 철근·케이블 삽입, 프린팅과 동시에 내장하는 기술. 콘크리트 매트릭스에 단 섬유/장섬유 혼입
 - 센서 기반 모니터링 : LiDAR, 카메라, 레이저 스캐너로 실시간 형상·위치 오차 감 지. 토출 압력, 경화 속도, 온도·습도 데이터 모니터링
 - 후처리 : 미장(Surface finishing), 단열재 충전 및 도장. 필요시 CNC 가공과 병행
 - 품질 검증 : 초음파, 열화상, X-ray CT 등 비파괴검사(NDT). 시공 코드(Structural Code)와 호환성 평가 필요

3.2 3D 프린팅 필요성과 기대 효과

1) 국내 건설산업 현황

- 건설분야는 노동집약·현장 의존적인 생산체계, 공급자 위주 산업구조 등으로 여전히 ‘낡은 전통산업’에 머무르고 있음
 - 건설은 안전성·생산성이 낮은 상황에서 고령화 및 숙련인력 감소가 빠르게 진행되고 있어 디지털화 및 자동화 필요성이 증대되고 있는 상황임
- 국가별 기술력의 경우 노동생산성 선도그룹은 시간당 평균 30~40\$의 수준을 나타내는 반면, 국내는 평균에도 못 미치는 시간당 평균 14\$의 생산성을 나타내고 있음
 - 생산성이 가장 우수한 벨기에는 시간당 48\$의 생산성을 나타내는 것으로 조사되어 국내 대비 약 3배 높은 수준임
 - 건설 시공분야 노동생산성 기준으로는 시공분야 생산성이 가장 높은 미국의 약 83% 수준에 머무르고 있음
- 이를 해결하기 위해 건설업에 3D 프린팅 기술과 같은 첨단기술 도입 시 생산성 제고가 가능할 것으로 전망하고 있으며, 건설업의 경우 디지털화가 가장 늦은 산업으로 기술력 개선만으로도 14~15%의 생산성 제고효과가 발생할 것으로 전망하고 있음
- 4차 산업혁명 중장기 전망(산업연구원, 2019)에서는 디지털화 등 첨단기술의 도입으로 건설산업에서의 실질 부가가치 성장이 크게 증가할 것으로 분석하고 있음
- 3D 프린팅 기술은 시공분야 디지털화 및 무인 시공 자동화의 핵심기술로 분류되고 있으며 향후 건설 패러다임 전환에 앞장설 것으로 많은 전문가들이 판단하고 있음

[표 3-14] 건설산업 디지털화에 따른 부가가치 전망

(단위: %, YoY)

업종유형	실적	전망(E)	
	(2016-2015)	(2016-2025)	(2026-2035)
농림어업	1.10	0.25	0.30
제조업	4.76	2.51	1.57
건설업	0.21	2.40	1.11
서비스업	3.39	2.93	2.24

자료 : 산업연구원(2019)

2) 건설분야 3D 프린팅 기술 접목 필요성

■ 무인시공 자동화 기술 도입을 통한 건설 안전성 및 생산성 향상

- 건설 산업은 제조업 대비 높은 인력 의존도, 해당 인력의 고령화 및 부족 등의 문제점을 지니고 있음
- 이를 해결하는 위한 대표적인 대안은 건설 산업의 전반적 자동화 대체가 필요한 상황임
- 또한 최근 현장에서 발생하는 안전사고 및 이에 대한 사회적 높은 관심도로 무인시공 자동화 기술의 도입 필요성이 대두되고 있음
- 국내 대형 건설사의 경우 스마트건설 전문가 및 로봇산업관계자 등을 중심으로 무인시공 로봇, LiDAR 및 SLAM 기술이 접목된 현장순찰 로봇 등을 개발
- 이에 따라 건설 자동화 분야인 3D 프린팅 기술을 활용한 무인시공 자동화 기술의 개발을 통해 건설 안전성을 확보할 필요가 있음
- 또한 국내 건설 산업에서 무인시공 자동화 시장의 점차적 확대와 함께 급속한 성장 예상에 따른 시장 선점을 위한 기술개발이 필요함

■ 3D 프린팅 기술의 도입을 통한 시공 생산성과 설계 효율성의 향상 필요

- 건설 산업에서의 3D 프린팅 기술은 3차원 설계를 기반으로 구조물의 요소 또는 건물 전체를 자동화 장비로 시공하는 기술임
- 연구 초기 비정형 조경용 구조물과 장식품 등을 만드는데 사용되었으나, 영역이 확장되어 구조용 건축부품 및 건물 전체에도 사용 중임
- 이러한 3D 프린팅 기술의 도입으로 건설 산업에서의 인건비와 특수 설계에 대한 비용절감이 가능함
- 또한 건설 프로젝트의 전반적인 공기를 단축하고 공사비를 절감하는 것이 가능함
- 특히, 비정형 건축물을 기존 방식보다 쉽게 시공이 가능하며, 기존 기술로 만들 수 없는 모양의 시공이 가능하여 효율적이고 흥미로운 디자인 창출이 가능하며 맞춤형 설계에 대한 비용이 감소함
- 3D 프린팅에 의한 건축물 건설은 한번만 건설하는 건축물의 건설비용이나 수천 번

동일한 건설을 시행하는 건축물이나 비용은 동일함

- 또한 거푸집 등과 같은 가설재를 사용하지 않고 최소의 재료로 건설하기 때문에 건설 폐기물의 최소화 등 친환경적 특징도 보유하고 있음
- 따라서 3D 프린팅을 통한 제작비용 및 시간 절감, 비정형·맞춤형 제작, 건설 공정 간소화 및 이에 따른 인건비 감소, 안전도 향상을 위해 사업 추진을 통한 기술개발 필요

■ 건설 생산방식 변화요구 및 패러다임 전환을 통한 건설 생태계 혁신

- 건설산업에서는 주어진 공기 및 시간내에 진행해야 하는 “시간/공간적인 제약”, 건설 방식을 획기적으로 개선하기 어려운 “기술의 제약”, 선주문 후제작으로 이루어지는 건설발주형태에 따른 국한적인 “시장의 제약”, 제조업의 장점인 대량생산 방식이 어려운 “생산의 제약” 등이 존재함
- 건설업은 많은 노동력이 필요하고 고위험군 직업으로 인식되고 있으며 경제활동 인구 감소 등으로 인해 관련 분야의 전문인력이 감소 추세이고, 타 산업에 비해 비전문가의 진입장벽도 높은 분야임
- 일반적으로 건설산업으로 인식하는 범위는 제한적이나 실제 건설산업은 관련 지식을 다루는 모든 서비스 산업, 건축물 관련 미래산업을 포함하며, 여기서 미래 산업에는 건설의 범위를 확장시킬 수 있는 3D 프린팅 등 디지털 제조업 산업이 있음
- 또한 건설시장은 성장에 한계를 드러내고 있으므로 새로운 건설시장 창출을 통한 패러다임 전환 시점이 도래하고 있음

3) 기술적 측면의 기대 효과

■ 시공 기간 단축

- 건설산업에서 가장 큰 도전 중 하나는 공사 기간 지연이며, 전통적인 건설 방식은 복잡한 공정, 다수의 협력업체, 인력 투입 등으로 인해 지연이 빈번함
- 3D 프린팅은 설계 데이터를 기반으로 자동화된 시공이 가능하므로, 공사 기간을 획기적으로 단축할 수 있음
- 미국의 ICON의 경우 단독주택 한 채를 24~48시간 내 시공을 완료하였다고 발표하였으며 중국 WinSun은 하루 만에 수직 골조 중심의 주택 10채를 동시에 건설함

- 수직골조만 비교하더라도 전통적 공법 대비 약 30~50%의 공사기간 단축 가능성이 제기되고 있으며, 대규모 재난 피해 지역이나 주거 취약계층 주택 공급에서 특히 중요

■ 인건비 및 건설비 절감

- 3D 프린팅은 노동 의존도를 크게 줄여줄 수 있음
- 기존 건축물은 수십 명의 인력이 필요하지만, 프린터 장비 운용과 품질 관리 인력만 있으면 건설이 가능함
- 프랑스 낭트의 사회주택 사례에서는 공사비가 전통 공법 대비 약 35% 절감되었다는 결과가 보고되었음
- 기존 사례를 분석해 보면 인건비는 평균적으로 30~40% 감소하였고, 필요 부분에만 적층함에 따라 폐기물 발생량 대폭 축소, 자재 낭비 최소화에 따라 전체 건설비 절감 효과 약 20~40%가 가능한 것으로 판단됨

■ 대량생산 및 반복시공 효율성

- 3D 프린팅 건설은 동일한 설계를 반복적으로 출력할 때 효과가 극대화됨
- 공공주택, 군사시설, 학교 등 표준화된 건축물 건설에서 특히 유리함
- 동일한 설계 반복 시 공사비는 점진적으로 낮아질 수 있음
- 공공주택을 대량으로 공급하거나 군사·재난용 임시 건축물에서도 단시간 내 대량 공급이 가능함

■ 친환경 소재 개발과 순환경제 기여

- 3D 프린팅 기술은 새로운 친환경 소재 개발과 밀접하게 연계됨
- 건설 폐기물을 분쇄하여 재활용 소재로 사용하거나 플라스틱·섬유 보강재 등을 혼합한 경량 프린팅 소재를 개발하는 등 지역 내 생산 자원을 활용해 순환경제 모델을 구축할 수 있음
- 중국 WinSun은 건설폐기물을 재활용하여 프린팅 소재로 활용함으로써 도시 환경부담을 줄이는 동시에 비용 절감 효과를 거두었다고 발표한 바 있음

■ 신산업 창출 효과

- 건설 3D 프린팅 확산은 관련 신산업 창출에 기여할 수 있음
- 프린팅 장비 제작 산업, 3D 프린팅 전용 건축 소재(고강도 콘크리트, 지오폴리머) 산업, ·설계 서비스 산업, ·품질검증 서비스 산업 등이 해당됨
- 단순히 기존 건설의 대체재가 아니라 새로운 산업 생태계 형성 효과를 가짐

4) 사회적 측면의 기대 효과

■ 맞춤형 설계와 주거 복지 향상

- 3D 프린팅은 디지털 설계 기반이므로 맞춤형 건축이 가능함
- 장애인 맞춤형 주택(문턱 제거, 공간 최적화 등), 고령자 친화적 구조물(안전손잡이, 경사로 포함 설계), 지역 문화적 특성을 반영한 맞춤형 디자인이 가능하며, 사회적 약자 주거 복지 향상에 크게 기여할 수 있음

■ 재난 대응 및 긴급 주거 제공

- 지진, 홍수, 전쟁 등 재난 상황에서는 신속한 주거 공급이 필수적이며, 3D 프린팅 건설은 단기간 내 대량 공급이 가능하므로 긴급 대응에 효과적임
- 아이티 지진, 인도네시아 쓰나미 등 재난 이후 3D 프린팅 주택 건설 논의가 활발하게 진행된 바 있으며 미국 국방부 ACES 프로젝트도 재난 대응을 주요 목적으로 포함

■ 건설 노동 환경 개선

- 3D 프린팅은 현장 인력을 대폭 줄여 사고 위험을 낮출 수 있다. 또한 반복적·위험한 작업을 기계가 대신 수행하면서 사고 예방, 노동 환경 개선 효과를 달성할 수 있음

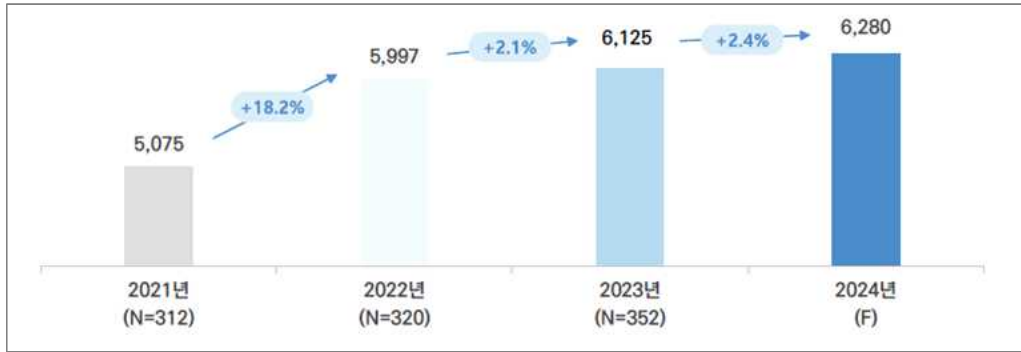
■ 건축 디자인 혁신과 도시미관 개선

- 3D 프린팅은 자유로운 곡선, 복잡한 구조 구현이 가능하므로, 건축 디자인 혁신 가능
- 기존 공법으로 어려운 곡선형 구조물, 유기적 디자인 구현 가능
- 도시 조경, 가로 시설물, 공공 미술 작품 제작에도 적용이 가능하고, 도시 경관 다양화 및 창의적인 건축문화 형성 가능

3.3 국내외 기술개발, 시장, 정책 동향

1) 국내 3D 프린팅 시장규모 추이

- 세계 3D 프린팅 시장은 지난 10년간 비약적인 성장을 거듭해 왔음
- 2010년대 초반까지만 해도 주로 시제품 제작과 의료, 항공우주 부품 제작에 국한되었지만, 현재는 자동차, 소비재, 건설 등 대규모 산업분야로 확대되고 있음
- 시장조사기관 MarketsandMarkets(2024)의 보고서에 따르면, 전 세계 3D 프린팅 시장 규모는 2023년 약 180억 달러 수준에서 2030년 약 1,200억 달러로 성장할 전망이다, 이는 연평균 약 20% 이상의 성장률에 해당함
- 2024년 3D 프린팅 산업 실태조사 보고서에 따르면 2023년 국내 3D 프린팅 시장규모는 6,125억원으로, 2022년 5,997억원 대비 2.1% 성장한 것으로 나타났음
 - 최근 3년간 국내 3D프린팅 시장규모는 지속적으로 성장하여 6,000억원을 돌파하였음
 - 글로벌 시장 성장률이 20%대 이상을 유지하는 반면, 국내 3D 프린팅 시장 성장률은 직전년도 18.2%에서 2024년도에는 2.1% 증가하는데 그쳤고, 코로나 이후 회복 속도 차이와 해외는 방산, 우주, 반도체 등 고부가가치 산업에서 3D 프린팅을 적극 활용하는데 반해 국내는 시제품 개발 단계에 머물러 있음에 기인한 것으로 판단됨
- 3D프린팅 산업유형별로는 ‘장비’가 2023년 매출액 기준 3,219억원(점유율: 52.6%)으로 전년도에 이어 올해 역시 3D 프린팅 시장에서 차지하는 비중이 큰 것으로 나타났다, 다음으로 큰 비중을 차지한 ‘서비스’는 1,374억원(22.4%)으로 나타났음
 - 국내 3D프린팅 산업에서 장비 산업의 비중이 큰 이유는 아직 3D프린팅 산업이 장비 보급 단계에 머무르고 있기 때문이며, 향후 3D프린팅 산업 활성화를 위해 서비스 시장으로의 확대가 필요함
 - 이러한 산업 확대를 위해서는 공급기업과 활용기업 간 연계강화, 실증, 연구, 품질 인증 등 종합적인 지원이 필요한 것으로 판단됨



[표 3-15] 국내 3D 프린팅 시장 규모 추이

구 분 (단위 : 억 원, %)	2021년 (N=312)		2022년 (N=320)		2023년 (N=352)		2,024년 (예측)			
	매출액	비중	매출액	비중	매출액	비중	매출액	비중		
전 체	5,075	100.0	5,997	100.0	6,125	100.0	6,280	100.0		
스캐너 제외 합계	3,630	71.5	4,129	68.9	4,730	77.2	4,795	76.4		
산업 유형	장비	소 계	2,662	52.4	3,267	54.5	3,219	52.6	3,309	52.7
		장비제조	1,690	33.3	2,068	34.5	1,922	31.4	2,043	32.5
		장비유통	971	19.1	1,199	20.0	1,297	21.2	1,266	20.2
	소재	소 계	424	8.4	451	7.5	604	9.9	627	10.0
		국내 제조	85	1.7	101	1.7	193	3.2	230	3.7
		외산 유통	339	6.7	350	5.8	411	6.7	397	6.3
	SW	소 계	897	17.7	1,015	16.9	928	15.1	936	14.9
		국내 개발	194	3.8	257	4.3	217	3.5	220	3.5
		외산 유통	703	13.9	758	12.6	711	11.6	715	11.4
	서비스	소 계	1,093	21.5	1,264	21.1	1,374	22.4	1,409	22.4

자료 : 정보통신산업진흥원(2024)

2) 국내 3D 프린팅 수요(활용) 산업별 시장규모

- 2023년 국내 3D 프린팅 수요 산업별 매출 비중을 살펴보면, ‘학교’ 부문이 18.1%로 가장 큰 시장을 형성하고 있으며, 다음으로 ‘공공’(16.2%), ‘의료/치과’(13.4%), ‘자동차’(11.5%), ‘전기/전자/통신’(9.1%) 등의 순으로 나타났음
- 학교와 공공이 각각 18.1%, 16.2%로 여전히 비중이 높지만, 자동차, 전기/전자/통신 등 국내 주력산업을 중심으로 민간으로의 3D 프린팅 시장 확대가 이루어지고 있다고 판단됨

- 다만 건설 분야는 아직 타 분야 대비 비중이 작은 편임

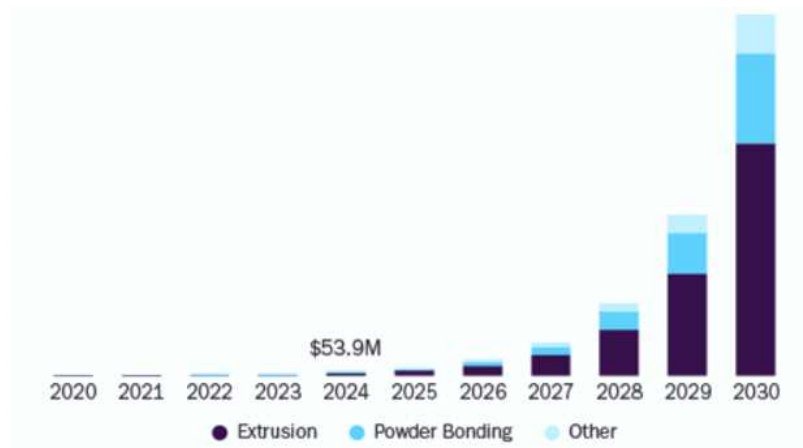
[표 3-16] 국내 3D 프린팅 산업별 매출 비중

구 분	사례수 (개)	학교	공공	의료/ 치과	자동차	전기/ 전자/ 통신	소비재	우주/ 항공	국방/ 방산	건축/ 건설	패션/ 주얼리	조선/ 해양	발전/ 에너지	기타
2023년	(352)	18.1	16.2	13.4	11.5	9.1	7.1	5.2	4.9	4.2	2.6	2.0	1.2	4.3
2022년	(320)	18.2	17.1	12.5	11.5	7.4	5.5	5.9	5.5	5.4	1.0	2.4	1.3	6.4
증감률(%p) (23년-'22년)	32	-0.5	-5.3	7.2	0.0	23.0	29.1	-11.9	-10.9	-22.2	160.0	-16.7	-7.7	-32.8

자료 : 정보통신산업진흥원(2024)

3) 건설분야 3D 프린팅 기술 시장동향

- Grand View Research의 3D Printing Construction Market 보고서에 따르면, 건축·건설 분야의 3D 프린팅 시장은 아직 초기 단계에 있으나 향후 수년간 폭발적인 성장을 기대할 수 있는 분야로 평가하고 있음
 - 2024년 기준 시장 규모는 약 5천만 달러(USD 53.9M) 수준에 불과하지만, 2030년까지 약 42억 달러(USD 4.18B)로 성장할 것으로 전망하고 있음
 - 이는 2025년부터 2030년까지 연평균 111% 이상(CAGR)이라는 매우 높은 성장률을 의미함
- 전 세계 도시들이 확장되고 현대화됨에 따라 스마트 시티 개발을 지원하는 3D 프린팅의 역할은 건설 시장에서 3D 프린팅 도입을 촉진하고 있으며 현대적이고 기술적으로 강화된 환경을 조성하려는 정부의 요구에 부응하고 있음
 - UN에 따르면 2023년 전 세계적으로 140개가 넘는 스마트 시티가 건설되었으며, 2050년까지 전 세계 인구의 70%가 스마트 시티에 거주할 것으로 예상하고 있음
 - 이러한 성장은 자동화·디지털화 기술 발전, 건설 비용 절감 요구, 인건비 상승, 환경 규제 강화, 지속 가능한 건축 자재 활용 수요 등에 의해 촉진될 것으로 예상됨
 - 특히 콘크리트 적층(extrusion) 기반 기술이 3D 프린팅 건설 시장을 주도하고 있으며, 건축용 벽체, 주택, 상업용 건물 시공에 활용이 증가할 것으로 예상하고 있음



출처: Region and Segment Forecast(2024)

[그림 3-25] 3D 프린팅 건설 시장 동향

- 지역별로는 아시아-태평양(APAC) 시장이 가장 높은 성장 잠재력을 보이고 있음
 - 중국, 인도, 싱가포르 등에서는 저가 주택 수요와 정부의 스마트 건축 프로젝트가 결합되며 시장 확대를 견인하고 있음
 - 북미와 유럽 역시 규제 완화, 군사 및 재난 대응 시설 수요를 바탕으로 빠른 도입이 진행 중임
 - 또한 ICON, Apis Cor, COBOD, WASP 등 3D 프린팅 건설 주요 기업은 단독 주택, 모듈형 건축물, 인프라 구조물에 이르기까지 적용 범위를 확장하며 경쟁력을 강화하고 있음
 - 더불어 민간 주택 건설뿐 아니라 군사용 전방기지, 재난 구호용 임시 주택, 저소득층 주거 공급 등으로 활용성을 확대하고 있음
 - 그에 따라 3D 프린팅 건설은 “건설 산업의 디지털 트랜스포메이션 핵심축”이 될 수 있으며, 기술 상용화·표준화·인증 체계 마련 여부가 시장 성패를 좌우할 것으로 예측되고 있음

4) 국내 건설 3D 프린팅 활성화를 위한 관련 정책 동향

■ 타 부처 정책 동향

- 정부에서는 혁신성장동력으로서 3D 프린팅 산업 육성을 위한 국가 차원의 중장기적 기술확보 전략을 마련하고 있음
- 2016년 3D 프린팅 산업 발전의 기반조성, 국가 경제 발전 이바지를 위해 『삼차원(3D)프린팅산업 진흥법』을 제정하고 산업현장 활용을 확대함으로써 기술 확산의 변곡점 마련, 차별적 기술력 확보로 양적·질적 성장 실현, 산업기반 고도화로 지속적 혁신·성장 촉발 등을 기대하고 있음

[표 3-17] 『삼차원프린팅산업 진흥법』 제정 이유

- 최근 삼차원(3D) 프린팅 기술에 대한 관심이 높아지면서 관련 기술을 활용한 산업분야의 혁신적인 발전과 이에 따른 긍정적인 효과가 기대되고 있음
- 삼차원프린팅은 제품개발에 소요되는 시간·비용을 획기적으로 절감하는 한편, 기존 산업의 제조공정을 고도화할 있는 기술로서 특히, 고객맞춤형 다품종 소량생산에 강점을 가지고 있어 새로운 사업기회 창출 및 소자본 창업 활성화에 유리함
- 창조경제를 달성하기 위한 새로운 성장 동력으로서 삼차원프린팅산업을 진흥하기 위하여 정부의 적극적 노력이 필요하고, 선도국에 비해 부족한 삼차원프린팅산업 관련 기술 및 인프라를 구축함으로써 삼차원프린팅의 안전한 이용환경 조성과 삼차원프린팅산업에 있어 창의성 고양, 대기업·중소기업 간 상생 및 국제경쟁력 확보를 위한 산업 생태계의 건전하고 지속가능한 발전을 추진함에 있어 정부의 역할이 중요함
- 이에 삼차원프린팅산업을 활성화하고 그 발전기반을 조성하는 데 필요한 사항을 법률에 규율함으로써 삼차원프린팅산업의 진흥을 통한 국민편익 증진과 국민경제의 발전에 이바지하려는 것임

- 과학기술정보통신부가 관할하는 상기 진흥법에서 정의하는 3D 프린팅 관련 정의는

[표 3-18]과 같음

[표 3-18] 법령 상의 3D 프린팅 관련 용어 정의

용 어	정 의
삼차원프린팅	삼차원형상을 구현하기 위한 전자적 정보(이하 “삼차원 도면”이라 한다)를 자동화된 출력장치를 통하여 입체화하는 활동
삼차원프린팅산업	삼차원프린팅과 관련된 장비·소재·소프트웨어·콘텐츠 등을 개발·제작·생산 또는 유통하거나 이에 관련된 서비스를 제공하는 산업
삼차원프린팅사업	삼차원프린팅산업과 관련된 경제활동
삼차원프린팅서비스사업	삼차원프린팅사업 중 이용자와 공급계약을 체결하고 이용자를 위한 삼차원프린팅을 업으로 하는 것

- 국내에서의 3D 프린팅 관련 정책 동향을 요약하면 [표 3-19]와 같음
 - 3D 프린팅은 첨단기술로서 관련 산업 육성을 지원함으로써 해당 산업 분야 국가경쟁력을 강화하도록 함
 - 프린팅 장비 표준을 비롯하여 재료배합, 구조 등을 포함한 설계기준을 선형적으로 개발하도록 하고, 일반 건축물 대비 상대적으로 기준이 낮은 비주택 건축물에 시범 적용을 추진하도록 함

[표 3-19] 국내 3D 프린팅 관련 정책 주요 내용

계획(법령)명	주요 내용
제4차 과학기술기본계획	<ul style="list-style-type: none"> • 기업수요에 기반하여 인프라·실증솔루션·비즈니스모델이 연계된 실증 R&D 지원 • 혁신성장동력 육성으로 유망산업의 성장동력화 촉진 - 3D 프린팅 등 첨단기술 산업 육성 지원을 통해 첨단기술 산업 분야 국가경쟁력 강화
제3차 건축정책기본계획	<ul style="list-style-type: none"> • 첨단 건축기술로 건축 생산성 향상 및 시장 확대를 위한 과제 제시 - 첨단 기술의 현장 도입을 위한 제도적 기반 마련과 첨단 기술시장 육성 및 성과 확산 지원으로 스마트 건축 및 첨단기술 확산 기반 조성
제1차 국토교통과학기술 연구개발 종합계획	<ul style="list-style-type: none"> • 지능형 건설생산체계, 혁신성장 동력으로서 건설자동화를 계획에 반영 - 인공지능, 로봇 등 융복합을 통해 설계·관리·시공·유지보수 등 건설 프로세스를 혁신하는 “지능형 건설생산체계”를 전략목표로 설정
제7차 건설기술진흥 기본계획	<ul style="list-style-type: none"> • ‘생산시스템 자동화 및 모듈화’의 세부과제로서 ①건설기계 자동화 및 로봇 도입과 ② OSC 기반 건설산업 제조화 추진 - 3D 프린팅의 경우 장비 표준, 설계기준을 개발하고, 비주택 건축물 대상 시범적용을 추진하도록 함
3D 프린팅 산업 발전전략	<ul style="list-style-type: none"> • 제조업 혁신을 통해 창조경제를 이끌기 위한 3D 프린팅 산업의 종합적으로 발전 - 글로벌 선도기업 육성, 시장점유율 제고, 독자 기술력 확보
프린팅 전략기술로드맵	<ul style="list-style-type: none"> • 국가 차원의 중·장기적 기술확보 전략 마련 - 시장수요를 고려한 3D 프린팅 핵심 활용 분야를 도출하고, 활용 분야 연계형 장비·소재·소프트웨어 기술확보 전략 제시
삼차원(3D)프린팅 산업 진흥법	<ul style="list-style-type: none"> • 3D 프린팅 산업 육성의 제도적 근거를 마련하고, 3년마다 3D 프린팅 산업 진흥 기본 계획 수립 - 3D 프린팅 산업진흥 기본계획을 수립하고, 충실한 이행을 위해 3D 프린팅 산업 현장 활용 가속화 및 차별적 기술력 확보, 혁신·성장 중심 산업기반 고도화의 세부 정책과제 마련

■ 국토교통부 관련 건설·건축 계획을 통한 기술개발의 지원

① 3차 건축정책 기본계획(국토교통부, 2021~2025)

- 건축에 관한 최상위 계획인 『제3차 건축정책 기본계획』은 건축의 생산방식, 공간 수요, 개발행태 등 건축 패러다임의 변화를 반영한 수립방향을 제시함
- 소품종·대량생산 중심의 고속성장의 시대에서 지역기반 소규모 건축사업을 통한 다 품종·소량생산 중심의 안정적 성장 시대로의 전환을 위해 건축의 생산방식, 공간수요, 개발행태 등에서의 건축 패러다임 변화를 반영함
- 또한 ‘첨단 건축기술로 건축 생산성 향상 및 시장 확대’를 위한 과제를 제시하여 첨단 기술의 현장 도입을 위한 제도적 기반 마련, 첨단 기술시장 육성, 성과 확산 지원을 통해 스마트 건축과 첨단기술 확산 기반을 조성하고자 함

② 제1차 국토교통과학기술 연구개발 종합계획(국토교통부, 2018~2027)

- 『제1차 국토교통과학기술 연구개발 종합계획』은 지능형 건설생산체계, 혁신성장 동력으로서 건설자동화를 계획에 반영함
- 인공지능, 로봇 등 융복합을 통해 설계·관리·시공·유지보수 등 건설 프로세스를 혁신하는 ‘지능형 건설생산체계’를 전략목표로 설정하였으며, 4대 전략 중 하나인 ‘기술 융합을 통한 새로운 가치창출’ 중 실천과제인 융합기술을 통한 건설지능화 실현과 국토교통 8대 혁신성장동력(건설 자동화)에 관련 기술을 반영함

③ 제7차 건설기술진흥 기본계획(국토교통부, 2023~2027)

- 디지털 전환을 통한 스마트건설 확산을 도모하는 과정에서 ‘생산시스템의 자동화와 모듈화’를 추구함
- ‘생산시스템 자동화 및 모듈화’의 세부과제에는 ①건설기계 자동화 및 로봇 도입과 ②OSC 기반 건설산업 제조화가 포함됨
 - ‘건설기계 자동화 및 로봇 도입’을 위해 건설기준 정비, 건설기계 제도 정비, 기술개발 등 지원, 인센티브 등 상용화 지원 등 기반 마련 과제를 수행하도록 함
 - 3D 프린팅의 경우 장비 표준, 설계기준을 개발하고, 비주택 건축물 대상 시범적용을 추진하도록 함

3.4 국내외 적용 현황과 사례

1) 해외 건설 3D 프린팅 기술 개발 현황

■ 미국

- 미국은 건설 3D 프린팅 기술의 상용화를 주도하는 국가 중 하나임
- 대표적 기업인 ICON은 텍사스주 오스틴에서 3D 프린팅 주택 단지를 조성해 세계적 주목을 받았음
 - ICON은 자체 개발한 ‘Vulcan 프린터’를 이용하여 주택 한 채를 약 24시간 만에 시공할 수 있음을 입증했으며, 이 과정에서 기존 공사 대비 30~40%의 비용 절감 효과를 거두었음

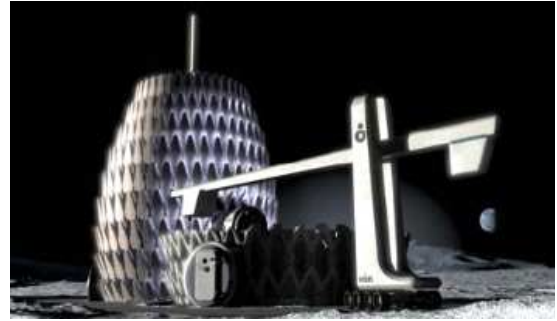


[그림 3-26] ICON 레일형 3D 프린터 장비 및 소형 주택 출력

- 또한 ICON은 NASA와 협력해 2028년까지 ‘Project Olympus’를 추진중이며 달 탐사용 3D 프린팅 거주지 건설 기술을 개발 중임
 - 이는 3D 프린팅 건설 기술이 단순히 지구상의 주거 문제 해결을 넘어, 우주 탐사라는 새로운 영역에도 적용 가능성을 보여주고 있음
 - 목표는 단순히 조형물 만드는 것이 아니라, 거주 가능한 구조물(pressurized habitat), 비거주 구조물, 착륙장, 도로 같은 기초 인프라, 미세 운석, 방사선, 온도 변화, 달진 등에 대한 보호 구조 기능을 가진 외피 등 다양한 요소를 포함하고 있음



(a) ICON-NASA 협업 우주건설 프로젝트 컨셉



(b) 사람 주거용 3D 프린팅 Olympus Construction System

[그림 3-27] ICON-NASA 우주건설 협업 프로젝트

- 미국 국방부(DOD)는 ‘Automated Construction of Expeditionary Structures (ACES)’ 프로그램을 통해 전쟁터와 재난 지역에서 군용 임시 구조물을 신속히 건설할 수 있는 기술을 개발하고 있음
 - 갠트리, 프린트 헤드, MDS 등 장비의 크기, 중량, 설치 및 이동성이 중요한 요소이며 군용 항공기나 트럭으로 옮길 수 있어야 하기 때문에 이를 고려해서 설계가 진행 중에 있음
 - 이러한 프로그램 시행은 3D 프린팅이 국가안보와 인도적 차원에서도 중요한 역할을 할 수 있음을 시사함



[그림 3-28] 미국 국방부 ACES 프로그램을 통해 시공된 군용 구조물

■ 유럽

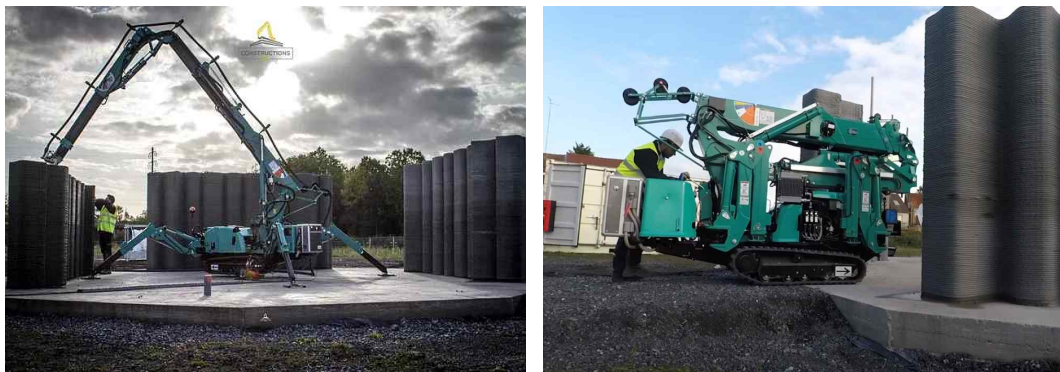
- 유럽은 지속가능성과 친환경성을 강조하는 특성을 바탕으로 3D 프린팅 건설 기술을 적극적으로 도입하고 있음

- 덴마크의 COBOD는 세계 최대 규모의 갠트리 방식 프린터를 제작하여 유럽과 중동 각국에 공급하고 있으며, 프랑스·독일·영국 등지에서 상업용 건물 및 주택 건설 프로젝트를 성공적으로 수행하였음



[그림 3-29] COBOD 프린팅 장비 및 3층 규모 임대용 아파트 출력

- 프랑스 기업인 Constructions-3D는 유압 크레인 형태의 3D 프린터를 개발하였으며 $\varnothing 8.5 \times 7\text{m}(\varnothing \times H)$ 의 건축물 출력이 가능함
 - 캐터필러 스타일로 이동 가능하며 전용 컨테이너로 이송이 가능하여 장비의 이동 및 설치의 효율성을 높였음



[그림 3-30] Constructions-3D의 작업 모습과 이동을 위한 모습

- 프랑스의 낭트 대학교는 2018년 단일 로봇 시스템을 활용하여 콘크리트 구조재와 폴리머 폼 단열재를 출력하는 기술(Batiprint 3D) 및 장비를 개발하였음
 - 폼 변형에 대한 실험을 통해 최적화 시공 방식을 도출하였으며, 해당 기술을 적용하

여 실제 주택 (YHNOVA House) 벽체의 구조체 및 단열재를 출력하였으며 시공기간은 18일이 소요되었고 기존 건축비용의 80%를 절감하였다고 발표하였음

- 이 방식은 기존 3D 프린팅 시공방식처럼 구조체를 직접 시공하는 방식이 아닌 폴리머폼을 출력하고 그 사이에 콘크리트를 주입하여 구조체를 형성하는 기술로 한번의 시공으로 구조체와 단열재를 동시에 시공할 수 있다는 장점이 있음



(a) 단열채+구조체 벽체 시공 (YHNOVA House, 2018) (b) 낭트대학교의 Batiprint3D 3D Printer 및 출력물 단면

[그림 3-31] 낭트대학교의 3D 프린팅 건축물 시공 사례

- 러시아기업인 Apis cor는 $\varnothing 8.5 \times 3.1\text{m}$ ($\varnothing \times H$)의 건축물 출력이 가능한 크레인 형태의 3D 프린터를 개발하였음
- 2019년 10월 두바이에 가장 큰 3D 출력 건물인 높이 9.5 m, 면적 640 m^2 의 사무용 건물을 출력하는 등 기술을 선도하고 있음



[그림 3-32] 이동형 크레인 타입 3D 프린터 및 세계 최대 규모 3D 프린팅 출력물

- 네덜란드 아이트호벤공대는 2017년 세계 최초로 3D 프린팅 콘크리트 다리를 건설함
- 갠트리 로봇 기반이며 1m 단위로 분할 출력하여 8개의 세그먼트를 조립하여 길이 8m, 넓이 3.5m 규모의 보도교량을 제작하였음



[그림 3-33] 네덜란드 아이트호벤 공대에서 제작한 3D 프린팅 보도교량

- 유럽연합(EU)은 ‘Horizon Europe’을 통해 3D 프린팅 건설 기술을 포함한 다양한 스마트 건설 기술을 지원하고 있으며, 특히 재활용 콘크리트·지오폴리머와 같은 친환경 소재 개발에 중점을 두고 있음

■ 중국

- 중국은 세계 최대 건설 시장을 보유하고 있는 만큼 3D 프린팅 기술 확산 속도 역시 매우 빠른 편에 속함
- 상하이의 WinSun은 2014년 24시간 만에 10채의 주택을 프린팅하는 시범사업을 통해 세계적 관심을 모은 바 있음
- 이후 중국은 대규모 아파트 단지와 상업용 건물에 3D 프린팅을 적용하면서 세계 최대 규모의 건설 3D 프린팅 시장을 형성하였음
- 중국 정부는 도시화 정책과 연계하여 3D 프린팅 건설을 국가 차원의 전략으로 추진하고 있으며, 기술 개발뿐 아니라 법제도 기반 마련에도 속도를 내고 있음



[그림 3-34] 중국 WinSun의 3D 프린팅 중국 고유건물 및 정원 구축 사례

■ 중동(UAE)

- 아랍에미리트 두바이는 2016년 세계 최초로 3D 프린팅 오피스 건물을 완공하며 기술을 과시하였음
- 두바이 정부는 2030년까지 전체 건축물의 25%를 3D 프린팅 기술로 건설하겠다는 목표를 제시하고 이를 법제화하였으며, 이 같은 정책적 추진은 3D 프린팅 건설 기술을 도시 차원에서 제도화한 대표적 사례로 평가됨

■ 주요 국외 사례 총괄

- 주요 국외 사례는 [표 3-20]에서 정리된 바와 같으며, 유럽, 미국을 중심으로 3D 프린팅 건축물 건설이 시도되고 있음

[표 3-20] 국외 3D 프린팅 적용 주요 사례

구조물명	위 치	규 모	완공연도	비 고
DERIHAUS	독일 하이델베르크	3개동, 21개 유닛	2026년	PERI 시공
Skovsporet 프로젝트	덴마크 홀스테브로	6개동, 36세대	2026년	COBOD 시공, 기숙사
Wolf Ranch Community	텍사스 조지타운	100호 (단독주택)	2023년	ICON 시공
Tecla	이탈리아 라벤나	60㎡	2021년	점토 사용
Kamp C 프로젝트	벨기에	2층 90㎡	2020년	3주 완성
발렌하우젠 주택	독일	3층 380㎡	2020년	벽체 6주, 5가구완성
Community First Village II	미국 텍사스	37.2㎡	2020년	
Apis Cor	UAE 두바이	2층 640㎡	2019년	
The BOD 2nd Building, Tabasco, Mexico	덴마크 코펜하겐	50.0㎡	2019년	
Community First Village I	멕시코	46.5㎡	2019년	
Chicon House	미국 텍사스	46.5㎡	2019년	
The BOD	미국 텍사스	32.5㎡	2018년	
1 Story Building	덴마크 코펜하겐	50.0㎡	2017년	
	러시아	38.0㎡	2017년	

자료 : 각종 문헌 내용 저자 정리

2) 국내 건설 3D 프린팅 기술 개발 현황

- 한국은 글로벌 선도국에 비해 도입 시점은 다소 늦었지만, 최근 들어 정부와 연구기관, 민간 기업이 함께 기술 개발과 실증사업을 추진하고 있음

■ 한국건설기술연구원 사례

- 국내의 경우 한국건설기술연구원을 주관으로 2016년부터 갠트리 방식의 3D 프린터를 활용하여 단층 100m² 규모의 건축물 콘크리트 골조 출력에 성공한 바 있음
- 비정형 건축부재 및 시험주택을 대상으로 하며 갠트리 기반의 대형 3D 프린팅 장비 개발, 3D 프린팅 전용 콘크리트 소재 개발, 설계, 시공 기술을 개발하였음
- 부산시, 수자원공사와 협업으로 부산에코델타시티에 국내 최초 3D프린팅 건축물 시공사례인 홍보관을 시공하였음
- 3D 프린팅 건설에 필요한 시공지침, 구조지침 등을 개발하고 있음



(a) 30평형 규모의 3D 프린팅 시험주택(2020)



(b) 부산에코델타시티 홍보관(2021)



(c) 3D 프린팅 기술로 제작한 벤치 및 조형물

[그림 3-35] 한국건설기술연구원의 3D 프린팅 건축물 사례

■ 하이시스(HISYS) 사례

- 하이시스는 대한민국 김포에 있는 건축용 3D 프린터 제조사로 갠트리 타입, 로봇 타입, 연구용 등 건축용 3D프린터 장비를 설계·제작·판매하고 있으며 직접 시공도 병행하고 있음
- 주로 갠트리 장비를 활용하여 시공을 진행 중에 있으며 초당 약 30~200mm 속도로 4층 규모까지 건축이 가능하다고 홍보하고 있음
- 소형물, 조경 구조물, 경비실, 원룸 주택 등 소형 건축물 및 구조물 중심의 시공이 가능하며 넓이 약 10㎡, 높이 약 2.2m의 NH 본사 경비실, 전용면적 약 27㎡, 8.2평 규모의 김포 원룸형 단층 주택, 높이 3m, 연장 25m의 무근 콘크리트 도로공사 옹벽 구조물 등을 시공한 바 있음
- 아직 국내 건축법에 3D 프린팅 건축을 규정하는 조항이 없으며, 품질 검증과 안전 기준 역시 마련되어 있지 않아 상용화 단계로 나아가는 데 제약이 있기 때문에 국내보다는 해외 쪽으로 사업영역을 확장하고 있음



(a) NH 본사 경비실(2022)



(b) 도로공사 옹벽 3D 프린팅 시공(2023)

[그림 3-36] 하이시스에서 3D프린팅 기술로 시공한 건축물 시공 사례

■ 삼성엔지니어링 사례

- 삼성엔지니어링은 2021년 비정형 건축 전문기업 마션케이(Marshankey)와 협업하여 3D 프린팅 로봇을 개발했고 시험용 건축물을 출력하는데 성공하였음
- 이 기술을 활용하여 2023년에는 사우디아라비아 국영 석유 기업인 아람코와 함께 사

우디 하위야(Hawiyah) 지역 건설현장에 3D 프린팅 기술을 이용한 1층 규모의 건축물을 완공하였음

- 현장의 대피소로 사용되는 해당 건물은 높이 3.85m, 면적 63m²(19평) 규모로 시공되었으며, 초당 100mm의 속도로 건축물을 완성하였음
- 이 장비는 최대 가로 7m, 세로 4m, 높이 4m 규모의 건물을 완성할 수 있으며 대형 트레일러 등을 활용하여 설치, 시공, 해체가 용이하도록 제작됨



(a) 삼성엔지니어링의 대형 3D 프린터



(b) 사우디 하위야 지역에 만든 3D프린팅 건축물(2023년)

[그림 3-37] 삼성엔지니어링의 사우디 현장 대피소

■ 현대건설 사례

- 현대건설은 2019년부터 3D 프린팅 기술을 본격적으로 건설현장에 적용하려는 노력을 진행 중임
 - 적층 제조 방식을 주로 활용 중이며 복잡한 곡면이나 비정형 구조를 효율적으로 구현하는데 중점을 두고 있으며 건축물 보다는 조형물 제작과 관련된 사례를 주로 발표하였음
 - 2019~2020년대 초반 국내 최초로 3D 프린팅 비정형 조경 구조물을 현장에 적용하는데 성공했음
 - 특히 2020년, 현대건설은 복합소재(플라스틱 기반) 3D 프린팅을 활용한 비정형 거푸집 시공 기술을 확보했고, 이를 통해 곡면이나 복잡한 형태의 조형물을 사람 수작업 최소화하면서도 정교하게 제작할 수 있는 기술을 공개하였음
 - 힐스테이트 레이크 송도 2차 단지에는 국내 최초로 3D 프린팅 복합소재로 만든 비정형 벤치를 설치했음

- 2022년 11월 3D 프린팅 어린이 놀이시설물을 개발하고, ‘힐스테이트 흥은 포레스트’ 단지에 설치하였음
 - 단순한 형태의 놀이터를 넘어서, 이용자의 적극적 활동을 고려한 복잡한 형태와 기능을 가진 대형 구조물로 안전성 및 품질 측면에서도 Q-마크 인증을 획득했고, 어린이제품안전특별법 기준을 모두 충족하여 어린이 안전 기준을 통과했음



(a) 국내최초 복합소재 3D 프린팅 비정형 벤치(2021)



(b) 힐스테이트 흥은포레스트 ‘토끼 놀이터’(2022)

[그림 3-38] 아파트 단지 내 조형시설물 설치 예

- 현대건설의 3D 프린팅 기술은 주로 조경 구조물, 조형 벤치, 놀이시설, 거푸집 등 비교적 비거주 조형물에 먼저 적용되었고, 전체 건축물이나 주택 구조체를 3D 프린팅으로 직접 출력하는 방식은 아직 상용화되지는 않은 상황임

3.5 3D 프린팅 적용의 장애요인과 생애주기 측면의 고려 사항

1) 국내 건설 3D 프린팅 적용 장애요인

- 국내에서는 이미 일부 실증사업과 연구 프로젝트가 수행되고 있음에도 불구하고, 본격적인 상용화로 이어지지 못하는 여러 장애요인이 존재하며, 이를 기술적, 제도적, 경제적, 사회·문화적 측면으로 나누어 살펴볼 수 있음

■ 기술적 장애요인

① 소재 기술의 한계

- 해외에서는 ASTM, EN 등 국제표준 기반의 콘크리트 소재 규격이 존재하나, 한국은 아직 KS 표준이 마련되지 않았음
- 콘크리트 적층 강도, 균열 발생 방지, 내구성 확보 등 기술적 검증이 부족함
- 프린팅 전용 지오폐리머 소재 연구가 진행 중이나, 실험실 수준에 머물러 있음

② 대형 장비 제작 미흡

- COBOD, ICON 등 해외 기업들은 대형 갠트리형 장비를 상용화했으나, 국내는 소규모 장비 제작 단계에 머물러 있음
- 대규모 주택·상업용 건물 시공에는 아직 한계가 있음

③ 품질 관리 및 모니터링 기술 부족

- 적층 과정에서 발생하는 강도 불균일성, 건조 수축, 열화 현상에 대한 실시간 모니터링 기술이 부재함
- 품질 검증 체계 미흡으로 안전성 확보가 어려움

■ 제도적 장애요인

① 건축법 및 지방서의 미비

- 현행 건축법에는 3D 프린팅 건축을 정의하거나 허용하는 조항이 없어 실증사업 외에는 정식 건축물로 허가받는 것이 불가능함

② 안전 인증 제도의 부재

- 3D 프린팅 건축물의 강도, 내구성, 내진 성능을 검증할 제도적 장치가 부재함
- 건축 허가, 보험, 유지관리 기준 마련이 필요함

③ 표준화 지연

- ISO/ASTM 52900 시리즈 등 국제표준과 국내 표준 간 정합성이 부족함
- KS 표준 부재로 인해 산업계 전반의 불확실성이 증가하고 있음

■ 경제적 장애요인

① 초기 투자 비용 부담

- 대형 3D 프린팅 장비는 수십억 원 규모로 중소기업이나 스타트업에게 부담임
- 국내 건설사는 ROI 불확실성으로 인해 대규모 투자에 소극적임

② 시장 수요 부족

- 제도적 기반이 없어 발주 자체가 거의 없는 상황임
- 민간 시장 수요는 ‘기술적 안정성 검증 후’라는 입장에서 관망 중인 것으로 파악됨

③ 산업 생태계 미성숙

- 장비 제작업체, 소재 공급업체, 설계·소프트웨어 업체 간 협력 네트워크가 부족함
- 해외와 달리 공급망이 파편화되어 있음

■ 사회·문화적 장애요인

① 기존 건설업계의 저항

- 전통적 시공 방식에 익숙한 인력과 기업은 새로운 기술 도입에 보수적임
- 노동조합의 일자리 감소 우려도 장애 요인으로 작용하고 있음

② 대중 인식 부족

- 일반 국민은 3D 프린팅 건축물의 안전성·내구성에 대해 신뢰가 부족함
- ‘실험적 건축물’이라는 인식이 강해 상용화 확산에 제약을 받고 있음

③ 전문 인력 부족

- BIM, 로봇, 재료공학, 품질관리 등 융합형 인재가 필요하나 교육체계가 부족하고 대학 및 직업교육 과정에서 관련 학문·훈련 프로그램 미비

2) 국내 건설 3D 프린팅 활성화를 위한 제도적 개정사항

- 국내 건설 3D 프린팅이 활성화되기 위해서는 법·제도·표준 체계의 정비가 선행되어야 함

■ 건축법 개정

- 현행 건축법은 전통적 공법을 전제로 하고 있어, 3D 프린팅으로 지어진 건축물을 정식 건축물로 인정하지 않음
- 건축법 개정을 통해 ‘적층제조 기반 건축물’의 정의와 허가 절차를 명문화해야 함
- 해외 사례 중 하나로 두바이는 법제화를 통해 2030년까지 25% 목표를 설정하고, 공공발주 건축물에 의무적으로 활용하도록 함

■ 시방서 및 기술 기준 제정

- 품질검증을 위해 압축강도, 인장강도, 내구성, 내진성능 등과 관련하여 구체적 시험 방법 규정 필요
- 안전 기준으로서 화재 안전성, 내구성 기준 반영
- 설계 기준으로서 BIM-3D 프린팅 연계 설계 지침 마련

■ 표준화 (KS/ISO 연계)

- 3D 프린팅 건축 소재, 장비, 시공 절차 관련 KS 규격 제정 필요

- 국제표준인 ISO/ASTM Additive Manufacturing 시리즈와 연계하여 정합성 확보
- 국가기술표준원, KICT 등 공인 기관 중심으로 시험·인증 기관 지정 및 설립

■ 발주 및 입찰 제도 개선

- 공공기관 발주 공사에 3D 프린팅 시범적용 조항 신설
- 입찰 평가 기준으로 기술 혁신성·친환경성 가점 부여
- 스타트업, 대형 건설사 컨소시엄 참여 독려 및 민관협력 장려

3) 국내 활성화를 위한 개선 필요성

■ 정책적 지원

- 국토부, 과기정통부 협력으로 장기적 R&D 지원 확대
- 3D 프린팅 장비 도입 기업에 세금 감면 등 혜택 부여
- 중소기업 장비 구입을 지원할 수 있는 보조금 제도 마련

■ 공공부문 선도

- 공공발주자가 선도적 역할 수행
- 재난주택, 공공임대주택, 군시설 등 공공성 높은 분야에서 우선 적용
- 성공 사례를 축적해 민간 부문으로의 확산 유도

■ 인력양성 및 교육

- 대학 내 건설 3D 프린팅 전공·교과목 신설
- 직업훈련원, 공공연수원에서 장비 운용 교육 제공
- 산학협력 프로그램을 통한 현장 인턴십 운영

■ 산업 생태계 구축

- 소재, 장비, 설계, 시공이 유기적으로 연결되는 생태계 필요

- 해외 선진기업과의 기술협력, 합작법인 설립
- 표준화된 공급망 형성을 통해 시장 안정화

■ 3D 프린팅 활성화를 위한 개선사항 총괄

- 국내 건설 3D 프린팅은 실증 단계에 머물러 있지만, 기술적·제도적 장애요인을 해결한다면 보다 빠른 확산이 가능하며, 이를 정리하면 다음과 같음
 - 기술적 측면에서 소재·장비·품질관리 고도화
 - 제도적 측면에서 건축법 개정, KS 표준 제정, 인증제도 마련
 - 경제적 측면에서 초기 투자 지원, 시장 수요 창출
 - 사회적 측면에서 인력 양성, 대중 인식 개선
- 국내 건설 3D 프린팅 활성화는 공공부문의 리더십, 정책적 지원, 산업 생태계 구축이라는 세 가지 축을 통해 달성될 수 있음

4) 건설공사 생애주기 고려사항

■ 건설공사 생애주기 고려 사항의 필요성

- 건설 3D 프린팅은 단순히 시공 기술의 혁신에 머무르지 않고 건축물의 전 생애주기(Life Cycle)에 영향을 미침
- 발주자는 설계 단계부터 유지관리 단계까지 고려하여 장기적 관점에서 정책과 전략을 구상할 필요가 있음
- 전통적인 건설 방식은 설계, 시공, 유지관리 단계가 분절적으로 운영되는 경향이 있으나, 3D 프린팅은 디지털 설계-자동화 시공-데이터 기반 유지관리라는 연속적 흐름을 가능하게 함

■ 설계 단계에서의 고려 사항

① BIM 기반 설계의 필수화

- 건설 3D 프린팅은 디지털 모델을 직접 출력하기 때문에, BIM과의 연계가 필수적임
- BIM 기반 3D 모델이 곧 시공 데이터로 변환되므로, 설계 오류를 사전에 줄일 수 있음

- 3D 프린팅 건축물 기획 시 공공 발주자는 발주 지침, 안내서에서 'BIM과 3D 프린팅을 연계한 설계를 의무화하는' 조항을 포함하는 방안 검토
- ② 설계 최적화와 소재 특성 반영
 - 프린팅 가능한 구조로 설계를 단순화하거나, 곡면·자유형 구조를 활용하는 등 최적화가 필요함
 - 설계 단계에서부터 압축강도, 건조수축 등의 소재 특성 관련 사항을 반영해야 안정적 출력이 가능함
 - 구조 엔지니어와 소재 전문가의 설계 과정 참여 필요
- ③ 법규와 표준의 반영
 - 건축법, 시방서 기준이 미비한 상황에서는 설계단계에 별도의 안전 여유율 반영 필요
 - 향후 KS/ISO 표준 제정 시 설계단계에서 의무적 반영
- ④ 공공성 반영
 - 공공 발주자는 단순히 기능적 요구사항 외에도 회적 가치를 설계에 반영해야 함
 - 장애인접근성, 고령자친화 설계, 재난 시 변환가능 구조 등이 여기 해당 가능

■ 시공 단계에서의 고려 사항

- ① 장비 배치 및 현장 관리
 - 대형 갠트리형 프린터의 설치 공간, 전력 공급, 기초 작업 등 고려 필요.
 - 도심지 현장에서는 장비 이동성과 소음·진동 최소화 대책 요구
 - 공공 발주자는 현장 적용성을 검증하는 프로토콜 마련
- ② 시공 품질 관리
 - 실시간 모니터링 시스템 구축을 통해 적층 균일성, 강도, 온도, 습도 등 측정
 - 품질 기준 미달 시 자동 보정 기능 필요
 - 발주자는 품질 관리 성능을 입찰 평가 기준에 포함
- ③ 안전 관리

- 기존 인력 작업이 줄어드는 대신, 장비 운용과 로봇 관리 인력의 안전 확보 필요
- 전기·기계적 위험요소, 장비 전복 위험, 소재 공급 장치 사고 등에 대비
- 발주자는 시방서에 3D 프린팅 공사에 특화된 안전관리 항목 추가
- ④ 공기 단축과 비용 관리
 - 3D 프린팅의 가장 큰 장점은 공기 단축이며, 발주자는 이를 ‘기존 공법 대비 최소 30% 이상 공사 기간 단축 시 인센티브 제공’ 등과 같이 계약 조건에 명시할 수 있음
 - 비용 절감 효과는 단순한 시공비 절감 외에 재난 대응 속도 향상, 사회적 비용 절감까지 고려해야 함

■ 유지관리 단계에서의 고려 사항

- ① 유지관리의 중요성
 - 건축물의 전체 생애주기 비용(LCC) 중 유지관리 비용이 약 60% 차지함에 따라 유지관리 전략은 3D 프린팅 건설의 실질적 효과를 결정하는 핵심 요인이 될 수 있음
- ② 유지관리 데이터의 확보
 - 3D 프린팅은 디지털 모델과 실제 시공이 일치하므로 디지털 트윈(Digital Twin) 기반 유지관리가 가능함
 - 균열, 변형, 습도, 온도 등 측정하는 센서 데이터를 BIM과 연동하여 실시간 모니터링이 가능하고, 발주자는 유지관리 계획 수립 시 디지털 트윈 적용을 의무화해야 함
- ③ 보수 및 교체 용이성
 - 3D 프린팅 건축물은 파손된 부재만 재프린팅하여 교체하면 유지관리 비용 절감이 가능하기 때문에 모듈 단위로 교체·보수가 가능하도록 설계해야 함
 - 공공 발주자는 유지관리 단계에서 ‘모듈 교체 비용’을 별도 항목으로 산정할 필요가 있음
- ④ 장기 내구성 검증
 - 3D 프린팅 건축물은 전통 방식과 달리 층간 접착부의 내구성이 취약할 수 있음
 - 10년, 20년 등 사용자가 장기적으로 거주한 사례가 적기 때문에 내구성 시험 데이터

가 아직 부족함

- 공공 발주자는 실증사업에서 장기 모니터링을 수행하여 데이터 축적할 필요가 있음

■ 생애주기 비용 분석

- 생애주기 비용 측면에서의 특성은 아래와 같으며, 공공 발주자는 LCC 기반 발주제도를 검토할 필요도 있음
 - ① 초기 비용 : 장비·소재 개발로 높음
 - ② 운영 비용 : 인건비 절감, 자재 절감으로 낮음
 - ③ 유지관리 비용 : 모듈 교체·디지털 모니터링으로 효율적임
 - ④ 총 생애주기 비용 : 전통 공법 대비 약 20~30% 절감 가능

■ 생애주기를 고려한 발주자 전략 종합

- 공공 발주자가 건설 3D 프린팅을 본격적으로 도입하기 위해서는 생애주기 전 단계에 대한 고려가 필요함
 - ① 설계단계 : BIM-프린팅 연계, 소재 반영, 사회적 가치 내재화
 - ② 시공단계 : 품질 관리, 안전 관리, 공기 단축 및 비용 관리
 - ③ 사용단계 : 디지털 트윈 기반 모니터링, 모듈 교체 가능성, 장기 내구성 데이터 축적
- 생애주기 전반에 걸친 전략은 단순히 시범사업 차원을 넘어, 민간부문에서 3D 프린팅 기술의 확산을 유도할 수 있는 정책적·기술적 기준이 될 수 있음

3.6 발주자 측면의 3D 프린팅 적용 전략

1) 공공 발주자의 역할과 전략의 필요성

- 공공건설공사는 국가 지자체가 발주하는 인프라 및 건축 프로젝트로, 건설산업 전반의 혁신을 주도하는 중요한 분야임
- 건설 3D 프린팅 기술은 민간 건설사보다 공공부문 발주자가 먼저 채택하고 시범사업을 시작으로 확대하는 것이 다음의 사유로 바람직함
 - 시장 창출 효과 : 민간 기업은 ROI가 불확실하면 새로운 기술에 투자하지 않으므로, 공공 발주자가 초기 시장을 열어주는 것이 필요함
 - 사회적 가치 실현 : 재난주택, 공공임대주택, 군시설, 기반시설 등은 사회적 가치가 큰 분야로 3D 프린팅 기술을 적용하면 비용·기간 절감으로 더 많은 수혜자가 혜택을 볼 수 있음
 - 표준화 주도 : 건축법, KS 규격 등은 공공 시범사업의 결과를 토대로 제·개정되며, 그에 따라 공공 발주자가 시범 적용 사례를 축적해야 법제도 개선이 가능함
- 공공 발주자는 건설 3D 프린팅의 ‘초기 시장 창출자이자 제도 개선의 촉진자’ 역할을 수행해야 함

2) 공공 건축공사에서의 적용 전략

■ 공공임대주택

- 저출산, 고령화로 1~2인 가구가 급증하고 있으며 공공임대 수요가 확대되고 있음
- 3D 프린팅 효과로는 저비용·단기간 시공이 가능하여 공급 속도 향상이 가능하고 맞춤형 설계가 가능하여 고령자·장애인 친화 주택 건설이 가능함
- 발주 공사 중 일정 비율 이상에 3D 프린팅 방식을 시범 적용하고 소규모 다세대 임대주택부터 단계적으로 확대하는 것을 고려할 수 있음

■ 교육시설 및 공공건물

- 국공립 어린이집, 초등학교, 도서관, 복지관 등 교육 및 공공시설의 경우 표준화된 구조물을 대량으로 공급할 수 있어 예산 절감도 가능할 수 있음
- 국토부·교육부 협력으로 공공 건축물 일부를 3D 프린팅으로 발주하고 디자인 자유

도를 활용해 지역 특색을 반영한 새로운 디자인 건축물로 활용 가능함

■ 군시설

- 병영 생활관, 탄약고, 창고, 방호시설 등 군시설의 경우 상황에 따라 신속 건설이 필요한 경우가 타 분야보다 많을 수 있음
- 미국의 ACES 사례와 같이 짧은 시간에 군사시설 구축을 연구한 사례가 전략 수립 과정에서 참조할 수 있는 사례가 될 수 있음
- 추진전략으로는 국방부와 협력하여 군사훈련장에서 실증하고 공병단 등과 협의하여 전시중 급속시공이 가능한 시설 등에 단계적으로 활용할 수 있을 것임

■ 재난주택 및 구호시설

- 한국은 홍수, 태풍, 산불 등 재난 피해가 빈번하게 발생하며 이에 따른 이재민 수용소가 필요함에 따라 24~48시간 내 시공이 가능한 긴급 주택 건설 분야에 활용이 가능함
- 추진전략으로는 행정안전부, 지자체가 재난 대비 3D 프린팅 주택 키트를 개발하고 공공 창고에 3D 프린팅 장비를 비축해 긴급 대응하는 것도 효과적일 수 있음

3) 공공 토목공사에서의 적용 전략

■ 교량 및 인프라

- 네덜란드 아이트호벤공대는 통행이 가능한 3D 프린팅 콘크리트 교량을 건설하였음
- 소규모 하천교, 농촌 지역 보도교 등에 적용이 가능할 것으로 예상되며 국토부, 지자체 발주 사업에 소규모 교량 3D 프린팅 시범사업 등을 추진하고 단계적으로 규모를 확대하는 것이 효율적이라 판단됨

■ 도로 및 보도 블록

- 3D 프린팅 기술과 스캔 기술을 활용하면 맞춤형 보도 블록 제작이 가능하기 때문에 도로 보수 및 유지관리 비용 절감이 가능함
- 대도시 도로 관리사업에 시범 도입하고 효과성을 검증한 후 점진적으로 확대하는 전략을 검토할 수 있음

■ 도시 인프라

- 도시 전체를 3D 프린팅 시설물로 구성한 부산시 스마트도시 로드맵 사례 참고 가능
 - 우선 가로등, 벤치, 공공조형물 등 도시 기반 시설을 구축하여 곡선형 디자인, 맞춤형 구조물로 도시 미관을 향상시키고 향후 주거용 건축물까지 확대하는 전략 가능
- 향후 지자체 도시재생 사업과 연계하여 추진하는 것도 효과적일 수 있음

4) 발주자 측면 전략 - 단계별 기술 도입 로드맵

- 공공 발주자가 건설 3D 프린팅을 적용하기 위해서는 단계적 전략이 필요하며 다음과 같은 3단계 전략을 검토할 수 있음
 - 1단계(실증 단계, 3년 내) : 소규모 공공임대주택, 도시 인프라, 조형물 중심으로 진행하고, 법제도 개선을 위한 데이터 축적
 - 2단계(확산 단계, 5년 내) : 어린이집, 도서관 등 중규모 공공건축물에서 적용을 확대하고, 군시설·재난주택 시범사업 활성화
 - 3단계(정착 단계, 5년 이후) : 대규모 공공주택 단지, 복합 공공시설에 본격 적용하도록 하고, 민간 확산을 촉진하는 제도적 기반 완비
- 공공 발주자는 3D 프린팅 건설 기술의 시장 창출자, 표준화 주도자, 사회적 가치 실현자 역할을 수행해야 함
- 공공주택, 교육시설, 군시설, 재난주택 등 사회적 파급효과가 큰 분야에서 먼저 적용하고 토목 인프라, 도시재생, 기반시설까지 확대하며 단계별 로드맵을 통해 실증, 확산, 정착으로 발전시키는 것이 효율적이라 판단됨

5) 전략 종합

- 적용성 평가는 기술성·경제성·환경성·사회적 가치 측면을 모두 반영해야 하며, 종합 프레임워크를 활용할 필요가 있음
- 설계, 시공, 유지관리의 전 생애주기 관점에서 전략을 마련해야 하며, 특히 유지관리 단계의 데이터 축적과 모듈 교체 가능성 검토가 필수적임
- 공공 발주자가 주도적으로 나선다면, 국내 건설 3D 프린팅은 단순 기술 도입을 넘어 건설산업 혁신, 사회적 가치 실현, 지속가능성 강화 등 목표를 동시에 달성할 수 있음

4. 자동화장비 관련 현황과 적용 방안

4.1 자동화장비 개념과 기술 구성요소

1) 자동화장비 유형

■ 총괄 구분

- 토목공사와 건축공사 현장에는 건설 장비에 있어 무인화, 자동화와 관련된 기술이 많이 적용되고 있음
- MG(Machine Guidance, 머신 가이드)와 MC(Machine Control, 머신 컨트롤)와 같은 건설장비의 운전 조작 지원시스템은 단계적으로 상용화되어 실제 사용 비율이 늘어나고 있으며, 여러 장비 제조업체와 전문 측량 업체들이 개발하여 상품 출시
 - MG는 건설기계 위치, 자세 정보를 이용하여 설계 목표 대비 작업종류, 작업상황, 목표수치, 지면과의 거리 등 작업 정보를 조종사에게 실시간으로 제공하는 기술임
 - MC는 머신가이드 기술을 활용하여 복잡한 조종이 요구되는 경사면, 비정형면, 수중작업 등 건설 장비 작업을 반자동화하여 작업 정밀도를 높이고 장비 조종을 용이하면서 효율적으로 할 수 있게 하는 기술을 의미함
- MG와 MC의 기술적 특성은 아래 표에서 보는 바와 같으며, 기술 개발은 1단계의 MG에서 시작하여, 2단계 개별기계 반자동화, 3단계 개별기계 완전 자동화를 거쳐 4 단계 다수 자동화 건설기계 협업까지 단계적으로 진행됨

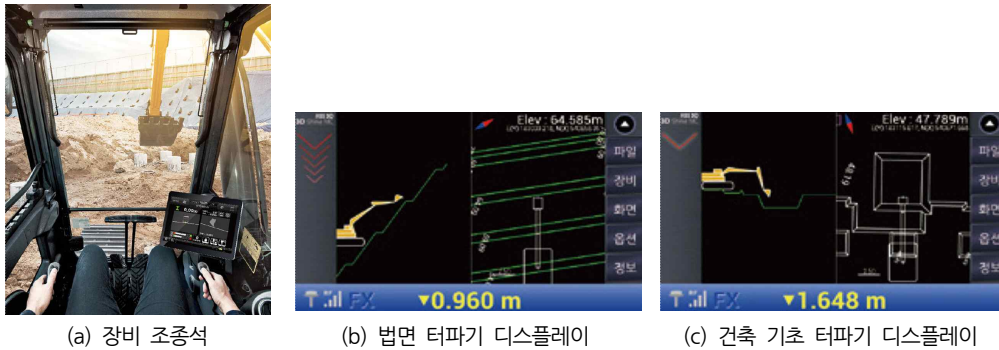
[표 3-21] 자동화장비 관련 기술 유형

구분	MG(머신 가이드)	MC(머신 컨트롤)
기술개요	장비에 부착된 센서와 모니터를 통해 작업자를 보조, 가이드하는 유인시스템	기울기 센서로 장비 움직임을 인지하고 GPS 위치정보 확인을 통해 컴퓨터로 장비를 제어하는 시스템
기대효과	① 모니터에 작업정보가 자동 안내되어 별도 측량작업 불필요 ② 작업품질 안정화 가능 ③ 현장 안전재해 감소	① 건설기계 반자동화 ② 공정의 효율화 및 단순화 ③ 장비 사용시간, 작업시간 단축 ④ 작업품질 향상 및 정밀 시공 ⑤ 투입인력 감소 ⑥ 현장 안전재해 감소
기술단계	[1단계] MG → [2단계] 개별기계 MC(반자동화, 운전자 개입 필요) → [3단계] 개별기계 MC(완전 자동화) → [4단계] 다수 자동화 건설기계 간 협업	

자료 : 표준시방서, KCS 10 70 10 : 2023 머신가이드 및 머신컨트롤 시공 일반

■ MG(머신 가이드런스)

- 일반적인 토공 작업에서 굴착기의 정지 및 굴착 작업 능력은 매우 큰 역할을 차지함
- 굴착기에서의 머신가이드런스는 굴착 작업시 잦은 확인 측량(보통 수준 측량) 과정을 거쳐야 하며, 이때 측량 기기 및 측량원이 투입되는 것이 아닌 굴삭기에 장착된 GNSS(Global Navigation Satellite System), IMU(Inertia Measurement Unit) 등에 의해 버킷의 절대 위치를 장비 조종원에게 알려주는 기술을 의미함⁴⁾
- 온보드(On-Board) 장치를 조종석 내부에 설치하고 장비 조종사에게 음향(Audio) 또는 시각(Visual) 피드백을 통해 도면(설계)상의 위치 대비 버킷 끝단과 같이 현재 장비의 위치 정보를 제공하는 기능이 포함되어 있음
 - 장비 조종자가 보는 디스플레이에 장비와 설계 도면이 정합된 화면, 현재 위치 및 고도, 설계 대비 현재 버킷 끝단의 높이 ±차이값을 표시하여, 어느 구역을 얼마만큼의 깊이로 굴착해야 할 것인지를 알 수 있게 함



[그림 3-39] 굴착기 MG 기술 적용 예

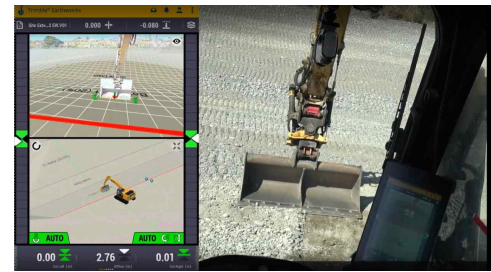
- 일반적으로 2D와 3D로 구분하고 있으며, 2D는 경사 또는 레벨만을 보고자 하는 상황에 필요한 MG 구성이며 별도의 3차원 도면 입력 없이도 단독 작업을 할 수 있어 단순 반복 굴착 작업에 유용하게 사용되며 3D에 비해 하드웨어 구성이 단순하고 시스템 구축이 간편함

4) • MC는 장비가 사람을 대신하여 제어(Control)에 개입하는 요소가 포함되어야 하며 현재 우리나라 장비 제조사에서는 MC를 '반자율기술'로 소개함
 • 장비 조종자의 복잡한 좌우레버 100% 수동 복합조종을 통한 고난도 저품질 고르기 작업 방식을 개선하기 위해 장비 조종자의 좌측 레버 단순 조종만으로 쉽고 정확하게 작업을 수행토록 돕는 반자율 기술임
 • MG 기술에 자율 요소를 더하면 MC라고 보는 것이 올바른 정의라고 볼 수 있음

- 3D는 3차원 설계 도면을 요하며 GNSS 및 자세 센서 등 가이던스에 필요한 모든 센싱 기술을 사용하여 초기 구축 비용이 2D에 비해 높으나 복잡한 법면이나 기초가 있는 건설 공사에서 유용하게 사용
- 최근 3D MG에 증강 현실(AR)기술을 더하여 가이던스 사용자 경험(UX)를 한 층 더 높인 제품들도 출시
 - 해외 제품 중에는 디스플레이 화면상에 카메라로부터 보여지는 현실정보와 3차원 설계정보 및 작업 현황 외 T사 제정보를 동시에 투영하여 장비 조종자의 가이드 이 해도를 높인 것도 있음



(a) 증강현실 MG 메인 화면



(b) 증강 및 가상 현실 멀티 화면 뷰

[그림 3-40] 증강현실 기반 MG 운영 사례

■ MC(머신 컨트롤)

- 디지털 센서와 전자유압시스템 등을 통해 장비의 자세와 작업지점 등을 실시간으로 운전자에게 알려주고 각종 작업을 반자동으로 수행
- 별도의 측량 인력 없이도 원하는 작업의 깊이나 기울기만 입력하면 자동으로 땅의 높 낮이를 파악해 작업을 할 수 있으며, 이로 인해 작업 현장의 공기단축과 비용 절감 등 이 가능해 작업 효율을 30% 이상 높일 수 있고 안전사고의 위험도 낮출 수 있을 수 있 을 것으로 기대
- MG 기술과 마찬가지로 MC 장비에도 3차원 설계도면 정보가 필요하며, 좌우 레버 의 복잡 조종이 아닌 단순 조종만으로 붐·암·버킷 등의 복잡 조종계통을 정해진 레벨 에 맞추어 작업을 해주는 기능 제공

2) 기술 구성 요소

- MG 장비는 측정장치, 해석장치, 입력장치, 출력장치 등으로 구성되며, MC 장비는 MG 장비에 머신컨트롤 제어기, 머신컨트롤용 조종장치 등이 추가됨

[표 3-22] MG, MC 장비 구성요소

구분	장치명	장치별 기능
공통	측정장치	• 건설기계 및 엔드이펙터의 위치, 이동 속도, 작업 진행상황 등 측정 (①GNSS를 이용한 위치 측정장치, ②레이저, 초음파 등을 이용한 거리 측정장치, ③엔드이펙터의 움직임을 측정하기 위한 관성측정장치, ④기타 해당 공종의 시공을 위해 필요한 측정장치)
	해석장치	• 측정장치로부터 계측된 데이터를 이용하여 엔드이펙터의 작업 상황정보와 시공 목표 정보의 차이를 실시간으로 산정
	입력장치	• 외부 저장장치로부터 디지털 설계도면, 작업 정보 데이터 등을 머신가이던스 장비로 전송
	출력장치	• 디지털 설계도면과 측정장치로부터 계측한 값, 해석장치로부터 산정된 결과 등 관련 정보를 시각(디스플레이 패널, 불빛 등), 청각(음향 등), 촉각(진동 등) 등을 통해 건설기계 조종사에게 제공
MC	제어기	• 측정장치로부터 얻어지는 데이터와 디지털 설계도면 및 작업 정보 데이터를 바탕으로 건설기계의 각 구동부를 조작하여 엔드이펙터의 위치와 움직임 등을 반자동으로 제어
	조종장치	• 건설기계 조종 인터페이스(페달, 조이스틱 등)에 기능을 추가하거나 인터페이스에 별도로 부착되어 건설기계 조종사가 머신컨트롤 기능을 실행하거나 종료

자료 : 표준시방서, KCS 10 70 10 : 2023 머신가이던스 및 머신컨트롤 시공 일반

4.2 자동화장비 필요성과 기대 효과

- 국내외 여러 문헌과 보고서에 따르면 MG 굴착기를 현장에 적용함에 따라 토공 생산성 및 효율성 증대, 인력 투입 및 비용 절감 효과를 거둘 수 있는 것으로 분석
 - 특히 기초, 관로, 법면 시공시 반복적인 확인 측량 과정을 크게 줄일 수 있게 되어 시공 시간 단축 효과가 적게는 10%부터 많게는 50% 수준으로 나타남
 - 직접 공사비, 유류비 절감 효과 및 시공 품질의 향상 효과도 크게 나타났으며, 터파기 시 측량 인원 투입 자체가 필요하지 않아 인력 운용의 유연성 확보와 안전에 큰 도움이 됨
 - 거의 모든 건설 공사는 토공사를 포함하고 있고 비용과 기간 측면에서 토공사가 차지하는 비중이 높다는 점을 고려한다면, 생산성 증가 효과가 입증된 MG 굴착기를

보다 많은 건설 현장에서 사용하는 것은 우리나라 건설 산업 전체의 생산성 증대와 비용 절감으로 이어질 수 있음

- MG/MC 기능을 보유한 자동화장비 도입을 통해 기대할 수 있는 효과는 다음과 같이 재정리할 수 있음

① 시공 비용 절감

- 굴착기의 유지비 및 유류비의 절감
- 장비의 생산성의 증가
- 임금, 초과 근무 감소에 따른 운영 비용의 절감

② 공기 단축

- 장비 생산성의 증가
- 측량, 측설, 마킹 등의 작업에 소요되는 시간 단축
- 재시공으로 인한 장비 재배치 등 장비 운용 효율의 증가

③ 친환경

- 유힬시간(Idle)이 줄어 연료 소모량의 감소
- 탄소배출량의 저감 및 기타 소모품 사용의 절감

④ 품질 향상

- 재래식 공법 대비 시공 품질 향상
- 시공 오류 발생 가능성의 저감
- 품질 보증 및 품질 계측 효율화

⑤ 안전성 향상

- 현장인력 최소화로 현장통제가 용이
- 불필요한 측량 과정 제거
- 부딪힘, 끼임과 같은 사고 발생 가능성 저감

4.3 국내외 정책 동향

- 미국 교통국(DOT, Department of Transportation), 연방 도로청(FHWA, Federal Highway Administration)의 Automated Machine Guidance(AMG), 일본 국토교통성의 i-Construction 등은 MG와 같은 건설 기계 자동화 기술의 도입 확대를 통한 건설 생산성의 혁신을 목표로 한 프로젝트임

■ 국내 자동화장비 관련 추진 정책

- 2018년 발표된 『스마트 건설기술 로드맵』에서는 시공단계 건설기계와 관련하여 미래에 달성해야 하는 비전을 제시한 바 있음
 - 현장에서 건설기계의 경우 운전자 숙련도 부족, 장비간 연계 미흡으로 과다 투입과 빈번한 사고 등의 문제가 있었음
 - 이에 ‘자동화 건설기계가 AI의 관제에 따라 자율 주행하고 시공을 수행함으로써 작업을 최적화하여 생산성을 높이고 인적 위험요인 최소화로 안전성을 향상하는 것을 미래상으로 설정함
 - 핵심기술은 자동화기술, 통합운영 및 관제 기술로 구분되었으며, 각종 센서·제어기·GPS 등을 통해 기계의 위치, 자세, 작업범위 정보를 운전자에게 제공하도록 하고, 다수의 건설기계를 통합 관리·운영하는 기술을 확보하도록 하였음

■ 일본의 건설기계 자동화, 무인화 추진 계획

- 국토교통성은 건설DX 추진에 있어 사안별로 추진과제와 일정을 정리하였으며, ‘건설시공에서 자동화, 원격화 촉진’에 있어서는 다음과 같이 시책을 정리함
 - 사람이 탑승하여 조종한 건설기계를 대상으로 자동화, 원격화를 진행하도록 함
 - 이를 통해 비약적인 저인력화와 생산성 향상을 실현하기 위해 안전과 시공관리에 대한 제도를 정비하고, 현장 도입을 촉진하도록 함
- 연차별 추진계획은 [표 3-23]과 같으며, 자동·원격시공의 안전가이드 마련 및 현장 검증 실시, 현장검증을 바탕으로 기술개발 촉진, 안전 규정 마련 및 적용, 기술기준 정비 등의 사항이 연차별로 구체화되면서 포함되어 있음

[표 3-23] 건설시공 자동화, 원격화 추진 계획

영역	2023년	2024년	2025~26년	목표 형태
건설시공에서 자동화, 원격화 촉진	<ul style="list-style-type: none"> • 자동·원격시공에 관한 안전 가이드라인이나 현장 검증 등의 활동 방침 수립 • 자동·원격시공의 현장 검증 실시 • 현장검증을 바탕으로 기술개발 촉진 • 안전 규정 초안 수립 	<ul style="list-style-type: none"> • 자동·원격시공의 현장 검증 실시 • 현장검증을 바탕으로 기술개발 촉진 • 안전 규정 대상 확대 • 자동·원격시공 기계의 기능요건 검토·공표 	<ul style="list-style-type: none"> • 자동·원격시공의 현장 검증 실시 • 현장검증을 바탕으로 기술개발 촉진 • 안전 규정 대상 확대 • 기술기준 등 정비 	담당자 부족이 심각화되는 건설 분야의 생산성 향상을 위하여, 건설기계가 자동으로 시공하는 건설현장을 실현하고, 작업원과 오퍼레이터의 부담을 대폭 감소
기대 효과	(시공자) • 특정 건설현장에서의 자동·원격시공의 안전대책 검토가 효율화 (자동·원격시공 기계의 개발자) • 자동·원격시공 기계에 요구되는 성능이 명확화			

■ 시방서 등 표준 현황

- 2023년 MG/MC 적용 공사 신뢰성 확보, 도입 활성화를 위해 표준적인 시공방법을 담은 표준시방서인 ‘KCS 10 70 10(머신가이던스 및 머신컨트롤 일반)’ 공표
 - ①용어 정의 및 범위, ②구성 장비의 최소 성능요구사항 및 장비교정 관련사항, ③ MG/MC 기술 적용시 사전확인, 제출물, 시공검사기준 등 시공단계에서 주체별로 준수하여야 할 사항 등 규정

[표 3-24] MG, MC 관련 표준시방서 구성

항 목	주요 제정사항
적용범위	• 다양한 건설공사에 활용할 수 있도록 적용범위 설정
용 어	• MG, MC 및 구성 장치에 대한 용어 정의
제출물	• BIM 연계 디지털 설계도면, 검·교정계획 등 제출물 명시
장 비	• 주요 구성장치를 구분하고 장비의 교정 및 안전기능 관련사항 규정
작업준비	• 장비의 작동여부, 정확도 검사 등 작업 준비 시 검토 사항 명시
시공방법	• MG, MC 적용 시 확인사항 등 시공방법에 대한 기준 규정
정확도 검사	• 공사 후 시공결과에 대한 검사 방법 및 절차 등 규정

자료 : 표준시방서, KCS 10 70 10 : 2023 머신가이던스 및 머신컨트롤 시공 일반

4.4 국내외 적용 현황과 사례

■ 기술 적용 현황과 발전 방향

- 현재 현장 적용 기술은 MG와 제한적인 반자동 기능 수준으로 제품개발 수준이나 타 산업 활용수준 보다 다소 낮고, 활용 비율 역시 떨어져 있음
 - 건설현장 적용 가속화를 위해서는 기술의 발전과 함께, 해당 기술과 솔루션이 자연스럽게 적용될 수 있는 건설현장의 환경 조성이 병행되어야 함
- 스마트 건설기술 개발 관련 국가연구개발사업에서는 도로실증을 통해 지능형 건설 장비 관제 기술과 디지털 기반 도로 건설 장비 자동화 기술을 개발하고 실증을 진행함
 - 지능형 건설장비 관제 있어서는 지능형 토공·포장 장비 관제 시스템과 스마트 네트워크 기반 토공·포장장비 IoT 운영 및 무인화 기술을 개발함
 - 자동화와 관련하여 도저, 그레이더, 롤러 등 3종에 대해 고정밀 작업 가능 자율 작업형 건설 장비 제어 기술과 시공장비 연동 도로포장 품질관리 및 향상 기술을 실증함
 - 경로 추종 자율 작업, 작업 시야 미확보 시 비상정지, 지능형 다짐에 있어서의 품질 확보 관련 기술 검증



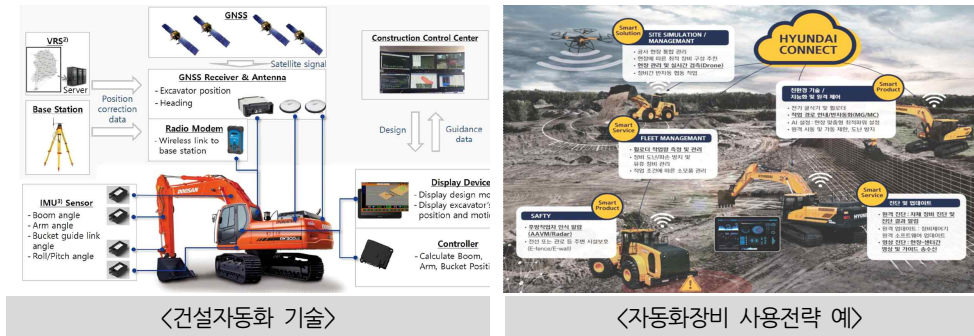
<연구단 종합 실현장 시연 모습>

<굴착기 원격제어 상황>

자료 : '도로실증을 통한 스마트 건설기술 개발' 연구단(2024), HD현대인프라코어 배포자료

[그림 3-41] 건설장비 운용 모습

- 토공사, 도로공사를 비롯하여 타워크레인이나 이동식크레인에서도 원격조정에 의한 무인화 실증이 이루어졌음
- 건설현장 내 건설기계의 자율이동·작업, 다수 기계의 통합 운영, AI 융합에 의한 고도의 지능화 등과 관련된 기술이 도입될 것으로 예상됨



자료 : 국토교통부 보도자료(2023.11.13), 현대건설기계(2021)

[그림 3-42] 자동화장비 기술 발전 사항

4.5 제도 개선 및 도입 방안

■ 제도 개선 요구 사항

- 『건설기계 안전기준에 관한 규칙』, 『산업안전보건 기준에 관한 규칙』 등 건설기계 관련 법규는 운전자 탑승을 전제로 하고 있어, 원격조종, 완전 자동화 등 무인운전에 대한 특례 인정 근거 마련이 요구됨
 - 특례를 우선 마련하고 추후 제작·운용 상의 세부기준을 정하도록 함
- 또한 운전자에 대한 면허·교육, 보험 제도 등도 정비함으로써 활성화 기반을 조성할 필요가 있음

■ 공공건설사업 도입 방안

- 자동화장비의 실현을 위한 기술적인 요소는 상당부분 진척된 바 있으며, LH의 경우 내부 사업을 대상으로 하는 시범사업을 통해 기술의 적용성, 실질적인 적용효과를 평가한 바 있음
- 공중을 가리지 않고 건설기계가 활용되는 대다수의 작업에서 MG/MC의 개념을 적용하여 생산성 향상, 성력화를 도모할 수 있고, 법제도적 환경이 조성된 후에는 무인화, 자동화까지 기능을 확대할 수 있을 것으로 예상됨
- 장비 자동화 수준의 향상은 작업품질과 현장 안전성 제고와 밀접하게 관련된다는 점에서 업체의 자발적인 기술 채택을 촉진하는 방안을 기본으로 하고, 전략적으로 기준 마련, 의무화 적용 비율, 인센티브 등을 병행하는 방안을 검토하도록 함

5. OSC 관련 현황과 적용 방안

5.1 OSC 개념과 기술 구성요소

■ 기본 개념

- 주택 등 건축물의 전체 또는 일부를 공장 내에서 사전제작하고, 현장으로 운반·설치·조립하는 방식의 건설공법
 - 건축물 부지 이외의 장소에서 부재, 부품, 선조립부분, 유닛 등을 생산 후 현장에 운반하여 설치·시공하는 방식으로, 전체 공정의 일정 비율 이상을 공장에서 제작

■ OSC 공법의 구분⁵⁾

- 공장제작 또는 탈현장(OSC) 공법은 모듈러 유닛을 조립하는 모듈러공법과 PC(Precast Concrete) 부재를 활용한 PC공법으로 구분
- 모듈러공법은 공장에서 사전 제작된 박스 형태 모듈을 현장에서 적층하여 건설
 - 주택, 숙박시설, 학교 및 기숙사, 병영생활관 등에 적용
 - 바닥, 벽체, 창호, 배선·배관, 욕실, 인테리어, 가전·가구 등 모두 설치 완료
- PC공법은 공장에서 구조체를 중심으로 콘크리트 보, 기둥 등의 부재를 제작하여 현장에서 조립하는 방식
 - 물류시설, 지하주차장, 공장, 터널·교량 등에 적용

[표 3-25] OSC 공법의 구분

구분	RC 공법 (Reinforced Concrete, 습식)	PC공법 (Precast Concrete)	모듈러공법 (Volumetric Modular)
구조	철근콘크리트구조	PC라멘조(PC기둥/보/슬라브)	라멘조(철골기둥/보)
작업 모습			
방식	<ul style="list-style-type: none"> • 전체 작업 현장 실시 - 철근, 콘크리트, 거푸집, 동바리, 마감공사 - 현장작업, 습식방식 	<ul style="list-style-type: none"> • 구조체 중심 공장 제작 - 철근, 콘크리트 적용 부재 공장 제작 - 현장조립, 토핑타설, 현장마감 	<ul style="list-style-type: none"> • 일정비율 이상 공장제작 후 현장설치 - 기둥, 보, 데크 슬라브, 건식 벽체, 배선(배관), 가구 등

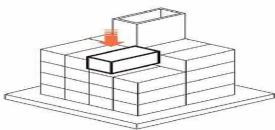
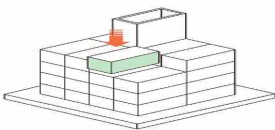
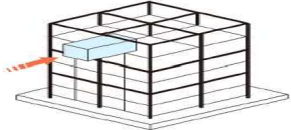



5) 2025년 12월 국회에서 발의된 『모듈러 건축 활성화 지원에 관한 특별법안』에서는 OSC라는 용어를 ‘모듈러’로 대체하여 정의하였으나, 본 연구에서는 기존에 통용되던 분류 방식에 따라 내용을 정리함

■ 유형 세분화

① 공법 기준 구분

- 레고처럼 모듈을 쌓아 단위 모듈이 상부 하중을 지지하는 적층방식과 모듈 유닛을 RC 골조에 끼워넣어 상부의 하중을 지지하지 않는 인필방식으로 구분

[표 3-26] 공법에 따른 모듈러 공법 유형 구분

적층방식		인필(Infill) 방식
라멘(유닛프레임+유닛)	벽식(패널+유닛)	
		
		
<p>〈용인영덕 경기 행복주택〉</p> <ul style="list-style-type: none"> • 기둥, 보가 하중을 받음 • 축하중을 받지 않는 비내력 칸막이용 벽체 설치 	<p>〈국립중앙의료원 음압병동〉</p> <ul style="list-style-type: none"> • 벽체가 하중을 받는 공법 • 벽체 내부 브레이싱 설치 	<p>〈천안두정 행복주택〉</p> <ul style="list-style-type: none"> • 구조체에 박스형 모듈 삽입 • 별개 구조공법으로 건축된 구조체에 모듈 삽입

② 재료 기준 구분

- 구조체 제작에 강재, 프리캐스트 콘크리트, 목재, 기타재료 등을 활용할 수 있음

[표 3-27] 재료에 따른 유형 구분

구분	강재(철골) (Steel)	콘크리트 (Concrete)	목재 (Timber)
작업 모습			
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 고층, 대공간, 생산자동화 	<ul style="list-style-type: none"> • RC, PC 인프라 활용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 공장생산 자동화 용이, 경량
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 내화비용 과다 	<ul style="list-style-type: none"> • 현장작업 과다, 크레인 대형화 	<ul style="list-style-type: none"> • 공간 제약, 인식

③ 이동 유무에 따른 구분

- 이동 여부에 따라 정주형, 이동형 등으로 구분

[표 3-28] 이동 유무에 따른 모듈러 공법 유형 구분

구분	정주형(PMC)	이동형(Relocatable Building, RB)
해당 사례	 <p>〈포스코 기가 타운〉</p>	 <p>〈평창 미디어 레지던스 호텔〉</p>
특징	<ul style="list-style-type: none"> • 현장 설치 후 영구적으로 건축물 존치 • 공장제작률 70% 내외 • 모듈러 유닛 재사용률 70~75% 	<ul style="list-style-type: none"> • 설치 후 타부지로 이동하며 재설치 가능 • 각 부분 모듈화로 현장설치 최소화 • 공장제작률, 유닛 재사용률 100% 수준

5.2 OSC 필요성과 기대 효과

1) 건설산업의 실태와 모듈러 도입 배경

■ 건설산업의 종합적 상황

- 건설산업은 내외부의 다양한 문제로 인해 위기상황에 직면해 있음
- 물량 중심의 과거 방식으로는 산업의 지속가능성을 담보하기 어려우며, 미래 산업으로서 새로운 성장방식과 생산체계가 요구됨

■ 건설분야 인력 감소 및 구조 변화

- 건설업에 종사하는 전체 인원의 절대적 감소와 함께 청년층의 건설업 기피 등으로 인해 타산업 대비 고령화 비율 높음
- 외국인근로자 비율 증가에 따라 숙련도 부족, 품질 및 안전 확보 영향

■ 생산성 저하

- 타산업과의 생산성 격차 확대, 영세화 및 저부가가치화 우려 심화
- 국내 노동생산성은 주요 선진국 대비 60~80%로서 낮은 수준임

- 국내 건설 노동생산성 감소 대비 제조업·전체 산업 90% 이상 증가
- 건설업은 타산업 대비 디지털 비율이 낮고, 상당한 재작업, 대기시간, 기상, 민원 등 외부영향으로 생산성 저조

■ 품질 및 안전 문제 지속 발생

- 건설품질 개선을 위한 지속적인 노력에도 불구하고 부실시공, 주택하자 등 품질 이슈 빈번하게 발생
- 사회 전반의 노력으로 건설 안전사고 전체 건수는 최근 5년간 20% 이상 감소하였으나, 여전히 전체 재해 절반 이상 건설분야에서 발생
- 국내 사망사고만인율은 선진국 대비 영국 11배, 일본 3배 수준임

2) 생산방식 혁신에 대한 기대 효과

■ 모듈러 공법 적용 효과 총괄

- 기존 프로세스에서 현장 작업을 최소화하여 생산방식의 효율성을 극대화함으로써 생산성, 환경성, 안전성, 성장성 측면의 장점 기대

■ 부분별 기대 효과

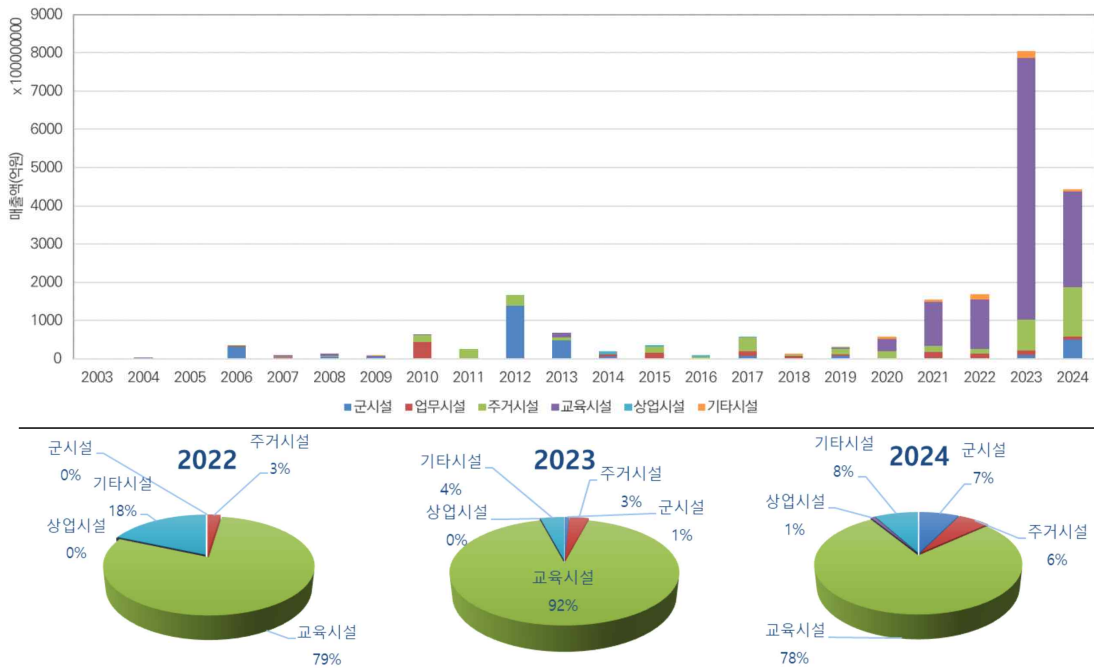
- 안정적인 공장 생산환경 확보에 따라 생산성 증대
 - 표준화, 자동화 생산으로 스마트 건설 실현
 - 기능인력 고령화, 외국인근로자 증가 등 건설 인력 실패 탈피 가능
- 모듈의 사전 공장 제작, 모듈 설치와 조립 용이성 등으로 기존 건설방식 대비 평균 20~30% 공사기간 단축 가능
- 탄소저감 재료, 재사용 등으로 건설의 지속가능성 제고
 - 모듈러 주택 전생애주기 탄소배출량은 기존 주택 대비 17~20% 저감
 - 77% 모듈러 현장에서 건설 폐기물 감소 (44% 현장은 5% 이상 감소)
- 현장 작업 최소화로 안전재해 발생 가능성 원천적 차단
- 요소기술 개발 및 활성화로 진출가능한 해외시장 탐색
 - 일정 이상 물량의 지속적 발주를 통해 대량생산, 원가저감 등으로 기술경쟁력 확보

5.3 국내외 시장, 정책 동향

1) 시장 동향

■ 모듈러 공법 관련 시장 추이

- 전체 건축물 유형을 대상으로 할 때 2024년 기준 국내 모듈러 건축 시장의 규모는 5,637억원 규모로 추정
- 그린스마트사업(모듈러 학교) 물량에 따라 2023년 8,064억원으로 최대치 기록
 - 해당 사업의 경우 시장 참여 20개사 중 주요 5개사가 전체 시장의 80% 이상 점유



[그림 3-43] 국내 모듈러 시장 동향

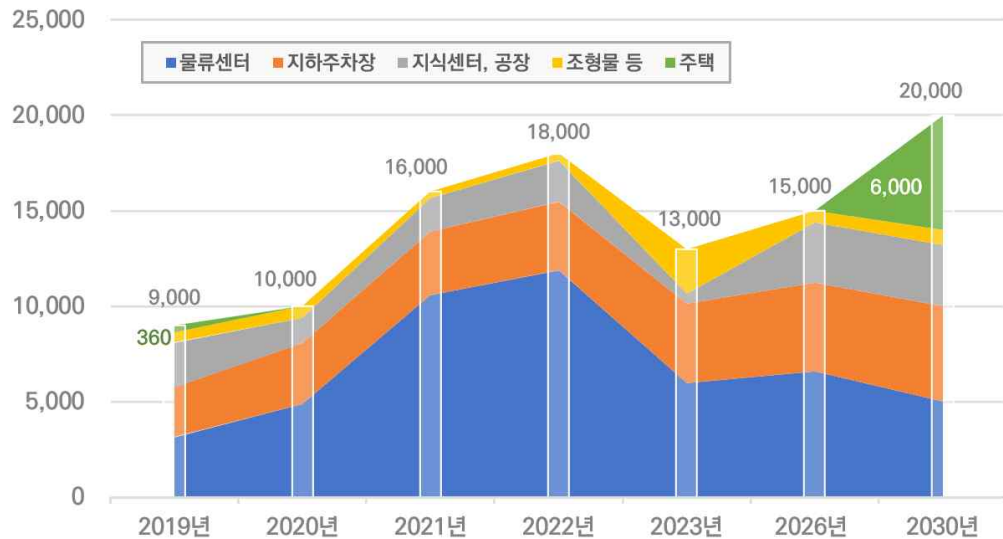
- 향후 시장은 단기적인 일부 축소 후 2030년 총 1조 이상 규모로 증가할 것으로 예측
 - 향후 주거용, 군시설, 업무시설 등을 중심으로 시장 확대 예상
 - Bass 모형에서 2030년 모듈러 건축시장 규모는 약 1조원 도출
 - 시나리오 분석의 경우 2030년 최소 1.1조원, 최고 4.4조원으로 예측되며, 국토교통부 주택공급대책에 따라 추가적인 시장 성장도 가능

■ PC 공법 관련 시장 추이

- 2020년 이후 물류센터, 지하주차장, 공장 중심으로 실적 확대
 - PC 수요 1.2~1.3배 증가 및 PC 단가 1.5배 이상으로 급격하게 증가되는 양상
 - 2022년 국내 시장규모는 1.5~1.8조, 2023년은 1.3조 수준 추정
- 향후 2030년에는 총 2조 수준까지 시장 확대를 기대함
 - 2022년 하반기부터 물류센터 물량감소가 있으나, 타 건축물 유형의 실적 증가 예상

[표 3-29] PC 공법 관련 시장 규모

구 분	2019년	2020년	2021년	2022년	2023년	예 상	
						2026년	2030년
물류센터	35%	49%	66%	66%	46%	44%	25%
지하주차장	29%	32%	21%	20%	32%	31%	25%
지식산업센터	7%	9%	5%	4%	10%	12%	10%
일반공장	19%						
반도체공장		4%	6%	8%	8%	9%	6%
조형물 등	6%	6%	2%	2%	4%	4%	4%
주택(아파트)	4%	-	-	-	-	-	30%
총금액(원)	9천억	1조	1.6조	1.8조	1.3조	1.5조	2.0조
물량(m ²)	-	-	-	150만m ²	120만m ²	135만m ²	160만m ²



[그림 3-44] 시설물 유형별 PC 공법 관련 시장 규모

■ 국내 모듈러 건축 연혁

- 국내 모듈러 프로젝트는 2003년 신기초등학교를 시작으로 점진적으로 확대 적용되었으며, 2021년을 기점으로 발주 규모 확대, 고층화, 평면 다양화 추진
 - 20여년간 학교, 기숙사 등 프로젝트에서 보건소, 주상복합 등 다양한 프로젝트로 확장되었으며, 모듈러 기술의 중고층화, 이동형 공법 적용 실현
 - 점진적으로 발주 프로젝트 규모 확대, 모듈러 고층화, 유닛 조합형 평면 활용

■ 최근 국내 모듈러 건축 동향

- 다양화, 그린스마트화, 대형·고층화, 고성능화 등으로 대표 동향을 정리할 수 있음
 - 공공·민간, 주거·비주거, 영구·임시, 국내용·수출용 등 적용대상, 사업방식 다변화
 - 재사용 가능 친환경 모듈러 학교 시장 확대
 - 구조성능 확보를 기반으로 고층화, 대공간화 추진
 - 바닥난방, 우수한 주거성능 등으로 한국형 모듈러 주택 발전

■ 모듈러 공법 적용분야 다양화

- 『9.7 주택공급 확대방안』에서 언급된 바와 같이 신축매입임대 사업을 통해 모듈러 주택 공급 확대 도모
 - 약 16만 가구 규모로 높은 공사비를 감안하여 저층 주택 적용
- 산불, 홍수 등 자연재해로 인한 이재민들 대상 모듈러주택 신속 공급
 - 안동 산불 피해지역에 대한 ‘경북형 모듈러주택’ 등과 같이 임시대피소 대체
- 노후도시 정비 시 신속한 이주단지 조성, 순환형 주택 공급에 모듈러 주택 등 활용
- 공동주택 단지 내에서 전용부위 중심의 아파트동을 비롯하여 단지 내 부대복리시설, 옥탑 등에 모듈러 공법 적용

■ 국내 기술의 해외 진출

- 사우드 옥사곤 빌리지 등 국외 대형 프로젝트 진출 및 현지 생산 시도
- 우크라이나 등 전후 복구사업 및 미국 등 선진국 모듈러 건축 수출

■ 공공기관 동향

- LH는 2024년 3월 『LH 2030 OSC로드맵』을 공표하고, 점진적 물량 확대, 고층화, 표준화, 기술선도, 제도개선 등을 추진하고 있음
 - 표준평면 개발, LH 시방서와 단계별 업무매뉴얼 발간, 바닥충격음 차단성능 개선, 경량화 및 건식화 추진, 각종 제도 및 기준 개선, 규제 완화 등 추진



[그림 3-45] LH 2030 OSC 주택 로드맵

- SH의 경우 공공주택에 OSC를 도입하기 위해 단계적으로 준비
 - 국내 4~6층 소규모 모듈러 공동주택 시장 개척 (공릉동, 가양동)(2014~2018)
 - 중층 규모 모듈러 확대 시도, 공공주택 확대 적용(2019~2022)
 - 제조방식의 전환, 설계단계부터 생산방식 제조화를 위한 표준화
 - 스틸 모듈러 표준모델 시스템 개발(2021~2022)
 - PC 설계 가이드라인 개발, PC실증단지 착공
 - 제조여건 마련, 자동화생산 공정에 의한 공공주도 대량생산 시스템
 - 100년의 주택 건설시장 창출, 재건축 사업모델 시장 제시
- GH는 2024년 12월 모듈러주택 표준평면 등 기술개발 촉진, 2030년까지 3기 신도시 지구별 총 1만개 이상(누적) 모듈 공급을 통한 시장 활성화 등을 골자로 하는 『GH 모듈러주택 로드맵』 발표
 - 모듈러공법 기술개발 촉진 환경 형성과 상용화를 목표로 국내 산업기반 구축, 모듈러 친화 성장환경 조성, 차별화전략 추진, 지속적 물량공급 등 4대 핵심전략 포함

2) 정책 동향

■ 국토교통부『스마트 건설 활성화 방안』(2022.07)

- ‘II. 생산시스템 선진화’ 전략 중 제조업 기반의 탈현장 건설(OSC) 활성화(현장→공장) 과제와 관련됨

[표 3-30] 스마트 건설 활성화 방안 중 관련 내용

▣ 시장 초기 붐업을 위한 공공발주 확대

- (공공주택) 2023년에 1천호로 발주물량을 확대(2020~2022년, 연평균 464호)하고, 시행성과와 기술 발전 등을 고려하여 점진적 확대방안 마련(2024년)
- (비주택) 노후 초·중·고 개축·리모델링에 공사기간이 짧은 OSC를 교육시설 활용

▣ 민간 확산을 위한 제도 정비

- (인센티브 제공) 지자체 인·허가 단계에서 용적률·건폐율·높이제한을 완화할 수 있도록 법적근거 마련(주택법, 2022년)
- (기준 정비) OSC 품질 제고를 위해 부재, 모듈의 제작오차, 품질관리 및 부재(또는 모듈) 간 수직·수평접합 등의 기준 마련(2023년)
- (OSC주택 인정제도 개선) 인정대상 범위(현재 주택)를 OSC 수요가 많은 기숙사, 오피스텔 등 준주택까지 확대(주택법, 2022년)

▣ 기술개발 지원 및 실적관리 강화

- (기술개발 지원) 핵심기술 고도화를 위한 민관 합동 R&D 추진
- (실적관리 강화) 전문건설업 업무범위에 모듈 개념 추가 및 실적관리 체계 구축
- (긍정인식 확산) 중고층 프로젝트 중심으로 성능 강조 등을 위한 홍보관 운영

■ 국토교통부『공업화주택 활성화 방안』(2023.07)

- 공업화주택의 사업성을 높일 수 있도록 인센티브를 제공하고, 공법 특성을 고려하여 기존 규제를 개선하려는 취지에서 공표
 - 지속적인 시장 확대를 위해 공공임대주택 발주물량을 점진적으로 확대할 수 있는 기반 마련
- 공공발주기관은 2030년까지 연간 3,000호 발주를 목표로 매년 발주계획을 수립하여 공업화주택 시장의 지속가능성을 보장하고, 민간의 자발적인 투자 및 기술개발 유도



[그림 3-46] 공업화주택 공공발주 물량 확대 목표 (사업계획승인 기준)

- 설계, 감리 등 각종 건설절차에 대해 공업화주택의 특징을 반영할 수 있도록 종합적 제도 개선방안 마련
- 내화기준, 친환경건축 인증제도, 인센티브 규정 등이 공업화주택에도 적용될 수 있도록 개선 및 사업여건 개선
- 모듈 제작 및 현장조립 관련 업종 분류, 실적관리 및 통계처리 체계 마련, 전문가 Pool 운영 등 각종 지원체계 마련

[표 3-31] 장수명주택 관련 인정기준 개정 동향

<장수명주택 관련 인정기준 개정 동향>

- (장수명주택 동향) 내구성 평가 기준이 콘크리트 중심으로 마련되어 있었으나, 최근 철골을 대상으로 평가가 가능하도록 기준 개정
 - 장수명주택 인정기준은 내구성, 가변성, 수리용이성 등으로 평가영역 구성
 - 향후 철골 모듈러주택의 경우 장수명주택 인정 가능
 - 장수명주택 인정에 따른 건축기준 완화 혜택 부여 현실화

■ 국토교통부 『제7차 건설기술진흥기본계획』 (2023.12)

- 디지털 전환(DX)을 통한 스마트건설 확산을 위한 ‘2] 생산시스템의 자동화/모듈화 전략’ 중 OSC 기반 건설산업 제조화 관련 계획 참조

[표 3-32] 제7차 건설기술진흥기본계획 중 관련 내용

- (제도 정비) 건설산업 제조화(현장 타설→공장 생산)에 맞춰 기준 정비
 - 건설기준, 공사비, 발주제도, 내화기준 정비
- (공공발주 확대) 기존 RC 대비 높은 공사비로 인해 OSC 시장이 확대되기 어려운 점을 고려하여 공공에서 마중물 역할 수행
 - 공공주택, 주택외건축, 토목 등 시설물유형별로 추진하되, 용이한 발주 지원
- (인센티브 부여) 부족한 경제성을 보완할 수 있는 유인책 제공
 - 용적률 등 완화, 주택도시기금 지원, 인정제도 개선 등 추진
- (성장기반 마련) 시장 초기 자생력이 부족한 업계의 역량강화 지원
 - 기술개발 지원, 실적관리 강화, 거버넌스 구축, 인증제 도입 등 추진
- (인식 개선) 공공발주기관 중·고층 프로젝트를 중심으로 OSC 주택의 품질·성능 등을 알리기 위한 홍보관 운영, 수요자 니즈 파악 및 추후 사업계획 반영

■ 이재명 정부 「주택공급 확대방안」 발표 (9.7 대책)

- 전체 사업기간 단축과 함께 품질·안전·환경 측면에서 강점이 있는 모듈러 공법을 적용한 주택의 공급 증대 도모
 - 주택공급 추진과제는 부문, 공급방식을 고려하여 제시됨
 - 부문은 공공주도, 공공·민간 협조, 민간주도+공공지원 등으로 구분
 - 공급방식은 수도권 공급, 도심 공급, 민간여건 개선 등으로 유형 구분
 - ‘모듈러 주택 공급 활성화’는 공공·민간 협조 사업으로 민간여건 개선 범주에 포함
- 모듈러주택의 신속한 보급에 대한 장애요인 제거를 위해 특별법 제정 추진
- 모듈러 매입임대주택의 경우 설계와 시공 관련 가이드라인을 먼저 마련하고, 그에 따라 2026년 연내 시범사업 착수하도록 일정 제시

[표 3-33] 9.7 대책 중 모듈러 주택 관련 내용

[모듈러 주택 공급 활성화]			
짧은 공기로 신속한 공급이 가능하면서, 환경·산재·공사품질 등 전통적 공법의 한계를 극복할 수 있는 모듈러 주택 공급 확대			
□ (신축매입) 모듈러 매입임대주택 설계·시공 가이드라인 및 매입가격 산정방안 등 제도기반 마련(2026년 상반기까지) 후 시범사업 추진(2026년 하반기) <ul style="list-style-type: none"> * 품질 확보를 위한 관리기준 및 고가매입 방지 등을 위한 적정 매입가격 산출방식 등 마련 ○ 모듈 운반·설치가 가능한 수도권 부지에, 기존 건축방식(RC) 보다 높은 공사비 수준을 감안하여 저층 주택에 시범사업 추진 <ul style="list-style-type: none"> * 모듈 단가 인하를 위한 대량발주 필요성, 높은 공사비에 따른 매입임대 적정 지원단가 등 검토 			
□ (제도개선) 공사비 부담 완화, 불합리한 규제개선, 인센티브 강화 등 모듈러 공법 보급 확대를 위한 「OSC·모듈러특별법(가칭)」 제정 <ul style="list-style-type: none"> ○ 모듈러 맞춤형 기준 및 품질관리제도 마련, 현장건설 중심의 각종 규제완화 및 인센티브 강화를 통한 고비용 구조 해소등 			
정책과제	조치사항	일 정	소관부서
3. 민간 주택공급 여건 개선 (③ 신속공급 모델을 통한 단기공급 확대)			
모듈러 주택 보급 활성화	OSC·모듈러 특별법 제정안 발의	2026.06	국토교통부 건축정책과, 주택건설공급과
	모듈러 매입임대주택 기반마련 및 시범사업추진	2026.06 ~	국토교통부 주거복지지원과

■ 특별법 추진 배경과 주요 내용

- 모듈러 건축을 총괄 관리하는 체계가 미비하고, 현장건설 중심 각종 규제는 단계적 해소 곤란, 통합적 접근 필요성에 따라 특별법 발의 추진
 - 현재 법령상 ①정의 부재, ②설계·건설기준 등 표준화 부족, ③인증·관리제도 미비, ④분리발주 등 규제로 인한 비용 상승 등 문제
- 모듈러 기준 정립, 인증체계 구축, 인센티브 근거 마련 등을 목표로 설정함
 - 모듈러 공법·재료를 포괄하는 법령상 정의를 마련하고, 표준건설기준, 기술인정방법 등에 관한 근거 규정 신설
 - 모듈러 건축물의 설계, 생산, 시공을 포괄하는 전주기 인증·관리시스템 구축 및 제도 운영기반 마련
 - 모듈러 건축물을 대상으로 분리발주 등 규제완화 특례, 건폐율 등 제한 완화, 재정 보조 등 인센티브 지원 근거 법제화
- ①(추진체계) 국토부장관이 ‘모듈러 건축 활성화 기본계획’ 수립, 모듈러 건축 심의위원회 및 협의체 운영 등
 - 심의위를 통해 기본계획 검토·인증제도 운영 등 중요의결사항 심의, 현행 모듈러 협의체 법제화로 규제개선사항 등 소통 활성화
- ②(표준화) 모듈러 건축 관련 표준기준 마련·보급에 관한 근거 규정
 - 모듈러 활성화 진입장벽이 되는 내화·감리·품질관리 등 별도 기준 마련, 주택평면·설계도서·폼셋·원가 등 공사기준 표준화
- ③(진흥구역) 국토부장관이 ‘모듈러 건축 진흥구역’을 지정·지원
 - 공공발주 물량 확대를 위해 진흥구역 내 실증사업 등을 대상으로 보조금, 기부채납 경감 등 인센티브 제공, 고비용 구조 개선
- ④(공장·건축물 인증) 부재 생산업체에 대한 ‘공장인증’과 건축물의 모듈러 건축기술 적용 여부를 평가하는 ‘건축물인증’ 신설
 - 공공건축물 건축시 ‘공장인증’ 취득 업체로 입찰자격 요건화, 모듈러건축물 인증시 분리발주, 관급자재, 감리 등 규제 특례
 - 표준화를 기반으로 절차를 간소화한 소규모 건축물 인정 방식 도입

3) 관련 제도 현황

- 모듈러 건축·주택과 직접적으로 관련된 현행 제도는 주택법 제51조 등에 의한 공업화주택 인정제도가 있음
- 모듈러 사업 추진 관련 현행 제도의 포괄적인 구성 체계는 공업화주택 관련 제도, 발주제도, 업종·업역 관련 제도로 구분

[표 3-34] 국내 OSC 건축 관련 제도

구분	관련 법령	주요 내용
공업화주택 관련 제도	주택법 제2조	정의
	주택법 제51조	공업화주택의 인정 등
	주택법 제53조	공업화주택의 건설 촉진
	주택건설기준 등에 관한 규정	공업화주택 인정 및 인정취소 등
	주택건설기준 등에 관한 규칙	공업화주택의 성능 및 생산기준 등
	건설기술진흥법 제14조	신기술의 지정·활용 등
	건설기술진흥법 제43조	설계 등의 표준화
	주택법 제33조	주택 설계 및 시공
	주택법 제38조	장수명 주택의 건설기준 및 인증제도 등
	주택법 제43조	주택 감리자 지정 등
	건축사법 제4조	설계 또는 공사감리 등
발주제도	국가계약법 시행령 제2장	추정가격 및 예정가격
	국가계약법 시행령 제14조	공사의 입찰
	국가계약법 시행령 제16조	물품의 제조·구매 및 용역 등의 입찰
	국가계약법 시행령 제6장	대형공사계약
	국가계약법 시행령 제8장	기술제안입찰 등에 의한 계약
	조달청 지침	기술제안입찰 등에 의한 낙찰자결정 세부기준
업종·업역 관련 제도	건설산업기본법 제2조	정의
	건설산업기본법 제8조	건설업의 종류
	건설산업기본법 제9조	건설업 등록 등
	건설산업기본법 시행령 제7조	건설업의 업종/업무분야/업무내용 및 [별표1]
	건설산업기본법 시행령 제13조	건설업의 등록기준 및 [별표2]
	건설산업기본법 제23조	시공능력의 평가 및 공시
	건설산업기본법 제40조	건설기술인의 배치

- 2025년 12월까지 공장인증과 성능인증을 거쳐 인정받은 공업화주택 관련 사항을 인정서 내용을 기준으로 정리하면 아래 표와 같음
 - 엔알비, 자이가이스트는 구조형식, 대상주택 등이 상이한 복수의 인정서를 보유하고 있으며, 일부는 유효기간이 경과함

[표 3-35] 인정 공업화주택 주요 내용(1)

구분	①포스코A&C	②금강공업	③유창이앤씨	
소재지(공장)	인천 연수구(군산)	부산 사하구(진천)	서울 양천구(천안·당진·화성 등)	
공업화인증	INNOHIVE Single Unit Type 1	KMC Type-A	U'Vista M-1 Multi-storey Housing	U'Vista A-2 Single House
주택규모	공동주택(12층)	공동주택(6층)	공동주택(4층 이하)	단독주택(1층)
인증기간	23.05.23~28.05.22	24.08.01~29.07.31	25.07.06~30.07.05	20.07.06.~25.07.05
구조형식	철골구조	철골 라멘조	철골라멘구조	철골 라멘조
인정범위	천장과 벽을 포함한 개별실	천장과 벽을 포함한 개별실	천장과 벽을 포함한 개별실	단독주택
회사실적	서울가양(SH), 웅진백령, 인천신문, 세종UR1,2(LH)	천안두정 (실증사업, LH)	서울 공릉동 기숙사	서울 성내동 대학생 기숙사
구분	④스타코	⑤KC산업	⑥범양플로이	⑦에스와이테크
소재지(공장)	부산 강서구(부산)	경기 여주시	충북 보은군	충남 아산시
공업화인증	CHS 공업화주택	KCPM M-1 Multiplex Housing	범양 모듈러-FLOY	SY 공업화주택_PHS
주택규모	공동주택	공동주택(2층)	공동주택(2층)	공동주택(3층)
인증기간	22.05.16~27.05.15	21.12.15~26.12.14	20.07.06~25.07.05	23.30.16~28.03.15
구조형식	-	철근콘크리트(PC)	라멘조(비내력벽)	철골구조
인정범위	천장과 벽을 포함한 개별실	천장과 벽을 포함한 개별실	천장과 벽을 포함한 개별실	다세대주택
회사실적	천안두정 (실증사업, LH)	케이씨모듈러 여주주택전시관	용인상갈 모듈러주택(2층)	

[표 3-36] 인정 공업화주택 주요 내용(2)

구분	⑧엔알비		⑨플랜엠	⑩대승엔지니어링
소재지 (공장)	전북 군산시		충북 음성군	충남 홍성군
공업화 인증	NRB 모듈러 공업화주택	NRB 라멘조 PC 모듈러 공업화주택	PLANM-H	대승 엔지니어링 -오티움
주택 규모	공동주택(4층 이하)	공동주택(지하 1층, 지상 30층)	공동주택(4층 이하)	공동주택(4층 이하)
인증 기간	24.03.27~29.03.26	25.08.21~30.08.20	24.05.03~29.05.02	24.10.21~29.10.20
구조 형식	철골구조	철근콘크리트조	철골구조	철골구조
인정 범위	연립주택, 다세대주택	아파트	연립주택, 다세대주택	천장과 벽을 포함한 개별실

구분	⑪성지제강	⑫자이가이스트		⑬엠쓰리시스템즈
소재지 (공장)	경기도 이천시	충남 당진시		경기도 이천시
공업화 인증	Sungji steel standard modular	자이가이스트 ADU	자이가이스트 Xi-SM	M3 Multi-Family Modular Housing
주택 규모	공동주택(4층 이하)	단독주택	공동주택(18층 이하)	공동주택(4층 다세대주택)
인증 기간	24.12.13~29.12.12	24.12.26~29.12.25	25.09.08~30.09.07	25.04.28~30.04.27
구조 형식	철골구조	목구조	철골구조	철골구조
인정 범위	연립주택	단독주택	아파트	공동주택(다세대주택)

구분	⑭자연과환경	⑮비콘
소재지 (공장)	충남 공주시	경기도 이천시
공업화 인증	NNE M-1 MODULAR HOUSING	Vicon PC standard modular
주택 규모	공동주택(2층 이하)	공동주택(4층 이하)
인증 기간	25.08.21~30.08.20	25.10.16~30.10.15
구조 형식	프리캐스트 콘크리트구조	PC구조
인정 범위	다세대주택	연립주택

5.4 국내외 적용 현황과 사례

1) 국내 주요 모듈러 주택 사업

- 2012년 4층 모듈러 건축물을 시작으로 현재 22층 모듈러주택 건설사업을 진행 중이며, 민간에서는 12층의 기숙사 건물 준공

[표 3-37] 국내 주요 사업 목록

관련 기관	사업명	층 수	준공연도	비고
SH	청담유토	4	2012년	
SH	공릉동 공공기숙사	4	2014년	
LH	부산용호 행복주택	4	2016년	
포스코 A&C	평창 미디어레지던스 호텔	4	2017년	
SH	가양동 실증단지	6	2017년	
LH	천안두정 행복주택	6	2019년	
LH	웅진백령 임대주택	4	2019년	
LH	세종 사랑의집	2	2020년	
LH	세종6-3 UR1,2BL	7	2024년	
LH	인천 강화신문	4	2025년	
포스코 A&C	광양 기가타운	12	2021년	
GH	용인영덕	13	2023년	

[표 3-38] 국내 주요 모듈러주택 건설사업 사례

용인영덕 경기행복주택 (GH)	
<ul style="list-style-type: none"> • 2023년 준공 • 106 세대 • 13층 1개동 • 철골 모듈러 • 실증사업 	

2) 국내 모듈러 건축의 기술 현황 및 사업 여건

- K-모듈러 건축에 대해 기술적 사항과 사업 여건을 중심으로 장점과 약점을 정리하여 실태를 파악함
 - 장점에는 ①수요 대비 공급이 부족한 지구에 대응이 가능한 점, ②설계와 제작에 있어 유연성을 제공하는 점, ③재료 수급, 운송 및 양중, 건설 경험을 바탕으로 하는 안정적 공급망 등이 있음
 - 약점에는 ①기존 현장작업 중심의 제도의 경직성이 여전한 점, ②다양한 사업과 현장에 대한 경험이 부족한 점, ③시장규모가 작아 규모의 경제 확보, 설비 투자 등이 어려운 점 등이 있음

[표 3-39] 국내 모듈러 건축 현황

구분	현황	내용
장점	신속한 공급	• 설계 → 자재공급 → 공장생산 → 모듈 운송 → 현장 조립 과정에서 세계적 수준의 공사기간 단축 가능
	유연성	• 사용자 니즈에 맞춘 설계의 유연성 • 다양한 모듈의 크기, 용도를 고려한 공장생산
	안정적 공급망	• 세계적 수준의 철강사, 다양한 건축마감재 등 안정적 자재 공급 가능 • 운송 및 현장 시공 장비(크레인 등) 적기 공급 가능 • 시공기술 측면에서 글로벌 건설사(해외진출 경험 보유)와 협업 하에 시장 진출
약점	제도적 미흡	• 현장 공법 위주의 현행 건축 관련 법제도 • 비합리적인 내화규제
	성공 경험 부족	• 기술적 측면에서 고층, 대공간, 디자인 등 경험 부족 • 공기단축, 안전확보, 제로카본 등 사회적 편익에 대한 인센티브 부족
	작은 시장 규모	• 생산자동화 등 과감한 투자의 걸림돌 • 규모의 경제가 구현되지 않아 경제성 확보 어려움 • 공공주택 일정 물량 배정, 해외 수출용 물량, 재난구호용 주택 비축 등 돌파구 필요 • 표준형 주택 모듈 적용을 통한 대량생산 체계 유도 및 물품 구매 방식 활용 필요

3) 국외 주요 국가별 OSC 건축 현황

■ 영국 등 유럽 현황

- 유럽에서 MMC 시장은 2020년 500억 달러 수준으로 2027년에는 800억 달러 이상이 될 것으로 예측
 - 영국은 전통적 방식을 대체할 수 있는 공법을 MMC의 7개 범주로 관리하고, 정부 주도로 다양한 정책 적극 시행
 - 2022/23년 기간에 전체의 1/3인 6,667호의 공공주택이 MMC 방식으로 착공되었고, Category-2 비중(93%)이 가장 높음

■ 일본 프리패브 주택 건설 현황

- 일본에서 프리패브 주택(プレハブ住宅)은 주택의 주요 구조부 벽, 기둥, 바닥, 지붕 또는 계단 등의 부재를 기계적 방법에 따라 대량으로 공장 생산하고, 현장에서 이 부재들로 조립 건축을 하는 주택을 의미함
- 국토교통성의 최근 10년 연차별 관련 통계를 활용하여 프리패브 방식으로 건설(착공 기준)하는 주택의 비율을 세대수(호)를 기준으로 계산할 수 있음
- 일본은 연간 12~15만 세대의 프리패브 주택을 건설하고 있으며, 전체 주택에서 최근 5년 기준 13.1%, 10년 기준 13.9%의 비중 차지

[표 3-40] 최근 일본 프리패브 주택의 비율

년 도	총괄 호수			프리패브주택			프리패브 주택 비율(%)
	전체 호수	임대주택	분양주택	전체 호수	임대주택	분양주택	
2014년	892,261	362,191	237,428	140,501	85,544	6,291	15.3%
2015년	909,299	378,718	241,201	143,549	91,107	6,011	15.7%
2016년	967,237	418,543	250,532	148,528	95,677	5,623	15.1%
2017년	964,641	419,397	255,191	139,012	89,257	4,938	14.0%
2018년	942,370	396,404	255,263	131,496	81,873	5,263	13.4%
2019년	905,123	342,289	267,696	127,131	78,435	5,821	13.8%
2020년	815,340	306,753	240,268	110,107	66,675	4,301	13.0%
2021년	856,484	321,376	243,944	113,474	70,582	4,401	13.3%
2022년	859,529	345,080	255,487	112,528	73,476	4,677	13.0%
2023년	819,623	343,894	246,299	103,403	68,873	5,746	12.6%
평 균	893,191	363,465	249,331	126,973	80,150	5,307	13.9%

■ 싱가포르의 DfMA 주택 현황

- 싱가포르 BCA는 DfMA 방식이 적용된 건축물의 비율을 총연면적(GFA)을 기준으로 계산하여 DfMA Adoption Rate(DAR)을 지표로 관리함
- PC, PPVC, PBU, MET, Prefabricated MEP, Structural Steel 등 DfMA 적용 비율의 목표수치는 2025년 기준으로 70%이며, 최근까지의 연도별 실적은 다음과 같음

[표 3-41] 싱가포르 DAR 수치 추이

DfMA 적용 실적 (성과)								ITM 목표
2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년	2023년	2024년	2025년
10.0%	19.2%	22.1%	31.1%	39.1%	44.0%	62%	68%	70.0%

[싱가포르 DfMA 관련 주요 사항]

- DfMA는 제조·조립을 위한 설계(Design for Manufacturing and Assembly)로서 영국, 싱가포르, 홍콩, 미국 등 해외 주요국에서 건축공사 패러다임 변화를 위해 적극적으로 활용하는 방식
- 싱가포르의 경우 정책 수립 주체로서 BCA(건설청), 정책 실행 주체로서 HDB(주택개발청)이 적극 활용
- 싱가포르 BCA에서 제시한 DfMA는 PC(Precast Concrete), PPVC(Prefabricated Prefinished Volumetric Construction), PBU(Prefabricated Bathroom Units), MET(Mass Engineered Timber), Prefabricated MEP, Structural Steel 분야 등에 걸쳐 개별 구성요소에서부터 통합된 조립품에 이르기까지 다양한 기술과 방법론 포함
- 싱가포르는 공공·민간 주택 건설 시장의 약 70%를 DfMA 방식으로 공급하는 것이 목표임
- 국가가 토지를 소유하고, PPVC(조립식 사전가마 제작) 등 모듈러 공법 활용을 전제로 토지 판매
- DfMA 적용에 따라 용적률 상향이나 펀드를 통한 지원 등 인센티브 제공

[싱가포르 BCA DfMA 가이드라인의 종류와 내용]

구 분	주요 내용
APCS(Advanced Precast Concrete System)	<ul style="list-style-type: none"> • PC(Precast Concrete)의 구성요소 • 3S 원칙(standardization, simplicity, single)에 따르는 PC 설계, 제작, 운반, 조립에 대한 가이드
MET(Mass Engineered Timber)	<ul style="list-style-type: none"> • 목재 건축자재와 관련한 가이드
PPVC(Prefabricated Prefinished Volumetric Construction)	<ul style="list-style-type: none"> • 독립형 3차원 모듈을 제작하기 위한 가이드 • 공장에서 제작된 모듈을 현장으로 운반하고 설치하기 위한 시공 방법에 대한 가이드
PBU(Prefabricated Bathroom Units)	<ul style="list-style-type: none"> • 사전 조립식 욕실 유닛의 생산 및 설치와 관련한 가이드
Prefabricated MEP System	<ul style="list-style-type: none"> • 조립식 기계/전기/배관 시스템의 생산 및 조립을 위한 가이드
Structural Steel	<ul style="list-style-type: none"> • 철골부재 접합부 설계와 관련한 가이드

4) 국외 모듈러 건축 주요 사례

- 유럽, 호주, 미국 등에서 2016년도 이후로 20층 이상의 모듈러 시공사례가 증가하고 있으며, 유럽과 아시아에서 최고 50층 이상의 고층 모듈러를 시공한 사례가 있음
- 싱가포르에서는 2023년 PC 모듈러를 활용한 56층 공동주택이 준공되는 등 초고층 건축물 다수 시공





[표 3-42] 국외 주요 모듈러 건축 사례

국 가	건물명	층수	준공연도	비고
영국	Murray Groove, Hackney	5층	1999년	
네덜란드	Utrecht University Space Boxes	3층	2005년	
영국	Tower Hamlets Community Housing	5층	2006년	
영국	Paragon, Brentford	17층	2007년	
영국	Wolverhampton University	24층	2009년	
영국	Victoria Hall, Wembley	17층	2011년	
영국	Felda House, Wembley	19층	2015년	
영국	Chapter Lewisham, London	12층	2016년	
호주	La Trobe Tower	44층	2016년	
미국	461 Dean Street-B2 Project	32층	2016년	
영국	Apex House	29층	2017년	
싱가포르	Clement Canopy	40층	2019년	
영국	Croydon Modular Tower-1	44/38층	2021년	
영국	Croydon Modular Tower-2	50/35층	2023년	
싱가포르	Avenue South Residence	56층	2023년	

■ 해외 모듈러 활성화 정책

- 모듈러 품질 및 성능 인증 취득 시 건축기준 완화, 행정절차 간소화, 감리/설계 간소화, 지원금 지급, 세금 공제 등 인센티브 지급
- 미국, 일본, 싱가포르, 캐나다, 홍콩 등 각 국가는 새로운 생산체계의 확대 적용을 위해 직접지원 방식과 간접지원 방식 병행

[표 3-43] 국외 모듈러 건축 주요 사례

사업명	Croydon Tower-1 (Vision Modular)	461 Dean (Full Stack Modular)	La Trobe Tower (Hickory)	Croydon Tower-1 (Vision Modular)
소재국	영국	미국	호주	영국
층수	44층	32층	44층	50층
관련 사진				
횡력저항 시스템	RC 코어(선행)	철골 메가 브레이스	RC Wall(수행)	RC 코어(선행)
모듈 유형	Framed Modules	Framed Modules	Framed Modules + Prefabricated Panels	Framed Modules

Croydon Tower-2 (영국, College Road)

- 2023년 준공
- 937 세대
- 1,725개 모듈
- 50/35층 2개동
- 163m 높이
- 철골 모듈러



Avenue South Residence (싱가포르)

- 2023년 준공
- 1,074 세대
- 3,034개 모듈
- 56층 2개동
- 192m 높이
- PC 모듈러



5.5 OSC 적용의 장애요인

■ 현황 총괄

- 공장제작 건축의 다양한 장점에도 불구하고 국내에서 본격적인 시장 활성화 단계에 진입하지 못하고 있음
 - 시장 확대에 영향을 미치는 장애물을 파악하고, 다양한 측면에서 활성화를 위한 돌파구 마련이 요구됨

■ 기술적 한계 : 모듈러 기술개발 및 검증 필요

- 중고층화 건축에 대해 구조 부재 내화, 성능 기준 확보·검증 필요
 - 공장 자동화 및 생산성 향상 필요
 - 모듈러 설계, 연구 등 전문 인력 부족

■ 협소한 시장 환경 : 발주 물량과 공장의 연속성에 대한 한계

- 공공 발주기관에 집중된 프로젝트 발주 및 실증사업
 - 설계, 시공 전과정을 관리하는 기업, 인력 및 협업 시스템 부재
 - 하도급 중심 및 한시적인 모듈러 사업 진행

■ 모듈러 관련 제도 미비 : 모듈러 산업 확장을 위한 제도 정비 필요

- 국가계약법, 건설기술 진흥법, 습식공법 중심 발주 및 계약 방식 재검토 필요
 - 주택법 ‘공업화주택 인정제도’가 유일 관련 법규로 제도 기반 미비
 - 모듈러 설계, 감리, 공장 감독, 시공 등에 대한 세부기준 미흡
 - 전기, 정보통신, 소방공사 분리 발주, 공사용자재 직접구매 등 적용 불합리

■ 발주기관 리스크 : 초기투자비 과다에 따른 발주기관 관심 저조

- 발주기관 프로세스 부재, 분업화된 조직
 - 기존 공법 대비 높은 모듈러 건설 공사비 고려 인센티브 요구
 - 공공기관 내 모듈러 관련 지식·이해 미흡, 요구성능 기준 부족
 - 발주기관 담당자, 감독관의 빈번한 인사 이동

제4장 스마트 시공기술 기반 생산시스템 혁신 전략

1. LH 내부 생산체계 혁신 추진 현황

1.1 총괄 실적

- 4개 스마트 시공기술별로 내외부 여건, 기술기준, LH의 역할 등을 종합적으로 정리하면 [표 4-1]과 같음

[표 4-1] 스마트 시공기술별 현황

구 분		건설로봇					3D 프린팅					자동화장비					OSC(주거)						
성숙도 및 여건 ^{주)}	외부	하			중		상			하			중		상		하			중		상	
	내부	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
표준시방서 현황		KCS 10 70 05 (2023.12.27. 제정)					-					KCS 10 70 10 (2023.01.19. 제정) KCS 10 70 20 (2023.12.16. 제정)					KCS 10 70 50 (2023.12.27. 제정) (OSC 일반)						
공사시방서 현황		-					-					특기시방서 (2020.12.21. 제정)					LHCS 41 58 (2021.08 제정) (모듈러주택 대상)						
발전방향		협동로봇, 원격제어, 반자동화, 완전자동화					신재료/장비 개발, 적용 사례 확대					가이던스, 반자동화, 완전자동화, 집단통제					표준화, 고성능, 제품화, 대량생산						
요구 기반		기술적 검증, 제도적 환경 조성					기술적 검증, 제도적 환경 조성					활용 비율 확대, 원가산정 등 기준					특별법 시행, 인센티브 제공						
LH 역할	기본 역할	• 기술 적용 지원					• 기술 적용 주관					• 기술 적용 지원					• 기술 적용 주관						
	활용	• (단기) 적용 권고 • (장기) 자율 선택 - 일부 공중 의무화					• (장기) 소형건목물 시범사업 진행					• (단기) 적용 권고 • (장기) 자율 선택					• OSC 적용을 전제로 입찰(사업자 공모) - 제한적 의무화						
	기반	• 각종 기준 마련 • 기술거래 마켓 운영					• 각종 기준 마련					• 각종 기준 마련					• 각종 기준 마련						

주) 성숙도 및 여건 평가 기준

- 외부 : 기술 자체 성숙도, 관련 제도, 업계 관심도 등 여건을 종합적으로 판단한 것으로 1(하)~5(상) 사이에서 선택
- 내부 : 적용 수준으로 1(시범·예비), 2(전략수립·준비), 3(확산·반복적용), 4(성숙·관리), 5(고도화·최적화) 등에서 선택

1.2 기술별 내부 추진 실적

1) 건설로봇 검토 실적

■ 주요 기술 시연회 개최

- 건설로봇과 관련하여 내부적으로 주요 기술의 시연회를 개최하고, 해당 시점에서의 개발된 로봇의 성능을 검토한 바 있음
- 건설인력 부족 및 고령화 등 건설산업이 직면한 인력의 한계를 극복하기 위한 대안으로 건설로봇의 가능성을 확인하고, 로봇수요에 대한 공공의 시그널을 업계에 전달하는 등 마중물 역할 실현하기 위해 시연회를 마련함
- 총 5가지의 건설로봇에 대해 현장에서 직접 기능을 확인할 수 있도록 진행

[표 4-2] 시연·전시 자동화 로봇 품목

로봇구분	① 외벽도장	② 실내도장	③ 바닥미장	④ 드릴링	⑤ 웨어러블
개발사 (공동개발)	H사 (J사)	M사	H사 (R사)	H사	A사
장 점	안전, 균일품질, 시공속도	균일품질	균일품질	균일품질, 시공속도	안전
비 고	시연	시연	전시	전시	시연

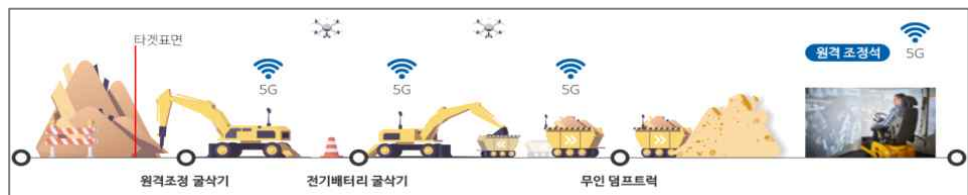
■ 건설로봇 도입 전략 검토

- 인력구조 변화, 높은 산업재해, 낮은 생산성 등 건설산업 현안에 선제적으로 대응하고, 산업 패러다임 전환을 주도하기 위해 건설로봇 현황을 검토하고 도입 전략을 수립함
- “스마트 건설기술 활성화 및 로봇 산업 생태계 기반 조성”을 목표로 설정하고, ①건설로봇 기술발굴, ②기술개발 실증지원, ③공공주도 기반조성 등 3대 방향에 따라 세부추진 방안을 마련함
 - 기술 발굴 영역에 있어서는 LH 현장에 적용가능한 로봇 기술 발굴, LH형 로봇 개발 방안 마련 등의 과제 설정
 - 지원 영역에서는 로봇 산업 육성을 위한 기술개발 지원, 로봇 기술 실증 및 인증 지원, 스마트 건설기술 적용 평가배점 신설 등이 검토됨
 - 기타 민간·공공 상생협력 관계 구축, 생태계 기반 조성 방안 등이 논의됨

2) 자동화장비 시범사업 추진

■ 추진 배경 및 범위

- 국토교통부는 건설산업의 생산체계를 혁신하고 안전사고를 예방하기 위해 건설현장에 첨단기술을 융·복합한 스마트 건설 자동화 도입을 추진함
- 그 일환으로 스마트시티 국가시범도시로 지정된 세종시 5-1생활권 부지조성공사에서 스마트건설자동화 시범사업을 진행함



[그림 4-1] 자동화 시범사업 진행 범위

- 시범사업은 ①사면절토, ②관로터파기, ③토공이동 등 3개 토공작업을 대상으로 함
 - 각 구간에서 전기 굴착기, 디젤 굴착기, 전기 자율주행 운반장비에 대해 일반 방법과 MG/MC 방법을 적용한 후, 양자에 대하여 품질을 검증하고 생산성을 비교함
 - 작업종료 후 GNSS 측량을 통한 품질검증, 건설정보 통합관계시스템 데이터를 통한 생산성 검증 진행

■ 실증 성과

① 사면절토 실증 결과

- 생산성은 표준품셈 대비 98.3%~115.3% 수준이고, 품질은 0.052m ~ 0.070m 수준으로 시공허용오차 기준인 $\pm 0.100m$ 충족

② 관로터파기 실증 결과

- 생산성은 표준품셈 대비 111.90% ~ 119.98% 수준이고 품질은 MG/MC유인이 0.028m로 허용오차범위 0.030m 이내로 나타남

③ 운반장비 실증 종합결과

- 표준품셈 대비 다소 낮게 나타났으나, 무인운반장치의 적재용량 차이와 덤프 운전 기사 미투입 등을 고려할 때 향후 기술 발전에 따른 효율 증가를 기대할 수 있음

3) OSC 공법 적용 실적

- OSC 주택은 사업계획 승인 기준 총 2,847세대를 공급하였고, 그 중 1,058호 완료
 - 모듈러공법이 2,583호(단독주택 포함), 부재형 PC주택 264호

[표 4-3] LH 공급 OSC 주택 현황

(단위 : 호) (사업계획 승인 기준)

구 분	년도	2020년까지	2021년	2022년	2023년	2024년	2025년
총 괄		534	82	442	0	831	958
공법 구분	모듈러주택	352	0	442	0	831	958
	PC주택	182	82	0	0		
Category1	강재모듈러	3		416		450	272
Category1	PC모듈러					381	686
Category3	부재형PC	182	82				
Category1	기타(단독)			26			
부산용호		14					
천안두경		40					
웅진-마을정비		80					
웅진-공공실버		72					
세종사랑		16					
강화신문		130					
세종 UR1				200			
세종 UR2				216			
구례 귀농귀촌				26			
의왕초평 A4						381	
세종5-1 L5						450	
시흥거모 A-1							272
고흥도양 1							150
완도중도 1							90
안산신길2 A-5							446
김포한강 Aa-12		146 (PC)					
아산탕정2 A-15		36 (PC)					
평택고덕 A-58			82 (PC)				

- NH는 개별 공공발주기관 중 가장 많은 OSC 주택 건설사업을 진행하였으며, 해당 사업 중 준공한 지구와 진행 중인 주요 지구는 아래 표와 같음

[표 4-4] 모듈러 주택사업 준공 지구

구 분	부산용호	천안두정	용진백령
세대수(층수)	행복 14호(4층)	행복 40호(6층)	영구·국민 152호(4층)
사업기간	'16.12~'17.07	'18.05~'19.07	'19.08~'20.06
현황사진			
구 분	세종사랑의집	세종 6-3 UR1,2	인천신문
세대수(층수)	영구 16호(2층)	통임 416호(7층)	국민·영구·행복130호(4층)
사업기간	'20.01~'20.08	'22.09~'24.12	'23.07~'25.02
현황사진			

[표 4-5] 모듈러 주택사업 진행 지구

구 분	세종 5-1 L5	의왕초평 A4	안산신길2 A-5
세대수(층수)	통임 450호(12층)	통임 381호(22층)	통임 442호(20층)
사업진행	착공 (2024.12)	착공 (2024.12)	사업자 선정
현황사진			
구 분	시흥거모 A-1	고흥도양	완도중도
세대수(층수)	통임 272호(14층)	통임 150호(15층)	통임 90호(14층)
사업진행	착공 예정 (2026.09)	착공 예정 (2026.05)	착공 예정 (2026.05)
현황사진			

2. 시공단계 작업별 적용가능성 검토

2.1 검토 기준 확인

- 실제 건설현장에서 건설자동화가 부진한 이유는 동화 기술이 어려워 고가의 자동화 장비가 필요하다는 점과 현장의 공정이 수작업 중심으로 되어 있어 자동화를 통해 경제적 이득을 얻기 쉽지 않다는 점을 들 수 있음
- 개별 건설현장의 특성에 적합한 항목별 기준치를 설정하고 건설자동화 고려 요소에 대한 분석을 통해 건설자동화가 요구되는 공정을 선정함으로써 건설자동화의 효과를 극대화할 수 있을 것임
- 건설자동화 적용 시 고려사항 검토를 통해 평가 항목을 정리할 수 있음
 - 안전성, 생산성, 품질, 경제성, 인적요인 등을 고려하여 자동화를 기획할 수 있음

[표 4-6] 건설자동화 적용 시 주요 고려사항

요소 영역	세부 고려 요소
안전성	건강에 유해한 작업
	물리적인 위험이 있는 작업
생산성	열악한 작업환경 하에서 작업
	단순하고 반복적인 작업
	자동화를 통한 작업 프로세스의 단축 가능
품질	품질에 대한 요구 성능 달성 가능
	일관된 정밀성 및 정확성의 확보 가능
경제성	작업시간의 단축 가능
	노무인력의 절감 가능
	재해사고율의 감소를 통한 비용절감 가능
인적요인	숙련된 기능 인력 부족
	육체적 피로가 심한 작업
	더럽고 불쾌한 작업

- 자동화 장비 도입 영향요인(이치주 등, 2013)은 다음과 같이 정리할 수 있음
 - 전체 요인들을 기술요인, 비기술요인 영역에 포함시킬 수 있음
 - 기술요인에는 사용성, 기능성 등이 포함되, 비기술요인에는 비용, 공사특징, 조직 등의 하위분류가 해당됨

[표 4-7] 건설자동화 장비 도입 시 영향요인

상 위	분 류	하위요인	주요 내용
기술 요인	사용성	생산성	작업시간의 단축, 작업인원의 감소
		안전성	위험도, 육체·정신적 피로도, 불쾌감
		공사품질	작업의 정확성과 일관성
		사용 용이성	조작과 작동의 용이성, 학습 난이도
	기능성	성능	작업 수행능력
		유연성	공사현장과 건물 특징의 대처 능력
		확장성	기능의 추가·변경, 인터페이스 변경
비기술 요인	비용	초기투자비	구입비와 학습·교육비
		유지관리비	생애주기 동안 발생한 고장의 정비비
	공사특징 조직	적용 작업의 특징	작업난이도, 빈도, 유사작업 가능성
		구성원 인식·의지	구성원의 인식 수준과 도입 의지
		운전자 수용태도	변화된 작업 방법의 수용태도
		개발자·사용자 사전관계	개발자와 도입 조직의 사전 관계
		과거 도입경험	과거 도입 경험

- 유정호 등(2025)은 해당 작업의 로봇화가 프로젝트 성과에 미치는 영향을 의미하는 '로봇화 중요도'와 해당 작업에 대한 로봇화의 용이성을 의미하는 '로봇화 적합성'을 기준으로 공동주택 건설공사에 있어 건설로봇 개발의 우선순위를 평가함

[표 4-8] 로봇 개발 우선순위 선정 기준 사례

영역	순번	평가항목	항목별 내용
로봇화 중요도	1	공사기간 단축 기여도	로봇화가 작업속도를 높이고, 전체 공사기간 단축에 기여하는 정도
	2	원가절감 효과	로봇화가 인건비 절감, 자재 낭비 감소, 공정 최적화를 통해 전체 건설 비용 절감에 기여하는 정도
	3	품질개선 효과	로봇화가 작업 품질의 균일성과 정밀도 향상에 기여하는 정도
	4	안전개선 효과	로봇의 도입이 작업자의 안전을 향상시키고 사고 위험을 줄이는 효과
	5	인력 대체 효과	로봇이 기존 작업 인력을 얼마나 대체할 수 있는지 여부
로봇화 적합성	1	작업 동작의 복잡성	해당 작업이 기계적으로 반복될 수 있는지, 복잡한 조작이 필요한지 여부
	2	작업의 요구 정밀도	해당 작업이 높은 정밀도를 요구하는지 여부
	3	작업 대상물의 취급 용이성	해당 작업의 자재를 로봇이 쉽게 다룰 수 있는 정도
	4	작업의 공간적 제약	로봇이 작업할 공간이 충분한지 여부
	5	작업의 변동성	작업이 일정한지 또는 중간에 추가적인 변형 작업이 필요한지 여부

2.2 공종 특성에 따른 적용가능성 예비 검토

■ 건설로봇 요구 우선순위 검토

- 유정호 등(2025)은 로봇화 중요도와 로봇화 적합성을 기준으로 공동주택 작업에 있어 건설로봇 개발의 우선순위를 평가함
- 그 결과 [표 4-9]와 같이 점수가 상대적으로 우수한 ⑩벽체(합지) 보드류 시공, ⑨벽체 단열재 시공, ⑩천정 석고보드 시공, ⑫경량벽체 보드류 시공, ⑭바닥재 시공, ②AL폼 해체 및 운반, ⑮벽체 미장공사, ⑧시멘트 벽돌 쌓기, ⑳바닥 타일공사 등을 공동주택 건설공사에서 로봇 개발의 우선 작업으로 선정함

■ 노무비에 근거한 인력 대체 간접 효과 검토

- 공종(작업)판단 기준은 정량적, 정성적안 지표를 도입하여 진행하는 경우에도 데이터가 충분하지 않을 수 있음
- 공동주택 건설현장의 내역서를 바탕으로 노무자 대체에 따른 효과가 클 것으로 예상되는 공종과 작업에 있어서의 우선순위를 파악함
- A현장의 건축도면 내역을 바탕으로 단지 내 여러 시설물 가운데 ‘아파트’로 한정하여 공종별 금액 가운데 노무비의 비율(A)와 아파트에 투입되는 전체 노무비에 대해 해당 공종(작업)의 노무비 비중(B)를 구함
- 노무비 비율(A)과 노무비 비중(B)을 바탕으로 실제 인력 대신 로봇 등 대체방식을 적용하는 경우 상대적으로 효과가 클 것으로 예상되는 공종을 검토함
- 검토 결과 인력 대체 효과가 높을 것으로 판단되는 공종에는 거푸집(알폼)공사, 가설공사, 미장공사, 목공사, 돌공사, 콘크리트공사, 도장공사, 타일공사 등이 있었음
- 노무비 비율이 높은 순위에 있는 공종에 대해 보다 상세하게 많은 노무비가 소요되는 작업을 추가로 확인할 수 있음
 - 가설공사의 경우 먹메김(골조, 마감)과 건축물 현장정리에 전체의 60%에 가까운 노무비가 사용되었고, 도장공사의 경우 다채무늬도료(벽, 천장)과 외부수성페인트에서 전체 도장공사 노무비의 40%, 30%가 각각 사용됨

[표 4-9] 공동주택 건설공사 작업별 로봇화 우선순위 도출 결과

구 분	로봇화 중요도	로봇화 적합성	평 균	순 위
1. 벽체 철근 배근	0.83	0.38	0.61	12
2. AI폼 해체 및 운반	0.84	0.69	0.76	6
3. AI폼 조립 및 설치	0.82	0.35	0.58	14
4. 슬라브 철근 배근	0.75	0.36	0.55	18
5. 먹메김	0.33	0.74	0.53	19
6. 발코니 난간 설치	0.41	0.51	0.46	22
7. 발코니 샷시 설치	0.49	0.39	0.44	24
8. 시멘트 벽돌 쌓기	0.77	0.72	0.75	8
9. 벽체 단열재 설치	0.78	0.86	0.82	2
10. 벽체(합지) 보드류 시공	0.84	0.87	0.86	1
11. 경량철골 벽체를 시공	0.68	0.49	0.59	13
12. 경량벽체 보드류 시공	0.77	0.79	0.78	4
13. 창호틀 설치	0.60	0.42	0.51	20
14. 창호주변 사춤	0.70	0.63	0.67	10
15. 벽체 미장공사	0.79	0.73	0.76	7
16. 방수공사	0.63	0.35	0.49	21
17. 벽체 타일공사	0.66	0.57	0.61	11
18. 경량철골 천정틀 시공	0.69	0.43	0.56	17
19. 천정 석고보드 시공	0.82	0.76	0.79	3
20. 바닥 타일시공	0.71	0.76	0.73	9
21. 가구공사	0.51	0.39	0.45	23
22. 천정도배공사	0.64	0.50	0.57	16
23. 벽체 도배공사	0.66	0.51	0.58	15
24. 바닥재 시공	0.72	0.82	0.77	5

자료 : 유정호 등(2025)

[표 4-10] 공종별 인력 대체 효과 검토

순위	공 종	노무비 비율(A)	노무비 비중(B)	대체 효과		비 고
				(AxB=C)	순위	
1	토공사	86.25%	0.0%	1.73		
2	도장공사	85.42%	3.9%	334.56	7	도장공사
3	가설공사	84.90%	11.0%	937.54	2	가설공사
4	수장공사	77.34%	3.0%	232.77		
5	(구조체)거푸집(알폼)공사	76.61%	12.7%	972.50	1	거푸집공사
6	창호환기공사	70.85%	0.0%	3.47		
7	미장공사	67.97%	6.3%	428.09	3	미장공사
8	지붕 및 흡통공사	67.29%	0.3%	22.14		
9	조적공사	65.58%	4.4%	290.49		
10	타일공사	63.91%	5.0%	318.72	8	타일공사
11	도배공사	63.81%	2.2%	143.55		
12	잡공사	62.12%	1.3%	83.01		
13	돌공사	57.69%	6.4%	367.13	5	돌공사
14	목공사	56.54%	7.0%	397.27	4	목공사
15	방수.방습공사	52.39%	1.8%	93.35		
16	(구조체)갯폼 관련 공사	48.40%	2.3%	109.97		
17	유리공사	41.10%	2.0%	83.57		
18	단열공사	35.27%	3.9%	138.12		
19	금속공사	33.09%	0.6%	19.25		
20	(구조체)철근공사	31.78%	5.8%	184.40		
21	(구조체)콘크리트공사	30.24%	12.0%	363.21	6	콘크리트공사
22	창호공사(1)	29.47%	3.8%	110.54		
23	승강기설치공사	24.31%	1.5%	37.44		
24	지정공사	14.57%	1.0%	14.50		
25	창호공사(2)	14.30%	1.3%	18.40		
26	가구공사	7.21%	0.3%	1.99		
27	현장감독차량유류대	0.00%	0.0%	0.00		

2.3 작업별 대체 기술 검토

- 토목과 건축 현장 내에서 진행되는 공종과 작업에 대해 4개 스마트 시공기술의 적용 여부와 활용방식을 정리함

[표 4-11] 토목 현장 작업 대체 기술 검토

시설분류(대)	대공종		중공종			적용가능성						
01	공통시설	Z1	공통가설공사	Z1	공통가설	주요자재						
				Z2		가설건물(발주자용)	●	OSC				
				Z3		가설건물(도급자용)	●	OSC				
				Z4		편의부대시설	●	OSC				
				Z5		공사용설비						
				Z6		기타						
		Z2	직접가설공사	Z7	직접가설	현장시설물						
		Z3	공통장비	Z8	공통장비	공통장비비						
		Z4	현장관리비	Z9	현장관리비	환경보전비						
				ZA		기타						
		Z5	품질관리비	ZB	품질관리비	품질관리비						
						ZC	토목지장물철거	●	로봇, MG/MC			
						ZD	건축지장물철거	●	로봇, MG/MC			
						ZF	벌개제근					
						ZG	폐공					
ZH	분뇨수거											
Z6	지장물철거공사	ZI	지장물철거공	석면건축자해체	●	로봇, MG/MC						
				ZJ	기타							
				02	토공시설	A1	단지토공(블록)	단지토공(블록)	A1	표토제거	●	MG/MC
									A2	비옥토		
A3	흙깎기	●	MG/MC									
A4	발파암유용											
A5	전석처리											
A6	터파기	●	MG/MC									
A7	흙쌓기	●	MG/MC									
A8	되메우기	●	MG/MC									
A9	흙운반	●	MG/MC									
AA	연약지반											
AB	비탈면보강공											
AC	비탈면보호공											
AD	비탈면고르기											
AE	부대공											
AF	기타											
A2	단지토공(도로)	AK	단지토공(도로)	표토제거	●	MG/MC						
				AH	비옥토							
				AI	흙깎기	●	MG/MC					
				AJ	발파암유용							
				AK	전석처리							
				AL	터파기	●	MG/MC					
				AM	흙쌓기	●	MG/MC					
				AN	되메우기	●	MG/MC					

시설분류(대)	대공종		중공종		적용가능성			
			AO		흙운반	●	MG/MC	
			AP		연약지반			
			AQ		비탈면보강공			
			AR		비탈면보호공			
			AS		비탈면고르기			
			AT		부대공			
			AU		기타			
			03		도로시설	B1	도로토공	B1
B2	되메우기	●		MG/MC				
B3	잔토처리	●		MG/MC				
B2	포장공	B4		포장공		시멘트콘크리트포장	●	MG/MC
		B5				아스팔트콘크리트포장	●	MG/MC
		B6				축구		
		B7				보도 및 기타포장	●	MG/MC
		B8				경계블록설치		
		B9				기타		
B3	교통시설공	교통시설공		BA	도로안내시설			
				BB	노면표시			
				BC	도로안전시설			
B4	도로부대공	도로부대공		BD	임시교통통제시설			
				BE	부대시설			
				BF	주요자재			
				BG	기타			
04	우수시설	C1	우수토공	C1	우수토공	터파기	●	MG/MC
				C2		되메우기	●	MG/MC
				C3		잔토처리	●	MG/MC
				C4		기타		
	C2	우수공	우수공	C5	우수관로(본관)			
				C6	우수관로(연결관)			
				C7	관기초			
				C8	우수맨홀			
				C9	집수시설			
				CA	축구			
				CB	우수암거			
				CC	초기우수처리시설			
	C3	우수부대공	우수부대공	CD	부대공			
				CE	비계 및 동바리			
				CF	주요자재			
CG				기타				
05	우수시설	D1	우수토공	D1	우수토공	터파기	●	MG/MC
				D2		되메우기	●	MG/MC
				D3		잔토처리	●	MG/MC
				D4		기타		
	D2	우수공	우수공	D5	우수관로(본관)			
				D6	우수관로(연결관)			
				D7	관기초			
				D8	우수맨홀			
				D9	우수맨홀펌프장			
	D3	우수부대공	DA	우수부대공	부대공			

시설분류(대)		대공종		중공종			적용가능성	
06	상수시설	E1	상수토공	DB	상수토공	주요자재		
				DC		기타		
				E1		터파기		
				E2		되메우기		
				E3		잔토처리		
		E4	기타					
		E2	상수공	E5	상수공	상수관로(직관 및 이형관)		
				E6		상수관로(분기관)		
				E7		관접합		
				E8		관기초		
				E9		밸브		
				EA		유량계		
				EB		소화전		
		EC	변실					
		E3	상수부대공	ED	상수부대공	부대공		
EE	상수시험							
EF	주요자재							
EG	기타							
09	교량시설	I1	교량토공	I1	교량토공	터파기	●	MG/MC
				I2		되메우기	●	MG/MC
				I3		잔토처리	●	MG/MC
				I4		기타		
		I2	교량하부공	I5	교량하부공	교대N	●	OSC
				I6		교각N	●	OSC
				I7		승강기N		
		I3	교량상부공	I8	교량상부공	거더N	●	OSC
				I9		슬래브N	●	OSC
				IA		주탑N	●	OSC
				IB		주탑기타	●	OSC
				IC		케이블N		
				ID		앵커리지N		
				IE		교면포장		
		IF	육교계단N	●	OSC			
IG	상부기타	●	OSC					
I4	교량가시설공	II	교량가시설공	가설훅막이				
		IJ		가시설				
		IK		계측				
I5	교량부대공	IL	교량부대공	교량부대				
		IM		주요자재				

[표 4-12] 건축 현장 작업 대체 기술 검토

공 종	분 류	현장 작업 대체 기술				비 고
		OSC	건설로봇	자동화장비	3D프린팅	
공동 가설공사	운반(비)			●		T/C 등
	품질관리(비)					
	가설(비)					
	폐기물처리					
	환경보전(비)					
	기타 공동 (일반)		●			관제로봇
직접 가설공사	가시설물	●	●			비계, 먹메김 등
토공사	터파기공사			●		
	흙막이공사					
지정공사	파일공사		●	●		두부정리, 관입 등
철근 콘크리트공사	거푸집공사	●			● ^{비교)}	거푸집제작 관련
	철근공사	●	●			
	콘크리트공사	●	●		●	
조적공사	쌓 기	●	●			
	부대공사					
결로보완 및 단열공사	결로보완	●				
	단열공사	●				
방수공사	(방수) 공법별	●				
	방수층 누름					
	지하주차장 방수					
미장공사	부위별 미장		●			
	판넬히팅	●				
	콘크리트 면처리		●			
	충전공사					
	기타공사					
타일공사 및 석공사	부위별	●	●			
목 공 사	석고판	●	●			
	천정틀 설치	●	●			
	경량벽체 설치	●				
	천정등박스몰딩 설치	●				
	벽, 천장지	●				
수장공사	바닥재	●				
	몰딩류	●				
	내·외부 마감용 도장	●	●			
도장공사	철부페인트					
	지하주차장 사인		●			
	뽕칠도장		●			
	특수바름					
	동별표시그래픽		●			

공 종	분 류	현장 작업 대체 기술				비 고
		OSC	건설로봇	자동화장비	3D프린팅	
창호공사	목제창호					
	알루미늄합금제창호					
	합성수지제(PL)창호	●			●	
	강제창호	●				
	스텐레스스틸창호					
	스텐레스 파이프 셔터					
	발코니용 외부 창호	●				
유리공사	유리끼우기	●				
지붕 및 흡통공사	지붕공사					
	흡통공사					
	기타 공사					
잡 공 사	흡출기					
	점검구류					
	금속난간류	●				
	씰링재 충전	●				
	시스템 욕실	●				
	기타 잡공사					
가구공사	가구류	●				
철골공사	구조재	●	●			
	마감재					
	철골경사지붕					
	금속기와 경사지붕					
기계공사	급수공사	●				
	급탕공사	●				
	오배수공사	●				
	난방공사	●				
	소화공사	●				
	공조설비공사	●				
	위생기구공사	●				
	옥외기계설비					
전기공사	옥내전기공사	●				
	옥외전기공사					
소방공사	소방설비공사					
통신공사	옥내통신공사	●				
	옥외통신공사					
가스공사	가스공사	●				
토목공사	배수/오수/급수공사			●		
	포장공사			●		
	부대시설공사			●		
조경공사	식재공사					
	조경/놀이시설물공사			●	●	

3. 미래 건설생산시스템 구상

3.1 생산시스템 전환에 의한 미래상 총괄

- 건설공사 생산시스템 측면에서 스마트건설 추진을 통해 현행 방식을 혁신함으로써 기대할 수 있는 미래상을 정리함
- ‘미래가치’를 기술집약, 탈현장, 무인화, 창의적, 자율화, 다회성 등으로 선정하고, 미래의 생산과 일하는 방식을 예측함
 - ‘첨단생산’ 분야에서는 현장작업 최소화, 생산성 극대화, 상시적 현장운영, 지능형 장비 적용 등을 예상할 수 있음

구 분	가치 변화		생산 및 일하는 방식	
	과거 가치	미래 가치	현재 방식	미래 방식
스마트한 첨단생산 OSC 건설로봇 3D 프린팅 자동화장비	노동집약	기술집약	• 노동집약적 비효율적 생산	• 기술집약/자본집약적 생산 변모 • 건설 생산성 제고
	현장생산	탈현장	• 현장 중심 공사 진행	• 공장화, 부품화, 제품화 • 현장 작업 최소화
	성력화	무인화	• 인력 기반 작업	• 자동 무인로봇, 장비 인력 대체 • 연중무휴, 24/7 현장 운영
	획일적	창의적	• 제한된 공법, 재료 사용	• 자유롭고 다양한 구조물 공급 • 스마트시공 최적 재료·공법
	인력 통제	자율화	• 탑승 운전자 조작 운영	• 원격 장비 운영 • 자율주행 지능형 장비 활용 지향
	일회성/고정	다회성/이동	• 공간 점유 및 단기 내용연수	• 장수명 개념의 스마트건축 지향
함께하는 미래산업	공공주도	민간주도	• 공공 선도 형식 산업 도입	• 첨단생산 시장 활성화 및 성숙
	대형주도	스마트평등	• 초기단계 대형사 기술 주도	• 기술 평준화 및 디지털 격차 극복
	비자발적	자발적	• 의무대상 한정 적용	• 첨단화 효과 체험 및 자발적 확대 • 의무 적용 대상(금액) 대폭 하향
	폐쇄형	개방·공유	• 기업 내부용 시스템	• 주요 기술 기준 표준화 • 참여자 공유형 시스템
지속가능 인프라	건설전문	융합인재	• 건설분야 전문인력 양성	• 스마트화 건설기술인 확충
	다원화체계	일원화체계	• 총괄체계 미흡(개별 부문 진행)	• 조직 내 추진체계 효율화
	공급자중심	수요자주도	• 기술 관련 정보 공유 미흡	• 우수기술 거래 활성화

[그림 4-2] 스마트건설이 가져올 건설생산 측면의 미래상

3.2 [하드웨어] 무인화, 자동화, 탈현장

- 자동화, 기계화의 이상적인 목표는 탈인력(labor-free), 무인화가 구현된 완전자동시스템이 될 수 있으나, 초기 단계에는 반자동, 부분자동 시스템을 중간 목표로 설정
- ‘부분자동 시스템’은 인력과 기계의 단순한 연계라기 보다는 장비의 조종에 있어 기계의 장점과 인력의 장점을 조합하는 협력체제로 볼 수 있음
- 지속적인 연구와 개발을 통해 인력이 담당하는 부분을 줄여 자동화 수준과 비중을 높일 수 있는 전략이 필요함

3.3 [소프트웨어] 스마트 시공 통합 플랫폼 구축

- 개별 현장에는 단일 기술이 아니라 여러 종류의 기술들이 해당 현장의 특성에 맞게 복합적으로 적용될 수 있음
- 이는 영국을 비롯한 유럽 내 다양한 국가에서 채택하고 있는 개념인 MMC(modern method of construction)에서 총 7가지의 분류를 두고 새로운 건설생산 방식을 정의하고 있는 것과 맥락을 같이 하는 것임
- 스마트 시공기술의 적용과 그 효과를 극대화하기 위해 개별 기술의 특성, 비용 대비 생산성 향상 수준, 현장 환경 요소에 대한 기술 적합성 등에 대한 데이터를 기반으로 적용계획이 수립될 필요가 있음
- 발주자는 ‘스마트 시공기술을 적용방식을 세분화한 ToolBox’를 작성하고, 적용 가이드라인을 통해 종합건설업체와 전문건설업체의 적절한 활용을 유도할 수 있음
- 아울러 플랫폼은 기술의 적용 현황, 진행 상황 등을 모니터링하고 결과를 정리하는 등 종합적인 관리 기능을 포함하고 있음

[표 4-13] 스마트 시공기술 조합의 사례

관리활동		시공/작업		
현장 관제	전용부위	공용부위	토공/조경	기타 작업
<ul style="list-style-type: none"> • 로봇 활용 실 시간 관제 및 위험 탐지 	<ul style="list-style-type: none"> • 공장제작 • 3D 프린팅(3차) 	<ul style="list-style-type: none"> • 코어 공장제작 • 옥탑 공장제작 • 부대시설 모듈화 • 3D 프린팅(2차) 	<ul style="list-style-type: none"> • MG/MC 적용 • 조경시설물 3D 프린팅(1차) 	<ul style="list-style-type: none"> • 현장작업, 단지 내 자재운반에 건설 로봇 활용

[스마트 시공 통합 플랫폼 구축 방안]

- 건설 로봇, 3D 프린팅, MG/MC, OSC 등 스마트 시공기술을 현장 적재적소에 활용하도록 지원하는 기반으로서의 플랫폼
- 플랫폼의 목표는 디지털화된 공정 관리와 자동화된 시공 실행 통합
- 스마트 시공 통합 플랫폼은 크게 3개의 레이어(Layer)로 구성

1) 데이터 및 모델링

모든 스마트 시공기술의 근간이 되는 디지털 정보 모델 생성 및 관리

(1) 디지털 트윈/BIM 통합

- BIM 모델을 플랫폼의 중심에 두고, 모든 시공 객체(OSC 모듈, 3D 프린팅 부재 등)에 대한 정밀한 3D 정보와 속성 데이터 정의
- BIM 모델을 기반으로 현장 환경을 가상화한 디지털 트윈을 구축하여, 로봇 및 장비의 작업 시뮬레이션 및 사전 검증 수행

(2) 데이터 표준화

- 3D 프린팅 설계 파일, MG/MC 장비의 위치 데이터(GPS 좌표), 로봇 작업 로그 등 각 기술에서 발생하는 데이터를 상호 운용 가능한 표준 포맷으로 정의하여 플랫폼에 통합

2) 플랫폼 코어 레이어 (Platform Core Layer)

수집된 데이터를 처리하고, 현장과 장비를 연결하며, 통합적인 관리 및 제어를 수행하는 플랫폼 핵심부.

(1) 공정 관리 시스템 (PCS)

- 전통적인 공정 계획(WBS)에 스마트 시공 기술의 투입 계획 통합
 - * OSC 부재 생산 진도율과 MG/MC를 이용한 현장 설치 진도율 연동
- 실시간 현장 데이터를 기반으로 계획 대비 실적을 비교하고, AI 기반 리스크 예측을 통해 작업 중단을 최소화

(2) 장비 및 로봇 제어 모듈

- MG/MC 시스템에서 수집되는 장비의 위치, 자세, 작업량 실시간으로 수신
- 건설 로봇에게 작업 명령을 내리고 로봇의 작업 피드백을 수신하는 통신 인터페이스(API) 구축

(3) 품질 및 안전 모니터링

- 현장에 설치된 IoT 센서와 드론 촬영 데이터를 플랫폼에 연동
- 로봇이 수행한 용접, 검사 결과 및 MG/MC의 시공 정밀도 데이터를 실시간으로 수집하여 디지털 트윈 상에서 시공 품질 즉시 검증

3) 현장 적용 및 인터페이스

플랫폼의 기능을 현장 작업자가 직접 사용하거나, 장비 및 로봇이 플랫폼과 상호 작용하는 접점

(1) 스마트 워크 가이드 (AR/VR)

- 현장 작업자에게 AR 장치를 제공하여, MG/MC 장비의 작업 영역이나 OSC 모듈의 설치 위치를 3D 모델 위에 겹쳐서 정확하게 가이드
- 원격 관리자는 VR 환경을 통해 디지털 트윈에 접속하여 현장 상황 실시간 점검 및 로봇 원격 제어 가능

(2) 모바일/웹 대시보드

- 관리자 및 작업자를 위한 맞춤형 대시보드를 제공하며, ①MG/MC 장비의 실시간 위치 및 작동 현황, ②OSC 부재의 공장 출하 및 현장 도착 물류 현황, ③3D 프린팅 출력 진행 상황 및 재료 재고 등의 주요 정보 관리

(3) 자동화 인터페이스

- 3D 프린터, 건설 로봇, MG/MC 장비가 플랫폼과 직접 데이터를 주고받을 수 있도록 통일된 통신 프로토콜을 적용하여 폐쇄 루프 제어 환경 구축

3.4 [생태계] 생산체계 변경

- 스마트 시공기술의 적용이 확대되면서 현행 건설 생산체계 내에서 각 주체가 수행했던 역할이 점진적으로 조정받을 수 있음
- 기술적, 제도적 환경이 갖추어져 사업여건과 사업성이 확보될 수 있는 상황에서 첨단 생산 공법의 적용 여부는 공공발주자, 민간사업자, 건축주에 달려 있음
- 다만, 공장제작 범위의 결정, 3D 프린팅 공법의 적용 여부는 시행자, 설계자의 검토결과에 따라 확인되고, 건설로봇과 MG/MC 적용의 경우 수급인(시공사, 건설사업자), 하수급인들이 의사결정에 차지하는 비중이 상대적으로 크다고 할 수 있음
- 이 과정에서 전통적으로 시공단계를 총괄하고 관리를 주도하는 종합건설사업자와 작업 자체의 진행을 담당하는 전문건설사업자의 역할이 축소될 것으로 예상됨
 - 주체별 역할의 변화 수준은 전체 건설 시장에서 새로운 생산체계가 차지하는 비중 에 따라 달라질 수 있으며, 기존 문헌에 따르면 첨단생산 확산 속도는 다소 느리고 비중 역시 일정 비율 이하로 고정될 것으로 예상됨
- 주체별 역할 변화에 있어 논의할 수 있는 사항을 정리하면 아래 표와 같음

[표 4-14] 생산 혁신 추진에 따른 미래의 주체별 역할 예상

구 분	현재 역할	미래의 주체별 역할	
		도입기 → 과도기	성숙기
계획 시점	현행 (AS-IS)	도입기 → 과도기	성숙기
단계 목표	지속적 개선	현장 부분 자동화 실현	건설 현장 완전 자동화
발주자	<ul style="list-style-type: none"> • 수급인(종합건설사) 선정 * 시공서비스 위탁 	<ul style="list-style-type: none"> • 표준화된 모듈러, 부재 주문수급 • 현장 잔여물량 대상 수급인 선정 	<ul style="list-style-type: none"> • 공장 재고로부터 신속 설치(MTS) • 현장 자동화, 인력 투입 작업 최소화로 관리부담 축소
수급인	<ul style="list-style-type: none"> • 종합건설사업자 - 현장 총괄 - 시공 종합관리 	<ul style="list-style-type: none"> • 주택건설 아파트동 등에서 물량 대폭 축소 	<ul style="list-style-type: none"> • 첨단기술 내재화 또는 서비스 공급자와 전략적 파트너십 체결 • 현장 관리 디지털화, 고도화
하수급인/작업반장	<ul style="list-style-type: none"> • 전문건설사업자 	<ul style="list-style-type: none"> • 공장주와 경쟁 * 작업물량 변동 크지 않음 	<ul style="list-style-type: none"> • 현장작업분을 위한 건설로봇, 3D 프린팅, MG/MC 서비스 공급자
작업자	<ul style="list-style-type: none"> • 현장에서 기능공, 조공 투입 	<ul style="list-style-type: none"> • 필요에 따라 현장 보다 공장으로 이동하여 출역 	<ul style="list-style-type: none"> • 공장 전문 인력으로 근무 증가 • 로봇 오퍼레이터 및 작업 보조 • 원격으로 무인화 장비 조종
사업관리자	<ul style="list-style-type: none"> • 현장 작업 위주 감리 	<ul style="list-style-type: none"> • 과업 내용, 방식 변경 	<ul style="list-style-type: none"> • 현장작업분 한정 감리업무 수행 * 공장제작분은 별도 보증체계 작동
설계자	<ul style="list-style-type: none"> • 설계자(건축사사무소) 	<ul style="list-style-type: none"> • 첨단공법 전문인력 부족 	<ul style="list-style-type: none"> • 신규 방식 정착에 따라 매뉴얼화

4. LH 건설공사 생산시스템 전환 전략

4.1 생산시스템 혁신 총괄

1) 생산시스템과 생산시스템 혁신 유형

- 건설공사 생산시스템은 시설물을 건조하는 물리적인 ‘작업’과 작업을 가능하게 하는 입력요소, 작업을 둘러싼 영향요소 등을 총체적인 관점에서 정의한 것임
- 그에 따라 생산시스템 혁신 또는 전환은 결과로서 시설물을 만든다고 했을 때, 첨단기술의 능력을 빌어 입력요소에 있어 차별성을 확보하는 것을 의미함
 - 동일한 시설물을 계획하여 최종 결과물에 차이가 없다고 하더라도, 이를 구현하는 과정이 상이할 수 있음
- 생산시스템에서의 입력요소는 인력, 자재, 장비, 공법 등이며, 혁신에서 지향하는 바에 따라 변화의 대상과 적용하는 스마트 시공기술이 달라짐
- 생산시스템 혁신은 과정의 혁신, 수단의 혁신으로 간주할 수 있으며, ‘인력’에 대해서는 기술적 보조를 통한 인력 투입의 축소 또는 무인화, 물리적 근력 증강을 통한 원활한 작업 지원 등을 도모할 수 있음
 - ‘장비’에 대해서는 운전원의 개입 수준과 장비의 자율성 수준에 따라 생산시스템에 미치는 영향에 차이가 있음
 - 다른 한편으로 작업 ‘장소’의 혁신이 있으며, 탈현장 또는 근현장에서 작업의 동시성을 높이는 방식으로 현장 전체의 효율성을 높이는 것으로 OSC 공법 도입이 기본적인 원리라고 할 수 있음
- 작업과 관련된 영향요소는 작업 수행에 영향을 미치는 현장 여건 등 작업환경, 기술기준과 법제도 등 제약요인을 의미함
- 궁극적으로 생산시스템 혁신은 최소 투입으로 사업의 효율성을 극대화하여, 기간, 비용, 품질, 안전, 환경 측면에서의 효과를 증대시키는 것을 목적으로 함
 - 생산 혁신은 다양한 규모의 스마트 생산기법을 통해 대상 자체 또는 과정에 있어 소요되는 기존 자원을 최소화할 수 있는 대안을 검토하고, 건설 생산을 둘러싼 현재의 이슈에 대한 솔루션을 제공함

2) 기술 현황과 과업 설정 방향

- 현재 시점에서 스마트 시공기술인 건설로봇, 3D 프린팅, 자동화장비, OSC 등 개별 기술의 적용가능 수준이 상이하여 기술별 도입 전략과 일정 상 차이는 불가피함
- 스마트 시공기술의 분류에 근거하여 유형별로 도입 방식을 상호 벤치마킹할 수 있으므로, 유형 A에 해당하는 OSC와 3D 프린팅을 묶어서 검토하도록 함
 - OSC 공법의 경우 다양한 적용 경험을 토대로 3D 프린팅에 비해 상대적으로 활성화 기반이 일정 수준 이상 마련되었다고 할 수 있으므로 3D 프린팅 도입에 있어 OSC 공법 도입 경로, 과정 상의 장애요인, 문제점 해결 방안 등을 참조할 수 있도록 함
 - 다만, OSC 공법은 기존 대비 작업과 생산 투입요소 자체에 변화를 주는 방식이 아님에 따라 영향요소의 적정한 처리를 통해 우호적인 사업 여건을 확보하는 방안을 3D 프린팅 도입 환경 조성에서 참조하는 것이 보다 바람직한 접근임
- 유형 B로 분류된 건설로봇과 자동화장비의 경우도 유사한데, 자동화장비의 산업 내 적용과 실용화 수준이 초기 기술개발이 진행 중인 건설로봇에 비해 높다는 점에서 MG/MC 적용 전략을 건설로봇 도입 시 검토하도록 함

4.2 추진 목표와 총괄 과제

- 생산시스템 혁신은 직접적으로 건설생산을 재정의함과 동시에 3D로 대표되는 기존의 진부한 건설 이미지를 첨단과 스마트로 전환하는 것을 목표로 하며, 목표 달성을 위한 과제와 기간별로 설정한 정량 목표는 아래와 같음

[표 4-15] 생산시스템 혁신의 핵심가치와 총괄 실행과제

전략목표	전략과제	총괄 실행과제	추진목표
<ul style="list-style-type: none"> • 생산 혁신을 통한 건설의 재정의 • 건설 이미지 전환 • 업계 전반에서 생태계 조성 	<ul style="list-style-type: none"> • 생산기술 적용 물량 지속 확대 • 기술적 검증을 통한 적용가능 대안 확보 • 법제도적, 인적, 조직적 환경 조성 	<ul style="list-style-type: none"> • 탈현장, 탈인력을 위한 기술 적용 확대 (검토, 검증, 확대, 표준화) 	<p>[총괄]</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2035년 자동화를 50% <ul style="list-style-type: none"> ➔ 전체 대비 스마트 시공기술 적용 작업비용 비율 <p>[단계별 OSC 적용 사업비율]</p> <ul style="list-style-type: none"> • (중기) 전체 6% • (장기) 전체 10% • (정착기) 전체 15~20% <p>[생산성]</p> <ul style="list-style-type: none"> • (장기) 상승(+) 반전 • (정착기) 30% 증가

4.3 실행과제

[표 4-16] 생산시스템 전환 추진 실행과제

구 분		실행과제명	세부 내용	
공통	1	EN	중장기 생산혁신 마스터플랜 제시	<ul style="list-style-type: none"> • 건설 완전자동화 실현을 위한 중장기 계획 • 전략적 실행과제 추진 방안 마련
	2	PP	전담조직 마련 및 전문인력 양성	<ul style="list-style-type: none"> • 사업 전반 스마트 시공기술 적용 주관 • 디지털 플랫폼 기반 현황 모니터링 • 기술 기준 마련, 적용대상 확대 추진
	3	PC	스마트 시공기술 공통 제도적 환경 조성	<ul style="list-style-type: none"> • 스마트 시공기술 공통 법제도 개정 • 내부 건설관리 지침 등 개정안 마련
	4	PC	생산혁신 촉진형 발주방식 시행	<ul style="list-style-type: none"> • 생산기술 최적화 발주방식 마련 • 참여주체간 협력 및 생태계 조성 방안
OSC	1	PC	OSC 주택 설계·시공·관리 매뉴얼화	<ul style="list-style-type: none"> • 설계·시공·관리 가이드라인 배포 • 설계기준 등 내부 지침 검토
	2	TN	OSC 공법 유형별 표준화	<ul style="list-style-type: none"> • 표준평면 및 표준설계도서 제시 • OSC 주택 표준화 후속조치
	3	PC	OSC 주택 제품화 및 구매 시스템화	<ul style="list-style-type: none"> • 표준 평면 기반의 제품 등록(나라장터) • 관련 제도 개정 및 인프라 정비
	4	TN	OSC 주택 성능 고도화	<ul style="list-style-type: none"> • 층간소음 등 고성능 OSC 주택 기획
	5	TN	OSC 주택 상품성 제고	<ul style="list-style-type: none"> • 공장제작 적용 부위 추가 • 특화 주거 상품 기획 및 분양주택 시범사업
	6	PC	OSC 활성화를 위한 제도 개선(지속)	<ul style="list-style-type: none"> • 기술인정, 인센티브 등 관련 법령 제·개정
RX	1	EN	건설로봇 기술 현황 조사 및 기존 전략 조정	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 주요 업체, 적용 사례, 제도 여건 조사 • 공공주택 시공 로봇 기존 도입전략 개정
	2	PC	로봇 기술개발 및 실증 지원 (지속사업)	<ul style="list-style-type: none"> • 기술개발 공모 사업 실시 • 기개발 로봇 검증 공모 사업 실시
	3	PC	특화로봇 개발 사업	<ul style="list-style-type: none"> • LH 사업 특성 부합 로봇 개발 • 단년(다년) 개발 지원 후 확대 적용 추진
	4	TN EN	건설로봇 활용 기술기준 및 인프라 마련	<ul style="list-style-type: none"> • 설계 및 원가기준, 시방서 등 내부지침 작성 • 기술 거래 마켓 운영
3DP	1	EN	3D 프린팅 기술 현황 조사 및 전략 수립	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 주요 업체, 적용 사례 조사 • 공공주택 3D 프린팅 기술 도입전략 수립
	2	TN PC	3D 프린팅 기술 도입 (1단계)	<ul style="list-style-type: none"> • 조경시설물 등 기초 기술 시범사업 실시 • 시범사업 결과 검토 및 점진적 확대
	3	TN PC	3D 프린팅 기술 도입 (2단계)	<ul style="list-style-type: none"> • 소형 부대복리시설 등 기본 기술 시범 적용 • 시범사업 결과 검토 및 점진적 확대
	4	TN PC	3D 프린팅 기술 도입 (3단계)	<ul style="list-style-type: none"> • 저층 건축물 등 핵심 기술 시범사업 실시 • 생산 및 제도적 여건 확인 및 점진적 확대
	5	TN	3D 프린팅 기술기준 마련	<ul style="list-style-type: none"> • 설계 및 원가기준, 시방서 등 내부지침 작성
MG/ MC	1	EN	자동화장비 기술 현황 조사 및 기존 전략 조정	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 주요 업체, 적용 사례, 제도 여건 조사 • MG/MC 기술 기준 도입전략 개정
	2	PC	머신가이던스, 운전 지원 기술 확대	<ul style="list-style-type: none"> • MG 적용 현황, 장애요인 파악 • 디딤돌 사업을 통해 전체 현장으로 확대
	3	EN	머신컨트롤, 무인화 기술 모니터링 및 도입	<ul style="list-style-type: none"> • 공종별 무인화 장비 점진 도입 • 시범사업 결과 검토 및 점진적 확대
	4	TN	MG/MC 활성화를 위한 기술기준 개정	<ul style="list-style-type: none"> • 현행 공사시방서, 내부지침 등 개정

4.4 제도 측면의 인프라 정비

1) 정책적 지원 요구 배경

- 유망기술의 도입은 기존 기술을 대체함으로써 가능하나, 건설 환경이 기존 기술 적용을 위해 최적화되어 있어 대체의 속도는 느리고, 저항이 발생하게 됨
- 기술역량을 보유한 공급자가 새롭게 등장하고, 초기에는 공급자 수가 많지 않음
- 보편화된 공법은 설계와 시공 기준이 명확하고, 검증된 방식으로 작업을 진행함으로써 작업이 가능한 기능인력도 충분하고, 비용적인 측면에서도 가장 저렴한 대안이 될 수 있음
- 그에 따라 새로운 기술의 도입은 기반이 충분하지 않고, 기준도 불명확하며, 비용도 추가로 투입되는 위험이 불가피하게 됨
- 시장 논리가 강하게 작용하는 민간부문 보다는 정부 정책 추진의 발판으로서 공공부문이 초기에 기술의 검증, 시범사업 실시, 제도 개선 사항 도출 등의 역할을 담당하고 있음
- 다만, 공공부문의 원활한 사업 진행, 민간부문 진입 유도 등을 위해서는 사업여건, 사업성을 보완해 줄 수 있는 제도적인 장치가 필요할 수 있음
- 스마트 시공기술을 예로 들면, 건설생산과 연관된 다양한 법령에 있어서의 개정, 특례인정, 특별법 제정과 함께 기술기준 추가, 인센티브 제공 등이 요구됨
- 이러한 정부 지원을 바탕으로 초기 시장이 형성되고, 지속적인 개정을 통해 국가별 건설시장의 특성에 맞는 최적의 적용 환경을 구축할 수 있음
- 건설로봇과 자동화장비는 작업에 투입되는 기계와 관련되어 있다는 유사성으로 인해 건설기계 관련 기준에 한해 일괄 처리 가능한 제도 개정안이 될 수 있음

2) 인프라 전반의 개선 과제

- 사내외 건설기술인과 LH 시행 사업에 참여하는 주체들이 생산시스템 혁신 추진을 위해 추진할 수 있는 실행과제를 재구성하여 정리하면 아래와 같음

[표 4-17] 생산시스템 전환 요소 영역별 실행과제 검토

영역	실행과제
[PP] 인력·조직	<ul style="list-style-type: none"> • 생산혁신 전담조직 구성 및 해당 부서 직종별 필요인력 배치 • 전담조직, 본사 내 유관부서, 지역본부(사업소), 현장 간 역할 분담 • 내부 직원 대상 교육 프로그램 실시 <ul style="list-style-type: none"> ※ 종합건설사, 전문건설사, 사업관리자 소속 건설기술인, 기능인력 대상 교육 병행 • 스마트건설 전문인력 경력개발 프로그램 수립 <ul style="list-style-type: none"> ※ 전체 기술직 직원 스마트 시공기술 관리 및 관련 자격/인증 취득 지원 • 스마트건설 전문인력 채용
[PC] 프로세스	<ul style="list-style-type: none"> • 건설공사, 감리용역 대상 계약, 발주, 입찰 방식 설정 (입찰안내서, 제안평가서) <ul style="list-style-type: none"> - 민간참여사업, 대형공사, 일반공사 등 사업유형에 따라 별도 지침 마련 • 감독·감리 기술 적용(작업) 모니터링 방법 설정 • 참여주체의 기술 활용을 유도하기 위한 인센티브
[TN] 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 스마트 시공기술별 특성에 따른 자체 기술 개발, 적용, 공유 <ul style="list-style-type: none"> - 사업 속성, 공사 특성을 고려한 기술 수요 분석 - LH가 직접 원천기술을 보유하고 운영해야 하는 시스템(플랫폼) - 내재화 요구 기술 자체 개발, 사업 내 플랫폼 공유 • 외부 주체 기술 선정, 적용, 평가 • 스마트 시공기술별 품셈, 원가산정 기준 등 작성 • 기술 적용 관련 지침, 기준 선제적 제정 및 운영 <ul style="list-style-type: none"> - 표준설계/시방에 따라 내부 설계지침, 전문시방서 제개정 • 동일한 데이터를 가지고 업무 진행
[ES] 생태계	<ul style="list-style-type: none"> • 중장기 전략 및 세부실행과제 수립 및 정기적 업데이트 • 중소기업의 스마트건설기술 활용 실적 보유로 기술 격차 해소 방안 시행 • 참여주체간 협력방안 마련 • 생태계 구축 기여 • 디지털 플랫폼 기반의 스마트 시공기술 공유, 거래방식 정립

3) 개정 대상 제도 검토

- OSC 공법의 경우 작업의 장소와 여건이 달라지고, 구조형식이나 성능과 같은 계획요소, 해당 작업의 고유한 속성은 변경되지 않은 상황임
 - 그에 따라 공동주택을 포함하는 건축물 건설사업에 적용되는 현행 법률들이 동일하게 적용됨
 - 다만, 기존에 없던 ‘공장제작’이 포함되어 이원화된 공공건설공사의 원활한 수행을 위해 개정이 필요한 법령을 나열할 수 있을 것임

[표 4-18] 건설사업 진행과정에서 관련 법 목록

기획·계획	설 계	시 공	사용·유지관리
<ul style="list-style-type: none"> • 국토계획법 • 택지개발촉진법 • 공공주택 특별법 • 국가재정법 • 국가계약법 • 지방계약법 • 공원녹지법 • 산림법 • 수도법 • 문화재보호법 • 자연공원법 • 자연환경보전법 • 수도권정비계획법 + ... 	<ul style="list-style-type: none"> • 국토계획법 • 건축법 • 주택법 • 주차장법 • 도로법 • 수도법 • 하수도법 • 수도권정비계획법 • 도시교통정비촉진법 • 건설산업기본법 • 건설기술 진흥법 • 녹색성장기본법 • 녹색건축물조성지원법 • 기계설비법 • 전기사업법 • 정보통신공사업법 + ... 	<ul style="list-style-type: none"> • 국가재정법 • 국가계약법 • 지방계약법 • 건설산업기본법 • 건설기술 진흥법 • 건축사법 • 엔지니어링산업 진흥법 • 주택법 • 산업안전보건법 • 중대재해처벌법 • 산업재해보상보험법 • 재난·안전관리기본법 • 전기공사업법 • 전력기술관리법 • 정보통신공사업법 • 소방시설공사업법 • 판로지원법 • 소음·진동관리법 • 대기환경보전법 • 수질·수생태보전법 • 폐기물관리법 • 화학물질관리법 • 전파법 • 건설기계관리법 • 지능형로봇촉진법 • 도로교통법 • 자율주행자동차법 • 하도급거래공정화법 • 건설근로자법 + ... 	<ul style="list-style-type: none"> • 시설물안전법 • 기반시설관리기본법 • 건축법 • 건축물관리법 • 공동주택관리법 • 집합건물소유·관리법 • 민법 • 국토계획법 • 도로법 • 도시철도법 • 공항시설법 • 전기통신사업법 • 전기안전관리법 • 전기공사업법 • 정보통신공사업법 + ...

[표 4-19] 시공단계 유관 법령과 스마트 시공기술 개정 요구

영역	법령명	관련 스마트 시공기술				참고사항
		건설로봇	3D 프린팅	MG/MC	OSC	
종합	건설산업기본법		●		●	업역
	건설기술 진흥법	●	●	●	●	감리, 대가, 기술기준
	건축법	●	●	●	●	구조기준, 성능기준, 감리
	주택법	●	●	●	●	구조기준, 성능기준, 감리
공사수행·발주·계약	국가재정법					
	국가계약법		○		●	
	지방계약법					
	건축사법	○	○		●	감리
	엔지니어링산업 진흥법					
	하도급거래공정화법					
(분리)발주·계약	전기공사사업법		○		●	분리발주완화, 감리
	전력기술관리법	○	○		○	분리발주완화, 감리
	정보통신공사사업법	○	○		○	분리발주완화, 감리
	소방시설공사사업법	○	○		○	분리발주완화, 감리
지급자재	판로지원법		○		●	공사용자재 구매제도
고용	근로기준법					
	건설근로자법					
안전	산업안전보건법	●				산업용로봇, 협동로봇 기준
	중대재해처벌법					
	산업재해보상보험법					
	재난안전관리기본법					
환경	소음·진동관리법					
	대기환경보전법					
	수질수생태보전법					
	폐기물관리법					
	화학물질관리법					
통신	전파법			●		5~6G 통신네트워크
기계·장비	건설기계관리법	●		●		기계(장비)등록, 승인, 기준
	도로교통법					
	자율주행자동차법			●		
	지능형로봇촉진법	●				건설로봇 정의, 안전, 인증
기타	(추가)					

4) 법제도 및 기술분야 인프라 구축 방안

■ 총괄

- 스마트 시공기술의 경우 현장에서의 '작업'과 직접적으로 연계된 기술이지만, 기술을 적용하는 세부 방법, 설계에의 반영방식, 일반건축물 또는 주거시설로서의 구조성능, 주거성능 관련 기준, 작업과정과 결과에 대한 관리방식 등이 불명확한 상황임
- 또한 4가지로 분류된 기술들은 속성 관점에서 공통적인 것도 있고, 개별 기술만의 고유한 특징도 있음
- 그에 따라 법제도적인 측면과 기술적인 측면에서 개정이 필요한 사항은 공통적인 사항과 비공통적인 기술별 사항을 구분하여 정리하였음

■ 공통적인 개정 사항

① 법제도 영역

① 정의, 범위, 분류체계의 법제화

- OSC, 건설로봇, 3D 프린팅, MG/MC는 현장작업 중심의 기존 기준에 맞추기에는 무리가 있음
- 기술 정의, 용어, 적용범위, 제외범위, 성능수준, 책임주체 등을 법체계에서 명확히 할 필요가 있음
- 특히 건설로봇은 로봇, 건설기계, 산업기계, 장비 사이의 경계가 불명확해 인증안 전기준을 정하기 어려운 상황 발생

② 성능 기반 인허가, 검사 체계 강화

- 4개 스마트 시공기술은 공법(방법) 규정 보다 안전, 내구성, 내화, 품질, 시공정밀도 등 성능으로 평가하는 것이 보다 용이할 수 있음
- ①대체공법 승인, 실증특례, 임시허가, ②표준화, ③상시허가 등으로 이어지는 경로를 명확히 하도록 함
- 필요에 따라 규제특례, 샌드박스 제도 연계

③ 디지털, 자동화 시대 하에서 책임, 보험, 하자, 감리 재정의

- 설계오류, 모델오류, 장비오류(MG/MC), 알고리즘오류(건설로봇), 재료오류(3D

프린팅) 등과 같이 책임 원인이 다층화됨

- 책임분담, 하자담보 범위, 전문배상/생산물배상(PL), 현장 안전사고 책임을 표준계약·약관·보험에서 정비해야 합니다.

④ 공장, 장비(도구), 프로세스, 사업에 대한 인증, 적합성 평가

- 스마트 시공기술에 대해서는 단계적 인증이 요구되며, 여기에는 ①제품, 부재, 재료 인증, ②로봇, 프린터, MG/MC 관련 장비 인증 및 검정, ③품질, 안전, 기록관리 등 프로세스 인증, ④현장 적용 사업(공사)의 검증 및 준공검사 등이 해당됨
- OSC는 최근 특별법 제정을 검토하면서 공장(생산)인증, 건축물인증 등의 인증체계 신설 예정

⑤ 공공발주를 위한 표준시방서, 표준품셈, 적정공사비 기준 검토

- 신기술의 경우 초기에 단가, 품셈, 검사체계가 없어 현장 적용이 어려움
- MG/MC처럼 표준시방서(KCS)에 반영해 신뢰성과 발주 근거를 만드는 접근 필요

⑥ 자격, 교육, 면허/조종, 운용 기준 마련

- 로봇 오퍼레이터, 원격조종, 프린팅 장비 운용, MG/MC 운전자 보조/자동제어 등은 기존의 장비조종과 차이가 있음
- 운용자격, 교육시간, 숙련도 평가, 안전교육 의무 제도화 필요

㉑ KDS, KCS, KS 등 건설기술 영역

⑦ 모델, 좌표, 기록 등 데이터 표준과 검증, 검사 디지털화

- 모델, 센서, 로그 등 디지털 데이터가 품질의 증거가 됨
- As-built 데이터 제출 기준, 좌표계/기준점/정밀도, 로그 보존기간, 감리 확인방법 (원격 포함) 같은 공통기준 필요

⑧ 안전기준의 자동화, 협업 반영

- 로봇, 원격조종, 자동제어 장비의 적용이 늘어날수록, 작업반경, 충돌방지, 비상정지, 통신두절 시 Fail-safe가 핵심 안전요소가 됨
- 굴삭기 관련 안전기준 등의 건설기계 안전기준과 같이 기존 기준들의 범주를 확장하되, 자동화, 원격, 협업 상황 반영

[표 4-20] 기술 간 공통 개정 사항

구분	개정 필요성	개정 방향
정의 및 범위	기술 정의가 법령에 없어 대체공법, 특례에 의존	<ul style="list-style-type: none"> • 건설기술 진흥법, 주택법 하위 고시에 스마트 시공기술 분류와 정의 관련 조항 신설 • OSC, 로봇, 3D 프린팅, MG/MC에 대한 내용을 기존 내용을 참조하여 명확히 함
인허가	공법 중심 인허가로 인해 신기술 적용에 어려움	<ul style="list-style-type: none"> • 성능 기반 인허가 원칙 명문화 • 실증특례로 시작하되, 상시 검토와 허용이 가능하도록 전환 경로 제도화
인증체계	단일 인증으로는 품질과 안전 담보 불가	<ul style="list-style-type: none"> • 제품, 장비, 공정, 프로젝트 4단 인증체계도입 • 공장, 개별 사업(건축물, 주택, 현장) 분리 인증
공공발주	표준시방, 품셈 등 비용 관련 기준 부재로 발주 담당자 어려움	<ul style="list-style-type: none"> • KCS(표준시방서)에 기술별 조항 신설 • 표준품셈, 적정공사비 반영
책임체계	설계, 모델, 장비, 소프트웨어 책임 불명확	<ul style="list-style-type: none"> • 표준계약서에 디지털 오류 책임구조 명시 • 하자, 보험 범위 재정의
감리 및 검사	공장제작 또는 작업 장비 투입 시의 감리 역할 불명확, 정밀 작업에 대한 육안 검사 한계	<ul style="list-style-type: none"> • 공장제작 부분 감리 방법, 스마트 시공기술 적용 시 현장 감리 방법 구체화 • 디지털 성과품 기반 검사 허용 • 필요시 원격, 비대면 감리 활용 방식 검토
안전	자동화, 원격 시공, 협업 작업 관련 안전기준 부재	<ul style="list-style-type: none"> • 산업안전보건규칙에 자동화, 원격, 협업 작업 안전조항 신설
인력 및 자격	신기술 운용자 관련 공식 자격 없음	<ul style="list-style-type: none"> • 로봇, MG/MC, 프린팅 운용자 교육, 자격 체계 도입
데이터	모델, 좌표, 로그 기준 부재	<ul style="list-style-type: none"> • 준공도서 작업 후(as-built) 데이터 제출 기준 • 좌표, 정밀도, 보관기간 규정

■ 스마트 시공기술별 개정 요구 사항

① OSC

① 총괄사항

- 현행 현장시공 중심 규정을 공장제조방식을 포괄할 수 있도록 정비하는 것이 필요함
- 최근 "모듈러 건축 특별법" 제정을 추진하여 맞춤형 기준, 인증, 규제특례, 인센티브 등에 대해 패키지로 검토 중임

② 법제도적 영역

- 특별법 또는 주택법 건축법 등 관련 법령에 OSC 정의, 범위, 사업주체(제조사/시공자) 책임 규정
- 운송, 양중, 현장반입에 따른 별도 안전, 교통, 적치 규정
- 공장 인증, 건축물(product) 인증으로 현행 공업화주택 인정방식 이원화
- 공공발주에서 제조, 운송, 설치, 현장마감을 분리 반영한 발주/대가 산정 체계 및 표준 품셈과 내역서 등 세부 비용기준 마련
- 현장검측 위주에서 공장검사, 출하검사, 현장조립검사 등을 강화하여 실시

③ 기술기준 영역

- 부재간 접합부 구조, 내진 성능 검증 방식 정립
- 내진, 내화, 차음, 내구성 등 성능기준에서 모듈러 특성 별도 반영
- 공장제작을 포함한 표준시방서, 표준도면, 검측기준의 세분화

② 건설로봇

① 총괄사항

- 로봇이 건설현장에 도입되는 경우 안전, 인증, 책임성을 판단하는 법령, 기준을 명확히 하도록 함

② 법제도적 영역

- 건설기계, 산업기계, 로봇장비 등 로봇 활용, 관리에 있어 기준이 되는 법령 명확화
- 자율주행, 원격조종, 협동로봇 사용 시 비상정지, 속도제한, 접근제어, 안전거리 등 안전요건을 산업안전 규정·지침에 반영

- 현장 투입 전 안전성 평가(위험성평가), 성능검증(실증), 사후 로그감사체계 등 마련
- 로봇 운전자, 감시자에 대한 자격요건 마련, 전문교육 실시. 특히 원격조종, 자율주행 안전 등에 대한 강조 필요
- 공공발주공사의 경우 로봇 투입이 가능한 공종, 조건을 야간순찰, 측량, 자재운반, 표면처리 등으로 시방서에 명확히 기술하도록 함

③ 기술기준 영역

- 인간, 로봇 작업구역 분리/공유 기준, 충돌방지, 지오펜싱, 통신두절 시 안전정지 (Fail-safe) 기능 마련
- 로봇 수집 영상, 센서 데이터의 보안, 개인정보, 저장기간에 대한 가이드 작성

3 3D 프린팅

① 총괄사항

- 구조체로 인정될 수 있는 설계, 재료, 시공, 검사 기준을 표준화, 가이드라인 등의 형식으로 공식화하도록 함
- 대한건축학회의 ‘갠트리형 3D 콘크리트 프린팅 시공 지침’ 등과 같이 참조가능한 자료까지는 마련됨

② 법제도적 영역

- 프린팅 부재의 인정 절차 명확화 필요
- 프린팅을 통한 현장 제작 작업에 대해서는 책임, 검사, 하자체계를 현행 현장시공 방식과 별도 정리 필요
- 장비(프린터), 재료(배합), 공정(적층), 품질(검사) 관련 패키지 인증 검토
- 시험체, 성능시험(압축, 부착, 층간전단, 내구, 내화 등)의 최소 요구수준 및 공인시험 기준 마련
- 직접적인 확인이 어렵기 때문에 센서로그, 샘플링 시험, 비파괴(NDT)검사 등 적정 검사방식 검토

③ 기술기준 영역

- KDS, KCS 체계 안에서 3D 프린팅 구조 요소의 설계모델 반영

- 토출량, 경화시간, 작업환경 등 적층 품질관리와 허용오차, 검측기준 정의
- 장비 교정, 노즐과 펌프 상태 등 공정 변수 관리 기준

4 MG/MC

① 총괄사항

- MG, MC에 대해서는 표준시방서로서 『머신가이던스 및 머신컨트롤 시공 일반』이 마련되어 있으며, 검측, 책임 등에 있어서의 기준 필요

② 법제도적 영역

- 자동제어 수준이 높아질수록 ‘운전자 조종’ 전제의 안전규정과 충돌할 수 있으며, 자동 제어, 반자동, 원격 등의 모드별 안전요건을 규정할 필요가 있음
- 작업 중 GNSS 교란 또는 통신두절 등 사이버, 통신 리스크 발생 시에 대한 대처요령을 안전관리 항목에 포함
- 정밀도, 토공량, 다짐수준, 평탄도 등 발주자 요구기준을 디지털 성과품 제출 기준과 연동
- 모델(설계) 오류와 시공(장비) 오류 관련 책임 분쟁에 대응하여 모델 제공, 검증, 승인 절차를 표준계약과 시방에 명문화

③ 기술기준 영역

- 기준점, 좌표계, 캘리브레이션, 센서 정확도 등 측량과 검측 프로토콜
- 토공, 포장, 다짐 등 공종별 허용오차, 검측방법(스캐닝, 드론, 장비로그) 표준화
- 장비 데이터 형식, 타 제조사 장비나 소프트웨어와의 호환 기준 마련

5. 생산체계 전환에 따른 영향

5.1 산업 생태계와 생산체계 전환

1) 산업 생태계의 개념과 특징

■ 산업 생태계의 정의

- 산업 생태계(industrial ecosystem)은 “산업 환경 내 모든 이해관계자들이 생태계의 유기체들처럼 긴밀하게 연결되어 상호 작용하는 시스템 또는 경제공동체”를 의미함
 - 이러한 생태계는 공진화(co-evolution), 경쟁과 협력, 공생, 가치 창출, 외부환경 영향 등을 요소로 함
- 산업 생태계와 관련된 주요 정의는 다음 표과 같음

■ 산업 생태계의 특징

- Moore(1996)는 기업 그 자체를 분석하던 경영학의 시각에서 벗어나 기업이 속한 산업의 전체적인 구조와 역학관계를 바탕으로 기업의 분석이 이루어져야 한다고 주장하고, Business Ecosystem이라는 접근 제시
- 생태계 구성원들간의 상호협력을 통해 혁신을 이루어내며 공진화(co-evolution)함
- 소수의 핵심종(keystone species)이 생태계 전반의 경쟁과 협력을 주도함
- 생태계 구성원과 외부 환경과의 상호작용은 끊임없이 발생하며 이 과정에서 발생하는 가치들이 생태계 내부로 환류(flow-back)되어 생태계 전반에 영향을 미치게 됨

■ 산업 생태계의 핵심 개념

- 산업 생태계와 관련하여 논의되는 핵심 개념은 다음과 같음
 - 공통적으로 언급되는 내용에는 (1)하나의 생태계 구조 내 다양한 행위자(actor)가 존재하며, (2)행위자마다 각자의 동기를 가지고 행위를 하며, (3)행위자들끼리 연결되어 있는데, (4)그 연결이 반드시 위계적이거나 단단히 묶여 있는 것은 아니며, (5)행위자들이 과거의 산업 구조 경계에 구속되어 있지 않다 등이 있음

① 구성원 간의 상호의존

② 공생

- ③ 공진화 (생태계 내에서 생산된 가치가 선순환되어 전체가 건강해짐)
- ④ 경쟁과 협력
- ⑤ 가치창출과 가치공유
- ⑥ 핵심기업(핵심종) (적은 개체수로도 생태계에 큰 영향을 미치고 유지에 중추적 역할을 하는 구성원)
- ⑦ 선순환
- ⑧ 외부 환경요소 (내부 주체뿐 아니라 외부 환경요소와의 상호작용 중요)
- ⑨ 환류

2) 건설분야 생태계와 공공부문의 역할

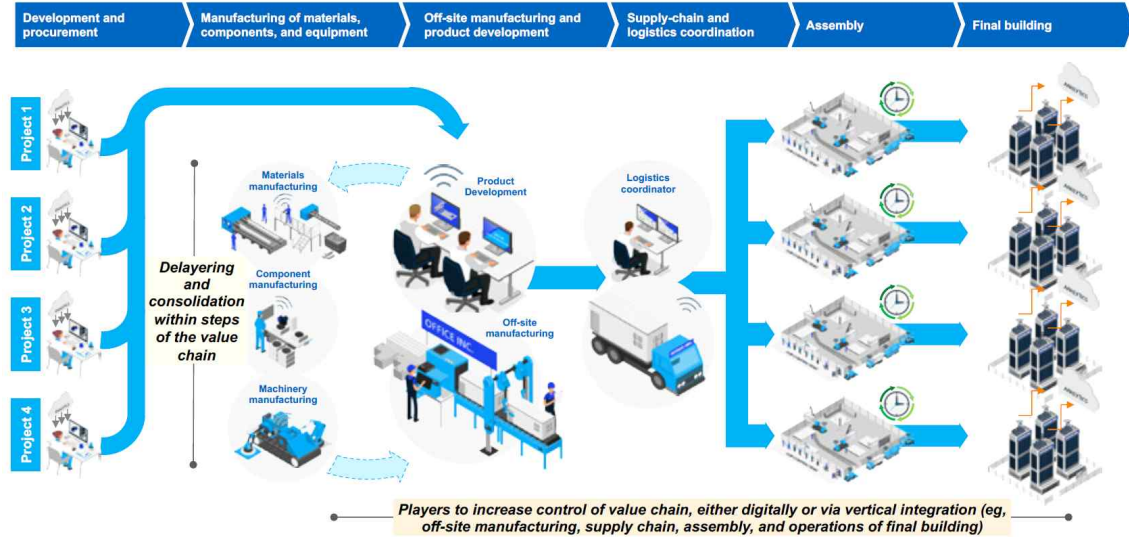
■ 생태계 측면에서 건설분야에서 강조되는 사항

- 건설제도 측면에서의 다음과 같은 장애요인을 제거하도록 함
 - 생산체계 개편
 - 분리발주 폐해 극복
 - 저가 수주 지양
 - 시장가격 변동 조기 반영
 - 공사용자재 관련 제도 정비
- 스마트건설을 수용할 수 있는 새로운 생태계로의 전환을 강조함
 - 건설산업 체질 전환, 생산체계 고도화 등 다양한 혁신은 기술 활용과 함께 산업의 모든 참여주체 사이의 유기적인 협력이 있어야 가능함
 - 산업의 참여 주체들과 더불어 생태계 구축에 영향을 미치는 다양한 내적(internal) 및 외적(external) 요인들을 유기적으로 결합할 수 있어야 4차 산업혁명 시대의 건설산업은 스마트 건설 생태계가 원활히 작동되는 산업의 넥스트 노멀로 변화 가능

■ 공공부문(공기업)과 생태계

- 민간과 공공을 이분법적 사고에서 바라보는 과거의 낡은 생각 탈피 필요
- 민간과 공공, 더 나아가 제3부문이 함께 공유(共有), 공생(共生), 공진화(共進化)하는 생태계 조성 모색
- 최근의 복잡한 문제들을 해결해 나가기 위해서는 이분법적 선택을 하는 것 보다는, 각각의 고유한 장단점을 지닌 정부(공공)능력과 민간(시장)능력, 더 나아가 NGO 등이 포함된 제3부문능력을 상호 연계하고 활용하는 것이 중요
- 정부를 포함한 공공부문이 규제 및 공공서비스의 독점적 서비스공급자가 아닌 서비스플랫폼 제공자가 되어야 함
- 공공기관 기능 및 역할모형 측면에서는 과거의 독점적 생산자나 서비스공급자 모형을 넘어서, 생태계 내 다양한 구성체 및 참여자들간의 공동창조와 공진화를 이끌어내는 플랫폼 제공자(platform provider)로 전환할 것이 강조됨
- 공공서비스의 제공은 ‘플랫폼(Platform, 산업생태계)’ 내에서 다양한 공급방식을 통해 이루어져야 하며, 공기업의 역할은 이를 조성하는 플랫폼 제공자로 설정
- 정부는 Service Designer, 공기업은 Service Provider로서 수직적 위계를 통해 독점적 공급을 실행하는 과거의 패러다임에서 벗어나야 함
- 민간, 사회경제 등 다양한 참여자가 참여하는 플랫폼을 조성하고, 플랫폼 내에서의 하나의 생산자이자 관리자가 되는 것이 공기업의 바람직한 역할임
- 공기업은 ‘플랫폼 제공자’로서, 독점적 공급자의 역할을 포기하고, 참여주체들과의 유기적 네트워크를 통한 진화적 발전 역할에 대한 고민이 필요한 시점임

- McKinsey(2000)는 건설 생태계가 현행 프로세스의 표준화, 결합, 통합을 기반으로 미래의 변화를 도모할 수 있다고 예측함



[그림 4-3] OSC 기반의 미래의 건설 생태계 모습

[표 4-21] 다행위자 네트워크에서의 인공지능 생태계 사례

출 처	현재의 생태계	미래의 생태계
건설 프로세스	<ul style="list-style-type: none"> • 상당히 프로젝트 기반임 • 유일무이한 고객 사양으로부터 개발 • 개략적 스케치로부터 계획된 설계 • 제한적 수준의 반복 	<ul style="list-style-type: none"> • 갈수록 프로덕트 기반으로 변모 • 구조체가 프로덕트가 되고, 특정 최종사용자 부문을 전문화하는 브랜드 제품 공장이라는 현장 밖에서 제조됨
가치사슬 및 참여자	<ul style="list-style-type: none"> • 지역기반으로서 수평적, 수직적으로 아주 분절화되어 있음 • 그에 따라 각 단계마다 상당수의 참여자들이 관여하게 되고, 인터페이스에서 큰 마찰 발생 	<ul style="list-style-type: none"> • 개발자는 전체 설계 또는 내부 또는 시장에서 외부적으로 제공된 여러 옵션 중의 특정 요소 중 선택 • 더 높은 글로벌화 하에서 수직적, 수평적으로 보다 결합되어 있음 • ‘탈중개인’이 디지털 마켓플레이스와 직접적인 채널을 통해 이루어짐
시공 진행	<ul style="list-style-type: none"> • 적대적 환경의 현장에서 제너럴리스트에 의해 시행 • 대부분의 작업자는 임시직이면서 수작업 진행 	<ul style="list-style-type: none"> • 시공자는 제품의 린, 현장 작업, 조립에 초점을 맞춤
기타 특징	<ul style="list-style-type: none"> • 자본을 적게 투입하는 수행 방식과 양단을 연결하는 디지털 도구, 프로세스 등의 제한적 활용 	<ul style="list-style-type: none"> • TCO와 향후 설계의 최적화를 위해 준공 후의 고객 행동에 대한 데이터와 분석 실행

5.2 생산체계 전환과 건설산업 구조 변화

■ 건설산업 구조 변화 검토 총괄

- 건설생산은 다층적인 구조를 통해 진행되며, 생산시스템의 변화는 필연적으로 생산 구조와 연관된 참여주체들에게 영향을 주게 됨
- 앞서 살펴본 현장 내 작업 시행 위계 Level ①~③을 고려할 때 유형 B는 주로 최하위 단계인 Level ③에서의 변화에 해당할 수 있음
- 시설물의 일부에 직접적으로 관여하는 유형 A는 OSC 공법과 3D 프린팅 공법으로 서, Level ①~③까지 광범위하게 연계되어 있는 이들을 사업에 적용하는 경우 유형 B 보다 영향도가 보다 클 것으로 예상됨
- 스마트 시공기술 도입에 따른 건설사업 구조 변화 양상은 유형 A의 기술 사이에서는 유사할 것으로 판단되며, 실제 영향의 내용은 관련 데이터 수집이 보다 용이한 OSC 를 대상으로 하여 진행함
 - 타 스마트 시공기술의 경우 활성화 수준이 상대적으로 낮고 연구/실적 데이터가 충분하지 않아 영향 정도를 추정하는 것이 다소 미흡할 수 있음
 - 그에 따라 OSC 공법이 적용된 주택을 위주로 검토를 진행함
- 밸류체인(value chain) 관점에서 두 기술 중 보다 실체가 있는 OSC 공법을 적용한 경우 건설공사 참여자의 가치 전환을 개별사업, 전체 업종 차원에서 검토

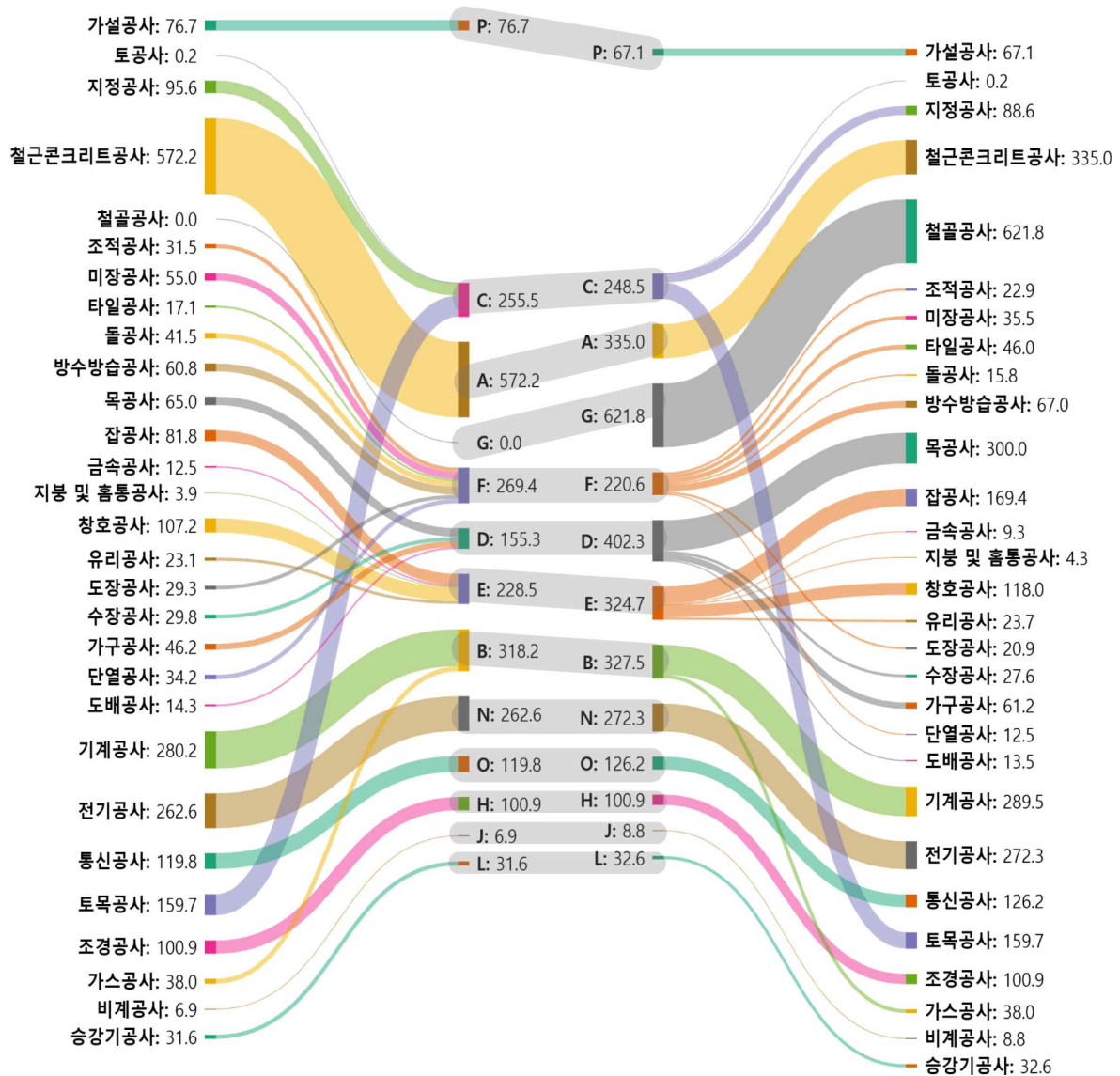
■ 종합건설업 관련 영향

- 공장 제작방식 도입이 현장 작업 진행 위계 Level ① 수준의 종합건설업자에게 미치는 영향은 주로 당초 시설공사에서 담당했던 물량에 있어서의 변동으로 나타남
- 건축공사, 기계공사, 토목공사, 조경공사 등을 포괄한 건설공사 대상 금액은 당초에 비해 47.8% 수준으로 축소

[표 4-22] 모듈러주택 건설사업의 종합건설업체 영향

구 분	건설공사 공종					분리발주 공종		기 타	전체 합계
	전체	건축 공사	기계 공사	토목 공사	조경 공사	전기 공사	통신 공사	가스 공사	
감소율	47.8%	57.3%	44.2%	0.0%	0.0%	21.6%	25.2%	0.0%	42.7%

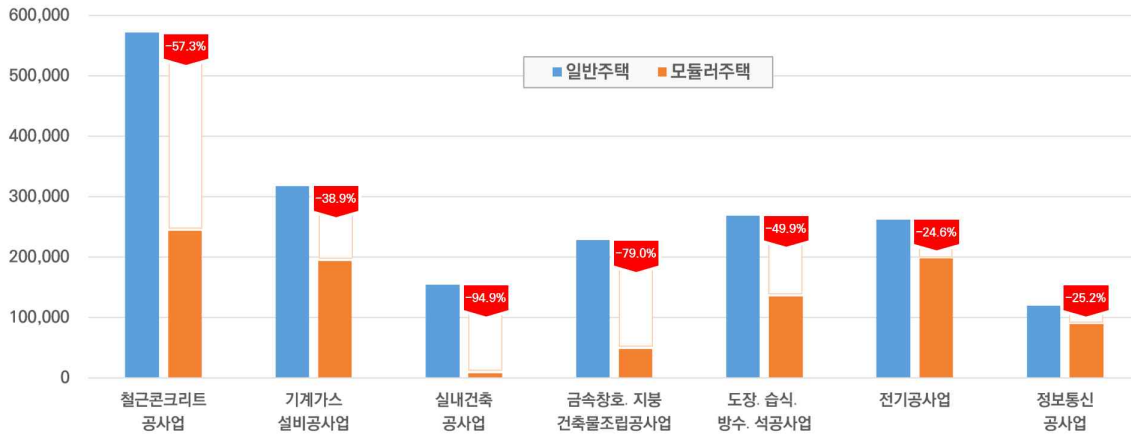
- 공종별 금액의 변동을 도식화함으로써 OSC 공법의 적용이 종합건설업체에 미치는 영향을 보다 세분화된 관점에서 검토함
- 강제 모듈러주택 건설 시 일반주택과 모듈러주택 세부공종별, 전문건설업종별 금액 차이를 확인할 수 있음



[그림 4-4] 공종별 금액 변화

■ 전문건설업 관련 영향

- 개별사업 차원에서 볼 때 전체적으로 42.7% 수준으로 금액 축소
 - 당초 대비 실내건축공사업은 94.9%, 금속창호·지붕건축물조립공사업은 79.0%, 철근콘크리트공사업은 57.3% 물량 감소

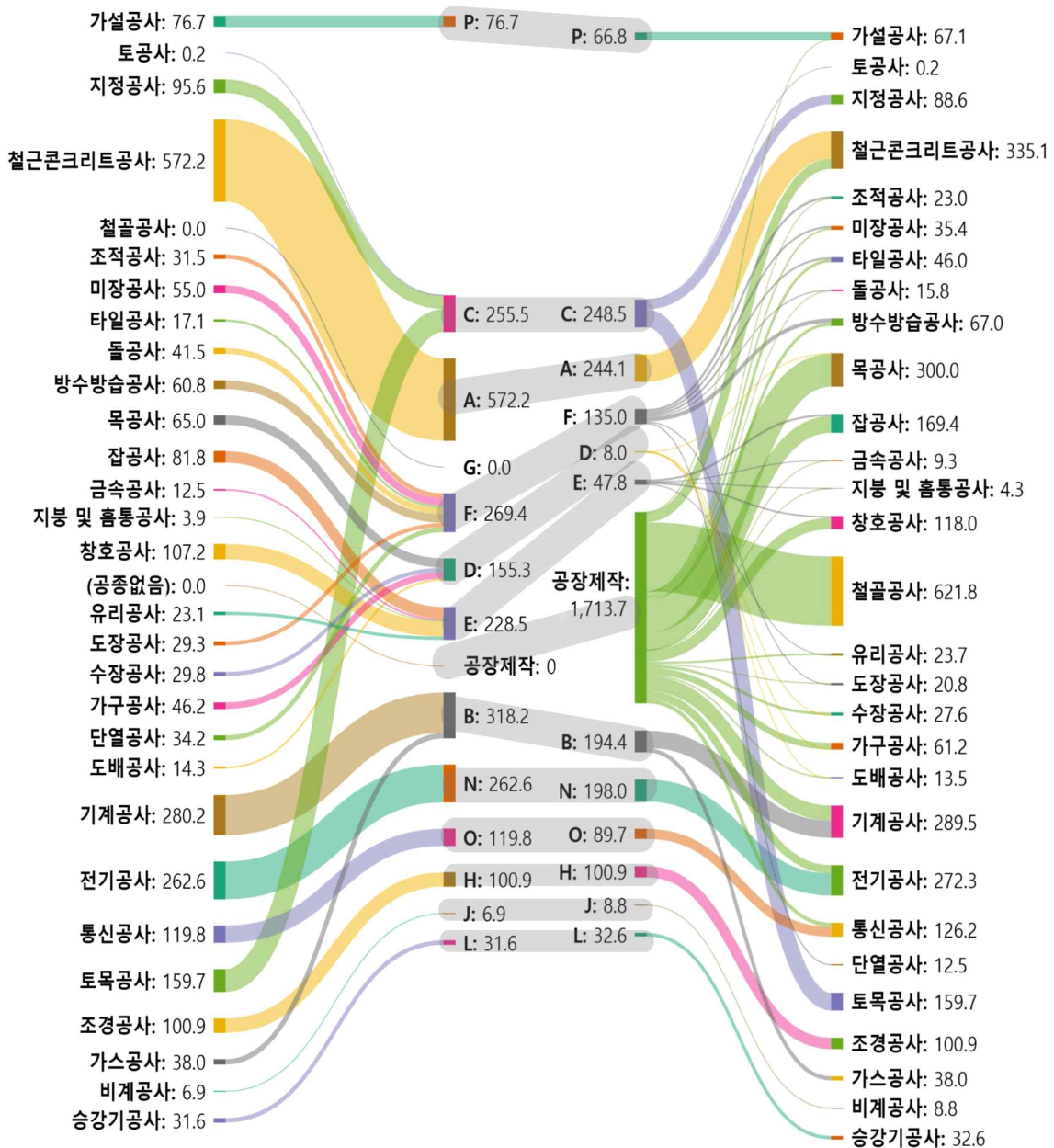


[그림 4-5] 일반주택과 모듈러주택의 전문건설업종 규모 차이

[표 4-23] 모듈러주택 건설사업의 전문건설업체 영향

기호	전문건설업종	감소율
A	철근콘크리트공사업	57.3%
B	기계가스설비공사업	38.9%
C	지반조성·포장공사업	2.8%
D	실내건축공사업	94.9%
E	금속창호·지붕건축물조립공사업	79.0%
F	도장·습식·방수·석공사업	49.9%
H	조경식재·시설물공사업	0.0%
J	구조물해체·비계공사업	27.7%(증)
L	승강기·삭도공사업	-3.0%(증)
N	전기공사업	24.6%
O	정보통신공사업	25.2%
P	기타(가설)	12.9%
전체 합계		42.7%

- 강제 모듈러주택 건설 시 공장제작의 비중, 세부공종별 금액 축소에 대해 검토함
- 내역서 상의 공종별 금액을 전문건설업종별로 재계산하여 일반주택과 모듈러주택 사이의 변동을 확인하였음
 - 공장제작 비중 확대에 따라 기존 전문건설업종에 할당되던 금액이 큰폭으로 축소

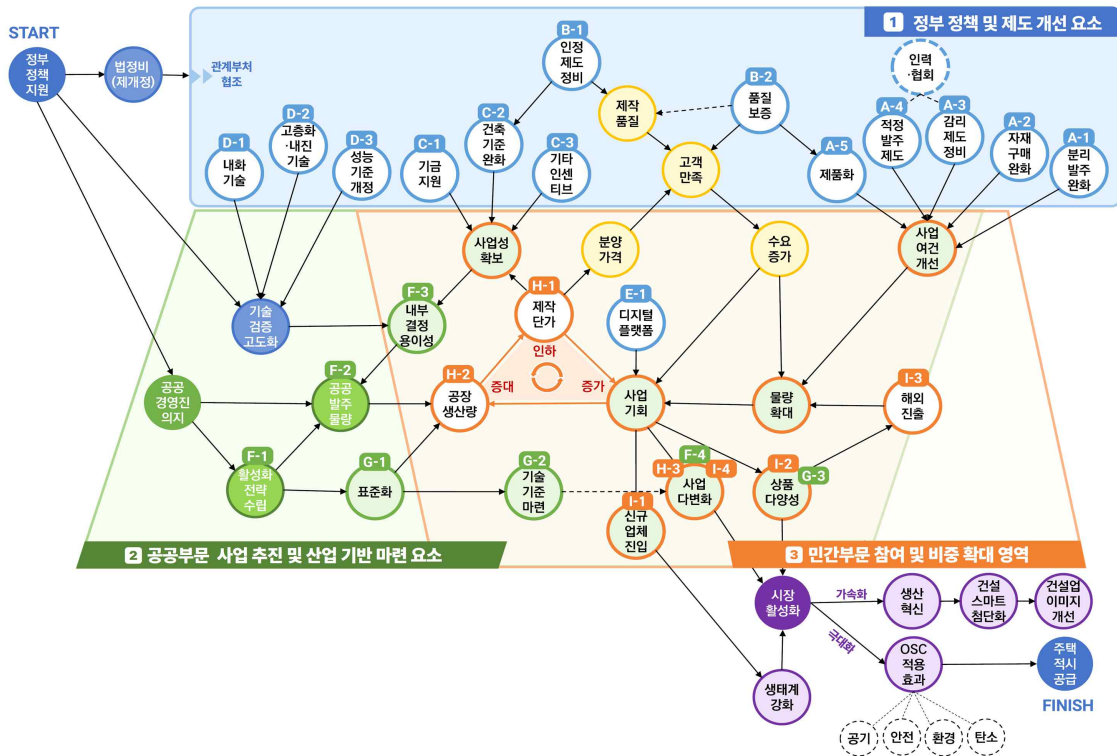


[그림 4-6] 공종별, 전문건설업종별 금액 변화

5.3 스마트 시공기술 활성화 방안

1) 유형 A 기술의 활성화 방안 검토

- OSC 공법, 3D 프린팅 기술의 도입은 해당 기술(역량)을 보유한 자가 기존 건설사업자를 대체함에 따라 새로운 영역의 산업부문이 신설됨
- 현행 제도는 ‘현장작업’ 중심의 건설공사를 지원, 통제하는 역할을 기술함에 따라 공장제작을 포함하는 건설공사수행 방식에 대해서는 제도 측면에서의 정의, 주체별 역할 등이 미흡하고 불명확한 상황임
- 그에 따라 유형 A 관련 기술의 활성화를 위한 영역을 정부 정책 및 제도 개선 영역, 공공 주도 산업 기반 마련 영역, 민간부문 참여 확대 영역 등 3개로 구분하고, 기술 도입에 있어 선행되어야 하는 필수 요인을 세부 영역 수준에서 [표 4-24]와 같이 정리함
- 위에서 정의한 유형 A 기술 활성화 요인을 바탕으로 OSC 산업이 건설산업 내에서 자리잡기 위해 필요한 요소들을 특정하여 재정의하고, 이들을 4개 영역으로 재편하여 도식화하면 [그림 4-7]과 같이 나타낼 수 있음



[그림 4-7] OSC 산업 활성화를 위한 영역별 요인 구분 및 연계

[표 4-24] 유형 A 기술 활성화를 위한 요인

1 정부 정책 및 제도 영역			
A	건설공사 제도 개선	A-1	분리발주제도 적용 완화
		A-2	공사용자재 구매 제도 완화
		A-3	건설공사 감리제도 정비
		A-4	적정 발주제도 마련
		A-5	나라장터 제품 등록, 구독제 시행
B	인정제도 정비 및 품질보증	B-1	인정제도 신설
		B-2	품질보증체계 마련
C	인센티브 제공	C-1	공적 기금 지원
		C-2	건축 기준 완화
		C-3	기타 인센티브 제공
D	필수기술 개발 지원 및 표준화	D-1	해당 기술 관련 건축기준 신설
		D-2	고층화, 내진설계 기준 마련
		D-3	건축물(주거) 성능 기준 개정
E	모니터링 및 중개	E-1	공급자, 수요자 매칭 플랫폼 운영
2 공공 주도 산업 기반 마련 영역			
F	사업추진 요소 마련	F-1	기술 활성화 전략 수립
		F-2	중장기 점진적 물량 확대 계획
		F-3	적용 대상 건설사업 심의기준 마련
		F-4	적용 대상 사업유형 다양화
G	계획·실행 요소 마련	G-1	표준모델 개발
		G-2	기술기준(비용, 내역, 공기) 마련
		G-3	건축물(주거) 성능 고도화
3 민간부문 참여 확대 영역			
H	기술 보유 업체 관련 요소	H-1	제작 단위비용 인하
		H-2	공장생산 효율화 지속 추진
		H-3	중장기 관점의 자동화 설비 투자
		H-4	포트폴리오 다변화로 가동율 유지
I	건설사 관련 요소	I-1	도입전략(외주, 내재화) 마련
		I-2	특화상품 개발
		I-3	해외진출 도모
		I-4	적용 분야 다양화

■ 영역별 활성화 역할과 대응

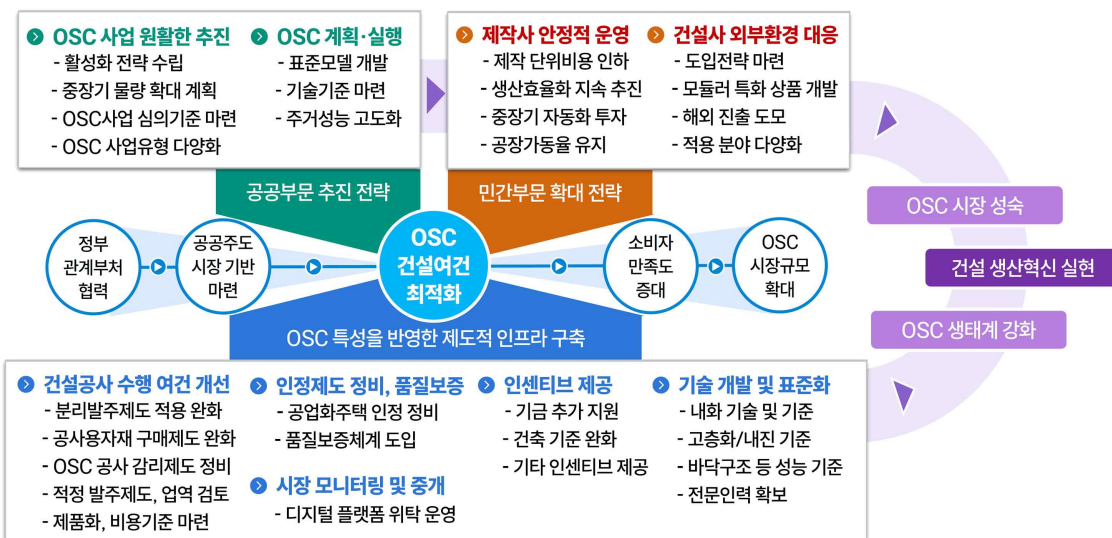
- 정부는 현행 건설공사 관련 다수의 법령이 OSC 공법 적용 공사가 원활하게 진행될 수 있도록 법적 수용성을 높이는 것이 요구됨
 - 현장작업 위주의 건설행위를 지원하는 법령을 마련하고 공장제작까지 포괄하도록 개정함으로써 원활한 사업 진행 보장 필요
 - 이를 위해 사업여건 개선과 직접 관련된 건설공사 관련 제도를 개정하고, 공업화주택 인정제도의 정비, 제품화와 연계된 품질보증체계 도입 고려
 - 개별 사업의 사업성을 조금이라도 올려줄 수 있도록 기금의 추가 지원, 재정 확대, 건축기준의 완화, 세제지원이나 건축비 가산과 같은 인센티브 마련
 - 기술적인 완성도를 높이고 표준화하며, 디지털 플랫폼 운영
- 공공사업을 추진하는 발주기관에게 기대하는 역할 수행
 - 유형 A 기술의 도입 과정에서 있어 시장 형성 시기에는 공공부문으로 하여금 점진적으로 해당 기술을 적용하는 시설물의 발주 물량 늘리도록 하는 ‘공공 주도 전략’을 시행할 수 있음
 - 공공기관에서는 우선적으로 중장기 활성화 전략을 중심으로 점진적인 물량 확대 계획을 명확히 함으로써 업계에 확실한 신호 전달 필요
 - 내부적으로는 해당 기술 적용 사업 심의기준 마련, 적용 대상의 확대 추진
 - 장기건설임대 외에도 정부안에 따라 신규매입임대주택까지 확대
 - 기술적인 측면에서 표준모델을 통해 생산에 있어 소품종 대량생산을 유도하고, 사업성을 높일 수 있는 기회 모색
 - 추가로 공사기간, 비용, 내역과 같은 별도 기술기준 제시
- 민간부문의 경우 민간부문 건설사업자들의 유형 A 기술 관련 산업 참여 확대를 위해 필요한 요소를 기술 보유 업체, 건설사로 구분하여 정리할 수 있음
- 종합건설사의 경우 별도의 도입전략을 구상할 필요가 있음
 - OSC 또는 3D 프린팅 기술이 적용된 사업에서는 발주 금액 축소가 예상됨에 따라 해당 기술을 내재화하여 역량을 갖추거나 외부 업체를 대상으로 파트너십을 구축하도록 함
 - 종합건설사는 특화 상품을 개발함으로써 증가되는 비용/분양가에 대한 우려를 상

쇄할 수 있는 스마트ハウ징의 매력도를 높일 필요가 있음

- 해외 진출을 도모함과 동시에 적용 분야를 다양화할 수 있어야 함
- 기술을 보유한 업체의 경우에도 지속적인 비즈니스 유지를 위한 전략 하에 시장에 진입하고 생산 효율화 작업을 진행하여야 함
 - 우선적으로 공장 또는 장비 운영을 위한 물량을 확보하고 제작 단위비용 인하를 시도함으로써 시장 내에서 가격 경쟁력 확보 필요
 - 생산 효율화를 추진하고 중장기 관점에서 자동화 설비 투자를 계획하도록 함
 - 수주 상황 변동에 유연하게 대처할 수 있도록 OSC 제작업체의 경우 3D 모듈 제작, 욕실 또는 부위별 POD 제작, 1D~2D 부재 제작 등으로 포트폴리오 다변화

■ 활성화 추진 전략

- 유형 A 기술 관련 산업을 본궤도에 정착하고 시장을 일정 규모 이상으로 활성화하기 위해서는 공공부문을 시작으로 민간부분까지 지속적으로 확장되는 방안 필요
- 그 과정에서 해당 기술을 적용할 수 있는 여건을 최적화하기 위해서는 기술 특성을 반영한 제도적 인프라 구축 선행이 요구됨
- 필요한 경우 특별법 제정과 같은 제도적 사항과 기술적 완성도가 결합됨으로써 시장 활성화, 생산방식 전환을 좀 더 앞당길 수 있을 것으로 기대됨



[그림 4-8] 유형 A 기술 중 OSC 산업 활성화 추진 전략

2) 유형 B 기술의 활성화 방안 검토

- 건설로봇, 자동화장비와 같이 작업프로세스 중심으로 적용되는 스마트 시공기술을 유형 B로 구분하고 이들을 활성화하는 방안을 추가로 검토함
- 유형 B에 대해서는 중장기 계획을 기반으로 생산 패러다임 전환 초기 단계 개발 지원, 수요 견인, 기술적·제도적 기반 마련 등 공적 역할을 설정할 수 있음
- 생산혁신 대상 기술 특성에 따른 활용방안을 모색하고, 전략적 상호 교차 벤치마킹으로서 MG/MC 도입 과정을 건설로봇 도입에서 참고할 수 있도록 함
- 전체적으로 공공부문이 할 수 있는 역할을 중심으로 하는 활성화 방안은 아래 그림과 같이 ①중장기 적용 계획 수립, ②기술 개발 지원, ③기술 적용 기회 확대, ④기술 기반 마련 및 생태계 조성 참여 등 4개 영역으로 구분하여 정리할 수 있음

① 중장기 적용 계획 수립	② 기술 개발 지원
<ul style="list-style-type: none"> • (취지) 생산혁신 기술의 공공건설 적용 중장기 전략 작성 • (내용) 기술수준, 공사유형 등에 따른 적용 확대 계획 제시 • (대상) 대상 기술의 속성을 반영하여 현장 무인화, 자동화 실현 • (방식) 시장 생애주기를 고려하여 물량 확대, 파급효과 예측 	<ul style="list-style-type: none"> • (취지) 생산혁신 기술 개발을 위한 수요 확인 및 여건 지원 • (내용) 공공건설 적용가능성 높은 분야(공중) 니즈 반영 유도 • (직접) 정부기관 연계 유망기술 개발 프로그램 참여 및 공동 지원 • (간접) 기술 검증을 위한 여건별 실증현장 제공, 우수기술 선정
③ 기술 적용 기회 확대	④ 기술 기반 마련 및 생태계 조성 참여
<ul style="list-style-type: none"> • (취지) 초기 시장 형성 공공부문 물량 제공 및 민간 확대 기반 마련 • (초기) 기술형입찰, 민간참여사업 사업자 선정 평가항목 신설 • (확대) 일반공사(중심제) 가점항목, 정규항목 추가, 인센티브 제공 • (방식) 스마트건설기술 활용 비율부터 무인화/자동화기술 특정 	<ul style="list-style-type: none"> • (취지) 설계/시공기술 표준화, 적정 거버넌스 구축 지원 • (기술) 자체 전문시방서 내용 개정, 비용산정기준 신설 • (산업) 공급/수요 주체 사이의 네트워크 구축 • (효과) 수요자의 자발적 채택 유도 및 시장 활성화 지원

[그림 4-9] 유형 B 활성화 방안 및 공공의 역할

5.4 건설인력에 대한 영향

■ 검토 총괄

- 스마트 시공기술의 적용은 직접적으로 ‘현장 인력의 대체’ 효과를 가져올 수 있음
- 아울러 새로운 기술의 도입에 따라 새로운 인력 수요가 생기거나, 기존 인력의 역할에 변화가 발생할 수 있음
- 그에 따라 “인력”에 대한 내용은 기능인력과 관리인력의 구분없이 ①현재 인력에 있어 예상되는 대체효과, ②새롭게 추가되는 인력 분야, ③스마트 시공기술 분야별 전문인력 양성을 위한 방안 등으로 구분하여 정리하였음

■ 스마트 시공기술별 영향

- OSC 공법을 통해서도 현장 작업자는 10~25% 줄어들고, 공장 작업자가 5~15% 늘어나면서 기능인력 투입을 감축할 수 있는 기회를 제공할 수 있음(McKinsey, 2019)
 - 모듈러 건축을 시행하는 RAD Urban은 현장인력의 85~90%를 현장 작업 대비 2배 수준으로 생산성을 높일 수 있는 공장에 투입하는 것으로 목표로 설정하였으며, 장래 10배 정도 생산성 향상시킬 수 있는 자동화를 다음 단계로 고려함

[표 4-25] 모듈러 확산에 따른 인력예의 영향

- 모듈러 건축에서 80%의 인력작업이 공장으로 이전
- 가장 노동집약적이면서 고가의 작업(기계, 전기, 배관 등) 등이 저가의 공장제작 인력에 의해 수행되어 노무비를 줄일 수 있게 됨
- 공장에서 표준화, 자동화, 통제된 운영 환경 하에서 비작업시간(비가동시간)을 줄여 생산성을 두 배로 향상 가능
- 현장에서의 모듈 조립에도 저숙련 인력이 투입되어 노무비 저감 가능
- 현장에서 25%의 시간만이 가치(value) 창출에 사용되는 반면, 공장에서는 75%의 시간에서 가치가 창출된다는 분석결과가 있음
- 전체적으로 보았을 때, 탈현장으로의 전환을 통해 최대 25%까지 노무비를 줄일 수 있으며 금액이 큰 전기, 배관, HAVC 설치가 공장으로 이전되는 경우 보다 현실적으로 가능해짐

- 건설분야에 벽돌 쌓기, 용접 등 특정 공정에서 로봇 도입 시 투입 인원을 획기적으로 줄일 수 있으며 직접 노무비의 약 35%까지 절감할 수 있을 것으로 예상하고 있음
 - 안전사고의 경우에도 위험한 작업을 로봇이 대체하면서 사고율이 45% 감소했다는

결과가 보고되고 있음

- 3D 프린팅 기술의 적용을 통해서는 보다 큰 효과를 기대할 수 있으며, 전통적인 방식 대비 인력을 최대 80%까지 줄일 수 있는 것으로 나타남
 - 아울러 공사기간 역시 30% 가깝게 단축이 가능하고, 재료의 낭비를 60% 이상 저감함으로써 폐기물 감소 효과도 예상할 수 있음
- MG/MC 기술의 경우 운전자가 자체적으로 정밀 시공을 수행함에 따라 보조인력이 불필요해지고, 별도의 장비 컨트롤룸에서 원격제어가 가능해지면 지금보다 소수 인원으로 다수의 장비 작업을 시행할 수 있게 됨
 - 직접 노무비를 평균적으로 35% 절감할 수 있고, 안전사고 역시 45% 감소되는 것으로 관찰되었음

[표 4-26] 스마트 시공기술별 인력 측면의 신규 수요 검토

기술 구분	공종별 감소 수요	신규 수요
OSC	현장 철근공, 거푸집공, 콘크리트 타설공	<ul style="list-style-type: none"> • OSC 공법 적용 시설물 설계자, DfMA 전문가 : OSC 공법 반영 설계, 생산효율과 현장조립을 반영한 설계 전문가 • 공장 제조 관리자 : 일반 제조업과 유사하나 건설 분야 공정, 자재수급, 품질관리 담당 인력 • 운송, 양중 코디네이터 • 현장조립 기술자 : 공장 제작물을 오차없이 현장 조립하는 숙련 기술자
건설로봇	도장공, 미장공, 용접공, 단순 노무자	<ul style="list-style-type: none"> • 로봇 오퍼레이터 : 현장 투입 로봇의 세팅, 실시간 모니터링 전문가 • 현장 로봇 유지보수 기술자 : 로봇 수시 정비, 투입 전 성능 확인 전문가 • 로봇 작업 경로 설계자 • 로봇-인간 협업 코디네이터 : 작업 안전성을 고려한 협동 로봇 운영, 안전 가이드 관리
3D 프린팅	조적공, 미장공, 거푸집 설치공	<ul style="list-style-type: none"> • 3D 모델링 전문가 • 특수 배합 콘크리트 품질 관리자 • 프린팅 시스템 제어 엔지니어
MG/MC	측량 보조원, 숙련 장비 조종사(일부)	<ul style="list-style-type: none"> • 디지털 측량 데이터 분석가 : 지형 데이터 디지털화 • GNSS/센서 및 데이터 관리자 : 건설기계 센서 데이터를 통해 시공오차 검토, 실시간 작업효율 분석 전문가 • 3D 토공 모델러

■ 신규 인력 수요 전망

- 단순 반복작업에 투입되어 왔고, 육체적 강도가 높은 기능인력들의 수요가 줄어들고, 현장에서 스마트 시공기술을 운영하고 데이터를 관리하는 ‘스마트건설 관련 인력’의 수요가 늘어날 것으로 예측할 수 있음

■ 전문 인력 양성

- 기술별 전문인력 양성을 위해서는 단순한 기능 교육과 실습에서 나아가 스마트 기술과 건설 지식이 융합된 커리큘럼이 요구됨

① 디지털 도구 숙련도 강화

- BIM 교육 : BIM 데이터는 모든 스마트 기술의 기본 기술로서, 현장 관리자는 BIM 모델을 보고 장비나 로봇에 작업 지시를 내릴 수 있도록 역량 강화 필요
- 장비 시뮬레이터 활용 : MG/MC 장비나 로봇 운용을 위해 VR 시뮬레이터를 활용한 가상 훈련을 도입하여 숙련도를 조기 확보 도모

② 기관별 커리큘럼 개편

- 대학 교육 : 토목/건축 공학 전공에 로봇 공학, 데이터 사이언스, 프로그래밍을 결합한 스마트 건설 전공을 신설
- 직업 전문학교 : 기존 기능 위주의 교육에서 '건설기계 자동화 제어', '모듈러 생산관리' 등으로 관리자 역량 교육 추가

③ 현장 재교육 및 자격 체계 정비

- 기존 숙련공 업스킬링 : 현장 경험이 풍부한 기존 기능 인력이 스마트 장비를 조작할 수 있도록 '스마트 건설 기능 마스터와 같은 전환 교육 프로그램 운영
- 국가직무능력표준(NCS) 개편 : 스마트 건설기술별 새로운 자격증 체계 마련 등을 통해 공식적인 전문인력 인정방식 정립

제5장 결 론

1. 연구 주요 결과

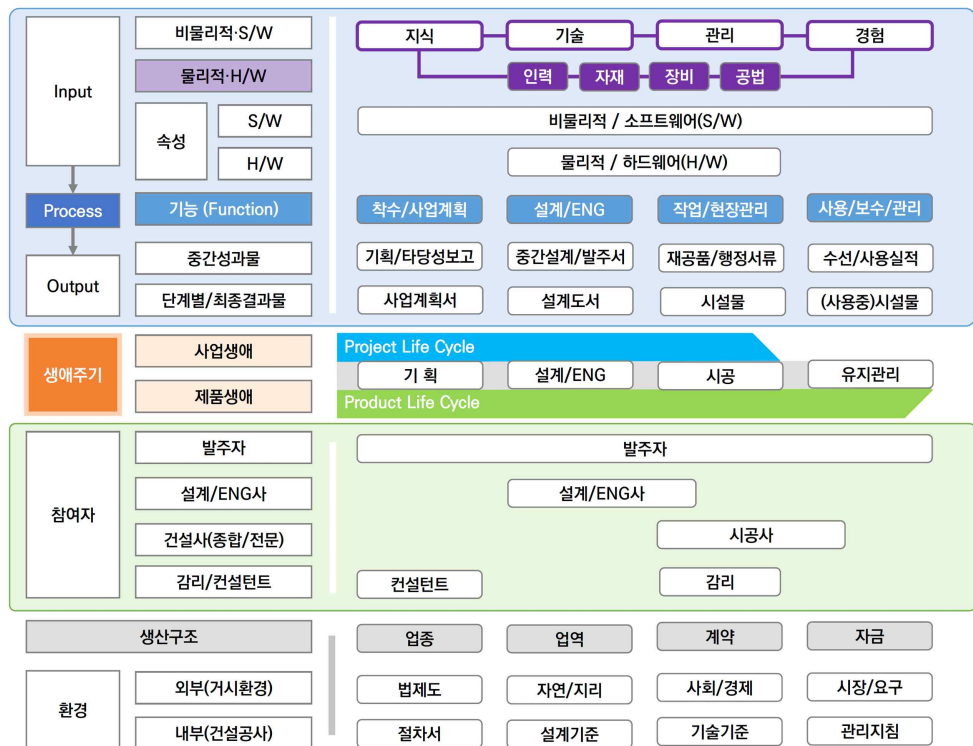
■ 스마트건설과 건설자동화, 스마트 시공기술

건설자동화는 스마트건설의 부분 영역으로서 ‘건설 장비의 자동화된 작업 지원과 함께 통신 기술과 소프트웨어적 기술을 적용한 건설관리, 현장 무선관리 체계, 감리까지 포함하는 모든 건설 활동’을 대상으로 함

- 스마트 시공기술은 “시설물 건조와 관련되어 물리적인 작업을 동반하는 건설 생산과 관련된 기술”로서 OSC 공법, 로봇틱스, 자동화장비, 3D 프린팅 등이 해당됨

■ 스마트 시공기술과 건설생산체계

스마트 시공기술은 건설생산체계의 입력요소 가운데 인력, 자재, 장비, 공법 등 물리적 요소들에 있어 인력의 대체, 무인화, 자재의 변경, 장비의 자동화, 공법의 신규화 등을 도모하는 것임



[건설생산체계와 구성요소]

■ 스마트 시공기술의 특징

스마트 시공기술은 해당 기술의 결과물이 최종시설물에 포함되는지, 생산활동 시점에 임시적 도구로 사용되었는지 여부에 따라 유형이 구분됨

- OSC 공법, 3D 프린팅의 경우 작업 결과물이 시설물의 일부가 되며, 계획과 설계단계에 해당 기술의 적용 여부가 결정되며 발주자(건축주, 시행자)가 주관이 됨 (☞ 유형 A)
- 건설로봇, 자동화장비의 적용은 종합건설사 또는 전문건설사가 주관하고, 발주자의 기준에 적합하도록 진행하며, 경우에 따라 설계에서 필요한 사항 반영 (☞ 유형 B)

[스마트 시공기술 특성 비교]

구 분	유형 A		유형 B	
	OSC	3D 프린팅	건설로봇	자동화장비
설계포함 여부	●	●	▲	▲
기술적용 주관	발주자	발주자	종합·전문건설사	전문건설사
인력대체 효과	하	상	상	중

건설자동화는 ①완전 수작업에서부터 연장, ②공구를 사용하는 단계, ③수동 조정 장비를 사용하는 단계, ④원격 조정 장비를 활용하는 단계, ⑤사전 프로그램 설정으로 운용되는 장비를 사용하는 단계, ⑥장비 자체가 주변 환경을 인지하여 작업을 하는 단계까지 진행될 수 있음

■ 국내외 생산시스템 전환 추진 정책 동향과 적용 수준

국내에서는 『스마트 건설기술 로드맵(2018)』, 『스마트 건설 활성화 방안(2022)』, 『제2차 국토교통과학기술 연구개발 종합계획(2023~2032)』 등에서 건설기계 자동화, 로봇 도입, 제조업 기반 탈현장 건설(OSC) 활성화 등을 중장기적 실현과 관련 산업 육성을 추진함
영국에서는 생애주기비용 절감(33%), 사업기간 단축(50%) 등을 목표로 『Construction 2025』을 추진하고, MMC 개념을 통해 건설생산 혁신 도구들을 통합적으로 관리함

일본 국토교통성은 'i-Construction 2.0'을 통해 2040년까지 건설현장 노동력 절감 30%를 위한 '자동화'를 적극 추진하며, 싱가포르의 ITM 하에서 DfMA, 로봇틱스를 전략적으로 추진하고 의무화 사항과 다양한 인센티브를 병행하고 있음

스마트 시공기술은 국내 주요 대형건설사업자 중심으로 기술개발과 적용이 시도되고 있으며, OSC(평균 31.3%), 시공자동화(평균 7.8%) 외에는 활용 실적이 부진한 상황임

- 향후 공장제작, 모듈화, 시공자동화, 건설로봇에 대한 투자 비율 증대 계획 보유

■ 스마트 시공기술 동향과 활성화 요구

기술명	OSC, 모듈러, 공업화주택	
주요 동향	시장 동향	• 모듈러 시장 2024년 5,637억원(2023년 8,064억원), PC 시장 연간 1.5조원
	적용분야 다양화	• 공공/민간, 건축/토목, 주거/비주거, 부대시설, 임시, 수출용, 재료/공법 복합
	고층화/대공간화	• 구조성능 확보와 중고층 사례 확대, 재료와 제작범위 반영 요구사항 최적화
	한국형모델 확립	• 바닥난방, 우수한 주거성능 기반으로 K-Modular Housing 발전
	공공주도 활성화	• 공공물량 점진 증대, 표준화 추진, 제품화로 대량생산/비용절감 기반 마련
		
장애 요인	<ul style="list-style-type: none"> • 고층화 관련 기술력 한계 및 인력 부족 • 규모의 경제 미확보, 높은 공사비에 의한 경제성 부족 • 현장생산 기반 제도 환경에 의한 OSC 사업 추진 어려움 	
추진 전략	<ul style="list-style-type: none"> • 분리발주, 공사용자재구매, 감리, 인증 관련 제도 정비 • 사업성 향상을 위한 인센티브 부여, 금융 지원 • 건설산업 밸류체인 혁신 및 민간부문 활성화 추진 	

기술명	건설로봇, 로봇틱스	
주요 동향	시장 동향	• 국내 시장 규모는 점진적으로 성장하여 2030년 2,920억원 수준으로 예측
	현장 적용 확대	• 기술개발, 현장실증에서 나아가 국내외에서 대형사 중심 상용화, 적용 확대
	활용 범위 확대	• 단일작업, 반복작업 대체에서 다용도, 보조, 범용로봇 개발 및 적용 노력 확산
	로봇 유형 변경	• 인간과 동일 공간에서 협력하는 협동로봇 확대, 휴머노이드 적용 가능성 검토
	공공 기대 효과	• 생산성 증대, 일정 단축, 근로자부족/고령화 대응, 재해 방지 및 고품질 지향
장애 요인	<ul style="list-style-type: none"> • 초기 투자비용, 기술성숙도 미흡 등으로 산업 전반의 참여 부진 • 현장의 특성이 반영된 건설형 안전·성능 기준 미비 • 공공부문 입찰평가제도 부재 및 개발기술의 실증 기반 부족 	
제도 개정 요구	<ul style="list-style-type: none"> • 공공발주 및 입찰제도 개선을 통한 로봇 적용 활성화 도모 • 건설로봇 관련 안전기준 및 인증체계 마련 • 기술 개발 및 현장 실증 지원 체계 강화 	

기술명	3D 프린팅, 적층 제조, AM	
주요 동향	시장 동향	• 세계 건설분야 3D 프린팅 시장은 2030년 42억달러 예측(연평균 111% 성장)
	적용사례 증가	• 미국, 유럽, 중국, 두바이 등 적극 개발, 상용화로 건축물, 교량 등 사례 증가
	초기 관심단계	• 국내는 정부, 산·학·연이 비주거조형물, 소규모 건축물 중심 개발, 실증 추진
	기술개발 지속	• 프린팅 재료, 장비, 적용 대상, 품질관리 체계 등 측면에서 연구개발 지원
	공공 기대효과	• 기간 단축, 인건비·건설비 절감, 친환경 건축, 맞춤형 건축, 설계/디자인 혁신
장애 요인	<ul style="list-style-type: none"> • 적층 소재, 대형장비, 검증 체계 등 기술적 요소 보완 필요 • 법적 구조물 인정을 위한 건축법, 기술기준, 표준화 미비 • 투자비 과다, 수요부족, 생태계 미성숙 등 경제·사회적 요인 미흡 	
제도 개정 요구	<ul style="list-style-type: none"> • 건축법 개정을 통해 '적층 제조 기반 건축물' 인정 • 검증기준(강도, 내진), 안전기준(내구성, 화재), 표준 제정 • 유망기술 정책적 지원, 공공부문 선도 및 생태계 구축 	

기술명	자동화장비, 머신가이던스, 머신컨트롤	
주요 동향	시장 동향	• 완전자동화시스템 기반 건설기계 전체작업 수행은 2040~50년 가능으로 예측
	실증사업 수행	• 스마트건설기술개발사업에서 디지털 기반 도로 건설장비 자동화 기술 실증 완료
	시범사업 실시	• 스마트시티 국가시범도시(5-1생활권)에서 건설자동화 시범사업 실시, 성과 분석
	후속작업 진행	• 기술 적용대상 공사 점진적 확대, 건설기계 통합관리 솔루션 개발 등 고도화
	공공 기대효과	• MG 시범사업에서 작업소요시간 단축, 생산성 향상, 원가 절감 효과 검증
기술 보완	<ul style="list-style-type: none"> • 원격조종, 완전 자동화 등 무인운전에 대한 제약 해소 필요 • 대기업 위주의 적용에서 중소기업, 스타트업 기술력 강화 도모 • 현장별 맞춤형 건설자동화 장비 적용 및 통합 관리 기술 개발 	
추진 사항	<ul style="list-style-type: none"> • 건설기계 무인운전 특례, 장비 인증 제도 마련 • 안정적 장비 운영을 위한 전문인력 양성 • 기업 차원의 현장적용 부담 완화를 위한 제도적 장치 제공 	

■ 생산시스템 전환 미래상과 추진 목표

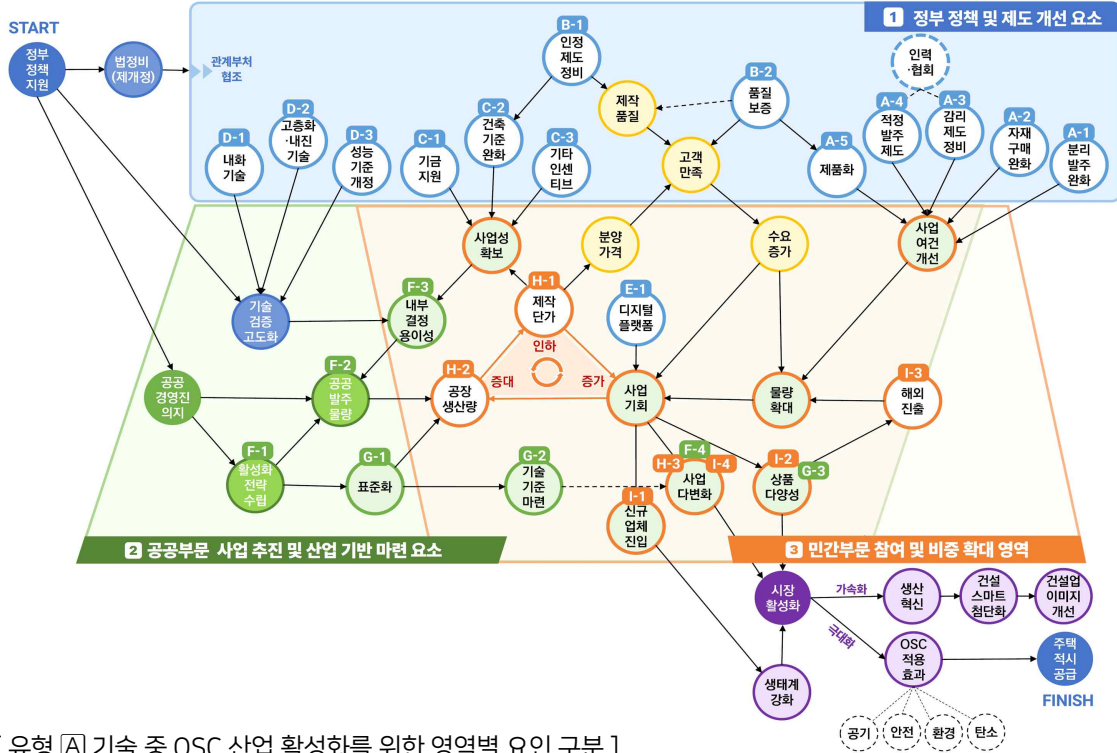
‘첨단생산’ 실현을 위해 탈현장, 무인화, 자율화, 창의적 등의 핵심주제를 두고 공장화, 부품화, 무인로봇, 3D 프린터 도입, 자율형 장비 등의 적용을 전략목표 하에 추진하도록 함

구 분	가치 변화		생산 및 일하는 방식	
	과거 가치	미래 가치	현재 방식	미래 방식
스마트한 첨단생산 OSC 건설로봇 3D 프린팅 자동화장비	노동집약	기술집약	• 노동집약적 비효율적 생산	• 기술집약/자본집약적 생산 변모 • 건설 생산성 제고
	현장생산	탈현장	• 현장 중심 공사 진행	• 공장화, 부품화, 제품화 • 현장 작업 최소화
	성력화	무인화	• 인력 기반 작업	• 자동 무인로봇, 장비 인력 대체 • 연중무휴, 24/7 현장 운영
	획일적	창의적	• 제한된 공법, 재료 사용	• 자유롭고 다양한 구조물 공급 • 스마트시공 최적 재료·공법
	인력 통제	자율화	• 탑승 운전자 조작 운영	• 원격 장비 운영 • 자율주행 지능형 장비 활용 지향
	일회성/고정	다회성/이동	• 공간 점유 및 단기 내용연수	• 장수명 개념의 스마트건축 지향

전략목표	전략과제	총괄 실행과제	추진목표
<ul style="list-style-type: none"> • 생산 혁신을 통한 건설의 재정적 • 건설 이미지 전환 • 업계 전반에서 생태계 조성 	<ul style="list-style-type: none"> • 생산기술 적용 물량 지속 확대 • 기술적 검증을 통한 적용가능 대안 확보 • 법제도적, 인적, 조직적 환경 조성 	<ul style="list-style-type: none"> • 탈현장, 탈인력을 위한 기술 적용 확대 (검토, 검증, 확대, 표준화) 	[총 괄] <ul style="list-style-type: none"> • 2035년 자동화를 50% <ul style="list-style-type: none"> ➔ 스마트 시공기술 적용 작업비용 비율 [단계별 OSC 적용 사업비율] <ul style="list-style-type: none"> • (중기) 전체 6% • (장기) 전체 10% • (정착기) 전체 20% [생산성] <ul style="list-style-type: none"> • (장기) 상승(+) 반전 ➔ (정착기) 30% 증가

■ 스마트 시공기술 활성화 방안

유형 A(OSC, 3D 프린팅) 기술이 건설업계에서 자리잡기 위해서는 정책/제도환경 마련, 공공부문 사업여건 개선, 민간부문 비중 확대 등이 병행될 필요가 있음



[유형 A 기술 중 OSC 산업 활성화를 위한 영역별 요인 구분]

유형 B(건설로봇, MG/MC)에 대해서는 중장기 계획을 기반으로 생산 패러다임 전환 초기 단계 개발 지원, 수요 견인, 기술적·제도적 기반 마련 등 공적 역할을 설정할 수 있음

2. 향후 연구 사항

- 스마트 시공기술의 경우 건설생산 패러다임을 전환함으로써 궁극적인 건설 혁신의 도구가 될 수 있으며, 현재 기술 도입 초기단계로서 시장 활성화를 위한 기술적, 제도적 환경 마련 진행에 대한 지속적 모니터링이 요구됨
 - OSC의 경우 공공에서 검증된 생산체계가 민간부문으로 확대될 수 있도록 시설물 성능과 비용적인 측면을 보완할 수 있는 연구가 요구됨
 - 기술 검증과 제도 정비가 병행되어야 하는 건설로봇과 3D 프린팅의 경우 실증 위주의 연구를 수행함으로써 기술 기준, 내외부 제도 개정안 작성 필요

참고문헌 References

〈일반 참고문헌〉

- 과학기술정보통신부(2024), 『2024년 3D프린팅산업 실태조사 보고서』
- 과학기술정보통신부(2020.10), 『2020년도 3D프린팅산업 진흥 시행계획(안)』
- 과학기술정보통신부 외 7개 정부부처(2019.02), 『2019년도 3D프린팅산업진흥 시행계획』
- 관계부처 합동(2021.03), 『2021년 3D 프린팅산업 진흥 시행계획』
- 관계부처 합동(2020.06), 『제2차 3D프린팅산업 진흥 기본계획 2020-2022』
- 국가과학기술심의회(2014.04), 『3D프린팅 산업 발전전략(안)』
- 국토교통과학기술진흥원(2015.09), 『건축물 대상 3D 프린팅 장비 및 설계기술 개발 기획 최종보고서』
- 국토교통부(2023), 『제7차 건설기술진흥 기본계획 (2023~2027)』. (국토교통부 고시 제 2023-809호, 12월 19일 고시)
- 국토교통부, 한국건설기술연구원(2023). 『스마트건설 얼라이언스』 출범과 첫 총회 개최. 국토교통부 보도자료 (11월 23일 등록)
- 국토교통부(2024), 『올해의 첨단 스마트 건설기술, 2024 스마트건설 챌린지에 도전하세요』, 국토교통부 보도자료
- 국토교통부(2022), 『스마트 건설 활성화 방안 (S Construction 2030)』
- 국토교통부(2023), 『기술형 입찰, 유찰은 줄이고 기술력은 높이고』, 국토교통부 보도자료
- 국토교통부, 『제6차 건설기술진흥기본계획 2018-2022』
- 국토교통부(2020). 『스마트 건설 활성화 로드맵. 국토부 정책자료』
- 산업통상자원부(2021), 『유럽 및 독일의 3D 프린팅 산업 동향』
- 삼성물산 현대건설(2023.04.11), 『건설 로봇 분야 에코시스템 구축 및 공동 R&D MOU』 (보도·기사)
- 이데일리(2023), 『국토부, 기술형 입찰 내 단독 응찰 평가방법 절차 신설』, 이데일리
- 한국건설기술연구원(2020), 『건설 로봇 시장 및 기술동향』
- 행정안전부(2022), 『제4차(23~27) 재난 및 안전관리 기술개발 종합계획』. 행정안전부

보도자료 (12월 15일 발표)

<국외 자료>

- 国土交通省(2024), 『i-Construction 2.0 - 建設現場のオートメーション化』
- 国土交通省(2024), 『請負工事成績評定要領の運用の一部改正について_2024』
- 国土交通省(2023), 『国土交通省直轄工事における総合評価落札方式の運用ガイドライン』
- 国土交通省(2022), 『公共工事の入札契約方式の適用に関するガイドライン 【本編】』
- BCA(2025), 『Media Factsheets - Annex A : Update on Built Environment Industry Transformation Map (BE ITM) Progress』
- Brosque, C., & Fischer, M. (2022), “Safety, quality, schedule, and cost impacts of ten on-site construction robots”, 『Construction Robotics』, 6(2), 163-186
- Texas A&M College of Architecture (2025.07.12), 『Embracing Construction Robotics: The Future of Construction Field Operations』 (설계·계획·품질관리 단계의 AI·로봇 활용)
- Wu, S. (2024), 『Understanding stakeholders’ intention to use construction robots』
- Zielinski, K., Tadeja, S., Blumberg, B., & Kjærgaard, M. B. (2025), 『Using Mobile AR for Rapid Feasibility Analysis for Deployment of Robots: A Usability Study with Non-Expert Users. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.14725>』
- McKinsey (2017), “Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity” Heidelbergcement, Germany, <https://www.heidelbergcement.com/en/pr-29-09-2020>
- COMPASS (2019), “Global Construction Yearbook”
- MARKETSANDMARKETS, 3D PRINTING CONSTRUCTION MARKET, GLOBAL FORECAST TO 2024.
- ICON, <https://www.iconbuild.com/contact/home>
- Shapeways, <https://www.shapeways.com/>
- Winsun, <http://www.mayidida.com/>
- Nguyen, V.T., & Khuc, T.Q. (2025). Decoding the structural interrelationships of

- barriers to 3D printing adoption in construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*.
- Dhamak, P., Daftardar, A., & Aital, P. (2025). Construction 4.0 technologies in the construction industry: Opportunities and challenges. *Journal of Science and Technology Policy Management*.
- Iyoha, P., Nejat, A., & Mostafavi, S. (2024). Systematic review on 3D printing for disaster-resilient housing. *SSRN Electronic Journal*.
- Corsini, L., & Terzioğlu, N. (2025). Digital circular economy and Industry 4.0 applications in construction. *AAU Journal of Technology and Society*.
- Rezapoor, D. (2025). China's cooperation on Industry 4.0 including 3D printing technologies. *Central Eurasia Studies Review*.
- ICON (2023). Affordable 3D printed housing project in Texas. *ICON Official Report*.
- COBOD (2024). European office building construction with 3D printing. *COBOD Case Study*.
- WinSun (2023). Demonstration project on 3D printed housing in Shanghai*. *Company White Paper*.
- MarketandMarkets (2024). 3D Printing Construction Market – Global Forecast 2030. *Market Research Report*.
- Buswell, R.A., Leal de Silva, W.W.R., Jones, S.Z., & Dirrenberger, J. (2020). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37–49.
- Perrot, A., Rangeard, D., & Pierre, A. (2016). Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*, 49(4), 1213–1220.
- Wolfs, R., Bos, F., & Salet, T. (2019). Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on mechanical performance. *Cement and Concrete Research*, 119, 132–141.
- Paul, S.C., Tay, Y. W. D., Panda, B., & Tan, M. J. (2018). Fresh and hardened

properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 18(1), 311–319.

Lim, S., Buswell, R.A., Le, T.T., Austin, S.A., Gibb, A.G., & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. Automation in Construction, 21, 262–268.

KICT (2023). 3D Printing Construction RW&D Roadmap in Korea. 한국건설기술연구원 보고서.

UAE Ministry of Infrastructure Development (2019). Dubai 3D Printing Strategy 2030. Government Policy Report.

European Commission (2021). Horizon Europe Work Programme: Climate, Energy and Mobility. EU Official Publication.

ASTM International (2021). Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (ASTM F2792*).

ISO/ASTM (2019). 52900: Additive manufacturing — General principles — Terminology

〈웹사이트〉

건설공사 안전관리 종합정보망(<https://www.csi.go.kr>) (2024.09.11. 최종 접속)

국토안전관리원 국토안전 데이터(<https://bigtori.kalis.or.kr>) (2024.09.11. 최종 접속)

공공데이터포털(<https://www.data.go.kr>) (2024.09.11. 최종 접속)