



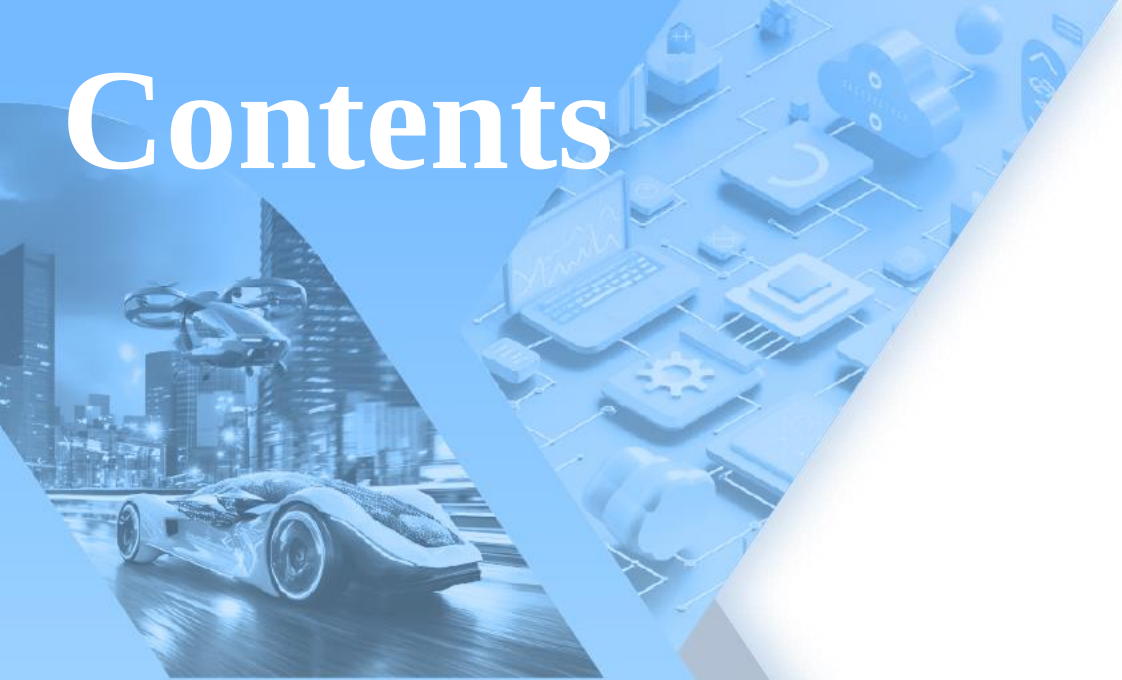
FIX All on AI
Future Innovation tech eXpo Conference 2025

AI 자율제조와 뿌리기술 혁신



이 호 진 (hlee3@kitech.re.kr)
한국생산기술연구원 대경기술실용화본부
2025. 10. 23.

Contents



I

자율제조 개념

II

AI 자율제조 필요성

III

뿌리기술 혁신 필요성

IV

AI 자율제조 동향

V

개발사례 1 : 3D프린팅 공정 지능화

VI

개발사례 2 : 가공공정 디지털 트윈



1. AI 자율제조 개념

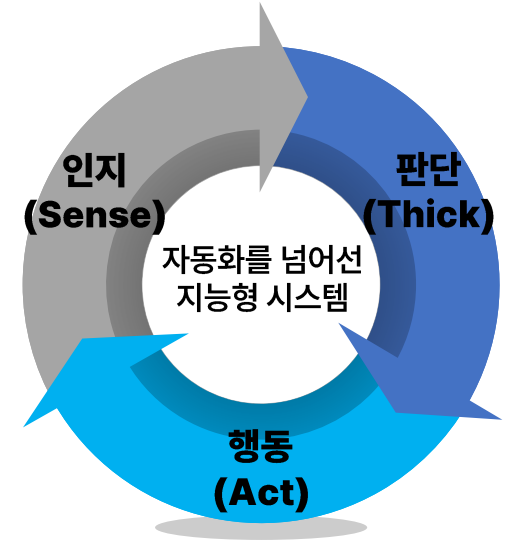
배경

글로벌 공급망 불안정, 인건비 상승, 숙련공 부족, 다품종 소량생산 확대 등으로
기존의 대량생산 중심 제조 체계는 한계에 직면

개념

AI 데이터 기반 기술을 활용하여 인간의 개입 없이 공정 상태를 인식하고,
스스로 판단 의사결정 제어를 수행하는 제조시스템

핵심 키워드 : 자율적 판단, 실시간 최적화, 폐루프 제어(Closed-loop Control)



1. AI 자율제조 개념

자율제조는 첨단 기술이 융합되어 구현되는 **지능형 제조 시스템**으로,
센서·데이터 수집, AI·머신러닝 분석, 디지털 트윈, 자율 제어 로봇 기술이 유기적으로 결합될 때,
스스로 데이터를 해석하고 **문제를 진단하며, 즉각적으로 대응**할 수 있는 완전한 자율 지능형 시스템으로 진화한다.

요소기술

센서 및 데이터 수집 기술



IoT, 머신비전, 열화상
등으로 공정 상태
실시간 모니터링



AI·머신러닝 기반 분석 기술

이상 탐지, 결함 예측,
공정 최적화 수행

디지털 트윈 기술



가상 시뮬레이션을
통해 실제 공정을
예측 및 제어

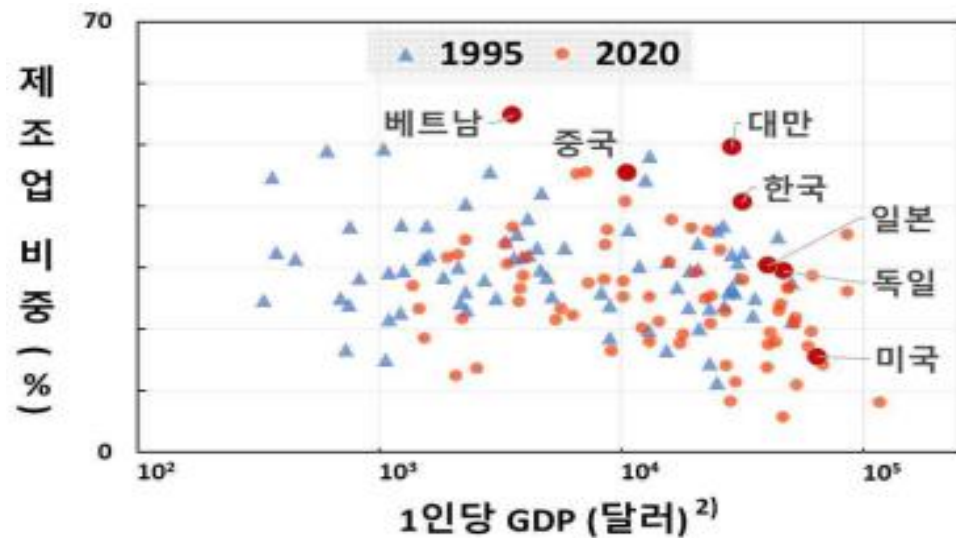
자율 제어 로봇 기술



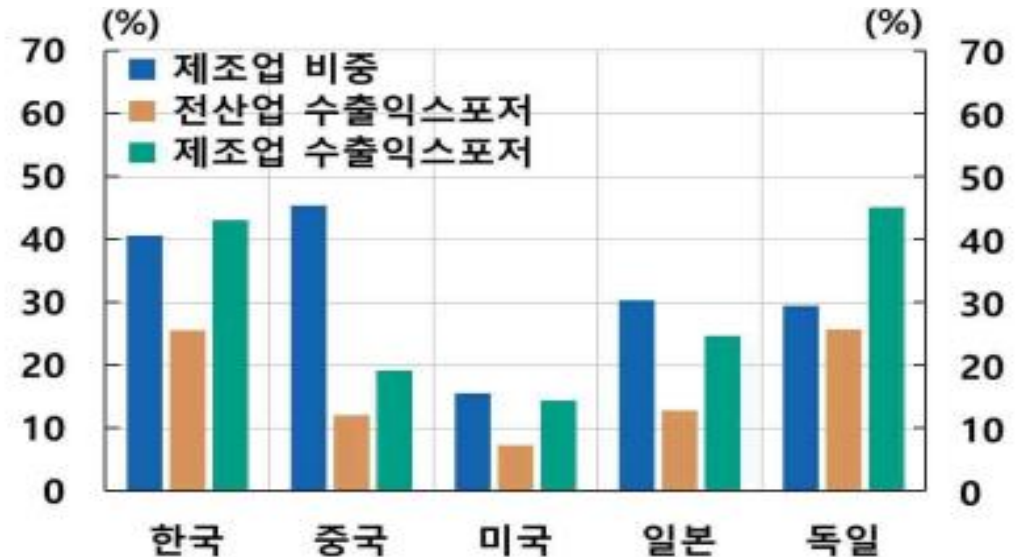
인간의 개입 없이 최적
경로, 조건을 스스로
판단하여 조정

2. AI 자율제조 의 필요성

- 제조업은 한국의 경제의 핵심 축으로, 국민 경제에 높은 부가가치를 창출
- 대한민국 제조업은 주요국 중에서도 수출의존도가 지속적으로 높은 산업임**
 - ▶ 2020년 기준 한국의 제조업은 GDP의 약 27%를 차지해 OECD 평균(14%)의 두 배에 달하며, 팬데믹 이후에도 제조업 수출 의존도는 약 47% 수준으로 여전히 높게 유지되고 있는 것으로 분석된다.



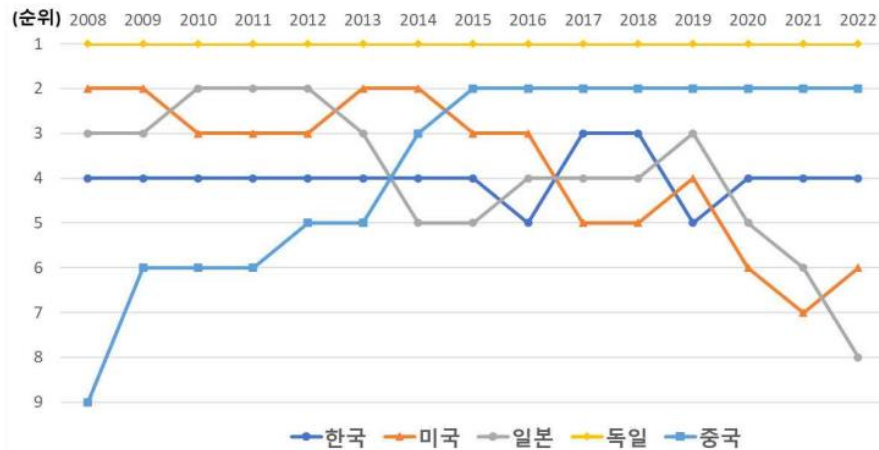
[국가별 소득수준 및 제조업 비중]
한국은행(2024)



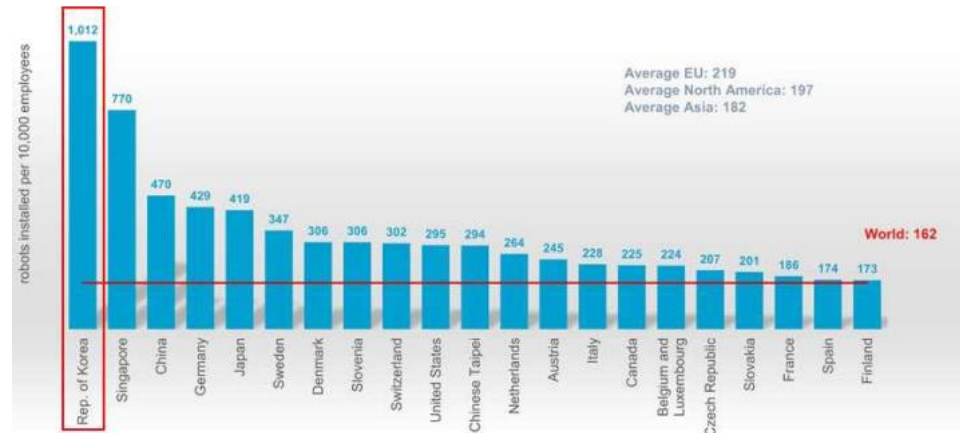
[주요국 제조업 비중 및 수출 의존도]
한국은행(2024)

2. AI 자율제조 의 필요성

- 한국의 제조업 경쟁력 지수는 꾸준히 상승
- 제조업 자동화 수준의 척도인 산업용 제조 로봇의 밀도는 **세계 최고 수준**
 - ▶ 유엔산업개발기구(UNIDO)에서 발표하는 **제조업 경쟁력 지수(Competitive Industrial Performance)**에서 한국은 2014년 일본을 처음 역전하여 **2022년 기준 4위권 유지 중**
 - ▶ 국제로봇연맹(IFR)에서 발표하는 국가별 로봇 밀도에서 **한국은 전자·자동차 산업에서의 대규모 로봇 활용을 기반**하여 2018 ~ 2019년을 제외(싱가포르 1위)하고는 **2010 ~ 2023년 세계 1위 달성**



[제조업 경쟁력 지수로 본 한국의 글로벌 경쟁력 추이]
유엔산업개발기구(UNIDO)

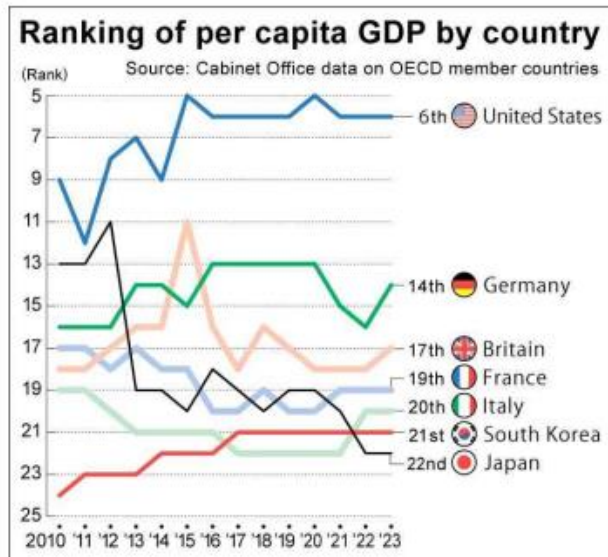


[국가별 제조 산업에서의 로봇 밀도(2023년 기준)]
International Federation of Robotics(2024)

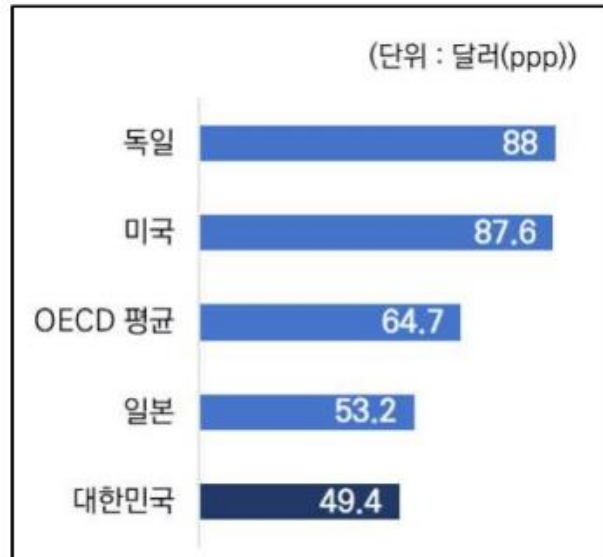
2. AI 자율제조 의 필요성

- 경제협력개발기구(OECD) 국가 기준 한국의 1인당 GDP는 평균 수준이나, 시간당 노동생산성 수준은 **최하위권**

▶ 한국의 1인당 GDP는 과거 지속 상승하여 2017년부터 OECD 국가 중 21위를 유지하고 있으나, 시간당 노동생산성은 \$ 49.4로 타 제조 강국(독일 \$ 88, 미국 \$ 87.6)에 비해 매우 낮은 상황



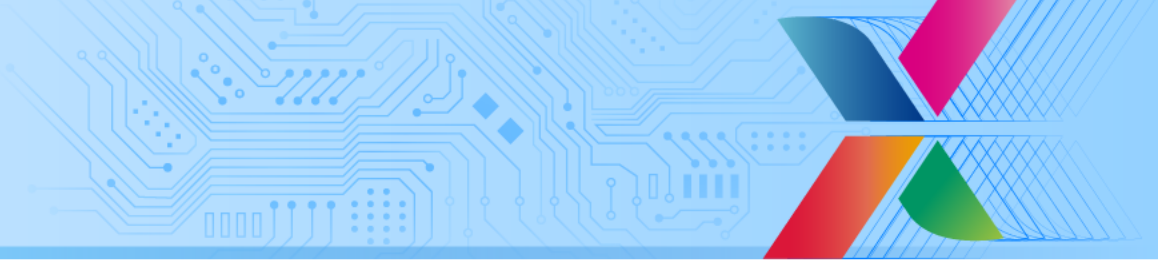
[OECD 국가별 1인당 GDP]
아사히신문(2024)



[OECD 국가별 시간당 노동생산성(2022년 기준)]
국회예산정책처(2023)

노동 생산성을 끌어올리기 위해 로봇을 가장 활발하게 활용 하지만, 생산 효율은 그에 미치지 못하는 역설적인 상황

2. AI 자율제조 의 필요성



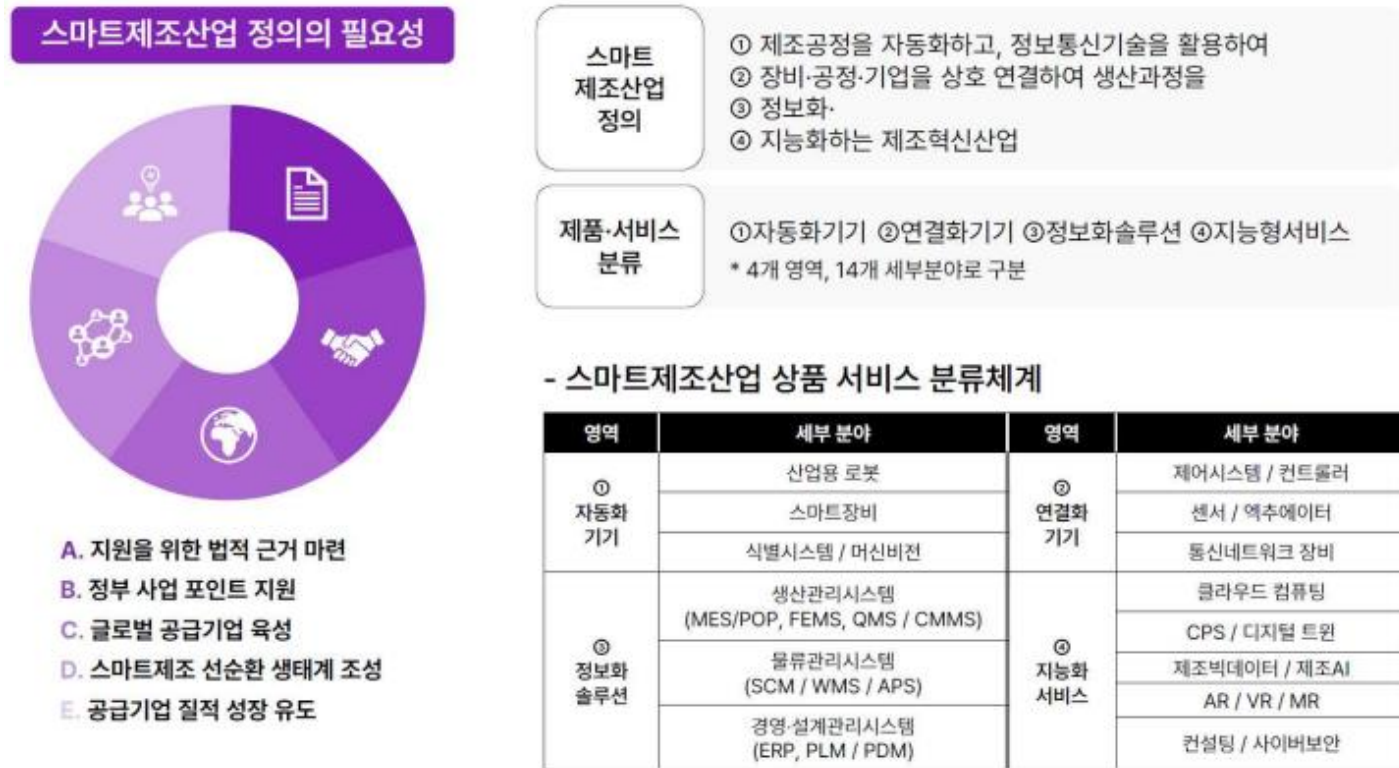
- 정부 R&D 투자의 효율성을 높이고 제조산업 구조 혁신을 이루기 위해, 글로벌 AI 자율제조 기술과 산업의 발전 방향을 종합적으로 살펴볼 필요가 있음

구분	개요	주요 기술 / 특징	주도 기관
Industrie 4.0	독일에서 시작된 제4차 산업혁명 전략, IoT·AI·CPS 등을 활용해 제조공정과 공급망 디지털·자동화	IoT, AI, CPS, 빅데이터, 스마트공장	DE 독일 (Plattform Industrie 4.0)
GAIA-X	유럽 데이터 주권 확보를 위한 클라우드·데이터 인프라 프로젝트	데이터 상호운용성, 보안, 클라우드 연합 플랫폼	DEEU 독일·EU 공동
Catena-X	자동차 산업 공급망 데이터 공유 및 표준화를 위한 개방형 플랫폼	자동차 공급망 효율화, 지속가능성, 데이터 표준화	DE 독일 (BMW, SAP, Siemens 등 컨소시엄)
Manufacturing-X	GAIA-X 기반 확장 프로젝트로, 산업 전반 데이터 교환 및 디지털 트윈 표준화 추진	산업 데이터 공유, AI·디지털 트윈 통합	DE독일 연방경제기술부

[주요 국가별 제조 디지털화 추진 전략]

2. AI 자율제조 of 필요성

- 중소벤처기업부(2024)는 스마트제조산업을 4개 영역으로 나누어 정의함.
또한, 이 영역들에 포함되는 14개 제품 및 서비스 분류를 세부분야 범위로 발굴



[스마트제조산업 정의 및 분류체계]
중소벤처기업부, SMATEC 2024

2. AI 자율제조 의 필요성

- 국내에서는 중소벤처기업부와 스마트제조혁신추진단 등에서 스마트공장 단계와 특성, 조건 등을 정의하고 있으며, 단계별 적용 스마트제조 기술 또한 제시되어 있음

등급	수준단계	특성	조건(구축수준)
Level 5	고도화	맞춤 및 자율 (Customized & Autonomy)	모니터링부터 제어, 최적화까지 자율로 운영
Level 4	중간2	최적화 & 통합 (Optimized & Integrated)	시뮬레이션을 통한 사전 대응 및 의사결정 최적화
Level 3	중간1	분석 & 제어 (Analyzed & Controlled)	수집된 정보를 분석하여 제어 가능
Level 2	기초2	측정 & 확인 (Measured & Monitored)	생산정보 실시간 모니터링 가능
Level 1	기초1	식별 & 점검 (Identified & Checked)	부분적 표준화 및 실적정보 관리
Level 0	ICT 미적용	미인식 & 미적용	미인식 및 ICT 미적용

[스마트제조산업 정의 및 분류체계]
대한상공회의소, 스마트공장 수준확인제도

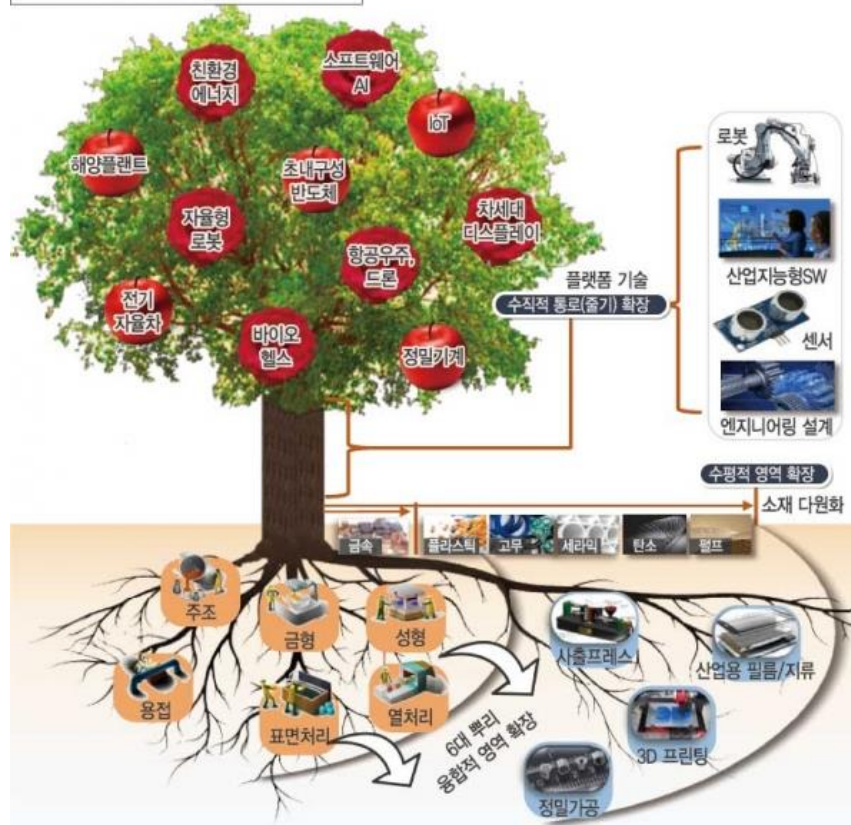
3. 뿌리기술 혁신 필요성

뿌리기술

제조업 전반에 걸쳐 활용되는 기반 공정기술과
사출·프레스, 정밀가공 로봇, 센서 등 제조업의 미래 성장 발전에 핵심적인 차세대 공정기술

* 뿌리산업은 나무의 뿌리처럼 겉으로 드러나지 않으나 최종 제품에 내재되어 제조업 경쟁력의 근간을 형성한다는 의미에서 명명

뿌리영역의 확대(기존 6대→14대 분야)



3. 뿌리기술 혁신 필요성

뿌리기술

제조업 전반에 걸쳐 활용되는 기반 공정기술과
사출·프레스, 정밀가공 로봇, 센서 등 제조업의 미래 성장 발전에 핵심적인 차세대 공정기술

소재 다원화 (총 6개 소재)



금속



세라믹



플라스틱



탄성 소재



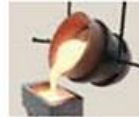
탄소



펄프

공정 기술 확장 (총 14개 기술)

• 소재 다원화 기반 뿌리기술 확장 (기존 6개 + 추가 4개 → 총 10개)



주조



금형



소성가공



용접



표면처리



열처리



사출·프레스



정밀가공



적층제조



산업용 필름·지류

• 지능화 공정기술 (기존 0개 → 4개)



로봇



센서



산업지능형 SW



엔지니어링 설계

3. 뿌리기술 혁신 필요성

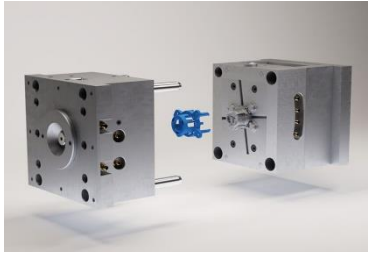
(1) 기반공정기술



주조

고체금속재료를 노에서 액체상태로 녹인 후 틀 속에 주입, 냉각하여 일정 형태의 금속제품을 만드는 기술

- 사형주조
- 금형주조
- 다이캐스팅
- 정밀주조
- 연속주조
- 저압주조
- 소실모형주조
- 특수주조



금형

통일 형태, 사이즈의 제품을 대량으로 생산하기 위하여 금속재료를 된 틀을 제작하는 기술

- 사출성형금형
- 다색다중성형금형
- 블로우성형금형
- 복합성형금형
- 프레스성형금형
- 프로그레시브성형금형
- 파인블랭킹금형
- 특수성형금형



소성가공

재료에 외부적인 힘을 가하여 영구적인변형을일으킴으로써 원재료를일정형태의제품으로 가공하는 기술

- 단조
- 압연
- 압출
- 판재성형
- 특수성형



용접접합

금속과 비금속으로 제조된 소재, 부품을 열 또는 압력을 이용하여 결합시키는 기술

- 아크용접
- 저항용접
- 특수용접
- 브레이징
- 칩레벨 접합
- 보드레벨 접합
- 구조용 접합



열처리

금속 소재 · 부품에 가열 및 냉각공정을 반복적으로 적용하여 금속조직을 제어함으로써 물성을 향상시키는 기술

- 전경화열처리
- 국부열처리
- 침탄열처리
- 질화열처리
- 복합열처리
- 비철, 특수금속열처리



표면처리

소재 · 부품의 표면에 금속 또는 비금속을 물리 · 화학적으로 부착시켜 미관이나내구성을개선시키고 표면 기능을 부여하는 기술

- 전기도금
- 무전해도금
- 양극산화
- 화학처리
- 도장
- 표면경화
- 스퍼터링
- 화학기상증착

3. 뿌리기술 혁신 필요성

(2) 소재다원화 공정기술



사출 · 프레스

고분자 기반 소재를 응용한 후
금형 등을 이용하여
일정한 형태로 가공하거나,
소재에 열 및 외력을 가하여
형상을 제조하는 공정기술

- 고분자 가공기술
- 고분자 성형기술
- 복합재료 제조공정 기술



정밀가공

절삭(잘라내기), 연삭(표면가공) 등에 의하여
불필요한 부분을 제거하여
필요한 형상을 만드는 공정기술

- 절삭가공
- 연삭가공
- 연마가공
- 광에너지응용가공
- 전기에너지응용가공
- 화학에너지응용가공



적층제조

플라스틱, 금속, 세라믹 등의 소재를
레이저 등의 열원을 활용하여
한 층씩 적층하여 3차원 형상의
제품 · 부품을 제작하는 공정기술

- 분말가공기술
- 용융기술
- 기타 적층 관련 기술



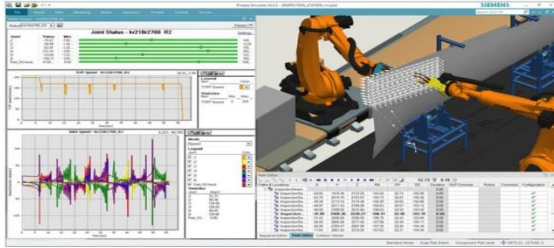
산업용 필름 및 지류공정

합성물질(필름) 또는 천연소재(지류)를
박막 또는 시트 형태로 제조하거나,
고기능성을 부여하기 위한
코팅 등의 신가공 공정기술

- 고분자 박막제조기술
- 고분자 코팅제조기술
- 제지공정

3. 뿌리기술 혁신 필요성

(3) 지능화 공정기술



로봇

프로그램 된 가변동작을 통해
대상물을 이동, 조작하는 작업을
지속적으로 수행·보조할 수 있도록
설계된 기계장치 및 이를 활용하는 기술

- 로봇생산자동화기술
- 로봇 관련 정보기술·소프트웨어
- 자동화기계관련정보기술·소프트웨어



센서

공정 지능화를 위해,
제조공정 데이터의
수집·획득·가공용 센서 모듈을
제조 및 활용하는 기술

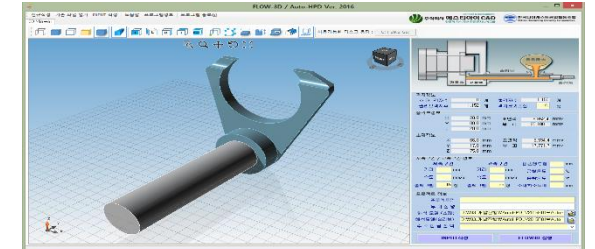
- 계측기술
- 센서기술
- 시스템통합화기술



산업지능형 소프트웨어

공정 데이터를 수집·가공하고,
지능화 알고리즘을 개발하여
기계학습을 통해
공정지능화에 활용하는 기술

- 소프트웨어솔루션
- 생산관리 서비스
- 계량분석 서비스
- 시험관리 서비스
- 검사관리 서비스
- 분석관리 서비스
- 품질관리 서비스



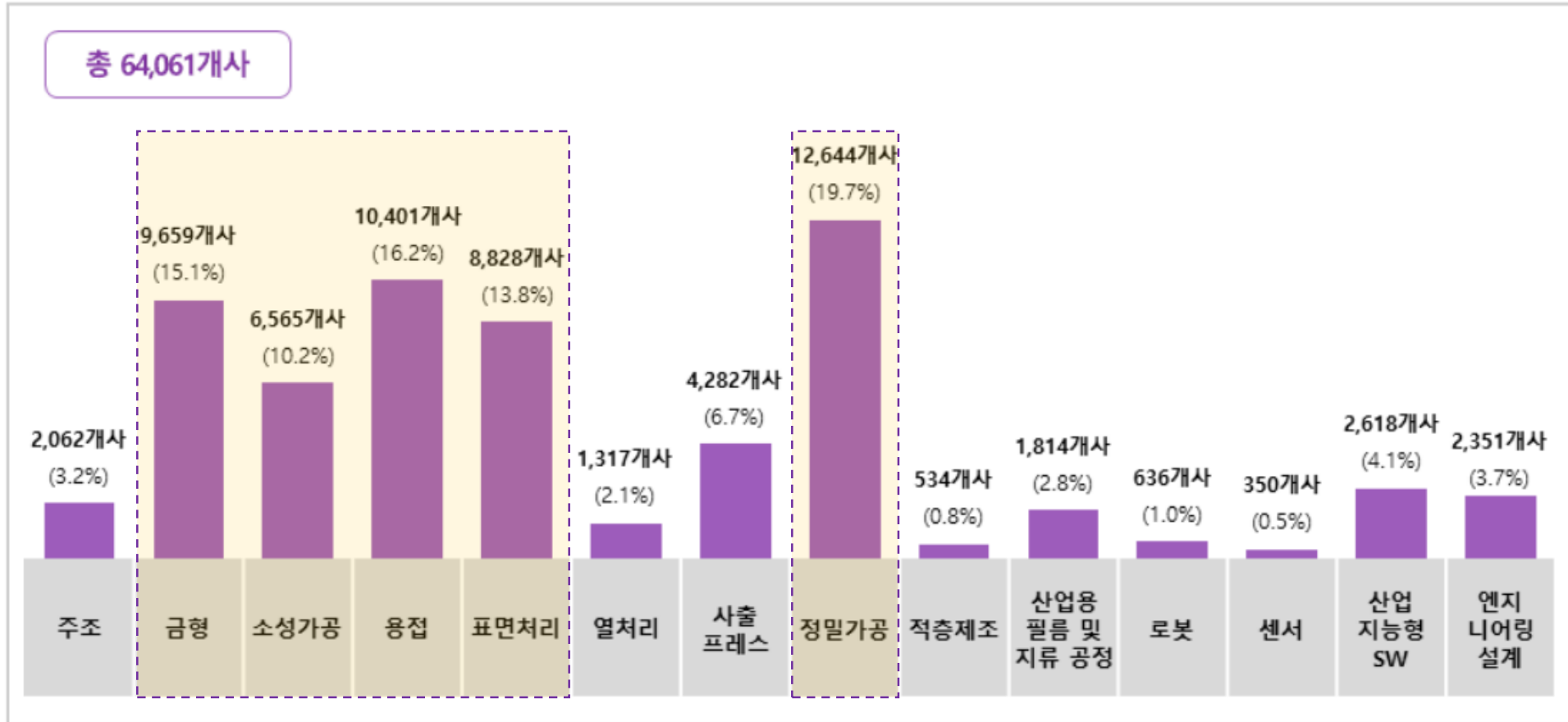
엔지니어링 설계

제품·공정설계 및 해석을 위한
엔지니어링 SW를 개발하고,
이를 활용하여 설계검증, 최적공정 등을
도출하여 제품기능의 효과적 구현과
제조 효율을 높이는 기술

- 설계기술
- 생산공정모델링 서비스
- 시뮬레이션 서비스
- 컴퓨터이용설계 관련 소프트웨어
- 컴퓨터이용제조 관련 소프트웨어
- 구조 관련 소프트웨어
- 용접 관련 소프트웨어
- 소성가공 관련 소프트웨어
- 기타 뿌리기술 관련 소프트웨어

3. 뿌리기술 혁신 필요성

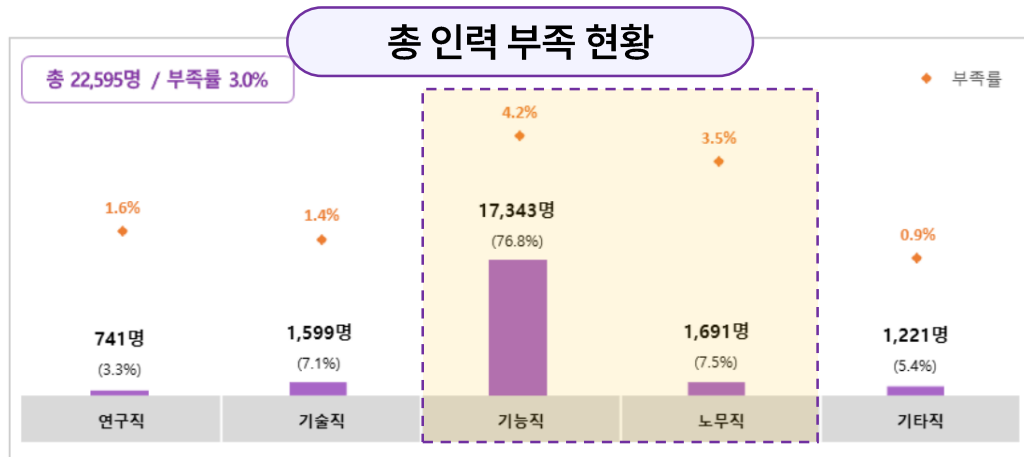
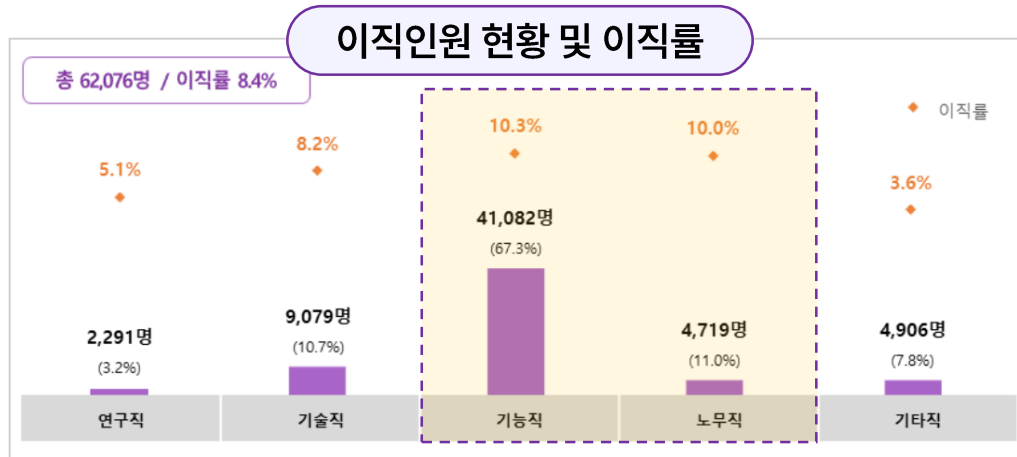
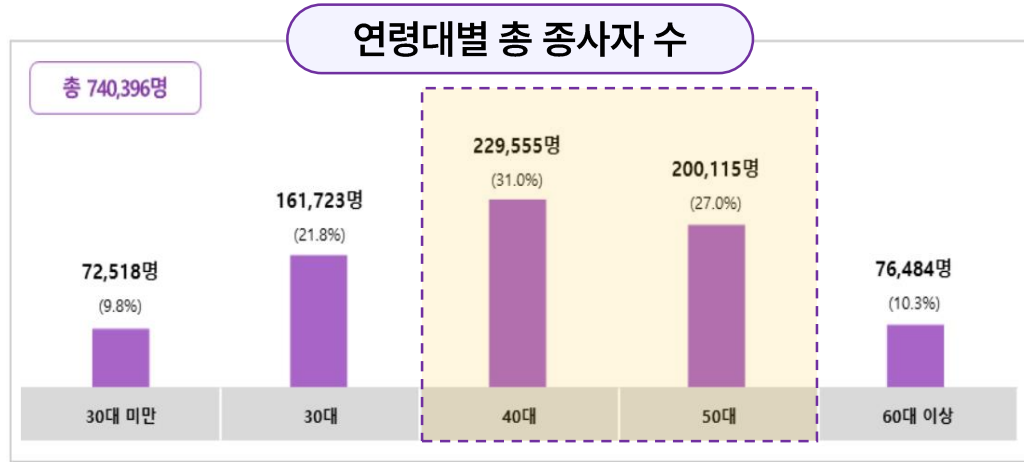
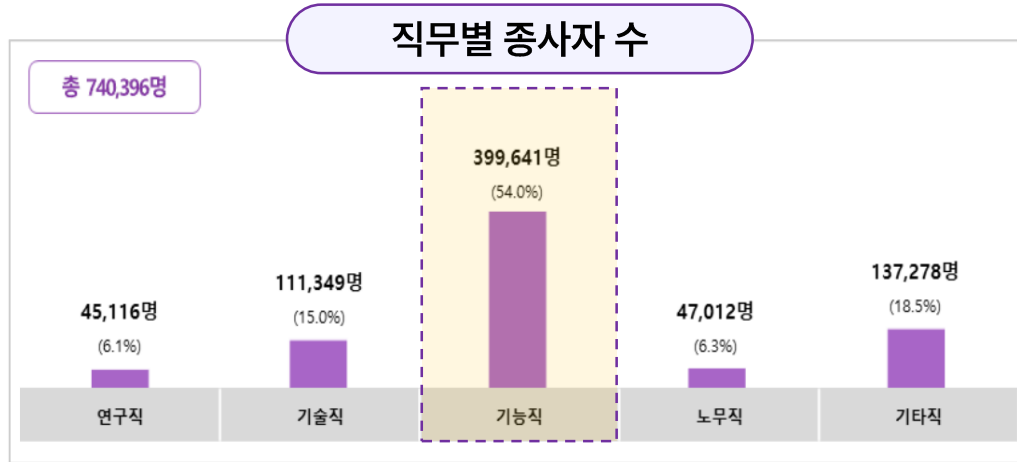
* 사업체 기초현황 (2024 뿌리산업 실태조사 보고서)



23년 말 기준 뿌리산업 영위 사업체 수는 64,061개사로,
5개 업종(정밀가공, 용접, 금형, 표면처리, 소성가공)이 각 10% 이상으로 높은 비중을 차지

3. 뿌리기술 혁신 필요성

* 사업체 기초현황 (2024 뿌리산업 실태조사 보고서)



뿌리산업은 숙련 기능인력의 고령화와 높은 이직률, 만성적인 인력 부족 문제를 동시에 겪고 있어,
생산 효율과 지속가능성을 확보하기 위해 AI 기반 자율제조 기술의 도입이 필수적

4. AI 자율제조 동향

[2014년] 제조업 3.0 전략 제시 (산업부)

- 스마트 공장 1만개 보급, 스마트 공장 확산 및 융합 신산업 시범 특구 조성

[2018년] 스마트 공장 확산 및 고도화 전략 발표 (중기부, 산업부, 과기부)

- 클라우드, 빅데이터 활용 스마트 공장의 ICT 융합 고도화 추진

[2023년] 신 디지털 제조혁신 추진전략 2023 발표 (중기부)

- 현장수요 반영 및 기업 역량별 맞춤 지원을 통한 중소제조기업 디지털 전환 유도

[2024년] 스마트 제조혁신 생태계 고도화 (중기부)

- 지능형 제조산업 개념 및 분류 정의, 스마트 제조기업 체계 제시

[2024년] AI 자율제조 얼라이언스 출범 (산업부)

- 제조업 AI 기반 혁신 촉진, 탄소감축 이슈 해결

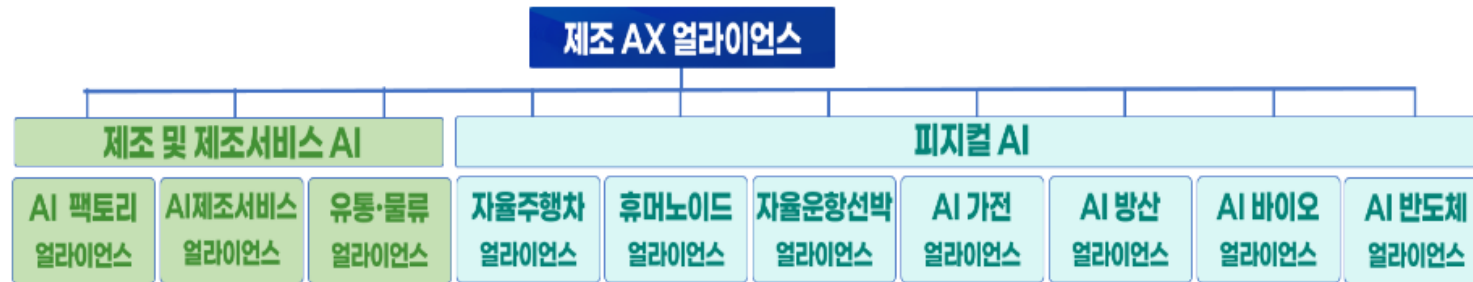
[2024년 5월] 인공지능 자율제조 전략 1.0 발표 (산업부)

- 샘 올트만 (Open AI, CEO) : AI는 미래의 경제적 풍요를 이끄는 가장 강력한 힘
- 팀 쿡 (Open AI, CEO) : AI 기술이 생산성, 문제해결에 있어 혁신적인 기회를 열 것

[2025년 5월] AI 자율제조 사업 → AI 팩토리 사업 명칭 변경 (산업부)

4. AI 자율제조 동향

M.AX 얼라이언스 • AI 팩토리, 휴머노이드, 자율주행차 등 10개 업종별 얼라이언스



AI 팩토리 M.AX 얼라이언스 • 각 제조업종 및 제조 AI 분야의 전문가들이 프로젝트에 참여



4. AI 자율제조 동향

'30년 목표 - 제조 AI 팩토리 M.AX 얼라이언스 본격 가동

[현재까지 AI 팩토리 선도사업에 참여중인 업종별 주요기업]

자동차	반도체	전자(가전 등)	철강	조선
현대차, LG이노텍, 한국타이어, 기아	삼성전자, 케이씨텍, 이수페타시스	LG전자, 쿠첸, LS전선	포스코, KG스틸, 대한제강	삼성중공업, HD현대삼호
항공·방산	식품·바이오	이차전지	석유화학·섬유	기계·건설
대한항공, KAI, 한화시스템	농심, 삼양식품, 한국콜마	LG에너지솔루션, 삼성SDI	SK에너지, GS칼텍스, 코오롱	HD현대건설기계, 코넥

- AI 팩토리 선도사업 102개, 2030년까지 500개 이상으로 확대 예정

SAMSUNG

- AI를 통해 HBM(고대역 폭 메모리 반도체)의 품질을 개선
- 전반적으로 사람이 수행중인 HBM 불량 식별 공정에 AI를 도입할 계획

HD현대중공업

- 함정 MRO용(Maintain 유지보수, Repair 수리, Overhaul 정비) 로봇 개발
- HD현대중공업은 숙련공에 의존하던 해양생물 제거, 재도장 등의 작업을 AI 로봇에 맡겨, MRO효율을 80% 이상 향상
- 셀 방식 생산방식에 핵심이 되는 AI 다기능 로봇팔을 개발
- 현대차는 힌지·도어 조립, 용접품질 검사 등 다양한 공정을 자율적으로 수행가능한 AI 로봇 팔을 공정에 도입하여, 생산성을 30% 이상 높일 계획

4. AI 자율제조 동향

휴머노이드, 금년부터 제조 현장 실증에 본격 투입

[6개 휴머노이드 과제 참여기업 및 내용]

분야	수요기업	공급기업	휴머노이드 주요 과업
디스플레이	삼성 디스플레이	레인보우 로보틱스	레이저 장비 내 렌즈교체, 검사, JIG 교체 작업 등
조선	HD현대미포	에어로봇	각종 상황과 이음 형태에 맞는 용접 작업 수행
	삼성중공업	에어로봇	다양한 장애물, 협소 공간, 비평탄면 등 극복을 통해 자율 이동하며 용접·청소 등
가전	LG전자	로브로스	인간 수준 핸들링 작업 및 보행을 바탕으로 가전제품 공장 내 조립·운송
화학	SK에너지	홀리데이 로보틱스	석유화학 제품 검사, 유압/가스 밸브 등 조작, 시료 제조, 검사 시료 운송 등 수행
유통	CJ대한통운	레인보우 로보틱스	피킹·분류·검수·포장 등 복잡한 물류 작업 동작을 다양한 상품에 맞게 자율적으로 수행

- 금년에는 디스플레이·조선·물류 등 6개 현장에 휴머노이드가 투입
- 27년까지 100개 이상 휴머노이드 실증사업을 통해 제조현장의 핵심 데이터를 모으고 AI와 로봇을 학습계획

5. 개발사례 1 : 3D 프린팅 공정 지능화

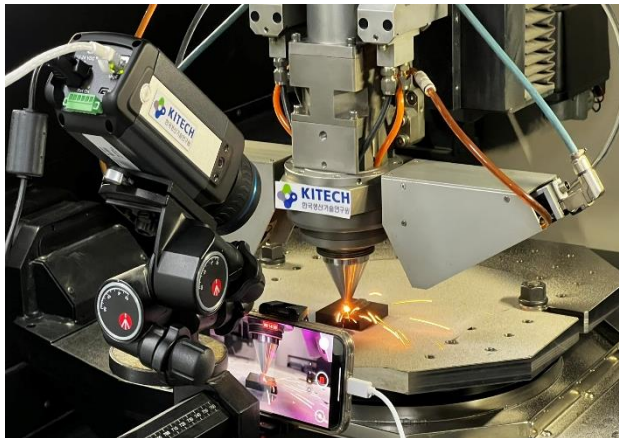
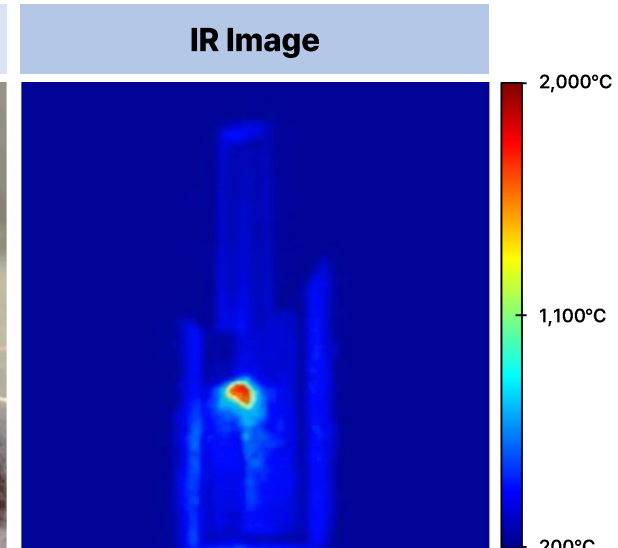
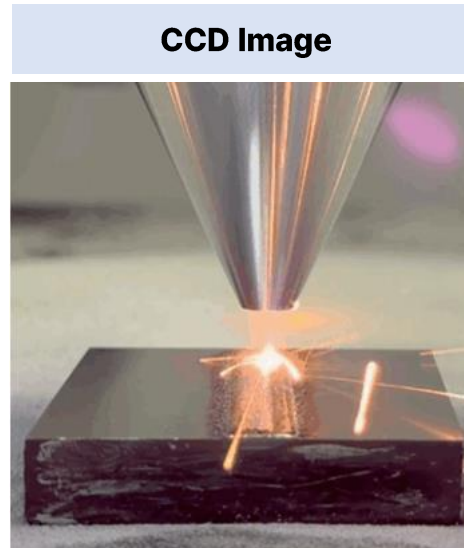


3D 프린팅 공정 지능화 개발 사례
한국생산기술연구원

5. 개발사례 1 : 3D 프린팅 공정 지능화

(2) 소재다원화 공정기술

공정 모니터링 시스템을 이용한 DED 공정의 열 특성 분석 기술 개발



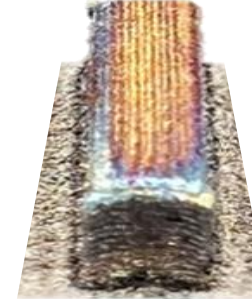
Results of Deposited Specimens



FR = 3 g/min



FR = 4 g/min

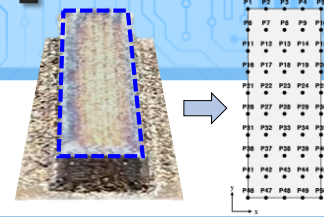


FR = 5 g/min

5. 개발사례 1 : 3D 프린팅 공정 지능화

(2) 소재다원화 공정기술

공정 모니터링 시스템을 이용한 DED 공정의 열 특성 측정

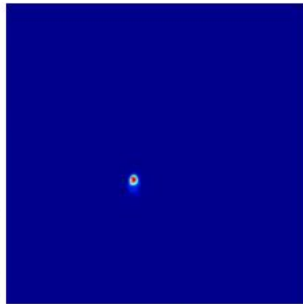
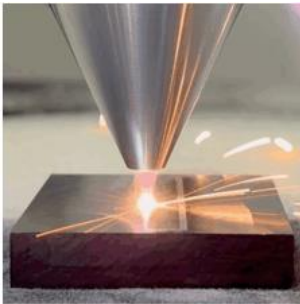


FR = 3 g/min

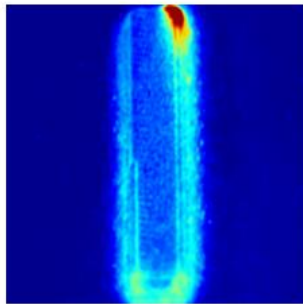
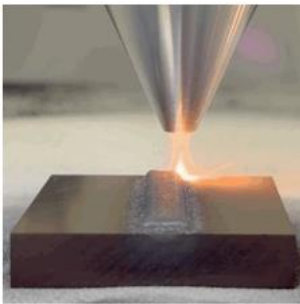
CCD Image

IR Image

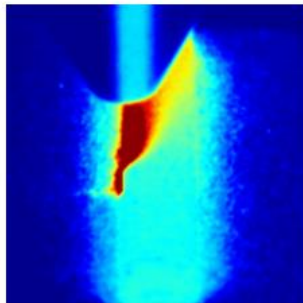
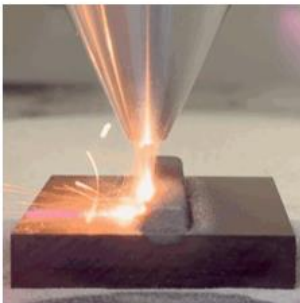
1st layer



14th layer



28th layer

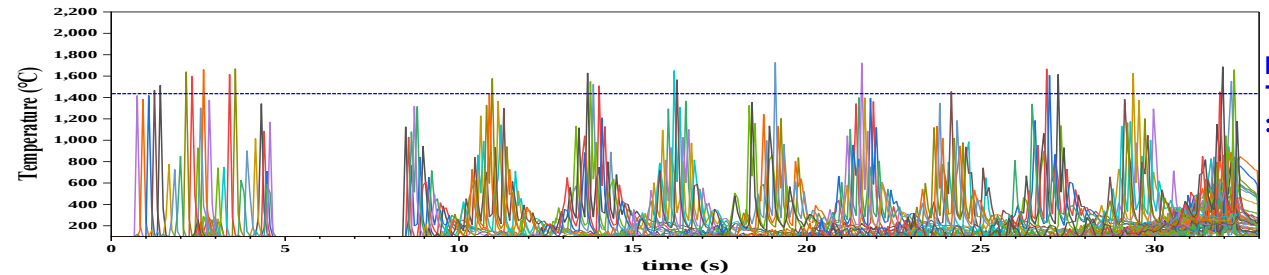


2,000°C

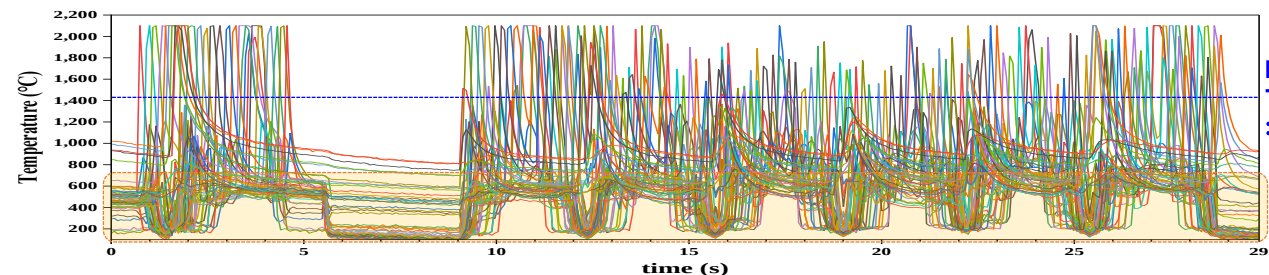
1,100°C

200°C

Temperature Graph

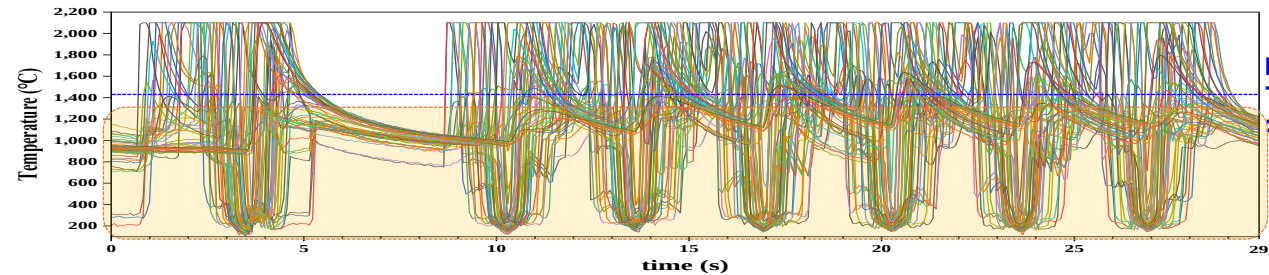


Melting Temperature : 1,400°C



Melting Temperature : 1,400°C

Heat Accumulation



Melting Temperature : 1,400°C

Heat Accumulation

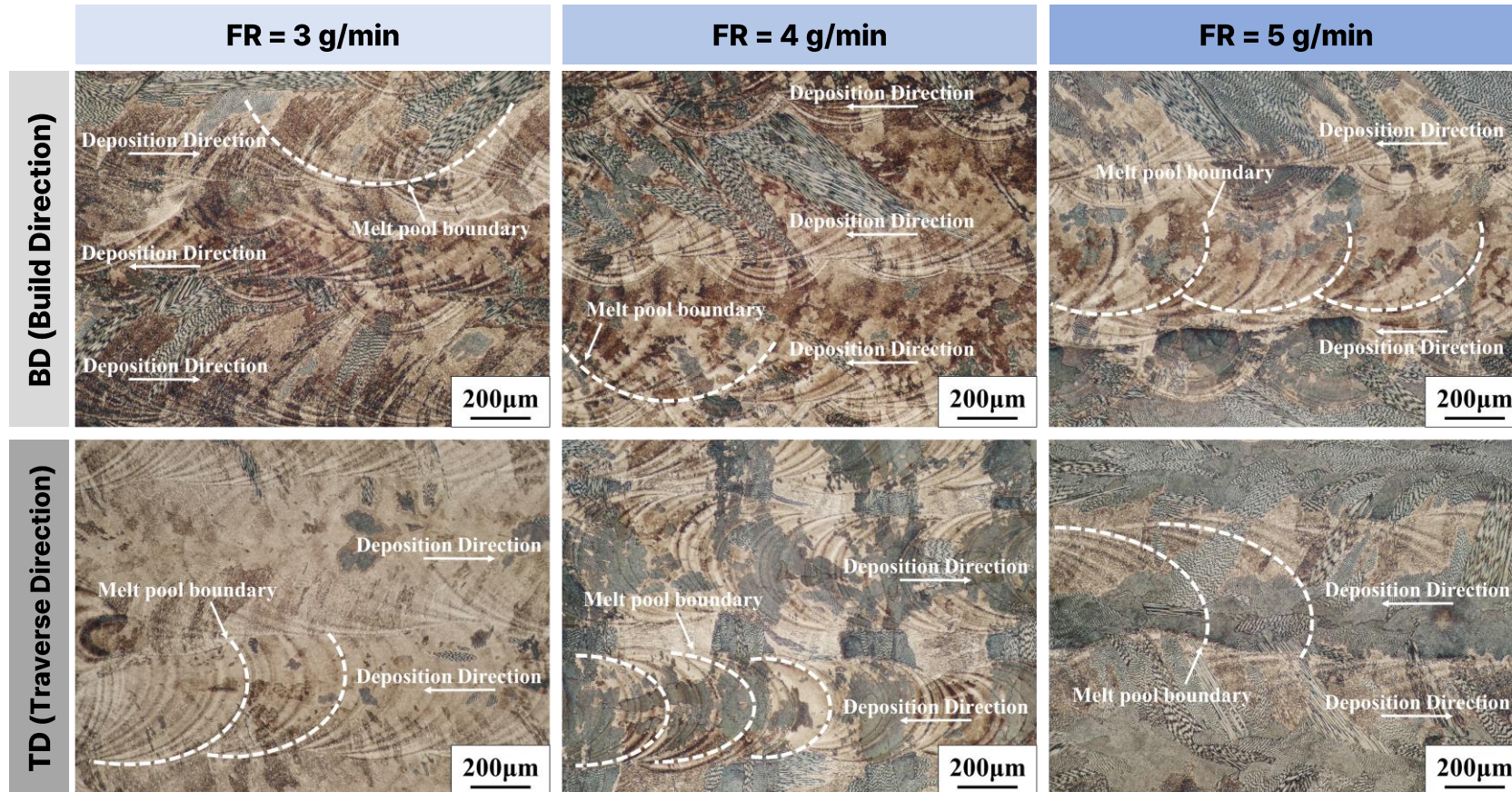
5. 개발사례 1 : 3D 프린팅 공정 지능화



(2) 소재다원화 공정기술

공정 모니터링 시스템을 이용한 DED 공정의 열 특성 분석 기술 개발

• OM (Optical Microscopy) 분석 결과



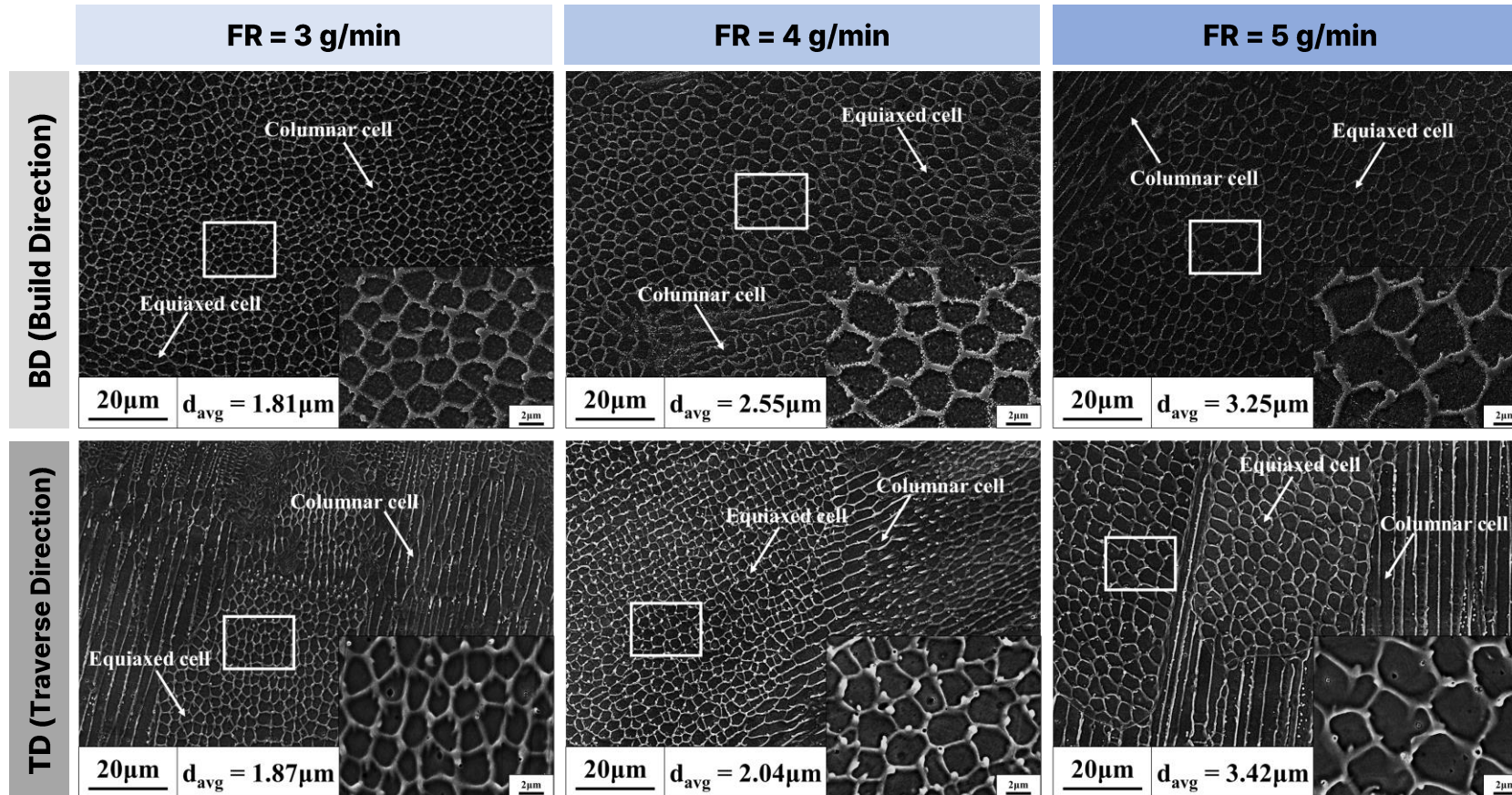
[Optical micrograph images of SUS316L deposited specimens by DED at 3, 4, and 5 g/min in BD (a, c, e) and TD (b, d, f)]

5. 개발사례 1 : 3D 프린팅 공정 지능화

(2) 소재다원화 공정기술

공정 모니터링 시스템을 이용한 DED 공정의 열 특성 분석 기술 개발

• SEM (Scanning Electron Microscopy) 분석 결과



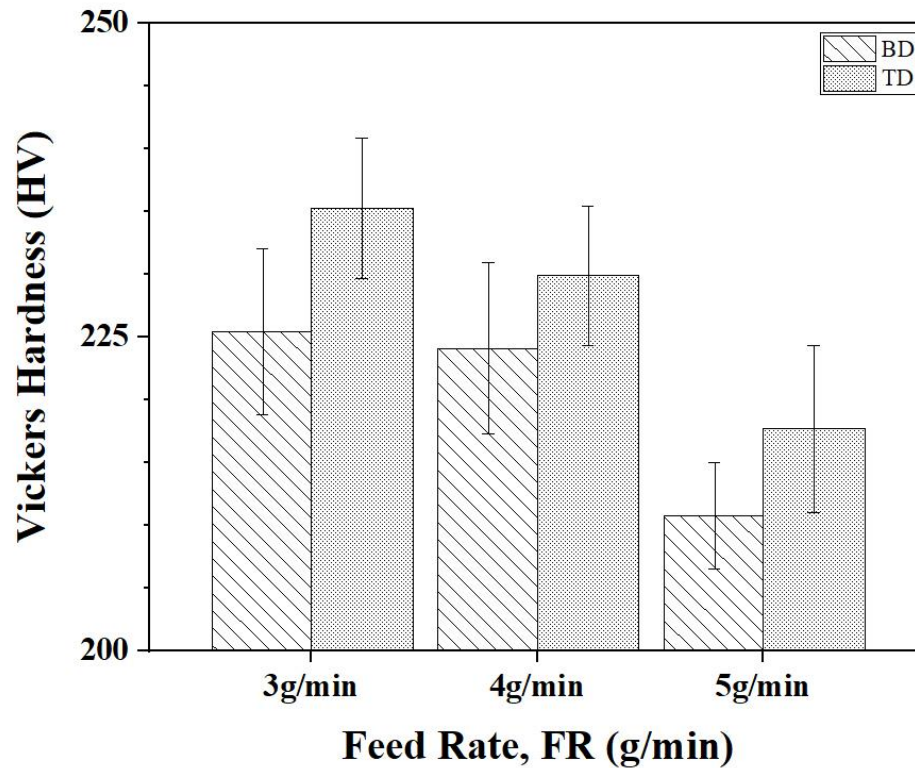
[SEM images of SUS316L deposited specimens by DED at 3, 4, and 5 g/min in BD (a, c, e) and TD (b, d, f)]

5. 개발사례 1 : 3D 프린팅 공정 지능화

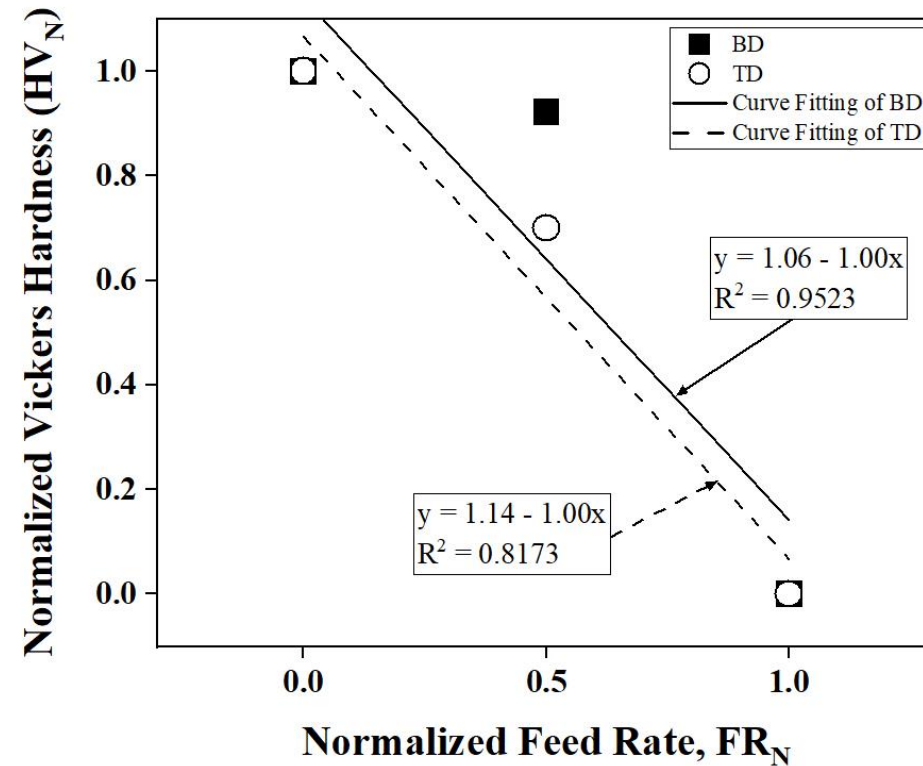
(2) 소재다원화 공정기술

공정 모니터링 시스템을 이용한 DED 공정의 열 특성 분석 기술 개발

• 비커스 경도(Vickers Hardness) 시험 결과



[Results of Vickers Hardness Test
Based on Powder Feed Rate]



[Results of Normalized Hardness Variation
According to Normalized Powder Feed Rate]

5. 개발사례 1 : 3D 프린팅 공정 지능화



3D 프린팅 공정 지능화 개발 사례

장비 스스로 결함 개선...AI 기반 금속 3D프린팅 제어 기술

2024.12.30 11:45



인공지능(AI) 기반 제어 모듈을 적용한 DED 적층 시스템. DED는 금속 분말이나 와이어 소재를 높은 에너지원으로 용융시키면서 적층하는 방식이다. 생기원 제공

장비가 스스로 결함을 인식·제어해 개선하는 인공지능(AI) 기반 금속 3차원(3D) 프린팅 제어기술이 개발됐다. 구형 장비를 교체하지 않고도 성능을 높일 수 있어 첨단 장비나 전문가가 부족한 제조 기업에서 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

기존 3D 프린팅 장비는 공학적 지식이 많이 필요하고 작업자의 경험, 지식이 제품 품질에 큰 영향을 미친다. 다품종 소량생산의 특성상 최적의 공정 조건을 찾는 데 많은 시간이 소요된다. 레이저 출력, 적층 속도 등 공정 변수가 적절하지 않으면 결과물에 균열, 기공 등 결함이 발생한다.

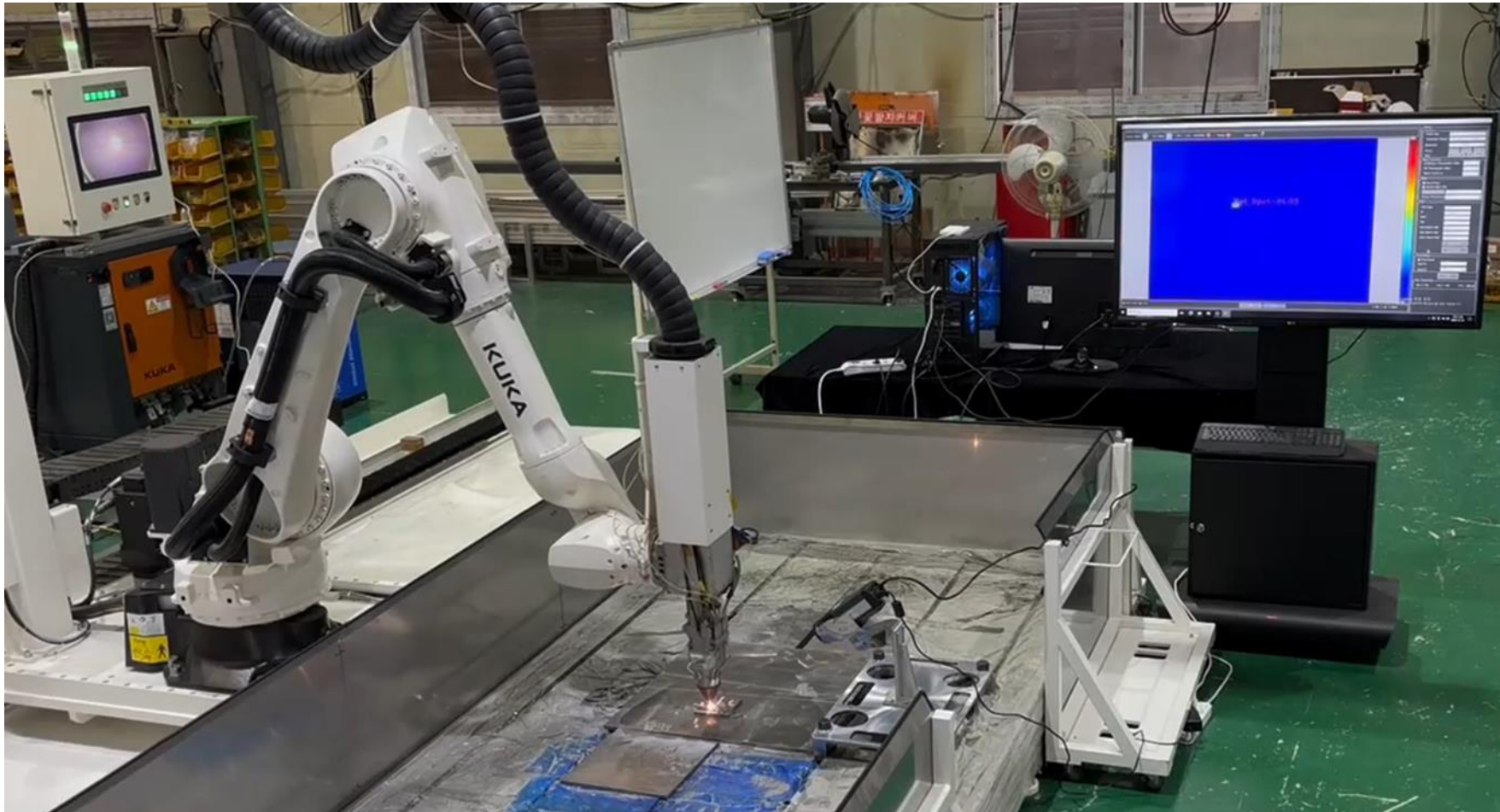
연구팀은 구형 금속 3D 프린팅 장비에 추가로 장착할 수 있는 '애드온(Add-on) 모듈'을 개발했다. 다양한 센서와 결함 검출, 장비 제어기술 등을 합친 모듈이다. 모듈은 공정 도중 결함이 발생하면 AI 알고리즘을 통해 이상 신호를 감지하고 작업자들에게 알람을 전달한다. 이후 스스로 공정 변수를 제어하면서 최적의 공정 조건을 찾는다.

개발된 모듈을 탑재한 3D 프린팅 장비는 초보자도 활용할 수 있어 지능화된 첨단 장비나 전문가가 부족한 제조기업에서 유용하게 쓰일 수 있다. 유사한 적층 공정에 공통으로 적용할 수도 있다. 구형 생산장비를 교체하지 않고도 AI 기반으로 데이터 수집·구축, 결함과 품질 예측·제어가 가능할 것으로 기대된다.

5. 개발사례 1 : 3D 프린팅 공정 지능화



3D프린팅공정지능화개발사례 에드온(Add-on) 모듈 기반 현장 데이터 실시간 취득 기술 개발



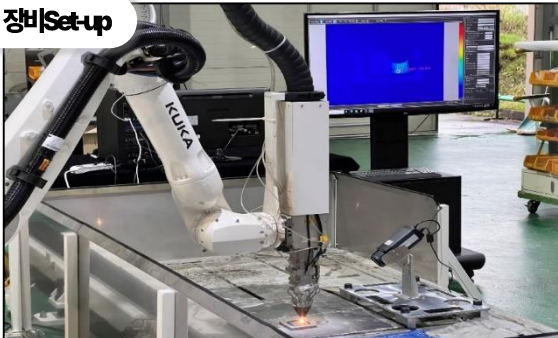
5. 개발사례 1 : 3D 프린팅 공정 지능화



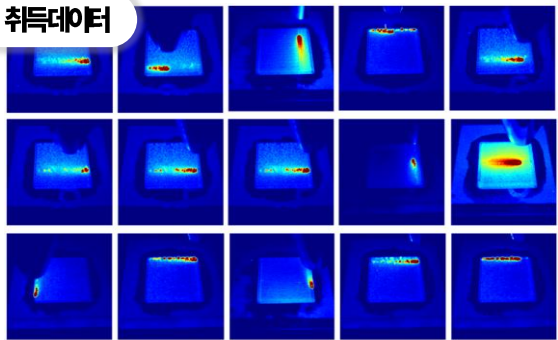
3D 프린팅 공정지능화개발사례 3D 프린팅 결함 Mode 검출 Deep Learning 알고리즘 개발

IR Image Data 취득

장비Set-up

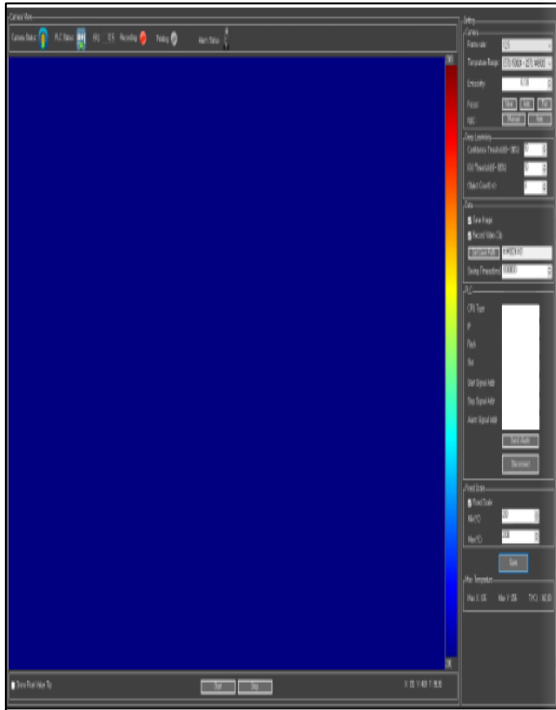


취득데이터



적층 공정 촬영을 통하여
AI 학습 데이터(IR Image Data) 취득

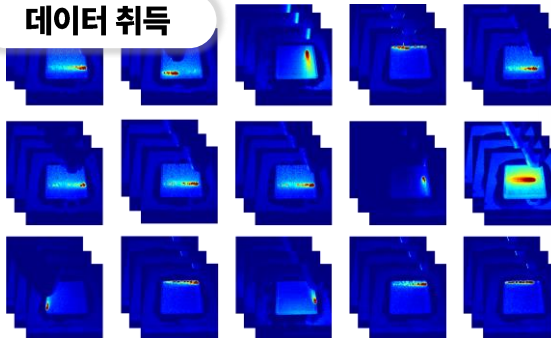
실시간 공정 모니터링



실시간 공정 모니터링 S/W 를 통한
적층 공정을 실시간으로 모니터링

데이터 취득 및 정제

데이터 취득

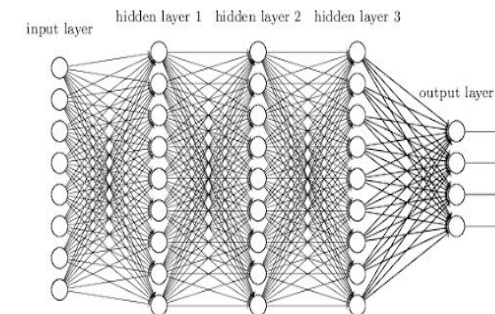


데이터 정제



실험 데이터를 기반으로
AI 학습에 적합한 정보를 선별 및 정제

결함 Mode 학습



정제된 데이터를 활용해
공정 내 결함 발생 패턴을 AI가 학습

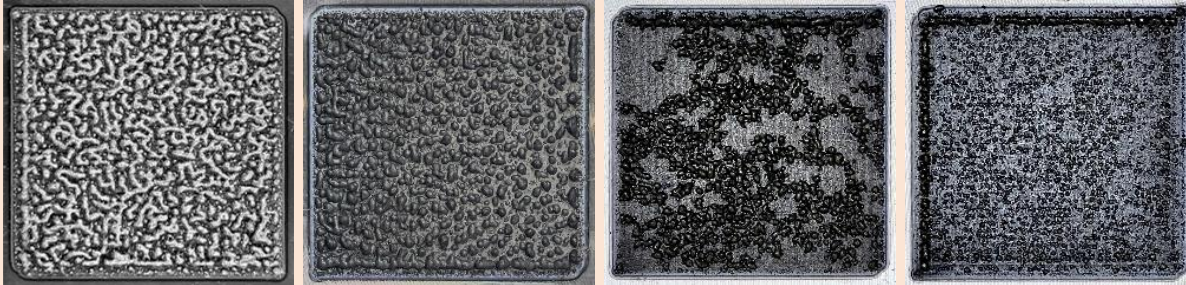
5. 개발사례 1 : 3D 프린팅 공정 지능화



3D프린팅공정지능화개발사례 에드온(Add-on) 모듈 활용 3D 프린팅 공정 실시간 제어 검출 및 능동 제어 기술 개발

개선 전

평면 적층 결과

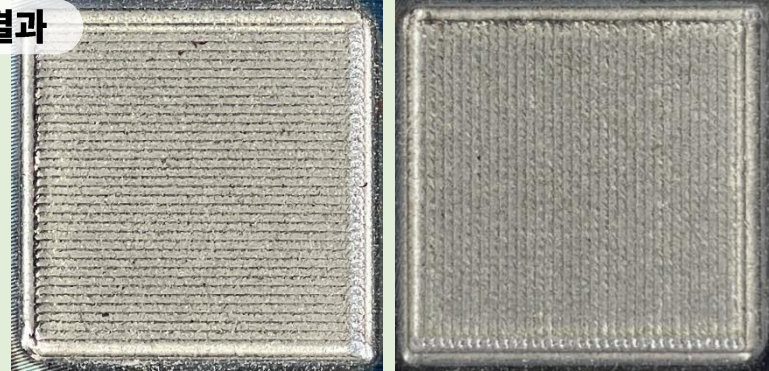


형상 적층 결과



개선 후

평면 적층 결과



형상 적층 결과



6. 개발사례 2 : 가공공정 디지털 트윈

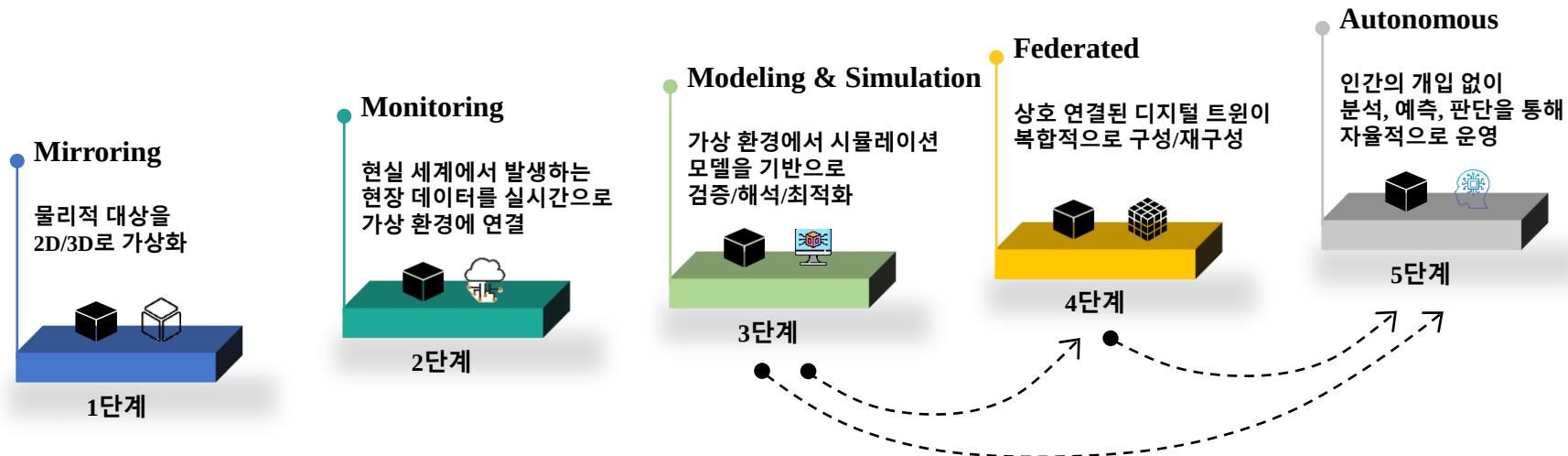
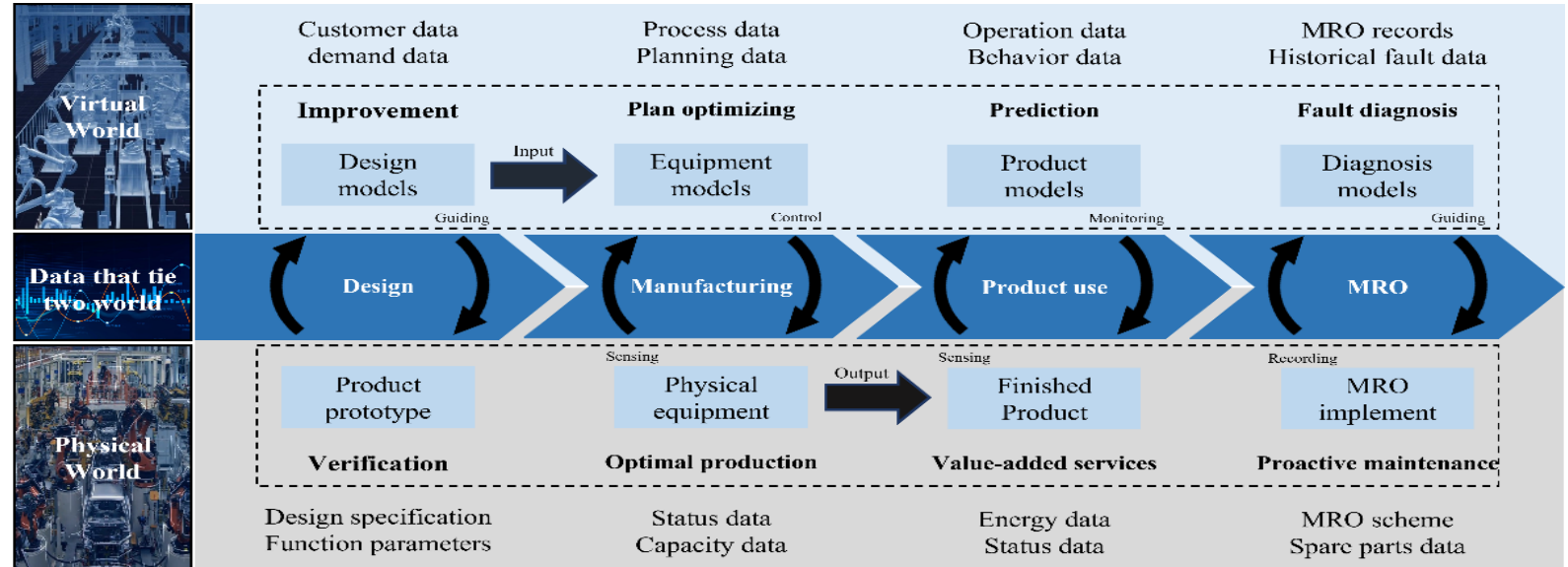


가공공정 디지털 트윈 개발 사례
한국생산기술연구원

6. 개발사례 2 : 가공공정 디지털 트윈

● 디지털 트윈(Digital Twin)

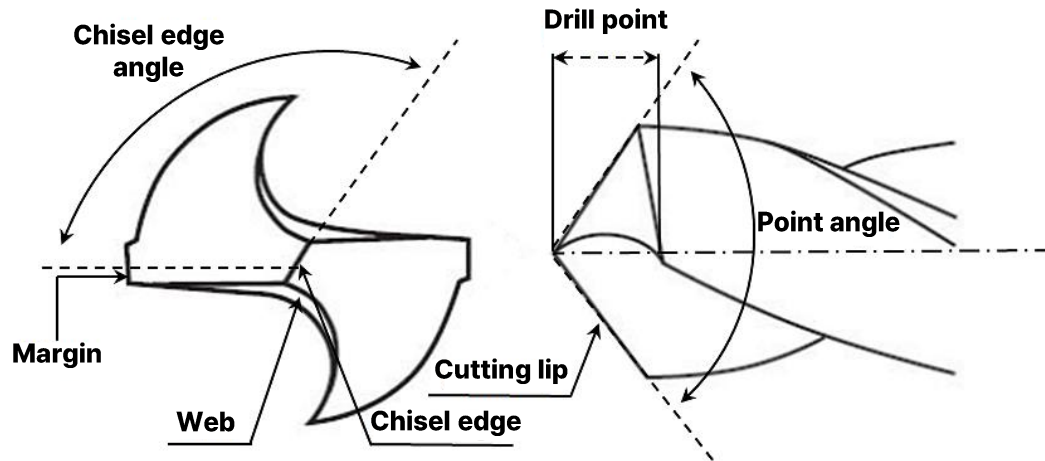
- 물리적 개체, 가상 모델, 연결된 데이터로 구성되며, 현실과 가상 간 양방향 동적 매핑을 통해 분석, 예측, 최적화를 수행
- 센서를 통해 수집된 물리 세계의 데이터는 가상 모델로 전송되어 시뮬레이션·검증 후 물리 환경에 피드백되어 운영과 성능을 향상



6. 개발사례 2 : 가공공정 디지털 트윈

Development Method

가공 디지털 트윈 모델의 절삭력 모사 기술 개발 - 절삭력 물리 모델



드릴 절삭력이 발생하는 구간

1) Lip region : 칩 생성 영역

- * 2D 직교 절삭 모델(Orthogonal Cutting model)
- * Oxley 이론 + Johnson-Cook 재료 소성 모델

2) Chisel region : Indentation에 의한 영역

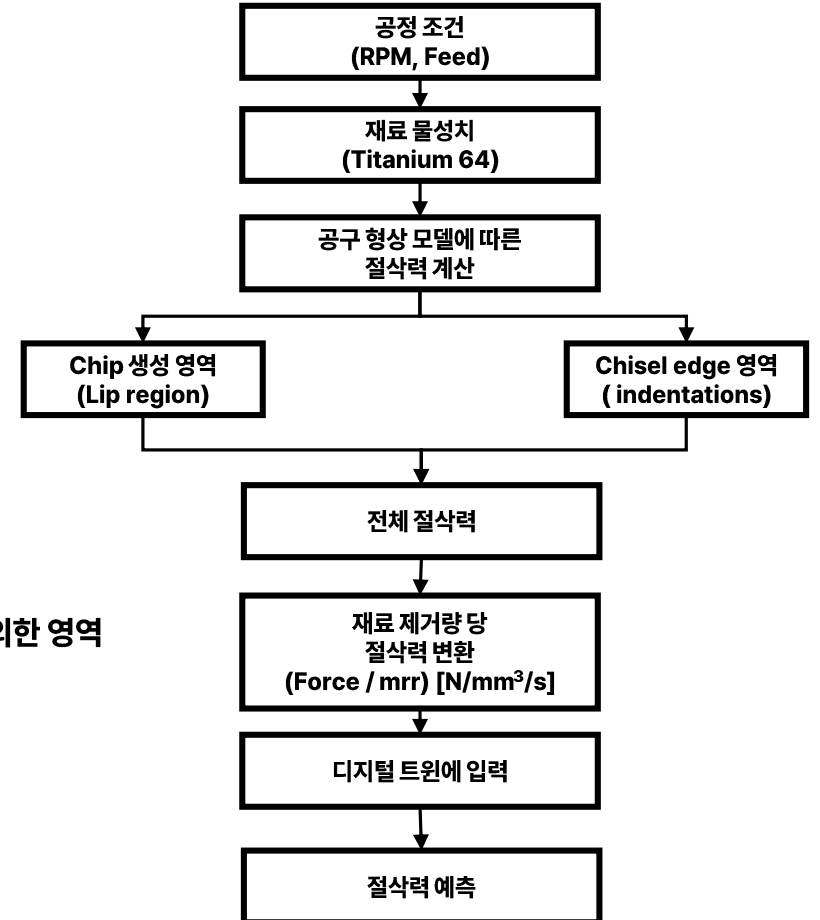
- * Indentation 기반 모델
- * 접촉 이론 기반으로 추력 계산

$$F_c = \frac{F_s}{\cos\theta} \cos(\lambda - \gamma) / F_c = \frac{F_s}{\cos\theta} \sin(\lambda + \gamma)$$

+

$$F_{chi} = E^* \delta l_{chi} / \delta = k_{chi} f(t)$$

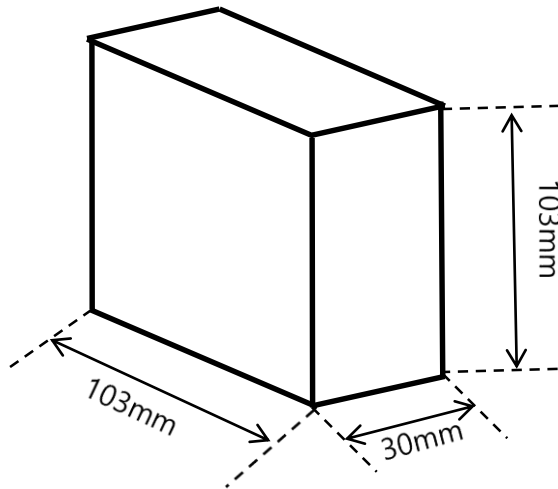
2가지 Mechanism을 기반으로 절삭력으로 변환



6. 개발사례 2 : 가공공정 디지털 트윈

Development Method

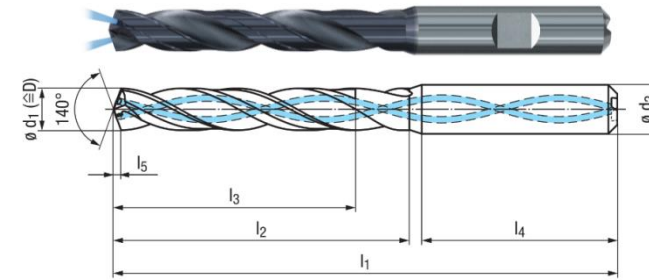
- 가공 디지털 트윈 모델의 절삭력 모사 기술 개발 – CNC 장비 활용 가공 실험 Set-up



[Ti-6Al-4V Mechanical properties]

Length (mm)	103*103*30
Tensile Strength, Yield (MPa)	1100
Elongation at Break (%)	10
Modulus of Elasticity (GPa)	114
Shear Strength (MPa)	760
Melting Point (°C)	1604-1660

	RPM [min ⁻¹]	Feed [mm/min]	Peck Drill [mm]	Thickness [mm]
ND/LFVAD	2700	200	10	10



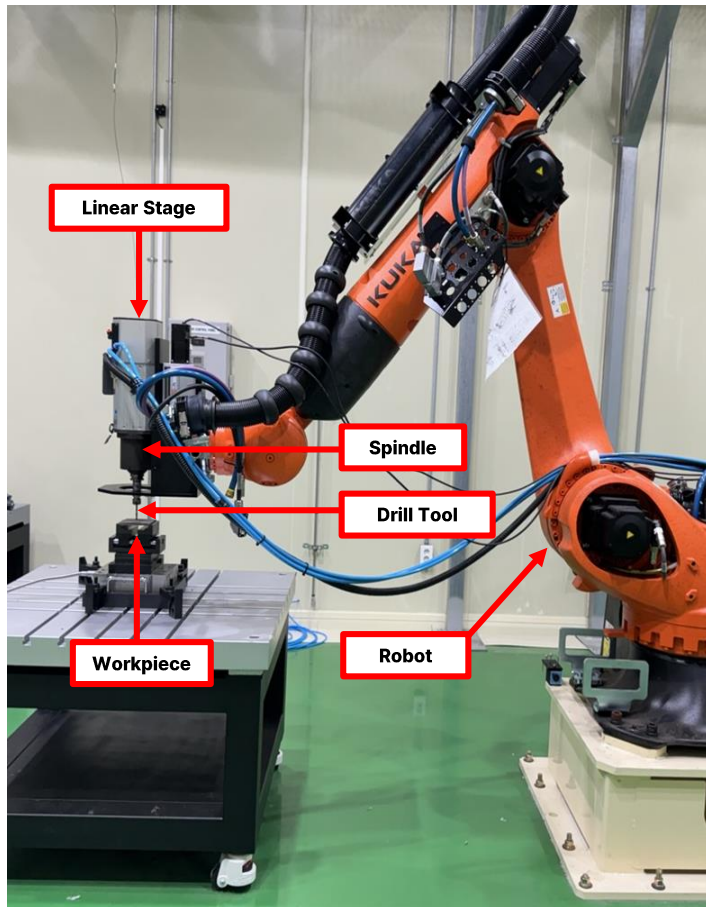
[Drill Technical details]

Diameter (mm)	6
Coolant supply	Internal coolant supply
Coating	TIALN-T63
Tool- sense of rotation	Right hand
Point angle (°)	140
Cutting material	Carbide

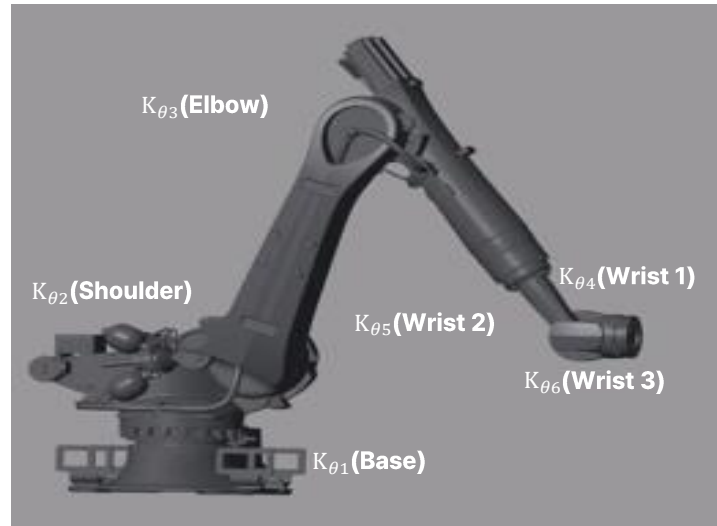
6. 개발사례 2: 가공공정 디지털 트윈

Development Method

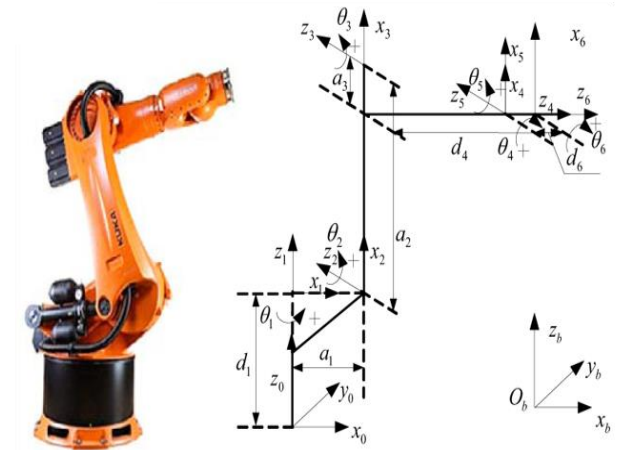
- 가공 디지털 트윈 모델의 절삭력 모사 기술 개발 – 로봇 활용 가공 실험 Set-up



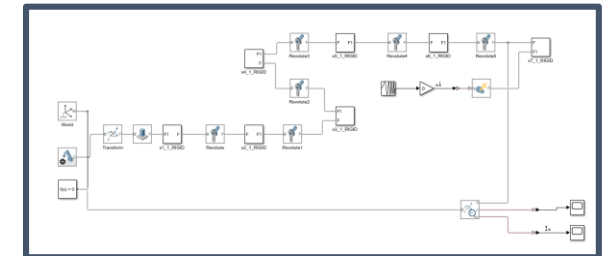
[Robot(KUKA KR 300R2700-2) drilling process schematic]



[Revolute joint of the robot]



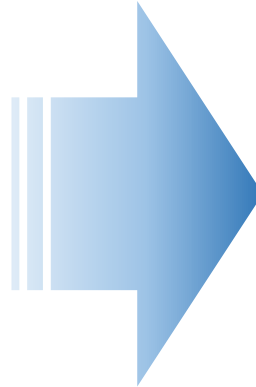
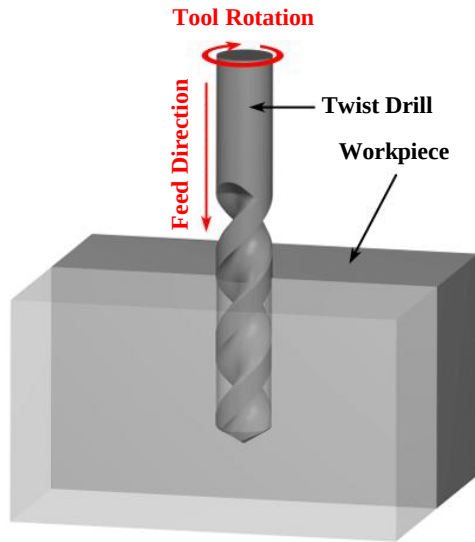
- CNC 가공 대비 낮은 강성 → 드릴날 불안정성, 진동(Oscillation) 발생 가능
Stiffness, Damping 측정 위해 로봇 각 축 인자 도출을 위해 Modal test 수행
- 테스트 결과 기반, Body - Joint 연결 SIMSCAPE 예측 모델 생성
- Simulink 모델에서 로봇 팔 끝단 위치에서 선형 분석과 주파수 응답 평가 수행
- 기존 연구 데이터를 초기 강성 값으로 설정 후 최적화 (Dumas et al.)



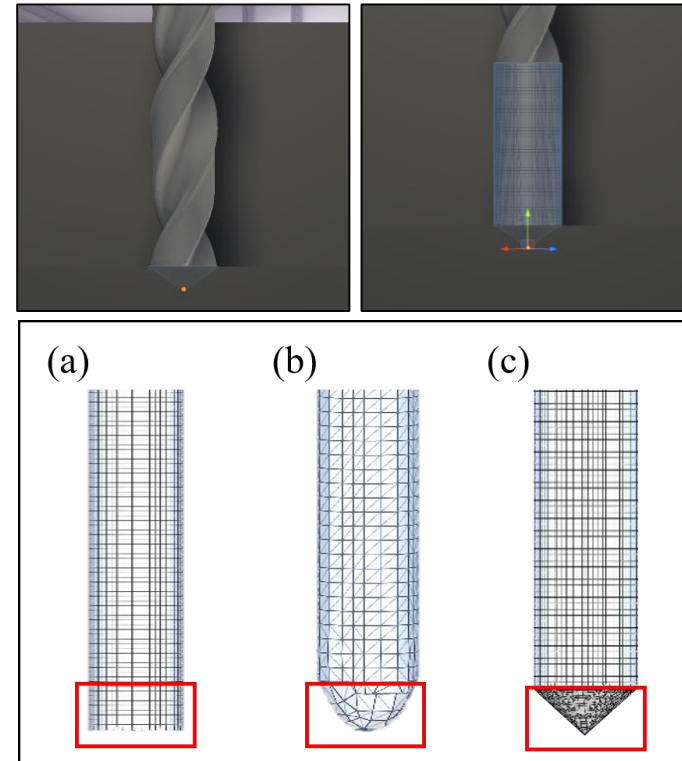
6. 개발사례 2 : 가공공정 디지털 트윈

Development Method

- 디지털 가시화 모델 개발 – 드릴 Prefab 형상



[Schematic and Actual View of Drill Tool in Machining Process]



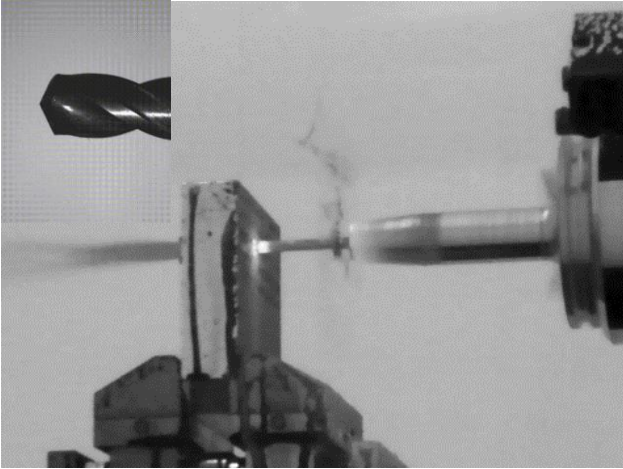
[Comparison of Drill Prefab Shapes]
(a) Cylinder, (b) Cylinder + Sphere (c) Cylinder + Cone

- 계산 부하와 형상 정확도를 위해 실제 드릴 형상을 기반으로, 원통형(Cylinder), 반구형(Sphere), 원뿔형(Cone), 3가지를 적용하여 절삭력 도출 결과에 따라 각 드릴 Prefab 형상을 비교하였음.

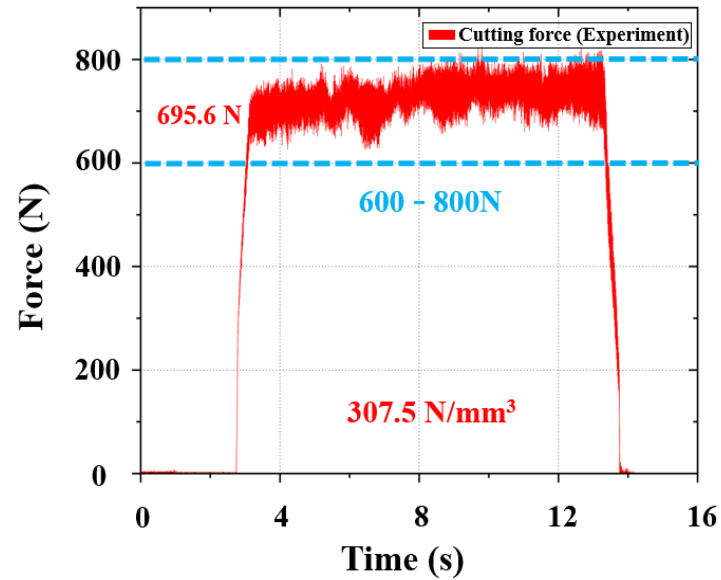
6. 개발사례 2 : 가공공정 디지털 트윈

Result & Discussion

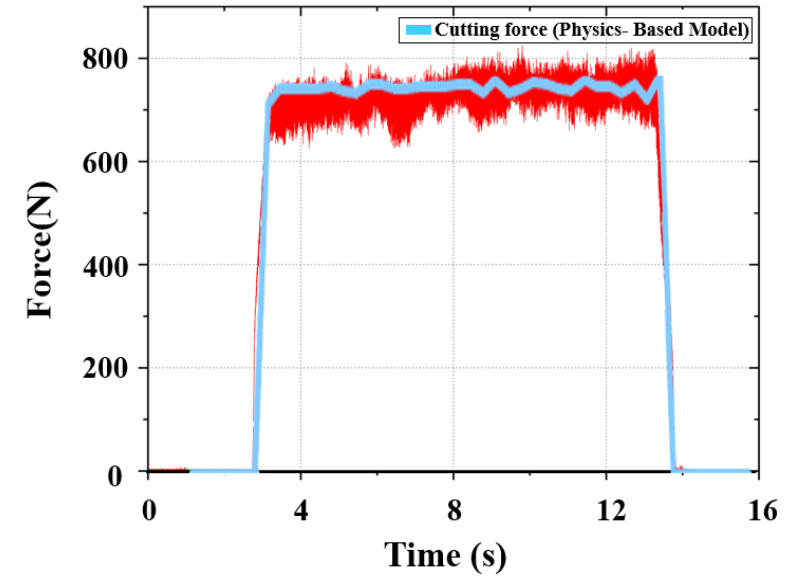
● 절삭력 물리 모델과 CNC 가공 실험 결과 비교



[CNC Machining Experiment Scene]



[Cutting Force Measured on the CNC Machine]



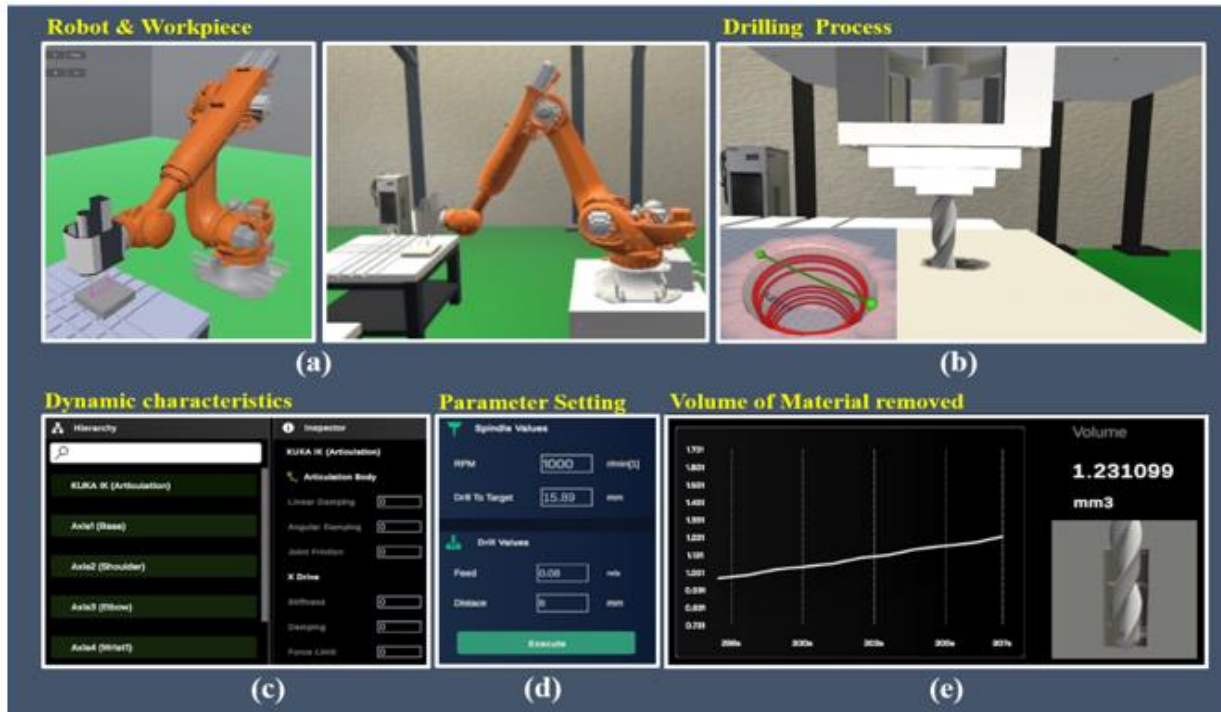
[Cutting Force Predicted by the Physics Based Model]

- 주요 절삭 구간(600N – 800N)에서 절삭력 물리 모델의 예측이 $\pm 2\%$ 이내로 일치하여, 실제 드릴링 공정 예측 및 제어에 유효함을 입증함.

6. 개발사례 2 : 가공공정 디지털 트윈

Result & Discussion

가공 디지털 트윈 모델 UI 가시화 결과



[Digital Twin Model UI Visualization]

(a) Robot & workpiece, (b) Drilling Process, (c) Dynamic characteristics, (d) parameter setting, (e) Volume of material removed



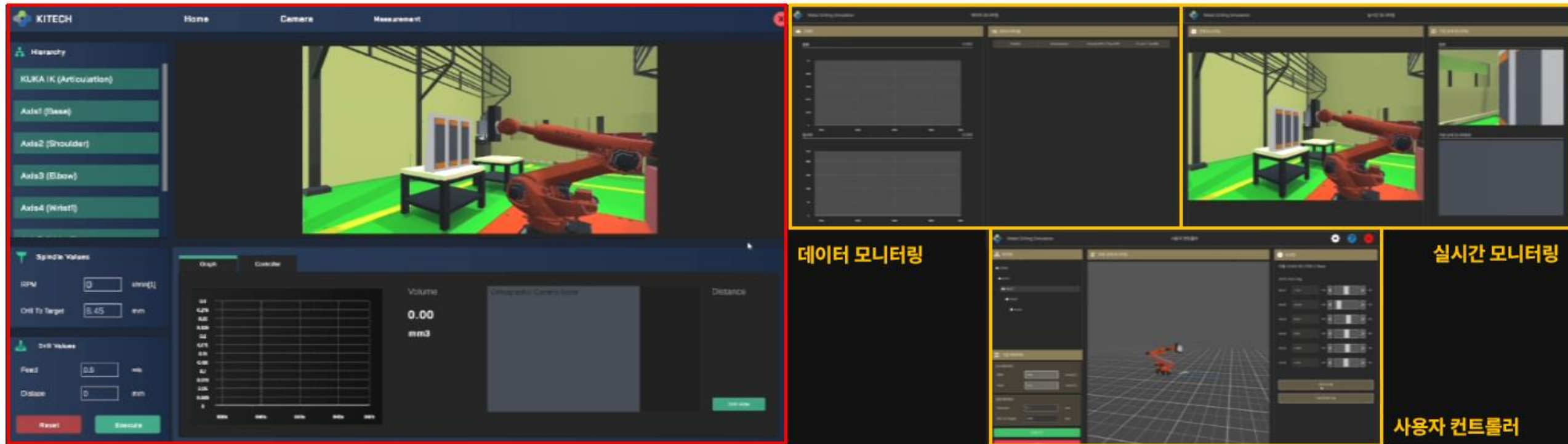
[Machining Digital Twin Model Drilling Video]

- 디지털 환경에서 로봇·공구·공작물을 3D로 가시화하고 드릴링 공정 진행과 함께 절삭된 부피량의 누적 변화를 동시 표시하여, 모델의 정상 동작을 확인함과 동시에 공정 변수 변화를 직관적으로 파악할 수 있음을 입증함.

6. 개발사례 2 : 가공공정 디지털 트윈

Result & Discussion

가공 디지털 트윈 모델 개발 결과



[Machining Digital twin software and Holonic Manufacturing System (HMS) Integration Result Video]

- 홀로닉 생산시스템(HMS)은 다수의 공정 모듈을 유기적으로 연결하고, 개별 공정 데이터를 실시간 수집 및 분석하여 최적화된 제어를 수행하는 지능형 제조 실행 시스템이다.
 - 가공 디지털 트윈 SW와 HMS의 연동 시뮬레이션으로 실시간 공정 상태와 가시화 등을 확인함으로써 실시간 제어의 신뢰성을 입증하였음.