



AI 기반 소프트웨어 정의 공장을 활용한 제조 혁신

임규혁*

Abstract

디지털 전환의 가속화와 함께 제조 분야는 유연성과 생산성 강화를 위한 AI 기반 소프트웨어 정의 공장을 도입하고 있다. 소프트웨어 정의 공장은 하드웨어 중심의 전통적 제조 방식을 벗어나 소프트웨어 기반의 공정 최적화, 실시간 데이터 분석, 자율운영을 가능하게 하는 요소로 작용한다. 본고는 소프트웨어 정의 공장의 개념과 기술적 요소를 살펴보고 소프트웨어 정의 공장 구현을 통한 제조 혁신 사례를 중심으로 산업별 적용 방안을 살펴보았다. 특히 자동차, 기계, 화학·제약 산업 등 소프트웨어 정의 공장(SDF) 도입에 따라 예측 유지보수, 생산 공정의 자동화, 맞춤형 제조, 품질 향상이 실현되고 있음을 확인하였다. 또한, 소프트웨어 정의 공장이 제조 분야의 지속가능한 혁신을 이끄는 핵심 동인임을 제시하며, 향후 발전 방향과 정책적 시사점을 제공하였다.

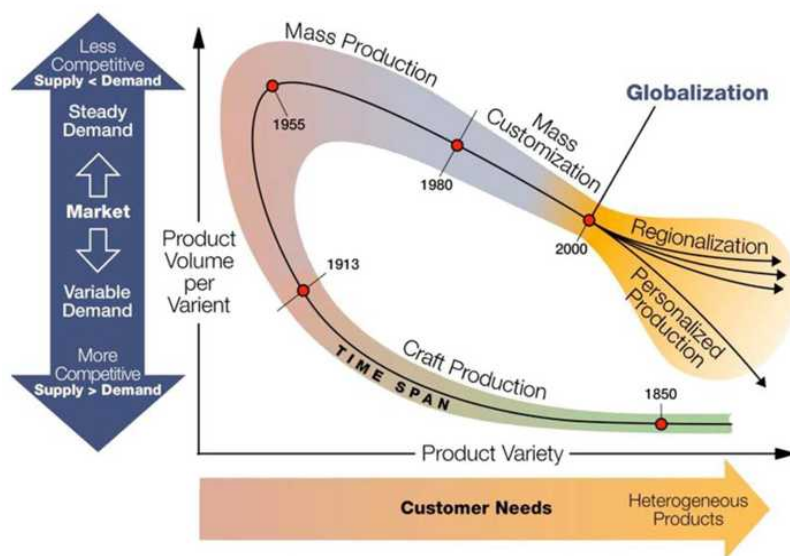
I. 서론

전통적으로 대량 생산 체계를 기반으로 발전해 온 제조업은 산업혁명이 진행되는 과정속에서 공정 자동화와 효율성 증대를 위한 대규모 생산 방식을 추구하였다. 하지만 고객 수요의 변화와 시장 경쟁 환경은 유연성과 효율성을 모두 갖춘 생산 방식으로의 전환을 제조 분야에 요구하고 있다. 특히 4차 산업혁명으로 대표되는 디지털 전환 시대의 진입과 함께 핵심기술로 여겨지는 사물인터넷(IoT), 빅데이터 분석, 클라우드 컴퓨팅·엣지 컴퓨팅, 디지털 트윈 및 AI는 기존 제조 분야의 패러다임을 변화시키는 모습이다(Lee et al., 2015; Schuh et al., 2015). 제조 분야에서는 디지털 전환의 핵심기술을 활용한 생산성 증대를 모색하고

* 슈타겐 수석연구원, khlim@shutagen.com

있으며, 특히 AI를 중심으로 융합된 기술들을 활용하는 현장에서는 제품 기획부터 생산, 물류, 서비스 단계를 아우르는 전 과정에서 실시간 데이터 기반의 의사결정으로 시장 변화에 유연한 대처와 고품질의 제품을 생산하기 위한 모습을 보이고 있다. 이러한 변화 가운데 ‘소프트웨어 정의(Software-Defined)’ 방법은 공정 제어, 네트워킹, 스토리지 등 제조 프로세스의 전반을 유연하게 구성하고 운영할 수 있기 때문에 제조 분야에서 차세대 인프라로 주목받고 있다.

그림 1 제조 패러다임 전환과 동인



자료: Qin & Lu(2021:p38), 그림 인용

2014년 가트너가 제시한 10대 전략 기술 중 하나인 SDx(Software-Defined Everything, 이하 SDx)는 소프트웨어를 네트워크로 관리하는 SDN(Software-Defined Networking, 이하 SDN)에서 발전된 개념으로 네트워크 관리의 효율성을 확보하기 위해 중앙에서 소프트웨어로 제어하는 방법을 의미한다. 이러한 소프트웨어 기술 활용 영역이 네트워크에서 시작되어 로봇, 자동차 등으로 확대되며 SDx 개념으로 확장되었다. SDx에서 파생된 개념인 소프트웨어 정의 공장(Software-Defined Factory, 이하 SDF) 방법은 소프트웨어가 기술의 중심이 되어 다양한 현장 내 생산요소들에 가치를 증대시킬 뿐만 아니라 디지털 전환을 추구하는 모든 영역에서 적용이 가능하다.¹⁾ 기존 제조 현장에서는 설비나 장비 등의 하드

1) 헬로티(2024), [AW 2025 주목할 솔루션-③] 제조 디지털 전환 이끄는 'SDF'...디지털 트윈 그 중심으로 '우뚝'

웨어 중심 변화로 대응에 초점을 두었다면, 이제는 소프트웨어를 통해 제조 환경이 유연하게 제어되어 생산성과 효율성을 동시에 달성할 수 있게 된 것이다. SDF를 통해서 제조 현장의 물리적 장비 및 디지털 자산들은 소프트웨어 정의를 통해 자율제어와 실시간 모니터링, 자원 최적화를 달성할 수 있으며, 제조 공정을 비롯한 다양한 프로세스가 소프트웨어적으로 추상화됨으로써 자동화된 의사결정 및 실시간 제어가 이루어진다. 즉, 기존 하드웨어인 장비·설비 중심의 운영이 아닌 데이터와 소프트웨어가 제조 관리와 운영 전략 수립에 핵심적인 역할을 하는 것이다.

이러한 SDF가 제조 분야의 혁신을 이끄는 데 있어 AI는 핵심적인 역할을 담당한다. 왜냐하면 제조 공정에서 발생하는 대규모 데이터를 수집, 분석하고 이를 기반으로 학습 모델을 구축하여 예측 분석 및 의사결정을 지원하기 때문이다(삼성SDS, 2023). 예를 들어, IoT 기기의 센서를 통해 수집한 실시간 데이터와 과거 이력들을 결합하여 장비나 설비의 이상 징후나 품질 저하를 사전에 예측함으로써 유지보수 시점을 알 수 있게 된다. 또한, 생산 일정의 최적화, 공정 간 협업 로봇 제어 및 에너지 효율화 달성 등 다양한 영역에서 AI 기술이 활용되고 있으며, 이를 통해 제품 불량률 감소와 운영 비용 효율성 증대, 품질 향상 등 전반적인 제조 효율성을 달성하는데 기여하고 있다. 이처럼 AI 기반 자율운영 시스템은 제조 과정의 순서를 동적으로 재배치하거나 고객 요구에 따른 다품종 소량 생산에 있어서도 유연한 대처가 가능하다(Mourtzis et al., 2016).

AI가 접목된 SDF는 초연결(Hyperconnectivity) 환경에서 보안과 신뢰, 표준화 등 다양한 기술적, 제도적 이슈와도 연계되어 있다. 예를 들어, 제조 공정에서 생성된 대규모 데이터를 어떠한 방식을 활용하여 안전하게 전송하고 저장할 것인지, AI 모델을 학습하는데 활용한 데이터 품질의 보증 정도는 어떻게 할 것인지, 그리고 자동화 과정에서 발생할 수 있는 불확실성과 책임 소재는 어떻게 관리할 것인지 등은 모두 현실에서 우선적으로 해결해야 할 중요한 사안들이다. 따라서 SDF를 적용하기 위해서는 법·제도, 윤리 이슈를 함께 검토하는 것이 필요하며 이를 기반으로 한 통합 운영 전략 수립이 요구된다.

본고는 이러한 배경들을 바탕으로 AI 기반 SDF 개념과 기술 요소들을 종합적으로 살펴보고 제조 분야의 혁신 방안에 대해 논하고자 한다. 먼저 SDF의 이론적 배경과 핵심구성 요소를 세부적으로 살펴보고 이를 구현하기 위한 구체적인 AI 기술 스택 등을 제시한다. 또한, 실제 현장에서 적용 중인 SDF 사례를 분석하고 산업별 특징을 살펴봄으로써 SDF가 실제 제조 현장에서 활용될 수 있는 방안을 논의하고자 한다. 최종적으로 SDF가 기술적 유행에 국한되지 않고 AI와 SDF의 결합이 가져올 미래 제조 분야의 변화상을 조망함과 동시에 현장에서 의미 있는 가치 창출과 구체적인 시사점을 제공하는데 목적이 있다.

II. 소프트웨어 정의 공장의 개념 및 특성

2.1. 소프트웨어 정의 공장의 적용 및 이점

SDF는 하드웨어에 집중한 기존의 제조 방식이 아닌 소프트웨어를 기반으로 제조 공정의 최적화 및 자동화를 설명하는 개념이다. 급진적인 기술의 진보가 진행되고 있는 현재 시점에서 제조 분야는 SDF를 통하여 생산 공정의 유연성은 극대화되고 빠르게 변화하는 환경에 대응할 수 있는 방향으로 설계되고 적용하는 중이다. 이러한 SDF가 갖고 있는 특징은 소프트웨어를 중심으로 한 운영, 클라우드 및 엣지 컴퓨팅(Edge Computing) 활용, 디지털 트윈 기술 접목과 AI 및 머신러닝(ML) 기반 자동화, 유연한 생산 환경 조성 등을 갖고 있다. 즉, 소프트웨어를 중심으로 한 운영은 하드웨어를 변경하여 최적화를 도모했던 방식과는 다르게 기존 하드웨어를 그대로 유지한 상태에서 제조 공정의 최적화가 가능해진다. 또한, 클라우드 및 엣지 컴퓨팅을 통한 실시간 데이터 수집·분석을 통해 원격 운영 및 관리 효율성이 높아지게 된다. 디지털트윈은 제조 환경과 동일한 디지털 공간 내에서 시뮬레이션 및 모니터링을 가능하게 하며, AI 및 머신러닝 기반 자동화는 현장의 장비, 설비 등에 대한 유지보수, 제품 품질관리와 생산 최적화에 효과적으로 작용한다. 종합하면, SDF의 적용은 제조 환경에서 유연성을 확보함으로써 기존의 고정된 라인에서 생산된 방식에서 벗어나 다품종 생산과 변경을 소프트웨어를 통해 제공하는 특징을 보인다.

표 1 소프트웨어 정의 대한 기준점

주요 특징	내용
추상화 (Abstraction)	• 물리 구현으로부터의 자원화로서 자원으로부터의 의존성을 감소하는 디커플링(decoupling)이 기준
장비 (Instrumentation)	• 물리 및 가상 인프라에 대한 모니터링을 통해 지능화된 분석이 가능한지 여부
프로그래밍 가능성 (Programmable)	• 문서화된 API를 통해 서비스 프로비저닝 뿐만 아니라 모든 IT 프로세스에 대한 자동화 여부
자동화 (Automated)	• API 및 기타 다른 자동화 도구를 이용한 요소 구성 및 구성 식(equation)에 따른 사용자에 의해 생성된 미들웨어 제거 가능 여부
정책 기반 관리 (Policy Management)	• 비즈니스 요구 사항을 충족하기 위해 미리 만들어 놓은 정책을 기반으로 중앙 집중화된 구성 및 분산화된 인프라 재구성 가능 여부

출처: 최영락 & 김찬호(2014), 확산되는 소프트웨어 정의(SDX) 개념 및 동향, 소프트웨어정책연구소

최근 제조 분야에서는 SDF에 활용되는 기술적 특징들에 대해서 높은 관심을 보이고 있는데 이는 글로벌 차원에서의 공급망 불확실성의 확대 및 AI가 유발하는 고용 양극화의 심화, 그리고 최종 소비자의 다양한 요구가 지속적으로 증가하고 있기 때문이다(Accenture, 2022; Lee et al., 2015). 앞서 언급하였듯이 제조 분야의 일반적인 환경 변화 대응 방식은 하드웨어를 교체하거나 장비·설비의 재구축에 초점을 두고 있는 만큼 시간과 비용 측면에서 효율적으로 대응하는데 한계가 존재했다. 하지만 SDF가 구축된 환경에서는 공정 변수(parameter) 또는 생산 라인의 변경이 소프트웨어 레벨에서 진행되기 때문에 예상치 못한 공급망의 급격한 변화가 발생하더라도 가상 공간에서의 시뮬레이션과 이를 기반으로 한 자동화된 재계획을 통해 생산 전략을 보다 효율적으로 조정할 수 있게 된다(McKinsey, 2022; Mourtzis et al., 2019).

디지털 전환이 점차 일상과 업무 현장에 접목되면서 고용 양극화 및 고속련 인력에 대한 비용 상승은 제조 분야에 있어 중요한 도전 과제로 여겨지고 있으며, 이에 대한 해결방안 중 하나로 SDF의 핵심 도구인 지능형 로봇과 자동화 시스템 도입이 확산되고 있다(Kagermann et al., 2013; Nguyen et al., 2021). 즉, SDF 도입으로 인력 수급의 안정성을 확보하고 기존 인력을 고속련 업무로 재배치할 수 있는 기회를 얻게 된다.

한편, 소비자 요구가 다양해지고 개인화 양상이 뚜렷하게 보이는 사회적 특징은 다양한 제품의 개인 맞춤형 생산을 요구하고 있으며, 이러한 특징을 반영하기 위해서는 유연한 제조 및 생산 체계가 필수적인 상황이다(Schmidt et al., 2015). SDF에서는 제조 공정을 소프트웨어 기반으로 관리하기 때문에 제품의 설계나 공정 시퀀스(sequence)의 변경이 신속하게 진행되고 가상 공간에서 시뮬레이션을 통해 재작업과 낭비를 최소화한다(Mourtzis et al., 2016). 이러한 방식은 사회·문화적 변화가 창출한 다양한 수요를 충족하는데 있어 적합한 방식으로 작용할 것이다.

글로벌 차원에서 강화되고 있는 환경 규제와 지속가능성 요구는 정부와 소비자, 그리고 생산자에게 탄소배출 저감과 친환경 생산 공정을 요구하고 있다(IEA, 2021). 이러한 상황에서 SDF는 센서 기반 실시간 데이터 수집·분석과 함께 AI 예측 모델을 기반으로 에너지 사용과 폐기물을 최적화함으로써 탄소 배출을 줄이는데 긍정적인 영향을 준다(Tercan & Meisen, 2022). 또한, AI 기반 예측 모델이 접목된 SDF 환경에서는 장비·설비의 이상 징후나 불필요한 가동 상태를 사전에 파악함으로써 유휴 시간(idle time)과 폐기물을 줄이는 방식을 통해서도 환경 친화적인 현장을 유지할 수 있게 된다.

종합하면 글로벌 차원의 공급망 불확실성, 고용 양극화 심화, 맞춤형 생산 요구, 환경 규제 강화, 클라우드·엣지 컴퓨팅 등을 활용한 생산 환경의 자동화 니즈 등 복합적 요소들은

복합적 요소들로 인해 SDF를 통한 유연한 공정과 생산 방식 전환이 필요하다. 특히 SDF가 제공하는 소프트웨어 기반 통합 제어와 최적화 기능은 기존 제조 분야에서는 달성하기 어려웠던 높은 수준의 유연성과 민첩성을 제공하므로 시장 경쟁 속에서도 지속 가능한 성장을 실현할 수 있는 핵심적인 수단으로 작용하게 된다(Lee et al., 2015).

2.2. SDF 구현과 AI 기술 스택

SDF와 AI 기술들을 통합하여 제조 공정의 혁신을 위해서는 기술 스택(stack)을 고려해야만 한다. 왜냐하면 SDF 구현의 핵심은 제조 현장에서 발생하는 데이터를 안정적으로 수집하고 처리할 수 있는 인프라가 필요하기 때문이다. 구체적으로 산업용 IoT 센서, 비전 카메라 등 다양한 장치로부터 온도, 압력, 진동, 영상 등의 데이터를 실시간으로 수집하게 된다. 확보된 데이터가 상위 시스템으로 전송되기 위해서는 산업용 이더넷을 포함한 무선 네트워크, 5G, OPC UA 등 표준 프로토콜을 활용해야 하며, 엣지 컴퓨팅이 도입된 현장에서는 초저지연(ultra-low latency) 처리가 가능하다는 특징이 있다(Lee et al., 2015).

클라우드 인프라 및 데이터 관리 단계에서는 클라우드 플랫폼(AWS, Azure 등)을 기반으로 대규모 데이터를 저장하고 분석하며, 상황에 따라 데이터 레이크를 구축하여 다양한 분석에 대응하게 된다. 이러한 환경에서는 플랫폼 및 분석 도구를 활용하여 머신러닝 모델을 개발, 학습, 배포함으로써 공정 자동화, 품질 예측, 이상 징후 감지 등 다각적인 활용이 가능하다. 아울러, MLOps 도구를 통한 모델의 버전 관리와 지속적 학습 파이프라인 구축은 동적인 공정 환경 변화에도 안정적으로 AI 모델을 유지·개선할 수 있는 기반을 제공한다(Armbrust et al., 2010; Chen & Chen, 2020).

다음으로 소프트웨어 정의 운영 및 오케스트레이션 영역에서는 도커(docker)와 같은 컨테이너 기술과 쿠버네티스(kubernetes)²⁾ 기반의 오케스트레이션을 통해 애플리케이션의 배포와 유연한 스케일링을 지원한다. 또한 CI·CD 파이프라인이 구축되어 상황에 적합한 새로운 기능과 업데이트된 모델의 자동 배포가 진행되며, 디지털 트윈을 적용한 실제 공장 설비와 공정 상황을 가상 환경에서 시뮬레이션을 통해 설비의 변경이라던지 공정 스케줄의 조정에 따른 변화 정도를 사전 검증할 수 있다.

SDF가 접목된 모든 과정에서는 보안과 안정성 확보가 필수적이다. 제조 공정, 설비에 활용되는 IoT 장비, 클라우드 인프라 등 SDF 구현에 필요한 요소들에 대한 보안 체계 마련

2) 도커(docker)는 컨테이너를 다루는 도구이며 쿠버네티스(kubernetes)는 컨테이너 런타임을 통해 컨테이너를 오케스트레이션 하는 도구를 뜻함

및 고가용성(high-availability) 시스템 등의 백업·복구 전략 수립이 선행되어야 한다. 마지막으로 MES(manufacturing execution system), ERP(enterprise resource planning), SCADA(supervisory control and data acquisition) 등 기존 제조 시스템과 연계를 통해 자동화에 국한되지 않고 전체 제조 프로세스와 통합된 환경을 구현할 수 있다.

표 2 소프트웨어 정의 공장 주요 특징

구분	주요 특징	내용
1	실시간 데이터 수집 및 모니터링 (Real-time Data Acquisition & Monitoring)	<ul style="list-style-type: none"> • 센서를 통한 데이터 실시간 수집 및 분석 • 클라우드·엣지 컴퓨팅 기반 대규모 데이터 처리 및 지연 최소화 • 생산 현황 및 품질 변화를 즉각 감지해 이상 상황에 대응
2	AI 기반 품질 모니터링 (AI-driven Quality Monitoring)	<ul style="list-style-type: none"> • 머신러닝·딥러닝을 통한 불량품 검출 및 결함 패턴 분석 • 비전(Vision) 시스템과 연동하여 제품 표면·내부 결함 자동 검출 • 적응형 모델(Adaptive Model)로 공정 변화에도 지속적인 정확도 유지
3	공정 최적화 (Process Optimization)	<ul style="list-style-type: none"> • 생산과 품질 데이터 통합 및 분석으로 공정 파라미터(온도, 압력, 속도 등) 자동 제어 • 폐루프 제어(Closed-loop Control)로 동적·지능형 공정 설정 가능 • 생산 일정 및 자원 배분 최적화로 낭비 요인 최소화
4	유연한 재구성 및 적응 (Agile Reconfiguration & Adaptation)	<ul style="list-style-type: none"> • 소프트웨어 정의 방식을 통해 공정 변경 및 신제품 생산에 대응 • 모듈화·재사용 가능한 공정 설계로 특정 모듈만 교체하거나 업데이트 가능 • 디지털 트윈(Digital Twin)으로 가상 시뮬레이션 후 실제 공정에 반영
5	예측 유지보수 (Predictive Maintenance)	<ul style="list-style-type: none"> • 장비 상태 데이터를 분석해 고장 가능성 예측 및 유지보수 시점 결정 • 불필요한 장비 교체나 점검을 줄여 비용 효율과 생산성 극대화 • AI 기반 고장 원인 분석(Root Cause Analysis)으로 개선책 도출
6	운영 효율성 및 의사결정 지원 (Operational Efficiency & Decision Support)	<ul style="list-style-type: none"> • 대시보드·알림 시스템으로 실시간 현황 모니터링 및 신속 대응 • AI 모델 분석 결과를 기반으로 한 의사결정 지원 시스템(DSS) 구축 • 엔지니어·관리자·현장 작업자 간 통합 플랫폼을 통한 협업 및 정보 공유
7	확장성 및 표준화 (Scalability & Standardization)	<ul style="list-style-type: none"> • 클라우드 네이티브(Cloud-native) 인프라로 확장 및 대규모 연산 지원 • OPC UA, MQTT 등 산업 표준 프로토콜과 오픈 API 활용 • 사이버 보안·데이터 프라이버시 강화로 안전하고 신뢰도 높은 운영 환경 조성

출처: Okuyelu, O., & Adaji, O.(2024). 저자 정리

앞서 언급하였듯이 SDF 환경에서는 AI 기반의 기술 스택을 핵심으로 간주한다. AI 기술 스택은 제조 공정의 효율성과 품질, 안전성을 확보하는데 있어 핵심 요소로 작용하며, 급격히 변화하는 제조 환경에서도 지속적인 혁신과 경쟁력을 유지할 수 있게 된다(Tercan & Meisen, 2022; 전호일 외, 2022; PwC, 2024). 세부적인 내용을 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 제조 공정에서 발생하는 다양한 데이터(센서, 이미지, 로그 데이터 등)는 노이즈 제

거, 정규화, 결측치 처리 등의 전처리 과정을 거치며, 산업 도메인 지식을 반영한 데이터 전처리 및 피처 엔지니어링(feature engineering)이 진행된다. 이러한 데이터 정제와 전처리 단계에서는 모델 학습의 효율성과 예측 정확도 향상이 상호 간 연관되어 있기 때문에 이중 데이터의 정합성 확보가 중요하다. 모델 개발 단계는 전처리 데이터를 통해 머신러닝과 딥러닝 모델을 구축하게 되는데 제품 결함을 검출하기 위한 합성곱 신경망(convolution neural network)과 공정 시간 변화를 예상하기 위한 순환 신경망 등의 모델을 적용하게 된다.

모델 개발이 완료된 이후에는 학습된 모델을 실제 제조 공정에 적용하고 지속적으로 관리하는 머신운영(MLOps) 단계가 진행된다. MLflow, AWS SageMaker 등 다양한 AI·머신러닝 모델의 개발 및 운영에 활용되는 도구들을 통해 자동화된 학습 파이프라인을 구축하고 모니터링을 지원하며, 이를 통해 변화하는 공정 조건에 적합한 내용을 모델에 활용할 수 있다. 또한, 제조 현장에서 발생하는 데이터에 대해 실시간 추론 및 엣지 AI 기술은 지연 시간을 감소시켜 이상 징후에 대한 즉각적인 피드백을 제공하게 된다. 이러한 시스템은 제조 라인의 가동 중단 시간을 최소화함으로써 운영 효율성을 향상시킨다(Zaharia et al., 2016). 마지막으로 제조 현장에 적용한 모델은 모니터링과 자동화된 피드백 루프(loope)를 통해 전체 단계에 대한 관리가 진행된다. 종합하면, SDF의 구현과 AI 기술 스택은 데이터 전처리부터 모델 개발, 그리고 모니터링과 실시간 추론 등 단계별로 활용되는 기술들이 유기적인 결합을 통해 제조 공정의 효율성과 품질을 향상시키는데 기여하게 된다.

종합하면 SDF를 통한 제조 분야의 혁신은 복잡한 제조 현장을 소프트웨어 중심으로 유연하게 정의하고 제어함으로써 생산 효율성 확보, 민첩성, 데이터 기반 의사결정 수준이 한 단계 업그레이드되어 달성할 수 있게 된다. 하드웨어와 소프트웨어를 디커플링하여 발생한 유연성, 실시간 데이터 통합과 분석, 노코드(no-code) 솔루션에 의해서 복잡한 의사결정에 따른 혁신이 아닌 현장 주도의 혁신이 이루어지게 되는 것이다. 그러나, 기존 레거시 장비와 데이터 관련 보안, SDF 분야 인력의 역량 증대 등 선행되어야 할 과제들이 존재하며, 소규모 제조 현장까지 확산되기 위해서는 표준화, 생태계 형성, 기술 검증에 대한 연구가 지속적으로 진행되어야 한다. SDF 환경의 핵심은 유연성과 통합 관리라 할 수 있는데 결국 제조 현장에서 발생하는 대규모 데이터와 복잡성을 효율적으로 다루기 위해서는 AI 기술 스택과의 결합이 필수적이다. 데이터 레이어부터 오케스트레이션 레이어, 비즈니스 레이어 전반에 있어 AI가 활용되어 실시간 분석과 예측, 자율 대응이 진행됨으로써 SDF가 지향하는 민첩성과 최적화를 달성할 수 있게 된다.

2.3. SDF 도입과 자율제조

AI는 SDF의 핵심 기술로 자리 잡고 있으며, 다양한 제조 공정에서 필수적으로 활용되고 있다. SDF 도입은 AI 자율제조 체계의 핵심 요소인 실시간 최적화, 자율제어, 예측 유지보수 및 데이터 기반 의사결정을 구현함으로써 제조 환경에서 경쟁력과 지속 가능성을 강화시킨다. 기존 제조 환경의 변화 영역은 크게 설비 및 공정 구조 변화, 실시간 데이터 기반 의사결정, 설비 제어의 지능화, 인력 및 조직 역량 강화, 운영 효율성과 안전성 제고 등이 있다. 보다 구체적으로 살펴보면 설비와 공정 부분에 있어 소프트웨어적인 재설계가 가능해짐으로써 유연하고 모듈화된 생산 체계 구축이 가능해진다. 다음으로 IoT 센서와 디지털 트윈 등으로 연결된 생산 라인에서는 실시간 데이터 수집 및 분석으로 공정 변수를 자동으로 조정하거나 장비와 설비 이상을 AI를 통한 진단으로 사전에 예측하고 정비하는데 활용하게 된다. 또한, 로봇과 지능형 제어시스템을 통해 자동화 수준이 향상되어 제품 모델 변경 등 급격한 변화에서도 신속한 라인 재구성이 이루어진다. 이러한 상황에서 제조 현장 인력은 단순 반복된 작업을 수행하는 것이 아니라 시스템 설계와 분석, 알고리즘 제어, 협동 로봇 등 고급 기술을 요구하는 영역에 대한 역량을 확보하는데 집중할 수 있게 된다. 결과적으로 생산 소요 시간(lead time)과 비용 효율성 확보, 품질 향상, 시장 변화에 유연하게 대응할 수 있는 자율제조 환경으로 진화하게 된다.

표 3 AI 기반 SDF와 자율제조

변화 영역	자율제조에 미치는 영향
실시간 프로세스 최적화 및 재구성	• 생산 라인이 현재 생산 조건에 맞춰 자동으로 최적의 공정 흐름과 운영 파라미터를 도출함으로써, 맞춤형(또는 주문형) 및 다품종 생산 환경에서 효율과 품질이 향상되고 다운타임은 최소화
분산 자율제어 및 모듈 협업	• 개별 생산 모듈이 자율적으로 운영되고 협력하여 공정 변동 또는 장애 상황에 대해 신속히 대응함으로써 전체 시스템의 복구와 안정성이 강화되고 생산 신뢰성 향상
예측 유지보수 및 자율 문제해결	• 장비·설비 고장을 사전에 예측하고 자율적으로 대응하여 생산 중단 시간을 감소하고 유지보수 비용 및 불량률을 감소시킴으로써 전체 설비 가동률(OEE)을 개선
통합 데이터 플랫폼 및 실시간 의사결정	• 다양한 시스템의 데이터를 통합하여 실시간 분석이 진행됨으로써 제조 공정이 자율적으로 문제를 감지하고 즉각적으로 대응하기 때문에 전체 시스템의 운영 효율성과 생산성이 증대

자료: 저자 정리

Ⅲ. 산업별 SDF 도입 및 적용 현황

SDF가 제조 혁신에 미치는 긍정적 영향을 살펴본 결과 유연성과 효율성, 그리고 최적화가 핵심 키워드라 얘기할 수 있다. 현재 산업별 SDF 활용은 도입 초기에 있으며, 이미 스마트팩토리로 전환한 기업들의 경우 일부 공정을 소프트웨어 정의 개념을 적용하는 중이다. 이러한 SDF 개념은 다양한 산업군의 특성에 적합하게 구현되어 혁신을 이끌고 있다. 본고에서는 자동차, 전자·반도체, 우주·방위, 기계, 화학·제약 산업 및 제조 솔루션 분야에서의 SDF 활용 사례와 기술적 특징을 구체적으로 살펴보고자 한다.

3.1. 자동차 산업

자동차 제조 분야는 초기 제품 설계 및 기획부터 자동화와 디지털 트윈 등의 기술을 통해 소프트웨어 기반 생산 혁신을 선도하는 모습이다. 생산 라인을 가상으로 구현한 디지털 트윈을 통해 부품 조립 공정을 시뮬레이션하고 최적화함으로써 문제를 사전에 발견하고 공정 효율을 높이고 있다. 예를 들어, 자동차 생산 라인 중 하나의 라인에 디지털 트윈을 적용하였을 경우 생산 효율은 약 6% 향상되고 다운타임이 약 87% 감소하는 것으로 나타났다(Mendi, 2022). 이처럼 가상화된 공장 모델과 센서 데이터를 연동하여 실제 설비의 데이터를 실시간 수집하고 피드백함으로써 문제 발생을 예측하고 대응할 수 있게 된다. 최근 첨단화된 자동차 공장들은 중앙 소프트웨어 플랫폼으로 센서 데이터와 장비를 통합 관리하고 있다. 메르세데스-벤츠의 팩토리56은 무인 자동운반 장치(AGV)에 장착된 센서로부터 수집된 데이터를 수집하고 분석하여 생산 프로세스 개선에 활용하고 있으며, 예측 유지보수를 통해 설비 고장을 예방하고 품질 향상에 활용하고 있다.³⁾ 이처럼 모든 장비와 설비가 네트워크로 연결되고 이로부터 발생하는 데이터가 통합 관리되는 SDF 환경에서는 설비 상태를 상시 모니터링할 수 있으므로 선제적인 유지보수가 가능해지기 때문에 생산 라인의 가동률은 높아지게 된다.

무엇보다 SDF는 다품종·맞춤형 생산의 유연성을 혁신적으로 높일 수 있는 핵심적인 역할을 하고 있다. 현대자동차그룹이 제시한 SDF 비전에 의하면 차종이나 사양 변경 시 생산 라인의 물리적 변경 없이 소프트웨어 설정만으로 전환이 가능하다는 점을 언급하고 있다.⁴⁾ 생산 설비의 제어 논리를 일원화하여 제품 전환에 빠르게 대응하는 중앙집중식 제어

3) Mercedes-Benz 공식 홈페이지

4) 현대자동차그룹(HMG Developers) 공식 홈페이지

를 통해 고객 맞춤형 차량을 실시간에 근접한 수준으로 생산하는 것이 가능해지고 있다.

이처럼 자동차 산업에서 SDF는 디지털 트윈으로 생산 과정과 완성된 제품을 사전에 검증하고 IoT 데이터 통합으로 공정을 지능화하여 소프트웨어적 공장 제어로 유연 생산을 달성하는 방향으로 진화하고 있다.

표 4 산업별 SDF 활용사례

구분	유스케이스	주요 특징
자동차	<ul style="list-style-type: none"> 생산 라인의 공정을 디지털 트윈으로 구현, 센서 데이터와 실시간 피드백을 소프트웨어 플랫폼에서 통합 관리 차량 모델이나 옵션이 변경될 때 기존 물리적 설비 변경 없이 생산 공정의 흐름 및 파라미터 재구성 → 다운타임 감소 및 생산 효율 향상 	<ul style="list-style-type: none"> 디지털 트윈과 중앙집중식 제어로 다 품종 생산 유연성 극대화
전자·반도체	<ul style="list-style-type: none"> 제조 단계별 제어 로직을 소프트웨어 계층으로 분리, 장비 별로 상이한 부분을 하나의 인터페이스로 관리 생산 라인 모듈을 독립적으로 운영하여 제품 변화에 따라 신속한 공정 전환 	<ul style="list-style-type: none"> 모듈식 생산 라인과 예측 유지보수로 생산 전환 속도와 품질 향상
우주·방위	<ul style="list-style-type: none"> 엔진 제조 공정에서 설비 상태를 지속적으로 모니터링하고 자율제어 시스템이 실시간으로 유지보수를 실행 불량률과 생산 중단 시간을 최소화하여 부품을 안정적으로 생산 	<ul style="list-style-type: none"> 정밀한 시뮬레이션과 자율제어를 통하여 복잡한 제조 공정의 안정성을 확보
기계	<ul style="list-style-type: none"> 조립 라인에 엣지 컴퓨팅을 도입하여 각 모듈의 제어 로직을 현장에서 자율적으로 관리함으로써 장애 발생시 신속한 작업 재분배 및 공정 복구 생산 공정의 탄력성 확보 및 자원 사용 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> 엣지 컴퓨팅 기반 자율제어와 실시간 에너지 관리로 공정 탄력성을 강화
화학·제약	<ul style="list-style-type: none"> 생산 데이터를 통합 관리하고 실시간 분석을 통해 품질 관리 및 규제 요구사항에 따른 공정 변경을 자동으로 진행 규제에 따른 변화에 대해 유연한 생산 라인 재구성 기능 	<ul style="list-style-type: none"> 실시간 공정 조율 및 규제에 부합하는 생산 방식의 유연화
제조 솔루션	<ul style="list-style-type: none"> 제조 설계, 생산, 유지보수 등 모든 프로세스를 하나의 소프트웨어 플랫폼으로 통합하여 관리(다양한 시스템과 연계하여 실시간 데이터 분석 및 의사결정 지원) 	<ul style="list-style-type: none"> 전체 제조 프로세스를 통합 플랫폼으로 관리, 데이터 기반 의사결정 지원 및 생산 혁신

자료: 저자 정리

3.2. 전자·반도체 산업

제품의 주기가 짧고 설비 투자 비용이 상대적으로 큰 전자·반도체 산업은 SDF를 통해서 유연한 생산 전략과 다운타임 최소화가 특히 중요하다. SDF 도입을 통해 기존 설비를 최대한 활용하면서 제품 변경에 따른 공정 재구성이 소프트웨어로 진행됨으로써 제품 업그레이드나 모델 전환에 신속한 대응이 가능해진다. 예를 들어, 어떠한 제품을 생산할지에 따

라 장비의 동작 레시피만 소프트웨어로 전환하여 생산 라인을 신속하게 재구성함으로써 장비 교체 없이도 다양한 제품을 하나의 설비에서 생산할 수 있는 것이다. 이러한 방식을 설명하는 대표 사례로 3D-Micromac AG는 Bosch Rexroth와 협업을 통해 인쇄형 전자 제품의 대량 생산을 위한 모듈형 생산 라인(microFLEX)을 개발하였다. 해당 모듈형 생산 라인은 롤 투 롤(Roll to Roll) 공정을 모듈화하여 제품 종류가 변경되어도 모듈을 추가 또는 교체만으로도 유연한 대응이 가능하다는 특징을 갖고 있으며, 고정밀 장력 제어 등을 통해 생산 효율을 높였다.

전자·반도체 공장은 한 대의 장비 가동이 멈추더라도 생산에 차질이 발생하기 때문에 AI와 센서 데이터를 활용한 설비 상태의 예측 관리에 적극적인 모습이다. AI 기반 예지정비를 도입하면 설비 가동시간은 10~20% 증가하고 유지보수 계획에 소모되고 시간을 50% 단축되며, 부품 비용도 10% 절감된다(Deloitte, 2017). 예를 들어 인텔은 소프트웨어 정의 네트워크를 도입하여 공장 내부 통신을 자동화함으로써 새로운 공장 네트워크 구축에 필요한 인력 85%를 줄이고 구축 시간을 상당 부분 단축하였다(Intel, 2022). 소프트웨어 중심의 자동화가 인력과 시간의 효율화를 달성하는데 한 축을 담당하게 되었고 이를 통한 생산 전환은 가속화되는 것이다. 이러한 SDF 구현으로 전자·반도체 생산 라인 유연성이 향상됨으로써 제품의 스펙 변화나 공정 개선에 대한 아이디어를 즉각적으로 현장에 반영할 수 있다. 결과적으로 전자·반도체 산업에서는 SDF를 기반으로 한 재구성이 용이한 모듈식, 예지보전을 통한 무중단 운영 및 데이터 통합 플랫폼으로 품질 향상을 실현하는 모습이다.

3.3. 우주·방위 산업

우주항공 및 방위 산업은 복잡한 제조 공정과 높은 수준의 품질을 요구하고 있는 만큼 SDF를 통해 제조 로직을 소프트웨어 계층으로 추상화하고 통합 관리하며, 고도의 시뮬레이션과 자율제어를 적용하는 방향으로 발전하고 있다. 제조 단계별 제어 로직을 하드웨어에서 분리하여 소프트웨어적으로 일원화하면 로켓 또는 항공기 부품과 같이 수 많은 공정 단계로 이루어진 복잡한 생산 흐름을 중앙에서 효율적 관리가 가능해지고 투명성 또한 높아진다. 대표적인 사례로 록히드 마틴(Lockheed Martin)은 캘리포니아의 팜데일에 약 215,000피트 규모의 지능화된 유연 생산 공장을 구축하면서 내부의 모든 제조 설비는 디지털로 연결하였고 생산 제어는 소프트웨어로 가능하게 하였다. 즉, 제조 구성요소와 IoT를 포괄하는 디지털 기반에 의한 공장 구축으로 생산 변경을 소프트웨어로 대응하는 유연성을

갖추고 있다.⁵⁾ 특히, AI를 포함한 로봇 등 디지털 전환 핵심기술을 도입하여 사람과 기계의 협업을 극대화함으로써 전용 지그나 고정 장치의 필요성이 줄어들었다고 언급하였는데 이는 생산 장비의 물리적 전환 없이도 소프트웨어 업데이트와 재프로그래밍을 통해서 다양한 부품 조립에 대응할 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 록히드 마틴은 미국 내 4개의 디지털 공장을 완공하고 지능형 공장 프레임워크라는 통합 시스템으로 연계하였으며, 그 중 한 공장은 IPC-CFX 표준과 FactoryLogix MES 플랫폼을 활용해 모든 제조 데이터를 단일 언어로 통합함으로써 이기종 시스템 간 네트워크의 용이성을 확보하였다. 이처럼 표준화된 데이터 수집과 통합 MES를 통해서 방산 제품 생산에 대한 추적과 정확성을 높이게 되었다. 보잉과 에어버스는 부품 조립 공정에 자동화 로봇을 도입하여 현장 작업자가 디지털 기기에 표시된 지시사항에 따라 정확하게 작업하도록 하고, 실시간 품질 데이터로 의사결정을 지원하는 SDF 접근을 확대하고 있다. 요약하면, 소프트웨어 중심 공정 제어로 복잡한 생산 라인을 관리하고 디지털 트윈 및 시뮬레이션을 통해 고품질 제품에 대한 신뢰성을 높이고 있으며, AI를 포함한 협동 로봇 등과의 자율성과 정밀도를 높이는 방향으로 활용되고 있다.

3.4. 기계 산업

기계 산업 분야는 생산 라인의 모듈화와 독립 운영을 기반으로 생산 제품 종류 변경에 신속하게 대응하고 엣지 컴퓨팅 기반 자율제어와 에너지 관리로 효율성을 확보할 수 있는 SDF에 주목하고 있다. 모듈식 생산 라인은 각각의 공정 모듈이 자체 제어 시스템을 갖추고 있으며 자율적으로 운용이 가능한 특징이 있으며, 필요에 따라 모듈을 추가하거나 제거하여 생산 순서가 변경됨으로써 라인을 유연하게 재구성할 수 있다. 대표적인 사례로 공정 자동화 기술을 갖춘 Festo의 MTP(Module Type Package) 기반 자동화 방식은 각각의 모듈이 네트워크로 연결되어 있으면서도 독립적인 기능 단위로 동작하며 표준화된 인터페이스로 중앙 오케스트레이션에 접속하게 된다.⁶⁾ 개별 모듈은 자체적인 제어 및 센서를 갖추고 있기 때문에 PnP(Plug-and-Play) 방식으로 공정에 투입되고 하나의 모듈에 오류가 발생하더라도 해당 모듈만 교체하면 전체 시스템을 중단하지 않고도 유지보수가 가능하다. 이러한 방식을 통해 기계 산업 관련 제조 분야는 제품 사양 변경이나 생산량 변동에 신속

5) LOCKHEED MARTIN 공식 홈페이지

6) Festo 공식 홈페이지

하게 대응하고 새로운 모듈 조합을 통해 생산 라인을 재구성할 수 있다. 대표적 사례로 한 자동차 부품 공급업체에서는 밸브 커버 생산 라인을 멀티프로토콜 I/O와 온보드 로직으로 구성된 독일 터크(Turck)사의 분산 제어 솔루션으로 모듈화한 이후 생산 라인의 유연성과 신뢰성을 향상시킬 수 있었다.⁷⁾ 탈중앙화 제어가 가능한 모듈식 생산 방식은 기계 산업 전반에서 SDF 기반을 제공하는 역할을 한다.

SDF의 핵심요소인 엣지 컴퓨팅은 현장 단위에서 데이터를 실시간으로 처리하고 제어하는 기능을 한다. 기존 클라우드로 전송했던 데이터를 현장의 장비 근처에서 분석하기 때문에 지연 시간이 줄어들고 즉각적인 피드백이 이루어진다. 엣지 계층에서 실시간으로 에너지 데이터를 분석하여 기계 동작을 조절하고 에너지 소비를 최적화할 수 있으며, 네트워크 장애가 발생했을 경우에도 현장 제어가 지속적으로 이루어져 생산 공정이 멈추지 않는 자율 운영이 가능한 것이다.⁸⁾ 예를 들면 제조 공정에서 엣지 AI가 장착된 카메라로 제품 검사를 진행 중 이상이 발견되면 즉각적으로 생산 라인을 중단시켜 불량 제품이 다음 공정으로 넘어가지 않게 하거나 기계 설비의 진동, 온도 등의 데이터를 상시 모니터링하여 고장 징후를 감지하면 즉시 정비 예약을 하는 등 현장 수준에서 자율제어가 진행된다. 요약하면, 기계 산업 분야에서의 SDF 활용은 모듈화와 엣지 제어 기술을 바탕으로 생산 유연성과 효율성을 향상시키고 에너지와 설비 상태를 실시간으로 관리함으로써 비용 절감과 무중단 운영을 실현하는 방향으로 발전하고 있다.

3.5. 화학·제약 산업

화학 및 제약 산업은 규제 준수와 품질의 안전성과 일관성을 최우선으로 고려해야 하므로 SDF 접근을 통한 실시간 모니터링과 제어, 유연한 생산 방식을 적용할 수 있다. 연속공정을 주로 운영하는 화학 공장이나 배치(batch) 공정 위주인 제약 공장의 경우 모두 센서를 통해 설비의 상태나 제품 품질을 지속적으로 모니터링하고 결과에 따라 자동으로 제어를 조율하는 자율운영 시스템이 도입되고 있다. 미국 식품의약국이 정의한 공정분석기술(Process Analytical Technology)은 제약 산업의 표준 또한 SDF 개념의 한 형태로 볼 수 있다. 이를 통해 생산 제품이 규격을 벗어나지 않도록 실시간으로 공정을 제어할 수 있을 뿐만 아니라 실시간 제품 방출(Release)도 가능하다. 예를 들어 배양 공정에 공정분석기술을 적용하면 pH나 용존산소 등을 자동으로 제어하여 일정 품질을 유지하면서도 공정 시간

7) TURCK 공식 홈페이지

8) SUSE 공식 홈페이지

을 단축할 수 있는 것이다. 이러한 실시간 피드백 제어 방식은 작업자가 직접 시료를 채취하고 시험하던 기존 방법보다 빠르고 정확하여 엄격한 규제와 높은 품질 기준을 준수하면서도 생산 효율을 높이는 효과가 있다.

한편, 유연한 생산 방식을 도입한 화학·제약 산업은 다품종 소량 생산과 분산화를 통해 생산에 대한 대응이 가속화되고 있다. 대표적인 혁신으로 여겨지는 화이자의 모듈 및 연속 생산 플랫폼은 전통적인 배치 생산을 소형 연속 생산 장비로 대체하여 생산 소요 시간을 획기적으로 단축하였다.⁹⁾ 화이자는 이를 위해 휴대용, 연속형, 미니어처 및 모듈식 생산에 사용되는 모듈형 공정을 개발하여 특정 경구용 의약품 제조 프로세스가 기존 몇 주간 소요되던 것을 불과 몇 분으로 단축하는데 성공하였다. 화학 산업에서도 연속식 모듈 플랜트가 주목받고 있다. 대규모 단일 공장 대신 소규모 모듈 공장을 여러 곳에 배치하고 소프트웨어로 중앙 관리하는 방식을 시도하고 있다. 모듈형 생산이 갖는 이점은 제품 전환이 빠르고 필요 시 설비를 증설하거나 이동하기 용이할 뿐만 아니라 공조 시스템 부담도 줄어드는 등 유연성과 경제성 측면에서 유리한 측면이 있다.

정리하면 화학·제약 산업에서의 SDF는 실시간 데이터 기반 공정 제어를 통한 품질의 일관성 유지 및 예지보전으로 설비 가용성을 극대화하며, 모듈러 연속 생산 방식으로 유연성을 높이는 방향으로 전환하고 있는 중이다. 이를 위한 핵심요소는 공정 데이터를 수집·통합하여 규제 준수와 최적화에 활용하는 통합 플랫폼이며, 선도 기업들은 제조 운영 플랫폼을 구축하여 데이터 기반의 의사결정을 지원하고 있다.

3.6. 제조·솔루션 분야

SDF 개념의 확산이 진행됨에 따라 제조 솔루션 업체들도 이를 지원하는 통합 플랫폼과 서비스를 개발하여 모든 산업 영역의 혁신을 추구하고 있다. 이러한 솔루션들은 공통적으로 불량률과 다운타임을 최소화하고 전체 제조 프로세스를 통합 관리하는데 목표를 둔다. 생산 라인을 완전한 디지털 시스템으로 구현한 Husco International은 최종 공정에서의 재작업률이 50% 이상 감소하였고 품질 또한 개선된 것으로 나타났다.¹⁰⁾

전체 공정을 포괄하는 통합 플랫폼은 SDF 구현의 필수 요소로 작용하고 있으며, 대표적으로 MES, SCADA, IIoT 플랫폼을 결합한 제조운영관리(MOM) 소프트웨어가 각광 받고 있다. 플랫폼을 기반으로 경영진은 실시간 대시보드를 통해 운영 상태를 한번에 파악하면

9) Pfizer 공식 홈페이지

10) METISAUTOMATION.CO.UK

서 동시에 AI 기반 분석 인사이트를 활용해 최적화된 의사결정을 하게 된다. 또한, 생산 일정과 공급망 정보까지 연계한 디지털 스레드를 구축함으로써 수주부터 출하까지 엔드 투 엔드(end-to-end)로 프로세스를 통합 관리하여 생산 소요 시간 단축과 함께 대응력 향상을 실현하고 있다. 현재 시점에서 대표적인 SDF 지원 솔루션 기업으로는 지멘스, GE, 록웰, ABB 등이 있고 이들의 솔루션은 클라우드와 엣지 연계, AI·머신러닝 기반 예측 모델, OT와 IT 통합 등에 주력하고 있다. 예를 들어 지멘스의 MindSphere는 PLM과 MES와 연계를 통해 설계부터 생산, 유지보수에 대한 전 과정을 데이터로 연결한다. 실제로 Schneider Electric의 스마트팩토리에서는 해당 플랫폼을 도입하고 품질 관련 프로그램을 적용하여 불량 폐기 비용을 40% 절감하였다.¹¹⁾ 이처럼 SDF의 핵심요소이자 제조 혁신의 키워드인 데이터 중심 제조 방식으로의 전환은 품질 개선과 생산성 향상의 이점이 실제로 현장에서 발생되고 있음을 알 수 있다. 요약하면, 제조 솔루션 분야에서의 SDF 적용은 현장의 설비부터 시작하여 최고경영층까지 모두를 포함하는 통합 데이터 플랫폼이 우선적으로 필요하다. 이를 통해 실시간 모니터링, 제어, 분석, 의사결정이 가능하도록 함으로써 제조 분야의 지속적인 개선과 민첩한 대응 문화를 정착시키는 방향으로 나아가고 있다. 또한, 불량률 제로와 무중단 생산을 지향하는 솔루션들은 개별 기업에 국한되는 것이 아닌 산업 전반의 경쟁력을 높이는데 기여하고 있다.

표 5 SDF 도입에 따른 영향

구분	내용
주요 기술	• 디지털 트윈, IoT, 엣지 컴퓨팅, AI, 표준화된 네트워크
성과 및 전망	• 생산성 향상, 비용 절감, 품질 관리, 소프트웨어 정의 제조 시대의 도래
기대효과	• 운용 효율성 극대화, 자율운영

자료: 저자 정리

산업군별 사례를 통해 알 수 있듯이 SDF는 제조 패러다임을 기존 하드웨어 중심에서 소프트웨어 중심으로 전환함으로써 유연성, 민첩성, 지능화를 달성하는 목표를 지향하고 있다. 제조 분야의 경쟁 환경 변화 속도는 더욱 빨라지고 있고 고객의 요구는 보다 세분화되고 복잡해지고 있다. 따라서 전통적인 방식을 통한 제조 운영으로는 시장 환경에 효과적인 대응이 어려운 상황에 놓일 수 밖에 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 SDF는 디지털 전

11) RCRWIRELESS.COM

환 핵심기술을 적극적으로 도입하고 있으며, 특히 디지털 트윈, IoT, 엣지 컴퓨팅, AI 등 기술 발전은 SDF의 핵심 동인으로 작용하고 있다. 앞서 살펴본 바와 같이 다양한 산업군에서 SDF의 실질적인 도입 효과가 입증된 만큼 제조 분야의 혁신은 더욱 가속화될 것이다.

IV. 결론

본고에서는 AI 기반 SDF 개념이 제조 분야의 혁신에 미치는 영향을 사례 중심으로 살펴보았다. SDF는 하드웨어 중심의 기존 제조 방식에서 벗어나 소프트웨어를 기반으로 생산 공정을 유연하고 효율적으로 제어하는 개념으로 AI 기술을 접목함으로써 제조 현장의 실시간 데이터 수집과 분석, 그리고 자동화된 의사결정을 지원한다. 산업별로 살펴본 사례분석 결과, AI와 결합된 SDF는 제조 프로세스 전반에 있어 유연성과 효율성을 향상시키고 자율 제어를 통해서 급변하는 시장 환경과 다양한 고객 수요에 신속하게 대응하는 핵심 동인으로 작용하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 소프트웨어 정의를 통해 생산 장비와 디지털 자산을 통합 관리하고 AI 기반 예측 및 최적화 방식을 적용함으로써 생산성 향상과 혁신적인 제조 방식으로의 전환이 이루어지는 것이다.

자동차, 전자·반도체, 우주·방위, 기계, 화학·제약 산업 등에서 SDF가 산업별 특성에 따라 구현되고 있는 사례를 통해 공통적으로 나타나는 핵심 가치는 유연성, 예측 가능성, 그리고 통합 관리인 것을 확인할 수 있었다. 자동차 산업에서는 디지털 트윈을 활용한 생산 최적화가 이루어지고 있으며, 전자·반도체 산업에서는 AI 기반 예지보전을 통해 설비가동률을 높이고 제품 변경 시 신속한 공정 전환이 가능해졌다. 또한, 우주·방위 산업에서는 제조 공정의 복잡성을 중앙에서 통합하여 관리하고 시뮬레이션을 적용함으로써 정밀도를 향상시키는 방향으로 발전하고 있다. 기계 산업에서는 모듈식 생산과 엣지 컴퓨팅을 기반으로 한 자율제어 기술을 통해 생산 탄력성과 에너지 효율성이 향상되고 있으며, 화학·제약 산업에서는 실시간 품질 관리 및 규제 준수를 위한 자동화 시스템이 도입되는 등 산업별로 SDF 적용 방식은 일부 차이가 있는 것을 알 수 있다. 산업별로 SDF 구현의 차이가 있지만 AI 기반 SDF의 보편적 가치인 유연성, 예측 가능성, 통합 관리가 구현되어 제조 경쟁력 향상을 이끌고 있는 만큼 SDF는 특정 분야에만 국한된 것이 아닌 전 산업의 제조 패러다임을 혁신하는 원동력으로 작용하고 된다.

SDF 구현으로 기대되는 효과는 생산성과 효율성 향상, 유연한 생산 체계 구축, 그리고 데이터 기반 의사결정 지원 및 품질 개선 등이 있다. 실시간 데이터 분석과 자동화된 공정

조정을 통해 공장 가동률은 증가하고 불량률은 감소하며, 다품종·맞춤형 소량 생산 환경에서도 신속한 대응이 가능해진다. 또한, 제조 시스템 전반에서 데이터를 통합 관리함으로써 경영진과 현장 작업자가 동일한 정보를 실시간으로 공유하고 활용할 수 있기 때문에 빠르고 정확한 의사결정이 이루어진다. 나아가 AI 기반 품질 관리와 예측 유지보수를 통해 제품의 일관성을 유지하고 설비의 효율성을 높일 수 있는 장점이 있다.

하지만 SDF 도입을 위해서는 우선적으로 해결해야 할 사항들이 존재한다. 먼저, 기존 레거시 시스템과의 통합 과정은 결코 쉬운 것이 아니기 때문에 초기 도입 비용과 시간이 많이 소요될 수 있으며, 이기종 시스템 간 인터페이스 표준화도 중요한 이슈로 작용할 것이다. 또한, 네트워크 기반 제조 환경에서는 보안 위험이 증가할 가능성이 높으며, 데이터 전송과 저장에 대한 안전성 확보, AI 의사결정의 신뢰성 문제 등도 선제적으로 대응해야 한다. 법·제도 측면에서는 SDF 확산을 위한 데이터 표준화, 인증 체계, 지적재산권 보호 등 정책적 지원이 필요하며, 제조 데이터 활용과 관련한 가이드라인도 개선이 필요하다. 이와 함께 제조 분야 인력의 디지털 역량 부족과 조직 변화에 따른 저항 문제는 SDF 도입을 저해하는 요인으로 작용할 수 있는 만큼 SDF 도입에 필요한 인재 양성과 교육이 필수적으로 요구된다.

향후 SDF 관련 연구에서는 AI 기반 SDF의 기술적 발전, 정책적 지원 방안, 그리고 경제적 영향을 보다 심층적으로 분석할 필요가 있다. 특히, 옛지 AI, 디지털 트윈, 자율공장 기술의 고도화 방안과 함께 기존 제조업체들이 SDF를 효과적으로 도입하기 위한 최적화 전략 방안 등에 대한 논의가 이루어져야 할 것이다. 또한, 표준화 및 법·제도 개선을 통해 기업들이 안정적으로 SDF를 운영할 수 있도록 지원하는 정책적 연구도 병행되어야 할 것이다. 마지막으로 SDF가 제조 분야에 미치는 경제적 효과, 투자 대비 성과, 노동시장의 변화 등을 종합적으로 살펴보는 것도 필요하다. 결론적으로 AI 기반 SDF는 제조 분야의 디지털 전환을 가속화하면서 생산성 향상과 유연성 증대라는 중요한 가치를 창출하고 있다. 그러나 기술, 정책, 경제 측면에서도 선제적으로 해결되어야 할 과제도 여전히 존재하고 있는 만큼 이를 보완하기 위한 연구와 정책적 지원은 필수적이다. 추가적인 연구와 실증 분석을 통해 SDF의 효과성을 지속적으로 검증하고 이를 기반으로 제조 분야의 패러다임은 재편될 것으로 기대된다.

참고문헌

- 삼성SDS.(2023). 제조업 혁신을 위한 디지털 트윈, 인사이트 리포트.
- 삼일PwC경영연구원.(2024). 생성형 AI를 활용한 비즈니스의 현주소.
- 한국생산기술연구원.(2022). 인공지능 기반 제조 공정설계 솔루션 기술개발 기획연구.
- Accenture.(2022). Software Defined Vehicle Solution. Accenture.
- Armbrust, M., Fox, A., Griffith, R., et al.(2010). A view of cloud computing. *Communications of the ACM*, 53(4), 50-58.
- Chen, L., Chen, P., & Lin, Z.(2020). Artificial intelligence in education: A review. *IEEE Access*, 8, 75264-75278.
- Deloitte.(2017). Predictive maintenance and the smart factory. Deloitte.
- Intel. (2022). Transforming Industrial Manufacturing with Software-Defined Networking. Intel.
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., & Wahlster, W.(2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; Final report of the Industrie 4.0 Working Group. *Forschungsunion*.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A.(2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23.
- McKinsey.(2022). Capturing the true value of Industry 4.0.
- Mourtzis, D., Vlachou, E., & Milas, N.(2016). Industrial big data as a result of IoT adoption in manufacturing. *Procedia CIRP*, 55, 290-295.
- Schmidt, R., Möhring, M., Härtling, R.-C., Reichstein, C., Neumaier, P., & Jozinović, P.(2015). Industry 4.0 - Potentials for creating smart products: Empirical research results. In *Business Information Systems*(pp. 16-27). Springer International Publishing.
- Schuh, G., Gartzten, T., Rodenhauser, T., & Marks, A.(2015). Promoting work-based learning through Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 3, 417-424.