



7 독일 인더스트리 4.0 자문위, 제조업에서 피지컬 AI의 잠재력 검토

⇒ 독일 공학한림원 인더스트리 4.0 연구자문위원회*는 산업제조 현장에 피지컬 AI를 접목한 ‘자율 공장’의 가능성과 제반 과제를 탐색한 보고서**를 발표(‘26.3)

* Forschungsbeirat Industrie 4.0

** Physical AI in der Industrie: Der Schlüssel zur autonomen Fabrik?

- (개요) 보고서는 디지털 트윈과 결합된 피지컬 AI가 자율 공장 구현을 위한 발판이 될 수 있음을 강조하면서, 피지컬 AI 실용화 현황과 과제를 정리
 - 독일의 제조업 디지털화 전략인 인더스트리 4.0의 맥락에서 피지컬 AI에 대한 정의를 제안하고, 제조업 현장(대규모 생산 설비)에서의 활용 잠재력을 조망
 - 특히, 피지컬 AI가 대규모 플랜트 공정에 적용되어 활용되는 사례를 하나의 모델로 도식화해 제시함으로써 그 잠재력을 구체적으로 설명
 - 이를 바탕으로 제조업 현장에서 피지컬 AI를 실용화하기 위한 전제 조건들을 검토하고, 연구개발과 관련된 도전 과제들을 정리
- (정의 및 잠재력) 보고서에 따르면 피지컬 AI는 “물리적인 환경과 상호작용하는 사이버-물리 시스템에서 AI를 활용하는 것”으로 정의
 - 생산 공정 자동화가 빠르게 진행되고 있으나 이 중 대부분의 시스템은 정해진 규칙에 따라 작동할 뿐 예측 불가능한 변화에 대한 대응 능력은 미비
 - 그러나 피지컬 AI는 환경으로부터 정보를 획득하고 다른 시스템의 데이터 스트림을 분석해 AI 모델로 해석하고, 스스로 행동을 도출해 실행함으로써 단순 자동화 시스템을 뛰어넘는 새로운 차원의 ‘자율 제조 시스템’을 구현
 - 특히, 기계·시스템·프로세스의 디지털화된 표상인 디지털 트윈과 결합된 피지컬 AI는 지속적으로 데이터를 포착해 시뮬레이션(가상 세계)과 현실을 연결함으로써 실제 상황에 맞는 의사결정이 가능
- (활용 모델) AI 시스템(알고리즘), 디지털 트윈, 에이전틱 AI는 상호 협력하면서 자동화된 플랜트 공정을 구현
 - 플랜트 공정은 ①플랜트에서 수집된 실시간 데이터 분석 및 제어 명령 계산(AI) → ②제어 명령 자동 실행(피지컬 AI) → ③시뮬레이션을 통해 최적의 제어 전략 확인(디지털 트윈) → ④제어 최적화 실행(에이전틱 AI)으로 자동화
 - 이러한 가상 모델은 제조업 현장에서 피지컬 AI의 활용 잠재력을 보여주고 있으나 현재 물리적 시스템에 AI를 통합하는 것은 연구 단계에 머무르는 실정

- **(전제 조건)** 피지컬 AI를 산업 현장에서 효과적으로 구현해 활용하기 위해서는 유연한 적응성과 더불어, 신뢰성·추적 가능성 및 인간 중심성 확보 필요
 - (적응성) 다양한 플랜트·공정 환경에 유연하게 적용할 수 있는 AI 분석 및 제어 모델을 만드는 데에는 지속적인 학습, 전이 학습*, 퓨샷 학습**, 교차도메인 학습*** 등 재학습이 중요
 - * Transfer learning : 이미 한 작업에 대해 학습된 모델의 지식을 다른 관련 작업에 적용하는 머신러닝 방법
 - ** Few-Shot Learning : 적은 수의 훈련 예시(데이터)를 제공해 AI 모델이 패턴을 파악하고 유사한 작업을 수행하도록 유도하는 기법
 - *** Cross-Domain Learning : 서로 다른 도메인 간 공통 특징을 학습하거나, 한 도메인의 지식을 다른 도메인으로 이전해 성능을 향상시키는 머신러닝 기술
 - (신뢰성·추적가능성) 피지컬 AI의 의사결정 신뢰성을 보장하기 위해서는 설명 가능성과 견고성을 확보할 수 있는 메커니즘과 책임 소재 명확화가 필요
 - ※ 로그 생성(Logging), 감사 추적(Audit trail), AI 모니터링과 같은 기술적 솔루션, 표준화된 절차와 인증 프로세스 등
 - (인간 중심성) 피지컬 AI로 업무 방식이 크게 달라지더라도 인간은 여전히 지식 제공자, 의사결정자, 책임자로서 중요한 역할을 수행할 것이므로 인간과 기계 간 매끄러운 소통을 지원하는 것이 중요
 - ※ 인간과 기계 사이의 의사소통을 지원하는 직관적인 인터페이스, AI 시스템이 의사결정에 대해 설명하고 인간의 피드백을 받아 다시 학습할 수 있는 메커니즘 등
- **(도전 과제)** 인더스트리 4.0 시대 피지컬 AI 시스템의 가장 중대한 과제는 시뮬레이션과 실제 현실(플랜트) 간 격차를 좁히는 것이 될 전망
 - 실험실 환경에서는 잘 작동하는 AI 모델이라도 실제 환경에서는 센서 노이즈, 재료 마모 등 여러 예상치 못한 변화에 직면
 - 이때 디지털 트윈은 현실 세계에서 피드백된 데이터를 플랜트 모델에 지속적으로 통합함으로써 모델의 적응성을 개선하는 데에 중요한 역할을 수행
 - 이 밖에도 피지컬 AI와 관련해 데이터 품질, 인터페이스 및 기술 표준, 직원 역량 강화, 중소기업에 대한 접근성 보장 등과 같은 과제 해결이 필요

출처 : 독일 공학한림원 인더스트리 4.0 연구자문위원회 (2026.3.26.)

<https://www.acatech.de/allgemein/forschungsbeirat-physical-ai-industrie/>
https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2026/03/Forschungsbeirat_Kurzformat_Industrie-4punkt0_Physical-AI_260324_WEB.pdf