



• 특집 • 자율제조(Autonomous Manufacturing) II

자율제조 셀 재구성을 위한 제조 운영 기술 기반 AAS 통합 프레임 워크 설계

Design of an AAS-integrated Framework based on Manufacturing Operation Technologies for Reconfiguring Autonomous Manufacturing Cells

이학철¹, 손진호^{2,#}Hak Chul Lee¹ and Jin Ho Sohn^{2,#}¹ 현대위아 로봇SW개발팀 (Robot SW Development Team, HYUNDAI-WIA Co.)² 현대위아 관제시스템개발팀 (Robot Control & Management System Development Team, HYUNDAI-WIA Co.)# Corresponding Author / E-mail: jinho.sohn@hyundai-wia.com, TEL: +82-31-529-1278

ORCID: 0009-0004-0144-484X

KEYWORDS: Asset administration shell (자산관리셸), Autonomous manufacturing (자율제조), Skill-based manufacturing (운영기술기반 제조), Equipment relocation (설비 재배치), Line reconfiguration (제조라인 재구성)

Recent manufacturing environments demand greater flexibility due to the increasing need for high-mix, low-volume production. While mobile and collaborative robots have made it easier to relocate equipment and change layouts, reconfiguring manufacturing cells remains challenging. Successful reconfiguration relies not only on physical layout changes but also on a deep understanding of the original design intent, operational constraints, and the empirical knowledge gained during operation. Unfortunately, this knowledge is often implicit and may depend on engineers or operators who are no longer available. To tackle this issue, this study introduces a framework for manufacturing cell reconfiguration based on the Asset Administration Shell (AAS). This framework integrates static engineering information with the operational knowledge acquired throughout construction and operation. It organizes asset specifications, operational states, manufacturing skills, and related documents into a unified structure, enabling reconfiguration decisions to reflect both system configurations and proven operating conditions. Furthermore, it connects work execution results with operational knowledge, document versions, and raw data references to enhance traceability and reproducibility post-reconfiguration. This proposed approach aims to reduce the complexity and cost of cell reconfiguration and relocation while enhancing operational flexibility, consistency, and scalability.

Manuscript received: March 6, 2026 / Revised: April 10, 2026 / Accepted: April 16, 2026

NOMENCLATURE

AAS = Asset Administration Shell
AMR = Autonomous Mobile Robot
AGV = Automated Guided Vehicle

DOC = Document Submodel in AAS
MPR = Mobile Picking Robot (Mobile Manipulator)
MOS = Manufacturing Operation Skill Submodel in AAS
SPEC = Specification Submodel in AAS
STATE = State Submodel in AAS

1. 서론

최근 제조 산업은 제품 다양화와 수요 변동성 확대에 따라 생산 시스템의 유연성을 요구받고 있다. 이에 따라 일정한 공정 흐름과 고정된 설비 배치를 전제로 설계되었던 전통적인 제조 셀 구조 역시 재구성 가능성을 고려하는 방향으로 변화하고 있다. 과거에는 동일 제품을 장기간 안정적으로 생산하는 것이 중요했다면, 현재는 변화하는 생산 요구에 유연하게 대응할 수 있는 구조가 더욱 중요해지고 있다. 이러한 배경에서 제조 셀을 상황에 맞게 재구성하려는 시도도 점차 확대되고 있다[1,2]. 특히 모바일 로봇과 협동 로봇의 도입은 제조 셀 운영 방식에 실질적인 변화를 가져오고 있다. 고정형 이송 설비 중심의 배치에서 벗어나 설비 간 이동과 작업 공간 활용이 보다 유연해졌고, 이에 따라 셀 구조를 조정하는 데 따르는 물리적 제약도 일부 완화되고 있다. 예를 들어 AGV 또는 AMR 기반 이송 체계는 공정 간 연결 방식을 유동적으로 만들 수 있으며, 협동 로봇은 고정형 자동화 설비에 비해 작업 대상이나 배치 변화에 대한 적응성이 높다[1,3,4]. 이런 점에서 제조 셀의 재구성은 이전보다 현실적인 대안이 되고 있다. 그러나 실제 현장에서의 셀 재구성은 단순한 레이아웃 변경만으로 설명되기 어렵다. 현재의 공정 배치와 운영 방식은 초기 설계 단계의 판단과 장기간 축적된 운영 경험이 함께 반영된 결과이기 때문이다. 설비 위치, 공정 간 거리, 버퍼 설정 등은 생산성뿐 아니라 품질 안정성, 작업 안전성, 유지보수 조건 등을 고려해 형성된 경우가 많다. 따라서 현재의 구조는 겉으로 드러나는 배치 정보만으로는 충분히 설명되지 않는 부분이 있다. 문제는 이러한 설계 의도와 운영 배경이 시간이 지나면서 충분히 공유되지 않는다는 점이다. 초기 구축에 참여했던 기술자나 운영 경험을 축적한 인력이 현장을 떠난 이후에는 관련 지식이 문서나 일부 데이터에만 남는 경우가 많다. 이때 설비 사양, 도면, 작업표준서 같은 정형 정보는 남더라도, 실제 운영 중 조정된 파라미터나 예외 상황에서의 대응 방식, 특정 조건에서만 드러나는 제약은 충분히 보존되지 못하는 경우가 적지 않다. 이 때문에 재구성 시점에는 현재 구조가 왜 유지되어 왔는지, 어떤 조건을 전제로 형성되었는지를 정확히 이해하기가 쉽지 않다. 이러한 상황에서는 정량적 데이터 분석만으로 기존 구조의 형성 맥락을 충분히 반영하기 어렵다. 생산 실적, 사이클 타임, 가동률 같은 지표는 현재 상태를 설명하는 데에는 유용하지만, 특정 구조가 왜 유지되었는지 또는 어떤 운영 제약을 전제로 형성되었는지를 직접 설명하지는 못한다. 따라서 제조 셀 재구성은 기술적 유연성의 확보뿐 아니라, 기존 시스템에 대한 이해와 운영 과정에서 축적된 지식을 어떻게 함께 반영할 것인가를 고려해야 하는 문제라고 볼 수 있다. 최근에는 자산 정보 구조화, 스킬 기반 제어, 유연 셀 컨트롤러 설계와 같은 접근이 제안되고 있으며[3-11], 이러한 연구들은 설비와 기능을 보다 체계적으로 표현하고 유연한 제어를 가능하게 한다는 점에서 의미가 있다. 다만 실제 재구성 시점에서는 정적인 사양 정보만으로는 충분하지 않으며, 운영 중 검증되거나 조정된 조건과 경험 정보까지 함께 반영할 수 있는 구조가 필요하다. 본 논문은 이러한 문제의식을

바탕으로, 운영 경험과 공정 데이터를 함께 반영한 제조 셀 재구성 접근 방법을 제안하고 그 적용 가능성을 검토하고자 한다. 특히 셀 재구성 과정에서 자산 정보, 운용 제약, 문서화된 기준, 그리고 결과 추적 정보를 함께 다룰 수 있는 구조를 통해, 재구성 이후에도 작업 수행과 결과 해석의 일관성을 유지할 수 있는 방법을 살펴보고자 한다.

2. 관련 연구

본 장에서는 자율제조 셀 구축과 운영을 위해 필수적인 핵심 기술을 자율제조 시스템과 물류 시스템, 이기종 장비의 데이터 상호 운용성을 위한 표준(AAS), 그리고 Skill-based Manufacturing로 구분하고 각 분야의 연구 동향을 고찰한다. 또한, 각 영역의 기술이 자율제조 셀의 구축과 운영에 적용되는 과정에서 나타나는 한계 요인을 시스템 재 구성을 위한 유연성 확보 측면에서 찾아보고, 이를 보완하기 위한 운영 정보의 디지털 자산화와 프레임워크화 필요성을 중점적으로 논의한다.

2.1 자율제조 시스템과 물류 자동화

자율제조는 컨베이어 벨트 중심의 고정된 라인 생산 방식을 탈피하여, 유연한 ‘매트릭스 생산 시스템(Matrix Production System)’으로의 전환을 의미한다[1]. 이러한 생산·제조 구조에서 공정이나 장비 간의 연결은 물리적으로 고정되어 있지 않으며, AGV나 AMR 등을 이용한 물류의 자율성이 시스템 전체의 유연성을 결정짓는 핵심 요소이다[1].

자율제조와 물류 자동화 분야의 초기 연구들은 AGV(Automated Guided Vehicle)의 단순 경로 주행에 집중했으나, 최근에는 자율주행 로봇(AMR)을 활용한 동적 경로 계획(Dynamic Path Planning)과 다중 로봇 제어(Multi-agent System)로 연구 범위가 확장되었다[1]. 특히, 제조 셀 간의 물류 이동을 최적화하기 위해 강화학습(Reinforcement Learning)을 적용하여 실시간으로 충돌을 회피하고 최단 경로를 탐색하는 알고리즘 연구가 활발하다[1]. 또한, 이기종 로봇 간의 협업을 위해 VDA 5050과 같은 통신 인터페이스 표준이 제정되면서, 중앙 관제 시스템이 다양한 제조사의 로봇을 통합 제어하는 환경이 구축되고 있다[1].

하지만 기존의 자율제조나 물류 자동화 분야의 연구는 주로 ‘이동과 이송의 효율성(Efficiency)’과 물류 로봇의 ‘작업 처리량(Throughput)’ 극대화에 초점을 맞추고 있다[1]. 반면 실제 생산·제조 현장에서는 특정 셀의 위치가 작업자의 안전 동선, 유지보수 접근성, 혹은 전력 공급 용이성 등 ‘비기능적 요건’에 의해 결정되는 경우가 많다. 또한 장비의 설정과 운전 측면에서는 생산 현장의 조도, 바닥면의 상태, 온/습도 같은 현장 환경뿐 아니라 특히 매뉴얼에 상세히 나오지 않는 개별 장비의 특성과 현장 운용 노하우 등이 매우 주요한 요소이다. 그러나 현재의 자율제조 및 물류 자동화 시스템은 이러한 설계 의도나 운영 상의 노하우나 제약 조건을 데이터화하여 관리하지 않기 때문에, 레이

아웃 변경이나 셀 재구성 시 기존의 현장 운영 맥락이 누락될 위험이 존재한다.

2.2 상호운영성을 위한 Asset Administration Shell

생산·제조 현장의 재구성을 통한 확장과 변경 시 발생하는 기존 운영 맥락의 소실을 막기 위해서는 설계 의도나 운영 노하우를 데이터화하고 자산화 하여 관리하는 ‘디지털 전환(Digital Transformation)’이 필요하다. 이를 위해서는 생산·제조 현장을 구성하고 있는 장비 등의 물리적 자산뿐만 아니라 인간이 현장에서 습득한 운영 노하우 등의 무형 자산을 포함하는 총체적 구성 요소들을 사이버 공간에 투영하는 디지털 트윈(Digital Twin) 기술이 필수적이다[5].

독일의 Platform Industrie 4.0에서 제안한 Asset Administration Shell (AAS)은 자산의 생애주기 데이터를 표준화된 형태로 관리하는 정보 모델로, 기기 간의 상호운용성(Interoperability)을 보장하는 핵심 표준으로 자리 잡았다[6].

AAS는 자산의 명판(Nameplate), 기술 데이터(Technical Data), 운영 데이터(Operational Data) 등을 서브모델(Submodel) 형태로 구조화를 한다. 이러한 구조적 특징 때문에 AAS는 디지털 트윈 구현을 위한 핵심 기술로 다뤄지고 있다[5,7]. 특히 최근 연구들은 AAS를 활용하여 장비가 네트워크에 연결되는 즉시 자신의 기능을 상위 시스템에 등록하는 ‘플러그 앤 프로듀스(Plug-and-Produce)’ 기능을 구현하거나[6], 클라우드와 엣지 컴퓨팅 환경에서 AAS 데이터를 동기화하는 아키텍처를 제안하고 있다[8]. 또한, OPC UA와 같은 통신 프로토콜과 AAS를 매핑하여 실시간성을 확보하려는 시도도 계속되고 있다[7].

하지만 현재의 AAS 연구와 표준 모델은 주로 장비의 ‘기능적 사양(Specification)’나 ‘실시간 상태(State)’ 같은 장비의 객관적이고 정량적인 데이터를 표현하는 데 집중되어 있다[5,6]. 설비 도입 및 제조 셀 구성 당시의 설계 의도, 과거 고장 이력에 따른 조치 사항, 숙련된 작업자의 운영 노하우와 같은 ‘암묵지(Tacit Knowledge)’를 AAS 내에 체계적으로 저장하고, 이를 재구성 시점에 인출하여 활용하는 프레임워크에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다.

2.3 Industry 5.0 기반의 Skill-based Manufacturing

생산·제조 시스템 재구성의 용이성(Reconfigurability)을 극대화하기 위해, 하드웨어의 기능을 소프트웨어적으로 캡슐화 하는 ‘Skill’ 개념이 도입되었다[9]. Skill-based Manufacturing은 장비의 복잡한 제어 로직을 ‘Move’, ‘Grasp’, ‘Weld’와 같은 직관적인 서비스 단위로 추상화하여[10], 제품의 요구사항(Product Requirement)과 제조 자원의 능력(Resource Capability)을 유연하게 매칭하는 것을 목표로 한다[9].

특히 2020년 이후 Industry 5.0 패러다임의 부상과 함께, Skill 연구는 다음과 같이 단순 자동화를 넘어 ‘인간 중심(Human-centric)’과 ‘회복 탄력성(Resilient)’을 강조하는 방향으로 진화하고 있다[9].

우선 온톨로지(Ontology) 기반의 Skill 모델링 연구가 활발하다. 이는 기계가 자신의 능력을 의미론적(Semantic)으로 이해하고, 공정 변화 시 스스로 가능한 작업을 추론할 수 있게 한다[12].

인간 작업자의 역량 또한 하나의 Skill로 정의하여, 로봇과 인간이 최적의 파트너십을 형성하도록 돕는 협업(Collaboration) 연구도 진행되고 있다[12].

마지막으로, 시스템의 회복 탄력성을 위해, 특정 장비 고장 시 동일한 Skill을 가진 다른 자원(기계 또는 사람)으로 작업을 즉시 대체하는 동적 스케줄링 연구가 주목받고 있다[9,10].

그러나 이러한 최신 연구들은 주로 ‘현재 시점’에서의 매칭 가능성에 집중하는 경향이 있다[9,10]. 과거 운영 과정에서 특정 Skill 조합이 품질이나 안전 측면에서 어떤 결과를 초래했는지에 대한 ‘경험적 데이터’가 Skill 모델에 충분히 반영되지 않고 있어, 진정한 의미의 자율적인 재구성을 달성하기에는 한계가 있다.

2.4 제조 셀 운영 정보 통합의 필요성

앞서 살펴본 바와 같이, 자율제조를 위한 물리적 유연성(AMR/AGV), 데이터 상호운용성(AAS), 그리고 제어의 추상화(Skill-based Manufacturing) 기술은 각각 고도화되어 왔다. 그러나 기존 연구들은 주로 시스템의 ‘기능적 구현(Functional Implementation)’과 ‘최적화(Optimization)’에 집중하는 경향이 있다. 즉, 현재의 기술들은 “장비를 어떻게 움직이고 통신할 것인가”에 대한 해답은 제시하지만, “과거에 왜 그렇게 했으며, 특정 상황이나 환경에서 어떤 운영 노하우가 필요한가”에 대한 설계 의도(Design Intent)와 운영 맥락(Operational Context)을 디지털화하고 자산화 하는 데에는 한계를 보인다.

특히 실제 산업 현장에서는 담당자의 이직이나 인사이동으로 인해 암묵지(Tacit Knowledge) 형태의 운영 경험이 소실되는 문제가 빈번하다. 이러한 맥락 정보의 단절은 제조 셀을 재구성할 때 안전 사고의 위험을 높이거나, 불필요한 시행착오를 반복하게 만드는 원인이 된다. Industry 5.0이 강조하는 인간 중심의 회복 탄력성을 확보하기 위해서는, 단순히 장비의 기능적 사양이나 상태 데이터 뿐만 아니라, 운영 과정에서 축적된 경험적 데이터와 설계의 배경 지식을 AAS 기반의 표준 모델로 구조화하여 디지털화(Digitalization) 및 자산화(Assetization)하는 접근이 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 AAS와 Skill 모델을 확장하여, 제조 셀의 물리적 재구성 시 운영 맥락과 경험 데이터를 함께 계승하고 활용할 수 있는 통합 프레임워크를 제안하고자 한다.

3. AAS 모델링과 운영 프레임워크

3.1 대상 시스템 및 공정

본 논문은 현장 창고로부터 소재를 공급받아 가공을 수행하고, 가공 완료품을 검사하여 출하 여부를 결정한 뒤 출하 전

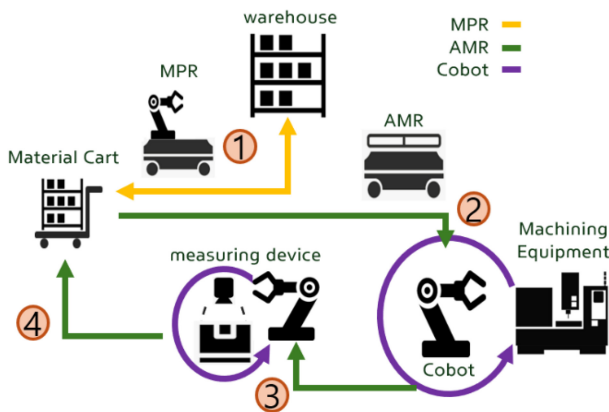


Fig. 1 Target System and process flow

보관까지 수행하는 Fig. 1과 같은 제조 셀을 대상으로 한다. 이후 제시하는 방법론은 이 시스템에서 발생하는 작업의 선후관계와 자원 점유를 고려해 공정 운용을 설명하기 위한 것이므로, 본 절에서는 방법론의 적용 대상을 명확히 하기 위해 시스템 구성과 기능을 먼저 기술한다. 전체 시스템은 기능에 따라 창고셀, 가공셀, 측정셀의 세 하위 셀로 분류된다.

창고셀은 소재 및 제품의 보관과 공정 투입을 위한 준비 작업을 담당한다. 창고셀에는 공급될 소재가 놓이는 테이블과, 테이블에서 소재를 집어 공정에 투입될 단위로 준비하는 모바일 매니플레이터로 구성된다. 모바일 매니플레이터는 테이블 상의 소재를 피킹한 후, 가공셀로 이동하는 카트에 적재함으로써 소재 공급을 수행한다. 또한 창고셀은 가공 및 측정이 완료된 제품을 출하 전까지 보관하는 저장 위치로 활용된다.

가공셀은 소재를 가공하여 제품을 생산하는 공정 셀이다. 가공셀은 소재를 가공하는 가공기와, 가공기에 소재를 투입하고 가공 완료품을 배출하는 협동로봇으로 구성된다. 협동로봇은 카트(또는 지정 인계 위치)로부터 소재를 취출하여 가공기에 로딩하고, 가공이 종료되면 제품을 언로딩하여 다음 단계로 인계한다. 따라서 가공셀에서는 로봇에 의한 설비 투입·배출 작업과 가공기의 가공 작업이 결합되어 제품 생산이 이루어진다.

측정셀은 가공 완료품의 품질을 측정하고 출하 여부를 판정하는 단계에 해당한다. 측정셀은 품질 데이터를 취득하는 비전 검사장치와, 검사 대상 제품을 이동·정렬하여 측정이 가능하도록 하는 협동로봇으로 구성된다. 협동로봇은 제품을 검사 위치로 이송하고 필요 시 자세를 정렬하며, 비전 검사장치는 측정 결과를 기반으로 제품의 합격/불합격(또는 출하 가능/불가)을 판단한다. 판정된 제품은 출하를 위해 창고셀에 보관된다.

시스템의 기본 흐름은 Fig. 1과 같다. (1) 창고셀에서 모바일 매니플레이터가 소재 테이블의 소재를 피킹하여 카트에 적재한다. (2) 가공셀에서 협동로봇이 카트로부터 소재를 취출해 가공기에 투입하고, 가공 후 제품을 배출한다. (3) 측정셀에서 협동로봇이 제품을 검사 위치로 이송·정렬하고 비전 검사장치가 품질을 측정하여 출하 여부를 판정한다. (4) 판정 결과에 따라 제품은 창고셀에 보관되어 출하 전 상태로 관리된다. 이후 장에서는

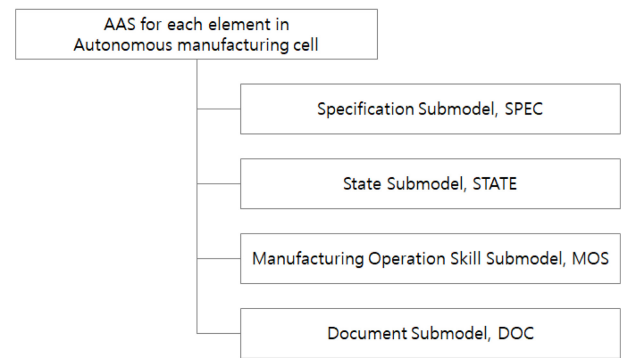


Fig. 2 Hierarchical structure of Autonomous manufacturing cell's AAS

이와 같은 3-셀 구성을 기반으로 각 자원(모바일 매니플레이터, 협동로봇, 가공기, 비전 검사장치 등)의 역할과 작업(피킹/적재, 로딩/언로딩, 가공, 이송·정렬, 측정 및 판정, 보관) 사이의 관계를 고려하고, 이를 토대로 운용 방법을 제시한다.

3.2 구성 요소 단위의 AAS 모델링

본 논문은 3.1절에서 현장 창고로부터 소재를 공급받아 가공을 수행하는 제조 셀의 구성과 공정 흐름(창고셀-가공셀-측정셀-창고셀)을 소개하였다. 이후 절에서는 해당 시스템을 대상으로 한 정보 모델과 운용 프레임워크를 제시한다. 여기서는 셀 단위로 자산을 단순화하기보다, 실제 현장에서 교체·확장·이설이 빈번한 구성요소를 기준으로 자산 경계를 설정하여 AAS로 정의한다. 구체적으로 각 셀의 운용 주체인 셀 컨트롤러를 최상위 자산으로 두고, 셀 컨트롤러가 관리하는 주요 장치(협동로봇, 모바일 매니플레이터, 가공기, 비전 시스템)와 교체 가능한 구성품(그리퍼 등)을 개별 자산으로 분리하여 AAS를 부여한다. 또한 셀 간 이송에 사용되는 카트(Cart)는 장치에 종속되지 않는 별도의 부가장치(Auxiliary Equipment) 자산으로 정의하고 AAS로 관리한다. 로봇 컨트롤러는 별도의 자산으로 분리하지 않고 로봇의 일부로 취급한다.

이와 같은 구성요소 단위 모델링은 재구성 요구를 고려한 선택이다. 현장에서는 생산 품종 변화나 설비 증설에 따라 그리퍼나 카메라 구성 변경, 카트 유형 변경, 장치 교체 및 추가가 반복적으로 발생한다. 셀 전체를 하나의 자산으로 두면 이러한 변경이 셀 모델 전체의 개정으로 확장될 수 있으나, 구성요소를 독립 자산으로 두면 변경 범위가 해당 자산과 관계(장착/인계/관리 관계) 갱신으로 국소화된다. 따라서 셀 컨트롤러는 하위 자산의 사양과 상태를 조합하여 공정을 운용하고, 구성 변경 시에도 동일한 운용 절차를 유지한 채 가능 여부만 재평가하는 형태로 운용이 가능하다.

각 자산의 AAS는 Fig. 2와 같이 정보의 성격에 따라 다음 서브모델로 구성된다. 설비(셀)를 구성하는 주요 요소의 기능 사양을 설명하기 위한 기능 사양 서브모델(Specification Submodel, SPEC), 설비 상태를 모니터링하기 위한 상태 서브모델(State

Submodel, STATE), 그리고 초기 구축 및 장기간 운영 과정에서 축적된 운영 지식(설비 파라미터, 운영 제약 조건, 운전 절차/조건 등)을 구조화해 정리한 운영 기술 서브모델(Manufacturing Operation Skill Submodel, MOS)로 구성한다. 또한 구축 및 운영 과정에서 생성·승인·배포된 각종 원문 문서 자산을(매뉴얼, 절차서, 도면, 점검 기록, 변경 이력, 성적서 등)을 식별하고 열람할 수 있도록 문서 서브모델(Document Submodel, DOC)을 별도의 서브모델로 구성한다. SPEC은 사양, 능력, 제약 조건, 인터페이스 등 설비가 따라야 하는 정적 기준 정보를 제공한다. STATE는 운용 중 변화하는 가용 상태, 작업 진행 상태, 작업 결과 등 실시간·이력 기반의 동적 상태 정보를 제공한다. MOS는 운영 과정에서 발생한 이슈를 해결하기 위해 도입된 추가 운전 조건, 조치 사항, 설정 변경, 그리고 부가장치 추가로 인해 반영된 운전 파라미터/설정의 변경 내역 등 운영 지식을 구조화해 제공한다. DOC은 작업표준서, 예지 보전 및 교정 문서와 같은 기준 문서뿐 아니라 운용 과정에서 생성되는 리포트·기록 등 운영 산출물을 식별하고, 각 문서를 설비/구성요소 및 작업(공정) 정보, 수행 이력, 적용된 사양·설정(SPEC·MOS), 발생 이벤트 및 상태 이력(STATE)과 연계함으로써 특정 설비에서 어떤 기준에 따라 어떤 작업이 수행되었고 어떤 결과가 발생했는지를 문서 단위로 추적·조회할 수 있도록 지원한다.

3.3 작업 Cell 단위의 AAS 모델링

창고셀의 자산 계층은 창고셀 컨트롤러 AAS를 최상위로 두고, 하위에 모바일 매니플레이터 AAS, 그리고퍼 AAS, 카트 AAS를 배치한다. 창고셀 컨트롤러 AAS의 SPEC에는 작업 구역 정의(테이블 적치 계획, 카트 인계 지점), 피킹-적재-인계로 이어지는 작업 흐름과 선행 조건, 관리 대상 자산 목록 및 관계(예: 모바일 매니플레이터-그리퍼 조합, 사용 가능한 카트 유형)가 포함된다. MOS (Manufacturing Operation Skill)는 창고셀의 구축 및 재구성 과정에서 반영된 운용 지식과 제약을 관리하는 서브모델로서, 장치 추가·교체·설치 위치 변경·툴링 변경 등으로 인해 달라지는 작업 파라미터와 운영상 제한을 기록하고, 필요한 경우 작업 수행 로직에 적용 가능한 형태로 제공한다. 예를 들어 그리퍼 교체로 인해 허용 가능한 파지 폭, 접근 방향, 권장 속도/가속도, 재시도 횟수와 같은 파라미터가 변경되거나, 특정 카트 유형에서만 허용되는 적재 높이/무게 중심 제약이 발생하는 경우, 해당 변경 내역과 제약 조건을 MOS에 반영한다.

또한 반복적으로 발생한 파지 실패나 인식 실패를 극복하기 위해 적용한 조치(예: 접근 자세 수정, 스캔 위치 추가, 보정 절차, 예외 처리 분기 강화)도 MOS에 누적하여, 이후 동일 조건에서의 작업 계획 및 실행 시 참조 가능하도록 한다. STATE에는 작업 대기열, 수행 중 작업, 카트 적재 완료 여부와 인계 대기 상태, 파지 실패/인식 실패 등 예외 상태가 포함된다. DOC에는 입출고 및 적치 작업표준서, 피킹·적재 작업표준서(예외 처리 포함), 이동 장치 안전작업 절차서, 예방보전 점검표, 일/주/월 단위 운용 리포트와 같은 운영 산출물이 연결된다. 모바일

매니플레이터 AAS는 이동 및 조작 수행 능력과 운전 상태를, 그리고퍼 AAS는 파지 방식과 허용 조건, 교체 이력 및 점검 기준을 제공한다. 카트 AAS는 적재 가능 규격/수량(사양), 현재 적재 상태, 목적지 및 인계 위치, 사용 가능 상태를 독립적으로 제공하여 셀 변경 시에도 물류 단위의 일관성을 유지하도록 한다. MOS는 재구성 이후 변경되는 운용 조건과 제약, 그리고 현장 적용 과정에서 축적된 대응 지식을 반영하는 서브모델로 활용될 수 있으며 창고셀, 가공셀, 측정셀에서 정의 가능한 MOS 항목의 예를 Table 1에 정리하였으며, Fig. 3은 현장의 여러 조건들을 가정하여 AASX PackageExplorer에서 작성한 MOS의 예시이다.

가공셀의 자산 계층은 가공셀 컨트롤러 AAS를 최상위로 두고, 하위에 협동로봇 AAS, 가공기 AAS, 그리고퍼/툴 AAS, 카트 AAS를 배치한다. 가공셀 컨트롤러 AAS의 SPEC에는 로딩-가공-언로딩으로 구성되는 공정 사이클, 단계 전이 조건, 로봇-가공기 인터록 규칙, 작업지시 분해 규칙이 포함된다. MOS는 가공셀에서 장치 구성 변경이나 공정 조건 변경이 발생했을 때 공정 수행의 실질적인 제약과 보정 지식을 축적하는 서브모델로 정의한다. 예를 들어 가공기 교체나 소프트웨어 업데이트로 인해 가공 파라미터의 유효 범위가 변경되거나, 툴 교체로 인해 요구 토크/회전수, 공정 시간, 허용 공차, 로봇 접근 경로 및 클램핑 조건이 달라지는 경우, 변경된 파라미터와 그에 따른 운영상 제약을 MOS에 기록한다. 또한 인터록 미충족이나 공정 알람을 반복적으로 유발하는 경계 조건을 완화하기 위해 적용한 처리(예: 공정 단계 순서 조정, 안전 인터록 충족을 위한 사전 동작 추가, 위임업/프리런 절차, 재가공 또는 재시도 정책, 특정 소재/로트에 대한 제한 조건)도 MOS에 포함한다. 셀 컨트롤러는 작업지시를 실행할 때 SPEC에 정의된 공정 사이클을 기본으로 따르되, MOS에 축적된 파라미터 변경 및 제약 정보를 함께 반영하여 단계 전이 조건과 실행 파라미터를 최종 결정한다. STATE에는 현재 작업지시 ID, 공정 단계, 설비 점유 상태, 알람 및 인터록 미충족 등 이상 상태가 포함된다. DOC에는 공정 계획서 및 작업표준서, 프로그램/레시피 관리대장(버전 및 변경 이력), 설비 안전작업 절차서 및 비상 복구 절차서, 예방보전 기록, 공정 실적 리포트가 연결된다. 가공기 AAS는 공정 능력과 운전 상태/알람 정보를 제공하고, 협동로봇 AAS는 로딩·언로딩 단계 및 안전 상태 정보를 제공한다. 그리고퍼/툴 AAS는 소재 파지 적합성, 장착 이력, 점검 기준을 제공하여 말단 툴링 변경이 공정 수행 가능성에 미치는 영향을 모델에 반영한다.

측정셀의 자산 계층은 측정셀 컨트롤러 AAS를 최상위로 두고, 하위에 협동로봇 AAS, 비전 시스템 AAS, 그리고퍼 AAS, 카트 AAS를 배치한다. 측정셀 컨트롤러 AAS의 SPEC에는 이송-정렬-측정-판정으로 이어지는 검사 공정 흐름, 검사 레시피 식별과 적용 규칙, 결과 데이터 구조(측정값, 판정 코드), 장치 간 연계 조건(정렬 완료 후 측정 트리거)이 포함된다. MOS는 측정셀에서 장치 추가나 배치 변경, 광학계/조명 변경, 소프트웨어 업데이트 등으로 인해 검사 품질과 성공률에 영향을 주는 파라미터

Table 1 Examples of MOS items defined for warehouse, processing, and measurement cells

Cell	Asset name	Value
Warehouse cell	Warehouse cell controller AAS	Hold the task after two retries on recognition failure
	Robot AAS (Mobile manipulator) – End-effector AAS (Gripper)	Applicable only to box-shaped objects
	Robot AAS (Mobile manipulator)	0.4 m/s
	End-effector AAS (Gripper)	35–65 mm
	Cart AAS (Type-A)	Maximum 220 mm
Processing cell	Processing cell controller AAS	Allow one rework when the surface roughness exceeds the threshold
	Robot AAS (Collaborative robot) – Machine Tool AAS (Machine-1)	Start loading 1.5 s after door-close confirmation
	Robot AAS (Collaborative Robot)	Front approach prohibited, side approach only
	Machine tool AAS (Machine-1)	3200 rpm
	Machine tool AAS (Machine-1)	42 s → 48 s
	End-effector AAS (Gripper/Tool)	Cylindrical parts with diameter 20–45 mm
Measurement cell	Measurement cell controller AAS	One retry after re-alignment on measurement failure
	Robot AAS (Collaborative robot)	±1.2 mm
	Vision system AAS (Camera-1)	18 ms
	Vision system AAS (Camera-1)	75%
	Vision system AAS (Camera-1)	5 mm inward from the outer contour
	Cart AAS	Move rejected parts to the QA waiting zone

및 운용 제약을 관리하는 서버모델로 정의한다. 예를 들어 카메라/렌즈/조명 변경으로 노출, 초점, 조명 각도, 허용 반사 조건, ROI 설정 등 레시피 파라미터가 조정되었거나, 정렬 방식 변경으로 인해 트리거 타이밍과 로봇 정지 오차 허용 범위가 달라진 경우, 해당 변경의 근거와 적용 조건을 MOS에 기록한다. 또한 측정 실패나 오판정을 극복하기 위해 현장에서 적용한 처리(예: 재측정 조건 및 횟수 제한, 결과 판정 코드의 보정 규칙, 특정 결함 유형에 대한 예외 분기, 정렬 재시도 절차, 특정 품목에서의 레시피 선택 우선순위)도 MOS에 축적하여, 동일한 문제의 재발 시 원인-조치의 재현성을 확보한다. STATE에는 검사 작업 진행 단계, 측정 성공/실패, 판정 결과, 재측정 여부, 결과 원본에 대한 참조가 포함된다. DOC에는 검사 작업표준서(SOP) 및 판정 기준서, 검교정 절차서 및 검교정 기록, 레시피/파라미터 관리대장, 안전작업 절차서, 품질 리포트 및 클레임/이상 분석 보고서 등 운영 산출물이 연결된다. 비전 시스템 AAS는 측정 가능 항목과 측정 조건, 레시피 구성, 장치 상태 및 결과 생성 상태를 제공한다. 검사 이미지나 리포트 등 원본 데이터는 비전 시스템 내부 저장소에 보관하고, AAS에는 원본 식별자와 생성 시각, 장비 식별 정보 등을 참조 형태로 제공하여 결과의 추적성과 재현성을 확보한다.

구성요소 단위 모델에서 중요한 것은 자산의 ‘나열’이 아니라, 구성요소 간 관계를 명시하는 것이다. 셀 컨트롤러 AAS는 하위 자산을 레퍼런스로 참조하고, 로봇 AAS는 장착된 그리퍼를 참조하며, 카트 AAS는 현재 인계 대상 셀 또는 인계 지점을 상태로 제공한다. 교체 가능한 구성품의 경우 장착 시점과 교체 이력, 검 교정

유효기간을 STATE, MOS 및 DOC와 연계함으로써, 동일 공정이 라도 구성 변화가 결과에 미치는 영향을 추적할 수 있도록 한다.

3.4 재구성을 고려한 AAS 운영 프레임워크

구성요소 단위 AAS 모델은 단순한 장치 정보의 표준화나 문서화를 위한 것은 아니다. 생산 환경에서는 품종 변화, 설비 증설, 레이아웃 변경에 따라 공정 구성과 장치 조합이 지속적으로 변경되며, 이러한 재구성을 빠르게 반영하는 것이 운영 측면에서 중요하다. 여기서 재구성은 그리퍼 교체와 같은 구성품 수준 변경뿐 아니라, 장치 교체 및 추가, 셀 추가 및 삭제, 라인 이설 및 셀 간 인계 지점 변경과 같은 레이아웃 수준 변경까지 포함한다. 본 논문에서는 특정 구현 기술을 전제하지 않고, 셀 컨트롤러가 AAS 정보를 어떻게 참조하여 재구성 상황에서도 공정을 운용할 수 있는지 프레임워크 수준에서 정리한다.

본 논문에서 제안하는 AAS 기반 이기종 협동로봇 및 AMR/MPR 모니터링/제어용 프레임워크는 Fig. 4와 같이 (1) 자산 계층, (2)산업용 필드버스 네트워크 계층, (3) 통합-엣지 계층, (4) AAS 서비스 계층, (5) 엔터프라이즈/운영 애플리케이션 계층의 5계층으로 구성된다[13-15].

아래 Fig. 4와 같이, 하위 세 계층에서는 Industrial Edge Gateway가 필드버스 기반의 실시간 제어·진단 데이터를 수집하고, 자산별로 상이한 상태 값과 오류코드를 프로토콜 어댑터 및 데이터 정규화를 통해 공통 의미로 변환한다.

상위 두 계층에서는 셀 단위의 AAS Server가 자산별 서버모델을 제공하며, 각종 서버모델 템플릿을 통해 로봇 종류와 벤더에



Fig. 3 AAS for material handling and storage cell control with emphasis on MOS

무관한 표준 데이터 구조와 제어 인터페이스를 보장한다. 또한 AAS Registry/Discovery를 이용해 자산 추가·교체 시에도 애플리케이션이 해당 자산의 AAS엔드포인트를 동적으로 탐색할 수 있어 시스템 결합도를 낮추고 확장성을 향상시킨다.

결과적으로 운영 대시보드나 HMI 혹은 셀 컨트롤러 같은 애플리케이션은 펌웨어 세부 구현을 직접 다루지 않고 AAS 표준 API를 통해 작업지시, 상태 모니터링, 알람 대응을 수행할 수 있으며, 이는 이기종 로봇이 혼재하는 생산·제조 현장에서 생산 라인 레이아웃 변경과 같은 재구성 문제를 해결할 수 있는 기반을 제공한다.

4. 운영 프레임워크 기반 셀 컨트롤러 운용 구조

4.1 작업지시 처리와 MOS 기반 수행 가능성 판단

셀 컨트롤러는 작업지시를 공정 운용의 최소 단위로 해석하고, 이를 셀 및 자산 수준의 세부 작업으로 분해하는 역할을 수행한다. 이 과정에서 표준 작업 흐름과 재구성 이후 반영되어야 할 운용 조건을 함께 고려함으로써, 동일한 작업지시라도 현재 구성에 적합한 방식으로 수행되도록 조정한다. 이러한

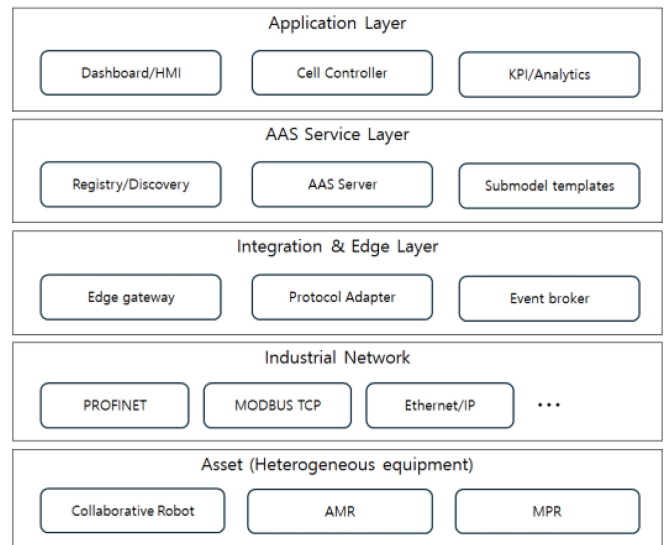


Fig. 4 AAS-based heterogeneous collaborative robot and AMR/MPR monitoring/control framework

기반 프레임워크 위에서 동작하는 셀 컨트롤러 애플리케이션은 작업지시를 받아 이를 셀 수준과 자산 수준의 세부 작업으로 나누고, 각 단계가 실제로 수행 가능한지를 판단하면서 작업을 진행하도록 구성된다. 이때 셀 컨트롤러는 셀과 하위 자산의 SPEC를 참조해 작업 흐름, 단계별 실행 조건, 자산 간 조합 관계를 파악하고, MOS를 통해 재구성 과정에서 새롭게 생기거나 변경된 운용 파라미터, 운영상 제약, 예외 대응 방식을 반영한다. 작업이 진행되는 동안에는 각 자산의 STATE를 바탕으로 선행 조건 충족 여부와 다음 단계로의 전이 가능성을 확인하고, 작업이 끝난 뒤에는 결과를 기록하는 동시에 수행 당시의 자산 구성, 적용된 MOS 항목, 관련 DOC의 버전, 원본 데이터에 대한 참조를 함께 남겨 결과의 추적성과 재현성을 확보한다.

셀 컨트롤러가 다루는 작업지시는 공정 운용의 최소 단위로 볼 수 있으며, 일반적으로 대상 소재 또는 제품의 식별자, 요구 공정, 선행 조건, 우선순위, 결과 보고 요구사항을 포함한다. Fig. 5와 같이 셀 컨트롤러는 작업지시를 수신하면 우선 자신의 SPEC에 정의된 표준 작업 흐름과 단계별 실행 조건을 기준으로 작업을 단계 단위로 분해한다. 이후 하위 자산 AAS의 SPEC와 STATE를 확인해 기본적인 수행 가능성을 검토하고, 재구성으로 인해 추가된 조건이나 보정이 필요한 부분은 MOS를 통해 반영한다. 다시 말해, SPEC가 정상적인 구성 상태를 전제로 한 표준 수행 규칙을 담고 있다면, MOS는 구축, 증설, 이설, 장치 교체, 센서 재배치 이후 현장에서 실제로 필요해진 보정값이나 제한 조건, 그리고 문제를 해결하는 과정에서 축적된 운용상의 처리 내용을 담는다고 볼 수 있다.

작업 할당 과정에서 MOS가 필요한 이유는 재구성 이후에도 작업지시 자체를 바꾸지 않고 같은 작업을 계속 수행해야 하는 경우가 많기 때문이다. 다만 같은 작업이라 하더라도 사용 가능한

자산 조합이나 적용 가능한 파라미터, 단계별 제약 조건은 달라질 수 있다. 예를 들어 그리퍼가 교체되면 특정 소재에 대해 허용 가능한 파지 방향이 바뀌거나 허용 페이로드가 달라질 수 있고, 가공기나 공구가 바뀌면 권장 속도, 접근 경로, 공정 시간, 인터록 충족을 위한 사전 동작이 달라질 수 있다. 측정셀에서도 조명이나 광학계가 바뀌면 레시피 파라미터나 정렬 허용 오차, 재측정 조건이 달라질 수 있다. 이러한 차이는 단순히 설비 목록이 바뀌었다는 정보만으로는 충분히 설명되지 않으며, 실제 운용에 필요한 보정과 제한 조건이 함께 관리되어야 한다[3,11]. MOS는 바로 이 지점을 다루는 서브모델이다. 즉, 변경된 자산 구성이 작업 수행에 어떤 영향을 주는지, 어떤 조건에서 어떤 값을 적용해야 하는지, 동일한 문제가 다시 발생했을 때 어떤 방식으로 대응해야 하는지를 운용 지식의 형태로 구조화해 제공한다[3,11].

4.2 STATE 기반 작업 수행과 셀별 작업 할당

셀 컨트롤러에 의해 분해된 작업은 셀의 특성과 자산 조합에 따라 구체적인 단계로 할당되며, 실제 수행 과정에서는 하위 자산의 STATE를 조합하여 단계 전이 여부가 판단된다. 따라서 같은 작업 구조를 유지하더라도, 셀별 자산 특성과 재구성 조건에 따라 실제 운용 방식은 달라질 수 있다. 셀별로 보면 이러한 차이는 더 분명하게 드러난다. 가공셀에서 셀 컨트롤러는 협동로봇의 작업 범위와 페이로드, 엔드이펙터의 파지 가능 조건, 가공기의 공정 능력과 인터록 조건을 SPEC와 STATE를 통해 확인한 뒤 로딩-가공-언로딩 작업을 분해해 할당한다. 이 과정에서 MOS에는 재구성 이후 추가된 인터록 충족 절차나 특정 소재에 대한 공정 파라미터 보정, 특정 자산 조합에서만 허용되는 속도 제한 등이 포함될 수 있으며, 셀 컨트롤러는 이를 반영해 실제 실행 조건을 정하게 된다. 측정셀에서는 로봇의 정렬 가능 조건, 비전 시스템의 레시피 지원 여부, 측정 조건을 확인한 후 검사 작업을 할당하는데, MOS는 조명 또는 광학계 변경에 따른 레시피 수정, 정렬 오차 허용 범위의 조정, 재측정 트리거 조건과 실패 처리 규칙 등을 제공한다. 창고셀에서는 모바일 매니플레이터와 엔드이펙터의 취급 가능 조건, 카트의 사용 가능 상태를 확인해 피킹과 적재 작업을 할당하며, MOS에는 인식을 개선을 위한 추가 스캔 포즈, 민감 품목에 대한 접근 속도 제한, 특정 카트 유형에서의 적재 높이 제한, 재시도 정책과 같은 내용이 포함될 수 있다. 결국 MOS는 재구성 이후에도 기존 작업 구조를 유지한 채 운용 조건만 현실에 맞게 조정할 수 있도록 하는 역할을 한다.

작업이 실제로 진행되는 동안에는 하위 자산의 STATE를 조합해 단계 전이를 판단한다. 창고셀에서는 모바일 매니플레이터의 피킹 완료 및 적재 완료 상태와 카트의 적재 완료 상태가 함께 만족될 때 다음 인계 단계로 넘어간다. 가공셀에서는 카트의 도착 및 적재 상태가 확인되고 로봇-가공기 인터록이 만족되면 로딩을 시작하며, 가공기 STATE에서 가공 완료가 확인되면 언로딩 단계로 진행한다. 측정셀에서는 로봇 STATE에서 정렬

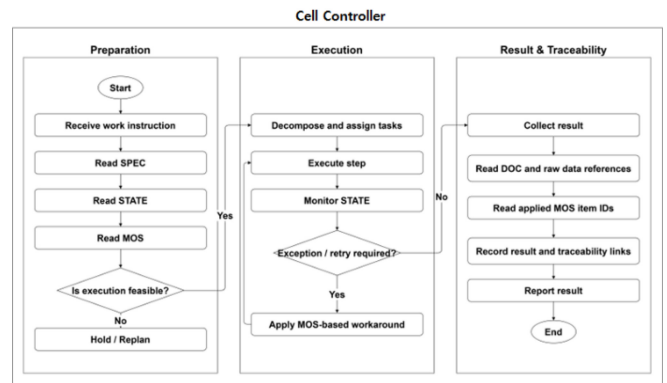


Fig. 5 Operational workflow of the cell controller with references to SPEC, STATE, MOS, and DOC

완료가 확인된 이후에 비전 시스템의 측정을 시작하고, 비전 시스템에서 결과 생성이 완료되면 판정 결과를 수집한다. 라인 이설이나 인계 지점 변경처럼 물리적인 배치가 달라지는 경우도 프레임워크 관점에서는 작업 구역 정의와 자산 간 연결 관계의 변경으로 표현할 수 있다. 따라서 카트 AAS의 인계 위치나 목적지 상태, 셀 컨트롤러 AAS의 작업 구역 정의가 갱신되면 작업 단계 자체는 유지한 채 새로운 레이아웃에 맞는 운용이 가능하다. 이때 센서 위치나 동작 여유 공간의 변화로 인해 단계별 선행 조건이 달라지는 경우가 있는데, 이러한 부분 역시 MOS를 통해 관리하는 것이 적절하다.

4.3 작업 결과의 추적성과 MOS·DOC 기반 해석

작업이 완료된 이후에는 결과값 자체뿐 아니라, 그 결과가 생성된 당시의 구성과 적용 조건을 함께 관리할 수 있어야 한다. 특히 재구성 환경에서는 동일한 작업이라도 운용 조건과 판정 기준이 달라질 수 있으므로, 결과는 해석 근거와 연결된 형태로 기록될 필요가 있다.

작업 완료 이후에는 결과와 근거 정보 사이의 연결이 중요하다. 가공셀은 완료 시각, 적용된 프로그램 또는 레시피 식별자, 완료 여부, 이상 여부 등을 결과로 남기고 필요하면 원천 데이터에 대한 참조를 함께 제공한다. 측정셀은 핵심 측정값과 판정 코드를 기록하고, 검사 이미지나 리포트와 같은 원본 데이터는 비전 시스템 내부 저장소에 보관한 뒤 그 식별자를 참조 형태로 연결한다. 재구성 상황에서 추적성이 중요한 이유는 같은 결과값이라도 그것이 어떤 구성과 어떤 기준 아래에서 생성되었는지를 함께 알아야 해석이 가능하기 때문이다. 따라서 Fig. 6과 같이 결과에는 수행 당시의 자산 구성, 적용된 MOS 항목이나 개정 ID, 관련 DOC의 버전, 원본 데이터의 참조 정보가 함께 연결될 필요가 있다.

이때 DOC와 MOS는 서로 다른 역할을 맡는다. DOC는 레이아웃 도면 개정, 이설 및 증설 작업 결과 보고서, 시운전 기록, 성능 및 품질 검증 리포트, 검정 및 교정 수행 기록과 같은 공식 산출물의 저장 위치와 식별자를 제공한다. 반면 MOS는 이러한

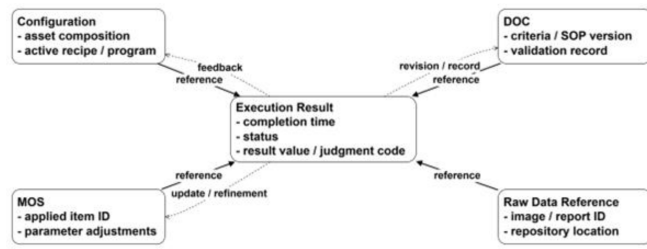


Fig. 6 Traceability and feedback structure linking execution results with configuration, MOS, DOC, and raw data references

공식 문서에 기록된 변경 사항이 실제 운용 과정에서 어떤 파라미터 변화와 제약으로 반영되었는지를 설명한다. 예를 들어 조명 교체로 인해 특정 레시피의 노출 파라미터가 변경되었다면, DOC에는 그 변경의 근거가 되는 보고서나 검증 문서가 연결되고, MOS에는 변경된 파라미터 값, 적용 대상 품목, 적용 시작 시점, 기존 값과의 차이, 유사한 문제가 재발했을 때의 대응 절차가 함께 기록된다. 셀 컨트롤러는 작업 결과를 기록할 때 이러한 MOS 항목과 DOC 참조를 함께 남김으로써, 나중에 동일 조건을 재현하거나 재구성 전후 결과를 비교할 수 있는 기반을 마련하게 된다.

결국 재구성은 단순히 일부 구성품을 바꾸는 수준에 그치지 않고, 셀의 추가와 통합, 라인의 이설까지 포괄하는 개념으로 이해할 필요가 있다. 이 과정에서 바뀌는 것은 장치의 물리적 위치만이 아니라 자산 간 관계와 공정 조건 전체이며, 그 결과 동일한 작업에 대해서도 적용 가능한 제약 조건, 측정 조건, 판단 기준이 달라질 수 있다[2]. 따라서 재구성 이후 생성된 결과를 이전 결과와 같은 의미로 해석하고 비교하려면, 구성 변경 이력과 관련 산출물을 결과와 함께 연결해 재구성의 적용 범위와 승인 및 검증 근거를 추적 가능하게 만들어야 한다. 셀 컨트롤러 중심의 구성요소 단위 AAS 프레임워크는 이러한 재구성을 자산의 추가 또는 삭제, 자산 간 관계의 갱신이라는 정보적 변화로 수용하고, 셀 컨트롤러는 하위 자산의 SPEC, STATE, MOS, DOC를 함께 참조하여 작업지시의 수행 가능성을 판단하고, 상태 기반으로 작업을 진행하며, 결과에 대한 추적성 링크를 설정한다[4]. 이러한 구조를 통해 그리퍼 교체와 같은 비교적 작은 변경부터 셀 추가나 라인 이설과 같은 구조적 변경까지 하나의 정보 틀 안에서 일관되게 다룰 수 있다.

5. 결론

본 논문은 창고셀-가공셀-측정셀로 구성된 제조 셀을 대상으로, 반복적인 재구성과 이설 환경에서 공정 운용을 보다 신속하게 복원하고 인수인계에 따른 운영 리스크를 완화하기 위한 AAS 기반 접근을 제안하였다. 제안한 방법은 셀 컨트롤러를 중심으로 로봇, 비전 시스템, 가공기, 그리퍼, 카트 등 주요 구성요소를

자산 단위로 분해하여 구성 정보를 정리하고, 작업지시 기반의 운용 절차, 상태 기반 작업 단계 진행, 그리고 결과-근거(구성/기준 문서/원본 데이터) 참조 관계를 통해 추적성을 확보하도록 구성된다.

이러한 구성요소 단위 모델은 재구성 시 변경 범위를 국소화하고, 레이아웃 변경이나 장치 교체가 발생하더라도 필요한 확인·조정 작업을 줄여 재구성 시간을 단축하는 데 기여할 수 있다. 또한 운영 과정에서 생성되는 산출물(교정 기록, 시운전 및 성능·품질 검증 리포트, 구성 변경 이력 등)을 자산 단위로 연결함으로써, 특정 인력에 의존하던 인수인계 부담을 낮추고 원격·제약된 지원 환경에서도 운용 복원에 필요한 근거를 확보하는 데 도움을 줄 수 있다.

다만, 제한한 프레임워크는 특정 제조 환경의 경험을 토대로 구성한 것으로, 다양한 제조 환경 적용에 제한이 있으며, 구현과 실증을 통한 보완 작업이 필요하다. 또한, 본 논문의 제안 내용들은 실제 재구성 과정에서 적용 및 검증이 필요하다.

향후에는 예정된 재 이설 및 재구성 과정에서 본 프레임워크를 적용하는 사례를 추적하고, 재구성 리드타임과 공정 안정화 기간 등의 지표를 통해 효과를 검증하여 제안한 프레임워크와 AAS Submodel을 지속적으로 개선할 계획이다.

REFERENCES

1. Ellithy, K., Salah, M., Fahim, I. S., Shalaby, R., (2024), AGV and industry 4.0 in warehouses: A comprehensive analysis of existing literature and an innovative framework for flexible automation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 134(1), 15-38.
2. Pansare, R., Yadav, G., Nagare, M. R., (2023), Reconfigurable manufacturing system: A systematic review, meta-analysis and future research directions, *Journal of Engineering, Design and Technology*, 21(1), 228-265.
3. Wiese, T., Abicht, J., Friedrich, C., Hellmich, A., Ihlenfeldt, S., (2022), Flexible skill-based control for robot cells in manufacturing, *Frontiers in Robotics and AI*, 9, 1014476.
4. Tzimas, E., Papazetis, G., Benardos, P., Vosniakos, G.-C., (2024), Design and development of a flexible manufacturing cell controller using an open-source communication protocol for interoperability, *Machines*, 12(8), 519.
5. Abdel-Aty, T. A., Negri, E., Galparoli, S., (2022), Asset administration shell in manufacturing: Applications and relationship with digital twin, *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 2533-2538.
6. Ye, X., Hong, S. H., Song, W. S., Kim, Y. C., Zhang, X., (2021), An industry 4.0 asset administration shell-enabled digital solution for robot-based manufacturing systems, *IEEE Access*, 9, 154448-154459.

7. Arm, J., Benesl, T., Marcon, P., Bradac, Z., Schröder, T., Belyaev, A., Werner, T., Braun, V., Kamensky, P., Zezulka, F., (2021), Automated design and integration of asset administration shells in components of industry 4.0, *Sensors*, 21(6), 2004.
8. Grüner, S., Hoernicke, M., Stark, K., Schoch, N., Eskandani, N., Pretlove, J., (2023), Towards asset administration shell-based continuous engineering in process industries, *at-Automatisierungstechnik*, 71(8), 689-708.
9. Hossfeld, M., Wortmann, A., (2024), A universal framework for skill-based cyber-physical production systems, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(5), 221.
10. Froschauer, R., Köcher, A., Meixner, K., Schmitt, S., Spitzer, F., (2022), Capabilities and skills in manufacturing: A survey over the last decade of ETFA, *Proceedings of the IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1-8.
11. Müller, A., Wurm, S., Willecke, P., Petrovic, O., Herfs, W., Brecher, C., (2024), Design of a flexible skill-based process control system considering process-relevant properties, *Machines*, 12(2), 142.
12. Umbrico, A., Cesta, A., Orlandini, A., (2022), Deploying ontology-based reasoning in collaborative manufacturing, *Semantic Web Journal*, 1-12.
13. Plattform Industrie 4.0, (2022), Details of the asset administration shell - Part 1: The exchange of information between partners in the value chain of industrie 4.0. https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.html
14. Boss, B., Malakuti, S., Lin, S.-W., Usländer, T., Clauer, E., Hoffmeister, M., Stojanovic, L., (2020), Digital twin and asset administration shell concepts and application in the industrial internet and industrie 4.0: An industrial internet consortium and plattform industrie 4.0 joint whitepaper, *Industrial Internet Consortium, a program of Object Management Group, Inc. ("OMG") and Plattform Industrie 4.0*. <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Digital-Twin-and-Asset-Administration-Shell-Concepts.html>
15. Gordt, A., Simon, A., Vojanec, B., Tenhagen, D., Rohrmus, D., Stephan, G., Gramaev, I., Vialkowsch, J., Stolze, M., Braunisch, N., Grüner, S., Miny, T., (2024), Asset administration shell discovery in an industrie 4.0 system environment, *Plattform Industrie 4.0*. https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/202404_Discussion_Paper_Discovery.html



Hak Chul Lee

Senior researcher with the Robot SW Development Team, HYUNDAI-WIA CORP. and Ph.D. candidate in the Department of Industrial and Management System Engineering, Kyung Hee University. His research interests are smart factory solutions, software of Mobile Parking Robots and AMRs.

E-mail: hakchul.lee@hyundai-wia.com



Jin Ho Sohn

Senior researcher with the Robot Control & Management System Development Team in HYUNDAI WIA Corp. and Ph.D. candidate in the Department of Industrial and Management System Engineering, Kyung Hee University. His research interests are smart factory platforms based on machine tools, collaborative robots, and AMRs.

E-mail: jinho.sohn@hyundai-wia.com