

Development of Cyber-Physical Production System based Manufacturing Control System for Aircraft Parts Plant

Deok Hyun Kim* · In Su Lee** · Chun Nam Cha***†

*Department of Industrial and Systems Engineering, Gyeongsang National University and Korea Aerospace Industry

**Korea Aerospace Industry

***Department of Industrial and Systems Engineering & Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

가상물리제조 기반 항공기 부품공장 생산통제시스템 개발

김덕현* · 이인수** · 차춘남***†

*경상대학교 대학원 산업시스템공학과 · 한국항공우주산업

**한국항공우주산업

***경상대학교 산업시스템공학부 · 공학연구원

To enhance the effectiveness of the FMS (flexible manufacturing system), it is necessary for the manufacturing control system to be upgraded by integrating the cyber and the physical manufacturing systems. Using the CPPS (Cyber-Physical Production System) concept, this study proposes a 4-stage vertical integration and control framework for an aircraft parts manufacturing plant. In the proposed framework, the process controller prepares the operations schedule for processing work orders generated from the APS (advanced planning & scheduling) system. The scheduled operations and the related control commands are assigned to equipments by the dispatcher of the line controller. The line monitor is responsible for monitoring the overall status of the FMS including work orders and equipments. Finally the process monitor uses the simulation model to check the performance of the production plan using real time plant status data. The W-FMCS (Wing rib-Flexible Manufacturing Control & Simulation) are developed to implement the proposed 4-stage CPPS based FMS control architecture. The effectiveness of the proposed control architecture is examined by the real plant's operational data such as utilization and throughput. The performance improvement examined shows the usefulness of the framework in managing the smart factory's operation by providing a practical approach to integrate cyber and physical production systems.

Keywords : FMS(flexible manufacturing system), Aircraft Parts Manufacturing, CPPS(Cyber-Physical Production System), W-FMCS(Wing rib-Flexible Manufacturing Control & Simulation), Utilization

1. 서 론

최근 많은 제조업체는 고객의 다양한 요구에 효율적

으로 대응할 수 있는 생산시스템 구축을 위하여 정보통신기술(ICT)과 전통 제조기술을 융합하는 스마트 제조시스템 구축을 추진하고 있다. 스마트 제조시스템 구축 전략의 실행은 4차 산업혁명을 실현하기 위한 요소기술인 사물인터넷, 빅데이터, 클라우드, CPS(cyber physical system), AI(artificial intelligence) 등을 기존 제조업과 융합하는 것으로서 그 실현 가능성에 주목하고 있다[8]. 스마트

Received 4 February 2020; Finally Revised 26 March 2020;

Accepted 27 March 2020

† Corresponding Author : cncha@gnu.ac.kr

제조시스템이 추구하는 제조단계의 자동화, 디지털 변환, 지능화(설비·장치·기기 등)는 데이터의 수집, 실시간 처리 및 분석, 분산 자율제어가 가능한 유연한 제조시스템의 구축이 전제되어야 하며, 스마트한 제조방식으로 전환하는 데 필요한 ICT 요소기술을 적용한 공장을 스마트 공장이라고 한다[4, 9]. 스마트공장 구축을 위해서는 ICT 요소기술뿐만 아니라 인간중심의 제조 활동과 시스템 구성요소 간의 상호작용을 반영할 수 있는 효율적인 통합 방안이 필요하다. 즉, 인공지능, 자율적 의사결정 및 유연성 등 인간의 장점과 정확성, 일관성, 처리속도 등 기계의 장점을 조화롭게 활용할 수 있는 스마트한 시스템의 지원이 요구된다. 인간과 상호작용하는 자동화된 스마트공장은 인적요류를 최소화하고 예외처리가 자동으로 이루어지는 유연성과 확장성까지 확보해야 하므로 실제 시스템 구현은 더 복잡하고 어렵게 된다[4, 6].

CPS 기술은 물리적인 현실세계와 컴퓨터상의 가상세계를 통합하고 동기화하는 역할을 한다. 복잡하고 다양한 현실세계의 정보가 가상시스템에 정확하게 반영됨으로써 과거에는 구현이 힘들었던 현실 세계의 문제에 대한 정확한 인지 및 분석, 예측을 통한 실시간 제어가 가능해져서 그 중요성과 활용 가능성이 증가하고 있다[3]. 이러한 CPS 기술을 제조 영역으로 확장한 것이 CPPS(Cyber-Physical Production System)이다. CPPS가 적용된 스마트공장에서는 제조 현장의 데이터 수집과 지능적 분석, 최적 제어가 가능하여 가상공장과 연결된 물리공장을 실시간으로 제어할 수 있다. 이러한 CPPS 개념은 가상공장과 물리공장을 통합하는 핵심기술로 인식되면서 점차 활용도가 높아지고 있으며, 최적화된 스마트공장을 구현하는데 기여할 것으로 기대된다[1, 4]. 아울러, 향후 통합된 제조실행시스템의 모습은 제조장비가 CPPS 기반의 자율적으로 의사결정을 내릴 수 있도록 지원하는 생산시스템으로 변화될 것이며, 임베디드 센서 및 액추에이터의 연결성 및 컴퓨팅 능력의 향상으로 CPS와 CPPS에서 상당한 트리거를 일으킬 것으로 예상되므로 분산, 수직통합, 연결성 및 모바일, 클라우드 컴퓨팅 및 고급분석을 지원하는 시스템으로의 변화가 요구된다[2].

본 논문에서는 CPPS를 실현하기 위한 4단계 수직적 통합제어 모형을 개발하고 이를 항공기 부품을 생산하는 실제 유연생산시스템에 적용함으로써 스마트공장 구축을 위한 방법론을 제안한다. 이를 위해서 제 2장에서는 CPPS에 관한 기존 연구의 결과를 소개한다. 제 3장에서는 항공기 부품공장의 제조현장 상황을 설명한다. 제 4장에서는 가상공장과 물리공장을 통합하는데 필요한 개념인 CPPS 기반의 4단계 수직적 통합제어 모형을 제안하며, 제 5장에서는 CPPS 개념을 항공기 부품공장의 유연생산라인에 적용하기 위한 W-FMCS(Wing rib-Flexible Manufacturing

Control & Simulation) 아키텍처를 기술한다. 제 6장에서는 W-FMCS를 K사에 도입한 효과를 분석하고, 제 7장에서는 본 논문의 결론을 제시한다.

2. 관련 연구

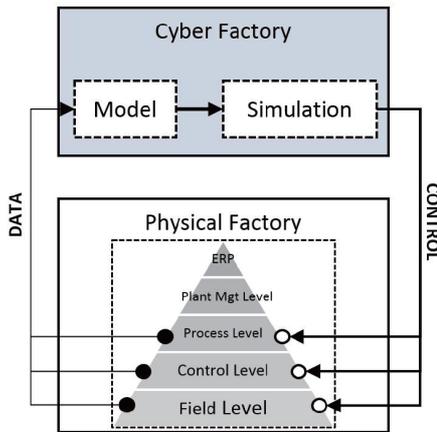
2.1 가상물리제조시스템(CPPS)

CPPS란 가상공간과 물리공간이 상호작용할 수 있도록 수직적으로 통합된 시스템을 의미하는 CPS의 개념을 제조영역으로 확장한 것으로서 기계, 설비, 사람, 공정, 제품 등의 개별 요소뿐만 아니라 생산 및 물류 네트워크에 이르는 모든 구성요소를 연결하여 자율적·협력적으로 운영하기 위한 상황인지 기반의 시스템들로 구성된다[1].

Monostori[6]는 CPPS의 아키텍처가 기존 자동화 시스템의 계층적 구조에서 분산 서비스 형태로 발전할 것으로 예측하였다. 즉, CPPS에서는 기존 자동화 시스템의 계층 구조 중에서 실시간으로 현장의 장비를 제어하기 위한 PLC(programmable logic controller) 기반 하위 통제(control) 계층은 변화가 없지만, 공정통제(process control), 공장관리(plant management), 자원계획(resource planning) 등 상위계층의 기능들은 자율적 판단과 상호 협력이 가능한 분산 서비스 시스템들로 대체된다.

Weyer 등[9]은 스마트공장의 설계단계뿐만 아니라 실제 생산을 위한 단기 의사결정 문제를 해결하는데도 시물레이션 기법의 활용이 증가할 것으로 예측하고, CPS 기반 공장의 동적 설계, 모델링 및 시물레이션을 위한 프레임워크를 제안하였다. CPS와 시물레이션 모델 간의 연계를 위해 제안된 아키텍처는 메타 데이터 모델을 포함하는 데이터 수집(data acquisition) 계층, CPS에서 물리적 부분과 사이버 부분 간의 통신을 담당하는 논리적 정보 인터페이스(information interface) 계층 그리고 생산 활동 및 시물레이션 자료의 관리, CPS 라이브러리 편집 및 CPS 인스턴스 조회 등을 수행하는 최상위 응용 계층(application layer) 등 3계층으로 구성된다.

Chun 등[1]은 CPPS를 구현하기 위한 아키텍처로 물리공장을 모사한 가상공장 모델을 구축하고, 컴퓨터상의 가상 모델을 통해서 물리공장의 성능을 분석하며, 최적의 운영 방법을 탐색하는 시물레이션으로 구성된 가상-물리 제조설비 연동형 플랫폼을 제안하였다(<Figure 1> 참조). <Figure 1>의 가상공장에는 디지털 모델과 시물레이션이 포함된 CPPS를 구현함으로써 시물레이션 결과를 물리공장을 제어하는 데 활용하고, 물리공장의 실행 결과는 가상공장으로 실시간 전달되어 가상공장의 의사결정을 위한 입력자료로 활용된다.



〈Figure 1〉 Architecture of Cyber-Physical Production System[1]

CPPS에 관한 기존의 연구를 종합하면, CPPS 아키텍처는 기본적으로 가상공장과 물리공장을 인터페이스 하는 계층적 구조를 중심으로 물리공장의 운영상황을 모사하기 위한 시뮬레이션 모듈을 가상공장에 배치하고, 물리공장 구성요소의 운영자료를 실시간으로 가상공장에 전달하여 시뮬레이션 모델에 반영할 필요가 있다. 또한, CPPS를 기반으로 물리공장을 실제로 운영하기 위해서는 전체 시스템의 최적화 관점에서 물리적 시스템과 가상시스템 간의 정보 전달 및 제어를 위한 수직적 통합제어 모형이 필요하다. 그러나 CPPS에 관한 기존의 연구는 대부분 자동화시스템 아키텍처의 제어계층을 위한 물리공장과 가상공장 간의 통신 문제를 중심으로 다루고 있기 때문에 CPPS 구축을 위한 통합 프레임워크로 활용하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 항공기 부품을 제조하는 공장을 대상으로 CPPS를 구축하기 위한 4단계 수직적 통합제어 모형을 제안하고 실제 공장의 운영 결과를 통해서 CPPS의 효과를 살펴본다.

2.2 CPPS 도입 시 고려사항

CPPS 도입 시 가상공장과 물리공장의 원활한 수직적 통합을 위해서는 ERP(enterprise resource planning), APS(advanced planning and scheduling), MES(manufacturing execution system) 등 상위 생산계획시스템과 사람, 장비, 센서 등 시스템 구성요소 간의 상호작용을 고려해야 한다. 또한, 물리공장과 가상공장의 원활한 인터페이스와 가상공장의 시뮬레이션을 효율적으로 통합운영하기 위해서는 다음과 같은 사항을 고려해야 한다[5].

첫째, 기존 생산통제 시스템과 CPPS의 인터페이스 방법을 고려해야 한다. 일반적으로 생산통제 시스템은 생산일정계획 수립과 장비의 제어 기능이 분리되어 있어서 물리공장의 변동 상황에 맞춰서 즉각 대응하기가 어렵

다. 따라서 생산통제 시스템에서 계획된 처리 일정이 변경되거나 예외 상황이 발생하는 경우, 작업의 순서가 바뀌고 선·후행 작업 간 대기가 발생하게 되어 장비의 가동률이 감소하고 재공품재고(WIP)와 리드타임이 증가하는 등의 효율 저하가 발생하게 된다[5].

둘째, CPPS와 인적요소 간의 상호작용을 고려해야 한다. 물리공장의 현장 및 제어계층에서 동시다발적으로 발생하는 상태정보를 빠르게 수집하는 과정에서 작업자의 불확실한 행동들이 시스템에 전달될 때 발생하는 예외사항 및 인적오류도 고려해야 한다[4, 6].

셋째, 현장의 4M1E(man, machine, method, material, environment) 정보를 실시간으로 수집하여 가상공장으로 전송하고 가상공장에서 결정된 제어 정보가 물리공장으로 피드백 되어 실제 장비가 제어될 때까지는 여러 단계를 거치게 되므로 시차(time lag)가 발생하게 된다. 따라서 현장 상황의 변동에 유연하게 대응할 수 있는 장비의 실시간 제어방법을 고려해야 한다[7].

넷째, 가상공장의 시뮬레이션 적용 범위에 대한 정의가 필요하다. CPPS 기반 공장의 시뮬레이션을 위해서는 정확한 디지털 모형이 필수적이며, 상황에 따라서 물리적 객체들을 유연하게 구성할 수 있어야 한다. 전통적인 시뮬레이션 기술이 주로 설계 및 엔지니어링 단계에 중점을 두었기 때문에 제조공장과는 상황이 다르다. 제조공장에서는 생산품목, 제조방식, HW 및 SW 구성요소 등을 고려하여 적용 범위를 명확히 정의해야 한다[9].

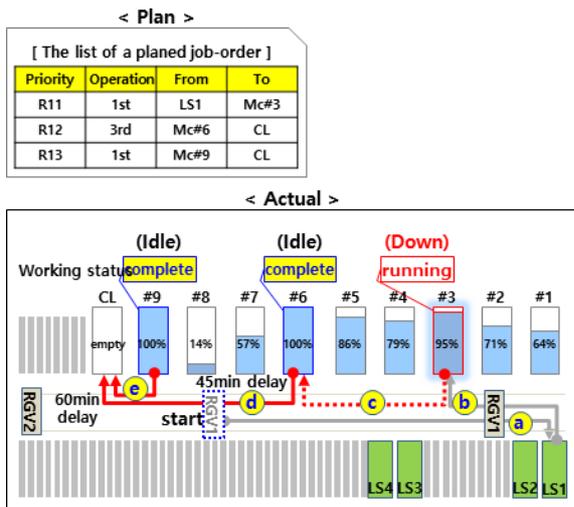
3. 항공기 부품공장의 제조현장 상황

본 연구의 대상은 항공기 부품의 일종인 윙립(wing rib)을 가공하는 K사의 FMS로서, 기존의 생산통제 시스템에서 수립된 5축 고속 가공장비 MCT(machining center)와 물류장비 RGV(rail guided vehicle)의 작업계획에 변동이 발생하는 경우 이를 반영하여 처리일정을 재계획하고 현장을 제어하기 위한 CPPS 기반 시스템 고도화를 추진하고 있다. K사의 생산통제 시스템은 상위 시스템에서 수립된 생산계획을 근거로 다음에 기술한 작업오더, 단위공정, 세부공정 순으로 처리 일정을 단계적으로 수립한다[5].

- 작업오더: MCT에 투입하는 작업 단위로서, 자재와 팔레트-치공구로 구성됨
- 단위공정: 원자재가 윙립으로 완성되는 가공 단계를 의미하며, 작업오더는 3개의 단위공정(①황삭가공 → ②황·정삭가공 → ③정삭가공)으로 구성됨
- 세부공정: 단위공정에서 자재가 처리되는 세부공정을 의미하며, 4개의 세부공정(로딩 → 가공 → 세척 → 언로딩)으로 구성됨

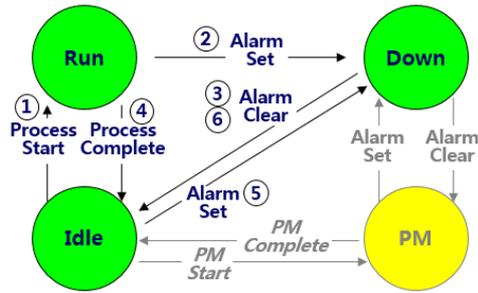
<Figure 2>는 K사가 운영하는 FMS의 MCT3에 발생한 일시정지로 인해서 작업계획이 지연되는 상황을 나타낸 것이다. 그림에서 <Plan>은 생산통제 시스템이 생성한 RGV1의 작업계획 목록으로서 우선순위, 단위공정, 출발지 및 목적지 등 4개의 필드로 구성된다. 현재 RGV1에는 3개의 작업이 할당되었으며, R11 황삭가공 셋업장치(LS1 : loading station) → MCT3, R12 정삭가공 MCT6 → 세척장치(CL : cleaning), R13 황·정삭가공 MCT9 → CL의 순서로 이송하도록 계획되었다. 또한 <Actual>은 FMS에서 실제 RGV1의 이동 경로를 보여준다. K사 FMS에는 MCT 9대, CL 1대, RGV 2대, LS 4대 그리고 55개의 팔레트 버퍼가 운영되고 있다.

현재 FMS는 ⑥의 이송작업 중 MCT3에서 일시정지가 발생되고, 이로 인해서 ③(다음 작업 수행을 위한 RGV의 이동) 및 ④, ⑤의 이송작업이 연쇄적으로 지연되어 MCT6과 MCT9에서 각각 45분과 60분의 작업지연이 발생한 상태이다. 제시한 예에서는 FMS의 작업계획과 실제 공장상황 간의 차이를 설명하기 위해서 3회의 팔레트 이송작업과 MCT3의 고장(Down)을 가정하였지만, 실제 FMS 운영에서는 훨씬 복잡하고 동시다발적이며 다양한 형태의 오류 및 예외상황이 발생할 수 있다.



<Figure 2> Operational Problem in the FMS

<Figure 3>은 가동(Run), 유휴(Idle), 고장(Down), 정비 (PM) 등 4개로 구분한 MCT 장비 상태의 변화를 보여준다. ②와 ⑤는 장비의 고장을 알리는 알람(alarm set)으로서, 이 경우 MCT의 상태는 고장으로 변경된다. 반면에 장비 혹은 가공조건을 점검할 필요가 있다는 알람이 발생하게 되면, MCT의 상태는 일시정지로 변경되고 자동운전에서 수동운전으로 운전 모드가 전환된다. FMS에서 알람이 발생하는 경우, 작업자는 HMI(human machine interface)를 통해서 알람의 내용을 확인하고 필요한 조치를 취하게 된다. 이후 MCT의 상태는 고장 혹은 일시정지에서 유휴상태로 변경된다.



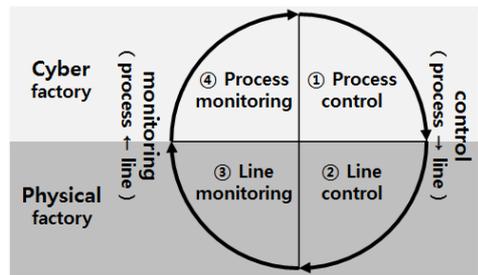
<Figure 3> Equipment Status Transition

4. 항공기 부품공장의 CPPS 프레임워크

4.1 CPPS 수직통합제어 모형

전술한 바와 같이 워킹 가공 FMS를 운영하는 동안 ERP, APS, MES 등 상위 생산계획시스템에서 생성된 생산계획은 다양한 원인에 의해 변경이 발생하게 되며, 이는 FMS의 성능이 당초 예측했던 기대치를 충족하지 못하게 되는 주요 원인이다. K사에서는 이에 대한 대책으로 현장에서 발생하는 변동을 실시간에 반영할 수 있는 CPPS 기반의 수직통합제어 시스템을 구축하였다.

<Figure 4>는 CPPS 기반 4단계 수직적 통합제어 모형의 구조를 보여준다. 제안된 모형에서 상하는 프로세스와 라인으로 구분되며 상위시스템인 가상공장(cyber factory)의 운영시스템과 하위시스템인 물리공장(physical factory)의 제어시스템 간의 수직적 통합을 나타낸다. 또한, 좌우는 현장에서 발생하는 변동을 감지하고 데이터를 수집하는 모니터링 시스템과 장비 제어시스템 간의 실시간 통합제어를 나타낸다. 통합제어 모형은 물리공장에서 발생하는 현장의 상황정보를 실시간으로 수집하여 가상공장으로 전달하는 모니터링 영역과 가상공장에서 탐색한 최적 제어정보를 물리공장으로 송신하여 FMS 장비를 제어하는 제어 영역 간의 협력적 상호작용 개념으로 운영된다. 통합제어는 ① 공정 제어(PC : process control), ② 라인 제어(LC: line control), ③ 라인 모니터링(LM : line monitoring), ④ 공정 모니터링(PM : process monitoring) 순으로 수행된다.



<Figure 4> CPPS based Vertical Integrated Control Model

4.2 W-FMCS 모델

<Figure 5>는 CPPS 기반 수직적 통합제어 모형의 PC, PM, LC 및 LM 등 4개 모듈로 구성된 W-FMCS의 통제 흐름을 보여준다. PC 모듈은 상위 생산계획시스템(ERP/APS/MES)이 수립한 기준정보 및 생산계획 자료와 PM 모듈의 스케줄링 결과를 기준으로 작업오더를 승인하여 (order confirm), 작업목록(dispatch list)을 생성하고(register), 작업을 할당한다(dispatch). LC 모듈은 PC 모듈이 할당한 작업의 유형에 따라서 장비의 제어규칙(rule control) 및 가공공법(recipe) 그리고 작업지령(trigger action) 등으로 구성된 제어명령 패킷을 장비로 전송한다. LM 모듈은 장비와 센서로부터 작업개시 및 종료, 객체 위치 그리고 장비 상태 및 오류 등의 정보를 수집하여 공정제어시스템(shop floor control system)을 통해서 PM과 PC 모듈로 실시간 송신한다. PM 모듈은 생산계획시스템이 수립한 생산계획 자료와 LM 모듈이 송신한 물리공장의 상태 정보를 기준으로 모듈에 탑재된 시뮬레이션 모델을 실행하여 생산 및 물류 장비의 최적 작업계획을 탐색하고 FMS 운영을 위한 계획지표(planned KPI)를 제공한다.

W-FMCS의 통제 프로세스는 PC 모듈이 APS로부터 향후 3~6개월에 대한 초기 생산계획을 수신한 이후에 시작된다. PC는 초기 생산계획을 구성하는 각 작업오더의 긴급도, 조립일정, 납기일 등의 우선순위 규칙을 고려하여 투입순서를 결정하고 승인된 작업오더를 LC 모듈로 전송한다. LC는 수신된 작업오더를 기준으로 시스템의 제어를 수행하고, LM 모듈이 1분 간격으로 수집한 작업진척 혹은 예외상황 등의 상태정보는 PM 및 PC 모듈로 송신된다. 초기 생산계획에 근거해서 FMS 운전이 시작되면 W-FMCS의 PC 모듈은 LM 모듈이 파악한 작업별 진척도 및

장비의 가동정보를 바탕으로 각 작업오더의 처리일정을 재계획하고 PM 모듈로 송신한다. 이때 PC 모듈은 공정별 MCT의 가용시간 및 RGV의 이동시간을 고려하여 일정을 재계획한다(<Figure 7> 참조).

PM 모듈은 LM 모듈이 수집한 FMS의 장비, 재공품재고 등에 관한 최신 정보를 반영하여 시뮬레이터의 상태정보를 갱신하고, 시뮬레이션을 수행하여 APS의 생산계획 및 PC 모듈의 작업 일정계획의 성과를 예측한다. 이때 PM 모듈은 현실성 있는 예측 결과를 얻기 위해서 LM 모듈에서 수집된 RGV 이송시간, MCT 가공시간, 가용 팔레트 수량 등의 최신 통계량을 시뮬레이터에 공급한다. 또한, 시스템 운영자는 PM 모듈의 시뮬레이션 기능을 활용해서 RGV의 대기시간을 최소화하고 MCT의 가동률을 높일 수 있는 개선안을 생성하여 PC와 LC 모듈에 반영할 수도 있다.

5. 항공기 부품공장 W-FMCS

5.1 W-FMCS 아키텍처

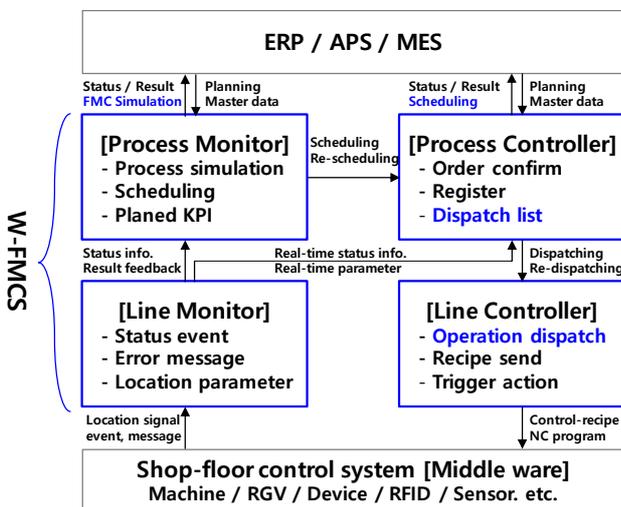
<Figure 6>은 K사의 CPPS 기반 항공기 부품 FMS 통제시스템 W-FMCS의 구성을 보여주고 있다. W-FMCS는 기존의 상위 생산계획시스템(ERP/MES/APS)과 FMS 제어를 담당하는 공정제어시스템(shop floor control system) 사이에 위치하며, <Figure 6>은 전술한 PM, PC, LC 및 LM 모듈간의 정보흐름을 보여준다.

5.1.1 프로세스 컨트롤러

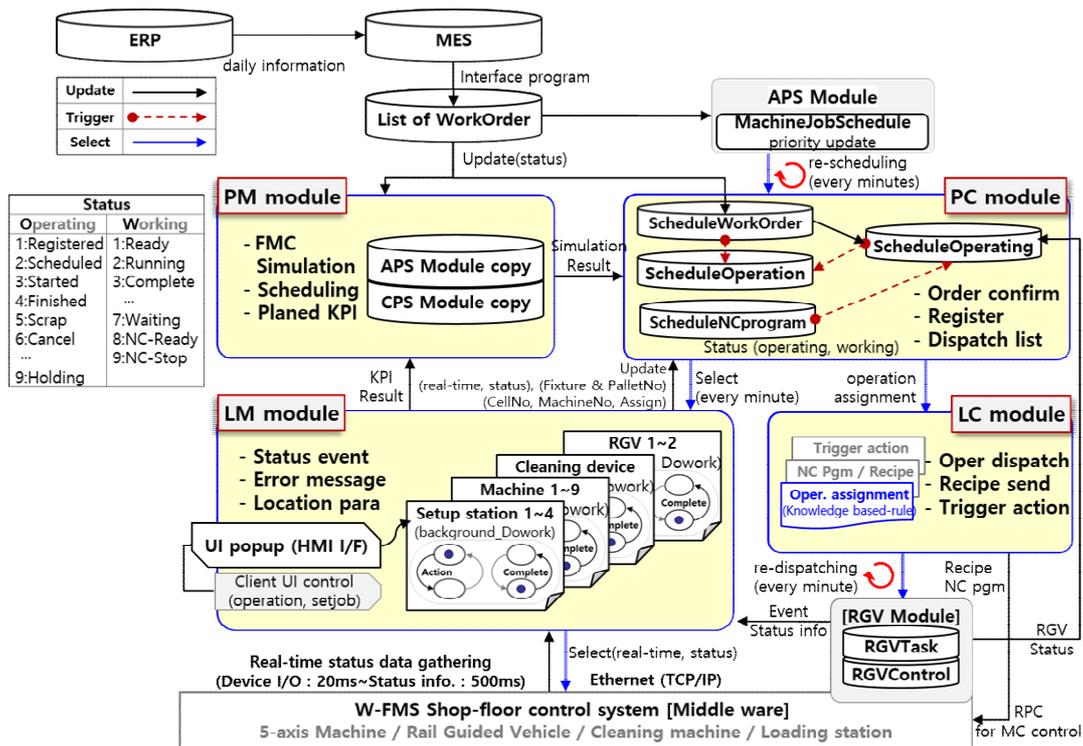
<Figure 6>에서 PC 모듈은 작업오더의 처리일정에 따라 단위공정의 제어 스케줄을 생성하는 CPPS 기반 스케줄링을 담당한다. APS 시스템은 제약경영이론(TOC : theory of constraints)의 DBR(drum buffer rope) 스케줄링 기법을 활용하여 ERP 시스템의 생산계획을 실행하기 위한 작업오더의 처리일정을 수립한다. <Figure 7>은 PC 모듈이 APS가 수립한 초기 작업일정계획을 근거로 각 작업오더의 단위공정 및 세부공정별 처리시간 추정치를 고려하여 RGV의 작업목록을 생성하는 흐름도이다. 여기서 생성된 단위공정별 작업오더의 예정 처리시간 정보는 실제 현장의 통제에 필요한 작업오더별 팔레트, 치공구 및 가공공법(NC 프로그램, 셋업 프로그램) 정보 등과 함께 LC 모듈로 전송된다.

5.1.2 라인 컨트롤러

<Figure 6>에서 LC 모듈은 PC 모듈이 생성한 단위공정별 작업오더와 관련 정보를 유휴 MCT에 할당한다. 또한,



<Figure 5> W-FMCS Model based on CPPS



<Figure 6> Architecture of CPPS based W-FMCS

RGV에 작업을 할당할 때는 가동률을 높이기 위해서 가공, 준비, 세척, 빈 팔레트 정리 순으로 할당할 작업을 탐색하는 지식기반 할당 규칙을 적용한다. 할당된 작업을 수행하기 위한 제어규칙(rule control), 가공공법(recipe), 작업지령(trigger action) 등의 정보는 HMI와 PLC를 통해서 관련 장비로 송신된다. W-FMCS에서 LC가 작업오더 및 FMS의 상태정보를 갱신하고 작업을 할당하는 주기는 RGV의 최소 이동시간을 반영하여 1분으로 설정하여 운영된다.

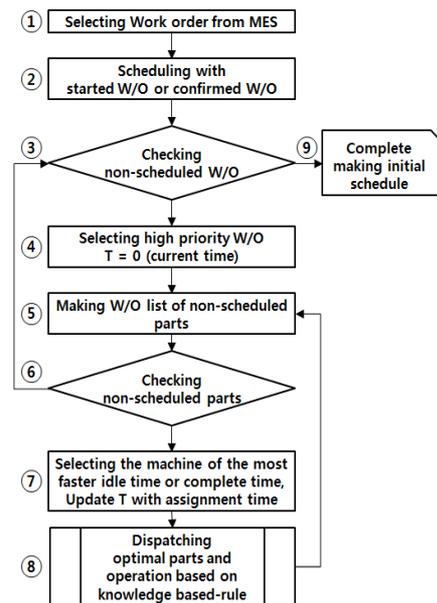
모듈이 갱신한 통합데이터베이스의 최신 상태정보를 반영해서 시뮬레이션을 수행하고, 가동률, 쓰루풋 등 주요 성과지표의 값을 예측한다. 시뮬레이터에는 성과지표의 예측치가 기대에 미치지 못할 때 데이터베이스에서 과거의 유사 사례를 탐색하여 재현할 수 있는 기능이 구현되어 있고, 운영자는 이를 활용하여 문제점을 파악하고 개선방안을 수립할 수 있다.

5.1.3 라인 모니터

<Figure 6>에서 멀티스레드 기반의 라인 모니터링 모듈은 PLC와 HMI를 통해서 시스템의 상태 및 오류 정보 그리고 제품 및 RGV의 위치정보를 실시간으로 수집하여 PM 및 PC 모듈로 송신한다. RGV와 MCT의 정보수집 주기는 20ms~500ms이고, 서버에서 구동되는 멀티스레드 방식의 에이전트가 장비에서 발생하는 이벤트를 감지하는 역할을 수행한다. 그리고 RGV, MCT 등의 객체에 특정 이벤트가 발생하는 경우, W-FMCS는 SQL(structured query language)의 트리거(trigger)를 이용해서 실시간으로 통합데이터베이스에 반영한다.

5.1.4 프로세스 모니터

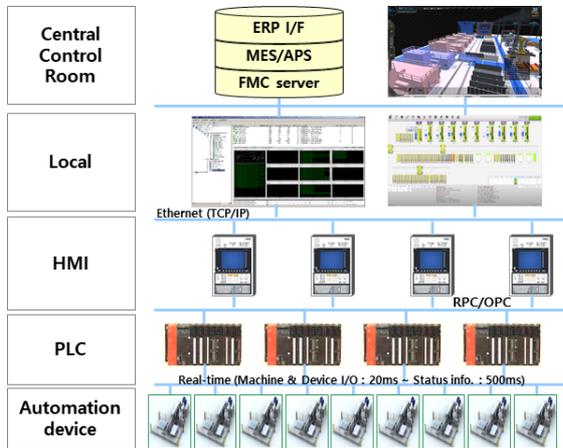
PM 모듈은 <Figure 6>에서 FMC 시뮬레이터에 해당한다. PM 모듈은 상위 생산계획시스템이 수립한 생산계획과 LM



<Figure 7> Flow Chart for W-FMCS Operations Scheduling

5.2 W-FMCS 구축

<Figure 8>은 K사 항공기 부품공장의 FMS에 구축된 CPPS 기반 W-FMCS의 전체 시스템 구성도를 보여준다. W-FMCS는 자동화기계 및 장치, PLC(Programmable Logic Control), HMI(Human Machine Interface), 작업장 그리고 중앙통제실 계층으로 구성된다. 장비와의 인터페이스 통신은 RPC/OPC(Remote Procedure Call/OLE Process Control) 방식을 채택하였으며, 장비의 I/O(Input/Output) 시간은 20ms, 상태정보 갱신 주기는 500ms로서 물리세계의 상태정보가 가상세계와 동기화되어 실시간 반영된다. 그림에서 중앙통제실 계층의 우측에는 FMC 시뮬레이터에 탑재된 디지털 공장의 실제 화면을 보여주고 있다.



<Figure 8> Control Layer of W-FMCS

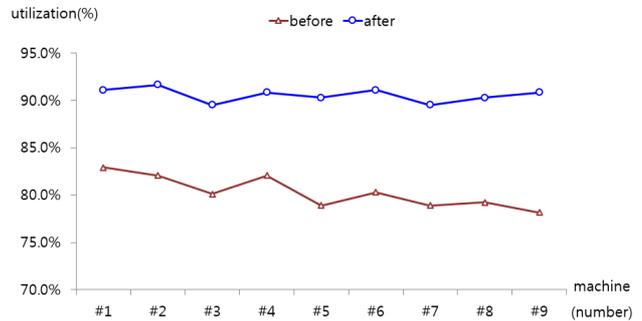
6. CPPS 기반 W-FMCS 운영 효과

<Table 1>은 본 연구에서 제안한 CPPS 기반 W-FMCS를 K사의 항공기 부품공장 FMS에 1개월간 적용한 결과를 보여준다. W-FMCS를 적용한 이후에 가동률은 평균 80.3%에서 90.6%로 12.8%, 생산능력은 10.5대에서 11.1대로 5.7% 향상되었으며, 제약공정의 생산속도 증가로 리드타임은 4.5일에서 4.1일로 8.9% 단축되는 결과를 나타냈다.

<Table 1> Effects of W-FMCS on Performance Measures

Performance measure	Before (result of operation)	After (result of operation)
Utilization	80.3% (range : 78.2~82.9, deviation : 4.8%p)	90.6% (range : 89.5~91.6, deviation : 2.1%p)
Throughput	10.5 ship-set	11.1 ship-set
Lead-time	4.5 days	4.1 days

<Figure 9>는 W-FMCS를 적용하기 전후의 MCT 가동률 변화를 비교한 결과이다. W-FMCS 적용 전 MCT의 평균 가동률은 80.3%이고, 최댓값은 MCT1의 82.9%, 최솟값은 MCT9의 78.2%로 나타났다. W-FMCS 적용 전에는 현장의 상태정보를 고려하지 않고 MCT가 배치된 순서대로 제품을 투입하기 때문에 상대적으로 앞쪽 MCT의 가동률이 더 높게 나타났다. 한편 W-FMCS 적용 후의 평균 가동률은 90.6%로 나타났으며, 최댓값은 MCT2의 91.6%, 최솟값은 MCT3과 MCT7의 89.5%로서 편차는 2.1%p로서 이전보다 가공 장비들의 가동률이 평균화되었음을 알 수 있다. 이는 W-FMCS가 MCT 고장, 일시정지, 셋업지연 등 실시간으로 파악한 현장의 상태정보를 반영하여 RGV의 운영효율을 높일 수 있는 작업배정을 수행한 결과, MCT의 가동률 편차가 감소하고 생산성이 향상된 것으로 판단된다.



<Figure 9> Comparison of MCT Utilization

스마트공장의 구축 및 운영은 단기에 끝나는 프로젝트가 아니므로 CPPS의 적용 이후에도 지속적인 고도화 및 유지보수 측면에서 생산현장의 물리적인 리소스(장비 업그레이드, 제어시스템 교체 등) 변경 시 사용자의 편의성을 쉽게 제공하는 방법 등은 앞으로 해결해야 할 과제로 남아있다.

7. 결론

본 연구에서는 기존 유연생산라인의 고도화를 위해 생산현장의 변동 상황이 실시간 반영되도록 가상공장 물리공장을 수직적으로 통합하는 CPPS 기반 생산통제시스템을 개발했다. 이를 위하여 CPPS 개념을 활용한 4단계 수직적 통합제어 모형을 제안하고, 시스템 구현을 위한 W-FMCS 아키텍처를 제시하였다. 또한, 항공기 부품공장의 유연생산라인에 W-FMCS를 적용함으로써 가상공장 물리공장 간의 수직적 통합을 바탕으로 생산통제 및 운영 시스템을 구축하였다. 그 결과로 현장의 변동사항이 실시간 반영되고, 변동 상황에 대응하여 효율적으로 작업일정을

재계획할 수 있는 토대를 마련했다.

본 논문에서 제안한 CPPS 기반의 4단계 수직적 통합 제어 모형 및 W-FMCS 아키텍처는 실제 항공기 부품 가공용 FMS에 적용한 실적을 비교, 분석함으로써 가동률 및 운영효율을 개선하는 효과가 있음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 CPPS 기반의 4단계 수직적 통합 제어 모형은 다양한 품목을 생산하는 스마트공장의 운영을 최적화하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Chun, I. G., Kang, S. J., Chun J. H. and Lee, S. H., CPS-based Smart Factory technology for a connection of Cyber-Physical factory, *The Journal of The Korean Institute of Communication Sciences*, 2016, Vol. 33, No. 11, pp. 8-15.
- [2] Francisco, A.L., The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems, *Journal of Innovation Management*, 2015, Vol. 3, No. 4, pp. 16-21.
- [3] Kang, H.M. and Hwang, K.T., Analysis of Research Trends of Cyber Physical System(CPS) in the Manufacturing Industry, *International Information Society Agency, Information Policy*, 2018, Vol. 25, No. 3, pp. 3-28.
- [4] Kim, D.G. and Park, M.G., Horizontal Integration between Cyber Physical System Based on Industry 4.0 and Manufacture Execution Systems through Middleware Building, *Journal of Korea Multimedia Society*, 2014, Vol. 17, No. 12, pp. 1484-1493.
- [5] Kim, D.H., Lee, I.S., and Cha, C.N., A simulation study to determine the number of pallets in the FMS for aircraft parts, *J. Soc. Korea Ind. Syst.*, 2018, Vol. 41, No. 4, pp. 59-69.
- [6] Monostori, L., Cyber-physical production systems : Roots, expectations and R&D challenges, *Procedia CIRP*, 2014, Vol. 17, No. 1, pp. 9-13.
- [7] Monostori, L., Kadar, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W., and Ueda, K., Cyber-physical systems in manufacturing, *CIRP Annals*, 2016, Vol. 65, No. 2, pp. 621-641.
- [8] Noh, S.D., Smart factory CPS technology trends and issues, *The Magazine of the IEEE*, 2016, Vol. 43, No. 6, pp. 47-50.
- [9] Weyer, S., Meyer, T., Ohmer, M., Gorecky, D., and Zuhlke, D., Future Modeling and Simulation of CPS-based Factories : an Example from the Automotive Industry, German Research Centre for Artificial Intelligence, *IFAC-PapersOnLine*, 2016, Vol. 49, No. 31, pp. 97-102.

ORCID

- Deok Hyun Kim | <http://orcid.org/0000-0002-9358-8784>
 In Su Lee | <http://orcid.org/0000-0002-6437-9609>
 Chun Nam Cha | <http://orcid.org/0000-0002-0975-295X>