

## 시물레이션 가능한 CPS 구성을 위한 에이전트 모델 구성 방법

이진명 · 박홍선 · 김찬우 · 강봉구<sup>†</sup>

## Agent Model Construction Methods for Simulatable CPS Configuration

Jinmyeong Lee · Hong-Sun Park · Chan-Woo Kim · Bong Gu Kang<sup>†</sup>

## ABSTRACT

A cyber-physical system is a technology that connects the physical systems of a manufacturing environment with a cyber space to enable simulation. One of the major challenges in this technology is the seamless communication between these two environments. In complex manufacturing processes, it is crucial to adapt to various protocols of manufacturing equipment and ensure the transmission and reception of a large volume of data without delays or errors. In this study, we propose a method for constructing agent models for real-time simulation-capable cyber-physical systems. To achieve this, we design data collection units as independent agent models and effectively integrate them with existing simulation tools to develop the overall system architecture. To validate the proposed structure and ensure reliability, we conducted empirical testing by integrating various equipment from a real-world smart microfactory system to assess the data collection capabilities. The experiments involved testing data delay and data gaps related to data collection cycles. As a result, the proposed approach demonstrates flexibility by enabling the application of various internal data collection methods and accommodating different data formats and communication protocols for various equipment with relatively low communication delays. Consequently, it is expected that this approach will promote innovation in the manufacturing industry, enhance production line efficiency, and contribute to cost savings in maintenance.

**Key words** : CPS(Cyber Physical Systems), M&S(Modeling and Simulation), agent model

## 요약

사이버물리시스템은 제조 환경의 물리적 시스템과 가상 공간을 연결하여 시물레이션을 가능하게 하는 기술이다. 이 기술의 주요 과제 중 하나는 두 환경 간 원활한 통신을 구현하는 것으로 복잡한 제조 공정에서는 다양한 제조설비의 프로토콜에 대응할 수 있어야 하며, 다수의 데이터를 지연과 오류 없이 송수신할 수 있어야 한다. 이에 본 연구에서는 실시간 시물레이션 가능한 사이버물리시스템 구성을 위한 에이전트 모델 구성 방법을 제안한다. 이를 위해 데이터 수집부를 독립된 에이전트 모델로 설계한 후, 이를 기존 시물레이션 도구와 효과적으로 통합하여 전체 구조를 개발하였다. 제안한 구조에 대한 구동 검증과 신뢰성 파악을 위해 실제 스마트 의류생산 마이크로 팩토리 시스템의 여러 장비와 연동하여 데이터 수집 기능에 대한 실증을 수행했다. 실증은 데이터 수집 주기와 관련된 데이터 지연과 및 데이터 결측에 대한 실험을 진행하였다. 결과적으로 제안된 CPS 구성 방법은 비교적 큰 통신 지연 없이 다양한 내부 데이터 수집과 다양한 장비의 데이터 포맷 및 통신 프로토콜에 적용 가능한 유연성을 보여주며, 비교적 간단하게 CPS 구성을 가능하게 한다. 따라서 제조 업계에서 혁신을 촉진하고 생산 라인의 효율성을 향상시키며, 유지보수 비용을 절감하는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

**주요어** : CPS(Cyber Physical Systems), M&S(Modeling and Simulation), 에이전트 모델

\* This study has been conducted with the support of the Korea Institute of Industrial Technology as “Development of microfactory-based technology for future smartwear manufacturing (KITECH EH-24-0006)”.

**Received:** 21 February 2024, **Revised:** 11 June 2024,

**Accepted:** 11 June 2024

**† Corresponding Author:** Bong Gu Kang

E-mail: bgkang@kitech.re.kr

Korea Institute of Industrial Technology

## 1. 서론

CPS(Cyber Physical Systems)는 물리적인 시스템과 가상의 시스템이 데이터 기반으로 상호 작용하는 시스템을 의미하며(Wan K, 2010), 최근 4차 산업혁명의 발전을 촉진할 수 있는 핵심 기술로 보안, 교통, 제조 등 다양

한 분야에서 연구되고 있다(A. Bagula, 2021; S. M. Dibaji, 2019). 특히, 제조 분야에서는 제품의 수율 및 품질 개선과 스케줄링 기반 생산 효율성 개선에 주로 활용되고 있으며(X. Zhu, 2017; M. Glatt, 2021), 제조 환경에 대한 모니터링을 포함한 의사결정 지원 도구로 활용되면서, 스마트 제조 산업의 핵심 요소로 자리잡고 있다.

이와 같은 CPS 기반 스마트 제조 환경의 효율적인 구성을 위해 ①실제 설비 시스템으로부터 발생하는 데이터 획득을 통해 상태정보를 갱신할 수 있는 데이터 수집부, ②수집된 데이터를 통해 what-if analysis 기반 새로운 의사결정이 가능한 논리 모델부, ③의사 결정된 결과에 대한 시각적인 분석이 가능한 가시화부, 총 3가지 구성 요소 간 상호 연결된 유기적인 연결 구조를 갖추어야 한다(Y. Jeong, 2020; G. Zhou, 2020). 이를 위해, 기존 연구에서는 단일 시뮬레이션 도구 혹은 시뮬레이션 도구를 결합하여 3가지 구성 요소 간 연결을 표현했다.

전자인 단일 시뮬레이션 도구를 활용하는 방식(S. Luściński, 2020; Parv, L, 2019)은 틀에서 제공되는 데이터 수집, 분석, 가시화 라이브러리를 통해 빠른 CPS 구성이 가능하다는 장점이 있는 반면에, 틀에서 지원하는 특정 데이터 인터페이스(W. Sun, 2021)를 통해서만 데이터 획득이 가능하여 다양한 설비로부터의 데이터 수집이 어렵다는 단점이 존재한다. 반면에, 후자인 시뮬레이션 도구를 결합하는 방식은 다양한 CPS 개발 요구사항에 맞게 필요한 도구의 결합을 통해 최적화된 CPS 구성요소의 결합을 가능하게 하는 장점이 있지만, 이를 위해서는 시스템 연동 작업이 선행되어야 하고 이는 궁극적으로 긴 개발 시간을 야기한다(H. Neema, 2019; J. Sztipanovits, 2014).

CPS를 구성함에 있어서, 설비 시스템 구축 단계에서 CPS를 개발하여 최적화된 구성 요소를 결합하는 것이 이상적이거나, 기존 구축하여 운영되고 있는 설비 시스템에 대한 CPS를 구성하는 것이 일반적인 상황임으로 비용 및 시간적 이유로 단일 시뮬레이션 도구를 주로 활용하고 있다. 그러나 이와 같은 접근 방식은, 시뮬레이션 도구에서 제공되는 외부 데이터 인터페이스를 사용함으로써 실제 설비 시스템과 호환이 안되는 경우가 있을 뿐만 아니라, 데이터 교환이 가능하더라도 최근 제조공정의 복잡성의 증대로 인해 불필요한 정보를 포함하여 데이터를 송수신하는 상황을 발생시키고, 이는 궁극적으로 과도한 데이터 교환으로 인한 통신 시스템의 지연을 발생시킬 수 있다(R. Sekaran, 2022).

이러한 문제점을 해결하기 위해, 본 논문에서는 단일 시뮬레이션 도구로부터 데이터 수집부를 분리하여 CPS

를 구성하는 방법을 제안한다. 이산사건 형태의 동작 특성을 갖는 데이터 수집부를 표현하기 위해, 이를 DEVS (Discrete EVent System Specification) 형식론 기반 에이전트 모델로 설계 및 구현하였으며, 실제 시스템(PS: Physical System)과 가상의 시뮬레이션 시스템(CS: Cyber System)간 인터페이스를 설계 및 구현하였다.

제안하는 CPS 모델 구조의 구동 검증을 위해, 의류 생산 마이크로 팩토리 시스템의 PLC(Programmable Logic Controller) 장비와 연동하여, 실제 시스템의 상태 정보 수집 기능에 대한 실증을 수행하였다. 또한, 실험적 분석을 통해 실제 시스템(PS)으로부터의 데이터 수집 주기에 따른 네트워크 지연 및 수집된 데이터의 안정성에 대한 분석을 통해, 가상의 시스템(CS) 상에서 분석을 위해 요구되는 실제 시스템(PS)으로부터의 이상적인 데이터 수집 주기에 대해 도출하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 CPS 구성 방법 관련 기존 연구에 대해 설명하며, 3장에서는 제안하는 시뮬레이션 가능한 CPS 구성을 위한 에이전트 모델 구성 방법에 대해 제시한다. 4장에서는 적용대상인 의류 생산 마이크로 팩토리 시스템 및 실험 시나리오에 대해 설명하고, 5장에서는 실험 결과에 대해 고찰한다. 마지막으로 6장에서는 본 연구의 결론을 제시한다.

## 2. 관련 연구

본 장에서는 2가지 관점(단일 시뮬레이션 도구 및 시뮬레이션 도구를 결합)으로 CPS를 구성하는 방안에 대한 관련 연구에 대해 설명한다.

### 2.1 단일 시뮬레이션 도구를 활용한 CPS 구성 연구

기 구성 및 운영 중인 제조설비에 대한 신속한 CPS 구성을 위해, 단일 시뮬레이션 도구들을 활용하는 기법이 널리 활용되고 있다. 해당 도구들은 이전 장에서 언급한 CPS의 3가지 구성요소인 데이터 수집부, 논리 모델부, 가시화부를 기본적으로 포함하고 있으며, 도구의 활용 목적에 따라 구성요소 중 일부에 대해 구체적인 표현이 가능한 환경을 제공한다.

CPS 구성요소 중 분석에 있어서 가장 중요한 논리모델부의 표현을 위해, 기존 연구들에서는 Anylogic, FlexSim 등과 같은 범용적 시뮬레이션 도구 상에서 제조 특화된 라이브러리를 통해 분석하거나(K. Khedri Liraviasl, 2015; Kumar, B, 2015) 좀 더 빠른 모델 구성을 위해 Process Simulate, Plant Simulation 등과 같은 제조 특화된 시뮬

레이션 도구를 주로 활용하였다(Yang, S. L., 2020). 해당 시뮬레이션 도구들은 모델에 대한 모듈화 및 계층적인 모델 구성을 통해 모델 재구성을 통한 분석이 유리하다는 특징을 갖는다.

한편, 일부 연구에서는 Visual Components 등과 같은 가시화부에 특화된 시뮬레이션 도구를 사용하여 CPS를 구성하였다(Lämmle, A., 2020; Arnarson, H., 2021). 해당 도구에서 제공되는 가시화 기능을 통해 단일 설비에 대한 애니메이션 정의 및 이에 대한 가시화를 통해 세부화된 시각적 동작 검증이 가능하다는 장점이 있는 반면, 반복, 배치 시뮬레이션 등과 같은 시뮬레이션 분석 관점에 있어서의 한계점이 있어 시각화 도구로만 사용하기 어렵다(Mahmood, K., 2020).

또한, Emulated 3D 등과 같은 일부 시뮬레이션 도구는 실제 설비와의 에뮬레이션을 위한 PLC 인터페이스 환경을 제공하며, 이를 통해 설비 제어 전에 사전 시뮬레이션 기반 분석을 수행하고 분석된 결과를 통해 실제 시스템으로의 적용이 가능하다. 이와 같은 도구는 단위기능 테스트(CT: Control Testing)에 특화되어 있기 때문에, (Phillips, R., 2010) 전체 시나리오 관점에서 시뮬레이션 가능한 CPS를 구성하기에는 한계를 지닌다.

단일 시뮬레이션 도구를 사용함으로써 모든 시스템 구성 요소들이 한가지의 환경에서 구현 가능해지므로 개발 및 테스트 프로세스가 단순화되고 시간과 비용을 절감할 수 있다. 하지만 특정 시뮬레이션 도구에 특화된 제조설비 이외의 장비는 호환이 어려울 수 있으며 다른 통신 프로토콜이나 데이터 포맷을 사용하는 장비와의 상호작용이 어려울 수 있다.

## 2.2 시뮬레이션 도구의 결합을 활용한 CPS 구성 연구

일반적인 제조현장은 단일 시뮬레이션 도구에서 지원되는 제조사 이외의 다양한 제조사들의 설비 및 센서류로 구성되어 있기 때문에, 단일 시뮬레이션 도구를 통한 데이터 수집 및 CPS를 구성하기에는 한계를 지닌다(H. Neema, 2018). 이를 해결하기 위해, 기존 연구에서는 CPS의 구성요소 별로 독립적인 어플리케이션을 구성한 후 이들을 결합하였으며, 이와 같은 접근 방식은 통신 인터페이스에 대한 유연한 확장이 가능하여 복잡한 제조공정에서의 CPS 구성을 가능하게 한다(H. Neema, 2019).

CPS의 3가지 구성요소 중 데이터 수집부 설계를 위해 OMNeT++, OPNET(H. Neema, 2019; Chen, B., 2014) 등 통신 network에 특화된 도구를 사용하거나 특정 프로토콜 및 제조 프로세스에 맞는 API를 자체 개발하여 사용

한다. 논리모델부에서는 주로 Matlab-Simulink, ARENA, PySim과 같은 DES(Discrete Event Simulation) 기반 도구를 활용하여 제조 공정의 동작을 모델링하고 시뮬레이션하여 생산 흐름을 분석하고 최적화한다. 반면, 가시화부는 이러한 시뮬레이션 결과를 시각적으로 전달하고 해석하기 위한 역할을 수행하며 OpenGL과 같은 오픈 소스 그래픽 라이브러리를 사용하여 직접 시각화 프로그램을 개발하거나(Lin, H., 2020), 범용 시뮬레이션 도구를 활용하여 결과를 시각적으로 나타내기도 한다(Mahmood, K., 2020).

이와 같은 도구 결합을 활용한 CPS는 다수의 서비스 시스템으로 구성되어 동기화, 일관성, 보안, 성능 및 상호 운용성에 대한 복잡한 요구를 갖게 된다(H. Neema, 2022). 이를 해결하기 위해 일부 연구에서는 모델 기반 디지털 플랫폼을 개발하여 CPS 도구들을 통합하였으며 기존 통합 방법(글루코드, 유지보수)의 단점들을 보완하였다.(Margaria, T., 2021) 또한, CPS의 아키텍처를 서비스 지향 구조로 설계하여 산업 및 제조 프로세스에서 시스템의 이질성과 상호운용성 문제를 해결하기도 한다(Sacala, I., 2021).

CPS의 구성 요소들을 독립적인 도구들로 설계하고 구현 한다면, 다양한 통신 프로토콜과 설비에 유연하게 대응할 수 있다. 또한 특정 도메인에 종속되지 않아 다양한 분야나 산업에서 활용이 가능하며 각 구성 요소를 분리된 모듈로 설계함으로써, 필요에 따라 개별적으로 업그레이드하거나 최적화 할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 각 도구들마다 프로그래밍 언어나 실행 환경의 차이로 인해 데이터의 형식 변환과 통신에 어려움이 있을 수 있으며, 네트워킹 문제가 발생할 수 있다. 또한, 여러 프로그램 간의 통합은 디버깅과 유지보수를 어렵게 만든다는 단점이 있다. 이에 따라 2가지 접근방식의 장단점을 서로 보완할 수 있는 해결책이 필요하다.

## 3. 방법

본 장에서는 단일 시뮬레이션 도구로부터 데이터 수집부를 분리하여 CPS를 구성하는 방법에 대해 제시한다. 먼저 제안하는 구성 프로세스에 대해 설명 후, 이에 필요한 전체 모델 및 세부 모델 구조에 대해 기술한다.

### 3.1 구성 프로세스

Fig. 1은 본 논문에서 제안하는 단일 시뮬레이션 도구로부터 데이터 수집부를 분리하여 CPS 모델을 재구성

하는 방법에 대해 보여준다. 데이터 수집에 대한 상세한 묘사를 위해, 단일 시뮬레이션 도구로부터 데이터 수집부(Data Acquisition)를 독립된 시스템(에이전트 모델)으로 분리한 후, 데이터 수집부가 제외된 레거시 시뮬레이션 도구와의 결합을 통해 전체 CPS를 구성한다.

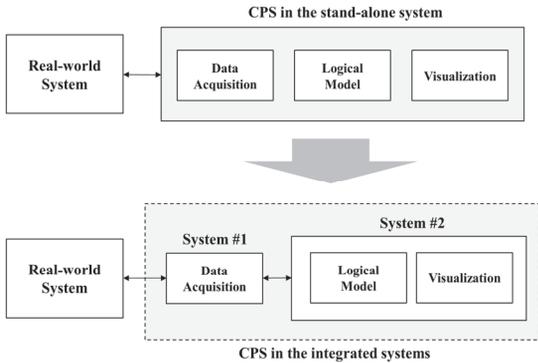


Fig. 1. Proposed CPS architecture in the integrated systems

제안하는 CPS를 구현하기에 앞서, 이산사건 기반으로 구동되는 CPS 구조를 시스템 이론 기반으로 모듈화 하여 표현하기 위해 Fig. 2에서와 같이 DEVS 형식론을 차용하여 DEVS model 관점에서 CPS model로 표현하였다.

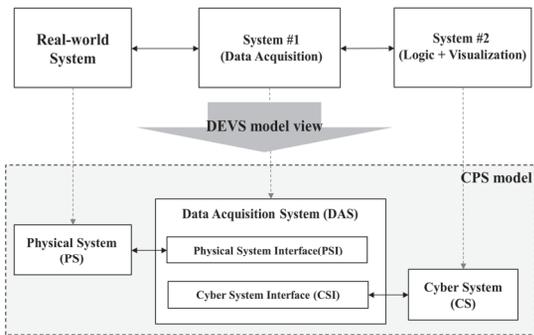


Fig. 2. CPS model construction from the DEVS model view

실제 설비 시스템 및 데이터 수집부가 제외된 레거시 시뮬레이션 도구를 각 각 Physical System(PS) 및 Cyber System(CS)으로 표현하였으며, 두 시스템 사이의 데이터 교환을 위한 두 종류의 인터페이스가 포함된 부분을 Data Acquisition System(DAS)으로 표현하였다. 본 논문에서는 각 모델에 대해 표현 및 구현 후, 3가지 시스템을 결합하는 형태로 CPS를 구성하였다. 다음 장에서는 CPS model의 구체적인 구조에 대해 제시한다.

### 3.2 전체 모델 구조

Fig. 3은 시스템 전체 모델 구조를 나타내며, PS는 설비를 제어하고 조작하기 위한 제어시스템(IDC, Internal Data Controller)과 실시간으로 내부 상태를 수집하고 모니터링하는 모듈로 구성되어있다. 모듈은 위치, 속도 등과 같은 내부 데이터(Internal Data)를 수집하며, 제어시스템은 이러한 데이터를 바탕으로 설비의 상태를 파악하고 제어동작을 수행한다. 또한 내부 모듈만으로 얻을 수 없는 외부 데이터(External Data)를 수집하기 위해 DAQ 장비 등과 같은 외부 모듈(EDA, External Data Acquisition)을 추가적으로 사용한다.

DAS는 PS의 IDC와 EDA로부터 데이터를 실시간으로 수집하고 IDC와 EDA를 제어할 수 있는 PSI(Physical System Interface), CS로 PS의 데이터를 송신하고 사용자 제어신호를 수신하는 CSI(Cyber System Interface), PSI가 수집한 데이터를 저장하는 Logger, 총 3가지로 구성된다.

CS에는 DAS의 CSI와 데이터 및 사용자 제어신호를 송수신하며 논리 모델부 및 가시화부를 제어할 수 있는 SM(Simulator Manager)으로 구성되어 있다.

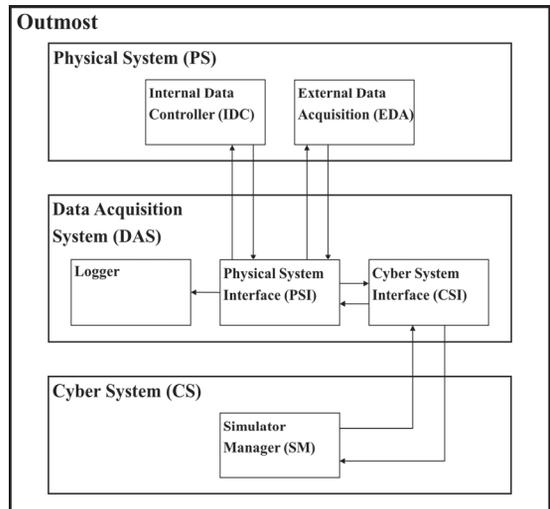


Fig. 3. Outmost Diagram

### 3.3 세부 모델 구조

세부 모델 구조는 DAS의 결합 모델 구조와 DAS와 CS 내부의 원자모델 구조 그리고 각 구조의 입력 사건에 의한 상태의 천이와 시간 진행에 따른 내부 상태의 천이에 대해 설명한다. PS의 세부 모델 구조는 장비마다 상이하므로 본 논문에서는 제외한다.

### 3.3.1 DAS 결합 모델

Fig. 4는 DAS 결합 모델 구조를 나타낸 것으로 PSI와 Logger는 결합 모델, CSI는 원자 모델이다. PSI는 PS와 데이터를 송수신하는 IDI(Internal Data Interface)와 EDI(External Data Interface)로 구성되어 있으며, Logger는 PSI로부터 전달 받은 데이터를 저장하는 IDL(Internal Data Logger)과 EDL(External Data Logger)로 구성되어 있다.

IDI는 PS의 IDC로부터 데이터를 수집하여 CSI와 IDL로 전달하고 CSI가 사용자 제어 신호를 전송하면 PS의 IDC에 제어 신호를 전달한다. EDI는 PS의 EDA로부터 데이터를 수집하여 CSI와 EDL로 전달하고 DAS 시스템이 시작되거나 정지될 때 신호를 PS의 EDA로 전달한다. CSI는 IDI와 EDI로부터 수신한 데이터를 CS의 SM으로 전송하고 SM이 사용자 제어 신호를 전송하면 IDI로 전달한다. IDI, IDL은 각각 EDI, EDL과 유사한 상태전이와 원자 모델을 가지고 있으므로 본 논문에서는 DAS의 IDI, IDL, CSI원자 모델의 세부 구조만 설명한다.

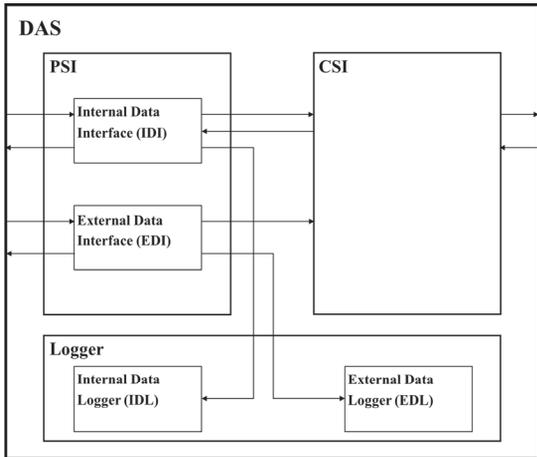


Fig. 4. DAS Coupled Model Diagram

### 3.3.2 DAS의 IDI 원자 모델

IDI의 원자모델 구조를 Fig. 5에 나타냈으며 본 연구에서는 IDI와 IDC 간의 통신 프로토콜로 UDP(User Datagram Protocol)를 채택하였다.

IDI는 DAS가 실행되면 UDP\_OPEN 상태에서 PS의 IDC와 UDP 통신 연결을 시도한다. UDP 통신 연결에 실패하면 연결을 다시 시도하고, 연결에 성공하면 연결 상태가 IDL에 전송되며 데이터 수집이 시작되고 REQUEST 상태로 전이한다.

REQUEST 상태에서 CSI로부터 사용자 제어 신호를 수신하면 CONTROL 상태로 전이하고, 제어 신호가 없으면 데이터 수집 주기에 따라 Read Request를 IDC로 전송하고 WAIT\_RESPONSE 상태로 전이한다.

CONTROL 상태에서는 수신된 사용자 제어신호에 대한 Write Request를 PS의 IDC에 전송하고 REQUEST 상태로 전이한다. WAIT\_RESPONSE 상태에서 설정된 시간 내에 PS의 IDC로부터 Response를 수신하지 못하면 통신 연결이 끊어진 것으로 판단하고 연결 상태를 IDL에 전송하고 UDP\_OPEN 상태로 전이한다. 설정된 시간 내에 PS의 IDC로부터 Response가 수신되면 Response 메시지 내의 데이터를 DAS의 변수에 매핑하는 함수가 호출되며 DATA\_PARSING 상태로 전이한다.

DATA\_PARSING 상태에서는 PS의 IDC로부터 수집한 데이터를 CSI로 전송하고 LOGGING 상태로 전이한다. LOGGING 상태에서는 PS의 IDC로부터 수집된 데이터를 IDL로 전달하고 REQUEST 상태로 전이한다.

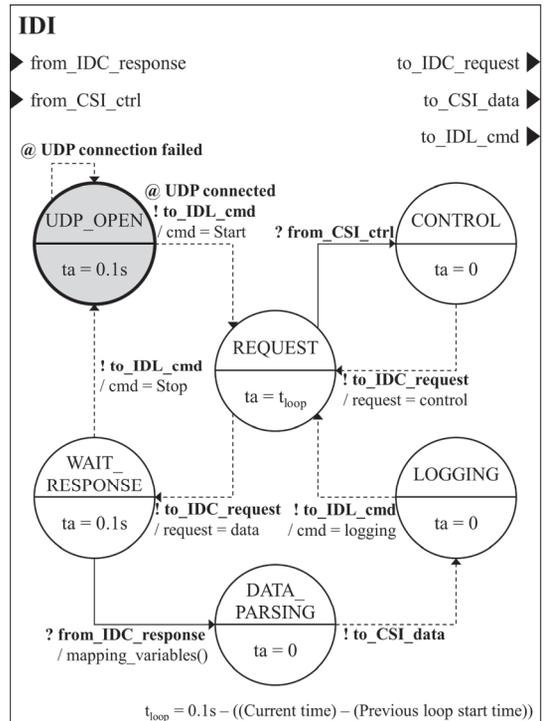


Fig. 5. IDI Atomic Model Diagram

### 3.3.3 DAS의 IDL 원자 모델

Fig. 6는 IDL 원자 모델 구조를 보여주며, 시작 시 WAIT 상태에서 IDI로부터의 연결 상태 수신을 기다린

다. 통신 연결에 성공하면 IDL은 연결 상태를 수신하고 CREATE\_FILE 상태로 천이하여 파일을 생성한 후 다시 WAIT 상태로 천이한다. IDL로부터 수집한 데이터를 수신하는 경우 LOGGING 상태로 천이하여 파일에 데이터를 기록하고 다시 WAIT 상태로 천이한다. 통신 연결이 끊어지면 IDL은 연결 상태를 수신받고 CLOSE\_FILE 상태로 천이하여 파일을 저장 및 종료한 후 다시 WAIT 상태로 천이한다.

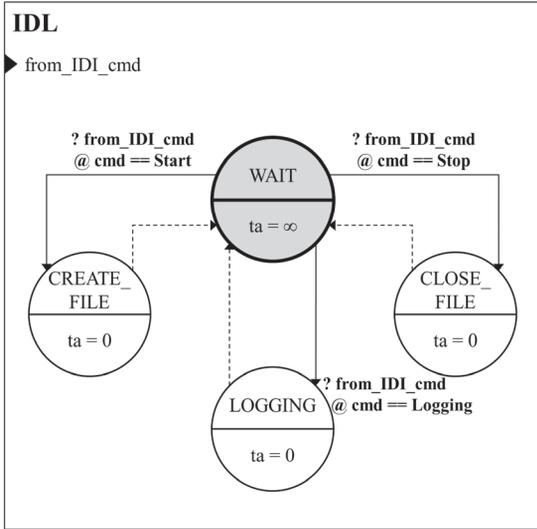


Fig. 6. IDL Atomic Model Diagram

3.3.4 DAS의 CSI 원자 모델

CSI 원자 모델 구조를 Fig. 7에 나타냈으며 본 연구에서는 CSI와 CS의 SM 간의 통신 프로토콜로 TCP (Transmission Control Protocol)를 채택하였다. CSI는 DAS가 실행되면 TCP\_LISTEN 상태에서 CS의 SM과 TCP 연결을 시도한다. TCP 통신 연결에 실패하면 연결을 다시 시도하고, 연결에 성공하면 WAIT 상태로 천이한다.

WAIT 상태에서는 IDL나 EDI로부터 데이터를 수신하게 되면 SEND\_DATA로 천이한다. SEND\_DATA 상태에서는 수집된 데이터를 CS의 SM으로 전송한다. 전송에 성공하면 WAIT 상태로 천이하고, 전송에 실패하면 TCP\_LISTEN 상태로 천이한다. WAIT 상태에서는 CS의 SM으로부터 사용자 제어 신호를 수신받는 경우 CONTROL 상태로 천이한다. CONTROL 상태에서는 IDL로 사용자 제어 신호를 전달하며 다시 WAIT 상태로 천이한다.

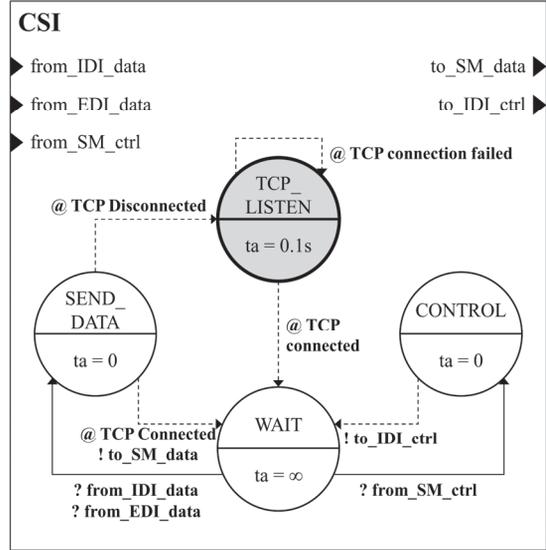


Fig. 7. CSI Atomic Model Diagram

3.3.5 CS의 SM 원자 모델

Fig. 8는 SM의 원자 모델 구조를 보여주며, CS가 실행되면 RUN\_SIMULATOR 상태에서 논리 모델부와 가시화부를 실행하고 WAIT 상태로 천이한다.

WAIT 상태에서 DAS의 CSI로부터 수집된 데이터를 수신하면 UPDATE 상태로 천이하여 논리 모델부와 가시화부에 전달한 후, 사용자의 제어 신호가 있는 경우 CONTROL 상태로 천이하고, 제어 신호가 없는 경우 WAIT 상태로 천이한다. CONTROL 상태에서는 CSI에 사용자 제어 신호를 송신하고 WAIT 상태로 천이한다.

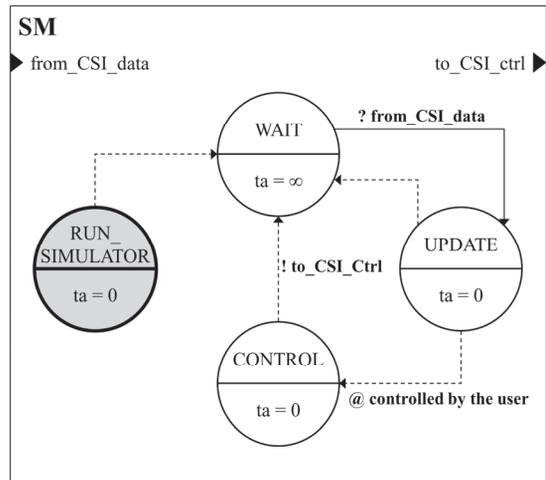


Fig. 8. SM Atomic Model Diagram

## 4. 시스템 구성 및 실험 시나리오

이 장에서는 제안한 CPS 구성 방법을 적용할 스마트 의류생산 마이크로 팩토리의 시스템 구성에 대해 설명하고, 구조에 대한 신뢰성과 유효성 파악을 위한 데이터 지연시간과 데이터 결측값 검증 시나리오에 대해 기술한다.

### 4.1 스마트 의류생산 마이크로 팩토리 시스템 구성

스마트 의류생산 마이크로 팩토리는 ICT 기술과 최신 섬유기술을 융합한 고성능성 의류를 생산하기 위해 설계된 시스템으로 컨베이어 시스템을 활용하여 재단된 원단을 간편하게 이송하며 동시에 자동으로 봉제 과정을 수행한다. 일반적으로 원단의 앞면과 뒷면을 봉제하여 하나의 완성된 의류로 제작하는 작업을 수행하는데 활용되고 있다.

실제 스마트 의류생산 마이크로 팩토리 구성을 Fig. 9와 같이 CS 상에 나타냈다. 해당 시스템은 컨베이어 벨트에 원단을 올려둘 수 있는 플레이트가 장착되어 있으며 원단은 이 플레이트를 통해 이송되는 형태로 설계되어 있다. AGV(Automated Guided Vehicle)는 봉제가 완료된 원단을 지정 위치로 운반한다. 공압 이송기는 컨베이어 벨트의 플레이트에 원단을 싣거나 내리는 역할을 수행하여 원활한 생산 과정을 지원한다.

로봇(UR5, UNIVERSAL ROBOTS, Denmark)은 공압 그리퍼가 장착되어 있어 플레이트 위의 원단을 봉제기로 운반하거나 봉제가 끝난 원단을 다시 플레이트 위로 운반하는 역할을 수행한다. 원단의 봉제를 위해 자동봉제기(AE-220A, JUKI, Japan)를 사용하였다.

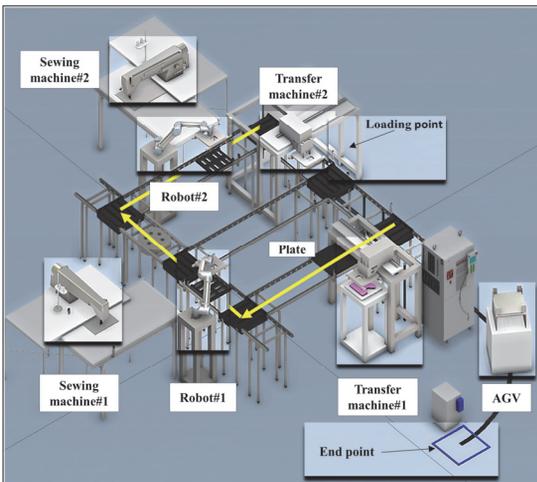


Fig. 9. Smart Microfactory System in Cyber System(CS)

### 4.2 스마트 의류생산 프로세스 및 데이터 수집

의류생산 전 각 플레이트는 지정된 원점에 위치하며, AGV가 Loading point에 도달했을 때 프로세스가 시작되도록 하였다.

의류 생산 프로세스가 시작되면 1번 공압 이송기(Transfer machine#1) 아래에 위치한 원단이 먼저 1번 공압 이송기(Transfer machine#1)에 의해 컨베이어 벨트의 플레이트로 운반되며, 이후 즉시 2번째 원단도 플레이트로 이송된다. 첫 번째로 이송된 원단은 컨베이어 벨트에 의해 2번 로봇(Robot#2)으로 이동하고, 두 번째 원단은 1번 로봇(Robot#1)으로 이동한다. 이후 각각의 플레이트에서 로봇에 의해 봉제기로 운반되며 즉시 봉제 프로세스가 진행된다. 이 때 원단이 제거된 플레이트는 컨베이어 벨트를 따라 시작지점으로 이동한다. 봉제가 진행 중일 때 컨베이어 벨트는 빈 플레이트를 각 로봇위치로 보내고 로봇은 봉제가 끝난 원단을 빈 플레이트로 운반한다. 이후 원단을 싣은 플레이트는 컨베이어 벨트를 따라 AGV가 위치한 Loading point로 옮겨지며, 총 5개의 의류가 AGV 위로 적재될 때까지 위 과정을 반복한다. 이후 Loading point에 위치해 있던 AGV가 End point로 이동하고 프로세스는 종료된다.

프로세스가 진행되는 동안에 팩토리 내부 PLC를 통해 총 160개의 내부 데이터를 취득하였다. 내부 데이터는 봉제기, 로봇, 컨베이어벨트, 공압 이송기 등 모든 구성설비의 상태 및 오류 데이터 등으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 네트워크 지연 및 수집된 데이터의 결측값 검증을 중점적으로 다루며, 데이터 스키마의 세부 설명은 생략한다.

### 4.3 데이터 지연시간(응답시간) 측정 방법 및 시나리오

데이터 지연시간을 파악하기 위해 네트워크 패킷 정보의 수집 시간과 설정한 데이터 수집 주기의 차이를 분석하여 데이터가 생성되고 수집되는 지연시간을 측정하였다.

데이터 수집을 위해 의류생산 프로세스를 실행하는 동안 모든 내부 데이터와 네트워크 패킷 정보를 수집하였으며, IDI의 데이터 수집 주기를 0ms에서부터 시작하여 50ms까지 10ms씩 증가시켜 총 6번의 실험을 하였다.

### 4.4 데이터 결측값 측정 방법 및 시나리오

의류생산 프로세스가 한 번 실행될 때마다 설비의 내부 데이터 변화 횟수가 항상 동일하다는 사실을 고려하여, 데이터 수집 주기별로 변화하는 모든 내부 데이터 변화 횟수를 기반으로 결측값을 분석하였다. 예를 들어, 데

이터 수집 주기가 짧아질 경우, 수집 주기 동안 데이터를 처리하지 못하여 오버헤드가 발생하고 이전 데이터가 아직 처리되지 않은 상태에서 새로운 데이터가 수집되면, 데이터가 실질적으로 변화하지 못하는 경우가 발생하며 총 변화 횟수가 줄어들게 된다.

데이터 결측값 측정을 위해 실험은 의류생산 프로세스를 실행하는 동안 모든 내부 데이터 정보를 수집하였다. 실험은 IDI의 데이터 수집 주기를 50ms에서부터 시작하여 500ms까지 50ms씩 증가시켰으며, 각 데이터 수집 주기별로 10번의 반복 실험을 수행하여 총 500번의 실험을 진행하였다. 실험의 일관성을 유지하기 위해 프로세스 도중에 오류가 발생하거나 정상적으로 실행하지 못한 경우는 제외하고 실험을 다시 진행하였다.

## 5. 결과 및 고찰

### 5.1 데이터 지연시간

Fig. 10은 데이터 수집 주기가 증가할 때 데이터 지연시간의 변화를 보여준다. 데이터 수집주기가 30ms 이상인 경우 평균 데이터 지연시간이 0.4ms 이하로 데이터 지연이 크지 않은 것으로 나타났으나, 데이터 수집 주기가 20ms 일 때 평균 데이터 지연시간은 약 2.3ms, 0ms 일 때 평균 데이터 지연시간은 약 22.3ms로 점차적으로 커지는 것을 확인 할 수 있다.

이를 통해 데이터 수집 주기가 30ms 이상인 경우, 비교적 안정적으로 실시간으로 작동 가능한 CPS 구성이 가능하지만 데이터 수집주기가 20ms 미만인 경우, 상대적으로 불안정하게 작동하는 것으로 나타났다.

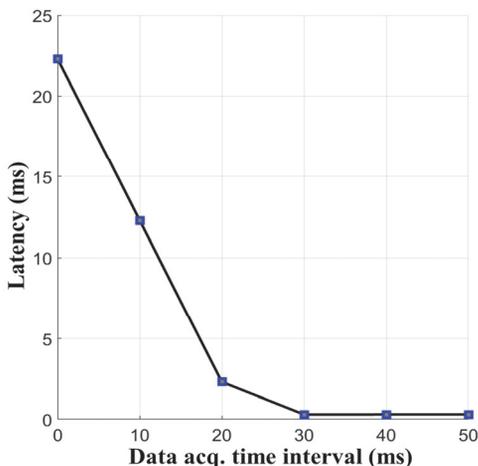


Fig. 10. Latency Based on Data acquisition time interval

### 5.2 데이터 결측값

Fig. 11의 Boxplot은 데이터 수집 주기에 따른 내부 데이터 변화 횟수를 보여준다. 평균값의 변화를 보면 데이터 수집주기가 증가할수록 내부 데이터 변화 횟수가 감소하여 결측 데이터가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 데이터 수집주기가 250ms 이상일 때는 IQR(Interquartile Range)이 평균적으로 10 이상으로 각 실험마다 내부데이터 변화 횟수의 변동성이 큰 것으로 나타났다. 하지만 200ms 이하인 경우, IQR이 평균적으로 2 이하로 250ms 이상일 때의 값과 비교하여 변동성이 작은 것으로 나타났다.

이를 통해 데이터 수집 주기가 짧을수록 결측된 데이터가 적게 발생하고, 보다 안정적인 데이터 수집이 가능함을 보여준다. 하지만 수집 주기가 길어질수록 누락된 값이 많아지고 데이터 수집의 변동성이 커질 수 있음을 확인할 수 있다.

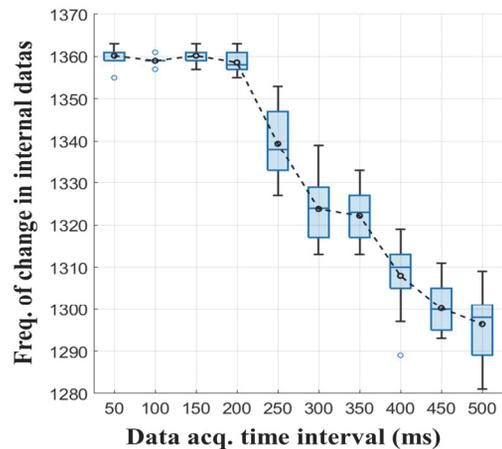


Fig. 11. Frequency of Change in Internal Data Based on Data acquisition time interval

### 5.3 결과 분석 및 고찰

데이터 수집 주기에 따른 지연시간으로 볼 때, 본 논문에서 제시한 CPS 구조의 평균적인 데이터 지연시간은 약 22ms로 나타났다. 따라서 23ms 이하의 데이터 수집 주기는 오버헤드를 발생시켜 데이터 누락이 발생할 가능성이 높다고 볼 수 있다. 이에 따라, 제안한 CPS 구성 방법을 활용할 때 시스템이 안정적으로 작동하기 위해 데이터 수집 주기를 최소 30ms 이상으로 설정하는 것이 적합하다고 판단된다.

일반적으로 데이터 수집 주기가 짧을 때 수집 주기 동안 데이터 처리를 완료 하지 못하여 데이터 누락이 발생한다. 하지만 본 결과에서는 데이터 수집 주기가 짧은 경

우에는 데이터 누락이 발생하지 않았으나, 상대적으로 수집 주기가 긴 경우에 데이터가 누락되는 것을 확인할 수 있다. 이는 데이터 수집 주기가 짧아도 실시간으로 데이터가 누락되지 않고 처리될 수 있으며, 오버헤드나 지연으로 인한 데이터 결측이 크게 발생하지 않음을 의미한다.

그러나 데이터 수집 주기가 긴 경우, 해당 이벤트나 변화를 감지하지 못할 가능성이 있고 이로 인해 해당 시간 동안 발생한 데이터가 누락되는 것으로 판단된다. 일반적으로 내부 및 외부 설비들은 논리 상태 High(1)와 Low(0)를 기반으로 상태를 펄스 신호로 전송하는데 High(1) 상태일 때 DAS가 계측을 해야 데이터가 누락되지 않고 읽히게 된다. 따라서 적용한 스마트 의류생산 마이크로 팩토리의 특정 내부 설비의 펄스 High(1) 신호가 250ms 이하로 동작하기 때문에 데이터 수집 주기가 250ms 이상일 경우 데이터 누락이 발생할 수 있으나, 250ms 이하인 경우에는 비교적 누락 될 가능성이 작아 데이터 값 변화 횟수의 변동성이 작은 것으로 나타났다.

이러한 관점에서 CPS를 구성함에 있어 적절한 데이터 수집 주기를 설정해야 안정적인 데이터 수집이 가능함을 알 수 있다. 본 논문에서 적용한 스마트 의류 생산 마이크로 팩토리의 이상적인 데이터 수집 주기는 30~250 ms이며, 해당 범위의 데이터 수집주기를 가질 때 결측 값 및 지연 없이 데이터를 수집할 수 있다고 판단할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 시물레이션 가능한 CPS 구성을 위해 에이전트 모델 기반으로 모델 구조를 효율적으로 설계하는 방법을 제시하였다. 데이터 수집부를 독립된 에이전트 모델로 설계 한 후, 데이터 수집부를 제외한 레거시 시물레이션 도구와의 결합을 통해 전체 구조를 구축하였으며, CPS 모델 구조의 동작 검증 및 데이터 수집의 신뢰성을 파악하기 위해 실제 스마트 의류 생산 마이크로 팩토리에 적용하여 실증을 진행하였다.

제안한 CPS 구성 방법은 단일 시물레이션 도구만으로 획득할 수 없었던 다양한 내부 데이터 수집이 가능하며, 4가지 이상의 다양한 장비의 데이터 포맷과 통신 프로토콜에도 적용이 가능하였다. 또한 CPS의 3가지 구성요소를 모두 설계하는 관점보다 동기화, 상호 운용성 및 유지 보수 측면에 있어서 비교적 간단하게 CPS 구성이 가능하였다. 따라서 다양한 설비에 대한 적용 가능성을 높일 수 있으며 이를 통해 여러 제조 업계에서 혁신을 촉진하고, 생산 라인의 효율성을 향상시키며, 제조 과정의 유지보수

비용을 절감하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

스마트 의류 생산 마이크로 팩토리에 적용 결과 30ms 이상의 데이터 수집주기에서는 데이터 지연이 거의 나타나지 않았으며, 데이터 수집주기가 짧을 경우 나타나는 오버헤드 및 통신 지연에 의한 데이터 누락은 없는 것으로 나타났다. 그러나 데이터 수집 주기가 설비 펄스 신호의 길이보다 길면 데이터 누락이 발생할 수 있으므로 실시간 CPS 구성에서 적절한 데이터 주기 선정이 필요한 것으로 나타났다. 데이터 주기를 선정할 때 발생할 수 있는 데이터 지연과 결측은 모두 시스템 작동에 중요한 요소로 최대한 발생하지 않도록 구성해야 하지만 불가피하게 발생하는 경우 CPS 활용목적에 따른 우선 순위 선정이 필요하다. CPS를 모니터링/제어용으로 사용하는 경우 실시간 데이터의 처리가 중요하므로 데이터 지연이 중요한 요소로 고려되어야 하며, 분석(시물레이션)용으로 사용되는 경우 분석 결과의 신뢰성이 중요하므로 데이터 결측이 중요한 요소로 고려되어야 한다. 따라서 이러한 활용목적에 따라 주기를 설정하고 우선순위를 고려한 시스템 설계가 필요하다.

본 연구의 한계로는 CPS를 구성함에 있어 외부 데이터 수집 없이 내부 데이터만 수집하였으며, 시나리오를 단일 설비에만 적용하였기 때문에 외부 센서가 있는 여러 설비에 적용할 경우 결과 값이 달라질 수 있다는 점이 있다. 또한, 제안된 CPS 모델 구조의 성능이 기존의 구조와 비교하여 얼마나 효과적인지에 대한 명확한 평가가 이루어지지 않았다는 한계가 있다. 기존 단일 시물레이션 도구를 활용한 CPS 기법의 경우 도구에서 지원하는 특정 설비의 데이터만 수집이 가능하기 때문에 스마트 의류생산 마이크로 팩토리의 전체적인 내부 데이터 수집에 제약이 있었으며, 기존 시물레이션 도구의 결합을 활용한 CPS 기법의 경우에도, 제안된 기법들이 동일한 조건과 환경에서 테스트되지 않아 명확한 평가를 내릴 수 없었다.

향후 연구에서는 본 연구에서 개발한 CPS 구조를 다수의 설비와 외부 데이터를 수집할 수 있는 DAQ(Data Acquisition) 시스템에 적용하여 데이터 수집의 안정성을 분석하고자 하며, 기존 기법들도 동일 조건과 환경에서 테스트할 수 있는 설비를 적용하여 명확한 성능 비교평가를 하고자 한다.

## References

1. A. Bagula, O. Ajayi, and H. Maluleke, "Cyber physical systems dependability using cps-iot monitoring,"

- Sensors, vol. 21, no. 8, pp. 2761, 2021.
2. A. Lämmle, C. Seeber, and E. Kogan, "Automatic simulation model implementation of robotic production cells in a 3D manufacturing simulation environment," *Procedia CIRP*, vol. 91, pp. 336-341, 2020.
  3. B. Chen, K. L. Butler-Purpy, A. Goulart et al., "Implementing a real-time cyber-physical system test bed in RTDS and OPNET." 2014 North American Power Symposium (NAPS), Washington, pp. 1-6, 2014
  4. B. S. Kumar, V. Mahesh, and B. S. Kumar, "Modeling and analysis of flexible manufacturing system with FlexSim," *International Journal of Computational Engineering Research*, vol. 5, no. 10, pp. 1-6, 2015.
  5. G. Zhou, C. Zhang, Z. Li et al., "Knowledge-driven digital twin manufacturing cell towards intelligent manufacturing," *International Journal of Production Research*, vol. 58, no. 4, pp. 1034-1051, 2020.
  6. H. Amarnson, B. Solvang, and B. Shu, "The application of virtual reality in programming of a manufacturing cell." 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Fukushima, pp. 213-218, 2021.
  7. H. Neema, T. Roth, C. Wang et al., "Integrating Multiple HLA Federations for Effective Simulation-Based Evaluations of CPS." 2022 IEEE Workshop on Design Automation for CPS and IoT (DESTION), Milano, pp. 19-26, 2022.
  8. H. Neema, J. Sztipanovits, C. Steinbrink et al., "Simulation integration platforms for cyber-physical systems." In *Proceedings of the Workshop on Design Automation for CPS and IoT*, pp. 10-19, 2019.
  9. H. Neema, Large-scale integration of heterogeneous simulations, Ph.D Thesis, Vanderbilt University, pp. 155, 2018.
  10. H. Y. Lin, and F. N. Yang, "Design and implementation of a CPS-based predictive maintenance and automated management platform," *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*, vol. 5, no. 1, pp. 100-109, 2020.
  11. I. S. Sacala, E. Pop, M. A. Moisescu et al., "Enhancing cps architectures with SOA for industry 4.0 enterprise systems." 2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Bari, pp. 71-76, 2021.
  12. J. Sztipanovits, T. Bapty, S. Neema et al., "Open META: A model-and component-based design tool chain for cyber-physical systems." *The Systems perspective in Computing: ETAPS Workshop(FPS 2014)*, Grenoble, pp. 235-248, 2014.
  13. K. K. Liraviasl, H. ElMaraghy, M. Hanafy et al., "A framework for modelling reconfigurable manufacturing systems using hybridized discrete-event and agent-based simulation," *IFAC-Papers OnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 1490-1495, 2015.
  14. K. Mahmood, T. Otto, J. Golova et al., "An approach to analyze the performance of advanced manufacturing environment," *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 628-633, 2020.
  15. K. Wan, K. Man, and D. Hughes, "Specification, Analyzing Challenges and Approaches for Cyber-Physical Systems (CPS)," *Engineering Letters*, vol. 18, no. 3, 2010.
  16. L. Parv, B. Deaky, M. D. Nasulea et al., "Agent-based simulation of value flow in an industrial production process," *Processes*, vol. 7, no. 2, pp. 82, 2019.
  17. M. Glatt, C. Sinnwell, L. Yi et al., "Modeling and implementation of a digital twin of material flows based on physics simulation," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 58, pp. 231-245, 2021.
  18. R. Phillips, and B. Montalvo, "Using emulation to debug control logic code." *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, Baltimore, pp. 1673-1677, 2010.
  19. R. Sekaran, A. Kumar Munnangi, S. Rajeyyagari et al., "Ant colony resource optimization for Industrial IoT and CPS," *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 37, no. 12, pp. 10513-10532, 2022.
  20. S. Luściński, and V. Ivanov, "A Simulation Study of Industry 4.0 Factories Based on the Ontology on Flexibility with Using Flexsim® Software," *Management and Production Engineering Review*, vol. 11, no. 3, pp. 74-83, 2020.
  21. S. M. Dibaji, M. Pirani, D. B. Flamholz et al., "A systems and control perspective of CPS security," *Annual reviews in control*, vol. 47, pp. 394-411, 2019.
  22. S. Yang, Z. Xu, G. Li et al., "Assembly transport

- optimization for a reconfigurable flow shop based on a discrete event simulation,” *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 15, no. 1, pp. 69-80, 2020.
23. T. Margaria, H. A. A. Chaudhary, I. Guevara et al., “The interoperability challenge: building a model-driven digital thread platform for CPS.” *International Symposium on Leveraging Applications of Formal Methods*, Rhodes, pp. 393-413, 2021.
24. W. Sun, J. Wu, G. Xiao et al., “Research on selection of commercial industrial simulation software oriented to virtual commissioning.” *Journal of Physics: Conference Series*. vol. 1906. no. 1, p. 012052, 2021.
25. X. Zhu, F. Qiao, and Q. Cao, “Industrial big data -based scheduling modeling framework for complex manufacturing system,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9, no. 8, 2017.
26. Y. Jeong, A. Singh, M. Zafarzadeh et al., “Data-driven manufacturing simulation: towards a CPS-based approach,” *SPS2020 Proceedings of the Swedish Production Symposium, Jönköping*, pp. 586-596, 2020.



**이진명** (ORCID : <https://orcid.org/0009-0003-4127-6724> / [ljm2910@kitech.re.kr](mailto:ljm2910@kitech.re.kr))

2018 인천대학교 기계로봇공학과 공학사  
 2020 고려대학교 기계공학과 공학석사  
 2020~ 2021 국방기술진흥연구소 연구원  
 2021~ 현재 한국생산기술연구원 기술원

관심분야 : 시뮬레이션, 신호처리, 기계공학



**박홍선** (ORCID : <https://orcid.org/0009-0003-6162-3287> / [hspark@nsl.hanyang.ac.kr](mailto:hspark@nsl.hanyang.ac.kr))

2016~ 2021 (주)펜타로직 연구개발팀 주임연구원  
 2021~ 2023 (주)동운아나텍 응용기술그룹 전임연구원  
 2023~ 현재 한양대학교 대학원 산업경영공학과 석사과정

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 강화학습, 디지털 트윈



**김찬우** (ORCID : <https://orcid.org/0009-0006-0294-9465> / [cwkim@nsl.hanyang.ac.kr](mailto:cwkim@nsl.hanyang.ac.kr))

2023 한양대학교 ERICA 산업경영공학과 공학사  
 2023~ 현재 한양대학교 대학원 산업경영공학과 석사과정

관심분야 : Path Planning, 스마트 제조, 시뮬레이션



**강봉구** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-7522-4979> / [bgkang@kitech.re.kr](mailto:bgkang@kitech.re.kr))

2011 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 공학사  
 2013 KAIST 전기및전자공학과 공학석사  
 2018 KAIST 전기및전자공학과 공학박사  
 2018~2019 KT 융합기술원 선임연구원  
 2019~현재 한국생산기술연구원 국가산업융합센터 선임연구원

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 디지털 트윈, 인공지능 융합