

스마트 서비스 시스템 기반 스마트 팩토리 아키텍처 설계

이희제* 이종윤

포항공과대학교 엔지니어링대학원

Smart Service System-based Architecture Design of Smart Factory

Heeje Lee*, Joongyoon Lee

*Graduate School of Engineering Mastership(GEM), Pohang University of
Science and Technology(POSTECH),*

Abstract : A new paradigm based on distributed manufacturing services is emerging. This paradigm shift can be realized by smart functions and smart technologies such as Cyber Physical System (CPS), Artificial Intelligence (AI), and Cloud Computing. Most architectures define stack levels from Level 0 (equipment) to Level 4 (business area) and specify the services to be provided between them. Because of their a rough technical specification, there is a limitation on how to actually utilize a technology to actually implement a smart factory service with this architecture. In this paper, we propose a smart factory architecture that can be utilized directly from the perspective of a smart service system by making the use of System Engineering Process and System Modeling Language (SysML).

Key Words : Smart Service System, Smart Factory Architecture, Manufacturing Execution System, Advanced manufacturing, Industry 4.0

Received: November 14, 2017 / **Revised:** December 26, 2017 / **Accepted:** December 27, 2017

* 교신저자 : Joongyoon Lee, jlee2012@postech.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

지난 10년 동안 엔터프라이즈 시스템과 같은 유망한 도구의 출현으로 제조 시스템 역시 생산성 및 서비스 품질을 향상시키는 방향으로 발전하였다. 그러나 오늘날의 세계 산업의 경쟁적 특성 때문에 기업들은 경쟁사들 사이에서 자신의 지위를 확보하기 위해 기존 시스템이 제공하는 기능을 넘어 최신 기술을 구현해야 하는 상황이 도래하고 있다[1].

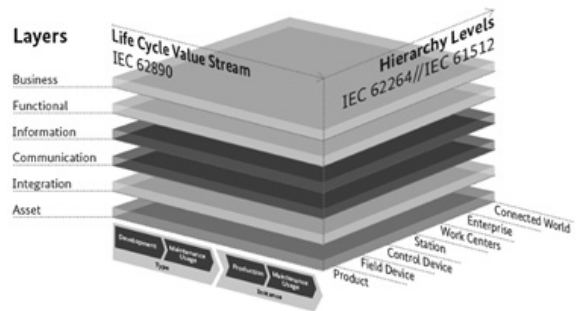
지금까지 공장 내부 및 외부의 복잡한 공정 관리 관리는 ERP(Enterprise Resource Planning), MES (Manufacturing Execution System) 등의 응용 프로그램을 통해 수행되었다. 경쟁의 심화로 인해 벌어진 고객 요구에 맞춘 제조 유연성의 증가는 이러한 솔루션으로는 실현하기 어려운 복잡한 제조 공정을 필요로 한다. 또한 서로 다른 정보 시스템의 정보 불일치는 계획과 생산의 문제로 직결 이어지고 있다[2].

이에 분산 된 제조 서비스를 기반으로 하는 새로운 패러다임이 등장하고 있다. 이 패러다임의 변화는 네트워크상의 서비스, 임베디드 인텔리전스, 예측 분석, 클라우드 컴퓨팅 기술 등이 반영된 스마트 기능 및 기술의 도입에 의해 실현될 수 있다[3]. 그러나 이러한 모든 기술은 각각의 표준이 존재하며, 그에 따라 도입 방법적인 면에서도 차이를 갖는다.

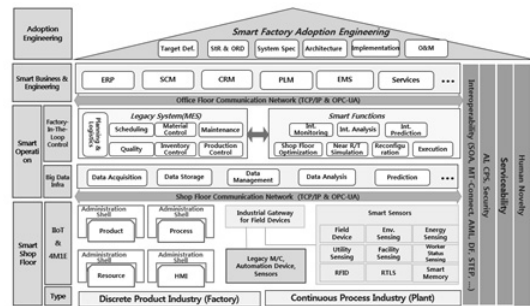
스마트팩토리와 관련된 대부분의 아키텍처는 Level 0(설비)부터 Level 4(비즈니스 영역)에 이르기까지의 설비 레벨을 정의하고, 이들 간에 제공해야 할 서비스를 명세하고 있다(Figure 1, 2). 대략적인 기술 명세가 나와 있으나, 이러한 형태의 아키텍처를 가지고 실제로 스마트 팩토리 서비스를 구현하는 데에는, 어떤 규모와 기술 수준을 가진 공장에서 적용이 가능한 지 명확히 알 수 없다는 한계가 있다.

본 논문에서는 일정한 형태의 설비 시스템이 이미 공장에 구축이 되어 있다는 가정 하에, 규모와 기술 수준에 따라 스마트 팩토리를 구현할 수 있도록 스마트 서비스 시스템의 개념과 스마트 팩토리의 개념을 도입하였다. 스마트 서비스 시스템은 기

Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0)



[Figure 1] RAMI 4.0[4]



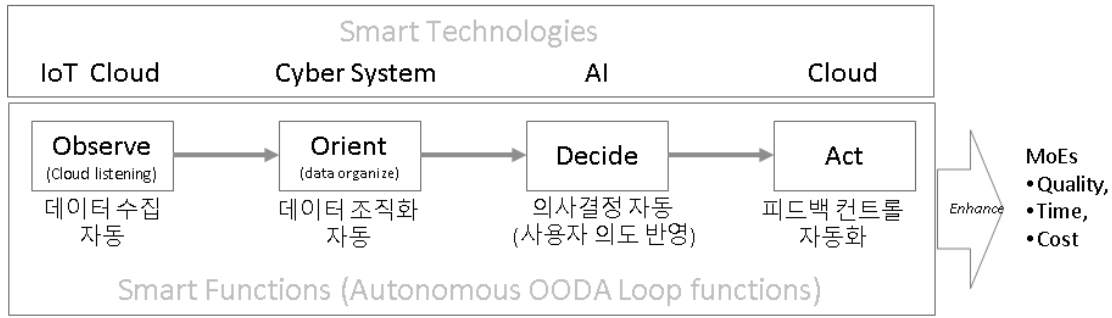
[Figure 2] POSTECH Smart Factory Architecture[2]

존 시스템의 변경을 최소화하고 기존 기능을 스마트 기능으로 바꾸는 방식으로, 기존 공장의 규모와 기술 수준이 다르더라도, 적용 가능성을 폭 넓게 증가시킬 수 있다.

또한 기존 아키텍처가 가지고 있던 구현의 불투명성을 해소하기 위해, 시스템 엔지니어링 프로세스 및 System Modeling Language(SysML)을 활용하여 Operational Activity 수준의 모델을 정의하여, 스마트 팩토리 구현에 직접적으로 활용할 수 있는 형태의 스마트 팩토리 아키텍처를 제안하고자 한다.

2. 연구 동향

스마트 서비스 시스템 개념은 빅데이터 시스템과 연계하여 다양한 산업에 적용하는 추세이다[6]. 그러나 제조 시스템에 대해서는 서비스 시스템을 클라우드 서비스 시스템(as a service)과 동격으로



[Figure 3] Smart Functions and Smart Technologies [11]

판단하여 연구를 진행하는 경우가 대다수이다[7]. 클라우드 시스템의 경우 설비 데이터를 통한 의사 결정을 별개의 시스템이 대신 판단할 수 있다는 점에 있어서는 서비스 시스템의 범주에 속하지만, 기존 데이터를 기반으로 지속적으로 비즈니스 목표를 이루기 위한 학습을 하는 데 용이하지 않다.

비즈니스 목표를 위한 서비스 시스템을 위해서는 데이터 분석이 필수적이다. 그러나 기존 연구는 실제 물리 법칙을 모사하는 Digital Twin을 통한 데이터 분석 기능을 제공하는 범주를 벗어나지 않는다[8]. 이러한 경우 해당 조업의 원리를 모두 파악하고 있는 전문가가 아니라면 서비스 시스템을 통해 비즈니스 목표를 이룰 수 없다. 때문에 비즈니스 목표를 이루기 위해 기존 공장의 데이터를 스스로 파악하여 최적 안을 제시할 수 있는 시스템이 필요한 상황이다. 본 논문에서는 이러한 스마트 서비스 시스템의 정의를 따르는 스마트 팩토리를 설계할 수 있도록 하는 아키텍처를 제시한다.

3. 스마트 서비스 시스템과 스마트 팩토리의 정의

3.1 스마트 서비스 시스템

서비스 시스템은 관련된 모든 사람을 만족시킬 수 있는 지속적인 행동을 수행하기 위해 자체 재구성 또는 최소한 재구성이 용이한 형태가 가능한 비즈니스 목표들 간의 원활한 상호 작용 관리를 위해 고안된 서비스 시스템을 말한다[9]. 특히, 제조업에

서의 비즈니스 목표는 비용, 시간, 품질, 유연성으로 정의될 수 있으며, 스마트 서비스 시스템은 다양한 IT 기술을 활용하여 이와 같은 비즈니스 목표를 향상시킬 수 있어야 한다[10, 11, 12, 13].

3.2 스마트 팩토리

스마트 팩토리는 이러한 스마트 서비스 시스템을 공장 시스템 환경에 적용하는 방법으로 접근할 수 있다. 스마트 팩토리는 제조업의 비즈니스 목표들을 다양한 IT 기술을 활용하여 향상시킬 수 있도록 구상하는 공장 시스템을 말하며, 이는 기존 공장이 가지고 있는 설비 자동화를 넘어 스마트 기술에 기반한 스마트 기능을 추가하여 보다 높은 성과를 달성하는 공장 시스템을 의미한다[14].

3.3 스마트 기술과 스마트 기능

스마트 기능은 기존의 시스템에서 제공하던 기능을 스마트 서비스 시스템을 통해 비즈니스 목표(Cost, Quality, Time)을 이룰 수 있도록 최적화된 기능으로 바꾸어 제공하는 것을 말한다. 이 스마트 기능을 이루기 위한 과정을 Observe, Orient, Decide, Act의 4 단계로 구성할 수 있으며, 각 과정을 위해 요구되는 기술을 스마트 기술이라고 한다(Figure 3). 각 단계에 대한 설명은 아래와 같다[15].

3.3.1 Observe

Observe 단계에서는 사전 정의된 외부 및 내부 시스템의 데이터 및 신호를 일정 주기에 맞추어, 또

<Table 1> Stakeholders Requirements

StR. Code	Stakeholder	Description
StR. 1	조업 관리자	스마트 서비스 시스템은 요청에 따라 각 비즈니스 지표 (Cost, Quality, Time)의 최적화 변수를 찾을 수 있어야 한다(스마트 기능의 활용).
StR. 2	조업 관리자	스마트 서비스 시스템은 기존 공장의 구조를 모사할 수 있는 다이어그램 기능을 제공해야 한다.
StR. 3	조업 관리자	스마트 서비스 시스템은 물리 환경을 반영한 사이버 시스템을 생성할 수 있어야 한다.
StR. 4	조업 관리자	스마트 서비스 시스템은 다양한 설비 데이터베이스와 연결 및 데이터 통합할 수 있어야 한다.
StR. 5	조업 관리자	스마트 서비스 시스템은 데이터 분석을 위해 다양한 분석 엔진을 지원해야 한다.
StR. 6	현장 사용자	스마트 팩토리 시스템은 제조 현장의 실시간 분석 기능을 제공할 수 있어야 한다 .
StR. 7	현장 사용자	스마트 서비스 시스템은 분석 결과를 현장에 표시할 수 있어야 한다.
StR. 8	현장 사용자	스마트 서비스 시스템은 현장 사용자의 설비 최적화 요청을 받아 설비별 Feedback-control을 제공해야 한다.
StR. 9	설비 관리자	스마트 서비스 시스템은 기존 설비로부터 데이터를 받아 사용자에게 가공 및 전달할 수 있어야 한다.
StR. 10	설비 관리자	스마트 서비스 시스템은 기존 설비로부터 데이터를 받아 분석을 위한 형태로 재구성할 수 있어야 한다.

는 실시간으로 자동 수집할 수 있어야 한다. 또한 이렇게 수집된 데이터를 스마트 서비스 시스템 내에 저장할 수 있어야 한다.

3.3.2 Orient

Orient 단계에서는 수집한 데이터를 통해 비즈니스 목표(비용, 시간, 품질)를 위해 분석 가능한 형태로 데이터를 구조화하는 작업을 수행한다. 변경할 데이터 구조는 설정된 분석 엔진에 따라 달라질 수 있어야 한다.

3.3.3 Decide

Decide 단계에서는 사전에 정의된 비즈니스 목표를 반영하기 위한 최적 행동이 결정된다.

3.3.4 Act

Act 단계에서는 앞선 단계에서 결정된 최적 행동을 실제 시스템에 반영한다.

4. 스마트 팩토리 아키텍처 및 기술개요

스마트 팩토리 아키텍처는 아래의 시스템 엔지니어링



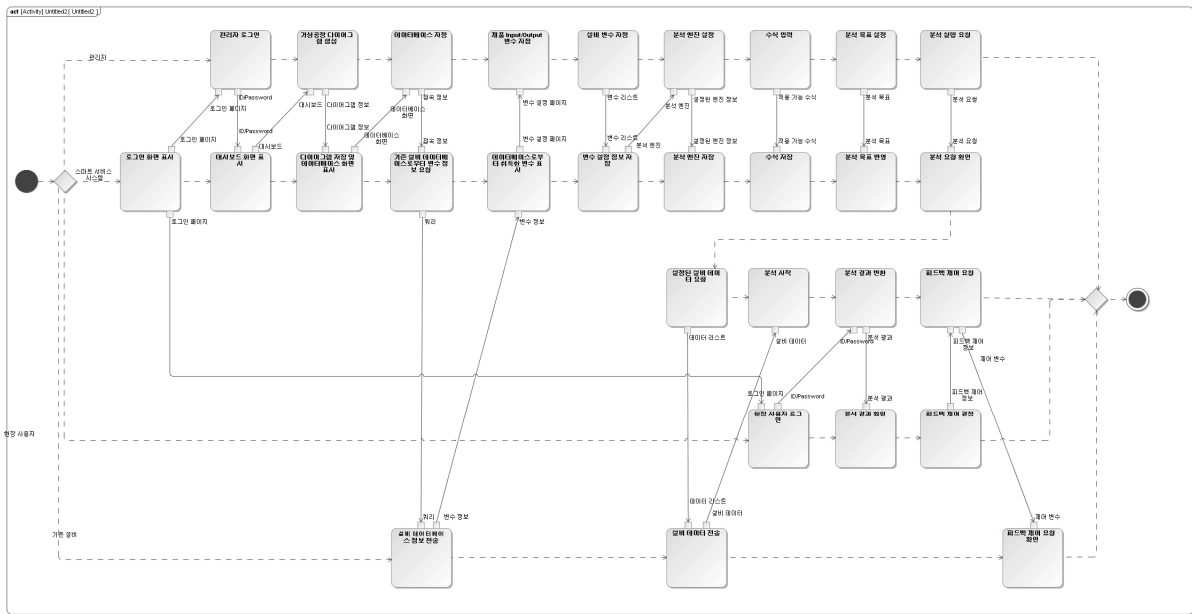
[Figure 4] Systems Engineering Development Process

어링 개발 프로세스에 입각하여 요구사항 정의, 요구사항 분석 및 아키텍처 설계의 범위 하에서 구성된다.

4.1 이해관계자 요구사항

스마트 기능(Observe, Orient, Decide, Act 등)을 실현하고, 스마트 기술(IoT Cloud, Cyber System, AI 등)을 성공적으로 도입하기 위한 목적으로, 스마트 팩토리 아키텍처를 통해 구현되는 시스템이 최소한 만족해야 하는 이해관계자 요구사항을 도출하였다(Figure 5).

아래의 이해관계자 요구사항의 경우, 크고 작은 다양한 시스템 구조와 규모를 가진 산업체에서 스마트 팩토리 아키텍처를 적용할 수 있도록 하는 것



[Figure 5] Operational Concept of Smart Service System-based Smart Factory

이 목적으로, 본 연구에서는 제조 산업군에서 생산 활동을 하는 데 발생할 수 있는 이해관계자들을 대상으로 가정하였다.

4.2 Operational Concept

앞선 이해관계자 요구사항을 기반으로, 구축될 스마트 팩토리 시스템의 단일 사용자 인터페이스로 제공할 수 있는 수준 하에서 Operational Concept (OPSCON)를 Activity Diagram으로 정의하였다 (Figure 5).

각각의 Activity들은 크게 1) 관리자의 Operation을 수행하는 부분, 2) 기존 설비와의 Operation을 수행하는 부분, 3) 사용자와의 Operation을 수행하는 부분의 세 부분으로 나누어진다. 각 Activity에 대한 상세한 설명은 아래와 같다.

4.2.1 관리자의 Operation 수행 부분

생산 관리자 또는 시스템 관리자가 분석을 위한 데이터베이스를 지정하고 분석 모듈에 필요한 데이터를 구분 짓는 모듈이다. 이를 위해 관리자는 1) 분석 목표 (Cost, Time, Quality), 2) 설비 변수, 3) 생산 제품 변수, 4) 분석 엔진을 지정할 수 있어

야 하며, 시스템은 이를 위한 User Interface를 제공해야 한다.

이를 위해서 설비의 데이터가 저장되는 데이터베이스가 요구되고, 필요한 데이터는 해당 데이터베이스에 모두 존재하는 것을 전제로 한다, 모든 필요 정보를 지정할 경우 데이터 정제 및 분석 모듈을 통하여 분석을 실행할 수 있다. 분석 엔진에 따라 필요한 경우 이미 알려져 있는 분석 수식을 입력할 수 있도록 인터페이스를 제공한다. 가상공장 다이어그램 생성 모듈의 경우 OPSCON 상 스마트 서비스 시스템 부분에서 아래의 Activity로 구분된다.

- 1) Op. 1. 로그인 화면 표시
- 2) Op. 2. 대시보드 화면 표시
- 3) Op. 3. 다이어그램 저장 및 데이터베이스 화면 표시
- 4) Op. 5. 데이터베이스로부터 취득한 변수 표시
- 5) Op. 6. 변수 설정 정보 저장
- 6) Op. 7. 분석 엔진 저장
- 7) Op. 8. 수식 저장
- 8) Op. 9. 분석 목표 반영
- 9) Op. 10. 분석 요청 확인

4.2.2 기존 설비와의 Operation 수행 부분

설정한 분석 엔진으로 데이터 분석을 수행할 수 있도록 기존 설비 데이터와 인터페이스하고, 형태를 변화시키는 부분이다. 데이터 분석 엔진은 외부 인터페이스로 간주되어 본 아키텍처에 실제 분석 과정이 수록되어 있지는 않다. 해당 모듈은 데이터 분석 엔진 및 데이터 형태에 대한 요구사항이 지정되어 있다는 가정 하에, 아래의 Activity를 포함한다.

- 1) Op. 4. 기존 설비 데이터베이스로부터 변수 정보 요청
- 2) Op. 11. 설정된 설비 데이터 요청
- 3) Op. 12. 분석 시작
- 4) Op. 14. 피드백 제어 요청

4.2.3 사용자와의 Operation 수행 부분

데이터 분석 활동의 결과를 실제 조업자 또는 생산 관리자가 모니터링 할 수 있는 사용자 인터페이스를 제공한다. 분석 결과는 크게 장기 트렌드 (Time, Cost, Quality)에 대한 분석 결과와 단기 고장 및 이상 징후에 대한 분석 결과를 포함한다. 이를 위해 시스템 개발자는 다양한 차트 라이브러리 등을 사용하여 인터페이스를 구성할 수 있다. 해당 모듈을 통해 분석을 재설정하거나, 분석 결과에 대해 Feedback Control이 요구될 경우 이를 설정할 수 있는 기능을 제공할 수 있어야 한다.

- 1) Op. 13. 분석 결과 반환
- 2) Op. 14. 피드백 제어 요청

<Table 2> Technology Review Contents of Plate Heating Furnace Project

구분	기술명	요약
Front-End	분석 및 추론 결과 표현을 위한 View 기술	HTML5 와 자바스크립트 오픈소스 라이브러리를 통해서 사용자 친화적인 인터페이스로 표시한다.
	가상공장 구축을 위한 다이어그램, 로그인 등 인터페이스 기술	
Back-End	대용량 데이터의 처리와 보관을 위한 데이터베이스 기술	Redis 나 MongoDB 등의 NoSQL 기술을 이용하여 대용량 데이터의 처리와 보관을 용이하도록 구성한다. 중소기업 등 단위가 적은 경우 MariaDB 등의 오픈 소스 RDBMS 를 활용할 수도 있다.
	데이터베이스, 분석 시스템 등과 통신을 위한 웹 서버 플랫폼	프론트와 백엔드를 효과적으로 잇기 위해 기존의 Apache 나 Tomcat 등의 서버 아키텍처는 한계가 있고 개발이 어렵다. 이를 넘어 비동기 및 멀티프로세싱 환경을 제공하는 NodeJS 등의 서버 플랫폼을 사용한다. NodeJS 는 NoSQL 과의 매칭도 우수하다.
통신	제조 데이터의 실시간 네트워크 프로토콜 기술	웹과 통합이 쉽고, 가벼운 형태의 안정적인 연결을 위해 RESTful 아키텍처를 활용한다.
	클라우드 서비스 기술	기본적으로는 on-promise로 돌아가지만 클라우드로도 실행할 수 있도록 구성한다. 실행을 위한 안정성 등의 필요 요소는 클라우드의 전체 사항으로 가정한다.
AI	인공지능 기술	기존의 메타 휴리스틱은 목표 함수와 변수를 정확하게 설정해야 하고, AI 의 경우 대용량 데이터가 요구되지 않을 경우 학습이 힘들었다. 본 연구에서는 이 두 가지 사항을 보완할 수 있는 George Mason 의 MEBN 을 주요 분석모델로 사용하고, 나머지 분석 방법에 대한 인터페이스도 제공한다.
CPS	Cyber 와 Physical 의 매칭 방법 및 목표	1) 기존의 설비 전체를 모사한 Digital Twin 방식과 다르게 데이터베이스 단위로 설비와 input 을 파라미터 형태로 정의할 수 있는 방법을 제시한다. 2) 설비 단위의 최적화는 현재도 이루어지고 있으나 여러 설비를 이어서 최종 최적화하는 방식을 제시한다.

5. 후판 공장 적용 사례 및 기술 개요

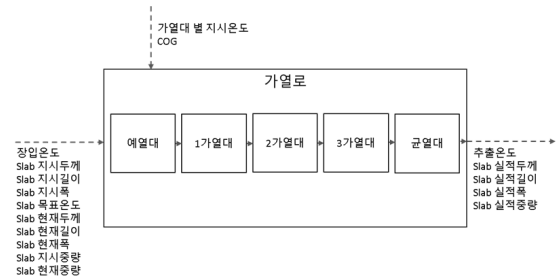
지금까지 제시한 스마트 팩토리 시스템 아키텍처를 철강 후판 생산 공장의 가열로를 대상으로 적용한 사례를 소개한다. 실제 적용 사례에서는 사전에 정해진 목적을 가지고 프로젝트를 수행하였기 때문에, 가상공장 다이어그램 생성 모듈의 개발은 범위에서 제외되었다. 그러나 해당 모듈과 같은 로직으로 아래와 같이 분석 목표와 변수, 엔진을 지정하였다.

- 1) 분석 목표: Cost (상대 원가 모델 구축)
- 2) 설비 변수 및 제품 변수
- 3) 분석 엔진: Multi-Entity Bayesian Network (MEBN)

프로젝트의 실제 구현을 위해서 아키텍처를 기반으로 아래와 같이 기술 검토를 수행하였다(Table 2). 기술 검토의 경우 OPSCON을 기반으로 모든 기능이 원활하게 구현될 수 있도록 최신 기술로 구현하는 것을 목표로 진행하였다.

포항공과대학교 연구팀은 위의 기술 검토를 바탕으로 프로젝트에 적용될 스마트 팩토리 어플리케이션을 개발하였다. 이를 통해서 후판 공장 가열로의 각 설비 변수 및 제품 변수의 변화에 따라서 달라질 수 있는 상대원가 평가 모델을 구축하였다(Figure 6). 또한 Multi Entity Bayesian Network(MEBN)을 분석 엔진으로 하여, 최적 상대원가 도출을 위해 각각의 파라미터에 대한 Feedback Control이 이루어질 수 있는 가능성에 대해 타당성 검토를 수행하였다.

그러나 본 논문에서는 스마트 팩토리 아키텍처에 대해서 특정한 기술을 명시하지 않았다. 실제로 해당 아키텍처를 기반으로 스마트 팩토리 시스템을 구현할 경우, 대상 산업체의 현재 기술 수준이나 목표 시스템, 그리고 이해관계자의 요구사항에 따라서 기술 검토 내용은 위의 내용과 상이할 수 있다.



[Figure 6] Machine and Product Variables in Reheating Furnace

6. 결론

본 논문에서는 공장 시스템이 구축되어 있는 기업을 대상으로, 스마트 서비스 시스템의 관점에서 구현에 직접적으로 활용할 수 있는 형태의 스마트 팩토리 아키텍처를 제안하였다. 이는 포괄적인 계층 및 서비스를 명세하던 기존의 아키텍처보다 한 단계 더 상세화가 이루어진 것으로, 아키텍처를 바탕으로 인터페이스와 기술 검토를 수행한다면, 다양한 분석 모델과 사용자의 요구사항에 특화된 인터페이스를 가진 스마트 팩토리 시스템을 손쉽게 구현할 수 있다.

그러나 현재 해당 아키텍처에 대해서는 부분적인 검증만이 이루어진 상태이다. 사용자 인터페이스 구축 및 서비스의 형태로 제공하는 부분에 대해서는 검증이 이루어지지 않은 상태이다. 논문에 명시되지 않은 다양한 기술을 활용하여 동일한 아키텍처로 개발이 가능한 지에 대한 검증 역시 이루어지지 않았다. 이에 대해서는 추후에 다양한 기술에 대한 프로토타입 및 실제 산업에서의 적용으로 검증이 이루어져야 할 것이다.

References

1. Li Da Xu, Enterprise systems: state-of-the-art and future trends, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 7, No. 4, 630-640, 2011.

2. Dominik Lucke, Carmen Constantinescu, and Engelbert Westkämper, Smart factory—a step towards the Next Generation of Manufacturing, *Manufacturing Systems and Technologies for the new frontier*, 115–118, 2008.
3. Jay Lee, Behrad Bagheri, and Hung-An Kao, A cyber–physical systems architecture for industry 4.0–based manufacturing systems, *Manufacturing letters*, 3, 18–23, 2015.
4. Hankel, Martin, and Bosch Rexroth, The reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0), *ZVEI*, 2015.
5. PRMS 4.0, <http://cpmi.postech.ac.kr/research-paradigm/>
6. Demirkan, Haluk, et al, Innovations with Smart Service Systems: Analytics, Big Data, Cognitive Assistance, and the Internet of Everything, *CAIS*, 37:35, 2015.
7. Tao, F., Zuo, Y., Da Xu, L., Zhang, L., IoT–based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(2), 1547–1557, 2014.
8. Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K. D, About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC–PapersOnLine*, 48(3), 567–572, 2015.
9. Barile, Sergio, and Francesco Polese, Smart service systems and viable service systems: Applying systems theory to service science, *Service Science* 2.1–2, 21–40, 2010.
10. Strategos–International, Toyota Production System and Lean Manufacturing, http://www.strategosinc.com/toyota_production.htm
11. ElMaraghy, Hoda A, Flexible and Reconfigurable Manufacturing Systems Paradigms, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 17.4, 261–276, 2005.
12. Glossary of Sustainable Manufacturing Terms, EPA, <http://archive.epa.gov/sustainablemanufacturing/web/html/glossary.html>
13. DOE–FOA–0001263, Manufacturing Innovation Institute for Smart Manufacturing: Advanced Sensors, Controls, Platforms, and Modeling for Manufacturing.
14. Smart Factory Architecture – Plate Mill Application Concept, Joongyoon Lee, 2017 Spring Conference of The Korean Society of Systems Engineering, 2017.
15. Cheol Young Park, Kathryn B. Laskey, Shelly Salim, and Joong–Yoon Lee, Predictive situation awareness model for smart manufacturing, In *Proceedings of 2017 20th International Conference on Information Fusion (Fusion 2017)*. 1–8, 2017.