

미래 제조시스템 성숙도평가 프레임워크

Framework for Assessing Maturity of Future Manufacturing System

이정철(Jeongcheol Lee)*, 장태우(Tai-Woo Chang)**,
박종경(Jong-Kyung Park)***, 황규선(Gyusun Hwang)****

초 록

스마트공장 등으로 변화하는 경쟁 환경 속에서 제조시스템의 현 수준을 측정하고 개선 목표와 과제를 도출, 추진하여 제조경쟁력의 수준을 높이는 것이 기업의 기본적 활동이 되고 있다. 그러나 기업의 미래 제조경쟁력을 갖추기 위한 구성요소 분석과 성숙도평가에 관한 연구는 부분적으로 진행되고 있고 초기단계에 있다. 본 연구는 제조시스템에 대한 다양한 관점의 모델, 개발프로세스, 프레임워크 등에 대한 기존 연구를 분석하였다. 또한 스마트공장 관련 성숙도평가 연구들을 통해 미래 제조시스템의 구성요소들을 도출하여 구조모델을 설계하였다. 평가모델, 변환모델까지 포함하는 메타모델을 설계하고 프레임워크 개발 프로세스를 도출하여 미래 제조시스템의 성숙도평가를 위한 통합적 프레임워크를 제안하였다. 또한 실제 스마트공장 평가에 적용하여 검증하였다. 제시된 프레임워크는 미래 제조시스템의 성숙도평가를 위한 기반 도구로 활용될 수 있을 것이다.

ABSTRACT

In an environment transformed by smart factories, measuring the current level of the manufacturing system, deriving improvement targets and tasks and increasing the level of manufacturing competitiveness become the basic activities of the company. However, research on the component analysis and maturity assessment to ensure the future competitiveness of the company is in progress and in the early stages. This study analyzed the existing research on various models, development process, and framework for manufacturing system. In addition, we designed a structural model by deriving the components of future manufacturing system through smart factory related maturity assessment studies. We designed a meta-model that includes an assessment model and a transformation model, and derived the framework development process to propose an integrated framework for the maturity assessment of the future manufacturing system. We verified it by applying it into an actual evaluation project of smart factory.

키워드 : 스마트제조, 스마트공장, 성숙도평가, 제조시스템, 메타모델

Smart Manufacturing, Smart Factory, Maturity Assessment, Manufacturing System, Meta-model

This work was supported by the GRRC program of Gyeonggi province. [(GRRC경기2018-B05), Smart Manufacturing Application Technology Research].

* Smart Manufacturing Innovation Team, Korea Productivity Center

** Corresponding author, Department of Industrial & Management Engineering / Intelligence & Manufacturing Research Center, Kyonggi University(keenbee@kgu.ac.kr)

*** Intelligence & Manufacturing Research Center, Kyonggi University

**** Manufacturing Technology Innovation Group, Memory Division, Samsung Electronics

Received: 2019-05-02, Review completed: 2019-05-14, Accepted: 2019-05-20

1. 서 론

독일의 Industry 4.0으로부터 진화해가고 있는 4차 산업혁명에는 제조시스템에 사물인터넷과 같은 새로운 기술을 적용하게 하였고, 제조시스템의 수준을 파악하도록 하여 기업의 경쟁력을 높이는 기반을 다져 주었다. 본 연구는 급변하는 제조현장의 미래를 효율적으로 대응할 수 있도록 제조시스템의 초기 진단을 위한 ‘미래 제조시스템의 성숙도평가를 위한 통합적 프레임워크(Framework for Assessing Maturity Of Future manufacturing system, 이하 FAMOF)’를 제시하고자 한다.

제조시스템 관련 기존 연구들에서는 제조기술과 최신 ICT 등의 융합을 특징으로 하는 미래 제조시스템의 비전을 기반으로 프레임워크, 요구사항, 핵심기술 등에 대한 다양한 사항들이 다뤄진 바 있다[6, 12, 13]. 하지만 스마트공장 등 미래 제조시스템에 대한 표준화된 정의와 모델 등이 확립되어 있지 않았고, 연구들이 주로 기술과 표준 등에 초점이 맞추어져 있어 R&D 및 공급기업 측면에서는 유용하나 제조기업 측면에서는 자사 제조시스템의 구축, 평가, 혁신 등에 활용하는 데에는 활용성이 떨어진다는 한계를 지니고 있다.

성숙도평가모델의 프로세스 개발에 관한 연구는 ‘성숙도평가모델의 품질은 모델 개발 프로세스의 품질에 의해 결정된다’는 가정 아래 많은 연구가 수행되었으며, 주로 정보시스템 분야를 대상으로 추진되어 왔다. 일반적으로 성숙도평가모델 개발 프로세스는 Scope, Design model, Develop instrument, Implement & Exploit의 4단계로 구성된다.

FAMOF 설계를 위한 구체적 요구사항을 도

출하기 위해 본 연구와 직접적으로 관련된 분야에서 프레임워크에 대한 기존 연구들을 찾아보았으나, 적절한 연구를 찾을 수 없어 차선책으로 소프트웨어공학 분야의 프레임워크에 대한 연구들을 살펴보았다. Johnson은 소프트웨어공학 관점에서 프레임워크의 구조를 “추상 클래스 집합과 인스턴스 간 상호작용하는 방식을 디자인하는 것”으로 정의하였다[4]. Chen은 프레임워크란 “일관된 개발 지원 및 경계 설정을 규정하는 것”으로 정의하면서, 모듈성, 재사용성, 확장성, 단순성, 유지관리성 등의 이점을 제공할 수 있다고 소개하였다[1]. 두 가지 프레임워크에 대한 정의로부터 FAMOF의 요구사항을 다음과 같이 도출하였다.

- 미래 제조시스템 성숙도평가모델 개발에 필요한 핵심골격 제공(산업·프로젝트 레벨)
- 미래 제조시스템 성숙도평가에 필요한 세부 기준 제공(기업 레벨)
- 미래 제조시스템 구축, 평가, 변환을 위한 모델들과 모델 간 상호작용 방식 명시
- 미래 제조시스템의 구성요소, 평가영역 등에 대한 명확한 경계 제시
- 각 모델의 속성을 결정하는 개발 프로세스 명시
- 모듈성(Modularity): 구조의 모듈화
- 재사용성(Reusability): 구조와 속성의 분리, 상위구조 추상화
- 확장성(Extensibility): 사용자 정의 가능
- 단순성(Simplicity): 복잡하지 않게 단순화
- 유지보수성(Maintainability): 최초 설계 프로세스와 유지관리 프로세스의 분리

최근 4차 산업혁명 관련 기업 성숙도 평가

연구들은 대부분 ISA-95 모델에서 제시한 제조운영 및 제어(Level 3) 수준보다는 비즈니스 업무(Level 4) 수준에서 평가영역을 선정하고 성숙도 단계를 정의하고 있어 제조시스템의 성숙도를 구체적으로 측정하는데 다음과 같은 한계점을 가지고 있다.

- 제조시스템에 대한 정의 및 구성요소 등을 명확히 제시하지 않고 평가항목 중심으로 소개하고 있음
- 제조운영 부문뿐만 아니라 비즈니스 부문까지 광범위하게 성숙도평가 영역에 포함되어 있음
- 대부분의 연구들이 성숙도평가모델의 개발 프로세스를 명확히 제시하지 않아 모델 개발과정을 구체적으로 파악하기 어려움

그러나 이 모델로는 미래 제조시스템 성숙도평가의 영역이 제한적이어서, 본 연구에서는 종합적이고 균형적인 성숙도평가를 수행할 수 있도록 프레임워크를 제시하고자 한다.

제조시스템의 평가와 관련된 연구에서는 제조 프로세스, 제조 경쟁력, 제조 정보화 등 다양한 관점에서 평가모델과 성숙도모델이 개발되

었다. 그러나 대부분 평가 중심으로만 평가항목이 설계되어 개선활동과 연계가 약하거나 충분한 현장 적용을 거치지 않아 유효성 검증을 확인하는 데에 어려움이 있다.

이러한 한계점을 개선하기 위해 제조시스템 구조, 제조시스템 성숙도평가, 미래 제조시스템 변환 관점에서 <Table 1>과 같이 기존 연구의 개선 방향을 도출하였다. 개선 방향들을 종합해 보면 FAMOF의 개발 방향은 다음과 같이 세 가지로 요약할 수 있다.

- 제조시스템 구축, 평가, 변환을 위한 하위 모델들로 구성된 메타모델 정의
- 다양한 관점을 포괄하는 구조와 구성요소로 표현된 제조시스템의 구조모델 개발
- 메타모델과 연계한 범용적인 개발 프로세스 제시

기존 연구 분석으로 도출된 한계점과 개선방향을 토대로 제2장에서는 FAMOF의 개발 프로세스를, 제3장에서는 구조-평가-변환으로 구성되는 메타모델을 제시한다. 제4장에서 프레임워크 적용 사례를 설명한 후, 제5장에서 결론과 함께 추후 연구과제를 제시한다.

<Table 1> Improvement Directions for Existing Research

	Improvement direction
Structure	• Development of the systematic models represented by components and comprehensive structures that cover various perspectives • Analysis of relationships among the components
Maturity assessment	• Framework development combining innovation and assessment • Applicability verification through field application and selection of weight value presenting manufacturing system characteristics • Development of process model for the assessment criteria and understanding of the future manufacturing system's maturity level
Transformation	• Linking with existing research of manufacturing system transformation such as lean manufacturing and innovation methods • Tools development supporting customized strategies for various industries and its levels

2. FAMOF 개발 프로세스

2.1 FAMOF 개발 프로세스 설계

앞서 살펴본 성숙도평가모델 개발 프로세스 관련 연구들은 개발 프로세스를 구체적으로 기술하고 있으나, 개발의 범위가 평가모델 혹은 성숙도의 단계 모델에 국한되어 있다. 이에 본 연구의 통합적 프레임워크 개발을 위해서는 기존 연구들이 제안한 프로세스에 수정이 필요하다. Pöppelbuß와 Röglinger의 디자인 원칙 및 요구사항[13]을 토대로 FAMOF 개발 프로세스를 위한 요구사항을 다음과 같이 정리하였고, 12개 프레임워크 설계원칙(R1~R12)으로 설정하였다. 다음으로 Maier et al.[7]이 제시한 개발 프로세스를 골격으로 FAMOF 개발 프로세스를 10단계(S1~S10)로 설계하였다. <Table 2>에 설계원칙과의 관련성도 함께 정리하였다.

- R1. 기존 모델과 비교: 평가모델뿐만 아니라 구조모델, 변환모델까지 포함한 메타

모델 관점에서 기존 모델과 비교해야 함

- R2. 반복적인 절차: 평가모델은 반복적이고 단계적으로 개발되어야 함
- R3. 평가: 모델 개발을 위한 모든 원칙과 전제들은 모델의 유용성, 품질 및 효과와 함께 반복적으로 평가되어야 함
- R4. 다중 방법론적 절차: 프레임워크 개발에는 제조시스템 구조, 평가, 변환에 대한 기존 연구 및 소프트웨어공학 등 다양한 방법이 사용되어야 함
- R5. 문제 관련성 확인: 개발된 프레임워크에 의해 제안된 문제해결 솔루션의 관련성을 연구자 및 실무자를 위해 입증해야 함
- R6. 문제 정의: 프레임워크 적용 분야는 적용 조건 및 예상 효과와 함께 설계 전에 결정되어야 함
- R7. 결과물에 대한 목표지향적 표현: 프레임워크의 표현방식은 모델 적용의 조건과 사용자의 요구와 관련하여 목표 대상을 명확히 해야 함
- R8. 과학적 문서화: 프레임워크 개발 프로세스는 각 단계, 관련 당사자, 적용방법

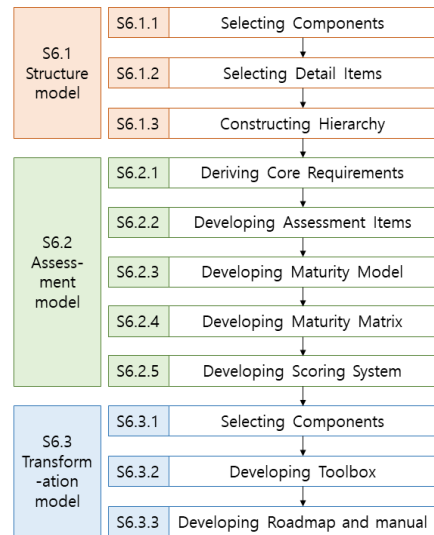
<Table 2> Development Process of FAMOF

Level	Sub-level		Related design principles
Planning (P)	S1	Definition(Scope, Goal)	R5, R6
	S2	Analysis related research	R1
	S3	Establish development direction	R9, R10
Development (D)	S4	FAMOF conceptual design	R1, R9, R10
	S5	FAMOF development process	R10
	S6	FMS meta-model	R2, R4, R11
Evaluation (E)	S7	Test application	R3, R12
	S8	Result analysis	R3, R12
Maintenance (M)	S9	Complement FMS meta model	
	S10	Documentation	R7, R8

- 및 결과를 고려하여 자세히 문서화해야 함
- R9. 메타모델: 보다 실용적인 제조시스템 성숙도 평가를 위해서는 구축, 평가, 변환을 위한 통합형 모델이 제시되어야 함
 - R10. 메타모델 개발 프로세스: 메타모델의 3개 하위 모델 간 연관관계를 고려하여 단계적으로 개발 프로세스가 설계되어야 함
 - R11. 성숙도에 대한 중심개념 정의: 성숙도와 성숙도 차원, 성숙도 수준과 성숙화 경로에 대한 명확한 정의가 있어야 함
 - R12. 대상그룹 지향평가 방법론: 항목별 평가에 대한 가이드라인 및 평가항목 조정 및 구성에 대한 가이드라인을 제공해야 함

2.2 FMS 메타모델 개발 세부 프로세스

FAMOF 개발 프로세스에서 핵심 프로세스는 메타모델 개발 프로세스이다. 이와 관련한 대표적인 연구로는 MESA에서 ISA-95 모델을 기반으로 CMMI(Capability Maturity Model Integration) 모델을 접목하여 새로운 성숙도모델을 개발한 MOM Maturity Model[8], 독일의 VDMA 등의 Industry 4.0 구축을 위한 Reference Model[15], MIT에서 개발한 LEM[9], LESAT[10], TTL[11] 모델 등이 있다. 이러한 연구들을 분석한 결과, 미래제조시스템(Future manufacturing system, 이하 FMS)의 메타모델(S6)은 구조와 작동방식을 나타내는 구조모델(S6.1), 성숙도평가를 위한 평가모델(S6.2), 성숙도향상을 위한 변환모델(S6.3)의 3개 하위 모델로 구성된다. 상기 연구들을 기반으로 FMS 메타모델 개발 세부 프로세스를 도출하였으며, <Figure 1>은 메타모델 개발의 세부 프로세스를 나타낸다.



<Figure 1> Detail Development Procedure of the FMS Meta-Model

3. FMS 메타모델 개발

3.1 구조모델

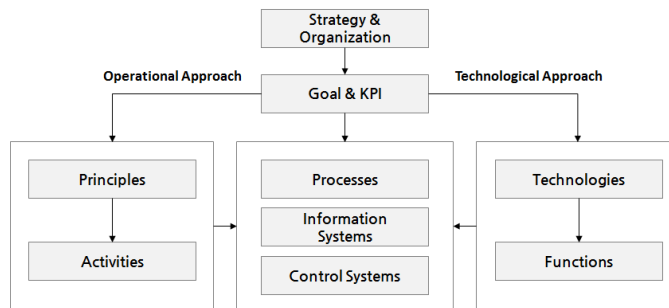
FMS 구조모델은 FMS 메타모델의 핵심이 되는 하위 모델로서 평가모델과 변환모델 개발의 기반이 되는 모델이다. FMS의 구조모델의 구성요소를 도출하기 위해 우선 4차 산업혁명 관련 성숙도평가모델에서 나타난 구성요소들을 정리하였다. 각 연구에서 나타나는 구성요소 및 평가영역들을 의미와 범위의 유사성에 따라 <Table 3>과 같이 7개의 그룹으로 분류하였다.

이러한 항목에 대한 계층적 관계를 검토하여 FMS 구조모델의 계층구조를 <Figure 2>와 같이 설계하였다. 중앙의 Processes, Information Systems, Control Systems는 제조시스템의 골격을 구성하는 구성요소이다. 왼쪽의 Principles,

〈Table 3〉 Components and Assessment Areas of the FMS Structure model

Components	Assessment areas	Referred models
Strategy & Organization	Organizational structure, Culture, Governance, Leadership, People, Customers, Employees, Designated Personnel, Market & Customer Access, Product & Service Portfolio	AI4MI, CEMM, I4MM, PMMI4, SMSRL
Goal & KPI	KPI Relationship, KPI	SMSRL
Processes	Operations, Smart operations, Value Chains & Processes	AI4MI, CEMM, PMMI4, SMSRL
Information System	Information infrastructure, IT Architecture, Data, Output Data Format, Software System	AI4MI, CEMM, PMMI4, SMSRL, RI4
Controls & Security	Controls and devices, Networks, Security policies, Smart Factory	CEMM, II4R
Technology	Technology	I4MM, RI4
etc	Products, Data-driven services, Smart products, Compliance/Legal/Risk/Security & Tax	II4R

- Acatech Industrie 4.0 Maturity Index(AI4MI)
- The Connected Enterprise Maturity Model(CEMM)
- Industry 4.0 Maturity Model (I4MM)
- IMPULS-Industrie 4.0 Readiness(II4R)
- PwC Maturity Model-Industry 4.0 capabilities (PMMI4)
- Reifegradmodell Industrie 4.0(RI4)
- Smart Mfg. System Readiness Level(SMSRL)



〈Figure 2〉 Hierarchy of the FMS Structure Model

Activities는 제조시스템의 주요 원칙과 핵심활동을 나타내는 운영적 측면의 구성요소를 나타낸다. 오른쪽의 Technologies, Functions는 제조시스템의 기술적 방향과 구현되어야 할 기능들을 나타내는 기술적 측면의 구성요소를 나타낸다.

3.2 평가모델

평가모델은 Assessment Item Model, Scoring Model 등으로 구성되며, <Table 4>에 전체 구

성요소를 정리하였다.

평가항목 개발을 위해서는 구조모델의 최종 구성요소에 대해 핵심요구사항 도출이 선행되어야 한다. 핵심요구사항은 제조현장에서 각 영역들(활동, 프로세스, 인프라)이 실현되기 위해 어떠한 요구사항들이 필요한지를 기술하고, 각 영역별 바람직한 모습을 구체화한 것이다. 바람직한 모습을 명확화·계량화하여 평가가 이루어질 수 있도록 평가항목을 정리해야 한다. 또한 바람직한 모습이 실현되고 있는지 평가하기

위한 수행도 기준과 바람직한 모습에 대해 정확히 이해, 전개, 가시화하는지 평가하기 위한 이행도 기준이 필요하다.

<Table 4>에서 제시한 구성요소에 대한 계층관계를 확인하고 FMS 평가모델의 계층구조를 설계하였다. 평가모델의 Dimension, Domain, Item을 도출할 때 구조모델의 구성요소가 기본적으로 활용된다. 평가모델의 개발은 Assessment Item Model, Maturity Model, Maturity Matrix, Scoring System 순의 단계에 따라 진행된다.

3.3 변환모델

변환모델은 제조성숙도의 현 수준과 목표수준의 차이를 줄이기 위한 Toolbox, Roadmap, Manual & Examples 등으로 구성된다. 변환모델은 평가모델의 평가항목에 1:1로 대응하여 Toolbox를 구성할 수 있으며, 전략적 차원에서 통합 Roadmap을 제시하거나 Manual & Examples 형태로 제시할 수 있다[5, 11]. Erol 등과 Ganzarain & Errasti는 Industry 4.0으로의 변환을 위해 envision, enable, enact의 3단계 프로세스 모델

<Table 4> Definition and Characteristics of Components of the Assessment Model

Components	Definition and Characteristics
Assessment Item Model	- Structural assessment model consisting of Dimension, Domain and Item - To present assessment items, deriving core requirement from the components of structural model should be preceded for the items.
Maturity Model	1:1 connection of Dimension as a criterion that defined the maturity level of the assessment item - Fixed numeric level(usually 5-levels) - A short description of each step and a features of each step
Maturity Matrix	- Detail assessment criteria that describe maturity level of all items in the Assessment Item Model $n \times m$ matrix(n: # of Item, m: # of maturity level)
Scoring Model	Maturity scoring model for Item, Domain, Dimension and overall using each item's weight and evaluating score.
Weight type	Method for deriving each item's weight(simple, AHP, ANP)
Item Network Model	Assessment item network model for deriving ANP-type weight

<Table 5> Definition and Characteristics of Components of the Transformation Model

Components	Definition and Characteristics	Existing examples
Toolbox	Consider the level of individual item or multi item presented by $n \times (m-1)$ matrix (n : # of Item, m : # of maturity level)	VDMA Toolbox Industrie 4.0 presents 6×4 matrix dividing two sections: products and production
Roadmap	Provide detailed driving roadmap considering relationships of core activities or level of corporate's key activities based on stages of introduction, development, diffusion and settlement	VDMA presents 5-steps guidelines including Preparation, Analysis, Creativity, Evaluation, and Implementation.
Manual & Examples	Develop execution manual consisting of promotion point, activity summary, promotion step, forms and cases according to activities of structural model	KPS conversion model develops 6 principals and 30 core activities and provides case oriented manual

을 제시하였다[2, 3]. <Table 5>는 FMS 변환모델 구성요소의 특징과 정의를 기술하고 있다.

4. 사례연구

한국 중소제조기업의 스마트공장에 대한 자율적 확산기반 구축을 위해 정부 정책에 의해 추진했던 스마트공장 진단평가모델 개발 프로젝트(Smart Factory Assessment Model, SFAM)에 FAMOF를 적용하였다. 적용 과정에서 한국형 중소기업 제조혁신 방법론(Korean Production System, KPS)의 제조시스템 메타모델의 구조와 개발 프로세스 등을 참조하였다. 산학연 분야별 전문가 20명과 함께 시범적용 개념으로 개발한 구조모델과 평가모델은 20개

기업에 적용해 보았고[6], 본 절에서는 FAMOF 검증 차원에서 개발 과정과 적용 결과에 대해서술한다.

4.1 구조모델 개발

SFAM 구조모델의 구성요소를 선정하기 위해 제3.1절에서 설명한 FAMOF 구조모델의 구성요소를 재검토하였다. 개발 시간과 개발팀 구성 등을 고려하여 운영적 측면의 Principles, Activities 항목은 모델에서 제외하였고, 프로세스, 정보시스템, 설비자동화 영역에 대해서는 분야별 전문가 그룹에서 먼저 세부 구성항목을 도출한 뒤, 전체 검토회의를 통해 최종 선정하였다.

<Table 6>과 같이 8개 구성요소를 선정하였다. SFAM의 세부 항목을 다음과 같이 개발하였고,

<Table 6> SFAM Components and the Comparison with FAMOF

Levels and components		Definition and characteristics	Details
FAMOF	SFAM		
Strategy & Organization	Vision & Strategy	Future goals of the manufacturing sectors to achieve corporate management goals	Each corporate's detailed strategies and visions
Goal & KPI	Goal	Key manufacturing strategic goals to pursue in the long term	5 core features; Connected, Real-Time, Intelligent, Flexible, Sustainable
	KPI	Core performance index for achieving goals	Productivity, Quality, Cost, Delivery, Safety, Environment
Processes	Process	Main processes for manufacturing value chain	Product development, Production planning, Process management, Quality management, Equipment management, Logistics management
Information system	Information system	Management information system for corporation and manufacturing management	MES, PLM, ERP, SCM, FEMS
Controls & Security	Facility automation	Manufacturing operation levels comprising machine and control	Control, Machine, manufacturing technology
Functions	Core functions	Main functions for a Achieving Goal & KPI	14 functions like anomaly response, criteria management, etc
Technology	Base technology	8 smart technologies	Smart sensors, CPS, 3D Printing, Energy saving, IoT, Cloud, Big-data and Hologram

<Table 6>의 오른쪽에 결과를 요약하였다.

‘Goal’은 미래 제조시스템을 통해 기업이 달성하고 싶은 바람직한 모습을 학술연구 분석과 기업 설문문을 통해 5개 키워드로 정리하였고, 이를 토대로 6개의 표준 KPI를 선정하였다. ‘Process’는 6개 메가 프로세스로 구분하였다. ‘Information system’은 스마트공장 추진 과정의 기본적인 요소로서 정책적으로 추진하고 있는 스마트공장 보급·확산사업의 5대 영역 분야를 포함한다. ‘Core functions’는 미래 제조시스템이 갖추어야 할 핵심적인 기능으로, 도출된 5개 Goal과 연계하여 14개의 핵심기능을 도출하였다. 핵심기능의 세부항목은, 정부의 R&D 전략 및 선행연구 등을 토대로 사전에 도출된 5개 Goal과 8대 스마트 제조 기반기술을 활용하여 분야별 전문가 그룹들이 연구조사 및 회의 등을 통해 선정하였으며, 내용은 다음과 같다.

- 통합·연결성: 수평적·수직적, 엔지니어링 통합
- 실시간 분석: 실적, 상태, 진도 정보에 대한 실시간 분석
- 실시간 모니터링: 실적, 상태, 진도 정보에 대한 실시간 가시적인 모니터링 기능
- 유연·신속대응(다품종/설비교체): 다양하고 변화하는 수요에 대한 유연·신속 대응
- 이력추적 관리: 모든 생산품에 대한 생산 데이터 추적 및 이상발생시 데이터 추적
- 이상상태 감지: 품질, 설비 등 관리기준을 벗어난 제조공정의 이상상태 감지
- 생산환경·조건 변화 감지 지능화: 인공 지능 기법 등을 활용한 생산환경·조건 변화에 대한 지능적 감지
- 4M 변화 폭 최소화: Man, Machine, Material,

Method 등 변화폭 관리

- 성능·부하차이 균형: 설비 및 공정별 부하 대비 성능의 밸런싱 유지
- 정보 지적 자산화/자체 복구 기반: 과거 생산 장애 문제해결 정보의 지적 자산화를 통한 자체 복구 기반 구축
- 예측·최적화 시뮬레이션: 공정시뮬레이션으로 사전 부하 예측 및 최적 대안 도출
- 스케줄링 지능화: 자원의 제약, 에너지 단가 등을 고려한 최적 생산 스케줄 생성
- 마스터데이터 기준: 마스터데이터를 활용한 공장 운영표준 관리
- 운영 우선순위규칙: 생산 목표 달성을 위한 우선순위규칙의 전략적 운영

4.2 평가모델 개발

성숙도는 Porter and Heppelmann[14]이 제시한 미래 스마트 제품의 4가지 기능요소를 제조시스템 관점에서 반영하고 ‘checking’의 기본 수준을 추가하여 5단계로 나누었다. 이 성숙도는 프로세스 평가항목 각각의 평정기준에 공통적으로 적용된다. 다음과 같이 스마트공장의 확산도 및 성숙도를 바탕으로 5가지 단계를 정의하였다. 각 수준은 이전 단계의 조건들을 충족시켜야 단계적으로 다음 단계로 올라갈 수 있다.

[1단계] 점검(Checking) 단계

- ICT를 아직 적용하지 않은 단계
- 체크시트, 작업일지 등을 수기로 관리함
- 상태를 단순 감지하며 외부시스템과 연계되지 못함

[2단계] 모니터링(Monitoring) 단계

- ICT를 활용하여 실적 및 상태정보를 수집

- 눈으로 보는 관리가 가능하며 실시간 정보의 추적이 가능
- 감지결과를 외부 모니터링 시스템에 데이터로 결과를 보여줌

[3단계] 제어(Control) 단계

- 수집 정보를 분석하여 이상 발견 및 조치
- 설비 및 기계를 유무선 네트워크를 통해 원격으로 제어 가능

[4단계] 최적화(Optimization) 단계

- 빅데이터 기술, 전문가시스템, 시뮬레이션 기법 등을 활용하여 사전대응시스템 구축
- 최적화기법(선형계획법 등)을 이용하여 도출된 결과를 의사결정에 활용

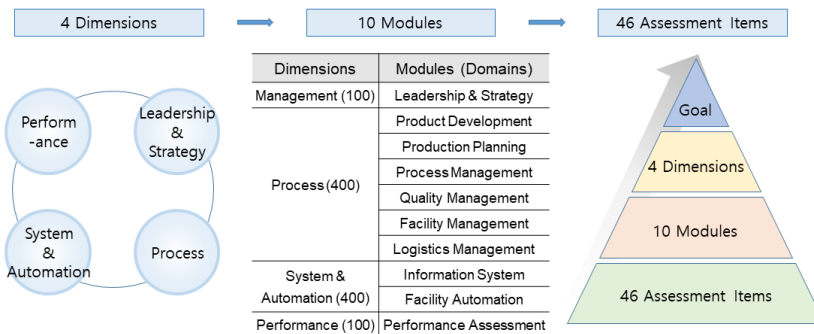
[5단계] 자율운영(Autonomy) 단계

- 모니터링, 제어, 최적화가 사람이 아닌 시스템에 의해 자율 운영이 가능
- 무인화 공정이 확산되어 전체 공장 운영이 자율운영이 가능한 상태
- IoT, CPS 기술 등이 완벽히 통합되어 물리적 공장과 디지털 공장이 같아지는 이상적인 디지털 트윈(Digital Twin)을 구축

이러한 성숙도는 SFAM 평가체계에 적용된

다. SFAM 평가체계는 <Figure 3>에 제시한 바와 같이 프로세스, 시스템&자동화, 리더십&전략(경영), 성과의 4개 부문으로 구성되며, 프로세스와 시스템&자동화 부문에는 직접적으로 적용 가능하며, 리더십&전략 부문과 성과부문은 다른 성숙도모델과 함께 복합적으로 활용하여 적용하였다.

4개 부문은 10개 모듈로 구분하였고, 구조모델의 각 구성요소별 핵심요구사항을 도출하여 46개 평가항목을 개발하였다. 평정기준 개발 시 성숙도를 기초로 수행도와 이해도 관점에서 세부 기준을 개발하였다. 실제 사례연구[6]에 제시한 <Table 7>은 도출된 10개 모듈과 46개 평가항목의 리스트를 나타낸다. 리더십&전략 부문에서는 CEO Leadership을 포함한 4개 항목을 도출하였다. 프로세스 부문에서는 구조모델에서 Process로 구분한 6개 분야에서 26개 항목을 도출하였다. 시스템&자동화 부문의 정보시스템, 설비자동화 모듈은 각각 5개씩 10개의 평가 항목을 도출하였다. 끝으로 성과 부문은 구조모델의 6개 KPI를 기준으로 하였으며, Delivery는 Lead time으로 지정하여 <Table 7>의 성과지표 항목을 도출하였다. 평가항목의 수는 다른 영역과의 균형과 중소기업 적용성 등을 고려하여 선정하였다.



<Figure 3> SFAM Assessment Scheme

〈Table 7〉 List of Assessment Items(6)

Dimensions	Modules (Domains)	Assessment Items
Leadership	Leadership & Strategy	CEO leadership Strategy and plan for implementing smart factory Management of organization and capability of smart factory Management of KPIs(Key Performance Indicators)
Process	Product Development	Procedure of product development Product design and evaluation Process design and evaluation Management of product information Management of technical information
	Production Planning	Management of information for production planning Demand and order planning Sales and operation planning Master production scheduling
	Process Management	Development of the detailed job schedule and order Management of the production progress Management of abnormalities in the manufacturing process
	Quality Management	Management of information for quality control Management of documents of standards for quality control Management of testing data Management of machines and equipment for quality control
	Facility Management	Management of the operation of facilities Maintenance of facilities Management of spare parts Management of molds, jigs, and tools
	Logistics Management	Management of the demand of materials Management of orders and lead times Management of storing and releasing products in a warehouse Management of racking systems Management of picking and delivering products Management of information about delivering and tracking
System & Automation	Information System	Utilization of ERP and SCM Utilization of MES Utilization of PLM Utilization of FEMS Management of information security
	Facility Automation	Automation of manufacturing facilities Automation of logistics facilities Automation of evaluation and testing facilities Automation of information network for facilities Management of energy, safety and environment
Performance	Performance Assessment	Productivity Quality Cost Lead time Safety Environment

5. 결론 및 추후 연구과제

본 연구의 성과로는, 첫째 제조시스템 구조, 성숙도 평가, 미래 방향 등 다양한 분야의 연구에 대한 입체적 분석을 통해 기존의 미래 제조시스템 성숙도평가모델에 대한 연구의 한계와 개선의 방향을 도출하였으며, 이러한 한계를 해결하기 위한 미래 제조시스템 구축, 평가, 변환을 위한 메타모델과 개발 프로세스로 구성된 통합적 프레임워크인 FAMOF를 제시하였다.

둘째, 프레임워크의 실용성 및 재사용성을 높이기 위해 추상화, 모듈화 등의 개념을 적용하였으며, 프레임워크 품질을 높이기 위해 성숙도평가모델 개발 프로세스에 대한 주요 기존 연구들을 확인한 뒤, 개발 프로세스를 설계하고 각 단계별 요구사항 및 설계 원칙을 재구성하거나 새롭게 추가하였다.

셋째, 본 연구에서 제시한 프레임워크가 실제 성숙도평가모델 개발 프로젝트에 어떻게 적용될 수 있는지를 제시하기 위해 실제로 스마트공장 진단평가모델 개발 프로젝트(SFAM)에 적용했던 사례 연구를 통해 연구의 실효성을 검증하였다.

본 연구의 프레임워크와 적용사례는 향후 스마트 제조 시스템의 성숙도평가모델 개발을 추진하는 학계 및 산업계의 연구자들에게 개발전략 수립 및 개발기간 단축 등을 위해 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 제조 분야가 아닌 다양한 분야의 성숙도평가 관련 연구에도 모델에 대한 개념설계와 개발 프로세스에 대한 일반적 가이드라인으로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구는 연구의 범위, 관련 프로젝트의 특수성, 사례적용 기업 수의 한계 등으로 인해 다

음과 같은 추후 연구과제들을 통해 연구의 결과를 개선할 수 있다. 첫째, 기업들의 업종별 특성들을 반영하는데 평가항목의 구체성 등이 미흡한 측면이 있다. 예를 들면 품질관리 프로세스에서 자동차업종에서의 기능안전(Functional Safety), 제약업종의 의약품안전(GMP), 식품업종의 식품안전(HACCP) 등의 평가항목을 직접적으로 다루지는 않고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 본 연구의 프레임워크를 바탕으로 업종별 특성을 반영한 핵심요구사항 도출 및 평가항목 설계 등을 통해 업종별 프레임워크 개발을 진행할 수 있다.

둘째, 프레임워크의 활용도를 높이고, 성숙도 수준 향상의 도구로 더 확산되기 위해서는 구조 모델, 평가모델, 변환모델의 작동원리를 더 구체화시키고, UML(Unified Modelling Language)과 같은 표준화된 모델링 도구를 활용하여 프레임워크를 더 정교하게 표현할 필요가 있다.

References

- [1] Chen, X., "Introduction to application frameworks," in Developing Application Frameworks in NET, Berkeley, CA: Apress, pp. 1-10, 2004.
- [2] Erol, S., Schumacher, A., and Sihn, W., "Strategic guidance towards Industry 4.0 - a three-stage process model," International Conference on Competitive Manufacturing(COMA 2016), 2016.
- [3] Ganzarain, J. and Errasti, N., "Three stage maturity model in SME's towards Industry

- 4.0,” *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, Vol. 9, No. 5, pp. 1119–1128, 2016.
- [4] Johnson, R., “Components, frameworks, patterns,” *ACM SIGSOFT Software Eng. Notes*, Vol. 22, No. 3, pp. 10–17, 1997.
- [5] Lee, J., Jang, D., Yoo, J., and Park, J., “KPC Manufacturing Innovation Program and Case Studies,” *Proceedings on KIIE Fall Conference*, pp. 1541–1554, 2012.
- [6] Lee, J., Jun, S., Chang, T., and Park, J., “A Smartness Assessment Framework for Smart Factories Using Analytic Network Process,” *Sustainability*, Vol. 9, No. 5, 2017.
- [7] Maier, A. M., Moultrie, J., and Clarkson, P. J., “Assessing organizational capabilities,” *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 59, No. 1, pp. 138–159, 2012.
- [8] MESA, “MESA MOM capability maturity model version 1.0,” A MESA International white paper, 4/11/2016.
- [9] MIT, *Lean Enterprise Model*, Cambridge, MA: Lean Aerospace Initiative, 1996.
- [10] MIT, *Lean Enterprise Self-Assessment Tool-Version 1.0*, Cambridge, MA: Lean Aerospace Initiative, 2001.
- [11] MIT, *Transitioning to a Lean Enterprise: A Guide for Leaders-Volume I: Executive Overview*, Cambridge, MA: Lean Aerospace Initiative, 2000.
- [12] Park, J. and Chang, T., “Review of Domestic Research on Smart Manufacturing Technologies,” *The Journal of Society for e-Business Studies* Vol. 23, No. 2, pp. 123–133, 2018.
- [13] Pöppelbuß, J. and Röglinger, M., “What makes a useful maturity model? A framework of general design principles for maturity models and its demonstration in business process management,” *19th European Conference on Information Systems (ECIS)*, 2011.
- [14] Porter, M. and Heppelmann, J., “How smart, connected products are transforming competition,” *Harvard Business Review*, Vol. 92, No. 11, pp. 64–88, 2014.
- [15] VDMA, *Guideline Industrie 4.0-Guiding principles for the implementation of Industrie 4.0 in small and medium sized businesses*, 2016.

저 자 소 개



이정철
1998년
2000년
2018년
2000년~2001년
2002년~현재
2015년~현재
관심분야

(E-mail: jcleee@kpc.or.kr)
서울대학교 산업공학과 (학사)
서울대학교 산업공학과 (석사)
서울대학교 산업공학과 (박사)
동부제강
한국생산성본부
민관합동 스마트공장추진단
스마트공장, 성과평가, 제조혁신



장태우
1995년
1997년
2004년
2002년~2007년
2007년~현재
2017년~현재
관심분야

(E-mail: keenbee@kgu.ac.kr)
서울대학교 산업공학과 (학사)
서울대학교 산업공학과 (석사)
서울대학교 산업공학과 (박사)
한국전자통신연구원 연구원/선임연구원
경기대학교 산업경영공학과 교수
경기대학교 지능정보융합제조연구센터(GRRC) 센터장
스마트공장, 물류/SCM, 시스템분석



박종영
1987년
1989년
2010년
1987년~1996년
1996년~2002년
2012년~2016년
2018년~2019년
관심분야

(E-mail: pjkyoung@naver.com)
전남대학교 화학공학과 (학사)
서울대학교 화학공학과 (석사)
서울대학교 산업공학과 (박사)
아모레퍼시픽
삼성SDS
한양사이버대학교 겸임교수
경기대학교 지능정보융합제조연구센터 책임연구원
스마트공장, PLM, MES, ERP, 제조혁신



황규선
2011년
2013년
2017년
2017년~현재
관심분야

(E-mail: maisnu@snu.ac.kr)
한양대학교 정보기술경영학과 (학사)
서울대학교 산업공학과 (석사)
서울대학교 산업공학과 (박사)
삼성전자 메모리사업부
스마트공장, 사물인터넷, 성과측정