

지속가능생산시스템의 특성 분석 및 V&V 전략

윤수철¹⁾, 서석환²⁾

1) 포항공과대학교 산업경영공학과, 2) 포항공과대학교 엔지니어링대학원

Characteristics Analysis of Sustainable Manufacturing System and V&V Strategy

SooCheol Yoon¹⁾, Suk-Hwan Suh²⁾

1) POSTECH Department of Industrial Engineering and Management

2) POSTECH Graduate School of Engineering Mastership

Abstract : Manufacturing industry is one of the core sectors providing national competitiveness and economical impact. Today's manufacturing industry is required to fulfill so called Sustainable Factory paradigm from the perspectives of environmental and social development. To cope with the requirements, researches for achieving sustainability in manufacturing system are actively carried out in the world from various perspectives. In this paper, we analyzed systemic characteristics of sustainable manufacturing system, and developed verification & validation strategy based on traceability between system requirement and functionality. The developed methods were applied to a European Project called the Foundation for the Sustainable Factory of the Future (FoFdration). Specifically, we analyzed and verified the deliverables of FoFdration by deriving systems architecture in terms of Component, Function, and Items. The results indicated that the FoFdration is pretty much compliant with the concept of Ubiquitous Factory, and can be used as an International Reference Model for the Smart Factory, a world wide hot topic under the paradigm of IOT (Internet-Of-Things), if information processing part is supplemented.

Key Words : System verification and validation, Sustainable Manufacturing, Environment Conscious Manufacturing, Ubiquitous Factory, Smart Factory, UbiDMR (Product/Plant Design, Manufacturing, Recycling via Ubiquitous Technology),

* 발표자: 윤수철, darkhell@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

오늘날 지속가능성 및 환경문제에 대한 국제적 관심이 점점 증가하고 있으며, 탄소배출권, 에너지 사용량 감축, 제품의 전과정 평가, 유해물질 사용 감축 등 다양한 형태로 환경문제에 대한 경각심이 표출되고 있다^{[1][2][3]}. 기업의 제품에 대한 환경책임은 점점 더 늘어나고 있으며, 제품의 사용단계 뿐만이 아니라 원료 수집, 생산, 물류 및 폐기까지 이르는 제품의 전 수명주기에 대한 관리가 요구되고 있다.

한편 환경문제에 대한 경각심은 제품 및 제조 분야 뿐 만이 아니라 플랜트, 철도, 항공, 건축 등 다양한 분야로 확산되고 있다. 철도 산업에서는 건설 및 운영 단계에서 발생하는 환경영향도를 평가하는 등 전반적인 친환경성 개선에 대한 연구가 진행되고 있으며^[4], 항공 산업에서는 환경 부담을 줄이기 위한 항공기 대체 원료 개발 등의 연구가 수행되고 있다^[5]. 이 외에도 다양한 분야에서 지속가능성 확보를 위한 연구가 수행될 것으로 예상되며, 생산시스템의 지속가능성 확보 연구는 향후 수행될 연구의 초석으로 활용될 수 있다. 이는 지속가능생산시스템의 설계 및 구축 연구는 오늘날 제조 산업에 요구되고 있는 친환경 요구사항을 만족시킬 뿐만 아니라, 향후 다양한 산업 분야에서 조명을 받게 될 지속가능 시스템의 기반마련을 위해서라도 수행되어야 함을 의미한다.

본 연구에서는 생산시스템의 지속가능성 확보 연구의 일환으로, 지속가능생산시스템의 특성 분석 및 지속가능생산시스템을 대상으로 한 Verification & Validation 전략 수립 연구를 수행하였다. 본 논문의 내용은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 지속가능생산시스템과 관련된 문헌 연구 및 생산시스템에 시스템 엔지니어링 기술을 적용한 사례를 분석하였다. 3장에서는 지속가능생산시스템의 특성을 분석하였으며, 4장에서는 지속가능생산시스템의 V&V 전략을 구축하였다. 5장에서는 본 연구의 결과를 EU FP7 FoFdration Project의

Sustainable Factory에 적용한 내용을 소개하며, 6장에서는 본 연구의 결론 및 의의를 서술한다.

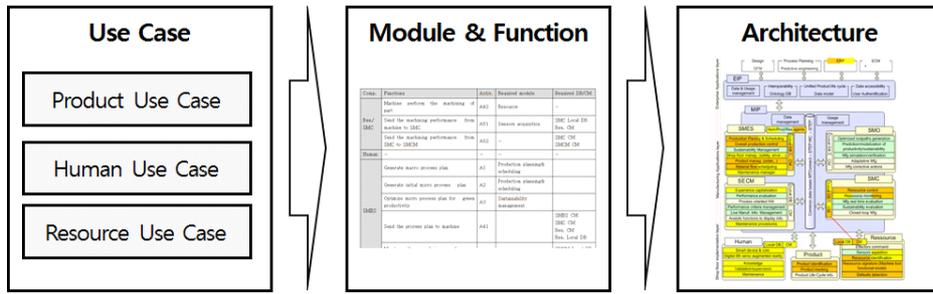
2. State-of-the-Art Research

2.1 Smart Factory

제조산업에서 지속가능성 및 친환경 요구사항은 지속적으로 다루어져 왔으나, 이에 대응하여 시스템적 차원에서 연구한 사례는 찾아보기 힘들다. 반면 지속가능생산시스템과 유사개념인 Smart Factory에 관한 연구는 유럽을 중심으로 많은 연구가 진행되었으며, 생산정보기술 및 생산자율화 기술의 근간을 엿볼 수 있다.

AUTO-ID Center^[6]는 생산 현장에서 제품, 원료 및 작업자를 실시간으로 감지하고 식별하기 위한 기반 기술 연구를 수행하였다. Fraunhofer IPA의 Smart Factory 연구에서는^[7] 정보의 분산을 통한 네트워크망을 구축하였으며, 사용자와 생산설비의 의도를 파악하여 적합한 서비스를 제공하기 위한 기술을 개발하였다. Kaiserslautern DFKI의 Smart Factory 연구에서는 지능형 생산을 위한 4가지 모듈로서 포지셔닝 기술, 모바일 디바이스 적용 기술, 웹 기반 상호작용 시스템, 수평적/수직적 정보 통합 모듈을 개발하였으며^[8], EUREKA Project에서는 유연하고 강건한 생산 시스템 설계를 위한 PRO-FACTORY 연구를 수행하였다^[9].

위 연구에서는 주로 스마트팩토리 구현을 위한 구체적인 기술인 Identification Technology, Sensing Technology, Automation Technology, Information Platform 등에 대해서 연구를 수행하였다. 그러나 해당연구는 생산시스템의 지속가능성을 확보하기 위한 기반기술 연구에 해당하며, 해당 기술의 개발이 곧 지속가능성의 확보로 이어지는 않는다. 또한 구체적인 기술은 개발되었으나, 지속가능생산시스템이 어떠한 기능과 구조를 갖추고 있어야 하는지에 대해서는 명시하고 있지 않다.



[Figure 1] Sustainable Manufacturing System Analysis Procedure

2.2. SE의 생산시스템 적용 연구

System Engineering(SE)은 주로 국방, 항공, 철도 산업과 같은 대형 시스템 위주로 적용되어 왔으며, 생산시스템과 같은 중대형 시스템에 적용된 사례는 찾아보기가 힘들다. 생산시스템에 적용된 연구 또한 생산시스템에 SE의 개념을 적용한 수준으로, 현 시점에서 생산시스템은 SE를 적용해보지 않은 미개척 분야로 해석할 수 있다.

M.Messaadia^[10]는 시스템 엔지니어링 프로세스를 분해하여 생산 시스템에 적용하는 연구를 수행하였다. 또한 시스템 빌딩 블록 개념을 생산시스템에 적용하였으며, 시스템 분해를 통해 PLM 단계까지 분해하고 각 수준별 Supporting System을 분석하였다.

생산시스템에 시스템 엔지니어링을 적용하는 연구 또한 필요하지만, 현 시점에서 제조분야에 주어진 과제는 기존의 생산능력을 유지하면서 지속가능성 및 친환경성을 확보하는 것이다. 이에 따라 시스템이 지속가능성을 확보하기 위해서는 어떠한 시스템 개발 절차 및 전략이 필요하며, 기존의 시스템 엔지니어링 방법론을 어떻게 적용할 것인지에 대한 해답을 강구해야 한다.

본 연구에서는 위와 같은 기존 연구의 한계를 극복하기 위해 지속가능생산시스템이 갖추어야 할 특성을 시스템 관점에서 분석하였다. 또한 기존 시스템 엔지니어링 방법론에서 사용되고 있는 V&V 전략을 수정하여, SE를 적용하지 않은 채 개발 중인 시스템을 위한 V&V 전략을 수립하였으며, 이를 지속가능생산시스템에 적용하였다.

3. 지속가능생산시스템 특성분석

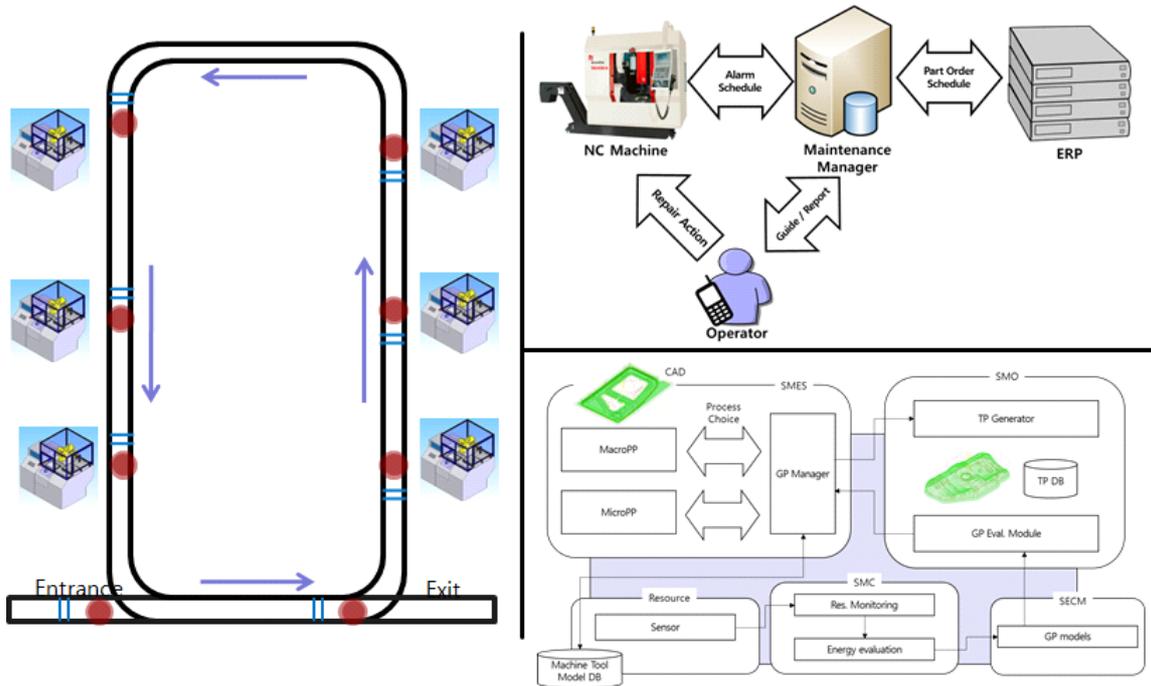
시스템이 요구사항을 제대로 만족시키기 위해서는 어떠한 형태로 운영되고 어떠한 기능을 제공해야 하는지가 명확해야 한다. 본 연구에서는 지속가능생산시스템의 고유한 특성을 파악하기 위해 시스템의 역할 및 기능을 분석하였다. 구체적으로 지속가능생산시스템의 use case 개발, 기능 및 모듈 분석, 아키텍처 개발을 수행하였다.

3.1 Use case 개발

지속가능생산시스템이 어떻게 운영되는지를 파악하기 위해 생산시스템의 주요 구성요소인 Human, Product 및 Resource 를 중심으로 그림 2와 같이 지속가능생산시스템 Use Case를 개발하였다. Product Use Case는 그림 2의 좌측과 같이 자율적인 생산제어를 통한 생산계획 및 물류 관리를 나타내며, 생산프로세스에서 일어나는 다양한 상황을 감지하여 스스로 최적의 생산계획을 수립/수행하는 기능을 표현한다. Human Use Case는 그림 2의 우측 상단과 같이 상황 인식 기술을 통한 작업자의 상황에 맞는 정보를 적절하게 알려주는 맞춤형 서비스를 나타낸다. Resource use case는 그림 2의 우측 하단과 같이생산 프로세스 평가기능을 바탕으로 설비 내에서 최적의 생산 프로세스를 설계, 실행, 예측하는 기능을 나타낸다.

3.2 모듈 & 기능 개발

앞 단락에서 개발한 Human, Product 및



[Figure 2] Sustainable Manufacturing System Use Case

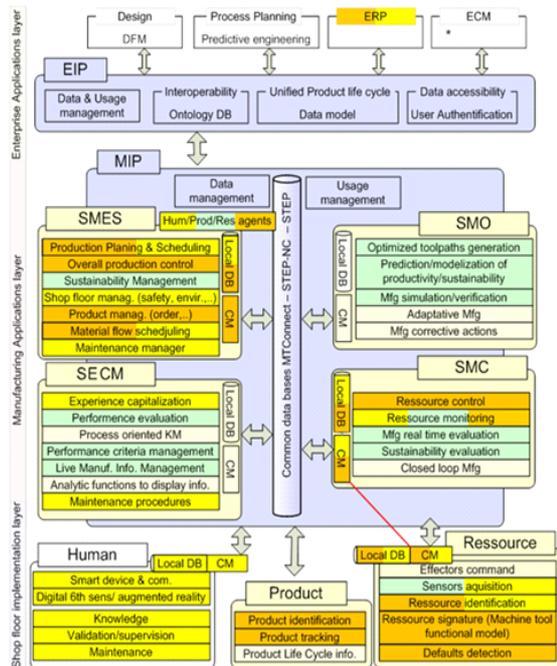
Resource Use Case를 분석하여, 각 Use Case에서 요구되는 능력을 확보하기 위해 필요한 시스템 기능을 도출하였다. 구체적으로 각 기능을 수행하기 위한 시스템, 모듈, 혹은 Sub-system을 도출하였으며, 해당 기능이 수행하는 주체 외에 연관이 있는 다른 시스템을 식별하였다. 표 1은 이 중 Product Use Case를 분석한 결과를 나타내고 있다.

<Table 1> Product Use Case Function and Component

Act.	Function	Comp.	Counter Comp.
A1	Check the entrance of product	SMES	Product agent
A2	Generate process plan		
A21	Receive process and machine information	Product Agent	SMES
A22	Generate process plan	Product Agent	
A23	Send generated process plan	Product Agent	SMES
A24	Notify newly assigned process	SMES	Resource Agent
A25	Generate routine of product and store into RFID tag	Product Agent	D2U
A3	Transport the product	Resource	

3.3 Architecture 개발

위 단락에서 개발한 지속가능생산시스템의 형상, 기능, Module, 등을 분석하여 그림 3과 같이 지속가능생산시스템의 Architecture를 개발하였다.



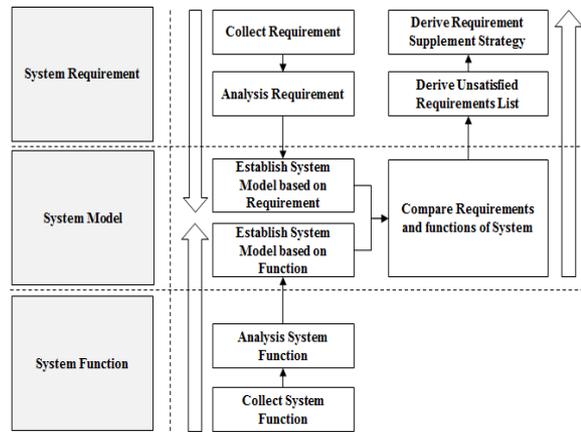
[Figure 3] Sustainable Manufacturing System Architecture

Architecture는 크게 Shop floor implementation layer, Manufacturing Application layer 및 Enterprise Application Layer로 나뉜다. Shop floor implementation layer는 실제 생산현장에서 작업자, 제품 및 생산설비에게 서비스를 제공하는 계층으로, Human Agent, Product Agent 및 Resource Agent로 구성되어 있다. Manufacturing Application Layer는 생산현장을 지원하기 위한 계층으로, 생산현장에서 발생하는 정보 및 필요한 정보를 바탕으로 상위 서비스를 제공한다. Manufacturing Application Layer는 생산 설비의 자율적 제어를 위한 Smart Machine Controller, 생산 프로세스 최적화를 위한 Smart Manufacturing Optimizer, 생산 프로세스의 지속 가능성 평가를 위한 Smart Manufacturing Execution System, 생산 시스템의 전사적 정보 관리를 위한 Smart Enterprise Content Management, 생산정보통합, 교환 및 관리를 위한 Manufacturing Information Pipeline으로 구성되어 있다. Enterprise Application Layer는 외부 시스템과 연동하기 위한 계층으로 ERP, ECM 등의 전통적인 시스템으로 구성되어 있다.

4. 지속가능생산시스템 V&V 전략 수립

지속가능생산시스템은 다양한 분야를 폭넓게 다루고 있으며, 지속가능성과 관련된 모든 특성을 생산시스템에 한 번에 적용하는 것은 어려운 일이다. 이와 같은 문제 때문에, 현재 운용중이거나 개발 중인 생산시스템 중에는 지속가능생산시스템의 유사개념인 Smart Manufacturing System, Eco-Friendly Manufacturing System 등이 부분적으로 적용된 사례가 많다.

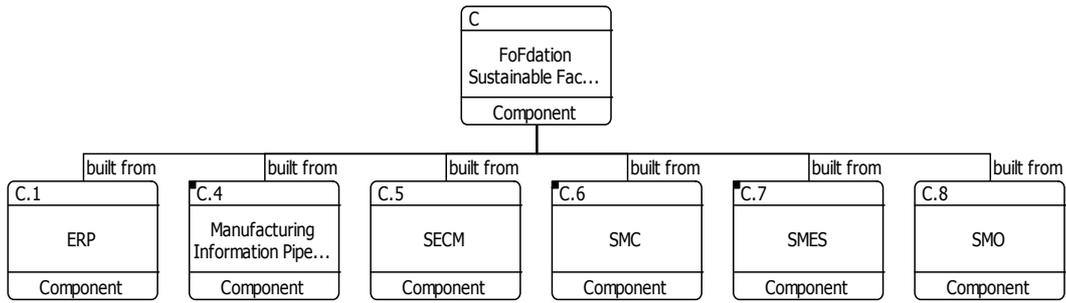
때문에 지속가능생산시스템의 V&V 프로세스에 기존의 시스템 엔지니어링 방법을 적용하기는 어려우며, 본 연구에서는 SE를 도입하지 않고 개발이 시작된 시스템의 V&V 프로세스를 수행할 수 있는 전략, 즉 Non-SE 시스템을 위한 V&V 전략



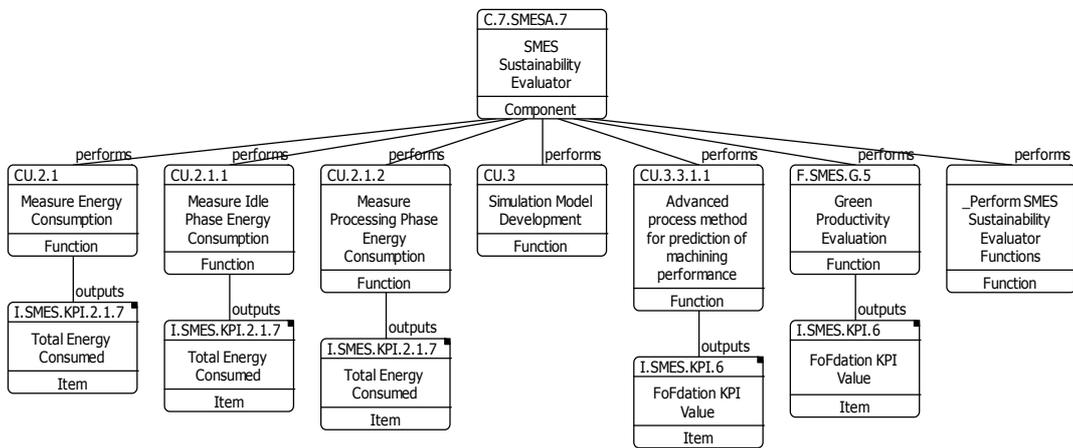
[Figure 4] V&V Strategy for Non-SE System

을 그림 4와 같이 개발하였다. 지속가능생산시스템은, SE를 도입하지 않고 개발이 시작된 시스템의 대표적인 사례로서, 본 V&V 전략이 효과적으로 적용될 수 있다.

V&V 전략은 크게 4단계로 나뉜다. 첫 번째 단계는 시스템 요구사항 분석을 통한 시스템 요구사항 모델 수립단계로, 시스템 개발 문건, 이해관계자 요구사항 자료 등을 수집 및 분석하고, 지속가능생산시스템에게 기대되는 요구사항을 정리하여 시스템 요구사항 모델을 개발한다. 두 번째 단계는 시스템 기능 분석을 통한 시스템 기능 모델 수립단계로, 시스템 개발 결과 문건, 개발된 시스템 등을 분석하여 시스템이 제공하는 서비스 혹은 수행하는 기능을 정리하여 시스템 기능 모델을 개발한다. 세 번째 단계는 요구사항 및 기능 상호 비교 단계로, 시스템 요구사항 모델 및 시스템 기능 모델을 비교하여 각 요구사항이 어느 기능을 통해 만족될 수 있으며, 각 기능은 어느 요구사항을 만족시킬 수 있는지 분석하여 상호추적성을 확보한다. 네 번째 단계는 요구사항 보완전략 도출 단계로, 어떠한 기능으로도 만족되지 못한 요구사항의 목록을 도출하고 해당 요구사항의 유형을 분석한다. 요구사항 유형별로 시스템이 대응해야 할 보완전략을 도출한다.



[Figure 5] FoFdration Sustainable Factory Component Top-Most Model



[Figure 6] FoFdration Sustainable Factory SMES Sustainability Evaluator Component Model

5. 적용: EU FP7 FoFdration Project

위 4절에서 개발한 지속가능생산시스템 특성 및 V&V 전략을 EU FP7 The Foundation of the Sustainable Factory of the Future (FoFdration) Project에 적용하였다. FoFdration Project에서는 스위스, 독일, 영국, 프랑스 등 유럽국가 및 한국의 대학연구기관, 산업체연구기관 및 국가연구기관이 모여 지속가능한 생산을 위한 기반기술 개발을 수행하였다. 본 연구에서는 FoFdration Project에서 개발하고자 하는 Sustainable Factory를 지속가능생산시스템의 특성을 반영하여 시스템 모델을 설계하였다. 또한 FoFdration Sustainable Factory의 요구사항 및 시스템 기능을 기반으로 한 V&V 연구를 수행하였다.

지속가능생산시스템의 특성인 SMC, SMO, SMES, MIP등을 고려하여 FoFdration Sustainable Factory의 Model을 Component, Function, Item 관점에서 구축하였다. Component는 FoFdration Sustainable Factory를 구성하고 있는 시스템, 서브시스템 및 구성요소를 나타내고 있으며, 총 84개의 Component가 정의되었다. Function은 FoFdration Sustainable Factory가 제공하는 기능 및 서비스를 나타내고 있으며, 총 259개의 Function이 정의되었다. Item은 FoFdration Sustainable Factory 내에서 생성, 사용, 교환 및 전달되는 정보 및 데이터를 나타내고 있으며, 총 311개의 Item이 정의되었다. 그림 5는 Component 모델 중, 최상위 Component 모델을 표현하고 있다.

<Table 2> FoFdration Sustainable Factory System Requirements

Number	Description	Source	Covered By
R1.1.1	provide feedback to Machine DB in real timein real time	D1.2	F1.1.3 F1.2 F1.4
R1.1.2	provide feedback to Product DB in real timein real time	D1.2	F1.1.1
R1.2.1	Trace the final destination of every finished product	D1.2	F2.3
R1.2.2	Store the final destination of every finished product	D1.2	F2.3
F1.1.1	Extract measured value from Product	D5.1	R1.1.2 R3
F1.1.2	Extract measured value from Process	D5.1	R3
F1.1.3	Extract measured value from Resource	D5.1	R1.1.1 R3

또한 FoFdration Sustainable Factory Model에 서는 Component, Function 및 Item 들 간의 관계 를 표현하고 있다. 각 Function은 해당 Function 을 수행하는 주체가 어느 Component인지를 Perform/Allocated 관계를 통해 표현한다. 또한 각 Function을 통해 어떠한 Item이 생성되는지를 output 관계를 통해 표현하고 있다. 그림 6은 FoFdration Sustainable Factory Model 중, SMES Sustainability Evaluation Component와 연관있는 Function 및 Item 간의 관계를 나타내고 있다.

FoFdration Sustainable Factory의 V&V를 수 행하기 위해 유럽 산업체 파트너인 AIRBUS 및 FIAT의 Sustainable Factory Use Case를 수집 하였다. 또한 FoFdration 프로젝트를 통해 개발된 시스템의 개발 문건 분석을 통해 시스템의 기능을 수집하였다. 수집된 요구사항 및 기능은 다음의 시 스템 엔지니어링의 요구사항 방법론에 따라 정리 되었다.

1. 시스템을 주어로 하는 완성된 문장으로 요구 사항 및 기능 표기.

2. 한 문장은 하나의 요구사항 및 기능만을 표기
3. 대/중/소분류 요구사항 및 기능 구조화
4. 각 요구사항 및 기능별로 고유 의 식별 번호 부여
5. 요구사항 및 기능 출처 표기.

시스템 요구사항은 총 108건이 도출되었으며, 시스템 기능은 총 176건이 도출되었다. 각 요구사 항은 어떠한 기능에 의해 만족되는지, 또한 각 기 능은 어떠한 요구사항을 만족시키는지 표기함으로 써 상호추적성을 확보하였다. 표 5는 요구사항 및 기능 목록 중 일부를 나타내고 있다.

위 과정을 수행한 후, 요구사항 보완사항을 도출 하기 위해 어떠한 기능으로도 만족되지 않는 요구 사항을 추출하여 유형별로 정리하였다.

- Hazardous Material: 유해물질의 관리
- Reuse/Recycle: 자원의 재사용 및 활용 관리
- New system: 새로운 시설 지원
- Saved Energy: 절약된 Energy의 측정 및 활 용 관리

FoFdration Model 개발 및 V&V 수행결과는 u-Factory 개념과 상응하는 모습을 나타내고 있 다. 또한 FoFdration Smart Factory Model은 향 후 Smart Factory에 관한 국제적인 참조 모델로 활용될 것으로 예상되며, 생산시스템의 이상적인 정보 프로세싱 개념이 정착됨에 따라 실현화 단계 에 접근할 수 있을 것이라 예상된다.

6. 결론

지속가능한 시스템은 제조산업을 비롯하여 플랜 트, 철도, 항공분야까지 확대되고 있는 범 산업적 이슈이며, 지속가능성을 위한 다양한 연구가 진행 되고 있다. 본 연구에서는 생산시스템에서 지속가 능성을 확보하기 위한 연구의 일환으로, 지속가능 생산시스템의 시스템적 특성을 분석하였으며, 시스 템 요구사항과 시스템 기능간의 추적성 확보를 통 한 Verification & Validation 전략을 수립하였다. 지속가능생산시스템의 특성 분석 결과는 EU FP7

FoFdration Project의 Sustainable Factory Model을 수립하는 데에 적용되었으며, V&V 전략은 동 프로젝트의 V&V 프로세스 수행 및 요구사항 보완사항을 도출하는 데에 적용되었다.

본 연구는 오늘날 다양한 기업이 당면한 과제인 지속가능성 이슈를 생산시스템에 적용하여 기초연구를 수행한데서 의의를 찾을 수 있다. 또한 특정 산업에 국지적으로 수행되어오던 시스템 엔지니어링 기술을 생산시스템 분야에 적용함으로써, 시스템 엔지니어링 적용 분야의 확산에 이바지하였다.

지속가능성 및 친환경 관련 이슈는 국내외적으로 다양한 분야에서 주목을 받을 것으로 예상된다. 각 분야의 지속가능시스템은 종류 및 규모에 따라 다양한 특성을 지니게 될 것이며, 기존의 시스템 엔지니어링 기술을 그대로 적용하기 보다는 능동적이고 유연하게 적용할 수 있는 전략이 필요할 것으로 예상된다.

Acknowledgement (감사의글, 사사)

본 연구는 산업통상자원부 엔지니어링 전문대학원 지원사업(No.H2001-13-1001)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Stavins, Robert N. (November 2001). "Experience with Market-Based Environmental Policy Instruments". Discussion Paper 01-58 (Washington, D.C.: Resources for the Future). "Market-based instruments are regulations that encourage behavior through market signals rather than through explicit directives regarding pollution control levels or methods"
2. ISO, ISO 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, Geneva: International Organisation for Standardisation (ISO), 2006.
3. European Union, Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment, Strasbourg: Official Journal of the European Union, 2011
4. Lee, C., et al; A Study on the Characteristics of Environmental Impact in Construction Sector of High-Speed Railway using LCA, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 17, No.3, 2014
5. Hwang, H., Nam, T., R&D Trend and Prospect of Environment Friendly Alternative Energy Propulsion Aircraft, Aerospace Industry Research, Vol. 76, 109-120, 2012
6. McFarlanea, D. et al.: 'Auto ID systems and intelligent manufacturing control', Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 16, pp. 365-376, 2003.
7. Westkamper, E.: 'The Proactive Initiative ManuFuture Roadmap'. The ManuFuture Road, Jovane F., Westkamper E., Williams D. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
8. Zuehlke, D.: 'SmartFactory - A Vision becomes Reality', The 13th IFAC Symposium on Information Control Problems, pp. 3-5, 2009.
9. EUREKA, <http://www.eurekanetwork.org>, (October, 2010).
10. Messadia, M., M. Djeghaba, and A. E. K. Sahraoui. "System engineering framework for manufacturing systems." ,ICCMD'06, Annaba (Algerie). 2006.