

스마트 제조와 글로벌 SCM의 미래

김준석†
세종대학교 경영학과

The Future of Smart Manufacturing and Global SCM

Joon-Seok Kim†
Department of Business Administration, Sejong University

Abstract

The fourth industrial revolution, characterized by artificial intelligence, big data and internet of things, has emerged as a hot issue in the global industrial environment. In the manufacturing environment, attention has focused on the smart manufacturing. In this study, we review the trends of global smart manufacturing research and practice as well as implementing strategies for smart manufacturing environment of a few advanced countries including Germany, USA, Japan, and Korea. We review the study related to future research issues concerned with supply chain based on smart manufacturing. Finally, we propose the important new issue regarding risk management in the supply chain combined with smart manufacturing.

Keywords: Smart manufacturing, Smart factory, Internet of things, Cyber-Physical System, Global Supply Chain

1. 서론

최근 4차 산업혁명이 학계와 산업계를 포함하는 글로벌 산업환경에서 뜨거운 이슈로 등장하였다. 4차 산업혁명은 인공지능(Artificial Intelligence; AI), 빅데이터(Big Data), 사물인터넷(Internet of Things; IoT)와 같은 도구를 통하여 인간의 개입없이 기계가 실시간으로 최적의 의사결정을 내리며 업무를 수행할 수 있는 환경이 도래했음을 예고하고 있다. 인공지능인 알파고는 세계 최고의 바둑기사와의 대결을 통하여 기계가 인간보다 더 빠르고 우월한 의사결정을 내릴 수 있음을 입증하였다. 이 세기의 대결을 시작으로 인간의 일을 기계가 대신하는 시대는 더 빠르게 현실화되고 있다.

제조 분야에서의 4차 산업혁명의 영향은 스마트 제조(Smart Manufacturing) 또는 스마트 공장(Smart Factory)이라

는 명칭으로 수년전부터 활발하게 학문적인 연구와 실제 환경에서의 적용이 이루어져 왔다. 본 연구에서는 스마트 제조에 대하여 독일, 미국, 일본, 한국 등 기술적으로 앞선 4개의 국가에서 어떠한 대응을 해왔고, 국가별로 어떤 특징이 있는지를 먼저 제시한다. 위의 4개 국가는 민간 부문의 연구, 개발, 도입과 더불어 정부의 강력한 지원 또는 정부 주도의 정책을 통하여 스마트 제조환경의 도입과 글로벌 경쟁우위를 확보하기 위한 노력을 하고 있다.

다음으로는 스마트 제조에서의 주요 연구 또는 기술 분야에 대한 현황을 소개한다. 본 연구에서 선정한 주요 분야는 스마트 제조 개념 및 방향성, 클라우드 제조, 사물인터넷(Internet of Things), 사이버 물리 시스템(Cyber-Physical System; CPS), 친환경 스마트 제조(Sustainable Smart Manufacturing)

분야이다. 각 분야에 대한 소개와 주요 연구 현황을 제시한다.

마지막으로, 본 연구에서는 Lin et al. (2016)이 제시한 일반 제조회사에서 스마트 제조회사로 전환될 때 고려해야 할 3가지 주요 요건과 이를 고려하여 스마트 제조회사에 기반한 SCM에서의 주요 연구 이슈들을 정리하고, 본 연구에서 발굴한 독자적인 추가 이슈를 제안한다.

2. 스마트 제조

스마트 제조의 도입은 인터넷과 통신 기술의 고도화에 따른 ICT(Information and Communication Technology)의 발전과 궤를 같이한다. 본 절에서는 글로벌 4개 국가의 스마트 제조 도입 현황과 ICT와 관련된 기술 분야를 위주로 스마트 제조 연구의 추세에 대해서 살펴보기로 한다.

2.1 스마트 제조의 글로벌 현황

스마트 제조 분야에서 가장 앞서 있는 국가는 독일로 알려져 있다. 독일 정부는 2012년부터 제조 환경 변화에 대응하고 자국 제조업의 차세대 경쟁력을 확보하기 위하여 Industry 4.0 프로젝트를 민간기업, 정부, 학계를 총망라한 형태로 진행하고 있다. Industry 4.0의 특징은 제조 현장과 ICT를 통합하여 최적의 제조회사를 만들어 가는 데 있다. 네트워크에 연결된 기기들은 사물인터넷(IoT)을 통하여 상품 제조 시에 취득한 정보들을 상호 공유하며 최적의 제조플랫폼을 구축해 나간다. 또한, 서비스인터넷(Internet of Service; IoS)은 판매, 영업, 유통, 제조, 구매, 제3자 물류, 협력사들의 정보 및 운영 시스템을 초연결(hyper-connected)시키는 것이 궁극적인 목표이다. 독일은 Industry 4.0에 대한 1차 wave를 마치고, 그 결과를 바탕으로 2015년에 Platform Industry 4.0으로 확대 개편하여 진행하고 있다. 2차 wave에서는 독일 정부의 개입을

확대하고 관련 인력 양성에 보다 초점을 맞추고 있다.

미국에서의 스마트 제조 분야에 대한 대응은 SMLC(Smart Manufacturing Leadership Coalition)로 축약된다. SMLC는 미국정부 주도의 범국가적 연구컨소시엄으로 스마트 제조에 있어서의 국제적 경쟁력 확보에 목적이 있다. SMLC에는 제조업체, 부품공급업체, 기술개발 회사, 대학, 정부기관 등이 총망라되어 참여한다. SMLC에서는 다양한 정성적, 정량적 평가 항목 및 관련된 달성 목표를 선정하여 가까운 미래에 미국의 스마트 제조 분야에서의 경쟁력 우위를 확보하려는 노력을 하고 있다. 이 과정을 통한 궁극적 목표는 스마트 제조 관련 기술, 표준, 플랫폼, 인프라스트럭처를 빠른 시간내에 확보하여 전 산업계로 확산시키는 데 있다.

일본에서도 스마트 제조와 관련된 조용하지만 확실한 움직임이 있다. 일본은 “일본재흥전략” 및 “과학기술혁신종합전략”등 종합 경제 전략을 통하여 스마트 제조 대응을 현실화하여 추진 중이다. “일본재흥전략”은 과학기술혁신, 산업입지 경쟁력 강화 등 제조업 강화정책을 중심으로 하며, “과학기술혁신종합전략”은 전략적혁신창조프로그램(Strategic Innovation Program; SIP)과 혁신적연구개발지원프로그램(Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies Program; ImPACT)을 포함한다. 전략적혁신창조프로그램(SIP)은 핵심기술 선정 후 기초연구, 실용화, 사업화까지의 로드맵을 제시하는 것을 주축으로 한다. 혁신적연구개발지원프로그램(ImPACT)은 장기적 관점에서 미래 일본 사회에 경제, 사회적 측면에서 영향력이 클 것으로 예상되는 연구주제를 선정하여 지원하는 프로그램이다. 이런 측면에서 봤을 때 일본은 제조업체 자체의 경쟁력 강화보다는 제조 기반과 관련된 방향으로 접근하고 있음을 알 수 있다.

마지막으로, 한국의 경우를 살펴보면 “제조혁신 3.0전략”과 연계하여 IT 기반의 생산관리가 가능한 중소/중견 기업을 대량으로 육성하는 방향으로 전개하고 있다. 제조업혁신 3.0 전략의 내용을 살펴보면 2020년까지 1만개 스마트 공장육성, 고속 수직이착륙무인기 등의 신산업 창출, 지역산단의 스마트화, 융합신제품 등 기존사업재편에 대한 지원 등을 포함하고 있다. 한국 스마트 제조 대응 전략의 특징은 중소/중견기업의 스마트화를 지향하고 있다는 것이다. 따라서, 현장의 요구사항을 최대한 반영하는 1단계 현장 밀착형 기술개발을 시작으로, 2단계 업계 확산을 위한 모델공장의 구축, 마지막으로 3단계인 중장기 고도화 기술개발 단계에서는 독일의 Industry 4.0과 유사한 형태로 상품기획-설계-제조-물류/유통의 전 과정에서 IoT, big data, 시뮬레이션 등을 활용하여 각 참여업체가 긴밀하게 연결 및 통합되는 것을 목표로 한다.

2.2 스마트 제조 주요 분야

본 절에서는 스마트 제조와 관련되어 진행되어 온 주요 주제를 분류하고 주요 연구를 소개하고자 한다. 본 연구에서 분류한 연구 주제는 스마트 제조 개념 및 방향성, 클라우드 제조, 사물인터넷(IoT), 사이버 물리 시스템(Cyber-Physical System; CPS), 친환경 스마트 제조(Sustainable Smart Manufacturing) 등이다.

먼저, 스마트 제조의 개념 및 방향성 주제의 연구에서는 스마트 제조 또는 스마트 공장의 정의와 한계점 및 기술 및 정책적인 요구사항 그리고 미래에 대한 대응 전략 등이 소개되었다. 대표적으로 Wang et al (2015)은 4차 산업혁명의 도래에 맞춰 제조 기업 내부에서의 수평적 통합과 수직적 통합이 필수적 요소이며, 이는 사물인터넷 등 새로운 기술적 혁신에 의하여 무장된 스마트 공장에 의하여 달성이 가능하다고

주장했다. 특히, 그들은 기업 내부에서의 수직적 통합을 이루어 내기 위하여 필요한 기술적 요소와 극복해야 될 한계점에 대하여 논하고 있다. Choi et al. (2015)은 가상환경을 기반으로 하는 디지털 제조(Digital Manufacturing)의 개념을 소개하고 디지털제조시스템이 스마트 제조에서의 공정설계와 성과 최적화에 도움이 될 것을 주장하였다. 또한 스마트 공장에 있어서 디지털제조의 기여점과 제한점을 논의하였으며, 미래 방향을 제시하였다. Brettel et al.(2014)은 문헌 연구를 통하여 4차 산업혁명 관련 주요 연구주제를 제시하였다. 그들이 제시한 연구주제는 3가지 분야로 개인화 제조(Individualized Production), 협력적 네트워크에서의 수평적 통합(Horizontal Integration in Collaborative Networks), End-to-end 디지털 통합(End-to-End Digital Integration) 등이다. 그들은 또한 산업체 관계자 및 컨설턴트 대상의 대면조사를 통하여 관리자 관점에서 본 4차 산업혁명 관련 기술 도입에 대한 찬반 의견과 그 이유를 설명하였다. 그 밖에도 유사한 연구로 Anderl(2014), Lucke et al.(2008) 등이 있다.

스마트 제조와 관련된 두 번째 연구 주제는 클라우드 제조(Cloud Manufacturing)이다. 클라우드 제조는 고객 및 서비스 중심의 제조 프레임워크로 다양하고 분산된 제조 공정을 필요에 맞게 구성하여 제조한다. 수요자 요구에 따라 최적의 제조자원으로 생산라인을 단 시간에 구성하여 제품을 생산하게 된다. Wu et al.(2013)은 클라우드 제조를 통하여 스마트 제조를 구현하기 위한 요구사항, 핵심 기술 환경, 전략 등을 소개하였으며, 클라우드 제조를 위한 현재의 기술 수준과 향후 연구 방향 등을 제시하였다. 이들이 제시한 연구 분야는 원거리 고속 산업통제시스템, 유연성 실행 비즈니스 모델, 클라우드컴퓨팅 등이다. He and Xu(2015)는 클라우드 제조

분야에서 요구되는 첨단 기술의 종류와 현재 수준을 제시하고 관련된 연구에 대한 리뷰와 향후 연구 방향을 제시하였다. 그들이 제시한 연구 주제는 기존의 제조 기술과 시스템, 클라우드 컴퓨팅, 사물인터넷, 가상환경(Virtualisation), 서비스 중심 기술(Service-oriented technologies), 고성능컴퓨팅(High performance computing) 등이다. 이외에도 유사한 연구로 Zhang et al. (2014), Tao et al. (2014) 등이 있다.

세번째 주제는 사물인터넷(IoT)이다. 사물인터넷은 인터넷으로 각종 사물을 연결하여 그들이 사용될 때 습득한 각종 정보를 다른 사물들과 공유하며 스스로 학습하고 분석한 정보를 사용자에게 제공하여 다양한 용도로 사용할 수 있게 한다. Xu(2014) et al. 은 사물인터넷과 연관되어 진행되어 온 연구들을 정리하고, 향후 진행 과제와 방향을 제시하였다. 그들이 분류한 관련 연구 주제는 인식 및 추적 기술 (Identification and Tracking Technologies), 사물인터넷 통신 기술(Communication Technologies in IoT), 사물인터넷 네트워크(Networks Involved in IoT), 사물인터넷 서비스관리(Service Management in IoT) 등이다. 또한 그들은 사물인터넷이 적용되는 주요 산업에서의 관련 연구에 대해서도 조사했으며, 의료보건 산업, 식품공급체인, 광산업, 교통과 물류, 소방안전 등이 주요 산업 분야이다. Bi et al. (2014)는 엔터프라이즈 시스템의 관점에서 사물인터넷과 현존하는 IT 인프라스트럭처 사이의 기술적 차이(gap)를 확인하고 향후 연구에 대한 방향을 지시하였다. 그들은 새로운 IT 환경으로의 성공적인 전환을 위한 필수 요건을 복잡성(complexity), 역학과 불확실성(dynamics and uncertainties), 가상개체 (virtual entities), 일차 수정(first-time correct)의 4가지로 분류하여 설명하였다. 유사한 연구로는 Mattern and Floerkemeier (2010),

Dias et al. (2012)이 있다.

네 번째 주제는 사이버 물리 시스템(CPS)이다. 사이버 물리 시스템은 사물인터넷과의 연관성이 매우 높은 기술적인 요소와 물리적인 제조시스템 또는 창고시스템 등이 결합된 차세대 산업 환경이다. 사이버 물리 시스템은 컴퓨터가 만들고 제어하는 디지털 환경인 사이버환경과 시간의 흐름 속에서 운영되며 물리적 법칙에 의하여 생성되고 제어되는 자연과 인공의 시스템 환경인 물리환경으로 구성되어 있다. 사이버 물리 시스템은 소프트웨어, 기계 및 전자 하드웨어, 센서, 액추에이터, 임베딩 시스템을 모두 포함하는 시스템이다. Lee et al. (2015)는 4차 산업혁명 환경에서 사이버 물리 시스템을 도입하기 위한 지침으로서 통합 5단계 아키텍처(5C CPS Architecture)를 제시하고 있다. 그들은 통합 5단계를 스마트 연결(Smart connection), 데이터-정보 변환(Data to information conversion), 사이버(Cyber), 인식(Cognition), 구성(Configuration)으로 분류하고 있다. Dworschak and Zaiser (2014)는 독일의 제조 환경을 기준으로 사이버 물리 시스템을 제조업에 도입할 때 요구되는 핵심경쟁력을 제시하였다. 그들은 사이버 물리 시스템이 숙련된 작업자를 가이드 하는 자동화(Automation) 시나리오와 숙련된 작업자가 사이버 물리 시스템을 가이드 하는 도구(Tool) 시나리오의 상반된 두 개의 시나리오에 대하여 조사를 진행하였다. 이외에도 Seiger et al. (2014), Monostori (2014) 등이 사이버 물리 시스템의 기술적 요소에 대한 연구를 진행하였다.

마지막 주제는 비즈니스의 지속성(sustainability)과 연관된 친환경 스마트 제조(Sustainable smart manufacturing)이다. 지난 10여년간 지구온난화에 대한 우려로 탄소배출 저감에 대한 국제사회에서의 논의가 활발해졌다. 이런 영향으로 제조회장에서도 친환경적

인 제조시스템 도입에 대한 관심이 높아져왔다. 스마트제조와 연결된 친환경 제조의 한 축은 공장에서 사용하는 전기에너지의 감축 또는 재사용에 대한 논의이다. Joo et al.(2016)은 재사용에너지를 활용하는 스마트제조시스템 구축에 대한 제안을 하였다. 그들은 에너지소비를 최소화 하는 생산스케줄을 생성하는 수리적 모델을 개발하고 시뮬레이션을 통하여 그 결과를 검증하였다. Vijayaraghavan and Dornfeld (2010)는 금속 작업을 하는 제조시스템에서 작업용구가 사용하는 전기를 지동으로 모니터링하고 분석하여 제공하는 스마트 시스템을 제안하였다. 이외에도 Seow and Rahimifard(2011)와 Duflou et al. (2012)의 스마트 제조 환경에서 에너지 절감에 대한 연구를 진행하였다.

3. 글로벌 SCM과 스마트 제조

2장에서 살펴보았듯이 스마트 제조는 4차 산업혁명의 소용돌이 속에서 새로운 제조 환경에서의 혁신적인 프레임워크로 많은 주목을 받고 활발한 연구와 도입이 다양한 분야에서 동시에 진행되고 있다. 4차 산업혁명의 주요 특징인 인공지능과 사물인터넷을 통하여 사물과 사물 또는 기계와 기계 또는 시스템과 시스템이 인간의 통제 없이 통신 네트워크로 상시 연결되어 스마트 공장에서 고객의 요구에 맞는 제품을 적시에 필요한 양만큼만 만들어 적시에 공급하는 시대가 현실로 다가오고 있다. 4차 산업혁명은 스마트 공장에서 상품을 만드는 것만 아니라 상품을 기획하고, 설계 및 개발하고, 부품을 구매하고, 제품을 만들고, 판매하는 데 이르는 전체 공급체인의 단계별 작업 또는 업무에도 적용될 수 있다. 특히, 사물인터넷을 통한 정보 취득 능력과 공유, 빅데이터와 인공지능을 활용한 실시간의 빠르고 정확한 의사결정 능력, 강력한 네트워크를 통한 상시 연결성은 그동안 SCM에서 해결하기 어려웠던 협업과 정보공유의

수준을 상당히 높일 것으로 기대된다. Lin et al. (2016)은 기존의 제조환경에서 스마트 제조환경으로 전환되는 과정에서 1) 공장이 비용(cost)센터에서 이익(profit)센터로 변환, 2) 작업의 초점(operational focus)이 프로세스에서 데이터로 변환, 3) 경영의 초점(management focus)이 노동(labor)에서 지식(knowledge)으로 변환됨을 지적했다. 기존의 제조환경이 효율성(efficiency)과 효과성(effectiveness)의 강조를 통한 노동 및 설비 생산성의 개선을 목표로 프로세스를 설계하고 운영 및 관리하였다면 스마트 제조 환경에서는 보다 더 효율적인 제조시스템으로 고객의 다양한 요구를 시스템에 반영할 수 있게 될 것이다. 이와 더불어 자동화 수준의 비약적인 증가는 요구되는 노동력의 수준을 비약적으로 감소시키는 반면 이러한 시스템을 설계하고 통제하는 더 고도로 숙련된 작업자의 지식을 요구하게 되므로 Lin et al. (2016)의 분석은 타당성을 보여준다.

Lin et al. (2016)은 앞에서 제시한 스마트 제조환경으로의 전환 과정에서 동시에 고려되어야 할 요소를 기반으로 학계와 산업계가 기술적인 이슈와 더불어 연구되어야 할 다음의 공급체인 관련 이슈를 제시하였다. 첫째로, 스마트 제조는 개별 제조 공장만이 아닌 전체 공급체인에서의 전체적 성과를 강조하여야 한다. 즉, SCM에서 늘 강조해 왔지만 현실적인 접근이 매우 어려웠던 일부 최적화가 아닌 전체 최적화에 대한 솔루션이 연구 및 개발되어야 하고 동시에 전체의 성과를 효과적으로 측정할 수 있는 지표 및 관련 시스템에 대한 연구 및 개발이 필요하다. Davis et al.(2012), Chand and Davis(2010) 둘째로, 스마트 제조는 데이터 기반이며, 이 데이터는 하나의 공장이 아닌 전체 공급체인을 커버해야 한다. 사물인터넷, 사이버 물리 시스템 등을 통하여 공급체인의 각 단계에서의 데이터가 취득

및 공유, 분석되어 시장에서부터 공급체인의 가장 상류에까지 공유된 정보에 기반한 협업과 의사결정이 이루어져야 한다. 이를 위해서는 전체 공급체인에서 취득한 데이터를 공유하고, 저장하고 분석할 수 있는 오픈 프로토콜, 데이터 분석모델, 시스템 도입 프레임워크와 표준이 연구, 개발 및 적용되어야 한다. Lee et al. (2014) 세제, 스마트 제조는 지식에 기반하므로 제조 네트워크 설계에 있어서 지식(knowledge)과 기술(skill)이 고려되어야 한다. 스마트 제조를 도입하는 데 있어 많은 경우에서 핵심 기술 혹은 지식의 부족을 겪을 것이다. 특히, 기술력이 부족한 국가 또는 기업에서는 매우 숙련된 기술자의 기술과 지식을 필요로 하는 작업에 많은 어려움을 가지게 된다. White(2003) 기술력이 부족한 스마트 제조 환경에서는 멀리 떨어진 지역에 위치한 숙련된 기술자의 개입이 필요할 것이며 이를 지원할 수 있는 전문가 또는 지식 및 기술 공유의 체계가 연구 개발 되어야한다.

마지막으로 Lin et al (2016)이 제시한 스마트 제조 환경을 기반의 공급체인에서 해결되어야 할 이슈와 더불어 본 연구에서 추가적인 이슈를 제시하고자한다. 실제 운영되는 공급체인에서의 가장 큰 이슈는 수요 또는 공급에서의 불확실성에 의하여 발생하는 위험(risk)을 어떻게 회피할 것인가이다. 이는 위험의 사전예측과 대안 시나리오를 통하여 어느 정도 극복될 수 있다. 스마트 제조 환경에서는 수요와 공급 과정에서의 위험 발생 여부와 가능성을 사전에 예측하고 사고 발생 시 사전에 정의되거나 시스템상에서 생성된 시나리오를 사람의 개입없이 시스템이 검토 및 평가하고 시스템 스스로 실행할 수 있는 체계와 방법론의 개발이 필요하다.

4. 결론

4차 산업혁명의 무서운 기세로 인류사회에 주요한 이슈로 떠 오르고 있으

며, 이는 제조와 SCM의 분야에서도 예외가 아니다. 본 연구에서는 제조환경에서의 4차 산업혁명인 스마트 제조 또는 스마트 공장과 이것이 SCM에 미치는 영향을 제시하였다.

본 연구에서는 스마트 제조의 글로벌 추진 현황과 스마트 제조 개념 및 방향성, 클라우드 제조, 사물인터넷, 사이버 물리 시스템, 친환경 스마트 제조 분야 등 주요 분야에서의 연구 현황을 제시하였다. 또한, Lin et al. (2016)에 기반한 스마트 제조환경의 도입이 SCM에 미치는 영향과 이 과정에서의 주요 이슈를 정리하였다. 마지막으로, 본 연구에서는 스마트 제조에 기반한 SCM이 고려해야 하는 추가적 이슈를 개발하여 제안하였다.

5. References

- [1] Anderl, I. R. (2014), Industrie 4.0-Advanced Engineering of Smart Products and Smart Production, Proc. of 19th International Seminar on High Technology.
- [2] Bi, Z., Xu, D. L., and Wang, C. (2014), Internet of Things for Enterprise Systems of Modern Manufacturing, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 10, No. 2, pp. 1537-1546.
- [3] Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., and Rosenberg, M. (2014), How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective, International Journal of Science, Engineering and Technology, Vol. 8, No. 1, pp. 37-44.
- [4] Chand, S. and Davis, J. F., (2010), The Smart Manufacturing Revolution, Manufacturing

- Executive Leadership Journal, November 2010.
- [5] Choi, S., Jun, C., Zhao, W. B., and Noh, S. D. (2015), Digital Manufacturing in Smart Manufacturing Systems: Contribution, Barriers, and Future Directions, *Advances in production Management Systems: Innovative Production Management towards Sustainable Growth*, pp. 21–29.
 - [6] Davis, J., Edgar, T., Porter, J. Bernaden, J., Sarli, M. (2012) Smart Manufacturing Intelligence and Demand-Dynamics, *Performance, Computers & Chemical Engineering*, vol. 47, pp. 145–156.
 - [7] Dias, R. A., Mendonça, I. T., and Regis, A. (2012), Integrated Manufacturing Management Using Internet of Things, *International Journal of Computer Applications*, Vol. 51, No. 11, pp. 20–25.
 - [8] Dworschak, B. and Zaiser, H. (2014), Competences for Cyber-Physical Systems in Manufacturing—First Findings and Scenarios, *Procedia CIRP*, Vol. 25, pp. 345–350.
 - [9] Duflou, J. R., Sutherland, J. W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., et al. (2012), Towards Energy and Resource Efficient Manufacturing: A Processes and Systems Approach, *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, Vol. 61, No. 2, pp. 587–609.
 - [10] He, W. and Xu, L. (2015), A State-of-the-Art Survey of Cloud Manufacturing, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 28, No. 3, pp. 239–250.
 - [11] Joo, J.Y., Raghavan, S., and Sun, Z. (2016), Integration of Sustainable Manufacturing Systems into Smart Grids with High Penetration of Renewable Energy Resources, *2016 IEEE Green Technologies Conference*, pp. 12–17.
 - [12] Lee, J., Bagheri, B., and Kao, H.-A. (2015), A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems, *Manufacturing Letters*, Vol. 3, pp. 18–23.
 - [13] Lee, J., Kao, H.-A., Yang, S., (2014), Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment, *Procedia CIRP*, vol. 16, pp. 3–8.
 - [14] Lin, Y., Ieromonachou, P. and Sun, W. (2016), Smart manufacturing and supply chain management, *IEEE 2016 International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences*.
 - [15] Mattern, F. and Floerkemeier, C., (2010), From the Internet of Computers to the Internet of Things, *From Active Data Management to Event-Based Systems and More*, pp. 242–259.
 - [16] Monostori, L. (2014), Cyber-Physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges, *Procedia CIRP*, Vol. 17, pp. 9–13.
 - [17] Seow, Y. and Rahimifard, S. (2011), A Framework for Modelling Energy Consumption within Manufacturing Systems, *CIRP Journal of Manufacturing*

- Science and Technology, Vol. 4, No. 3, pp. 258–264.
- [18] Seiger, R., Keller, C., Niebling, F., and Schlegel, T. (2014), Modelling Complex and Flexible Processes for Smart Cyber-Physical Environments, *Journal of Computational Science*, Vol. 10, pp. 137–148.
- [19] Tao, F., Cheng, Y., Da Xu, L., Zhang, L., and Li, B. H. (2014), CCloTCMfg: Cloud Computing and Internet of Things-Based Cloud Manufacturing Service System, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 10, No. 2, pp. 1435–1442.
- [20] Wang, S., Wan, J., Li, D., and Zhang, C. (2016), Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook, *International Journal of Distributed Sensor Network*, Vol. 2016, pp. 1–10.
- [21] Westkamper, E. and Jendoubi, L., (2003), Smart Factories-Manufacturing Environments and Systems of the Future, *Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, pp. 13–16.
- [22] Wu, D., Greer, M. J., Rosen, D. W., and Schaefer, D. (2013), Cloud Manufacturing: Strategic Vision and State-of-the-Art, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 32, No. 4, pp. 564–579.
- [23] Vijayaraghavan, A. and Dornfeld, D. (2010), Automated Energy Monitoring of Machine Tools, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 1, pp. 21–24.
- [24] Xu, L. D., He, W., and Li, S. (2014), Internet of Things in Industries: A Survey, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 10, No. 4, pp. 2233–2243.
- [25] Zhang, L., Luo, Y., Tao, F., Li, B. H., Ren, L., et al. (2014), Cloud Manufacturing: A New Manufacturing Paradigm, *Enterprise Information Systems*, Vol. 8, No. 2, pp. 167–187.