

## 제조 분야 사이버 물리 시스템(CPS) 연구 동향 분석

강형묵\*, 황경태\*\*

### 요약

본 연구의 목적은 국내 및 해외 공히 국가 차원에서 중요한 혁신 의제로 추진하고 있는 제 4차 산업혁명, 인더스트리 4.0, 스마트 제조 등에서 중요한 위치를 차지하고 있는 사이버 물리 시스템(Cyber Physical System: CPS) 분야의 연구 동향을 분석하고, 향후 연구 방향을 제시하는 것이다. 본 연구에서는 (1) 인더스트리4.0과 스마트 제조의 개념, CPS의 기본 개념과 역할 등을 정리하고, (2) 이 분야의 문헌을 분석하여 향후 연구 방향을 제시할 수 있는 분석 기준들을 설정하고, (3) 제조 CPS 관련 주요 연구 결과를 분석하고 향후 연구 방향을 제시한다. '구글 학술검색'을 통해서 식별된 2013년부터 2017년까지 발간된 제조 CPS에 대한 74 개의 해외 문헌과 8개의 국내 문헌을 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다. (1) 기존에 제시된 다양한 관점의 방법론과 프레임워크를 바탕으로 제조 CPS분야에 대한 공통의 방법론과 프레임워크를 제시하는 연구가 필요하다. (2) 제조 CPS 분야의 성숙도를 높이기 위해서는 기존의 시스템을 포함하여 CPS 시스템을 실제로 구현하고 운영하는 데 관한 연구가 필요하다. (3) 제조 CPS 시스템을 진단하고 개선 방향을 제시할 수 있는 진단 방법론에 관한 연구가 필요하다. (4) 세부 모델 및 툴 측면에서는 CPS의 특성을 감안한 SCM 및 생산계획 모델과 인간-기계 협업에 관한 연구에 대한 강화가 필요하다.

주제어: 사이버 물리 시스템, 사이버 물리 생산 시스템, 제조 사이버 물리 시스템, 인더스트리 4.0, 스마트 제조, 스마트 공장

## Analysis of Research Trends of Cyber Physical System(CPS) in the Manufacturing Industry

Kang, Hyung-Muck, Hwang, Kyung-Tae

### Abstract

The purpose of this study is to analyze the research trends and present future research directions in the field of Cyber Physical System (CPS), a key element in the 4th Industrial Revolution, Industry 4.0, and Smart Manufacturing that are currently promoted as important innovation agenda both at home and abroad. In this study, (1) the concepts of industry 4.0, smart manufacturing and CPS are summarized; (2) analysis criteria of these fields are established; and 3) analysis results are presented and future research direction is proposed. 74 overseas and 8 domestic literature on manufacturing CPS from 2013 to 2017 are identified through 'Google Scholar Search'. Major results of the analysis are summarized as follows: (1) research on a common methodology and framework for the manufacturing CPS needs to be done based on the analysis of the existing methodologies and frameworks of various perspectives; (2) in order to improve the maturity of the manufacturing CPS, it is necessary to study actual deployment and operations of CPS, including the existing systems; (3) it is necessary to study the diagnostic methodology that can evaluate manufacturing CPS and suggest improvement strategy; and (4) as for the detailed model and tool, it is necessary to reinforce research on SCM·production planning and human-machine collaboration while considering the characteristics of CPS.

Keywords: cyber physical system, CPS, cyber physical production system, cyber physical manufacturing system, manufacturing cyber physical system, industry 4.0, smart manufacturing, smart factory

2018년 8월 8일 접수, 2018년 8월 9일 심사, 2018년 8월 22일 게재확정

\* 동국대학교 서울캠퍼스 경영정보학과 박사과정(aribaba@naver.com)

\*\* 교신저자: 동국대학교 서울캠퍼스 경영정보학과 교수(kthwang@dongguk.edu)

## I. 서론

최근 독일에서는 인더스트리 4.0, 미국에서는 스마트 제조(Smart Manufacturing) 혹은 산업 인터넷(Industrial Internet)이 국가 및 기업의 중요한 경영 의제가 되고 있다. 한국에서는 4차 산업 혁명, 디지털 혁신(Digital Transformation) 등의 용어가 이와 유사한 의미로 사용되고 있다. 최초에는 제조 기업의 혁신 과제로 출발하였으나, 4차 산업혁명, 디지털 혁신 등이 강조되면서, 최근에는 기업뿐만 아니라 국가적인 의제가 되었으며, 한국에서도 대통령 직속으로 4차 산업혁명 위원회가 설립되어 활동을 시작하였다(Kagermann, et al., 2013; Thoben, et al., 2017).

용어에 따라 약간의 차이가 있을 수 있지만, 인더스트리 4.0과 스마트 제조의 핵심 개념 및 목표는 사물 인터넷(IoT), 빅데이터, AI 등 혁신적으로 진화하고 있는 정보통신기술(ICT)을 적극적으로 활용하여 제품, 비즈니스 모델, 프로세스를 근본적으로 혁신하고자 하는 것이다. 전통적인 제조 기업에서도 기존 하드웨어 중심의 제품·비즈니스 모델에서 소프트웨어 및 서비스 중심의 제품·비즈니스 모델로 전환하는 것이 핵심 과제이며, 산업간 융합 및 경쟁이 일반화되고 있다(Kagermann, et al., 2013; Thoben, et al., 2017). 국내에서도 4차 산업혁명의 핵심기술로 AI 연구 및 상용화가 가속화되고 있으며(백승익 외, 2016; 김병운, 2016), IoT, 빅데이터 등에 대한 연구 및 활용도 활발하게 전개되고 있다(주정민·나형진, 2015).

인더스트리 4.0과 스마트 제조의 핵심 요소 중 하나인 CPS는 IoT, 빅데이터 등의 기술을 활용하여 사이버 세상과 물리적인 세상을 연계하고, 동기화하는 요소이다. IoT나 빅데이터 등이 기술적인 요소라고 한다면, CPS는 이러한 요소들을 활용하여 물리적인 세상을 사이버 세상에 반영하고, 사이버 세상의 기술을 활용하여 실제의 물리적인 세상을 통제하고 제어하는 시스템이다.

특히 제조 분야에서는 물리적인 공장의 운영, 공급

업체 및 고객과의 거래, 물류 등에 관한 정보가 MES, ERP, SCM 등의 사이버 시스템에 정확하게 반영되고, 이러한 정보를 가지고 최적화된 경영·공급·생산 계획을 수립하여 운영하는 것이 과거부터 기업의 핵심 경쟁력이다. CPS기술의 발전으로 과거에는 불가능하거나 어려웠던 운영 효율성을 확보하는 것이 가능하게 되었고, CPS 기술의 발전과 그 적용의 중요성은 점차 증대하고 있다.

본 연구에서는 연구 문헌 분석을 통해 제조 CPS 연구 동향 및 주요 연구 결과를 분석하고, 향후 제조 CPS 분야의 연구 방향을 제시하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서 수행한 주요한 연구 내용은 다음과 같다.

- 분석 대상인 CPS의 기본개념을 정리한다.
- 제조 CPS 분야에서 기 수행된 연구를 분석하고 향후 연구방향을 제안하는데 활용될 수 있도록 연구 주제 등을 포함하여 다양한 분석 기준들을 수립한다.
- 수립한 분석 기준을 바탕으로, 이 분야의 연구 문헌을 분석하여 연구동향을 파악하고, 향후 연구방향을 제안한다.

본 논문의 제I장은 서론으로서, 연구의 배경과 연구 내용, 논문의 구성을 서술한다. 제II장에서는 인더스트리 4.0과 스마트 제조의 개념, CPS의 기본적인 개념, 인더스트리 4.0과 스마트 제조 내에서 CPS의 역할을 정리한다. 제III장은 본 연구를 위해 수립한 문헌의 분석 기준, 분석할 문헌의 선정 방법, 분석 절차 등에 대해 설명한다. 제IV장에서는 분석 기준을 바탕으로 문헌 들을 분석한 결과를 제시한다. 마지막으로 제V장은 결론으로서, 연구의 주요 결과를 종합적으로 제시하고, 이 분야의 향후 연구방향을 제안한다.

## II. 인더스트리4.0과 스마트 제조, 제조 분야 CPS

### 1. 인더스트리 4.0의 기본 개념 및 기술

인더스트리 4.0은 제조 경쟁력이 가장 뛰어난 국가 중 하나인 독일이 향후에도 지속적으로 제조 경쟁력을 확보하기 위해 정부 차원에서 추진 중인 혁신 의제이다(Kagermann, et al., 2013). 최초 독일에서는 제조 분야를 중심으로 인더스트리 4.0을 정의하였으나, 최근 한국을 포함하여 전 세계적으로는 제조 뿐만 아니라 금융, 통신, 에너지, 유통, 서비스, 공공 등 전 산업의 전체 가치 체인(Value Chain)을 디지털을 기반으로 혁신하는 의미의 제4차 산업혁명과 동일하게 사용되기도 한다.

인더스트리 4.0은 로봇을 통한 자동화, ERP·MES 등 정보시스템의 활용에 기반을 둔 기존의 자동화(Automated) 제조에서 지능형(Intelligent) 제조로의 패러다임 전환을 의미한다. 지능형 제조는 기존과는 달리 전체 가치체인에서 사람의 개입을 최소화한 상태로 운영이 가능해야 하며, 이를 가능하게 하기 위해서는 IoT, 빅데이터, AI 등의 요소 기술이 뒷받침되어야 한다(Thoben, et al., 2017).

인더스트리 4.0의 또 다른 특징은 로트 크기(Lot Size)를 최소화하여 다양한 제품들을 가지고 고객들의 개인적인 요구사항을 충족시킨다는 점이다(Radziwon, et al., 2014). 이러한 특징들이 가능하기 위해서는 현장에서 발생하는 모든 데이터가 실시간으로 적절하게 생산 시스템에 제공되어야 하고, 생산 시스템은 이를 적시에 반영하여 가능한 한 물리적인 라인의 변경이나, 대기 없이 생산 변경이 가능해야 한다(Thoben, et al., 2017).

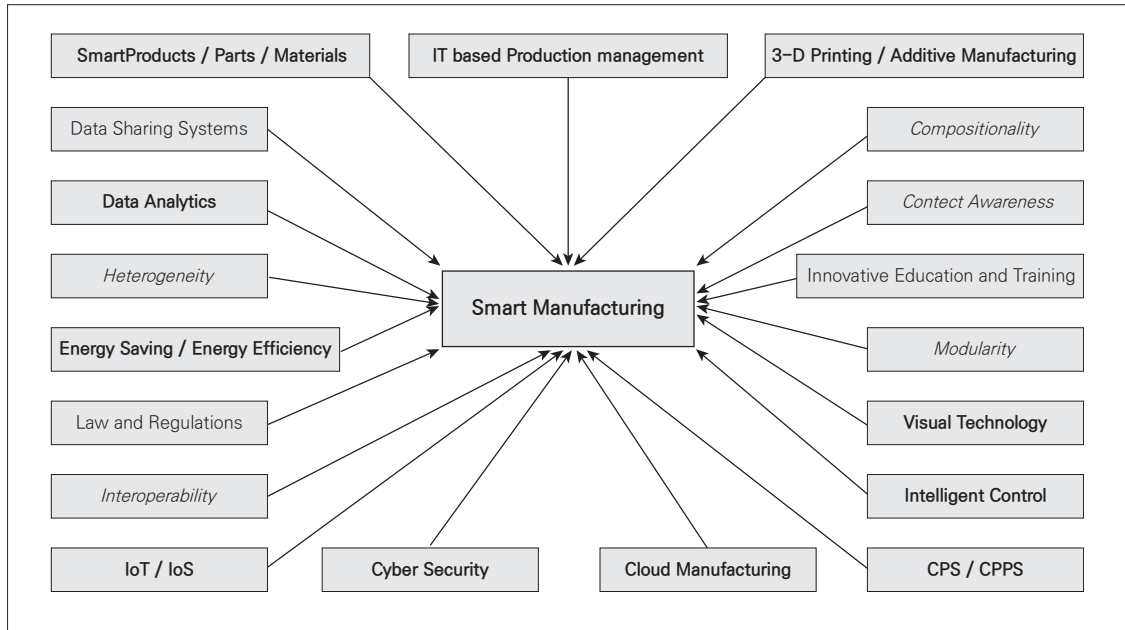
인더스트리 4.0은 스마트한 제품, 절차, 프로세스에 집중해야 하고, 스마트 공장이 핵심이다. 스마트 공장은 제품을 보다 효율적으로 생산할 수 있도록 복잡성을 관리하고, 장애나 중단(Disruption)에 잘 대응해야 할 수 있어야 한다(Kagermann, et al., 2013). 스마트 공장은 주변 상황이 동적이고 급속하게 변화하는 생산 시설로부터 발생하는 다양한 문제들을 해결할 수 있는 유연성·대응성이 높은 프로세스들을 제공하는 제조 솔루션이다. 스마트 공장은 자동화와 관련이

있고, 불필요한 인력과 자원의 낭비를 최소화하여 생산 최적화를 달성할 수 있는 소프트웨어와 하드웨어의 조합이지만, 한편으로는 서로 다른 기업이나 파트너들 간의 협업을 통해 스마트함을 달성하는 것도 중요한 요소이다(Radziwon, et al., 2014).

이러한 인더스트리 4.0을 광의로 정의하면 “가치 체인 조직의 기술과 개념에 대한 총칭”으로 볼 수 있다(Hermann, et al., 2016). 또한, 결과적으로 인더스트리 4.0은 전략적인 수준에서 수평적인 가치 네트워크를 지원할 수 있어야 하며, 엔지니어링을 포함한 비즈니스 프로세스 전체 가치 체인에 대한 중단 간 통합을 제공할 수 있어야 하고, 제조 시스템에 대한 수직적인 통합과 네트워킹을 가능하게 해야 한다(Kagermann, et al., 2013). 인더스트리4.0의 기술 요소에는 CPS, IoT, 서비스 인터넷(Internet of Service: IoS) 및 스마트 공장, 빅데이터, 클라우드, M2M(Machine to Machine) 등이 포함되는데, 이 중에서 가장 핵심적인 기술요소는 CPS, IOT, IoS, 스마트 공장 등의 네 가지로 볼 수 있다. 모듈화된 인더스트리 4.0의 스마트 공장에서는 CPS는 물리적 프로세스를 모니터링하고 실제 세계의 가상 복사본을 만들고, 분산된 의사 결정을 내린다. CPS는 IoT를 통해 실시간으로 서로 의사소통하고 협조하며, IoS를 통해 조직 내부 및 조직 간 서비스가 제공되며 가치 체인의 참가자가 활용하게 된다(Hermann, et al., 2016).

## 2 스마트 제조의 기본 개념 및 기술

최근 미국에서는 GDP에서 제조업이 차지하는 비중이 낮아지고, 과학과 기술 혁신을 통해 미국이 다시 제조업에서 글로벌 리더가 되어야 한다는 점을 강조하면서, 스마트 제조를 주요 혁신 의제로 제시하고 있다(Anderson, 2011). 스마트 제조는 미국을 제조 강국으로 다시 부상시키기 위한 차원의 의제로서 최근 학계나 산업계에서 중요하게 다루고 있는 주제이고, 요소 기술 등 여러 가지 측면에서 인더스트리 4.0과 중



출처: Mittal, et al. (2017)

〈그림 1〉 스마트 제조의 특성 및 기술 시각화

복되는 점이 많아 유사한 개념으로 활용되기도 한다 (Radziwon, et al., 2014). 스마트 제조는 “네트워크화된 데이터와 ICT를 적극적으로 활용하여 제조 활동을 통제하는 제조 방식의 집합”으로 정의할 수 있으며 (Thoben, et al., 2017), 미래의 스마트 제조 시스템은 기존 및 신규 시장에 대응하여 복잡하고 개인화된 제품을 생산할 수 있도록 자기 조립(Self-Assembly) 단계까지 진화할 것으로 예상된다(Mittal, et al., 2017). 인더스트리 4.0과 스마트 제조는 사람의 개입을 최소화하는 지능형·자기 조립 단계로의 진화, 개인화된 제품의 유연한 생산이라는 2가지 측면에서 동일한 지향점을 가지고 있다.

스마트 제조의 주요 기술 요소(볼드체)에는 IoT·IoS, 사이버 보안, 데이터 분석, 클라우드 제조, CPS·CPPS, IT 기반 생산 관리, 3D 프린팅 등이 있고, 특성(이탤릭체)으로는 상호운용성, 모듈화 등이 있다 (〈그림 1〉 참조)(Mittal, et al., 2017). 스마트 제조의

주요 기술요소를 CPS, 클라우드 제조, 빅데이터 분석, IoT, 스마트 센서 등의 핵심·기반 기술과 3D 프린팅, 에너지 절감, 홀로그램 등과 같은 응용·추가 기술로 구분하기도 한다(Kang, et al., 2016).

### 3. 사이버 물리 시스템

인더스트리 4.0과 스마트 제조 모두에서 강조하는 핵심 기술요소는 IoT, IoS, CPS, 빅데이터 분석, 클라우드 등이며, 그 외에 ERP·SCM·MES와 같은 IT 기반의 생산관리 시스템, 3D 프린팅, 사이버 보안 등도 중요한 기술요소라 할 수 있다. 그 중 IoT, IoS, 빅데이터, 클라우드 등은 최근 들어 기반 기술로 정착되었으나, 근간이 되는 CPS, 특히 제조 분야에서의 CPS의 적용은 실무적으로나 학술적으로 시작 단계로 볼 수 있다.

CPS라는 용어는 2006년 미국의 국립과학재단

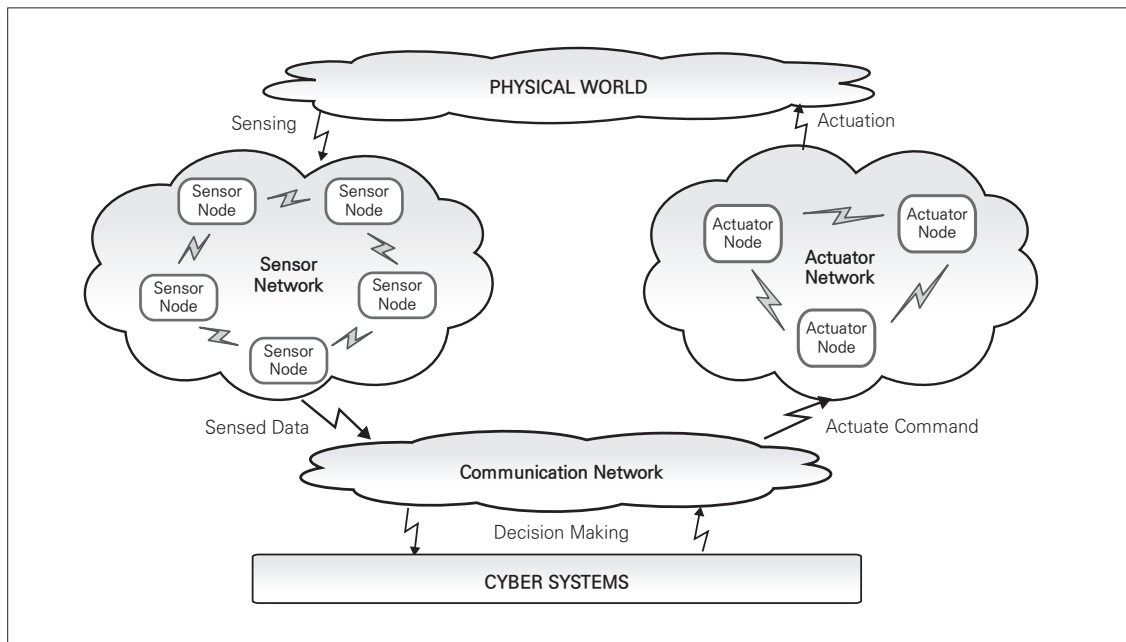
(National Science Foundation: NSF)에서 처음 사용되기 시작하였고, Lee(2008)의 연구가 CPS의 확산에 크게 기여하였다(Lee, 2008; Wang, et al., 2015). 미국에서는 CPS를 연구하는 학계, 공공기관, 산업계 간의 협업을 촉진하기 위해 Cyber-Physical Systems Virtual Organization (CPS-VO, <http://cps-vo.org/>)라는 특별한 이익 단체가 조직되어 운영되고 있다(Gunes, et al., 2014).

CPS는 다양하게 정의되고 있는데, CPS의 확산에 기여한 Lee(2008)는 “컴퓨터와 물리적인 프로세스와의 통합으로서, 물리적인 프로세스들이 컴퓨터에 영향을 미치거나 또는 그 반대로 컴퓨터가 프로세스에 영향을 미치는 피드백 루프를 통해서 내장된 컴퓨터와 네트워크들이 물리적인 프로세스를 모니터링하고 통제하는 것”으로 정의하고 있다. 이것은 자동차에 내장되는 텔레매틱스(Telematics)나 시스템 에어컨 같은 기술을 의미한다.

CPS의 또 다른 정의는 “주변 물리적인 세상과 연결

을 갖는 협력적인 연산 장치(컴퓨터)로 구성된 시스템으로 물리적인 세상과 동일한 정보를 가진 사이버 시스템 및 그 연결”을 의미하며, 동시에 인터넷을 통하여 다른 시스템과도 서로 연동하고, 데이터 접근 및 처리 서비스를 제공하고 제공받는 시스템으로 확장 가능하다. 물리적인 요소와 가상 요소 간 상호작용은 가장 중요한 요소이며, 우리는 그 사이의 상호작용을 반드시 이해해야 한다(Wang, et al., 2015).

CPS는 비교적 새로운 개념이지만, 그 구성 요소는 이미 잘 알려져 있는 것들이다. <그림 2>에서 볼 수 있는 바와 같이, CPS는 물리적 세계, 인터페이스, 가상 시스템으로 구성된다. 물리적 세계는 관찰되거나 제어되어야 하는 물리적 현상과 관련 있다. 가상 시스템은 정보를 처리하고, 주위 환경과 소통하는 것과 관련이 있다. 물리적 세계와 가상 시스템은 센서와 작동기 등을 통해 서로 연결된다. 센서는 물리적 세계의 변화를 파악하여 가상 시스템으로 전송하는 역할을 하며, 작동기는 가상 시스템의 정보나 지시를 물리적 세



<그림 2> CPS 개요



계로 전송하는 역할을 수행한다. CPS와 대부분의 기존 가상 시스템과의 큰 차이는 물리 환경에 대한 제어의 가역성이다. 가상 시스템 내에서는 작업 취소가 상대적으로 용이하나, CPS에서는 물리 환경에 대한 작업 취소가 어렵기 때문에 스케줄링 및 작업 제어가 매우 중요하다. 특히 CPS는 대부분 실시간 작업으로 구성되기 때문에 실시간 제어에 대한 연구가 중요하다 (Gunes, et al., 2014).

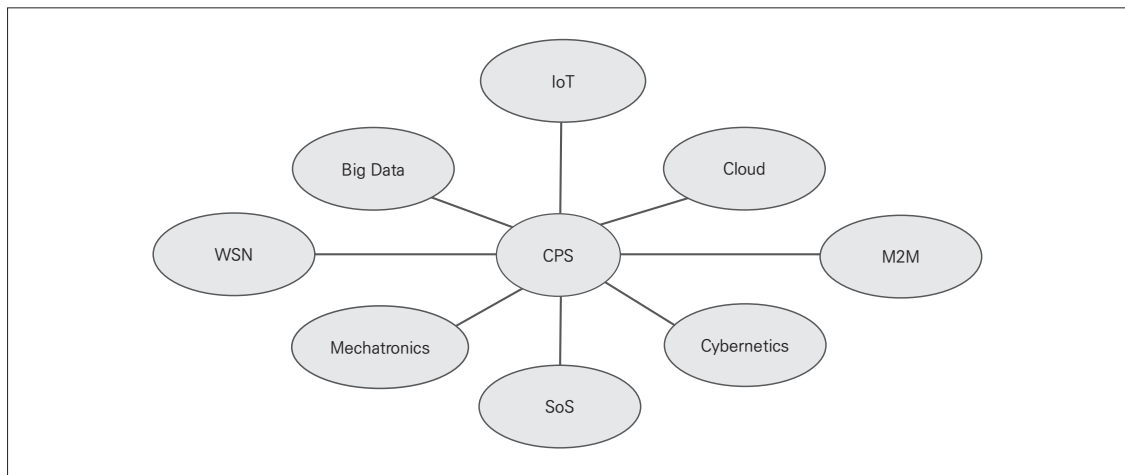
또한 다양한 연구 분야와 용어들이 CPS와 관련이 있는데, 관련 개념과 기술은 다음과 같다(〈그림 3〉 참조)(Gunes, et al., 2014).

빅데이터는 가상 세계에 축적되는 다량의 데이터를 활용하는 기술로서, CPS 도입 후 성과를 내기 위한 기반 기술로 볼 수 있다. 클라우드 ICT 분야에서 패러다임을 바꾸는 기술로서, 기업이나 개인이 필요할 때 신속하게 컴퓨팅 자원(하드웨어, 애플리케이션 프로그램, 서비스 등)을 사용할 수 있도록 해 주는 환경이다. 최근에는 CPS 도입 시에도 가상 세계 및 물리 세계와의 연계를 클라우드 환경에 구축하는 것이 보편화되고 있다(Gunes, et al., 2014).

IoT는 CPS의 핵심 기술 요소로서, 물리적 세계와 가상 세계가 소통하기 위한 핵심 인프라이다. 물리적

세계의 사물에 아주 작은 칩 등을 내장시켜 가상 세계 및 다른 사물과 연결시키는 기술로 IoT라는 용어는 1999년부터 사용되었다. IoT는 상당 부분 CPS와 겹친다. IoT도 물리적 세계에서의 사물을 관찰하고, 커뮤니케이션 기술을 활용하여 실제 사물을 관리하기 위한 데이터를 확보한다. 하지만, IoT는 사물 간의 연결에 관련된 기술 중심인 반면, CPS는 실제 세계를 제어하고 최적화하기 위한 사이버 시스템의 구성 및 그 응용에 중점이 있다고 할 수 있다(Gunes, et al., 2014).

M2M(Machine-to-Machine)은 CPS와 관련된 또 다른 개념으로서, 커뮤니케이션 망을 통해 다른 기계와 소통하는 기술 표준으로서, IoT와 CPS의 하부 구조라고 볼 수 있다. 인공지능학(Cybernetics)은 인간과 기계 간 커뮤니케이션과 제어에 대한 분야이다. SoS(Systems of Systems)는 독립적으로 운영될 수 있는 자율적인 시스템의 집합으로, 서로 동일한 목표를 가지고 연동되는 대규모의 이기종 시스템을 의미한다. 메카트로닉스는 기계 시스템과 전기 시스템의 조합으로 1960년대에 처음 나온 개념으로, 복잡한 공학 시스템을 설계·구현·적용하는데 사용되는 체계적인 접근 방법이다. 무선센서네트워크(Wireless Sensor Network: WSN)는 물리적 세계를 감지하는 네트워크



〈그림 3〉 CPS 관련 개념 및 기술

로서, IoT 단말과 연계하여 데이터를 수집·전송하는데 적용되는 기술로 CPS 기반 기술이라고 볼 수 있다(Gunes, et al., 2014).

일상의 모든 면을 바꿀 수 있는 CPS의 잠재력은 엄청나다. 자율주행 자동차나 지능형 교통망, 로봇 수술, 지능형 빌딩, 스마트 그리드 등과 같은 개념은 이미 오래된 몇 가지 대표적인 CPS 사례이다. 제조 분야에서 IoT와 IoS가 외부를 포함한 전체 제조 프로세스의 네트워킹을 가능하게 함으로써 공장을 스마트한 환경으로 전환하는 것이 가능하게 되었으며, 물리적인 세계와 가상 시스템을 연계하여 자율적이고, 지능적인 스마트 제조 환경을 가능하게 하는 CPS의 중요성과 가치에 대한 인식이 증대되고 있다(Kagermann, et al., 2013).

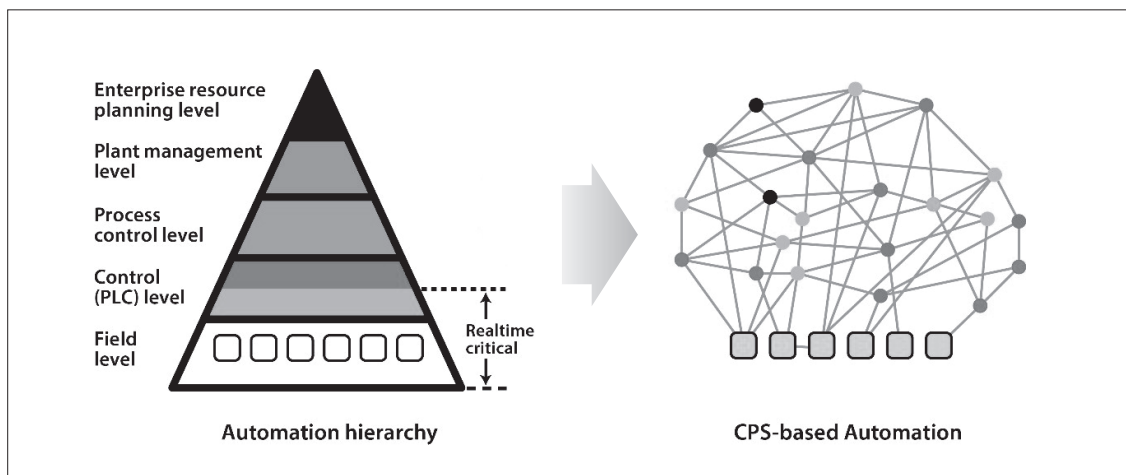
#### 4. 사이버 물리 생산시스템

사이버 물리 생산시스템(Cyber Physical Production Systems: CPPS)은 CPS를 제조생산 분야에 적용한 것으로, 2013년에 최초로 개념이 제시되어, 이후 많은 연구가 수행되고 있다. CPS 기술을 활용하여 제조생산 분야를 고도화하고자 하는 개념이다(Monostori,

2014).

CPPS는 내부 생산 프로세스에서부터 배송 네트워크에 이르기까지 생산의 모든 단계와 계층을 아울러 상황에 따라 반응하는 자율적이고 협업적인 요소 및 하부 시스템의 연결로 구성된다. 이러한 자율적인 운영을 모델링하고, 미래에 발생할 행위를 예측하고, 해당 시스템을 제어하기 위해서는 기본적인 시스템 관련 연구가 필요하다. 자율, 협업, 상황 대응, 최적화 등이 연구의 근원적인 질문으로서, 분석적이고 시뮬레이션에 기반을 둔 접근이 과거보다 더 중요할 수 있다. 또한 센서 네트워크의 운영, 대용량 데이터 처리, 정보 추출·제공, 보안 등도 CPPS 도입 시 중요한 극복 요소이며, CPPS를 구현하는 과정에서 과거와는 다른 새로운 작업자와 기계간의 협업이 구현되어야 한다(Monostori, 2015).

CPPS는 부분적으로 전통적인 자동화 피라미드와는 다른 방식으로 구현되어야 한다(그림 4)의 왼쪽 부분). 일반적인 PLC(Programable Logic Controller: 프로그램 논리 제어 장치)를 포함하는 전형적인 기술 프로세스와 관련된 현장 제어는 기존과 비슷하게 유지되지만, 보다 상위 계층에서는 현재보다 분산적이고 자율적인 방식의 협업이 CPPS의 특징이라고 볼 수 있



〈그림 4〉 자동화 계층 구조 분산 서비스로 전환

다(〈그림 4〉의 오른쪽 부분)(Monostori, 2014). 실제 현장에서는 아직 오른쪽과 같은 자율적인 협업은 어려우나, 관련된 많은 기술 및 협업 모델 연구가 이루어지고 있다.

이러한 CPPS 개발을 위해서는 디지털 트윈(Digital Twin)이 중앙 집중적인 분석 및 분산화 된 생산 프로세스의 제어에 필요한 중요한 전제 조건이다. 디지털 트윈은 물리적인 세계를 가상 시스템 내에 동일하게 구성하는 것이다. 디지털 트윈의 개발을 통해 확보된 물리 환경에 대한 데이터를 위치와 상관없이 원거리에서 실시간으로 데이터를 접근하고 활용하기 위해서는 클라우드 기반 솔루션 및 빅데이터, IoT 등의 기반 기술이 필요하다(Uhlemann, et al., 2017).

CPPS의 또 다른 중요한 특성 중 하나는 적응력이다. 주로 생산 시스템 관점에서, 요구되는 가변성에 대응하기 위해서는 변환 가능 공장, 집중 유연 생산 시스템과 같은 지원 수단을 고려해야 한다. 또 다른 도전 요소는 CPPS의 모든 통신 과정에서 보안이 확보되어야 한다는 점과 생산 시스템이 더 높은 적응력을 확보하기 위해서는 생산 시스템의 하부 구조를 최대한 단순화하여 CPPS의 복잡도를 최소화해야 한다는 점으로 CPPS의 상부 구조에서 대응하기는 어렵다(Francalanza, et al., 2017).

### Ⅲ. 연구수행 방법

#### 1. 문헌분석 방법

본 연구에서는 CPS 관련 문헌을 식별하는데, '구글 학술검색'을 활용하였다. '제조 사이버 물리 시스템'과 '사이버 물리 생산 시스템', 'manufacturing cyber physical system', 'cyber physical production system'이라는 단어를 중심으로 제조 CPS 관련 문헌들을 검색하였다. 검색 결과, 약 100 여 편의 논문 및 보고서, 백서, 단행본 등이 식별되었다. 본 연구는 학술 논문을 분석하는 것이 목적이므로, 그 중 학술 문헌

이 아닌 보고서, 백서, 단행본 들은 제외시켰다. 이러한 과정을 거쳐 최종적으로 총 82편(해외 74편, 국내 8편)의 논문을 분석 대상으로 선정하였다.

최종 선정된 문헌을 대상으로 연구 주제와 일반적인 분석 기준에 따라 분석을 실시하였다. 다음에서는 본 연구에서 분석 기준으로 수립한 연구 주제와 일반 분석 기준에 대해 설명한다.

## 2. 문헌분석 기준

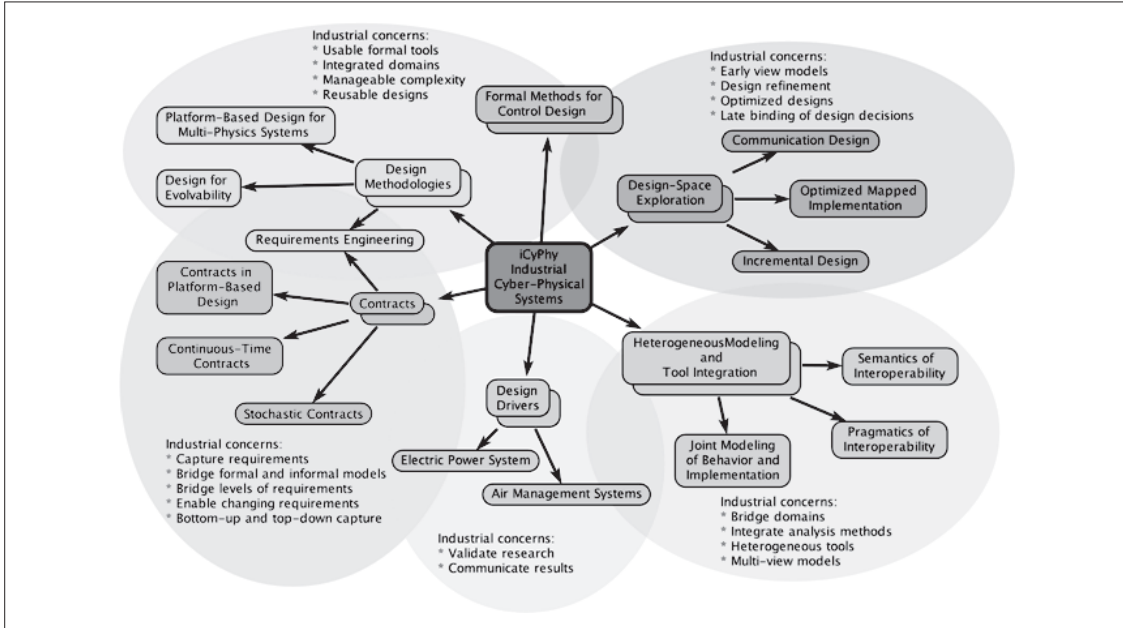
### 1) 연구 주제

본 연구에서는 제조 CPS분야에서 수행된 연구들을 체계적으로 분석하고 향후 연구 방향을 제시하기 위하여, 주요한 분석 기준의 하나로 연구 주제를 선택하였다. 제조 CPS 분야의 주요한 연구 주제를 식별하기 위한 기반 자료로 미국 버클리 대학교에서 제시한 CPS 관련 분류체계(〈그림 5〉) 및 개념도(〈그림 6〉)를 활용하였다(Fisher, et al., 2014). 버클리 대학교에서는 최초로 CPS라는 개념을 제시하고, 구체화하는데 기여한 E.A. Lee 교수가 CPS관련 연구를 주도하고 있으며, 이후 IBM과 United Technology와 협력하여 iCyPhy (<https://ptolemy.berkeley.edu/projects/icyphy/>)라는 CPS 관련 산학 프로그램을 운영 중이다.

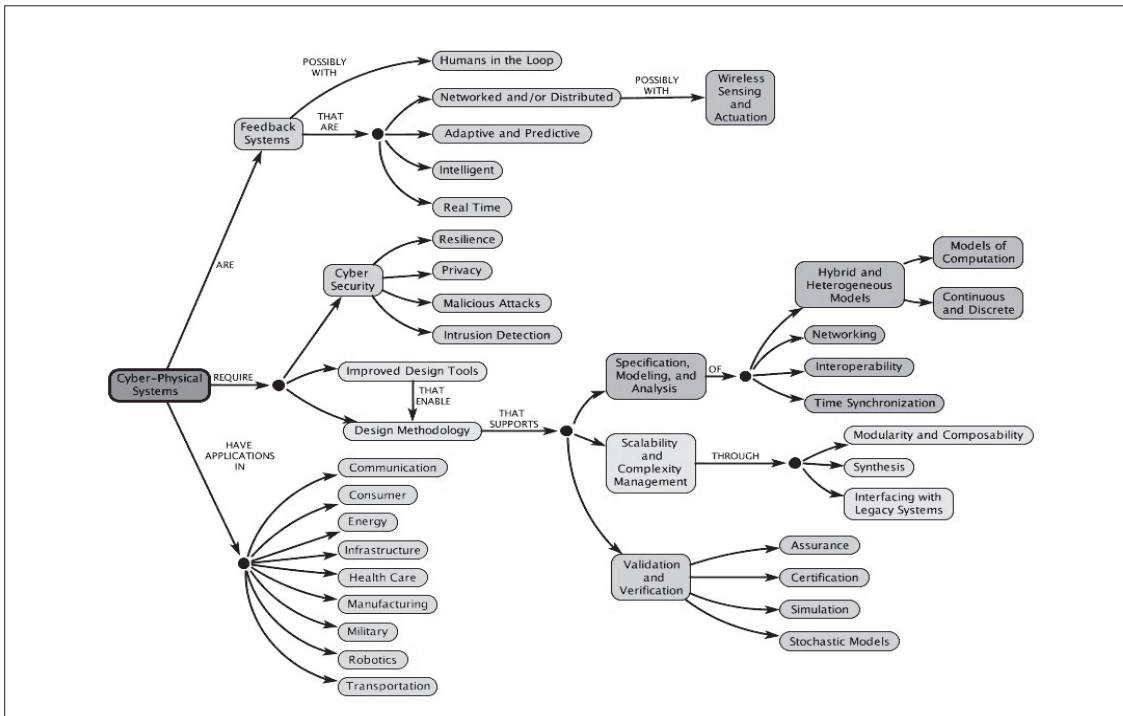
iCyPhy에서는 CPS 설계 및 모델링, 분석 등에 관련된 기술 및 아키텍처, 방법론, 지원 도구 등을 주로 연구하고, 2014년도에 CPS 연구 필요 분야에 대한 분류 체계의 주요 항목으로 '설계 방법론', '이기종 모델링 및 도구 통합', '요구공학', '계약', '설계 동인', '디자인 공간 탐사', '제어 설계 방법론'을 제시하고 있다(Fisher, et al., 2014). 이후 분류체계에 기반하여 아래의 개념도를 작성하고, '설계 도구' 및 '설계 방법론', '모델링', '사이버 보안'과 에너지, 통신 등 '어플리케이션', '피드백 시스템'을 주요 요소로 제시하고 있다(Wang, et al., 2015).

이를 통해서 제조 분야 CPS에서 중요한 연구 주제





〈그림 5〉 연구 주제에 대한 분류 체계 (iCyPhy)



〈그림 6〉 CPS 개념도 (<http://cyberphysicalsystems.org/>)

〈표 1〉 일반 분석 기준

기준	내용	설명
발간 연도	발간 연도	연구가 발간된 연도
지역	지역	주저자가 속한 지역
전반적 연구 방법	실증	실제 현상에 대한 관찰을 통해 분석 결과를 제시하는 연구
	비실증	아이디어, 프레임워크 고찰에 기반한 연구
비실증 연구 방법	개념적 프레임워크	해당 분야의 범위 및 내용을 규정하는 개념적 모델 혹은 프레임워크를 제시하기 위한 연구
	수리·공학적 프레임워크	해당 분야의 내용을 규정하는 수리·공학적 모델 혹은 프레임워크를 제시하기 위한 연구
	튜토리얼·리뷰	해당 분야의 연구 개요 및 내용을 정리하고 설명하기 위한 연구
실증 연구 방법	실험	실험실 및 현장에서의 실험에 의한 연구
	서베이	질의서를 활용하여 수행하는 연구
	사례 연구	하나나 2개 이상의 조직, 시스템 등에 대한 심층 분석을 수행하는 연구
	현상 기술	특정 기술이나 시스템, 프로젝트에 대해 설명하는 연구

로는 ‘설계 방법론’, ‘모델링 및 툴 통합’, ‘어플리케이션’, ‘사이버 보안’으로 판단된다. ‘설계 방법론’은 제조 분야에 CPS를 적용하기 위한 전체적인 프레임워크 및 아키텍처, 세부 방법론에 관한 연구에 해당하며, ‘모델링 및 툴 통합’은 다양한 제조 CPS 내 요소를 통합, 설계하기 위한 모델링 방안 및 관련 툴에 관한 연구에 해당한다. ‘어플리케이션’은 제조, 에너지 등 해당 산업군 내 적용 가능한 어플리케이션이나 유스케이스(Use Case)에 관한 연구에 해당한다. ‘사이버 보안’은 CPS에 대한 외부 침입을 탐지하고, 대응하기 위한 기술에 대한 연구이다.

iCyPhy에서 제시한 연구 주제 외에 제조 및 전반적인 CPS 분야에서 중요하게 다루는 연구 주제로는 빅데이터, AI, IoT 등의 ‘기술’ 적용에 관련한 주제가 있다. 제조 분야 CPS 현황 및 발전에 관한 연구(Wang, et al., 2015) 및 CPS: 개념, 기술 및 구현 원리에 관한 연구(Horváth & Gerritsen, 2012) 등에서 ‘기술’을 중요한 CPS 관련 연구 주제로 제시하고 있다.

이러한 내용을 종합하여 본 연구에서는 문헌들을 분석하여 분류하는데 사용할 연구 주제로 (1) 설계 방법론, (2) 모델링 및 툴 통합, (3) 기술(사이버 보안 포함), (4) 유스케이스(어플리케이션 포함)로 구분하고,

이에 속하지 않는 리뷰 연구 등은 기타로 분류하고자 한다.

## 2) 일반 분석 기준

일반적인 분석 기준에는 논문 발간 년도, 발간 지역 및 전반적 연구방법(실증·비실증), 세부 연구방법 등이 포함된다(〈표 1〉 참조).

전체 82 건의 대상 문헌을 연구 주제 및 일반적인 분석 기준에 따라 분석하였으며, 분석 결과 및 시사점을 제시하였다.

## IV. 분석 결과

### 1. 연구 주제 기반의 분석 결과

#### 1) 연구 주제

다음의 〈표 2〉에는 연구 주제 별로 분석한 결과가 정리되어 있다. 5가지 주제 ‘모델링 및 툴 통합’에 관한 연구가 44%로 가장 높은 비중을 차지하고 있고, 다음으로 ‘설계 방법론’(17%), ‘기술’(16%), 등의 순으로 나타났다. 이것은 이 분야가 도입, 설계, 구축, 운영의 시스템 수명주기 관점에서 볼 때, 아직까지 구축 및 운

〈표 2〉 연구 주제

연구 주제	소계		해외		국내	
	개수	비율	개수	비율	개수	비율
설계 방법론	14	17%	14	19%	0	0%
모델링 및 툴	36	44%	31	42%	5	63%
기술	13	16%	13	18%	0	0%
유스케이스	7	9%	7	9%	0	0%
기타	12	14%	9	12%	3	37%
소계	82	100%	74	100%	8	100%

영 사례가 비교적 미흡한 초기 도입 및 설계 단계에 있기 때문에, 이 분야의 연구 또한 아직까지는 공학적 관점에서 시스템을 설계하는데 집중하고 있다는 것을 나타내는 결과라고 판단된다.

연구 주제 관점에서 국내외를 비교해 보면, 공통적으로 모델링 및 툴 통합 분야가 지배적인 비중을 차지하고 있다. 그러나 차이점은 해외의 경우 5가지 주제가 다 다루어지고 있으나, 국내의 경우에는 모델링 및 툴 통합에만 집중되어 있는 경향을 나타내고 있다.

아래에서는 각 연구 주제별로 세부적인 내용을 살펴보고, 향후 연구 방향에 대한 시사점을 제시하도록 한다.

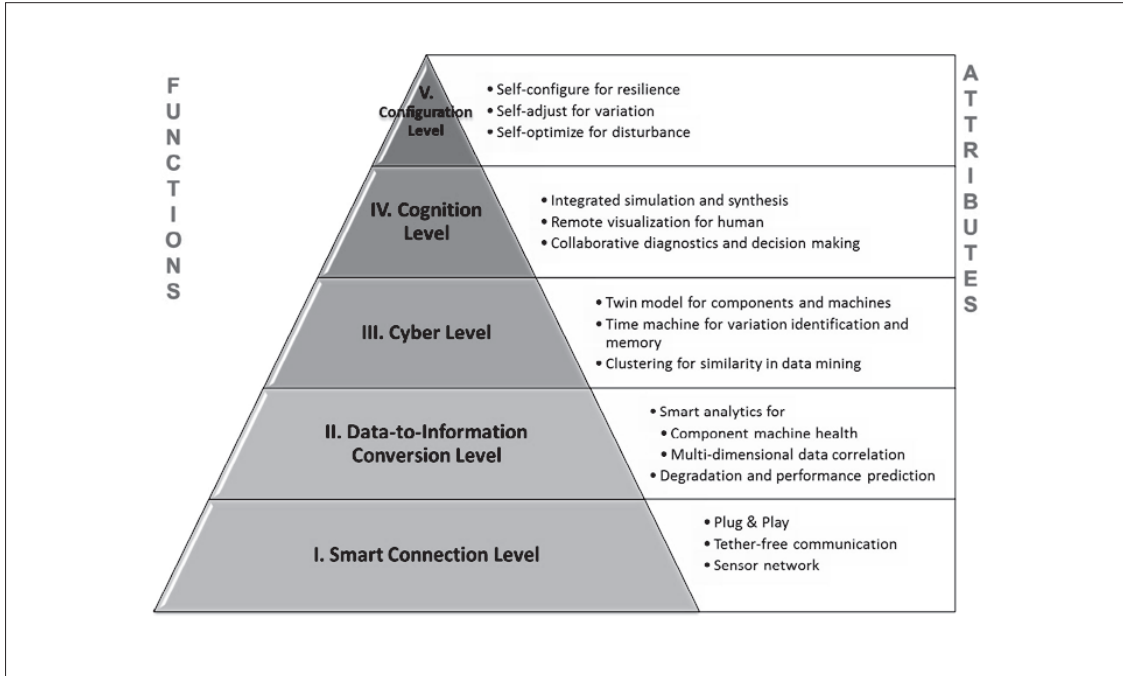
## 2) 설계 방법론 분야

설계 방법론 분야에서는 전반적인 CPS 설계 방법론과 아키텍처에 관한 연구들이 수행되었다.

설계 방법론을 제시한 연구들이 다른 주제로는 지식 기반으로 CPPS 설계를 지원하는 방법론 및 프레임워크(Francalanza, et al., 2017), 제조 분야 CPS 모델 및 설계 가이드라인(Babiceanu & Seker, 2016), CPS 관련 시스템 통합 프레임워크(Saldivar, et al., 2015), 다중 에이전트 기반의 CPPS에 의한 이기종 생산 시스템의 결합에 대한 설계 방법론(Vogel-Heuser, et al., 2014), 가상 공학 객체와 가상 공학 프로세스에 기반한 가상 시스템 설계 방법론(Shafiq, et al., 2015), CPS 자동화를 위한 엔지니어링 방법론 및 도구(Harrison, et al., 2016), 제조

설비를 위한 CPS 기반 기술 문서 관리에 관한 연구(Barthelmey, et al., 2014), 제조 분야 CPS 설계 및 구현을 위한 온톨로지 활용(Garetti, et al., 2015) 등을 들 수 있다. 현재까지는 다양한 관점에서 설계 방법론과 프레임워크에 대한 연구가 이루어지고 있기 때문에, 제조 분야 CPS에 공통적으로 적용되는 방법론과 프레임워크는 아직까지 확립되지 않았다고 판단된다. 따라서 제조 분야 CPS의 발전을 위해서는 향후 표준 프레임워크에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

CPS 아키텍처 측면에서는 제조 분야 CPS 설계 및 구현을 위한 5C 아키텍처를 제시한 연구(Lee, et al., 2015), 재구성 가능한 제조 시스템의 제어 및 검증을 위한 CPS 기반의 자동화 아키텍처(Brusafferri, et al., 2014), 산업 자동화 시스템 구현을 위한 CPS 아키텍처에 대한 연구(Tharamboulidis, 2015), 스마트 팩토리를 위한 인간 중심적 사이버-물리 참조 아키텍처에 관한 연구(Zamfirescu, et al., 2013), CPPS의 연결성 활성화를 위한 아키텍처 및 프레임워크에 관한 연구(Rojas, et al., 2017), CPPS를 위한 마켓 플레이스 아키텍처(Aguiar, et al., 2017) 등의 연구가 수행되었다. 제시된 여러 가지 아키텍처 중에서 5C 아키텍처(그림 7)가 제조 분야 CPS 연구에서 가장 많이 활용되고 있다. 5C 아키텍처는 CPS에서 데이터를 처리 하는 수준에 따라 5단계로 아키텍처를 구성하고 있는데, 제조 분야의 다양한 산업군에 보편적으로 적용할 수 있는 아키텍처이기 때문에 활용도가 높은 것으로 판단된다. 향후 인더스트리 4.0 및 CPS의



〈그림 7〉 CPS 적용을 위한 5C 아키텍처

적용이 정착되었을 때, 제조 분야 CPS의 적용 수준에 대한 진단 및 관련 프레임워크 수립 연구에 이리한 5C 아키텍처가 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 3) 모델링 및 툴 통합 분야

모델링 및 툴 통합 분야에서는 디지털 트윈 및 시뮬레이션과 작업자·조직과의 협업에 대한 연구가 가장 많이 수행되었고, 그 외에 생산 계획, 의사 결정, 데이터 모델, 미들웨어 등에 대한 연구들이 수행되었다.

제조 분야에서 핵심적인 SCM 및 생산계획에 관련된 연구에서 다른 주제로는 CPS에 기반한 생산 관리 (Schuh, et al., 2013), 물류 모델과 결합된 CPPS - 개선된 생산계획 및 제어를 위한 학습 공장 개념에 관한 연구(Seitz & Nyhuis, 2015), CPPS에서 생산 계획을 위한 모델링 접근방법 비교(Anis, et al., 2014) 등이 있다. CPS가 IoT, 빅데이터 등과 같은 기술의 급격한 발전에 따라 중요한 연구 주제로 활발히 연구되

고 있음에도 불구하고, CPS의 도입 및 정착이 지연되고 있는 가장 큰 문제 중 하나는 시장 및 현장의 변화에 따른 SCM 및 생산계획의 빠른 최적화가 실제적으로 어렵기 때문이다(Schuh, et al., 2013). 최근에 AI 등의 기술이 빠르게 발전함에 따라 제조 현장의 각 객체가 자율적이고 분산적으로 최적화되도록 하기 위한 연구들이 많이 이루어지고 있다. 이러한 연구와 실무에서의 실제 적용에서 실질적인 성과가 낮을 때 CPS의 도입이 가속화될 것으로 판단된다.

모델링 및 툴 통합 분야에서 또 다른 중요한 연구 주제는 CPS 시스템의 도입에 따른 조직과 인력의 변화 및 참여에 관한 내용이다. 관련 연구로는 사회적 CPS 연결 및 서비스 지향적 제조 패러다임에 관한 연구(Jiang, et al., 2016), 생산 네트워크에서 사회적 CPS에 관한 연구(Frazzon, et al., 2013), CPPS에서 인적 요소의 통합을 위한 모델 개발(Stern & Becker, 2017), 사이버 물리 생산 조립 공정에서 인간-로봇 협

업에 관한 연구(Wang, et al., 2017), CPPS에서 작업자 지원 및 오류 분석에 관한 연구(Zinnikus, et al., 2017), CPPS를 위한 학습 공장 및 스마트 프로덕션 교육에 관한 연구(Merkel, et al., 2017) 등이 있다. 현재까지는 개념적 모델 연구가 주를 이루고 있지만, 향후 CPS가 일반화되면 해당 환경에서 인력·조직의 역할 및 성과, 만족도 등에 대한 연구가 중요해 질 것으로 판단된다.

디지털 트윈 및 시뮬레이션 관련한 연구로는 인터스트리 4.0을 위한 CPPS 실현: 디지털 트윈에 관한 연구(Uhlemann, et al., 2017) 및 물리적 공간과 가상 공간의 동기화를 위한 웹 기반 가상 제조 공정 트윈 모델 설계 및 구현에 관한 연구(김경식 외, 2016), CPS 기반 공장의 미래 모델링 및 시뮬레이션에 관한 연구(Weyer, et al., 2016), 제조산업용 디지털 트윈 구현을 위한 CPS기반 가상-실제조설비 연동형 모델링 및 시뮬레이션 기술에 관한 연구(전인걸 외, 2017), 스마트 공장을 위한 CPPS(Cyber Physical Production System) 시뮬레이션에 관한 연구(박호철, 2014), CPS를 포함하는 생산 공정의 시뮬레이션에 관한 연구(Lachenmaier, et al., 2017) 등이 수행되었다. 디지털 트윈 및 시뮬레이션은 다른 분야 대비 특히 국내에서 많이 연구되고 있음을 볼 수 있다.

미들웨어 관련 연구로는 인터스트리4.0 기반 사이버물리시스템과 생산관리 시스템 간의 미들웨어 구축을 통한 수평적 통합(김대근·박만곤, 2014), 사이버-물리 생산 시스템 연동 미들웨어 프레임워크(전형국 외, 2017) 등 2건이 있는데, 모두 국내에서 이루어진 연구이다.

의사결정 및 데이터 모델에 관한 연구로는 CPPS에서의 지식 기반 의사 결정에 관한 연구(Klober-Koch, et al., 2017), CPPS에서 성과 평가 및 상태 기반 의사 결정에 관한 연구(Wang, et al., 2017), CPPS의 조립 공정을 구성하는 데이터 모델에 관한 연구(Strang & Anderl, 2014), 서비스 지향 제조 CPS를 위한 데이터 품질 관리(Song, et al., 2017) 등이 있다.

제조 CPS 적용에 대한 성과 및 문제점 진단 관련한 연구로는 CPPS 진단에 관한 연구(Niggemann & Lohweg, 2015), 지능형 제조 시스템을 위한 사이버 물리적 취약성 평가 접근법에 관한 연구(DeSmit, et al., 2017) 등이 있다. 제조 분야 CPS 적용이 증가할수록 진단 및 평가 관련 연구도 같이 증가할 것으로 예상된다.

그 외 다양한 주제의 모델링 및 툴 관련 연구가 수행되었으며, 관련 연구로는 개방형 지식 기반 생산 실행 시스템을 위한 CPS에 관한 연구(Iarovyi, et al., 2016), AutomationML 분석기를 활용한 CPPS 엔지니어링 지원(Sabou, et al., 2016)에 관한 연구, 공장 자동화 관점에서 CPS 벤치마킹(Niemueller, et al., 2013) 모델에 관한 연구, CPPS 개발을 위한 통합 제품, 프로세스 및 제조 시스템 개발 참조 모델에 관한 연구(Miranda, et al., 2017), CPS 기반 매칭을 통한 선택적 조립 및 적응형 제조 최적화에 관한 연구(Lanza, et al., 2015), 새로운 산업화를 위한 사이버 물리 제조 시스템에 관한 연구(Majstorović, et al., 2014), 산업용 CPS를 위한 자동화에 관한 연구(Dai, et al., 2015), 인터스트리 4.0 관점에서 CPPS 모델링에 관한 연구(Bocciarelli, et al., 2017), CPPS를 위한 온라인 학습 알고리즘에 관한 연구(Maier, 2014), 유연하고 분산된 CPPS를 위한 데모 모델 설계에 관한 연구(Egger, et al., 2017), 제조 시스템 설계를 위한 CPS 기반 멀티 스케일 접근법에 관한 연구(Penas, et al., 2017), CPPS에 대한 시각적 분석에 관한 연구(Post, et al., 2017), CPPS를 위한 패턴 기반 비즈니스 모델 개발에 관한 연구(Rudtsch, et al., 2014) 등이 있다.

위와 같이 다양한 주제에 대한 연구가 존재하는 것은 CPS가 특정 영역에 한정된 연구 주제가 아니라, 전 산업·기능에 적용 가능하며, 미래를 위해 반드시 확보해야 하는 핵심 기술이기 때문이다. 따라서 기존 연구 결과를 CPS관점으로 재해석, 활용하는 등, 여러 학제에 걸친(Multi Discipline) 다양한 CPS 관련 연구 들



이 향후에 더 증가할 것으로 예상된다.

#### 4) 기술 분야

기술 분야에 대한 연구의 주제로는 제조 CPS 분야에 적용 가능한 빅데이터, IoT 등이 있는데, 가장 연구가 많이 된 분야는 사이버 보안이다.

사이버 보안에 관한 연구들의 세부적인 주제를 살펴보면, 제조 시스템의 사이버 물리적 보안 문제에 관한 연구(Wells, et al., 2014), 제조 CPS의 사이버 보안을 위한 트로이 검출 및 부가 채널 분석에 관한 연구(Vincent, et al., 2015), CPS에서의 측면 지향적인 공격 모델링에 관한 연구(Wasicek, Armin, et al., 2014), 정보 유출을 고려한 안전한 사이버 물리 제조 시스템에 관한 연구(Chhetri, et al., 2017b) 등이 있다.

사이버 보안 외에 기술 분야에서 다루어진 세부 주제로는 CPS, 디지털 제조 및 인터스트리 4.0에서의 빅데이터(Wang & Wang, 2016), 사이버-물리 제조 클라우드: 아키텍처, 가상화, 통신 및 테스트베드(Liu, et al., 2017), CPPS에서의 임베디드 데이터베이스 기술(Bonci, et al., 2017), 사이버-물리 제조 시스템을 위한 IoT 모델(Foradis & Thramboulidis, 2017), 사이버 물리 제조 시스템에서 IoT 활용을 위한 UML 기반 접근 방식(Thramboulidis & Christoulakis, 2016), 사이버 물리 제품 제조(Wright, 2014), 적층 제조에 대한 CPS 적용(Chhetri & Faruque, 2017a), 자동화 솔루션에서 CPPS로 전환 시 중대한 개념 및 기술적 도전(Ribeiro & Bjorkman, 2017), 산업용 CPPS에서 무선 센서 네트워크를 위한 범용 파서(Silva, et al., 2017) 등이 있다.

빅데이터, IoT 등은 인터스트리 4.0 및 스마트 제조의 핵심 기술 요소이므로, 이에 관련된 기술적인 연구와 산업 현장에서의 실제적인 적용이 증가하고 있으나(Kang, et al., 2016), 제조 CPS 분야에 특화된 관련 기술에 대한 연구는 아직 초기 단계에 머물러 있다고 판단된다. 위에서 언급한 연구들도 대부분 관련 기술

을 소개하거나, 제조 분야 CPS에 관련 기술을 적용하기 위한 초기 연구라고 볼 수 있다. 향후 스마트 제조가 보편화되면서 현재보다 더 많은 연구가 수행될 것으로 예상된다.

사이버 보안은 CPS의 발전에 있어서 가장 중요한 도전 요소가 될 것이고, 관련 연구도 가장 활발하게 이루어질 것으로 기대된다. 실제 세계의 데이터가 사이버 시스템에 더 많이 축적되고, 이에 기반을 둔 가상 시스템이 실제 세계를 제어하는 CPS가 보편화될수록, 사이버 시스템에 대한 보안 위협이 증가할 것이고, 이에 따라 사이버 보안에 대한 연구도 증가할 것이기 때문이다.

#### 5) 유스케이스 분야

유스케이스 분야에 관련해서는 제조 CPS 분야에 적용 가능한 다양한 유스케이스들이 연구되고 있다. 유스케이스는 크게 다음과 같은 두 가지 관점에서 연구되고 있다. 첫 번째 관점은 CPS 관련 기술이나 개념을 검증하기 위한 어플리케이션 및 유스케이스이고, 두 번째 관점은 실제 제조 현장에 적용해 보는 유스케이스이다.

첫 번째 유형의 유스케이스에 대한 연구의 예로는 서비스 지향 아키텍처, 클라우드 제조, 적응형 제조 시스템, 모델 중심의 제조 시스템 등 4가지 유스케이스를 제시한 제조 분야 CPS 현황과 전망에 관한 연구(Wang, et al., 2015), 공작기계에 대한 사이버-물리 모듈, 가상 환경에서 매핑 및 동기화 된 실제 시스템 및 컨트롤러, 프로세스 계획의 자동 생성, CNC 워크샵에서 대체 라우팅을 통한 스케줄링, 제품 별 데이터를 활용한 적응형 스케줄링 등을 제시한 제조 분야 CPS 연구(Monostori, et al., 2016), 제조 서비스로서의 3D 프린터 유스케이스를 검토한 사이버 물리 제조 서비스 기반 스마트 제조 시스템에 관한 연구(Lu & Ju, 2017), 플러그 앤드 생산(Plug & Produce) 사례를 제시한 기술공학 적용에 관한 연구(Otto & Niggemann, 2014), 자동화(CPS가 작업자 가이드)

와 도구(작업자가 CPS 가이드) 시나리오를 제시한 제조 분야 CPS 경쟁력에 관한 연구(Dworschak & Zaiser, 2014)가 있다.

두 번째 유형의 유스케이스에 대한 연구로는 예측 생산 시스템을 위한 CPS 연구에서 차세대 생산 시스템을 위한 CPS 지원 볼 스크류 상태 모니터링 유스케이스를 제시한 연구(Lee, et al., 2017), 항공 우주, 자동차, 가전 및 산업 기계 등 네 가지 산업에서 CPS 도입을 통해 유연성과 적응성 측면에서 제조 시스템의 성능을 향상시키는 유스케이스를 보여준 연구(Fantini, et al., 2016)를 들 수 있다.

현재까지 연구에서 제시된 대부분의 유스케이스들은 실제 현장에서의 유스케이스보다는 기술 및 개념 검증에 위한 유스케이스가 주를 이루고 있다. 향후 CPS의 도입이 가속화되기 위해서는 현장에서 활용 가능한 다양한 유스케이스의 식별 및 확산에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

## 6) 기타 분야

기타에 속하는 문헌들은 제조 CPS의 개념 및 관련 기술, 특성, 도전 요소들에 대해 기존 연구를 정리하고, 향후 연구 방향을 제시한 리뷰 논문들이 주를 이루고 있다.

주요 논문으로 CPPS 개념 정립에 대해 기여한 CPPS: 제조 기술 및 과학으로부터의 기원에 관한 연구(Monostori, 2015), CPPS의 기원, 기대 및 연구 개발 과제(Monostori, 2014)를 들 수 있다.

Monostori(2015)에 의하면, CPPS는 컴퓨터 과학, 정보통신기술 및 제조과학기술의 발전에 의존하고 있으며, 제4차 산업 혁명의 기반인데, 위의 세 분야는 서로 긍정적인 영향을 미치면서 융합되고 있다. CPPS는 완전히 새로운 개념이 아니라, 기존 제조 분야에서 있었던 여러 혁신 활동, 예를 들어 지능형 제조 시스템, 생물학적(Biological) 제조 시스템, 재구성가능(Reconfigurable) 제조 시스템, 디지털 공장, 홀로닉(Holonic) 또는 에이전트 기반 제조 시스템, 협력적이

며 대응적인 제조 기업 등에 뿌리를 두고 있다. 그리고 향후 도전 요소로 적응형 자율 시스템, 협력적 생산 시스템, 동적 시스템의 식별 및 예측, 견고한 스케줄링, 실제 및 가상 시스템의 융합, 인간-기계(로봇) 협업 등을 지적하고 있다(Monostori, 2015)

이 외에 다음과 같은 다양한 연구들이 수행되었다. CPS가 제조 산업 서비스에 미치는 영향(Herterich, et al., 2015), 컴퓨터 통합 제조(CIM), CPS, 클라우드 생산 등의 개념 및 관계(Yu, et al., 2015), 공급망 관리에서 CPS의 역할(Klotzer & Pflaum, 2015), CPS 기반 생산 시스템에서 디지털 트윈의 역할(Negri, et al., 2017), 제조에서 CPS를 가능하게 하는 기술 표준 및 특허 포트폴리오에 관한 리뷰(Trappey, et al., 2016), CPS 기반 제조 시스템 최적화(Kim & Park, 2017), 스마트 공장과 사이버물리시스템 기술(노상도, 2016), 효과적인 사이버 물리 제조 시스템 환경 구축을 위한 제조 라인 KPI(강선가·박진우, 2016), 가상-실공장 연동을 위한 CPS기반 스마트 공장 기술(전인걸 외, 2016), 우에다 칸지 교수의 유산에 기반한 사이버 물리 제조(Váncza & Monostori, 2017) 등이 있다.

## 2. 일반 기준에 의한 분석 결과

### 1) 논문 발간 년도

2006년 미국의 국립과학재단(National Science Foundation: NSF)에서 CPS라는 용어가 처음 사용되고 연구되기 시작한 이후(Lee, 2008; Wang, et al., 2015), 제조 관련 연구에서 CPS가 연구되기 시작한 것은 2013년부터로 판단된다. 다음의 <표 3>에서 볼 수 있는 바와 같이, 제조 분야 CPS 연구가 2013년에 처음 발표되어, 그 다음부터 비교적 일정한 수준으로 연구가 진행되다가, 2017년에 이전에 비해 크게 증가한 것을 알 수 있다. 이것은 인터스트리 4.0과 스마트 제조 등이 국가 차원의 혁신 의제로 자리 잡으면서 산업계에서 많은 투자가 이루어진 시점과 유사한 패턴을

〈표 3〉 발간 연도

	합계		해외		국내	
	개수	비율	개수	비율	개수	비율
2013	3	4%	3	4%	0	0%
2014	17	21%	15	20%	2	25%
2015	15	18%	15	20%	0	0%
2016	15	18%	11	15%	4	50%
2017	32	39%	30	41%	2	25%
합계	82	100%	74	100%	8	100%

〈표 4〉 논문 발간 지역

합계	해외								국내
	소계		미국		EMEA		기타		
82	74	100%	14	19%	51	69%	9	12%	8

보이고 있다.

국내의 경우를 보면, 2014년도에 최초의 논문이 발표되었으나, 그 이후에 연구편수가 크게 증가하지 않고 있다. 결론적으로, 제조 분야 CPS 연구는 초기 단계로 볼 수 있고, 해외에서 이 분야의 연구가 활발히 이루어지고 있는데 반해서, 국내의 경우에는 아직까지 연구가 활성화되어 있지 않은 것으로 보인다.

## 2) 논문 발간 지역(해외)

국내에서 발간된 8개의 논문 외 해외에서 발간된 논문을 미국 (US), 유럽·중동·아프리카(Europe, Middle East and Africa: EMEA), 기타(아시아 및 중남미, 오세아니아) 지역으로 구분하여 분석하였다(〈표 4〉 참조).

분석 결과, 유럽·아프리카 지역의 논문이 69%로 압도적인 비중을 차지하고 있고, 그 다음으로 미국이 약 19%, 아시아를 포함한 기타 지역이 12%를 차지하고 있다. 가장 활발하게 연구가 이루어지고 있는 유럽·아프리카 지역의 논문 51편 중 독일 논문이 절반 정도(25편)로 특히 독일이 제조 분야 CPS 연구에 있어서 주도적인 역할을 수행하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 독일이 제조 강국이며, 인터스트리 4.0을

주도하는 국가라는 사실을 다시 한 번 확인해 주는 증거라고 판단된다.

그런데 미국의 연구가 차지하는 비중이 19%에 불과한 결과는 CPS라는 개념을 최초로 제시한 국가가 미국이고, IoT, 빅데이터, 임베디드 시스템 등 일반적인 CPS 관련 기술 분야에서 지속적으로 연구를 주도하고 있는 사실을 감안하면 놀라운 결과이다. 이러한 결과는 일반적인 CPS 기술에 대한 연구는 미국이 주도하고 있지만, 제조 분야에 CPS를 적용하는 분야에 대한 연구는 독일이 주도하고 있는 것으로 해석할 수 있다. 또한 아시아를 포함한 기타 지역은 제조 CPS에 대한 연구가 미흡한 결과를 나타내고 있다. 아시아 지역은 중국 및 일본을 포함하고 있고, 특히 중국에서는 ‘제조 2025’라는 중국판 인터스트리 4.0을 중요 국가 의제로 추진하는 것을 고려할 때 이는 의외의 결과이나, 중국어 논문은 본 연구에 포함되지 않았기 때문인 것으로 추측된다.

## 3) 전반적인 연구 접근방법

제조 분야 CPS 연구의 전반적인 연구 접근방법(실증·비실증)을 분석한 결과를 보면(〈표 5〉), 전반적으

〈표 5〉 전반적인 연구 방법

	합계		미국		EMEA		기타		국내	
실증	28	34%	11	79%	15	29%	1	11%	1	13%
비실증	54	66%	3	21%	36	71%	8	89%	7	87%
합계	82	100%	14	100%	51	100%	9	100%	8	100%

로 비실증 연구의 비중(66%)이 실증 연구 연구(34%)에 비해 매우 높다는 것을 알 수 있다. 이것은 CPS, 특히 제조 분야의 CPS 연구가 초기 단계이므로 CPPS 등 제조 분야 CPS 개념 및 주요 특성, 설계 방법론, 모델·프레임워크를 수립하는 작업이 먼저 선행되어야 하기 때문으로 판단된다. 실증연구의 경우에도 서베이 연구는 볼 수 없으며, 사례 연구나 현상기술, 실험 등의 연구가 중심인 것도 동일한 이유로 판단된다.

국내외 현황을 비교 분석해 보면, 국내의 실증 연구 비중(13%)이 해외(34%)에 비해 좀 더 낮다. 이러한 현상의 원인으로는 앞에서 언급한 바와 같이, 국내의 연구가 아직 해외에 비해 성숙도가 낮기 때문으로 볼 수 있다.

특기할 사항은 미국의 경우, 실증 연구의 연구의 비중이 80% 정도로 매우 높게 나타났고, 이것은 유럽의 실증 연구 비중(29%)과는 크게 대비되는 결과이다. 이것은 일반적으로 미국의 학술지들이 실증주의에 더 높은 가치를 두는 반면, 유럽의 학술지들은 비실증 연구에도 높은 가치를 부여하는 현상을 극명하게 보여주는 결과이다(Palvia, et al., 2017).

#### 4) 세부 연구 방법

먼저, 비실증 연구들의 세부적인 연구방법을 분석한 결과를 보면(〈표 6〉), 전체적으로 개념적 모델의 비중이 39%, 수리·공학적 모델 및 프레임워크에 관한 비중이 28%, 튜토리얼·리뷰 논문이 33%로 세부 방법별로 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 개념적 모델에 관한 연구는 주로 CPS를 제조 분야에 적용하기 위한 상위 수준의 아키텍처나 프레임워크 등과 관련이 있고, 수리·공학적 모델 및 프레임워크는 거시적인 CPS가 아닌 보안 등 특정 기술 요소나 기능 요소에 대한 수리·공학적인 모델 및 프레임워크 수립과 관련되어 있다. 튜토리얼·리뷰 논문은 CPS가 아직 신생 분야이고, 연관된 기술이 IoT, 빅데이터, AI, 디지털 트윈 등 광범위하므로 최근 연구 동향 및 향후 연구 방향 등을 주로 제시하고 있다.

유럽의 경우 개념적 모델과 수리적 모델, 튜토리얼·리뷰 논문이 비교적 균형을 이루고 있는데 반해서, 미국에서는 수리·공학적 모델에 대한 연구가 없음을 볼 수 있다. 이는 미국의 경우, 제조 분야에 CPS를 적용하기 위한 방법론 및 모델에 대한 연구보다는 기술과 사이버 보안 중심의 실증 연구에 주력하기 때문인 것

〈표 6〉 비실증 세부 연구 방법

	합계		미국		EMEA		기타		국내	
개념 모델	21	39%	2	67%	17	47%	2	25%	0	0%
수리 모델	15	28%	0	0%	8	22%	3	38%	4	57%
튜토리얼·리뷰	18	33%	1	33%	11	31%	3	37%	3	43%
합계	54	100%	3	100%	36	100%	8	100%	7	100%

〈표 7〉 실증 세부 연구 방법

	합계		미국		EMEA		기타		국내	
실험	9	32%	4	36%	4	27%	0	0%	1	100%
서베이	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
사례 연구	14	50%	6	55%	7	46%	1	100%	0	0%
현상 기술	5	18%	1	9%	4	27%	0	0%	0	0%
합계	28	100%	11	100%	15	100%	1	100%	1	100%

으로 판단된다. 국내의 경우에는 개념적 모델에 대한 연구보다는 특정 기술 등에 대한 수리·공학적 모델에 대한 연구와 해외 사례에 대한 튜토리얼·리뷰 논문의 비중이 높게 나타났다.

실증 연구들의 세부 연구방법을 보면(〈표 7〉), 전체적으로 사례 연구가 50% 정도로 큰 비중을 나타내고 있고, 다음으로 실험(32%), 현상기술(18%) 등의 순으로 나타났다. 특기할 만한 사항은 서베이 연구가 전혀 없다는 점인데, 이것은 CPS가 실제 현장에서 적용되기 시작한 시기가 얼마 되지 않아 일부 선도적인 제조 현장 외에는 CPS가 도입되지 않았기 때문에, CPS를 주제로 서베이를 실시할 모집단이 아직 부족한 상태이기 때문인 것으로 추측된다. 그 외 실험 연구도 32%로 CPS의 개념, 모델, 기술 등을 실증적으로 검증하기 위한 연구들이 비교적 많이 수행되고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 미국에서는 실험과 사례 연구 중심의 연구가 활발한데 반해서, 유럽에서는 특정 기술이나 프로젝트에 대한 기술적인 연구가 상대적으로 활발함을 볼 수 있다.

## V. 결론

제조 CPS에 대한 82개 문헌 분석을 통해 인터스트리 4.0 및 스마트 제조 추진의 핵심 요소인 제조 CPS 연구 동향을 분석하고, 향후 연구 및 실무에 도움을 줄 수 있는 연구 방향을 제시하였다. 총 82편의 논문(해외 74편, 국내 8편)을 대상으로 연구 주제 및 일반 기

준에 따라 분석을 실시하였다.

먼저, 연구 주제에 관련된 주요한 결과를 정리하면 다음과 같다.

연구 주제 측면에서 설계 방법론과 모델링·툴 통합이 가장 많이 연구되고 있는데, 이것은 아직 제조 분야의 CPS 적용이 초기 단계이기 때문에 구체적인 기술이나 활용 문제보다 이러한 주제에 집중하고 있는 것으로 판단된다. 설계 방법론에 관한 연구의 경우, 현재까지 다양한 관점에서 연구가 수행되고 있기 때문에, 제조 분야 CPS의 공통적인 방법론·프레임워크는 존재하지 않으므로 향후 연구에서는 표준 프레임워크에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. CPS 아키텍처 측면에서는 다양한 산업군에 보편적으로 적용될 수 있는 5C 아키텍처(〈그림 7〉)가 제조 CPS 연구에서 가장 많이 활용되고 있고, 향후 CPS의 적용 수준 진단 등의 연구에서도 활용도가 높을 것으로 예상된다.

모델링 및 툴 통합 분야에서는 작업자·조직과의 협업, 생산 계획·시뮬레이션, 의사 결정, 디지털 트윈, 데이터 모델, 미들웨어 등에 대한 연구들이 수행되었고, 이외에도 중요한 주제는 CPS의 도입이 조직·인력에 미치는 영향으로서, 현재까지는 개념적 모델 수준의 연구에 머물고 있지만, 인력·조직의 역할 및 성과, 만족도 등이 중요한 연구 주제로 부상할 것으로 예상된다.

기술 분야에서는 인터스트리 4.0 및 스마트 제조의 핵심 기술 요소인 빅데이터, IoT 등에 대한 연구가 수행되고 있지만, 아직까지 관련 기술의 소개 수준의 초



기 연구에 머물고 있다. 향후 스마트 제조가 확산되면서, 학술적으로도 현재보다 심도 있는 연구가 수행될 것으로 예상된다. 사이버 보안도 현재 많은 연구가 수행되고 있지만, CPS가 보편화될수록 사이버 시스템에 대한 보안 위협이 증가할 것이기 때문에 이 분야의 연구도 더욱 증가할 것으로 판단된다.

제조 CPS 분야에 적용 가능한 유스케이스에 대한 연구는 아직까지 실제 현장에서의 유스케이스보다는 기술 및 개념의 검증에 위한 유스케이스가 주를 이루고 있다. 현장에서 활용 가능한 다양한 유스케이스를 식별하는 연구를 통해서 CPS의 도입에 도움이 될 수 있는 연구가 향후 필요한 것으로 판단된다.

다음에서는 일반적인 기준에 따라 분석한 결과를 정리한다.

논문의 발간년도 - 제조 분야 CPS에 대한 연구는 2013년에 처음 발표되어, 비교적 일정한 수준으로 유지되다가, 2017년부터 이전에 비해 크게 증가한 것을 알 수 있다. 이는 인터스트리 4.0과 스마트 제조 등이 각 국가의 혁신 의제로 자리 잡으면서 산업계 및 학계에서 많은 투자가 이루어진 시점과 유사한 패턴을 보이고 있다.

논문의 연구 지역 - 유럽·아프리카 지역의 논문이 약 70% 정도로 압도적인 비중을 차지하고 있다. 유럽 중에서도 특히 독일이 제조 분야 CPS 연구에 있어서 주도적인 역할을 수행하고 있는 것으로 나타났다.

연구의 전반적인 접근방법(실증·비실증) - 제조 분야 CPS 분야 연구의 전반적인 연구 접근방법은 비실증 연구의 비중(66%)이 실증 연구에 비해 매우 높다. 이것은 CPS, 특히 제조 분야의 CPS 연구가 초기 단계이므로 CPPS 등 제조 분야 CPS 개념 및 주요 특성, 설계 방법론 및 모델·프레임워크의 수립 등 비실증적인 연구가 먼저 선행되어야 하기 때문으로 판단된다. 국내의 현황을 비교 분석해 보면, 국내의 실증 연구 비중(13%)이 해외(34%)에 비해 좀 더 낮은데, 그 원인으로서는 국내의 연구가 아직 해외에 비해 성숙도가 낮기 때문으로 볼 수 있다.

세부 연구방법(비실증 연구) - 전체적으로 개념적 모델(39%), 수리·공학적 모델 및 프레임워크(28%), 튜토리얼·리뷰(33%) 등 세부 방법별로 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 국내의 경우에는 개념적 모델에 대한 연구보다는 특정 기술 등에 대한 수리·공학적 모델에 대한 연구와 해외 사례에 대한 튜토리얼·리뷰 논문의 비중이 높게 나타났다.

세부 연구방법 (실증 연구) - 전체적으로 사례 연구가 높은 비중(약 50%)을 나타내고 있고, 다음으로 실험(32%), 현상기술(18%) 등의 순으로 나타났다. 또한 미국과 유럽의 전반적인 연구 경향과 유사하게 미국에서는 실험과 사례 연구 중심의 연구가 활발한데 반해서, 유럽에서는 특정 기술이나 프로젝트에 대한 기술적인 연구가 상대적으로 활발함을 볼 수 있다.

다음에서는 분석 결과를 바탕으로 제조 분야 CPS 연구에 대하여 각 주제 별로 고려해야 할 시사점과 향후 연구 방향을 제시한다.

먼저, 설계 방법론 분야의 경우, 첫째, 기존에 제시된 다양한 관점의 방법론과 프레임워크를 바탕으로 제조 CPS분야에 대한 공통의 방법론과 프레임워크를 제시하는 연구가 필요하다. 둘째, 현재까지 수행된 대부분의 연구는 새로운 방법론 및 프레임워크, 아키텍처를 제시하는 것이 중심이고, CPS 개념이 반영된 시스템의 구축 및 운영에 대한 연구는 미흡한 것이 현실이다. 하지만, CPS라는 개념을 생각해 보면 기존에 구축되어 있는 시스템들도 일부 CPS의 개념과 특성을 가지고 있는 것이 사실이다. 따라서 이 분야 연구의 성숙도를 높이기 위해서는 기존의 시스템을 포함하여 CPS 시스템을 실제로 구현하고 운영하는데 관한 연구가 필요하다. 셋째, 제조 CPS, 이에 기반한 인터스트리 4.0 및 스마트 제조의 빠른 실행을 위해서는 현재 수준을 진단하고 개선 방향을 제시하는 것이 중요하므로, 기존 연구들의 결과를 반영하여 제조 CPS에 대한 프레임워크 제시 및 이에 기반한 진단 방법론 개발에 관한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

또한 향후 CPS 구축 및 운영 사례가 많아지고, 해당

분야에 대한 연구가 활발해지면 시스템 수명 주기 관점의 연구가 확대되고 중요해질 것으로 판단된다. 시스템 수명 주기 관점에서 '설계', '구축', '운영' 단계로 나누어 분석하거나, 데이터 수준에 따른 분석도 가능할 수 있다. 데이터 처리 및 활용 관점에서는 앞에서 언급한 5C 아키텍처에 기반한 프레임워크 및 진단 방법론 개발에 관한 연구가 효과적이라고 판단된다. 데이터 관점에서 접근하면, 대부분의 제조업체가 보유한 시스템 및 가치 사슬에 대해 제조 CPS관점에서 진단이 가능할 것으로 판단된다.

세부 모델 및 툴 측면에서는 전체 제조 가치 사슬 및 CPS의 두뇌에 해당하는 생산계획 및 SCM 모델 및 툴에 대한 연구가 중요하고 향후 많은 투자가 이루어져야 할 것이다. CPS, 인터스트리 4.0, 스마트 제조에서 공통적으로 나타나는 중요한 특성은 분산, 상호운용성, 개방형이다. 하지만, 현재까지 구축되어 운영 중인 대부분의 기업 내 시스템은 계층적으로 운영되고 있고, 계층적으로 운영될 때에는 물리적인 세계의 변화를 사이버 시스템에서 빠르게 대응하기 어려울 수밖에 없다. 따라서 최근 급격하게 발전하고 있는 AI, 클라우드, 빅데이터, IoT등의 기술을 적용하여 제조 현장의 각 객체가 자율적이고 분산적으로 운영될 수 있도록 하는데 기여할 수 있는 연구가 중요하다고 판단된다.

또 하나 중요한 연구 주제는 CPS 시스템 도입에 따른 조직과 인력의 변화 및 참여에 관한 문제이다. AI 등 기술의 발전에 따라 점차 작업자의 개입이 최소화된 자동화된 시스템 운영이 발전의 추세인 것은 분명한 사실이다. 그러나, 이와 동시에 당분간은 제조 CPS 운영에 있어서 작업자들과 조직의 역할이 매우 중요하고, CPS와 인적 요소를 통합한 모델을 개발하는 것이 중요하다. 이미 관련 연구가 북미와 유럽에서는 중요하게 다루어지고 있는데, 향후 국내에서도 관련 연구가 보강되어야 할 것으로 판단된다.

연구 방법론 측면에서 보면, 현재까지는 비실증 연구의 비중이 매우 높은 편이 높다. 그러나, 제조 CPS의 구축 및 운영 사례가 증가하면 그 운영 과정에서 발

생하는 문제나 성과를 측정하기 위한 수명주기 관점의 CPS 프레임워크 및 진단 도구 개발과 그에 기반한 실증 연구 등이 수행되어, 이 분야의 이론적인 진보뿐만 아니라 실무에 기여할 수 있는 연구가 필요할 것이다.

국내에서 현재까지 수행된 제조 분야 CPS 연구는 주로 시뮬레이션, 미들웨어, 연동 등 모델링 및 통합 분야에 집중되어 있다. 국내의 CPS 연구를 활성화하고, 실제 현장에서 성과를 내기 위해서는 유럽이나 북미와 같이 현장 중심의 다양한 유스케이스 발굴에 관한 연구가 필요하다고 판단된다. 자율성, 상호운용성, 분산, 지능화 등 CPS의 주요 개념을 적용하여 업무를 개선할 수 있는 유스케이스의 발굴이 필요하다.

이러한 유스케이스 발굴은 학계만의 연구로는 한계가 있고, 산업계와 협력하여 진행해야 의미 있는 성과가 나올 수 있다. 특히 독일을 중심으로 한 유럽 지역에서 진행되는 다양한 CPS, 인터스트리 4.0 관련 연구 및 프로젝트를 참고할 필요가 있다고 본다. 인터스트리 4.0, 스마트 제조에 관련하여 정부가 지원하는 연구 과제를 평가할 때, CPS 개념 및 원칙 적용을 평가 기준으로 활용하는 것도 도움이 될 수 있을 것이다.

유스케이스 발굴 및 연구가 활성화되면 관련 기술이나 방법론, 모델링 및 툴에 대한 연구도 보다 활성화되고, 제조 현장에서 CPS 개념에 기반한 스마트 제조 또한 가속화될 것으로 판단된다.

## ■ 참고문헌

- 강선가·박진우 (2016). "효과적인 사이버 물리 제조 시스템 환경 구축을 위한 제조 라인 KPI 연구." 한국경영과학회 학술대회논문집, 849-857.
- 김경식·임병목·최성수·지수영·류관희 (2016). "물리적 공간과 가상공간의 동기화를 위한 웹 기반 가상 제조공정 트윈 모델 설계 및 구현." 「한국정보기술학회논문지」, 14(2): 115-124.
- 김대근·박만곤 (2014). "인터스트리 4.0 기반 사이버물리시스템과 생산관리시스템간의 미들웨어 구축을 통한 수평적 통합." 「멀티미디어학회논문지」, 17(12):

- 1484-1493.
- 김병운 (2016). "인공지능 동향분석과 국가차원 정책제언." 「정보화정책」, 23(1): 74-93.
- 노상도 (2016). "스마트팩토리와 사이버물리시스템 기술." 「한국통신학회지 (정보와통신)」, 33(11): 3-7.
- 박호철·김기형·이주연·왕지남·김강석·손태식 (2014). "스마트 팩토리를 위한 CPPS (Cyber Physical Production System)." 한국정보과학회 학술발표논문집, 838-840.
- 백승익·임규진·여등승 (2016). "인공지능과 사회의 변화." 「정보화정책」, 23(4): 3-23.
- 전인걸·강성주·전재호·이수형 (2016). "가상-실공장 연동을 위한 CPS 기반 스마트팩토리 기술." 「한국통신학회지 (정보와통신)」, 33(11): 8-15.
- 전인걸·강성주·전재호·유미선·하수정 (2017). "제조산업용 디지털트윈 구현을 위한 CPS 기반 가상-실제조설비 연동형 모델링 및 시뮬레이션 기술." 대한전자공학회 학술대회, 1716-1717.
- 전형국·이수형·전인걸 (2017). "사이버-물리 생산 시스템 연동 미들웨어 프레임워크." 한국통신학회 학술대회논문집, 770-771.
- 주정민·나형진 (2015). "사물인터넷 (IoT) 에 관한 국내 연구 동향 분석." 「정보화정책」, 22(3): 3-15.
- Aguiar, S., Pinto, R., Reis, J. & Goncalves, G. M. (2017). "A Marketplace for Cyber-Physical Production Systems: Architecture and Key Enablers." In *INTELLI 2017, The Sixth International Conference on Intelligent Systems and Applications*.
- Anderson, A. (2011). "Report to the President on Ensuring American Leadership in Advanced Manufacturing." *Executive office of the President*.
- Anis, A., Schafer, W. & Niggemann, O. (2014). "A comparison of modeling approaches for planning in cyber physical production systems." In *Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), 2014 IEEE*, 1-8.
- Babiceanu, R. F. & Seker, R. (2016). "Big Data and virtualization for manufacturing cyber-physical systems: A survey of the current status and future outlook." *Computers in Industry*, 81: 128-137.
- Barthelmey, A., Storkle, D., Kuhlenkotter, B. & Deuse, J. (2014). "Cyber physical systems for life cycle continuous technical documentation of manufacturing facilities." *Procedia CIRP*, 17: 207-211.
- Bocciarelli, P., D'Ambrogio, A., Giglio, A. & Paglia, E. (2017). "A BPMN extension for modeling Cyber-Physical-Production-Systems in the context of Industry 4.0." In *Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2017 IEEE 14th International Conference*, 599-604.
- Bonci, A., Pirani, M. & Longhi, S. (2017). "An embedded database technology perspective in cyber-physical production systems." *Procedia Manufacturing*, 11: 830-837.
- Brusaferrri, A., Ballarino, A., Cavadini, F. A., Manzocchi, D. & Mazzolini, M. (2014, September). "CPS-based hierarchical and self-similar automation architecture for the control and verification of reconfigurable manufacturing systems." In *Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), 2014 IEEE*, 1-8.
- Chhetri, S. R. & Al Faruque, M. A. (2017a). "Side channels of cyber-physical systems: Case study in additive manufacturing." *IEEE Design & Test*, 34(4): 18-25.
- Chhetri, S. R., Faezi, S. & Faruque, M. A. A. (2017b). "Fix the leak!: an information leakage aware secured cyber-physical manufacturing system." In *Proceedings of the Conference on Design, Automation & Test in Europe*, 1412-1417.
- Dai, W., Vyatkin, V., Pang, C. & Christensen, J. H. (2015). "Time-stamped event based execution semantics for industrial cyber-physical systems." In *Industrial Informatics (INDIN), 2015 IEEE 13th International Conference*, 1263-1268.
- DeSmit, Z., Elhabashy, A. E., Wells, L. J. & Camelio, J. A. (2017). "An approach to cyber-physical vulnerability assessment for intelligent manufacturing systems." *Journal of*

- Manufacturing Systems*, 43: 339-351.
- Dworschak, B. & Zaiser, H. (2014). "Competences for cyber-physical systems in manufacturing—first findings and scenarios." *Procedia CIRP*, 25: 345-350.
- Egger, G., Rauch, E., Matt, D. T. & Brown, C. A. (2017). "(Re-) Design of a Demonstration Model for a Flexible and Decentralized Cyber-Physical Production System (CPPS)." *In MATEC Web of Conferences*, 127: 01016
- Fantini, P., Tavola, G., Taisch, M., Barbosa, J., Leitao, P., Liu, Y. & Lohse, N. (2016). "Exploring the integration of the human as a flexibility factor in CPS enabled manufacturing environments: Methodology and results." *In Industrial Electronics Society, IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE*, 5711-5716.
- Fisher, A., Jacobson, C. A., Lee, E. A., Murray, R. M., Sangiovanni-Vincentelli, A. & Scholte, E. (2014). "Industrial cyber-physical systems—iCyPhy." *In Complex Systems Design & Management*, 21-37.
- Foradis, T. & Thramboulidis, K. (2017). "From Mechatronic Components to Industrial Automation Things—An IoT model for cyber-physical manufacturing systems." *Journal of Software Engineering and Applications*, 10(08): 734-753.
- Francalanza, E., Borg, J. & Constantinescu, C. (2017). "A knowledge-based tool for designing cyber physical production systems." *Computers in Industry*, 84: 39-58.
- Frazzon, E. M., Hartmann, J., Makuschewitz, T. & Scholz-Reiter, B. (2013). "Towards socio-cyber-physical systems in production networks." *Procedia Cirp*, 7: 49-54.
- Garetti, M., Fumagalli, L. & Negri, E. (2015). "Role of ontologies for CPS implementation in manufacturing." *Management and Production Engineering Review*, 6(4): 26-32.
- Gunes, V., Peter, S., Givargis, T. & Vahid, F. (2014). "A survey on concepts, applications, and challenges in cyber-physical systems." *KSII Transactions on Internet & Information Systems*, 8(12).
- Harrison, R., Vera, D. & Ahmad, B. (2016). "Engineering methods and tools for cyber-physical automation systems." *Proceedings of the IEEE*, 104(5): 973-985.
- Hermann, M., Pentek, T. & Otto, B. (2016, January). "Design principles for industrie 4.0 scenarios." *2016 49th Hawaii International Conference in System Sciences (HICSS)*, 3928-3937
- Horvath, I. & Gerritsen, B. H. (2012). Cyber-physical systems: Concepts, technologies and implementation principles. *In Proceedings of TMCE*, Vol. 1: 7-11.
- Herterich, M. M., Uebernickel, F. & Brenner, W. (2015). "The impact of cyber-physical systems on industrial services in manufacturing." *Procedia CIRP*, 30: 323-328.
- Iarovyi, S., Mohammed, W. M., Lobov, A., Ferrer, B. R. & Lastra, J. L. M. (2016). "Cyber-physical systems for open-knowledge-driven manufacturing execution systems." *Proceedings of the IEEE*, 104(5): 1142-1154.
- Jiang, P., Ding, K. & Leng, J. (2016). "Towards a cyber-physical-social-connected and service-oriented manufacturing paradigm: Social Manufacturing." *Manufacturing Letters*, 7: 15-21.
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A. & Wahlster, W. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry* final report of the Industrie 4.0 Working Group. Forschungsunion.
- Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi, S., Kim, H., Park, J. H., Son, J. Y. & Do Noh, S. (2016). "Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(1): 111-



- 128.
- Kieseberg, P. & Weippl, E. (2018). "Security Challenges in Cyber-Physical Production Systems." *In International Conference on Software Quality*, 3-16.
- Kim, S. & Park, S. (2017). "CPS (Cyber Physical System) based Manufacturing System Optimization." *Procedia computer science*, 122: 518-524.
- Klober-Koch, J., Pielmeier, J., Grimm, S., Brandt, M. M., Schneider, M. & Reinhart, G. (2017). "Knowledge-Based Decision Making in a Cyber-Physical Production Scenario." *Procedia Manufacturing*, 9: 167-174.
- Klotzer, C. & Pflaum, A. (2015). "Cyber-physical systems (CPS) in supply chain management: a definitional approach." *Proceedings of NOFOMA 2015*.
- Lachenmaier, J. F., Lasi, H. & Kemper, H. G. (2017). "Simulation of production processes involving cyber-physical systems." *Procedia CIRP*, 62: 577-582.
- Lanza, G., Haefner, B. & Kraemer, A. (2015). "Optimization of selective assembly and adaptive manufacturing by means of cyber-physical system based matching." *CIRP Annals*, 64(1): 399-402.
- Lee, E. A. (2008). "Cyber physical systems: Design challenges." *In 11th IEEE Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 363-369
- Lee, J., Bagheri, B. & Kao, H. A. (2015). "A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems." *Manufacturing Letters*, 3: 18-23.
- Lee, J., Jin, C. & Bagheri, B. (2017). "Cyber physical systems for predictive production systems." *Production Engineering*, 11(2): 155-165.
- Liu, X. F., Shahriar, M. R., Al Sunny, S. N., Leu, M. C. & Hu, L. (2017). "Cyber-physical manufacturing cloud: Architecture, virtualization, communication, and testbed." *Journal of Manufacturing Systems*, 43: 352-364.
- Lu, Y. & Ju, F. (2017). "Smart manufacturing systems based on Cyber-physical Manufacturing Services (CPMS)." *IFAC-PapersOnLine*, 50(1): 15883-15889.
- Maier, A. (2014). "Online passive learning of timed automata for cyber-physical production systems." *In Industrial Informatics (INDIN), 2014 12th IEEE International Conference*, 60-66.
- Majstorovic, V. D., Macuzic, J., Sibalija, T. V., Ercevic, M. & Ercevic, B. (2014). "Cyber-Physical Manufacturing Systems-Towards New Industrialization." *CIP-Каталогизација у публикацији* (2014), 113.
- Merkel, L., Atug, J., Merhar, L., Schultz, C., Braunreuther, S. & Reinhart, G. (2017). "Teaching smart production: an insight into the learning factory for cyber-physical production systems (LVP)." *Procedia Manufacturing*, 9: 269-274.
- Miranda, J., Perez-Rodriguez, R., Borja, V., Wright, P. K. & Molina, A. (2017). "Integrated Product, Process and Manufacturing System Development Reference Model to develop Cyber-Physical Production Systems-The Sensing, Smart and Sustainable Microfactory Case Study." *IFAC-PapersOnLine*, 50(1): 13065-13071.
- Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D. & Wuest, T. (2017). "Smart manufacturing: characteristics, technologies and enabling factors." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 0954405417736547.
- Monostori, L. (2014). "Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges." *Procedia Cirp*, 17: 9-13.
- Monostori, L. (2015). "Cyber-physical production systems: roots from manufacturing science and technology." *at-Automatisierungstechnik*, 63(10): 766-776.
- Monostori, L., Kadar, B., Bauernhansl, T., Kondoh,



- S., Kumara, S., Reinhart, G. & Ueda, K. (2016). "Cyber-physical systems in manufacturing." *CIRP Annals*, 65(2): 621-641.
- Negri, E., Fumagalli, L. & Macchi, M. (2017). "A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems." *Procedia Manufacturing*, 11: 939-948.
- Niemueller, T., Ewert, D., Reuter, S., Karras, U., Ferrein, A., Jeschke, S. & Lakemeyer, G. (2013). "Towards benchmarking cyber-physical systems in factory automation scenarios." *In Annual Conference on Artificial Intelligence*, 296-299.
- Niggemann, O. & Lohweg, V. (2015). "On the diagnosis of cyber-physical production systems: state-of-the-art and research agenda." *In Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 4119-4126.
- Otto, J., Henning, S. & Niggemann, O. (2014). "Why cyber-physical production systems need a descriptive engineering approach-a case study in plug & produce." *Procedia Technology*, 15: 295-302.
- Palvia, P., YK, C. P., Kakhki, M. D., Ghoshal, T., Uppala, V. & Wang, W. (2017). "A decade plus long introspection of research published in Information & Management." *Information & Management*, 54(2): 218-227.
- Penas, O., Plateaux, R., Patalano, S. & Hammadi, M. (2017). "Multi-scale approach from mechatronic to Cyber-Physical Systems for the design of manufacturing systems." *Computers in Industry*, 86: 52-69.
- Post, T., Ilsen, R., Hamann, B., Hagen, H. & Aurich, J. C. (2017). "User-guided visual analysis of cyber-physical production systems." *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 17(2): 021005.
- Radziwon, A., Bilberg, A., Bogers, M. & Madsen, E. S. (2014). "The smart factory: exploring adaptive and flexible manufacturing solutions." *Procedia engineering*, 69: 1184-1190.
- Ribeiro, L. & Bjorkman, M. (2017). "Transitioning from standard automation solutions to cyber-physical production systems: an assessment of critical conceptual and technical challenges." *IEEE Systems Journal*, 1-13.
- Rojas, R. A., Rauch, E., Vidoni, R. & Matt, D. T. (2017). "Enabling Connectivity of Cyber-Physical Production Systems: A Conceptual Framework." *Procedia Manufacturing*, 11: 822-829.
- Rudtsch, V., Gausemeier, J., Gesing, J., Mittag, T. & Peter, S. (2014). "Pattern-based business model development for cyber-physical production systems." *Procedia CIRP*, 25: 313-319.
- Sabou, M., Ekaputra, F., Kovalenko, O. & Biffl, S. (2016). "Supporting the engineering of cyber-physical production systems with the AutomationML analyzer." *In 2016 1st International Workshop on Cyber-Physical Production Systems (CPPS)*, 1-8.
- Saldivar, A. A. F., Li, Y., Chen, W. N., Zhan, Z. H., Zhang, J. & Chen, L. Y. (2015, September). "Industry 4.0 with cyber-physical integration: A design and manufacture perspective." *In Automation and computing (icac), 2015 21st international conference*, 1-6.
- Schuh, G., Potente, T., Thomas, C. & Hauptvogel, A. (2013, September). "Cyber-physical production management." *In IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*, 477-484.
- Seitz, K. F. & Nyhuis, P. (2015). "Cyber-physical production systems combined with logistic models-a learning factory concept for an improved production planning and control." *Procedia CIRP*, 32: 92-97.
- Shafiq, S. I., Sanin, C., Szczerbicki, E. & Toro, C. (2015). "Virtual engineering object/virtual engineering process: a specialized form of cyber physical system for Industrie 4.0." *Procedia Computer Science*, 60: 1146-1155.
- Silva, R., Reis, J., Neto, L. & Goncalves, G. (2017).

- "Universal parser for wireless sensor networks in industrial cyber physical production systems." *In Industrial Informatics (INDIN), 2017 IEEE 15th International Conference*, 633-638.
- Song, Z., Sun, Y., Wan, J. & Liang, P. (2017). "Data quality management for service-oriented manufacturing cyber-physical systems." *Computers & Electrical Engineering*, 64: 34-44.
- Stern, H. & Becker, T. (2017). "Development of a Model for the Integration of Human Factors in Cyber-physical Production Systems." *Procedia Manufacturing*, 9: 151-158.
- Strang, D. & Anderl, R. (2014). "Assembly process driven component data model in cyber-physical production systems." *In Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (Vol. 2)*.
- Thoben, K. D., Wiesner, S. & Wuest, T. (2017). "Industrie 4.0 and smart manufacturing-a review of research issues and application examples." *Int. J. Autom. Technol*, 11(1).
- Thramboulidis, K. (2015). "A cyber-physical system-based approach for industrial automation systems." *Computers in Industry*, 72: 92-102.
- Thramboulidis, K. & Christoulakis, F. (2016). "UML4IoT-A UML-based approach to exploit IoT in cyber-physical manufacturing systems." *Computers in Industry*, 82: 259-272.
- Trappey, A. J., Trappey, C. V., Govindarajan, U. H., Sun, J. J. & Chuang, A. C. (2016). "A review of technology standards and patent portfolios for enabling cyber-physical systems in advanced manufacturing." *IEEE Access*, 4: 7356-7382.
- Uhlemann, T. H. J., Lehmann, C. & Steinhilper, R. (2017). "The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0." *Procedia Cirp*, 61: 335-340.
- Vancza, J. & Monostori, L. (2017). "Cyber-physical manufacturing in the light of Professor Kanji Ueda's legacy." *Procedia CIRP*, 63: 631-638.
- Vincent, H., Wells, L., Tarazaga, P. & Camelio, J. (2015). "Trojan detection and side-channel analyses for cyber-security in cyber-physical manufacturing systems." *Procedia Manufacturing*, 1: 77-85.
- Vogel-Heuser, B., Diedrich, C., Pantforder, D. & Gohner, P. (2014). "Coupling heterogeneous production systems by a multi-agent based cyber-physical production system." *In Industrial Informatics (INDIN), 2014 12th IEEE International Conference*, 713-719.
- Wang, F., Ju, F. & Lu, Y. (2017). "A study on performance evaluation and status-based decision for cyber-physical production systems." *In Automation Science and Engineering (CASE), 2017 13th IEEE Conference*, 1000-1005.
- Wang, L. & Wang, G. (2016). "Big data in cyber-physical systems, digital manufacturing and industry 4.0." *International Journal of Engineering and Manufacturing (IJEM)*, 6(4): 1-8.
- Wang, L., Torngren, M. & Onori, M. (2015). "Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing." *Journal of Manufacturing Systems*, 37: 517-527.
- Wang, X. V., Kemeny, Z., Vancza, J. & Wang, L. (2017). "Human-robot collaborative assembly in cyber-physical production: Classification framework and implementation." *CIRP annals*, 66(1): 5-8.
- Wasicek, A., Derler, P. & Lee, E. A. (2014). "Aspect-oriented modeling of attacks in automotive cyber-physical systems." *In Design Automation Conference (DAC), 2014 51st ACM/EDAC/IEEE*, 1-6.
- Wells, L. J., Camelio, J. A., Williams, C. B. & White, J. (2014). "Cyber-physical security challenges in manufacturing systems." *Manufacturing Letters*, 2(2): 74-77.
- Weyer, S., Meyer, T., Ohmer, M., Gorecky, D. & Zuhlke, D. (2016). "Future modeling and simulation of CPS-based factories: an example from the automotive industry." *IFAC-*

*PapersOnLine*, 49(31): 97-102.

- Wright, P. (2014). "Cyber-physical product manufacturing." *Manufacturing Letters*, 2(2): 49-53.
- Yu, C., Xu, X. & Lu, Y. (2015). "Computer-integrated manufacturing, cyber-physical systems and cloud manufacturing-concepts and relationships." *Manufacturing letters*, 6: 5-9.
- Zamfirescu, C. B., Pirvu, B. C., Schlick, J. & Zuehlke, D. (2013). "Preliminary insides for an anthropocentric cyber-physical reference architecture of the smart factory." *Studies in Informatics and Control*, 22(3): 269-278.
- Zinnikus, I., Antakli, A., Kapahnke, P., Klusch, M., Krauss, C., Nonnengart, A. & Slusallek, P. (2017). "Integrated semantic fault analysis and worker support for cyber-physical production systems." *In Business Informatics (CBI), 2017 IEEE 19th Conference*, 1: 207-216.