

디지털 트윈 연구의 저자 동시인용 분석

김수민* · 서창교**

〈목 차〉

I. 서론	IV. 분석 결과
II. 선행연구	4.1 군집 분석
2.1 디지털 트윈	4.2 다차원 척도 분석
2.2 저자 동시인용 분석	4.3 요인 분석
III. 연구 방법	4.4 네트워크 중심성 분석
3.1 분석방법 및 절차	V. 결론
3.2 자료의 수집 및 저자 선정	5.1 결론 및 시사점
3.3 행렬 작성	5.2 한계점 및 향후 연구 방향
	참고문헌
	<Abstract>

I. 서론

디지털 트윈(digital twin)이란 디지털 표현으로 실제 세계의 발전소나 도시와 같이 큰 시스템의 쌍둥이를 만들어 가상세계에 나타낸 것을 일컫는다(Gartner, 2018). 디지털 트윈은 제조, 의료, 운송, 공공 서비스 등 다양한 영역에 적용될 수 있는데, 디지털 트윈은 시스템과 프로세스를 실시간으로 모니터링하여 실제로 문제가 발생하기 전에 이를 감지할 수 있으며, 새로운 비즈니스 기회도 발견할 수 있도록 해준다(Madni et al., 2019). 글로벌 시장조사기관인

가트너는 4차 산업혁명을 견인하는 디지털 트윈을 2017년부터 2019년까지 3년 연속으로 10대 전략 기술 트렌드로 선정하였다(Gartner, 2016; 2017; 2018). SAP의 수석 부사장인 Kaiser는 디지털 트윈의 중요성을 역설하면서, 디지털 트윈을 도입하는 기업은 고객의 욕구를 더 잘 이해하고, 기업의 상품과 서비스를 향상시키는 것은 물론이고 경쟁적 이점을 제공하는 새로운 비즈니스 모델을 식별할 수 있지만, 디지털 트윈에 뒤처지는 기업은 도태될 것이라고 하였다(SAP, 2016). 국내 역시 민관 차원에서 디지털 트윈 도입을 위해 노력하고 있다. 전라

* 경북대학교 대학원 경영학부, smk37825@gmail.com(주저자)

** 경북대학교 경영학부, ck@knu.ac.kr(교신저자)

북도는 수산 양식 산업을 친환경·고부가가치 스마트 양식시스템으로 전환하는 구축 사업에 향후 3,500억 원을 투자하여 추진할 계획이다(매일경제, 2019). 수원시는 삼성전자, 삼성 SDS, KT, 쏘카, 이노덱 등과 함께 5G 기술기반 모바일 디지털 트윈 기술을 활용하여 구도심을 혁신도시로 재구조화하는 스마트시티 챌린지 사업을 진행하고 있다(이데일리, 2019).

한편, 디지털 트윈 시장의 급속한 발전은 사회 전반에 걸쳐 혁신과 변화를 불러일으킬 것으로 예측되며 이에 발 맞춰 최근 학계에서도 많은 연구가 이루어지고 있다. 디지털 트윈은 센서, 통신, 네트워크, 컨트롤 이론, 수학, 소프트웨어 엔지니어링, 컴퓨터 공학과 같은 융합적 특징을 가진다(Baheti and Gill, 2011). 특히 정보시스템 분야에서도 빅데이터, 클라우드 컴퓨팅이 주요한 연구 주제로 다루어졌는데(류성열, 박상철, 2018) 이는 디지털 트윈의 기반기술로서 정보시스템 학문분야에서도 그 중요성이 강조된다. 디지털 트윈의 이러한 융합 학문적 특징과 다양한 분야를 아우르는 학제적 성격을 보았을 때, 디지털 트윈 연구를 총체적으로 분석하는 연구의 필요성이 제기된다.

과거의 연구 문헌에 대한 리뷰는 학문 발전의 필수적인 요소이며, 효과적인 리뷰는 지식의 발전을 위한 토대를 만드는 가치 있는 활동으로 인식되고 있다(Webster and Watson, 2002). 기술의 발전에 따라 새로 탄생한 분야의 지적 구조를 분석하는 것은 현재 연구 영역의 지적 구조에 대한 이해 없이는 미래의 지향점을 명확히 논의하기 어렵기 때문이다(김광재, 박종구, 2011). 즉, 지적 구조를 분석하는 것은 신진 연구자들에게 지금까지 연구 분야가 어떻게 발

전하여 왔는지를 탐색하며, 특히 급속히 발전하고 있는 분야에서는 기존 연구의 문제점을 발견하고 학문의 미래 발전 방향을 제시할 수 있다(서창교, 황채영, 2012).

본 연구는 디지털 트윈 연구의 핵심 저자들을 찾고, 핵심 저자들의 대표 논문의 연구 주제를 분석하여 디지털 트윈 연구의 지적 구조를 구성하는 주제를 서술하고 주제간 관계를 실증적으로 규명하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 본 연구는 관련 연구를 수집하여 계량서지학적 방법의 하나인 저자 동시인용 분석을 사용하였다. 저자 동시인용 분석은 특정 학문 분야의 지적 구조를 규명하는데 유용하게 사용된다(김경식, 2017). 저자 동시인용 분석에서는 저자들이 빈번하게 함께 인용될수록 밀접한 관계가 있다고 가정한다(김미애, 서창교, 2015). 연구 결과는 디지털 트윈 분야 연구의 핵심 주제 및 분포 파악에 도움을 주며 상대적으로 미흡한 디지털 트윈 연구의 영역을 찾아 향후 연구 방향성 모색에 유용한 정보를 제공할 것이다.

II. 선행연구

2.1 디지털 트윈

디지털 트윈은 컴퓨팅과 통신을 통해 작동이 감시되고, 조정되고, 조작되고, 통합되는 물리적 시스템으로(Rajkumar et al., 2010), 가상 물리 시스템(cyber physical system)이라 불리기도 하는데, 물리 세계와 가상 세계를 연결해주고 둘 사이의 소통을 가능하게 해준다. 디지털 트윈의 경제적·사회적 잠재력은 현재 이루어

진 것보다 훨씬 방대하며, 기술 발전을 위한 투자가 전 세계적으로 이루어지고 있다(Lee, 2008).

Gunes et al.(2014)은 디지털 트윈의 도메인으로 스마트 제조와 비상 대응, 항공 교통, 사회 기반시설, 헬스 케어와 의학, 지능형 교통체계, 서비스를 위한 로봇을 제시하였다(<표 1> 참고). 제조 산업은 디지털 트윈이 가장 활발하게 적용되고 있는 선두적인 분야이다. Wang et al.(2016)은 유연한 제조시스템을 시행하기 위하여 공장 내부의 구성 요소를 수직적으로 통합하여 스마트 공장을 구현하는 것이 4차 산업혁명의 주요 기능이라 하였다. Jin et al.(2014)은 사물 인터넷을 통해 도시의 시민(건강과 웰빙 등)과 교통(기동성, 오염 등), 서비스에 영향을 끼치는 문제를 해결할 수 있는 스마트 시티를 실현하기 위한 프레임워크를 제공하였다. 의학 분야에서도 디지털 트윈을 활용한 시스템

이용에 기대를 보이고 있다. Zhang et al.(2015)은 클라우드 및 빅데이터 기술을 통해 의료시스템의 성능을 향상시켜 다양한 스마트 건강관리 및 서비스 사용에 기여 할 수 있는 환자 중심의 의료 서비스를 위한 디지털 트윈을 제안하였다. Sampigethaya and Poovendran (2012)은 항공기 및 영공 시스템 설계 및 성능 보증을 위한 디지털 트윈 프레임워크를 제안하고 대규모 유인 및 무인 항공 교통을 제어하는 기본적인 디지털 트윈 솔루션을 제시하였다. 최무진과 박종필(2017)은 MIS 전문가들에게 제조정보공유와 유관 소프트웨어 개발, 제조(생산)지원시스템의 구현, MIS 교육 커리큘럼의 확대와 같은 디지털 트윈 관련 연구 주제의 확장을 제안하였다.

2.2 저자 동시인용 분석

계량서지학(bibliometric) 분야에서 학문의 지적구조를 파악하는데 주로 사용되는 저자 동시인용 분석은 특정 연구 주제 내에서 저자들 간의 동시인용 빈도를 분석 단위로 사용하기 때문에 시간의 경과를 반영하여 연구의 흐름 및 지적 구조를 표현할 수 있다(김재욱 등, 2008). 두 개의 논문이 같이 인용될수록 그들 간의 관계는 가까우며, 연구가 서로 관련되고 후속 연구에서 반복적으로 함께 인용되는 저자들은 저자 동시인용에서 패턴을 보이며, 지적 구조를 나타낸 지도에서 가까이 위치한다(White and Griffith, 1981). 즉, 인용 패턴을 살펴보는 것은 연구 분야의 지적 구조를 파악하는 중요한 자료임을 알 수 있다.

Backhaus et al.(2011)은 B2B 마케팅의 구조

<표 1> 디지털 트윈 도메인(Gunes et al., 2014)

도메인	기능
스마트 제조	상품이나 배달 서비스 제조의 생산성을 최적화
비상 대응	공공 안전의 위협을 다루고 자연과 가치 있는 사회기반시설을 보호
항공 교통	항공 시스템의 운영과 수송 관리
사회기반 시설	물, 전기, 가스, 기름과 같은 일일 보급량의 분배
헬스케어와 의학	환자의 건강 상태를 관찰 및 필요한 조치
지능형 교통체계	실시간 정보 공유를 하며 수송 관리의 안전과 조정, 서비스를 향상
서비스를 위한 로봇	인간의 복지를 위한 서비스를 수행

와 발전 과정을 인용 분석과 저자 동시인용 분석을 사용하여 밝혔다. 연구는 마케팅과 B2B 저널에서 1,392편의 논문을 수집하여 1972년-2009년의 기간을 4구간으로 나누어 구간별 피인용 상위 300명을 연구 대상으로 삼았다. 연구 결과는 시기가 지날수록 저자와 군집의 수가 증가하여 초기에는 개인 판매 및 조직 구매 행동이 학문의 초기 초점이었으나 시간이 지남에 따라 산업 거래 파트너 간의 상호 작용으로 관심이 바뀌었다. Zhao and Strotmann(2014)은 정보과학 분야의 12개 핵심 저널로부터 2006년-2010년의 기간을 대상으로 하여 244명의 핵심 피인용 저자를 선정하였다. 분석을 통해 웹 개발이 개발 연구를 주도하고 있으며 네트워크 과학의 영향력이 커지면서 전통적인 컴퓨터 과학의 영향력을 보완하고 있으며, 웹 통계분야에 관한 연구는 일시적 감소 후 다시 활발해지고 있음을 발견하였다. Zavarraqi(2016)는 지식 경영을 대상으로 저자 동시인용 분석을 수행하였다. 1990년-2013년 동안 총 5,826편의 논문을 Web of Science로부터 수집하여 5구간으로 기간을 나누어 구간 별 30인의 저자를 선정하였다. 결과 분석을 통해 지식 경영 분야를 13개의 하부 영역으로 분류하고, 지식 경영은 이들 하부 영역들이 서로 연계되어 있는 학제간 연구 분야임을 확인하였다.

III. 연구방법

3.1 분석방법 및 절차

McCain(1990)의 표준적 저자 동시인용 분석

과정을 본 연구 방법에 맞게 수정하였다.

첫째, 데이터베이스에서 디지털 트윈 관련 논문을 수집하였다.

둘째, 수집된 문헌을 종합하여 인용데이터를 구성하고 핵심 저자를 선정하였다.

셋째, 저자 동시인용 빈도를 통해 저자 동시인용 빈도 행렬과 상관계수 행렬을 작성하였다.

넷째, 상관계수 행렬을 데이터로 하여 다변량 분석기법인 군집 분석과 다차원척도 분석, 요인 분석을 수행하였다.

다섯째, 저자 동시인용 빈도 행렬을 이용하여 저자 네트워크의 중심성을 구하였다.

여섯째, 다변량 분석과 소셜 네트워크 분석을 기반으로 지적 구조를 해석하였다.

3.2 자료의 수집 및 저자 선정

디지털 트윈 연구의 현황을 분석하기 위해, 논문 검색 사이트인 Web of Science에서 데이터를 수집하였다. 논문 제목과 초록, 저자 키워드, 키워드 플러스에 “digital twin” 또는 “cyber physical system”을 키워드로 하여 데이터를 수집하였다. 이 때, 문서 타입에서 에디토리얼, 책, 노트, 데이터 페이퍼, 리프린트는 제외하였다. 또한 초기 자료 수집에서 2010년 이전에는 몇 개의 연도에서 0~1건 이하의 데이터가 수집되었기에, 자료 수집은 2010년부터 2018년까지로 한정하여 총 804편의 논문을 수집하였다. 이들 논문은 2,461명의 저자(1저자 748명)가 저술하였으며, 321개의 저널에 발표되었다. 논문에 인용한 총 26,514편의 참고문헌을 핵심 저자들을 선정하기 위한 기초 데이터로 사용하여 저자 동시인용 분석과 소셜 네트워크 분석을 실시하

였다.

<표 2> 저자명 코딩 및 피인용 빈도

이름	표기	피인용 빈도
Lee, Edward A	lee ea	132
Rajkumar, Ragunathan	rajkumar r	56
Lee, Jay	lee j	55
Mo, Yilin	mo y	51
Cardenas, Alvaro A	cardenas aa	42
Wan, Jiafu	wan j	41
Sridhar, Siddharth	sridhar s	36
Liu, Yao	liu y	35
Monostori, Laszlo	monostori l	34
Pasqualetti, Fabio	pasqualetti f	33
Sha, Lui	sha l	32
Tao, Fei	tao f	31
Atzori, Luigi	atzori l	25
Wang, Lihui	wang l	25
Hahn, Adam	hahn a	24
Mitchell, Robert	mitchell r	24
Karnouskos, Stamatis	karnouskos s	23
Ten, Chee-Wooi	ten c	23
Derler, Patricia	derler p	22
Khaitan, Siddhartha Kumar	khaitan sk	22
Kim, Kyong-Dae	kim k	22
Ilic, Marija D	ilic md	21
Sztipanovits, Janos	sztipanovits j	21
Tan, Ying	tan y	20
Xu, Li Da	xu ld	20
Wu, Dazhong	wu d	19
Xun, Xu	xun x	19
Wu, Fang-Jing	wu f	18
Zhang, Heng	zhang h	18
Zhang, Yingfeng	zhang y	18
Chen, Min	chen m	17
Kosut, Oliver	kosut o	17
Teixeira, Andere	teixeira a	17
Xie, Le	xie l	17
Akyildiz, Ian F	akyildiz if	16
Colombo, Armando W	colombo aw	16
Leitao, Paulo	leitao p	16
Gubbi, Jayavardhana	gubbi j	15
Li, Husheng	li h	15
Wang, Shiyong	wang s	15
Xia, Feng	xia f	15

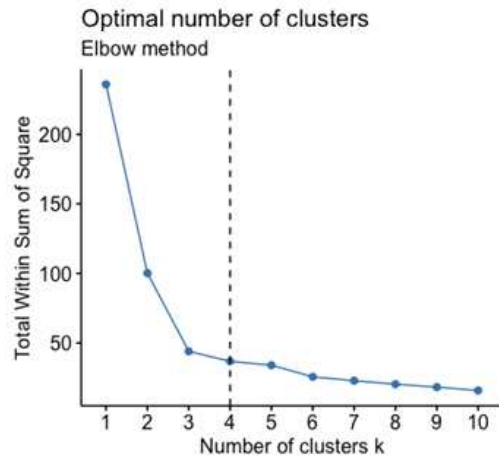
저자 동시인용 분석은 핵심 저자를 선정하여 분석에 사용한다. 핵심 저자 선정을 위해 저자 이름을 연구목적에 맞게 코딩하였다. 동명이인은 저자의 연구 업적물과 소속, 연구 주제 등을 이용하여 대조하였다. 연구대상 저자 선정에 엄격한 기준은 없으며(McCain, 1990) 많은 저자가 선정 될수록 지적 구조의 세밀한 하부 집단 표현은 가능하지만 한 학문 분야의 대표 저자로서의 의미가 없어져 의미 있는 군집 분석이 어려워진다(문주영, 2011). 일반적으로 연구 데이터에 따라 적절한 수를 선택하는데 본 연구는 최종적으로 피인용 빈도 15회 이상인 핵심 저자 41명을 선정하였다. 이 때, 저자 동시인용 분석은 저자를 저작물의 총체로 바라보기 때문에 피인용 빈도 계산 시에 한 문헌에서 같은 저자가 여러 번 인용된다면 이는 한 번 인용된 것으로 간주하였다. <표 2>에 저자명 코딩 및 피인용 빈도를 제시하였다.

3.3 행렬 작성

핵심 저자를 선정한 후 저자 데이터베이스를 구축하고, R과 Excel을 사용하여 선정된 저자 간의 쌍이 형성된 행렬을 작성하였다. 행렬의 대각선 값은 자기 인용을 포함한 값이기에, 다른 값에 비해 높은 값을 가지며 결과가 왜곡된다. 따라서 대각선 값을 해당 저자가 다른 저자와 동시인용 된 빈도 값 중에서 상위 3개를 더한 후 2로 나눈 값으로 대체하였다(White and Griffith, 1981). 결과적으로 41*41 저자 동시인용 빈도 행렬이 만들어졌다(<표 3> 참고).

저자 동시인용 분석을 위해서 저자 동시인용 빈도 행렬을 상관계수 행렬로 변환한다. 저자 동시인용 빈도 행렬을 상관계수 행렬로 변환하는 이유는 저자 동시인용 빈도 행렬은 동시인용 빈도 값이 0인 경우가 많아 저자 간의 관계 차이점을 파악하는데 어려움이 존재하지만(전은주 등, 2013), 상관계수는 빈도 수 간에 규모의 차이를 제거하여 두 저자가 얼마나 유사하는지 밝히는데 유용한 정보를 제공해(Kerlinger, 1966; McCain, 1990) 주기 때문이다. 본 연구는 R을 이용하여 동시인용 빈도 행렬을 피어슨 상관계수 행렬로 변환시켰다(<표 4> 참고).

분석과 다차원 척도 분석의 군집 개수로 사용하였다(<그림 1> 참고). 군집 분석으로 만들어진 덴드로그램은 <그림 2>에 제시하였다.



<그림 1> 다변량 분석의 최적 군집 개수

IV. 분석 결과

4.1 군집 분석

다차원 척도 분석 기법의 하나인 군집 분석(cluster analysis)은 한 개의 모집단 내에서 유사한 개체들로 여러 개의 하위 동질 집단을 찾는 방법이다(전은주 등, 2013). 저자 동시인용 분석은 일반적으로 응집 계급 방법을 사용하며(McCain, 1990), 본 연구도 앞서 만든 상관계수 행렬을 가장 일반적으로 쓰이는 ward 방식을 사용하여 군집 분석을 수행하고 결과를 덴드로그램으로 나타내었다.

다변량 분석의 군집 개수는 연구의 목적에 맞게 연구자의 판단에 맡기거나 silhouette method, gap statistic method, elbow method 등을 사용할 수 있다. 본 연구는 elbow method를 사용하여 찾은 군집 개수의 최적값인 4를 군집

각 군집의 주제 영역을 식별하기 위해서 군집 별 저자의 대표 논문을 사용하였다. <표 5>에는 군집별 대표 저자 3인과 각 저자의 대표 논문을 정리하였다. 군집 1은 센서 네트워크, 무선 센서, 빅데이터, 사물 인터넷과 같은 주제를 다룬 저자들이 속했다. 디지털 트윈은 사물 인터넷과 시뮬레이션, 빅데이터 분석, 인공지능을 포함하는 네 가지 기반 기술을 바탕으로 하며, 이들 기술은 밀접하게 연결되어 상호 작용한다(강효은, 김호원, 2018). 즉, 군집 1은 디지털 트윈의 기반 기술에 관한 연구 주제이다. 군집 2는 디지털 트윈 주제의 역사와 현황, 전망, 도전 과제와 같은 포괄적인 주제를 다룬 문헌의 저자들 그룹이다. 따라서 군집 2는 전망과 도전 과제라 명명하였다. 군집 3에는 데이터 무결성(integrity), 허위 데이터(false data), DoS



<그림 2> 저자 군집 덴드로그램

<표 5> 군집별 대표 저자와 논문

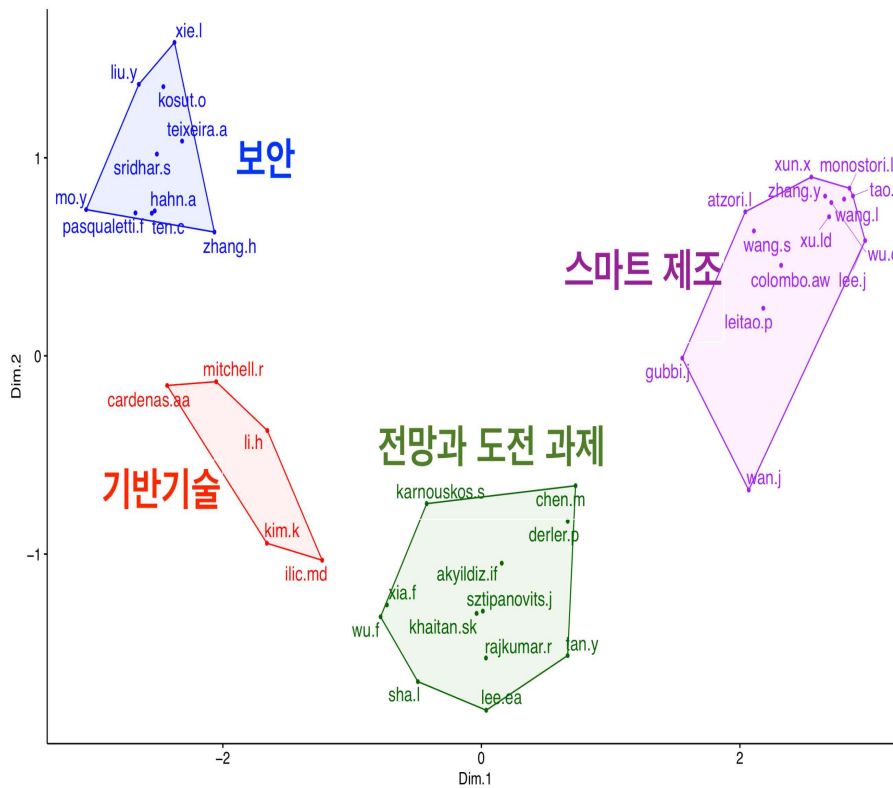
군집	주제영역	저자	대표 논문
1	기본 기술	akyildiz if	A survey on sensor networks
		chen m	Machine-to-machine communications: Architectures, standards and applications
		ilic md	Modeling of future cyber-physical energy systems for distributed sensing and control
2	전망과 도전 과제	lee ea	Cyber physical systems: Design challenges
		rajkumar r	Cyber-physical systems: The next computing revolution
		sha l	Cyber-Physical Systems: A new frontier
3	보안	liu y	False data injection attacks against state estimation in electric power grids
		mo y	Cyber physical security of a smart grid infrastructure
		pasqualetti f	Attack detection and identification in cyber-physical systems
4	스마트 제조	lee j	A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems
		monostori l	Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges
		tao f	IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing

공격에 대한 탐지나 대응 또는 보안에 관한 주제를 다룬 저자들이 등장하였다. 이에 따라 군집 3은 보안 영역으로 판단하였다. 마지막으로 14명의 저자가 속하는 가장 큰 군집 4는 사물인터넷과 스마트 공장, 스마트 제조, 클라우드 제조와 같은 주제를 다루고 있다. 따라서 군집 4는 스마트 제조로 명명하였다.

4.2 다차원 척도 분석

다차원 척도 분석(MDS)은 다차원 관측 값이나 개체들 간의 거리, 유사성과 비유사성을 이용하여 개체들 사이의 구조나 관계를 쉽게 파악하는데 사용한다(McCain, 1990). 이는 앞서 만든 피어슨 상관계수 행렬에서의 근접성에 따라 관련성이 높은 저자들은 지도상에서 가까이 위치하며 동시인용 빈도가 높은 저자일수록 지

도상에서 중심에 위치하게 표현된다(<그림 3>참고). MDS 저자 지도를 구성하는 저자는 앞선 저자 군집 덴드로그램과 유사하게 나타났으며 하부 주제 영역 또한 같게 해석되었다. Mitchell R, Cardenas AA는 보안 군집에서 기반기술 군집으로 이동하였고, Akyildiz IF, Chen M, Wu F, Xia F는 기본 기술 군집에서 전망과 도전 과제 군집으로 이동하였다. 대체적으로 군집이 이동된 저자들은 MDS 저자 지도 상의 군집의 경계에 위치하고 있는데 Mitchell R은 침입 탐지와 반응, 신뢰성에 대한 논문을 썼고 Cardenas AA는 보안에 관한 논문을 썼다. 이는 보안과 기반기술 모두에 해당할 수 있기에 군집 이동이 일어난 것으로 기본 기술에서 전망과 도전 과제 군집으로 이동한 저자들도 마찬가지로의 행태를 보인다.



<그림 3> MDS 저자 지도

4.3. 요인 분석

요인 분석은 저자가 다른 하위 주제 영역을 형성하는데 어떻게 기여하였는지 분석하는데 도움을 준다. 요인 분석에서 저자는 한 요인에만 속하는 것이 아니라 적재량이 높은 요인을 중심으로 해석한다. 따라서 여러 요인에 등장하는 저자는 디지털 트윈의 여러 하위 지적 구조 영역에 기여한 것으로 해석할 수 있다. McCain(1990)의 연구에서는 요인 분석의 적재량이 0.4 이상인 저자만을 분석하였다. 본 연구에서도 적재량 0.4 이상인 저자만을 채택하여 5개의 의미 있는 요인을 추출하고 적재량이 높

은 저자 순으로 요인 분석의 결과를 정리하였다(<표 6> 참고). 군집이 4개였던 군집 분석이나 다차원 척도 분석과 달리 요인 분석은 앞서 발견하지 못 했던 다섯 번째 요인이 새로운 주제로 분화되었다. 새로운 요인인 믿음성 (dependability)은 디지털 트윈에 침입이나 공격 등이 발생했을 때 신뢰나 보안, 정상적 작동과 같은 주제 영역을 다루는 저자들로 군집 분석에서 보안 군집에 속했던 저자들이다.

요인 1(스마트 제조)과 요인 5(기반 기술)에 기여한 Atzori L의 대표 논문은 사물 인터넷에 관한 서베이 논문이다. 사물 인터넷은 스마트 제조의 기반 기술이므로 타당한 결과이다. 요인

<표 6> 요인 분석

요인 1		요인 2		요인 3		요인 4		요인 5	
스마트 제조		전망과 도전 과제		보안		믿음성		기반 기술	
lee j	0.86	lee ea	0.91	liu y	0.52	mitchell r	0.56	akyildiz if	0.55
tao f	0.83	rajkumar r	0.88	pasqualetti f	0.50	hahn a	0.42	chen m	0.44
monostori l	0.82	sha l	0.87	mo y	0.49	ten c	0.41	atzori l	0.44
wang l	0.81	tan y	0.77	sridhar s	0.49				
wu d	0.78	sztipanovits j	0.69	monostori l	0.48				
xu ld	0.76	khaitan sk	0.67	lee j	0.46				
zhang y	0.76	kim k	0.62	tao f	0.45				
xun x	0.73	karnouskos s	0.61	teixeira a	0.45				
colombo aw	0.67	derler p	0.59	wang l	0.43				
leitao p	0.63	wu f	0.58	kosut o	0.42				
wan j	0.62	ilic md	0.58	ten c	0.41				
atzori l	0.6	xia f	0.54	wu d	0.41				
wang s	0.6	wan j	0.49						
gubbi j	0.46	akyildiz if	0.43						
		li h	0.41						
		cardenas aa	0.41						

1(스마트 제조)과 요인 3(보안)에 적재된 Monostori L은 제조 시스템에서 디지털 트윈의 역사와 기대, R&D 도전과제를 제시하는 동시에 보안 측면의 도전과제를 강조하였다. Lee J와 Tao F, Wu D는 요인 1(스마트 제조)과 요인 3(보안)에 적재되었는데, 이는 스마트 제조의 성공에 보안 이슈가 중요하게 작용함을 의미한다.

4.4 네트워크 중심성 분석

소셜 네트워크는 정보 교환 및 상호 연관된 사회적 행위자의 그룹으로 정의될 수 있다(강동준과 이길남, 2015). 저자 동시인용 분석에서 소셜 네트워크는 저자들을 하나의 노드로 두고 이들 간의 동시인용 관계를 선으로 나타낸 것으로, 연결되어 있는 저자들은 디지털 트윈 연구에서 서로 영향을 주고 있다고 판단할 수 있

다. 본 연구에서는 Netminer 4를 사용하여 연결정도 중심성과 근접 중심성, 매개 중심성을 분석하고 내림차순으로 정리하였다(<표 7> 참고).

분석 결과는 연결정도 중심성과 근접 중심성의 순위가 일치하는 것으로 나타났다. 매개 중심성의 경우에도 상위 6인(Lee EA, Rajkumar R, Wan J, Karnouskos S, Kim K, Cardenas AA)은 연결정도 중심성과 근접중심성의 상위 6인과 일치하였다. 연결정도 중심성이 높은 저자는 다른 저자와 동시인용이 많이 된 저자로, 디지털 트윈의 지적 구조에 가장 핵심적 역할을 한 저자들이다. 앞선 군집 분석과 연결정도 중심성 지표를 비교하면 Lee EA와 Rajkumar R, Karnouskos S는 디지털 트윈을 전체적으로 조망하는 역할을 한 저자들로 디지털 트윈의 연구를 새로 시작하기 위해서는 디지털 트윈에 대한 전망과 도전 과제에 대한 이해가 선행되

<표 7> 중심성 지표

#	연결정도 중심성		근접 중심성		매개 중심성	
1	lee ea	1.000	lee ea	1.000	lee ea	0.055
2	rajkumar r	0.950	rajkumar r	0.952	rajkumar r	0.041
3	wan j	0.875	wan j	0.889	wan j	0.027
4	karnouskos s	0.800	karnouskos s	0.833	karnouskos s	0.025
5	kim k	0.775	kim k	0.816	kim k	0.022
6	cardenas aa	0.775	cardenas aa	0.816	cardenas aa	0.021
7	derler p	0.775	derler p	0.816	sridhar s	0.019
8	sridhar s	0.750	sridhar s	0.800	derler p	0.018
9	lee j	0.725	lee j	0.784	li h	0.016
10	tan y	0.700	tan y	0.769	tan y	0.015
11	li h	0.675	li h	0.755	atzori l	0.014
12	sha l	0.675	sha l	0.755	lee j	0.012
13	mo y	0.650	mo y	0.741	sha l	0.012
14	hahn a	0.650	hahn a	0.741	mo y	0.011
15	pasqualetti f	0.625	pasqualetti f	0.727	khaitan sk	0.011
16	atzori l	0.600	atzori l	0.714	hahn a	0.009
17	khaitan sk	0.600	khaitan sk	0.714	leitao p	0.009
18	mittchell r	0.600	mittchell r	0.714	mittchell r	0.009
19	gubbi j	0.600	gubbi j	0.714	gubbi j	0.008
20	monostori l	0.600	monostori l	0.714	pasqualetti f	0.007
21	leitao p	0.575	leitao p	0.702	chen m	0.007
22	ilic md	0.575	ilic md	0.702	ilic md	0.006
23	wu d	0.575	wu d	0.702	monostori l	0.006
24	wang l	0.550	wang l	0.690	xu ld	0.004
25	tao f	0.550	tao f	0.690	sztipanovits j	0.004
26	xu ld	0.525	xu ld	0.678	wu d	0.004
27	ten c	0.525	ten c	0.678	wang l	0.004
28	zhang y	0.525	zhang y	0.678	xia f	0.003
29	sztipanovits j	0.500	sztipanovits j	0.667	tao f	0.003
30	xun x	0.500	xun x	0.667	xun x	0.003
31	chen m	0.475	chen m	0.656	colombo aw	0.003
32	xia f	0.475	xia f	0.656	ten c	0.003
33	colombo aw	0.475	colombo aw	0.656	zhang y	0.003
34	kosut o	0.450	kosut o	0.645	wu f	0.002
35	liu y	0.450	liu y	0.645	kosut o	0.002
36	wu f	0.400	wu f	0.625	liu y	0.002
37	wang s	0.400	wang s	0.625	akyildiz if	0.002
38	xie l	0.375	xie l	0.615	xie l	0.002
39	teixeira a	0.375	teixeira a	0.615	teixeira a	0.001
40	zhang h	0.375	zhang h	0.615	wang s	0.001
41	akyildiz if	0.300	akyildiz if	0.588	zhang h	0.001

어야 함을 알 수 있다. 추가적으로 타 군집 별 주요 저자를 찾자면 기반 기술은 Kim K와 Li H가, 보안에서는 Cardenas AA와 Sridhar S가, 스마트 제조의 경우 Wan J와 Lee J이다.

피인용 빈도(<표 2> 참고)가 높은 Lee EA는 연결정도 중심성도 높게 나왔다. Lee EA는 자신을 포함하여 41명의 저자와 동시인용 되었다. Rajkumar R, Wan J, Cardenas AA 역시 동시인용 회수와 피인용 회수, 연결정도 중심성이 모두 높은 저자이다.

반면 Karnouskos S, Derler P, Kim K는 비교적 피인용빈도는 상대적으로 낮은(각각 17위, 19위, 21위) 반면 각기 33명(4위), 32명(5위), 32명(5위)으로 상대적으로 많은 저자와 동시인용되었기에 연결정도 중심성 지표가 높다. 이와 대조되게 Lee J, Mo Y, Liu Y는 높은 피인용빈도 순위(각각 3위, 4위, 8위)에도 불구하고 다른 저자와의 동시인용은 30명(9위), 27명(13위), 19명(34위)으로 상대적으로 낮은 편이다. 이에 따라 연결정도 중심성 지표가 낮게 나타났다.

근접 중심성은 직접 연결되지 않고 간접 연결된 거리도 고려하며 매개중심성은 근접성이 떨어지는 노드끼리 연결해주는 역할을 한다. 매개중심성이 높다면 네트워크 내에서 정보 흐름 및 관리에 중요한 역할을 하는 노드로 판단한다. 각기 41명, 39명과 동시인용된 Lee EA와 Rajkumar R은 매개중심성이 0.04~0.05 수준으로 매우 높은 것을 확인할 수 있다. 연결정도 중심성은 낮으나 매개 중심성이 상대적으로 높은 저자들은 Atzori L, Chen M, Sztipanovits J, Xia F, Akyildiz IF이다. 이들은 각기 사물 인터넷과 디지털 트윈의 시스템 통합, 빅데이터, 네트워크 서비스 품질 관리, 센서 네트워크와 같은 연

구를 수행하였다. 이러한 기술은 디지털 트윈의 중요 기반 기술이거나 새로운 영역인 디지털 트윈의 네트워크상에서 서비스 품질 관리를 중시하는 연구를 수행하기에 다른 하위 주제 영역에서도 연구되어야 하는 분야이며, 디지털 트윈 연구 연결망에서 지식을 전파하는 위치에 있다. 즉, 다른 하위 주제의 연구자들을 연결하고 매개하는 역할을 수행한다. 반면에 Pasqualetti F, Ten C, Zhang Y는 연결정도 중심성과 근접 중심성에 비해 상대적으로 매개 중심성이 낮은 저자들이며 각기 디지털 트윈 상의 공격 탐지 및 식별, 실시간 정보 수집 및 통합 프레임워크를 연구하였다. 이들은 다른 하위 주제의 저자들과 연계의 필요성이 상대적으로 낮은 특정 분야의 연구를 주로 수행하는 것으로 판단된다.

V. 결 론

5.1. 결론 및 시사점

저자 동시인용 분석을 사용하여 디지털 트윈 연구 분야의 지적 구조를 파악하고자 한 본 연구는 다음과 같은 사항을 발견하였다.

첫째, 군집 분석과 다차원 척도 분석 결과 하위 지식 영역은 기반 기술과 디지털 트윈의 전망과 도전, 보안, 스마트 제조로 네 가지가 대표적인 것으로 확인되었다. 첫 번째 군집은 센서 네트워크, 무선 센서, 빅데이터, 사물 인터넷과 같은 디지털 트윈의 기반 기술에 대한 연구들이다. 두 번째 군집은 디지털 트윈 연구의 흐름, 현황, 전망, 도전 과제와 같은 디지털 트윈의 개념을 정립하고, 방향성을 제시하는 문헌에 기여

하였다. 보안 군집에서는 데이터 무결성과 허위 데이터, DoS 공격과 탐지와 관련된 연구들이 다. 마지막 군집인 스마트 제조는 사물 인터넷과 스마트 공장, 클라우드 제조와 같은 주제가 다루어졌다. 요인 분석에서는 믿음성이 추가되어 디지털 트윈의 총 다섯 가지 하부 연구 영역이 확인되었다.

한편, 본 연구의 학문적 시사점은 다음과 같다. 첫째, 학문의 경계가 융합적인 디지털 트윈 연구의 지적 구조를 총체적으로 바라보았다. 디지털 트윈은 단일한 학문 분야로만 해결하기 어려운 복잡한 연구문제를 다루며 융합적, 학제적 성격을 띠기에 본 연구는 특정 학술지에 국한하지 않고 Web of Science 데이터베이스를 이용하여 연구 영역이 지속적으로 확장되고 있는 디지털 트윈 연구를 분석하였다.

둘째, 본 연구는 서베이와 같이 연구자의 주관적 판단에 의존하는 분석이 아니라, 계량적 방법인 저자 동시인용 분석 방법을 사용하였다. 따라서 미래 연구자들은 본 연구에서 아직 충분히 연구되지 않았다고 나타나는 도메인(비상 대응, 항공 교통, 사회기반시설, 헬스케어와 의학, 지능형 교통체계, 서비스를 위한 로봇)과 도전 과제(지속가능성, 신뢰성, 정보처리 상호운용성, 예측가능성)에 대한 추가적인 연구를 할 필요가 있다고 판단한다.

실무적인 관점에서 본 연구는 디지털 트윈 관련 연구의 성숙도와 연구 트렌드, 핵심 기술 등을 파악하여 정책 결정자 및 투자 의사결정 담당자에게 중복투자를 방지할 수 있는 시사점을 제공하였다. 즉, 스마트 공장과 같이 관련 기

술 및 연구가 충분히 이루어진 분야에는 현장 적용을 위한 투자를, 아직 연구가 부족한 보안이나 비상 대응, 항공 교통, 사회기반시설, 헬스케어와 의학 등의 분야에는 실용화를 위한 추가적인 연구에 자원을 우선 배분하여야 한다.

5.2 한계점 및 향후 연구 방향

본 연구는 디지털 트윈의 하부 연구 영역과 핵심 연구자, 향후 적용 도메인과 도전과제들을 정리하였지만, 다음과 같은 한계점을 가진다.

첫째, 본 연구는 제 1 저자만을 분석에 사용하였다. 디지털 트윈은 학제간 분야로 공동연구가 활발하게 이루어지고 있는 주제 분야이기에, 향후 연구에서는 모든 저자를 분석에 고려하는 방안이 대한 검토가 필요하다.

둘째, 인용 자료를 연구 대상으로 삼았기에 중요한 연구들 중에서 최근에 발표되었다는 이유로 인용 수가 충분치 않아 본 연구의 분석에서 누락되었을 가능성이 있다. 인용정보 대신에 연구 초록 등을 분석하는 토픽모델링 분석을 사용하여 최근 연구를 반영하는 추가 연구가 필요하다.

셋째, 본 연구는 2010년대의 연구결과를 분석하였다. 디지털 트윈 주제는 4차 산업혁명에 대한 관심으로 관련 연구가 최근에 급증하고 있으므로 본 연구의 데이터 수집 기간이 9년(2010-2018)으로 비교적 짧은 것을 감안하였을 때 향후 연구는 디지털 트윈에 대한 연구가 충분히 축적된 후의 추가적인 연구의 필요성이 제기된다.

참고문헌

- 강동준, 이길남. (2015). SNA (Social Network Analysis)를 활용한 한국무역학회지 공저자 네트워크 분석. *무역학회지*, 40(5), 1-23.
- 강효은, 김호원. (2018). 제조 산업 기반 디지털 트윈 요소 기술 및 동향. *한국통신학회지 (정보와통신)*, 35(8), 24-28.
- 김경식. (2017). 저자동시인용 연결망 분석을 통한 스포츠 안전사고의 지적 구조 규명. *한국융합과학회지 (구 한국시큐리티융합경영학회지)*, 6(3), 1-16.
- 김광재, 박종구. (2011). 저자동시인용 분석방법을 이용한 혁신확산 연구의 지적구조. *한국방송학보*, 25(6), 52-87.
- 김미애, 서창교. (2015). 국내 SCM 연구의 저자동시인용분석. *정보시스템연구*, 24(4), 43-60.
- 김재욱, 김향미, 이소영, 이진화. (2008). 저자동시인용 분석을 통한 “관계 마케팅” 연구 동향 및 지적 구조 규명에 관한 연구. *마케팅연구*, 23(3), 1-35.
- 류성열, 박상철. (2018). ‘정보시스템연구’의 연구주제와 서베이 방법론 동향분석. *정보시스템연구*, 27(4), 1-33.
- 문주영. (2011). 2000년대 비서학연구의 저자동시인용분석. *비서·사무경영연구*, 20(1), 25-44.
- 매일경제. (2019). 수산물도 첨단기술로...전북 스마트 양식시스템 추진. 검색일 2019년 5월 28일. <https://www.mk.co.kr/news/business/view/2019/05/308373/>.
- 서창교, 황채영. (2012). “한국SCM학회지”의 연구 다양성 평가: 2002-2011. *한국SCM학회지*, 12(2), 99-110.
- 이데일리. (2019). 수원시, 5G 기반 ‘모바일 디지털 트윈’ 기술로 구도심 혁신. 검색일 2019년 5월 28일. <http://www.edaily.co.kr/news/read?newsId=02364886622486952&mediaCodeNo=257>.
- 이우형. (2017). 계량정보분석 방법의 이해 및 정책적 함의. *한국산업기술진흥원*, 23.
- 전은주, 천성문, 이영순. (2013). 저자동시인용 분석을 통한 상담학의 지적 구조 분석. *상담학연구*, 14(1), 461-480.
- 최무진, 박종필. (2017). CPS(Cyber physical system)와 MIS의 연구기회 탐색. *정보시스템연구*, 26(4), 63-85.
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002). A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8), 102-114.
- Backhaus, K., Luggner, K., and Koch, M. (2011). The structure and evolution of business-to-business marketing: A citation and co-citation analysis. *Industrial Marketing Management*, 40(6), 940-951.
- Baheti, R., and Gill, H. (2011). Cyber-physical systems. *The Impact of Control Technology*, 12(1), 161-166.
- Chen, M., Wan, J., and Li, F. (2012). Machine-to-machine communications: Architectures, standards and applications. *KSII Transactions on*

- Internet & Information Systems*, 6(2), 480-497.
- Gartner (2016). Gartner's Top 10 Strategic Technology Trends for 2017. Retrieved May 28, 2019, <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017/>.
- Gartner. (2017). Gartner's Top 10 Strategic Technology Trends for 2018. Retrieved May 28, 2019, <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2018/>.
- Gartner. (2018). Gartner's Top 10 Strategic Technology Trends for 2019. Retrieved May 28, 2019, <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019/>.
- Gunes, V., Peter, S., Givargis, T., and Vahid, F. (2014). A survey on concepts, applications, and challenges in cyber-physical systems. *KSII Transactions on Internet & Information Systems*, 8(12), 4242-4268.
- Ilic, M. D., Xie, L., Khan, U. A., and Moura, J. M. (2010). Modeling of future cyber - physical energy systems for distributed sensing and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 40(4), 825-838.
- Jin, J., Gubbi, J., Marusic, S., and Palaniswami, M. (2014). An information framework for creating a smart city through internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(2), 112-121.
- Kerlinger, F. N. (1966). *Foundations of Behavioral Research*. Wadsworth.
- Lee, E. A. (2008). Cyber physical systems: Design challenges. In *IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 363-369.
- Lee, J., Bagheri, B., and Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23.
- Liu, Y., Ning, P., and Reiter, M. K. (2011). False data injection attacks against state estimation in electric power grids. *ACM Transactions on Information and System Security (TISSEC)*, 14(1), 13.
- Madni, A. M., Madni, C. C., and Lucero, S. D. (2019). Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. *Systems*, 7(1), 7.
- McCain, K. W. (1990). Mapping authors in intellectual space: A technical overview. *Journal of the American Society for Information Science*, 41(6), 433-443.
- Mo, Y., Kim, T. H. J., Brancik, K., Dickinson, D., Lee, H., Perrig, A., and Sinopoli, B. (2011). Cyber - physical security of a smart grid infrastructure. *Proceedings of the IEEE*, 100(1), 195-209.

- Monostori, L. (2014). Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia Cirp*, 17, 9-13.
- Pasqualetti, F., Dorfler, F., and Bullo, F. (2013). Attack detection and identification in cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 58(11), 2715-2729.
- Rajkumar, R., Lee, I., Sha, L., and Stankovic, J. (2010). Cyber-physical systems: The next computing revolution. In *IEEE Design Automation Conference*. 731-736.
- Sampigethaya, K., and Poovendran, R. (2012). Cyber-physical integration in future aviation information systems. In *IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. 7C2 1-12.
- SAP. (2016). Coffee Machines Brew Industry Disruption: Digital Twins Emerge in 2017 . Retrieved May 28, 2019, from <https://news.sap.com/2016/12/coffee-machines-brew-industry-disruption-digital-twins-emerge-in-2017/>.
- Sha, L., Gopalakrishnan, S., Liu, X., and Wang, Q. (2008). Cyber-physical systems: A new frontier. In *IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing*, 1-9.
- Tao, F., Zuo, Y., Da Xu, L., and Zhang, L. (2014). IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(2), 1547-1557.
- Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D., and Zhang, C. (2016). Towards smart factory for industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Computer Networks*, 101, 158-168.
- Webster, J., and Watson, R. T. (2002). Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review. *MIS Quarterly*, 13-23.
- White, H. D., and Griffith, B. C. (1981). Author cocitation: A literature measure of intellectual structure. *Journal of the American Society for Information Science*, 32(3), 163-171.
- Zavaraqi, R. (2016). Mapping the intellectual structure of knowledge management subject area: A co-citation network analysis. *International Journal of Information Science and Management (IJISM)*, 14(1), 73-82.
- Zhang, Y., Qiu, M., Tsai, C. W., Hassan, M. M., and Alamri, A. (2015). Health-CPS: Healthcare cyber-physical system assisted by cloud and big data. *IEEE Systems Journal*, 11(1), 88-95.
- Zhao, D., and Strotmann, A. (2014). The knowledge base and research front of

information science 2006 - 2010: An author cocitation and bibliographic coupling analysis. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 65(5), 995-1006.

김 수 민 (Kim, Sumin)



경북대학교에서 경영학 학사와 석사를 취득하였으며 주요 관심분야는 디지털 트윈, 데이터마이닝, 공유 경제 등이다.

서 창 교 (Suh, Chang-Kyo)



경북대학교에서 경영학과 학사, POSTECH에서 산업공학 석사 및 박사학위를 취득하였으며, 현재 경북대학교 경영학부 교수로 재직 중이다. 주요 관심 분야는 SCM, 지능정보시스템, 텍스트 마이닝 등이다.

<Abstract>

Author Co-citation Analysis for Digital Twin Studies

Kim, Sumin · Suh, Chang-Kyo

Purpose

A digital twin is a digital replication of a physical system. Gartner identified the digital twin as one of the Gartner Top 10 Strategic Technology Trend for three years from 2017. The rapid development of the digital twin market is expected to bring about innovation and change throughout society, and much research has been done recently in academia. In this research, we tried to explore the main research trends for digital twin research.

Design/methodology/approach

We collected the digital twin research from Web of Science , and analyzed 804 articles that was published during time span of 2010-2018. A total of 41 key authors were selected based on the frequency of citation. We created a co-citation matrix for the core authors, and performed multivariate analysis such as cluster analysis and multidimensional scaling. We also conducted social network analysis to find the influential researchers in digital twin research.

Findings

We identified four major sub- areas of digital twin research: “Infrastructure”, “Prospects and Challenges”, “Security”, and “Smart Manufacturing”. We also identified the most influential researchers in digital twin research: Lee EA, Rajkumar R, Wan J, Karnouskos S, Kim K, and Cardenas AA. Limitation and further research suggestion were also discussed as a concluding remarks.

Keywords: Digital twin, Cyber physical system, CPS, Industry 4.0, Author co-citation analysis

* 이 논문은 2019년 6월 2일 접수, 2019년 7월 27일 1차 심사, 2019년 8월 23일 게재 확정되었습니다.