

계량서지분석과 LDA 토픽모델링을 통한 도시 디지털 트윈 연구동향과 연구주제 분석

Analysis of Research Trends and Topics in City Digital Twin through Bibliometric Analysis and LDA Topic Modeling

최병창¹, 안혜경², 김문구^{3*}

Byoung-Chang Choi¹, Hye-Kyoung An², Moon-Koo Kim^{3*}

요약

본 연구는 도시 디지털 트윈 분야의 지식 생산 구조와 핵심 연구 주제를 살펴보기 위해, Scopus에 수록된 영문 학술지 논문 664편(2018~2025년)을 대상으로 계량서지분석과 LDA 토픽 모델링을 결합한 혼합 분석을 수행하였다. 분석 결과, 도시 디지털 트윈 연구는 2020년 이후 지수적 증가 패턴을 보였으며, 지속가능성·도시계획 학술지와 공학 학술지가 공존하는 이중 분포를 형성하고 있다. 국가별로는 중국, 미국, 영국이 상위권을 차지하였다. 또한 LDA 토픽 모델링을 통해 건물 및 에너지 관리, 스마트시티 인프라 설계, 디지털 트윈-메타버스 융합, 사물인터넷·인공지능 기반 예측 시스템, 지능형 교통 시스템, 데이터 통합 및 위험관리, 지리정보시스템 기반 도시 정보 플랫폼의 7개 핵심 토픽이 도출되었으며, 디지털 트윈-메타버스 융합(28.5%), 데이터 통합 및 위험관리(19.4%), 건물 및 에너지 관리(18.4%)가 큰 비중을 차지하였다. 본 연구는 도시 디지털 트윈이 기술 시스템과 도시 정책의 교차 영역에서 다층적으로 형성되어 가고 있음을 보여주며, 균형적 연구 활성화와 정책 반영에 관련된 시사점을 제공한다.

핵심어 : 도시 디지털 트윈, 계량서지분석, LDA 토픽 모델링, 스마트시티, 연구 동향

Abstract

This study examines the knowledge production structure and core research topics in the field of City Digital Twin (CDT) by conducting a mixed analysis that combines bibliometric analysis and Latent Dirichlet Allocation (LDA) topic modeling on 664 English-language journal articles published between 2018 and 2025 in the Scopus database. The analysis shows that research on City Digital Twin has followed an exponential growth pattern since 2020, with sustainability- and urban planning-oriented journals coexisting with engineering-oriented journals at the top tier, and with China, the United States, and the United

1 Department of Business Consulting, Daejeon University, Daejeon, Korea [Graduate Student]

e-mail: cbc71@korea.kr

2 Department of Business Consulting, Daejeon University, Daejeon, Korea [Graduate Student]

e-mail: samoa101@naver.com

3 Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, Korea [Principal Researcher]

e-mail: mkkim@etri.re.kr (Corresponding Author)

Received(May 11, 2026), Review Result(1st: June 7, 2026), Accepted(August 7, 2026), Published(August 31, 2026)



© 2026 The Authors. Published by NCISS.

This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.

Kingdom leading in national research productivity. The LDA topic modeling identified seven core topics: building and energy management, smart city infrastructure design, digital twin-metaverse integration, Internet of Things and artificial intelligence-based prediction systems, intelligent transportation systems, data integration and risk management, and Geographic Information System-based urban information platforms. Among these, digital twin-metaverse integration (28.5%), data integration and risk management (19.4%), and building and energy management (18.4%) account for the largest shares. The findings indicate that City Digital Twin research is developing as a multi-layered field at the intersection of technology systems and urban policy, and offer implications for fostering balanced research development and policy reflection.

Keyword : City Digital Twin, Bibliometric Analysis, LDA Topic Modeling, Smart City, Research Trends

1. 서론

기후위기 대응, 인구 집중에 따른 도시 인프라 부담, 행정 부처 간 데이터 단절 등 복합적 도시 문제에 대응하기 위한 정책 수단으로 도시 디지털 트윈(City Digital Twin, CDT)이 부상하고 있다. 도시 디지털 트윈은 물리적 도시 환경을 가상 공간에 실시간으로 재현하여 도시의 상태를 모니터링하고 정책 개입의 효과를 사전에 검증하는 동적 시스템으로 정의된다 [1]. 싱가포르의 Virtual Singapore, 영국의 National Digital Twin Programme, 한국의 디지털 트윈국토 사업 등 국가 단위의 정책 프로젝트가 추진되고 있으며, 이러한 흐름은 코로나19 이후 비대면 행정 수요의 확대와 탄소 중립 정책의 본격화와 맞물려 더욱 가속화되고 있다 [2]. 이는 도시 디지털 트윈이 단순한 시각화 기술을 넘어 도시 거버넌스의 작동 방식과 정책 의사결정 구조를 재편하는 사회-기술적 제도로 작동하기 시작했음을 시사한다 [3].

이러한 정책적 부상은 학술 연구의 양적 확대로 이어지고 있다. El-Agamy et al. [4]은 서지분석에서 디지털 트윈과 스마트시티 영역의 출판이 2020년을 기점으로 가파른 증가세를 보인다고 보고 하였으며, Mazzetto [5] 역시 동일한 양적 추세를 확인하였다. 연구의 외연 또한 에너지 관리, 재난 대응, 교통 운영, 시민 참여 등 도시 정책의 다양한 영역으로 확장되고 있으나 [6], 분야 전반의 지식 생산 구조와 주제 지형을 통합적으로 진단한 연구는 충분히 축적되지 못하고 있다. 기존 서지 분석은 특정 기술-응용 분야 단위로 분절되어 있고 [5], 키워드 빈도 중심의 접근이 우세하여 잠재 토픽 구조와 토픽별 비중을 테마 단위로 해석한 연구는 제한적이다. 이러한 공백을 보완하는 작업은 분야의 지식 생산 구조를 거시적으로 조망하고 후속 연구의 방향성을 모색하는 분석 틀을 제공한다는 점에서 학술적·정책적 의의를 갖는다 [7].

이에 본 연구는 Scopus에 수록된 도시 디지털 트윈 관련 영문 학술지 논문 664편(2018~2025년)을 대상으로 계량서지분석과 LDA 토픽 모델링을 결합한 혼합적 분석을 수행한다. 구체적인 연구 질문은 다음과 같다.

첫째, 도시 디지털 트윈 연구의 지식 생산은 시간, 국가, 저널 차원에서 어떠한 구조로 형성되어 왔는가?

둘째, 토픽 모델링을 통해 도출되는 도시 디지털 트윈 연구의 잠재 주제 구조와 주요 활용 분야는 무엇이며, 각 토픽은 어떠한 비중으로 분포하고 있는가?

셋째, 도출된 주제 구조는 도시 디지털 트윈 연구의 발전 방향에 어떠한 학술적·정책적 시사점을 제공하는가?

2. 이론적 배경

2.1 도시 디지털 트윈의 개념과 의의

도시 디지털 트윈(City Digital Twin, CDT)은 IoT, 클라우드 컴퓨팅, BIM, GIS 기술의 성숙과 함께 제조업 단위의 디지털 트윈 개념이 도시 규모로 확장된 것으로 [8], 도시의 물리적 환경과 사회·경제적 활동을 가상 공간에 실시간으로 재현하고 시뮬레이션을 통해 정책 효과를 사전에 검증하는 동적 시스템으로 정의된다 [1][7]. 이는 단순한 3차원 시각화를 넘어 도시 운영의 의사결정 구조에 직접 결합되는 통합 정보 체계를 의미한다.

CDT는 핵심 기술 스택의 성숙, 도시화 가속과 기후위기에 따른 사전 검증 수요 증대, 부문별 기술 도입에 머물렀던 스마트시티 정책의 한계를 극복하려는 통합 거버넌스 요구가 결합되면서 부상하였다 [9]. 그 기능은 물리적 환경의 재현, 데이터 기반 지능형 분석과 최적화, 3차원 시각화를 통한 시민 참여의 세 축으로 요약된다.

2.2 선행연구 고찰

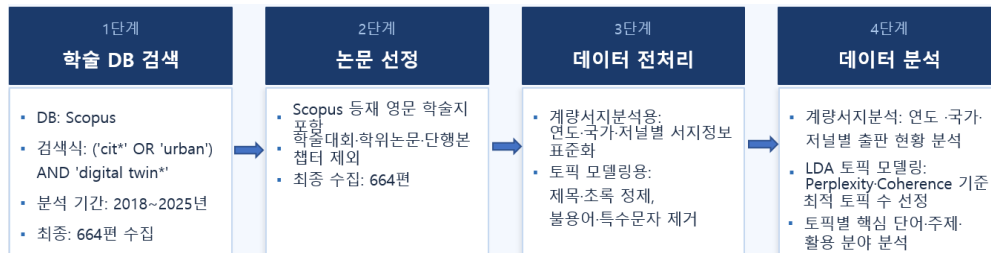
CDT 분야의 서지분석 연구는 분석 초점에 따라 세 흐름으로 구분된다. 첫째, CDT 자체를 대상으로 한 연구는 CDT가 단순 시각화를 넘어 도시 운영·의사결정·지속가능한 전환을 지원하는 핵심 플랫폼으로 인식되고 있음을 보여준다 [10]. 둘째, 기술·인프라 중심 연구는 IoT 기반 데이터 수집, AI 기반 예측·최적화, 블록체인 기반 신뢰성 확보가 주요 연구 주제로 부상하고 있음을 확인하였다 [11]. 셋째, 응용 분야 중심 연구는 지속가능한 스마트시티, 도시 물류, 기후 대응형 도시 개발 등 다양한 영역에서 CDT 연구가 확대되며 기술 중심 논의에서 도시 문제 해결 중심으로 전환되고 있음을 보여준다 [12].

이상의 검토는 기존 연구가 분야의 양적 성장과 다학제적 확장을 확인하는 데 기여해 왔음을 보여주는 동시에, 두 가지 한계를 드러낸다. 기존 연구는 특정 기술·응용 분야 단위로 분절되어 CDT 전반의 지식 생산 구조와 주제 지형을 통합적으로 분석한 연구가 부족하며, 키워드 빈도·인용 네트워크 중심의 접근이 우세하여 잠재 토픽 구조와 토픽별 의미·비중을 테마 차원에서 도출한 시도는 제한적이다.

3. 연구방법

3.1 분석 절차

본 연구는 계량서지분석과 LDA 토픽 모델링을 결합한 혼합적 분석을 통해 도시 디지털 트윈 분야의 지식 생산 구조와 핵심 연구 주제를 규명하였다. 분석 절차는 [그림 1]과 같다.



[그림 1] 연구방법 및 절차

[Fig. 1] Research Methods and Procedures

3.2 자료 수집

학술 문헌 수집을 위해 Scopus 데이터베이스를 활용하였다. Scopus는 공학, 사회과학, 환경·도시 연구 영역을 폭넓게 색인하며 메타데이터 표준화 수준이 높아 CDT와 같은 다학제적 연구 분야의 동향을 통합적으로 파악하기에 적합하다 [4]. 검색식은 제목·저자 키워드를 대상으로 ('city' OR 'urban') AND 'digital twin'을 적용하였고, 분석 기간은 2018~2025년으로 설정하였다. Scopus 등재 영문 학술지 정규 논문만을 포함하였으며, 학술대회 자료·학위논문·단행본 챕터는 동료 심사 일관성 확보가 어렵다는 점에서 제외하였다. 최종 수집 문헌은 총 664편이다.

3.3 분석 방법

수집된 서지정보는 목적에 따라 두 가지 방식으로 전처리하였다. 계량서지분석을 위해서는 연도·국가·저널 기준으로 데이터를 정리·표준화하였고, 토픽 모델링을 위해서는 제목과 초록을 분석 단위로 설정한 후 특수문자·숫자·일반 불용어를 제거하였다.

계량서지분석은 특정 학문 분야의 양적 성장과 학술적 지형을 객관적으로 진단하는 데 효과적인 접근으로 [13], 본 연구에서는 연도별 출판 추세, 국가별 연구 생산성, 주요 학술지 분포를 분석하였다.

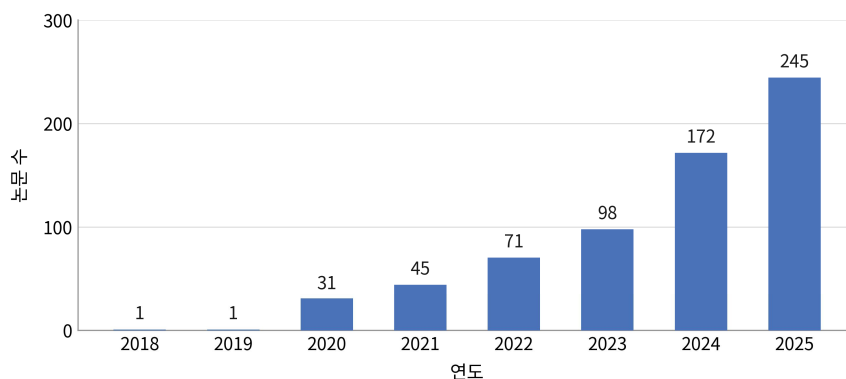
잠재 주제 구조 도출을 위해 잠재 디리클레 할당(Latent Dirichlet Allocation, LDA) 알고리즘을 적용하였다. LDA는 각 문서를 여러 토픽의 확률 분포로 표현하는 확률 모형으로, 키워드 빈도 중심의 클러스터 분석에 비해 텍스트의 잠재 주제 구조를 정밀하게 식별하며 학술 문헌 분석에서 안정성과 해석 가능성이 검증되어 있다 [14]. 분석 도구로는 LDA 기반 토픽 모델링과 시각화를 통합 지원하는 텍스트롬(Textom)을 사용하였다. 최적 토픽 수는 Perplexity와 Coherence 지표를 단계적으로 비교하여 통계적 적합도와 해석 가능성을 종합적으로 고려해 선정하였다. 도출된 각 토픽의 의미 부여와 명명은 CDT 분야 교수 1인과 외부 전문가 1인의 검토를 거쳐 저자들과의 협의를 통해 최종 결정하였다.

한편, 본 연구의 작성 과정에서 생성형 AI 도구인 Claude(Anthropic, Opus 5)를 문장 다듬기와 표현 정제 목적으로 보조적으로 활용하였다. 자료 수집, 데이터 분석, 결과 해석은 모두 저자들이 직접 수행하였으며, 생성형 AI는 분석 결과의 도출이나 학술적 판단에는 관여하지 않았다.

4. 연구결과

4.1 지식 생산 현황 분석

본 연구는 도시 디지털 트윈 분야의 지식 생산 구조를 분석하기 위해 연도별 출판 추세, 주요 학술지 분포, 국가별 연구 생산성을 분석한다.



[그림 2] 연도별 논문출판 현황

[Fig. 2] Annual Publication Trend

연도별 출판 추세를 살펴보면, CDT 연구는 [그림 2]와 같이 세 단계의 발전 양상을 보인다. 2018~2020년 초기 탐색기(전체의 5.0%)를 거쳐, 2021~2023년 성장기에는 214편(32.2%)이 출판되었으며, 2024~2025년 확장기에는 417편(62.8%)이 집중되어 급격한 양적 팽창이 이루어졌다. 지수 모

형 적합 결과 $y \approx 0.74 \cdot e^{0.67t}$ ($R^2 \approx 0.98$)로 지수적 증가 패턴이 확인되며, 2020년의 변곡점은 코로나19 이후 비대면 행정 수요 확대 및 디지털 전환 정책 본격화 시기와 맞물려 있다.

주요 학술지 분포를 [표 1]과 같이 정리하였다. 상위 10위권 13개 학술지가 전체의 28.9%(192편)를 차지하며 두 흐름으로 구성된다. 하나는 Sustainability(31편), Sustainable Cities and Society(20편), Sustainable Energy Technologies and Assessments(18편) 등 지속가능성·도시계획 계열이며, 다른 하나는 Applied Sciences·IEEE Access(각 17편), IEEE Internet of Things Journal(13편) 등 공학·기술 계열이다. 특히 상위 1~3위를 지속가능성 계열이 독점하는 점은 CDT 연구가 기술 개발을 넘어 지속가능성 의제와 결합되는 경향을 보여준다.

[표 1] 상위 저널 분포

[Table 1] Distribution of Top Journals

순위	학술지명	논문	비율
1	Sustainability	31	4.7%
2	Sustainable Cities and Society	20	3.0%
3	Sustainable Energy Technologies and Assessments	18	2.7%
4	Applied Sciences / IEEE Access	17	2.6%
6	IEEE Internet of Things Journal	13	2.0%
7	Buildings / Smart Cities / IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	12	1.8%
10	Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science / Journal of Management in Engineering / Remote Sensing / Sensors	10	1.5%

[표 2]는 국가별 연구 생산성을 제시한 것이다. 상위 10개국은 아시아·태평양(중국·한국·호주·홍콩), 유럽(영국·이탈리아·독일·스페인·스웨덴), 북미(미국)의 세 권역으로 구성된다. 중국(16.8%), 미국(9.3%), 영국(7.6%)이 상위 3위를 차지하며, 특히 중국의 비중은 2위 미국의 1.8배, 3위 영국의 2.2배에 달해 주요 생산국으로서의 위상이 두드러진다. 한편 상위 10개국은 중국을 제외하면 모두 OECD 회원국으로 도시화율과 디지털 인프라 수준이 높은 국가군에 해당하며, 아프리카·중남미·서아시아 권역이 상위권에 포함되지 않는 점은 CDT 지식 생산이 고소득·고도시화 국가군에 편중되어 있음을 시사한다.

[표 2] 상위 국가 분포

[Table 2] Distribution of Top Countries

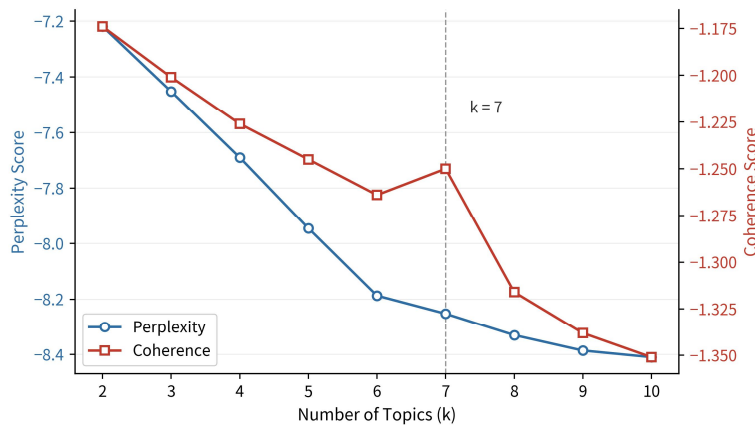
순위	국가	출판 수	비율
1	중국	172	16.8%
2	미국	95	9.3%
3	영국	78	7.6%

4	이탈리아	56	5.5%
5	한국	45	4.4%
6	호주	40	3.9%
7	독일	32	3.1%
8	스페인	30	2.9%
9	스웨덴	28	2.7%
10	홍콩	27	2.6%

주) 비율은 국가별 귀속 건수 합계(1,024건) 대비 값이며, 국제 공동연구는 중복 집계

4.2 LDA 토픽모델링 분석 결과

도시 디지털 트윈 분야의 잠재 주제 구조 도출을 위해 LDA 토픽 모델링을 적용하였다. [그림 3]과 같이 토픽 수 2~10개 구간에서 두 지표를 단계적으로 측정하였다. Perplexity는 토픽 수 증가에 따라 -7.219에서 -8.410으로 지속 감소하였으며, 토픽 6~7 부근에서 감소 기울기가 완만해졌다. Coherence는 토픽 6→7 구간에서 -1.264에서 -1.250으로 분석 범위 내 유일하게 반등하였으나, 토픽 8에서 -1.316으로 재악화되었다. 두 지표를 종합하여 통계적 적합도와 의미적 일관성이 균형을 이루는 7개를 최종 토픽 수로 선정하였다. 한편, 도출된 7개 토픽의 분포와 주제어는 [표 3]과 같다.



[그림 3] 최적 토픽수 결정

[Fig. 3] Determination of Optimal Number of Topics

[표 3] 토픽별 분포 및 주제어

[Table 3] Distribution by Topic and Keywords

토픽	토픽명	분포 (비율)	토픽 주제어
1	건물 및 에너지 관리	122편 (18.4%)	building, energy, BIM, GIS, simulation
2	스마트시티 인프라 설계	79편 (11.9%)	smart city, infrastructure, standard, interoperability, framework

3	디지털 트윈-메타버스 융합	189편 (28.5%)	metaverse, virtual, immersive, social, platform
4	IoT/AI 기반 예측 시스템	42편 (6.3%)	IoT, deep learning, edge computing, federated learning, optimization
5	지능형 교통 시스템	38편 (5.7%)	traffic, vehicle, mobility, autonomous, simulation
6	데이터 통합 및 위험관리	129편 (19.4%)	data integration, risk, blockchain, security, semantic
7	GIS 도시 정보 플랫폼	65편 (9.8%)	GIS, BIM, 3D, visualization, generative

디지털 트윈-메타버스 융합(28.5%), 데이터 통합 및 위험관리(19.4%), 건물 및 에너지 관리(18.4%)의 상위 3개 토픽이 전체의 66.3%를 차지하며, 스마트시티 인프라 설계(11.9%), GIS 도시 정보 플랫폼(9.8%), IoT/AI 기반 예측 시스템(6.3%), 지능형 교통 시스템(5.7%)이 뒤를 잇는다.

4.3 토픽별 주제분석

도출된 7개 토픽의 학술적 의미를 파악하기 위해 토픽별 핵심 주제와 연구 흐름을 대표 논문 중심으로 분석하였다. 대표 논문은 LDA 분석에서 산출된 토픽 등장 확률을 기준으로 선별한 후, CDT 분야 교수 1인과 외부 전문가 1인의 검토를 거쳐 저자들과의 협의로 확정하였다.

■ 토픽 1: 건물 및 에너지 관리

토픽 1은 CDT를 활용한 건물 에너지 관리 영역으로, GIS와 BIM을 결합한 분석을 중심으로 발전해 왔다. 두 기술의 결합은 도시 전체의 에너지 흐름을 파악하고 근린 단위 수요를 예측함으로써 탄소 저감 전략 수립의 기반을 제공한다 [15]. 최근에는 인공지능을 통해 에너지 소비 패턴의 예측 정확도와 설명 가능성을 함께 높이는 연구 [16], VR·AR을 활용한 시민 참여형 설계 연구 [17]로 외연이 확장되고 있다.

■ 토픽 2: 스마트시티 인프라 설계

토픽 2는 도로·상하수도·전력망 등 도시 인프라의 설계와 운영을 다루는 영역으로, 표준화와 시스템 간 호환성을 축으로 발전해 왔다. ISO 표준에 기반한 도시 서비스 설계 방법은 이질적 도시 시스템 간 상호운용의 기반을 마련하였고 [18], 도시 공간 정보와 분석 모델을 양방향으로 연결하는 기술은 물리 도시의 변화를 가상 도시에 즉시 반영한다 [19]. 인프라 운영 측면에서는 디지털 트윈 기반의 물-에너지 통합 관리 [20], 블록체인 결합을 통한 데이터 신뢰성 확보 [21], 스마트시티 디지털 트윈과 도시 메타버스를 연계한 시민 정보 활용 및 프라이버시 보호 [22] 연구가 축적되고 있다.

■ 토픽 3: 디지털 트윈-메타버스 융합

토픽 3은 CDT와 메타버스의 결합을 통해 도시계획과 시민 참여 방식을 재구성하는 영역으로, 몰입형 시각화를 중심으로 발전해 왔다. 시민이 촬영한 사진·영상을 가상 도시 모델에 결합하는 참여형 센싱은 시민 관점의 위험 요소 파악을 가능하게 하며 [23], 차세대 이동통신과 가상 환경 기

술의 결합은 스마트시티를 시민의 활동·소통 공간으로 확장한다 [24]. 나아가 인공지능·빅데이터·디지털 트윈이 결합된 메타버스가 도시 설계와 공공 서비스에 적용되고 [25], 물리적 공간을 넘어 시민의 사회적 활동까지 포괄하는 사회적 도시 디지털 트윈(social digital twin) 개념이 제시되었으며 [26], CDT를 공동 플랫폼으로 구축해 다수 이해관계자의 데이터 공유와 협력을 지원하는 논의로 확장되고 있다 [27].

■ 토픽 4: 사물인터넷·인공지능 기반 예측 시스템

토픽 4는 IoT 센서와 인공지능을 결합해 도시 데이터를 분석·예측하는 영역으로, 딥러닝과 분산 처리 기술을 축으로 발전해 왔다. 협력형 지능형 교통 시스템의 보안 문제 해결 [28], 무선 센서 네트워크 기반 거주자 환경 만족도 평가 [29], 에지 컴퓨팅 기반 분산 학습을 통한 시스템 에너지 절감 [30], 전력망 데이터와 진화 알고리즘을 결합한 전력 배분·수요 관리 [31] 등이 대표적이다. 특히 연합 학습(federated learning)은 데이터를 집중시키지 않고 다기관 학습을 가능하게 하여, 프라이버시 보호와 데이터 활용을 동시에 달성하는 핵심 기술로 부상하였다 [32].

■ 토픽 5: 지능형 교통 시스템

토픽 5는 CDT를 통해 도시 교통 흐름을 분석·최적화하는 영역으로, 가상 공간에서의 시뮬레이션과 시각화를 중심으로 발전해 왔다. 차량 간 통신 환경에서 CDT는 결측 교통 데이터를 보완하고 실시간 교통 상황을 예측하는 데 활용되며 [33], 디지털 트윈 기반 진단은 교통 인프라의 에너지 효율을 평가하는 수단을 제공한다 [34]. 게임 엔진과 교통 시뮬레이션 도구를 결합한 시각화는 정책 시나리오를 제시함으로써 전문가와 시민의 공동 의사결정을 지원하고 [35], 자율주행 차량의 경로 안내 연구는 개인 편의와 공공 이익의 균형을 모색한다 [36]. 또한 다양한 이동 수단을 단일 서비스로 통합하는 통합 모빌리티 개념은 사용자 편의와 환경 지속가능성을 함께 추구하는 방향으로 전개되고 있다 [37].

■ 토픽 6: 데이터 통합 및 위험관리

토픽 6은 다양한 출처의 데이터를 연결하고 안전하게 관리하는 영역으로, 데이터 간 의미 연결과 보안·위험관리를 축으로 발전해 왔다. IoT 환경에서 물리 객체의 데이터를 수집·분석·시각화하는 다층 구조 모델은 디지털 트윈의 기본 틀을 제시하였고 [38], 건물 정보 모델을 도시 규모로 확장한 도시정보모델링(City Information Modeling) 개념은 분산된 도시 데이터를 연결하는 기반을 마련하였다 [39]. 보안 측면에서는 실제 모바일 데이터를 대체하는 합성 시민 이동 데이터 생성 기법이 프라이버시 보호와 데이터 활용을 동시에 가능하게 하며 [40], 블록체인과 디지털 인증서를 결합한 검증 체계는 데이터의 소유권과 진본성을 보장한다 [41]. 나아가 통계와 위험 분석을 결합한 위험 정보 기반 디지털 트윈은 위기 상황에서의 적응과 회복을 지향한다 [42].

■ 토픽 7: 지리정보시스템 기반 도시 정보 플랫폼

토픽 7은 GIS를 기반으로 CDT의 공간 정보를 관리·활용하는 영역으로, BIM과 GIS의 통합 및

시각화 기술을 중심으로 발전해 왔다. 도시 시설 관리를 위해 다중 출처 데이터를 수집·정리하는 분산형 GIS는 자원 배분과 운영 일정을 효율화하며 [43], 컴퓨터 그래픽 기법을 적용한 데이터 형식 변환은 BIM과 GIS 간 호환성 문제를 해결한다 [44]. 시각화 측면에서는 게임 엔진 기반 지오공간 플랫폼이 CCTV 영상을 통해 차량과 보행자의 이동 경로를 동적으로 재현하고 [45], 항공 영상과 거리 측정 센서 데이터를 3차원 도시 모델로 변환하는 절차적 방식은 도시 모델링을 자동화한다 [46]. 생성형 인공지능 측면에서는 데이터의 의미를 함께 처리하는 인지형 디지털 트윈이 물류·주차 관리의 시스템 간 연결성을 높이고 [47], 건물 외형과 조건을 결합한 생성형 모델은 데이터가 부족한 지역에서도 정교한 3차원 도시 모델 구축을 가능하게 한다 [48].

5. 결론

5.1 연구 요약 및 함의

본 연구는 Scopus에 수록된 CDT 관련 영문 학술지 논문 664편(2018~2025년)을 대상으로 계량서지 분석과 LDA 토픽 모델링을 결합한 혼합적 분석을 수행하였다. 주요 결과와 함의는 다음과 같다.

첫째, CDT 연구는 초기 탐색기(2018~2020)→성장기(2021~2023)→확장기(2024~2025)의 세 단계 발전 양상을 보이며 지수적 증가 패턴이 확인되었다. 2020년의 변곡점은 코로나19 이후 비대면 행정 수요 확대 및 디지털 전환 정책 본격화와 맞물려 있어, CDT 연구의 양적 성장이 사회·정책 환경 변화와 연동되고 있음을 시사한다.

둘째, 상위 학술지는 지속가능성·도시계획 계열과 공학 계열이 공존하는 이중 분포를 보였다. 이는 CDT 연구가 기술 개발에 한정되지 않고 기술 시스템과 도시 정책의 교차 영역에서 다루어지는 다학제적 연구 영역임을 보여준다.

셋째, 중국·미국·영국이 연구 생산성 상위 3위를 차지하였으며, 상위 10개국 고소득·고도시화 국가군에 편중된 양상은 다양한 도시 환경의 요구가 학술 담론에 반영될 여지가 남아 있음을 시사한다.

넷째, LDA 토픽 모델링으로 도출된 7개 핵심 토픽은 물리적 환경 재현, 데이터 기반 지능형 분석, 시민 참여라는 CDT의 세 기능 축을 포괄한다. 상위 3개 토픽이 전체의 66.3%를 차지하는 분포는 CDT 연구가 시각화 도구를 넘어 시민 참여 플랫폼과 데이터 거버넌스 논의로 확장되고 있음을 보여준다.

5.2 정책적·실무적 시사점

첫째, CDT 연구의 균형적 활성화가 필요하다. 상위 3개 토픽에 연구가 집중된 반면 IoT·AI 기반

예측 시스템과 지능형 교통 시스템의 비중은 상대적으로 작아, 해당 영역에 대한 학술적 관심과 연구 지원이 요구된다.

둘째, 본 연구의 7개 토픽 구조는 물리적 환경 재현·지능형 분석·시민 참여의 세 축을 균형 있게 반영하는 정책 의제 설정의 참고 틀로 활용될 수 있다.

셋째, 데이터 통합 및 위험관리 토픽의 높은 비중은 CDT 운영에서 데이터 보안·프라이버시 의제가 핵심 관심사임을 보여주며, 데이터 활용 규범과 제도적 틀 정비 논의의 기초 자료가 될 수 있다.

5.3 연구의 한계 및 향후 연구 방향

첫째, 시간 차원의 분석에 한계가 있다. 2018~2019년 출판량이 각 1편에 불과하여 시기별 토픽 분포 분석이 어려웠으나, 향후 데이터 축적 시 토픽의 부상·변화 시기를 추적하는 분석이 가능할 것이다.

둘째, 국가·권역별 비교 분석이 추가될 필요가 있다. 주요 연구 생산국 간 토픽 분포 차이와 권역별 연구 주제의 차별성을 분석함으로써 CDT 연구의 지역적 특성과 정책 맥락의 영향을 심층적으로 규명할 수 있을 것이다.

References

- [1] E. Shahat, C. T. Hyun, and C. Yeom, "City digital twin potentials: A review and research agenda," *Sustainability*, vol. 13, no. 6, Art. no. 3386, Mar. 2021, doi: 10.3390/su13063386.
- [2] D. W. Jeong, J. H. Park, J. J. Seo, W. H. Shin, and H. Y. Jang, "The progress and prospective advancements of the national digital twin pilot project," *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, vol. 32, no. 3, pp. 51-63, Sep. 2024, doi: 10.7319/kogsis.2024.32.3.051.
- [3] K. H. Lee, S. W. Lee, I. J. Yu, and S. Y. Lim, "A study on the institutional limitations of the national digital twin pilot project and proposing improvement measures," *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, vol. 32, no. 2, pp. 67-82, Jun. 2024, doi: 10.7319/kogsis.2024.32.2.067.
- [4] R. F. El-Agamy, H. A. Sayed, A. M. AL Akhatatneh, M. Aljohani, and M. Elhosseini, "Comprehensive analysis of digital twins in smart cities: A 4200-paper bibliometric study," *Artificial Intelligence Review*, vol. 57, no. 6, Art. no. 154, May 2024, doi: 10.1007/s10462-024-10781-8.
- [5] S. Mazzetto, "A review of urban digital twins integration, challenges, and future directions in smart city development," *Sustainability*, vol. 16, no. 19, Art. no. 8337, Sep. 2024, doi: 10.3390/su16198337.
- [6] M. Jafari, A. Kavousi-Fard, T. Chen, and M. Karimi, "A review on digital twin technology in smart grid, transportation system and smart city: Challenges and future," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 17471-17484, Feb. 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3241588.
- [7] V. V. Lehtola et al., "Digital twin of a city: Review of technology serving city needs," *International*

- Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 114, Art. no. 102915, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jag.2022.102915.
- [8] M. Batty, "Digital twins," *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, vol. 45, no. 5, pp. 817-820, Sep. 2018, doi: 10.1177/2399808318796416.
- [9] T. Deng, K. Zhang, and Z.-J. M. Shen, "A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities," *Journal of Management Science and Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 125-134, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.jmse.2021.03.003.
- [10] M. Mongo and N. Daidj, "Digital twin: A driver of sustainable smart cities? Evidence from a bibliometric analysis," *Environmental Economics and Policy Studies*, vol. 28, no. 1, pp. 351-379, Jan. 2026, doi: 10.1007/s10018-025-00437-4.
- [11] E. J. Sacoto-Cabrera, A. Perez-Torres, L. Tello-Oquendo, and M. Cerrada, "IoT, AI, and digital twins in smart cities: A systematic review for a thematic mapping and research agenda," *Smart Cities*, vol. 8, no. 5, Art. no. 175, Oct. 2025, doi: 10.3390/smartcities8050175.
- [12] A. Galkin, G. Samchuk, D. Kopytkov, and R. G. Thompson, "Digital twins in logistics: A comprehensive bibliometric analysis for advancing smart cities and sustainable development," *Discover Sustainability*, vol. 6, no. 1, Art. no. 853, Aug. 2025, doi: 10.1007/s43621-025-01754-0.
- [13] N. Donthu, S. Kumar, D. Mukherjee, N. Pandey, and W. M. Lim, "How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines," *Journal of Business Research*, vol. 133, pp. 285-296, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jbusres.2021.04.070.
- [14] D. M. Blei, A. Y. Ng, and M. I. Jordan, "Latent Dirichlet allocation," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 3, pp. 993-1022, Jan. 2003, doi: 10.5555/944919.944937.
- [15] N. Buckley, G. Mills, S. Letellier-Duchesne, and K. Benis, "Designing an energy-resilient neighbourhood using an urban building energy model," *Energies*, vol. 14, no. 15, Art. no. 4445, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14154445.
- [16] B. Lei, P. Liu, N. Milojevic-Dupont, and F. Biljecki, "Predicting building characteristics at urban scale using graph neural networks and street-level context," *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 111, Art. no. 102129, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2024.102129.
- [17] K. Jaalama et al., "Auditing an urban park deck with 3D geovisualization: A comparison of in-situ and VR walk-along interviews," *Urban Forestry and Urban Greening*, vol. 76, Art. no. 127712, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.ufug.2022.127712.
- [18] H. F. Badawi, F. Laamarti, and A. El Saddik, "Devising digital twins DNA paradigm for modeling ISO-based city services," *Sensors*, vol. 21, no. 4, Art. no. 1047, Feb. 2021, doi: 10.3390/s21041047.
- [19] E. Visconti, C. Tsigkanos, and Z. Hu, "Model-driven engineering city spaces via bidirectional model transformations," *Software and Systems Modeling*, vol. 20, no. 6, pp. 2003-2022, Feb. 2021, doi: 10.1007/s10270-020-00851-0.
- [20] X. Li et al., "Application of effective water-energy management based on digital twins technology in sustainable cities construction," *Sustainable Cities and Society*, vol. 87, Art. no. 104241, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.scs.2022.104241.
- [21] S. Liao, J. Wu, A. K. Bashir, W. Yang, J. Li, and U. Tariq, "Digital twin consensus for blockchain-enabled intelligent transportation systems in smart cities," *IEEE Transactions on Intelligent*

- Transportation Systems*, vol. 23, no. 11, pp. 22619-22629, Nov. 2022, doi: 10.1109/TITS.2021.3134002.
- [22] K. Kuru, "MetaOmniCity: Toward immersive urban metaverse cyberspaces using smart city digital twins," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 43844-43868, May 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3272890.
- [23] Y. Ham and J. Kim, "Participatory sensing and digital twin city: Updating virtual city models for enhanced risk-informed decision-making," *Journal of Management in Engineering*, vol. 36, no. 3, Art. no. 04020005, May 2020, doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000748.
- [24] Z. Allam and D. S. Jones, "Future (post-COVID) digital, smart and sustainable cities in the wake of 6G: Digital twins, immersive realities and new urban economies," *Land Use Policy*, vol. 101, Art. no. 105201, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.landusepol.2020.105201.
- [25] Z. Allam, A. Sharifi, S. E. Bibri, D. S. Jones, and J. Krogstie, "The metaverse as a virtual form of smart cities: Opportunities and challenges for environmental, economic, and social sustainability in urban futures," *Smart Cities*, vol. 5, no. 3, pp. 771-801, Jul. 2022, doi: 10.3390/smartcities5030040.
- [26] B. Yossef Ravid and M. Aharon-Gutman, "The social digital twin: The social turn in the field of smart cities," *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, vol. 50, no. 6, pp. 1455-1470, Nov. 2023, doi: 10.1177/23998083221137079.
- [27] A. M.-A. Qadir and A. O. Fatah, "Platformization and the metaverse: Opportunities and challenges for urban sustainability and economic development," *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, vol. 10, pp. 1-29, Sep. 2023, doi: 10.4108/ew.3842.
- [28] Z. Lyu, Y. Li, H. Feng, and H. Lv, "Deep learning for security in digital twins of cooperative intelligent transportation systems," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 9, pp. 16666-16675, Oct. 2022, doi: 10.1109/TITS.2021.3113779.
- [29] W. Wang, H. Guo, X. Li, S. Tang, J. Xia, and Z. Lyu, "Deep learning for assessment of environmental satisfaction using BIM big data in energy efficient building digital twins," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 50, Art. no. 101897, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101897.
- [30] M. Kang, X. Li, H. Ji, and H. Zhang, "Distributed edge cooperation and data collection for digital twins of wide-areas," *China Communications*, vol. 20, no. 8, pp. 177-197, Sep. 2023, doi: 10.23919/JCC.fa.2023-0202.202308.
- [31] X. Wang and D. Ma, "Smart city landscape architecture for sustainable urbanization in digital twin: Practical sustainable and reliable renewable based smart cities energy hub development," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 65, Art. no. 103785, May 2024, doi: 10.1016/j.seta.2024.103785.
- [32] W. Wang et al., "Data information processing of traffic digital twins in smart cities using edge intelligent federation learning," *Information Processing and Management*, vol. 60, no. 2, Art. no. 103171, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.ipm.2022.103171.
- [33] C. Hu et al., "Digital twin-assisted real-time traffic data prediction method for 5G-enabled internet of vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 4, pp. 2811-2819, May 2022, doi: 10.1109/TII.2021.3083596.
- [34] Z. Tu, L. Qiao, R. Nowak, H. Lv, and Z. Lyu, "Digital twins-based automated pilot for energy-efficiency assessment of intelligent transportation infrastructure," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 11, pp. 22320-22330, Nov. 2022, doi: 10.1109/TITS.2022.3166585.
- [35] S. Rundel and R. De Amicis, "Leveraging digital twin and game-engine for traffic simulations and

- p>visualizations,"
- Frontiers in Virtual Reality*
- , vol. 4, Art. no. 1048753, Feb. 2023, doi: 10.3389/frvir.2023.1048753.
- [36] X. Liao, S. Leng, Y. Sun, K. Zhang, and M. Imran, "A digital-twin-based traffic guidance scheme for autonomous driving," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 22, pp. 36829-36840, Aug. 2024, doi: 10.1109/IJOT.2024.3429534.
- [37] W. Li, B. Wang, R. Sun, L. Ai, and Z. Lin, "Energy-efficient multimodal mobility networks in transportation digital twins: Strategies and optimization," *Energy*, vol. 318, Art. no. 134587, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.134587.
- [38] A. R. Al-Ali, R. Gupta, T. Z. Batool, T. Landolsi, F. Aloul, and A. A. Al Nabulsi, "Digital twin conceptual model within the context of internet of things," *Future Internet*, vol. 12, no. 10, Art. no. 163, Sep. 2020, doi: 10.3390/fi12100163.
- [39] A. Kemp, "The BIM implementation journey: Lessons learned for developing and disseminating city information modelling (CIM)," *Built Environment*, vol. 46, no. 4, pp. 528-546, Dec. 2020, doi: 10.2148/benv.46.4.528.
- [40] C. Anda, S. A. Ordóñez Medina, and K. W. Axhausen, "Synthesising digital twin travellers: Individual travel demand from aggregated mobile phone data," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 128, Art. no. 103118, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.trc.2021.103118.
- [41] Z. Pervez, Z. Khan, A. Ghafoor, and K. Soomro, "SIGNED: Smart cIty dIGital twiN vERifiable data framework," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 29430-29446, Mar. 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3260621.
- [42] U. Alibrandi, "Risk-informed digital twin of buildings and infrastructures for sustainable and resilient urban communities," *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, vol. 8, no. 3, Art. no. 04022032, Jun. 2022, doi: 10.1061/AJRUA6.0001238.
- [43] A. Bujari, A. Calvio, L. Foschini, A. Sabbioni, and A. Corradi, "A digital twin decision support system for the urban facility management process," *Sensors*, vol. 21, no. 24, Art. no. 8460, Dec. 2021, doi: 10.3390/s21248460.
- [44] J. Zhu and P. Peng, "Towards effective BIM/GIS data integration for smart city by integrating computer graphics technique," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 10, Art. no. 1889, May 2021, doi: 10.3390/rs13101889.
- [45] A. Lee, K.-W. Lee, K.-H. Kim, and S.-W. Shin, "A geospatial platform to manage large-scale individual mobility for an urban digital twin platform," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 3, Art. no. 723, Feb. 2022, doi: 10.3390/rs14030723.
- [46] S. Somanath, V. Naserentin, O. Eleftheriou, D. Sjölie, B. Stahre Wästberg, and A. Logg, "Towards urban digital twins: A workflow for procedural visualization using geospatial data," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 11, Art. no. 1939, May 2024, doi: 10.3390/rs16111939.
- [47] Y. Liu et al., "Cognitive digital twins for freight parking management in last mile delivery under smart cities paradigm," *Computers in Industry*, vol. 153, Art. no. 104022, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.compind.2023.104022.
- [48] L. Liao, Y. Ogawa, C. Zhao, and Y. Sekimoto, "ControlBldg: A variable-controlled generative framework for conditioned modeling of vast 3D urban buildings," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 230, pp. 581-598, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2025.09.026.