

# 건설기계 무인화 기술 개발을 위한 디지털 트윈 기술 Digital Twin Technology for the Development of Autonomous Construction Machinery

이연호 · 이흥석 · 장흥석 · 최성준

Yeonho Lee, Hongseok Lee, Hongseok Jang and Sungjoon Choi

## 1. 서 론

디지털 트윈은 현실 세계의 물리적 대상을 디지털 환경 내에서 모방하고 동기화하는 가상 시뮬레이션 모델을 의미한다. 이 개념은 항공/우주 분야에서 수명 예측을 위해 처음으로 개발되었으며<sup>4)</sup>, 산업 혁명 4.0(Fig.1)을 주도하는 미래의 핵심 기술 중 하나로 인식되고 있다. 디지털 트윈의 등장은 현실 세계의 물리적 대상을 디지털로 변환하는 새로운 방법에 대한 가능성을 열어 주었다. 초기에는 이러한 개념이 이론적인 수준에 머물러 있었지만, 컴퓨팅 시스템의 연산속도와 네트워크 인프라의 발전으로 인해 현실 세계와 디지털 세계 간의 연결이 가속화되고 있다.

자율주행 차량 또는 건설기계 분야에서는 디지털 트윈을 검증용 시뮬레이션으로 활용하여 무인화 기술의 발전을 촉진하고 있으며, 이를 통해 건설환경과 같은 비정형 환경에서의 자율작업을 효과적으로 수행할 수 있는 새로운 무인화 기술을 개발하고 있다. 본 기술 원고에서는 디지털 트윈의 개념과 무인화 기술 개발 분야에 응용방법에 관해 소개하고자 한다.

## 2. 디지털 트윈의 정의

디지털 트윈이라는 개념의 유래는 1991년 David Gelernter이 저술한 'Mirror Worlds'를 통해 처음 소개되었다.<sup>1)</sup> 이 책에서는 현실 세계의 물리적 대상을 프로그래밍을 통해 디지털로 모방하는 개념을 다루었다. 이후 2006년도 미시간대학(University of Michigan)의 Michael Grieves가 제품 수명 주기 관리(PLM)에 대한 새로운 예측 방법으로 실제 물리적 환경을 디지털 환경으로 모형화하는 "Information Mirroring Model"을 제안함으로써 현재 사용되는 정의에 근접하였다<sup>2)</sup>. 그러나, 당시에는 컴퓨팅 연산 능력과 네트워크 인프라가 부족하여 Fig.2와 같은 제품 수명 주기 관리(PLM) 아이디어가 실용화되지 못했다.

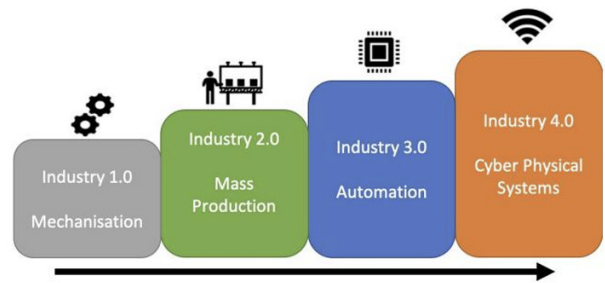


Fig. 1 Industrial Revolution<sup>7)</sup>

디지털 트윈이라는 용어는 실제로 2010년 NASA에서 기술 로드맵 초안에서 처음 등장했다. 이는 항공/우주 비행체의 수명을 예측하기 위한 도구 정의하였다. 여기서 디지털 트윈은 다중 물리 모델, 센서 정보 및 항공체 이력 데이터를 결합하여 디지털 환경과 실제 물리 환경을 동기화하고 장비의 상태와 수명 주기를 관리할 수 있는 프로세스를 의미한다<sup>3)</sup>.

실질적으로 디지털 트윈이 실제 기술 개발에서 활용되기 시작한 예는 미 공군에서 볼 수 있다. 여기서는 Fig. 3과 같은 프로세스로 개발 중인 항공기의 물리적, 기계적 특성이 고려된 물리 가상 모델과 실제 비행환경에서 측정된 데이터 값을 동기화하여 구조의 피로나 균열을 예측함으로써 항공기의 수명을 높이고 교체 주기를 예상하는 기술에 활용되었다<sup>4)</sup>. 이로써 디지털 트윈 기술은 실용화 단계에 진입하여 기술 개발에 적용되기 시작했으며, 고속연산 시스템과 네트워크 인프라가 확장됨에 따라 차량, 기계, 도시 환경 설계 및 분석과 같은 다양한 분야에서도 활용되고 있다.<sup>12)</sup>

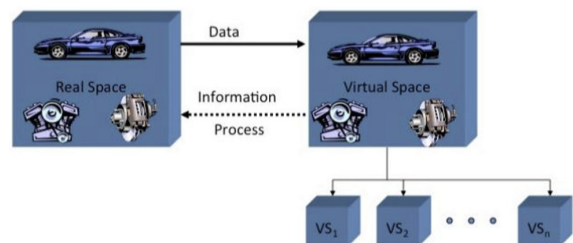


Fig. 2 Origin Digital Twin Concept for PLM<sup>2)</sup>

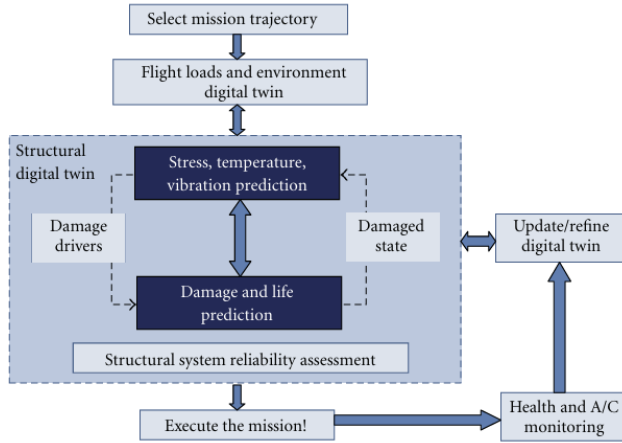


Fig. 3 Functional schematic of the Digital Twin life prediction concept<sup>4)</sup>

그러나 최근 디지털 트윈 활용 분야의 확장으로 인해 적용되는 목적이 다양해지고 있어 그 정의가 모호해지고 있다. 특히 2010년대 후반 이후에는 디지털 트윈과 관련된 수많은 논문과 문헌이 발표(Fig.4) 되면서 산업기술 디지털화와 관련된 다른 용어와 중복되어 혼란을 가져오고 있다.

최근 이러한 혼란을 해결하기 위해 다양한 학회와 기관에서 디지털 트윈을 좀 더 포괄적으로 정의하려는 시도가 있다. 일반적으로 모든 분야에서 활용되는 디지털 트윈의 정의는 "실제 세계의 다중 물리적 특성을 모방하여 구성된 디지털 환경 내에서 실시간 기반의 역학적 동기화가 가능한 가상 시뮬레이션 모델"이라고 할 수 있다.<sup>6)</sup>

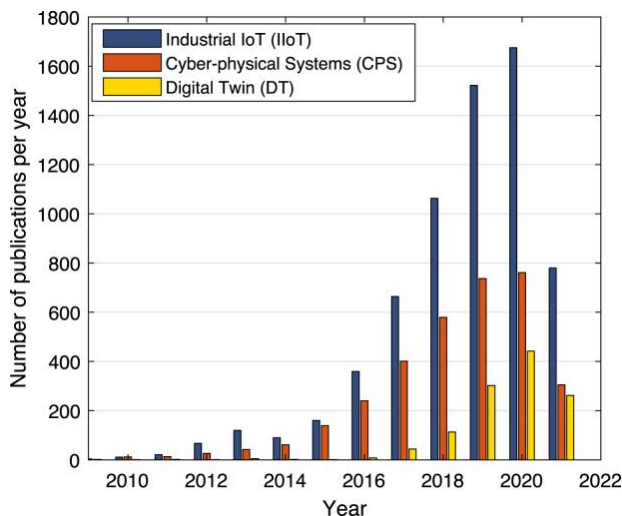


Fig. 4 Year wise publications showing the research trends<sup>5)</sup>

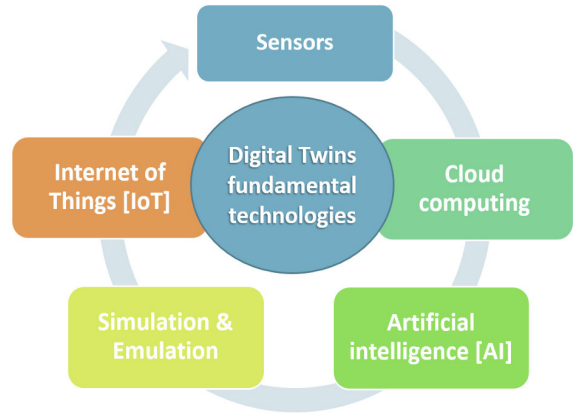


Fig. 5 Digital twin fundamental technology<sup>8)</sup>

### 3. 무인화 기술의 디지털 트윈

산업 혁명 4.0 시대에서는 디지털 트윈이 산업공정에서 핵심 기술로 부상하고 있다. 가상 물리 모델을 도입하여 인공지능이 가상 환경의 데이터를 분석하고 의사결정을 하는 것을 목표로 하고 있으며, 이는 자율작업 및 자율주행과 같은 장비 무인화 기술에 점진적으로 확대되고 있다.<sup>8)</sup>

#### 3.1 차량 자율주행을 위한 디지털 트윈

자율주행 차량의 상용화를 위해서는 주행 경험을 쌓는 것과 함께 확률 기반의 안정성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 그러나 현실 도로 환경에서는 다양한 요인과 돌발 상황으로 인해 예기치 못한 사고가 발생할 수 있다. 이에 따라 인공지능 알고리즘의 개발에서 주변 환경을 실시간으로 파악하고 대응하는 것이 어려운 과제 중 하나이다.

자율주행 차량의 제어 시스템을 효과적으로 개발하기 위해 인공지능 기술을 활용하고 있으며, 디지털 트윈 방법을 테스트베드로써 활용하고 있다.<sup>9)</sup> 디지털 트윈 내 구축된 테스트베드는 가상 센서 데이터와 물리적 주행 환경을 모형화하여 차량 주변 환경의 변화를 가상으로 계측하고 시뮬레이션(Fig.6)한다. 이를 통해 현실 세계에서는 어려운 다양한 주행 시나리오에 대한 빅 데이터를 확보할 수 있으며, 안전하고 반복 가능한 실험 환경을 제공하여 자율주행 기술의 발전을 가속화 하고 있다. 국내에서는 현재 자율주행 검증용 시뮬레이션 플랫폼 업체가 국내 완성차 업체 및 유수의 연구기관과 협력하여 개발 및 상용화를 진행 중이다.



Fig. 6 Digital twin platform(Morai) for Autonomous Driving Research<sup>9)</sup>

### 3.2 건설기계 무인화를 위한 디지털 트윈

최근 건설산업에서는 숙련된 작업자의 수가 감소하고 있어서 건설기계 관련한 무인화 기술에 대한 요구가 증가하고 있다. 현재 무인화 건설 장비의 상용화 수준으로 굴착기의 경우 머신가이던스/머신컨트롤 기술을 활용하여 작업자의 작업 보조 시스템 수준에 있으며 국내외 선진사에서는 건설기계 장비의 완전 무인화 기술을 개발하기 위해 디지털 트윈 기술을 적용하여 연구하고 있다.<sup>13)</sup>

건설기계의 무인화를 위한 디지털 트윈 기술은 차량 자율주행용 디지털 트윈과 비슷한 역할을 하지만, 구성된 작업 환경은 주로 비정형하고 제한된 영역에서의 작업을 다루기 때문에 로봇 시스템과의 환경과 유사성이 높다. 따라서 최근 건설기계의 무인화 기술 개발에는 Fig. 7과 같이 로봇의 자율이동 및 작업에 활용되는 ROS(Robot Operating System)와 같은 플랫폼이 널리 사용되고 있다.

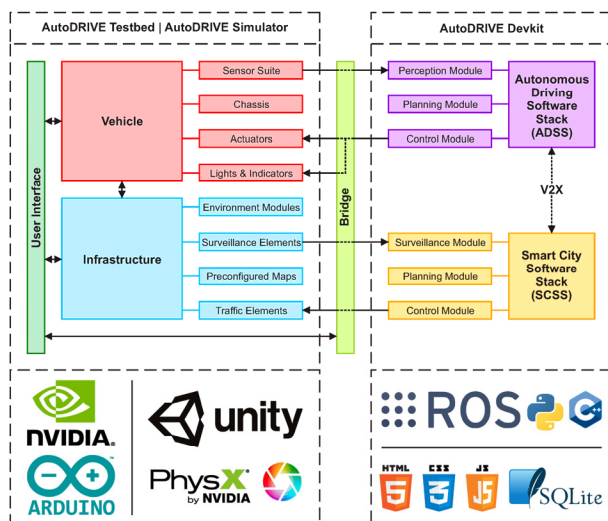


Fig. 7 Diagram of Digital Twin Environment for Unmanned AI Technology Learning<sup>10)</sup>

국외에서는 최근에 ETH Zurich에서 굴착기 작업의 무인화를 선도적으로 연구하고 있으며, 디지털 트윈을 활용하여 자율적인 도랑 굴착, 건식 돌담의 자율 조립(Fig.8), 자율 임업 작업 및 반자율 원격 조작에 대한 애플리케이션을 개발하고 있다. 더 나아가 더 복잡한 작업을 무인화하기 위한 연구도 진행 중이다.

## 4. 결론

디지털 트윈 기술은 현재 무인화 기술의 테스트베드로써 작업 시나리오에 대한 빅 데이터 생성에 중요한 역할을 하고 있으며, 개발 검증 과정에서의 위험성을 극복하고 개발 비용을 절감하는 데에 큰 도움을 주고 있다. 건설기계 자율작업 제어기술은 단순 작업에서 인간 작업자에 비해 높은 정확도를 보여주지만, 비정형 환경에서의 복잡한 작업에는 한계가 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 무인화 기술 개발을 위한 디지털 트윈은 개발 환경을 보다 정확하게 모사할 수 있는 방향으로 연구되고 있으며, 미래에는 활용 분야가 더 확대될 것으로 전망된다.



Fig. 8 Autonomous excavator wall construction using digital twin technology<sup>11)</sup>



참고 문헌

- 1) Gelernter, D. Mirror Worlds, The Day Software Puts the Universe in a Shoebox. How it Will Happen and What it Will Mean; Oxford University Press, Oxford, UK, 1993.
- 2) Grieves, M. Origins of the Digital Twin Concept. 2016.
- 3) Shafto, M.; Conroy, M.; Doyle, R.; Glaessgen, E.; Kemp, C.; LeMoigne, J.; Wang, L. Draft modeling, simulation, information technology & processing roadmap. Technol. Area 2010, 11
- 4) Tuegel, E.J.; Ingrassia, A.R.; Eason, T.G.; Spottswood, S.M. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin.Int. J. Aerosp. Eng. 2011
- 5) Shah Z.; Aamir M.; Syed A.H.; MD. Jalil P.; Mikael G.;Mohsen G. Industrial digital twins at the nexus of NextG wireless networks and computational intelligence: A survey, Journal of Network and Computer Applications, Volume 200, April 2022
- 6) Ali, W.A.; Fanti, M.P.;Roccatelli, M.; Ranieri, L. A Review of Digital Twin Technology for Electric and Autonomous Vehicles.,Appl. Sci. 2023, 13, 5871
- 7) Fuller, A.; Fan, Z.; Day, C.; Barlow, C. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. IEEE Access 2020, 8
- 8) Piromalis, D.; Kantaros, A. Digital Twins in the Automotive Industry: The Road toward Physical-Digital Convergence. Appl. Syst. Innov. 2022, 5, 65.
- 9) Morai.2024.05.08.<https://www.morai.ai/drive>
- 10) Samak, T.; Samak, C.; Kandhasamy, S.; Krovi, V.; Xie, M. AutoDRIVE: A Comprehensive, Flexible and Integrated Digital Twin Ecosystem for Autonomous Driving Research & Education. Robotics 2023, 12, 77.

- 11) Johns, R.L.; Wermelinger, M.; Mascaro, R. et al. Autonomous dry stone. Constr Robot 4, 127-140 (2020)
- 12) Botín-Sanabria, D.M.;Mihaita, A.-S.; Peimbert-García, R.E.;Ramírez-Moreno, M.A.;Ramírez-Mendoza, R.A.; Lozoya-Santos, J.d.J. Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review. Remote Sens. 2022, 14, 1335.
- 13) Kotmasu.2019.01.01.<https://www.komatsu.com/en-gb/blog/2019/digitization-and-automation/>

[저자 소개]

이연호

E-mail : leeyeonho@kitech.re.kr

Tel : 053-580-0347

2014년 경북대학교 기계공학과 석사.  
2014년~현재 한국생산기술연구원 대경 지역본부 모빌리티시스템그룹 연구원.  
건설기계 무인 자율화 제어 연구.



장홍석

E-mail : hsjang@kitech.re.kr

Tel : 053-580-0323

2014년 창원대학교 기계공학과 석사.  
2016년~현재 한국생산기술연구원 연구원



이흥석

E-mail : leehs@kitech.re.kr

Tel : 053-580-0329

2014년 창원대학교 기계공학과 석사.  
2014년~현재 한국생산기술연구원 대경 지역본부 모빌리티시스템그룹 연구원.  
다물리시스템 해석, 건설기계·부품의 연구에 종사. 유공압건설기계학회의 회원



최성준

E-mail : sjchoi@kitech.re.kr

Tel : 053-580-0302

2010년 포스텍 기계공학과 박사. 2010년~현재 한국생산기술연구원 수석연구원.  
유공압건설기계학회, 정밀공학회, 음향학회, 소음진공공학회 등 회원, 공학박사

