

RESEARCH ARTICLE

Development of the Model for Construction in Science Inquiry Class Using Digital Twin Technology

Jung-ho Byeon*

Kangwon National University

디지털 트윈 기술을 활용한 과학 탐구 수업 구성 모델 개발

변정호*

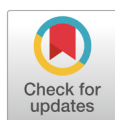
강원대학교

*Corresponding Author: Jung-ho Byeon, jhbyeon@kangwon.ac.kr

ABSTRACT

This study aims to develop a model for construction in a science inquiry class, explicitly focusing on the application of digital twin technology. This technology allows students to explore biological phenomena virtually, learning with virtual replicas and physical space in the context of learning biology. To develop the model, the researcher analyzed various research related to digital twin applications and performed a literature review in the context of effective teaching and learning strategy. Additionally, 22 students were recruited to assess the effect of the class to construct through the model at the affective domain. This study found that the construction model of inquiry class functions as guidance for interactive and immersive learning, enabling students to overcome the traditional limitations of time, space, and physical resources. Also, results showed that students significantly improved their affective domain in biology inquiry class. Consequently, three conclusions were drawn from this research. First, digital twin technology enhances student engagement and interaction, creating a more immersive and interactive learning environment. Second, personalized learning is facilitated, as the digital twin system allows for real-time monitoring and tailored feedback, fostering greater independence in students' learning processes. Third, the digital twin-based class model proved feasible and effective in actual classes, with tangible improvements in students' affective domain towards science and inquiry-based learning. Therefore, using the digital twin technology can help reduce the digital and educational divide by providing high-quality learning experiences in resource-limited settings.

Key words : Digital twin, science inquiry, learning biology, science education, teaching & learning strategy



OPEN ACCESS

Brain, Digital, & Learning
2024, Vol. 14, No. 3, 305-324

<https://doi.org/10.31216/BDL.20240018>

Received: September 08, 2024

Revised: September 18, 2024

Accepted: September 19, 2024

© 2023. Institute of Brain based Education,
Korea National University of Education



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

21세기는 디지털 기술의 급속한 발전과 함께 변하고 있으며, 빅데이터, 인공지능, 클라우드 컴퓨팅, 디지털 트윈 등 혁신적인 기술들이 산업, 의료, 금융, 교육 등 다양한 분야에 빠르게 통합됨으로써 인간의 삶과 사고 방식을 재정의하고 있다(Vincent-Lancrin et al., 2022). 디지털 기술을 통한 교육의 변화와 혁신이라는 맥락에서 첨단 디지털 기술의 활용을 통한 학습의 질 향상은 교육의 접근성을 높이는 중요한 수단으로 자리 잡고 있으며 교육 패러다임의 전환을 주도하고 있다(OECD, 2022). 반면, 교육 현장에서는 인프라 격차, 교사의 디지털 교수역량, 학습 관리 및 평가 등의 차이가 증가하고 있으며, 학습자의 교육 격차를 해결할 혁신적 교육법의 등장을 요구하고 있다(WEF, 2024). 이러한 디지털 격차를 극복하기 위해 학습의 본질적 기능을 강화하고 디지털 기술 활용을 도구적 관점으로 바라보는 새로운 관점으로서의 인식 전환이 필요시 되고 있다(Tikhonova & Raitskaya, 2023).

첨단 디지털 기술을 활용하여 교육의 본질적 기능인 학습을 강화하자는 관점인 ‘교육 4.0’에서는 가상 세계 기술과 인공지능을 활용하여 교수역량 지원, 평가 방법 및 분석법 개선, 디지털 기술 활용 능력 지원, 학습경험 및 콘텐츠 개별화 같은 교육적 지원을 강조한다(WEF, 2024). 교육 4.0 맥락에서 디지털 기술은 교육의 본질적 목적에 도달하기 위한 도구적 관점에서 기능하며, 문제해결학습, 공동학습, 적응력에 초점을 맞춘 학습자 중심의 맞춤형 교육을 구현하고자 한다. 또한 수업 현장에 대한 교육적 성찰과 개선을 통한 학습경험의 개인화와 효율성을 증진하는데 관심을 두고 있다(Bonfield et al., 2020). 첨단 디지털 기술 중 몰입형 가상 세계 기술은 사용자가 실제와 유사한 환경에서 학습과 실습을 할 수 있도록 지원함으로써, 전통적인 교실 학습의 한계인 시공간적 제한을 극복할 수 있는 기회를 제공한다(Tao et al., 2024). 또한 가상 세계 구축과 상호작용으로 대표되는 메타버스 기술은 학습자가 실제로는 체험 불가능하거나 위험성 있는 환경으로부터 안전한 경험을 제공하며, 언제 어디서나 온오프라인을 통해 학습자에게 다양한 활동과 경험을 제공할 수도 있다(Hassan et al., 2024). 특히, 디지털 트윈 기술의 급격한 발전은 가상 세계에서 실재감 높은 새로운 형태의 경험을 제공할 수 있는 잠재적 가능성을 증가시키고 있다(Dwivedi et al., 2022).

새로운 디지털 기술을 활용한 에듀테크 기술은 매우 빠르게 교육현장에 확산될 수 있는 특징을 지니고 있지만, 수업에 적용하는 최종적인 결정은 교사에 의해 이루어져야 한다. 그러나 팬데믹 이후 드러난 사실은 첨단 디지털 기술의 교육적 활용과 새로운 교육적 방법들은 모든 지역의, 모든 학생들에게 동등한 수준으로 제공되지 못하고 있다는 것이다(Reimers, 2022). 새로운 디지털 기술이나, 교수법 적용에 대한 교사의 최종 결정은 개인적인 맥락에 해당하며, 디지털 기술에 대한 선호도나 접근성 등 다양한 요인에 의해 영향을 받을 수 있다. 혁신적 장점을 지닌 기술이라 하더라도 전문적 수준의 기술이 필요하고, 고가의 하드웨어와 과다한 준비 시간이 소요되거나, 장시간 학생들의 훈련이 선행되어야만 활용 가능하다면 실질적으로 수업에 대한 활용을 기대하기는 어려울 수밖에 없다.

교실 수업을 지원하기 위해 디지털 기술의 접근성을 개선하고, 교사가 첨단 기술을 손쉽게 활용함으로써 확장된 수업 경험을 제공할 수 있도록 지원하는 것은 교육의 본질을 강조하는 측면에서 매우 중요한 주제이다. 이런 맥락에서 과학 탐구 수업에 있어 학습의 효율성과 경제성을 확보함으로써 학습의 본질에 집중할 수 있도록 첨단 디지털 기술을 활용하는 교수설계 역량 지원 방안의 제시는 절실하다고 볼 수 있다. 따라서 이 연구에서는 교사와 학생이 온오프라인에서 활용 가능하며, 실재감 높은 가상세계 구현 및 콘텐츠 생성이 가능한 디지털 트윈 기술을 활용할 수 있도록 지원하는 과학탐구 수업 구성 모델을 제시하고자 하였다. 또한 수업

구성 모델에 따라 계획 및 운영한 탐구 수업의 경험이 학생들에게 어떤 영향을 미치는지 확인하고자 하였다.

Theoretical Background

메타버스 기술은 현실과 유사한 가상 세계의 경험을 제공함으로써 현실 세계의 제한점을 보완할 수 있는 대안적 학습 활동으로 제안되어 왔다(Kuznetcova et al., 2019). 메타버스는 가상공간에서 타인과 상호작용하고 소통할 수 있는 환경을 의미하는 용어로 사용되고 있다. 가상현실(VR)은 현실과 유사한 3차원 공간을 생성하며, 증강 현실(AR)은 현실 세계에 디지털 콘텐츠를 가져올 수 있다. 라이프 로깅은 디지털 공간에서 실제 세계를 기록 및 공유할 수 있으며, 거울 세계는 현실 세계를 가상공간으로 옮겨 놓는다는 개념이 중심이 된다(Tilak et al., 2020). 가상현실은 현실 유사 공간을 디지털로 구현하여 몰입감을 제공하는 장점을 지니고 있어 실제 방문이 어려운 장소를 교사나 학생이 쉽게 체험할 수 있도록 하기 때문에 학습에 종종 활용되어 왔다. 반면, 가상현실 구축에는 전문적인 3D 렌더링 기술이나 고가의 장비가 요구되며, 누구나 손쉽게 구현하거나 새로운 콘텐츠의 추가 및 수정이 어려운 단점을 지니고 있다(Thelen et al., 2022). 특히 전문 개발자에 의해 제공되는 콘텐츠를 일방적으로 소비해야 하는 수동성, 폐쇄성으로 인해 사용자의 자유로운 수정이 불가능한 점, 교사의 교수·학습 전략에 따른 수정 불가능 등의 제한점을 지니고 있다. 컴퓨터 그래픽 기반 가상현실 기술은 높은 진입장벽으로 인해 교사나 학생이 제한된 수업 시간 중에 몰입형 콘텐츠를 제작하기 어려우며, 360° 사진의 경우 단순 이미지 촬영만 가능하다는 한계를 지니고 있다. 무엇보다도 높은 기술적 장벽에 비해 낮은 실재감과 사용자가 상호작용 콘텐츠를 직접 생성하여 추가하기 어렵다는 특징 때문에 교실 수업 수준에서의 활용은 미미한 편이다(Kim et al., 2020).

가상세계 콘텐츠를 학습에 활용하기 위해 우선적으로 고려되어야 하는 요소는 실재감이며, 학습자에게 현실과 동일한 수준의 실재감이 제공될 때 가상세계 활동의 효과가 높게 나타난다(Peper et al., 2021). 현실 세계에 대한 유사 공간으로서 몰입감을 제공할 수 있다는 장점에도 불구하고 과거의 VR 기술로 생성된 가상 공감은 길이, 너비, 크기 등 현실 정보를 동일하게 반영하기 어렵다는 한계를 지니고 있기 때문에 실재감이 낮다는 단점을 지니고 있다(Tao et al., 2024).

최근 이미지 처리 인공지능 기술 발전으로 인해 가상세계에서 현실세계 정보를 동일하게 구현하는 디지털 트윈 기술은 가상현실 기술이 지닌 제한점에 거울세계의 장점을 결합한 것으로 높은 실재감을 제공할 수 있는 새로운 대안으로 대두되고 있다(Tao & Zhang, 2017). 디지털 트윈은 입력 값에 대해 물리적 객체와 동일한 출력 값을 생성하는 가상 복제물로서 물리적 객체의 잠재성 또는 실제 구성 요소를 표현하는 알고리즘으로 정의할 수 있다(Grieves & Vickers, 2017). 또한 물리적 객체의 구성 요소, 가상 세계의 복제품, 물리적 객체에서 가상 복제품으로 데이터 전송, 가상 복제품에서 물리적 객체로의 데이터 흐름을 포함하는 기술적 개념으로 설명되기도 한다(Thelen et al., 2022). 디지털 트윈 개념은 항공기 구조 행동을 디지털로 재현하기 위해 처음 구현되었으며(Tuegel et al., 2011), 다양한 분야에서 관리 및 생산을 위한 방법으로 사용됨으로써 미래 산업을 선도하는 첨단 기술로 인식되고 있다(Lu et al., 2020).

빅데이터와 인공지능의 발전은 디지털 트윈의 범위를 확대하고, 살아있는 사물, 무생물 등 물리적 실체, 과정, 시스템을 디지털로 복제한 가상 구조 구축을 가능케 하며, 디지털 복제물과 물리적 객체 간의 데이터에 기반한 상호 연계를 통해 실시간 모니터링도 가능하게 한다(Rathore et al., 2021). 디지털 트윈은 다양한 분야에서 혁신적 작업, 모니터링, 진단, 예측이 가능한 기술로서 교육에서의 활용도가 매우 높으며, 온오프라인

학습을 모두 매개할 수 있다는 측면에서 활동의 시공간적 범위를 무한대로 확장할 수 있는 장점을 지니고 있다(Sepasgozar, 2020).

Research Method

Development of Class Construction Model

과학학습에 있어 디지털 트윈 기술을 활용하여 효율성을 제고하고 탐구활동을 확장할 수 있도록 지원하는 교수법을 구성하기 위해서는 학습 영역과 학습 영역별 학습 목표 및 활동 내용에 대한 고찰이 요구된다. 특히 과학적 탐구활동은 문제해결과정을 통해 지식을 생성하고 개념을 획득하는 경험적 과정이라는 측면을 고려하여 문제해결의 맥락에서 분석되어야 한다(Fauth et al., 2019; Yildiz & Yildiz, 2021). 또한 디지털 트윈의 특징과 장단점을 고려하여 과학 탐구학습에 활용하기 위한 방안을 모색하기 위해서는 디지털 트윈 기술의 특징, 사용자 활용성과 활용 사례 등에 대해 폭넓게 분석할 필요가 있다. 이를 위해 디지털 트윈을 핵심 주제로 하는 최근 5년 이내의 연구 논문들을 조사하고, 디지털 트윈 활용하여 수행된 연구들 중 기술적 특징, 사용자 접근성, 활용 방안 및 범주의 구체성을 기준으로 분석 대상을 선정하였다. 디지털 트윈 기술 및 소프트웨어 개발, 하드웨어 구축을 목적으로 하는 연구들은 제외하였으며, 디지털 트윈에 대한 초기 개념연구 2편을 포함한 35편의 연구 논문을 1차 선별하였다. 이후 디지털 트윈에 대한 리뷰나 이론 검토가 목적인 연구를 제외하여 최종적으로 25편의 분석 대상 논문을 선정하고 세 가지 기준에 따라 분석하였다.

또한 과학학습에 대한 이론적 고찰을 통해 학습자의 개념획득과 과학적 문제해결과정의 경험이라는 관점에서 과학 탐구수업에 디지털 트윈을 활용하기 위한 수업을 구성하는 일반적 모델을 도출하였다. 또한 과학 탐구학습의 문제점 극복과 학습 효율성 개선의 관점에서 디지털 트윈 기술을 범주화하고 수업 유형별 활용 방법, 학습 목표 및 내용별 활용 방법을 분석 및 도출하였으며, 교사가 수업을 설계하는 방법을 안내하는 수업 구성 모델을 제시하였다. 디지털 트윈 관련 연구 논문에 대한 분석 결과를 바탕으로 도출한 학습 단계, 단계별 학습 방안, 의사소통 등 학습 요소별 범주는 디지털 기술 활용 과학학습 전문가 4인이 참여하는 정기 세미나에서 타당도를 점검받아 수정·보완하였다. 디지털 트윈 활용 연구 분석을 위한 분석틀에 대한 전문가 그룹 일치도는 93%였으며, 도출된 학습요소에 대한 타당도는 91%로 일부 불일치 항목에 대해서는 세미나 과정을 통해 수정하였다. 또한 타당도를 확보한 학습 요소에 따라 구성한 디지털 트윈 활용 수업 구성 모델의 세부 요소와 내용은 과학교육 전문가 3인이 참여하는 정기 세미나를 통해 동의할 때까지 3차에 걸쳐 수정·보완하였다.

Participants

디지털 트윈을 활용한 과학 탐구수업 구성 모델을 학교 현장에 적용할 수 있는지 확인하고, 학생들에게 미치는 영향을 파악하기 위해 강원특별자치도 소재 고등학교 심화과학반 연합 활동 프로그램 수강 학생 22명이 수업 활동에 참여하였다. 연구에 참여한 학생들은 고등학교 1학년이었으며(평균 나이: 15.81세), 동일한 지역 내 고등학교에 재학 중인 학생들이었다(Table 1). 전체 학생들 중 남학생의 비율은 59.1%, 여학생의 비율은 40.9%였으며, 자발적 참여 의사에 따라 소속 고등학교의 심화과학반 연간 활동에 참여 중이었다. 남학생의 경우 메타버스 관련 활동에 대한 경험 있는 학생의 비율이 61.54%였으며, 여학생의 경우 55.56%로 남녀간 메타버스 활동 경험의 차이는 두드러지지 않았다.

Table 1. The composition of participants

High School	A	B	C	D	E	F	G	Sum
Male	1	1	0	1	0	10	0	13
Female	1	1	1	0	3	0	3	9

Application & Measurement of Class Construction Model

디지털 기술을 활용한 과학학습의 목적은 다양하게 해석될 수 있으나 창의적이고 융합적 인재 양성을 위해서는 학생 스스로 다양한 기술을 활용하여 지식을 융합하고 생성할 수 있는 경험을 제공하는 것이 필요하다. 이런 관점에서 교수·학습전략을 도출하고 수업을 계획하고 운영하는 모델을 제시하기 위해서는 학습의 구성 요소들에 대한 이론적 고찰이 필요하며, 추출된 학습 요소들 간의 관계를 파악함으로써 모델을 구성해야 한다. 또한 개발된 수업 구성 모델에 따라 계획된 디지털 트윈 활용 수업의 현장 적용 가능성을 확인할 필요가 있다. 이를 위해 고등학생들을 대상으로 하여 디지털 트윈 활용 모델에 따라 생물 탐구 수업을 계획 및 운영하였으며, 학생들의 인식 변화에 미치는 영향을 확인하였다. 수업 전·후에 온라인 설문 방식으로 디지털 트윈 활용 학습에 대한 활동 동기, 태도, 과제집착의 수준을 측정하였다. 검사를 시행하기 전 수업 참여 학생들에게 연구의 목적과 내용을 설명하였으며, 자발적 참여 동의 후 학생들이 작성한 응답지를 분석하였다. 3차시에 걸쳐 제공된 생물 탐구 수업은 1차시에 학교 내외의 생물 탐구 대상을 자유롭게 정하여 실내에서 대상 생물의 분류학적·생태학적 특징을 조사하고, 2차시에 디지털 트윈을 생성한 후 해당 공간에 존재하는 조사 대상 생물의 특징을 안내하는 디지털화된 콘텐츠 이미지, 영상 등 학생 주도적으로 선택하여 생성하였다. 3차시에는 직접 제작한 콘텐츠를 디지털 트윈에 삽입하고, 콘텐츠가 삽입된 디지털 트윈을 공유 링크를 통해 발표하였다. 사전·사후검사는 학생들의 가상세계 활용 학습에 대한 사전 경험과 인식에 대한 기초 검사 실시 후 디지털 트윈에 대한 정의적 영역 검사지(Byeon & Kwon, 2023)를 제시하였다.

Result & Discussion

The Analysis of Researches for Digital Twin Application

디지털 기술을 활용하여 교육의 본질인 학습자 맞춤형 교육을 구현하고자 하는 교육 4.0 패러다임에서는 학습자에게 제공되어야 하는 교육 내용과 함께 지향하는 경험을 구분하여 제시하고 있다(Haderer & Ciolacu, 2022). 학습자에게 제공되어야 하는 교육 내용은 기술적 적응을 위한 빌트인 메커니즘에 해당하며, 글로벌 시민 스킬, 혁신적이고 창의적인 스킬, 테크놀로지 스킬, 의사소통 스킬로 구분된다. 또한 첨단 디지털 기술과 교수·학습법을 활용한 혁신적 교육이 지향하는 학습자 경험은 개인화 및 자기대면식 학습, 접근가능하고 내포된 학습, 문제기반과 협력적 학습, 평생학습과 학습자주도 학습으로 범주화하고 있다(WEF, 2024). 즉, 디지털 소양에 초점을 맞춘 에듀테크 중심 수업의 문제를 개선하고, 교과 내용 및 활동으로 학습의 중심을 이동시키는데 초점을 맞추고 있다.

교육의 본질적 기능을 구현하기 위해서는 학습자가 적극적으로 참여할 수 있어야 하고, 학습활동에 능동적으로 참여할 수 있는 기회가 제공되어야 하며, 창의적으로 자유롭게 의사소통할 수 있도록 지원하는 것이 필요하다(Bonfield et al., 2020). 따라서 교육 4.0에서 지향하고 있는 디지털 기술은 학습자의 성공적 학습이 일

어날 수 있도록 지원하는 내재적 시스템과 도구로써 존재하는 것이며, 학습자에게 제공되는 경험은 자기주도성과 문제기반 협력학습과 관련성을 지녀야 한다. 이런 맥락에서 디지털 트윈 기술의 교육적 활용을 위해 관련 연구들을 분석하고 범주화하였다(Table 2).

일반적으로 디지털 트윈 개념은 데이터에 기반하여 물리계에 존재하는 공간과 객체에 대한 가상 복제 모델의 통합을 의미하며, 물리계의 데이터를 수집 및 모니터링함으로써 실제 객체나 공간에 대한 정보를 업데이트하고 최적화, 예측, 의사결정을 지원하는 시뮬레이션 기술에 해당한다(Botín-Sanabria et al., 2022; Tao et al., 2024).

특히 실시간 데이터를 통해 물리계의 시스템을 최적화하고 예측함으로써 실제 공간과 객체에서 발생할 수 있는 문제를 가상 공간에서 반복적으로 시뮬레이션하여 비용을 절감하며 위험한 상황을 가상으로 경험할 수 있게 한다(Hazrat et al., 2023). 반면 디지털 트윈의 정의는 활용 분야에 따라 다소 다르게 제시되며, 사물인터넷(Internet of Things: IoT), 데이터 송수신 기술인 사이버-물리시스템(Cyber-Physical Systems: CPS), 클라우드 컴퓨팅 기술, 3D 스캐닝 기술이 필수적이다(Rathore et al., 2021). 디지털 트윈은 가상세계 기술은 최신 기술로써 다양한 산업 분야에서 활용되고 있으며, 응용 분야에 따라 역할과 기능에 차이가 있었으나, 제품 개발의 가속화, 성능 최적화 및 검증, 원격 진단 및 품질 평가, 유지보수 기능을 제공하였다(Tao et al., 2024; Willcox & Segundo, 2024).

Table 2. The result of literature review about the research of digital twin application (continued)

	Technology Skill	User Accessibility	Application Category & Example
Tuegel et al.(2011)	Designing aircraft structure life prediction process using digital computing	Use high-performance computing to simulate system operations in a virtual environment with an intuitive user interface.	Predict and manage the life of aircraft structures, increase maintenance efficiency, and assess structural safety.
Grievies(2015)	Lightweight virtual factory models that monitor and process real-time data for physical products and their virtual replicas.	A manufacturing simulation collects and compares real-time measurement data to solve problems.	Comparison of physical factory and digital replicas to confirm compliance with design (e.g., the bolt torque data of a car engine)
Tao et al. (2018)	Product design, simulation, diagnosis, and prediction are performed using virtual models that reflect physical products.	Assess and interact with digital twin with real-time data by leveraging computing and network communication.	Used for data-driven design and optimization at all stages from product design, manufacturing, maintenance, and retirement (e.g., bicycle design)
Sepasgozar(2020)	Construction management education recreates physical tasks in a virtual environment with interaction learning.	Access virtual learning modules anytime, anywhere via smartphones, tablets, and VR headsets for large classes.	Project-based learning in construction education allows one to experience real-world construction work (e.g., using virtual tunnel drilling machines)
Sulaiman et al., 2020)	A marketing tool that transforms 360° photos into 3D digital interactive twins, allowing you to experience a space virtually	Providing mobile optimization and high accessibility, allowing users to navigate the space anytime, anywhere, and quickly.	During the COVID-19 pandemic, online support marketing through virtual tours instead of traditional on-site visits to properties
Flaga & Pacholczak(2022)	Real-time data collection, analysis, and simulation through virtual system models and implementation in a web application.	Access digital twins with simple hardware via a web browser, enabling real-time data visualization and simulation	Use for small production line design, training, and programming simulation (e.g., training by building a virtual conveyor system)
Komninos & Tsigkas(2022)	Real-time data collected from smart birdhouse monitors and simulates the state of the natural environment in virtual space.	Digital twin devices make it easy to visualize natural environment data and observe bird activity in real-time.	Environmental education purposes in schools provide an experience of interaction with nature (e.g., smart new houses).

Table 2. The result of literature review about the research of digital twin application (continued)

	Technology Skill	User Accessibility	Application Category & Example
Pang et al. (2022)	real-time monitoring and control through data-based modeling by synchronizing physical and virtual robots.	Provides a realistic virtual robot experience via remote control using a Unity 3D interface.	Assists in learning robot programming and debugging remotely without physical equipment (e.g., IRB120 remote platform).
Emmert-Streib & Yli-Harja (2022)	Computer model simulating medical phenomena through data from a virtual representation of a physical object.	The digital twin system simulates biological and medical scenarios, enabling customized treatment plans.	Personalized medicine, multiscale modeling for predictive analytics to study complex biological systems (e.g., artificial pancreas models)
Zhang et al. (2023)	Multi-environment mapping for plant environment optimization enables real-time data collection and monitoring systems.	The mobile application enables real-time monitoring and control of environmental parameters in the plant from anywhere.	Manage and optimize environmental variables in plant facilities (e.g., CO2 concentration, temperature, humidity, and illuminance).
Tjahyadi et al. (2023)	Real-time data interaction between physical and virtual systems enables system simulation and control.	Remotely control lab equipment, monitor real-time results in a virtual environment, and access via the Internet.	Enables control engineering training with virtual experiments and hands-on exercises without physical equipment access.
Lei et al. (2023)	Virtual replica for real-time monitoring and control of physical DC-DC converter systems' dynamic characteristics.	Real-time data enables remote monitoring and control of systems, accessible from anywhere via cloud connectivity.	Optimized for health monitoring, fault diagnosis, and control performance in electric vehicles, renewable energy systems, and DC microgrids.
Lee et al.(2023)	An immersive learning system connecting physical and virtual environments in real time for student interaction.	Solve gamified math problems with digital twin systems and monitor and interact with learning progress anytime, anywhere.	Used in college math education to teach fundamentals and motivate students (e.g., gamification-enabled learning).
Mehrabi(2023)	Technology that can virtually recreate a natural food system to simulate and predict system health in a variety of crises	Analyze real-time data from food systems, make quick decisions, and use it for policymaking and crisis management.	Scenario analysis of complex stressors for use in food policy, crisis management, agriculture, and food supply chain analysis and improvement
Mitsanis et al. (2024)	Leverages 3D plant modeling to virtually replicate and simulate structural and functional properties of real-world plants.	3D plant models enable farmers to monitor crops in real-time and enhance agricultural management through advanced simulation.	Crop growth management, pruning strategy development, agricultural education and training, etc. (e.g., precision agriculture with FSPM)
Mordaschew et al. (2024)	Human digital twins optimize production efficiency by simulating the characteristics and capabilities of workers with disabilities.	Workers and managers with disabilities can coordinate work in real-time, enabling flexibility and personalized support.	Used to enhance competencies and productivity of workers with disabilities (e.g., HDT optimizing work assignments in a protected workplace).
Kim & Heo (2024)	Replicates physical objects to simulate, analyze, and predict using real-time data for precise agricultural management.	Farmers can collect, analyze, and visualize through various sensors and data platforms to increase farm productivity.	Precision and individualized agriculture for fruit crop growth, yield forecasting, and disease management (e.g., citrus plantations on Jeju).
Zi et al.(2024)	Ensemble learning technology for real-time monitoring and prediction of milling cutter wear conditions to enhance accuracy.	The system monitors milling cutter wear in real-time and enables immediate action based on predictions.	Monitor the milling cutter's wear status and, based on the predicted wear conditions, make tool changes and optimize the process.
Ferrari & Willcox(2024)	A virtual replica of a physical system for predictive analysis by monitoring and optimizing system health data.	Providing analysis and control of data from physical systems in real-time and can be easily applied in various industries.	Used in mechanical and aerospace engineering for design, manufacturing, maintenance, and reduced risk (e.g., F119 turbofan engine).
Laubenbacher et al. (2024)	Personalized treatment and diagnosis technology using real-time simulation and prediction based on patient data.	Analyze patient data in real time and make optimal treatment decisions. It can be widely used within the healthcare system.	Oncology for personalized treatment planning, prognosis prediction, and clinical trial virtualization (e.g., breast cancer, brain tumor)
Moshood et al.(2024)	Real-time data collection, monitoring, simulation, and predictive analytics by virtual replicas of physical systems.	Interfaces can be provided to monitor and control the real-time status of physical systems intuitively.	Monitoring for manufacturing, infrastructure management in smart cities, and creating patient-tailored treatment plans in healthcare.

Table 2. The result of literature review about the research of digital twin application

	Technology Skill	User Accessibility	Application Category & Example
Demir(2024)	Create virtual models of physical objects, systems, or processes to monitor and optimize health based on real-time data.	Instructors and students have a virtual experience similar to a physical campus, enabling streamlined course management.	Higher education management, university-industry cooperation, research activities, resource optimization, etc.
Ding et al. (2024)	Technology for virtual simulations using lunar exploration data to accurately predict and evaluate rover movement and terrain.	User-friendly access to assess risks that may arise during robotic exploration and plan safe exploration routes	Used to evaluate and optimize robot mobility and terrain in space exploration (e.g., analyzing Yutu-2 rover and rocks in Chang'E-4 mission).
Rihm et al. (2024)	Virtually replicate the lab, automatically adjust experimental conditions based on real-time data, and optimize.	Intuitively control and monitor experimental factors and automate experiment management for accessibility.	Automate experiments, manage data and improve reproducibility (e.g., autonomous robots with real-time data analysis).
Hassan et al. (2024)	Simulate the operation of a real bioreactor in a virtual environment, allowing trainees to respond to various situations.	Providing immersive, interactive learning and an opportunity to experience and correct experimental errors.	Used to train biological manufacturing and process control operators, simulating real-world operations (e.g., National Horizons Center, UK).

특히 스마트 제조 환경에서 가상 모델을 활용한 시뮬레이션을 통해 예측, 고장 및 복구 시나리오 테스트, 하드웨어 및 소프트웨어의 보안 점검과 평가, 오류의 사전 탐지 등에 기여하였다(Botín-Sanabria et al., 2022). 또한 의료 분야에서는 종양세포에 대한 디지털 복제물을 생성하고 임상학적 정보를 통합한 데이터베이스를 구축하여 연구 및 교육 목적으로 활용하였으며, 건축 및 공학교육에 활용한 사례도 존재하였다(Hazrat et al., 2023).

디지털 트윈 기술 활용 연구 논문들에서 제시하고 있는 기술적 측면의 공통적인 특징을 분석한 결과, 물리적 시스템 또는 객체의 상태를 실시간으로 모니터링하고 가상 환경에 반영하는 것을 기술적 공통점으로 제시하였다. 또한, 가상 모델을 이용하여 다양한 상황이나 시나리오에서 시뮬레이션하고 실제 발생할 수 있는 결과를 예측하였으며, 물리적 객체와 가상 모델 간의 동기화를 통해 실시간 상태를 반영함으로써 상호작용 및 제어하는 기술이 공통적으로 적용되었다. 마지막으로 다양한 산업 분야에 적용되는 과정에서 해당 분야의 특수한 요구를 충족하기 위해 디지털 트윈 기술이 사용자 요구에 따라 수정되어 맞춤형으로 활용되었다. 따라서 디지털 트윈은 기술적 측면에서 실시간 데이터 수집 및 모니터링, 가상 시뮬레이션 및 예측, 물리적 시스템과 가상 시스템의 동기화, 목적에 따른 맞춤형 기술 적용으로 범주화할 수 있었다.

이상의 논의를 바탕으로 기술적 특징의 범주에 따른 과학 탐구학습 활용 방법으로는 디지털 트윈 기술 적용 교육 도구의 개발, 학습 몰입도와 상호작용성 향상, 실제 학습환경과 가상 환경의 통합을 통한 맞춤형 학습 제공 등을 제안할 수 있다. 특히, 생물학습에 있어서는 디지털 트윈 기술을 적용함으로써 실제 생물 시스템이나 개체를 가상 세계로 복제하고, 실시간 상호작용할 수 있는 교육적 도구를 개발할 수 있을 것이다. 예를 들어, 가상 생물 반응기 또는 3차원 동식물 모델링을 통해 학습자가 실물을 활용하지 않고도 생물을 이해하고 학습할 수 있을 것이다. 또한 학습자가 가상 환경에서 대상을 실시간 모니터링 및 시뮬레이션할 수 있기 때문에 학습 몰입도와 상호작용성을 크게 향상 시킴으로써, 탐구기반 생물 학습을 강화할 수 있는 새로운 접근법으로 활용될 수 있다. 실제 생물 실험과 가상 실험 환경을 통합함으로써 학습자가 이론적 학습과 실험 시뮬레이션을 온라인으로 수행할 수 있고, 다양한 상황과 장소에서 접근 가능케 함으로써 체험 기회를 확대할 수 있다. 또한 디지털 트윈을 통해 학습 진행 상황을 실시간으로 모니터링하고 교수가 개별화된 피드백을 제공할 수 있으므로, 맞춤형 학습을 위한 플랫폼으로도 기능할 수 있다.

과학 탐구학습에 활용하기 위한 방안을 도출하기 위해 분석한 디지털 트윈 기술 활용 연구들에서 제시하고 있는 사용자 접근성 측면의 공통적 특징을 도출하였다. 각각의 특징을 범주화한 결과는 데이터 기반 디지털 트윈 운영, 실제 공간과 객체로의 피드백을 위한 플랫폼 활용, 실용성과 편의성을 고려한 사용자 친화적 인터페이스, 원격 모니터링 및 제어, 몰입형 환경 제공으로 구분되었다. 특히 데이터에 기반한 플랫폼의 경우 다수의 연구에서 스마트폰, 태블릿, VR 헤드셋, 웹 브라우저, 클라우드 플랫폼 등 다양한 기기를 통해 디지털 트윈에 접근할 수 있도록 설계하였다. 이러한 접근성을 고려한 설계는 사용자가 언제 어디서나 디지털 트윈 환경에 쉽게 접속하고 상호작용할 수 있도록 지원하기 위한 인프라로서의 중요성을 지닌다. 또한 인터페이스는 사용자 친화적이어야 한다고 제시하였으며, 복잡한 데이터나 시뮬레이션 결과를 비전문가도 쉽게 사용할 수 있도록 설계하고 있었다. 또한 물리적 객체로부터 전달되는 데이터를 바탕으로 시스템을 모니터링하고 제어할 수 있는 기능을 제공함으로써, 사용자가 현장에 있지 않아도 객체의 상태를 확인하고 적절한 피드백을 제공하는 것이 중요하다고 하였다. 따라서 디지털 트윈 기술을 생물 탐구학습에 활용하기 위해서는 학습자 및 교수자의 접근성을 고려해야 하며, 사용자 친화적 인터페이스와 데이터에 기반한 상호작용, 학습적 피드백, 정보 업로드가 가능한 몰입형 환경을 제공할 필요가 있다.

The Application Method & Contents of Digital Twin for Learning Biology

생물 학습에 디지털 트윈 기술을 활용하기 위해 고려해야 하는 기술적 특징과 사용자 접근성에 따라 활용 범위를 도출한 결과, 데이터 기반 시뮬레이션, 몰입형 협력학습, 학습자 맞춤형 학습 콘텐츠 개발로 범주화할 수 있었다. 디지털 트윈은 데이터의 수집 및 모니터링에 기반하여 물리적 공간과 객체를 복제한 가상모델의 시뮬레이션이라는 기술적 특징을 지니고 있으므로, 데이터 기반 시뮬레이션 측면에서 디지털 트윈 기술의 활용이 가능하다. 구체적으로 생물학습에 디지털 트윈을 사용하여 세포 분열, 유전자 발현, 생태계 상호작용 등 복잡한 생물학적 과정을 시뮬레이션하고 다양한 상황을 가상세계에서 경험할 수 있도록 활동을 구성할 수 있다. 예를 들어, 식물의 광합성 과정에서 빛의 세기나 이산화 탄소 농도에 따른 영향을 실제 식물로부터 전달된 데이터를 활용하여 실시간으로 관찰 및 분석할 수 있다. 또한 디지털 트윈 기반 학습은 온라인으로 학습자와 교수자가 가상 환경에서 생물 주제 관련 문제를 탐구할 수 있게 함으로써, 다양한 학습 스타일과 속도에 맞는 맞춤형 교육을 제공할 수도 있다. 이러한 특징은 비대면 상황에서 유용하게 활용될 수 있으며, 실습과 실험이 제한된 환경 또는 위험물을 다루는 실험에서도 실재감있는 가상 탐구 경험을 제공할 수 있게 한다.

디지털 트윈 기술의 또 다른 특징은 몰입형 학습환경과 다양한 기기 접근성을 통해 온오프라인을 통한 협력활동이 가능하다는 점이다. 특히 원격지의 다수 생태계를 디지털 트윈으로 구현하고 가상 공간에서 상호작용할 수 있는 콘텐츠를 제공함으로써 학습자가 온라인으로 원격지의 생물 시스템을 경험하고 실험할 수 있는 환경을 제공할 수 있다. 또한 다양한 기기를 통해 디지털 트윈에 접근이 가능하게 구현함으로써, 언제 어디서나 가상 실험이나 활동에 참여할 수 있고 데이터를 분석할 수 있다. 그러므로, 시공간적 제약을 벗어나 원격지 생태계 탐구, 서로 다른 지역의 생물 모니터링과 같은 팀 프로젝트에 어떤 학습자나 쉽게 참여하도록 지원할 수 있다. 따라서, 디지털 트윈의 활용은 개별 학습자가 학습 목표에 효과적으로 도달할 수 있는 몰입형 경험의 제공과 함께 원격으로 다수의 학습자가 공동 프로젝트를 수행하는 협력학습을 지원할 수도 있다.

학습에 있어 중요하게 고려되어야 하는 요소 중 하나는 실질적 학습이 일어날 수 있는 경험을 제공하고 학습 결과를 활용할 수 있는 기회가 제공되어야 한다는 것이다. 디지털 트윈은 실제 실험 장비나 재료의 제한

없이 학생들이 다양한 실험을 가상 환경에서 수행할 수 있으며, 안전하게 실험을 반복하고, 결과를 분석할 수 있다. 또한 사용자의 학습 결과를 업로드할 수 있는 클라우드 컴퓨팅이 가능한 플랫폼을 활용함으로써 사용자가 직접 가상 모델을 시뮬레이션하여 다양한 영향을 분석할 수 있으며, 학습결과를 콘텐츠화하여 실시간으로 공유 및 의사소통하는 것도 가능하다. 독일, 핀란드, 스위스의 대학에서는 공학교육에 디지털 트윈을 활용하여 문제해결 과정을 경험하고, 협업 능력을 향상 시키는 연구 사례를 제시하기도 하였다(Hazrat et al., 2023).

따라서 디지털 트윈을 생물 학습에 활용하기 위해서는 디지털 트윈의 기술적 특징, 사용자 접근성, 활용 방법 범주의 하위 요소들에 대해 고려해야 하며, 교수·학습적 활용을 위한 목적으로 데이터 기반 시뮬레이션, 몰입형 협력학습, 학습자 맞춤형 학습 콘텐츠 개발 측면이 함께 고려되어야 한다.

The Construction Model of Science Learning Class using for Digital Twin

학습은 학습자의 참여를 통해 시작되므로 흥미와 학습 동기 유발을 포함하는 교수학습 전략이 반영된 일련의 학습 활동이 수업 계획에 따라 제공되어야 하므로, 학습자의 참여를 이끌어내는 인지적 수준의 준비 상태를 촉진하는 교수·학습 전략이 필요하다. 인지적 활성의 유발은 교실에서 이루어지는 수업의 성공 여부를 평가하는 요소에 해당하며, 학습자가 문제해결과정에 몰입해야 하는 목적과 이유에 대한 공감 여부와도 관련되므로 교수자에 의해 사전에 면밀히 설계되어야 한다(Fauth et al., 2019).

과학 학습에 있어 과학적 탐구활동을 통한 문제해결과정의 경험과 과학적 개념의 획득은 중요한 학습 목적에 해당하며, 교사는 학생의 선개념을 파악하고 교정하기 위해 적합한 교수·학습 전략과 기술을 발휘할 수 있는 수업을 구성해야 한다(Vosniadou, 2013). 일반적으로 수업을 위한 교수학습 전략은 교사에 의해 구현되는 것으로 효율적인 수업관리를 위해 사전에 계획 및 조직되어야 하며, 수업 목표 달성에 기여할 수 있는 적당하고 효과적인 방법으로 구성되어야 한다(Zee & Koomen, 2016). 실제로 교사는 수업을 계획 및 구성만 하는 수준을 넘어 목표 도달을 위해 수업을 직접 운영하며 관리하는 역할도 수행해야 한다. 그러므로 학생과의 상호작용을 유지하면서 학습 상태를 모니터링하고 학습자의 이해도와 학습목표 도달 여부를 점검하는 등 전반적인 수업의 관리 방법과 수단을 활용하는 것 또한 교사에게 요구된다(Fauth et al., 2019).

과학 학습에 있어 수업의 유형과 목표는 다양하게 구분될 수 있으나, 교수와 학습이 동시에 일어나는 교실 수업 맥락에서 대표적인 두 가지 지향점은 과학적 문제해결과정의 경험과 과학적 개념 형성이라 볼 수 있다(Cho et al., 2010; NRC, 2000). 그러므로, 과학적 탐구수업을 통해 학습자가 문제해결과정을 경험하고 과학적 개념을 획득하도록 안내하고 지원하기 위해서는 학습 참여를 유도하는 동기유발, 교수학습 전략의 구현이라는 수업 관리뿐만 아니라 학생과의 의사소통 및 피드백이 필수적으로 고려되어야 한다(Fauth et al., 2019; Keller et al., 2016; Mahler et al., 2017).

과학 탐구활동의 중요성은 과학 학습에 있어 당연한 것으로 인식하고 있는 것과 달리, 학교 현장에서 과학 탐구활동은 여전히 축소되어 있으며 운영하기 어려운 것이 현실이다. 특히 생물 탐구활동은 실내 활동뿐만 아니라, 실외 활동과의 연계성을 포함하고 있으므로, 제한된 시간과 인프라를 활용하여 교사가 수업을 통해 구현하기 어려운 것으로 인식되기도 한다(Behrendt & Franklin, 2014). 디지털 트윈은 물리적 시스템의 가상 복제본을 만들어 실제 세계의 다양한 활동을 안전하고 효율적으로 시뮬레이션할 수 있는 기회를 제공함으로써 학생들이 실험실에서 직접 경험하기 어렵거나 반복 탐구가 어려운 탐구활동을 가상환경에서 경험할 수

있다(Hassan et al., 2024). 또한 흥미 및 동기유발을 통해 학습자의 적극적인 참여를 유도하고, 실시간 피드백을 통해 학습 효과를 극대화할 수도 있으며 동일한 가상 실험환경을 서로 다른 학습자들에게 반복 제공도 가능하게 한다.

이러한 관점에서 디지털 트윈 활용 연구에 대한 분석과 교수·학습적 해석을 바탕으로 디지털 트윈 기술을 과학 탐구수업에 활용하기 위해 필수적으로 고려해야 하는 영역과 요소들에 대해 범주화하였다. 또한 수업 구성을 위해 고려되어야 하는 영역 간의 상호작용 지향점을 제시하고 세부적인 수업 구성 방안을 도출함으로써 디지털 트윈 수업 구성 모델을 Fig. 1과 같이 제시하였다.

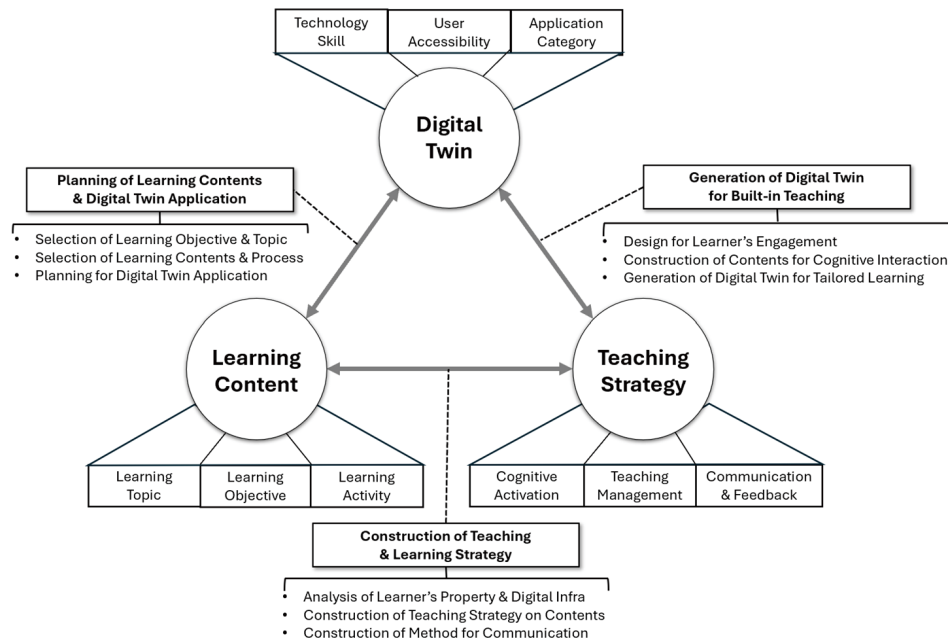


Fig. 1. The construction model of science inquiry class using digital twin technology

혁신적이고 새로운 디지털 기술을 수업에 활용하는 것은 교수자가 학습 내용과 디지털 기술의 하위 요소들을 전반적으로 검토하고 계열적으로 설계하는 과정이며, 학습자의 상호작용과 학습효과를 높이기 위한 적합한 교수학습 전략을 마련해야 하는 창의적인 활동에 해당한다(Lee & Lim, 2018). 또한 디지털 트윈 기술 같은 새로운 기술을 수업과 연계하기 위해서는 수업이 이루어지는 공간과 인프라 특성, 교수자와 학습자의 상호작용 접근성, 학습자의 특성 등을 필수적으로 고려해야 한다(Verkijika, 2019). 특히 생물 탐구학습이라는 상황에 대해 디지털 트윈 기술을 활용할 경우에는 교사의 수업 역량뿐만 아니라 탐구활동과 주제 및 대상이 내포하고 있는 복잡성이 고려되어야 하며, 과학적 문제해결과정의 시간적 계열성도 함께 살펴야 한다(Yildiz & Yildiz, 2021). 이외에도 다양한 에듀테크 기술들을 활용함으로써 디지털 트윈이라는 가상 공간을 하나의 플랫폼으로 하여 학습자가 다양한 상호작용을 할 수 있는 자유도를 제공할 수 있어야 한다(Karatas et al., 2017; Vincent-Lancrin, 2022).

과학 탐구수업을 설계하는데 있어 중요한 요소들의 우선 순위는 교수자가 어떤 수업을, 어떤 상황에서, 어떤 학습자들을 대상으로, 어떻게 운영하고자 하는지에 따라 다를 수 있다. 그러나 학습 과정별로 제시되는 교

수전락은 학습 효과 및 성공 여부에 초점을 맞추어야 하며, 문제해결 및 과학적 개념의 획득을 촉진할 수 있어야 한다(Kara et al., 2018; Keller et al., 2016; Zee & Koomen, 2016). 특히 디지털 트윈 같은 기술적 도구를 사용할 경우에는 하나의 영역과 관련된 다른 영역을 계열적이면서도 반복적으로 고려하는 과정이 필요하다. 또한 과학적 문제해결 활동에 학생들의 참여를 유발하고 유지할 수 있도록 수업을 조직하기 위해서는 자연스럽게 학습에 몰입할 수 있도록 학습의 범위와 방향을 명확히 한정하고, 적합한 가이드를 제공해야 한다(Berestova et al., 2021). 이를 위해서는 학습자의 특성과 학습환경에 적합한 맞춤형 교수전략 및 디지털 기술이 선별되어야 하며, 교수활동과 디지털 기술의 활용이 동조화될 수 있도록 수업을 설계해야 한다. 뿐만 아니라, 과학적 문제해결 과정에서는 학생의 상호작용이 강화된 학습 활동이 제공될 때 높은 학습 효과를 발휘하므로(Chen et al., 2021), 디지털 트윈 내에서 다양한 상호작용을 할 수 있도록 학습활동이 계획되어야 한다. 따라서 이 연구에서 개발한 디지털 트윈 활용 탐구 수업 구성 모델을 활용하여 생물 탐구 수업을 계획하고 학교 현장에서 구현 가능한지 확인하기 위해 Fig. 2와 같은 과정을 통해 수업을 계획 및 적용하였다.

1) 학습 주제로 ‘학교 내 생물 탐구’를 가장 먼저 선정한다면, 2) 학습 주제에 적합한 디지털 트윈 기술을 탐색하고 선정함으로써 3D공간 및 객체를 복제할 수 있는지 결정해야 한다. 3) 학습주제와 디지털 트윈 기술이 결정되면, 학습에 도달 목표를 학생들의 성취수준과 인지 수준을 고려하여 결정해야 하고, 4) 학습에 참여할 수 있도록 유발하기 위한 동기유발을 포함하는 인지적 활성화 전략을 수립해야 한다. 학습자 참여 전략이 수립되면, 5) 교수학습 전략을 구현할 수 있는지 여부를 확인하기 위해 3D 공간 구성 및 콘텐츠 삽입을 위한 사용자 접근성과 기술적 접근 방법을 확인하고, 6) 구체적인 탐구활동을 안내 및 지원하기 위한 교수학습 전략을 포함하는 수업 관리방법을 마련해야 한다. 이때 구체적으로 학생들이 디지털 트윈을 어떻게 생성할지, 디지털 트윈에 어떤 학습 학습콘텐츠를 삽입하거나 생성하도록 할 것인지 계획하는 것이 바람직하다. 이후 7) 교수·학습 전략의 구현이 가능한 디지털 트윈 적용 범주와 적합성을 탐색 및 선별해야 하며, 8) 디지털 트윈 범주의 적합성과 교수전략을 학습 내용 영역에 투사하여 9) 구체적으로 디지털 트윈을 활용해 어떻게 탐구활동을 수행할지 세부적인 내용을 결정해야 한다. 이에 따라 10) 디지털 트윈을 활용한 생물 탐구 활동이 기술적으로 교실 내외의 수업 상황에서 실행 가능한지 확인하고 11) 수정·보완 과정을 거치게 되면 최종적으로 구성된 탐구학습 활동에 따라 교수전략을 수정해야 한다. 마지막으로 12) 학습활동 과정에서 학습자와 학습자, 교수자와 학습자의 의사소통 및 생성한 디지털 트윈에 대한 공유 방안을 검토하며, 평가 및 피드백 방안을 선정함으로써 수업의 구성을 완료할 수 있다. 디지털 트윈 기술은 3D 공간과 객체의 복제를 주된 기능으로 하며, 일종의 가상세계 플랫폼으로 기능할 수 있으므로 현재 활용되고 있는 다양한 에듀테크 도구와 소프트웨어들을 삽입 및 연결하여 사용 가능하다. 그러므로 디지털 트윈을 활용한 수업을 구성하는 과정에서는 교수학습 전략을 구현하는 외부 자원을 적극적으로 활용함으로써 더욱 다양하고 역동적인 수업 활동을 구성해야 한다.

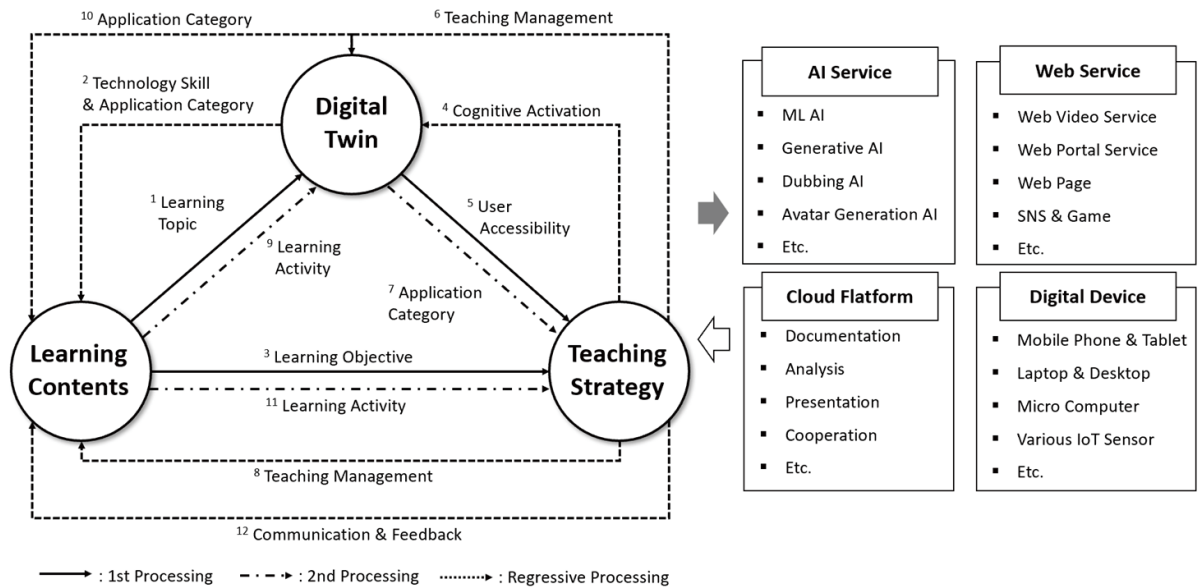


Fig. 2. The example of the class construction process using the model

Results of Basic Information of Students

디지털 트윈을 활용한 과학 탐구 수업 구성 모델에 따른 수업에 참여한 학생들이 지니고 있는 메타버스 관련 경험이나 정보를 확인하기 위해 관련한 응답 결과를 분석하였다(Table 3). 메타버스 활동과 관련된 정보를 경험하는 빈도에 대해 50.0%의 학생들이 ‘자주 접하고 있다’라고 응답하였으며, 경험이 전무한 경우는 ‘없다’라고 응답하였다. 메타버스 관련 정보를 획득하는 주요한 방법은 미디어와 웹 콘텐츠였으며, 학교의 교과·비교과 활동을 통해서도 관련 정보를 얻고 있었다. 메타버스 관련 활동을 처음 경험한 시기는 주로 중학교라고 응답하였으며, 주요한 메타버스 활동의 유형은 게임과 학교에서 이루어지는 수업이 동일 수준으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 연구에 참여한 학생들은 메타버스에 대한 경험이 풍부하다고 보기는 어려우며, 관련 활동에 대한 경험이 있는 학생들의 절반 정도는 학교 내에서 이루어지는 활동을 통해 메타버스를 경험하였다는 것을 알 수 있었다.

메타버스와 관련된 질문 중 ‘메타버스에 대한 학습이 삶에 필수적인가?’에 대해서는 50%의 학생들이 중요하다고 응답하였으며, 응답의 주요 이유는 ‘미래를 대비하기 위함’이었다(Table 4). 필요하지 않다고 응답한 학생(22.7%)과 판단을 유보한 학생(18.2%)의 비율이 40.9%로 나타남으로써 메타버스가 어떻게 활용될 수 있는지에 대한 지식이나 경험이 부족하다는 것을 알 수 있었다.

Table 3. The result of basic information about the experience of the Metaverse

Frequency of Information Experience		Acquisition Type of Metaverse Information		Period of First Experience		Type of Metaverse Activity	
Answer	%	Answer	%	Answer	%	Answer	%
Very Often	18.2	Curriculum	4.6	Elementary School	9.1	Game	27.3
Often	31.8	Club Activity in School	13.6	Middle School	50.0	Class Activity	27.3
Usually	31.8	Media	40.9	High School	22.7	None	45.5
Little	18.2	Web contents	36.4	None	40.9		
Not at all	0.0	None	4.6				

‘메타버스에 대한 학습이 나에게 긍정적 영향을 줄 수 있는가?’라는 질문에 대해서는 77.3%의 학생들이 ‘그렇다’ 이상으로 응답하였으며, ‘아니다’라고 응답한 학생은 한 명도 없었다. 또한 이런 선택을 한 이유를 분석한 결과, ‘막연히 도움이 될 것 같다’와 같이 구체적 이유 없이 긍정적 효과를 기대하는 학생의 비율이 40.9%로 가장 높게 나타났으며, 응답을 유보한 학생들은 31.8%였다. 그러므로 학생들은 메타버스에 대한 학습과 활용이 자신에게 긍정적일 것이라고 인식하는 경향이 있으나, 어떻게 활용하는지에 대한 구체적 경험이나 지식이 부족한 상태라는 것을 확인하였다. 마지막으로 ‘메타버스에 대한 학습이 사회에 긍정적 영향을 줄 수 있는가?’라는 질문에 대해서는 81.8%의 학생들이 ‘그렇다’ 이상으로 응답하였으며, 구체적이지 않은 긍정적 인식의 비율이 18.2%로 가장 낮게 나타났다. 결국, 대부분의 학생들은 메타버스에 대한 학습이 사회에 어떻게 긍정적 효과를 가져올 것인지에 대해서는 구체적으로 설명하는 편이나, 자신에게 어떻게 긍정적 효과를 제공할 것인지에 대해서는 구체적으로 설명하지 못하고 있다. 이러한 결과는 메타버스 기술에 대해 간접적으로 학습하였으나, 메타버스 기술을 구체적인 상황에 직접 활용하거나 효과를 획득한 경험이 부족하기 때문이라고 볼 수 있다. 따라서 일회적 체험 형태의 메타버스 활동이나 이론 중심 학습뿐만 아니라, 구체적 상황에서 메타버스 기술을 활용함으로써 자연스럽게 학생들이 미래지향적 디지털 기술에 대해 인식하고 경험할 수 있는 기회를 제공할 필요가 있다.

Table 4. The result of basic information about the consciousness of the Metaverse Learning

Essential for Life				Provides Positive Effects for Me				Provides Positive Effects for Society			
Answer	%	Reason for Selection	%	Answer	%	Reason for Selection	%	Answer	%	Reason for Selection	%
Very Much	13.6	Widely use in Current	9.1	Very Much	36.4	Non-specific Positive Perception	40.9	Very Much	18.2	Non-specific Positive Perception	18.2
Much	36.4	Preparing for the Future	50.0	Much	40.9	Specific Positive Perception	27.3	Much	63.6	Specific Positive Perception	36.4
Normal	40.9	Not Need	22.7	Normal	22.7	Not Sure	31.8	Normal	13.6	Not Sure	45.5
Little	9.1	Not Sure	18.2	Little	0.0			Little	4.6		
Not at all	0.0			Not at all	0.0			Not at all	0.0		

The Result of Affective Effect

디지털 트윈 활용 수업 구성 모델에 따른 과학 탐구수업을 학생들에게 제공하기 전·후 메타버스에 대한 정의적 인식 변화를 확인한 결과는 Table 5와 같았다. 메타버스 학습 활동에 대한 동기 수준은 사전 검사 결과의 평균이 사후 검사 결과에 비해 22.32점 증가하였으며, 사전·사후 검사 결과를 활용하여 양측 t-검정을 수행한 결과, 통계적으로 유의한 수준의 변화를 확인하였다(Table 6).

Table 5. The result of mean for the affective effect of Metaverse learning between pre and pos- test

Group	Motivation										Attitude		Task Commitment	
	Attention		Relavance		Confidence		Satisfaction		Sum					
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Pre-test	40.59	7.22	30.55	6.31	28.50	5.06	21.05	4.06	120.68	20.84	76.14	8.36	87.68	14.26
Post-test	48.50	4.98	35.14	4.82	34.59	4.54	24.77	3.31	143.00	16.07	85.77	8.94	100.59	11.48

Table 6. The result of paired t-test for the affective effect of Metaverse learning between pre and post-test

Paired Relation		t	df	Sig.	Cohen's <i>d</i>
Activity motivation of Metaverse learning		-5.165	21	.000**	1.199
Sub-Factor	Attention	-5.145	21	.000**	1.275
	Relevance	-4.038	21	.001**	0.818
	Confidence	-6.228	21	.000**	1.267
	Satisfaction	-3.582	21	.002**	1.006
Attitude of Metaverse learning		-4.781	21	.000**	1.113
Task commitment of Metaverse learning		-3.352	21	.003**	0.997

** : $p < .01$

메타버스 학습에 대한 활동 동기 변화의 Cohen's d 값은 1.199로 매우 높게 나타남으로써 통계적으로 유의한 수준에서 수업에 의한 긍정적 효과가 있다는 것을 확인하였다. 동기 검사 결과의 하위 요소들인 주의집중, 관련성, 자신감, 만족감에 대한 평균 비교 결과에서는 모두 $p < .01$ 수준에서 유의한 변화가 확인되었으며, Cohen's d 역시 높은 수준으로 학생들의 수업 참여는 활동동기의 하위 요소에 고르게 긍정적 효과를 제공하였다고 판단할 수 있었다. 뿐만아니라, 메타버스 학습에 대한 태도와 과제집착 검사 결과 역시 사전 평균값에 비해 사후 평균값이 통계적으로 유의하였으며, Cohen's d 가 각각 1.113과 .997로 높게 나타남으로써 수업의 효과가 긍정적이었음을 확인하였다. 따라서 이 연구에서 개발한 수업 구성 모델에 따른 과학 탐구 수업의 경험은 디지털 트윈에 대한 정의적 영역 변화에 긍정적 효과를 제공하였다.

Conclusions and Educational Implications

디지털 트윈을 활용한 과학 탐구 수업 구성 모델을 개발하고 모델에 따라 생명과학 탐구 수업을 계획하여 고등학교 학생들을 대상으로 적용한 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

첫째, 과학 탐구학습에 초점을 맞춘 디지털 트윈 활용 수업 구성 모델을 개발할 수 있었다. 교사의 수업설계 역량은 전문성에 해당하지만, 디지털 트윈 같은 첨단 디지털 기술을 활용한 수업을 계획하는 것은 기존의 교수이론과 노하우만을 지닌 교사에게 생소한 영역일 수 있다. 이런 맥락에서 디지털 트윈 활용 수업을 위해 고려되어야 하는 영역, 요소, 방법에 대한 모델을 개발함으로써 학교 현장에서 교사가 체계적으로 디지털 트윈을 활용할 수 있는 수업 설계 가이드 라인을 제시하였다.

둘째, 디지털 트윈 활용 수업 구성 모델에 따른 과학 탐구 수업의 경험은 학습자의 정의적 영역에 긍정적 영향을 제공할 수 있다. 가상 공간과 실제 세계를 넘나들며 생물 탐구 활동을 수행하고 탐구 결과를 디지털 콘텐츠로 생성한 후, 디지털 트윈 공간 내에 구현 및 공유한 학생들의 메타버스 활동에 대한 동기, 태도, 과제집착력이 크게 향상되었다. 이런 결과는 학습자가 실재감 높은 디지털 도구를 활용함으로써 탐구활동에 몰

입할 수 있는 경험을 하고, 자기주도적으로 탐구결과를 디지털화하여 가상공간에 구현함으로써 가상 세계 활용 학습을 지속하려는 욕구가 강화되었기 때문이다.

셋째, 디지털 트윈 수업 구성 모델에 따라 효과적인 수업의 계획이 가능하며, 현장에서 운영 가능하다는 것을 확인하였다. 이 연구에서 개발한 수업 구성 모델에 따라 디지털 트윈 기반 생물 탐구 수업을 계획하고 학생들을 대상으로 적용한 결과, 제한된 시간동안에도 디지털 트윈 활용 탐구 활동을 수행하여 결과물을 생성 및 공유할 수 있었다. 즉, 첨단 디지털 기술을 활용한 수업을 운영하는데 있어 기술에 대한 적응 시간을 최소화하여도 구조화된 수업 설계 모델을 활용하면 기술 습득에 소모되는 시간을 줄이고 효과적으로 탐구활동을 수행할 수 있다. 다만, 제한된 차시로 인해 기초적인 수준의 디지털 트윈을 생성하고 탐구 결과를 디지털 콘텐츠로 생성 하였으나, 지속적으로 탐구수업에 활용할 수 있는 체계를 갖춘다면 다층적이고 점진적으로 심화된 수업 활동이 가능할 것이다.

이 연구를 통해 디지털 트윈을 과학 탐구학습의 도구로 활용할 수 있는 수업 구성 모델을 개발하고 현장 적용 가능성을 확인함으로써, 다음과 같은 교육적 시사점을 제시할 수 있었다. 첫째, 디지털 트윈을 활용한 다양한 수업 프로그램의 지속적 개발과 적용을 통해 과학 학습의 효율성에 미치는 영향을 연구할 필요가 있다. 물리, 화학, 지구과학 등 다른 과학교과 분야에도 디지털 트윈 기술을 적용한 연구를 통해 다양한 과학 탐구 수업에 대한 디지털 트윈의 활용 가능성을 검증할 필요가 있다. 둘째, 디지털 트윈 같은 가상 세계 활용 교수 역량 강화를 위한 체계적인 교사 연수 프로그램이 필요하다. 교육의 발전 속도가 사회 변화의 속도를 따라가기 위해서는 첨단 기술을 교육 현장에 활용할 수 있는 교사 대상 교수역량 강화 프로그램 개발과 확산이 필요하다. 셋째, 디지털 트윈을 활용한 탐구활동 및 학습은 교육 격차를 줄이고 모든 학생들이 의사소통에 참여하도록 촉진하는 기능을 제공할 수 있다. 디지털 트윈은 모바일 폰만으로도 쉽게 활용이 가능하므로 물리적 자원의 제약이 있는 지역 및 학교 환경에서도 동일한 학습 경험을 제공할 수 있다. 특히 기술적 인프라가 부족한 지역이나 학교에서도 첨단 기술을 활용한 과학 탐구활동을 가능하게 하며, 간단한 연습만으로도 활용이 가능하므로 교육격차를 줄이는데 기여할 수 있을 것이다. 또한 에듀테크 기술을 융합적으로 활용하여 탐구결과를 디지털 콘텐츠화하여 삽입 할 수 있으므로, 탐구과정 중 의사소통 및 탐구결과 발표와 같은 상호작용에 누구나 쉽게 참여할 수 있는 기회를 제공할 수도 있을 것이다.

Conflicts of Interest

The author declared no conflicts of interest.

References

- Behrendt, M., & Franklin, T. (2014). A review of research on school field trips and their value in education. *International Journal of Environmental and Science Education*, 9, 235-245.
- Berestova, A., Ermakov, D., Aitbayeva, A., Gromov, E., & Vanina, E. (2021). Social networks to improve the creative thinking of students: how does it works? *Thinking Skills and Creativity*, 41, 100912.
- Bonfield, C. A., Salter, M., Longmuir, A., Benson, M., & Adachi, C. (2020) Transformation or evolution?: Education 4.0, teaching and learning in the digital age. *Higher Education Pedagogies*, 5, 223-246.

- Botín-Sanabria, D. M., Mihaita, A.-S., Peimbert-García, R. E., Ramírez-Moreno, M. A., Ramírez-Mendoza, R. A., & Lozoya-Santos, J. D. J. (2022). Digital twin technology challenges and applications: A comprehensive review. *Remote Sensing*, 14, Article 1335.
- Byeon, J.-h., & Kwon, Y.-J. (2023). The effect of outdoor inquiry program for learning biology using digital twin technology. *Journal of Baltic Science Education*, 22, 781-798.
- Chen, S. Y., Tsai, J. C., Liu, S. Y., & Chang, C. Y. (2021). The effect of a scientific board on improving creative problem solving skills. *Thinking Skills and Creativity*, 41, Article 100921.
- Cho, H. H., Kim, H. K., Yoon, H. S., & Lee, K. Y. (2010). The theoretical review of the feature and application of science teaching models. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 30, 557-575.
- Demir, L. (2024). Digital twin technology in higher education management: The case of Turkey. *International Online Journal of Education and Teaching*, 11, 279-288.
- Dihan, M.S., Akash, A.I., Tasneem, Z., Das, P., Das, S.K., Islam, M.R., ... Hasan, M. (2024). Digital twin: Data exploration, architecture, implementation and future. *Heliyon*, 10, Article e26503.
- Ding, L., Zhou, R., Yu, T., Yang, H., He, X., Gao, H., ... Zhang, K. (2024). Lunar rock investigation and tri-aspect characterization of lunar farside regolith by a digital twin. *Nature Communications*, 15, Article 2098.
- Dwivedi, Y. K., Hughes, L., Baabdullah, A. M., Ribeiro-Navarrete, S., Giannakis, M., Al-Debei, M. M., ... Wamba, S. F. (2022). Metaverse beyond the hype: Multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice and policy. *International Journal of Information Management*, 66, Article 102542.
- Emmert-Streib, F., & Yli-Harja, O.P. (2022). What Is a digital twin? Experimental design for a data-centric machine learning perspective in health. *International Journal of Molecular Sciences*, 23, Article 13149.
- Fauth, B., Decristan, J., Decker, A. T., Büttner, G., Hardy, I., Klieme, E., & Kunter, M. (2019). The effects of teacher competence on student outcomes in elementary science education: The mediating role of teaching quality. *Teaching and Teacher Education*, 86, Article 102882.
- Ferrari, A., & Willcox, K. (2024). Digital twins in mechanical and aerospace engineering. *Nature Computational Science*, 4, 178-183.
- Flaga, S., & Pacholczak, K. (2022). Demonstrator of a digital twin for education and training purposes as a web application. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16, 110-119.
- Grieves, M. W. (2015). Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. White Paper, 1-7.
- Grieves, M. W., & Vickers, J. H. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In Kahlen, J., Flumerfelt, S., & Alves, A. (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85-113). Springer.
- Haderer, B., & Ciolacu, M. (2022). Education 4.0: Artificial intelligence assisted task- and time planning system. *Procedia Computer Science*, 200, 1328-1337.
- Hassan, M., Montague, G., Iqbal, M.Z., & Fahey, J. (2024). Virtual reality-based bioreactor digital twin for operator training. *Digital Chemical Engineering*, 11, Article 100147.
- Hazrat, M. A., Hassan, N. M., Chowdhury, A. A., Rasul, M. G., & Taylor, B. A. (2023). Developing a skilled workforce for future industry demand: The potential of digital twin-based teaching and learning practices in engineering education. *Sustainability*, 15, Article 16433.
- Kara, M., Kukul, V., & Cakir, R. (2018). Conceptions and misconceptions of instructional pertaining to their roles and competencies in distance education: A qualitative case study. *Participatory Educational Research*, 5, 67-79.
- Karatas, S., Bagriacik-Yilmaz, A., Dikmen, C. H., Ermis, U. F., & Grubuz, O. (2017). Interactions in distance education environments: A trend analysis. *Quarterly Review of Distance Education*, 18, 63-82.

- Keller, M., Neumann, K., & Fischer, H. (2016). The impact of physics teachers' pedagogical content knowledge and motivation on students' achievement and interest. *Journal of Research in Science Teaching*, 54, 1-29.
- Kim, I. S., Ryu, S. K., Byun, H. J., & Seo, Y. K. (2020). Analysis of interaction experience through instructional digital imagination in non-face-to-face synchronous classes. *Journal of Educational Technology*, 36, 873-904.
- Kim, S., & Heo, S. (2024). An agricultural digital twin for mandarins demonstrates the potential for individualized agriculture. *Nature Communications*, 15, Article 1561.
- Komninou, A., & Tsigkas, G. (2022). Prototyping a Digital Twin System for Environmental Education. *Proceedings of the 26th Pan-Hellenic Conference on Informatics*, 361-366.
- Kuznetcova, I., Glassman, M., & Lin, T. J. (2019). Multi-user virtual environments as a pathway to distributed social networks in the classroom. *Computers & Education*, 130, 26-39.
- Laubenbacher, R. C., Mehrad, B., Shmulevich, I., & Trayanova, N. A. (2024). Digital twins in medicine. *Nature computational science*, 4, 184-191.
- Lee, J. K., & Lim, B. Y. (2018). A study on the process of reconstructing early childhood curriculum through teachers' imagination. *Journal of Early Childhood Education*, 38, 137-165.
- Lee, J. Y., Pyon, C. U., & Woo, J. Y. (2023). Digital twin for math education: A study on the utilization of games and gamification for university mathematics education. *Electronics*, 12, Article 3207.
- Lei, Z., Zhou, H., Dai, X., Hu, W., & Liu, G. (2023). Digital twin based monitoring and control for DC-DC converters. *Nature Communications*, 14, Article 5604.
- Lu, Y., Liu, C., Wang, K.I., Huang, H., & Xu, X. (2020). Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 61, Article 101837.
- Mahler, D., Großschedl, J., & Harms, U. (2017). Using doubly latent multilevel analysis to elucidate relationships between science teachers' professional knowledge and students' performance. *International Journal of Science Education*, 39, 213-237.
- Mehrabi, Z. (2024). How will crises affect food systems? Ask a 'digital twin'. *Nature*, 615, Article 189.
- Ministry of Education (2021). The plan of future curriculum with the people.
- Mitsanis, C., Hurst, W., & Tekinerdogan, B. (2024). A 3D functional plant modelling framework for agricultural digital twins. *Computers and Electronics in Agriculture*, 218, Article 108733.
- Mordaschew, V., Duckwitz, S., & Tackenberg, S. (2024). A human digital twin of disabled workers for production planning. *Procedia Computer Science*, 232, 745-751.
- Moshood, T. D., Rotimi, J. O., Shahzad, W., & Bamgbade, J. A. (2024). Infrastructure digital twin technology: A new paradigm for future construction industry. *Technology in Society*, 77, Article 102519.
- National Research Council (2000). *Inquiry and the National Science Education Standards: A Guide for Teaching and Learning*. National Academy Press.
- OECD (2022). *Trends Shaping Education 2022*, OECD Publishing.
- Pang, D., Cui, S., & Yang, G. (2022). Remote laboratory as an educational tool in robotics experimental course. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, 17, 230-245.
- Peper, E., Wilson, V., Martin, M., Rosegard, E., & Harvey, R. (2021). Avoid zoom fatigue, be present and learn. *NeuroRegulation*, 8, 47-56.
- Rathore, M. M., Shah, S. A., Shukla, D., Bentafat, E., & Bakiras, S. (2021). The role of ai, machine learning, and big data in digital twinning: A systematic literature review, challenges, and opportunities. *IEEE Access*, 9, 32030-32052.

- Reimers, M. F. (2022). Learning from the frontlines of educational innovation during a pandemic. In Vincent-Lancrin, S., Romani, C. C., & Reimers, F. M. (Eds.), *How Learning Continued during the Covid-19 Pandemic: Global Lessons from Initiatives to Support Learners and Teachers* (pp. 78-90). OECD Publishing.
- Rihm, S. D., Bai, J., Kondinski, A., Mosbach, S., Akroyd, J., & Kraft, M. (2024). Transforming research laboratories with connected digital twins. *Nexus*, 1, Article 100004.
- Sepasgozar, S. M. E. (2020). Digital twin and web-based virtual gaming technologies for online education: A case of construction management and engineering. *Applied Sciences*, 10, Article 4678.
- Sulaiman, M. Z., Aziz, M. N. A., Bakar, M. H. A., Halili, N. A., & Azuddin, M. A. (2020). Matterport: virtual tour as a new marketing approach in real estate business during pandemic COVID-19. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research*, 502, 221-226.
- Tao, F., & Zhang, M. (2017). Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. *IEEE Access*, 5, 20418-20427.
- Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., ... Nee, A. Y. C. (2018). Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, 57, 3935-3953.
- Tao, F., Zhang, H., & Zhang, C. (2024). Advancements and challenges of digital twins in industry. *Nature computational science*, 4, 169-177.
- Thelen, A., Zhang, X., Fink, O., Lu, Y., Ghosh, S., Youn, B.D., ... Hu, Z. (2022). A comprehensive review of digital twin-part 1: Modeling and twinning enabling technologies. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65, Article 354.
- Tikhonova E., & Raitskaya L. (2023). Education 4.0: The concept, skills, and research. *Journal of Language and Education*, 9, 5-11.
- Tilak, S., Glassman, M., Kuznetcova, I., Peri, J., Wang, Q., Wen, Z., & Walling, A. (2020). Multi-user virtual environments (MUVES) as alternative lifeworlds: Transformative learning in cyberspace. *Journal of Transformative Education*, 18, 310-337.
- Tjahyadi, H., Prasetya, K., & Murwantara, I. M. (2023). Digital twin based laboratory for control engineering education. *International Journal of Information and Education Technology*, 13, 704-711.
- Tuegel, E. J., Ingraffea, A. R., Eason, T., & Spottswood, S. M. (2011). Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 1-14.
- Vincent-Lancrin, S. (2022). Educational innovation and digitalisation during the COVID-19 crisis: Lessons for the future. In Vincent-Lancrin, S., Romani, C. C., & Reimers, M. F. (Eds.), *How Learning Continued during the COVID-19 Pandemic: Global Lessons from Initiatives to Support Learners and Teachers* (pp. 21-47). OECD Publishing.
- Vosniadou, S. (2013). Conceptual change in learning and instruction: The framework theory approach. In S. Vosniadou (Ed.), *International Handbook of Research on Conceptual Change* (pp. 11-30). Routledge.
- Willcox, K., & Segundo, B. (2024). The role of computational science in digital twins. *Nature Computational Science*, 4, 147-149.
- World Economic Forum (2024). Shaping the future of learning: The role of AI in education 4.0. *Insight Report*, 1-27.
- Yildiz, C., & Yildiz, T. (2021). Exploring the relationship between creative thinking and scientific process skills of preschool children. *Thinking Skills and Creativity*, 39, Article 100795.
- Zee, M., & Koomen, H. M. Y. (2016). Teacher self-efficacy and its effects on classroom processes, student academic adjustment, and teacher well-being: A synthesis of 40 years of research. *Review of Educational Research*, 86, 981-1015.

- Zhang, Z., Zhu, Z., Gao, G., Qu, D., Zhong, J., Jia, D., ... Pan, S. (2023). Design and research of digital twin system for multi-environmental variable mapping in plant factory. *Computers and Electronics in Agriculture*, 213, Article 108243.
- Zi, X., Gao, S., & Xie, Y. (2024). An online monitoring method of milling cutter wear condition driven by digital twin. *Scientific Reports*, 14, Article 4956.

Authors' information

Byeon, Jung-ho: Kangwon National University, Professor, 1st Author. <https://orcid.org/0000-0002-0109-7866>