

조경설계의 친환경성 평가를 위한 디지털 트윈 시뮬레이터 개발과 사용성 분석[†]

Development and Usability Analysis of a Digital Twin Simulator for Environmental Sustainability Assessment in Landscape Design[†]

박재현^{*,**}, 김재현^{***}, 이채린^{***}, 이유미^{****,*****}

*서울대학교 협동과정 조경학 박사수료, **서울대학교 스마트시티 글로벌 융합전공 박사수료, ***서울대학교 환경대학원 석사, ****서울대학교 환경대학원 환경설계학과 부교수, *****서울대학교 환경계획연구소 겸무연구원, *****서울대학교 스마트시티 글로벌 융합전공 겸임교수

Piao, Zaixian^{*,**}, Kim, Jaeheon^{***}, Lee, Chaelin^{***}, Lee, Yumi^{****,*****}

*Ph.D. Candidate, Course Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University

**Ph.D. Candidate, Integrated Major in Smart City Global Convergence, Seoul National University

***Master of Landscape Architecture, Department of Environmental Design, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University

****Associate Professor, Department of Environmental Design, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University

*****Adjunct Researcher, Environmental Planning Institute, Seoul National University

*****Adjunct Professor, Integrated Major in Smart City Global Convergence, Seoul National University

Received: November 13, 2025

Revised: November 25, 2025

Accepted: November 25, 2025

3인익명 심사필

Corresponding author :

Yumi Lee

Associate Professor, Department of Environmental Design, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

Tel.: +82-2-880-5665

E-mail: yumil@snu.ac.kr

국문초록

본 연구에서는 게임엔진을 활용하여 조경설계 과정에서 열섬 저감 및 식재 음영 면적 확보 등 친환경성 인증평가 항목을 실시간으로 시뮬레이션하는 디지털 트윈 시뮬레이터를 개발하였다. 전문가 휴리스틱 평가(heuristic evaluation)를 통해 이에 대한 사용성과 실무적 활용 가능성을 검증하였다. 평가 결과, 시뮬레이터는 직관적 사용성 측면에서는 긍정적인 평가를 받았으나, "시스템과 실제세계의 일치" 및 "실무 활용성 및 잠재성" 항목에서는 상대적으로 낮은 평가를 받았으며, 특히 실무 활용성 항목에서 전문가 간의 편차가 크게 나타났다. 이는 디지털 트윈과 현실 세계의 정보 일치도를 향상하기 위하여 실무에 필요한 복합 정보를 포함하는 표준 데이터베이스 구축이 필요함을 시사한다. 설계 단계에 따른 실무 활용성 편차를 해결하기 위하여 데이터 중심의 정량적 분석에 초점을 맞춘 전문가용 모듈과 고품질 시각화와 상호작용을 극대화한 의사결정 지원용 모듈을 구분하여 개발하는 과정이 필요하다. 본 연구는 조경설계 분야에서 디지털 트윈 개발과 사용성 평가를 연계한 통합적 연구 방법론을 통하여 디지털 트윈 기술 개발과 사용자 간의 간극을 구체적으로 식별하고 발전 방향을 제시한 것에 의의가 있다.

주제어: 가상현실, 휴리스틱 평가, LEED · SITES, 언리얼 엔진, 도시 열섬

ABSTRACT

This study developed a digital twin simulator using a game engine to perform real-time simulations of environmental sustainability focusing on heat island reduction and securing vegetation shade coverage within the landscape design. The simulator's usability were verified through a heuristic evaluation conducted by experts. The results showed that while overall usability received positive feedback, the heuristics "Match between system and the real world" and "Usability and potential" received relatively low scores. Furthermore, it was confirmed that discrepancies exist in the simulator's applicability depending on the stage of the design process. This suggests the need to establish a standard database that includes composite data for professional practice and a differentiated development process that separates quantitative analysis modules from decision-support visualization modules. This study holds significance in that it specifically identified the gap between digital twin technology development and its users and presented future development directions through an integrated research methodology linking digital twin development with usability evaluation in the field of landscape architecture.

Keywords: Virtual Reality, Heuristic Evaluation, LEED · SITES, Unreal Engine, Urban Heat Island

[†]이 논문은 국토교통부의 스마트시티 혁신인재육성사업 및 서울대학교 환경 계획연구소의 지원을 받았음.

1. 서론

1.1 연구의 배경

기후변화 시대를 맞아 조정 공간의 환경적 성능을 제고하는 지속 가능한 외부공간의 설계 및 계획의 중요성이 부각되고 있다. 국내의 극한 기후 현상은 점차 빈번해지며 심각한 기후변화의 영향은 도시의 주요 인프라 및 기능을 파괴할 수 있다(Bucchignani et al., 2021). 특히 최근 기후변화로 인한 도시 열섬현상은 시민들의 주요 불안 요소로 나타나고 있으면 도시민들의 삶에 직접적인 영향을 준다(오규식과 홍재주, 2005). UN은 지속 가능발전목표에서 지속 가능성과 관련하여 도시의 기후변화, 자연재해에의 적응 및 회복력 등을 제시하고 있다(<https://sdgs.un.org/goals>). 조정설계 분야에서는 기후 위기에 대응하기 위하여 지속 가능하고 자연재해에 대한 회복탄력성을 향상할 수 있는 기후 적응형 외부공간 설계를 지향해 왔다. 도시 열섬효과 완화, 물순환 개선, 바람길 개선, 건물 에너지 저감 등은 기후 적응형 설계에서의 중요한 전략이다. 우리가 추구하는 지속 가능하고 회복탄력성이 높은 기후 적응형 설계의 가치를 사람들에게 인지시키는 것은 쉽지만 이런 가치를 정량화하고 평가하기에는 조정 요소들의 특성상 항상 어려움이 있었다. 조정설계에서는 특히 식재, 음영, 토양, 바람 등과 같은 다양한 변화하는 설계적 요소들을 제어하고 있고 설계 프로세스에서는 지속적으로 설계안이 변화하며 그때그때 실시간으로 설계안에 대한 지속 가능성을 정량적으로 평가하는 것에는 한계가 존재한다.

정량화하기 어려운 외부공간의 가치를 평가하기 위하여 여러 친환경성 평가지표가 개발되었다. 건축물의 친환경성을 평가할 수 있는 친환경 인증 제도는 도시계획 및 설계 분야에서 기후변화에 대응하는 환경적 성능을 평가하는 핵심적인 지표이다. 특히 미국의 LEED(Leadership in Energy and Environmental Design) 및 SITES(Sustainable Sites Initiative) 인증 제도는 친환경 설계의 길잡이 역할을 하고 있다. 외부공간에 대한 인증 시스템인 SITES는 독립적인 인증 기준을 가지고 있으면서도 LEED 시스템과의 연계성을 갖추고 있으며, 관련 법제도적 지침과 표준과도 조화를 이루고 있다(전승훈과 채수권, 2021). 특히 LEED 와 SITES 인증 체계에서는 다양한 외부공간의 여러 친환경 요소들을 평가하고, 공간 조성 계획, 설계, 건설, 관리 등 전체 프로젝트 개발 과정의 지속 가능성 확보와 통합 디자인 실현을 추구한다.

실제 설계 실무과정에서는 프로젝트의 친환경 인증을 받기 위하여 다양한 설계적 요소를 변경하는 상황이 빈번히 발생한다. 이에 따라 생성된 다양한 설계안들에 대한 친환경성 평가를 효율적으로 비교 확인하는 과정이 필요하다(Gomaa et al., 2021). 외부공간의 설계적 옵션이 변화할 때마다 복잡한 평가 항목들에 대한 결과를 예측하고 실시간으로 확인하는 도구는 부족하며 이에 따라 다양한 평가 요소로 구성되는 친환경 평가시스템을 항상 변화하는 설계과정에서 적용하는 것은 한계가 존재한다. 이는 결과적으로 지속 가능한 친환경 외부공간 설계 프로세스의 효율성을 저하하게 된다. 외부공간의 친환경성 평가는 단일적인 요소가 아닌 열환경, 친환경 재료, 식재 생장 환경 등 다양한 요소들에 대한 복합적인 평가로 이루어진다. 기존의 외부공간의 친환경성 평가는 주로 단일 도구를 사용하여 개별 요소에 대한 시뮬레이션 및 평가로 이루어지고 있었으며 복수의 평가 항목들을 통합된 시스템에서 시뮬레이션하며 다양한 디자인 시나리오들을 도출하여 평가하는 것에 한계가 존재하였다. 이런 한계들을 극복하기 위하여 외부공간의 설계 옵션 변경에 따라 실시간으로 다양한 디자인 시나리오를 시뮬레이션하며 복합적인 친환경성 평가 결과를 실시간으로 도출할 수 있는 디지털 트윈 시뮬레이터의 개발이 필요하다.

1.2 연구의 목적

본 연구의 목적은 조정설계 과정에서 복잡한 친환경성 평가를 실시간으로 수행할 수 있는 디지털 트윈 시뮬레이터를 개발하고, 개발된 디지털 트윈 시뮬레이터에 대한 사용성 평가를 수행하여 이의 활용성을 검증하는 것이다. 이를 달성하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 두 가지의 연구 질문을 설정하였다. 첫째, 개발된 디지털 트윈 시뮬레이터는 휴리스틱 평가 관점에서 어떤 사용성의 강점과 한계를 지니고 있는가? 둘째, 본 디지털 트윈 시뮬레이터는 조정설계 프로세스의 어느 단계에서 더 높은 활용성을 가지는가? 이러한 연구 질문을 바탕으로 구체적인 목표는 다음과 같다.

첫째, 조정설계 단계에서 LEED와 SITES 같은 주요 친환경성 인증 평가 항목과 연동되는 디지털 트윈 시뮬레이터를 개발한다. 디지털 트윈 시뮬레이터에서는 포장, 식재 등 친환경성 평가와 밀접하게 연관된 조정설계 옵션들을 사용자가 상호작용 UI(user interface)를 통하여 실시간으로 자유롭게 제어할 수 있도록 개발한다. 사용자의 설계 옵션 선택에 따라 구성된 다양한 설계 시나리오별 친환경성 평가 항목 결과를 즉각적인 시뮬레이션을 통해 도출하고 비교 및 확인할 수 있도록 한다. 둘째, 개발된 디지털 트윈 시뮬레이터를 대상으로 조정설계 실무 전문가들이 참여

하여 휴리스틱 평가(heuristic evaluation)를 수행한다. 사용성 평가를 통하여 개발된 디지털 트윈 시뮬레이터가 조경설계 실무에서 가지는 활용 가능성과 잠재력을 검증한다. 동시에 디지털 트윈 시뮬레이터의 구체적인 문제점과 한계를 파악하여 향후 개발 과정에서 필요한 개선점을 도출하는 것이 목표이다.

2. 이론적 고찰

2.1 외부공간 친환경성 인증평가

기후변화 시대에 조경설계에서 추구하는 지속 가능성은 환경적 측면 뿐만 아니라 사회, 경제, 인간의 삶의 질 등 다양한 측면에서 중요한 역할을 한다. 기후변화 적응을 위한 지속 가능한 외부공간 설계는 기후변화로 인한 극단적인 기후 조건에 대응할 수 있으며 자연재해로부터의 피해를 최소화하고 사회 및 경제적 안정성을 유지할 수 있다(김복영, 2019). 지속 가능한 외부공간 설계는 효율적인 물관리 시스템, 친환경적인 재료 사용 등을 통해 외부공간의 자원 소비를 줄이고 에너지 효율성을 향상시킨다. 또한 지속 가능한 외부공간 설계는 건강한 공기, 쾌적한 열환경, 편안한 공간 조성 등을 통하여 건강한 환경을 조성하고 사람들의 삶의 질을 향상시킬 수 있다(김승현, 2013). 이런 지속 가능한 외부공간 설계의 가치를 사람들이 정서적으로만 인지하는 것이 아니라 정량적으로 평가 및 증명하기 위하여 다양한 친환경성 인증평가시스템들이 개발되었다(유광흠 등, 2012). 그중 미국에서 제시한 LEED, SITES가 국제적으로 인정받는 대표적인 친환경성 인증평가시스템이다.

LEED는 건축물 위주의 친환경성 평가가 주를 이루고 있어 외부공간과 관련된 평가 항목은 비교적 부족하다. LEED는 미국 그린빌딩협의회(U.S. Green Building Council, USGBC)에서 개발한 친환경 건축물 인증 제도로 1998년에 처음 도입되었으며 현재 전 세계적으로 널리 사용되고 있다(<https://www.usgbc.org/leed>). LEED는 건축물의 설계, 건설, 운영, 유지관리 등의 모든 단계에서 환경적 지속 가능성을 평가하고 인증한다. LEED는 건축물의 에너지 효율성, 물 사용 효율성, 실내 환경 품질, 재료 사용, 설계 혁신 등의 여러 항목을 평가하며, 적용 범위는 건축 디자인+건설(building design+construction), 실내 건축 디자인(interior design+construction), 운영 관리(operations+main-tenance), 주거지역(residential), 도시 및 지역사회(cities+communities), 재인증(recertification) 등으로 되어 있다(전승훈과 채수권, 2021). 이렇듯 LEED에서는 건축물 위주의 친환경성 평가를 주로 이루고 있기에 본 연구에서는 LEED의 건축 디자인+건설 평가범위에서 외부공간과 연관된 평가 항목을 선별하여 디지털 트윈 개발에 적용하였다.

반면 SITES는 LEED에서 부족했던 외부공간에 대한 친환경성 평가를 중심으로 다양한 측면에서의 평가 항목들로 구성된 평가인증 시스템이다. 미국의 SITES는 미국조경가협회(American Society of Landscape Architecture, ASLA), 미국 식물원(United States Botanic Garden) 등 권위 있는 기관들이 협력하여 개발한 지속 가능한 조경 공간 조성을 위한 인증 시스템으로 조경 및 외부 공간에 특화된 LEED라고 이해할 수 있다. SITES는 건축물뿐만 아니라 공원, 캠퍼스, 주거 단지, 상업 지구 등 건물이 있거나 없는 모든 외부 공간 프로젝트에 적용될 수 있다(ASLA, 2005). 조경 분야에서 지속 가능성을 정량적으로 평가하고 증명하는 공신력 있는 기준으로 활용되고 있다(이형숙, 2016). SITES에서 추구하는 근본적인 목표는 지속 가능한 토지 개발 및 관리 관행을 장려하고, 나아가 생태계 서비스를 보호하고 재생성하는 것이다. 이를 통하여 기후변화 대응, 수자원 관리, 생물 다양성 증진, 인간의 웰빙, 자원의 순환 등 다양한 가치를 창출할 수 있다(전승훈과 채수권, 2020). SITES에서는 외부공간의 설계, 시공, 관리 등 전체과정을 포함하는 지속 가능한 외부환경과 관련된 Site Context, Pre-Design Assessment+Planning, Site Design(water), Site Design(soil+vegetation), Site Design(material selection), Site Design(human health+well-being), Construction, Operation+Maintenance, Education+Performance Monitoring, Innovation or Exemplary Performance 등 총 10개 부문에 대하여 평가한다. 본 연구에서는 SITES에서 특히 조경설계 단계와 관련된 site design(soil+vegetation) 부문에서의 평가 부문 평가 항목을 선정하여 디지털 트윈을 개발하였다.

2.2 디지털 트윈

다양하고 복잡한 평가 항목들로 구성된 외부공간 친환경성 평가시스템에 대한 디지털 전환 및 실시간 시뮬레이션에 있어 디지털 트윈은 유용한 도구로 활용될 수 있다. 디지털 트윈은 현실 세계의 물리적 객체, 시스템, 프로세스 등 다차원적인 데이터를 가상 공간에 동일하게 조성하여 현실과 똑같이 작동하는 쌍둥이를 구현하는 기술이다(황성범 등, 2020). 조경 분야에서의 디지털 트윈은 건축이나 제조 산업의 디지털 트윈과는 차별성을 갖는다. 정형화된 부품이나 정적인 구조물을 주로 다루는 타 분야와 달리, 조경은 식물이라는 살아있는 생명체를 다룬다. 따라서 조경 디지털 트윈은 단순한 3차원 형태의 재현을 넘어, 시간의 흐름에 따른 성장, 계절에 따른 경관 변화, 그리

고 이에 따른 미기후의 변화 등 4차원적 환경 변화를 시뮬레이션할 수 있어야 한다는 점에서 고유한 특성을 지닌다. 최근 빠르게 성장하는 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어 기술과 함께 컴퓨터 속 가상환경에서 실시간으로 매우 가까운 현실을 시뮬레이션하는 것이 가능해졌다(Ruohomäki et al., 2018). 디지털 트윈은 외부공간을 가상으로 재현하고 시뮬레이션을 통해 다양한 평가 항목을 신속하게 분석할 수 있고 외부공간의 다양한 설계 시나리오를 시뮬레이션할 수 있는 환경을 제공하며 이를 통해 최적의 설계 대안을 탐색할 수 있다(Atwa et al., 2019). 디지털 트윈은 설계 단계부터 다양한 설계 요소 변경에 대한 영향을 미리 예측하여 실제 공간을 건설하기 전에 여러 시나리오를 비교 분석하여 건설산업에서 방대한 비용 절감과 지속 가능성을 동시에 추구할 수 있다(Rafsanjani et al., 2023). 또한 디지털 트윈은 외부공간 친환경성 및 디자인 시나리오에 대한 정보를 직관적이고 현실적인 방식으로 사용자들에게 제공할 수 있으며 이를 통하여 효율적인 의사결정을 지원하고 다양한 이해 관계자들의 의사소통을 원활하게 할 수 있다(Kober et al., 2024). 본 연구에서는 외부공간 설계 단계에서 활용할 수 있는 디지털 트윈 시뮬레이터를 개발하여 조정설계 요소 변경에 따라 다양한 설계 시나리오를 실시간 시뮬레이션하고 이에 따른 친환경성 평가 항목에 대한 평가 결과를 확인할 수 있도록 한다.

디지털 트윈은 적용 단계와 데이터의 연동 수준에 따라 1단계 모사(mirroring), 2단계 관제(monitring), 3단계 모의(modeling & simulation), 4단계 연합(federated), 5단계 자율(autonomous) 등 다양한 층위로 구분된다(윤재석과 김진민, 2022). 일반적인 디지털 트윈은 운영 및 관리 단계에서 IoT와 같은 실시간 센싱 데이터와 연동되는 동적 모델을 포함하여 실시간 데이터 피드백, 동적 환경 시뮬레이션, 운영 단계 최적화 등을 포함한다. 하지만 본 연구에서 개발하는 디지털 트윈 시뮬레이터는 전통적인 의미의 운영 및 관리 단계의 디지털 트윈이 아닌 조정설계 단계에서의 의사결정을 지원하기 위한 설계 시뮬레이션 중심의 디지털 트윈 지향 시뮬레이터로서 디지털 트윈의 구현 수준에 있어서 고도화된 디지털 트윈은 아니다. 이는 정적인 설계 데이터를 기반으로 가상의 시나리오에 대한 친환경성 평가 결과를 검증하는 데 초점이 맞추어져 운영 및 관리용 디지털 트윈과는 구별되는 특징을 갖는다.

2.3 휴리스틱 평가

휴리스틱 평가는 소수의 전문가들을 대상으로 진행하여 서비스의 개발 초기에 빠르게 직관적으로 사용성을 평가하는 방법이다(Quinones and Rusu, 2017). 휴리스틱 평가 방법은 해당 분야의 전문가가 풍부한 경험을 바탕으로 독립적으로 평가한 후 결과를 취합하는 방식으로 3~5명의 평가자만으로도 충분한 문제점들을 발견할 수 있기에 경제적인 장점을 갖고 있다(Nielsen and Molich, 1990). 휴리스틱 평가의 기준이 되는 원칙들은 10개의 휴리스틱(heuristics)을 기반으로 하며(Nielsen, 1994), 특정한 서비스의 기능과 목적에 따라 휴리스틱을 변경하여 평가를 진행할 수도 있다(김성근, 2020).

디지털 트윈은 하나의 시스템 서비스로서 단순히 개발에서 끝나는 것이 아니라 사용성 평가를 통해 지속적인 발전이 필요하다(Aheleroff et al., 2021). 디지털 트윈의 사용성을 평가하는 것은 시스템에 오류가 있는지, 제어하기 쉬운지 등 사용성의 문제점을 발견하는 것뿐만 아니라 이런 문제점들을 개선할 수 있도록 개발 방향을 제시하여 더 나은 사용자 경험 및 활용성을 제고하기 위한 중요한 과정이다(Stone et al., 2005). 따라서 본 연구에서는 디지털 트윈 시뮬레이터의 문제점과 개선점을 도출하기 위하여 휴리스틱 평가 방법을 활용하였다. 휴리스틱 평가 표준에 따라 평균 경력이 14년이 넘는 조정설계 전문가 4명을 대상으로 평가를 진행하였다.

3. 연구의 방법

3.1 연구 대상지

본 연구에서는 서울대학교 시흥캠퍼스 부지를 대상지로 설정하여 디지털 트윈을 개발하였다. 서울대학교 시흥캠퍼스는 현재 다수의 부지가 개발되지 않은 대상지로서 외부공간의 다양한 설계 시나리오에 대한 사전 시뮬레이션 및 평가 과정이 필요하다. 또한 서울대학교 시흥캠퍼스는 쾌적하고 안전한 캠퍼스 환경 및 경관계획을 수립하여 지속 가능한 친환경 설계가 필요한 대상지이며 스마트캠퍼스를 지향하여 외부 환경에 대한 시뮬레이션 및 사전 예측을 적극적으로 추진하는 계획을 수립하므로 본 연구에 적합한 대상지이다.

3.2 친환경성 평가 항목 분석 및 시뮬레이션 요소 선정

본 연구에서는 우선적으로 외부공간의 친환경성을 평가할 수 있는 평가지표 및 친환경 평가인증 체계를 분석하

여 디지털 트윈에서 구현할 항목들을 도출하였다. 본 연구에서는 미국 LEED V4.1 BD+C 평가인증 지표에서 제시한 평가 항목들 중에서 외부공간 조경설계와 관련된 “열섬효과 저감”과 “오픈스페이스” 평가 항목을 선정하였고, SITES V2 평가인증 지표에서는 “열섬효과 저감”과 “식생을 활용한 건물 에너지 사용 최소화” 평가 항목들을 선정하였다(표 1 참조). 해당 평가 항목들을 충족시킬 수 있는 평가 기준 요구사항들은 외부공간 조경설계의 포장, 식재 등 주요 물리적 설계 요소들과 긴밀히 연관되며, 디지털 트윈의 기술적 강점과 부합된다. “열섬효과 저감” 같은 평가 항목은 포장재의 SR(solar reflectance)값과 같은 물체의 표면 물성에 기반한 평가 항목으로 이는 게임엔진의 물리 기반 렌더링 기술을 통하여 효과적으로 시각화될 수 있다. 또한 “오픈스페이스”, “식생을 활용한 건물 에너지 사용 최소화” 평가 항목에서 다루는 식재 면적 및 음영 면적 등 평가 기준은 3차원 공간의 체적과 면적을 실시간으로 연산하는 게임엔진의 기하학적 처리 능력을 통해 설계 변경 즉시 결과값을 산출하기에 적합한 항목이다. 따라서 본 연구에서는 시각적 직관성과 실시간 연산의 효율성을 고려하여 보도 포장과 식재 요소를 주요 시뮬레이션 대상으로 선정하여 다양한 설계 옵션 변화에 따른 외부공간의 친환경성 실시간 평가를 진행하였다.

3.3 디지털 트윈 개발

본 연구에서는 디지털 트윈 시뮬레이터를 개발하기 위하여 게임엔진인 언리얼 엔진5(Unreal Engine 5)를 사용하였다. 언리얼 엔진은 강력한 게임엔진으로서 최근 게임분야 뿐만 아닌 다양한 산업 분야에서의 디지털 트윈 구축 플랫폼으로 활용되고 있다. 본 연구에서의 디지털 트윈 개발 단계는 3D 모델링, 데이터 입력 및 실시간 시각화, 설계 옵션 실시간 시뮬레이션 개발, 상호작용 UI 개발 등 단계로 이루어진다(그림 1 참조).

3.3.1 3D 모델링

본 연구에서는 서울대학교 시흥캠퍼스 마스터플랜 계획안을 기반으로 SketchUp 프로그램을 사용하여 해당 대상지에 대한 3D 모델링을 진행하였다. 3D 모델링 과정에서 디지털 트윈 시각화의 컴퓨팅 연산 효율성 제고를 위하여 부지별 LOD(level of detail)를 설정하여 3D 모델링을 진행하였다. 캠퍼스 부지 내부에 해당되는 설계 대상지 공간은 OGC 국제표준 CityGML 3.0에서 제시하는 LOD3 단계에 해당되는 디테일로 비교적 높은 LOD로 3D 모델링을 진행하였고, 캠퍼스 부지 외부에 해당되는 주변 공간은 LOD1 단계에 해당되는 비교적 낮은 LOD로 3D 모델링을 진행하여 추후 디지털 트윈 시각화의 컴퓨팅 연산의 효율성을 제고하였다.

3.3.2 데이터의 입력 및 실시간 시각화

본 연구에서는 앞 단계에서 SketchUp으로 진행한 대상지 3D 모델링 데이터를 데이터스미스(Datasmith) 파일 포맷으로 추출하여 언리얼엔진에 입력하였다. 데이터스미스는 사전 생성된 3D 모델링 씬과 다양한 산업의 표준 설

표 1. 선정한 LEED v4.1 BD+C, SITES v2의 친환경성 평가 항목 및 평가 기준

구분	평가 항목	평가 기준
LEED v4.1 BD+C	열섬효과 저감 (SS credit: heat island reduction)	<ul style="list-style-type: none"> 초기 태양 반사율(SR) 값이 최소 0.33인 포장재를 사용하십시오. 기존 수목을 활용하거나, 식재 후 10년 이내에 대상지 내 포장 구역(높이더 포함) 면적 이상의 그늘을 형성할 수 있는 수목을 식재하십시오. 식생 플랜터를 설치하십시오. 모든 식재는 사용승인 시점까지 설치가 완료되어야 하며, 인조 잔디는 포함할 수 없습니다. 식생 구조물을 활용하여 그늘을 제공하십시오.
	오픈스페이스 (SS credit: open space)	<ul style="list-style-type: none"> 해당 외부 공간의 최소 25%는 식재(잔디는 식생으로 인정하지 않음)하거나, 상부 식생 캐노피를 확보해야 합니다.
SITES v2	도시 열섬효과 저감 (Credit 4.9: reduce urban heat island effects)	<ul style="list-style-type: none"> 초기 태양 반사율(SR) 값이 최소 0.33인 포장재를 사용하십시오. 기존 수목을 활용하거나, 식재 후 10년 이내에 대상지 내 포장 구역(높이더 포함) 면적 이상의 그늘을 형성할 수 있는 수목을 식재하십시오. 식생 플랜터를 설치하십시오. 모든 식재는 사용승인 시점까지 설치가 완료되어야 하며, 인조 잔디는 포함할 수 없습니다. 식생 구조물을 활용하여 그늘을 제공하십시오.
	식생을 활용한 건물 에너지 사용 최소화 (Credit 4.10: use vegetation to minimize building energy use)	<ul style="list-style-type: none"> 식생 또는 식생 구조물을 사용하여, 설치 후 10년 이내에 건축 면적의 30% / 60%에 해당되는 그늘을 제공하십시오.

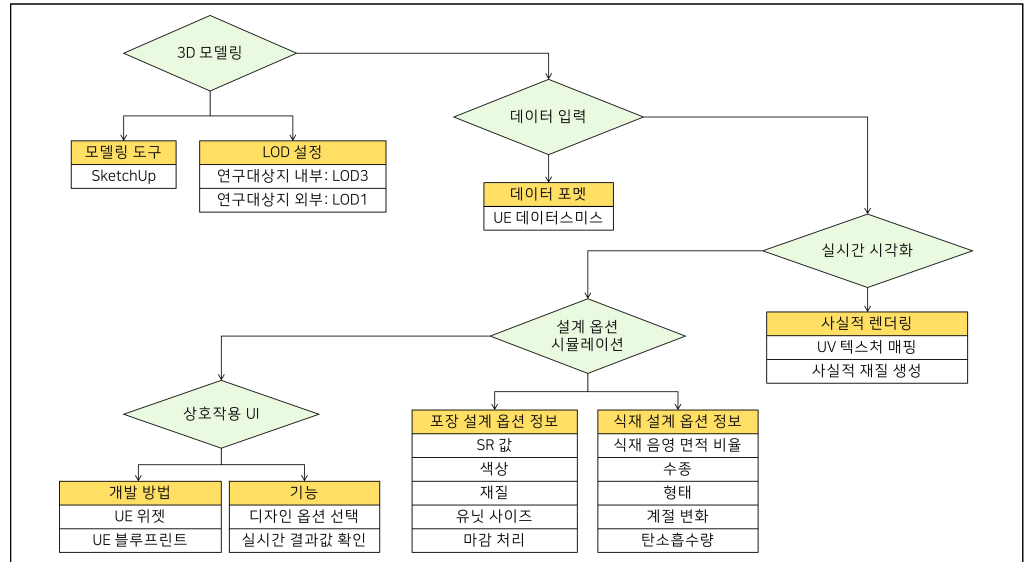


그림 1. 게임엔진 기반 디지털 트윈 개발 프로세스 및 개발 방법

계 애플리케이션으로 제작된 데이터 에셋 전체를 언리얼 엔진으로 가져올 수 있는 툴 및 플러그인 모음이다. 이를 활용하여 3D 모델링 데이터를 효율적으로 언리얼엔진에 입력할 수 있다. 3D 모델링 데이터 입력 후 언리얼엔진에서 재질(material)을 제작하고 3D 모델링에 재질 데이터를 부여 및 UV Mapping을 통하여 사실적인 3D 모델링 시각화 렌더링을 실시간으로 구현하였다.

3.3.3 설계 옵션 실시간 시뮬레이션 개발

본 단계에서는 앞서 선정한 외부공간 조경설계와 관련된 친환경성 평가 항목들을 바탕으로 보도 포장 설계 요소를 선정하여 SR 값이 다른 다양한 보도 포장 설계 옵션 시뮬레이션을 개발하였다. 디지털 트윈 시뮬레이터 내부의 친환경성 평가 로직은 LEED v4.1 및 SITES v2의 평가 기준을 기반으로 한 규칙 기반 알고리즘으로 구현되었다. 구체적으로 사용자가 선택한 포장재의 SR 값이 기준값인 0.33 이상일 경우 LEED v4.1 및 SITES v2의 열섬현상 저감 평가 항목의 크레딧 획득 필요조건을 충족하며 LEED v4.1의 “열섬효과 저감” 평가 항목에서 2점을 획득할 수 있고, SITES v2의 “열섬효과 저감” 평가 항목에서는 4점을 획득할 수 있다. 보도 포장 설계 옵션에서는 포장재료의 SR 값뿐만 아니라 색상, 재질, 유닛 사이즈, 마감처리, 등 실제 조경설계에서 필요한 포장재료의 정보들을 함께 제공하였다.

식재 설계 옵션 시뮬레이션 개발에 있어서는 건축면적 대비 식생으로 제공하는 음영 면적 비율값을 기준으로 각각 25%, 35%, 60% 등 3가지 값에 해당되는 식재 설계 옵션들을 개발하였다. 사용자가 선택한 식재 설계 옵션의 건축면적 대비 식생으로 제공하는 음영 면적 비율값이 25%의 경우 LEED v4.1의 “오픈스페이스” 및 SITES v2의 “식생을 활용한 건물 에너지 사용 최소화” 평가 항목에서 모두 점수를 획득할 수 없고, 35%의 경우 LEED v4.1의 “오픈스페이스” 및 SITES v2의 “식생을 활용한 건물 에너지 사용 최소화” 평가 항목에서 모두 1점을 획득하고, 60%의 경우 LEED v4.1의 “오픈스페이스”에서는 1점, SITES v2의 “식생을 활용한 건물 에너지 사용 최소화”에서는 2점을 획득할 수 있다. 식재 설계 옵션에서는 건축면적 대비 식생으로 제공하는 음영 면적 비율값뿐만 아니라 식생의 수종, 형태, 계절변화 여부, 개당 탄소 흡수량 등 정보들을 함께 제공하였다(그림 2 참조).

3.3.4 상호작용 UI 개발

본 단계에서는 설계자, 일반 시민, 발주처 등 다양한 주체의 사용자들이 해당 디지털 트윈 시뮬레이터를 쉽게 사용 가능하고 실시간 시뮬레이션을 수행하기 위하여 사용자와 상호작용이 가능한 UI를 개발하였다. 사용자가 디지털 트윈 시뮬레이터 화면 우측의 UI 패널을 통해 직접 선택한 포장 및 식재 설계 옵션에 따라 실시간으로 시뮬레이터 내부의 친환경성 평가 로직이 작동되어 화면 좌측에서 LEED v4.1의 “HEAT ISLAND REDUCTION”, “OPEN SPACE” 및 SITES v2의 “Reduce urban heat island effects”, “Use vegetation to minimize building energy use” 등 평가 항목에 대한 결과 점수, 총 식재 탄소 흡수량, 시공 가격 등 정보들을 바로 확인할 수 있다(그림 3 참조). 사용자는 상호작용 UI를 통하여 포장 및 식재 설계 옵션들을 자유롭게 조합할 수 있고 이에 따른

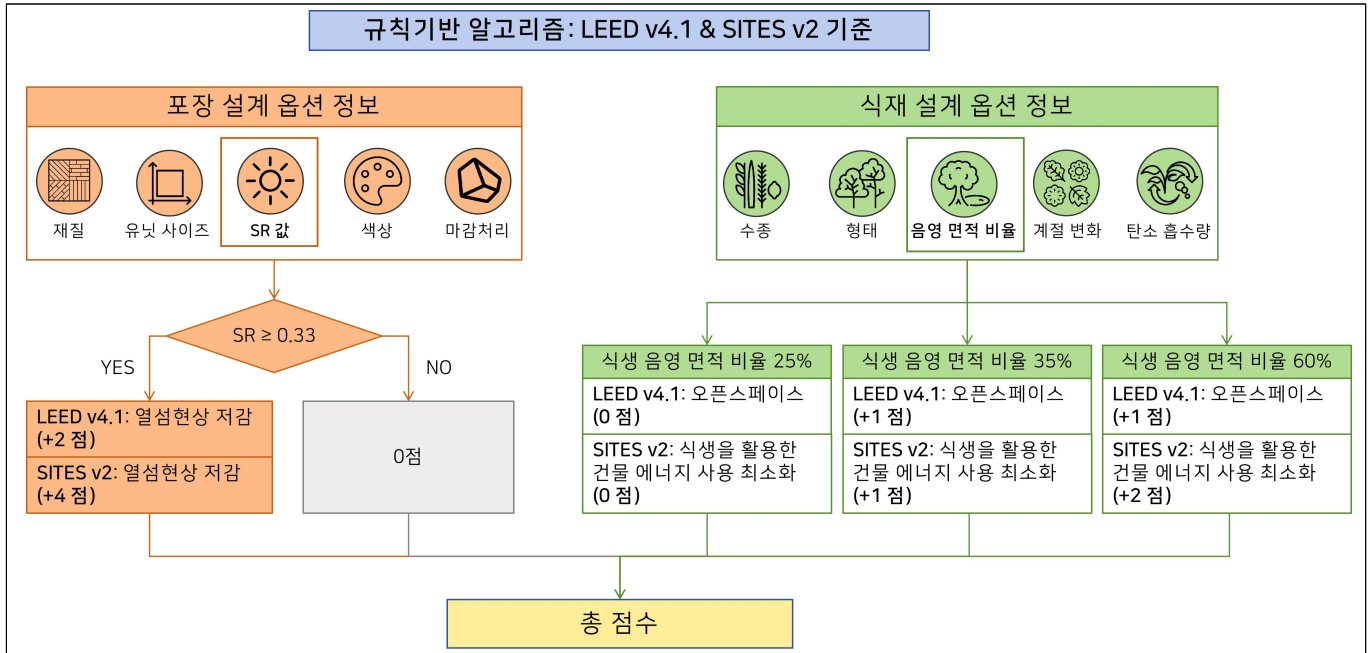


그림 2. 설계 옵션에 따른 친환경성 평가 로직 및 규칙 기반 알고리즘

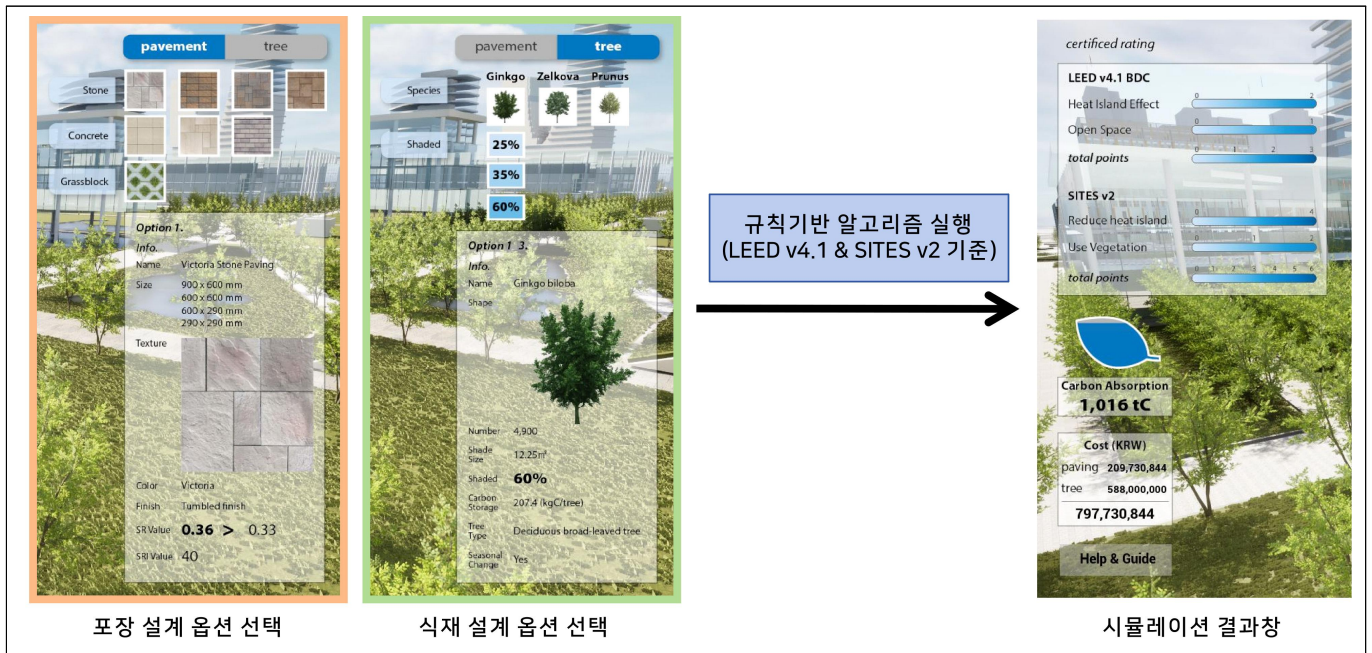


그림 3. 포장 및 식재 시뮬레이션 옵션 선택 UI 패널 및 친환경성 평가 시뮬레이션 결과창

설계 대안 시각화 결과물을 친환경성 평가 결과와 함께 실시간으로 확인하여 여러 설계 대안들을 빠르게 비교할 수 있다(그림 4 참조).

3.4 휴리스틱 평가를 활용한 디지털 트윈 사용성 평가

본 연구에서는 개발된 디지털 트윈 시뮬레이터에 대한 사용성 및 활용성을 평가하기 위하여 국내외 조경설계 분야의 전문가들을 모집하여 휴리스틱 평가를 수행하였다. Nielsen and Molich(1990)에 따르면 휴리스틱 평가는 3~5명의 소수 전문가만으로도 전체 사용성 문제의 75% 이상을 발견할 수 있기에 본 연구에서는 4명의 조경설계 전문가들을 평가자로 선정하였다. 모든 참가자들은 다년간의 공공공원, 단지설계 등 조경설계 분야의 경력을 지니고

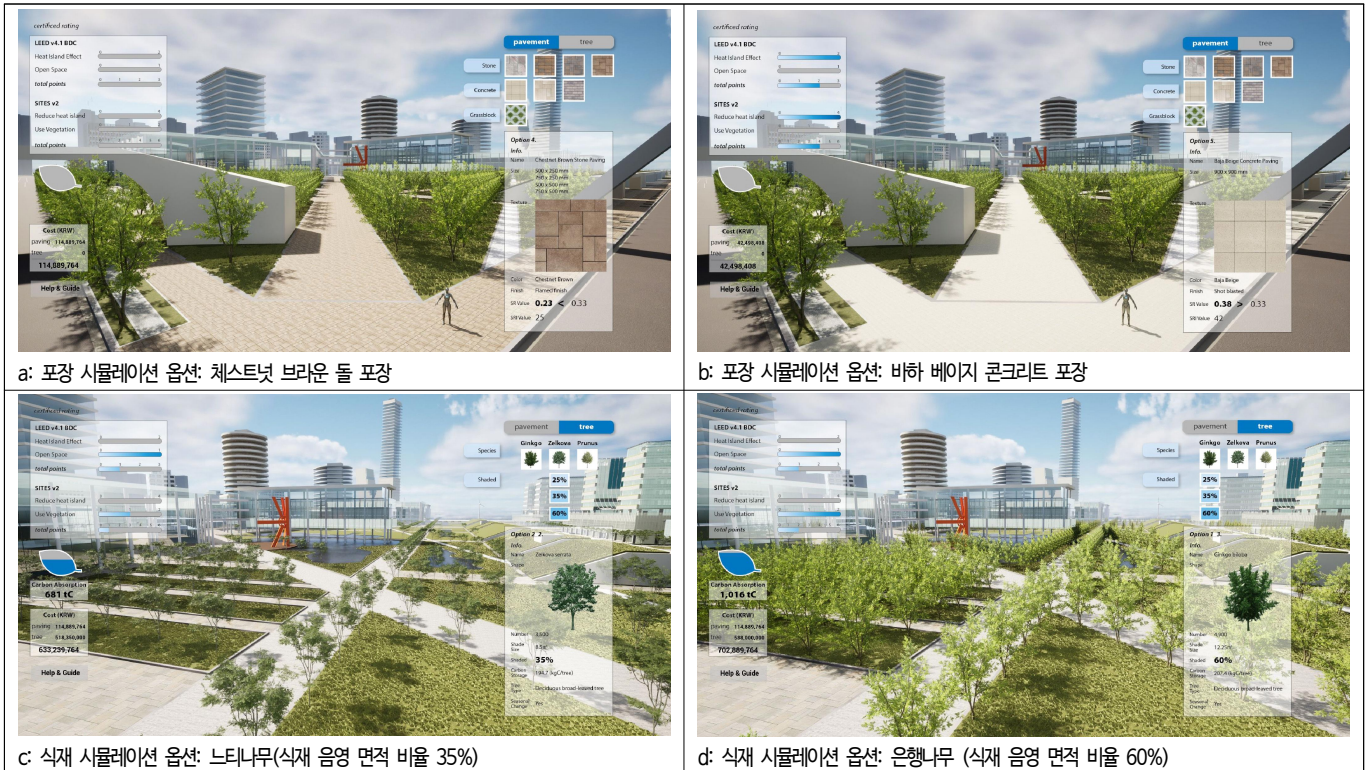


그림 4. 디지털 트윈 시뮬레이터 포장 및 식재 설계 옵션 변경에 따른 설계 대안 비교

있으며(평균 14.5년 경력) 해외 조경설계 프로젝트에서 LEED 및 SITES 평가인증 관련 실무를 수행한 경험이 있다. 평가 절차는 다음과 같이 진행되었다.

평가 방식은 평가자들의 해외 거주를 고려하여 1:1 비대면 형식으로 진행되었다. 평가자들은 우선 약 20분간 별도의 과업 지시 없이 연구자가 제공한 디지털 트윈 시뮬레이터를 직접 실행하여 자유롭게 탐색하며 기능 및 사용 방법을 익혔다. 이후 “포장 및 식재 설계 옵션 변경을 통한 LEED 평가점수 3점 및 SITES 평가점수 6점 획득”이라는 시나리오 기반 테스트를 수행하며 시뮬레이터를 조작하였다. 이후 9점 리커트 척도(1점: 전혀 그렇지 않다, 9점: 매우 그렇다)를 사용하여 총 10가지 휴리스틱 평가 척도에 관한 설문에 대하여 응답하였고, 마지막으로 설문 후 인터뷰를 진행하였다.

본 연구에서는 Jakob Nielsen의 휴리스틱 평가 척도를 기반으로 본 연구 디지털 트윈 시뮬레이터의 특성 및 활용 가능성 평가목적을 고려하여 10개의 휴리스틱 평가 척도를 구성하였으며 각각 평가 척도에 해당되는 체크리스트 설문지를 작성하였다. 본 연구에서 구성한 휴리스틱 평가 척도는 시스템 상태의 시각화(visibility of system status), 시스템과 현실 세계의 일치(match between system and the real world), 사용자 제어 및 자유(user control and freedom), 일관성과 표준(consistency and standards), 오류 방지(error prevention), 기억보다 인식(recognition rather than recall), 융통성과 효율성(flexibility and efficiency of use), 미니멀한 심미적 디자인(aesthetic and minimalist design), 도움말과 설명서(help and documentation), 실무 활용성 및 잠재성(usability and potential) 등 10가지(표 2 참조)로 구성하였다. 이하나(2020)의 연구에서는 각각의 휴리스틱 평가 척도에 대하여 3개의 설문 문항을 구성하여 평가를 수행함으로써 각 평가 척도에 대한 보다 편향적이지 않은 평가 결과를 취득할 수 있었기에 본 연구에서도 각각 평가 척도에 대하여 3개의 설문 문항으로 구성하였다(표 2 참조). 참가자들이 총 10개의 각각 휴리스틱 평가 척도에 대한 평가 결과 점수는 각 평가 척도에 해당되는 3개의 설문평가 결과값의 평균값으로 산정하였다. 이외에 참가자들과의 개별 인터뷰를 통하여 해당 디지털 트윈 시뮬레이터에 대한 활용 가능성 및 개선점을 추가적으로 논의하였다.

4. 연구의 결과 및 분석

휴리스틱 평가 결과, 본 디지털 트윈 시뮬레이터의 기본적인 사용성에 대해서는 전반적으로 긍정적인 평가를 받

표 2. 휴리스틱 평가 척도 및 세부 평가 설문 문항

연번	휴리스틱 평가척도	설명	세부 평가 설문 문항 내용
1	시스템 상태의 시각화 (visibility of system status)	시스템 상태의 시각화 및 정보 전달 피드백의 적절성 평가	1.1: 친환경성 평가 결과 및 설계 대안 시각화의 명확성 1.2: UI 아이콘 표시의 명확성 1.3: 사용자 조작에 대한 즉각적 피드백
2	시스템과 현실 세계의 일치 (match between system and the real world)	사용자에게 익숙한 용어/개념 사용 여부 및 현실 세계와 일치하는 정보 제공 여부 평가	2.1: 현실 세계 정보 제공의 정확성 2.2: 사용자에게 익숙한 용어, 개념 사용 2.3: 디지털 트윈 객체와 현실 객체의 인자적 일치
3	사용자 제어 및 자유 (user control and freedom)	사용자가 디지털 트윈을 자유롭게 제어 및 조작할 수 있는지 평가	3.1: 설계 옵션 선택의 자유도 3.2: '되돌리기' 및 '재선택' 기능 지원 여부 3.3: 시뮬레이션 실행/취소의 자유도
4	일관성과 표준 (consistency and standards)	사용자 혼란을 방지하는 디지털 트윈 시스템의 일관성 및 표준 준수 여부 평가	4.1: 상호작용 버튼, 정보창 등의 디자인 일관성 4.2: 설계 옵션 선택에 따른 피드백의 일관성 4.3: 유사 시뮬레이션 기능 작동 버튼의 구분 용이성
5	오류 방지 (error prevention)	오류 발생을 방지하도록 디지털 트윈 시스템이 주의 깊게 설계되었는지 평가	5.1: 메뉴의 논리적 구성 및 상호 구분 5.2: 메뉴 및 기능에 대한 적절한 설명 5.3: 시뮬레이션 옵션 선택의 정확성 지원
6	기억보다 인식 (recognition rather than recall)	사용자 기억력 부하를 최소화하는 직관적 시각화 및 구성 평가	6.1: 현재 선택된 시뮬레이션 옵션 정보 파악 용이성 6.2: 메뉴의 직관적이고 편의성 높은 배열 6.3: 시뮬레이션 기능/옵션 선택에 소요되는 시간
7	융통성과 효율성 (flexibility and efficiency of use)	초보자부터 숙련자까지 쉽고 효율적으로 사용 가능한지 평가	7.1: 초보자부터 숙련자까지의 사용 적합성 7.2: 사용자가 원하는 설계 시뮬레이션 실행의 효율성 7.3: 초보자용 가이드 제공 여부
8	미니멀한 심미적 디자인 (aesthetic and minimalist design)	불필요한 정보 없이 간결하고 심미적인 디자인 구성 평가	8.1: 텍스트/이미지들의 미니멀, 심미적 디자인 8.2: 필요한 정보만 간결하게 나열 8.3: 버튼/기능의 명확한 시각적 및 의미적 구분
9	도움말과 설명서 (help and documentation)	도움말 및 사용 설명이 잘 구성되어 있는지 평가	9.1: 사용법을 설명하는 도움말의 존재 여부 9.2: 사용법 및 도움말에 대한 접근 용이성 9.3: 사용법 및 도움말에 대한 이해 용이성
10	실무 활용성 및 잠재성 (usability and potential)	설계 과정에서의 실무 활용 가능성 및 잠재성 평가	10.1: 실시간 평가/시뮬레이션/의사결정에 대한 도움 정도 10.2: 기존 방식 대비 시간/비용 절감 기대 10.3: 실무 도입 의향

았다(표 3, 부록 1 참조). 본 연구에서는 도출된 평가 결과를 각 휴리스틱 척도별 평균값에 따라 상위(7.3 이상), 중위(6.5~7.3), 하위(6.5 미만)의 세 그룹으로 구분하여 분석하였다. 상위 그룹에는 “사용자 제어 및 자유(7.75)”, “시스템 상태의 시각화(7.50)”, “기억보다 인식(7.33)”, “도움말과 설명서(7.33)”가 포함되었다. 이는 본 디지털 트윈 시뮬레이터가 사용자에게 현재의 설계 옵션 변경 사항과 그에 따른 친환경성 평가 결과를 직관적으로 전달하며, 사용자가 원하는 설계 옵션을 자유롭게 탐색하고 즉각적인 피드백을 받는 핵심 기능에 강점이 있음을 시사한다. 전문가들은 언리얼 엔진을 기반으로 한 고품질의 실시간 렌더링과 상호작용 UI가 사용자의 조작에 따른 친환경성 평가 결과를 즉각적으로 보여주는 점을 높이 평가했다. 또한 사용자가 복잡한 메뉴얼을 기억할 필요 없이, 화면에 보이는 설계 옵션을 직관적으로 인식하여 조작할 수 있다는 점도 역시 강점으로 나타났다. 본 디지털 트윈 시뮬레이터의 핵심 개발 목표인 실시간 설계 옵션 시뮬레이션 및 친환경성 평가 결과 확인 기능이 성공적으로 구현되었음을 시사한다. 중위 그룹에는 “융통성과 효율성(7.00)”, “일관성과 표준(6.92)”, “오류 방지(6.67)”, “심미적 디자인(6.58)” 등이 포함되었다. 이는 본 디지털 트윈 시뮬레이터의 기본적인 시스템 구동 안정성은 확보되었으나 전문가용 도구로서의 정교한 기능 배치 및 사용자 경험 설계의 완성도를 높일 필요가 있음을 시사한다. 상위 그룹에 속한 “시스템 상태의 시각화”와 달리, 메뉴나 버튼 구성의 디자인을 평가하는 “미니멀한 심미적 디자인”은 6.58점으로 상대적으로 낮은 평가를 받았다. 이는 언리얼 엔진이 제공하는 사실적인 3D 렌더링 품질은 우수하나, 그 위에 겹쳐지는 정보 패널이나 조작 버튼의 디자인이 다소 복잡하거나 시각적 물입을 방해할 여지가 있음을 의미한다. “오류 방지” 점수가

표 3. 휴리스틱 평가 척도별 결과 요약

연번	휴리스틱 평가척도	평균값(Mean)	표준편차(SD)
1	시스템 상태의 시각화(visibility of system status)	7.50	0.50
2	시스템과 현실 세계의 일치(match between system and the real world)	6.42	0.83
3	사용자 제어 및 자유(user control and freedom)	7.75	0.43
4	일관성과 표준(consistency and standards)	6.92	0.92
5	오류 방지(error prevention)	6.67	0.82
6	기억보다 인식(recognition rather than recall)	7.33	0.58
7	융통성과 효율성(flexibility and efficiency of use)	7.00	0.91
8	미니멀한 심미적 디자인(aesthetic and minimalist design)	6.58	0.76
9	도움말과 설명서(help and documentation)	7.33	0.58
10	실무 활용성 및 잠재성(usability and potential)	6.00	2.32

중위권에 머무른 것은, 사용자가 논리적으로 불가능한 설계 옵션을 선택했을 때 시스템이 이를 사전에 차단하거나 경고하는 방어적 설계 기능이 아직 충분히 구현되지 않았기 때문으로 분석된다. 이는 향후 상용 소프트웨어 수준으로 발전하기 위해 다양한 시나리오에 대한 예외 처리 로직 보강이 필요함을 시사한다.

하위 그룹에는 “시스템과 현실 세계의 일치(6.42)”와 “실무 활용성 및 잠재성(6.00)”이 해당되었다. 이는 본 디지털 트윈 시뮬레이터가 연구용 프로토타입을 넘어 실무 도구로 정착하기 위해 해결해야 할 핵심 과제를 시사한다. 첫째, “시스템과 현실 세계의 일치” 항목의 낮은 점수는 현재 디지털 트윈 시뮬레이터에서 제공하는 데이터의 단순성과 실무 현장의 복잡성 간의 괴리에서 기인한다. 사후 인터뷰에서 전문가들은 현재 제공되는 포장 및 식재 옵션이 비교적 단순화되어 있고 제공되는 정보 데이터의 깊이가 부족하다고 지적하였다. 실무에서는 포장재의 SR값, 식재의 음영 면적 비율 등 물리적 수치뿐만 아니라 자재의 단가, 내구연한, 식재 생육 특성, 계절별 변화, 관수 요구량, 유지관리 편의성, 시공 난이도 등 다양한 변수가 복합적으로 고려되어야 한다. 하지만 현재의 시뮬레이터에서는 이런 실제 설계과정에서 필요한 다양한 정보들을 충분히 반영되지 않아, 현실과 괴리된 시뮬레이션에 그칠 수 있다는 우려가 제기되었다. 즉, 현재의 시뮬레이터가 조정설계 과정의 통합적 의사결정에 필요한 데이터의 현실감이 비교적 부족하여 실무 적용에는 한계가 있음을 보여준다.

둘째, “실무 활용성 및 잠재성” 항목은 전체 평가 중 가장 낮은 평균 점수(6.00)를 기록함과 동시에, 가장 높은 표준편차(2.32)를 보였다(표 3, 그림 5 참조). 이는 평가자들 사이에서 디지털 트윈 시뮬레이터의 효율성에 대한 합의가 이루어지지 않았음을 의미한다. 사후 인터뷰를 통하여 설계 프로세스 단계에 따라 해당 시뮬레이터의 활용성의 차이가 원인으로 분석된다(표 4 참조). 설계 초기 단계의 거시적 분석을 중시하는 전문가들은 지속 가능한 외부 공간 설계를 위해 설계 초기 단계에서 미기후, 일조, 바람길, 우수 흐름 등 정량적인 분석이 필요하다고 보았다. 하지만 본 디지털 트윈 시뮬레이터에서는 이러한 정밀한 환경 분석 기능보다는 실시간 시뮬레이션 시각화와 상호작용에 치중되어 있어, 설계 초기 단계에서의 활용성은 낮다고 평가했다. 반면 설계 후반 단계의 의사결정 과정을 중시하는 전문가들은 본 디지털 트윈 시뮬레이터의 강점인 고품질 실시간 시각화와 직관적인 상호작용 시뮬레이션 기능이 설계 후반 단계에서 강력한 잠재력을 지닌다고 평가하였다. 구체적으로는 실시설계 단계에서의 포장, 식재 등 설계 재료의 비교, 가치공학(value engineering, VE) 과정에서 설계 대안의 친환경 성능 및 비용 등 비교 평가를 통한 최적안 도출, 그리고 발주처나 일반 시민 등 비전문가에게 설계안의 친환경적 가치를 직관적으로 설명하고 설득하는 의사소통 도구로서 매우 유용할 것이라 응답했다. 즉, 본 디지털 트윈 시뮬레이터는 설계 프로세스 초기 단계의 정밀한 분석 도구로서는 한계가 존재하나, 설계 프로세스 후반 단계의 소통 및 의사결정 지원 도구로서의 활용성과 잠재력은 크게 평가되었다.

5. 결론

본 연구에서는 게임엔진을 기반으로 외부공간의 친환경성 평가 항목과 연계된 조정설계 옵션을 실시간으로 제어하고 그 결과를 시각화할 수 있는 디지털 트윈 시뮬레이터를 개발하였다. 디지털 트윈 시뮬레이터의 사용성 및 실무 활용성을 평가하기 위해 조정설계 전문가들을 대상으로 휴리스틱 평가를 수행하였다. 평가 결과, 본 디지털 트

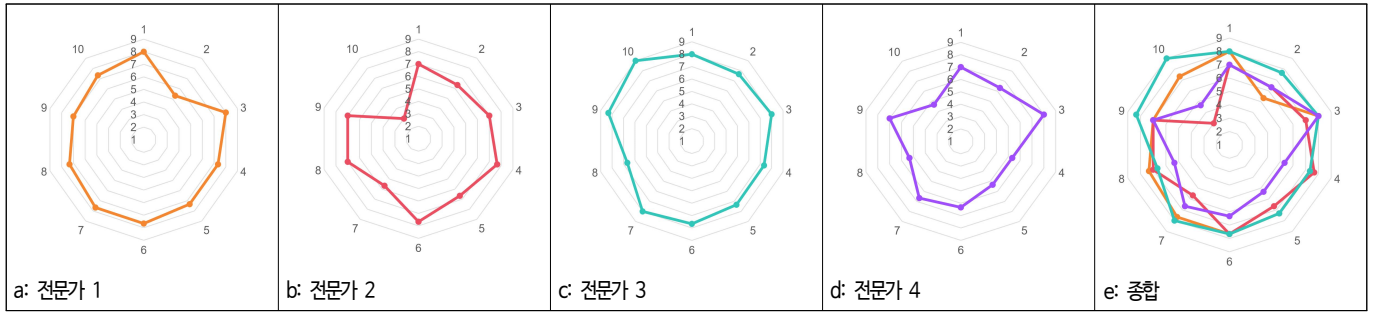


그림 5. 휴리스틱 평가 결과 스파이더(spider) 차트

표 4. 사후 인터뷰 내용 중 공통 의견 및 상이 의견

구분		주요 의견 및 코멘트
공통 의견	긍정 의견	언리얼 엔진 기반의 실시간 시각화 품질이 우수하여 비전문가의 의사소통하기 쉬움 UI가 직관적이라서 쉽게 설계 옵션들을 변경하면서 조작하는 것이 쉬움 친환경성 시뮬레이션 결과를 실시간으로 확인할 수 있어 대안 비교 효율성이 높음
	개선 의견	현재 제공되는 시뮬레이션 설계 옵션이 비교적 단순함 자재비, 시공비, 유지관리, 식생 생육 특성, 시공 난이도 등 실무에 필요한 다양한 정보가 부족함 LEED 및 SITES 평가 항목 중 기타 평가 항목에 대한 시뮬레이션도 추가로 필요함 UI 및 UX에 대한 정교한 설계 및 디테일이 필요함
상이 의견	그룹A (설계 초반 단계 중시)	설계 초반 단계의 거시적 분석, 미기후, 바람길 등 물리적 정밀 분석 기능이 부재 정밀한 정량적 분석 기능이 부재하여 실무에서의 활용성이 떨어짐
	그룹B (설계 후반 단계 중시)	실시설계, VE(가치공학) 단계에서의 설계 대안 비교에서 활용성이 높음 설계 후반의 발주처 보고, 주민 설명회 등 다양한 주체와의 의사소통 도구로서 활용성이 높음

인 시뮬레이터는 직관적인 시각화와 상호작용성에서 강점을 보였으나, 제공되는 정보 데이터의 깊이와 실무 활용성에 있어서 한계가 있음을 확인하였다. 평가에서 나타난 실무 활용성의 큰 편차는 본 디지털 트윈 시뮬레이터가 설계 프로세스 전반을 포괄하기보다는, 설계안이 구체화되는 후반 단계의 의사결정 지원과 비전문가와와의 소통 도구로서 최적화되어 있음을 시사한다. 이러한 결과는 디지털 트윈이 기술적 구현을 넘어 조경설계에서의 실무적 가치를 확보하기 위하여 해결해야 할 명확한 과제들을 제시하며 구체적인 디지털 트윈 개발 방향성 설정의 중요성을 시사한다.

본 연구는 다음과 같은 명확한 한계를 지닌다. 본 연구에서는 친환경성 평가 항목을 LEED와 SITES의 일부 평가 항목들로만 한정하였으며, 이에 연동된 설계 옵션도 포장 및 식재로 제한되어 실제 프로젝트의 복잡한 변수를 모두 반영하지는 못했다. 또한 본 디지털 트윈 시뮬레이터는 사전에 입력된 정적 데이터를 기반으로 작동하여 실시간으로 변동하는 자재비, 시공비, 유지관리 데이터 등 동적 정보를 연동하는 고도화된 디지털 트윈으로 나아가지 못했다.

본 연구의 한계를 극복하고 조경 분야 디지털 트윈 기술의 실용화를 향상하기 위하여 지속적인 후속 연구 및 제도 개선이 필요하다. 그중 중요한 과제 중 하나는 “시스템과 현실 세계의 일치” 문제를 해결하는 것이다. 단순히 설계 옵션의 수를 늘리는 것을 넘어, 실무자의 의사결정에 필수적인 조경 특화 속성 정보를 포함하는 표준 데이터베이스 구축이 필요하다. 이 데이터베이스에는 자재비, 노무비 할증, 식재 규격별 단가 등 실시간 견적 산출이 가능한 수준의 “경제성 데이터”, 관수 주기, 전정 요구도, 병충해 저항성 등 운영 관리 단계에서 활용할 수 있는 “유지관리 데이터”, 시간에 따른 수목 탄소 흡수량 변화, 생장 속도 등 정밀한 친환경 성능 예측이 가능한 “시계열 생태 데이터” 등이 포함되어야 한다. 이는 개별 연구 차원을 넘어 학회 및 공공기관 주도의 표준화 작업과 연계될 때 시너지를 더 확장할 수 있다. 본 연구에서는 LEED와 SITES의 정적 점수를 반영하는 수준이나, 향후에는 미기후 분석, CFD를 통한 바람길 예측, 강우 유출 시뮬레이션, 식재 생장 모델 등 동적인 물리적 환경 요소를 시뮬레이션하는 디지털 트윈 시스템과 연동되는 확장된 프레임워크가 필요하다. 이를 통해 평가를 넘어 예측과 최적화가 가능한 고도화된 디지털 트윈으로 발전시킬 필요가 있다. 또한 전문가들이 지적인 활용 단계의 불일치 문제를 해결하기 위해 개발 방향을 명확히 할 필요가 있다. 한가지 방향은 데이터 중심의 미기후, 에너지, 물순환 등 정량적 분석에 초점을 맞춘 전문가용 모듈 개발 방향이 존재하고, 또 다른 방향으로 본 연구에서 개발한 디지털 트윈 시뮬레이터의 강점인 실시간 시뮬레이션, 고품질 시각화와 상호작용을 극대화하여, VE, 발주처 보고, 시민 참여 등 비전문가

와의 의사결정에 특화된 모듈 개발 방향이 존재한다.

본 연구는 조경설계 분야에서 디지털 트윈 개발과 사용성 평가를 연계한 통합적 연구 방법론을 채택하여 휴리스틱 평가를 통한 사용성의 실증적 검증으로 디지털 트윈 기술 개발과 사용자 간의 간극을 구체적으로 식별하여 제시했다는 점에서 학술적 가치가 있다. 이는 향후 조경 분야의 디지털 전환 연구에서 기술 개발과 사용자 중심 평가가 병행되어야 함을 시사한다. 또한 본 연구에서는 전통적인 CAD나 시뮬레이션 소프트웨어가 아닌, 고품질 실시간 렌더링과 상호작용이 강점인 게임엔진을 조경설계의 친환경성 평가 플랫폼으로 활용했다는 점에서 기술적 확장성을 확인하였다. 이는 복잡한 환경 데이터를 사용자에게 직관적으로 시각화하고 소통하는 의사결정 지원 도구로서 게임 엔진의 새로운 가능성을 제시한다.

References

1. 김복영(2019) 도시재해 저감 설계를 위한 조정정보모델의 활용. 서울대학교 대학원 박사학위논문.
2. 김성근(2020) 고품질을 배려한 기능성 게임 휴리스틱 가이드라인 연구. 한국디자인리서치학회 5(3): 81-93.
3. 김승현(2013) 지속 가능한 도시조경설계에 관한 연구: ASLA Sustainable Landscape Case Studies를 중심으로. 한국도시설계학회지 도시설계 14(1): 97-108.
4. 오규식, 홍재주(2005) 도시공간 구성요소와 도시열섬현상의 관련성 연구. 한국도시설계학회지 도시설계 6(1): 47-63.
5. 유광흡, 홍성덕, 진현영, 신민중(2012) 친환경 근린개발 평가인증체계 개발을 위한 평가항목 도출. 도시설계 13(6): 41-54.
6. 윤재석, 김진민(2022) 디지털 트윈 연구 및 표준화 동향 분석. 표준인증안전학회지 12(1): 31-47.
7. 이하나(2020) 의료기기의 사용성 제고를 위한 휴리스틱 평가 연구 -개인용 물리치료기기의 인터페이스를 중심으로-. 한국디자인문화학회지 26(2): 447-455.
8. 이형숙(2016) 미국 외부공간 친환경 인증(SITES) 사례분석을 통한 친환경 조성기법 및 평가체계 연구. 한국조경학회지 44(3): 56-64.
9. 전승훈, 채수권(2020) 국내외 외부공간의 지속 가능성 인증지표 및 기준의 비교검토 -물과 토양 및 식생 평가 항목을 중심으로-. 환경영향평가 29(6): 430-440.
10. 전승훈, 채수권(2021) 기후위기 대응 외부공간의 지속 가능성 평가지표의 검토 및 고찰. 환경영향평가 30(6): 393-412.
11. 황성범, 정석재, 윤성욱(2020) Digital Twin 개념을 적용한 제조환경 시뮬레이션 모형 설계. 한국시뮬레이션학회논문지 29(2).
12. Aheleroff, S., X. Xu, R. Y. Zhong and Y. Lu(2021) Digital twin as a service(DTaaS) in industry 4.0: an architecture reference model. *Advanced Engineering Informatics* 47: 101225.
13. American Society of Landscape Architects(2015) SITES v2 Rating System For Sustainable Land Design and Development. Green Business Certification Inc.
14. Atwa, S. M. H., M. G. Ibrahim, A. M. Saleh and R. Murata(2019) Development of sustainable landscape design guidelines for a green business park using virtual reality. *Sustainable Cities and Society* 48: 101543.
15. Bucchignani, E., A. L. Zollo and M. Montesarchio(2021) Analysis of expected climate extreme variability with regional climate simulations over Napoli Capodichino Airport: A contribution to a climate risk assessment framework. *Earth* 2(4): 980-996.
16. Gomaa, M., T. A. R. E. K. Farghaly and Z. E. L. Sayad(2021) Optimizing a life cycle assessment-based design decision support system towards eco-conscious architecture. *WIT Transactions on Engineering Sciences* 130: 39-50.
17. Kober, C., F. G. Medina, M. Benfer, J. P. Wulfsberg, V. Martinez and G. Lanza(2024) Digital twin stakeholder communication: Characteristics, challenges, and best practices. *Computers in Industry* 161: 104135.
18. Nielsen, J. and R. Molich(1990) Heuristic evaluation of user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*.
19. Nielsen, J.(1994) Enhancing the explanatory power of usability heuristics. In *Proceedings of the SIGCHI*

Conference on Human Factors in Computing Systems.

20. Quinones, D. and C. Rusu(2017) How to develop usability heuristics: A systematic literature review. Computer Standards & Interfaces 53: 89-122.

21. Rafsanjani, H. N. and A. H. Nabizadeh(2023) Towards digital architecture, engineering, and construction(AEC) industry through virtual design and construction(VDC) and digital twin. Energy and Built Environment 4(2): 169-178.

22. Ruohomäki, T., E. Airaksinen, P. Huuska, O. Kesäniemi, M. Martikka and J. Suomisto(2018) Smart city platform enabling digital twin. 2018 International Conference on Intelligent Systems(IS).

23. Stone, D., C. Jarrett, M. Woodroffe and S. Minocha(2005) User Interface Design and Evaluation. Morgan Kaufmann.

24. United Nations. Sustainable Development Goals. <https://sdgs.un.org/goals>

25. U.S. Green Building Council. LEED rating system. <https://www.usgbc.org/leed>

Appendix

부록 1. 전문가별 휴리스틱 평가 세부 결과

휴리스틱 평가척도	1			2			3			4			5			6			7			8			9			10			
설문 문항	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3	7.1	7.2	7.3	8.1	8.2	8.3	9.1	9.2	9.3	10.1	10.2	10.3	
전문가1	8	8	8	5	5	6	8	8	8	7	7	8	6	8	8	7	8	8	8	8	7	8	7	7	8	6	7	7	7	8	
전문가2	7	7	7	5	7	7	7	7	7	8	7	8	7	7	6	7	8	8	5	5	7	7	7	7	5	8	8	4	2	3	
전문가3	8	8	8	7	8	8	8	8	8	8	7	7	8	8	6	7	8	8	8	8	8	6	8	6	9	8	8	9	9	9	
전문가4	5	7	9	5	6	8	8	8	8	6	5	5	5	6	5	6	6	7	8	6	6	5	6	5	7	7	7	5	4	5	
척도별 평균값	전문가1	8.00			5.33			8.00			7.33			7.33			7.67			7.67			7.33			7.00			7.33		
	전문가2	7.00			6.33			7.00			7.67			6.67			7.67			5.67			7.00			7.00			3.00		
	전문가3	8.00			7.67			8.00			7.33			7.33			7.67			8.00			6.67			8.33			9.00		
	전문가4	7.00			6.33			8.00			5.33			5.33			6.33			6.67			5.33			7.00			4.67		
평균값	7.50			6.42			7.75			6.92			6.67			7.33			7.00			6.58			7.33			6.00			
표준편차	0.50			0.83			0.43			0.92			0.82			0.58			0.91			0.76			0.58			2.32			