https://doi.or.kr/10.23283/JKCT.2025.2.1.04
Journal of the Korea Convergence Technology, Vol 2, No, 1, pp.20-26, June. 6, 2025, ISSN 3058-3152

실시간 위험 감지를 위한 디지털 트윈 기반 공연장 안전 시뮬레이션 프레임워크 연구

김두범*

A Simulation Framework for Real-Time Risk Detection in Mobile Stages Using Digital Twin Technology

Dubeom Kim*

요 약

본 연구는 공연예술 산업에서의 이동형 공연장의 안전관리를 고도화하기 위한 기술적 접근으로, 디지털 트윈 기반 시뮬레이션과 실시간 멀티모달 위험 감지 체계를 통합한 통합 안전관리 플랫폼의 설계 방안을 제안하였다. 기존의 수동 중심 안전관리 체계의 한계를 극복하고자, 공연장의 구조물 안정성, 군중 밀집도, 기상 환경 등 복합 요소를 가상 시뮬레이션 환경에서 통합적으로 분석하며, 실제 공연 환경에서 수집되는 영상, 소리, 센서 데이터를 바탕으로 실시간 이상 징후를 탐지할 수 있는 체계를 구성하였다. 본 논문은 특히 에이전트 기반 군중 시뮬레이션, 강화학습 기반 행동 예측, 구조물 하중 분석, 기상 데이터 연동 등 최신 기술을 공연장 안전관리 영역에 통합하는 프레임워크를 제시하고 있으며, 향후 실증 연구 및 법제도 연계, 플랫폼 표준화로의 확장을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

☞ **주제어** : 디지털 트윈, 공연장 안전관리, 군중 시뮬레이션, 멀티모달 AI, 이동형 공연장, 실시간 위험 감지

Abstract

This study proposes a design framework for an integrated safety management platform that combines digital twin-based simulation and real-time multimodal risk detection technologies, with a focus on enhancing safety in mobile performance venues. Unlike traditional manual safety systems, the proposed platform enables predictive and responsive safety management by simulating structural stability, crowd dynamics, and weather conditions in a virtual environment, and by analyzing real-time data from cameras, audio sensors, and IoT devices. The research integrates cutting-edge technologies such as agent-based crowd simulation, reinforcement learning for behavioral prediction, structural load analysis, and meteorological data coupling into a unified system applicable to performance safety scenarios. This paper serves as a conceptual foundation for future empirical studies, standardization efforts, and regulatory integration in the field of cultural event safety.

☞ **Keywords** : Digital Twin, Performance Safety, Crowd Simulation, Multimodal AI, Mobile Stage, Real-Time Risk Detection

☆ This article is a revised manuscript based on a part of a public-commissioned research report submitted to the Seoul Foundation for Arts and Culture in 2022.

* 1저자: 서경대학교 미래융합대학 아트앤테크놀로지학과
* 교신저자: 서경대학교 미래융합대학 아트앤테크놀로지학과
· Corresponding Author: Dubeom Kim, whitelion@skuniv.ac.kr

Received April 30, 2025
Revised May 22, 2025
Accepted May 24, 2025
Published June 30, 2025

1. 서 론

21세기 들어 전 세계적으로 대규모 문화예술 행사가 활발히 이루어지면서, 공연장 안전에 대한 사회적 관심이 높아지고 있다. 특히 야외에서 임시로 설치되는 '이동형 공연장'의 수요는 팬데믹 이후 더욱 증가하고 있으며, 축제, 콘서트, 지역 문화행사 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 이러한 이동형 공연장은 그 유동성과 비정형성으로 인해 정형화된 공연장보다 구조적 안전, 기상 변수, 군중 밀집 등 복합적인 위험에 노출되기 쉽다. 실제로 국내외에서 공연 중 발생한 군중 압사, 무대 붕괴, 조명 장비 낙하 등의 사고는 공연 산업의 발전에도 불구하고 여전히 안전에 대한 기술적, 제도적 준비가 부족함을 보여준다.

이에 따라 공연장 안전관리는 단순히 물리적 구조물의 점검을 넘어, 시공간적 변화에 유연하게 대응할 수 있는 지능형 시스템으로의 전환이 요구되고 있다. 기존의 안전관리 방식은 주로 작업자 중심의 점검 매뉴얼이나 CCTV 기반 관제에 의존하고 있으며, 실시간 대응이나 다중 변수 분석이 어려운 구조적 한계를 지닌다. 특히 이동형 공연장은 매회 설치되는 장소, 규모, 환경이 달라 고정형 안전 지침을 적용하기 어려운 측면이 있어, 상황 적응형이고 예측 가능한 안전관리 체계가 필수적이다.

이러한 배경 속에서 디지털 트윈(Digital Twin) 기술은 공연장 안전관리의 새로운 해결책으로 주목받고 있다. 디지털 트윈은 물리적 객체나 공간을 디지털 환경에서 실시간으로 복제하고, 그 상태를 시뮬레이션하여 예측 가능한 의사결정을 가능하게 하는 기술로, 스마트시티, 제조업, 건설, 물류 등 다양한 분야에서 이미 활용되고 있다. 예컨대 GE(General Electric)는 설비 유지보수를 위한 디지털 트윈을 개발해 산업 현장의 예지정비와 비용 절감을 실현하였고, 영국 런던은 'VU.CITY'를 통해 도시의 교통 흐름과 건축물 간섭을 시뮬레이션하고 있다.

공연 산업에서도 이러한 기술을 적용하여 구조물 안정성, 군중 밀집도, 기상 환경을 가상 공간에서 시뮬레이션하고, 운영 중 수집된 센서 데이터를 통합 분석해 실시간으로 위험 요소를 탐지할 수 있다면, 지금까지 인력에 의존하던 수동적 안전관리의 패러다임을 벗어나, 선제적 대응과 시나리오 기반 안전 정책 수립이 가능해질 것이다.

기존 연구에서는 군중 밀집 분석(Crowd Dynamics), 구조물 응력 해석(Structural Analysis), 기상 환경 시뮬레이션(Environmental Simulation) 등 개별 요소 기술에 대한 연구는 활발히 진행되어 왔다. Helbing et al.(2000)은 군중 행동 시뮬레이션 모델을 제시하며, 출구 병목현상과 압사 사고 예측 가능성을 탐색하였고, Yu & Johansson(2007)은 군중 간 상호작용 모델 기반의 압력 축적 시뮬레이션을 발전시켰다. 또한 FEM 기반의 공연장 구조물 분석은 축제 무대 설치 시 하중 계산 및 바람 강도에 따른 응력 예측 등에 활용되고 있다. 그러나 이들 연구는 개별 요소의 정밀 분석에는 기여했지만, 이동형 공연장처럼 복합 위험 요인이 동시다발적으로 작용하는 상황에서의 통합적 접근에는 미흡하다.

최근 몇몇 연구에서는 이러한 요소들을 통합적으로 다루기 위한 시도가 이루어지고 있다. 예컨대, 고정형 공연장을 대상으로 한 실내 디지털 트윈 구축(박철민 외, 2021), 군중 분석을 활용한 실시간 비상 대응 시스템(Chen et al., 2019), 스마트 시티 내 이벤트 안전관리 모델(Lee et al., 2022) 등이 있다. 그러나 이동형 공연장처럼 매번 다른 공간, 규모, 환경 변수에 따라 조정이 필요한 상황에 대한 적용 사례나 연구는 아직 제한적이다.

이러한 맥락에서 본 연구는 이동형 공연장의 특성과 위험 요소를 구조화하고, 이를 반영한 디지털 트윈 기반 시뮬레이션 프레임워크를 설계함으로써, 향후 다양한 형태의 공연장에서 반복적으로 활용 가능한 안전관리 모듈화 모델을 제시하고자 한다. 또한, 실시간 위험 요소 감지를 위해 멀티모달 센서 데이터(영상, 소리, 기상 등)를 융합 분석할 수 있는 시스템 구성 방안을 함께 탐색한다.

본 연구는 실증 결과나 완성된 솔루션을 제시하기보다는, 기술 구성의 개념적 틀과 요소별 설계 가이드를 중심으로 서술하며, 향후 이 분야에서 연구를 이어나갈 연구자들에게 초기 토대와 설계 프레임을 제공하는 데 중점을 둔다.

2. 관련 연구 및 기술 동향

2.1 디지털 트윈 기술의 개념과 확장

디지털 트윈(Digital Twin)은 물리적 시스템의 동적 변화를 실시간으로 가상 환경에 반영하여 분석·시뮬레이션할 수 있도록 설계된 고도화된 사이버-물리 시스템이다

[2]. 이 개념은 NASA가 우주선 모니터링을 위해 도입한 이후, 제조(Industry 4.0), 건설(BIM), 도시계획(Smart City), 국방, 물류 등 다양한 산업 분야로 확장되었다. 특히 산업 현장에서는 설비의 예지정비(Predictive Maintenance), 제품 설계 최적화, 공정 자동화에 활용되며 생산성과 안전성을 동시에 높이는 핵심 기술로 간주된다.

국제표준화기구 ISO는 디지털 트윈의 구조와 데이터 흐름, 운영 체계를 정의한 ISO 23247 시리즈를 통해 디지털 트윈 기술의 국제적 통용성을 제고하고 있다 [3]. 이 기술은 실시간 센싱 기반의 데이터 동기화, 정밀한 3D 시각화, 시뮬레이션 기반 예측, 양방향 피드백 제어 등의 특징을 가지며, 공연장이라는 동적이고 복합적인 환경에서도 안전관리 체계로서의 잠재력을 갖는다.

2.2 군중 시뮬레이션 및 행동 예측 기술

군중 시뮬레이션은 대규모 인원의 집단 행동을 예측하기 위한 연구 분야로, Helbing과 Molnár이 제안한 Social Force Model은 보행자 간의 상호작용, 병목 현상, 압력 축적 등을 수학적으로 설명하며 군중 밀집 사고의 예측 가능성을 보여주었다[1]. 이 모델은 구조물과 군중 간 간섭이 복합적으로 작용하는 공연장 환경의 위험 요소 예측에 이론적 기반을 제공한다.

최근에는 에이전트 기반 시뮬레이션(Agent-Based Modeling)과 강화학습(Deep Reinforcement Learning)을 결합한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 개별 관객의 반응 속도, 회피 반경, 심리적 특성 등을 변수로 설정해 보다 현실적인 군중 이동 예측이 가능해지고 있다. 이는 공연장 설계 시 군중 흐름의 병목 지점을 사전 시뮬레이션하거나, 긴급 대피 경로 설정에 활용될 수 있다.

2.3 구조물 안전 해석과 물리 기반 시뮬레이션

공연장 구조물(무대, 트러스, 조명 리그, 음향 타워 등)은 설치 장소, 지반 상태, 기상조건 등 외부 변수에 민감하게 반응한다. 박철민 외(2021)는 실내 공연장의 무대 구조 안전성을 평가하기 위한 디지털 트윈 기반 모델을 개발하여, 구조물의 하중 상태와 관객 밀집 상태를 시각화하고 시뮬레이션하는 방식을 제시하였다 [5].

도시형 이벤트 환경에서도 디지털 트윈 기반 군중 분석과 구조물 안정성 평가가 접목된 연구가 이뤄졌으며, Lee 외(2022)는 스마트 안전관리 시스템의 개념을 도심 이벤트에 적용해 군중 이동 예측과 시각화 기반 위험관리 방식을 제안하였다 [6]. 이처럼 기존 공연장의 고정형 구조를 넘어서 유동적이고 비정형적인 이동형 공연장에 대한 연구가 필요한 시점이다.

2.4 실시간 위험 감지를 위한 멀티모달 데이터 처리

공연장 환경에서는 단일 센서로 수집되는 데이터만으로는 위험 상황을 완전하게 감지하기 어렵다. 예를 들어, 군중 밀집도를 감지하기 위해 설치한 CCTV만으로는 화재 발생이나 구조물 진동을 인식할 수 없으며, 소음이나 날씨 등의 복합 조건을 고려하지 못한다. 이에 따라 최근에는 멀티모달(Multimodal) 데이터 처리 기반의 이상 상황 감지 기술이 주목받고 있다.

Chen 외(2019)는 영상, 음향, 환경 센서 데이터를 융합한 실시간 군중 밀집도 분석 시스템을 제안하며, 이벤트 공간에서의 위험 감지 정확도 향상을 입증하였다[4]. 공연장과 같은 고밀도 환경에서는 CCTV 영상만으로는 군중 압력이나 구조물 이상 진동을 감지하기 어려우며, 이에 따라 다중 센서 기반 멀티모달 분석 기술이 필수적이다.

이러한 시스템은 비명, 충돌음, 기울기 센서, 풍속, 온도 등의 데이터를 실시간 분석하여 복합 위험 점수를 산출하고, 임계치를 초과할 경우 경고를 발생시킬 수 있다. 향후 공연장 전용 경보 알고리즘 및 시나리오 추천 시스템의 정교화가 요구된다.

2.5 공연장 안전관리 연구의 기술적 과제와 방향

이처럼 개별 기술들은 높은 수준의 정밀도와 기능성을 보여주고 있지만, 이들을 공연장이라는 현실적이고 동적인 공간에 '통합적'으로 적용하는 데에는 여전히 많은 과제가 존재한다. 특히, 다음의 세 가지 요소는 향후 연구자들이 반드시 고려해야 할 기술적 난제로 지적된다.

1) 실시간성: 수천 명 이상의 관객 데이터를 처리하고, 구조물 및 기상 데이터를 동기화하며, 즉시 반응하는 체계가 되어야 한다.

2) 확장성: 공연장마다 구조와 환경 조건이 다르므로,

시스템은 다양한 형태의 공연장에 맞게 재설정 가능한 유연성을 갖추어야 한다.

3) 표준화 및 재사용성: 안전 매뉴얼, 구조물 설계, 관객 시뮬레이션 등 구성 요소가 모듈화되어야, 타 현장 적용 시 빠른 전환과 비용 절감이 가능하다.

3. 제안 방법

3.1 연구 개요 및 구성 전략

본 연구는 이동형 공연장의 설치, 운영, 철거 전 과정에서 발생할 수 있는 위험 요소를 디지털 트윈 시뮬레이션 환경에서 사전 예측하고, 실시간으로 이상 상황을 감지·대응할 수 있는 안전관리 플랫폼의 설계를 목적으로 한다. 이를 위해 공연장 구조물, 군중 이동, 기상 환경 등 다양한 요소를 통합 시뮬레이션하고, 멀티모달 센서 기반의 실시간 모니터링 시스템을 연계하는 하이브리드 안전관리 프레임워크를 제안한다.

전체 시스템은 크게 다음 세 가지 구성으로 나뉜다.

1) 디지털 트윈 기반 시뮬레이션 엔진 (오프라인 예측)

2) 멀티모달 위험 감지 시스템 (실시간 관제)

3) 사용자 대응 인터페이스 및 시나리오 시스템 (관리자용 대시보드)

각 구성 요소는 상호 연동되며, 사전 설계된 시나리오 및 실제 센서 데이터 기반으로 연속적으로 작동한다.

3.2 디지털 트윈 기반 시뮬레이션 설계

3.2.1 공연장 구조물 모델링 및 배치

- SketchUp 기반의 구조물 모델을 FBX로 변환한 뒤 Unreal Engine 환경에 불러오고, Nanite와 Chaos 시스템을 활용해 하중 반응을 시각화한다[7].
- 각 구조물은 메타데이터(중량, 재질, 설치방식 등)를 포함하며, 시뮬레이션에서 구조물의 부하, 바람 하중, 진동 전달을 반영한다.
- 구조물 하중, 바람 하중, 진동 전달 등을 FEM 방식으로 분석하고, 부하-응력 반응 시나리오를 시각화하여 사고 가능성을 사전 진단한다.

3.2.2 군중 이동 시뮬레이션

- 군중은 에이전트 기반 모델로 구성되며, 각 에이전트는 나이, 반응속도, 이동속도, 회피 반경 등 개별 특성을 가진다. 강화학습 기반 행동 모델을 ONNX 포맷으로 불러와 에이전트에 적용하며 [8], 병목 현상, 밀집도 변화, 비상 대피 행동 등을 시뮬레이션할 수 있도록 설계된다..
- 관객 밀집도는 실시간 시각화를 통해 분석되며, 특정 밀집 구간에서의 압력값, 대피 시간, 이동 지연 등을 정량적으로 도출할 수 있다.
- 강화학습 기반 행동 예측을 위해 ONNX 포맷의 신경망 모델을 연동하고, 학습된 행동 패턴에 따라 동적 시뮬레이션이 가능하도록 구성한다.

3.2.3 기상 및 환경 변수 적용

- 공연장에 연동된 기상 API(예: 기상청 OpenAPI)를 통해 강수량, 풍속, 기온 등의 데이터를 실시간 수집하여 시뮬레이션 환경에 반영한다.
- 바람에 의한 구조물 흔들림, 비로 인한 이동 속도 저하, 미끄러짐 발생 확률 등을 시나리오 변수로 반영하여, 복합 재해 상황을 구성한다.

3.3 실시간 멀티모달 위험 감지 시스템

3.3.1 데이터 수집 장치 및 구조

- 영상 데이터: CCTV 및 드론 기반 실시간 영상 스트림 확보
- 소리 데이터: 마이크 센서로 비명, 충돌음, 장비 이상음을 수집
- 환경 데이터: IoT 센서로 진동, 기울기, 풍속, 온습도, 미세먼지 등을 감지
- 공연 정보 데이터: 공연 장르, 출연 인원, 예상 관객 수, 타임테이블 등

3.3.1 이상 상황 감지 알고리즘

- LSTM 기반 시계열 분석 알고리즘으로 위험 신호 감지 (예: 진동 급증 → 구조물 불안정 경고)
- Vision Transformer 또는 YOLOv8 기반 영상 객체 감지로 군중 밀집 상태 실시간 분석

- 각 데이터의 조합을 통해 '복합 위험 점수'를 산출하고, 정해진 임계값을 초과하면 관리자에게 경보 발생

3.4 사용자 대응 인터페이스 설계

3.4.1 대시보드 기반 관리자 화면

- 전체 공연장 레이아웃 3D 시각화
- 실시간 위험 감지 로그 스트리밍
- 군중 밀집도, 구조물 상태, 기상 상황을 색상 기반 위험등급으로 표시

3.4.2 대응 시나리오 제시

- 군중 분산 유도, 장비 사용 제한, 음향/조명 중단, 구조물 해체 등 사전 정의된 매뉴얼 기반 자동 시나리오 생성
- 시나리오 선택 시 AR 인터페이스 기반 실시간 유도 가능 (예: LED 유도등, 음성 방송 연계)

3.5 연구의 한계와 향후 보완 방향

본 연구는 실증보다는 개념적 설계와 기술 구조 제시에 중점을 두고 있으며, 향후 실제 공연장에서의 테스트 및 정량적 데이터 확보가 필요하다. 또한, 에이전트 기반 모델의 정확도 향상을 위한 실측 군중 데이터 확보, 기상 반응 시뮬레이션의 현장 검증, 실시간 UI 반응 속도 개선 등도 중요한 후속 과제로 제시된다.

4. 논의

4.1 통합형 안전관리 시스템의 의의

본 연구에서 제안한 디지털 트윈 기반의 공연장 안전관리 시스템은 단순한 기술 융합을 넘어, 공연예술 산업 내 안전관리 체계의 패러다임 전환을 유도할 수 있는 통합적 플랫폼 모델이다. 지금까지 공연장 안전은 설계자와 현장 작업자의 경험과 판단, 그리고 수동적 매뉴얼에 의존해 운영되어 왔다. 하지만 공연의 대형화, 장비의 복잡화, 군중의 다양화, 기후 변화에 따른 불확실성이 확대됨에 따라, 이와 같은 주관적·수동적 방식만으로는 현대 공연장의 복합위험에 효과적으로 대응하기 어렵다.

제안된 시스템은 공연장이라는 동적인 물리적 공간을 정밀하게 복제한 가상 환경을 기반으로, 구조물·군중·환경의 상태를 실시간으로 분석하고 예측할 수 있도록 설계되었다. 이는 선제적 사고 예방, 긴급 상황의 실시간 대응, 재난 발생 후의 시나리오 재구성까지 모두 포괄할 수 있는 다층적 안전관리 체계를 의미한다.

4.2 기존 연구 및 시스템과의 차별성

기존의 관련 연구는 대부분 특정 기술 요소에 집중되어 있었으며, 구조물 응력 분석, 군중 행동 시뮬레이션, 기상 시뮬레이션, 영상 기반 관제 등으로 분절되어 있었다. 또한 공연장 안전 시스템이라 하더라도 대부분은 고정형 실내 공연장을 전제로 개발된 사례가 많으며, 이동형 공연장의 특수성을 반영한 기술적 대응은 거의 존재하지 않았다.

본 연구의 차별성은 다음과 같다:

- 전 주기 통합성: 공연의 설계-설치-운영-철거에 이르는 전체 과정을 안전 시나리오 내에 통합
- 멀티모달 실시간성: 영상·음향·센서 데이터를 동시 처리하여 다양한 이상 상황을 실시간 예측
- 시뮬레이션과 운영의 융합: 사전 위험 예측과 실시간 사고 대응이 하나의 시스템으로 연동

이러한 특성은 공연장뿐 아니라 스포츠 경기장, 야외 페스티벌, 도심 대규모 이벤트 등에도 확장 가능한 구조를 제공하며, 향후 디지털 기반 문화안전 정책 수립에도 기초 자료로 활용될 수 있다.

4.3 이동형 공연장의 기술적 특징과 시스템 적용상의 고려사항

이동형 공연장은 매회 공연 장소와 구조, 설치 조건이 달라지기 때문에, 안전관리 시스템은 다음의 기술적 유연성을 반드시 갖추어야 한다:

- 모듈화와 프리셋화: 무대 구조물, 장비, 인원, 기후 등 주요 요소를 프리셋으로 저장하고, 현장 상황에 따라 빠르게 조정 가능한 템플릿 시스템 필요
- 로우 리소스 대응성: 일부 공연은 네트워크나 전력 인프라가 제한적이므로, 엣지 컴퓨팅 기반의 경량화된 데이터 처리 방식을 채택해야 한다
- 현장 중심 UI/UX 설계: 관리자, 감독자, 안전요원 등

실제 운영자의 인지 부담을 줄이기 위한 직관적인 인터페이스 설계가 필수적이다

특히 공연장이 외부 업체에 의해 반복적으로 임시 조성되는 구조를 고려하면, 시스템의 설치 및 커스터마이징 편의성이 핵심 경쟁력이 된다.

4.4 연구의 한계와 윤리적 고려

본 연구는 프로토타입 개념 설계 수준에서 수행되었으며, 실제 공연장에서의 반복 실증이나 정량적 검증이 포함되지 않았다. 향후 연구에서는 다양한 규모와 장르의 공연 사례를 통해 시스템의 성능, 반응 속도, 오경보율, 사용자 만족도 등을 측정하는 후속 연구가 필요하다.

또한 멀티모달 데이터 수집 과정에서 관객의 생체 정보, 행동 정보, 음성 정보 등이 포함될 수 있으므로, 개인정보 보호 및 윤리적 데이터 수집 방안 마련이 필수적이다. GDPR이나 국내의 개인정보보호법에 저촉되지 않도록, AI 감지 시스템은 비식별화, 최소 수집, 비가역 익명화 등의 조치를 전제해야 한다.

5. 결론 및 제언

본 연구는 이동형 공연장이라는 특수한 문화공간에서 발생 가능한 복합적인 위험 요소를 통합적으로 관리하기 위한 새로운 기술적 접근으로서, 디지털 트윈 기반 시뮬레이션 시스템과 실시간 멀티모달 위험 감지 체계를 결합한 안전관리 플랫폼 설계를 제안하였다. 기존의 공연장 안전관리 방식이 주로 수동적인 점검과 CCTV 관제에 의존해 온 것과 달리, 본 연구는 구조물 안정성, 군중 이동 시나리오, 기상 환경 등을 통합적으로 시뮬레이션하고, 공연 중 실시간으로 수집되는 다양한 데이터를 바탕으로 위험 요소를 조기 탐지하는 예측형 대응 체계를 구축하는 데 초점을 두었다.

이러한 접근은 공연의 설계-설치-운영-철거에 이르는 전 과정을 포괄하며, 실제 공연장 환경에 가까운 가상 시뮬레이션을 통해 사전 위험을 분석하고, 실시간 데이터를 연계해 운영 중 이상 상황에 대응할 수 있도록 한다. 특히, 군중 시뮬레이션, 구조물 하중 분석, 기상 변수 적용, 영상/음향 기반 AI 감지 등 여러 이질적 기술을 단일 시스템 내에서 연동함으로써, 기존 연구에서 다루지 못했던 현장 기반 통합안전관리 시스템의 가능성을 실증적으로 검토한 데에 큰 의의가 있다.

연구의 결과는 단지 기술적 설계에 그치지 않고, 향후 공연장뿐 아니라 스포츠 경기장, 대규모 축제, 도심 집회 등 다양한 다중 밀집 공간에 응용될 수 있는 범용적 모델로서의 확장성을 내포한다. 이는 향후 문화기술 산업의 스마트화뿐 아니라, 재난안전 분야에서의 실시간 예측 시스템 개발에도 기여할 수 있을 것이다. 또한, 이러한 기술이 공연 산업 전반의 안전 신뢰도를 제고하고 관객 경험의 질을 높이는 데 실질적인 기여를 할 수 있다는 점에서, 산업적·사회적 파급 효과 또한 주목할 만하다.

그럼에도 불구하고 본 연구는 설계 프레임 중심의 개념 제시에 머무르며, 실시간 연산 성능, 현장 적용성, 사용자 인터페이스에 대한 정량적 검증은 수행하지 못한 한계를 지닌다. 따라서 후속 연구에서는 실제 이동형 공연장 현장에서의 반복 실증 실험을 통해 시스템의 반응 속도, 경보 정확도, 사용 편의성 등을 정량화하고, 다양한 공연 장르 및 환경에 맞춘 사용자 맞춤형 인터페이스 고도화가 요구된다.

특히 향후 연구에서는 관객 에이전트의 행동 모델을 강화학습 기반으로 고도화하고, 위험 상황 발생 시 자동으로 반응하는 디지털 시나리오 엔진, 그리고 AR 기반 훈련 시스템으로 확장하여 공연 종사자의 안전 대응 교육까지 포괄하는 융합형 플랫폼으로의 진화를 꾀할 수 있을 것이다. 또한 관련 법·제도와의 연계, 표준화 지침 개발, 공공기관 및 지자체의 문화행사와의 연동 등을 통해 정책적 차원의 확산 전략도 병행되어야 할 것이다.

궁극적으로 본 연구는 이동형 공연장을 단순한 임시 무대로 보는 것이 아니라, 고도화된 기술 기반의 가변적 문화 플랫폼으로 재정의하는 작업의 일환이다. 공연의 예술성과 기술적 안전성이 함께 구현될 수 있도록, 본 연구가 실무 현장과 학계 모두에 실질적인 기초자료로 활용되기를 기대한다.

참고문헌(Reference)

[1] D. Helbing and P. Molnár, “Social force model for pedestrian dynamics,” Physical Review E,

vol. 51, no. 5, pp. 4282-4286, 1995.
[2] B. Yu and A. Johansson, “Modeling crowd turbulence by many-particle simulations,” Physical Review E, vol. 76, no. 4, p. 046105, 2007.
[3] J. Glaessgen and D. Stargel, “The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles,” in 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2012.
[4] Y. Chen et al., “A multi-sensor based real-time crowd monitoring and management system,” in Proc. IEEE Int. Conf. Pervasive Computing and Communications, 2019, pp. 1-8.
[5] ISO 23247-1:2021, Automation systems and integration — Digital Twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
[6] S. Park et al., “Development of digital twin model for indoor performance space safety analysis,” Journal of Korea Multimedia Society, vol. 24, no. 7, pp. 1187-1197, 2021. (In Korean)
[7] H. Lee, J. Park, and M. Song, “A study on smart safety management using digital twin in urban events,” Journal of the Korean Society of Safety, vol. 37, no. 4, pp. 23-31, 2022. (In Korean)
[8] ONNX: Open Neural Network Exchange, https://onnx.ai/, Accessed May 2025.

저 자 약 력

김 두 범 (Dubeom Kim)



· 2005년 3월 상명대학교 학사
· 2007년 8월 중앙대학교 예술공학전공 석사
· 2020년 8월 중앙대학교 예술공학전공 박사

e-mail : whitelion@skuniv.ac.kr
관심분야 : 가상현실, 디지털 콘텐츠