Check for updates

특집논문 (Special Paper)
방송공학회논문지 제31권 제4호, 2026년 7월 (JBE Vol.31, No.4, July 2026)
https://doi.org/10.5909/JBE.2026.31.4.588
ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

장식적 2D 도상의 3D 절차적 변환: 색상 구획 기반 VR 모래 만달라 구현

이 상 훈[a], 한 상 임[a)‡]

Procedural 3D Transformation of Decorative 2D Iconography: A Color-Segmentation-Based Implementation of a VR Sand Mandala

Sanghoon Lee[a)] and Sanglim Han[a)‡]

요 약

본 논문은 *Medicine Buddha NanoMandala*의 VR 확장을 위한 선행 구현 연구로서, 장식적 2D 만달라 이미지를 3D 오브젝트 기반 가상환경으로 전환하는 색상 구획 기반 절차적 파이프라인을 제안한다. 입력 만달라 이미지의 색상 정보를 기준으로 암석형 오브젝트를 자동 배치하고, raycast 기반 후보점 추출과 흰색 배경 영역 제외 규칙을 통해 원본 도상의 색상 구획과 공백 구조를 반영하였다. 구현 결과, 색상 정보는 프리팹 선택, 배치 여부, 후처리를 연결하는 핵심 제어 변수로 기능하였다. 또한 scale 및 최대 배치 수 비교를 통해 원본 패턴의 가독성, 입자적 질감, 실행 가능성 사이의 균형이 VR 모래 만달라 구현에서 중요함을 확인하였다.

Abstract

This study proposes a color-segmentation-based procedural pipeline for transforming a decorative 2D mandala image into a 3D object-based virtual environment, as a preliminary implementation for the VR extension of the *Medicine Buddha NanoMandala* project. The pipeline uses the color information of an input mandala image to automatically place rock-like 3D objects that visually function as sand-particle units. Placement candidates are extracted through raycasting, while collision points with the mandala mesh are excluded as wall regions and white background areas are skipped using an RGB threshold. Through this process, both the color regions and empty spaces of the original image are reflected in the 3D layout. The implementation shows that color information can function not only as a surface attribute but also as a control variable connecting prefab selection, object placement, background exclusion, and post-processing. Comparisons of scale and maximum object count further indicate that balancing pattern legibility, particle-like texture, and execution feasibility is critical for implementing a VR sand mandala.

Keyword : Virtual Reality, Procedural Generation, Color Segmentation, 3D Object Placement, Sand Mandala

Copyright ⓒ 2026 Korean Institute of Broadcast and Media Engineers. All rights reserved.
“This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons BY-NC-ND (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and not altered.”

Ⅰ. 서 론

1. 연구 배경 및 문제 제기

디지털 콘텐츠 제작 환경에서 2D 이미지를 3D 공간으로 전환하는 작업은 게임, 실감형 콘텐츠, 가상현실, 미디어아트 제작 전반에서 점차 중요해지고 있다. 특히 가상현실 환경에서는 사용자가 이미지를 단순히 바라보는 것이 아니라, 이미지가 구성한 공간 안으로 들어가고 그 내부를 이동하거나 관찰할 수 있어야 한다. 이때 2D 이미지를 3D로 변환하는 과정은 단순한 형상 입체화에 그치지 않는다. 원본 이미지가 가진 색상, 경계, 반복 패턴, 공백 구조를 3D 공간 안에서 어떻게 유지하고 재구성할 것인지가 핵심 문제가 된다. 절차적 콘텐츠 생성은 규칙과 알고리즘을 통해 디지털 콘텐츠를 자동 또는 반자동으로 생성하는 방법으로, 대규모 장면 구성과 반복적 자산 배치에 효과적으로 활용되어 왔다[1]. 그러나 기존 절차적 생성 연구는 주로 게임 레벨, 지형, 도시, 건축적 구조와 같이 기능적 공간 구성을 중심으로 발전해 왔으며, 장식적 2D 도상의 색상 구획과 조형적 질서를 3D 공간으로 변환하는 문제는 상대적으로 충분히 다루어지지 않았다[2].

본 논문은 *Medicine Buddha NanoMandala* 프로젝트의 VR 버전 제작을 위한 선행 구현 연구로 출발하였다. *Medicine Buddha NanoMandala*는 UCLA Art|Sci Center, UCLA CNSI 연구자, 중앙대학교 GMA 연구실이 협력하는 예술·과학 융합 프로젝트로 DSLR 사진, 스테레오스코픽 이미지, 공초점 현미경 이미지, 주사전자현미경 이미지 등 서로 다른 스케일의 이미지를 연결하여, 과학적 관찰과 문화적 형식을 하나의 연속적 시각장으로 구성하는 것을 목표로 한다[3]. 그러나 기존 프로젝트의 주요 결과물은 이미지와 영상 기반의 시각 구성에 집중되어 있다. 이러한 이미지와 영상의 결과물들은 카메라의 시점이 고정되어 모래 만달라의 고해상도 질감과 물질적 두께감이나 입자 간의 상호 축적 형태를 인지할 수 없어 촉각적 질감이나 입체적 몰입감을 저해하는 문제점을 야기할 수 있다.

하지만, VR 공간에서는 모래 만달라의 고해상도 질감과 물질적 두께감을 직접적으로 감상할 수 있고, 카메라의 시점이 곧, 시점 변화가 자유로운 관객의 시선으로 이동하기 때문에 촉각적 질감이나 입체적 몰입감을 향상시킬 수 있을 것이다. 선행 구현 연구에서는 만달라의 내부를 이동하거나 입자적 구조를 가까이에서 관찰할 수 있는 VR 버전은 별도로 구현되어 있지 않다. 따라서 본 논문은 해당 프로젝트의 VR 확장을 위해, 2D 만달라 도상을 3D 오브젝트 기반의 가상환경으로 변환하는 제작 파이프라인을 검토한다.

만달라와 같은 장식적 2D 도상은 대칭 구조, 반복 패턴, 다층적 색상 구획, 의도적 공백이 결합된 복합적 시각 구조를 가진다. 이러한 도상을 3D 환경에서 재현할 때 단순히 외곽선을 입체화하거나 오브젝트를 무작위로 배치하는 방식만으로는 원본의 시각적 질서를 유지하기 어렵다. 특히 모래 만달라는 서로 다른 색상의 입자들이 경계와 공백을 따라 축적되며 전체 문양을 형성한다. 따라서 이를 VR 환경에서 재현하려면 단일 텍스처를 입히는 방식이나 수작업 배치 방식만으로는 충분하지 않다. 색상 영역마다 대응되는 오브젝트를 배치해야 하며, 동시에 비워져야 하는 배경 영역과 문양의 경계도 유지해야 한다. 이러한 작업을 수작업으로 수행할 경우 배치 좌표 지정, 색상 대응, 경계 수정, 밀도 조절이 반복적으로 요구되어 제작 비용이 커진다.

VR 환경에서는 이러한 문제가 더욱 중요해진다. 일반적인 2D 이미지나 영상에서는 관객의 시점이 고정되어 있지만, VR 환경에서는 사용자가 장면 안에서 이동하고, 특정 영역을 가까이에서 관찰하며, 이미지의 표면이 아니라 공간적 구조를 경험한다. 따라서 모래 만달라를 VR로 구현하기 위해서는 원본 이미지의 전체 형상뿐 아니라, 입자적 질감, 색상 구획, 공백 구조, 장면 밀도까지 함께 고려해야 한다. 또한 많은 수의 오브젝트를 사용하는 방식은 모래 입자의 시각적 효과를 강화할 수 있지만, 동시에 렌더링 부담을 증가시킬 수 있다. 그러므로 VR 모래 만달라 구현에서는 시각적 복잡도와 실시간 실행 가능성을 함께 조절할 수 있

a) 중앙대학교 첨단영상대학원(Chung-Ang University)
‡ Corresponding Author : 한상임(Sanglim Han)
E-mail: sanglimhan@cau.ac.kr
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5134-5275
※ 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 가상융합대학원의 연구 결과로 수행되었으며 (RS-2024-00418847), 2026년도 교육부 및 서울특별시의 재원으로 서울RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다 (2026-RISE-01-024-06).
· Manuscript received May 26, 2026; Revised July 6, 2026; Accepted July 7, 2026.

는 절차적 제작 방식이 필요하다[4][5].

본 논문은 이러한 문제의식에서 출발하여, 2D 만달라 이미지를 입력으로 받아 색상 구획 정보를 기반으로 3D 오브젝트를 자동 배치하는 파이프라인을 구현한다. 본 논문에서 색상은 단순한 표면 장식이나 재질 속성이 아니라, 3D 공간에서 오브젝트의 배치 여부와 배치 영역을 결정하는 구조적 기준으로 사용된다. 구체적으로 입력 만달라 이미지를 기반으로 3D 만달라 메시를 구성하고, Unity 환경에서 raycast를 통해 배치 후보 지점을 추출한다. Raycast가 만달라 메시와 충돌하는 경우 해당 지점은 벽으로 간주하여 제외하고, 메시를 통과해 바닥에 닿은 지점에서 샘플링한 색상값이 흰색 임계값 이상일 경우 배경 영역으로 판단하여 배치를 건너뛴다. 이를 통해 원본 이미지의 색상 영역뿐 아니라 공백 구조까지 3D 배치 과정에 반영한다. 이 과정은 *Medicine Buddha NanoMandala*의 VR 버전 제작을 위한 기초 구현 방식이자, 장식적 2D 도상을 VR 환경의 3D 오브젝트 구조로 전환하기 위한 절차적 제작 방법으로 볼 수 있다.

2. 연구 목적 및 기여

본 논문의 목적은 장식적 2D 도상의 색상 구획 정보를 활용하여 3D 오브젝트 배치와 후처리를 수행하는 절차적 변환 파이프라인을 제안하고, 이를 VR 모래 만달라 구현 사례를 통해 검토하는 데 있다. 이를 위해 본 논문은 2D 만달라 이미지를 입력 자산으로 사용하고, 암석형 3D 오브젝트를 모래 입자와 유사한 시각 단위로 활용한다. 암석형 오브젝트는 완전히 매끈한 기하학적 입자가 아니라 불규칙한 표면과 형태를 가지므로, 모래 만달라의 입자감과 물질적 밀도를 3D 공간에서 표현하는 데 적합하다. 본 논문은 이러한 오브젝트를 색상 구획 기반으로 자동 배치함으로써, 원본 만달라 이미지의 색상 분할 구조와 전체 형상을 3D 환경에서 유지하는 방식을 구현한다.

본 논문의 기여는 세 가지로 정리할 수 있다. 첫째, 장식적 2D 도상의 색상 구획 정보를 3D 공간 좌표와 2D 픽셀을 일치시킨 후, 실시간 샘플링된 색상 벡터와 기준 색상 벡터 간의 4차원 유클리드 거리 연산을 수행하여 3D 배치 규칙으로 전환하는 구현 방식을 제시한다. 둘째, raycast 기반 후보점 추출과 흰색 배경 영역의 임계값 특정 수치(0.9) 이상으로 설정, 메시의 벽면 제외 규칙을 결합하여, 메시를 관통하여 바닥에 도달한 후보점에 한해서만 픽셀 색상을 샘플링하여 원본 이미지의 문양과 공백 구조를 함께 반영하는 배치 방식을 제안한다. 셋째, *Medicine Buddha NanoMandala*의 VR 확장이라는 구체적 제작 맥락 안에서, 색상 정보가 단순한 시각 속성이 아니라 3D 공간 구성과 장면 최적화를 연결하는 핵심 제어 변수로 기능할 수 있음을 보인다. 본 논문은 정량적 사용자 평가나 다양한 도상에 대한 일반화 검증까지 수행하지는 않지만, 장식적 이미지의 VR 변환을 위한 절차적 제작 파이프라인의 가능성을 구현 사례를 통해 확인한다.

Ⅱ. 관련 연구

1. 절차적 콘텐츠 생성과 3D 환경 구성

절차적 콘텐츠 생성은 디지털 콘텐츠를 수작업으로 일일이 제작하는 대신, 규칙, 매개변수, 알고리즘을 통해 자동 또는 반자동으로 구성하는 제작 방식이다. 이 방식은 게임, 가상환경, 시뮬레이션, 실감형 콘텐츠 제작에서 대규모 장면을 효율적으로 생성하기 위한 방법으로 활용되어 왔다. 관련 연구에서는 절차적 생성의 핵심을 단순한 자동화가 아니라, 제한된 규칙 집합을 통해 다양한 결과를 만들면서도 제작자가 결과를 조절할 수 있는 통제 가능성으로 설명한다[1]. 절차적 모델링 역시 이러한 흐름 안에서 발전해 왔으며, 지형, 식생, 도시, 건축물, 가상 세계의 구성 요소를 규칙 기반으로 생성하는 방법을 다루어 왔다[2].

기존 절차적 모델링 연구는 주로 기능적 공간이나 건축적 구조를 생성하는 데 초점을 두어 왔다. 예를 들어 도시나 건축물의 절차적 생성에서는 도로망, 블록, 건물 입면, 층위 구조와 같은 공간적 규칙이 주요한 생성 기준이 된다[6]. 또한 이미지 기반 절차적 모델링에서는 2D 이미지에서 형태적 단서를 추출하고 이를 3D 모델 구성의 기준으로 활용하는 방식이 제안되어 왔다[7]. 이러한 연구들은 2D 입력이 3D 구조 생성의 출발점이 될 수 있음을 보여주지만, 대부분 건축 입면이나 도시 구조와 같이 비교적 기능적이고 구조

화된 대상을 중심으로 한다. 이에 비해 만달라와 같은 장식적 도상은 기능적 공간보다 색상 구획, 대칭 패턴, 반복 문양, 공백 구조의 시각적 질서가 더 중요하게 작동한다.

본 논문이 다루는 2D 만달라 이미지는 기존 절차적 생성 연구의 일반적 대상과 성격이 다르다. 만달라의 색상은 단순한 표면 장식이 아니라, 문양의 영역과 경계를 구분하는 구조적 정보이다. 따라서 3D 변환 과정에서도 색상 정보는 재질 적용 단계에서만 사용되는 것이 아니라, 오브젝트가 어디에 배치되고 어떤 영역이 비워져야 하는지를 결정하는 기준으로 사용되어야 한다. 이 점에서 본 논문은 도시, 건물, 게임 레벨의 절차적 생성과 달리, 장식적 2D 도상의 색상 구획을 3D 공간 배치 규칙으로 전환하는 문제에 초점을 둔다. 특히 본 논문은 *Medicine Buddha NanoMandala* 프로젝트의 VR 확장 과정에서 요구된 제작 조건을 바탕으로, 2D 모래 만달라 이미지를 입자형 3D 오브젝트 구조로 변환하는 파이프라인을 검토한다.

2. 이미지 색상 정보 기반 배치와 VR 장면 최적화

이미지 기반 3D 구성에서 입력 이미지는 단순한 참조 이미지가 아니라, 공간 생성의 기준 데이터로 활용될 수 있다. 이미지의 색상, 경계, 마스크 정보는 특정 영역을 분리하거나, 서로 다른 자산을 배치하거나, 배경 영역을 제외하는 데 사용될 수 있다. 본 논문에서는 사용자가 입력한 2D 만달라 이미지의 색상 정보를 기반으로 3D 오브젝트를 자동 배치한다. 이때 색상 정보는 사전에 고정된 수동 배치 좌표가 아니라, raycast를 통해 확보된 후보 지점에서 샘플링되는 입력 이미지 기반의 배치 기준으로 작동한다.

본 논문에서는 이러한 이미지 기반 배치 논리를 2D 만달라 도상의 VR 변환에 적용한다. 입력 이미지의 색상 구획은 오브젝트가 배치될 영역을 구분하는 기준으로 사용되며, 배경과 경계 영역은 별도의 제외 규칙을 통해 처리된다. 이 방식은 원본 만달라의 색상 영역뿐 아니라 공백 구조까지 3D 배치에 반영하기 위한 것이다. [표 1]은 기존 절차적 생성 접근과 본 논문의 접근을 비교한 것이다.

VR 환경에서 이러한 절차적 배치 방식은 실시간 실행 가능성과 함께 고려되어야 한다. 가상현실 콘텐츠는 일반 화면 기반 콘텐츠보다 사용자의 시점 이동과 몰입 경험에 민감하므로, 장면의 시각적 복잡도를 유지하면서도 렌더링 부담을 관리해야 한다[4][5]. 실시간 렌더링에서는 많은 수의 오브젝트, 높은 폴리곤 수, 과도한 draw call이 장면 성능에 영향을 미칠 수 있으며, 따라서 장면 구성 단계에서부터 자산 수, 메시 구조, 배치 밀도, 렌더링 비용을 함께 고려하는 것이 중요하다[8].

본 논문은 모래 만달라의 입자적 시각성을 표현하기 위해 암석형 3D 오브젝트를 사용한다. 암석형 오브젝트는 실제 모래 입자를 물리적으로 정확히 시뮬레이션하기 위한 것이 아니라, 모래 만달라의 입자감과 불규칙한 물질감을 VR 공간에서 시각적으로 재현하기 위한 자산이다. 따라서 본 논문의 구현 목표는 물리 기반 입자 시뮬레이션이 아니라, 입력 만달라 이미지의 색상 구획과 전체 형상을 유지하면서 3D 오브젝트 집합으로 모래 만달라의 시각 구조를 재구성하는 데 있다. 이 과정에서 색상 정보는 오브젝트 배치, 배경 영역 제외, 후처리 판단을 연결하는 핵심 제어 기준으

표 1. 기존 절차적 생성 접근과 본 논문의 차이
Table 1. Comparison between conventional procedural generation approaches and the proposed approach

Category	Conventional Procedural Generation Approaches	The Proposed Approach
Primary Target	Cities, Terrains, Buildings, Game Levels	Decorative 2D Mandala Iconography
Generation Criteria	Functional Spatial Rules, Structural Constraints, Parameters	Color Segmentation and Empty Spaces of Input Image
Input Data	Rule Sets, Terrain Data, Structural Parameters	2D Mandala Image and 3D Reference Mesh
Placement Method	Centered on Functional Rules (Roads, Blocks, Object Intervals, etc.)	Automatic Placement Based on Raycast Candidates and Color Sampling
Exclusion Rules	Collision, Boundary, and Density Limits	Wall Collision Region Exclusion, White Background Region Exclusion
Objective	Large-scale Virtual Environment Generation	VR Extension of Sand Mandala and Preservation of Visual Structure

로 기능한다.

따라서 본 논문의 의의는 특정 렌더링 기법의 성능 우수성을 입증하는 데 있기보다, 장식적 2D 도상의 색상 정보를 3D 배치와 후처리에 활용할 수 있는 절차적 제작 방식을 제시하는 데 있다. 특히 모래 만달라의 VR 장면화에서는 색상 구획, 공백 구조, 입자형 오브젝트의 밀도 조절이 함께 고려되어야 하므로, 배치 규칙과 후처리를 통합한 파이프라인 설계가 중요하다.

Ⅲ. 색상 기반 3D 만달라 배치 파이프라인

1. 입력 이미지와 3D 자산 구성

본 장에서는 *Medicine Buddha NanoMandala*의 VR 확장을 염두에 두고 설계한 색상 구획 기반 3D 만달라 배치 파이프라인을 설명한다. 본 파이프라인은 2D 만달라 이미지를 입력으로 받아, 해당 이미지의 색상 구획 정보를 기준으로 3D 오브젝트를 자동 배치하는 방식으로 구성된다. 입력 이미지는 단순한 시각 참조가 아니라, 3D 공간에서 오브젝트의 배치 영역과 배경 영역을 판별하는 기준 데이터로 사용된다. 즉, 색상 정보는 재질 표현을 위한 부가 요소가 아니라, 배치 규칙을 결정하는 구조적 정보로 작동한다.

3D 자산은 모래 만달라의 입자적 시각성을 VR 환경에서 재현하기 위해 암석형 오브젝트를 기본 단위로 사용하였다. 본 논문에서 사용된 암석형 오브젝트는 실제 모래 입자의 물리적 거동을 시뮬레이션하기 위한 것이 아니라, 모래가 집합적으로 형성하는 불규칙한 질감과 입자감을 시각적으로 재현하기 위한 자산이다. 각 오브젝트는 입력 만달라 이미지의 색상 영역에 대응될 수 있도록 색상별 프리팹으로 구성하였다. 전체 파이프라인은 입력 이미지, 3D 만달라 메시, 색상별 프리팹, raycast 기반 후보점 추출, 색상 샘플링, 자동 배치, 후처리 단계로 이어진다. [그림 1]은 입력 만달라 이미지, 3D 만달라 모델링, Unity 자산 준비, 오브젝트 배치, 최적화 및 후처리로 이어지는 전체 흐름을 나타낸다.

본 구현 사례에서 입력 만달라 이미지는 오렌지, 퍼플, 라벤더, 골드, 핑크 계열의 주요 색상 구획을 포함한다. 파이프라인은 이 색상들을 수작업 배치 좌표로 사용하지 않고, 입력 이미지에서 샘플링되는 색상값을 기준으로 오브젝트 배치와 프리팹 대응을 수행한다. 따라서 색상은 미리 고정된 위치 정보가 아니라, 입력 이미지에 따라 배치 결과를 달라지게 하는 기준 데이터로 사용된다.

2. 만달라 메시 생성과 삼각형 변환

2D 만달라 이미지를 3D 공간에서 배치 기준으로 사용하기 위해, 먼저 Blender에서 만달라 메시를 구성하였다. 원본 이미지를 배경 참조로 배치한 뒤, 외곽선과 내부 경계를

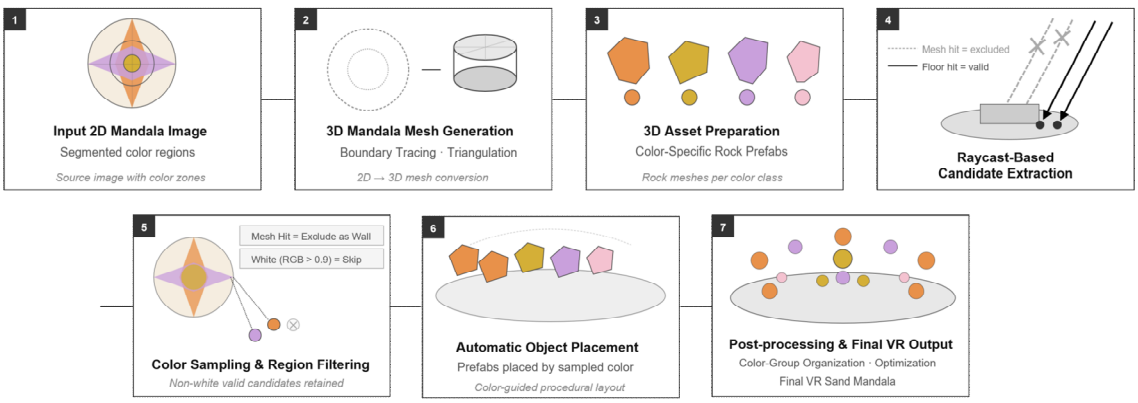

그림 1. 색상 기반 VR 모래 만달라 구현 파이프라인
Fig. 1. Color-based implementation pipeline for a VR sand mandala

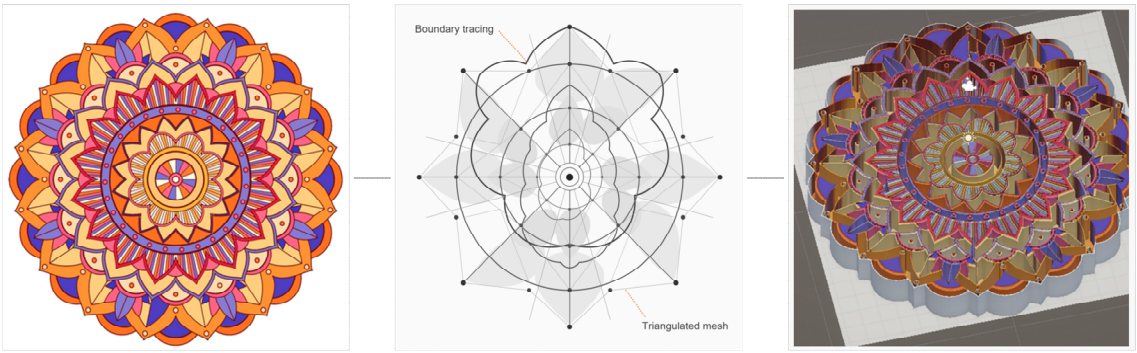

그림 2. 2D 만달라 이미지와 3D 메시 변환 과정
Fig. 2. Transformation process from a 2D mandala image to a 3D mesh

따라 곡선을 추적하고 이를 폴리곤 형태로 변환하였다. 이후 extrude 처리를 통해 평면적 도상에 높이를 부여하고, Unity에서 raycast 연산이 가능한 3D 기준 구조를 생성하였다.

이 과정에서 삼각형 변환이 수행되었다. 만달라 이미지는 곡선, 반복 문양, 오목한 경계가 많은 복합 도상이므로, 사각형 또는 비정형 폴리곤 상태에서는 raycast 충돌 판정이 불안정해질 수 있다. 따라서 모든 면을 삼각형으로 정리하여 충돌 판정의 정밀도를 높였다. 이 처리는 만달라 메시를 최종 시각 모델로 완성하기 위한 단계라기보다, 이후 Unity에서 배치 후보점을 안정적으로 추출하기 위한 전처리 단계에 해당한다. 2D 이미지가 3D 메시로 전환되는 과정은 [그림 2]와 같다.

이처럼 3D 만달라 메시를 구성하는 이유는 원본 도상을 단순히 입체화하기 위해서가 아니다. 본 논문에서 만달라 메시는 오브젝트가 배치될 수 있는 영역과 배치되어서는 안 되는 영역을 구분하는 공간적 기준으로 기능한다. 따라서 메시 생성 단계는 이후 raycast 기반 배치 알고리즘과 직접 연결된다. 또한 색상 영역 일치도는 유니티 스크립트에서 색상 오차 임계값(0.6)에 의해 생성 단계에서 임계값 이외의 다른 색상 오브젝트가 배치되지 않게끔 설계하여 약 94%의 일치율을 보여주고, 경계 보존도 또한 만달라 문양의 벽을 통과하는 소수의 모래 만달라 오브젝트를 제외한 나머지는 raycast 충돌 검사를 통해 약 96%의 수치를 보여주고 있다.

3. Raycast 기반 배치 후보점 추출

Unity 단계에서는 상부에서 하부 방향으로 raycast를 수행하여 3D 오브젝트의 배치 후보 지점을 추출하였다. raycast가 만달라 메시와 직접 충돌하는 경우, 해당 지점은 문양의 경계 또는 벽으로 간주하여 배치 대상에서 제외하였다. 반대로 raycast가 만달라 메시를 통과하여 바닥에 도달하는 경우, 해당 지점은 잠재적 배치 후보로 처리하였다.

이러한 방식은 만달라 도상의 입체 경계와 내부 공백을 동시에 고려하기 위한 것이다. 만약 raycast 충돌 지점을 모두 배치 지점으로 사용하면, 문양의 벽면이나 경계부에도 오브젝트가 생성되어 원본 도상의 구획 구조가 흐려질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 충돌 지점을 배치 지점으로 사용하는 대신, 충돌 여부를 배제 조건으로 활용하였다. 즉, raycast는 오브젝트를 배치하기 위한 위치 탐색 도구이면서 동시에 배치해서는 안 되는 영역을 제거하는 필터로 사용된다.

바닥에 도달한 지점에서도 추가적인 색상 판별이 수행된다. 바닥 지점에서 샘플링한 색상값이 흰색 임계값, 즉 RGB 값 0.9 이상에 해당할 경우 해당 영역은 배경으로 판단하여 배치를 건너뛰었다. 이 규칙은 원본 만달라 이미지의 공백 구조를 유지하기 위한 것이다. 결과적으로 본 파이프라인의 배제 규칙은 두 단계로 구성된다. 첫째, 만달라 메시와 충돌하는 지점을 벽으로 간주하여 제외한다. 둘째, 바닥 색상 샘플링 결과가 흰색 임계값 이상인 지점을 배경

표 2. Raycast 기반 배치 후보점 추출 규칙
Table 2. Raycast-based rules for extracting placement candidates

Step	Criteria / Condition	Action / Processing	Objective
1	Raycast collides with the mandala mesh	Exclude from placement	Preserve pattern boundaries and wall regions
2	Raycast passes through the mesh and reaches the ground	Maintain as a placement candidate	Secure valid placement regions
3	Ground-sampled color value is RGB 0.9 or higher	Exclude from placement	Preserve the white background and empty structures
4	Ground-sampled color value falls within a valid color region	Place 3D object	Reconstruct the 3D layout based on color segmentation

으로 간주하여 제외한다. 이 과정은 [표 2]와 같이 정리할 수 있다.

이와 같은 이중 배제 규칙은 만달라의 형태적 외곽뿐 아니라, 내부의 빈 공간과 배경 영역을 함께 보존하기 위한 장치이다. 따라서 본 논문의 배치 방식은 단순히 많은 오브젝트를 생성하는 방식이 아니라, 배치하지 않을 영역을 함께 정의함으로써 원본 도상의 시각 구조를 유지하는 방식이다.

4. 색상 샘플링과 오브젝트 자동 배치

배치 후보점이 확보되면, 바닥 또는 기준 평면상의 위치를 입력 만달라 이미지의 대응 좌표로 변환하고, 해당 위치의 색상값을 샘플링한다. 샘플링된 색상값은 색상군 판별에 사용되며, 각 색상에 대응되는 프리팹 세트가 선택된다.

본 논문에서 사용된 색상 기반 배치는 사전에 지정된 고정 좌표에 오브젝트를 놓는 방식과 구분된다. 배치 후보점은 raycast를 통해 생성되고, 각 후보점에서 참조되는 색상은 입력 이미지로부터 샘플링된다. 따라서 결과적으로 오브젝트의 분포는 입력 만달라 이미지의 색상 분할 구조를 따른다. 이러한 방식은 원본 이미지가 가진 대칭 구조와 반복 패턴을 3D 오브젝트 집합으로 재구성하는 데 사용된다.

암석형 오브젝트는 색상별로 구분된 뒤, 만달라 이미지의 각 색상 영역에 대응하여 배치된다. 이를 통해 2D 이미지의 색상 구획은 3D 공간에서 입자형 재료의 분포로 번역된다. 특히 모래 만달라의 경우, 전체 이미지는 단일 표면이 아니라 작은 입자들이 모여 형성된 시각 구조로 이해될 수 있다. 본 논문의 파이프라인은 이러한 특성을 반영하여, 색상 영역을 면 단위로 칠하는 대신 다수의 3D 오브젝트를 색상 구획에 따라 배치하는 방식을 사용한다.

5. 배경 영역 제외 및 후처리

배치가 완료된 이후에는 장면의 시각 구조와 실행 가능성을 고려한 후처리를 수행하였다. 본 논문의 후처리는 크게 두 가지 방향으로 구성된다. 첫째, 흰색 배경 영역과 벽으로 판정된 영역을 제외함으로써 원본 도상의 공백 구조를 유지한다. 둘째, 색상군별로 생성된 오브젝트를 정리하여 장면의 복잡도를 낮추는 최적화 과정을 수행한다.

실시간 3D 환경에서는 많은 수의 개별 오브젝트가 장면에 포함될 경우 렌더링 비용이 증가할 수 있다[8]. 따라서 본 논문에서는 색상군별 오브젝트 구조를 기준으로 장면을 정리하였다. 이때 색상 정보는 배치 단계에서 프리팹 선택 기준으로 사용될 뿐 아니라, 후처리 단계에서도 동일 색상군을 묶는 기준으로 기능한다. 즉, 색상 정보는 파이프라인의 앞 단계와 뒤 단계를 연결하는 공통 제어 변수로 작동한다.

최종 결과는 동일한 카메라 좌표를 기준으로 입력 이미지 및 배치 결과를 비교하여 검토하였다. 이 비교는 정량적 유사도 분석이 아니라, 만달라의 전체 형상과 색상 분할 구조가 유지되었는지를 확인하기 위한 질적 검토에 해당한다. 구현 과정에서 확인된 경계 처리상의 차이는 다음 장의 결과 분석에서 함께 다룬다.

이상의 절차를 종합하면, 본 논문의 파이프라인은 입력 이미지의 색상 정보를 3D 배치, 배경 제외, 프리팹 선택, 후처리에 연결하는 구조를 가진다. 따라서 색상은 단순한 시각적 결과물이 아니라, 2D 만달라 도상을 VR 환경의 3D 오브젝트 집합으로 변환하기 위한 핵심 매개 변수로 기능한다. Ⅲ장에서 제시한 전체 구현 절차는 다음 장에서 결과 이미지와 조건별 비교를 통해 분석한다.

Ⅳ. 구현 결과 및 분석

1. 색상 기반 오브젝트 배치 결과

본 논문의 파이프라인을 적용한 결과, *Medicine Buddha NanoMandala*의 VR 확장을 위한 기초 장면으로서 입력 만달라 이미지의 색상 구획을 따라 암석형 3D 오브젝트가 자동 배치되었다. 배치 결과는 원본 이미지의 색상 영역을 단순히 텍스처로 입히는 방식이 아니라, 각 색상 영역에 대응하는 오브젝트 집합을 3D 공간에 분포시키는 방식으로 생성되었다.

구현 결과에서 오렌지, 퍼플, 라벤더, 골드, 핑크 계열의 주요 색상 구획은 각각 대응하는 오브젝트 분포로 변환되었다. 이 과정에서 원본 만달라의 중심 대칭 구조와 반복적 패턴은 전반적으로 유지되었다. 특히 색상 샘플링을 통해 배치가 이루어지기 때문에, 수작업으로 좌표를 지정하지

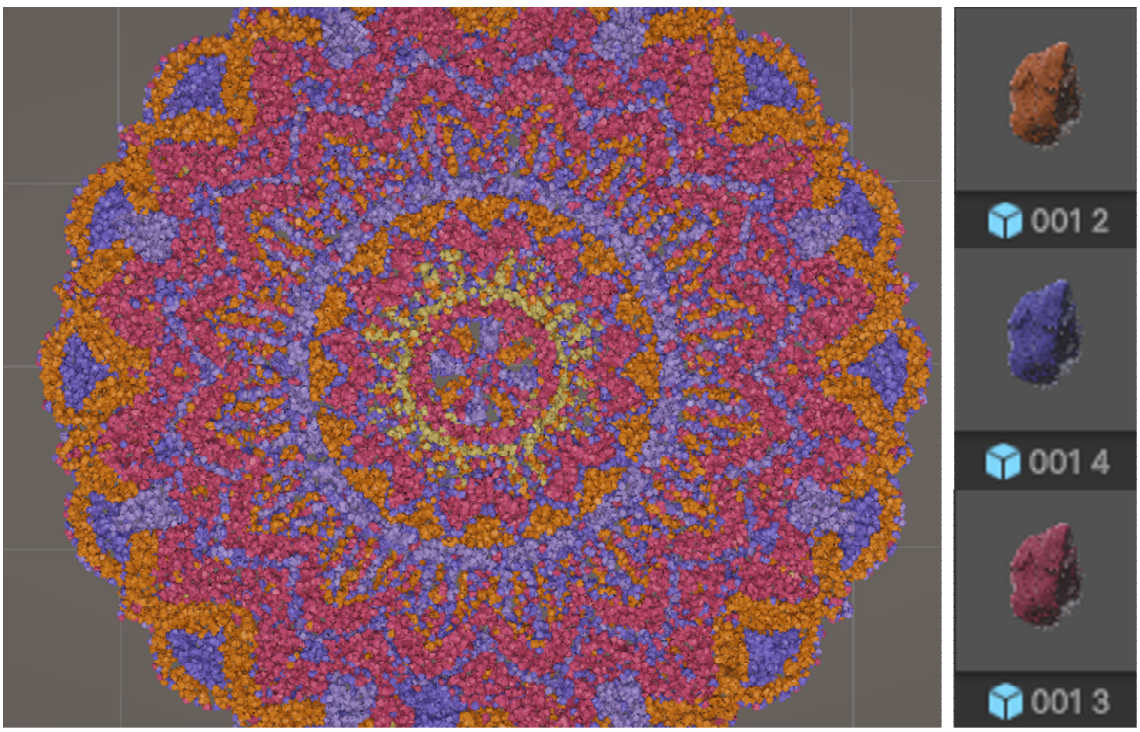

그림 3. 색상 기반 오브젝트 배치 결과와 색상별 프리팹 예시
Fig. 3. Color-based object placement result and examples of color-specific prefabs

표 3. 색상 구획 기반 오브젝트 배치를 위한 주요 제어 파라미터
Table 3. Key Control Parameters for Color-Segmentation-Based Object Placement

Parameter	Value	Technical Role and Rationale for Placement
Spatial Exploration Control	100,000	Maximum number of raycast attempts for exploring valid placement regions
Density Limit Control	20,000~50,000	Maximum number of sand particle objects that can be placed in the final scene
Vertical Offset	0.02f	Y-axis correction value to prevent geometric intersection and clipping with the ground plane
Error Tolerance Limit	0.6	Maximum allowable distance for matching between the sampled pixel color and reference color vectors
Exclusion Threshold	> 0.9(RGB)	Threshold value to detect white empty space outside the mandala design and block object generation

않아도 입력 이미지의 색상 분포에 따라 오브젝트의 위치와 범위가 결정되었다. 입력 만달라의 색상 구획에 대응하여 자동 배치된 오브젝트 결과와 색상별 프리팹 예시는 [그림 3]과 같다.

이 결과는 본 논문의 파이프라인이 장식적 2D 도상을 3D 오브젝트 집합으로 변환할 수 있음을 보여준다. 다만 이 변환은 원본 이미지를 기하학적으로 완전히 복제하는 방식이 아니라, 색상 영역과 전체 형상의 관계를 유지하면서 입자형 3D 자산으로 재구성하는 방식이다. 따라서 결과의 평가는 정밀한 형상 복원보다는, 원본 만달라의 색상 분할 구조와 시각적 질서가 3D 공간에서 유지되는가에 초점을 둔다.

본 논문에서 제안하는 3D 공간 분포 방식의 학술적 근거와 구현 재현성을 확보하기 위해, 적용된 제어 파라미터는 [표 3]과 같다.

2. 모래 만달라의 3D 시각 구조 재현

본 논문에서 암석형 오브젝트를 사용한 이유는 모래 만달라의 입자적 특성을 VR 환경에서 시각적으로 재현하기 위해서이다. 모래 만달라는 단일한 평면 이미지가 아니라, 서로 다른 색상의 입자들이 경계와 패턴을 이루며 축적된 구조로 이해될 수 있다. 따라서 본 구현에서는 매끈한 표면 모델이나 단일 텍스처 대신, 불규칙한 표면을 가진 다수의 암석형 오브젝트를 배치 단위로 사용하였다.

이러한 방식은 두 가지 효과를 만든다. 첫째, 원본 이미지의 색상 구획이 3D 공간에서 입자형 분포로 변환된다. 둘째, 사용자가 VR 환경에서 만달라를 관찰할 때 평면 이미지가 아니라 물질적 두께와 밀도를 가진 오브젝트 집합으로 인식할 수 있다. 이는 기존 이미지·영상 기반 *Medicine Buddha NanoMandala* 작업을 사용자의 시점 이동과 근접 관찰이 가능한 3D 장면으로 확장하기 위한 조건이 된다.

배치 결과는 동일한 카메라 좌표를 기준으로 입력 이미지와 비교하였다. 이 비교에서 원본 만달라의 전체 외곽, 중심 구조, 주요 색상 분할은 전반적으로 유지되었다. 특히 넓은 영역과 좁은 영역 사이에서 배치 품질의 큰 차이는 나타나지 않았으며, 색상 샘플링 기반 배치가 복잡한 문양 구조에도 비교적 안정적으로 적용되었다.

그러나 일부 차이도 확인되었다. 특히 외곽선에 채워진 색상 영역은 3D 모델 변환 과정에서 뚫리지 않는 폐쇄적 형태로 나타났다. 이는 2D 이미지에서 시각적으로는 경계와 내부 공간이 분리되어 보이더라도, 3D 메시 변환 과정에서는 해당 영역이 하나의 닫힌 면으로 처리될 수 있기 때문이다. 이 문제는 복잡한 장식 도상의 내부 구멍, 외곽선, 색상 경계가 3D 메시화 과정에서 충분히 분리되지 않을 때 발생하는 한계로 볼 수 있다.

3. Scale 및 배치 수 변화에 따른 결과 비교

본 논문에서는 오브젝트 scale과 최대 배치 수를 조정하면서 배치 결과의 차이를 비교하였다. 이 비교는 정량적 성능 평가라기보다, 모래 만달라의 시각적 밀도와 패턴 가독성이 어떤 조건에서 안정적으로 나타나는지를 확인하기 위한 구현 단계의 조건 비교이다. 비교 조건은 scale 0.01, scale 0.1, 그리고 최대 배치 수 조정 조건으로 구성하였다. 조건별 결과는 [표 4]와 같다.

Scale 0.01 조건에서는 많은 수의 오브젝트를 배치할 수 있었지만, 오브젝트가 지나치게 작게 나타나면서 개별 입자 형태가 잘 드러나지 않았다. 이 경우 색상 분포는 전체적으로 유지되지만, 만달라 문양의 경계와 반복 구조가 흐릿하게 보일 수 있다. 반면 scale 0.1 조건에서는 개별 암석형

표 4. Scale 및 배치 수 조건별 결과 비교
Table 4. Comparison of results by scale and object count conditions

Condition	Scale	Max Objects	Max Spawn Attempts	Frame Rate	Result Characteristics
A	0.01	500,000	5,000,000	10~15 FPS	A high-density particle distribution is formed, but individual object legibility and pattern visibility are reduced.
B	0.1	50,000	500,000	90 FPS	The overall color segmentation and primary patterns are revealed relatively clearly.
C	0.1	200,000	2,000,000	45~60 FPS	Particle density increases, enhancing the sand texture, but crowding/complexity increases at some boundary regions.

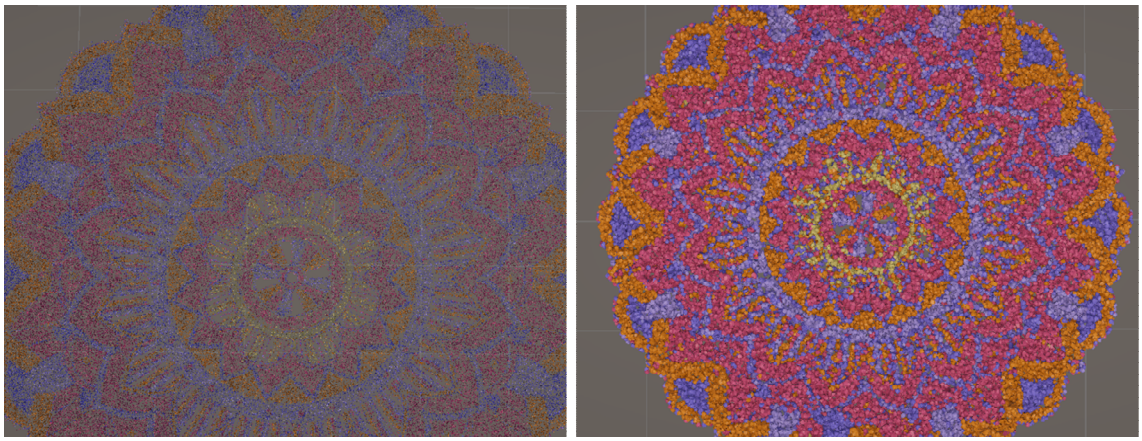

그림 4. Scale 및 Max Objects 조건에 따른 대표 배치 결과 비교
Fig. 4. Representative comparison of placement results according to scale and max object conditions

오브젝트의 형태가 더 뚜렷하게 나타나며, 원본 이미지의 색상 구획과 중심 대칭 구조도 비교적 선명하게 확인되었다.

Max Objects 값을 50,000에서 200,000으로 높인 경우, 오브젝트 밀도가 증가하면서 모래 만달라의 입자감은 강화되었다. 그러나 지나치게 높은 밀도는 색상 경계부의 혼잡도를 증가시킬 수 있으며, VR 환경에서는 렌더링 부담도 함께 커질 수 있다. 실시간 렌더링 환경에서는 시각적 복잡도와 실행 성능이 함께 고려되어야 하므로[8], 단순히 많은 수의 오브젝트를 배치하는 것이 항상 좋은 결과로 이어지는 것은 아니다. Scale 및 배치 수 조건에 따른 대표적 시각적 차이는 [그림 4]와 같다.

이 비교를 통해 본 논문의 파이프라인에서 scale과 최대 배치 수는 단순한 기술 매개변수가 아니라, 모래 만달라의 시각적 해상도와 입자감을 조절하는 표현 매개변수로 기능함을 확인할 수 있다. 작은 scale은 높은 밀도를 가능하게 하지만 패턴 식별성을 약화시킬 수 있고, 큰 scale은 입자감을 강화하지만 배치 수가 증가할 경우 경계 혼잡과 렌더링 부담을 증가시킬 수 있다. 따라서 VR 모래 만달라 구현에서는 원본 패턴의 가독성, 입자적 질감, 실행 가능성 사이의 균형이 중요하다. 본 비교에서는 scale 0.1, Max Objects 50,000 조건이 원본 색상 구획의 가독성과 암석형 오브젝트의 입자감을 비교적 균형 있게 유지하는 조건으로 확인되었다.

4. VR 모래 만달라 구현 가능성

앞선 결과를 종합하면, 본 논문의 색상 구획 기반 배치 파이프라인은 2D 만달라 이미지를 VR 환경의 3D 오브젝트 구조로 전환하는 데 적용 가능함을 보여준다. 입력 이미지의 색상 정보는 단순한 표면 색상으로 사용된 것이 아니라, 오브젝트의 배치 영역을 판별하고, 색상별 프리팹을 선택하며, 배경 영역을 제외하는 기준으로 작동하였다. 이를 통해 원본 만달라의 주요 색상 구획과 중심 대칭 구조를 유지하면서, 모래 만달라의 입자적 질감을 3D 공간에서 재구성할 수 있었다.

이 결과는 *Medicine Buddha NanoMandala*의 기존 이미지·영상 기반 시각 구조를 VR 환경으로 확장하기 위한 기초 제작 방식으로 의미를 가진다. 기존 작업이 서로 다른 스케일의 이미지를 연결하여 만달라의 시각적·과학적 의미를 구성했다면, 본 논문의 파이프라인은 그 이미지를 관객이 이동하고 근접 관찰할 수 있는 3D 장면으로 변환하기 위한 기술적 기반을 제공한다. 특히 단일 텍스처를 사용하는 방식이 아니라 다수의 암석형 오브젝트를 색상 구획에 따라 배치함으로써, 모래 입자의 물질감과 시각적 밀도를 VR 장면 안에서 표현할 수 있었다.

다만 본 논문의 결과는 완성된 VR 체험의 효과를 검증한 것이 아니라, VR 모래 만달라 구현을 위한 제작 파이프라인의 가능성을 확인한 사례에 해당한다. 결과 검토는 동일한 카메라 좌표를 기준으로 한 육안 비교를 중심으로 이루

어졌으며, 다양한 입력 이미지, HMD 기반 실행 성능, 사용자 체험에 대한 검증은 후속 연구에서 다룰 필요가 있다.

Ⅴ. 결 론

본 논문은 *Medicine Buddha NanoMandala*의 VR 확장을 위한 선행 구현 연구로서, 장식적 2D 만달라 이미지를 3D 오브젝트 기반의 가상환경으로 전환하는 색상 구획 기반 절차적 파이프라인을 제안하였다. 이를 위해 입력 만달라 이미지의 색상 정보를 기준으로 암석형 3D 오브젝트를 자동 배치하고, raycast 기반 후보점 추출과 흰색 배경 영역 제외 규칙을 결합하여 원본 도상의 색상 구획과 공백 구조를 함께 반영하였다.

구현 결과, 색상 정보는 단순한 재질 속성이 아니라 오브젝트 배치, 프리팹 선택, 배경 영역 제외, 후처리를 연결하는 핵심 제어 변수로 기능하였다. 또한 암석형 오브젝트를 색상 구획에 따라 배치함으로써, 모래 만달라의 입자적 질감과 시각적 밀도를 3D 공간에서 재구성할 수 있음을 확인하였다. Scale 및 최대 배치 수 비교에서는 오브젝트의 크기와 밀도가 원본 패턴의 가독성, 입자감, 실행 가능성에 직접적인 영향을 미친다는 점을 확인하였다.

본 논문의 의의는 장식적 2D 도상을 단순히 3D 형상으로 변환하는 데 있지 않다. 오히려 색상, 경계, 공백, 반복 패턴이 결합된 도상의 시각 구조를 3D 배치 규칙으로 전환하고, 이를 VR 장면 제작에 활용할 수 있는 파이프라인을 제시했다는 데 있다. 특히 본 구현은 기존 이미지·영상 기반 *Medicine Buddha NanoMandala* 작업을 사용자의 이동과 근접 관찰이 가능한 VR 환경으로 확장하기 위한 기초 제작 방법으로 활용될 수 있다.

다만 본 논문은 하나의 만달라 이미지와 제한된 자산 세트를 대상으로 한 구현 사례이며, 결과 평가는 동일한 카메라 좌표를 기준으로 한 육안 비교에 머물렀다. 또한 VR 환경을 위한 모델 구현이지만 실제 HMD 기반 실시간 성능 평가나 사용자 체험 평가를 수행하지 못했다는 명확한 한계가 존재한다. 또한 2D 외곽선을 3D 메시로 변환하는 과정에서 일부 내부 구멍이 분리되지 못하고 폐쇄된 면으로 처리되는 시각적 오류가 관찰되기도 하였다. 후속 연구에서는 다양한 만달라 이미지에 대한 적용 가능성, 실제 VR 환경에서의 쾌적한 프레임레이트와 사용자 경험 검증을 함께 수행할 필요가 있다.

참 고 문 헌 (References)

[1] M. Hendrikx, S. Meijer, J. van der Velden, and A. Iosup, “Procedural Content Generation for Games: A Survey,” *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, Vol.9, No.1, Article 1, pp.1-22, 2013.
doi: https://doi.org/10.1145/2422956.2422957

[2] R. M. Smelik, T. Tutenel, R. Bidarra, and B. Beneš, “A Survey on Procedural Modelling for Virtual Worlds,” *Computer Graphics Forum*, Vol.33, No.6, pp.31-50, 2014.
doi: https://doi.org/10.1111/cgf.12276

[3] Victoria Vesna, Medicine Buddha NanoMandala, https://victoriavesna.com/project/medicine-buddha-nanomandala/ (accessed May 14, 2026).

[4] J. Jerald, *The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality, Association for Computing* Machinery and Morgan & Claypool Publishers, New York, 2015.
doi: https://doi.org/10.1145/2792790

[5] M. Slater and M. V. Sanchez-Vives, “Enhancing Our Lives with Immersive Virtual Reality,” *Frontiers in Robotics and AI*, Vol.3, Article 74, 2016.
doi: https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00074

[6] P. Müller, P. Wonka, S. Haegler, A. Ulmer, and L. Van Gool, “Procedural Modeling of Buildings,” *ACM Transactions on Graphics*, Vol.25, No.3, pp.614-623, July 2006.
doi: https://doi.org/10.1145/1141911.1141931

[7] P. Müller, G. Zeng, P. Wonka, and L. Van Gool, “Image-Based Procedural Modeling of Facades,” *ACM Transactions on Graphics*, Vol.26, No.3, Article 85, pp.1-9, July 2007.
doi: https://doi.org/10.1145/1239451.1239536

[8] T. Akenine-Möller, E. Haines, N. Hoffman, A. Pesce, M. Iwanicki, and S. Hillaire, *Real-Time Rendering*, 4th ed., A K Peters/CRC Press, Boca Raton, 2018.
doi: https://doi.org/10.1201/b22086

저 자 소 개

이 상 훈

- 2021년 2월 : 한신대학교 컴퓨터공학부 학사
- 2024년 2월 : 중앙대학교 게임공학 석사
- 2026년 3월 ~ 현재 : 중앙대학교 가상융합학과 박사과정
- ORCID : https://orcid.org/0009-0009-8331-3515
- 주관심분야 : XR, 3D Engine

한 상 임

- 2013년 : School of the Art Institute of Chicago BFA
- 2017년 : University of California Los Angeles MFA
- 2025년 3월 ~ 현재 : 조교수, 중앙대학교 첨단영상대학원
- ORCID : https://orcid.org/0009-0008-5134-5275
- 주관심분야 : 인공지능 예술, 미디어아트, 현대미술, 게임엔진