

공공도서관 목조건축 기획설계에서의 생성형 AI 적용 연구

A Study on the Application of Generative AI in the Conceptual Design of Timber-structure Public Libraries

○옥 동 준* 박 무 경* 조 경 익* 윤 정 원**
Ok, Dongjun Park, Mu-Gyeong Jo, Gyeong-Ik Yoon, Jungwon

Abstract

This study proposes a Generative AI (GAI) workflow for the conceptual design of timber-structure public libraries. Focusing on a approximately 4,000m² public library, the research aims to explore the integration of GAI in designing timber structures that meet both aesthetic and structural requirements. Using a combination of Stable Diffusion(SD), LoRA, ControlNet, and IP-Adapter, we developed a sophisticated method to generate realistic design images. This workflow specifically utilized ControlNet to maintain structural integrity and a coherent layout, while LoRA and IP-Adapter are crucial for rendering rich, authentic material textures. Our findings demonstrate GAI's potential as a powerful tool for creative ideation and rapid visualization in architectural design. This approach provides a viable method for contributing to the revitalization of timber architecture in public space.

키워드 : 목구조, 도서관, 스테이블 디퓨전, 인공지능, 생성형 인공지능

Keywords : Timber Structure, Library, Stable Diffusion, Artificial Intelligence (AI), Generative AI (GAI)

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

지구온난화와 기후변화는 현대 사회의 가장 시급한 과제로 부상하였으며, 이에 대응하기 위한 국제적 노력이 강화되고 있다. 유엔기후협약(UNFCCC)부터 파리 협정에 이르기까지, 전 세계는 온실가스 배출량 감축을 핵심 목표로 설정하고 있다. 특히 온실가스 배출량의 대부분을 차지하는 이산화탄소를 효과적으로 줄이는 방안이 중요해지면서, 대기 중 이산화탄소를 흡수하고 벌목 후에도 탄소를 장기간 저장하는 유일한 건축 재료인 목재가 주목받고 있다(IPCC, 2023; Kim, 2022). 건축 분야는 많은 양의 재료를 소비하는 특성상 목구조의 활용이 탄소 저감에 크게 기여할 수 있다.

이미 선진국에서는 목재 활용을 위한 정책적 노력이 활발히 이루어지고 있다. 일본의 경우 '공공건축물 등의 목재 이용 촉진에 관한 법률' 시행 후 저층 건축물의 목조 확률이 90%를 넘어서는 등 목조건축 시장을 성공적으로 확대하였다. 국내에서도 목조건축에 대한 관심이 증가하여 2000년부터 2020년까지 목조건축물이 11배 이상 증가하는 양적 성장을 이루었으나(Kwon, 2020), Jeon & Kim(2022)에 따르면 공공성이 높은 생활 SOC 시설에 목구조가 적용된

사례는 여전히 드물다. 이는 목재 건축의 장점에도 불구하고 공공 건축 분야에서의 인식 개선 및 제도적 지원이 미흡함을 시사한다.

따라서 본 연구는 기후 변화 대응 및 탄소 저감을 위한 목구조 설계의 활성화를 목적으로 한다. 특히, 기존 설계 방식의 한계를 극복하고 사용자의 아이디어와 의견을 효과적으로 반영하기 위해 GAI를 활용한 새로운 워크플로우를 제안하고자 한다. 본 연구는 다양한 AI 도구를 활용하여 목구조 공공도서관의 기획설계안을 실험하고, 이를 통해 지속가능한 건축 분야에서 GAI가 제공할 수 있는 새로운 브레인스토밍 및 시각화 방법론을 제시하는 것을 목적으로 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 사례연구의 일환으로, 강북구 문화공원 내 공공도서관 건립을 가정하여 이미지 생성 AI인 Stable Diffusion(SD)을 활용해 목구조 건축을 시뮬레이션하였다. 학습 데이터는 목구조의 다양한 디자인과 미적 특성이 잘 드러나는 일본의 목조 공공도서관 사례를 선정하였다. 구체적으로, 아키타 국제교양대학(AIJ) 도서관, 기후 미디어 코스모스 도서관, 다케오 시립도서관을 조사해 LoRa(Low-Rank Adaptation) 학습 데이터를 구축하였다. 이후 구축된 데이터를 건축물의 형태와 구조적 안정성을 제어하는 ControlNet 및 이미지의 질감과 분위기를 적용하는 IP-Adapter와 함께 적용하여 기획설계 매스에 목구조 디자인을 구현하였다. 본 연구의 절차는 그림 1과 같다.

* 서울시립대학교 건축학부(건축학전공) 학부과정

** 서울시립대학교 건축학부(건축학전공) 교수

(Corresponding author: Department of Architecture, University of Seoul, jwyoona@uos.ac.kr)

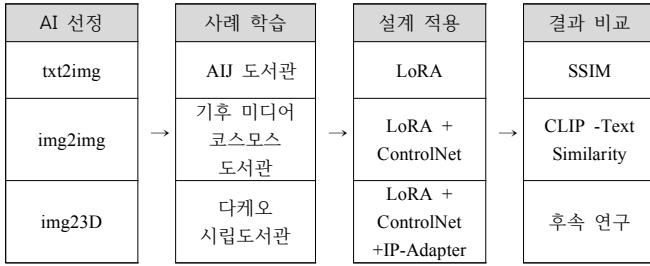


그림 1. Workflow Diagram

2. 선행연구 및 GAI 고찰

2.1 선행연구 고찰

국내외 건축 분야에서 GAI를 활용한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. Lee & Ko(2023)는 SD를 활용하여 미적, 감정적 프롬프트를 특정 건축 양식이나 건축가 스타일로 시각화하는 초기 연구를 수행하였다. 이들은 AI의 잠재력을 확인하면서도, 3차원적 형태 구현에 한계가 있음을 지적하였다. Shin(2024)은 ChatGPT와 DALL.E를 활용하여 AI가 건축적 작업을 수행할 수 있는지 다각도로 평가하였다. 이러한 연구들은 AI가 설계 초기 단계의 아이디어 구상부터 도면 분석에 이르기까지 중요한 역할을 수행할 수 있음을 보여준다.

해외 연구에서도 유사한 경향이 나타난다. Wang et al.(2025)은 SD를 활용해 중국 전통 정원의 마스터플랜을 설계하며, 색분할 기반 UI를 통해 전문가와 비전문가 모두가 높은 공간 정확도와 미적 충실도를 갖춘 결과물을 도출할 수 있음을 입증하였다.

표 1. 선행 연구 고찰 요약

선행연구	AI 도구	주요 내용 및 시사점
Lee & Ko (2023)	SD	- 국내 건축 분야 초기 연구 - 입면 생성을 통한 창의적인 결과물 확인 - 디자인 과정 도구
Shin (2024)	ChatGPT, DALL.E	- AI의 대지 이해 - 건축 스케치 이해 - 스케치 기반 이미지 생성 - 창의적 아이디어 제공 - 건축가 역할 수행 가능성
Wang et al. (2025)	SD	- 전통 정원 마스터플랜 설계안 도출 - 사용자 참여 설계 - 높은 공간 정확도와 미적 충실도

이러한 선행연구들은 공통적으로 AI가 건축 설계 과정의 보조적 도구로서 유용하다는 점을 확인했으나, 대부분의 연구가 건축물의 외부 모습이나 마스터플랜과 같은 거시적 스케일에 집중되어 있다. 이에 본 연구는 선행연구와 달리 목구조의 특징이 잘 드러나는 건축물 내부 공간의 시각화에 집중하여 차별점을 둔다. 또한, 선행연구에서 제기되었던 입체적 형태 구성의 어려움과 같은 한계가 AI 도구의 발전으로 어느 정도 해결 가능한지 파악하고, 이를 통해 목구조 건축 분야에서 GAI의 미래 활용 가능성을 모색하고자 한다. 선행연구에 대한 구체적인 요약은 표 1에 제시되어 있다.

2.2 GAI 비교를 통한 img2img 선정과 테스트

(1) GAI 비교를 통한 Image-To-Image 선정

연구에 앞서 여러 가지 GAI를 비교 및 테스트하여 사용할 AI를 선정하였는데, Text-to-Image(txt2img), Image-To-Image(img2img), Image-To-3D(img23D)의 방식들을 문헌 고찰과 간략한 실험을 통해 비교하였다. 그 결과, 본 연구에서는 img2img 방식을 선정하였다.

(2) img2img 테스트

구조가 잘 드러난 일본의 목구조 공공도서관을 학습시킨 후 매스에 적용하는 워크플로우를 구상하였기 때문에 img2img 방식을 테스트하였다. Flux.1 Dev, SD1.5을 동일한 입력 이미지, 동일한 프롬프트를 사용하여 이미지를 생성하였다. 각 모델의 구조 재현 능력을 테스트하기 위해 라이노에서 목구조를 모델링하여 이미지로 내보낸 후 입력 이미지로 사용하였다. 프롬프트로 ‘A realistic image of eco-friendly library features timber as its primary structure, showcasing sustainable architecture through a warm and natural interior that enhances the indoor atmosphere.’를 입력하였다.

표 2. img2img AI 테스트 결과

GAI	출력
Flux.1 -dev	
Stable Diffusion 1.5	

(3) 테스트 결과

img2img 모델의 테스트 결과, Flux.1-dev는 뛰어난 시각적 완성도를 보였으나 입력 이미지를 거의 반영하지 못하는 한계가 있었다. 반면, SD 1.5는 입력 이미지의 특징을 충실히 반영하였으나 상대적으로 이미지 품질이 낮았다.

그럼에도 불구하고 SD 1.5를 최종 모델로 본 연구에서 선정하였는데, 그 이유는 다음과 같다. 첫째, SD는 이미 보편적으로 활용되고 있어 관련 자료가 풍부하다. 둘째, LoRA, ControlNet, IP-Adapter 등 다양한 확장 기능과의 뛰어난 호환성을 통해 입력 이미지의 변수를 정밀하게 제어할 수 있다. 셋째, 업스케일링 과정을 통해 최종 이미지의 품질을 효과적으로 개선할 수 있다고 판단하였다.

3. 목조 공공도서관에 대한 GAI 적용 실험

3.1 목조 공공도서관 사례 선정

본 연구는 목구조 설계의 특징을 학습하기 위해 구조 방식이 각기 다른 일본 목조 도서관 사례 세 곳을 선정하였다. 목구조의 시각적 특징이 잘 드러나는 AIJ 도서관, 기후 미디어 코스모스 도서관, 다케오 시립도서관을 학습

데이터 수집 대상으로 삼았다. 이들 사례는 각각 다른 구조 시스템과 재료를 사용하여 목구조의 다양성을 포괄적으로 반영한다. 선정된 도서관들의 주요 구조 재료와 시스템은 다음 표 3에 요약되어 있다.

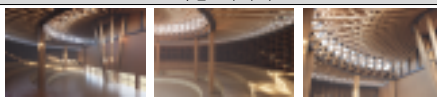
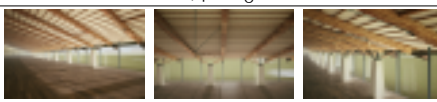
표 3. 목조 공공도서관 사례

도서관명 (연도)	AIJ 도서관 (1993)	기후 미디어 코스모스 (2015)	다케오 시립 도서관 (2000)
건축가	센다 미츠루	이토 토요	Klein Dytham Architecture (KDA): 리노베이션
구조 재료	RC, 목조(지붕)	RC, S, 목조 (지붕)	RC, 하이브리드 (지붕)
구조 시스템			
단면 다이어그램			

AIJ 도서관은 지역 자재인 아키타 삼나무를 활용하여 방사형 이중 조립보 구조를 구현했다. 전통적인 이음 및 맞춤 방식을 적용해 복잡한 접합부의 미적, 경제적 문제를 해결했다는 특징이 있다. 기후 미디어 코스모스 도서관은 폭 120mm, 두께 20mm의 얇은 편백나무를 세 방향으로 겹쳐 곡면의 지붕을 구성한 독특한 구조를 선보인다. 다케오 시립도서관은 철근 콘크리트 기둥과 목조 트러스 지붕을 결합한 하이브리드 구조를 채택하여 목조건축의 다양한 가능성을 보여주는 사례로 평가된다.

3.2 LoRA 학습

표 4. 학습 이미지

도서관명	학습 이미지
AIJ 도서관	 外 9장
기후 미디어 코스모스	 外 12장
다케오 시립 도서관	 外 10장

LoRA 학습을 위해서 표 4와 같이 Rhino에서 구조를 모델링하고 D5를 통해 사례마다 10장 이상에 다양한 각도의 이미지를 생성한다. 이후, 모델 학습 조건으로 배치 크기를 3으로 설정하였으며, 총 15 에포크(epoch) 내에서 최대 1600 스텝(step)에 도달하면 학습이 종료되도록 설정하였다. 모델의 가중치는 안정적인 학습 경과 확인을 위해 에포크마다 저장하였다.

4. 도서관 설계안에 대한 GAI 병합실험

4.1 데이터 준비 및 전처리

본 연구는 공공도서관 설계에 GAI를 적용하여 국내 목재 활성화 사업에 따른 목구조 적용 가능성을 탐구하고자 한다. 이를 위해, 그림 2와 같이 Rhino에서 추출한 실내 구조 렌더링 이미지를 기본 입력데이터로 활용하였다.

입력 이미지의 해상도는 1024x512로 설정하였다. 또한, Photoshop을 사용하여 스케일 인지도를 높이기 위한 인물 이미지를 추가하였으며, 각 사례의 구조적 특징이 명확하게 반영되도록 부족한 구조 라인을 보강하였다. 이미지 데이터의 일관된 색상 출력을 보장하기 위해 모든 이미지는 sRGB로 정규화하고 감마 조정을 거쳤다.

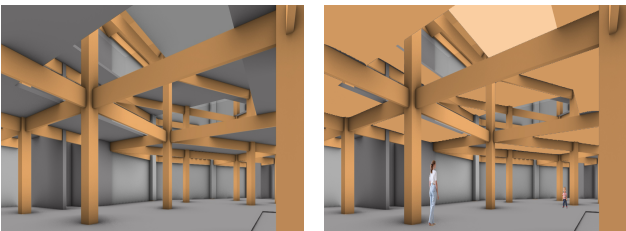


그림 2. 기본 입력데이터와 전처리 과정

4.2 파이프라인 구성 및 모델 설정



그림 3. ComfyUI 파이프라인

ComfyUI 파이프라인은 SD 1.5 모델을 기반으로 텍스트 인코딩, LoRA 로딩, ControlNet 조건 설정, 그리고 IP-Adapter를 통한 텍스처 주입 순으로 구성된다. 파이프라인의 첫 단계는 입력 이미지와 마스크를 로딩하고 VAE 인코더를 통해 이미지의 잠재 공간을 추출하는 과정이다. 그 후, 선행 학습한 LoRA 모델을 적용하여 목재 질감과 구조 디테일에 대한 학습 정보를 입력 이미지에 반영한다. 다음으로 ControlNet을 사용하여 이미지의 형태와 볼륨을 보존하며, 라인(line)과 깊이(depth)를 조건으로 설정한다. 이후 IP-Adapter를 통해 텍스처를 주입함으로써 목재의 결 방향과 세부 디테일을 강조한다. 마지막으로, KSampler를 사용하여 샘플링을 진행하고, VAE 디코딩을 통해 최종 결과 이미지를 생성한다. 출력된 모든 이미지는 메타데이터와 함께 저장되며, 실험의 재현성을 위해 Seed 값과 주요 파라미터도 함께 기록한다. 전체 파이프라인은 그림 3에 제시되어 있다.

4.3 출력 및 후처리

이미지 생성 절차는 크게 세 단계로 이루어진다. 먼저, Rhino에서 캡처한 입력이미지를 로드한 후 LoRA 모델을 적용해 목재의 질감과 구조적 특성을 강화한다. 이어서 ControlNet을 활용하여 입력이미지의 형상과 볼륨을 보존하며, IP-Adapter를 통해 레퍼런스 이미지의 목재 텍스처와 색조를 주입하여 자연스러운 질감을 구현한다. 이 과정에서 KSampler를 사용하여 샘플링하며, denoise strength와 steps를 조절하여 이미지의 완성도를 최적화한다. 다음으로, 생성된 이미지는 VAE 디코딩을 거쳐 출력되며, Flux 모델을 사용해 해상도를 높이는 업스케일링 작업을 진행한다. 동시에 국부 인페인팅을 통해 디테일이 부족한 부분을 보완하여 이미지 품질을 향상시킨다.

모든 출력 이미지는 실험의 재현성을 위해 사용된 파라미터와 Seed 값을 포함하여 저장된다. 학습 데이터에 따른 출력 이미지는 표 5에 제시되어 있다.

표 5. 사례 도서관 학습데이터에 따른 출력 이미지

도서관명	출력 이미지
AIJ 도서관	
기후 미디어 코스모스	
다케오시립 도서관	

4.4 비교 및 평가

표 6. GAI 디자인 적용단계 비교

비교군	LoRA 단독	LoRA+ControlNet	LoRA+ControlNet+IP-Adapter
출력 이미지			
평가	형상 보존도 부족함	재질 충실도 부족함	모든 면 적함

디자인 적용 단계에서는 LoRA만 적용한 경우, LoRA+ControlNet을 적용한 경우, LoRA+ControlNet+IP-Adapter를

적용한 경우를 비교군으로 설정하였다. 비교는 형상 보존, 재질 충실도, 접합부 현실감을 주요 평가 기준으로 하여 정성적 평가를 진행하였다. 그 결과, 표 6과 같이 LoRA+ControlNet+IP-Adapter를 모두 결합한 모델이 목구조의 재질 충실도와 형상 보존에서 가장 뛰어난 성능을 보였다.

5. 결론

본 연구는 기후 변화 대응 및 탄소 저감을 위한 목구조 건축 활성화 방안으로 GAI를 활용한 공공도서관 기획설계 워크플로우를 구축하고 그 가능성을 탐구하는 데 목적을 두었다. 강북구 문화공원 내 공공도서관 사례에 GAI를 적용함으로써, 국내 목구조 활성화에 기여할 수 있는 초기 디자인 방법의 잠재력을 확인했다.

SD 모델을 기반으로 LoRA, ControlNet, IP-Adapter를 결합한 워크플로우는 기존의 목구조 건축 설계 방식과 차별화된 결과를 도출했다. 특히, LoRA를 통해 학습된 사례의 구조적 특징과 재질감을 효과적으로 반영했으며, ControlNet과 IP-Adapter의 결합을 통해 초기 매스의 형상을 유지하면서도 사실적인 목재 질감을 구현할 수 있었다. 이는 기획설계 단계에서 사용자의 상상력과 아이디어를 빠르고 효과적으로 시각화하는 강력한 보조 도구로서 GAI의 역할을 증명한다.

이러한 연구 결과는 GAI가 건축 설계 분야에서 창의적인 아이디어 제공 및 시뮬레이션을 지원하는 데 매우 유용함을 시사한다. 앞으로의 기술 발전에 따라 GAI는 건축 산업에 더 큰 혁신을 가져올 것으로 기대된다.

참고문헌

- 권용수 (2020). 일본의 공공건축물 목재 이용 촉진과 시사점. 건축과 도시공간, 38(2020-06), 50-51.
- 김윤미. (2023). 중·고층 하이브리드 목조건축물의 유형 분석 및 구조적 특성 연구. (석사학위논문, 명지대학교 대학원 건축학과).
- 김철기. (2022). 탄소중립 시대에서의 목조건축. 한국강구조학회지, 34(4), 69-71.
- 신동윤. (2024). AI의 역할과 활용: 건축 디자인에서 ChatGPT와 DALL.E의 통합적 접근. 대한건축학회논문집, 40(2), 67-76.
- 이동호, 고성학. (2023). AI 이미지 생성기를 통한 건축 이미지 생성 실험 및 활용성 평가. KIEAE Journal, 23(5), 13-22.
- 전영진, 김영훈. (2022). 국내 생활SOC 선도사례를 통해 본 목재사용 현황 분석. 한국생태환경건축학회 학술발표대회 논문집, 22(1), 60-61.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Wang, C., Shi, Y., Ma, C., Xu, H., & Kastner, P. (2025). Reimagining Chinese Garden Design: An interactive approach using Stable Diffusion. CAADRIA2025, 9-18.