

2025년 추계학술발표대회 : 대학생부문

지속가능한 초고층 건축을 위한 프리패브리케이션 3D 프린팅 구조 연구

- 파라메트릭 최적화와 공간 프로그램 통합을 중심으로 -

A Study on Prefabricated 3D Printing Structures for Sustainable High-Rise Architecture

- Focused on Parametric Optimization and Programmatic Integration -

○산 해 성* 김 소 영**
San, Thar Htet Kim, So Young

Abstract

This hypothetical theory project investigates factory-based modular 3D printing as a sustainable alternative for high-rise construction. By parametrically optimizing structural elements such as columns, beams, and slabs according to actual load paths, the approach dramatically reduces concrete consumption and construction waste. Complex building components are fabricated off-site with millimeter precision and transported for rapid on-site assembly, streamlining the construction process while minimizing environmental impact. Embedded sensors within the printed modules enable real-time performance monitoring and algorithmic refinement, ensuring continuous improvement of structural efficiency. The research aims to demonstrate how advanced digital fabrication methods can redefine skyscraper construction by lowering CO₂ emissions, enhancing material efficiency, and establishing new possibilities for sustainable architectural design.

키워드 : 3D 프린팅, 모듈러 건축, 파라메트릭 최적화, 초고층 건축, 지속가능성, 구조 효율성, 디지털 제작

Keywords : 3D Printing, Modular Construction, Parametric Optimization, High-Rise Architecture, Sustainability, Structural Efficiency, Digital Fabrication

1. 서론

1.1 연구의 목적

현대 건축에서 고층 빌딩은 도시의 상징적 존재일 뿐 아니라 사회적, 경제적, 환경적 영향을 동시에 드러내는 중요한 건축 유형이다. 그러나 이러한 초고층 건축은 막대한 양의 콘크리트를 필요로 하며, 이는 생산 과정에서 이산화탄소를 다량 배출하고, 시공 과정에서도 과도한 자원 낭비와 폐기물을 발생시킨다. 전통적인 건설 방식은 거푸집과 대규모 인력, 반복적인 운송 과정에 의존함으로써 효율성이 낮고 환경적 부담을 가중시켜 왔다. 이러한 문제는 건축이 직면한 가장 시급한 과제 중 하나로, 기존의 방식에서 벗어나 지속가능한 대안을 모색해야 할 필요

성을 보여준다.

3D 프린팅 기술은 이러한 한계를 극복할 수 있는 혁신적 방법으로 주목받고 있다. 재료를 층층이 쌓아 올리는 방식은 불필요한 거푸집을 제거하고, 자재 사용을 최소화 하며, 복잡하고 유기적인 형태를 구현할 수 있는 장점을 지닌다. 또한 모듈화된 건축 부재를 공장에서 미리 제작 하여 현장에서 조립하는 시스템은 시공 속도를 높이고, 정밀도를 확보하며, 불필요한 에너지 소비를 줄일 수 있다. 이와 같은 특성은 콘크리트 사용을 절감하고, 이산화탄소 배출을 줄이는 동시에, 건축적 자유도를 확장하는 가능성을 제시한다.

궁극적으로 본 연구의 목적은 3D 프린팅을 기반으로 한 새로운 초고층 건축 방법론을 제시하고, 이를 통해 환경적 부담을 줄이는 동시에 건축의 혁신적 가능성을 탐색 하는 것이다. 이는 단순히 한 가지 기술의 적용을 넘어, 미래 도시를 지탱할 수 있는 지속가능한 고층 건축의 패러다임을 구축하는 데 기여할 것으로 기대된다. =

2. 입력자료 분석

2.1 3D 프린팅 공정

건설 분야에서 3D 프린팅은 거푸집, 대규모 인력, 반복적 절차에 의존하는 기존의 전통적 방식과 근본적으로 다

* 한양대 학사 5학년

** 한양대 건축학과 교수

(Corresponding author : Department of Architecture, Hanyang University, harrythar88@hanyang.ac.kr)

이 연구는 2025년도 저자의 졸업 설계작품 결과의 일부임

른 접근 방식을 제시한다. 콘크리트를 표준화된 거푸집에 타설하는 대신, 디지털 모델을 기반으로 재료를 층층이 적층하여 구조물을 구축함으로써 재료 배치를 정밀하게 제어할 수 있으며, 시공 과정에서 발생하는 오류를 줄이고 불필요한 폐기물을 크게 감소시킨다.

이 방법은 대규모 구조물의 시공에서 특히 혁신적인데, 기존 방식에서는 복잡성과 맞춤화가 비용 상승을 초래했으나 3D 프린팅은 추가적인 비용 부담 없이 복잡한 형상이나 특수 부재를 제작할 수 있다. 이를 통해 기존에 구현하기 어려웠던 건축적 형상을 실현할 수 있으며, 동시에 재료의 효율적 사용을 가능하게 하여 전반적인 공사 비용을 절감하면서 품질의 일관성을 유지한다.

2.2 현장 프린팅과 공장 외부 프린팅

3D 프린팅 건설은 크게 현장 프린팅과 공장 외부 프린팅 방식으로 나눌 수 있으며, 두 방법 모두 디지털 모델링과 적층 제작을 기반으로 하지만 실행 장소와 과정에 따라 고유한 특징과 장점을 가진다.

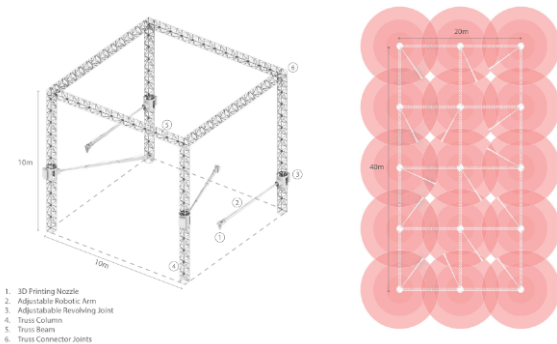


그림1. 모듈형 3D 프린터 (현장 프린팅)

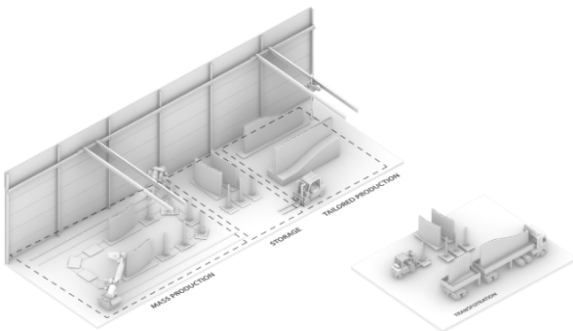


그림2. 공장 외부 프린팅

현장 프린팅은 건설 현장에서 직접 모듈화된 장비를 활용하여 구조물을 적층하는 방식이다. 각 모듈은 약 10미터 구간을 담당하며, 코어 또는 트러스 시스템에 설치된 로봇 팔이 해당 범위에서 연속적으로 수직 프린팅을 수행한다. 여러 구간을 동시에 시공하거나 완성된 후 상부로 이동할 수 있어 공정을 효율적으로 이어갈 수 있다. 이 방식은 대형 부재 운반 부담을 줄이고, 구조와 건축 요소를 실시간으로 통합할 수 있다는 장점이 있다.

공장 외부 프린팅은 기둥, 보, 슬래브, 연결 부재 등을 공장에서 미리 제작한 후 현장으로 운반해 조립하는 방식이다. 정밀한 디지털 모델링을 바탕으로 대형 프린터로 제작된 부재는 양생 과정을 거쳐 운송되며, 현장에서는 강재 이음이나 콘크리트 충전을 통해 결합된다. 이 방식은 품질 관리와 정밀도가 뛰어나며, 자재 낭비와 시공 오류를 줄이고 공사 속도를 높일 수 있다.

2.3 프리패브리케이션 3D 프린팅 구조 시스템

엑소스켈레톤 구조는 건물 외곽에 배치된 프리패브 기둥과 트러스 시스템으로, 디아그리드와 유사하게 높은 안정성을 제공한다. 외곽에서 하중을 지지함으로써 내부 기둥 의존도를 줄이고 공간 활용의 자유도를 넓힌다. 모듈화된 외곽 부재는 공장에서 정밀 제작되어 현장에서 빠르게 조립되며, 강재 이음이나 콘크리트 충전을 통해 구조적 연속성을 확보한다. 이로써 공정이 단순화되고 인력이 절감되며, 시공 오차를 최소화해 신뢰성이 향상된다.

슬래브는 응력 해석을 기반으로 필요한 경로에만 재료를 배치한 최적화 설계로 제작된다. 불필요한 질량을 줄여 경량화하면서 동일한 강도를 유지해 전체 고정하중을 감소시킨다. 프리패브 방식으로 제작된 슬래브는 높은 정밀성과 빠른 시공, 품질 일관성을 보장하며, 자재 사용과 이산화탄소 배출을 줄여 환경적 부담을 최소화한다. 이를 통해 초고층 건축의 구조적 효율성과 지속가능성이 크게 강화된다.

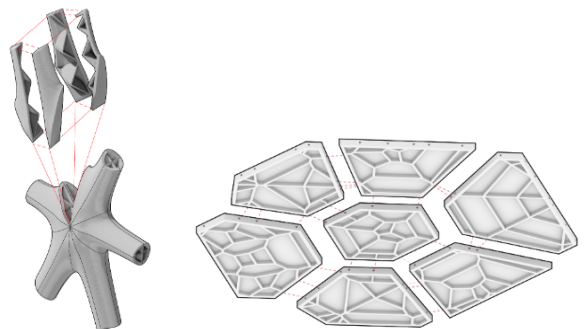


그림3. 사전 제작된 3D 프린팅 구조물 및 슬래브

3. 구조 시스템과 건축 형태

디아그리드 구조 시스템은 기존의 철근콘크리트 골조, 전단벽, 코어-아웃리거 방식과 달리 삼각 격자 형태의 외곽 구조망을 통해 중력과 횡력을 동시에 지지한다. 전통적 방식은 내부 기둥과 대규모 콘크리트 코어에 의존해 자중과 재료 비용이 증가하고 공간 활용이 제한된다. 반면 디아그리드는 하중을 축력(인장·압축)으로 전달하여 효율성을 높이고, 내부 기둥과 코어 규모를 줄일 수 있어 콘크리트 사용량과 CO₂ 배출을 크게 줄이는 지속가능한 해법을 제시한다.

또한 디아그리드는 삼각 격자 외피가 외골격처럼 작용해 횡력 저항 성능이 뛰어나며, 층간 변위와 비틀림을 효과적으로 억제한다. 이는 전통적 구조가 풍하중에서 전단

자연과 큰 변위를 보이는 한계를 극복하고, 하중을 외피 전체에 균등하게 분산시켜 안정성과 쾌적성을 확보한다. 여기에 프리패브와 모듈화 시공을 접목하면, 디아그리드는 구조적 효율성과 환경적 이점을 동시에 실현할 수 있다.

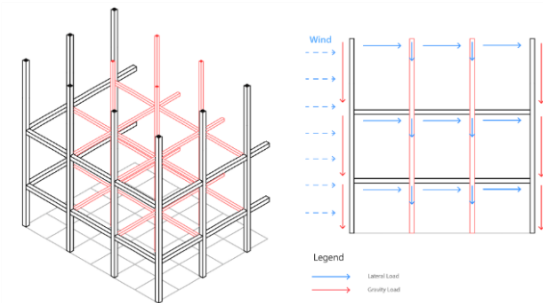


그림4. 일반 구조물 하중 분포

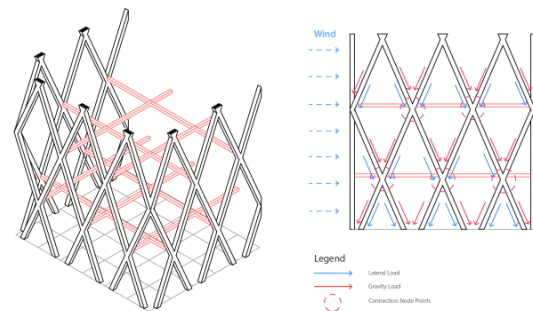


그림5. 디아그리드 구조 하중 분포

3.2 건물 형태와 구조

3D 프린팅 기술은 초고층 건축에서 구조적 요구에 맞춘 자유로운 형상을 구현할 수 있게 한다. 전통적 건설 방식이 효율성을 위해 획일적인 형상을 반복 적용했다면, 적층 제조는 구간별 성능에 따라 형태와 디아그리드 각도를 세밀히 조정할 수 있다. 상부 구간은 바람의 영향을 최소화하기 위해 원형 단면과 $73^{\circ} \sim 77^{\circ}$ 의 각도를 적용하여 와류 발생을 억제하고 안정성을 높인다. 중간 구간은 수직 하중과 강성을 중점적으로 고려해 사각형·팔각형 단면과 $70^{\circ} \sim 72^{\circ}$ 의 각도를 채택하여 하중을 균형 있게 분산한다.

기단부 구간은 상부에서 전달되는 힘이 집중되므로 휨 저항력이 핵심이다. 이 구간은 16~24각형 단면과 약 68° 의 각도를 적용해 접지 면적을 넓히고 횡력을 분산시킨다. 결과적으로 각 구간별 최적화된 형상과 구조 강화는 건물 전체의 강성과 안전성을 보장하는 중요한 요소가 된다.

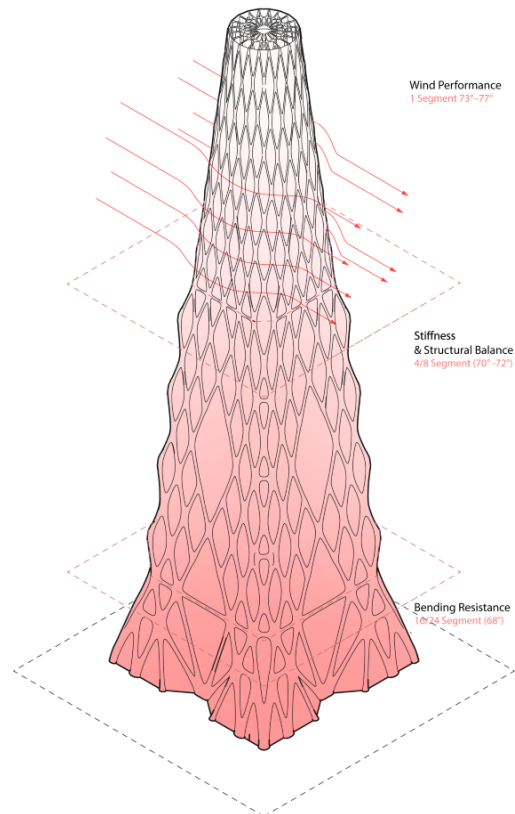


그림6. 디아그리드 각도와 건축 형태

4. 형태와 프로그램의 통합

타워의 기하학적 전환은 단순한 조형적 변화가 아니라 각 구간의 공간 프로그램과 긴밀하게 연계된 구조적 논리이다. 초고층 건축은 기단부, 중간부, 상부로 갈수록 서로 다른 구조적 조건과 기능적 필요를 지니며, 3D 프린팅을 통한 자유로운 형상 구현은 이러한 요구를 수직적으로 반영할 수 있는 기반을 제공한다. 이를 통해 구조적 최적화와 기능적 효율성이 동시에 실현된다.

기단부는 16각형에서 24각형에 이르는 다각형 단면을 적용해 넓고 개방적인 평면을 형성한다. 이러한 구조는 대형 아트리움, 넓은 동선, 유연한 공간 구성을 가능하게 하여 리테일이나 공공성이 강조되는 프로그램에 이상적이다. 중간부에서는 형태가 사각형과 팔각형으로 전환되며, 오피스 기능에 맞춰 균형 잡힌 구조와 단순한 수직 동선을 지원한다. 정형화된 기하학은 효율적인 그리드 계획과 공간 재구성을 용이하게 만들어 업무 공간의 변화하는 수요에 유연하게 대응한다.

상부 구간은 원형 단면을 채택하여 공기역학적 이점을 확보함과 동시에 호텔 프로그램에 최적화된다. 원형 평면은 중앙 코어를 중심으로 객실을 배치해 자연광과 조망을 고르게 제공하고, 순환 동선도 매끄럽게 유지한다. 또한 공용 공간과 프라이빗 공간을 명확히 구분할 수 있어 쾌적하고 기능적인 호텔 환경을 조성한다.

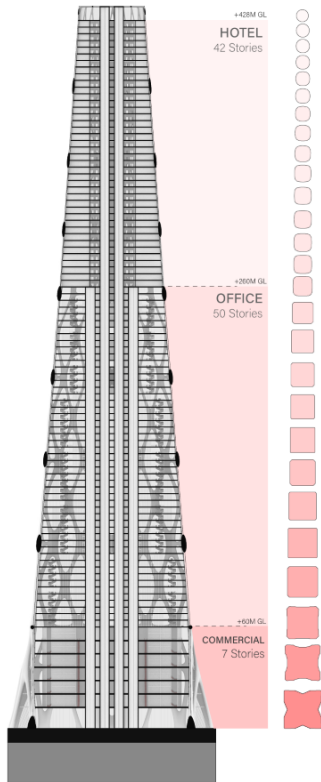


그림7. 단면 및 기하학적 형태 전이

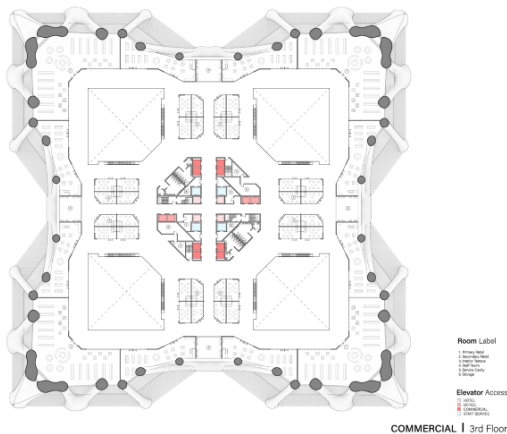


그림8. 상업용 3층

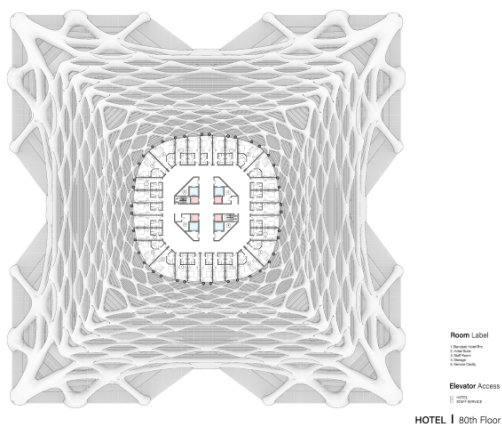


그림9. 호텔 전용 68층

5. 결론

결론적으로, 본 연구는 3D 프린팅이 초고층 건축에서 콘크리트 사용을 줄이고 이산화탄소 배출을 감소시키며, 구조적·프로그램적 요구에 대응하는 자유로운 형상을 구현함으로써 새로운 가능성을 제시할 수 있음을 보여준다. 현장 프린팅과 공장 외부 프린팅을 파라메트릭 최적화와 결합함으로써 건물 형태는 효율적으로 진화하며, 상업·오피스·호텔 구간에 걸쳐 기능적 명료성을 유지한다. 재료 효율성, 구조적 논리, 프로그램 통합을 아우르는 이러한 전략은 초고층 건축의 지속가능하고 혁신적인 미래를 위한 새로운 접근 방식을 제시한다.

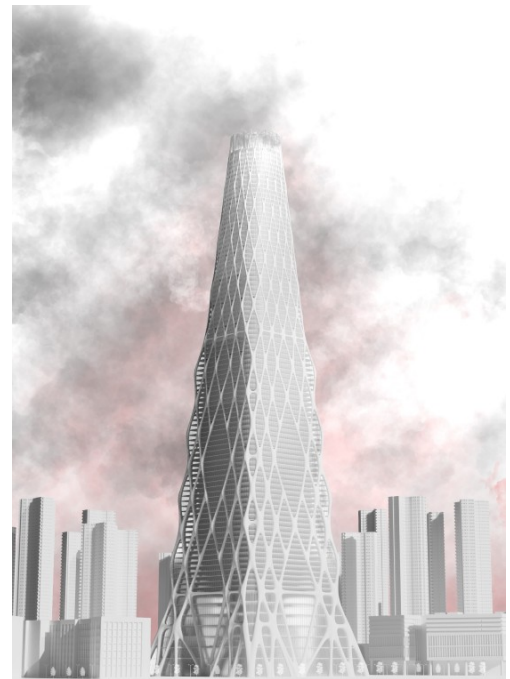


그림9. 입면 렌더링

참고문헌

1. Hossain, M. A.; Zhumabekova, A.; Paul, S. C.; Kim, J. R., A Review of 3D Printing in Construction and its Impact on the Labor Market, Sustainability, 2020
2. Scaramozzino, D., Selection of the Optimal Diagrid Patterns in Tall Buildings, Engineering Structures, 2022
3. Moon, K. S., Optimal Grid Geometry of Diagrid Structures for Tall Buildings, Architectural Science Review, 2008
4. Zhi, Yefan; Teng, Teng; Akbarzadeh, Masoud, Designing 3D-printed concrete structures with scaled fabrication models, Architectural Intelligence, 2024
5. Scott, Clare, WASP Introduces the Modular WASP Crane Construction 3D Printer, 3DPrint.com, 2018
6. Yang, J.; Lu, X.; Li, X., Optimal Diagrid Patterns for Tall Buildings, Engineering Structures, 2020