Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 24, No. 12 pp. 605-612, 2023

https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.12.605
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

생성형 디자인 기법을 활용한 트러스 구조물 설계 자동화 알고리즘 구축

이재욱[1], 조원호[2], 김소연[3], 이종호[1*]
[1]한국건설기술연구원, [2]상상진화, [3]연세대학교 건축공학과

Establish an Algorithm for the Design Automation of Truss Structures using Generative Design Techniques

Jae-Wook Lee[1], Won-Ho Cho[2], So-Yeon Kim[3], Jong-Ho Lee[1*]
[1]Korea Institute of Civil Engineering & Building Technology
[2]Imagine Builder
[3]Department of Architecture & Architectural Engineering, Yonsei University

요 약 트러스 구조물은 그 구조적 특성과 설계 원칙 때문에 널리 활용되는 구조물로, 기존 연구에서는 트러스 설계는 설계자가 수행하고 대부분 구조해석 관련 연구가 진행되고 있다. 또한 낮은 건설산업 생산성 및 고령화된 건설 인력의 문제가 대두하면서 스마트 건설에 관한 연구가 증가하고 있는 추세이다. 이 연구는 생성형 디자인(Generative Design)의 중요성과 그 기술을 이용한 트러스 구조 설계의 자동화 방법론에 중점을 두고 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 비쥬얼 프로그래밍 기법을 활용한 세 가지 단계(Step 1: 트러스 기본구조, Step 2: 생성형 디자인을 적용한 트러스 변형 구조, Step 3: 비선형 알고리즘을 추가한 상단부 이형적 트러스 구조)를 제시하여 트러스 구조 설계의 복잡성을 효과적으로 탐색하고 평가하였다. 결과적으로 본 연구는 트러스 구조 설계에 있어서 생성형 디자인의 적용 가능성을 탐구하는 새로운 접근법을 제시하였으며 이를 통하여 전통적인 구조 디자인 방식을 개선 및 보완할 수 있는 대안을 제시하였다.

Abstract Truss structures are used widely because of their structural characteristics and design principles. In current research, truss design is typically undertaken by designers, and a significant amount of research has focused on structural analysis. Furthermore, with the emerging issues of low productivity in the construction industry and an aging workforce, there is an increasing emphasis on research in smart construction. This study emphasized the importance of generative design and its application in automating truss structure design methodologies. This paper proposes a three-step process (Step 1: Basic Truss Structure, Step 2: Truss Design Transformation with Generative Design, and Step 3: Advanced Truss Structure with the Integration of Non-linear Algorithms) utilizing visual programming techniques to evaluate the complexities of truss structure design. As a result, this study introduced a novel approach to examine the feasibility of using generative design in truss structural design. The results reveal an alternative to enhance and supplement conventional structural design methods.

Keywords : Building Information Modeling(BIM), Generative Design, Truss Structure, Design Automation, Civil Engineering

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(적립금사업)사업으로 수행되었습니다. (과제번호 20230410-001, 복합플랜트 건설 디지털화를 위한 파이프랙 설계 자동화 및 이상상황 구조물 해석 연계 알고리즘 구현)
*Corresponding Author : Jong-ho Lee(KICT)
email: leejongho@kict.re.kr
Received November 1, 2023 Revised December 7, 2023
Accepted December 8, 2023 Published December 31, 2023

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

현대의 건설 및 구조 설계 분야는 빠르게 변화하고 발전하는 기술 트렌드의 중심에 있다. 이러한 변화의 원동력 중 하나는 디지털 기술의 급격한 발전이다. CAD (Computer-Aided Design) 시스템, BIM(Building Information Modeling)과 같은 도구들이 설계 과정을 혁신하였고, 이러한 디지털 변화의 중심에는 생성형 디자인(Generative Design) 기법이 있다 [1].

생성형 디자인은 전통적인 설계 방법론의 한계를 넘어서, 설계자의 역할을 보조하며 더욱 효율적인 설계 방안을 제시한다. 이 기법은 컴퓨터 알고리즘을 기반으로, 주어진 조건과 목표 내에서 가능한 모든 설계 옵션을 탐색하고 비교한다 [2]. 예를 들어, 특정 건물의 에너지 효율을 최대화하거나, 구조물의 성능을 최대화하는 등의 목표를 설정할 수 있다.

생성형 디자인의 가장 큰 장점 중 하나는 다양한 설계 변수와 조건들 사이의 복잡한 상호 작용을 자동으로 계산하고 최적화한다는 것이다. 이를 통해, 설계자는 수많은 설계 옵션 중에서 최적의 해답을 빠르게 찾아낼 수 있다. 또한, 이 기법은 설계 초기 단계부터 적용될 수 있어, 프로젝트의 전체 수명 주기 동안 비용, 시간, 자원을 절약하는 데 크게 기여한다 [3].

이러한 생성형 디자인 기법의 도입은 건축 및 구조 설계 분야에서의 혁신적인 변화를 가져왔다 [4]. 설계 과정이 더욱 빠르고 효율적으로 진행될 수 있게 되었으며, 이를 통해 더욱 안정적이고 지속 가능한 건물과 구조물을 구현하는 것이 가능해졌다 [5].

트러스 구조물은 그 구조적 특성과 설계 원칙 때문에 공학 및 건축 분야에서 널리 활용되는 구조물 중 하나이다. 트러스는 여러 개의 직선적인 부재들이 합쳐져 만들어진 구조로, 각 부재들은 주로 압축 또는 인장의 힘을 받는다 [6]. 이러한 특성 때문에 트러스 구조물은 높은 강도와 경량성을 동시에 만족시키는 데 매우 효과적이다. 하지만, 트러스 구조물의 설계는 매우 복잡한 과정을 거친다. 각 부재의 길이, 두께, 재료, 연결 방식 등 다양한 변수들이 설계 과정에서 고려되어야 하며, 이러한 변수들 간의 상호 작용은 전체 구조의 성능과 안정성에 결정적인 영향을 미친다. 예를 들어, 특정 부재의 길이나 두께를 변경하면 그로 인해 전체 구조의 하중 분포나 변형률이 크게 바뀔 수 있다.

이러한 복잡성 때문에, 전통적인 설계 방법론만으로는 최적의 트러스 구조물 설계를 도출하기가 어렵다. 그러나 생성형 디자인 기법을 활용하면, 주어진 조건과 목표 하에 다양한 설계 옵션을 빠르게 생성하고 평가할 수 있다 [7]. 이를 통해, 더욱 효율적이고 안정적인 트러스 구조물 설계를 실현하는 것이 가능해진다. 생성형 디자인은 알고리즘을 기반으로 수많은 설계 변형을 자동으로 탐색하며, 이 중에서도 최적의 설계를 선택하는 능력을 가지고 있다. 따라서, 트러스 구조물 설계에 이 기법을 적용함으로써, 설계자는 더 넓은 설계 공간에서 최적의 해답을 찾아낼 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 연구의 방법 및 범위

이 연구에서는 생성형 디자인 기법의 효율성과 혁신성을 활용하여 트러스 구조물 설계의 자동화를 진행한다. 트러스 구조물은 그 특성상 다양한 부재와 연결점, 그리고 그들 간의 복잡한 상호작용을 포함하고 있어, 설계 과정이 복잡하다. 이러한 복잡성은 전통적인 설계 방법론만으로는 최적화하기 어려운 경우가 많다. 그러나 BIM 기반 비쥬얼 프로그래밍 기법인 생성형 디자인 기법을 활용하면, 이러한 복잡한 상호작용을 자동으로 계산하고 최적의 설계 방안을 제시할 수 있다.

본 연구의 첫 번째 단계는 생성형 디자인 알고리즘의 구축 과정을 탐구하는 것이다. 이 과정에서는 트러스 구조물의 주요 변수와 조건들, 그리고 이들 간의 상호 작용을 정의하고, 이를 기반으로 한 알고리즘을 개발한다. 알고리즘의 개발 과정에서는 다양한 설계 조건과 제약사항을 고려하여, 가능한 모든 설계 옵션을 탐색하고 비교한다.

다음 단계는 개발된 알고리즘을 활용하여 얻어진 설계 결과의 효율성과 안정성을 평가하는 것이다. 이를 위해, 다양한 트러스 구조물 설계 사례를 대상으로 실험을 진행하며, 각 설계 결과의 성능과 안정성을 측정한다. 또한, 생성형 디자인 기법을 활용한 설계 결과와 전통적인 설계 방법론을 활용한 설계 결과를 비교하여, 생성형 디자인 기법의 장점과 한계를 분석한다.

본 연구를 통해, 생성형 디자인 기법을 활용한 트러스 구조물 설계의 자동화와 최적화의 가능성을 탐구하고, 이를 실제 설계 분야에 적용하는 방법에 대한 깊은 통찰력을 제공하고자 한다.

2. 기존 연구 고찰

2.1 생성형 디자인 기본 방법론

전통적인 디자인 방법론은 수 세기 동안 사람들이 사용해 온 방식으로, 디자이너의 경험, 지식, 그리고 직관이 핵심적인 역할을 한다. 이 방법론에서는 디자이너가 주도적으로 아이디어를 구상하고, 그 아이디어를 바탕으로 스케치, 모델링, 프로토타이핑 등의 과정을 거쳐 완성도 높은 디자인을 구현하게 된다. 따라서 전통적인 디자인 방법론은 디자이너의 개인적인 터치와 스타일이 강하게 반영되며, 그의 창조력과 해결책에 큰 영향을 받는다.

반면 생성형 디자인 방법론은 최근에 등장한 상대적으로 새로운 접근법으로서 알고리즘과 계산을 중심으로 다양한 디자인 옵션들을 자동으로 생성한다. 디자이너는 초기에 목표와 제약 조건을 설정하고, 그 후에는 알고리즘이 수많은 가능성 중 최적의 디자인을 찾아내는 역할을 한다 [8]. 따라서 생성형 디자인을 활용하였을 때 디자인 옵션의 다양성과 유연성이 뛰어나며, 복잡하거나 반복적인 작업에서 효율적인 결과를 도출할 수 있게 되는 것이다.

이 두 방법론의 가장 큰 차이점은 아래의 그림 1에서 나타나는 것처럼 '디자이너의 역할'에 있다 [9]. 전통적인 방법론에서 디자이너는 모든 과정의 중심에 있지만, 생성형 디자인에서는 디자이너가 초기 설정과 평가 과정에 더 집중하게 된다. 특히, 생성형 디자인은 디자인의 경계를 확장시키며, 전통적인 방법론만으로는 도달하기 어려운 새로운 해결책과 아이디어를 제공할 수 있다.

2.2 건설 분야 생성형 디자인 연구 사례

건설 분야에서는 다양한 혜택과 함께 설계 최적화, 프로세스 자동화 및 빠른 의사결정 및 혁신적인 디자인 생성 측면에서 생성형 디자인 기법이 활용되고 있다 [10].

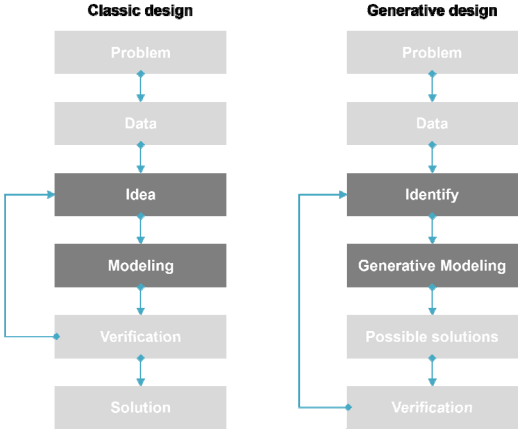

Fig. 1. Method of Generative Design [9]

특히 트러스 구조물의 설계 및 최적화는 다양한 조건의 변수들이 고려되어야 한다. 이러한 최적화 과정에서 발생할 수 있는 주요 문제점 및 도전과제들은 다음과 같다.

2.2.1 다양한 요소의 복합성

트러스 구조의 최적 레이아웃을 설계하는 것은 노드의 위치, 노드 간의 연결 토폴로지, 연결 막대의 단면 면적 등 다양한 요소를 동시에 고려하는 조합 구조 최적화 문제로 볼 수 있다 [11]. 각 요소가 서로에게 영향을 미치므로, 단일 요소의 변경이 전체 디자인의 성능과 효율성에 큰 영향을 미칠 수 있다.

2.2.2 변수의 복잡성

디자인 변수는 연속적인 것 (예: 노드의 위치)과 이산적인 것 (예: 노드 간의 연결 유무)이 혼합되어 있다 [12]. 이로 인해 최적화 솔루션의 공간이 복잡해지며, 이는 최적의 해를 찾는 것을 어렵게 만든다.

2.2.3 솔루션 공간의 복잡도

연속 및 이산 변수의 혼합은 솔루션 공간의 복잡성을 크게 높인다 [13]. 이렇게 복잡한 솔루션 공간에서 최적의 해를 찾는 것은 계산적으로 매우 도전적이다.

2.2.4 지역 최적해와 전역 최적화

복잡한 솔루션 공간에서는 지역 최적해에 갇힐 위험이 있어, 진정한 전역 최적해를 찾는 것이 어려울 수 있다 [14]. 따라서 전역 최적화 방법의 도입과 적용이 필요하다.

2.2.5 비볼록성 및 비미분성

트러스 구조물의 최적화 문제는 종종 비볼록적이고 비미분 가능한 특성을 가진다 [15]. 이러한 특성은 일반적인 최적화 방법으로는 해결하기 어렵다.

최적화 과정에서의 이러한 문제점과 도전과제는 트러스 구조물의 효율적이고 경제적인 설계를 위한 주요 장애물로 작용한다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위한 연구와 방법론의 발전이 계속적으로 필요하다.

3. 본론

3.1 주요 방법론 소개

이 연구의 중심에는 트러스 디자인의 혁신에 있다. 전

통적인 트러스 디자인은 구조적 안정성에 중점을 둔 것에 반해, 현대의 디자인 패러다임은 미적 가치와의 조화를 중요시한다. 따라서 이번 연구에서는 이 두 요소를 효과적으로 융합하는 방안을 탐구하고자 한다. 아래 Fig. 2와 같이 주 연구 방법론은 생성형 디자인과 NurbsCurve의 적용을 통해 트러스 디자인의 새로운 가능성을 탐구하는 세 단계로 이루어져 있다.

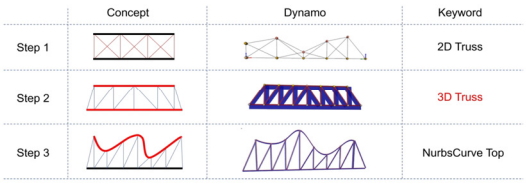

Fig. 2. Truss Bridge Generative Desgin Methodology

(1) Step 1 : 기본 트러스 구조

트러스는 여러 개의 강한 구성 요소들이 특정한 패턴으로 연결되어, 주어진 하중을 안정적으로 지지할 수 있는 구조물이다. 먼저 이러한 트러스의 기본 구조를 깊게 이해하고, 그 안에서 중요한 접점 포인트를 특정하여 분석한다. 이때 이 접점들은 트러스가 하중을 견뎌낼 때 중요한 역할을 하므로, 그 안정성은 트러스 전체의 성능에 큰 영향을 미치게 된다.

(2) Step 2 : 생성형 디자인의 적용을 통한 트러스 변형 구조

생성형 디자인은 컴퓨터 알고리즘을 사용하여 사용자의 입력 조건과 목표에 따라 수많은 디자인 옵션을 자동으로 생성하는 기법이다. 이 연구에서는 이러한 기법을 활용하여 트러스의 구조적 특성, 예를 들면 높이, 두께, 길이 등의 변수를 조절하며, 최적의 구조적 성능을 가진 트러스 디자인을 도출한다. 또한 이를 통해, 주어진 조건에서 최적화된 트러스 구조를 신속하게 도출할 수 있게 된다.

(3) Step 3 : 트러스 상단부 비선형 구조

NurbsCurve는 곡선과 표면을 표현하기 위한 고급 수학적 도구로, 복잡하고 독특한 형태를 디자인할 수 있게 한다. 이 연구에서 트러스의 상단부에 NurbsCurve를 적용함으로써 순수 구조적 목적을 넘어선 참신한 디자인 요소나 형태를 트러스에 도입할 수 있는 방안을 구축한다. 이를 통해, 트러스의 기능적인 가치 뿐 아니라 미적 가치까지도 향상시킬 수 있다.

3.2 Step 1의 주요 방법론 소개

Fig. 3에서 나타나는 것과 같이, 첫 번째 방법론에서는 트러스의 기본 조건을 점과 선으로 구분하고 생성형 디자인을 위한 기초적인 분류를 수행한다.

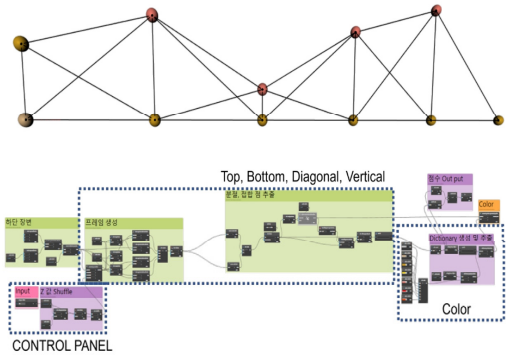

Fig. 3. Step 1 Visual Programming Methodology

3.2.1 트러스 구조의 장방향 거리 조절

실험의 초기 단계에서 트러스 구조의 장방향 거리는 유동적으로 조절한다. 이 조절을 통해 트러스 구조의 다양한 변형 가능성을 탐구한다.

3.2.2 색상 변화의 기준

트러스 구조 내에서 포인트가 겹치는 정도에 따라 색상의 변화가 발생한다. 라인의 길이와 색상 변화의 관계를 연구한다. 특히, 라인의 길이가 짧을수록 색상 변화의 정도가 증가하는 알고리즘을 구성한다.

3.2.3 트러스의 형태 변형

X-형태의 기본적인 트러스 구조를 넘어서, 다양한 단방향 및 복잡한 형태의 변형을 탐구한다. 방향성에 따른 트러스의 변화를 연구하며, 1방향 또는 2방향의 트러스 형태 모두를 검토한다.

3.2.4 색상 범위 및 Line 색상 변경

구현된 결과물의 특성에 따라 트러스의 색상 범위 및 Line 색상 변경 범위를 조절한다.

Step 1에서의 생성형 디자인 결과물들은 아래의 Fig. 4와 같이 나타난다. 점과 선으로 이루어져 비교적 단순한 형태의 대안을 가지고 있음을 알 수 있다.

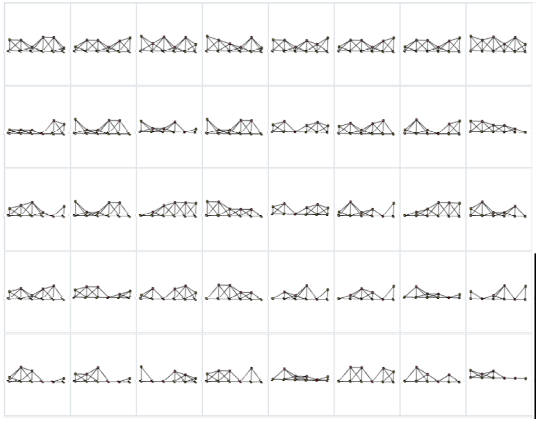

Fig. 4. Step 1 Main output images

3.3 Step 2의 주요 방법론 소개

두 번째 단계에서는 생성형 디자인 방법론을 적극적으로 활용하여 트러스 구조의 다양한 디자인 요소와 그에 따른 구조적 특성을 연구하고 분석하는 데 초점을 맞추고 있다. Fig. 5에서 나타나는 것처럼 두 번째 단계의 시작점으로 컨트롤 패널을 주요 Input 값으로 설정하여 사용한다.

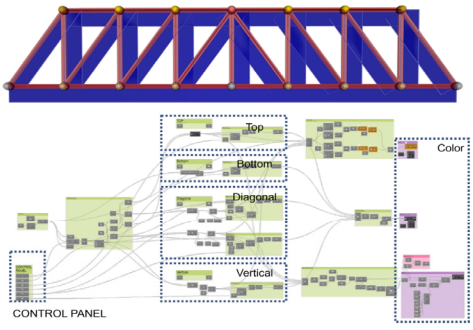

Fig. 5. Step 2 Visual Programming Methodology

Input 값의 정의는 Fig. 5에서 나타나는 숫자와 일치하여 설명할 수 있다.

(1) Z component (Z 축 높이 변환): Z 축에 따른 트러스의 높이를 조절한다.

(2) Divisions (분할 개수): 트러스의 구조를 분할하는 개수를 정의한다.

(3) Top Chord Size (크기 조절): 상단 부분의 트러스 크기를 조절한다.

(4) Bottom Chord Size (크기 조절): 하단 부분의 트러스 크기를 조절한다.

(5) Vertical Chord Size (크기 조절): 수직 방향의 트러스 크기를 조절한다.

(6) Diagonal Chord Size (크기 조절): 대각선 방향의 트러스 크기를 조절한다.

위에서 정의한 Input 값들을 바탕으로 생성형 디자인의 구현을 진행하면 결과물 값은 Fig. 6와 같이 나타난다. 이는 Step 1. 단계와 비교했을 때 입체감이 형성된 결과물을 확인할 수 있고 결과물의 다양성도 확보한 것을 알 수 있다.

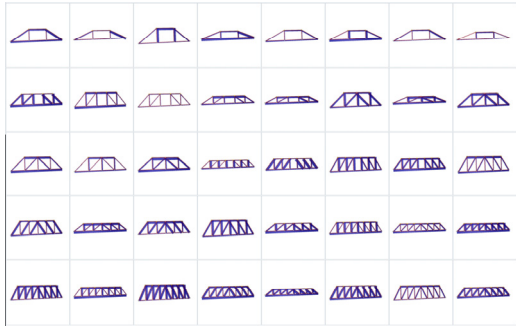

Fig. 6. Step 2 Main output images

3.4 Step 3의 주요 방법론 소개

Step 3는 트러스 디자인의 상단 부분에 NurbsCurve를 통합하여 새로운 디자인 요소와 안정적인 구조 체계를 도입하는 과정을 중점적으로 다루며 Fig. 7과 같이 나타난다.

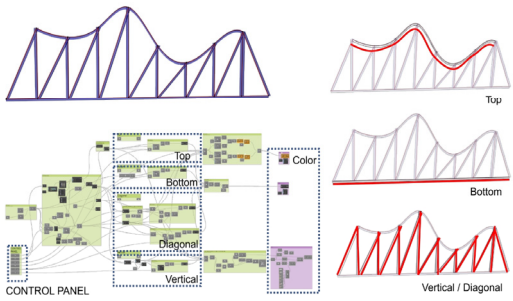

Fig. 7. Step 3 Visual Programming Methodology

3.4.1 NurbsCurve 대입 구간의 도입

상단 디자인을 반영하기 위해서는 NurbsCurve를 트러스 디자인에 적용하는 구간이 추가된다.

3.4.2 기존 상단 Line의 재작성 및 구조 Line 수정

NurbsCurve의 도입에 따라, 기존 상단 Line의 작성 방식이 재조정되며, 전체적인 구조 Line의 목록 또한 수정된다.

3.4.3 색상 및 구조 작업의 분리: 전체 디자인을 통합하고 분리하여 색상 및 구조 작업을 이전에 진행했던 방식과는 달리, 이번 단계에서는 Line과 NurbsCurve의 구분을 명확히 하여, 각각의 결과 값에 따른 색상을 분리한다.

3.4.4 상단 디자인의 변화와 범위: 디자인 요소의 도입과 변화에 따라, 상단 디자인은 특정 범위 내에서 변경될 수 있으며, 그림과 같이, 특정 조건과 설정하에 디자인이 변화하는 모습을 확인할 수 있다.

3.4.5 Dynamo를 통한 쉬운 수정 및 변형: Dynamo 툴의 활용으로, 기존에 설계된 디자인을 더욱 손쉽게 수정하고, 추가적인 변형을 적용할 수 있다.

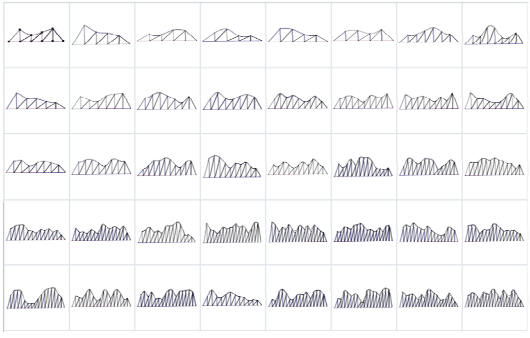

Fig. 8. Step 3 Main output images

4. 결론

디지털 시대는 건설 및 구조 설계 분야의 풍경을 극적으로 변화시켜, 산업을 새로운 전방으로 밀어나가는 강력한 도구와 방법론을 도입하고 있다. 이 연구를 통해 밝혀진 바와 같이, 생성형 디자인은 이러한 발전의 중심에 있는 주요 기술로서, 전통적인 방법의 한계와 자동화된 설계의 거대한 잠재력 사이의 다리 역할을 한다.

이에 생성형 디자인 알고리즘에 관한 깊은 탐구를 하였으며, 생성형 디자인을 활용하였을 때 트러스 구조 설계와 관련된 복잡성을 관리할 수 있는 것을 확인하였다. 전통적인 방법은 기본적이지만, 트러스 디자인의 특성이 복잡하게 얽힌 변수와 조건들을 다양한 방식에서 검토해야 한다. 반면 생성형 디자인은 이러한 문제를 혁신적인 해결책으로 제공하며, 표면 수준의 디자인 가능성을 넘어서 광범위한 디자인 공간으로 탐구하고, 수많은 변형을 자동으로 평가하여 최적의 해결책을 찾아낸다.

본 연구에서는 크게 세 가지 단계를 통하여 트러스 구조 설계를 자동화할 수 있는 방법론을 제시하였으며, 이를 바탕으로 결과물들을 생성하였다. 트러스의 디자인이 주로 하중과 안정성에 초점을 맞춰져 있었던 기존의 트러스 디자인 방법론에서 현재 미적 가치 또한 중요한 요소로 부상하고 있어 단순한 구조물로서의 기능을 넘어선 미적 요소를 강조하는 방향으로 변화하고 있다. 이 연구에서는 생성형 디자인과 NurbsCurve을 활용한 알고리즘을 통해 이러한 변화를 적용하였다. 생성형 디자인을 통해 다양한 디자인 변수를 조절하면서 최적의 구조적 성능을 가진 트러스 디자인을 도출하는 동시에, NurbsCurve를 활용하여 그 디자인에 독특하고 미적인 요소를 추가하였다. 이로 인해 생산된 트러스는 구조적으로는 안정적이면서도 시각적으로 매력적인 형태를 갖게 되는 것을 확인할 수 있었다.

이런 접근법은 트러스가 단순히 기능적인 요소로만 사용되던 과거의 관점을 넘어서, 건축물이나 공간에 미적인 가치를 더하는 구조적 아트워크로서의 역할을 할 수 있게 만든다. 따라서 이 연구의 결과물은 기존의 트러스 디자인과는 확연히 다르게, 구조와 미의 조화를 이루는 새로운 디자인 패러다임을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구는 트러스 구조 설계의 자동화에 있어서 비쥬얼 프로그래밍 기법을 활용하여 다양한 디자인 대안을 생성하는 방안에 중점을 두었다. 그 결과, 생성형 디자인을 통해 복잡한 트러스 구조의 다양한 설계 옵션을 효과적으로 탐색하고 평가할 수 있는 가능성을 확인하였다. 그러나 이 연구의 한계점으로는, 구조적 해석 기법과의 연계가 부족한 점을 들 수 있다. 트러스 구조의 설계 대안을 생성하는 것만으로는 충분치 않으며, 이러한 대안들이 실제로 안정적이고 효과적인지를 평가하는 과정이 필요하다. 이를 위해서는 생성형 디자인과 구조적 해석 기법 간의 연계가 강화될 필요가 있다. 향후 연구 방향으로는 다음과 같은 사항들을 고려할 수 있다:

(1) 구조적 해석과 연계: 생성형 디자인으로 얻어진 트러스 구조 대안들에 대한 구조적 해석을 실시하여, 안정성 및 성능을 평가하는 연구가 필요하다.

(2) 알고리즘의 개선: 비쥬얼 프로그래밍 기법을 활용한 생성형 디자인 알고리즘의 정밀도와 효율성을 높이는 연구가 진행되어야 한다.

(3) 다양한 구조 형태의 적용: 트러스 구조 외에도 다양한 구조 형태에 대해 생성형 디자인 기법을 적용하는 연구를 확장하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

(4) 실제 적용 사례 연구: 이 연구의 방법론을 실제 건설 프로젝트에 적용하여, 실용성과 효과를 검증하는 연구가 진행될 필요가 있다.

결론적으로, 이 연구는 트러스 구조 설계의 자동화에 있어서 중요한 첫 걸음을 제시하였으나, 아직도 극복해야 할 여러 과제들이 남아 있다. 이러한 과제들을 해결하기 위해 지속적인 연구와 발전이 필요하며, 이를 통해 건설 및 구조 설계 분야에서의 혁신을 기대할 수 있다.

References

[1] K. M. Dogan, H. Suzuki, E. Gunpinar, M. S. Kim, "A generative sampling system for profile designs with shape constraints and user evaluation", *Comput – Aided Des,* 111:93–112. 2019.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.02.002

[2] K. Shea, R. Aish, M. Gourtovai, "Towards integrated performance-driven generative design tools", *Autom. Constr,* Vol. 14, pp.253–264, 2005.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.07.002

[3] Y. Schwartz, R. Raslan, I. Korolija, D. Mumovic, "A decision support tool for building design: An integrated generative design optimisation and life cycle performance approach", *SAGE Publications Inc.* Vol.19, No.3, pp.401–430, 2021.
DOI: https://doi.org/10.1177/1478077121999802

[4] A. Raina, J. Cagan, C. McComb, "Design Strategy Network: A Deep Hierarchical Framework to Represent Generative Design Strategies in Complex Action Spaces", *J. Mech. Des,* 144, 4052566. 2021.
DOI: https://doi.org/10.1115/1.4052566

[5] H. Sun, L. Ma, "Generative design by using exploration approaches of reinforcement learning in density-based structural topology optimization", *Designs,* Vol.4, No. 2, p.20, 2020.
DOI: https://doi.org/10.3390/designs4020010

[6] J. Mockus, R. Paulavičius, D. Rusakevičius, D. Šešok, J. Žilinskas, "Application of reduced-set pareto-lipschitzian optimization to truss optimization", *J Glob Optim,* Vol. 67, No. 1 pp.425–450, 2017.
DOI: https://doi.org/10.1007/s10898-015-0364-6

[7] M. Watson, M. Leary, M. Brandt, "Generative design of truss systems by the integration of topology and shape optimisation", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118, pp.1165–1182, 2021.
DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-021-07943-1

[8] T. H. Kwok, "Improving the diversity of topology-optimized designs by swarm intelligence", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.65, No.202, p.20, 2022.
DOI: https://doi.org/10.1007/s00158-022-03295-w

[9] Dino, I. G. (2016). An evolutionary approach for 3D architectural space layout design exploration. Automation in Construction, 69, 131–150.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.020

[10] S. Oh, Y. Jung, S. Kim, I. Lee, N. Kang, "Deep generative design: Integration of topology optimization and generative models", *J Mech Des,* 141:111405, 2019.
DOI: https://doi.org/10.1115/1.4044229

[11] J. Felkner, E. Chatzi, T. Kotnik, M. Beer, V. Kreinovich, R. Kruse, eds "Interactive particle swarm optimization for the architectural design of truss structures", (eds Beer, M., Kreinovich, V. & Kruse, R.) *Computational Intelligence for Engineering Solutions(CIES),* Singapore, pp.15–22, 2013.
DOI: https://doi.org/10.1109/CIES.2013.6611723

[12] D. A. G. Vieira, A. C. Lisboa, "A cutting-plane method to nonsmooth multiobjective optimization problems", *Eur J Oper Res,* Vol. 275 No.3 pp.822–829, 2019.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.12.047

[13] M. Stolpe, "Truss topology optimization with discrete design variables by outer approximation", *J Glob Optim,* Vol.61, No.1, pp.139–163, 2015.
DOI: https://doi.org/10.1007/s10898-014-0142-x

[14] A. M. Mirzendehdel, M. Behandish, S. Nelaturi, "Exploring feasible design spaces for heterogeneous constraints", *Comput Aided Des,* 115, pp.323–347, 2019.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.06.005

[15] X. Wang, Y. Song, P. Tang, "Generative urban design using shape grammar and block morphological analysis", *Front Archit Res,* Vol. 9, No. 4 pp.914–924, 2020.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.09.001

이 재 욱(Jae-Wook Lee) [정회원]

- 2012년 2월 : 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 (공학석사)
- 2020년 8월 : 일리노이대학교 건축학과 (건축학박사)
- 2020년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

〈관심분야〉
BIM, 설계자동화, 건축환경

조 원 호(Won-Ho Cho) [정회원]

- 2022년 11월 ~ 현재 : 상상진화 기술연구소 DYNAMO 자동화 팀장
- 2017 6월 ~ 현재 : BIM 자동화 프로젝트, 컨설팅
- 2023년 11월 : 스마트건설챌린지 2023 BIM 분야 스마트 기술 최우수혁신상

〈관심분야〉
BIM, 자동화, 대안생성

김 소 연(So-Yeon Kim) [준회원]

- 2023년 8월 : 연세대학교 일반대학원 건축공학과 (공학석사)

〈관심분야〉
BIM, 건축계획, 도시계획

이 종 호(Jong-Ho Lee) [정회원]

- 2015년 8월 : 연세대학교 일반대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 연세대학교 일반대학원 건축공학과 박사과정
- 2015년 8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임연구원

〈관심분야〉
BIM, GIS, 바이오헬스, 뇌파