

위상최적화와 Cellular Automata 모델을 이용한 대공간 트러스 구조물의 최적형태 설계

Optimal Shape Design of Space Truss Structure using Topology Optimization and Cellular Automata Model

김 호 수†
Kim, Ho-Soo

이 민 호*
Lee, Min-Ho

요 지

대공간 구조물은 형태에 따라 구조물의 설계와 시공에 미치는 영향이 크기 때문에 초기 단계에서의 최적형태 설계가 중요하다. 그러나 기존의 대공간 구조물의 최적형태 설계는 구조엔지니어의 직관이나 경험을 바탕으로 수행되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 대공간 트러스 구조물의 체계적인 최적형태 설계를 위해 위상최적화 기법과 Cellular Automata 모델을 이용한 통합프로세스를 제안하고자 한다. 먼저 위상최적화 기법을 이용하여 구조물의 초기 최적형상을 찾고, 다음 단계로 Cellular Automata 규칙에 의해 생성된 구조패턴을 적용하여 대공간 트러스 구조형태를 생성한다. 최종적으로 구조해석을 실시하고 크기최적화를 적용함으로써 설계조건을 만족하는 최적형태를 제안하고자 한다.

핵심용어 : 형태생성, 위상최적화, 셀룰라 오토마타, 대공간 트러스 구조물

Abstract

It is important to design the optimal shape in the initial process because the influences on the design and construction are large according to the shape and pattern of spatial structures. However, the existing optimal shape designs for spatial structure are performed by the designer's intuition and experiences. Therefore, this study proposes the integrated process using the topology optimization and cellular automata model. First, the initial optimal shapes are obtained by using the topology optimization, and then the spatial truss structural patterns are created through the application of cellular automata rules. Finally, the optimal shapes to satisfy the various design conditions are generated by the structural analysis and size optimization.

Keywords : morphogenesis, topology optimization, cellular automata, space truss structure

1. 서 론

오늘날 경제, 사회, 문화 및 기술의 발전과 더불어 건축 구조물의 대형화가 요구되고 있으며, 스포츠 및 문화생활 공간의 필요성에 따라 체육관이나 쇼핑센터 등의 대공간 구조물에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 대공간 구조물은 형태적 특성에 따라 구조물의 설계와 시공에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 초기 단계에서의 최적형태 설계는 매우 중요하다.

그러나 기존의 대공간 구조물의 최적형태 설계는 구조엔지

니어의 경험을 바탕으로 시행착오적인 방법에 의해 수행되었으며, 형태최적화 보다는 응력과 변위 등의 제한조건을 만족시키는 부재단면을 찾아내는 크기최적화 기법 위주로 이루어져왔다. 이에 비해 최근에는 위상최적화 기법을 이용한 최적 설계와 Morphogenesis 모델을 이용한 형태생성 연구가 강구되고 있다.

위상최적화는 최적의 물질분포를 찾는 것으로 일정 설계영역을 대상으로 이를 유한개의 요소로 이산화하여 각 요소의 밀도나 다른 특성 등을 설계변수로 하여 목적함수와 구속조건을 만족하는 최적의 설계위상을 찾는 개념이다(Bendsøe

† 책임저자, 종신회원 · 청주대학교 건축공학과 교수
Tel: 043-229-8483 ; Fax: 043-229-8483
E-mail: hskim@cju.ac.kr

* 청주대학교 건축공학과 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

등, 1988). 위상최적화에 대한 연구로는 주어진 설계영역의 보 내부에 적합한 유공형상 및 치수산정을 위해 사용하였다(이동규 등, 2006). 또한 중량을 최소화하며 응력을 목표치 이내로 제한하는 조건하에 최적형상을 구하기 위해 근사법을 이용한 연구를 수행하였다(김홍진 등, 2003).

또한 Morphogenesis 기법은 생물학 형태를 수학적 모델로 표현하기 위한 모델링 방안으로 생물의 자기 성장을 통하여 다양한 형태를 생성하는 기법이다(김호수 등, 2010). Morphogenesis 기법 중 Cellular Automata 모델은 초기 입력된 cell들과 이웃상태의 cell에 따라 다양한 패턴이 생성되는 모델링 기법으로 간단하게 프로그래밍할 수 있는 장점이 있다. 이에 따라 Cellular Automata 모델은 자연 과학 및 컴퓨터공학 분야에서 주로 사용되어 왔으며, 최근 기계 및 멀티미디어 관련 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 이에 대해 셀룰라 오토마타 원리를 분석하고 영상처리 관련 분야에서 이를 이용하여 에지 추출 검증을 시도하였다(남태희, 2008). 의사난수를 효과적으로 생성할 수 있는 특성을 가진 셀룰라 오토마타를 이용하여 해쉬 함수를 도입하고 분석하였다(정기태 등, 2004). 이처럼 Cellular Automata 기법은 건축분야에서 구조물의 형태생성 연구 및 초기 설계를 위한 연구가 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 먼저 위상최적화 기법을 이용하여 구조물의 초기 최적형상을 찾고 이를 바탕으로 트러스 구조 형태를 생성한다. 다음 단계로 Cellular Automata 규칙에 의해 생성된 구조패턴을 적용하여 대공간 트러스 구조물을 설계한다. 최종적으로 구조해석을 실시하고 크기최적화를 적용함으로써 설계조건을 만족하는 최적형태를 제안하고자 한다.

2. 최적형태 설계를 위한 정식화 과정

2.1 위상최적화 기법

위상최적화 기법은 설계영역을 이산화하여 각 요소의 밀도 또는 기타 특성을 설계변수로 하고 목적함수와 제한조건에 따른 각 요소의 유무를 판정하여 최종적인 위상을 도출하는 방법으로 설계영역을 유한개의 요소로 구분하고 주어진 하중에 대하여 변형을 최소화하는 문제이다. 이러한 위상최적화 기법은 균질화법과 밀도법으로 분류되는데 균질화법은 직교 이방성(Orthotropic) 물질의 강성계수를 이용한 방법으로 미소구조(Microstructure)를 도입하고 이의 크기와 영역을 고려하여 구조물의 강도와 강성을 조절함으로써 최적화하는 방법이다. 이에 비해 밀도법은 등방성(Isotropic) 물질의 강

성계수를 이용한 방법으로 설계변수를 요소의 밀도로 하고 설계변수를 단순화하여 최적화에 소요되는 시간을 절감하는 방법이다.

본 연구에서는 균질화법에 비해 접근방법이 비교적 간단하며, 최적화에 소요되는 시간이 짧은 밀도법을 이용하여 위상 최적화를 수행하고자 한다. 이에 따라 밀도법은 컴플라이언스를 목적함수로 두고 이를 최소화하는 밀도분포를 찾는 문제로 (1)식과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{목적함수} : C(x) &= u^T K u & (1) \\ \text{구속조건} : 0 < x_e &\leq 1 \quad (e = 1, 2, \dots, N) \\ V &\leq V_0 - V' \end{aligned}$$

여기서, C : 컴플라이언스

u : 전체 변위 벡터

K : 전체 강성 행렬

V : 부피

V_0 : 부재 원래의 부피

V' : 제거될 부피

x_e : 내부 가상 밀도

2.2 Cellular Automata 모델

Cellular Automata 모델은 Von Neumann에 의해 소개되었고, 공간, 시간, 상태가 모두 이산적인 시스템을 다룬다. 여기서 일정하게 배열된 공간을 cell이라 부르며, 인접한 cell들의 상호작용에 의해 단계별로 cell이 배열되는 시스템이다. Cellular Automata 모델의 구성요소는 상태(State), 이웃(Neighborhood), 그리고 규칙(Rules)의 세 가지로 되어 있다. 상태(State)는 cell을 표시하는 변수로 숫자나 성질을 나타내고, 이웃(Neighborhood)는 상호작용하는 cell의 집합을 의미하고, 규칙(Rules)은 현재의 cell의 상태와 그 주변의 상태에 대하여 다음 상태를 결정하는 규칙을 말한다. Cellular Automata 모델의 종류는 1차원 띠모양구조, 2차원 그리드구조, 또는 3차원 입체구조로 구분되며, 여기서는 간단하고 적용하기 쉬운 1차원 띠모양 구조를 고려하였다.

Cellular Automata 모델 중 1차원 띠모양 구조는 0과 1의 상태로 표현되는 각 cell이 선형으로 배열되고 있으며, 상호 인접한 cell과의 상호작용에 의해 다음상태의 cell이 결정된다. 또한 cell의 다음 상태는 2^3 인 8개의 배열상태를 가지며, 이에 따라 규칙은 2^{2^3} 인 256개가 된다. 예를 들어 1차원 3이웃 규칙 중 255번의 이웃 상태와 다음 상태는 그림 1

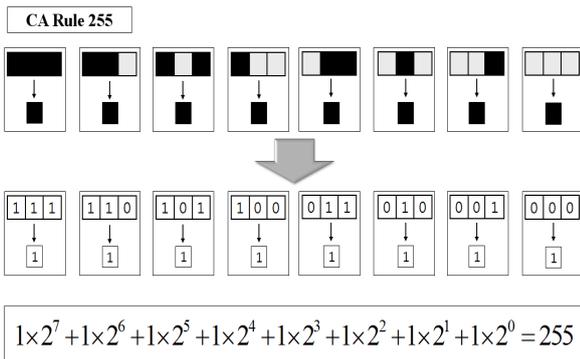


그림 1 Cellular Automata 모델의 규칙

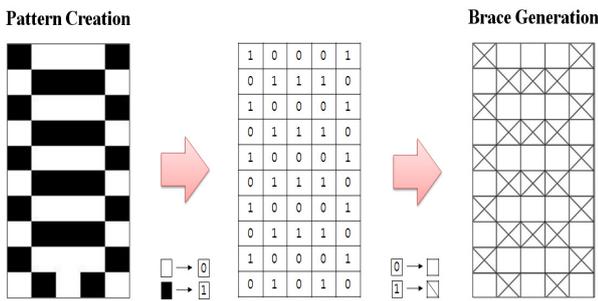


그림 2 CA규칙에 의한 브레이스 패턴 생성

과 같다.

특히 위상최적화 결과로 생성된 초기 형태를 확장하여 전체 구조시스템을 설계하기 위해선 연결 부재 시스템의 브레이스 배치 형상을 결정하는 것이 중요하게 된다. 이를 위해 그림 2와 같이 1차원 3이웃 패턴생성결과 1과 0으로 표현된 것 중 1은 브레이스가 생성되는 자리를 의미한다.

2.3 크기최적화 기법

크기최적화를 위한 설계변수는 단면적으로 설정하였으며 매 단계마다 구해진 최적 단면적을 이용하여 부재단면 계산 기법을 통해 부재의 단면치수를 산정한다. 목적함수는 식 (2)와 같이 전체 중량을 고려하였으며, 구속조건은 응력 및 변위구속조건을 반영하였다.

$$\text{목적함수 : } OBJ = \sum_{i=1}^n \rho_i L_i x_i \quad (2)$$

$$\text{구속조건 : } \sigma_{\max,i}(x) \leq \sigma_{\text{allow},i} \quad (i=1,2,\dots,n)$$

$$u_j(x) \leq u_{\text{allow},j} \quad (j=1,2,\dots,p)$$

$$x_v^L \leq x_v \leq x_v^U \quad (v=1,2,\dots,m)$$

여기서, n : 전체 부재 수

ρ_i : i 부재의 중량계수

L_i : i 부재의 길이

x_i : 부재의 단면적

$\sigma_{\max,i}(x)$: i 번째 부재의 조합응력

$\sigma_{\text{allow},i}$: 허용응력

$u_j(x)$: j 절점에서 발생하는 변위

$u_{\text{allow},j}$: 변위제한 값

p : 변위제어 대상 자유도 수

x_v^L : 설계변수의 최소 제한 값

x_v^U : 설계변수의 최대 제한 값

m : 그룹수

2.4 형태생성 프로세스

대공간 트러스 구조물의 최적형태 설계를 위해 그림 3과 같이 위상최적화 기법과 Cellular Automata 모델을 고려한 형태생성 프로세스를 제안한다. 프로세스는 크게 위상최적화 기법, Cellular Automata 모델 적용, 크기최적화 기법으로 구분된다. 위상최적화는 트러스 구조물의 초기형태를 생성하는 역할을 하고, Cellular Automata 모델은 규칙에 의해 구조패턴을 생성하고 위상최적화 기법으로 만들어진 초기트러스 구조물을 구조패턴에 따라 확장하여 전체 구조물을 형성하는 역할을 한다. 또한 크기최적화는 전체 구조물의 형태를 대상으로 구속조건을 만족하면서 중량이 최소가 되는 최적형태를 설계하는 것을 목적으로 하며, 전체적인 형태생성 프로세스는 다음과 같다.

- 1) 위상최적화하고자 하는 구조물의 초기 설계영역을 결정한다. 여기서, 스패ん길이, 높이, 하중, 지점조건 등을 고려하고 기본 데이터를 입력한다.
- 2) 초기 설계영역에 대한 위상최적설계를 수행하여 최적의 재료분포를 구한다.
- 3) 위상최적설계 결과를 토대로 시공성 및 실용성이 고려된 트러스 구조물로 재설계한다.
- 4) 상기과정을 통해 얻어진 2차원 트러스 구조물을 3차원 철골 트러스 구조물로 확장하기 위해 대칭성과 연계성을 고려한 CA규칙 90번을 이용하여 생성된 구조패턴으로 브레이스를 설치하는 자리를 결정한다.
- 5) 3차원 트러스 구조물을 대상으로 부재그룹화를 도입하여 크기최적설계를 위한 데이터를 얻는다.
- 6) 크기최적화는 DOT(Design Optimization Tools) (Vanderplaats, 2001)를 이용하며, 응력 및 변위구속조건을 만족하는 부재크기를 자동으로 업데이트한다.
- 7) 크기최적화 과정을 통해 부재그룹화가 되어 있는 구조

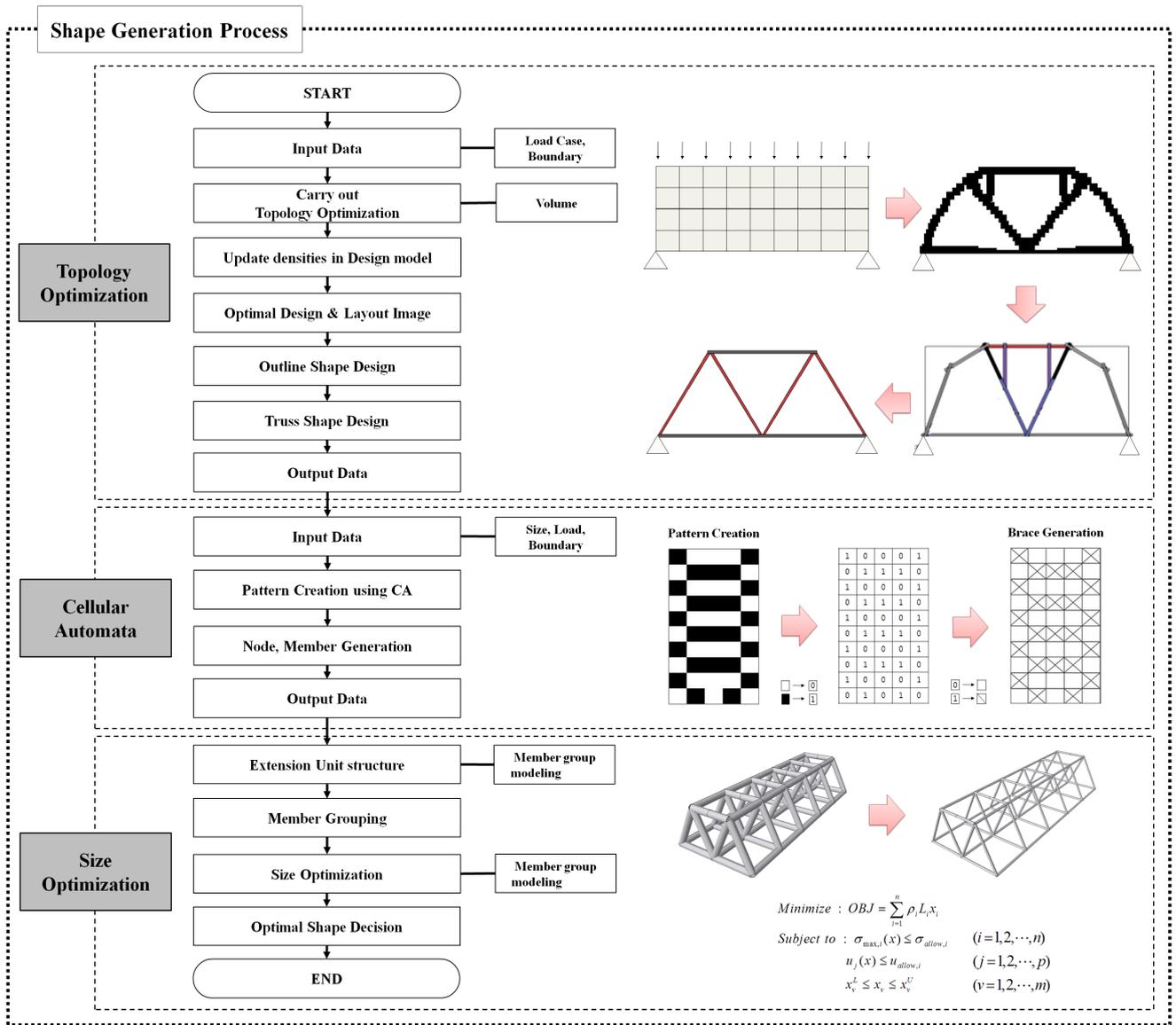


그림 3 최적형태설계 프로세스

물의 최적부채를 선정하여 트러스 구조물의 최적형태를 설계한다.

20m인 이차원 형상을 가지며, 설계역역에 대한 재료밀도는 50%가 되도록 하였으며, 지점 조건은 그림 4와 같이 설정하

3. 적용예제

3.1 위상최적화 적용

초기 구조물의 설계영역, 경계조건 및 하중조건을 설정한 뒤, 위상최적화를 통하여 최적의 설계 영역을 찾고 설계 영역에 대한 기본 레이아웃을 형성한 후 이를 바탕으로 트러스 형태 설계를 수행한다. 위상최적화는 목적함수로 구조물의 컴플라이언스가 최소가 되는 것으로 하며, 설계변수는 요소의 밀도가 된다.

초기 구조물의 설계영역은 스패ん길이(L) 30m, 높이(H)

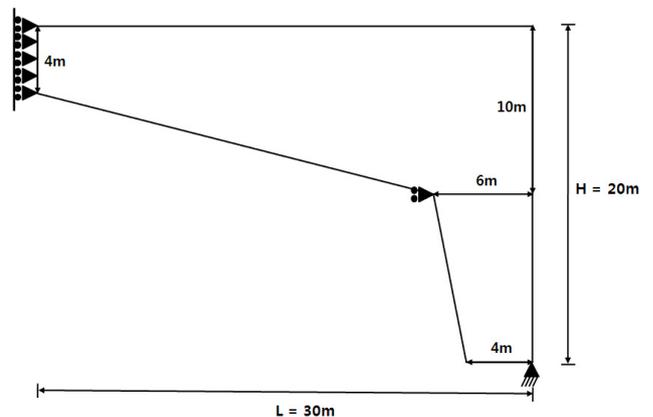


그림 4 초기 구조물의 설계모델

표 1 주요 설계변수

주요항목	변수
스팬길이(L)	30m
높이(H)	20m
탄성계수	210GPa
프아송비	0.3
하중조건	등분포하중 2.5kN/m

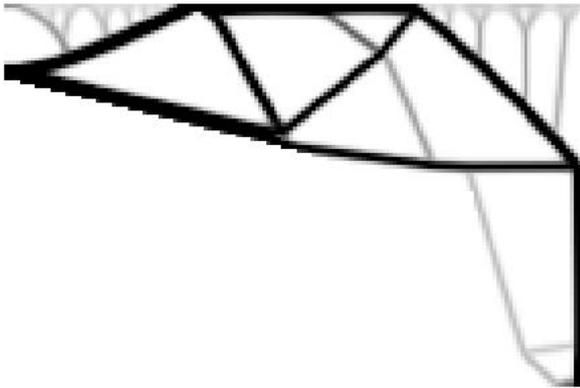
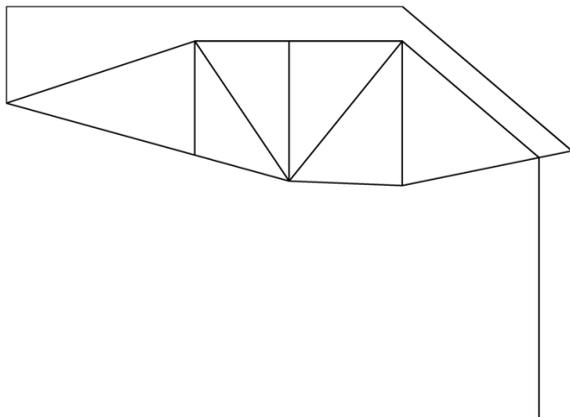
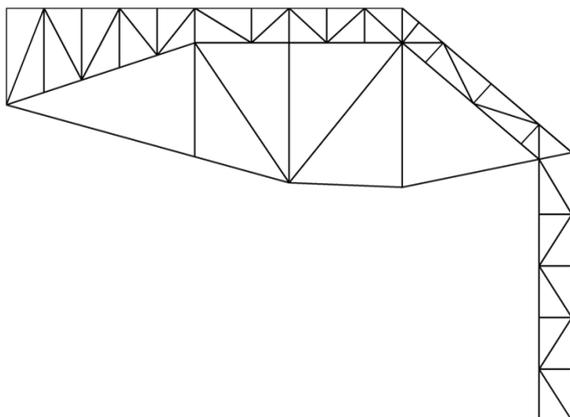


그림 5 위상최적화 적용형태



(a) 아웃라인 형상



(b) 트러스 구조형상

그림 6 형태생성 및 설계과정

였다. 작용하중은 상부에 연직하중 2.5kN/m이 작용하는 것으로 가정하였고, 위상최적화 적용을 위한 모델의 개요는 표 1과 같다.

위상최적화를 수행한 결과 그림 5와 같은 최적의 설계영역과 기본적인 레이아웃을 얻었다. 그러나 위상최적화를 통해 생성된 형상을 실제 모델에 적용하기 어렵기 때문에 시공성을 고려하여 재설계를 한다. 먼저 그림 6(a)와 같이 기본적인 아웃라인을 형성한 뒤 이를 바탕으로 그림 6(b)와 같은 2차원 트러스 형상으로 설계한다. 이와 같은 재설계 과정은 설계자의 의도와 판단이 중요하며 전체 구조물의 형태결정에 영향을 미칠 수 있다.

3.2 Cellular Automata 모델 적용

Cellular Automata 모델을 적용하여 브레이스 구조패턴 및 형태를 생성하기 위해 x 방향길이 60m, y 방향길이 120m, x 방향 분할 수 11, y 방향 분할 수 12로 설정하였으며, 그림 7과 같이 평면형상을 구성하였다. 또한 기본 모델에 대한 입력 데이터는 표 2와 같다. 여기서 CA Rule의 경우 다양한 Rule이 고려될 수 있는데, 특히 Rule 90은 기본 모델로 설정된 범위에서 다른 Rule에 비해 대칭성을 가지고 있으며 위상최적화 기법과의 연계 및 적용성을 고려하여 선정되었다.

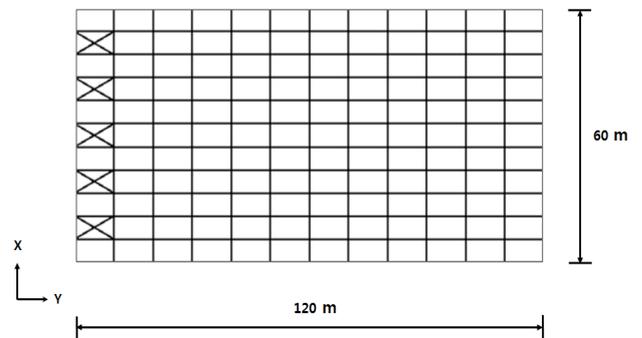
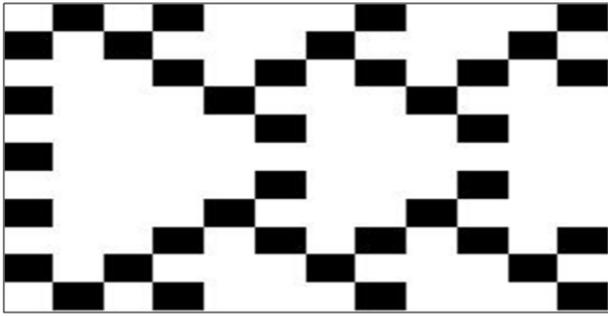


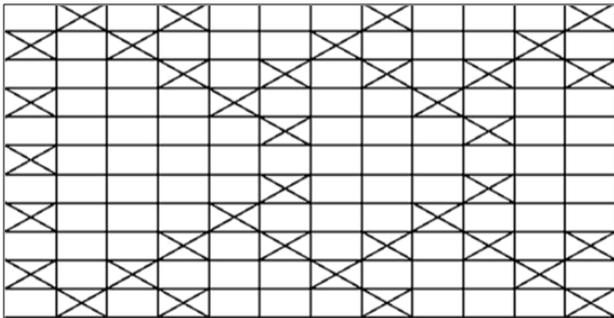
그림 7 기본 모델설정

표 2 기본 모델 개요

구분		입력 데이터
x 방향 길이		60m
y 방향 길이		120m
x 방향 분할 수		11
y 방향 분할 수		12
사용부재재료		SS400
부재 종류 및 초기 부재 크기	기둥	H-200×100×5.5×8
	보	H-200×100×5.5×8
	브레이스	SR-39
초기이웃상태		01010101010 
CA Rule		Rule 90



(a) CA Rule 90



(b) 브레이스 패턴 생성

그림 8 CA규칙을 이용한 브레이스 구조패턴생성

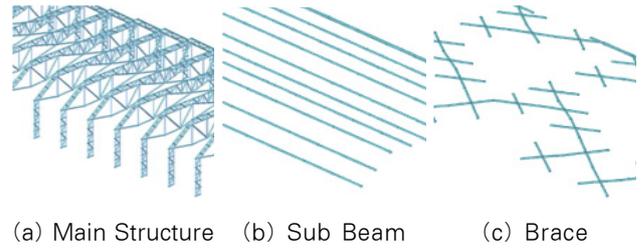
Cellular Automata 규칙을 적용하여 그림 8과 같은 브레이스 구조패턴이 생성되었다. 이를 토대로 위상최적화를 통해 설계한 트러스 구조물을 확장하여 전체 구조물의 형상을 설계하기 위한 연결 부재 브레이스 시스템을 구성할 수 있다.

3.3 전체 구조물의 형태설계

대상 구조물의 설계영역에 대하여 트러스 형상 설계를 수행한 후, 표 3과 그림 10과 같이 전체 구조물로 구성해 나간다. 전체 구조물의 개요는 x 방향으로 60m, y 방향으로 120m, z 방향으로 20m인 3차원 형상이다. 또한 그림 9와 같이 부재 그룹화 기법을 적용하여 메인골조, 서브골조, 브레이스 3가지 종류의 부재로 그룹화하여 전체 구조물을 설계한다.

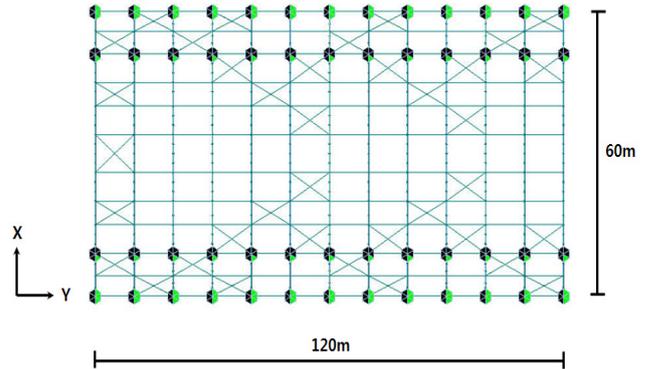
표 3 전체 구조물 모델링 개요

구분		입력 데이터		
x 스팬길이		60m		
y 스팬길이		120m		
높이(z)		20m		
하중조건		상부 3kN/m ²		
부재 그룹화 구분	그룹화	Main Structure (mm)	Sub Beam (mm)	Brace (mm)
		Ø-700×9	Ø-700×9	Ø-700×9
	비그룹화	Ø-700×9		
초기 중량(kN)		13365		

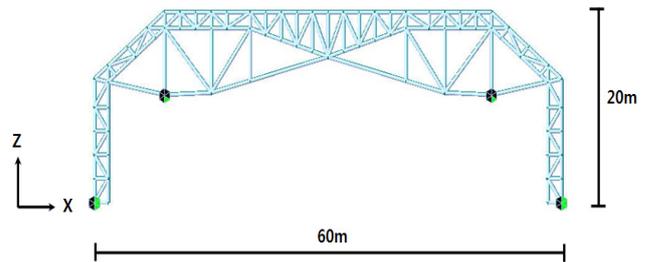


(a) Main Structure (b) Sub Beam (c) Brace

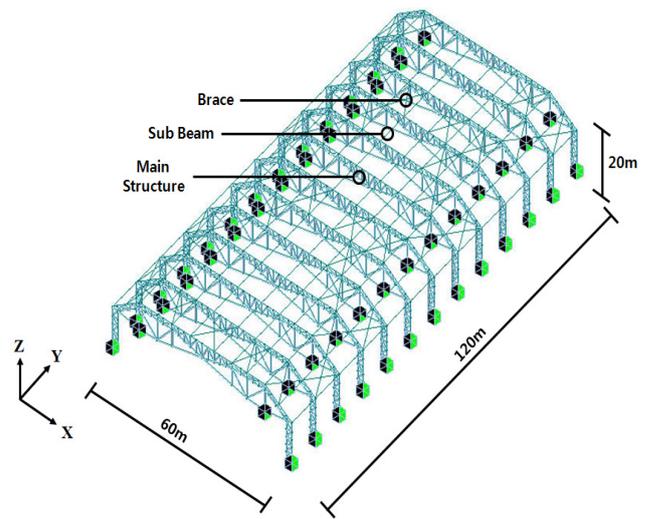
그림 9 전체 구조물 모델의 부재별 그룹화



(a) Top View



(b) Front View



(c) ISO View

그림 10 전체 구조물의 형태 모델

3.4 크기최적화 적용

전체 구조물의 모델링 및 설계가 끝나면 크기최적화를 수행하여 부재의 최적 단면 크기를 도출한다. 작용하중은 상부 연직하중 3kN/m^2 으로 가정하였다. 크기최적화 시 목적함수는 구조물의 총 중량으로 하고, 이를 최소화하는 것으로 한다. 구속조건으로는 부재의 응력과 절점변위로 하였다. 최적화시 응력은 부재설계기준에 따른 허용응력을 넘지 못하도록 설정하였고, 모든 절점의 변위가 제한변위 100mm 를 넘지 못하도록 고려하였다. 표 4는 부재 그룹화와 비그룹화에 대한 최적설계 결과를 보여주며 최적설계시 힘의 크기 및 부재 위치에 따라 적절한 부재그룹화를 실시함으로써 최종물량이 많이 절감된 것을 알 수 있다. 또한 그림 11은 크기 최적화시 물량변화 이력을 보여주는데 최적화를 반복 수행하는 동안 안정적으로 수렴하였으며, 최적물량은 그룹화를 했을 경우를 비그룹화 했을 경우와 비교하면 물량이 크게 절감된 것을 알 수 있다. 또한 그림 12는 변위 변화 이력을 나타내고 있는데 최적화를 수행하면서 그룹화 및 비그룹화에 따른 변

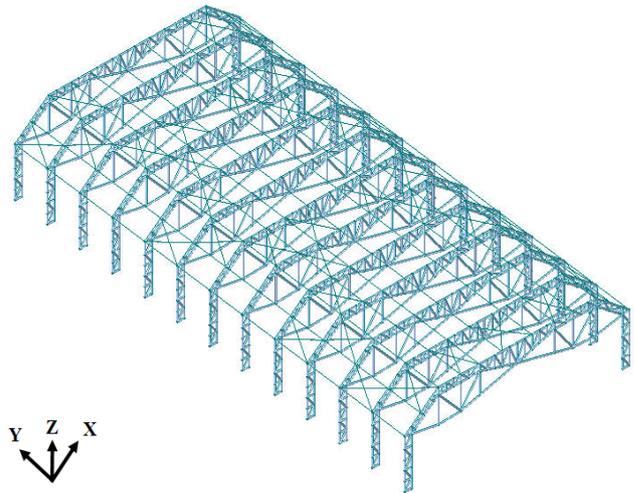


그림 13 전체 구조물의 최적형태 설계

위차이가 크기 않은 것을 알 수 있었으며, 그림 13은 전체 구조물에 대한 최종적인 최적형태를 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 대공간 트러스 구조물의 최적형태를 설계하기 위해 위상최적화 기법과 Cellular Automata 모델을 적용하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 트러스 구조물의 최적형태 설계를 위해 위상최적화, Cellular Automata 및 크기최적화를 적용한 프로세스를 제안하였으며, 이에 따라 위상최적화 기법을 적용하여 트러스 구조물의 초기형태를 결정하고, CA 규칙에 따른 브레이스 구조패턴을 생성하여 전체트러스 구조물의 형태를 도출할 수 있었다.
- 2) 특히 브레이스에 대한 구조패턴 생성을 위해 CA규칙 90을 적용하였으며, 초기 이웃상태 및 경계조건 후 전체 구조물의 최적 형상 생성을 위한 대상으로 설정하였다. 이에 따라 단위 유닛 트러스 구조물을 구조패턴에 적용하여 3차원 트러스 구조물로 확장이 가능하였다.
- 3) 크기최적화 수행시 트러스 구조물을 부재그룹화하여 구속조건 및 목적함수를 만족하는 트러스 구조물의 부재 크기가 선정되었다. 그 결과 그룹화했을 경우가 비그룹화 했을 때 보다 물량이 크게 감소한 것을 알 수 있다.
- 4) 위상최적화 기법과 Cellular Automata 모델을 이용하여 대공간 트러스 구조물의 다양한 형태를 생성할 수 있으며, 추가로 크기최적화 기법을 적용하여 최적의 부재크기를 선정함으로써 구조물의 실용적인 설계가 가능하도록 하였다. 이와 같이 본 연구에서 제안하고 있는 프로세스를 통하여 다양한 대공간 구조물의 최적

표 4 크기최적화에 따른 최적중량 비교

구분	부재종류			최적중량 (kN)
	Main Structure	Sub Beam	Brace	
부재 그룹화	Ø-428.8×5.5	Ø-120.2×1.5	Ø-120.2×1.5	3808
비그룹화	Ø-430.2×5.5			5019

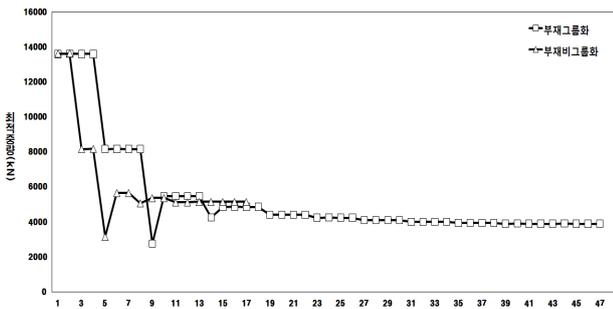


그림 11 크기최적화에 따른 최적중량 이력

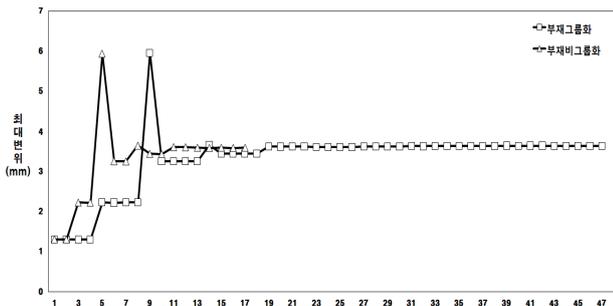


그림 12 크기최적화에 따른 변위이력

형태 설계에 도움을 줄 것으로 판단되며 추가적으로 다양한 설계요소를 반영하여 실무활용도를 높여나갈 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0074292).

참 고 문 헌

Bendsøe, M.P. (1995) Optimization of Structural Topology, Shape and Material, Springer, Berlin, Germany.

Bendsøe, M.P., Kikuchi N. (1988) Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 71, pp.197~224.

J. von Neumann (1966) The Theory of Self Reproducing Automata, A. Burks(ed.), Univ. of Illinois Press, pp.151.

Vanderplaats (2001) Research & Development, Inc, Design Optimization Tools.

이동규, 신수미 (2006) 개구부의 형태에 따른 유공보의 위상최적화, 대한건축학회 논문집, 22(5), pp.105~112.

김홍건, 양성모, 노홍길, 나석찬, 유기현, 조남익 (2003) 2차원 구조물의 최적형상설계에 관한 연구, 한국생산제조시스템학회 논문집, 12(2), pp.9~16.

김호수, 박영신, 양명규 (2010) 구조물의 형태 생성과 Morphogenesis 기법, 한국공간구조학회 학술기사, pp.11~15.

남태희 (2008) 셀룰라 오토마타의 원리 분석과 에지 추출 검증, 한국컴퓨터산업교육학회 논문집, 9(1), pp.29~38.

정기태, 이계상, 장동훈, 성재철, 이상진 (2004) 셀룰러 오토마타 기반 해쉬 함수 분석, 한국정보보호학회 논문집, 14(6), pp.111~123.

김호수, 박영신, 양명규, 이민호, 김재윤 (2010) 밀도법을 이용한 스페이스 트러스 구조물의 초기형상 설계, 한국공간구조학회 논문집, 10(4), pp.59~66.

이은형, 박재균 (2009) 위상과 형상최적화 기법을 사용한 FRP 교량 바닥판의 설계, 한국전산구조공학회 논문집, 22(5), pp.501~507.

이동규, 신수미, 박성수 (2007) SIMP를 이용한 구조물의 재료 위상 최적설계, 한국전산구조공학회 논문집, 20(1), pp.19~28.

- 논문접수일 2011년 10월 4일
- 논문심사일 2011년 10월 7일
- 게재확정일 2012년 1월 6일