

밀도법을 이용한 스페이스 트러스 구조물의 초기 형상 설계

Initial Shape Design of Space Truss Structure using Density Method

김 호 수* 박 영 신** 양 명 규*** 이 민 호*** 김 재 윤***
Kim, Ho-Soo Park, Young-Sin Yang, Myung-Kyu Lee, Min-Ho Kim, Jae-Yoon

요 약

본 연구는 스페이스 트러스 구조물의 초기 형상을 결정하기 위해 밀도법을 이용한 위상최적화 기술을 고려하고자 한다. 대부분의 초기 형상설계는 다양한 최적화 방법을 활용하지 않고 설계자의 경험이나 시행착오적인 방법을 바탕으로 수행되고 있다. 이런 이유로 합리적이고 경제적인 최적화기술이 초기 형상설계에 도입되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 스페이스 트러스 구조물을 대상으로 설계영역을 설정하고 위상최적화를 수행하여 최적의 재료분포를 찾은 뒤 크기최적화를 이용하여 최적부재 크기를 찾고자 한다. 이와 같이 밀도법을 이용한 위상 및 크기최적화를 병행하여 수행할 경우 합리적인 스페이스 트러스 구조물의 초기 형상을 도출할 수 있다.

Abstract

This study presents the topology optimization technique by density method to determine the initial shape of space truss structures. Most initial shape design is performed by designer's previous experiences and trial and error method instead of the application of reasonable optimization method. Thus, the reasonable and economical optimization methods are needed to be introduced for the initial shape design. Therefore, we set design domain for cantilever space truss structure as an example model. And topology optimization is used to obtain optimum layout for them, and then size optimization method is used to find the optimum member size. Therefore, the reasonable initial optimal shapes of spatial truss structures can be obtained through the topology and size optimization using density method.

키워드 : 위상최적화, 크기최적화, 형상설계, 밀도법, 스페이스 트러스

Keywords : Topology Optimization, Size Optimization, Shape Design, Density Method, Space Truss

1. 서 론

오늘날 건축 구조물이 대공간, 대형화됨에 따라 주어진 설계환경 및 조건을 만족시키는 최적의 설계 대안을 찾는 것은 어려운 과정이다. 특히 대공간 구조물의 최적설계는 설계자의 과거 경험이나 시행착오적인 방법을 바탕으로 수행됨으로써 과도한 노력과 계산시간이 소요되며, 일반적으로 형상 및 위상에는 변화를 주지 않고, 부재의 치수만을 변화시

키는 크기최적화를 주로 고려하였다. 이에 비해 형상 및 위상최적화 기법을 구조물의 초기 형상설계에 적용시 합리적인 설계대안을 구축할 수 있다. 초기 형상 설계 및 위상최적화에 대한 연구로 김홍건¹⁾은 중량을 최소화하며 응력을 목표치 이내로 제한하는 조건하에서 최적형상을 구하기 위해 근사법을 이용한 연구를 수행하였고, 이동규²⁾는 위상최적화시 수렴성 개선과 초기 구멍의 효과를 검증하는 연구를 수행하였다. 또한 황영진³⁾은 차량설계에 위상최적화를 도입하여 주어진 요구조건에 대하여 높은 강성을 가지는 동시에 구조 경량화를 만족시킬 수 있는 초기 설계 모델을 제시하는 연구를 수행하였다. 외국사례로 Wang¹⁰⁾은 위상최적화시 수치적 불

* 청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사(교신저자)
Tel: 043-229-8483 Fax: 043-229-8483
E-mail : hskim@cju.ac.kr

** 청주대학교 건축공학과 박사과정

*** 청주대학교 건축공학과 석사과정

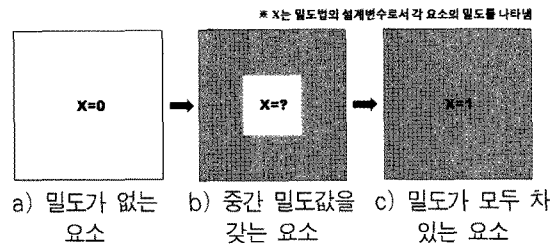
안정 문제를 해결하기 위하여 필터링 방법에 관한 연구를 수행하였고 Liang¹¹⁾은 PBO방법을 위상최적화에 이용한 후 단순보 예제에 적용하여 알고리즘의 타당성을 증명하였다.

하지만 기존 연구들은 위상최적화 기법을 건축 구조물의 초기 형상설계 단계에 이용한 사례가 드물며 연구의 대부분이 알고리즘 개발이나 수치적인 문제점 등을 개선하기 위해 진행되고 있다. 또한 위상최적화 기법을 최적의 위상 및 형상을 찾는 과정에만 국한하여 사용하고 있을 뿐 구조물의 부재 단면크기 산정은 고려하지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 위상 및 크기최적화를 이용하여 스페이스 트러스 구조물의 최적 위상 및 형상을 결정하고 구조 부재의 최적 단면크기를 도출하고자한다. 이를 위해 밀도법을 이용하여 해당 설계영역의 최적 재료분포를 찾은 후 이에 대한 재해석 및 재설계를 수행하고, 아울러 크기최적화를 추가적으로 적용함으로써 구조물의 세부조건을 만족하는 최적의 초기 형상을 설계하고자 한다.

2. 밀도법에 의한 위상최적화

2.1 밀도법의 개념

부재모델을 전제로 위상 최적화 방안은 크게 직교 이방성(orthotropic) 물질의 강성계수를 이용한 균질화법(homogenization method)과 등방성(isotropic) 물질의 강성계수를 이용한 밀도법(density method)으로 분류된다. 밀도법은 균질화법을 토대로 발전한 방법으로 설계변수를 요소의 밀도로 단순화하여 방향에 따른 특성을 고려하지 못하는 단점이 있으나 균질화법에 비해 설계변수의 수가 상대적으로 적으므로 최적화에 소요되는 시간이 짧은 장점이 있는 방법이다. 특히 밀도법의 경우 임의의 설계영역을 유한개의 요소로 분할한 뒤, 각 요소의 밀도를 설계변수로 하여 최적의 밀도분포를 찾는 것이다. <그림 1>과 같이 밀도가 0 인 부분은 재료가 없는 것으로, 밀도가 1인 부분은 재료가 있는 부분으로 간주한다. 또한 밀도법은 밀도의 중간값이 필요 없으므로 중간값을 제거하기 위해



<그림 1> 밀도법의 설계변수

Mlejnek⁴⁾이 제안한 (1)식을 이용하여 밀도값에 별첨지수인 p를 곱하는 방법을 사용한다. 이 방법을 사용하면 재료 밀도 값이 0과 1 수렴하게 되어 구조물의 형상이 뚜렷하게 드러나는 효과가 있다. p는 일반적으로 $p \geq 1$ 값으로 설정하며 주로 p는 2에서 5사이의 값을 사용하며 본 연구에서는 3을 사용하였다.

$$E^e = (x^e)^p E^0 \tag{1}$$

여기서, E^e : 유효 탄성계수

E^0 : 원래 재료의 탄성계수

x^e : 요소의 상대밀도

p: 별첨지수

위상최적화의 목표는 주어진 부피에서 컴플라이언스를 최소화하는 것으로 여기서 컴플라이언스는 변위의 발생으로 생성되는 변형에너지를 의미하며, 강성이 클수록 변위의 발생 가능성이 줄어들기 때문에 이는 강성을 최대화하는 것과 같다.

컴플라이언스를 구하기 위해서 가상변위의 법칙을 적용하며 이때 가상변위의 법칙은 그 물체에 대한 가상의 작은 변위에 대하여 전체 내부 가상일은 전체 외부 가상일과 같다는 것을 의미한다. 이를 이용하여 구한 컴플라이언스는 (2)식과 같다.

$$c = F^T u = u^T K u \tag{2}$$

여기서, c: 컴플라이언스

F: 전체 하중벡터

u: 전체 변위벡터

K: 전체 강성행렬

밀도법을 사용하여 컴플라이언스를 최소화하는 내부 가상 밀도 분포를 찾는 문제로 정식화하면 (3) 식과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } : c &= \sum_{e=1}^N (u^e)^T K^e u^e \\ &= \sum_{e=1}^N (x^e)^p (u^e)^T K^0 u^e \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{Subject to } : \frac{V(x)}{V_0} \leq f$$

$$F = Ku$$

$$0 < x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$$

여기서,

c: 컴플라이언스

$K^e = (x^e)^p K^0$: 설계변수 x^e 에 대한 요소의 강성행렬

u^e : 요소의 변위벡터

x^e : 요소의 상대밀도

$V(x)$: 부피

V_0 : 원래의 부피

f: 부피분율

내부 가상 밀도 x^e 는 x_{\min} 과 x_{\max} 사이의 값을 가지며, x_{\min} 은 0.001이고 x_{\max} 는 1이다. 또한 x^e 가 0.001이면 비워져 있는 요소를 의미하며, 1이면 꽉 채워져 있는 요소를 의미한다.

2.2 민감도 해석

최적화 과정에서는 설정된 설계변수가 목적함수의 요구 사항을 만족시키도록 계속적으로 값을 변환시킨다. 이 과정에서 요구되는 사항으로 설계변수의 변화에 따른 목적함수 또는 제한조건의 변화를 추정하는 것이 민감도(sensitivity)의 계산이다. 본 연구에서는 설계변수 x^e 에 대한 목적함수와 제한조건의 민감도 해석을 수행하였다. (2)식을 설계 변수에 대하여 편미분하면 (4)식과 같다.

$$\frac{\partial c}{\partial x^e} = u^T \frac{\partial K}{\partial x^e} u + \frac{\partial u^T}{\partial x^e} K u + u^T K \frac{\partial u}{\partial x^e} \quad (4)$$

평형 방정식 $F = Ku$ 를 설계 변수에 대하여 편미분하면 (5)식과 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial x^e} = \frac{\partial K}{\partial x^e} u + K \frac{\partial u}{\partial x^e} \quad (5)$$

$\frac{\partial F}{\partial x^e} = 0$ 이므로 $K \frac{\partial u}{\partial x^e} = -\frac{\partial K}{\partial x^e} u$ 에 의해 (6)식이 유도된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x^e} = -K^{-1} \frac{\partial K}{\partial x^e} u \quad (6)$$

(6)식을 (4)식에 대입하면 (7)식과 같다.

$$\frac{\partial c}{\partial x^e} = u^T \frac{\partial K}{\partial x^e} u - 2u^T \frac{\partial K}{\partial x^e} u = -u^T \frac{\partial K}{\partial x^e} u \quad (7)$$

요소의 강성행렬 $K^e = (x^e)^p K^0$ 를 설계변수 x^e 에 대하여 편미분하면 (8)식이 되고, 이를 (7)식에 대입하면 (9)식과 같은 민감도를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial K^e}{\partial x^e} = p(x^e)^{p-1} K^0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x^e} = -p(x^e)^{p-1} (u^e)^T K^0 u^e \quad (9)$$

2.3 최적조건법

최적조건법(Optimality criteria method)은 Bendøse⁵⁾가 제안한 것으로 라그랑지승수(Lagrange multiplier)를 도입하여 설계제한조건을 전체 포텐셜에너지에 포함시켜 새로운 목적함수를 만들어 제한이 없는 문제형태로 바꾸어 준 뒤, 변분법을 이용하여 최적조건을 찾아낸다. 이렇게 구해진 최적조건은 경계조건 등을 포함한 평형방정식과 최적의 밀도분포 및 그에 대한 제한을 의미하고, 최적조건을 만족시키도록 밀도분포와 이에 따른 변위를 번갈아가면서 개선시키면 원하는 해에 도달할 수 있게 된다. 최적조건법을 적용하기 위해 위상최적화의 정식화 과정인 (3)식에 라그랑지를 도입하고 쿤-터커 필

요조건을 이용하면 (10)식이 유도될 수 있다. 각각의 제한조건에 대하여 라그랑지승수를 도입하여 최적조건을 구하고, 이로부터 밀도분포 개선 알고리즘을 얻을 수 있다.

$$L = c + \lambda(V - fV_0) + \lambda_1^T(Ku - F) + \sum_{e=1}^N \lambda_2^e(x_{\min} - x^e) + \sum_{e=1}^N \lambda_3^e(x^e - x_{\max}) \quad (10)$$

여기서 λ_i 는 라그랑지승수를 의미한다. 또한 설계 변수에 대하여 편미분한 라그랑지를 정리하면 (11)식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial L}{\partial x^e} = \frac{\partial c}{\partial x^e} + \lambda \frac{\partial V}{\partial x^e} + \lambda_1^T \frac{\partial(Ku)}{\partial x^e} - \lambda_2^e + \lambda_3^e \quad (11)$$

$\lambda_2^e = \lambda_3^e = 0$, $\frac{\partial F}{\partial x^e} = 0$ 라고 가정하고 라그랑지를 유도하면 (12)식과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial x^e} = \frac{\partial c}{\partial x^e} + \lambda \frac{\partial V}{\partial x^e} + \lambda_1^T \left(\frac{\partial K}{\partial x^e} u + K \frac{\partial u}{\partial x^e} \right) \quad (12)$$

(6)식과 (9)식을 (12)식에 대입한 후 정리하면 (13)식과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial x^e} = -p(x^e)^{p-1}(u^e)^T K^0 u^e + \lambda \frac{\partial V}{\partial x^e} + \lambda_1^T \left(\frac{\partial K}{\partial x^e} u + K(-K^{-1} \frac{\partial K}{\partial x^e} u) \right) \quad (13)$$

(13)식에서 $\frac{\partial L}{\partial x^e} = 0$ (for $e = 1, \dots, N$) 으로 가정하면 (14)식과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial x^e} = -p(x^e)^{p-1}(u^e)^T K^0 u^e + \lambda \frac{\partial V}{\partial x^e} = 0 \quad (14)$$

(14)식에 의한 설계 변수는 (15)식으로 정리된다.

$$\frac{p(x^e)^{p-1}(u^e)^T K^0 u^e}{\lambda \frac{\partial V}{\partial x^e}} = \frac{-\frac{\partial c}{\partial x^e}}{\lambda \frac{\partial V}{\partial x^e}} = B^e = 1 \quad (15)$$

λ 는 체적제한과 관련된 라그랑지승수로서 밀도분포 개선단계마다 체적 제한을 맞추도록 구해주어야 한다.

$$x_{new}^e = B^e x^e \quad (16)$$

또한 (17)식은 효율적인 적용을 위한 개선된 개념을 보여준다.

$$x_{new}^e = \quad (17)$$

if $x^e(B^e)^\eta \leq \max(x_{\min}, x^e - m)$,
then $\max(x_{\min}, x^e - m)$

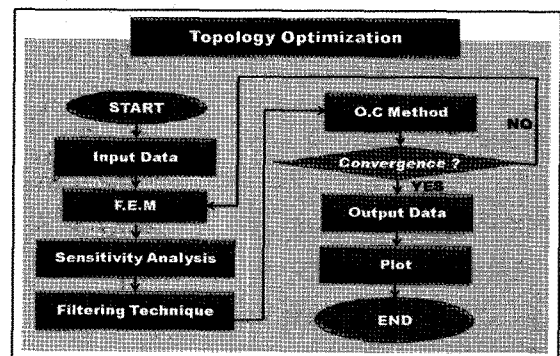
if $\max(x_{\min}, x^e - m) < x^e(B^e)^\eta < \min(1, x^e + m)$,
then $x^e(B^e)^\eta$

if $\min(1, x^e + m) \leq x^e(B^e)^\eta$,
then $\min(1, x^e + m)$

여기서, η 과 m 은 각각 감쇠계수(damping coefficient)와 조정변수(move-limit)로서 알고리즘의 수렴속도 및 안정성과 관련이 있다. η 는 0.5의 값을 사용하며 m 은 보통 0.2를 사용한다.

2.4 위상최적화 과정

연구에서의 위상최적화 수행을 위한 프로세스는 <그림 2>와 같다.



<그림 2> 위상최적화 과정

1) 해당 구조물에 대한 하중, 지점조건을 고려하고 위상최적화를 수행할 설계영역 설정에 대한 기본 데이터를 입력한다.

2) 유한요소 해석을 통하여 목적함수를 구하기 위

한 설계영역내의 변위를 구한다.

3) 민감도 해석을 통하여 설계변수(요소의 밀도)의 변화에 따른 목적함수 또는 제한조건의 변화를 추정한다.

4) 필터링 기법⁹⁾을 이용하여 유한요소해석 시 발생할 수 있는 수치적 문제점인 체커보드 현상을 완화시킨다.

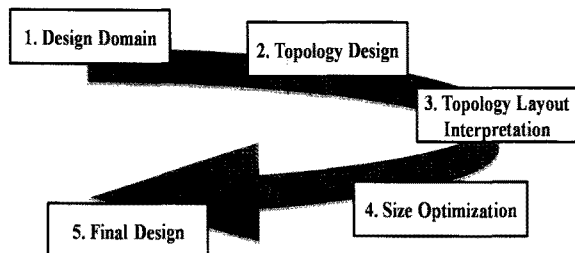
5) 최적조건법을 이용하여 개선단계마다 체적 제한을 만족하는 요소의 밀도로 갱신시킨다.

6) 갱신된 설계 변수 값이 주어진 수렴조건에 만족하면 최적화를 멈추고 그렇지 않으면 2)에서 6)의 과정을 반복한다.

7) 위 과정이 완료되면 설계영역에 대한 최적의 재료분포를 이미지화한다.

3. 구조물의 초기 형상설계 프로세스

본 연구에서는 구조물의 최적 초기 형상을 얻기 위해 <그림 3>과 같이 설계영역 설정, 위상최적화, 재해석 및 재설계, 크기최적화, 최종 설계 순으로 차례대로 진행하였다.



<그림 3> 구조물의 초기 형상 설계 프로세스

1) 설계하고자하는 구조물의 설계영역을 설정한다.

2) 위상 최적 설계를 수행한다. 이를 통해 대상 구조물의 내·외부에 대한 최적의 재료분포를 동시에 구할 수 있다.

3) 최적의 재료분포에 대한 재해석 및 재설계를 수행한다. 이 단계에서는 최적의 재료분포를 얻었으나 두께 및 크기가 제작하기에 불가능 할 정도로 작고 형태도 고르지 않아 그대로 실제 모델에 적용하기 어렵기 때문에 제작성과 실용성을 고려하여 구

조물의 최적 재료분포를 토대로 철골 트러스 형상으로 재해석 및 재설계를 수행한다.

4) 크기최적화⁹⁾를 수행한다. 이때, 변위 및 응력 등의 세부조건을 만족시키는 최적의 부재를 찾아 효율적인 구조물의 형상을 제안한다.

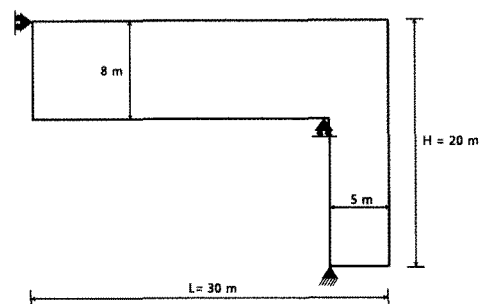
1)~4)단계를 마치게 되면 최종적으로 최적 초기 형상을 얻을 수 있다.

4. 적용모델 및 형상설계

본 연구에서 제시한 구조물의 초기 형상 설계 프로세스를 적용해 보기 위해 캔틸레버형 스페이스 트러스 구조물을 선정하고 형상 설계를 수행하였다.

4.1 설계영역 설정 및 위상최적화 수행

캔틸레버형 스페이스 트러스 구조물의 설계영역은 <그림 4>와 같은 이차원 형상을 가지며, 스패น(L)은 30 m, 높이(H)는 20 m이고, 지점조건은 그림과 같이 설정하였다. 하중은 연직하중 3 kN/m이 작용한다고 설정하였으며, 재료의 탄성계수는 210 GPa, 포아송비는 0.3이다. 위상최적화 수행 시 설계변수는 각 요소의 상대밀도이고 구조물의 컴플라이언스를 최소화하는 것을 목적으로 한다. 이는 구조물의 강성을 최대화하는 것과 같으며, 이때의 재료분포를 찾기 위해 위상최적화를 수행한다.

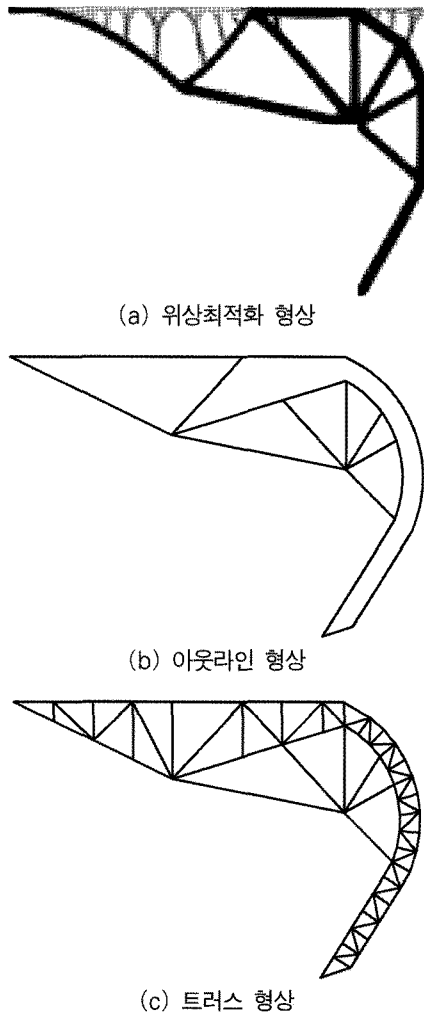


<그림 4> 대상 구조물의 설계영역

4.2 재해석 및 재설계 과정

위상 최적화의 결과로 <그림 5(a)>와 같은 최적의 재료분포를 얻었다. 이때 위상 최적화 결과 형상은 구조물에 대한 최적 재료 분포의 정보를 제공하

며, 이를 토대로 <그림 5(b)>와 같은 아웃라인 형상으로 설계한다. 그 후에 <그림 5(c)>처럼 트러스 형상으로 설계를 진행한다. 재해석 및 재설계 과정은 설계자의 판단이나 의도가 중요하며 이에 따라 구조물의 형상이 달라진다.



<그림 5> 구조물의 형상 설계 과정

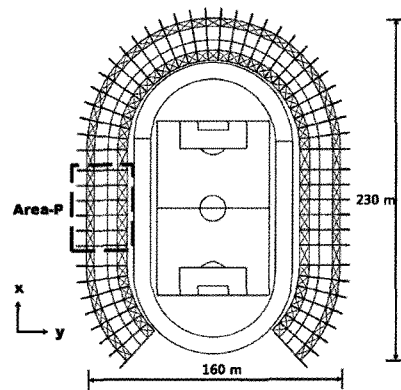
4.3 스페이스 트러스 구조물의 모델링

대상 구조물의 설계영역에 대하여 트러스 형상 설계를 수행한 후, <표 1>과 <그림 6(a)> 및 <그림 6(b)>와 같이 전체 구조물로 구성해 나간다. 전체 구조물의 개요는 x 방향으로 160 m, y방향으로 230m, z방향으로 20 m인 삼차원 형상이다. 또한 <그림 7>와 같이 부재 그룹화 기법을 사용하여 3가지 종류의 부재로 그룹화하여 전체 구조물을 설계한다. 전체 구조 모델의 초기부재는 KS규격에서 주

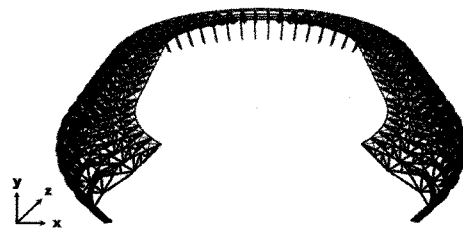
어진 SS400 원형 강관으로 Main structure, Sub beam, Brace 부재는 모두 동일한 규격인 $\varnothing 600 \times 9.0$ mm 부재로 설정한다. 그리고 <그림 6(a)>에서 Area-P란 최적의 부재 사이즈를 찾기 위해 크기 최적화를 수행할 구역을 표시한 것이다.

<표 1> 구조물 모델링 개요

x 스패 길이	160 m		
y 스패 길이	230 m		
높이(z)	20 m		
하중조건	상부 3 kN/m ²		
부재종류	Member (mm)	Brace (mm)	Chord (mm)
	P-600×9.0		
초기 중량(kN)	2560.85		

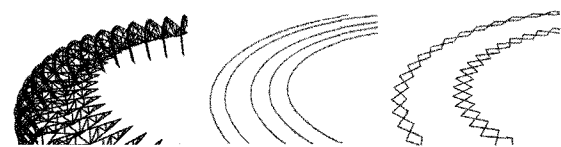


(a) Top View



(b) Front View

<그림 6> 구조물의 모델 형상



(a) Main structure (b) Sub beam (c) Brace

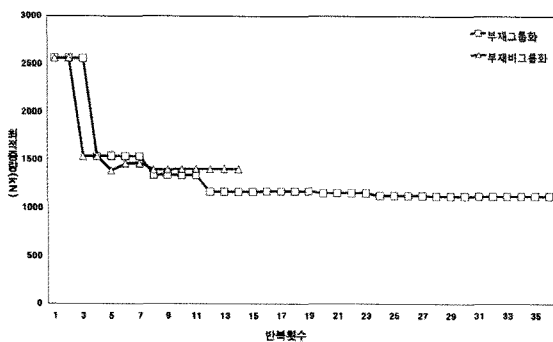
<그림 7> 구조물 모델의 부재별 그룹화

4.4 크기최적화 수행 및 결과분석

구조물의 모델링이 끝나면 크기 최적화를 수행하여 부재의 최적 단면 크기를 도출한다. 본 예제에서는 Area-P 구간을 대상으로 크기 최적화를 수행하며, 작용하중은 상부 연속하중 3 kN/m²으로 가정하였다. 크기 최적화 시 목적함수는 구조물의 총 중량으로 하고 이를 최소화하는 것을 목적으로 한다. 구속조건으로는 부재의 응력과 절점변위로 정하였다. 최적화 시 응력은 부재설계기준에 따른 허용응력 범위를 넘지 못하도록 설정하였고, 모든 절점의 변위가 제한변위 100 mm를 넘지 못하도록 설정하였다. 결과를 분석하여 보면 <표 2>와 같이 부재의 허용응력을 넘지 않았으며, 목표변위 또한 만족하였음을 알 수 있다. 또한 <그림 8>은 최적 중량이력을 나타내는 것으로 부재 그룹화 경우와 비그룹화 경우 모두 여러 번의 반복과정을 거치는 동안 안정적으로 수렴하는 것으로 나타났다.

<표 2> 전체 구조물의 제한조건 검토

구분	최적제어변위(mm)	최대 응력비
부재 그룹화	92.4	1.0
부재 비그룹화	91.8	1.0



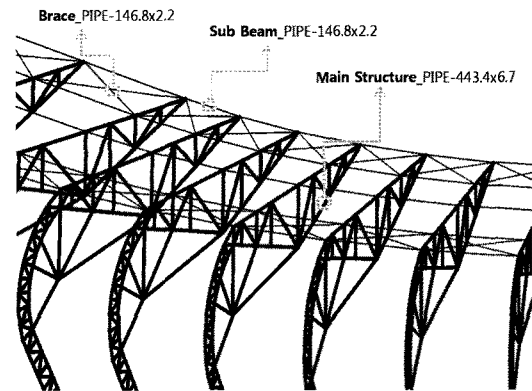
<그림 8> 구조물의 최적중량 이력

<표 3>은 구조물의 최적 부재크기 및 중량을 나타내는 것으로 최적 중량은 초기 중량에 비해 감소하였다. 또한 부재그룹화와 비그룹화 경우를 비교해 보면 부재를 그룹화 했을 때의 구조물의 총 중량이 비그룹화 경우에 비해 20% 감소함을 알 수 있었다. 이는 부재를 비그룹화하면 허용응력 및 목표변위를

만족하는 가장 큰 부재를 기준으로 모든 부재가 동일하게 설계되기 때문으로 판단된다. <그림 9>는 위상 및 크기최적화를 통한 켈틸레버형 구조물의 최적 부재 단면을 나타내는 형상을 보여준다.

<표 3> 전체 구조물의 최적 중량 비교

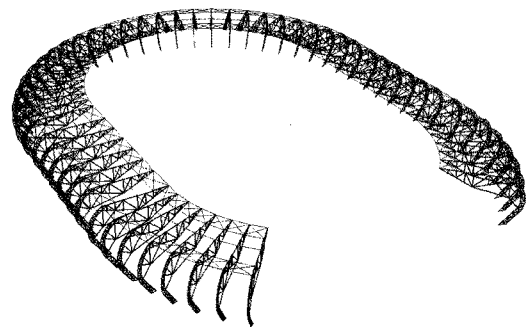
구분	부재종류			최적 중량 (kN)
	Main structure (mm)	Sub beam (mm)	Brace (mm)	
부재 그룹화	P-443.4×6.7	P-146.8×2.2	P-146.8×2.2	1121.6
부재 비그룹화	P-444.3×6.7			1403.4



<그림 9> 구조물의 최적 부재 단면

4.5 구조물의 최적 형상

구조물의 초기 형상 설계 프로세스를 통하여 <그림 10>과 같은 켈틸레버형 스페이스 트러스 구조물의 최적 형상을 얻을 수 있다.



<그림 10> 구조물의 최적 형상

4. 결 론

본 연구에서는 위상최적화 기법 중 밀도법을 이용하여 스페이스 트러스 구조물의 초기 형상 설계 방안을 제시하였으며, 적용모델을 고려한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 밀도법을 이용하여 위상최적화를 수행한 결과 기존의 설계방법인 설계자의 경험이나 시행착오적인 방법에서 벗어나 구조물의 설계영역과 경계조건 등의 데이터만으로 간편하고 효율적으로 구조모델의 최적의 재료분포를 얻을 수 있었다. 또한 밀도법을 이용한 위상최적화를 실제 구조물의 초기 형상 설계에 적용시 합리적인 설계 대안을 구축할 수 있다.

2) 위상최적화 후 크기최적화를 추가적으로 수행함으로써 구조물의 초기 위상뿐만 아니라 최적의 부재 단면 크기도 결정할 수 있어 구조물의 최종적인 형상을 얻는데 도움을 줄 수 있다.

3) 구조물의 형상 설계 시 하중 및 부재연결에 따라 적절하게 부재를 그룹화한다면 크기최적화 시 효율성을 높일 수 있다.

4) 위상 최적설계를 통하여 개념 설계단계에서 발생하는 시간과 비용의 낭비를 줄일 수 있으며, 공학적 접근을 통하여 구조설계 시 효과적인 대안을 도출하는데 용이하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(과제번호 #06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김홍건, 양성모, 노홍길, 나석찬, 유기현, 조남익, 2차원 구조물의 최적형상설계에 관한 연구, 한국공작기계학회논문집, 12권 2호, pp.9-16, 2003
2. 이동규, 신수미, 박성수, SIMP를 이용한 구조물의 재료 위상 최적설계, Part I : 부분적인 구멍의 위상을 가지는 초기 설계영역, 한국전산구조공학회논문집, 20권 1호, pp.9-18, 2007

3. 황영진, 강신권, 김종범, 이석순, 최창곤, 손재홍, 수송기계부품의 경량화 형상을 위한 위상최적설계, 한국정밀공학회지, 20권, 7호, pp.177-184, 2003
4. Mlejnek, H. P, An Engineer's Approach to Optimal Material Distribution and Shape Finding, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 106, 1993
5. Bendsoe, M. P, Optimization of Structural Topology, Shape and Material, Springer, Berlin, Germany, 1995
6. Sigmund, O, Petersson, J, Numerical instabilities in topology optimization : a survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima, Struct. Optim. 16, pp.68-75, 1998
7. John Chilton, Space Grid Structures, 2000
8. G.S. Ramaswamy, M Eekhout, G R Suresh, Analysis, design and construction of steel space frames. Thomas Telford, 2002
9. Vanderplaats Research & Development, Inc, Design Optimization Tools, 2001
10. M.Y. Wang, S.Y. Wang, K.M.Lim, A density filtering approach for topology optimization, 7th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, pp.1007-1016
11. Qing Q. Liang, Automated performance-based optimal design of continuum structures under multiple load cases, 5th Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM 2007

- ▶ 접수일자 : 2010년 7월 15일
- ▶ 심사 완료일자 : 2010년 10월 5일
- ▶ 게재 확정일자 : 2010년 10월 8일