

구조물의 최대강성 치수최적설계

신수미*, 박현정**

Size Optimization Design Based on Maximum Stiffness for Structures

Soo-Mi Shin *, Hyun-Jung Park **

요약

본 연구는 주어진 부피제약조건 하에서 최대강성을 구현하는 고층 철골 트러스 시스템의 단면치수 재조정 프로세스를 보여준다. 이러한 치수최적설계는 경사도법에 근거한 최적화 방법에 의해 수치적으로 연산된다. 전형적인 치수최적설계에서는 변위나 응력제약조건 하에서 구조물의 최소중량을 구현하지만, 본 연구에서 소개되는 치수최적설계는 이것과 반대의 프로세스를 가진다. 즉, 부피와 같은 재료제약조건 하에서 최대강성을 구현한다. 본 연구는 기존의 치수최적설계방법의 대안으로서 그 의미를 가질 수 있다. 고층 철골트러스 구조시스템의 수치 예제를 통하여 부재 단면치수 재조정 설계가 기존의 최소중량설계와 반대인 최대강성 이산화 치수최적설계를 통하여 적합하게 수행됨이 증명되었다.

Abstract

This study presents a structural design optimizing sizes of high-rise steel plane truss members by maximizing stiffness subjected to given volume constraints. The sizing optimum design is evaluated by using a well-known optimality criteria (OC) of gradient-based optimization methods. In typical size optimization methods, truss structures are optimized with respect to minimum weight with constraints on the value of some displacement and on the member stresses. The proposed method is an inversed size optimization process in comparisons with the typical size optimization methods since it maximizes stiffness associated with stresses or displacements subjected to volume constraints related to weight. The inversed approach is another alternative to classical size optimization methods in order to optimize members' sizes in truss structures. Numerical applications of a round shape steel pipe truss structure are studied to verify that the proposed maximum stiffness-based size optimization design is suitable for optimally developing truss members's sizes.

▶ Keyword : Size optimization design, High-rise truss, Maximum stiffness, Volume constraints, Optimality criteria

• 제1저자 : 신수미 • 교신저자 : 박현정
• 투고일 : 2008. 11. 17, 심사일 : 2008. 11. 26, 게재확정일 : 2009. 1. 23.
* 부산대학교 건축공학과 BK21 박사후연구원 ** 신라대학교 건축학부 조교수

1. 서론

트러스는 인간이 창조한 구조물 중에서 가장 많이 사용되는 것 중에 하나이다. 부재를 용접이나 볼트이음으로 핀 접합 상태로 연결하여 인장력과 압축력에만 저항하는 심플한 구조 시스템적 특성은 그 사용성을 극대화시켰다. 철강을 주재료로 사용하는 건설 구조물 중에서 트러스는 가장 일반적이고 대표적인 철강 구조물로서 최근 구조물이 대형화되면서 대스팬 지붕트러스, 교량트러스, 초고층 건물의 트러스튜브나 스테거드 트러스와 같이 넓은 공간에 걸치는 형식으로 구현되고 있다. 따라서 한정된 철강 재료를 사용해서 최고의 구조성능 발현을 목표로 하는 경제성을 가진 트러스 구조물 설계는 구조 엔지니어들에게 큰 관심사였다. 이러한 경제성에 입각한 사고를 바탕으로 과거의 경험에 근거한 직관적인 설계에서 벗어나 체계적이고 합리적인 설계의 필요성을 인식하게 되었고, 이는 자연적으로 구조물의 "최적설계" 이론과 연계가 되었다.

현재 일반화된 구조 최적화 방법(1)으로는 최적설계의 목적에 따라 치수(size), 형상(shape), 위상(topology)에 관한 것이 있으며, 이중에서 특히 치수 최적화는 공장에서 규격화된 단면특성의 강재가 사용되는 트러스 구조설계에서 경제적인 강재 사용에 큰 역할을 한다 하겠다.

일반적으로 강재 트러스의 치수 최적설계는 이미 결정된

위상과 형상의 트러스를 대상으로 응력과 변위 제약조건에 대해 최소중량 구조물을 찾아 각 부재의 최적단면적에 적합한 규격의 강재 형태와 치수를 선정하는 과정으로 볼 수 있다. 트러스의 치수 최적설계와 관련된 근래의 국내(2)(3)(4)와 국외(5)(6)(7)의 연구는 대부분 확률론적인 수치 최적화방법을 탈피한 확률론적인 방법인 퍼지이론이나 유전자 알고리즘을 통하여 구현하고 있으며, 전통적으로 다루어진 최소중량 최적화를 수행하였다.

본 연구에서는 이러한 비선형 제약최적화 문제를 해결하기 위해 라그랑지 함수를 이용하는 확률론적인 최적성 기준 알고리즘(8)(optimality criteria)의 경사도에 기초한 수치 최적화방법을 사용하여 초고층 강골구조물 최적설계에 대한 기초연구로서 주어진 강재량에 대해서 최대강성을 구현하는 트러스 부재의 최대강성 치수 최적설계 알고리즘을 개발하였다.

등분포 수평하중을 받는 원형관강 고층 트러스의 수치예제를 통하여 본 연구에서 제안한 비확률적인 방법에 의한 최대강성을 가지는 단면치수 최적설계 알고리즘의 유효성을 증명하였다.

II. 트러스 최대강성 치수의 최적화문제 정식화

평면트러스는 핀접합을 가지는 축 부재로 구성되며 외부하

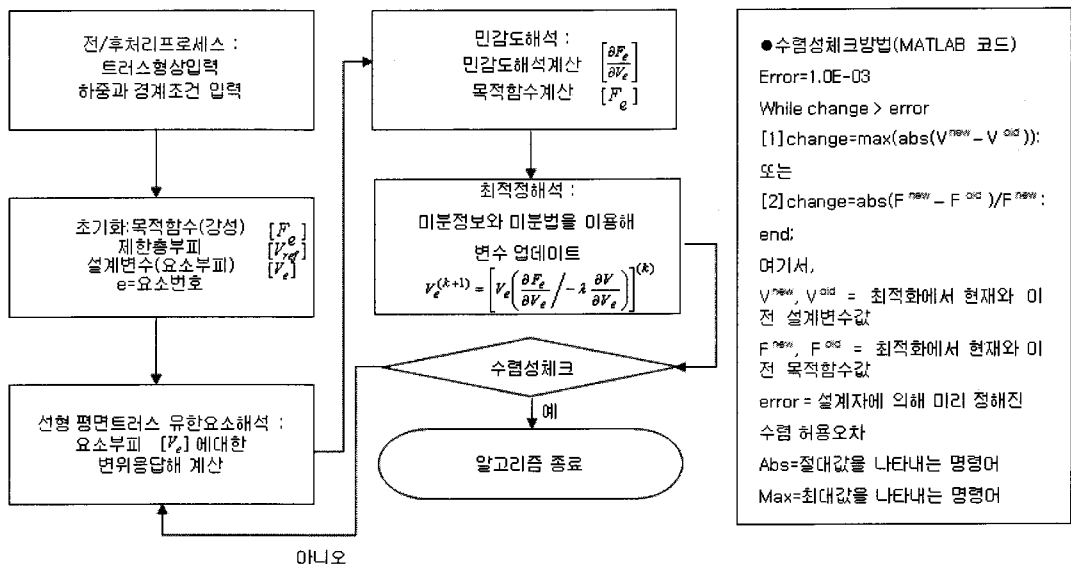


그림 1. 최대강성 이산화 치수 최적설계 알고리즘
 Fig. 1. Algorithm for maximum stiffness-based size optimization design

중에 대해 재축을 따라 인장과 압축변위가 작용하고 휨변형에 대해서는 저항하지 않는다. 트러스는 회전된 각 요소들의 연결 시스템이기 때문에 구조해석의 편리성을 위해서 일반적으로 요소좌표계는 전체좌표계로 통일되어야 한다. 좌표변환을 위한 식(1)에 의해 요소 축에 평행하고 수직인 자유도 $u_{1,2}$ 와 $v_{1,2}$ 는 각각 전체 축에 관한 자유도 \bar{u}_1, \bar{u}_2 와 \bar{v}_1, \bar{v}_2 로 수정된다.

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{v}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \bar{v}_2 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

식(1)을 간단한 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\{U_e\} = [T]\{\bar{U}_e\} \dots\dots\dots (2)$$

요소좌표계상의 요소 강성행렬 $[K_e]$ 을 좌표전환하기 위해 가상일의 원리를 고려하여 절점변위벡터 $\{U_e\}$ 와 요소 강성행렬을 이용하여 변형률에너지 Π 를 정의하면 식(3)과 같다.

$$\Pi = \frac{1}{2} \{U_e\}^T [K_e] \{U_e\} \dots\dots\dots (3)$$

여기서,

$$[K_e] = \begin{bmatrix} A_e E_e / L_e & 0 & -A_e E_e / L_e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -A_e E_e / L_e & 0 & A_e E_e / L_e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, A_e : 요소의 단면적
 E_e : 요소의 탄성계수
 L_e : 요소의 부재길이

식(2)를 식(3)에 대입하면 전체 좌표시스템에서 변형률 에너지 식은 식(5)와 같다.

$$\bar{\Pi} = \frac{1}{2} \{\bar{U}_e\}^T [\bar{K}_e] \{\bar{U}_e\} \dots\dots\dots (5)$$

여기서, $[\bar{K}_e] = [T]^T [K_e] [T]$ 는 전체좌표계에서 요소 강성행렬을 나타낸다.

변형률에너지는 좌표시스템에 의존하지 않기 때문에 좌표가 변경되었다고 해서 변하지 않으며 식(4)는 식(3)과 일치함을 알 수 있다. 일반적으로 강성은 변형률에너지의 역수로 표준화 될 수 있기 때문에 전체좌표계상에서 총 요소 수 N_e 를 가지는 최종적인 평면트러스의 강성 Ψ 은 스칼라량으로서 식(6)과 같다.

$$\Psi = \left(\sum_{e=1}^{N_e} \frac{1}{2} \{\bar{U}_e\}^T [\bar{K}_e] \{\bar{U}_e\} \right)^{-1} \dots\dots\dots (6)$$

본 연구에서 사용하는 트러스의 치수 최적설계를 위한 목적함수는 표준화된 구조강성이며, 제약조건은 강제 부피의 하한과 상한치 제약과 사전에 주어진 강재의 총부피 제약을 고려한다. 따라서 최적설계 문제의 정식화는 식(7)과 같다.

$$\text{Maximize } \Psi(V) = \left(\sum_{e=1}^{N_e} \frac{1}{2} \{\bar{U}_e\}^T [\bar{K}_e] \{\bar{U}_e\} \right)^{-1} \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{Subject to } \sum_{e=1}^{N_e} V_e = V_{ref} \dots\dots\dots (8)$$

$$V^L \leq V_e \leq V^U \dots\dots\dots (9)$$

$$V_e = A_e \times L_e \dots\dots\dots (10)$$

$$V_{ref} = V_0 \times N_e \dots\dots\dots (11)$$

여기서,

Ψ : 목적함수, 표준화된 구조강성
 V_e : 설계변수, 요소 체적(cm^3)
 V^L, V^U : 설계변수의 하한치와상한치
 V_{ref}, V_0 : 설계변수의 총체적(cm^3), 한 요소의 초기체적(cm^3)
 A_e : 요소의 단면적(cm^2)
 L_e : 요소의 부재길이(cm)

III. 원형 강관 트러스 구조물의 치수 최적설계

최적정 방법을 사용한 치수 최적설계 알고리즘은 그림1에 도시하였다. 각 과정은 전/후처리 프로세스, 설계변수와 목적함수의 초기화, 선형 평면트러스의 유한요소해석, 민감도해석, 최적정 해석, 수렴성 체크의 과정으로 이루어지며, MATLAB 코드를 사용하여 프로그램을 수행하였다.

설계대상 구조물은 그림 2와 같이 159 요소, 104 총자유도를 가지는 3스팬 12층 트러스 구조이다. 이산화 치수 최적설계를 수행하기 위해 구조해석과 설계에 적용되는 단면은 실제 공장에서 제작되는 상용제품인 KS D3566 /JIS G3444 구조용 원형강관 단면에 대한 단면특성을 사용하여 최적설계를 수행하였다.

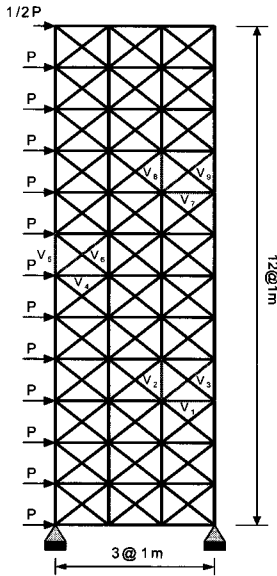


그림 2. 설계모델 (트러스)
Fig. 2. Design model (truss)

강구조의 최대강성을 목적함수로 사용하였고, 제약조건으로는 강재의 총 부피 제한과 각 강재의 상·하한치 제한인데 필요한 설계 데이터는 표 1에 제시하였다.

표 1. 트러스 요소의 입력자료
Table 1. Input data of truss element

설계 입력자료	값
스팬과 층고 (cm)	100
강재의 탄성계수 E_s (GPa)	210
하중 P (kN)	50
원형강관 부피 하한치 V^L (cm^3)	5,000
원형강관 부피 상한치 V^U (cm^3)	15,000
원형강관 총부피 제약 (cm^3)	954,000~2,226,000 (간격: 159,000)

표 2. 최적화된 트러스 구조물의 강성과 최대변위 비교
Table 2. Comparison between stiffness and maximum displacement of optimized truss structure

총부피 제한값 (cm^3)	최적화 전의 트러스		최적화 후의 트러스		비교	
	표준화 된강성	최대 변위 (cm)	표준화 된강성	최대변위 (cm)	강성 증가율 (%)	최대변위 감소율 (%)
954,000	0.1737	439.985	0.2122	384.190	22.17	12.68
1,113,000	0.2027	377.130	0.2633	318.071	29.90	15.66
1,272,000	0.2317	329.989	0.3154	267.437	36.12	18.96
1,431,000	0.2606	293.324	0.3636	229.170	39.52	21.87
1,590,000	0.2896	263.991	0.4035	201.077	39.33	23.83
1,749,000	0.3185	239.992	0.4214	186.941	32.31	22.11
1,908,000	0.3475	219.993	0.4272	182.053	22.94	17.25
2,067,000	0.3765	203.070	0.4309	178.998	14.45	11.85
2,226,000	0.4054	188.565	0.4333	176.979	6.88	6.14

원형강관의 총부피(cm^3) 제한값 954,000~2,226,000 (간격 = 159,000)에 따라 수렴하는 목적함수인 강성과 최대변위는 20 스텝에서 산출되었다. 이 값들은 최적화를 수행하지 않은 트러스 구조물의 강성 및 최대변위와 비교하여 표 2에 나타내었다.

최적화가 수행되기 전의 초기 트러스는 강재 하나의 부피 (cm^3)가 각각 6,000~14,000 (간격=1,000)으로 균일하다고 가정하였고 이러한 트러스가 치수 최적화를 위한 설계대상이다. 동일한 총 부피 제한 값에 대해 최적화 이후의 트러스는 최적화 이전보다 최대변위가 줄어들고 높은 강성을 보임을 알 수 있다. 그리고 강재의 총 부피 제한이 증가하면 초기 트러스나 최적 트러스 모두 강성이 증가하고 최대변위는 감소하였다. 그림 3에 최적화된 트러스의 강성 증가율과 최대변위 감소율의 변화 양상을 그래프로 제시하였다. 최적화 된 후의 트러스에서 강성 증가율과 최대변위 감소율은 총 부피 제한 값을 크게 설정함에 따라 점점 증가하다가 점점 감소하는 경향을 보였다.

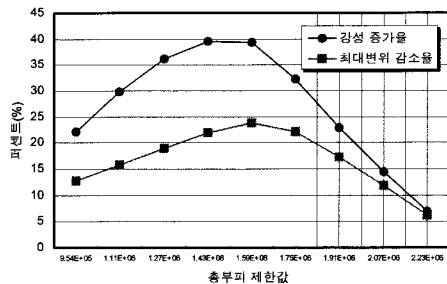


그림 3. 최적화된 트러스의 강성 증가율과 최대변위 감소율
Fig. 3. An increasing rate of stiffness and a decreasing rate of maximum displacement for optimized truss

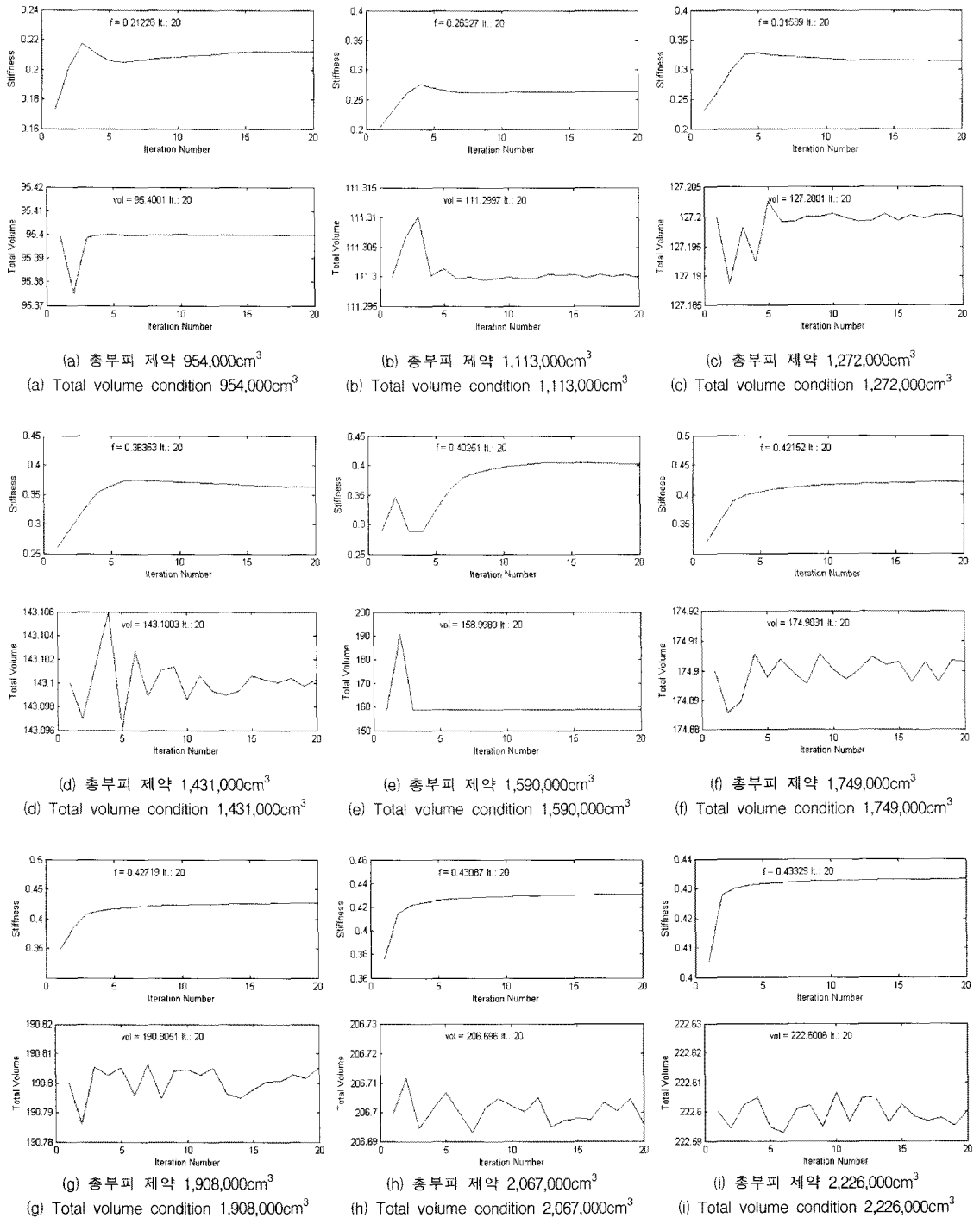


그림 4. 목적함수와 부피 제약조건에 수렴 이력곡선

Fig. 4. Convergence history curve for objective function and volume constraints

표 3. 강재의 총부피 제약이 1,749,000cm³일 때 목적함수와 설계변수의 수렴이력

Table 3. Convergence history for objective function and design variables (total volume condition=1,749,000cm³)

	표준화된 강성	V ₁ (cm ³)	V ₂ (cm ³)	V ₃ (cm ³)	V ₄ (cm ³)	V ₅ (cm ³)	V ₆ (cm ³)	V ₇ (cm ³)	V ₈ (cm ³)	V ₉ (cm ³)
Step 1	0.3185	11287.7	11235.7	10839.4	10340.4	10300.2	10313.1	10173.2	10168.6	10158.8
Step 2	0.3548	11790.8	11668.0	10735.4	9595.8	9573.0	9538.7	9222.9	9212.7	9191.2
Step 3	0.3891	13423.4	13190.6	11430.3	9357.6	9316.8	9256.0	8700.3	8682.6	8645.1
Step 4	0.3993	15000	15000	12414.6	9274.8	9213.5	9123.1	8299.5	8273.3	8218.1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Step 17	0.4206	15000	15000	15000	13265.5	12823.2	12210.8	6494.0	6319.6	5961.6
Step 18	0.4210	15000	15000	15000	13754.3	13278.2	12619.0	6447.2	6259.3	5874.4
Step 19	0.4213	15000	15000	15000	14215.0	13706.5	13001.7	6386.5	6185.6	5774.6
Step 20	0.4214	15000	15000	15000	14598.7	14060.9	13314.3	6291.5	6078.5	5644.0

표 4. 강재의 총부피 제약이 1,908,000cm³일 때 목적함수와 설계변수의 수렴이력

Table 4. Convergence history for objective function and design variables (total volume condition=1,908,000cm³)

	표준화된 강성	V ₁ (cm ³)	V ₂ (cm ³)	V ₃ (cm ³)	V ₄ (cm ³)	V ₅ (cm ³)	V ₆ (cm ³)	V ₇ (cm ³)	V ₈ (cm ³)	V ₉ (cm ³)
Step 1	0.3475	12353.6	12236.7	11863.0	11316.8	11305.7	11288.9	11133.8	11228.8	11118.0
Step 2	0.3848	13275.2	13138.6	12100.6	10829.5	10804.0	10765.7	10412.8	10401.5	10377.4
Step 3	0.4077	14984.6	14742.2	12910.2	10716.4	10672.8	10607.7	10011.2	9992.1	9951.7
Step 4	0.4136	15000	15000	13977.3	10768.9	10705.3	10611.2	9749.8	9722.2	9664.2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Step 17	0.4266	15000	15000	15000	14529.7	14151.2	13611.2	8558.2	8400.2	8072.5
Step 18	0.4268	15000	15000	15000	14912.5	14508.5	13931.5	8523.6	8354.7	8004.8
Step 19	0.4270	15000	15000	15000	15000	14874.2	14259.8	8492.3	8313.0	7940.8
Step 20	0.4272	15000	15000	15000	15000	15000	14602.6	8469.8	8278.8	7883.8

표 5. 구조용 원형강관의 총부피 제약이 1,749,000cm³일 때 트러스의 최적 치수설계 결과

Table 5. Optimized result of truss (total volume condition=1,749,000cm³)

부재 번호	최적 단면적(cm ²)	KS규준 원형강관
V ₁	150.000	Ø558.8×9.0
V ₂	150.000	Ø558.8×9.0
V ₃	106.082	Ø406.4×9.0
V ₄	145.987	Ø406.4×12.0
V ₅	140.609	Ø508.0×9.0
V ₆	94.161	Ø355.6×9.0
V ₇	62.915	Ø267.4×8.0
V ₈	60.785	Ø318.5×6.0
V ₉	39.915	Ø190.7×8.0



표 6. 구조용 원형강관의 총부피 제약이 1,908,000cm³일 때 트러스의 최적 치수설계 결과

Table 6. Optimized result of truss (total volume condition=1,908,000cm³)

부재 번호	최적 단면적(cm ²)	KS규준 원형강관
V ₁	150.000	Ø558.8×9.0
V ₂	150.000	Ø558.8×9.0
V ₃	106.082	Ø406.4×9.0
V ₄	150.000	Ø558.8×9.0
V ₅	150.000	Ø558.8×9.0
V ₆	146.026	Ø406.4×12.0
V ₇	84.698	Ø355.6×8.0
V ₈	82.788	Ø355.6×8.0
V ₉	55.755	Ø267.4×7.0

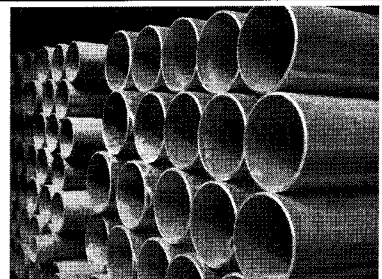


그림 4는 원형강관의 총 부피 제한이 $954,000\text{cm}^3 \sim 2,226,000\text{cm}^3$ 일 때, 부피 간격을 $159,000\text{cm}^3$ 으로 하여 최적설계를 수행한 것이다. 수행한 목적함수와 부피 제약조건은 적절하게 수렴하는 이력곡선을 나타냄을 알 수 있었다.

강재의 총 부피 제약이 $1,749,000\text{cm}^3$ 와 $1,908,000\text{cm}^3$ 일 때 목적함수와 설계변수의 변화과정을 표 3과 표 4에 각각 나타내었다. 20 스텝 만에 수렴하였으며 여기서 설계변수 V_{1-9} 는 임의적으로 선택된 수평(V_1, V_4, V_7), 수직(V_2, V_5, V_8), 가새(V_3, V_6, V_9) 부재들의 부피를 가리킨다. 수렴결과를 고찰해보면 부피의 크기가 수평부재 > 수직부재 > 가새의 순으로 수렴하는 것으로 보아 풍하중과 같은 주어진 등분포 수평하중에 저항하는 데 수평방향에 대해서 강성적으로 유효한 최적 단면설계가 이루어졌다고 볼 수 있다. 지지점에 가까운 (V_1, V_2, V_3)은 부피 상한치인 15,000을 향하여 빠르게 수렴하는 반면, 지지점에 가장 먼 (V_7, V_8, V_9)는 부피 하한치인 5,000을 향하여 빠르게 수렴하는 것을 볼 수 있다. 구조용 원형강관의 총 부피 제약이 $1,749,000\text{cm}^3$ 와 $1,908,000\text{cm}^3$ 일 때 KS D3566/JIS G3444 규격 원형강관 재료표에 의해 최적 부피 V_{1-9} 에 적합하게 산출한 물량결과는 표 5와 표 6에 제시하였다.

V. 결론

본 연구에서는 초고층 강골조 구조물 최적설계에 대한 기초연구로서 기존의 확률론적인 유전자 알고리즘을 탈피하여 확정론적 최적점 방법을 접목한 구조물의 단면크기 재조정 치수 최적설계를 제시하고 이산화 최적설계 프로그램을 개발하여, 고층 트러스 구조물의 구조해석과 치수 이산화 최적화를 일괄적으로 수행하였다.

또한 트러스 치수 최적설계에 통상적으로 많이 사용하던 최적 모델 - 구조응답조건(변위와 응력 제약조건) 하에서 재료조건(최소중량)을 구현 - 의 역개념인 재료조건(중량으로 치환할 수 있는 부피 제약조건) 하에서 구조 응답조건(최대강성)을 구현하였다. 이것은 이산화 치수 최적설계를 수행할 때 방법론적인 또 다른 대안으로 가치가 있다고 판단된다. 이러한 역개념에 근거한 최적점 모델은 이미 일반적으로 위상 최적설계나 형상 최적설계를 수행하기 위한 최적 모델로 사용되었던 점에 비추어, 본 연구의 치수 최적화 설계 프로그램은 최적위상과 형상을 구현하는 위상이나 형상최적화 프로세스와 쉽게 연계되어 설계자 중심의 최적설계가 가능할 것으로 보인다. 추후의 연구는 이러한 통합 구조 최적설계 구현하기 위한 최적 알고리즘 개발을 모색할 필요가 있다고 사료된다.

참고문헌

- [1] U. Kirsch, "Optimal Topologies of Structures," Applied Mechanics Reviews, Vol. 42, No. 8, pp. 223-239, Jan. 1989.
- [2] 황선일, 조홍동, 한상훈, "유전알고리즘을 이용한 트러스 구조물의 이산화최적설계," 한국전산구조공학회 논문집, 제 14권 제 2호, 97-106쪽, 2001년 6월.
- [3] 강문명, 반춘욱, "퍼지-유전자 알고리즘에 의한 트러스의 단면 및 형상 이산화 최적설계," 한국전산구조공학회 논문집, 제 15권, 제 1호, 81-89쪽, 2002년 3월.
- [4] 김진상, 정일영, "최적점 기준법에 의한 트러스 구조물의 최적설계에 관한 연구," 대한건축학회 논문집(구조계), 제 12권, 제 9호, 225-233쪽, 1996년 9월.
- [5] D. E. Goldberg, M. P. Samtani, "Engineering Optimization via Genetic Algorithm," Proceeding of Ninth Conference on Electronic Computation, ASCE, The Structural Engineer, Vol. 69, No. 24, pp. 471-482, 1986.
- [6] W. M. Jenkins, "Structural Optimization with the Genetic Algorithm," The Structural Engineer, Vol. 69, No. 24, pp. 419-422, Dec. 1991.
- [7] A. Kaveh, V. Kalatjari, "Size/geometry Optimization of Trusses by The Force Method and Genetic Algorithm," ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 84, No. 5, pp. 347-357, Mar. 2004.
- [8] M. P. Bendsoe, "Optimization of Structural Topology, Shape, and Material," Berlin, Springer, 1995.
- [9] K. Sigron, "MATLAB Primer-Second Edition," Department of Mathematics, University of Florida, 1992.
- [10] 백진욱, 방정원, "동적 네트워크 환경하의 분산 에이전트를 활용한 병렬 유전자 알고리즘 기법," 한국컴퓨터정보학회논문지, 제 11권, 제 4호, 119-125쪽, 2006년 9월.
- [11] 박중현, "능동 현가장치에의 지능형 제어시스템 적용에 관한 연구," 한국컴퓨터정보학회논문지, 제 12권, 제 3호, 287-293쪽, 2007년 7월.
- [12] R.T. Haftka, R. V. Grandhi, "Structural Shape Optimization a Survey," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 57, No. 1, pp. 91-106, Aug. 1986.

- [13] B. Topping, "Shape Optimization of Skeletal Structures: A Review," Journal of Structural Engineering, Vol. 109, No. 8, pp. 1933-1951, Aug. 1983.

저자 소개



신수미

1997: 부산대학교 건축공학과 공학사

1999: 부산대학교 건축공학과 공학석사

2004: 부산대학교 건축공학과 공학
박사

현재: 부산대학교 건축공학과 BK21
박사후연구원

〈관심분야〉 최적화, 신뢰성 해석



박현정

1993: 부산대학교 건축공학과 공학사

1995: 부산대학교 건축공학과 공학석사

2001: 부산대학교 건축공학과 공학
박사

현재: 신라대학교 건축학부 조교수

〈관심분야〉 최적설계