스페이스 트러스 구조에 대한 최적화 구조 해석 프로그램의 개발

Development of Optimum Structural Analysis Program for Space Truss Structures

손 수 덕[1] · 김 명 선[2] · 김 승 덕[3] · 강 문 명[4]

Sohn, Su Deok Kim, Myung Sun Kim, Seung Deog Kang, Moon Myung

요 약 : 스페이스 프레임 구조물은 내부 기둥이 없는 대공간을 덮을 수 있다는 장점 때문에 현재의 많은 구조가와 설계자들에게 큰 관심을 받고 있다. 본 연구에서 다루는 강성구조·이산화시스템인 스페이스 트러스는 기하학적 비선형항이 포함된 대변형 이론을 이용한 유한요소법을 응력해석 방법으로 사용하며, 비선형최적화에 적합한 GINO (General Interactive Nonlinear Optimizer) 프로그램을 이용하여 구조물에 대한 전체 체적을 목적함수로 하고 부재의 축력강도, 세장비, 처짐 및 국부좌굴 등으로 제약조건식을 유도하여 최적 설계를 하고자 한다.

ABSTRACT : Recently, the space truss has been attracted by many designers because of their ability to support significant loads with a minimum material. And it is relatively flexible to design the configuration of structures. This paper presents a volume optimization for the space truss on the basis of result evaluated from nonlinear analysis. The optimization of the truss is done by nonlinear optimum GINO(General Interactive Nonlinear Optimizer) program. The objective function considered is the volume of the steel bars. The constraints for optimum design are the design limits, such as the axial force strength, maximum slenderness, minimum thickness, allowable deflection and ratio of the external diameter to thickness of the circular tube bars.

핵 심 용 어 : 스페이스 트러스, 비선형 해석, 뉴튼-랩슨 법, 최적화

KEYWORDS : Space truss, Nonlinear analysis, Newton-Raphson Method, Optimization

1) 경북대학교 건축공학과 박사과정
2) 경북대학교 건축공학과 박사수료
3) 정회원, 세명대학교 건축공학과 교수, 공학박사
4) 정회원, 경북대학교 건축공학과 교수, 공학박사

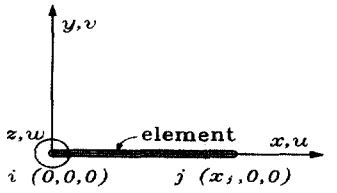
본 논문에 대한 토의를 1999년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

대공간 구조물 중의 하나인 스페이스 프레임 구조물은 다른 대공간 구조 시스템(연속체 쉘, 케이블 네트, 공기막구조 등)과 같이 내부 기둥이 없는 대공간을 덮을 수 있다는 장점과 경량화와 경제성 및 공장 생산이 가능하기 때문에 현재의 많은 구조가와 설계자들에게 큰 관심을 받고 있으며, 체육관이나 전시실의 홀 등의 대공간 설계에 사용되어진다. 본 연구에서 다루는 강성구조·이산화시스템인 스페이스 트러스는 기하학적 비선형항이 포함된 대변형 이론을 이용한 유한요소법을 응력 해석 방법으로 사용하며, 이러한 구조물의 비선형 해석에 관한 문제에 대해서는 수정 하중증분법과 뉴튼-랩슨법을 혼용하는 방법을 채택하며, 또한 구조물이 유닛으로 구성된 부재의 초기의 주관적인 설정으로 인해 나타난 과다한 재료의 사용에 대하여 비선형최적화에 적합한 GINO프로그램[(1)]을 이용하여 부재응력에 대한 전구조물의 경제적인 최적한 체적을 구하고자 한다. 본 연구의 기하학적 비선형을 고려한 응력해석결과에 대한 정확성을 알아보기 위해서 132개의 부재로 이루어진 래티스 돔(Lattice dome)과 192개의 부재로 이루어진 복층 스페이스 트러스(Double layer space truss)의 응력해석결과를 (문헌 5)에 소개되는 프로그램에 의한 응력해석결과와 비교하고, 구조물에 대한 전체 체적을 목적함수로 하여 부재의 축력강도, 세장비, 처짐, 국부좌굴 등으로 제약조건식을 유도하여 최적화를 하고 그 결과를 비교, 고찰 하고자 한다.

2. 트러스 요소의 정식화

기하학적 비선형을 고려한 트러스 요소의 비선형 강성 메트릭스를 유도하기 위해 트러스 요소의 요소좌표계를 그림 1 에서와 같이 정의한다. 그리고 요소좌표계에서의 절점변위 및 절점하중은 식(1)~식(2)와 같다.



요소 좌표계 : x, y, z
요소내 변위 : u, v, w

그림 1. 트러스 요소의 요소 좌표계.

$$\{d_x\}=\begin{Bmatrix} d_{xi} \\ d_{xj} \end{Bmatrix},\ \{d_y\}=\begin{Bmatrix} d_{yi} \\ d_{yj} \end{Bmatrix},\ \{d_z\}=\begin{Bmatrix} d_{zi} \\ d_{zj} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\{f_x\}=\begin{Bmatrix} f_{xi} \\ f_{xj} \end{Bmatrix},\ \{f_y\}=\begin{Bmatrix} f_{yi} \\ f_{yj} \end{Bmatrix},\ \{f_z\}=\begin{Bmatrix} f_{zi} \\ f_{zj} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

트러스 요소에서 한 요소가 갖는 절점을 2개로 두고 요소내 변위를 식(3)과 같이 x에 관한 1차식으로 가정한다.

$$u(x)=\alpha_1+\alpha_2 x,\ v(x)=\beta_1+\beta_2 x,\ w(x)=\gamma_1+\gamma_2 x \quad (3)$$

계수 α_1, α_2를 식(1)의 절점변위로 나타내면 식(4)와 같다.

$$d_{xi}=u(0)=\alpha_1,\ d_{xj}=u(x_j)=\alpha_1+\alpha_2 x_j \quad (4)$$

식(4)를 메트릭스로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} d_{xi} \\ d_{xj} \end{Bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & x_j \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

계수 $\{\alpha\}$와 마찬가지로 $\{\beta\}$와 $\{\gamma\}$를 절점좌표로 나타내어 메트릭스로 표현하면 다음식과 같다.

$$\{d_x\}=[\Phi]\{\alpha\},\ \{d_y\}=[\Phi]\{\beta\},\ \{d_z\}=[\Phi]\{\gamma\} \quad (6)$$

여기서,

$$[\Phi]=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 1 & x_j\end{bmatrix}\quad [\Phi]^{-1}=\begin{bmatrix}1 & 0\\ -\frac{1}{x_j} & \frac{1}{x_j}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_1 & 0\\ b_1 & b_2\end{bmatrix} \tag{7}$$

식(6)을 이용하여 계수 $\{\alpha\}$, $\{\beta\}$, $\{\gamma\}$를 구하면 식(8)과 같다.

$$\{\alpha\}=[\Phi]^{-1}\{d_x\},\ \{\beta\}=[\Phi]^{-1}\{d_y\},\ \{\gamma\}=[\Phi]^{-1}\{d_z\}$$
$$\begin{aligned}\alpha_1 &= a_1 d_{xi}, \quad \alpha_2 = b_1 d_{xi} + b_2 d_{xj}\\ \beta_1 &= a_1 d_{yi}, \quad \beta_2 = b_1 d_{yi} + b_2 d_{yj}\\ \gamma_1 &= a_1 d_{zi}, \quad \gamma_2 = b_1 d_{zi} + b_2 d_{zj}\end{aligned} \tag{8}$$

식(8)에 나타난 계수 $\{\alpha\}$, $\{\beta\}$, $\{\gamma\}$를 식(3)에 대입하면 요소내의 임의의 점에서의 변위함수를 식(9)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}u(x) &= a_1 d_{xi} + (b_1 d_{xi} + b_2 d_{xj})\, x\\ v(x) &= a_1 d_{yi} + (b_1 d_{yi} + b_2 d_{yj})\, x\\ w(x) &= a_1 d_{zi} + (b_1 d_{zi} + b_2 d_{zj})\, x\end{aligned} \tag{9}$$

변형도-변위 관계식을 비선형항을 포함한 식(10)과 같이 채택할수 있다.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left\{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\right\} \tag{10}$$

식(9)를 식(10)에 대입하고 변형도를 절점변위로 표현하면 식(11)와 같다.

$$\begin{aligned}\varepsilon_x = {} & b_1 d_{xi} + b_2 d_{xj} + \frac{1}{2}\{(b_1 d_{xi} + b_2 d_{xj})^2\\ & + (b_1 d_{yi} + b_2 d_{yj})^2 + (b_1 d_{zi} + b_2 d_{zj})^2\}\end{aligned} \tag{11}$$

식(11)를 메트릭스로 나타내면 다음과 같다.

$$\varepsilon_x = A_1 d + \frac{1}{2} d^T B^T B d \tag{12}$$

여기서, $[A_1] = [\,b_1\ 0\ 0\ b_2\ 0\ 0\,]$ (12(a))

$\{d\} = [\,d_{xi}\ d_{yi}\ d_{zi}\ d_{xj}\ d_{yj}\ d_{zj}\,]^T$ (12(b))

$$[B] = \begin{bmatrix}b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0\\ 0 & b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0\\ 0 & 0 & b_1 & 0 & 0 & b_2\end{bmatrix} \tag{12(c)}$$

증분구간에서 응력도-변형도 관계식을 다음 식(13)과 같이 채택한다.

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \tag{13}$$

현재의 상태를 초기상태로 가정하고, 현상태에서의 증분에 관한 가상일의 원리를 적용하면 식(14)와 같다.

$$\int_v [\,(\sigma_x^{(0)} + \sigma_x)\,\delta\varepsilon_x\,]\, dV = (f^{(0)} + f)^T \delta d \tag{14}$$

식(12)로부터 $\delta\varepsilon_x$를 구하면 식(15)와 같다.

$$\delta\varepsilon_x = [\ A_1\ ]\delta d + [\,d^T B^T B\,]\delta d \tag{15}$$

식(15)를 식(14)에 대입하면 식(16)을 얻을 수 있다.

$$Al[\,(\sigma_x^{(0)} + \sigma_x)(A_1 + d^T B^T B)\,] = (f^{(0)} + f)^T \tag{16}$$

식(13)에 식(12)를 대입하고, 그 결과를 다시 식(16)에 대입하여, d의 2차항을 소거하면 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned}f^{(0)} + f = {} & Al(A_1^T \sigma_x^{(0)}) + Al[\,\sigma_x^{(0)} B^T B\,]d\\ & + AlE[\,A_1^T A_1\,]d\end{aligned} \tag{17}$$

d 의 2차항을 소거하여 발생하는 오차를 불평형력이라 정의하고 이를 구하면 다음식과 같다.

$$r = A\ l\ A_1^T\ \sigma_x^{(0)} - f^{(0)} \tag{18}$$

식(18)을 이용하면 증분방정식은 다음식과 같이된다.

$$f - r = [k_E + k_G]d \tag{19}$$

여기서, $k_E = A l E[A_1^T A_1]$: 탄성강성메트릭스

$k_G = A l[\sigma_x^{(0)} B^T B]$: 기하강성 메트릭스

3. 수치해석 기법 및 Flow-chart

변형도와 변위 사이의 관계식 식(10)에서 미소변형해석에서 무시했던 고차항을 포함시켜 그 거동을 표현해야 하는 경우에서는 기하학적 비선형 해석이 필요하게 된다. 따라서 본절에서는 개발된 프로그램에서 사용된 비선형 문제의 해법들을 고찰해 보고자 한다.

3.1 수정 하중 증분법

수정 하중 증분법은 하중 증분법에서의 전체하중이 충분히 작은 하중으로 증분되어 적용한다면 각 하중의 증분 구간내에 구조물의 거동은 근사적으로 선형이라는 개념에 근거하여 국소선형화하며, 각 증분마다 발생하는 오차를 다음단계의 하중 증분값에 반영하여 오차의 누적을 방지하고 수렴조작을 줄여 그해를 구하는 방법으로 비선형 거동을 하는 구조물의 전체적인 거동을 파악하기에 적합하다. 이러한 수정 하중 증분법의 과정을 그림 2 와 같이 단일 자유도 시스템을 이용하여 설명하면 다음과 같다.

주어진 하중 F는 i개의 증분하중 $\Delta F^{(i)}$로 분할한뒤, 첫 번째 하중 증분 $\Delta F^{(1)}$을 구조물의 초기형상에 적용하면 구조물의 증분 변위 $\Delta D^{(1)}$은 식(20)에 의해 구할 수 있다.

$$\Delta D^{(1)} = [K^{(0)}]^{-1}\ \Delta F^{(1)} \tag{20}$$

여기서, $[K^{(0)}]$: 초기장력등이 존재하는경우의 강성 메트릭스

그러나, 비선형 방정식에서 국소 선형화를 위한 고차항의 소거로 내력 $\Delta f^{(1)}$과 외력 $\Delta F^{(1)}$은 오차를 가지게 되며, 이러한 하중을 불평형력 $r^{(1)}$이라 정의하고 다음식과 같이 표현한다.

$$r^{(1)} = \Delta F^{(1)} - \Delta f^{(1)} \tag{21}$$

위 식(21)의 불평형력 $r^{(1)}$은 다음단계의 $\Delta F^{(2)}$값에서 보정치로 이용되며, 보정이 된 증분하중을 이용하여 $\Delta D^{(2)}$의 값을 구하게 된다. 따라서 $D^{(2)}$의 값은 $D^{(1)}$의 값에 불평형력 $r^{(1)}$만큼 보정하여 구한 $\Delta D^{(2)}$를 더한 것이 되며, 이상의 내용을 스텝수 i 로 정리하면 다음 식(22)와 같고, 그 과정은 그림 2 에서 보는 바와 같이 B→C→D→E→를 구하여 하중을 점증시킨다.

$$\begin{aligned} \Delta D^{(i)} &= [K^{(i-1)}]^{-1}\ (\Delta F^{(i)} + r^{(i-1)}) \\ D^{(i)} &= D^{(i-1)} + \Delta D^{(i)} \end{aligned} \tag{22}$$

여기서 $[K^{(i-1)}]$은 이전 증분의 마지막 단계 형태에 의해 구성된 강성메트릭스이고, 최종적인 단계에서는 마지막 불평형력 $r^{(i)}$가 발생한다.

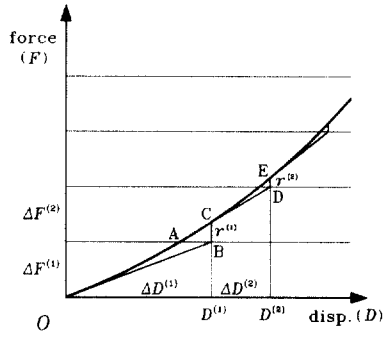


그림 2. 수정 하중 증분법

3.2 뉴튼-랩슨 법

본 프로그램에서는 수정 하중 증분법에 의해 발생되는 마지막 단계의 오차 $r^{(i)}$를 줄이기 위해 뉴튼-랩슨법을 사용하여 이를 해결한다. 그림 3에서 $r^{(i)}$를 ΔF^{o}와 같다고 하여 새로운 반복과정을 통해 불평형력을 소거할 수 있고 반복과정의 일반적인 공식은 식(23)과 같다.

$$D^{(i)} = D^{(i-1)} + [K^{(i-1)}]^{-1} r^{(i)} \qquad (23)$$

여기서, $D^{(i)}$: i 단계의 절점변위

$D^{(i-1)}$: $i-1$ 단계의 절점변위

$[K^{(i-1)}]$: $i-1$ 단계의 형태에 의해서 얻어진 강성 메트릭스

$r^{(i)}$: 불평형력(불평형력 값은 $\Delta F^{(i-1)}$ 과 같다.)

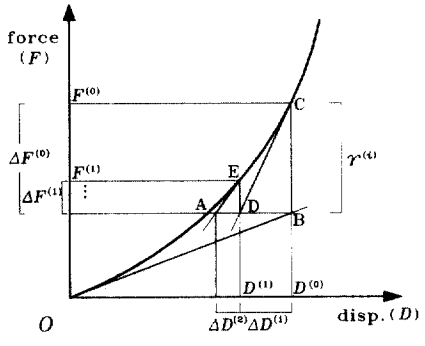


그림 3. 뉴튼-랩슨 법

따라서, 순환과정은 B→C→D→E→의 순으로 불평형력 $r^{(i)}$가 허용 규정치(허용 오차의 한계)에 만족할때까지 계산하게 된다.

3.3 응력 해석 프로그램의 Flow-chart

기하학적 비선형을 고려한 스페이스 트러스의 응력-변형 해석 프로그램의 Flow- chart 는 그림 4와 같고, $\alpha=1$ 일때의 Loop 와 $\alpha=0$ 일때의 Loop 는 각각 수정하중 증분법과 뉴튼-랩슨법의 반복과정을 나타낸다. 본 논문에서 개발된 프로그램은 수정하중 증분법을 이용하므로 구조물의 거동을 파악할수 있으며, 뉴튼-랩슨법의 혼용으로 해의 오차를 줄일수 있다.

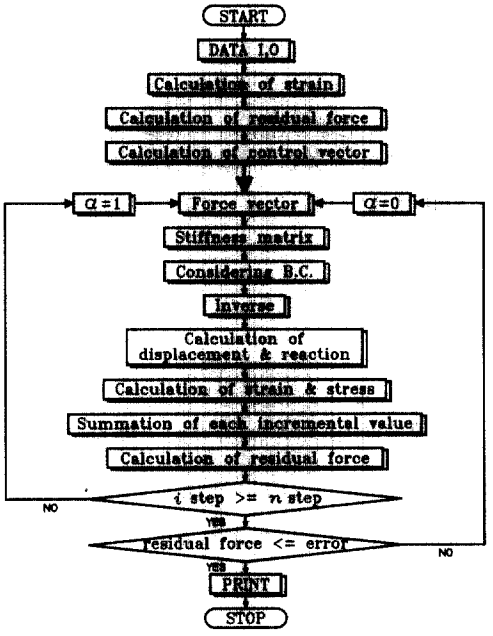


그림 4. 응력 해석 프로그램 Flow-chart.

4. 목적함수 및 제약 조건식

4.1 목적 함수식

철골 스페이스 트러스 구조물의 최적설계에 있어서 목적함수를 사용부재의 체적으로 하는 경우는 부재의 단면적에 비례하여 설계값이 결정되므로 변수는 부재의 단면적이 되며, 그 목적함수식은 다음 식(24)와 같이 표현할수 있다.

$$V = \sum_{i=1}^{n} V_i = \sum_{i=1}^{n} A_i l_i \quad (i = 1, 2, \ldots, n) \qquad (24)$$

여기서,

V_i : i 번째 부재의 체적

A_i : i 번째 부재의 단면적

l_i : i 번째 부재의 길이

n : 구조물의 부재수

4.2 제약 조건식

대한 건축학회 강구조 설계규준을 근거로 한 인장 및 압축 응력도, 세장비, 처짐에 대한 제약식과 부재를 원형강관으로 사용할 경우의 국부좌굴 및 부재의 두께와 지름에 대한 제약식은 다음과 같다.[3,4]

$$(f_c \text{ or } f_t) - \frac{N_i}{\alpha A_i} \geq 0 \quad (i = 1, 2, \ldots, n) \quad (25)$$

$$\lambda_i - a_1 \geq 0 \qquad (i = 1, 2, \ldots, n) \quad (26)$$

$$a_2 - \frac{\Delta}{L} \geq 0 \quad (27)$$

$$D_i - a_3 \geq 0 \qquad (i = 1, 2, \ldots, n) \quad (28)$$

$$t_i - a_4 \geq 0 \qquad (i = 1, 2, \ldots, n) \quad (29)$$

$$a_5 - \frac{D_i}{t_i} \geq 0 \qquad (i = 1, 2, \ldots, n) \quad (30)$$

여기서,

N_i : i 번째 부재의 외력에 의한 인장(압축)

A_i : i 번째 부재의 단면적

f_t : 강재의 허용 인장 응력도 ($f_t = \frac{F_y}{1.5}$)

f_c : 강재의 허용 압축 응력도

$$f_c = \frac{\left\{1 - 0.4\left(\frac{\lambda_i}{\lambda_p}\right)^2\right\} F_y}{\frac{3}{2} + \frac{2}{3}\left(\frac{\lambda_i}{\lambda_p}\right)^2} \quad : \lambda_i \leq \lambda_p \text{ 일 때}$$

$$f_c = \frac{0.227\, F_y}{\left(\frac{\lambda_i}{\lambda_p}\right)^2} \quad : \lambda_i > \lambda_p \text{ 일 때}$$

λ_p: 한계 세장비 ($\lambda_p = \pi\sqrt{\frac{E}{0.6 F_y}}$)

λ_i : i 번째 부재의 세장비

a_1 : 일반 압축재일 경우 : $a_1 = 250$,
특수 압축재일 경우 : $a_1 = 200$

Δ : 구조물의 처짐량

L : 구조물의 스팬

a_2 : 단순지지일 경우 : $a_2 = 1/300$,
켄틸레버의 경우 : $a_2 = 1/250$

D_i : i 번째 강관의 직경

t_i : i 번째 강관의 두께

a_3 : 원형강관의 최소 직경 (= 2.72 cm)

a_4 : 원형강관의 최소 두께 (= 0.20 cm)

a_5 : $F_y = 2.4\ t/cm^2$, SS400, SM400, SPS400, SPSR400 일 경우 : $a_5 = 100$

$F_y = 3.3\ t/cm^2$, SM490, SM490, SPS490, SPSR490 일 경우 : $a_5 = 73$

α : 단면 감소 계수

5. 수치해석 예제

〔예제 1〕 철골 스페이스 트러스의 응력 해석 및 최적설계를 수행하기 위해서 그림 5 에서 보는 바와 같이 61개의 절점과 132개의 원형강관 부재로 이루어진 래티스 돔[6]을 채택하기로 하며, 하중은 모든 절점에 집중하중 P=889.6 kg 이 작용한다. 절점은 모두 반경이 R인 구의 표면에 위치하고, 단면 감소계수는 $\alpha = 1$로 한다.

〔예제 1〕의 초기 입력자료는 다음과 같다.

탄성계수 : $E_s = 2.1 \times 10^6$ kg/㎠

부재의 항복응력 : $F_y = 2{,}400 \sim 3{,}500$ kg/㎠

부재의 단면적 : 6.452cm^2 (전 부재 동일)

래티스 돔의 높이(H) : 152cm

래티스 돔의 저면직경(L) : 610cm

레티스 돔의 곡률반경(R) : 382.034cm

이상의 설계조건에 대하여 응력해석 및 최적설계를 한 결과는 그림 7 및 그림 8 과 같다.

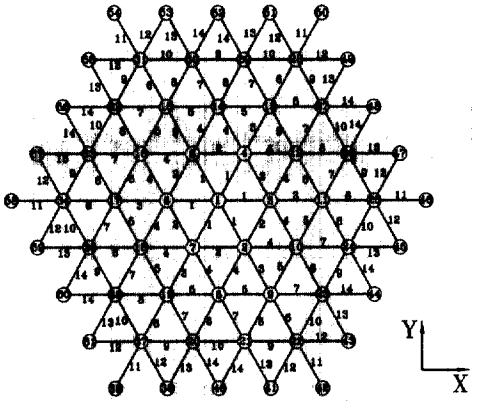


그림 5. 래티스 돔 평면도 및 절점번호

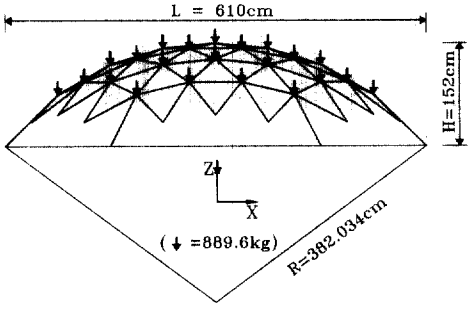


그림 6. 래티스 돔 입면도 및 하중

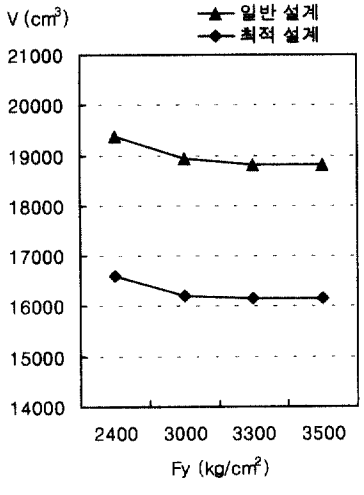


그림 7. 래티스 돔의 최적설계 결과

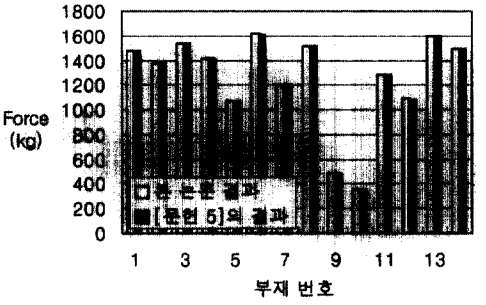


그림 8. 래티스 돔의 응력해석 결과

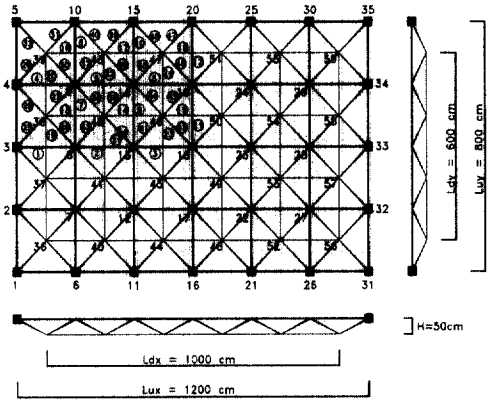


그림 9. 복층 스페이스 트러스 평면도 및 절점번호

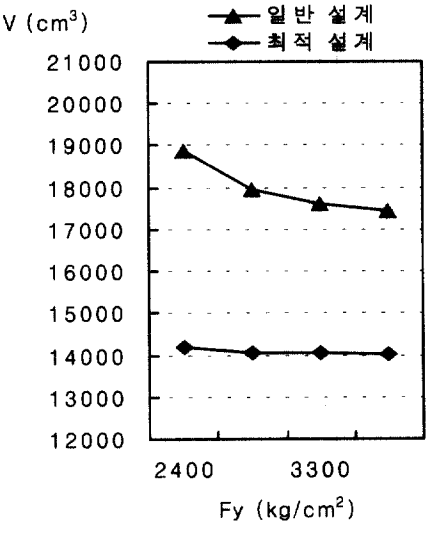


그림 10. 복층 스페이스 트러스의 최적설계 결과

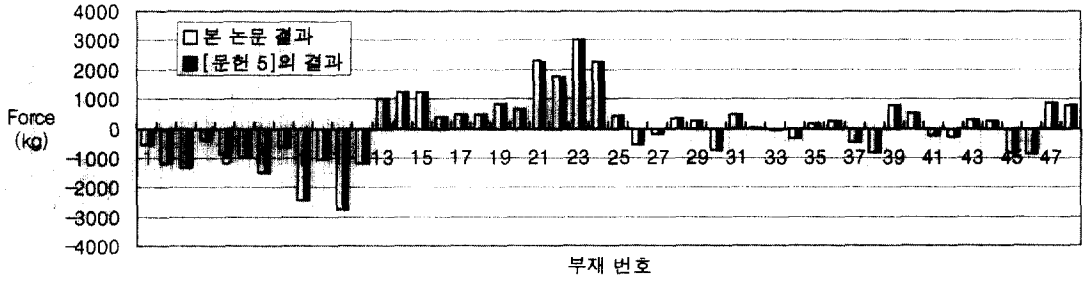


그림 11. 복층 스페이스 트러스의 응력해석 결과

〔예제 2〕 그림 9 에서 보는바와 같이 복층 스페이스 트러스의 절점은 모두 59개로 구성되고 192개의 원형강관 부재로 이루어지며 그 부재들은 각각 상현재, 하현재 그리고 사재로 구성되어 있고, 구조물은 상현재의 외곽둘레가 절점으로 지지되어 있으며 하중은 등분포 하중 ω=0.13 t/m2 이 작용하며, 단면 감소 계수는 α = 1로 한다. 〔예제 2〕의 초기 입력자료는 다음과 같다.

탄성계수 : E_s = 2.1×10^6 kg/㎠

부재의 항복응력 : F_y = 2,400 ~ 3,500 kg/㎠

부재의 단면적 : 10 cm^2 (전 부재 동일) ,

복층스페이스트러스의 높이(H) : 50 cm

복층스페이스트러스의 스팬길이(Lux): 1200 cm

(Luy): 800 cm

이상의 설계조건에 대하여 응력해석 및 최적설계를 한 결과는 그림 10 및 그림 11 과 같다.

6. 비교 및 고찰

스페이스 트러스의 기하학적 비선형을 고려한 본 연구의 응력 해석과 (문헌 5)에 의한 응력 해석 을 비교한 결과 그림 8 및 그림 11 에서 보는 바와 같이 매우 잘 일치함을 고찰할 수 있고, 개발된 프로그램은 수정 하중 증분법 과 뉴튼-랩슨법의 혼용으로 구조물의 거동 파악 및 해의 오차를 줄일 수 있었다. 〔예제 1〕에서 일반 재래식 설계,즉 단면의 최대 응력을 기준으로 한 부재의 단면적을 초기단면으로 가정하여 구조물을 설계하였을 경우, 구조물의 총 체적은 그림 7 에서 나타난 것과 같이 최적설계의 경우가 약 14.2 % 의 철골 부재량이 절감됨을 알수 있었고, 〔예제 2〕의 경우 상현재, 하현재 그리고 사재에 대한 각각의 최대응력을 기준으로한 단면적을 초기 단면으로 가정하여 구조물을 설계하였을 경우 구조물의 총 체적은 그림 10 에 나타난 것과 같이 최적설계의 경우가 약 19.5 % 의 철골 부재량이 절감됨을 알수 있었다. 그리고, 강재의 재료 항복강도 Fy 값은 클수록 경제적 임을 또한 고찰할 수 있었다.

7. 결 론

본 연구에서 개발한 스페이스 트러스의 기하학적 비선형을 고려한 응력해석 프로그램의 결과를 설계예를 통해 비교·고찰한 결과 (문헌 5)에 의한 해석결과와 잘 일치하며, 트러스에 사용된 원형 강관의 최적설계 결과는 인장(또는 압축)응력, 처짐, 국부좌굴 등에 영향을 받으며, 최적설계 결과는 일반 재래식 설계보다 철골 부재량이 대단히 절감됨을 고찰할 수 있었다.

끝으로, 본 연구는 1996년도 포항 종합 제철 연구비 지원으로 수행되었음을 알려 드리는 바이다.

참 고 문 헌

(1) Liebman J., L. S. Lasdon, L. Schrage and A. D. Waren, Modeling and Optimization with GINO, The Scientific Press, 1986

(2) Mu, Z.G., M. M. Kang, S. D. Kim and M.H. Choi, An Optimum Design of Axi-symmetrically Loaded Thin Shells of Revolution, Proceeding of Asia-Pacific Conference on Shell and Spatical Structures, Beijing, China, May, 1996, pp.478~485.

(3) Cassis,J. and Sepúlveda,A., Optimum Design of Trusses with Buckling Constraints, Journal of Structural Engineering, Vol.111, No.7, July, 1985, pp.1573~1589.

(4) Sohn, S. D., Mu, Z. G., Kang, M. M., Kim, S. D. and Kwun, T. J., Optimization of Space trusses Considering Geometric Nonlinearity, The Third Asian-Pacific Conference on Computational Mechanics, Seoul, Korea, September, 1996.

(5) Jihong, Q., Users Manual of MSGS Space Truss Analysis, Version 3.0, 1992.

(6) Salajegheh,E. and Vanderplaats,G.N., Efficient Optimum Design of Structures with Discrete Design Variables, International Journal of Space Structures, Vol.8, No.3, 1993,pp.199~208.

(7) Antonio, L. T., Luciano, O. and Corrado, P., Minimum Weight Design of Reticular Space structures : A Computer Aided System, Inter- national Journal of Space Structures Vol.9 No.4, 1994, pp.179~189.

(8) Lasdon,L.S.,Waren,A.D.,Jain,A. and Ratner, M., Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programming, ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 4, 1978, pp.34~50.

(9) 권택진, 이병해, 한상을, 김승덕, 정환목, SPACE FRAME 構造物의 構造解析, 設計 및 施工, 第12回 電算構造工學會 技術講習會, 韓國電算構造工學會, 7. 1995, pp.1~24.

(접수일자 : 1998년 6월 17일)