

고등해석과 유전자 알고리즘을 이용한 반강접 강뼈대 구조물의 직접설계시스템의 최적화

Optimization of direct design system of semi-rigid steel frames
using advanced analysis and genetic algorithm

최 세 휴)[†]
Choi, Se Hyu

요 약 : 본 논문에서는 고등해석과 유전자 알고리즘을 이용한 반강접 강뼈대 구조물의 직접설계시스템의 최적화를 수행하였다. 고등해석은 접합부의 비선형, 기하학적 비선형 및 재료적 비선형을 고려한다. 기하학적 비선형은 안정함수를 사용하여 고려하였으며, 재료적 비선형은 CRC 접선 탄성계수와 포물선 함수를 사용함으로써 고려하였다. 접합부의 비선형은 Kishi와 Chen이 제안한 3가지 매개변수를 가지는 파워모델을 사용하여 고려하였다. 최적화 기법으로는 유전자 알고리즘을 사용하였다. 목적함수는 구조물의 중량을 사용하였으며, 제약조건식은 구조시스템의 하중-저항능력, 처짐, 층간 수평변위 및 연성요구 조건을 고려하였다. 제안된 방법에 의한 설계결과를 기존의 방법들과 비교하였다.

ABSTRACT : The optimization of the direct design system of semi-rigid steel frames using advanced analysis and genetic algorithm was presented. Advanced analysis can predict the combined nonlinear effects of connection, geometry, and material on the behavior and strength of semi-rigid frames. Geometric nonlinearity was determined using stability functions. On the other hand, material nonlinearity was determined using the Column Research Council (CRC) tangent modulus and parabolic function. The Kishi-Chen power model was used to describe the nonlinear behavior of semi-rigid connections. The genetic algorithm was used as the optimization technique. The objective function was assumed as the weight of the steel frame, with the constraint functions accounting for load-carrying capacities, deflections, inter-story drifts and ductility requirement. Member sizes determined by the proposed method were compared with those derived using the conventional method.

핵심어 : 고등해석, 최적설계, 유전자 알고리즘, 강뼈대구조물

KEYWORDS : advanced analysis, optimal design, genetic algorithm, steel frames.

1. 서론

구조물의 최적설계는 많은 연구자들에 의해 연구되어왔으며, 실용적인 측면을 위해 규격화된 부재를 사용한 이산화 최적설계에 대한 관심이 증대되고 있는 실정이다. 특히 Rajeev와 Krishnamorthy(1992), Lin과 Hajela (1992) 및 Pantelides와 Tzan(1997) 등은 구조물의 이산화 최적화 기법으로 유전자 알고리즘(GA)을 사용한 바 있다. 최근 컴퓨터 기술의 발전으로 Chen과 Kim(1997), Orbison (1982), Liew와 Tang (1998) 및 박문호 등 (2000) 등에 의해 구조시스템과 그에 속한 부재의 강도와 안정을 직접적으로 고려함으로써 해석후 개별 부재의 강도검토가 필요없는 고등해석을 이용한 직접설계 시스템이 개발 검증된 바 있다. 또한, 고등해석과 유전자 알고리즘

을 이용한 강뼈대 구조물의 최적설계에 대한 연구도 Pezeshk 등 (2000), 김승억과 마상수 (2003) 및 윤영목과 김병현 (2004) 등에 의해 활발히 연구되고 있다. 그러나, 이들의 방법은 강뼈대 구조물의 실제 보-기둥 접합부가 부재간에 상대회전 각이 있는 강접과 힌지접합 사이의 거동을 보이고, 임의의 하중에 대하여 회전강성을 가진 반강접 거동을 함에도 불구하고 강접으로 가정하고 있다. 보-기둥 접합부의 상대회전은 인접부재 사이의 모멘트 분배와 변형에 영향을 주므로 강뼈대 구조물의 해석과 설계에 고려하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 강뼈대 구조물의 기하학적 재료적 비선형뿐만 아니라 모멘트 재분배에 영향을 미치는 접합부의 반강접 및 비선형효과를 고려한 고등해석과 유전자 알고리즘을 이용한 이산화 최적설계를 수행하고자 한다. 접합부의 반강접 및 비선형효과는 Kishi와 Chen이 제안

1) 교신저자. 정회원, 경북대학교 토목공학과 조교수
(Tel. 053-950-7582, Fax. 053-950-6564 E-mail: shchoi@knu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

한 3가지 매개변수를 가지는 파워모델(Power Model)을 사용하여 고려하였으며, 최적화 기법으로는 Krisnakumar (1989)이 제안한 마이크로 유전자 알고리즘(μ GA)를 사용하였다.

2. 실용적인 고등해석

2.1 기하학적 비선형을 고려하는 안정함수

본 논문에서는 안정함수를 이용하여 기하학적 비선형 효과를 고려하였다. 3차원 보-기둥 부재에 대하여 안정함수를 이용한 힘-변위의 관계는 식 (1)과 같다 (박문호 등 2000).

$$\begin{bmatrix} P \\ M_{yA} \\ M_{yB} \\ M_{zA} \\ M_{zB} \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_1 \frac{EI_y}{L} & S_2 \frac{EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 \frac{EI_y}{L} & S_1 \frac{EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_3 \frac{EI_z}{L} & S_4 \frac{EI_z}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_4 \frac{EI_z}{L} & S_3 \frac{EI_z}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \theta_{yA} \\ \theta_{yB} \\ \theta_{zA} \\ \theta_{zB} \\ \phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, M_{yA} , M_{yB} , M_{zA} , M_{zB} , P 및 T 는 각각 부재의 A단 및 B단에 작용하는 단부 휨모멘트 및 축력과 비틀림을 나타낸다. θ_{yA} , θ_{yB} , θ_{zA} , θ_{zB} , θ_{yA} , δ 및 ϕ 는 절점의 회전각 및 축변형과 비틀림각을 나타낸다. S_1 , S_2 , S_3 및 S_4 는 안정 함수로서 식 (2a)-(2h)에 정의되어 있다.

2.1.1 인장인 경우

$$S_1 = \frac{\pi^2 \rho_y \cosh(\pi\sqrt{\rho_y}) - \pi\sqrt{\rho_y} \sinh(\pi\sqrt{\rho_y})}{2 - 2 \cosh(\pi\sqrt{\rho_y}) + \pi\sqrt{\rho_y} \sinh(\pi\sqrt{\rho_y})} \quad (2a)$$

$$S_2 = \frac{\pi\sqrt{\rho_y} \sinh(\pi\sqrt{\rho_y}) - \pi^2 \rho_y}{2 - 2 \cosh(\pi\sqrt{\rho_y}) + \pi\sqrt{\rho_y} \sinh(\pi\sqrt{\rho_y})} \quad (2b)$$

$$S_3 = \frac{\pi^2 \rho_z \cosh(\pi\sqrt{\rho_z}) - \pi\sqrt{\rho_z} \sinh(\pi\sqrt{\rho_z})}{2 - 2 \cosh(\pi\sqrt{\rho_z}) + \pi\sqrt{\rho_z} \sinh(\pi\sqrt{\rho_z})} \quad (2c)$$

$$S_4 = \frac{\pi\sqrt{\rho_z} \sinh(\pi\sqrt{\rho_z}) - \pi^2 \rho_z}{2 - 2 \cosh(\pi\sqrt{\rho_z}) + \pi\sqrt{\rho_z} \sinh(\pi\sqrt{\rho_z})} \quad (2d)$$

2.1.2 압축인 경우

$$S_1 = \frac{\pi\sqrt{\rho_y} \sin(\pi\sqrt{\rho_y}) - \pi^2 \rho_y \cos(\pi\sqrt{\rho_y})}{2 - 2 \cos(\pi\sqrt{\rho_y}) - \pi\sqrt{\rho_y} \sin(\pi\sqrt{\rho_y})} \quad (2e)$$

$$S_2 = \frac{\pi^2 \rho_y - \pi\sqrt{\rho_y} \sin(\pi\sqrt{\rho_y})}{2 - 2 \cos(\pi\sqrt{\rho_y}) - \pi\sqrt{\rho_y} \sin(\pi\sqrt{\rho_y})} \quad (2f)$$

$$S_3 = \frac{\pi\sqrt{\rho_z} \sin(\pi\sqrt{\rho_z}) - \pi^2 \rho_z \cos(\pi\sqrt{\rho_z})}{2 - 2 \cos(\pi\sqrt{\rho_z}) - \pi\sqrt{\rho_z} \sin(\pi\sqrt{\rho_z})} \quad (2g)$$

$$S_4 = \frac{\pi^2 \rho_z - \pi\sqrt{\rho_z} \sin(\pi\sqrt{\rho_z})}{2 - 2 \cos(\pi\sqrt{\rho_z}) - \pi\sqrt{\rho_z} \sin(\pi\sqrt{\rho_z})} \quad (2h)$$

여기서 $\rho_y = P/(\pi^2 EI_y/L^2)$, $\rho_z = P/(\pi^2 EI_z/L^2)$ 이다.

2.2 축력에 의한 점진적인 소성화

강재 시편의 응력-변형률 관계는 그림 1과 같이 완전 탄-소성 응력-변형률의 관계를 가지지만 실제 사용되고 있는 H-형강의 경우에는 제조공정상 필연적으로 발생하게 되는 불균등한 냉각에 의한 잔류응력에 의하여 비선형 탄-소성 응력-변형률의 관계를 가지게 된다.

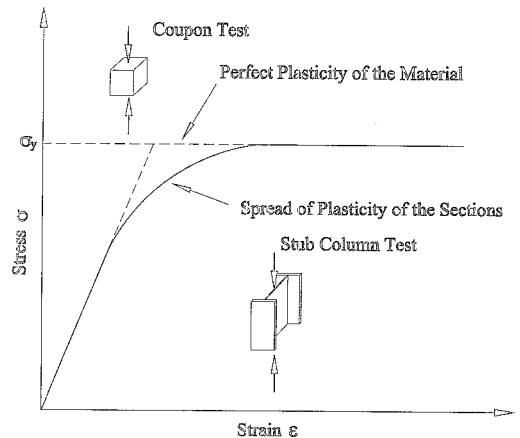


그림 1. H-형강의 응력-변형률 관계

본 논문에서는 이러한 비선형 탄-소성 응력-변형률을 고려하기 위하여 CRC 탄성계수를 사용하여 식(3a) 및 식(3b)과 같이 정식화하였다.

(1) $P \leq 0.5P_y$ 인 경우

$$E_t = 1.0E \quad (3a)$$

(2) $P > 0.5P_y$ 인 경우

$$E_t = 4 \frac{P}{P_y} E \left(1 - \frac{P}{P_y}\right) \quad (3b)$$

2.3 축력과 휨에 의한 점진적인 소성화

그림 2에서 보는 바와 같이 순수 휨을 받는 단면의 모멘트-곡률의 관계는 항복모멘트에서 소성모멘트까지 점진적인 소성화에 의한 비선형 거동을 하게 된다. 그러나, 탄-소성항진 해석에서는 단면의 항복모멘트에서 소성모멘트까지 선형으로 가정함으로써 점진적인 소성화를 고려하지 못하고 있다.

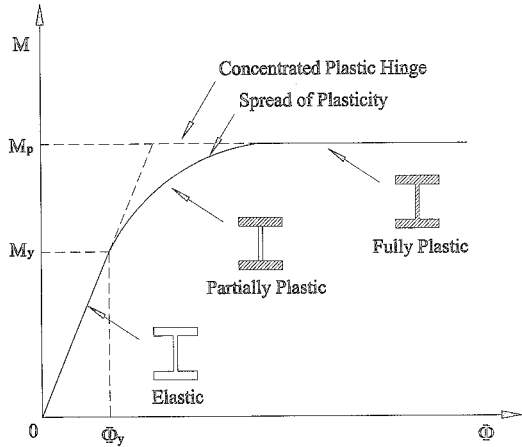


그림 2. H-형강의 모멘트-곡률 관계

본 논문에서는 비선형 모멘트-곡률 관계를 고려하기 위하여 식(4a) 및 식(4b)과 같은 포물선 함수를 사용하였다.

(1) $a \leq 0.5$ 인 경우

$$n = 1 \tag{4a}$$

(2) $a > 0.5$ 인 경우

$$n = 4a(1-a) \tag{4b}$$

여기서, a 는 단면에 작용하는 부재력의 크기를 나타내는 함수로서 AISC-LRFD (1993)의 완전소성면을 활용하여 식(5)와 같이 정식화된다.

(1) $\frac{P}{P_y} \geq \frac{2}{9} \frac{M_y}{M_{yb}} + \frac{2}{9} \frac{M_z}{M_{zb}}$ 인 경우

$$a = \frac{P}{P_y} + \frac{8}{9} \frac{M_y}{M_{yb}} + \frac{8}{9} \frac{M_z}{M_{zb}} \tag{5a}$$

(2) $\frac{P}{P_y} < \frac{2}{9} \frac{M_y}{M_{yb}} + \frac{2}{9} \frac{M_z}{M_{zb}}$ 인 경우

$$a = \frac{P}{2P_y} + \frac{M_y}{M_{yb}} + \frac{M_z}{M_{zb}} \tag{5b}$$

그러므로, 3차원 보-기둥 부재의 연화 소성항진을 고려하는 힘-변위의 관계는 식 (6)에 정의되어 있다.

$$\begin{bmatrix} P \\ M_{yA} \\ M_{yB} \\ M_{zA} \\ M_{zB} \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_t A}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{iiY} & k_{ijY} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{ijY} & k_{jjY} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{iiZ} & k_{ijZ} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{ijZ} & k_{jjZ} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \Theta_{yA} \\ \Theta_{yB} \\ \Theta_{zA} \\ \Theta_{zB} \\ \Phi \end{bmatrix} \tag{6}$$

여기서,

$$k_{iiY} = n_A \left[S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - n_B) \right] \frac{E_t I_y}{L} \tag{7a}$$

$$k_{ijY} = n_A n_B S_2 \frac{E_t I_y}{L} \tag{7b}$$

$$k_{jjY} = n_B \left[S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - n_A) \right] \frac{E_t I_y}{L} \tag{7c}$$

$$k_{iiZ} = n_A \left[S_3 - \frac{S_4^2}{S_3} (1 - n_B) \right] \frac{E_t I_z}{L} \tag{7d}$$

$$k_{ijZ} = n_A n_B S_4 \frac{E_t I_z}{L} \tag{7e}$$

$$k_{jjZ} = n_B \left[S_3 - \frac{S_4^2}{S_3} (1 - n_A) \right] \frac{E_t I_z}{L} \tag{7f}$$

2.4 접합부의 비선형을 고려한 힘-변위 관계

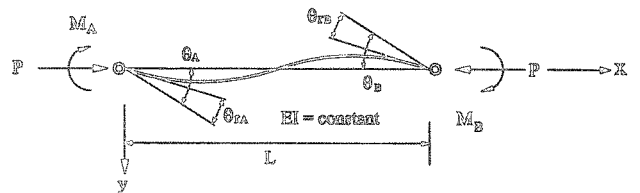


그림 3. 회전 스프링을 가진 보-기둥 부재

양단에 반강접 접합부를 가진 보-기둥 부재는 그림 3과 같이 접합부를 회전스프링으로 모델링할 수 있다. 접합부의 비선형 거동에 대한 효과는 부재에 대한 유연도 행렬에 접합부의 유연도 행렬을 고려함으로써 구할 수 있다. 따라서, 반강접 보-기둥 부재의 힘-변위 관계는 식(8)과 같이 정식화 된다.

$$\begin{bmatrix} P \\ M_{yA} \\ M_{yB} \\ M_{zA} \\ M_{zB} \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_r A}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{iiY}^* & i_{ijY}^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{ijY}^* & k_{jjY}^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{iiz}^* & k_{ijz}^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{ijz}^* & k_{jiz}^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \Theta_{yA} \\ \Theta_{yB} \\ \Theta_{zA} \\ \Theta_{zB} \\ \Phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서

$$k_{iiY}^* = \frac{(k_{iiY} + \frac{k_{iYk_{iiY}}}{R_{ktYB}} - \frac{k_{iiY}^2}{R_{ktYB}})}{R_Y^*} \quad (9a)$$

$$k_{ijY}^* = \frac{(k_{ijY} + \frac{k_{iYk_{ijY}}}{R_{ktYA}} - \frac{k_{iiY}^2}{R_{ktYA}})}{R_Y^*} \quad (9b)$$

$$k_{iY}^* = \frac{k_{iY}}{R_Y^*} \quad (9c)$$

$$k_{iiz}^* = \frac{(k_{iiz} + \frac{k_{iizk_{iiz}}}{R_{ktZB}} - \frac{k_{iiz}^2}{R_{ktZB}})}{R_Z^*} \quad (9d)$$

$$k_{ijz}^* = \frac{(k_{ijz} + \frac{k_{iizk_{ijz}}}{R_{ktZA}} - \frac{k_{iiz}^2}{R_{ktZA}})}{R_Z^*} \quad (9e)$$

$$k_{ijz}^* = \frac{k_{ijz}}{R_Z^*} \quad (9f)$$

$$R_Y^* = (1 + \frac{k_{iY}}{R_{ktYA}})(1 + \frac{k_{iY}}{R_{ktYB}}) - \frac{k_{iY}^2}{R_{ktYA}R_{ktYB}} \quad (9g)$$

$$R_Z^* = (1 + \frac{k_{iiz}}{R_{ktZA}})(1 + \frac{k_{iiz}}{R_{ktZB}}) - \frac{k_{iiz}^2}{R_{ktZA}R_{ktZB}} \quad (9g)$$

여기서, R_{ktYA} , R_{ktYB} , R_{ktZA} 및 R_{ktZB} 는 각각 A단 및 B단의 임의의 회전각 $|\Theta_r|$ 에 대한 접합부의 접선 강도를 나타낸다. 본 연구에서는 접합부의 접선 강도를 구하기 위하여 Kishi와 Chen (1990)이 제안한 3가지 매개변수를 이용한 파워 모델(Three Parameter Power Model)을 사용하였다. Kishi와 Chen이 제안한 3가지 매개변수를 이용한 파워 모델의 일반식은 식 (10)과 같다.

$$M = \frac{R_{ki}\Theta_r}{\left\{1 + \left(\frac{\Theta_r}{\Theta_0}\right)^n\right\}^{1/n}} \quad (10)$$

여기서 M 은 모멘트, R_{ki} 는 초기강성, Θ_r 은 회전각, Θ_0 는 소성회전각 ($= M_u/R_{ki}$), M_u 는 접합부의 극한모멘트 및 n 은 형상계수이다. 접합부의 접선강도는 접합부의 모멘트를 회전각으로 미분함으로써 구할 수 있다. 접합부의 하중이 증가하는 경우에는 식(11)과 같이 접선 강성으로 나타낼 수 있으며, 하중이 감소하는 경우에는 식(12)와 같이 초기강성으로 나타낼 수 있다.

(1) 접합부의 하중이 증가하는 경우

$$R_{kt} = \frac{dM}{d|\Theta_r|} = \frac{M_u}{\Theta_0(1 + \Theta^n)^{1+1/n}} \quad (11)$$

(2) 접합부의 하중이 감소하는 경우

$$R_{kt} = \frac{dM}{d|\Theta_r|}_{\Theta_r=0} = \frac{M_u}{\Theta_0} = R_{ki} \quad (12)$$

2.5 기하학적 불완전 모형

2.5.1 브레이싱된 구조물

기하학적 불완전성은 부재의 직선도 (straightness) 및 수직도 (plumbness)에 대한 오차로서 부재의 제작 및 구조물의 조립시에 발생한다. 브레이싱된 구조물은 기하학적 불완전성중 부재의 수직도에 대한 불완전성보다는 부재의 직선도에 대한 불완전성에 의하여 영향을 받는다. 왜냐하면, 부재의 비수직도에 의한 P-Δ효과는 브레이싱에 의하여 소멸되기 때문이다. ECCS (1984; 1991), AS (1990) 및 CSA (1994)에서는 직선도에 대한 불완전성으로 기둥길이의 1/1000을 사용하도록 추천하고 있다. AISC (1993)에서도 동일한 크기의 불완전성을 추천하고 있다. 본 논문에서는 직선도에 대한 불완전성으로 $L_c/1000$ 을 사용하였다.

ECCS (1984; 1991), AS (1990) 및 CSA (1994)에서는 직선도에 대한 불완전성을 부재의 중간부에 최대 처짐이 발생하는 포물선 형상을 추천하고 있으나, 해석시 모델링하는 방법에 대해서는 언급하지 않고 있으며, 실용적이지 못한 단점이 있다. 본 논문에서는 부재의 중간에 최대 변형을 갖는 두개의 요소로 모델링함으로써 직선도에 대한 불완전성을 고려하였다. 두개의 요소를 사용하여 모델링할 경우의 정확도는 2차원 구조에 대하여 이미 검증된 바 있다 (Kim과 Chen, 1996a).

2.5.2 브레이싱 되지 않은 뼈대 구조물

CSA (1994)와 AISC (1993)에서는 수직도에 대한 시공오차를 $L_c/500$ 로 제한하고 있고 있다. 따라서 본 연구에서도 수직도에 대한 불완전성의 크기로 $L_c/500$ 을 사용하였다. 이 값은

브레이싱된 경우의 비직선도 $L_c/1000$ 과 개념적으로 동등한 값을 알 수 있다.(Kim과 Chen, 1996b).

3. 최적설계 문제형성

3.1 마이크로 유전자 알고리즘

본 연구에서는 최적화 기법으로 마이크로 유전자 알고리즘을 사용하였다. Krisnakumar(1989)이 제안한 마이크로 유전자 알고리즘은 연산시간을 줄이기 위하여 집단을 크기를 작게 함으로서 발생할 수 있는 유전정보의 결핍과 탐색능력의 저하를 극복한 알고리즘이다. 모집단의 수렴성은 각 개체의 유전자형을 비교하거나 표현형을 비교하는 방법이 있으나, 본 연구에서는 최적개체와 나머지 개체들의 염색체 비트끼리 비교하여 서로 다른 비트의 수가 5% 미만이면 수렴조건에 만족된 것으로 판정하였다. 재생산은 적자생존과 자연도태현상을 알고리즘형태로 나타낸 것으로 룰렛-휠 선택법과 토너먼트 선택법 등이 있으나 본 연구에서는 토너먼트 선택법을 사용하였다.

개체는 소멸시키는 방법이다. 교배에는 일점교배법, 다점교배법, 균등교배법 등이 있으나, 본 연구에서는 일점교배법을 사용하였으며, 개체간의 정보교환을 위하여 반드시 교배가 일어나도록 교배확률을 1.0으로 하였다. 엘리트 전략은 각 세대에서 가장 좋은 최적개체가 재생산을 위하여 선택되어지지 않거나 교배 등에 의해 소멸되는 것을 방지하기 위하여 De Jong (1975)에 의해 처음으로 소개된 것으로 최적개체를 강제로 유지시키기 위한 알고리즘이다. 본 연구에서는 좋은 유전자의 확률적 손실을 방지하기 위하여 엘리트 전략을 사용하였다.

3.2. 최적화 문제의 정식화

본 논문에서 사용된 강제는 A36인 AISC 부재 256개(2의 8승개)의 WF형강을 사용하였다. 따라서, 구조물의 총 염색체수는 설계변수의 총수와 각 설계변수당 염색체수인 8의 곱으로 정의된다. 설계집단의 크기는 10으로 하였으며, 세대수는 고정시키지 않고 수렴기준을 5회 만족될 때 프로그램이 종료되도록 하였다.

3.2.1 적합도 함수

자연계의 생물들은 끊임없는 생존경쟁을 통하여 환경에 적응해 나가는데, 한 생물의 생존능력은 그 환경에 대한 적응능력을 반영한다. 적합도 함수는 환경에 대한 생물의 적응능력을 알고리즘으로 표현한 것으로 일반적으로 목적함수로부터 계산된다. 환경에 대한 생물의 적응능력이 클수록 생존능력이 강하기 때문에 유전자 알고리즘에서도 적합도 함수는 최대화 문제형태로 기술되어야 한다. 많은 공학적인 문제에서 목적함수는 최소화 문제로 기술되기 때문에 최소화 문제로 기술되는 목적함수를 최대화 문제로 기술되는 적합도 함수로 변환할 필요가 있다. 본 논문에서는 적합도 함수로 Ryu et al.(2002)이 제안한 정규화된 제약조건의 위배를 근거로 식(13)과 같이 변환된 적합도 함수를 적용하였다.

$$F(x) = K - OBJ(1 + rC) \tag{13}$$

여기서 $F(x)$ 는 적합도 함수이고, K 는 최소화 문제로 기술된 목적함수를 최대화 문제로 기술되는 적합도함수를 얻기 위해서 필요한 충분히 큰 수를 나타낸다. OBJ 는 목적함수, r 은 벌칙계수의 증가계수를 나타내며 C 는 위배계수로서 식(14)와 같다.

$$C = \sum_{i=1}^m \max(0, g_i^+(x)) \tag{14}$$

토너먼트 선택법은 개체 집단 중에서 임의로 두 개의 개체를 선택한 다음, 적합도가 높은 개체는 생존시키고 적합도가 낮은

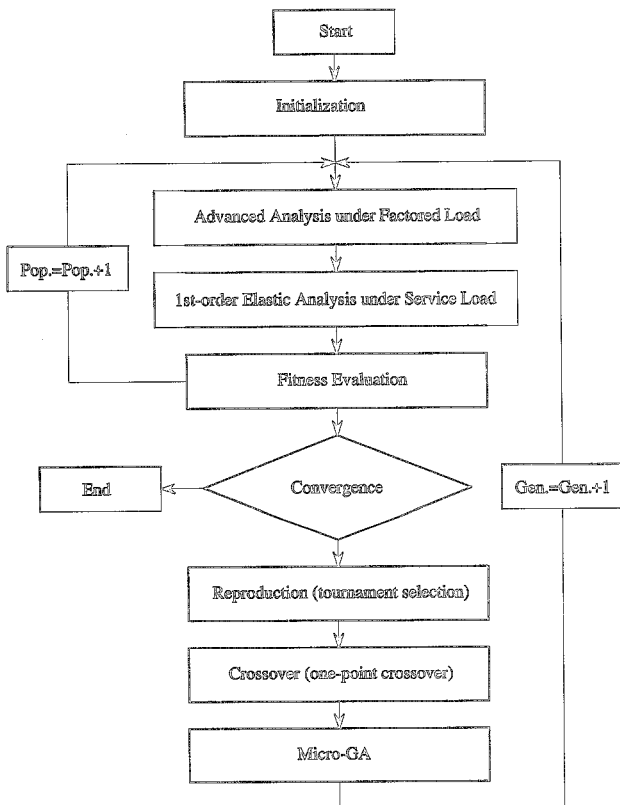


그림 4. 최적화 알고리즘

여기서 $g_i^+(x)$ 는 정규화 된 제약조건으로 양의 값을 가지는 i 번째 제약함수의 값이다.

3.2.2 목적함수

본 연구에서 사용된 목적함수는 구조물의 전체중량을 사용하였으며, 식(15)와 같다.

$$OBJ = \sum_{i=1}^N W_i L_i \quad (15)$$

여기서 W_i 는 i 번째 부재의 단위길이당 무게이며, L_i 는 부재의 길이이다.

3.2.3 하중저항능력에 의한 제약조건식

고등해석을 적용한 직접설계시스템의 설계형식은 기본적으로 LRFD 설계형식과 비슷하다. 본 논문에서는 구조시스템에 작용하는 하중비를 이용하여 하중저항능력에 대한 제약조건식을 고등해석에 적용하기 위한 제약조건식으로 나타내었다.

$$g_1 = \frac{1.0}{\phi} - \lambda \leq 0 \quad (16)$$

여기서 ϕ 는 구조시스템에 대한 저항계수로서 0.9를 사용하였다. λ 는 구조시스템 해석에 적용되는 설계하중에 대한 비를 나타낸다.

3.2.4 사용성에 의한 제약조건식

본 논문에서는 사용성에 대한 제약조건으로 처짐과 층변위를 사용하였으며, 처짐과 층변위에 대한 제약조건식은 AISC-LRFD 규정을 참고하여 식 (17)과 식(18)와 같이 정식화하였다.

$$g_2 = \frac{(\Delta_{bw})_i}{L_i/360} - 1.0 \leq 0 \quad (17)$$

$$g_3 = \frac{(\Delta_{cv})_j}{H_j/300} - 1.0 \leq 0 \quad (18)$$

여기서 식 (18) 및 식 (19)은 각각 처짐 및 층변위에 대한 제약조건식이다. L_i 및 $(\Delta_{bw})_i$ 는 i 번째 보의 지간길이 및 처짐을 나타낸다. H_j 및 $(\Delta_{cv})_j$ 는 j 번째 기둥의 층고 및 층간수평변위를 나타낸다.

4. 설계예제

4.1 3층 2경간 구조물

본 설계 예제는 3층 2경간 강뼈대 구조물로서 그림 5에 도시하였다. 부재의 크기를 나타내는 설계변수로는 보와 기둥으로 하였으며, 그림 6에 도시하였다. 보-기둥 접합은 복부 L형강 L4×3.5×5/16×8.5를 갖는 상하 L형강 L6×4×9/16×7인 접합을 사용하였다. 모든 볼트는 지름 19 mm (3/4 inch)인 A325를 사용하였다. 기하학적 불완전성을 고려하기 위하여 기둥부재에 대하여 기둥길이의 1/500에 해당하는 비수직도를 모델링하였다.

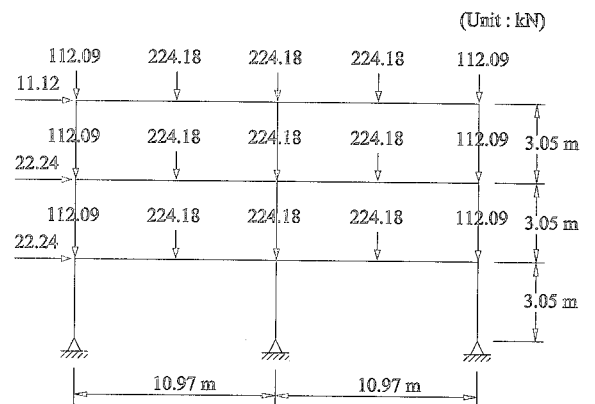


그림 5. 3층 2경간 구조물

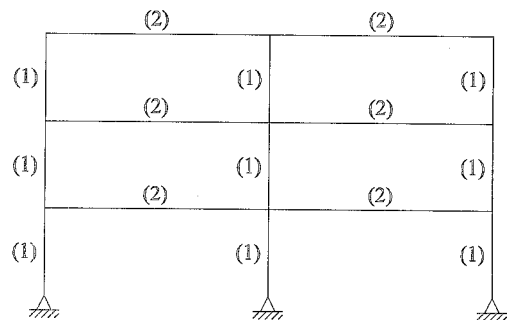


그림 6. 3층 2경간 구조물의 설계변수

본 연구에서 제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 보-기둥 접합부가 강접합인 경우와 반강접인 경우에 대하여 각각 예제해석을 수행하였다. 최적설계결과를 Pezeshk 등 (2000)의 연구결과 및 운영목과 김병현 (2004)의 연구결과와 비교하여 표 1에 제시하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 강접합 구조물에 대하여 본 연구에서 제안한 알고리즘을 사용했을 경우 최적설계된 구조물의 총중량은 62.29 kN (14,004 lb)로서 기하학적 비선형 해석을 이용한 Pezeshk 등의 최적설계 결과인 86.79kN (19,512lb)보다는 약 28.2% 정도, 2차 비탄성 해석을 이용한

윤영묵과 김병헌의 최적설계 결과인 67.74kN (15,228lb)보다는 약 8.0% 정도 중량감소 효과를 얻을 수 있었다. 최적설계된 반강접 구조물의 총중량은 77.99 kN (17,532 lb)로서 강접합 구조물에 비하여 25%정도 중량이 증가함을 보였다. 이는 접합부의 반강접 효과가 구조물의 극한하중 예측시 큰 영향을 주기 때문이다. 또한, 강접합 구조물에 대하여 본 연구에서 제안한 알고리즘을 사용했을 경우 최적설계된 구조물의 하중-저항능력은 1.12로서 윤영묵과 김병헌의 연구결과인 1.074보다 큰으로서 전체 중량은 감소하면서 하중-저항능력은 4.3%정도 증가함을 보임으로서 제안한 알고리즘이 매우 효율적임을 알 수 있었다.

Pezeshk 등은 최적해를 구하기 위하여 집단수를 60, 세대수를 30을 사용하였다. 또한, 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계를 수행함에 있어서 발생하는 난수에 따라 설계결과들이 다르게 나타날 수 있기 때문에 최적설계를 30회를 수행하였다. 즉 Pezeshk 등은 최적해를 구하기 위해서 54,000회의 비선형 해석을 수행하였다. 윤영묵과 김병헌은 집단수를 50, 세대수를 50, 난수발생을 3회 실행함으로써 최적해를 구하기 위해서 7,500번의 비선형 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 난수 발생을 3회, 집단수를 10으로 하였으며, 프로그램의 종료기준을 세대 수가 아닌 마이크로 유전자 알고리즘의 수렴조건을 5회 만족하면 종료되는 것으로 코딩하였다. 본 예제에서는 강접합 구조물인 경우 32번째 세대에서, 반강접 구조물인 경우 28번째 세대에서 종료하였다. 따라서, 최적해를 구하기 위하여 강접합 구조물인 경우 960회, 반강접 구조물인 경우에는 840회 비선형 해석을 수행하게 되었다. 본 연구에서 제안한 알고리즘을 사용했을 경우 Pezeshk 등의 연구결과보다는 약 56배, 윤영묵과 김병헌의 연구결과보다는 약 8배의 시간을 절약할 수 있음을 알 수 있었다.

4.2 3차원 강뱀대 구조물

본 논문에서 제안한 알고리즘의 타당성과 효율성을 검증하기 위한 설계예제로서 김승익과 마상수(2003)에 의하여 설계된 바 있는 3차원 강뱀대 구조물을 사용하였다. 구조물에 작용하는 설계하중은 그림 7과 같다. 설계변수는 부재 크기로 하였으며 그림 8에 나타내었다. 보-기둥 접합은 복부 L형강 L4×3.5×5/16×8.5를 갖는 상하 L형강 L6×4×9/16×7인 접합을 사용하였다. 모든 볼트는 지름 19 mm (3/4 inch)인 A325를 사용하였다. 기둥길이의 1/500에 해당하는 비수직도를 채택하여 기하학적 불완전성을 고려하였다.

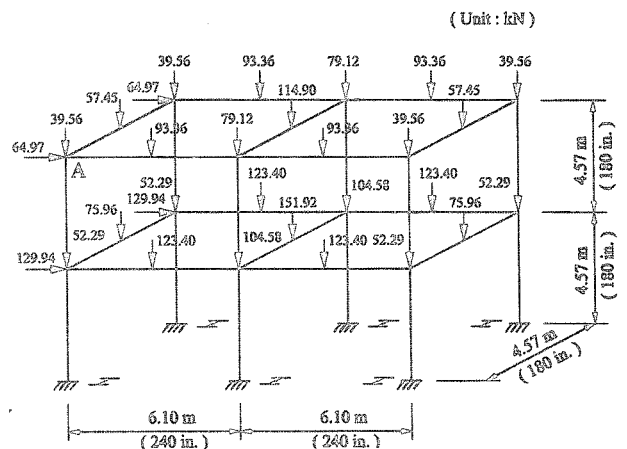


그림 7. 3차원 강뱀대 구조물

표 1. 3층 2경간 구조물 최적설계 결과

| 설계변수 | 제안된 방법 | | Pezeshk 등 (2000) | 윤영묵과 김병헌 (2004) |
|--------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 반강접 | 강접합 | 강접합 | 강접합 |
| 기둥 | W18×46 | W12×50 | W10×68 | W10×54 |
| 보 | W24×62 | W21×44 | W24×62 | W21×48 |
| 최소중량 | 77.99 kN (17,532 lb) | 62.29 kN (14,004 lb) | 86.79 kN (19,512 lb) | 67.74 kN (15,228 lb) |
| 하중저항능력 | 1.21 | 1.12 | 1.455 | 1.074 |
| 비선형해석수 | 840 회 | 960 회 | 54,000 회 | 7,500 회 |

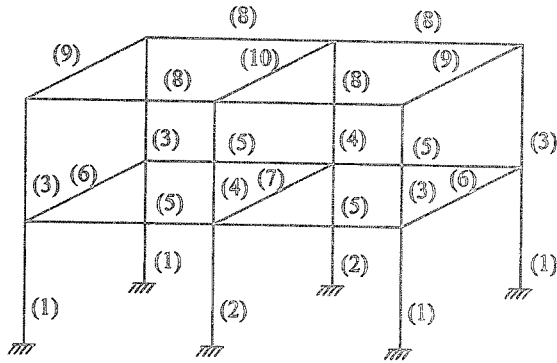


그림 8. 3차원 강뼈대 구조물의 설계변수

본 연구에서 제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 보-기둥 접합부가 강접합인 경우와 반강접인 경우에 대하여 각각 예제해석을 수행하였다. 최적설계결과를 김승억과 마상수 (2003)의 연구결과와 비교하여 표 2에 제시하였다. 표 2에서 보는 바와 같이 강접합 구조물에 대하여 본 연구에서 제안한 알고리즘을 사용했을 경우 최적설계된 구조물의 총중량은 110.83 kN (24,915 lb)로서 김승억과 마상수의 최적설계 결과인 145.58 kN (32,727 lb)보다 약 23.9% 정도 중량감소 효과를 얻을 수 있었다. 최적설계된 반강접 구조물의 총중량은 125.91 kN (28,305 lb)로서 강접합 구조물에 비하여 13.6%정도 중량이 증가함을 보였다. 이는 접합부의 반강접 효과가 구조물의 극한 하중 예측시 큰 영향을 주기 때문이다. 본 연구에서 제안한 알고리즘을 사용했을 경우 최적설계된 구조물의 하중-저항능력은 1.20로서 김승억과 마상수의 하중-저항능력인 1.93보다 설계 하중에 저항계수를 고려한 1.11에 훨씬 가까운 값을 보임으로서 제안한 알고리즘이 매우 효율적임을 알 수 있었다.

표 2. 3차원 강뼈대 구조물의 최적설계 결과

| 설계변수 | 제안된 방법 | | 김승억 등 (2003) 강접합 |
|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 반강접 | 강접합 | |
| 1 | W33×130 | W14×34 | W14×145 |
| 2 | W14×90 | W33×291 | W16×67 |
| 3 | W8×48 | W12×72 | W10×112 |
| 4 | W14×120 | W10×49 | W12×65 |
| 5 | W21×50 | W8×40 | W24×68 |
| 6 | W10×54 | W14×22 | W16×31 |
| 7 | W24×55 | W10×49 | W12×30 |
| 8 | W8×31 | W18×35 | W10×68 |
| 9 | W12×35 | W6×15 | W8×18 |
| 10 | W14×90 | W14×34 | W12×30 |
| 최소중량 | 125.91 kN (28,305 lb) | 110.83 kN (24,915 lb) | 145.58 kN (32,727 lb) |
| 하중저항능력 | 1.13 | 1.20 | 1.93 |
| 해석수 | 1,110회 | 840 회 | 200,000 회 |

한편, 김승억과 마상수는 최적해를 구하기 위하여 집단수를 10, 세대수를 20,000을 사용함으로써 최적해를 구하기 위하여 200,000회의 비선형 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 강접합 구조물인 경우 840회 (집단수 10, 난수발생을 3회, 평균 수렴 세대수 28회), 반강접 구조물인 경우 1,110회 (집단수 10, 난수발생을 3회, 세대수 37회)의 비선형 해석을 수행하였다. 따라서, 본 연구에서 제안한 알고리즘을 사용했을 경우 김승억과 마상수의 연구결과보다 238배의 시간을 절약할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 고등해석과 유전자 알고리즘을 이용하여 강뼈대 구조물의 최적설계를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제안된 방법은 강뼈대 구조물의 거동에 영향을 미치는 모든 중요한 계수들 즉 접합부의 비선형성, 축력과 휨에 의한 점진적인 소성화, 잔류응력의 영향, 기하학적 비선형 및 기하학적 불완전성을 실질적으로 고려한 최적설계 방법이라 할 수 있다.
- (2) 제안된 방법으로 3층 2경간 구조물에 대하여 최적설계를 수행한 경우 최적설계된 구조물의 총중량은 기하학적 비선형 해석을 이용한 Pezeshk에 의한 최적설계보다 약 28%, 2차 비탄성해석을 이용한 윤영묵과 김병현에 의한 최적설계보다는 약 8% 정도 중량감소 효과를 얻을 수 있었으며, 3차원 구조물인 경우에는 가장 위험한 한 개의 부재에 대한 적합도 함수를 사용한 김승억과 마상수에 의한 최적설계보다 약 24% 정도 중량감소 효과를 얻을 수 있었다.
- (3) 해석시 반강접 효과를 고려한 경우, 반강접 효과를 고려하지 않은 경우보다 3층 2경간 구조물은 약 25%, 3차원 구조물은 약 14% 정도 중량이 증가함을 알 수 있었다. 이는 접합부의 반강접 효과가 구조물의 극한하중에 큰 영향을 주기 때문이다.
- (4) 제안된 방법으로 3층 2경간 구조물에 대하여 최적설계를 수행한 경우 비선형 해석수는 기하학적 비선형 해석을 이용한 Pezeshk의 비선형해석 수보다는 56배, 2차 비탄성해석을 이용한 윤영묵과 김병현의 비선형해석 수보다는 8배, 3차원 구조물인 경우에는 가장 위험한 한 개의 부재에 대한 적합도 함수를 사용한 김승억과 마상수의 비선형해석수보다는 238배 정도 해석수 즉 설계시간을 대폭 줄일 수 있음을 알 수 있었다.
- (5) 제안한 방법은 고등해석과 유전자 알고리즘을 동시에

고려함으로써 개별부재별 최적설계가 아닌 구조시스템의 최적설계를 수행할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다 (과제번호 : KRF-2004-003-D00400). 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- 김승억, 이상수 (2003) 유전자 알고리즘을 이용한 비선형 비탄성 최적설계, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제23권 5A호, pp.841-850.
- 박문호, 김승억, 최세휴 (2000) 3차원 강뼈대 구조물의 실용적인 고등해석기법 개발, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제20권 1-A호, pp.69-76.
- 윤영목, 김병헌 (2004) 2차 비탄성해석과 유전자 알고리즘을 이용한 평면 강골조 구조물의 최적설계, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제24권 1-A호, pp.87-100.
- AISC (1993) *Load and resistance factor design specification*, 2nd ed., AISC, Chicago.
- Chen, W.F. and Kim, S.E. (1997) *LRFD steel design using advanced analysis*, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- CSA (1994) *Limit states design of steel structures*, CAN/CAS -S16.1-M94, Canadian Standards Association.
- De Jong, K.A. (1975) An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems, Doctorial dissertation, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
- ECCS (1984) *Ultimate limit state calculation of sway frames with rigid joints*, Technical Committee 8-Structural stability technical working group 8.2-System publication No. 33, p.20.
- ECCS (1991) *Essentials of Eurocode 3 design manual for steel structures in building*, ECCS-Advisory Committee 5, No. 65, p.60.
- Kim, S.E. and Chen, W.F. (1996a) Practical advanced analysis for braced steel frame design, *J. Struct. Eng.*, ASCE, 122(11), pp. 1266-1274.
- Kim, S.E. and Chen, W.F. (1996b) Practical advanced analysis for unbraced steel frame design, *J. Struct. Eng.*, ASCE, 122(11), pp. 1259-1265.
- Kish, N. and Chen, W.F. (1990) Moment-rotation relations of semi-rigid connections with angles, *J. Struct. Eng.*, ASCE, 116, 7, pp. 1813-1834.
- Krishnakumar, K. (1989) Micro-genetic algorithms for stationary and non-stationary function optimization, SPIE, Intelligent Control and Adaptive Systems, Vol. 1196.
- Liew, J.Y. and Tang, L.K., (1998) Nonlinear refined plastic hinge analysis of space frame structures, Research Report No. CE027/98, Department of Civil Engineering, National University of Singapore, Singapore.
- Lin, C.Y. and Hajela, P., (1992) Genetic algorithm in optimization problem with discrete and integer design variables, *Engng. Optim.*, 19, pp.309-327.
- Orbison, J.G., (1982) Nonlinear static analysis of three-dimensional steel frames, Report No. 82-6, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York.
- Pantelides C.P. and Tzan S.R. (1997) Optimal design of dynamically constrained structures, *Comput. Struct.*, 62, pp.141-149.
- Pezeshk, S., Camp, C.V. and Chen, D. (2000) Design of nonlinear framed structures using genetic optimization, *J. Struct. Eng.*, ASCE, 126(3), pp.382-388.
- Rajeev, S. and Krishnamorthy, C.S. (1992) Discrete optimization of structures using genetic algorithms, *J. Struct. Eng.*, ASCE, 118, pp.1233-1250.
- Ryu, Y.S., Kim, J.H., Cho, H.M., and Kim, J.K. (2002) LRFD based design optimization of steel box girder sections using genetic algorithm, *KSCE*, Vol. 6, No 2, pp. 127-134.
- Standards Australia (1990) AS4100-1990, *Steel structures*, Sydney, Australia.

(접수일자 : 2006. 7. 12 / 심사일 2006. 8. 7 /
심사완료일 2006. 9. 20)