

## 유전자 알고리즘을 이용한 비선형 비탄성 최적설계

### Nonlinear Inelastic Optimal Design Using Genetic Algorithm

마상수\* · 김승억\*\*

Kim, Sung Eock · Ma, Sang Soo

---

#### ABSTRACT

An optimal design method in cooperated with nonlinear inelastic analysis method is presented. The proposed nonlinear inelastic method overcomes the difficulties due to incompatibility between the elastic global analysis and the limit state member design in the conventional LRFD method. The genetic algorithm uses a procedure based on Darwinian notions of survival of the fittest, where selection, crossover, and mutation operators are used among sections in the database to look for high performance ones. They satisfy the constraint functions and give the lightest weight to the structure. The objective function is set to the total weight of the steel structure and the constraint functions are load-carrying capacities, serviceability, and ductility requirement. Case studies of a three-dimensional frame and a three-dimensional steel arch bridge are presented.

Keywords : nonlinear inelastic analysis, optimal design, genetic algorithm

---

#### 1. 서 론

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용한 비선형 비탄성 최적설계방법을 제시하고자한다. 제한한 비선형 비탄성해석 방법은 종래 설계의 단점 즉 개별 부재와 구조시스템의 적합조건을 고려하지 못하는 문제점을 극복하였다. 기하학적 비선형 즉  $P-\delta$ 와  $P-\Delta$  효과를 고려하기 위하여 안정함수를 사용하였다. 잔류응력에 의한 재료적 비선형을 고려하기 위하여 CRC 접선탄성계수법을 사용하였다. 보-기둥 부재의 탄성강성에서 완전 소성강성까지 점진적 변화를 나타내기 위하여 LRFD 및 Orbison의 완전소성면을 활용하였다.

유전자 알고리즘은 다윈(Darwin)의 적자생존의 개념을 기본으로 선택, 교배 및 돌연변이라는 세 가지 연산을 수행함으로써 최적설계에 필요한 설계변수 즉 부재 단면을 형성하여, 제약조건을 모두 만족하는 최소 구조물 중량을 제공하는 설계변수를 선택하면서 최적설계를 수행하였다. 목적함수로는 구조물의 총중량을 사용하였으며, 제약조건식으로는 하중저항능력, 사용성 및 연성도를 사용하여 최적설계를 수행하였다.

#### 2. 실용적인 비선형 해석

---

\* 한국시설안전기술공단 기술개발실 연구원 · 공학석사

\*\* 정희원 · 세종대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사

안정함수는 축방향력에 의하여 휨 강성이 감소하는 영향을 고려하는 함수로서 기하학적인 비선형을 효과적으로 고려할 수 있다. Chen과 Lui<sup>(1)</sup>가 발표한 단순화된 안정함수를 사용하였다.  $S_1, S_2, S_3$ 와  $S_4$ 는 각각의  $y$ 와  $z$ 축에 대한 안정함수이며 식(1)과 같다.

$$S_1, S_3 = \begin{cases} \frac{\pi\sqrt{\rho}\sin(\pi\sqrt{\rho}) - \pi^2\rho\cos(\pi\sqrt{\rho})}{2 - 2\cos(\pi\sqrt{\rho}) - \pi\sqrt{\rho}\sin(\pi\sqrt{\rho})} & : P < 0 \\ \frac{\pi^2\rho\cosh(\pi\sqrt{\rho}) - \pi\sqrt{\rho}\sinh(\pi\sqrt{\rho})}{2 - 2\cosh(\pi\sqrt{\rho}) + \pi\sqrt{\rho}\sinh(\pi\sqrt{\rho})} & : P > 0 \end{cases} \quad S_2, S_4 = \begin{cases} \frac{\pi^2\rho - \pi\sqrt{\rho}\sin(\pi\sqrt{\rho})}{2 - 2\cos(\pi\sqrt{\rho}) - \pi\sqrt{\rho}\sin(\pi\sqrt{\rho})} & : P < 0 \\ \frac{\pi\sqrt{\rho}\sinh(\pi\sqrt{\rho}) - \pi^2\rho}{2 - 2\cosh(\pi\sqrt{\rho}) + \pi\sqrt{\rho}\sinh(\pi\sqrt{\rho})} & : P > 0 \end{cases} \quad (1)$$

잔류응력을 가진 부재가 축방향력에 의하여 점진적으로 항복하는 것을 고려하기 위하여 CRC 점선계수를 사용한다. 점선계수는 식(2)와 같이 축방향력의 함수로 나타낼 수 있다.<sup>(1)</sup>

$$P \leq 0.5P_y, \text{ 일 경우 } E_t = 1.0E, \quad P > 0.5P_y, \text{ 일 경우 } E_t = 4\frac{P}{P_y}E(1 - \frac{P}{P_y}) \quad (2)$$

점선탄성계수 모델은 축방향력과 모멘트를 동시에 받는 부재의 점진적 소성화를 나타내기에는 부적합하다. 이를 위하여 탄성강성에서 완전 소성강성 즉 영까지 점진적 변화를 나타내기 위하여 연화소성힌지(softening plastic hinge)를 사용한다. 연화소성힌지는 포물선함수 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha \leq 0.5 \text{ 일 경우 } \eta = 1, \quad \alpha > 0.5 \text{ 일 경우 } \eta = 4\alpha(1 - \alpha) \quad (3)$$

여기서,  $\alpha$ 는 단면에 작용하는 부재력의 크기를 나타내는 함수로서 AISC-LRFD 및 Orbison의 완전 소성면을 활용하여 다음과 같이 각각 나타낼 수 있다.

AISC-LRFD<sup>(2)</sup>

$$\alpha = \frac{P}{P_y} + \frac{8}{9} \frac{M_y}{M_{yp}} + \frac{8}{9} \frac{M_z}{M_{zp}} \quad : \quad \frac{P}{P_y} \geq \frac{2}{9} \frac{M_y}{M_{yp}} + \frac{2}{9} \frac{M_z}{M_{zp}} \quad (4a)$$

$$\alpha = \frac{P}{2P_y} + \frac{M_y}{M_{yp}} + \frac{M_z}{M_{zp}} \quad : \quad \frac{P}{P_y} < \frac{2}{9} \frac{M_y}{M_{yp}} + \frac{2}{9} \frac{M_z}{M_{zp}} \quad (4b)$$

Orbison<sup>(3)</sup>

$$\alpha = 1.15p^2 + m_z^2 + m_y^4 + 3.67p^2m_z^2 + 3.0p^6m_y^2 + 4.65m_z^4m_y^2 \quad (5)$$

여기서,  $p = \frac{P}{P_y}$ ,  $m_z = \frac{M_z}{M_{zp}}$  (강축),  $m_y = \frac{M_y}{M_{yp}}$  (약축) 이다.

그러므로, 3차원 보-기둥 부재의 연화 소성힌지를 고려하는 힘-변위의 관계는 식 (6)과 같이 정식화 된다.

$$\begin{bmatrix} P \\ M_{yA} \\ M_{yB} \\ M_{zA} \\ M_{zB} \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_t A}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & k_{iy} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{iy} & k_{ii} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{iz} & k_{iz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{iz} & k_{iz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \theta_{yA} \\ \theta_{yB} \\ \theta_{zA} \\ \theta_{zB} \\ \phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서,

$$k_{iy} = \eta_A \left[ S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \eta_B) \right] \frac{E_t I_y}{L}, \quad k_{ii} = \eta_A \eta_B S_2 \frac{E_t I_y}{L}, \quad k_{iz} = \eta_B \left[ S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \eta_A) \right] \frac{E_t I_y}{L} \quad (7a-c)$$

$$k_{iiz} = \eta_A \left[ S_3 - \frac{S_4^2}{S_3} (1 - \eta_B) \right] \frac{E_1 I_z}{L}, \quad k_{ijz} = \eta_A \eta_B S_4 \frac{E_1 I_z}{L}, \quad k_{jiz} = \eta_B \left[ S_3 - \frac{S_4^2}{S_3} (1 - \eta_A) \right] \frac{E_1 I_z}{L} \quad (7d-f)$$

### 3. 비선형 비탄성 최적설계

#### 3.1 최적설계 알고리즘

유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)은 Holland<sup>(4)</sup>가 제안한 최적 설계기법으로써, 설계자가 결정한 매개변수 값과 선택(selection), 교배(crossover), 그리고 돌연변이(mutation)라는 세 가지 처리 과정을 거치면서 최적화에 필요한 세대들을 형성하게 된다. 각 세대의 개체들은 8개의 염색체를 갖는 2진수의 조합으로 이루어지며, 2진수의 조합을 위해서 AISC 규격의 WF형강 단면 291개 중에서 거대 단면 35개를 제외한 256개(2의 8승개)를 사용하였다. 또한, AISC 규격의 BOX형강 단면 263개 중에서 작은 단면 7개를 제외한 256개를 사용하였다. 따라서, 각 세대를 구성하는 개체들은 최적화에 사용되는 설계변수 즉, 부재별 단면 크기가 된다.

유전자 알고리즘에 의한 최적설계 결과를 비교하기 위하여 사용한 단면점증법은 초기단면으로 가장 가벼운 단면으로 가정한다. 설계하중에 의한 비선형 비탄성해석에 의한 해석결과가 제약조건식을 만족하지 않게 되면, 단면을 단계별로 하나씩 증가시킴으로서 최적해를 구한다.

#### 3.2 목적함수

목적함수는 강뼈대 구조물의 중량의 함수로서 식 (8)과 같다.

$$OBJ = \rho \left[ \sum_{i=1}^{NB} (V_b)_i + \sum_{j=1}^{NC} (V_c)_j \right] \quad (8)$$

여기서  $(V_b)_i$ 는  $i$ 번째 보의 체적,  $(V_c)_j$ 는  $j$ 번째 기둥의 체적,  $NB$ 는 보의 개수,  $NC$ 는 기둥의 개수이다.  $\rho$ 는 단위 체적당 중량이다.

#### 3.3 제약조건식

본 연구에서는 제약조건식을 세가지로 나누어 고려하였다. 첫째는 구조시스템의 하중저항능력에 대한 제약조건이며, 둘째는 사용성에 대한 제약조건이다. 셋째는 연성도에 의한 제약조건이다.

비선형 비탄성 해석의 설계형식은 기본적으로 LRFD 설계형식을 따르고 있다. LRFD의 설계형식은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum \gamma_i Q_i \leq \phi R_n \quad (9)$$

여기서,  $R_n$ =구조물 부재의 하중저항능력,  $Q_i$ =설계하중,  $\phi$ =저항계수,  $\gamma_i = Q_i$ 에 대한 하중계수이다. 종래의 LRFD와 제안된 비선형 비탄성 해석에 의한 설계법의 중요한 차이점은 식 (9)의 오른쪽항 ( $\phi R_n$ )이 LRFD에서는 구조물의 각 부재에 대한 공칭저항능력이지만, 비선형 비탄성 해석에 의한 설계법에서는 전체 구조시스템의 공칭저항능력을 나타낸다. 비선형 비탄성 해석에서 공칭저항능력은 구조시스템이 저항할 수 있는 최대 하중으로 나타낸다. 식 (9)의 왼쪽항 ( $\sum \gamma_i Q_i$ )은 LRFD에서는 각 부재의 부재력이지만, 비선형 비탄성 해석에서는 구조시스템에 작용된 하중을 의미한다. 결론적으로 LRFD에서는 개별부재에 대한 강도를 평가하나 비선형 비탄성 해석에서는 구조시스템의 하중저항능력을 평가함으로서 한 차원 발전된 방법이라고 할 수 있다.

AISC-LRFD<sup>(5)</sup>에서 사용하는 저항계수는 부재에 대한 것인 반면 제안한 방법에서 사용하는 저항계수는 구조체에 대한 저항계수이다. AISC-LRFD에서는 저항계수로 부재의 압축강도에 대하여 0.85를, 인장강도와 휨강도에 대하여 0.9를 사용하고 있다. 따라서, 강빔대 구조물의 해석시, 구조시스템이 좌굴에 의하여 붕괴될 경우에는 0.85를, 인장에 의해 항복할 경우와 소성힌지 발생에 의하여 붕괴될 때는 0.9를 사용하였다. AASHTO-LRFD<sup>(6)</sup>에서는 압축강도, 인장강도 및 휨강도에 대한 저항계수를 0.90, 0.95 및 1.0으로 규정한다. 따라서, 강교량이 압축에 의하여 좌굴이 발생할 때에는 0.9를, 인장에 의해 항복할 때는 0.95를, 그리고 휨에 의해 소성과괴될 때에는 1.0을 구조물 저항계수로 사용한다. 하중저항능력에 대한 제약조건식을 나타내면 다음과 같다.

$$G(1) = \phi R_n - \sum \gamma_i Q_i \geq 0 \quad (10)$$

여기서  $\phi R_n$ 은 구조시스템에 대한 하중저항능력을 나타낸다.

ASCE Ad Hoc 위원회<sup>(7)</sup>에 의하면, 뼈대 구조에 대하여 일반적인 층간 수평변위의 허용치는 층 높이의 1/500에서 1/200을 제안하고 있으며 보통은 H/300이다. Ad Hoc 위원회<sup>(7)</sup>와 Ellingwood<sup>(8)</sup>에 의한 층의 처짐 제한은 다음과 같다.

- 활하중에 의한 바닥 거더의 처짐 : H/360
- 층간 수평변위 : 풍하중에 대해 H/300

본 연구에서는 Ad Hoc 위원회와 Ellingwood에 의한 연구를 바탕으로 제약조건식을 다음과 같이 형성하였다.

$$G(2) = \frac{L_i}{360} - (\Delta_{bv})_i \geq 0 \quad G(3) = \frac{H_j}{300} - (\Delta_{cv})_j \geq 0 \quad (11)$$

여기서 G(2) 및 G(3)은 각각 처짐 및 층변위에 대한 제약조건식이다.  $L_i$  및  $(\Delta_{bv})_i$ 는 i-번째 보의 지간길이 및 처짐을 나타낸다.  $H_j$  및  $(\Delta_{cv})_j$ 는 j-번째 기둥의 층고 및 층간 수평변위를 나타낸다.

강교량의 사용성에 대한 제약조건식으로는 AASHTO-LRFD의 규정을 따른다. 지간 L인 교량에서 사용이동하중에 대한 사용성 제한은 다음과 같다.

- 차량하중에 대한 처짐 : L/800
- 보도하중에 의한 처짐 : L/1000

사용 하중하에서는 영구 변형을 방지하기 위하여 소성힌지가 생기지 않도록 하여야 한다.

충분한 회전 능력은 부재의 소성 모멘트 발현과 모멘트 재분배를 위하여 필요하다. 이것은 부재가 적절히 휘지지되고 단면이 조밀(compact)할 때 얻어진다. 휘지지 길이와 조밀단면에 대한 제한은 AISC-LRFD의 규정에 따른다. 이를 제약조건식으로 나타내면 다음과 같다.

$$G(4) = \frac{300r_{yt}}{\sqrt{F_y}} - L_{bi} \geq 0 \quad G(5) = \frac{65}{\sqrt{F_y}} - \left( \frac{b_f}{2t_f} \right)_i \geq 0 \quad G(6) = \frac{640}{\sqrt{F_y}} - \left( \frac{h_c}{t_w} \right)_i \geq 0 \quad (12)$$

여기서 G(4)는 횡비틀림 좌굴을 방지하기 위한 비지지장에 대한 제약조건식이다. G(5) 및 G(6)은 국부좌굴을 방지하기 위한 플랜지 및 웨브의 폭-두께비에 대한 제약조건식이다.  $r_{yt}$  및  $L_{bi}$ 는 i-번째 부재에 대한 약축방향의 회전반경 및 비지지장을 나타낸다.  $b_f$ ,  $t_f$  및  $t_w$ 는 각각 플랜지의 폭과 두께 및 웨브의 두께를 나타낸다.  $h_c$ 는 보의 깊이,  $F_y$ 는 항복강도를 나타낸다.

강교량에 대한 횡지지 길이와 조밀단면에 대한 제한은 AASHTO-LRFD규정을 따르며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G(4) = \left[ 0.124 - 0.0759 \left( \frac{M_l}{M_p} \right) \right] \left[ \frac{r_y E}{F_y} \right] \geq L_b \quad G(5) = 0.382 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \geq \frac{b_f}{2t_f} \quad G(6) = 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \geq \frac{2D_{cp}}{t_w} \quad (13)$$

여기서, G(4)는 횡비틀림 좌굴을 방지하기 위한 비지지장에 대한 제약조건식이다. G(5) 및 G(6)는 국부좌굴을 방지하기 위한 플랜지 및 웨브의 폭-두께비에 대한 제약조건식이다.  $M_l$ 은 비지지장 길이의 끝단 모멘트 중 작은 값이며  $M_p$ 는 소성모멘트이며  $r_y$  및  $L_b$ 는 약축방향의 회전반경 및 비지지장을 나타낸다.  $b_f$ ,  $t_f$  및  $t_w$ 는 각각 플랜지의 폭과 두께 및 웨브의 두께를 나타낸다.  $D_{cp}$ 는 보의 깊이,  $E$ 는 탄성계수이며  $F_y$ 는 항복강도를 나타낸다.

## 4. 설계 예제

### 4.1 3차원 강뺨대 구조물

본 설계 예제는 3차원 강뺨대 구조물로서 그림 1에 도시하였다. 부재의 크기를 나타내는 설계변수는 그림 2에 나타내었다. 각 부재의 항복강도는 250 MPa (36 ksi)이고, 탄성계수는 200,000 MPa (29,000 ksi)이다. 하중조합을 고려한 설계하중을 그림 1에 도시하였다. 기하학적 불완전성을 고려하기 위하여 기둥부재에 대하여 기둥길이의 1/500에 해당하는 비수직도를 모델링하였다.

유전자 알고리즘의 매개변수인 염색체수는 데이터 베이스에 저장된 단면의 수인 2의 8승(=256)개로 정해진 값이다. 개체수는 본 예제의 설계변수가 10개이므로 10이다. 교배율은 0.1에서 1.0까지, 돌연변이율은 0.01에서 0.05까지, 그리고 집단수는 5에서 50까지 변화시킨 결과 교배율은 0.90, 돌연변이율은 0.03, 그리고 집단수는 10일 때 20000세대 정도에서 수렴도가 좋았다. 따라서, 유전자 알고리즘의 매개변수 값으로 염색체수는 8, 교배율은 0.90, 돌연변이율은 0.03, 전체세대수는 20000, 설계변수인 개체수는 10, 그리고 집단수는 10을 사용하였다. 따라서, 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계에서는 20000세대의 설계변수 중에서 제약조건을 만족하고, 구조물이 최소 총중량을 갖게하는 설계변수가 선택된다. 단면점증법에서는 가장 가벼운 단면인 W4X13에서 시작해서 구조물이 제약조건식을 모두 만족할 때까지 두 가지 규칙에 의하여 단면이 한단계씩 증가된다.

유전자 알고리즘 및 단면점증법에 의한 최적설계 결과를 표 1에 정리하였다. 표 1에서 유전자 알고리즘에 의한

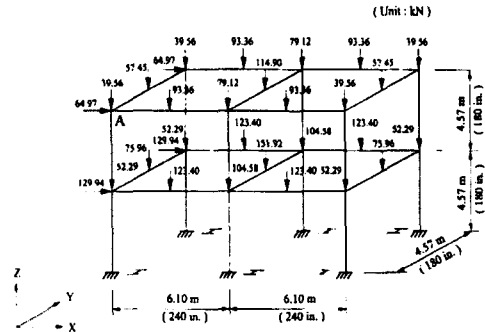


그림 1. 3차원 강뺨대구조물

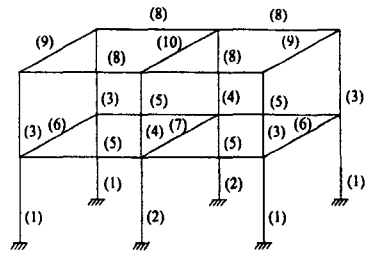


그림 2. 설계변수

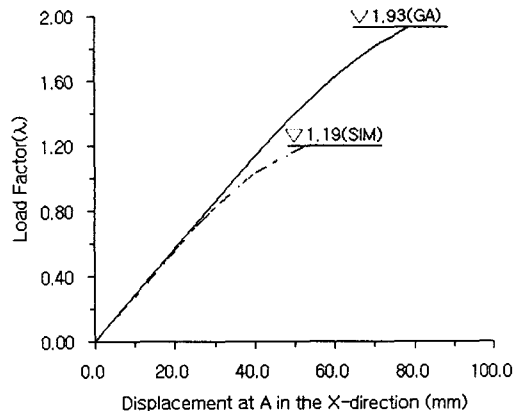


그림 3. 하중-변위 곡선

구조물의 전체중량이 단면점증법에 의한 것보다 약 15.6 % 감소하였다. 구조물의 하중저항능력은 설계하중에 대하여 증분하중의 비로 나타내었으며 유전자 알고리즘을 사용한 경우 1.93, 단면점증법을 사용한 경우 1.19로 산정되었다. 본 구조물은 좌굴에 의하여 붕괴되었기 때문에 구조시스템에 대한 저항계수로 0.85를 사용하였다. 따라서, 구조물에 대한 극한 하중비  $\lambda$ 는 유전자 알고리즘 및 단면점증법의 경우 각각 1.641 ( $=1.93 \times 0.85$ )과 1.012 ( $=1.19 \times 0.85$ )가 된다. 극한 하중비가 1.0보다 크므로, 선택한 단면을 사용하는 것이 적절함을 알 수 있다. 또한, 활하중에 의한 최대처짐은 유전자 알고리즘 및 단면점증법에서 각각  $L/1900$ 과  $L/1814$ 로 계산되었다. 이는 처짐 허용치인  $L/360$ 보다 작으므로 기준치를 만족함을 알 수 있다. 풍하중에 의한 최대 층간 수평변위는 유전자 알고리즘 및 단면점증법에서 각각  $H/331$ 와  $H/351$ 로 계산되었다. 이는 허용 수평변위인  $H/300$ 보다 작으므로 기준치를 만족함을 알 수 있다. 본 설계예제의 증분하중비와 사용성을 살펴보면 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계는 사용성에 의하여 부재 치수가 결정되고, 단면점증법을 이용한 최적설계는 부재 강도에 의하여 부재 치수가 결정되었다는 것을 알 수 있다. 유전자 알고리즘(Genetic:GA) 및 단면점증법(Section Increment Method; SIM)을 이용하여 최적설계된 구조물에 대한 하중-변위 곡선은 그림 3에 나타내었다. 본 예제설계에서 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계 결과, 단면점증법보다 구조물 전체중량이 15.6 % 감소하였지만, 하중저항능력은 43.0 % 증가하였다.

#### 4.2 3차원 강아치교

본 설계 예제는 교폭 7.32 m (24 ft), 지간 61.0 m (200 ft)인 3차원 강아치교이다(그림 4). 부재 크기를 나타내는 설계변수는 아치리브, 타이, 평형재, 그리고 브레이싱에서 각각 1, 2, 3과 4이다. 각 부재의 탄성계수는 200,000 MPa (29,000 ksi)이고 항복강도는 250 MPa (36 ksi)이다. 사용한 하중은 AASHTO-LRFD(1998)에서 규정하고 있는 사하중, 활하중(HS-20), 충격하중만을 고려하였으며, 사하중은 강아치교의 자중과 상재되는 주형의 자중을 고려하여 각 절점당 133.5 kN (30kips)을 작용시켰으며, 활하중 (HS-20)은 영향선을 고려하여 각 절점에 작용시켰다. 하중계수로는 사하중 1.25, 활하중 1.75, 충격

표 1. 3차원 강아치교 구조물의 해석 결과

설계변수	유전자 알고리즘 부재 크기	단면점증법 부재 크기
1	W14×145	W40×192
2	W16×67	W40×192
3	W10×112	W40×167
4	W12×65	W40×192
5	W24×68	W16×31
6	W16×31	W12×14
7	W12×30	W12×22
8	W10×68	W14×22
9	W8×18	W8×13
10	W12×30	W12×16
전체 중량(lb)	32,727	38,792
하중저항능력	1.93	1.19

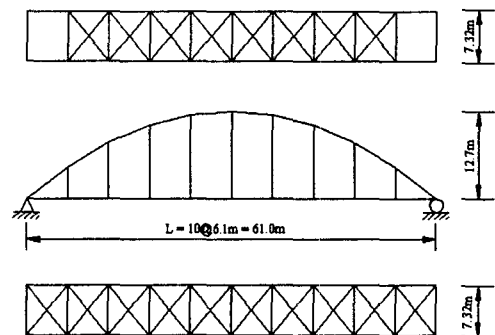


그림 4. 3차원 강아치교

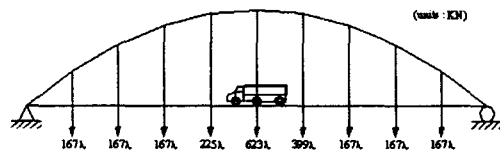


그림 5. 설계하중

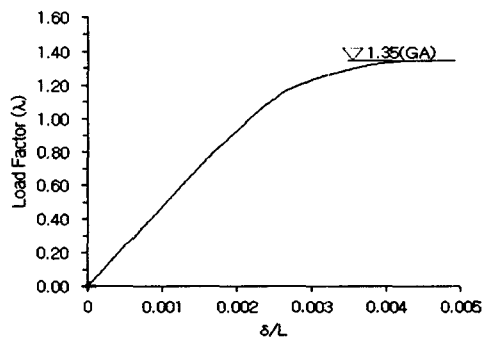


그림 6. 하중-변위 곡선

계수 0.30을 사용하였으며, 하중계수를 고려한 설계하중을 그림 5에 도시하였다.

유전자 알고리즘을 이용한 최적설계는 프로그램이 WF형 단면과 BOX형 단면을 모두 인식할 수 있어서 해석이 가능하였지만, 단면점증법은 프로그램에 BOX형 단면이 인식되도록 코딩(coding)하지 못하여 최적설계를 수행하지 못하였다. 따라서, 본 설계예제는 유전자 알고리즘만을 이용하여 최적설계를 수행하였다.

유전자 알고리즘의 매개변수인 염색체수는 데이터 베이스에 저장된 단면의 수인 2의 8승(=256)개로 정해진 값이다. 개체수는 본 예제의 설계변수가 4개이므로 4이다. 교배율은 0.1에서 1.0까지, 돌연변이율은 0.01에서 0.05까지, 그리고 집단수는 5에서 50까지 변화시켜본 결과 교배율은 0.90, 돌연변이율은 0.03, 그리고 집단수는 10일 때 수렴도가 좋았다. 따라서, 유전자 알고리즘의 매개변수 값으로 염색체수는 8, 교배율은 0.90, 돌연변이율은 0.03, 전체세대수는 2000, 설계변수인 개체수는 4, 그리고 집단수는 10을 사용하였다. 본 설계예제는 구조물의 부재수가 많아서 해석하는데 많은 시간이 소요되고, 2000세대 내에서도 어느정도 합리적인 최적설계가 이루어졌다고 판단되므로 최적화 시간을 고려하여 전체세대수를 낮게 정하였다. 따라서, 최적설계는 2000세대의 설계변수 중에서 제약조건을 만족하고, 구조물이 최소 총중량을 갖게하는 설계변수가 선택된다.

유전자 알고리즘 및 비선형 비탄성 최적설계 결과는 표 2와 같다. 표 2에서 강아치교의 하중저항능력은 설계하중에 대하여 충분하중의 비가 1.35에 이를 때 극한 상태에 도달하였다. 본 구조물은 소성힌지가 발생하여 붕괴되었기 때문에 구조시스템에 대한 저항계수로 1.0을 사용하였다. 따라서, 구조물에 대한 극한 하중비는 1.35 (=1.35×1.0)가 된다. 극한 하중비가 1.0보다 크므로, 선택된 단면을 사용하는 것이 적절함을 알 수 있다. 사용이동하중에 대한 최대 변위는 42 mm(1.66 in)로서 L/1452에 해당하므로 허용변위기준인 L/800을 만족한다. 최적설계된 강아치교의 하중-변위 곡선을 그림 6에 나타내었다. 본 설계예제는 사용성 기준을 충분히 만족하므로 부재 강도에 의하여 부재 치수가 결정된 것을 알 수 있다.

**표 2. 3차원 강아치교의 해석 결과**

유전자 알고리즘	
설계변수	부재크기
1	TS20X12X1/2
2	W27X84
3	W16X57
4	W6X12
전체중량	130,682
하중저항능력	1.35

#### 4. 결론

본 논문에서는 유전자 알고리즘 및 비선형 비탄성해석 방법을 이용한 최적설계 방법을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제안한 비선형 비탄성해석 방법은 3차원 강뼈대 구조물의 거동에 영향을 미치는 모든 중요한 계수들 즉 축력과 휨에 의한 점진적인 소성화, 잔류응력의 영향, 기하학적 비선형 및 기하학적 불완전성을 실질적으로 고려할 수 있다. 제안한 비선형 비탄성해석 방법은 종래 설계의 단점 즉 개별 부재와 구조시스템의 적합조건을 고려하지 못하는 문제점을 극복하였다.
- (2) 비선형 비탄성해석에 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)과 단면점증법(Section Increment Method)를 도입하여 최적설계를 수행하였다. 목적함수로는 구조물의 총중량을 사용하였으며, 제약조건식으로는 하중저항능력, 사용성 및 연성도를 사용하여 최적설계를 수행하였다.
- (3) 3차원 강뼈대 구조물의 예제설계 결과 유전자 알고리즘에 의해 최적설계된 구조물의 총중량이 단면점증법에 의한 총중량보다 15.6 % 감소하였다. 유전자 알고리즘은 설계변수의 전역적 탐색이 가능한데 반하여, 단면점증법은 가벼운 단면에서 시작하여 두 가지 규칙에 의해 단면을 증가시키므로 설계변수의 전역

적 탐색이 불가능하다. 따라서, 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계 결과가 단면검증법에 의한 최적설계 결과보다 우수한 결과를 보였다.

(4) 제안한 최적설계 방법은 실용적인 비선형 비탄성해석에 유전자 알고리즘을 도입한 최적설계방법으로 설계자의 노력과 시간을 대폭 절감할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 2000년도 한국과학기술부의 국가지정연구실 지원(과제번호:M10204000143-02J0000-12910)과 2002년도 건설교통부의 건설기술연구개발사업 지원(과제번호:C102A2000005-02A0200-00510)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. Chen, W.F. and Lui, E.M. Stability design of steel frames, CRC Press, Boca Raton. 1992
2. Kanchanalai, T. The design and behavior of beam-columns in unbraced steel frames, *AISI Project No.189, Report No.2, Civil Engineering/structures Research Lab., University of Texas, Austin, Texas. 1977*
3. Orbison, J.G. Nonlinear static analysis of three-dimensional steel frames, *Report No.82-6, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York. 1982*
4. Holland, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. *Ann Arbor, Michigan, The University of Michigan Press. 1975*
5. AISC, Load and resistance factor design specification, *AISC, 2nd ed., Chicago. 1993*
6. AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specification, *AASHTO. 1998*
7. Ad Hoc Committee on Serviceability, Structural serviceability : a critical appraisal and research needs, *ASCE J. Struct. Eng.*, 112(12), 1986, pp.2646-2664.
8. Ellingwood, B. Serviceability guidelines for steel structures, *AISC Engineering Journal*, 26, 1st Quarter, 1989, pp.1-8.