

# 유전자 알고리즘을 이용한 비선형 탄성 최적설계

## Nonlinear Elastic Optimal Design Using Genetic Algorithm

김 승 역<sup>1)</sup> · 마 상 수<sup>2)</sup>

Kim, Seung Eock · Ma, Sang Soo

**요 약 :** 본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용한 비선형 탄성 최적설계 방법을 제시하였다. 제안한 비선형 탄성해석은 종래 설계의 단점 즉 선형 탄성해석 후 비선형 효과를 고려하기 위하여  $B_1$ ,  $B_2$  계수를 사용하는 불합리성을 극복하였다. 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. 2차원 강뼈대 구조물, 3차원 강뼈대 구조물, 그리고 3차원 강아치교의 설계예제를 수행하였다.

**ABSTRACT :** The optimal design method in cooperation with a nonlinear elastic analysis method was presented. The proposed nonlinear elastic method overcame the drawback of the conventional LRF method this approximately accounts for the nonlinear effect caused by using the moment amplification factors of and .

The genetic algorithm uses a procedure based on the Darwinian notions of the survival of the fittest, where selection, crossover, and mutation operators are used to look for high performance among the sections of the database. They satisfy constraint functions and give the lightest weight to the structure.

The objective function was set to the total weight of the steel structure. The constraint functions were load-carrying capacities, serviceability, and ductility requirement. Case studies for a two-dimensional frame, a three-dimensional frame, and a three-dimensional steel arch bridge were likewise presented.

**핵 심 용 어 :** 비선형 탄성해석, 최적설계, 유전자 알고리즘, 목적함수, 3차원 강아치교

**KEYWORDS :** nonlinear elastic analysis, optimal design, genetic algorithm, objective function, a three-dimensional steel arch bridge

### 1. 서 론

현재 사용되고 있는 대부분의 설계 방법에서는, 구조물의 해석시  $P-\delta$  모멘트와  $P-\Delta$  모멘트에 의한 비선형 효과를 고려하지 않고 있다. 강뼈대 구조물의 설계시 비선형 효과는 매우 중요하며 반드시 고려해야 한다. 미국의 강구조 시방서인 AISC-LRFD(1994)에서는 이러한 비선형 효과를 고려하기 위하여 구조물의 해석시 선형 탄성해석과 비선형 탄성해석을 제시하고 있다. 선형 탄성해석을 수행 할 경우  $B_1$ ,  $B_2$  계수(Approximate Moment Magnification Factor)를 도

입하여  $P-\delta$ 효과와  $P-\Delta$ 효과를 고려한다. 일반적으로 설계자들은 비선형 효과를 고려하기 위하여  $B_1$ ,  $B_2$  방법을 사용한다.  $B_1$ ,  $B_2$  방법에서는 횡지지되지 않은 뼈대 구조물의 해석시 횡방향으로 지지된 경우와 지지되지 않은 경우로 나누어 선형 탄성해석을 수행하여 두 경우에 대해 최대모멘트를 각각 구한 후  $B_1$ ,  $B_2$  계수를 곱하여  $P-\delta$ 효과와  $P-\Delta$ 효과를 따로 고려한다.(AISC-LRFD, 1994) 그러나 이 방법은 지지된 경우의 최대모멘트의 위치와 지지되지 않은 경우의 최대모멘트의 위치가 같지 않음에도 불구하고 이를 그대로 사용하는 문제점을 내포하고 있다. 또한 설계자는  $B_1$ ,  $B_2$ 를 계산할 때 두 분

1) 정희원, 세종대학교 토목환경공학과/건설기술연구소, 부교수  
(Tel. 02-3408-3291, Fax. 02-3408-3332, E-mail:sekim@sejong.ac.kr)  
2) 세종대학교 토목환경공학과/건설기술연구소, 석사과정(mss971462@daum.net)

본 논문에 대한 토의를 2003년 10월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

리된 구조물에 대하여 적절한 유효길이 계수를 선택하여야 하는 문제점 때문에 해석에서부터 설계에 이르기까지 일괄적인 컴퓨터 활용이 불가능하다.(Chen 등, 1997)

해석시 비선형의 영향을 직접 고려하는 방법으로는 ABAQUS 나 ANSYS 같은 범용 유한요소 해석 프로그램을 사용하는 것이다. 그러나 이 방법은 기하학적 비선형 효과를 고려하기 위하여 부재의 길이 방향으로 10개 이상의 요소로 분할하여야 하므로 대형 구조물의 해석에는 요소의 수가 너무 많이 필요하여 경제성이 없기 때문에 일반 설계에는 사용되지 않는다. 본 연구에서는 일반 설계에 사용할 수 있는 실용적인 비선형 해석기법을 제시하고자 한다. 안정함수(Stability Function)를 사용하므로써 비선형성을 고려한다.(Chen 등, 1986) 안정함수의 장점은 부재 당 하나의 요소를 사용하므로써 유한요소해석법에 비하여 계산량을 현격히 줄일 수 있는 장점이 있다.

유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)은 Holland (1975)가 제안한 최적 설계기법이다. 최근에는 Rajeev와 Krishnamorthy(1992), Lin과 Hajela(1992), May와 Balling(1992) 및 Pantelides와 Tzan(1997) 등에 의해서 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms)과 Simulated Annealing (SA)과 같은 새로운 알고리즘들이 소개되고 있다. 그러나, 지금까지 이러한 알고리즘을 적용함에 있어서 사용되는 구조해석 방법들은 기존의 설계법과 마찬가지로 탄성해석 후 개별부재에 대한 부재력과 강도검토식을 사용한 설계방법을 사용함으로써 구조시스템과 개별부재 사이의 적합조건을 만족시키지 못하는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 최적설계 방법으로 유전자 알고리즘과 단면점증법을 사용하였다. 유전자 알고리즘은 이진수의 조합으로 구성된 개체들의 집단을 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)의 세 가지 과정을 거쳐 최적화를 수행하는 알고리즘이다. 단면점증법은 LRFD의 상관관계식으로 계산된 값중 최대값을 가지는 부재의 단면을 데이터 파일에 저장된 단면들 중에서 단계별로 하나씩 증가시키는 방법으로서, 유전자 알고리즘에 의한 최적설계 결과를 단면점증법과 비교하였다. 목적함수로는 구조물의 총중량을 사용하였으며, 제약조건으로는 하중저항능력, 사용성 및 연성도를 고려하였다.

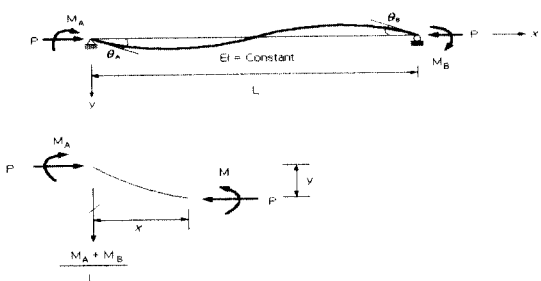


그림 1. 보-기둥 부재의 힘-변위 관계

## 2. 실용적인 비선형 해석

기하학적인 비선형성을 고려하기 위하여 안정함수를 사용한다. 안정함수란 축방향력에 의하여 휨 강성이 감소하는 영향을 고려하는 함수로서 부재를 하나 혹은 두 개의 요소로 이상화하여 기하학적인 비선형을 효과적으로 고려할 수 있다.(Kim 등, 1996a; 1996b) 그림 1과 같이 면내 휨모멘트를 받고 있는 부재의 힘-변위관계는 식(1)과 같다.

$$\begin{pmatrix} M_A \\ M_B \end{pmatrix} = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} S_{ii} & S_{ij} \\ S_{ji} & S_{jj} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \theta_A \\ \theta_B \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $S_{ii}, S_{ij}, S_{ji},$  및  $S_{jj}$  는 안정함수로 식(2) 및 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

축방향력이 압축일 경우 ( $P < 0$ )

$$S_{ii} = S_{jj} = \frac{\pi\sqrt{\rho} \sin(\pi\sqrt{\rho}) - \pi^2 \rho \cos(\pi\sqrt{\rho})}{2 - 2\cos(\pi\sqrt{\rho}) - \pi\sqrt{\rho} \sin(\pi\sqrt{\rho})} \quad (2a)$$

$$S_{ij} = S_{ji} = \frac{\pi^2 \rho - \pi\sqrt{\rho} \sin(\pi\sqrt{\rho})}{2 - 2\cos(\pi\sqrt{\rho}) - \pi\sqrt{\rho} \sin(\pi\sqrt{\rho})} \quad (2b)$$

축방향력이 인장일 경우 ( $P > 0$ )

$$S_{ii} = S_{jj} = \frac{\pi^2 \rho \cosh(\pi\sqrt{\rho}) - \pi\sqrt{\rho} \sinh(\pi\sqrt{\rho})}{2 - 2\cosh(\pi\sqrt{\rho}) + \pi\sqrt{\rho} \sinh(\pi\sqrt{\rho})} \quad (3a)$$

$$S_{ij} = S_{ji} = \frac{\pi\sqrt{\rho} \sinh(\pi\sqrt{\rho}) - \pi^2 \rho}{2 - 2\cosh(\pi\sqrt{\rho}) + \pi\sqrt{\rho} \sinh(\pi\sqrt{\rho})} \quad (3b)$$

식(2)와 식(3)에서  $\rho = \frac{P}{P_c} = \frac{P}{\pi^2 EI/L^2}$  이다.

3차원 보-기둥 부재는 단면의 각 주축(Y축 및 Z축)에 대하여 휨모멘트-회전각이 서로 독립적이므로 안정함수를 각 굽힘면(Plane of Bending)에 대하여 2차원 보-기둥 부재에 대한 안정함수를 그대로 사용할 수 있다. Y축에 대한 안정함수를  $S_1, S_2$ 로 나타내고, Z축에 대한 안정함수를  $S_3, S_4$ 로 나타내면 3차원 보-기둥 부재의 힘-변위 관계는 식(4)와 같다.(Kim 등, 2001; Kim 등, 2003)

$$\begin{bmatrix} P \\ M_{yA} \\ M_{yB} \\ M_{zA} \\ M_{zB} \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_1 \frac{EI_y}{L} & S_2 \frac{EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 \frac{EI_y}{L} & S_1 \frac{EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_3 \frac{EI_z}{L} & S_4 \frac{EI_z}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_4 \frac{EI_z}{L} & S_3 \frac{EI_z}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \theta_{yA} \\ \theta_{yB} \\ \theta_{zA} \\ \theta_{zB} \\ \phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서,  $P$ ,  $M_{yA}$ ,  $M_{yB}$ ,  $M_{zA}$ ,  $M_{zB}$  및  $T$ 는 축력,  $y$  와  $z$ 축에 대한 단모멘트 및 비틀림모멘트를 각각 나타낸다.  $\delta$ ,  $\theta_{yA}$ ,  $\theta_{yB}$ ,  $\theta_{zA}$ ,  $\theta_{zB}$  및  $\phi$ 는 축변형, 절점의 회전각 및 비틀림각이다.  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ 와  $S_4$ 는 각각의  $y$ 와  $z$ 축에 대한 안정 함수로서 식 (5a) ~ 식 (5d) 와 같다.

$$S_1 = \begin{cases} \frac{\pi\sqrt{\rho_y}\sin(\pi\sqrt{\rho_y}) - \pi^2\rho_y\cos(\pi\sqrt{\rho_y})}{2 - 2\cos(\pi\sqrt{\rho_y}) - \pi\sqrt{\rho_y}\sin(\pi\sqrt{\rho_y})} : P < 0 \\ \frac{\pi^2\rho_y\cosh(\pi\sqrt{\rho_y}) - \pi\sqrt{\rho_y}\sinh(\pi\sqrt{\rho_y})}{2 - 2\cosh(\pi\sqrt{\rho_y}) + \pi\sqrt{\rho_y}\sinh(\pi\sqrt{\rho_y})} : P > 0 \end{cases} \quad (5a)$$

$$S_2 = \begin{cases} \frac{\pi^2\rho_y - \pi\sqrt{\rho_y}\sin(\pi\sqrt{\rho_y})}{2 - 2\cos(\pi\sqrt{\rho_y}) - \pi\sqrt{\rho_y}\sin(\pi\sqrt{\rho_y})} : P < 0 \\ \frac{\pi\sqrt{\rho_y}\sinh(\pi\sqrt{\rho_y}) - \pi^2\rho_y}{2 - 2\cosh(\pi\sqrt{\rho_y}) + \pi\sqrt{\rho_y}\sinh(\pi\sqrt{\rho_y})} : P > 0 \end{cases} \quad (5b)$$

$$S_3 = \begin{cases} \frac{\pi\sqrt{\rho_z}\sin(\pi\sqrt{\rho_z}) - \pi^2\rho_z\cos(\pi\sqrt{\rho_z})}{2 - 2\cos(\pi\sqrt{\rho_z}) - \pi\sqrt{\rho_z}\sin(\pi\sqrt{\rho_z})} : P < 0 \\ \frac{\pi^2\rho_z\cosh(\pi\sqrt{\rho_z}) - \pi\sqrt{\rho_z}\sinh(\pi\sqrt{\rho_z})}{2 - 2\cosh(\pi\sqrt{\rho_z}) + \pi\sqrt{\rho_z}\sinh(\pi\sqrt{\rho_z})} : P > 0 \end{cases} \quad (5c)$$

$$S_4 = \begin{cases} \frac{\pi^2\rho_z - \pi\sqrt{\rho_z}\sin(\pi\sqrt{\rho_z})}{2 - 2\cos(\pi\sqrt{\rho_z}) - \pi\sqrt{\rho_z}\sin(\pi\sqrt{\rho_z})} : P < 0 \\ \frac{\pi\sqrt{\rho_z}\sinh(\pi\sqrt{\rho_z}) - \pi^2\rho_z}{2 - 2\cosh(\pi\sqrt{\rho_z}) + \pi\sqrt{\rho_z}\sinh(\pi\sqrt{\rho_z})} : P > 0 \end{cases} \quad (5d)$$

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

식 (5)는 축력이 0일 때 수치해석적으로 부정이 발생한다. 이러한 문제를 피하기 위해서 Chen 과 Lui(1992)는 멱급수

(Power-Series)를 사용하여 식 (6)을 제안하였다. 식 (6)은 부재의 축력이  $-2.0 \leq \rho \leq 2.0$  범위의 값을 가질 때 매우 정확한 값을 나타낸다.

$$S_1 = 4 + \frac{2\pi^2\rho_y}{15} - \frac{(0.01\rho_y + 0.543)\rho_y^2}{4 + \rho_y} + \frac{(0.004\rho_y + 0.285)\rho_y^2}{8.143 + \rho_y} \quad (6a)$$

$$S_2 = 2 - \frac{2\pi^2\rho_y}{30} + \frac{(0.01\rho_y + 0.543)\rho_y^2}{4 + \rho_y} - \frac{(0.004\rho_y + 0.285)\rho_y^2}{8.143 + \rho_y} \quad (6b)$$

$$S_3 = 4 + \frac{2\pi^2\rho_z}{15} - \frac{(0.01\rho_z + 0.543)\rho_z^2}{4 + \rho_z} + \frac{(0.004\rho_z + 0.285)\rho_z^2}{8.143 + \rho_z} \quad (6c)$$

$$S_4 = 2 - \frac{2\pi^2\rho_z}{30} + \frac{(0.01\rho_z + 0.543)\rho_z^2}{4 + \rho_z} - \frac{(0.004\rho_z + 0.285)\rho_z^2}{8.143 + \rho_z} \quad (6d)$$

식 (6)은 인장과 압축을 받는 부재에 대하여 구분 없이 사용할 수 있다. 그러나  $\rho$ 의 범위가  $-2.0 \leq \rho \leq 2.0$ 을 벗어날 경우에는 식 (6)의 오차가 커져서 식 (5)를 사용해야 한다. 안정함수는 개별 뼈대구조 부재에 대하여 하나의 부재를 하나의 요소로 사용할 수 있게 해주며, 요소의 강성도와 단부력을 정확하게 산정하는 장점을 갖고 있다. 3차원 기둥과 3차원 강뼈대 구조물을 대상으로 실용적인 비선형 탄성해석을 검증한 바 있다.(김창성 등, 2002)

### 3. 최적설계

#### 3.1 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)

유전자 알고리즘(GA)은 Michigan 대학교의 John Holland에 의해 소개된 생물 진화와 유전법칙을 적용시킨 최적화 기법이다. 유전자 알고리즘은 이진수의 개체들로 구성된 집단을 가지고, 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)라는 세 가지 연산을 수행함으로써 최적화하는 알고리즘이다. 유전자 알고리즘의 처리과정은 그림 2와 같다.

유전자 알고리즘은 먼저 초기집단을 형성한다. 모든 집단은 염색체수, 교배율, 돌연변이율, 전체세대수, 개체수, 그리고 집단수에 의해 결정된다. 다음으로, 개체의 적합도를 평가하여

개체를 선택하고, 선택된 개체를 교배와 돌연변이 시켜서 종료 조건인 전체세대수가 형성될 때까지 반복한다. 염색체수(8)는 '0'과 '1'의 조합이 8개임을 나타낸다. 즉, 그림 2의 초기집단에서 '1011000100011010'은 2개의 개체(10110001과 00011010)를 말한다. 10110001과 00011010은 십진수로 177과 26이며, 선택된 각 개체의 십진수 값에 '1'이 더해져서 178과 27이 된다. 이것은 database에 저장된 2의 8승 (=256)개의 단면중 178번과 27번 단면이다. 또한, 각 세대마다 2개(개체수)의 개체를 가지는 3개(집단수)의 집단이 형성되고, 형성된 집단 중에서 적합도가 좋은 집단의 개체 2개가 선택된다. 선택, 교배, 돌연변이를 거쳐서 적합도가 좋은 2개의 개체씩 10세대(전체세대수)가 형성된다. 교배율, 돌연변이율 및 전체세대수는 설계할 구조물의 성격에 맞게 설계자가 정한다. 구조물 최적화에서, 개체수는 최적화 할 구조물에 사용되는 단면의 수이며, 설계자가 정한 전체세대 내에서 가장 최적의 개체가 선택된다.

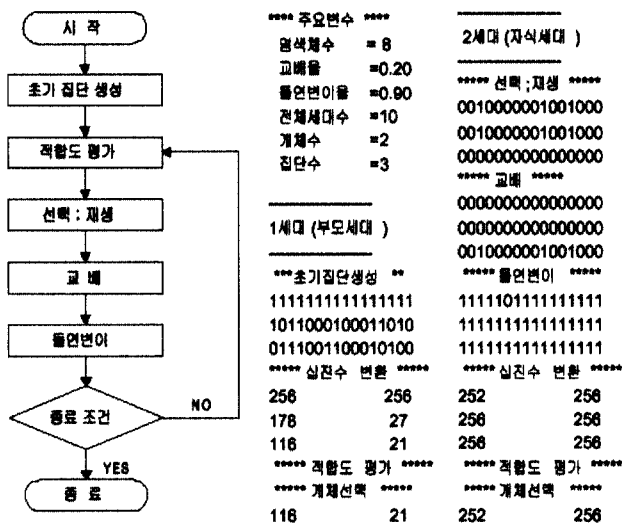


그림 2. 유전자 알고리즘의 처리과정

본 연구에서 사용한 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계 절차는 그림 3과 같다. 유전자 알고리즘은 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.

우선, 유전자 알고리즘을 이용하여 1세대 설계변수를 선정한다. 1세대 설계변수에 의한 구조물의 총중량을 검사하고, 사용성과 하중저항능력을 검사한다. 각각의 부재에 대한 상관 계수 값  $G(1)$ (3.4절에 표현되는 식 (8a), 식 (8b))이 1.0 이하 일 때 하중저항능력을 만족한다. 만약 1세대가 사용성과 하중저항능력을 만족하지 못한다면, 유전자 알고리즘에 의한 2세대를 새로운 설계변수로 선택한다. 2세대 설계변수가 구조물의 사용성과 하중저항능력을 만족한다면, 2세대 설계변수에 의한 구조물 총중량이 목적함수 검사의 기준이 된다.

다음으로, 3세대를 새로운 설계변수로 선택하고, 3세대에 의한 구조물의 총중량, 사용성, 그리고 하중저항능력을 검사하여 하나라도 만족하지 않는다면 4세대를 새로운 설계변수로 선택한다. 만약 3세대 설계변수에 의한 구조물의 총중량이 2세대 설계변수에 의한 구조물의 총중량보다 작고, 사용성과 하중저항능력을 모두 만족한다면, 3세대 설계변수에 의한 구조물의 총중량이 목적함수 검사의 기준이 된다. 이러한 반복 과정은 설계자가 결정한 유전자 알고리즘의 매개변수인 최대세대수까지 반복한다. 따라서, 최대세대수 내에서 사용성과 하중저항능력을 만족하는 최소 중량을 갖는 구조물이 탄생되어 최적설계가 종료된다.

### 3.2 단면점증법(Section Increment Method)

유전자 알고리즘을 이용한 최적설계 결과와 비교하기 위하여 사용한 단면점증법 알고리즘은 그림 4와 같다. 초기단면은 가장 가벼운 단면으로 가정하였다. 설계하중에 의한 비선형 탄성 해석에 의한 해석결과가 제약조건식을 만족하지 않게 되면, 단면을 단계별로 하나씩 증가시킴으로서 최적해를 구한다. 주요 매개변수와 선택, 교배 및 돌연변이 연산에 의하여 각 세대별로 단면이 선택되어지는 유전자 알고리즘과는 달리 단면점증법은 다음의 두 가지 규칙에 의하여 단면을 단계별로 증가시킨다.

첫째, 중량이 같은 여러개의 단면이 있다면 단면 높이가 낮은 것부터 선택한다. 예를들어, AISC 규격의 WF형강 단면 291개 중에서 중량이 30lb인 단면에는 W10X30, W12X30 및 W14X30이 있다. 만약 단면이 W10X30인 부재가 제약조건식을 만족하지 않는다면, 새로운 부재 단면은 W12X30이 선택된다. W12X30도 제약조건식을 만족하지 않는다면 W14X30이 새로운 단면으로 선택된다. 2차원 구조물과는 달리 3차원 구조물에서는 약축(weak-axis)방향의 강성과 강축(strong-axis)방향의 강성이 모두 고려되어야하므로, 강성차이가 작은 단면 즉 부재의 단면 높이가 작은 것 부터 선택하도록 하였다.

둘째, 같은 중량의 단면이 없다면 조금 더 무거운 단면을 선택한다. AISC 규격의 WF형강 단면 291개 중에서 중량이

301b보다 조금 큰 311b인 단면은 W8X31과 W16X31이다. 첫번째 규칙에 의해 선택된 W14X30도 제약조건을 만족하지 않았다면, 두번째 규칙에 의해 W8X31이 새로운 단면으로 선택된다. W8X31이 제약조건식을 만족하지 않는다면, 다시 첫번째 규칙에 의해 W16X31이 선택된다.

단면점증법의 절차는 우선, 구조물의 사용성을 나타내는 처짐과 층간 수평변위에 대한 평가를 위하여 사용하중하에서 해석을 수행한다. 만약 보가 처짐에 대한 제약조건을 만족하지 않게 되면 지간길이에 대해 가장 큰 처짐을 가진 보의 부재 크기를 한 단계 증가시키게 된다. 또한 층간 수평변위를 만족시키지 않게 되면 마찬가지로 비지지장에 대해 가장 큰 수평변위를 가진 기둥의 부재 크기를 한 단계 증가시키게 된다.

다음으로, 설계하중을 받는 구조물의 하중저항능력을 평가하기 위하여 비선형 탄성해석을 수행한다. 상관 계수 값  $G(1)$ 이 1.0 이상인 부재들 중 가장 큰 값을 가지는 부재에 대하여 데이터 파일에서 단면을 하나씩 증가시켜간다. 이런 반복과정은 구조물의 모든 부재의 상관 계수 값  $G(1)$ 이 1.0 이하 일 때까지 계속된다.

### 3.3 목적함수

목적함수는 강구조물의 중량의 함수로서 식 (7)과 같다.

$$OBJ = \rho \left[ \sum_{i=1}^{NB} (V_b)_i + \sum_{j=1}^{NC} (V_c)_j \right] \quad (7)$$

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.

### 3.4 제약조건식

#### 3.4.1 하중저항능력에 대한 제약조건식

보-기둥 부재에 대한 하중저항능력은 AISC-LRFD 상관 방정식을 사용하였으며 제약조건식은 다음과 같다.

$$\frac{P}{\phi_c P_n} \geq 0.2 \text{ 인 경우}$$

$$G(1) = \frac{P}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \frac{M_y}{\phi_b M_{ny}} + \frac{8}{9} \frac{M_z}{\phi_b M_{nz}} \leq 1.0 \quad (8a)$$

$$\frac{P}{\phi_c P_n} < 0.2 \text{ 인 경우}$$

$$G(1) = \frac{P}{2\phi_c P_n} + \frac{M_y}{\phi_b M_{ny}} + \frac{M_z}{\phi_b M_{nz}} \leq 1.0 \quad (8b)$$

여기서,  $\phi_c$  및  $\phi_b$  는 압축 및 휨에 대한 강도감소계수이다. AISC-LRFD에서는 저항계수로 부재의 압축강도, 인장강도 및 휨강도에 대하여 각각 0.85, 0.9 및 0.9를 사용하고 있다. AASHTO-LRFD(1998)에서는 저항계수로 부재의 압축강도, 인장강도 및 휨강도에 대하여 각각 0.90, 0.95 및 1.0을 사용하고 있다.  $P$ ,  $M_y$  및  $M_z$  는 각각 축력,  $y$  및  $z$ 축에 대한 휨모멘트이다.  $M_{ny}$  및  $M_{nz}$ 는  $y$  및  $z$ 축에 대한 단면의 공칭 휨강도이다. 본 연구에서 사용하는 단면은 조밀단면으로 가정하였기 때문에 단면의 소성 휨모멘트를 공칭 휨강도로 사용한다.  $P_n$ 은 공칭 압축강도로서 다음식과 같다.

$$\lambda_c \leq 1.5 \text{ 인 경우}$$

$$P_n = 0.658 \lambda_c^2 F_y A \quad (9a)$$

$$\lambda_c > 1.5 \text{ 인 경우}$$

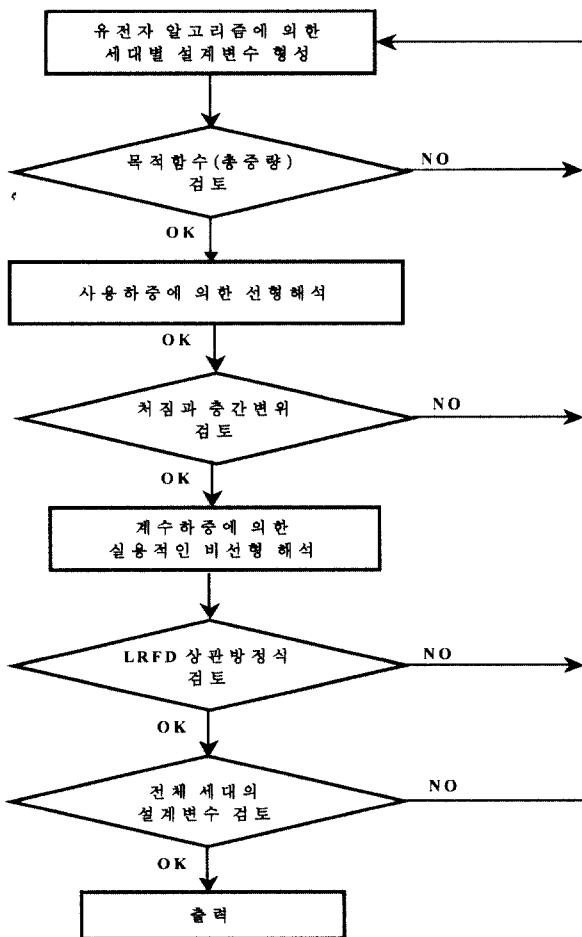


그림 3. 유전자 알고리즘 및 비선형 탄성해석을 이용한 최적설계

$$P_n = \frac{0.877F_y A}{\lambda_c^2} \quad (9b)$$

여기서,  $\lambda_c$ 는 세장비로서 식(10)과 같다.

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi r} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (10)$$

또한,  $F_y$  및  $E$ 는 항복강도 및 탄성계수이다.  $A$  및  $L$ 은 부재의 단면적 및 길이이다.  $r$ 은 좌굴면에 대한 회전반경이다.  $K$ 는 부재의 유효길이계수로서 Dumonteil(1992)가 제안한 식은 다음과 같다.

횡방향 변위가 방지된 경우

$$K = \frac{3G_A G_B + 1.4(G_A + G_B) + 0.64}{3G_A G_B + 2.0(G_A + G_B) + 1.28} \quad (11a)$$

횡방향 변위가 있는 경우

$$K = \sqrt{\frac{1.6G_A G_B + 4.0(G_A + G_B) + 7.5}{G_A + G_B + 7.5}} \quad (11b)$$

여기서,  $G_A$  및  $G_B$ 는 기둥 단부 A 및 B에서 보-기둥에 대한 강성비를 나타낸다.

### 3.4.2 사용성에 대한 제약조건식

ASCE Ad Hoc 위원회(1992)에 의하면, 뼈대 구조에 대하여 일반적인 층간 수평변위의 허용치는 층 높이의 1/500에서 1/200을 제안하고 있으며 보통은 H/300이다. Ad Hoc 위원회(1986)와 Ellingwood(1989)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.

$$G(2) = \frac{L_i}{360} - (\Delta_{bv})_i \geq 0 \quad (12)$$

$$G(3) = \frac{H_j}{300} - (\Delta_{cv})_j \geq 0 \quad (13)$$

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 처

짐을 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.

### 3.4.3 연성도에 대한 제약조건식

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

$$G(4) = \frac{300r_{yi}}{\sqrt{F_y}} - L_{bi} \geq 0 \quad (14)$$

$$G(5) = \frac{65}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{b_f}{2t_f}\right)_i \geq 0 \quad (15)$$

$$G(6) = \frac{640}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{h_c}{t_w}\right)_i \geq 0 \quad (16)$$

여기서 G(4)는 횡비틀림 좌굴을 방지하기 위한 비지지장에 대한 제약조건식이다. G(5) 및 G(6)는 국부좌굴을 방지하기 위한 플랜지 및 웨브의 폭두께비에 대한 제약조건식이다.  $r_{yi}$  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-LRFD 규정을 따르며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G(4) = \left[0.124 - 0.0759\left(\frac{M_i}{M_p}\right)\right] \left[\frac{r_y E}{F_y}\right] \geq L_b \quad (17)$$

$$G(5) = 0.382\sqrt{\frac{E}{F_y}} \geq \frac{b_f}{2t_f} \quad (18)$$

표 1. 2차원 강뼈대 구조물의 비선형 탄성 최적설계 결과

설계 변수	사용성(변위)을 고려한 경우				사용성(변위)을 고려하지 않은 경우			
	유전자 알고리즘에 의한 최적설계		단면점증법에 의한 최적설계		유전자 알고리즘에 의한 최적설계		단면점증법에 의한 최적설계	
	부재 크기	G(1)	부재 크기	G(1)	부재 크기	G(1)	부재 크기	G(1)
1	W24X55	0.997	W24X62	0.816	W24X55	0.997	W24X62	0.816
2	W18X40	0.871	W16X40	0.929	W18X40	0.871	W16X40	0.929
전체 중량(lb)	2,460		2,665		2,460		2,665	

$$G(6) = 3.76\sqrt{\frac{E}{F_y}} \geq \frac{2h_c}{t_w} \quad (19)$$

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.  $M_f$ 은 비지지장 길이의 끝단 모멘트 중 작은 값이며  $M_b$ 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.  $h_c$ 는 보의 깊이,  $E$ 는 탄성계수이며  $F_y$ 는 항복강도를 나타낸다.

#### 4. 설계 예제

##### 4.1 2차원 강뼈대 구조물

본 설계 예제는 2차원 강뼈대 구조물로서 그림 4에 도시하였다. 부재의 크기를 나타내는 설계변수는 그림 5에 나타내었다. 각 부재의 항복강도는 250MPa (36ksi)이고, 탄성계수는 200,000MPa (29,000ksi)이다. 구조물에 작용하는 설계하중은 사하중 54.75kN/m(3.75kips/ft), 활하중 36.5 kN/m (2.5kips/ft), 및 풍하중 83.3kN (18.72kips)를 사용하였다. 사하중, 활하중 및 풍하중에 대한 하중계수는 각각 1.2, 0.5 및 1.3을 사용하였다. 하중조합을 고려한 설계하중은 등가집중하중으로 환산하여 재하시켰으며 그림 5에 도시하였다.

유전자 알고리즘의 매개변수인 염색체수는 데이터 베이스에 저장된 단면의 수인 2의 8승(=256)개로 정해진 값이다. 개체수는 본 예제의 설계변수가 2개이므로 2이다. 교배율은 0.1에서 1.0까지, 돌연변이율은 0.1에서 1.0까지, 그리고 집단수는 5에서 50까지 변화시켜본 결과 교배율은 0.2, 돌연변이율은 0.9, 그리고 집단수는 10일 때 5000세대 정도에서 수렴도가 좋았다. 따라서, 유전자 알고리즘의 매개변수 값으로 염색체수는 8, 교배율은 0.20, 돌연변이율은 0.90, 전체세대수는

5000, 설계변수인 개체수는 2, 그리고 집단수는 10을 사용하였다. 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계에서는 5000세대의 설계변수 중에서 제약조건을 만족하고, 구조물이 최소 총중량을 갖게하는 설계변수가 선택된다. 단면점증법에서는 가장 가벼운 단면인 W4X13에서 시작해서 구조물이 제약조건식을 모두 만족할 때까지 두 가지 규칙에 의해 단면이 한단계씩 증가된다.

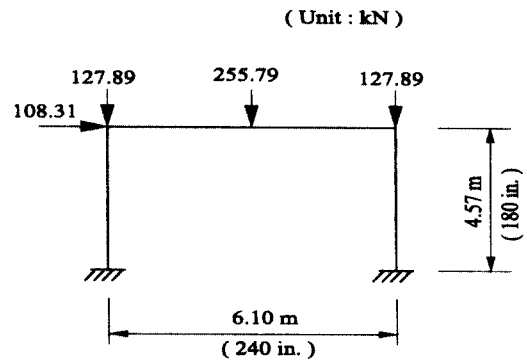


그림 4. 2차원 강뼈대 구조물

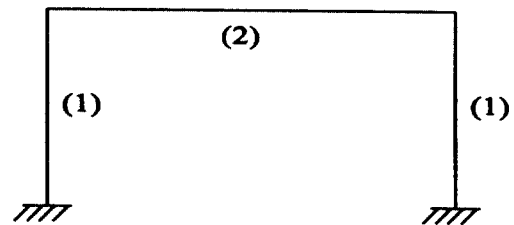


그림 5. 2차원 강뼈대 구조물의 설계변수

유전자 알고리즘에 의한 최적설계 결과와 단면점증법에 의한 최적설계 결과는 사용성(변위)을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 구분하여 표 1에 정리하였다. 표 1에서 G(1)은 하중저항능력에 대한 제약조건식이며, 각 경우의 G(1)값이 1.0 이하이므로 선택된 설계변수는 적당하다는 것을 알 수 있다. 또한, 유전자 알고리즘에 의하여 선택된 설계변수는, 기동 부재는 단면점증법보다 가벼운 단면이 선택되었고, 보 부재는 단면점증법보다 단면 중량은 같지만 높이가 더 높은 부재가

선택되었다. 구조물 총중량은 약 7.7% 감소하였다. 표 1에서 사용성(변위)을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 구조물 총중량이 같으므로, 본 설계예제는 부재 강도 조건에 의하여 부재 치수가 결정된 것을 알 수 있다. 사용하중에 의한 거더의 최대처짐은 유전자 알고리즘 및 단면점증법에서 각각 L/1519 과 L/1404로 계산되어, 처짐 허용치인 L/360를 만족함을 알 수 있다. 풍하중에 의한 최대 수평변위는 유전자 알고리즘 및 단면점증법에서 각각 H/756와 H/785로 계산되어, 허용 수평변위인 H/300를 만족함을 알 수 있다.

### 4.2 3차원 강뼈대 구조물

본 설계 예제는 3차원 강뼈대 구조물로서 그림 6에 도시하였다. 부재의 크기를 나타내는 설계변수는 그림 7에 나타내었다. 각 부재의 항복강도는 250MPa (36ksi)이고, 탄성계수는 200,000 MPa(29,000 ksi)이다. 구조물에 작용하는 설계하중은 다음과 같다. (1) 지붕하중 : 사하중 10.8kN/m<sup>2</sup> (225psf), 활하중 7.2kN/m<sup>2</sup>(150psf), (2) 바닥하중 : 사하중 13.2kN/m<sup>2</sup>(275 psf), 활하중 12.0kN/m<sup>2</sup>(250 psf), (3) 풍하중 7.2 kN/m<sup>2</sup>(150psf)를 사용하였다. 하중조합은 1.2DL+0.5LL+1.3WL를 사용하였다. 하중조합을 고려한 설계하중은 등가집중하중으로 환산하여 재하시켰으며 그림 6에 도시하였다.

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 0.1에서 1.0까지, 그리고 집단수는 5에서 50까지 변화시켜본 결과 교배율은 0.2, 돌연변이율은 0.9, 그리고 집단수는 10일 때 20000세대 정도에서 수렴도가 좋았다. 따라서, 유전자 알고리즘의 매개변수 값으로 염색체수는 8, 교배율은 0.20, 돌연변이율은 0.90, 전체세대수는 20000, 설계변수인 개체수는 10, 그리고 집단수는 10을 사용하였다. 따라서, 유전자 알고리즘을 이용한 최적 설계에서는 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.

사용성(변위)을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 유전자 알고리즘에 의한 최적설계 결과와 단면점증법에 의한 최적설계 결과를 표 2에 정리하였다. 표 2에서 G(1)은 하중저항 능력에 대한 제약조건식이며, 각 경우의 G(1)값이 1.0 이하이므로 선택된 설계변수는 적당하다는 것을 알 수 있다. 유전자 알고리즘에 의한 구조물의 전체중량이 단면점증법에 의한 것보다 약 14.5% 감소하였다.

표 2. 3차원 강뼈대 구조물의 비선형 탄성 최적설계 결과

설계 변수	사용성(변위)을 고려하지 않은 경우			
	유전자 알고리즘에 의한 최적설계		단면점증법에 의한 최적설계	
	부재 크기	G(1)	부재 크기	G(1)
1	W12X96	0.816	W30X116	0.747
2	W24X103	0.929	W40X183	0.763
3	W14X53	0.960	W24X76	0.845
4	W24X76	0.931	W24X68	0.878
5	W14X53	0.731	W16X40	0.984
6	W8X15	0.880	W8X15	0.871
7	W12X19	0.965	W12X19	0.960
8	W12X26	0.995	W12X26	0.905
9	W8X13	0.814	W8X13	0.797
10	W12X16	0.915	W12X16	0.920
전체 중량(lb)	22.055		25.794	

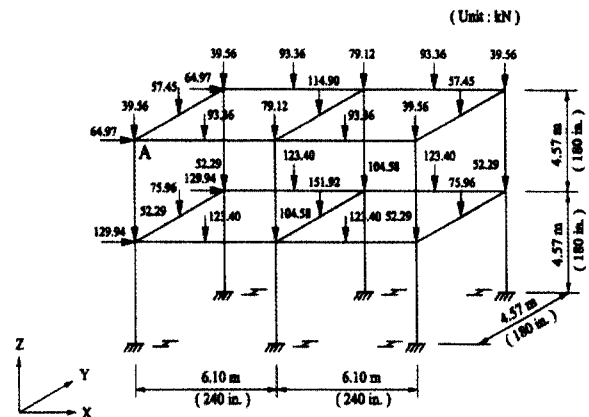


그림 6. 3차원 강뼈대 구조물

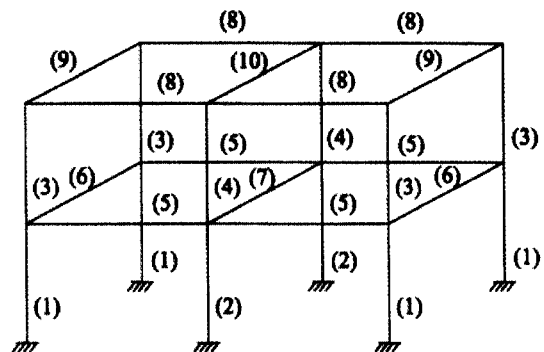


그림 7. 3차원 강뼈대 구조물의 설계변수



### 4.3 3차원 강아치교

본 설계 예제는 교폭 7.32m (24 ft), 지간 61.0m (200 ft)인 3차원 강아치교이다(그림 8). 부재 크기를 나타내는 설계변수는 아치리브, 타이, 평형재, 그리고 브레이싱에서 각각 1, 2, 3과 4이다. 각 부재의 탄성계수는 200,000MPa (29,000 ksi)이고 항복강도는 250MPa (36ksi)이다. 사용한 하중은 AASHTO-LRFD에서 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, 충격계수 0.30을 사용하였으며, 하중계수를 고려한 설계하중을 그림 9에 도시하였다.

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

표 3. 3차원 강아치교의 비선형 탄성 최적설계 결과

설계 변수	유전자 알고리즘에 의한 최적설계	
	부재 크기	G(1)
1	TS16X12X1/2	0.774
2	W33X130	0.909
3	W18X76	0.800
4	W10X45	0.927
전체중량(lb)	207,173	

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 0.1에서 1.0까지, 그리고 집단수는 5에서 50까지 변화시켜본 결과 교배율은 0.2, 돌연변이율은 0.9, 그리고 집단수는 10일 때 수렴도가 좋았다. 따라서, 유전자 알고리즘의 매개변수 값으로 염색체수는 8, 교배율은 0.20, 돌연변이율은 0.90, 전체세대수는 2000, 설계변수인 개체수는 4, 그리고 집단수는 10을 사용하였다. 본 설계예제는 구조물의 부재 수가 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 알고리즘을 이용한 비선형 탄성 최적설계 결과는 표

3과 같다. 표 3에서 G(1)은 하중저항능력에 대한 제약조건식이며, 각 설계변수의 G(1)값이 1.0 이하이므로 선택된 설계변수는 적당하다는 것을 알 수 있다. 사용이동하중에 대한 최대 변위는 27mm(1.06in)로서 L/2254에 해당하므로 허용변위기준인 L/800을 만족한다. 본 설계예제는 사용성 기준을 충분히 만족하므로 부재 강도에 의하여 부재 치수가 결정된 것을 알 수 있다.

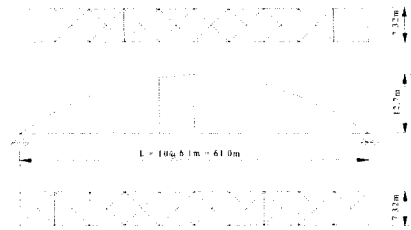


그림 8. 3차원 강아치교



그림 9. 설계하중

## 5. 결 론

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용한 비선형 탄성 최적설계 방법을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제안한 해석 방법은 기하학적 비선형 효과 및 전단 변형 영향을 고려할 수 있으며, 종래 설계의 단점 즉 선형 탄성 해석 후 비선형 효과를 고려하기 위하여  $B_1, B_2$  계수를 사용하는 불합리성을 극복하였다. 제안한 해석 방법은 종래 설계의 단점 즉 개별 부재와 구조시스템의 적합조건을 고려하지 못하는 문제점을 극복하였다.
- (2) 비선형 탄성해석에 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)과 단면증명법(Section Increment Method)를 도입하여 최적설계를 수행하였다. 목적함수로는 구조물의 총중량을 사용하였으며, 제약조건식으로는 하중저항능력, 사용성 및 연성도를 사용하여 최적설계를 수행하였다.
- (3) 2차원 강뼈대 구조물의 예제설계 결과 유전자 알고리즘에 의해 최적설계된 구조물의 총중량이 단면증명법에 의한 총중량보다 7.7% 감소하였다. 3차원 강뼈대 구조물의 예제설계 결과 유전자 알고리즘에 의해 최적설계된 구조물의 총중량이 단면증명법에 의한 총중량보다

약 14.5% 감소하였다. 유전자 알고리즘은 설계변수의 전역적 탐색이 가능한데 반하여, 단면점증법은 가벼운 단면에서 시작하여 두 가지 규칙에 의해 단면을 증가시키므로 설계변수의 전역적 탐색이 불가능하다. 따라서 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계 결과가 단면점증법에 의한 최적설계 결과보다 우수한 결과를 보였다.

- (4) 제안한 최적설계 방법은 실용적인 비선형 탄성해석에 유전자 알고리즘을 도입한 최적설계방법으로 설계자의 노력과 시간을 대폭 절감할 수 있으며, 더욱 경제적인 최적설계가 가능하다.

### 감사의 글

본 연구는 2002년도 한국과학기술부의 국가지정연구실 지원(과제번호 : M10204000143-02J0000-12910)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

김창성, 마상수, 최세휴, 김승억 (2002) "비선형 해석을 이용하여 강뼈대구조물의 자동화설계", 한국강구조학회 논문집 제 14권 2호, 339-348

AASHTO, "AASHTO LRFD Bridge Design Specification", AASHTO.1. Clarke, M. J., Bridge, R. Q., Hancock, G. J. and Trahair, N. S. (1992), Benchmarking and verification of second-order elastic and inelastic frame analysis programs, in SSRC TG 29 Workshop and Nomograph on Plastic Hinge Based Methods for Advanced Analysis and Design of Steel Frames, White, D. W. and Chen, W. F., Eds., SSRC, Lehigh University, Bethlehem, PA. 1998

AISC, *Load and resistance factor design specification*, AISC, 2nd ed., Chicago, 1994.

Ad Hoc Committee on Serviceability, Structural serviceability: a critical appraisal and research needs, ASCE J. Struct. Eng., 1986, 112(12), pp.2646-2664.16. Dumonteil, P., Simple equations for effective length factors, *Engineering Journal*, AISC, 29(3), Third Quarter, 1992, pp. 111-115.

Chen, W.F. and Kim, S.E, *LRFD steel design using advanced analysis*, CRC Press, Boca Raton,

Florida, 1997

Chen, W.F. and Lui, E.M., *Structural stability - Theory and implementation*, Elsevier Science Publication Co., New York, 1986.

Chen, W.F. and Lui, E.M., *Stability design of steel frames*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1992.

Dumonteil, P., Simple equations for effective length factors, *Engineering Journal*, AISC, 29(3), Third Quarter, 1992, pp.111-115.

Ellingwood, B., Serviceability guidelines for steel structures, *AISC Engineering Journal*, 26, 1st Quarter, 1989, pp.1-8.

Holland, J. H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, Michigan, The University of Michigan Press, 1975.

Kim, S.E. and Chen, W.F., Practical advanced analysis for braced steel frame design, *ASCE J. Struct. Eng.*, 1996a, 122(11), pp.1266-1274.

Kim, S.E. and Chen, W.F., Practical advanced analysis for unbraced steel frame design, *ASCE J. Struct. Eng.*, ASCE, 1996b, 122(11), pp. 1259-1265.

Kim, S.E. and Choi, S.H., Practical advanced analysis for semi-rigid space frame, *Solids and Structures*, 2001, 38(2001), pp.9111-9131.

Kim, S.E., Lee, J.H., Park, J.S., 3-D second-order plastic-hinge analysis accounting for local buckling, *Engineering Structures*, 2003, 25(2003), pp. 81-90.

Lin, C.Y. and Hajela, P., Genetic algorithm in optimization problem with discrete and integer design variables, *Engng Optim*, 1992, 19, pp. 309-327.

May, S. A. and Balling, R.J., A filtered simulated annealing strategy for discrete optimization of 3D steel frameworks, *Struct Optim*, 1992, 4, pp. 142-148.

Pantelides C.P. and Tzan S.R., Optimal design of dynamically constrained structures, *Comput Struct*, 1997, 62, pp. 141-149.

Rajeev, S. and Krishnamorthy, C. S., Discrete optimization of structures using genetic algorithms, *ASCE, J. Struct Engng*, 1992, 118, pp. 1233-1250.

(접수일자 : 2002. 12. 27 / 심사일 2003. 1. 18 / 심사완료일 2003. 3. 24)