

## 초기인장력을 받은 그리드 구조물의 최적설계

### Optimum Design of Grid Structures with Pretension

김 대 환\*  
Kim, Dae-Hwan

이 재 홍\*\*  
Lee, Jae-Hong

#### 요 약

본 논문은 마이크로 유전 알고리즘을 이용하여 그리드 구조물의 최적화를 수행하고 초기인장력이 최적화에 미치는 영향을 분석하였다. 최적화시 여러 제약조건을 설정하여 구조물의 물량이 최소화 되도록 부재의 단면을 찾는 최적 설계를 수행하였다. 알고리즘의 검증용 위해 10-bar 트러스를 예제로 설정하여 이전 연구 결과와의 비교를 하였다. 이를 바탕으로 초기인장력이 적용된 트러스 구조물의 최적화가 가능한 다음과 같은 기법을 사용하여 그리드 형태인 72-bar 트러스의 최적화를 수행하였으며, 이전 연구 결과와 비교하여 이를 입증하였다. 최적화시 초기인장력 크기를 달리하여 트러스 구조물의 최적화를 수행하였으며, 물량이 최소화되는 최적화된 초기 인장력 값도 찾았다.

#### Abstract

In this study, micro genetic algorithm is used to find an optimum cross section of grid structures with pretension. Design optimization of trusses consists of arriving at optimum sizes of cross-section and prestressing force parameters, when weight of the truss is minimum, satisfying a set of specified constraints. The present approach is verified by ten-bar truss example showing good agreements with previous results. Features of the proposed method, which help in modeling and application to optimal design of pretensioned truss structures, are demonstrated by solving a problem of seventy two bar truss structures. The minimum weight design of seventy two bar truss is performed for various magnitudes of pretension and optimal prestressing forces are also found for various configurations of pretensioned truss structures.

**키워드 :** 그리드 구조물, 최적설계, 마이크로 유전 알고리즘

**Keywords :** Grid structures, Optimum Design, Micro-Genetic Algorithm

### 1. 서 론

예전부터 대공간구조물은 좀 더 넓은 공간을 얻기 위하여 점차 장스팬화 되고 이를 지지하기 위하여 여러 구조 시스템 및 형태 등이 개발되어왔다. 이러한 장스팬 구조물의 경우 좀 더 가벼우면서 많은 하중을 버티기 위한 형태로 발전되어왔고, 또한 장스팬 구조물의 안정성 및 경제성을 위해 부재 단면을 최적화시키기 위한 노력도 계속되어왔다. 이러한 최적화를 위해 컴퓨터 언어를 이용한 알고리즘들이 개발되어왔고, 개발된 최적화 알고리즘은 공학적인 많은 문제를 해결해왔다. 하지만 최적화를 위한 알고리즘은 복잡한 함수들이 서로 복합적으로

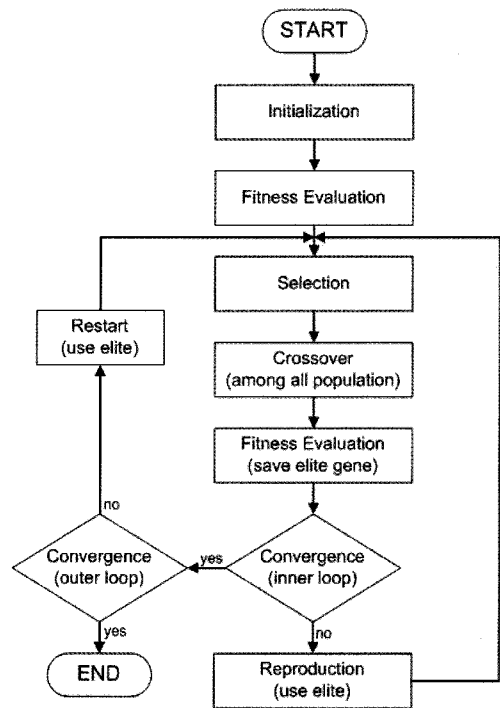
연결이 되어있기 때문에 공학적 최적화 문제들을 해결하는 것에 많은 어려움이 따라왔다. 최적화를 위한 알고리즘은 다양하게 존재하지만 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 트러스 구조물의 최적설계를 수행하였다. 이에 대한 근래의 연구 동향을 살펴보면 국외<sup>(1,2,3)</sup>와 국내<sup>(4,5,6,7)</sup> 등 유전자 알고리즘을 이용하여 최소중량최적화를 수행하고 있으며 많은 연구자들에 의해 선행 연구되어 있다. 그러나 아직까지 초기인장력을 도입하여 최적화를 실시한 연구들은 아직 미비한 실정이며, 이에 본 연구에서는 Krishnakumar<sup>(8)</sup>가 제안한 마이크로 유전 알고리즘(Micro Genetic Algorithm :  $\mu$ -GA)의 유전 연산자를 트러스 구조물의 최적설계에 적합하도록 수정하여 구조물의 최적설계 프로그램을 개발하였다. 이는 트러스 모델에는 복잡한 연산보다는 단순히 해를 탐색하여 대입하는 마이크로 유전 알고

\* 세종대학교 건축공학과 석사과정

\*\* 교신저자, 세종대학교 건축공학과 교수, 공학박사,  
Tel: 02-3408-3331 Fax: 02-3408-4331  
E-mail : jhlee@sejong.ac.kr

리즘이 적합하다고 판단하여 이를 적용하였다. 마이크로 유전 알고리즘은 김선명<sup>(9)</sup>과 김영빈<sup>(10)</sup>에 의해 냉간성형강 부재의 단면 최적설계와 I-형 복합재료 보의 최적설계의 연구에 사용된 바 있으며, 김연태<sup>(7)</sup>에 의해 초기인장력이 도입된 언더텐션 구조물의 최적화에 사용된 바 있다.

본 연구에서는 마이크로 유전 알고리즘을 이용하여 그리드 구조물의 설계변수와 초기인장력 값을 달리하여 최적화를 수행하였다. 본 연구에서 사용한 최적화 알고리즘을 검증하기 위해 10-bar 트러스를 이전 연구 결과와 비교하였다. 또한 72-bar 트러스를 통해 초기인장력이 적용된 모델에 대해 알고리즘을 검증하였다. 이를 바탕으로 그리드 구조물의 최적 설계 시 모델의 각 부재를 동일한 단면적으로 하여 설계변수를 1개로 둔 경우와 상부, 하부, 대각 부재로 그룹을 나누어 설계변수를 3개로 둔 경우로 나누어 최적화를 수행하였다.



〈그림 1〉 마이크로 유전 알고리즘의 순서도

## 2. 마이크로 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 생물학적 진화과정 등의 자연 현상을 모방한 것으로서 세대가 지남에 따라 좀 더 우월한 유전자를 찾아 취하고자 하는 것이다. 이러한 유전 알고리즘은 다른 최적화 알고리즘과는 다르게 수학적 지식이 크게 필요하지 않으면서 손쉽게 적용이 가능하다는 큰 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 탐색 유도 방법 중 하나인 무작위 탐색법(Random search method)<sup>(11)</sup>을 이용하였으며, 이는 확률에 기초해서 동작하지만 구조물의 최적화와 같이 매우 복잡한 함수에 적용 가능한 방법 중 하나이다. 본 알고리즘은 이와 같은 기법을 사용하며, 자연 진화의 형태와 같이 보다 우월한 유전자를 얻는 것을 목적으로 한다. 즉 유전알고리즘은 구조물의 최소의 물량을 찾도록 유도한다. 유전알고리즘은 많은 개체를 운용할수록 설계자가 원하는 최적 값을 안정적으로 구할 수 있다는 장점이 있지만 개체수만큼의 구조해석이 필요하므로 개체수의 증가로 인한 최적 값을 얻는 시간도 증가된다. 이를 보완하기 위해 Krishnakumar<sup>(6)</sup>는 적은 개체군을 운용하고 설계 변수가 적은 문제에 높은 효율성을 보

여주는 마이크로 유전알고리즘을 사용하였다.

마이크로 유전알고리즘은 일반적인 유전알고리즘에 비해 더욱 단순한 유전연산을 사용하므로 일반적인 유전알고리즘에서와 같은 까다로운 매개변수 설정을 피할 수 있다. 또한 마이크로 유전 알고리즘에서는 기존의 유전 알고리즘에서 중요한 연산을 담당하며 진화의 연료라고 불리던 돌연변이 연산을 배제하였다. 돌연변이 연산의 경우 돌연변이율 및 돌연변이를 일으키는 방법설정 등이 필요하므로 그에 대한 함수의 추가 및 계산량이 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 돌연변이 연산을 배제하였으며 대신 재시동 연산과 교배율을 1.0으로 하여 모든 개체가 교배연산을 수행하도록 하였다. 이로 인해 돌연변이 연산이 배제되었음에도 불구하고 다양한 탐색을 할 수 있도록 유도한다.

그림 1은 마이크로 유전 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 먼저 구조물의 기하학적 형상 및 물성치를 입력한 후 최적화를 수행할 설계변수 및 후보군의 범위 등을 설정하고, 설계변수에 적용이 될 후보군을 정렬 및 생성한다. 우선 초기 염색체 정보를 생성하고 유전 개념에 일치하도록 하기 위해 각 집단마다 염색체 정보를 0과 1로 구별되는 이진 스트링

으로 변환하여 정렬된 후보군의 정보를 입력한다. 이러한 각 집단의 유전자 정보를 구조물에 입력하여 트러스 구조물의 계산 프로그램을 이용하여 구조해석을 수행하고 최적화의 목적인 물량 및 제약 조건을 가지고 후보군의 적합도를 평가한다.

이후 초기에 입력된 값에서부터 해의 개선을 위하여 한세대를 이루는 내부루프를 과정을 거친다. 이 과정에 대한 식은 다음과 같이 정식화 하였다.

$$s_i(x) = \begin{cases} 0, & 0.0 \leq x < 0.5 \\ 1, & 0.5 \leq x < 1.0 \end{cases} \quad (1)$$

Minimize

$$f(x) = \left( \sum_{i=1}^n A_i \cdot l_i \right) \cdot \rho \quad (2)$$

$$\begin{aligned} F(X, M) &= f(X), & g_{allow}(X) &\geq g_i(X) \\ F(X, M) &= f(X) + \text{penalty}(X), & g_{allow}(X) &< g_i(X) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{penalty}(X) = r \left\{ \left( \frac{\sigma(i)}{\sigma_{all}} - 1 \right)^2 + \left( \frac{\delta(i)}{\delta_{all}} - 1 \right)^2 \right\} \quad (4)$$

여기서,  $s_i(x)$  : 이진화된 탐색체 정보

$f(x)$  : 구조물의 총 중량

$A_i$  : 각 부재의 단면적

$l_i$  : 각 부재의 길이

$\rho$  : 밀도

$g_{allow}(X)$  : 제약한 최대 허용 값

$g_i(X)$  : 제약 조건에 대한 해석 값

$\text{penalty}(X)$  : 벌칙 값

$\sigma(i)$  : 각 요소의 응력

$\sigma_{all}$  : 허용 응력

$\delta(j)$  : 각 절점의 처짐

$\delta_{all}$  : 허용 처짐

을 의미한다. 이때 개체는 넓고 다양한 탐색이 필요하며, 이를 위해 식 (1)과 같이 랜덤함수를 이용하여 0과 1사이에 나오는 무작위 값들을 이진화시켜 탐색체 정보를 무작위로 선출한다. 이러한 유전자 정보를 가지고 개체의 적합도를 평가한다. 이를 위해 유전자 정보를 이용하여 각 집단마다 구조물에 정보를 입력한 후 트러스 구조물의 계산 프로그램을 이용하여 구조해석을 수행한다. 이때 유전자 이론에서 일반적인 유전자와 우월한 유전자를 구별하는 목적함수는 식 (2)와 같으며 이는 구조물의 총

중량을 나타낸다. 이와 같은 목적함수를 통해 유전 정보의 적합도를 판단하며 이는 식 (3)과 같다. 구조해석 수행 시 설계자가 고려한 제약조건을 만족하는 범위 내에서 후보군들이 선정되며, 만약 만족하지 못하는 후보군들은 벌칙함수(Penalty Function)를 적용하여 도태시킨다. 이때 목적함수에 추가되는 벌칙 함수는 식 (4)와 같으며, 만약 설계 변수의 후보군을 적용한 구조물의 해석 값이 최적화를 위해 제약한 허용 값보다 초과할 시, 해석 값과 허용 값의 비에 1을 감한 값의 제곱과 벌칙 상수를 곱한 값이 목적함수에 추가한다. 이로 인해 최소화 문제에서 목적함수가 높은 값을 갖게 되고, 이는 다른 유전자보다 도태되는 결과를 가져온다. 따라서 제약조건을 위배하는 개체는 다음 세대에서 생존할 확률이 줄어들고 최적 해의 개선은 제약조건을 위배하지 않는 양상으로 진행된다.

다음으로 적합도 평가를 기초로 선별된 우수한 개체군들은 토너먼트 형식으로 비교를 거듭하며 최후의 우월한 인자를 결정한다. 이러한 유전 인자들은 두 개의 부모해의 특징을 부분적으로 결합하여 하나의 새로운 해를 만드는 연산자인 교배 연산을 수행한다.

교배를 통해 새롭게 생성된 개체에 엘리트 개체를 포함시켜 내부루프의 수렴성을 검사한다. 이때 내부루프는 한 세대 안에서 발생하는 것이며, 설계자가 지정한 내부루프의 수렴 조건을 만족하지 못하면 동일한 내부 마이크로 유전알고리즘을 수행하고, 내부루프의 종료 조건을 만족할 경우 세대를 의미하는 외부루프의 종료 조건을 검사한다. 이를 만족하면 알고리즘을 종료하고 그렇지 못하면 재시동을 하게 된다.

재시동 시에는 전 세대에서 얻은 엘리트 개체를 보존하며, 이를 제외한 나머지 개체들은 랜덤함수를 이용하여 새롭게 구성한다. 이때 엘리트 개체는 지난 세대의 진화의 결과를 나타내며 새롭게 생성된 개체는 개체군에 새로운 형질을 부여하여 다양한 탐색을 가능하게 하는 작용을 한다. 따라서 이러한 과정을 통해 세대가 지남에 따라 보다 우수한 최적 값을 찾게 된다.

### 3. 해석 예제

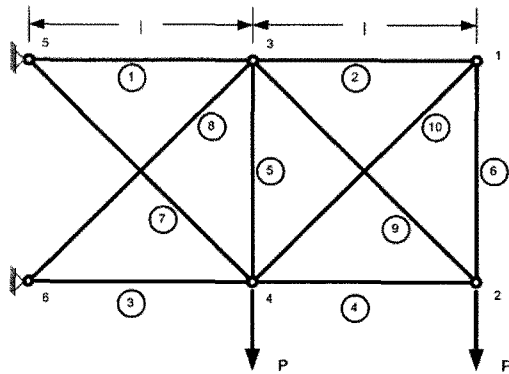
#### 3.1 10-bar 트러스의 최적 설계

마이크로 유전알고리즘을 이용하여 개발된 본 프로그램을 검증하기 위해 검증 예제로 자주 사용되는 10-bar 트러스의 최적설계를 수행하여 본 연구와 Haftka<sup>(12)</sup>에 의해 수행된 결과 값을 비교하였다.

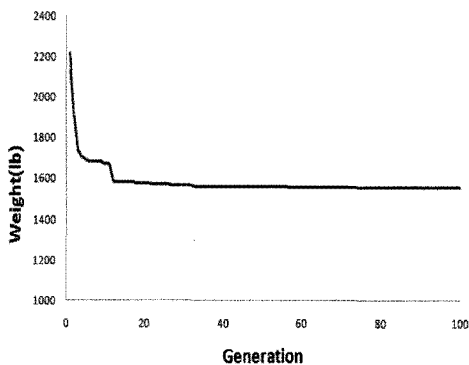
해석 모델은 그림 2와 같이 10개의 트러스 요소로 이루어진 구조물로 5번과 6번 절점은 회전단이며, 2번과 4번 절점에 재하 되고 있다. 구조물의 탄성계수는 10,000ksi이며 밀도는 0.1 lb/in<sup>3</sup> 이다.

Minimize  $(\sum A_i \cdot l_i) \cdot \rho$  (5)

Subject to  $\sigma(i) \leq \sigma_{allowable}$  (6)



l=360 in, P=100 kips  
 <그림 2> 10-BAR 트러스



<그림 3> 10-BAR 트러스의 최적중량 수렴곡선

<표 1> 이전연구와의 최적단면 및 응력 비교

요소	최적 단면 in <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )		응력 ksi (MPa)	
	본 연구	Haftka <sup>(12)</sup>	본 연구	Haftka <sup>(12)</sup>
1	7.8 (50.31)	7.9 (50.96)	24.1(166.05)	25.0 (172.25)
2	0.6 (3.87)	0.1 (0.65)	17.0(117.13)	25.0 (172.25)
3	8.3 (53.54)	8.1 (52.25)	-24.9(-171.6)	-25.0(-172.25)
4	3.9 (25.16)	3.9 (25.16)	-22.1(-152.3)	-25.0(-172.25)
5	0.1 (0.645)	0.1 (0.65)	0.29 (2.00)	-0.07 (-0.48)
6	0.5 (3.23)	0.1 (0.65)	23.2(159.85)	25.0 (172.25)
7	6.2 (39.99)	5.8 (37.41)	24.9(171.56)	25.0 (172.25)
8	5.0 (32.25)	5.51(35.54)	-24.9(-171.6)	-25.0(-172.25)
9	3.9 (25.16)	3.68(23.74)	31.8(219.1)	37.5 (258.38)
10	0.6 (3.87)	0.14 (0.90)	-23.0(-158.5)	-25.0(-172.25)

목적함수는 식 (5)와 같이 구조물의 각 부재별 무게의 합인 총중량이 최소화 되는 값을 목적함수로 설정하였으며, 수식 (6)과 같이 각 요소의 응력이 허용응력 이상이 되지 않도록 제약하였다. 9번 요소의 허용응력은 75ksi 로 설정하였고 그 이외의 요소는 25ksi로 설정하였다.

그림 3은 마이크로 유전 알고리즘을 이용하여 10-bar 트러스 구조물의 최적화를 수행한 결과이다. 가로축은 최적 값을 찾기 위해 수행된 연산의 횟수, 즉 세대수를 나타내며 세로축은 구조물의 중량을 나타낸다. 세대가 지남에 따라 구조물의 중량은 점차 감소해 왔고 어느 일정 세대가 지난 후에는 중량 값이 점차수렴함을 보여주고 있다. 유전 프로그램으로 얻은 수렴된 값은 1556.2 lb로 검증예제의 값 1499.0 lb 와 3.5%의 오차를 보였다.

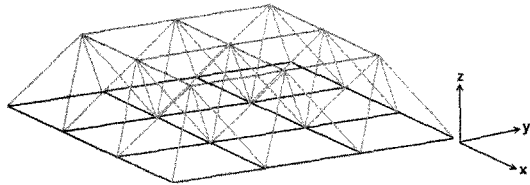
표 1은 본 프로그램을 이용하여 구조물이 최종적으로 수렴하여 얻은 결과 값과 Haftka<sup>(12)</sup>에 의해 선형적으로 수행된 검증예제를 비교한 것으로 최적화된 각각의 부재 단면적과 응력 값을 나타낸다. 본 연구의 결과는 수학적으로 정확히 계산된 이전 연구의 결과와 매우 작은 오차를 보여주었으며 이를 통해 본 프로그램의 신뢰성을 확인하였다.

#### 3.2 72-bar 트러스의 최적 설계

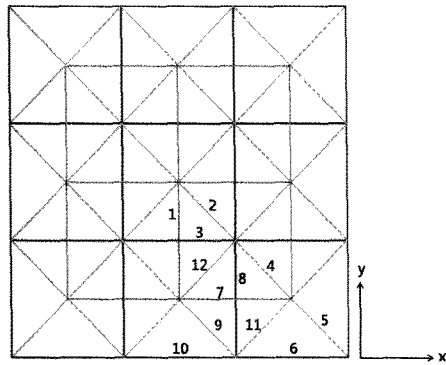
본 장에서는 초기 인장력이 고려된 그리드 형태를 가진 72-bar 트러스의 최적화를 수행하였다. 기존에 Levy<sup>(13)</sup>는 Equilibrium formulation과 Hybrid formulation의 이론을 이용하여 초기인장력이 고려된 72-bar 트러스의 최적화를 성공적으로 수행하였

〈표 2〉 재료 물성치

재료	탄성계수	허용응력
압축부재	$16 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$	20,000 psi
인장부재	$16 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$	40,000 psi



〈그림 4〉 72-bar 트러스



〈그림 5〉 72-bar 트러스의 평면도

다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 마이크로 유전 알고리즘을 이용하여 72-bar 트러스에 초기인장력을 적용하지 않은 모델과 초기인장력을 적용한 후의 모델의 최적화를 수행하여 기존에 수행된 결과 값과 비교하였다. 또한 초기인장력이 증가함에 따라 최적화시 모델에 미치는 영향을 확인하고자 하며 설계변수를 변화시킨 후 최적화시 초기인장력이 모델에 미치는 영향을 알아보려고 한다.

그림 4는 72-bar 트러스의 형상이다. 이전 연구 결과와의 비교를 위하여 구조물의 크기 및 물성치 등은 기존 모델과 동일시 하였으며, 사용된 주단위는 모두 inch와 pound이다. 본 모델을 구성하고 있는 각 부재의 길이는 모두 54 in (1.37 m)이며, 하중은 모델 상부의 중앙 절점에서 윗 방향으로 13,534 lb (6,139 kg) 만큼 작용한다. 모델의 경계조건의 경

우 하중이 작용하는 상부 중앙 점은 Z축 방향으로만 이동이 가능하고, 하부 가장자리에 위치한 점은 모두 Z축 방향으로만 구속되어 있다. 또한 하부의 가장자리에 위치한 점 중에서 코너에 위치한 한 점은 수평방향으로도 구속되어 있다. 표 2는 재료의 물성치를 나타낸 것으로서 모든 부재의 탄성 계수는  $16 \times 10^6 \text{ psi}$  ( $110.32 \times 10^3 \text{ MPa}$ )이며 인장부재의 허용응력은 압축부재보다 2배 큰 값을 가진다.

그림 5는 72-bar 트러스를 상부에서 본 평면도이다. 그리드의 형상은 물론 하중과 경계조건이 모두 x축과 y축에 대해 대칭이다. 따라서 그리드를 구성하고 있는 부재 번호는 12번까지 나타냈으며 그 외의 부재는 표현의 간략화를 위해 생략하였다.

본 연구에서는 72-bar 트러스의 각 부재를 동일한 단면적으로 하여 설계변수를 1개로 둔 경우와 상부, 하부, 대각 부재로 그룹을 나누어 설계변수를 3개로 둔 경우로 나누어 최적화를 수행하였다. 그림 4와 그림 5는 설계변수가 3개인 모델로써 3가지 색깔로 구별 되어 있다. 이때 각각의 색깔은 부재들의 설계변수를 의미한다. 또한 대각 부재 중 5번, 9번 부재에 각각 초기인장력 값을 넣어 주고 이와 대칭되는 모든 부재에 인장력을 적용하였다. 이는 초기인장력의 효과적인 적용을 위해서는 지지점과 연결이 된 부재에 적용하는 것이 가장 효과적이며, 제시한 부재 이외에 다른 부재의 초기인장력의 적용은 물량을 절감하는데 별다른 효과가 없었다. 따라서 5번과 9번 부재에 초기인장력을 도입하였으며, 이때 9번 부재에 작용한 인장력은 5번 부재에 작용한 인장력보다 2.56배 크게 적용하여 최적화를 수행하였다.

### 3.2.1 설계변수가 1개인 경우

본 연구에서는 72-bar 트러스에서 초기인장력을 고려하지 않은 경우와 초기인장력을 동시에 고려한 경우 최적화를 수행하였다. 본 프로그램을 통해 얻은 결과의 신뢰성을 입증하기 위해 기존에 Levy<sup>(13)</sup>에 의해 연구된 결과 값과 비교하였다.

또한 앞의 트러스 예제와 마찬가지로 식 (7)과 같이 구조물의 총 부피를 목적함수로 설정하였으며 식 (8)과 같이 각 요소별 응력은 허용응력을 넘지

않도록 설정하고 단면적 후보군의 범위를 다음과 같이 제한하였다.

$$\text{Minimize} \quad \sum A_i \cdot l_i \quad (7)$$

$$\text{Subject to} \quad \sigma(i) \leq \sigma_{allowable} \quad (8)$$

$$0.01 \text{ in}^2 \leq A_i \leq 1 \text{ in}^2$$

여기서,  $A_i$  : 각 설계변수 별 단면적

$l_i$  : 각 요소의 길이

$\sigma(i)$  : 각 요소의 응력

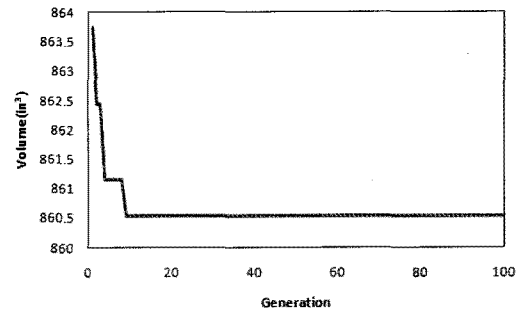
$\sigma_{allowable}$  : 허용 응력

을 의미한다.

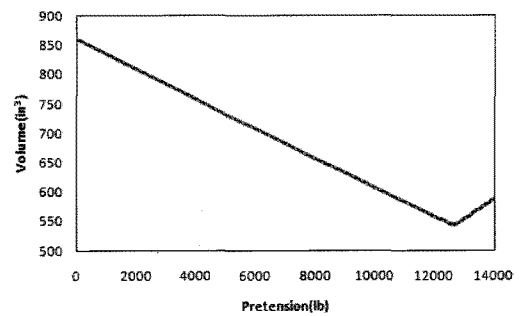
목적함수인 식 (7)는 각 부재의 면적과 길이를 곱한 값으로써 모델의 전체 부피가 최소가 되도록 하는데 그 목적이 있다. 그리고 제약함수는 각 부재에 작용한 응력이 허용응력 값을 넘기지 않도록 하고 있으며, 면적의 범위를 다음과 같이 정해줌으로써 계산량 및 설계시간 증가를 피하였다.

그림 6은 본 프로그램을 이용하여 100세대까지 수행한 최적화 결과이다. 세대가 지남에 따라 부피가 절감하였고 10세대 부근에서 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이는 모든 단면을 설계변수 1개로 설정하였기 때문에 값을 빠른 시간 안에 찾은 것으로 볼 수 있다. 또한 그림 7은 72-bar 트러스에서 초기 인장력을 증가함에 따른 부피의 변화를 나타낸 것이다. 이때 초기인장력 값은 9번 부재에 적용한 값을 말하며 5번 부재에도 같은 비율로 증가시켜주었다. 모델에 초기인장력을 적용해준 결과 부피가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 초기 인장력 값이 증가 할수록 좀 더 많은 부피가 감소하였고, 인장력 값이 12,616 lb에서 최소값을 가졌다. 그러나 계속적인 초기 인장력의 증가는 오히려 부피를 증가시키는 효과를 가져왔으며, 이는 과도한 초기인장력의 경우 부재 자체에 부담을 주어 보다 큰단면적을 필요로 하기 때문이다.

표 3과 표 4는 본 연구에서 마이크로 유전 알고리즘을 이용하여 얻은 최적화 값을 기존 연구 결과와 비교한 것이다. 각 부재 번호는 그림 5에서 나타낸 바와 같고 모델의 각 부재별로 적용된 힘 및 단



〈그림 6〉 설계변수가 1개인 경우 최적 수렴곡선 (초기 인장력을 가하지 않은 경우)



〈그림 7〉 초기인장력에 따른 부피 감소 효과 (설계변수가 1개인 경우)

〈표 3〉 최적화에 따른 응력과 최적 단면 및 부피 (초기인장력을 가하지 않은 경우)

부재	Levy <sup>(13)</sup>	본 연구
	Optimal force no prestress (lb)	Optimal force no prestress (lb)
1	2871	2899
2	4785	4797
3	-4426	-4426
4	-1914	-1903
5	479	481
6	-239	-238
7	1196	1199
8	-1077	-1060
9	1436	1447
10	-598	-598
11	718	722
12	-1436	-1429
Area	0.2213 in <sup>2</sup>	0.22132 in <sup>2</sup>
Volume	860.4 in <sup>3</sup>	860.5 in <sup>3</sup>

면적, 부피를 표를 통해 나타내었다. Levy<sup>(13)</sup>에 의해 선행 연구 되었던 결과 값과 본 연구에서 마이

〈표 4〉 최적화에 따른 응력과 최적 단면 및 부피  
(초기인장력을 가한 경우)

부재	Levy <sup>(13)</sup>	본 연구
	Optimal force with prestress(lb)	Optimal force with prestress(lb)
1	5583	5589
2	4785	4795
3	-2791	-2795
4	798	770
5	1595	1575
6	-798	-786
7	399	417
8	-798	-785
9	2791	2785
10	-2791	-2783
11	-1196	-1167
12	-2791	-2751
Area	0.13955 in <sup>2</sup>	0.13990 in <sup>2</sup>
Volume	542.6 in <sup>3</sup>	543.5 in <sup>3</sup>

크로 유전 알고리즘을 이용하여 얻은 단면적 및 부피의 최적 값의 차이는 모두 1% 내로 나타났다. 이를 통해 본 프로그램이 3차원 모델의 최적화에 대해서도 신뢰성이 있음을 입증하였다.

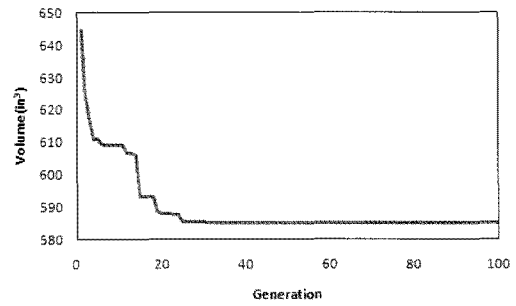
### 3.2.2 설계변수가 3개인 경우

이전에 Levy<sup>(13)</sup>에 의한 연구는 설계변수를 1개로 두어 최적화를 수행하였지만 본 연구는 심층적으로 수행하기 위하여 설계변수를 3개로 두어 최적화를 수행하였다. 즉 72-bar 트러스 모델에서 상부 부재, 하부 부재, 대각 부재를 각각 그룹으로 묶어서 최적화를 수행하였으며 그림 4, 그림 5의 각각의 색을 통해 구별할 수 있다.

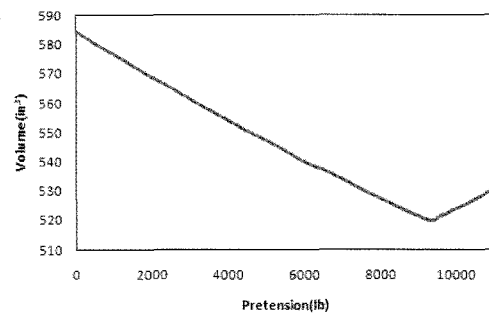
그림 8은 마이크로 유전 알고리즘을 적용하여 최적화를 나타낸 수렴곡선이다. 최적화 단면을 찾는 데 약 30세대정도가 소요되었는데 이는 앞선 설계변수가 1인 모델보다 최적화 단면을 찾는 데 변수가 더 많기 때문에 그에 따른 결과라고 볼 수 있다.

최적화 모델에서 설계변수가 3개인 경우 설계변수가 1개인 경우 설정하였던 하중 및 초기 인장력에 관한 변수는 동일하게 두었다. 그리고 초기인장력을 점차 증가시키면서 인장력이 모델의 부피에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다.

그림 9는 모델에 적용한 초기인장력이 증가함에



〈그림 8〉 설계변수가 3개인 경우 최적 수렴곡선  
(초기 인장력을 가하지 않은 경우)



〈그림 9〉 초기인장력에 따른 부피 감소 효과  
(설계변수가 3개인 경우)

〈표 5〉 최적화에 따른 단면적 및 부피

설계변수	Optimal area no prestress(in <sup>2</sup> )	Optimal area with prestress(in <sup>2</sup> )
1	0.06448	0.12166
2	0.23920	0.16012
3	0.11997	0.12008
Volume	585.01 in <sup>3</sup>	519.51 in <sup>3</sup>

따라 최적화시 부피의 변화를 나타낸 것이다. 설계변수가 1개인 경우처럼 초기 인장력 값이 증가할수록 좀 더 많은 부피가 절감되었고, 인장력 값이 9,323 lb에서 최소값을 가졌다. 그러나 앞의 예제와 마찬가지로 최적의 초기인장력 값을 넘어가면서 모델의 부피가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 이 예제 또한 과도한 초기인장력이 부재에 부담을 주는 것으로 판단된다.

표 5는 최적화를 수행한 후 부재의 단면적 및 부피를 나타낸 것으로 초기인장력으로 인해 부피가 감소하였다. 또한 표 5와 표 6은 각 부재에 걸리는 응력에 대한 항복의 응력의 비를 나타낸 것이다. 최

〈표 6〉 부재의 응력에 대한 항복응력 비  
(초기 인장력을 가하지 않은 경우)

부재	설계변수가 1개인 경우	설계변수가 3개인 경우
	$\sigma / \sigma_{allowable}$	$\sigma / \sigma_{allowable}$
1	0.33	0.95
2	0.54	1.00
3	-1.00	-1.00
4	-0.43	-0.98
5	0.05	-0.01
6	-0.05	0.01
7	0.14	0.45
8	-0.24	-0.24
9	0.16	0.26
10	-0.14	0.01
11	0.08	0.25
12	-0.32	-0.50
Voulme	860.53 in <sup>3</sup>	585.01 in <sup>3</sup>

〈표 7〉 부재의 응력에 대한 항복응력 비  
(초기 인장력을 최적화 한 경우)

부재	설계변수가 1개인 경우	설계변수가 3개인 경우
	$\sigma / \sigma_{allowable}$	$\sigma / \sigma_{allowable}$
1	1.00	1.00
2	0.85	1.00
3	-0.99	-1.00
4	0.14	0.02
5	0.28	0.29
6	-0.28	-0.22
7	0.07	0.14
8	-0.28	-0.26
9	0.05	0.50
10	-1.00	-0.71
11	-0.42	-0.15
12	-0.98	-1.00
Voulme	546.45 in <sup>3</sup>	519.51 in <sup>3</sup>

적화시 초기에 제약 하였던 조건에 의해서 부재들이 항복응력에 도달하였음을 알 수 있고, 이 결과를 통해 최적화가 잘 수행되었음을 확인할 수 있다. 또한 설계변수가 1인 경우보다 3인 경우에서 초기인장력에 대한 부피 절감율이 감소하였음을 알 수 있다. 즉 설계변수가 1인 경우 최적화된 초기인장력을 적용했을시 약 36.5%의 부피가 절감하였지만, 설계변수가 3인 경우 약 11.2%의 부피가 절감하였다. 이는 단면적에 대한 설계변수가 증가 할수록 최

적화시 각 변수 별 단면적이 자유롭게 변할 수 있기 때문이다. 즉 초기인장력을 적용하지 않았을 때 설계변수가 3개인 경우 1개인 경우보다 최적화를 통한 부피 값이 많이 감소하였고, 이를 통해 초기인장력을 적용 했을 시에도 많은 부피가 줄어들지 않았다. 그러나 모든 경우에서 초기인장력 값은 부피 절감에 효과가 있었고, 따라서 초기인장력을 통해 구조물의 물량을 제어할 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 최적화 기법인 마이크로 유전알고리즘(Micro Genetic Algorithm :  $\mu$ -GA)을 이용하여 그리드 모델의 최적설계 프로그램을 개발하였다. 이를 바탕으로 초기인장력이 도입된 72-bar 트러스의 최적 설계를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서는 마이크로 유전 알고리즘을 이용하여 그리드 모델에 대한 최적 설계 프로그램을 성공적으로 개발하였다. 72-bar 트러스 예제를 통해 기존 연구 결과와 비교하여 신뢰성을 입증하였으며 본 프로그램을 사용할 경우 실제 거동과 비슷한 3차원 모델의 최적 설계를 간편하고 빠르게 수행 가능하며 효율적이고 경제적인 설계가 가능하다.

(2) 초기인장력이 증가함에 따라 72-bar 트러스의 최적 부피는 감소하였으며, 최적화 된 초기인장력이 존재함을 확인하였다.

(3) 부재의 단면적에 대한 그룹핑을 증가시킨 후 최적화시 부피가 감소함을 확인하였다. 또한 설계변수가 증가하였을 시 초기인장력을 통한 부피 절감율이 감소함을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2009-0087819)이며 연구 지원에 감사드립니다.



## 참고문헌

1. D.E.Goldberg, Sizing Populations for Serial and Parallel Genetic Algorithms, Proceeding 3rd International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, Arlington, VA, pp.70-79, 1989
2. W.M Jenkins, Strucural Optimization with the Genetic Algorithm, The Structural Engineer, Vol. 69. No.24, pp.419-422, 1991
3. Kalyanmoy Deb, Surendra Gulati, Design of truss-structures for minimum weight using genetic algorithms, Finite Elements in Analysis and Design 37, pp447-465, 2001
4. 황선일, 조홍동, 한상훈, 유전알고리즘을 이용한 트러스 구조물의 이산최적설계, 한국전산구조공학회 논문집, 제 14권 제 2호, 97-106쪽, 2001
5. 강문명, 반춘욱, 퍼지-유전자 알고리즘에 의한 트러스 단면 및 형상 이산화 최적설계, 한국전산구조공학회 논문집, 제 15권, 제 1호, 81-89쪽, 2002
6. 김봉익, 권중현, 유전자 알고리즘을 이용한 2차원 강구조물의 최적설계, 한국해양공학회지 제 21권, 제 2호, 75-80쪽, 2007
7. 김연태, 이재홍, 마이크로 유전 알고리즘을 이용한 언더텐션 구조물의 최적설계, 대한건축학회 논문집(구조계), v.25 n.10, 35-42쪽, 2009
8. K.Krishnakumar, Micro-genetic Algorithm for Stationary and Non-stationary Function Optimization, SPIE, Intelligent Control and Adaptive Systems, Vol.1196, pp.282-296, 1989
9. 김선명, 이재홍, 마이크로 유전알고리즘을 이용한 냉간성형강 부재의 단면 최적설계, 석사학위 논문, 2001
10. 김영빈, 이재홍, 마이크로 유전알고리즘을 이용한 I-형 복합재료 보의 최적설계, 대한건축학회논문집 2003년 6월호, pp 69-77, 2003
11. 진강규, 유전 알고리즘과 그 응용, 교우사, 2004
12. Raphael T.Haftka, Zafer Gurdal, Elements of Structural Optimization, 1992
13. R.Levy, A.Hanaor. Optimal Design Of Prestressed Truss. Computers & Structures Vol.43, No.4, pp.741-744, 1992

▶접수일자 : 2010년 2월 8일

▶심사 완료일자 : 2010년 12월 20일

▶게재 확정일자 : 2011년 2월 16일