

# 실수코딩 유전알고리즘을 이용한 케이블 돔의 형상 최적 설계

## The Shape Optimization of Cable Dome Using Real Coding Genetic Algorithm

한 상 을\*      조 남 철\*\*      김 중 범\*\*\*  
Han, Sang-Eul      Jo, Nam-Chul      Kim, Jong-Bum

---

### ABSTRACT

The purposes of this study are to develop the real coding genetic algorithm and to obtain the shape optimization of a cable domes by using this scheme. Generally, the structural performance of the cable dome is influenced very sensitively by prestress, geometry and length of the mast because of flexible structures. So, it is very important to decide the optimum shape to get maximum stiffness of cable domes. We use the two models to verify the usefulness of this algorithm for shape optimization and analyze the roof system of Seoul olympic gymnastic arena as one analytical model of practical structures

---

### 1. 서    론

구조물의 최적설계기법은 컴퓨터의 성능 향상 및 소프트웨어의 개발과 함께 많은 발전을 하였으며, 다양한 공학설계문제에 적용되어 왔다. 고전적인 최적화 기법에서는 경사도를 이용하고 있는데, 이 방법은 설계변수에 대하여 목적함수와 제약함수의 일차 변분이상의 정보를 요구하고, 미분가능성, 연속성 등의 부가적인 정보를 필요로 한다. 또한 최적화 문제의 탐색공간이 작고 단순할 때는 완전 검색과 기존의 방법으로 충분히 최적해를 구할 수 있지만, 지역 최소·최대점이 많거나 비선형성이 클 때에는 특수한 인공지능 기법이 필요하다. 이러한 문제점들을 극복하기 위해 유전 알고리즘이 개발되었으며, 이는 최적화하고자 하는 목적함수 값 이외에 어떤 사전지식 없이도 복잡한 영역에서 전역적 최적해를 찾을 수 있는 장점이 있다. 이 연구는 실수코딩 유전알고리즘을 이용하여, 케이블 돔의 최적형상을 탐색하고, 최적화 문제에 적절한 유전알고리즘을 개발하고자 한다. 케이블 돔은 연성구조물로 구조물의 기하형상에 따라 구조적 성능이 크게 좌우되기 때문에 포스트의 길이, 위치 및 절점의 높이 등의 적절한 좌표가 구조물의 성능을 좌우한다고 볼 수 있다. 따라서 케이블 돔의 초기장력, 부재사이즈, 높이/반경 비를 일정하게 한 상태에서 구조물의 기하 형상을 계속적으로 변화시키면서 처짐에 대한 저항성능을 평가하여, 절점 변위가 최소로 되게 하는 형상을 찾는다. 또한 형상이 변화되면 처짐에 대한 저항 성능을 평가하기 전에, 프리스트레스에 의한 구조물의 평형을 찾은 후 해석을 시행한다. 이 연구에서 제시하는 유전알고리즘의 성능을 평가해보기 위해 다양한 모델에 적용하여 초기형상과 최적형상의 성능을 비교 검토하였다.

---

\* 정회원 · 인하대학교 건축학부 교수  
\*\* 인하대학교 건축학부 석사과정  
\*\*\* 인하대학교 건축학부 박사과정

## 2. 실수코딩 유전 알고리즘

일반적으로 실제 구조물의 정밀탐색 과정에서는 해에 대한, 복잡한 제약조건이 요구된다. 이진코딩을 채용할 경우 정밀도를 높이거나 해에 대한 사전지식의 결여로 탐색공간을 확대하게 되면 탐색체의 길이가 길어지게 되며, 긴 탐색체는 매우 큰 탐색공간을 만들어 유전알고리즘이 해를 찾는데 많은 시간을 요구하거나, 경우에 따라서는 실패하는 원인을 제공한다. 따라서 실수코딩을 채용함으로써 이러한 문제점들을 극복할 수 있고, 유전자형과 문제의 변수가 같게 표현되어 프로그래밍이 간편하다.

### 2.1 코딩 및 집단의 초기화

연속 탐색공간 변수의 최적화 문제에는 유전자의 표현을 실수하는 것이 자연스럽다. 탐색체를 실수로 표시함으로써 정확히 문제의 변수와 일대일 대응하는 실수 유전자를 가지게 되고, 정밀도는 알고리즘을 수행하는 컴퓨터의 정도에만 제약을 받게 된다. 실수 탐색체의 조합으로 이루어지는 개체군의 초기화는 모든 탐색체가 적합한 영역 내의 점이 되도록 이행된다. 초기화 방법으로는 두 가지가 있는데, 하나는 정의영역 내의 점들을 무작위로 취하는 방법이고, 다른 하나는 일부는 정의영역 내에서, 나머지는 경계상의 점을 무작위로 취하는 방법이다.

### 2.2 유전 연산자

유전알고리즘의 연산자는 자연진화의 원리를 알고리즘 형태로 근사화한 것을 말한다. 특히 알고리즘의 성능을 좌우하는 것은 연산자라 할 수 있고, 다양한 연산자의 선택에 있어 공통적인 원칙은 우수한 해가 선택될 확률을 높이는 것이다. 유전 알고리즘에서 대표적인 연산자는 재생산, 교배, 돌연변이이다. 재생산은 자연환경에서 적자생존(survival of the fittest)을 모방하려는 인위적인 메커니즘이다. 재생산 연산자는 적합도 값을 기반으로 집단내의 개체들을 선택하고 교배급원을 형성해준다. 교배는 개체들의 적합성을 위해 탐색체의 유전인자를 교환하는 것을 말하며, 돌연변이 연산자는 재생산 연산과 교배에 의해 개체들이 너무 한쪽 방향으로만 치우치는 것을 보완하기 위하여 아주 작은 확률로 개체의 한 탐색체를 변화시켜주는 것을 말한다. 돌연변이의 역할은 개체의 탐색체 배열을 변화시켜줌으로써 다른 최적화 알고리즘이 흔히 빠지기 쉬운 지역최적해로부터 벗어나게 하는 것이다.

### 2.3 적합도의 평가

유전 알고리즘에서 환경에 대한 생물의 적응능력은 개체의 적합도를 평가하는 과정을 통해 반영된다. 재생산, 교배, 돌연변이를 거쳐 새로운 집단이 완성될 때마다 개체들의 적합도가 평가되는데 이는 대개 제약조건과 목적함수로부터 계산된다. 적자 생존론에서 볼 수 있듯이 환경에 대한 생물의 적합도가 클수록 환경에 대한 적응능력이 크게되어 생존할 기회를 많이 갖는다. 이점을 착안하여 유전 알고리즘에서 표현한 것이 적합도이다. 자주 쓰이는 방법으로는 두 가지가 있는데, 하나는 목적함수의 부호를 바꾸어 이를 적절히 이동시키는 방법이고, 다른 하나는 목적함수의 역을 취한 다음 적절한 상수를 더하는 방법이다.

### 2.4 제약조건의 취급

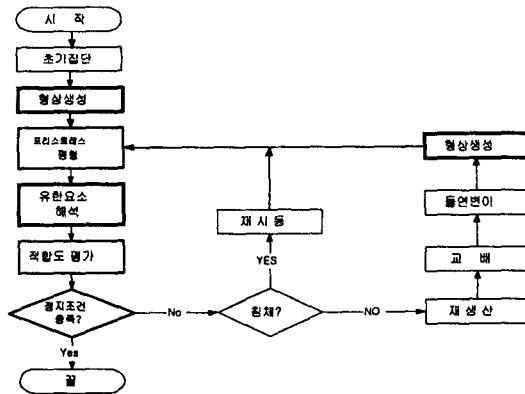
형상 최적화와 같이 탐색공간의 범위가 광대하고, 복잡한 최적화 문제에 유전알고리즘을 적용할 때 고려되어야 할 사항은 제약조건의 취급이다. 제약조건의 적절한 사용에 의해 유전알고리즘에 소모되는 시간을 절약할 수 있고, 찾고자 하는 해의 정도를 증가시킬 수 있다. 유전알고리즘은 비제약 최적화 문제에 적합하므로 제약 조건을 직접적으로 다룰 수 있는 연산자를 갖고 있지 않지만, 최근의 문헌에서 제약조건을 다루는 몇 가지 방법들이 제시되어 왔다. 이들은 크게 거부전략, 복구전략, 유전자의 보완전략, 벌점전략으로 분류된다.

이 연구에서는 벌점전략을 이용하였으며, 이는 문제의 해공간이 부적합한 영역을 탐색하게 될 때 벌점을 부과하고, 이 벌점을 평가 함수 계산에 반영하는 방법이다.

### 3. 형상 최적화 알고리즘 및 정식화

#### 3.1 형상 최적화 알고리즘

이 연구에서 사용한 최적화 알고리즘은 다음과 같다.



#### 3.2 최적화 문제의 정식화

케이블 돔의 형상최적 설계는 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\text{Minimize} \quad F(x) = \sum_{i=1}^m (D)^2 \quad (3.1)$$

*Subject to*      *Mechanical constraint*

$$P_k \geq 0, \quad k \in (\text{cable number})$$

$$g_{\delta_i}(x) = \delta_i - \delta_{iu} \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (3.2)$$

*Geometrical constraint*

$$\psi_{j+1}(X) - \psi_j(X) \leq 0$$

$H / R = \text{constant}$

여기서,  $F(x)$  : 절점변위  $(D)^2$ 의 합

$m$  : 절점번호

$P_k \geq 0$  : 케이블 장력

$\delta_i$  :  $i$  절점의 변위

$\delta_{iu}$  :  $i$  절점의 변위 제약값

$\psi_{j+1}(X) - \psi_j(X) \leq 0$  : 포스트의 위치조정

이 연구에서 최적형상은 최대강성을 갖는 구조물로 정의하며, 구조물에 하중을 가했을 때 변위가 최소로 되는 것을 의미한다. 최적화 수행을 위한 목적함수는 절점 변위벡터의 정규화로 표현할 수 있고, 그 목적은 목적함수의 값을 최소로 되게 하는데 있다. 제약조건은 역학적 제약조건과 기하학적 제약조건으로 나눌 수 있다. 역학적 제약조건은 역학적 원리를 따르고 식 (3.2)에서 볼 수 있듯이 케이블의 장력( $P_k$ )은 항상 '0' 이상인 것과 변위 제약을 의미한다. 형상이 바뀌면 프리 스트레스에 의한 구조물의 내력은 하중이 가해지지 않은 상태에서 평형을 유지해야 한다. 기하학적 제약조건은 구조물의 높이를 일정하게 한 상태와 높이에 변화를 준 상태로 구분하고, 포스트의 위치를 조절하는 것이다.

#### 4. 케이블 돔의 형상 최적화

##### 4.1 14절점 25부재 케이블 돔 모델

###### 4.1.1 유전 알고리즘을 이용한 최적형상 결정

그림 4.1은 케이블 돔을 형상 최적화하기 위한 모델로 절점 14개와 부재 25개로 이루어진 케이블 돔 모델이다. 이 모델은 참고문헌[5]에서 제안한 최적형상이다. 이 논문에서는 이 모델을 편의상 초기형상이라 하며, 최적화 수행과정을 거쳐 생성된 최적형상과 구조적 성능을 비교하고자 한다. 최적화 하는 과정에서 부재의 단면적, 초기장력, 영 계수 등은 변하지 않고, 부재 길이와 절점 좌표는 변한다. 그림에서 보는 바와 같이 설계변수는  $RU1, HU1, HL1, HU2, HL2$ 로 구성되어 있으며, 설계변수의 정의역은  $RU1$ 의 경우 초기 좌표 값에서  $\pm 150\text{cm}$ 으로 하고  $HU1, HL1, HU2, HL2$ 의 경우 초기 좌표 값에서  $\pm 100\text{cm}$ 로 하였다. 유전알고리즘의 제어 파라미터로 집단크기는 14, 교배율은 1, 돌연변이율은 0.5로 하였다. 20세대 이상 목적함수 값의 감소가 이루어지지 않을 경우 더 이상의 진화가 없는 것으로 간주하여 프로그램을 종료하도록 하였고, 그림 4.2와 그림 4.3은 세대증가에 따른 목적함수의 수렴과정을 도시화한 것이다. 세대증가가 63세대까지 이루어져 있으나, 최적해는 이미 32세대에서 얻어진 최적해가 계속 유지되고 있음을 알 수 있다. 유전알고리즘은 확률적 연산에 의해 집단을 진화시키며 최적해를 얻기 때문에 동일 조건의 같은 문제라 하더라도 시행할 때마다 다른 수렴과정을 보이며, 얻어진 해도 유일한 해가 아니라 하나의 시행해일 뿐이므로, 최적해라 할 수 없다. 따라서 최적화 수행과정을 반복 시행하여 가장 우수한 값을 최적해로 선정해야 한다. 그림 4.4은 최적형상과 초기형상을 나타내었으며, 형상은 크게 변하지 않고, 포스트의 위치와 길이가 변하였다.

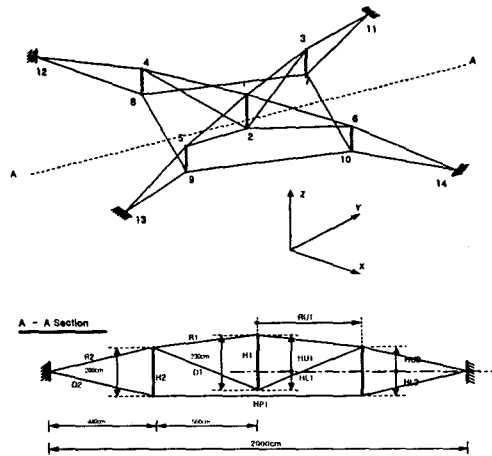


그림 4.1 초기형상 및 설계변수

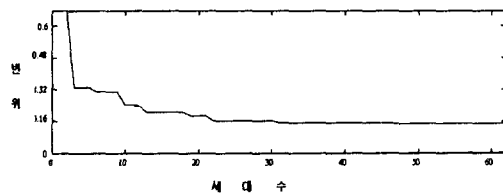


그림 4.2 변위함수 수렴과정

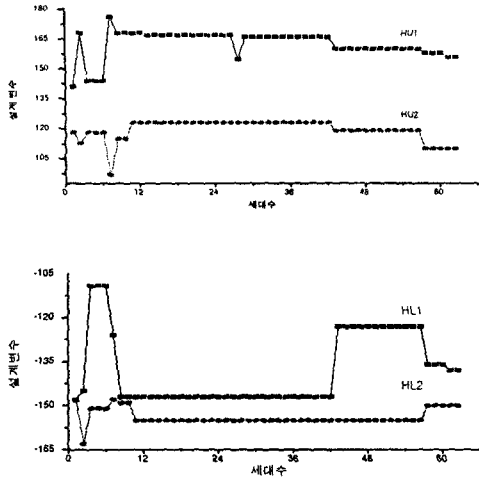


그림 4.3 설계변수 수렴과정

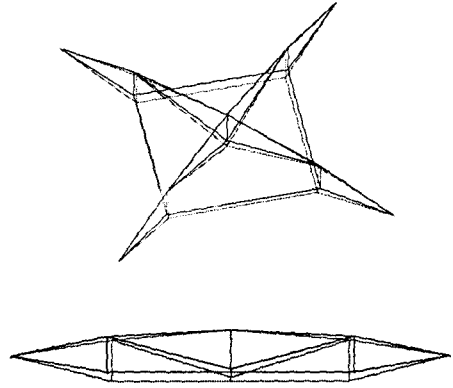


그림 4.4 초기형상 및 최적형상

#### 4.1.2 초기형상 및 최적형상의 구조성능 비교

해석모델 및 하중조건은 그림 4.5와 같으며, 참고문헌[5]에서 제안한 모델과 이 연구에서 제안한 최적형상의 처짐에 대한 구조적 처짐 저항성능을 비교한다. 케이블 구조물은 연성 구조물이기 때문에 프리스트레스 및 기하형상에 따라 구조물의 처짐에 대한 성능이 달라진다. 케이블 돔의 처짐 제한에 대한 규정은 없지만, 일반적으로 구조물의 안정성 및 사용성을 고려하여 스패에 대한 처짐의 비를 1/300 ~ 1/150 정도로 적용하고 있다. 이것을 기준으로 하중증분에 따른 구조물의 처짐에 대해 살펴보기로 한다. 절점 1에 수직하중이 증가함에 따라 초기형상은 수직하중 6톤에서 부재 R1의 장력이 완전히 상실해 국부적 불안정 상태를 초래했지만, 최적형상에서는 수직하중 10.8톤에서 부재 R1의 장력이 완전히 상실해 국부적 불안정 상태를 초래하였다. 따라서 최적형상이 초기형상보다 약 1.8배의 수직하중에 대한 여유를 갖는다.

그림 4.6과 그림 4.7에서 절점 1에 수직하중 15톤을 가했을 때 초기형상은 52.63cm, 최적형상은 27.58cm의 처짐이 생겼으며, 수직하중 30톤을 가했을 때 초기형상은 82.68cm, 최적형상은 50.34cm의 처짐이 발생하여 최적형상이 초기형상보다 약 1.65배의 처짐에 대한 저항성능을 가지고 있다. 절점 3의 경우 초기형상에 수직하중 12톤을 가했을 때나 최적형상에 24톤을 가했을 때 각각 26.87cm, 28.17cm로 1.2cm의 매우 미소한 차이를 보였으며, 최적형상은 초기형상보다 2배 정도의 처짐 저항성능을 보였다. 절점 1과 절점 3의 변위 그래프에서 최적형상은 수직하중이 4.5톤까지 선형변형을 하고, 초기형상은 수직하중 2.3톤까지 선형변형을 한 후, 비선형 변형을 하였기 때문에 최적형상이 더 안정적인 구조물임을 알 수 있다. 지금까지 살펴본 것으로 초기형상과 최적형상의 처짐에 대한 성능은 최적형상이 매우 우수한 것으로 나타났다.

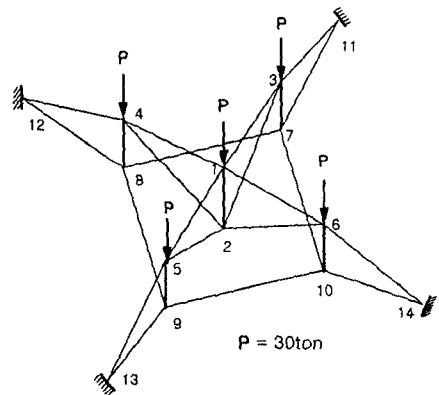


그림 4.5 해석 모델 및 하중조건

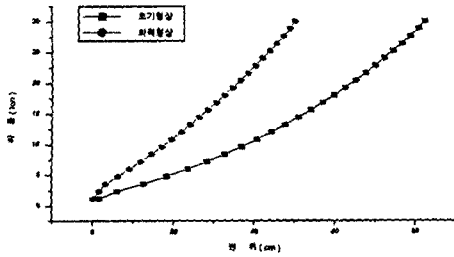


그림 4.6 절점 1의 하중 - 변위 곡선

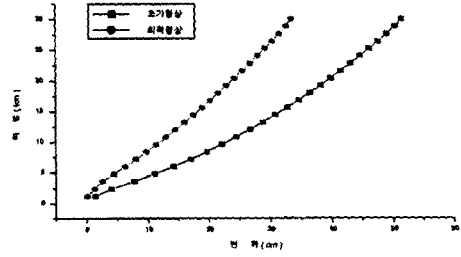
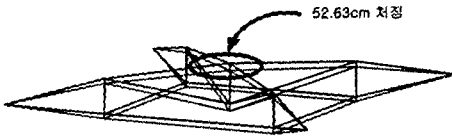
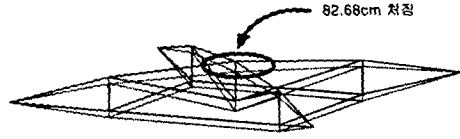


그림 4.7 절점 3의 하중 - 변위 곡선

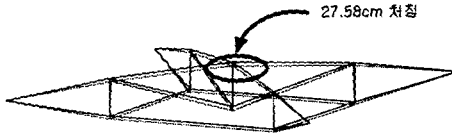


(a) 수직하중 15t의 경우

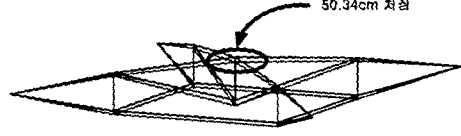


(b) 수직하중 30t의 경우

그림 4.8 초기형상 돔의 최대 처짐



(a) 수직하중 15t의 경우



(b) 수직하중 30t의 경우

그림 4.9 최적형상 돔의 최대 처짐

## 4.2 올림픽 체조 경기장

### 4.2.1 유전 알고리즘을 이용한 최적형상 결정

그림 4.10는 서울 올림픽 체조경기장과 동일한 시스템을 갖는 직경 120m의 케이블 돔이고, 중앙의 센터링을 단일 부재로 가정한 것 이외의 기하형상, 프리스트레스, 절점좌표는 모두 동일하다.

일반적으로 케이블 돔 구조물의 형상을 탐색하기 위해서는 시공 중에 초기장력을 도입하여야 하며, 이 연구에서는 초기장력을 결정하는 부분은 생략하고, 안정화 이행 과정을 통해 구해진 초기장력에 따른 케이블 돔의 최적좌표 결정 과정을 규명하고자 한다. 케이블 돔의 초기장력 결정문제는 케이블 돔 설계 과정에서 핵심적인 사항으로, 초기장력의 도입으로 케이블 돔에 구조적 안정성을 부여할 수 있다. 설계하중은 모든 절점에서 2.21톤으로 하였다. 설계변수는 그림 4.10과 같

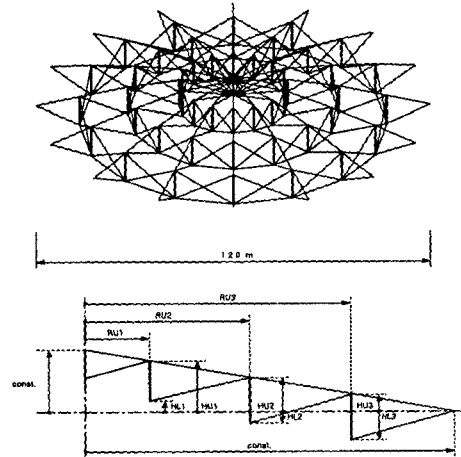


그림 4.10 케이블 돔의 초기형상 및 설계변수

이 반경 방향과 높이 방향이며, 전체 높이와 반경은 고정하였다. 제약조건으로 변위제약을 주었고, 케이블의 불안정에 대해 검토하였다. 여기서 변위제약은 초기 형상해석시 최대변위보다 3cm작은 값을 사용하였고, 기하 제약조건으로는 포스트의 위치를 조정하였다. 유전알고리즘의 제어 파라미터로 집단크기 14, 초기에는 교배율 1.0, 돌연변이율 0.5를 사용하여 얻은 결과를 그림 4.11에 나타내었다. 20세대이상 목적함수 값의 감소가 이루어지지 않을 경우 더 이상의 진화가 없는 것으로 간주하여 프로그램을 종료하도록 하였다. 목적함수와 설계변수의 단위는 cm로 하였다. 그림 4.11에서 세대증가가 120세대까지 이루어졌으나, 이미 90세대에서 최적해가 얻어져 계속 유지되고 있음을 알 수 있다.

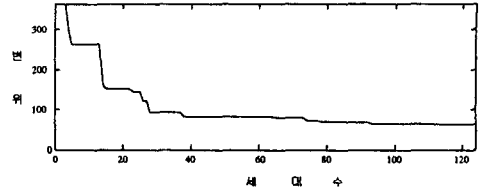


그림 4.11 변위함수의 수렴과정

#### 4.2.2 초기형상 및 최적형상의 구조성능 비교

해석모델 및 하중조건은 그림 4.12과 같고, 절점 좌표는 초기형상과 최적형상이 다르다.

케이블 돔의 처짐 제한에 대한 규정은 없지만 일반적으로 구조물의 안정성 및 사용성을 고려하여야 한다. 따라서 하중증분에 따른 구조물의 처짐에 대해 살펴보기로 한다. 비선형 수치해석으로 하중증분과 수정 뉴턴랩슨법을 사용하였다. 절점 1의 경우 초기형상과 최적형상에 수직하중 18.75톤을 가했을 때까지 절점의 변위는 거의 비슷하나, 33톤을 가했을 때에는 최적형상 128.7cm이고, 초기형상은 212.9cm로 처짐에 대한 저항 성능비는 1.65배로 최적형상이 우수하다. 또한 초기형상과 최적형상은 각각 수직하중 18.75톤, 27.5톤까지 선형으로 거동하나, 이후에는 비선형으로 거동한다. 절점 3, 35, 67도 절점 1과 비슷한 거동을 하나, 최적형상이 초기형상보다 큰 하중에서도 선형거동을 하며, 안정적인 거동을 하는 것으로 나타났다. 각 절점에서 초기형상과 최적형상의 처짐에 대한 성능 비는 절점 3에서 1.6배, 절점 35에서 1.4배, 절점 67에서 1.96배로 나타났으며, 최적형상이 초기형상보다 1.4 ~ 1.96배 정도 우수한 것으로 나타났다. 그림 4.13부터 그림 4.16은 각 절점의 변위를 나타낸다.

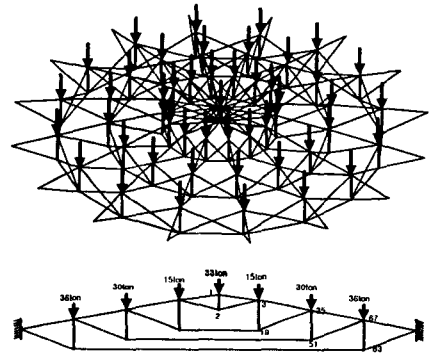


그림 4.12 해석모델 및 하중조건

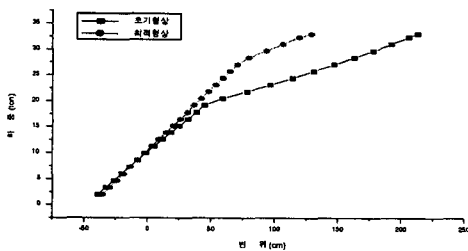


그림 4.13 절점 1의 하중 - 변위 곡선

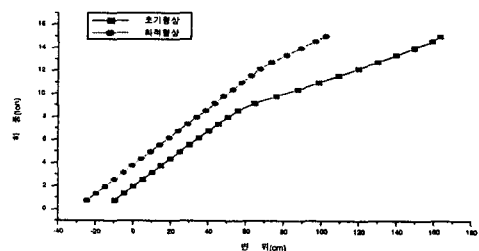


그림 4.14 절점 3의 하중 - 변위 곡선

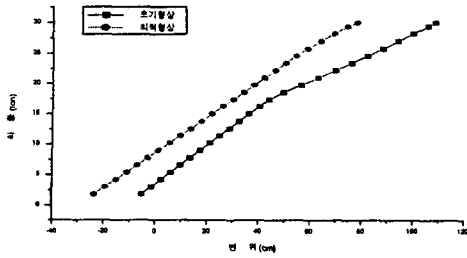


그림 4.15 절점 35의 하중 - 변위 곡선

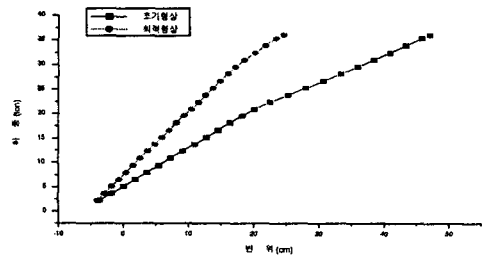


그림 4.16 절점 67의 하중 - 변위 곡선

## 5. 결론

유전알고리즘은 연속성, 미분가능성 등과 같은 탐색공간의 제약에 관계없이 전역해를 찾을 수 있는 큰 장점 때문에 최근 알고리즘의 효율을 높이기 위한 많은 이론적 연구가 이루어지고 있다. 그러나 지금까지 유전알고리즘을 이용한 최적화 방법은 구조물의 증량최적화 문제가 대부분이며, 형상최적화의 경우라도 단순한 구조물의 절점을 이진코딩한 방법이므로 넓은 영역의 탐색이 불가능하다. 따라서 이 연구에서는 고정밀도의 해를 요구하는 실제 구조물에 대한 최적화 문제를 다루기 위해 실수코딩 유전알고리즘을 사용하였으며, 기하학적 비선형 해석을 고려한 케이블 구조물의 형상 최적화 문제를 다루었다.

이상과 같은 연구를 수행하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 설계변수를 실수코딩하여 부호화 및 복호화 과정을 거치지 않으므로 유전 알고리즘을 이용한 구조물의 최적화 과정상에서 발생하는 시간을 단축시킬 수 있었다.
2. 14절점 25부재 케이블 돔 모델에서 초기형상과 최적형상의 처짐의 성능비는 1.65 ~ 1.82배의 차이를 보이며, 올림픽 체조경기장 모델에서도 1.4 ~ 1.96배의 성능을 보였다.
3. 14절점 25부재 모델과 올림픽 체조 경기장 모델에서 볼 수 있듯이 최적형상이 초기형상보다 안정적이고, 강한 강성을 갖는 것으로 나타났다.

## 참고 문헌

1. Chen PS, Abe M, Kawaguchi M. Shape of tensegrity frames hav-ing an optimum rigidity. 4th Conference on Space Structures, Uni-versity of Surrey, UK, Sept. 5-10, 1993. pp.1017-1026.
2. Chen PS, Kawaguchi M. Minimum deformation shape of pre-stressed bar structures. Seiken-IASS Symposium on Nonlinear Analysis and Design for Shell and Spatial Structures. Tokyo, Japan, Oct. 1993. pp.255-260.
3. Kawaguchi M, Chen PS, Tatemichi I Optimum shapes of a cable dome structure. Engineering Structures 21(1999). pp.719-725.
4. Eshelman, L. J., and Schaffer, J. D., *Real-Coded Genetic Algorithms Interval-Schemata, Foundation of Genetic Algorithms 2*, L. D. Whiteley(Ed.), Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA, 1993. pp.187-202.
5. 최옥훈, 케이블 돔 구조물의 최적형태해석, 한국 강구조 학회지, Vol.11, No.1, pp53-60.
6. 진강규, *유전알고리즘과 그 응용*, 교우사, 2000.