대공간 구조물의 최적설계 기법

The Optimum Design Method for the Spatial Structure

한 상 을* 조 용 원**

*본학회 부회장, 인하대학교 건축학부 교수
**인하대학교 건축공학과 석사과정

1. 서 론

건축 구조물의 설계에 있어서 최소한의 자원으로 구조물에 요구되는 최고 수준의 사용성과 안정성을 확보하기 위하여 최적설계 개념이 적용 되어야 한다.[1)]

최적설계는 주어진 제약조건과 목적함수를 만족하는 최적의 상태를 찾는 것이며, 컴퓨터 하드웨어, 최적화 이론 및 수치해석적인 기법의 개발과 더불어 연구 발전되어 왔다. 특히, 대공간 구조물은 구성부재가 많고 기하학적 비선형성을 가지고 있으므로 타 구조물에 비해 해석 및 설계에 어려움이 있어 다양한 최적화 기법이 요구된다.

대공간 구조물의 최적설계는 외부하중에 따른 구조물의 응력분포에 대응하여 적절한 단면의 부재를 배치함으로서 소요되는 부재의 총중량을 최소화하는 단면 최적화, 3차원적으로 자연스러운 힘의 흐름을 유도하고 처짐을 제어하기 위한 형태 최적화 등이 있다. 이러한 최적화 문제를 효율적으로 해결하기 위하여 여러 가지 방법들이 연구되고 있으며, 그 대표적인 예로 유전 알고리즘(genetic algorithm), 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing), 터부 알고리즘(tabu), 신경망 알고리즘(neural network) 등을 들 수 있다. 특히 유전 알고리즘은 생물의 진화과정을 모방한 확률론적 탐색기법으로 최근까지 대공간 구조물의 최적설계에 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 유전 알고리즘은 통계적 특성상 초기해의 설정 등 운용에 있어서의 기술적인 제약이 따르며, 이로 인해 국부 최적해에 빠지는 문제가 발생할 수 있고, 경우에 따라서는 탐색시간이 확장되고 불안정한 해를 찾을 수 있는 문제점을 가진다. 따라서 목적함수, 제약조건, 설계변수 등의 특성을 적절히 설정함으로서 문제의 탐색공간에서 최적의 유전 알고리즘 개발이 필요하다고 판단된다.

본고에서는 유전알고리즘의 목적함수를 달리하여 최적해를 찾는데 국한되지 않고 코딩법, 탐색전략, 제어 파라미터 등을 달리하여 대공간 구조물에의 적용성을 검토한다. 또한 유전 알고리즘이 가지고 있는 국부 최적해 및 탐색시간을 더 효율적으로 처리할 수 있는 터부 알고리즘에 대하여 언급하기로 한다.

2. 유전 알고리즘

1975년 홀랜드(Holland)에 의해 처음으로 제시된 유전 알고리즘은 생물의 진화과정, 즉 자연선별과 유전법칙을 모방한 확률적인 탐색기법으로 지금까지도 이론과 응용에 관하여 활발한 연구가 이루어지고 있다. 유전 알고리즘의 가장 큰 특징은 이웃해 탐색기법이 하나의 해를 운용하는 타 알고리즘과는 달리 복수 개의 잠재해들로 이루어진 해의 집단(population)을 운용하여 최적해를 찾아간다.

유전 알고리즘의 코딩법으로는 홀랜드에 의해 개발된 단순 유전 알고리즘에서 사용되고 있는 이진수 코딩(binary encoding)이 있으며, 이진수코딩이 가지고 있는 변수의 추가에 따른 탐색점의 급격한 증가에 대한 문제점을 보안하기 위한 실수 코딩(real-coded genetic algorithm: RCGA)[2] 이 있다. 실수 코딩 유전 알고리즘은 유전자형(genotype)과 표현형(phenotype)이 근접하여 제약조건을 다루기에 적합하다. 또한 실수를 정수화한 정수 코딩(integer)알고리즘이 있으며, 본고에서는 실수 코딩과 정수 코딩 유전 알고리즘을 사용하고 있다.

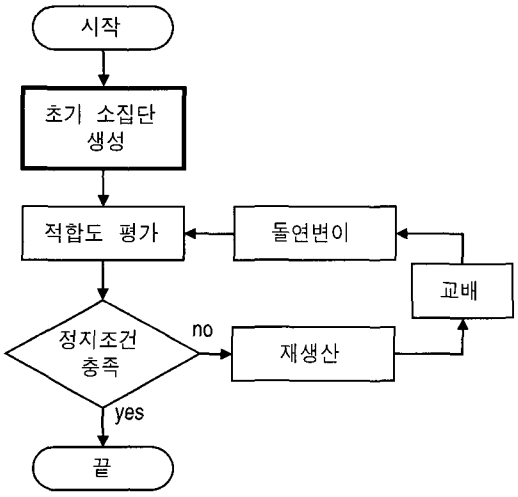

그림 1 유전 알고리즘의 기본 구조

2.1 표현 및 초기집단의 생성

구조체의 최적화 문제는 설계변수가 표준화 되어 있기 때문에 연속변수가 아닌 이산화 변수로 다루는 것이 현실적이다. 이산화 변수를 효과적으로 다루기 위해서는 실수 코딩 및 정수 코딩이 필요하다. 본고에서 사용한 정수코딩은 유전자를 정수형으로 표현하나 유전연산자(재생산, 교배, 돌연변이)들을 적용하는 경우에는 실수처럼 취급하도록 하고 연산자의 적용이 끝날 때에는 반올림, 올림 등을 이용하여 다시 정수화 시키는 방법을 택하였다. 이렇게 함으로써 실수 코딩의 장점을 살리면서 이산형 변수를 효과적으로 다루 수 있을 것이라 판단된다.

탐색공간 상의 점들을 표현하는 방법이 결정되면 유전연산자를 통해 모의진화가 수행될 초기 개체집단의 생성이 요구된다. 초기집단 생성[2]은 사전지식이나 경험적으로 유도된 초기화(directed initialization)가 효과적이나, 그렇지 못할 경우 무작위 초기화(random initialization)를 사용할 수도 있다.

2.2 유전 연산자

유전 알고리즘의 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 메커니즘이며, 연산자는 적합도 값을 기반으로 집단내의 개체들을 선택하고 교배급원을 형성해 준다. 재생산 과정을 거쳐 좋은 개체들은 유전되고 나쁜 개체들은 소멸되었지만, 집단의 다양성이 더 좋은 방향으로 진행되었다고 볼 수는 없다. 교배는 개체들의 적합성을 위해 염색체의 유전인자를 교환하는 것을 말하며, 돌연변이 연산자는 재생산 연산과 교배에 의해 국부 최적해에 빠지는 것을 보완하기 위하여 아주 작은 확률로 개체의 한 염색체를 변화시켜주는 것을 말한다.

2.3 적합도(fitness) 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. 적합도 평가로부터 우수한 유전자를 고르게 되며, 최종적으로 선택된 유전자가 최적해가 되는 것이다. 대표적인 적합도 평가방법[2]으로는 다음 두 가지를 들 수 있다.

$$f(X) = -F(x) + \alpha \geq 0 \tag{1}$$

$$f(X) = \frac{1}{F(x) + \alpha} \tag{2}$$

식(1), (2)에서 $f(X)$는 적합도 함수이고, $F(x)$는 목적함수이며, α는 임의의 상수이며 제약조건의 벌점전략이라 할 수 있다.

3. 유전 알고리즘을 이용한 최적설계

3.1 크기 최적화[3]

전술한 유전 알고리즘과 전략을 통해 응력, 변위제약과

구조물의 전체좌굴(overall buckling)을 고려한 기하비선형 입체트러스 구조물의 중량최적화 문제를 다룬다. 정식화는 다음과 같다.

$$Minimize\ \ W(x)=\sum_{k=0}^{ng} A_k \sum_{i=0}^{mk} \rho_i L_i \qquad (3)$$

$$g_{\delta i}(x)= \delta_i - \delta_{iu} \le 0,\ \ i=1,2,\cdots,p$$
$$g_{\sigma j}(x)= \sigma_j - \sigma_{ju} \le 0,\ \ j=1,2,\cdots,nm$$
$$g_k(x) = \lambda_u - \lambda \le 0 \qquad (4)$$

여기서, $W(x)$: 전체 구조물의 총 중량
A_k : 그룹 k부재의 단면적
ρ_i, L_i : 부재의 비중, 길이
ng, mk, p, nm : 그룹의 수, 그룹 k의 부재수, 절점수, 부재수
δ_i, σ_j, λ : i 절점의 변위, j부재의 응력, 하중계수 (비선형해석에 의한 좌굴시 하중 스텝)
δ_{iu}, σ_{ju}, λ_u : 변위, 응력의 제약값, 하중의 스텝수

유전 알고리즘은 비제약 최적화 문제에 적합한 알고리즘이기 때문에 식(3), (4)는 벌점함수를 이용한 비제약 문제로의 전환이 필요하고 모든 제약조건을 정규화하는 것이 바람직하며 정규화는 다음과 같다.

$$g_{\delta i}(x)=\frac{\delta_i}{\delta_{iu}}-1\le 0,\qquad i=1,2,\cdots,p$$
$$g_{\sigma j}(x)=\frac{\sigma_j}{\sigma_{ju}}-1\le 0,\qquad j=1,2,\cdots,nm$$
$$g_k(x)=\frac{\lambda_u}{\lambda}-1\ \le\ 0. \qquad (5)$$

정규화된 제약조건 식(5)를 적용한 비제약 목적함수 ϕ는 아래와 같다.

$$\phi(x)=W(x)\left(1+C_1\sum_{i=0}^{p} v_{\delta i}+C_2\sum_{j=0}^{nm} v_{\sigma j}+C_3 v_k\right) \qquad (6)$$

여기서, $W(x)$ = 식(3)의 목적함수
C_1, C_2, C_3 = 벌칙강도를 정하는 상수
$v_{\delta i}$, $v_{\sigma j}$, v_k = 변위, 응력, 하중계수의 위반계수

식(6)을 단순화하면 목적함수는 다음과 같다.

$$\phi(x)=W(x)(1+C\times v_{\delta\sigma k})$$

$$v_{\delta\sigma k}=1-\frac{\lambda_k}{\lambda_u}$$

본고에서 제시하는 유전 알고리즘의 유용성과 효율성을 평가해보기 위해 설계 예제를 통하여 타 논문의 최적화 알고리즘과 비교하고, 대공간 구조물 형태의 예제에 적용한다.

(1) 10절점 25부재 입체 트러스

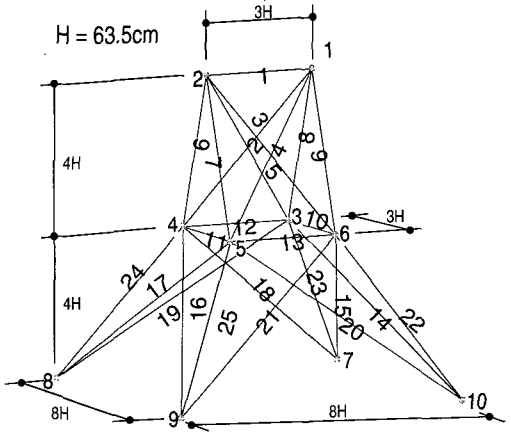

그림 2 10절점 25부재 입체트러스

그림 2는 구조체 크기 최적화 문제의 전형적인 예제[4]로 알고리즘의 성능 평가에 많이 이용된다. 설계변수는 표 1, 2에 나타내었다. 변위는 모든 절점의 X, Y, Z 방향 모두 ±0.889㎝이내로 제약했으며, 응력제약은 ±275.790kN/㎠로 하였다. 설계변수의 경계조건은 0.65㎠에서 22.58㎠까지 0.1씩 증가하는 이산형 영역이며, 이것을 오름차순 순으로 번호를 부여하여 유전자형으로 사용하였다. 부재의 비중은 각각 6.895×10^7kN/㎥, 2768kg/㎥로 하였다. 이러한 설계조건과 제반 상수들은 타 논문[4]과 비교를 위해 동일하게 하였다.

더 이상 목적함수값의 감소가 이루어지지 않을 경우 더 이상의 진화가 없는 것으로 간주하여 연산을 종료하도록 하여 얻은 결과를 그림 3과 표 3에 나타내었다. 표 4는 타 논문[4]의 알고리즘과 성능을 비교한 것으로 이 표에서 보는 바와 같이 본고에서 제시한 알고리즘의 의해 얻은 목적함수값이 타 논문에 비해 더 작은 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다.

표 1 설계 하중

절 점	하 중 (kN)		
	F_x	F_y	F_z
1	4.45	-44.48	-44.48
2	0	-44.48	-44.48
3	2.22	0	0
6	2.67	0	0

표 2 설계 변수

설계변수(그룹화)	부 재
A1	1-2
A2	1-4, 2-3, 1-5, 2-6
A3	2-5, 2-4, 1-3, 1-6
A4	3-6, 4-5
A5	3-4, 5-6
A6	3-10, 6-7, 4-9, 5-8
A7	3-8, 4-7, 6-9, 5-10
A8	3-7, 4-8, 5-9, 6-10

표 3 최적설계 결과

시행수	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	종료세대	총중량(kgf)
1	0.65	0.65	22.6	0.65	8.39	5.81	5.16	22.6	163	220.68
2	0.65	6.45	22.6	0.65	10.8	5.81	0.65	22.6	141	221.71
3	0.65	2.58	22.6	0.65	12.3	6.45	1.94	22.6	138	218.72
4	0.65	5.16	22.6	0.65	4.52	5.81	1.29	22.6	126	220.26
5	0.65	7.10	22.6	0.65	9.68	5.81	0.65	9.68	135	222.31
6	0.65	2.58	22.6	0.65	12.3	6.45	1.94	22.6	143	218.72
7	0.65	7.10	22.6	0.65	9.68	5.81	0.65	9.68	128	222.31
8	0.65	3.84	22.6	0.65	11.6	5.81	1.94	22.6	154	219.26
9	0.65	0.65	22.6	0.65	12.9	6.45	3.23	22.6	121	218.74
10	0.65	3.23	22.6	0.65	11.0	5.81	2.58	22.6	149	219.72
평 균									139.8	220.26
표준편차									13.1	3.17

표 4 최적해의 비교

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	총중량
Duan	0.65	11.6	16.8	0.65	0.65	5.16	13.6	16.8	255.34
Rajeev	0.65	11.6	14.8	1.29	0.65	5.16	11.6	18.1	247.67
Cai	0.65	0.65	21.9	0.65	12.9	6.45	4.52	21.9	221.09
Tong	0.65	3.23	21.9	0.65	12.3	6.45	2.58	21.9	220.01
present method	0.65	2.58	22.6	0.65	12.3	6.45	1.94	22.6	218.72

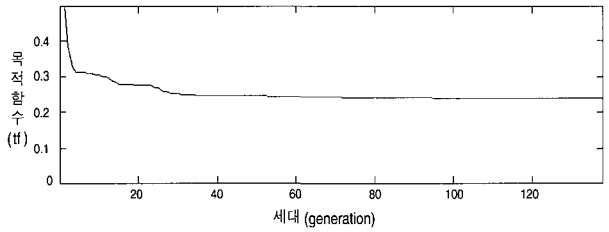

그림 3 목적함수 수렴과정

최적해의 최대 변위는 1, 2번 절점에 -Y 방향으로 각각 0.879㎝, 0.888㎝가 발생하여 제약값 0.889㎝에 아주 가까웠다. 부재의 응력은 제약값을 크게 밑돌았다. 따라서 이 문제의 최적해는 응력제약보다 변위제약에 의해 결정됨을 알 수 있다.

(2) 라멜라 네트워크 돔

여기에서는 유전 알고리즘의 대공간 구조물에 대한 적용성을 검토하기 위하여 라멜라 네트워크 돔을 대상으로 크기최적화 문제를 다룬다.

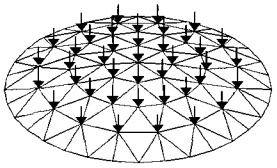

그림 4 설계 하중

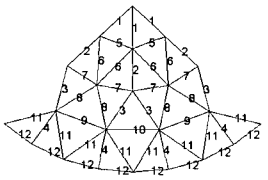

그림 5 설계변수

지점은 모두 핀으로 하고, 설계 하중은 그림 4와 같이 지점을 제외한 모든 절점의 Z방향으로 80kN을 가하였다. 설계변수는 그림 5에서 나타낸 바와 같이 대칭위치의 부재들을 12개로 그룹화한 부재 단면적 A1A12를 사용하였고 설계변수의 경계조건은 KS규격 구조용 강관 61개를 유전자형으로 사용하였다. 제약조건으로는 응력제약과 모든 절점의 X, Y, Z 방향 변위 모두 ±1.0㎝이내로 하였다. 탄성계수는 2100(tf/㎠), 부재비중은 7.85×10^{-6}(tf/㎤), 부재의 항복강도는 3.3(tf/㎠)을 사용하였다.

최적화 결과, 그림 6, 7은 부재 단면적을 선굵기로 나타낸 것이며, 그림 6과 표 5는 응력제약만 고려할 경우로 5번째 시행해가 최소값을 보이고 있다. 그림 7과 표 6은 변위와 응력을 모두 제약할 때의 결과들이다.

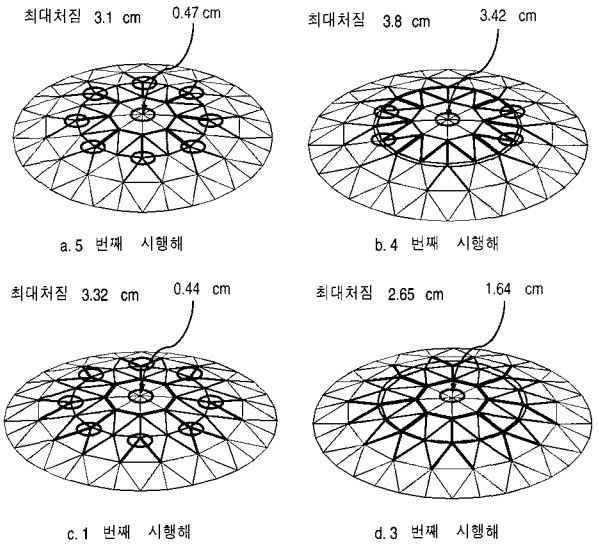

그림 6 응력제약 시 최적설계 결과

표 5 최적 설계 결과 (응력제약 시)

시행수	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	종료	총중량(tf)
1	17	24	21	15	21	22	20	17	12	9	13	1	145	3.669
2	17	23	24	20	24	15	20	22	15	12	10	1	157	4.040
3	17	24	23	17	24	19	19	20	9	14	12	1	165	3.885
4	16	22	22	17	24	19	20	19	13	10	12	1	155	3.663
5	16	24	20	17	22	21	21	17	12	10	13	1	191	3.616

표 6 최적 설계 결과 (응력, 변위 모두 제약 시)

시행수	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	종료	총중량(tf)
1	24	25	24	24	28	21	26	24	19	17	13	1	200	6.613
2	23	28	21	26	26	20	26	23	21	13	12	1	160	6.766
3	23	25	25	25	26	22	26	23	15	21	12	1	166	6.734
4	24	25	25	12	28	22	26	24	14	10	22	1	181	7.004
5	24	25	25	20	29	20	26	25	10	23	20	1	143	7.167
6	25	25	23	26	26	17	25	25	19	17	8	1	205	6.437
7	24	26	22	26	28	17	26	24	11	25	12	1	159	7.164
8	24	26	23	25	28	19	26	25	20	18	9	1	250	6.751
9	22	28	23	20	26	23	26	23	11	15	22	1	253	6.916
10	25	24	24	24	30	22	26	23	23	12	14	1	148	6.750

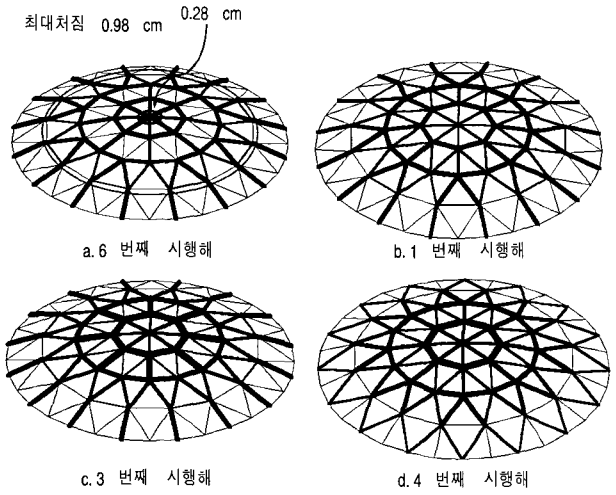

그림 7 응력, 변위 모두제약 시 최적설계 결과

3.2 형상 최적화[5)]

형상 최적화란 구조물의 부재크기 변화없이 구조체의 형상을 변화시키면서 최대강성을 갖는 형상의 탐색과정이라 할 수 있다. 본고에서는 형상최적화를 위하여 케이블 돔을 모델로 하였다. 케이블 돔의 형상최적화는 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

$$Minimize\ F(x)=\sum_{i=1}^{m}(D_i)^2$$

$$Subject\ to\ \text{역학적 제약조건}$$

$$P_k \geqq 0,\quad k \in (cable\ number)$$

$$g_{\delta i}(x)=\delta_i-\delta_{iu} \leqq 0,\qquad i=1,2,\cdots,p$$

기하학적 제약조건

$$h_j(x)=\psi_{j+1}-\psi_j \leqq 0$$

$$H/R=constant$$

여기서, $F(x)$: 절점 변위 D_i의 제곱의 합

m : 절점번호

$P_k \geqq 0$: 케이블 장력

δ_i : i 절점의 변위

δ_{iu} : i 절점의 변위 제약값

H, R : 케이블 돔의 높이 및 반경

$\psi_{j+1}-\psi_j \leqq 0$: 포스트의 위치조정

(1) 유전 알고리즘을 이용한 최적형상 결정

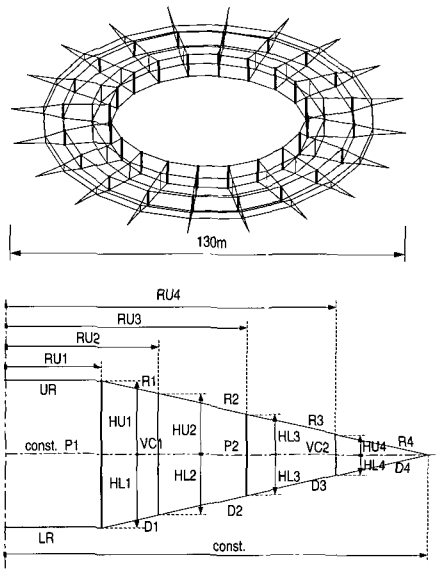

그림 8 초기형상 및 설계변수

여기에서 형상 최적화의 대공간 구조물에 적용성을 검토하기 위하여 부산 월드컵 경기장을 그림 8과 같이 180절점 400부재로 축소한 모델을 사용하여 초기장력에 대한 최적형상을 결정하는 문제를 다룬다.

설계변수는 그림 8과 같이 절점의 반경과 높이이며, 반경은 고정하였다. 제약조건으로 변위제약을 사용하며 초기 형상 해석시 최대변위보다 5cm작은 값을 사용하였고, 기하 제약조건으로는 포스트의 위치를 조절하였다.

유전 알고리즘의 제어 파라미터로 집단크기 14, 교배율 1과 돌연변이율 0.5를 적용한 결과를 그림 8에 나타내었다. 최적해로의 수렴은 60세대에서부터 120세대까지 거의 일정하게 변화가 없었으며, 결과로부터 얻어진 최적형상을 초기형상과 비교하여 그림 10에 나타낸다.

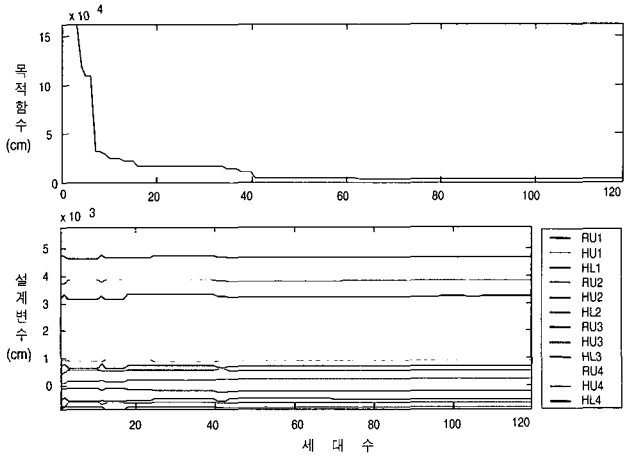

그림 9 설계변수 및 목적함수의 수렴과정

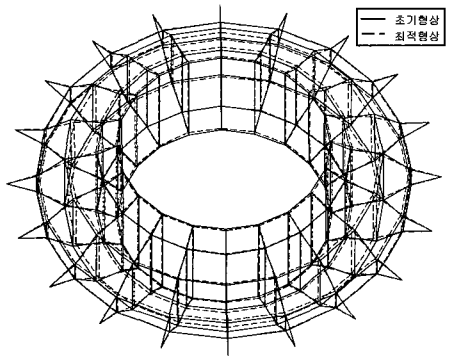

그림 10 초기형상 및 최적형상

(2) 초기형상 및 최적형상의 구조성능 비교

해석모델은 그림 10와 같다. 하중조건은 그림 11과 같고, 부재의 제원은 앞 절과 동일하나 절점좌표는 초기형상과 최적형상이 다르다. 부산돔의 경우는 포스트와 케이블에 의해 상하부재가 연결된 것과 그렇지 않은 경우가 있으므로, 케이블 위에 30tf하중을 가하면, 수직케이블이 불안정을 초래할 수 있기 때문에 하단부의 모든 절점에 하중을 가하였다.

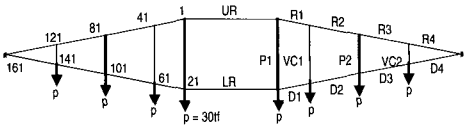

그림 11 해석모델의 하중조건

초기형상 및 최적형상의 절점 변위를 비교한 결과는 다음과 같다. 표 7을 보면 최적형상이 초기형상에 비해 처짐에 대한 성능이 1.4배에서 1.6배 우수하다는 것을 알 수 있다.

표 7 초기형상 및 최적형상의 절점 변위 비교

하중 (tf)	1번 절점(cm)		41번 절점(cm)		81번 절점(cm)	
	초기	최적	초기	최적	초기	최적
3	12.20	0.13	23.49	16.59	25.57	15.39
6	35.57	12.54	54.34	36.36	56.81	35.32
9	54.71	24.03	79.22	53.58	82.05	52.65
12	69.53	34.69	100.10	68.89	103.20	68.03
15	85.54	44.75	118.30	82.81	121.70	81.99
18	97.41	54.37	134.50	95.67	138.10	94.86
21	110.80	63.65	149.20	107.70	153.00	106.90
24	122.20	72.64	162.90	119.10	166.80	118.30
27	132.90	81.40	175.60	130.00	179.70	129.10
30	142.20	89.12	186.40	139.90	190.60	138.40

4. 터부 알고리즘

4.1 터부 알고리즘의 기본개념[6)]

터부 알고리즘(tabu algorithm)은 통계적인 방법을 이용하는 유전 알고리즘과는 달리 발견론적인 방법으로서 1970년대 초반에 Hansen에 의해 제시되었으며, Glover, Hu, Dhinga, Machado 등에 의해 발전되어 왔다. 터부알고리즘의 기본개념은 그림 12과 같이 나타낼 수 있다.

기존의 알고리즘은 시작점에서 개선하는 움직임을 한쪽 방향으로 진행하여 지역 최적해를 찾으면 멈추지만, 터부 알고리즘은 한쪽 방향으로만 진행하지 않고, 이미 지나왔던 지역 최적해에 다시 빠지는 일 없이 '최고로 가능한 움직임'으로 탐색을 계속하여 전역 최적해를 구한다. 터부 알고리즘의 단순화된 진행과정은 그림 12와 같다. 그림 12에서 T는 터부목록, $k_{\max}$는 최대반복수, x^*는 최적해, OPTIMUM은 이웃함수 중에 최적해를 찾는 함수이다.

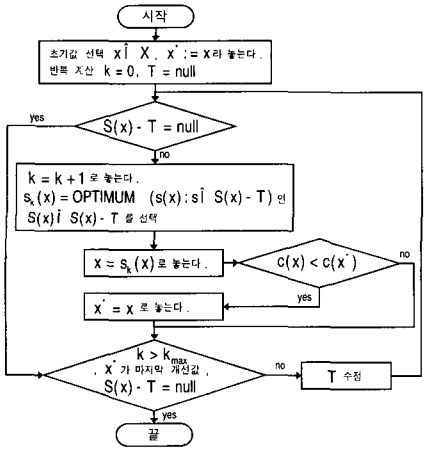

그림 12 터부 알고리즘의 개념

터부 알고리즘 진행시 터부목록에 포함된 이웃함수들은 진행에서 제외된다. 터부 알고리즘 과정에는 3가지 중요한 점이 있다.

(1) 터부목록 T를 사용함으로서 제약적인 탐색을 하며, 생성된 해들은 업데이트된 T에 의해 결정된다.
(2) 전 스텝에서 발견된 지역 최적해 중 가장 좋은 해를 개선하는 경우를 제외하고, 지역 최적화의 조건을 참고하지 않는다.
(3) 개선하는 움직임 중에서 가장 좋은 움직임은 각 단계에서 선택되고, OPTIMUM 함수 안에 삽입된 기준을 사용한다.

터부 알고리즘의 진행과정에서 터부목록 T를 제외한 원소들은 부등식 제약들의 집합을 만족해야 한다. 그림 12에서 OPTIMUM 함수가 최소화를 빨리 이루기 위해서는 $S(x)-T$를 축소화시키고, 이 범위에서 샘플링하는 방법을 사용한다. 극단적으로 후보해가 하나만 존재할 수 있고 이 경우는 $c(s)<c(x)$인 s를 뽑는 샘플전략은 무시할 수 있다. 그러므로 터부 알고리즘은 최적해가 있을 확률이 적은 영역에 많은 시간을 소비하지 않고, 최적해가 있을 확률이 높은 영역을 탐색하는데 더 많이 시간을 소비한다.

4.2 터부 알고리즘을 이용한 최적설계[8)]

터부 알고리즘의 타당성을 검토하기 위하여 그림 2와 같은 10절점 25부재 입체 트러스를 가지고 유전 알고리즘과 비교하였다. 정식화 및 설계변수는 다음과 같다.

설계변수 : A_i, $(i=1,2,3,\cdots,25)$

목적 함수 : $f(x)=\sum_{i=1}^{25}\rho l_i A_i$

제약 조건 : $\sigma_i \le \sigma_y$, $\sigma_i < \sigma_{ei}$

$\left(\sigma_y = 2.7579\times10^5 kN/m^2,\ \sigma_{ei} = -\frac{\pi^2 EI}{l_i^2}/A_i\right)$

단면적 : $A_i(cm^2) \in \{0.064516,\ 0.64516\times k\}$

$(k=1,2,\cdots,40)$

초기값 : $[A_1, A_2, \ldots, A_{41}] = 0.64516\times40\,(cm^2)$

표 8 재료 물성치

탄성계수	$E=6.895\times10^7 kN/m^2$
밀도	$\rho=2767.042\,kg/m^3$

표 9 설계 하중(kN)

절점번호	Fx	Fy	Fz
1	4.48	44.48	-22.24
2	0.0	44.48	-22.24
3	2.22	0.0	0.0
6	2.22	0.0	0.0

표 10 그룹화

설계변수(그룹화)	부재 번호
G1	1
G2	2, 3, 4, 5
G3	6, 7, 8, 9
G4	10, 11
G5	12, 13
G6	14, 15, 16, 17
G7	18, 19, 20, 21
G8	22, 23, 24, 25

유전 알고리즘과 터부 알고리즘에 의한 해석 결과는 표 11과 같으며, 얻어진 두 결과를 비교해 보면 터부 알고리즘은 수렴성이 좋을 뿐만 아니라 우수한 해를 찾고 있음을 알 수 있다. 터부 알고리즘에 의한 최적 단면을 그림 12에 나타내었다. 그림 13에서 보는 바와 같이 결정된 단면크기

표 11 단면 최적 비교결과 단위(cm^2)

설계 변수	유전 알고리즘	터부 알고리즘
G1	0.064	0.064
G2	0.650	0.650
G3	2.580	2.580
G4	0.064	0.650
G5	0.064	0.064
G6	0.650	0.650
G7	2.580	1.940
G8	2.580	2.580
반복수	93	67
중량(kgf)	210.3	208.8

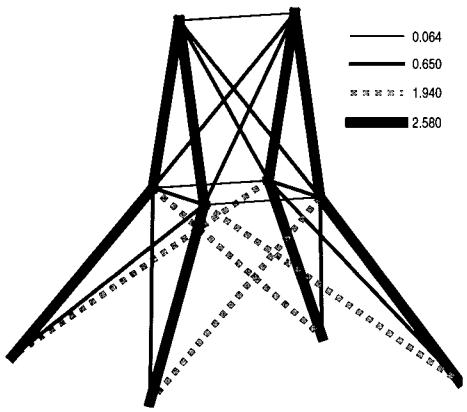

그림 13 터부 알고리즘에 의한 최적단면

에 따른 힘의 흐름을 알 수가 있었다.

5. 결 론

유전 알고리즘을 이용한 최적설계시 목적함수, 코딩법, 탐색전략 및 제어 파라미터 등을 달리하여 대공간 구조물의 적용성을 검토한 결과 기존 유전 알고리즘보다 더 효과적인 방법을 모색할 수 있었으며, 이는 대공간 구조물의 최적설계에 매우 유용할 것으로 판단된다. 또한 터부 알고리즘의 경우, 유전 알고리즘보다 더 좋은 수렴성을 보이고 있으나, 터부 알고리즘은 설계변수의 영역이 넓어지거나 설계 변수가 많아지면 함수계산 횟수가 급격히 증가되는 단점이 있다. 앞으로는 이를 상호 보완할 수 있도록 두 알고리즘을 복합적으로 사용하는 연구가 필요할 것으로 판단되며, 또한 더욱 더 수렴성을 향상시키고 정확한 해석을 위하여 설계 변수 영역의 확장으로 생기는 많은 계산량을 효과적으로 처리할 수 있는 병렬처리 기법에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Hayaliuglu, M. S., "Optimum Design of Geometrically nonlinear elastic-plastic Steel frames via Genetic Algorithm", *Computer and Sciences*, 1999
2. 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000
3. 현승협, "경계확장과 복합유전 알고리즘을 이용한 비선형 입체 트러스의 최적설계", 대한건축학회논문집(구조), 2003, pp. 3~10
4. Duan, M. Z., "An Improved Templeman's Algorithm for the Optimum Design of Trusses with Discrete Member Sizes", *Eng. Optim.*, Vol.9, 1983, pp.303~312
5. 조남철, "케이블 돔 구조물의 형상최적화에 관한 연구", 대한건축학회논문집(구조), 2003, pp. 53~60
6. 김여근외 2명, 메타 휴리스틱, 영지문화사, 1997
7. Arora, Introduction to Optimum Design, 1994
8. 조용원, "터부 알고리즘에 의한 대공간 구조물의 최적설계", 전산구조공학회 학술발표논문집, 2004, pp.171~178
9. Manoharan, S. and Shanmuganathan, S., "A Comparison of Search Mechanisms for Structural Optimization", *Computer and Sciences*, Vol. 73, 1999, pp. 363~372