

연속 및 이산화 최적알고리즘에 의한 단둥온실구조의 최적설계

Optimum Design of Greenhouse Structures Using Continuous and Discrete Optimum Algorithms

박춘욱(영진전문대)·이석건·이종원*·이현우 (경북대)

Park, Choon Wook·Lee, Suk Gun·Lee, Jong Won*·Lee, Hyun Woo

Abstract

In paper the discrete optimum design program was developed using the continuous and discrete optimum algorithms based on the SUMT and genetic algorithms. In this paper, the objective function is the weight of structures and the constraints are limits state design limits method. The design variables are diameter and thick of steel pipe. Design examples are given to show the applicability of the optimum design using the continuous and discrete optimum algorithms based on the SUMT and genetic algorithms of this study.

I. 서 론

오늘날 국제적인 경쟁사회에 있어서 기술자들은 보다 안전하고도 경제적인 설계에 많은 관심을 가지게 되었는데 최근의 컴퓨터 공학의 발달에 힘입어 대용량의 계산을 아주 짧은 시간과 적은 비용으로 수행 가능함에 따라 모든 설계 분야에 컴퓨터를 이용하는 최적설계 기법이 도입되고 있다. 최근 들어 온실구조는 해마다 강풍이나 적설 등으로 인한 파손으로 막대한 경제적 손실을 입고 있다. 그러나 1990년대 초반 온실의 구조안전과 구조설계기준설정, 자재의 규격화 및 표준화에 관한 연구가 일부 수행된바 있으나, 파이프 온실은 구조물로서의 공학적 설계나 유지관리에 관심이 부족하여 연구가 미비한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 단둥온실구조의 구조 역학적 연구의 일환으로 이산화 최적기법으로는 신뢰성과 범용성이 좋으며, 설계변수로서 이산화 된 코드를 사용하므로 조합최적화 문제에 적용이 매우 용이한 유전자 알고리즘(genetic algorithms, 이하 GAs)에 관한 연구(Arora, 1996; Reinschmidt, 1971; Rajeev 등, 1992) 와 연속최적기법으로는 다설계변수와 다제약조건식을 갖는 비선형 최적화 문제를 일련의 벌칙매개변수(penalty parameter)들을 사용하여 무제약 최소화 문제로 변형시켜 목적함수의 최소해를 가능해의 영역 안에서부터 지배적인 제약조건의 경계부로 연속적으로 접근시켜 최적해를 구하는 SUMT(sequential unconstrained minimization technique, 이하 SUMT)를 사용하기로 한다. 단둥 온실구조의 제약조건식으로는 한계상태설계기준으로 하며, 단둥 온실구조에 대하여 연속 및 이산화 최적설계문제를 SUMT와 GAs를 이용하여 체계화 하였다. 최적화 알고리즘 및 프로그램을 개발하고, 설계 예를 들어 비교·고찰하고자한다.

II. 재료 및 방법

1. 연속최적기법

구조물의 요소가 적절하게 결정되고 설계 변수와 목적함수 및 제약조건 등이 결정되면 다음 식 (1), 식(2)와 같은 일반적인 형태로 최적 설계 문제가 형성된다.

$$\text{Minimize } F(X) \quad (1)$$

$$\text{subject to } G_j(X) \geq 0 \quad (2)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, i$$

여기서, X 는 설계변수이며 $F(X)$ 는 목적함수이고 $G_j(X)$ 는 제약 조건식이다.

최적설계에서는 목적함수가 식(1)로, 제약조건식이 식(2)이 주어질 때 $F(X)$ 가 최소로 되도록 설계변수 X 를 결정하는 것이다. 본 연구에서는 다설계변수와 다제약조건식을 갖는 비선형 최적화 문제를 일련의 벌칙매개변수(penalty parameter)들을 사용하여 무제약 최소화 문제로 변형시켜 목적함수의 최소해를 가능해의 영역안에서 부터 지배적인 제약조건의 경계부로 연속적으로 접근시켜 최적해를 구하는 SUMT를 사용하기로 한다. 최적해에 접근하는데 소요되는 시간이나 값의 정도는 벌칙변수 α^r 및 설계변수의 변화량에 크게 좌우되지만, α^r 값에 따라 최적해에 수렴하지 않을 수도 있기 때문에 초기 설계치는 반드시 실행가능 설계치를 선택해야 하는 어려움이 있다. 초기치 t^r 및 α^r 를 이용하여 무제약 함수의 최소치를 식 (3)과 같이 구함으로써 일련의 설계점 X^r 을 구할 수 있으며 식 (3)에서 $\phi(X, \alpha^r, t^r)$ 은 식(4)와 같이 정식화 된다.

$$\text{Min } \phi(X, \alpha^r, t^r) \quad (3)$$

$$\phi(X, \alpha^r, t^r) = C(X) + \alpha^r \sum_{j=0}^m \frac{1}{G_j(X)} + t^r \sum_{j=1}^m \max. [G^j(X), 0]^2 \quad (4)$$

식(4)를 penalty function으로 사용하는 방법을 Mixed interior-exterior penalty function method라 하며 본 연구에서는 이 기법을 사용하여 최적화 문제를 형성하였다. 또한 SUMT에 의한 다단계 동적계획법에 의한 최적화 알고리즘은 그림 1과 같다.

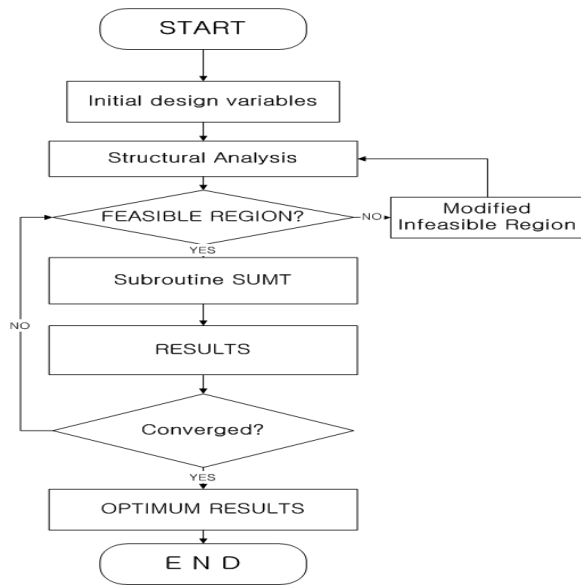


그림 1 SUMT에 의한 연속최적설계 알고리즘

되는 매우 중요한 요소가 적합도이며, 본 연구에서는 목적함수의 역수를 기본적으로 사용하였으며 이때 목적함수가 1.0 미만의 수치로 표현되는 것을 방지하기 위하여 (Kavlie, 1971)을 참조하여 식 (5)과 같이 최대 목적함수 값과의 비를 적합도로 표현하였다.

$$Fitness = \frac{Object_{Max}}{Object_{Sum}} \quad (5)$$

$$Object_{Max} = \sum_{i=1}^n A_{max} \times L_i \quad (6)$$

$$Object_{Sum} = \sum_{i=1}^n A_i \times L_i \quad (7)$$

여기서, A_{\max} 는 검색에 사용되는 단면 데이터베이스의 단면적중 가장 큰 값이며 A_i 는 i 번째 부재의 단면적이고 L_i 는 i 번째 부재의 길이이다.

그림 2는 본 연구에서 이산화최적기법인 GAs 적용절차를 도시화한 것으로 초기화절차와 진화적 절차 및 유전적 절차 3가지로 구성된다. 그림2의 초기화 작업에서 GAs은 임의의 난수를 발생시켜 한 세대의 개체 수만큼의 염색체를 생성해 내어야 한다. 이때 본 기사에서 적용한 형상최적설계를 수행하기 위해 절점이동의 방향과 상·하한 치를 결정하고 검색할 데이터의 간격을 결정한다. 이렇게 생성된 염색체들은 진화적 절차에 전달되며 디코딩 수치화 작업을 통하여 실제 설계 변수에 사용될 수치로 변환되며, 얻어진 설계 변수들을 사용하여 구조 해석을 수행한다. 진화적 절차는 구조 해석의 결과를 분석하여 염색체의 적합도를 계산하며 계산된 적합도를 유전적 절차에 전달한다. 유전적 절차에서는 GAs의 연산자인 복제와 교배 및 돌연변이 등을 통하여 다음 세대의 유전자를 생성하게 되며 다시 진화적 절차에 전달한다

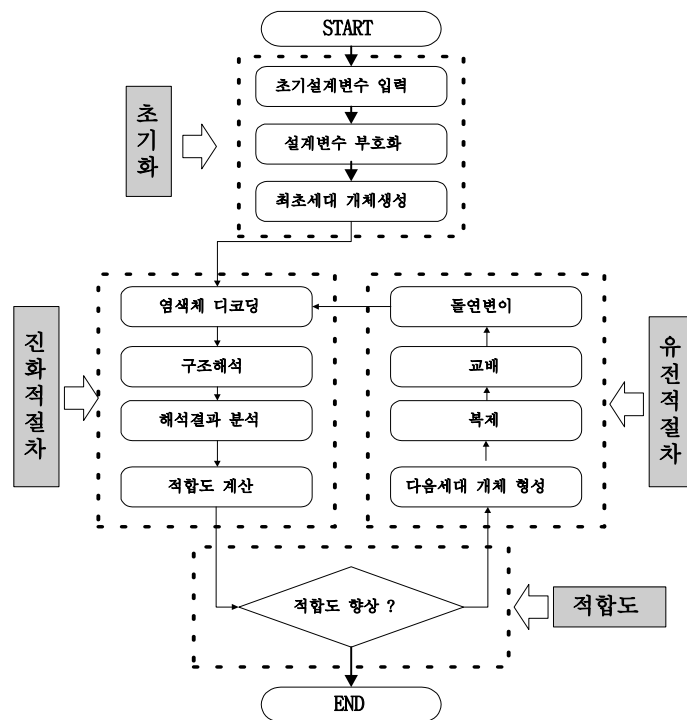


그림 2. GAs 적용 흐름도

3. 목적함수식 및 제약조건식

최적화를 위한 목적함수로 전체구조물이 최소중량의 설계가 되도록 강재의 중량함수를 사용하였으며 다음식(8)과 같이 정의 된다.

$$\text{Minimize} : F(X)$$

$$F(X) = \sum_{i=1}^n \rho A_i L_i \quad (8)$$

여기서, $F(X)$: 목적함수, X : 설계변수, n : 구조물의 부재수, A_i : i 번째 부재의 단면적, L_i : i 번째 부재의 길이, ρ : 강재의 단위중량 이다.

한계상태설계기준을 기준으로 하여 인장 및 압축응력도, 휨-인장 및 휨-압축응력도, 세장비, 처짐에 대한 제약식과 부재를 원형강관으로 사용할 경우의 국부좌굴 및 부재의 두께와 지름에 대한 제약식은 다음과 같다.

가. 응력제약 조건식

$$(\phi_t \text{ or } \phi_c) (P_n)_i > (P_u)_i \quad (9)$$

여기서, ϕ_t : 인장저항계수(0.9), ϕ_c : 압축저항계수(0.85), $(P_u)_i$: i 번째 부재의 설계강도, $(P_n)_i$: i 번째 부재의 공칭강도(인장 : $P_n = A_g F_y$, 압축 : $P_n = A_g F_{cr}$), A_g : 부재의 총단면적, F_y : 항복강도($\lambda_c \leq 1.5$ 일때 : $F_c = (0.65^{\lambda_c^2}) F_y$, $\lambda_c > 1.5$ 일때 : $F_{cr} = (0.85/\lambda_c^2) F_y$),

$$\lambda_c = \frac{KL}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E_s}} \text{이다.}$$

나. 조합력 제약조건식

$$\left(\frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0.2 \right) \text{인 경우 : } \frac{(P_u)_i}{\phi (P_n)_i} + \frac{8}{9} \left[\frac{(M_{ux})_i}{\phi_b (M_{nx})_i} \right] \leq 1.0 \quad (10)$$

$$\left(\frac{P_u}{\phi P_n} < 0.2 \right) \text{인 경우 : } \frac{(P_u)_i}{2\phi (P_n)_i} + \left[\frac{(M_{ux})_i}{\phi_b (M_{nx})_i} \right] \leq 1.0 \quad (11)$$

여기서, ϕ_b : 휨 저항 계수(0.9)이며 $(M_u)_i$: i 번째 부재의 소요휨강도이고 $(M_n)_i$: i 번째 부재의 공칭휨강도이다.

다. 관경 두께비 제약조건식

$$(\text{압축재}) \text{인 경우 : } \frac{240}{F_y} > \frac{D_i}{t_i} \quad (12)$$

여기서, D_i : i 번째 원형강관의 직경이고 t_i : i 번째 원형강관의 두께이다.

라. 세장비 제약조건식

$$200 - \frac{KL}{r} > 0 \quad (13)$$

여기서, r : 좌굴축에 대한 단면2차반경이다.

마. 사용성 제약조건식

단면의 사용성 및 단면형상에 대한 제약조건식은 다음의 식으로 정식화 된다.

$$D_i - 1.59 > 0 \quad (14)$$

$$t_i - 0.1 > 0 \quad (15)$$

$$5.08 - D_i > 0 \quad (16)$$

$$0.2 - t_i > 0 \quad (17)$$

바. 변위 제약조건식

$$\delta_{\max} - \frac{L}{100} > 0 \quad (18)$$

$$\delta_x - \frac{H}{60} > 0 \quad (19)$$

여기서, δ_{\max} : 서까래 최대수직변위, δ_x : 기둥 최대수평변위, L : 구조물의 전체 길이, H : 기둥높이이다.

4. 연속 및 이산화최적 단동온실 모델 및 적용하중

그림 3과 같은 단동온실에 대하여 SUMT를 이용한 연속최적설계를 수행하기 위해 먼저 부재에 대한 각부재의 초기 설계변수를 가정하여 구조해석을 한 후 설계 제약조건식을 만족하는 각 단면에

대해서 최적화를 실시하였다. 단동온실의 부재단면의 최적화가 이루어진 후, 목적함수의 값이 결정되면 바로 전단계의 목적함수값과 비교하여 허용범위에 수렴하지 않았을 경우는 다시 최적화 과정을 반복하도록 하였다. 온실구조의 중량을 목적 함수로 사용하였으며 제약 조건으로는 식 (9)~식 (19)와 같고 한계상태설계기준을 근거로 하였다. 그리고, 부재의 물리적 성질은 표 1과 같으며 하중조건은 설계풍속 30m/s, 설계적설심 20cm, 서까래 간격은 60cm로 하였다.

표1. 부재의 물리적 성질

부재의 항복강도 $F_y(t/cm^2)$	탄성계수 $E(t/cm^2)$	단위중량 $\rho(t/cm^3)$
2.4	1700	7.85×10^{-6}

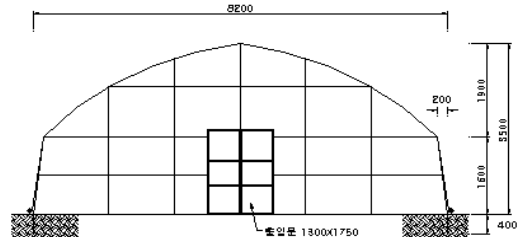


그림 3. 단동온실 규격

단동온실구조에 작용하는 풍하중은 다음 식 (20)로 구한다.

$$W_v = c \times q \times \alpha \times \beta \quad (kg/m^2) \quad (20)$$

여기서, c : 풍력계수, α : 지형이나 시설의 배치에 따른 할증계수, β : 차폐물이 있는 경우의 절감계수, q : 속도압(kg/m^2)이다. 할증계수 α 와 절감계수 β 는 무시할 수 있으며 풍력계수 c 그림 4와 같고 속도압은 식 (21)로 구한다.

$$q = 0.0197v^2\sqrt{h} \quad (21)$$

여기서, v : 설계용 풍속(m/s), h : 원예시설 각 부의 지표면으로부터의 높이(m)로서 본 연구에서는 처마높이와 지붕높이의 평균값으로 하였다. 그리고, 적설하중의 분포형태는 그림 5와 같으며, 식 (22)으로 산정하였다.

$$W_s = \rho \times D \times \alpha \quad (kg/m^2) \quad (22)$$

여기서, ρ 는 설의 단위체적중량으로 본 연구에서는 $1.0kg/cm^3$ 적용하였으며, D 는 설계용 적설심(cm)이고 α :지붕경사 및 피복재의 종류에 따른 절감계수로 0.75를 적용하였다.

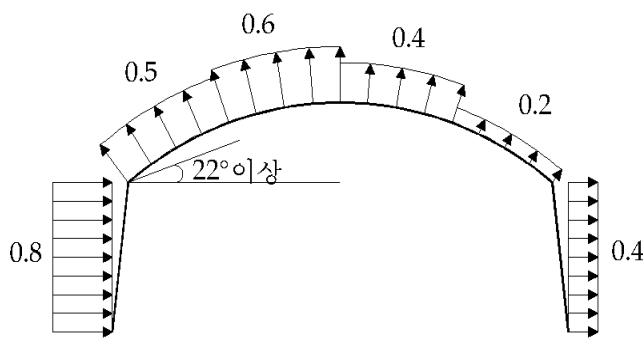


그림 4. 풍력계수 분포도

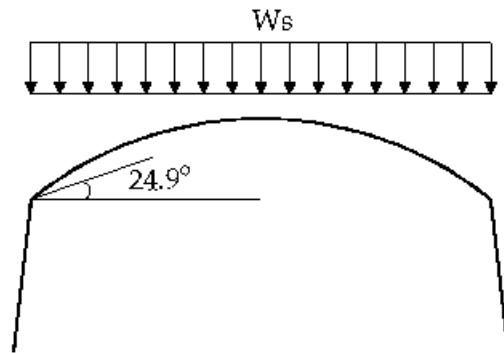


그림 5. 적설하중 분포도

III. 결과 및 고찰

본 연구에서는 SUMT와 GAs을 이용하여 단동온실구조에 대하여 구조해석과 단면 최적화를 동시에 수행하여 연속 및 이산화 최적설계문제를 수행하고, 그 결과를 비교·고찰하였다.

SUMT를 사용한 연속최적설계를 수행한 최적설계 결과는 표 5 와 같다.

표 5. 변위제약에 따른 단둥은실구조의 연속최적설계 결과

CASE	변위 고려					변위 무시				
	부재력 (tf-cm)	직경(D) (cm)	두께(t) (cm)	단면적 (cm ²)	목적함수 (tf)	부재력 (tf-cm)	직경(D) (cm)	두께(t) (cm)	단면적 (cm ²)	목적함수 (tf)
적설하중	2.635	3.989	0.159	1.924	0.0187	2.635	3.593	0.101	1.108	0.0108
풍 하 중	2.276	3.770	0.153	1.738	0.0169	2.276	3.347	0.100	1.028	0.0099
결정단면	φ-39.89×1.6mm					φ-35.93×1.0mm				

최종 수렴하기 전까지 5번의 반복수행과정을 거쳤으며 반복횟수에 따른 목적함수의 수렴과정은 그림 6과 같다.

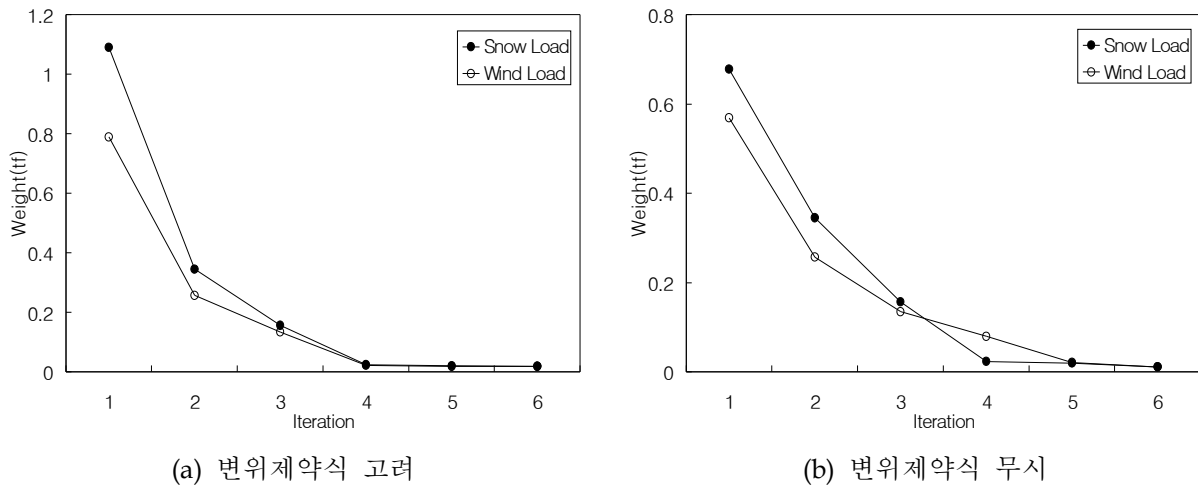


그림 6. 연속최적설계값의 수렴과정

그림 3과 같은 단둥은실에 GAs를 이용한 이산화 최적 설계를 수행하기 위해 구조해석과 설계에 적용되는 은실용 파이프는 KSD 3760 비닐하우스용 아연도 강관에 명시된 46개의 부재를 사용하였으며 강관에 대한 단면 성질은 프로그램에서 자동으로 계산이 수행되도록 하였다. 부재의 중량을 목적 함수로 사용하였고, 제약 조건으로는 한계상태설계기준을 근거로 하였다.

염색체길이 및 설계공간은 표 6에서 보는 바와 같으며 교배확률과 돌연변이확률 매개변수는 각각 0.5와 0.025를 사용하였으며, 설계집단은 60, 최대세대수는 3000번으로 하였다.

표 6. 단둥은실의 이산최적설계 유전자 길이

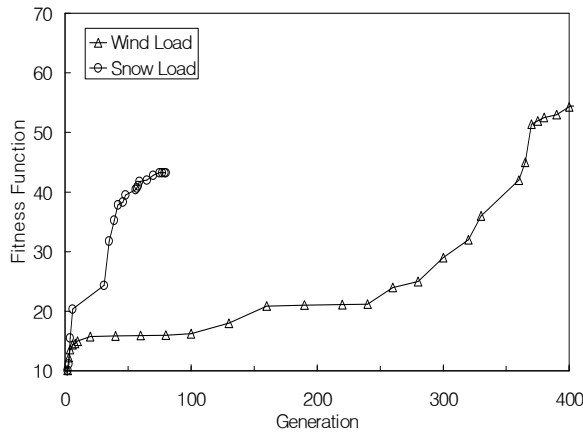
부재그룹	설계공간	유전자 길이(bit)
1	47	6

GAs에서 염색체의 생존 확률 계산의 기준이 되는 매우 중요한 요소가 적합도이며, 본 연구에서는 목적함수의 역수를 기본적으로 사용하였으며 이때 목적함수가 1.0 미만의 수치로 표현되는 것을 방지하기 위하여 (Kavlie, 1971)을 참조하여 식 (5)와 같이 최대 목적함수 값과의 비를 적합도로 표현하였다.

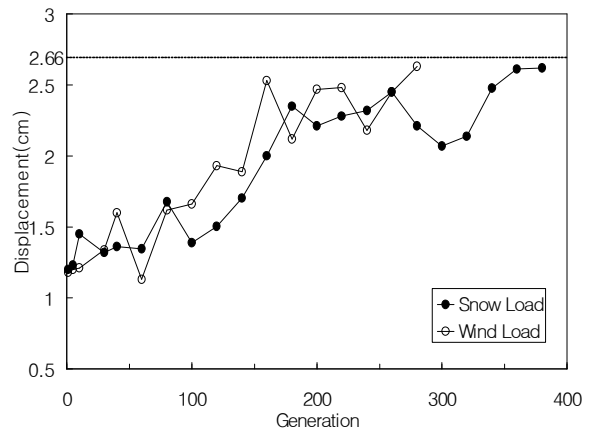
이산 최적설계를 수행한 결과는 표 7과 같으며, 적합도의 변화형상과 세대증가에 따른 기동수평 최대변위의 변화형상은 각각 그림 7에 나타나 있다.

표 7. 변위제약에 따른 단둥은실구조의 이산최적설계 결과

CASE	변위 고려					변위 무시				
	부재력 (tf-cm)	직경(D) (cm)	두께(t) (mm)	단면적 (cm ²)	목적함수 (tf)	부재력 (tf-cm)	직경(D) (cm)	두께(t) (mm)	단면적 (cm ²)	목적함수 (tf)
적설하중	2.635	3.81	1.7	1.924	0.0189	2.635	3.81	1.4	1.337	0.0130
풍 하 중	2.531	3.81	1.5	1.738	0.0168	2.531	3.81	1.2	1.154	0.0112
결정단면	ϕ -38.1×1.7mm					ϕ -31.8×1.4mm				



(a) 변위제약식 고려



(a) 변위제약식 무시

그림 7. 변위를 고려한 단둥은실구조의 적합도함수변화

이상의 연구결과에서 보는 바와 같이, 유전자알고리즘을 이용하여 구조해석과 단면 및 위상을 동시에 고려할 수 있으며, 변위제약식을 고려하여 목적함수를 비교하면 연속최적설계결과가 이산최적설계결과 값에 비해 1.1%정도, 변위제약식을 고려하지 않은 경우는 10.9% 더 경제적임을 알 수 있으며 풍하중에 비해 설하중에 의한 최적 설계값이 결정됨으로 설하중에 의한 설계가 더 지배적임을 알 수 있었다. 그리고, 그림 7에서와 같이 최적치 검색이 각각 82와 400 세대에서 발생되었으며 이후세대가 증가되어도 종료될 때까지 더 이상의 적합도가 증가가 없는데 이는 설계공간에서 효율적으로 최적해가 검색됨을 간접적으로 증명하는 것이고, 세대의 증가에 따른 기동최대수평변위제한이 만족함을 확인할 수 있었다. 따라서, 연속 및 이산최적설계알고리즘에서 경제적인 최적설계가 가능함을 보였고, 다양한 최적설계정보를 얻는데 효과적임을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서 단둥은실구조의 연속 및 이산최적설계 문제를 SUMT 및 유전자알고리즘을 이용하여 한계상태설계기준을 근거로 하여 구조해석과 연속 및 이산최적설계를 각각 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구는 기존연구에서 다루기 힘든 이산형, 연속형 변수를 고려하여 단둥은실구조의 최적설계를 효과적으로 수행할 수 있는 알고리즘을 제시하고, 구조해석과 단면 연속 및 이산화 최적화를 동시에 수행할 수 있는 최적설계 프로그램을 개발하였다.

2. 본 연구의 알고리즘 및 프로그램을 통하여 연속최적 설계값이 실제 공장에서 제작되는 상용 제품을 이용한 이산최적 설계값보다 더 경제적임을 알 수 있었다.
3. 설계자의 경험에 의한 설계보다 다양한 설계기준을 근거로 온실구조의 최적화가 보다 신속하게 실제구조물의 거동에 근접하는 최적설계가 됨을 알 수 있고, 설계자에게 초기설계단계에서 구조물의 형상에 대한 선택을 도울 수 있을 뿐 만 아니라 공학적인 다양성과 제약 조건 등을 취급하는데 아주 유연하게 대처할 수 있음을 설계 예에서 알 수 있었다.

향후 본 연구에서는 3차원 구조해석에 의한 단면 및 형상 최적설계가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Arora, J. S., and Huang, M. W., Discrete Structural Optimization with Commercially Available Sections, Structural Eng./Earthquake Eng. ASCE, Vol. 13, No. 2, pp. 93~110
2. Reinschmidt, K. F., 1971, Discrete Structural Optimization, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 97, No. ST1, pp. 133~156
3. Rajeev, S., and Krishnamoorthy, C. S., 1992, Discrete optimization of structures using genetic algorithm, Journal of Structural Engineering, ASCE, 118(5), pp. 1233~1250
4. Rao, S. S., Sundaraju, K. and Praksah, B. G., 1992, Multiobjective fuzzy optimization techniques for engineering design, Computer & Structures, 42(1), Pergamon Press, pp.37-44.
5. Shih C.J. and Yu, K.C.(1995), Weighting objectives strategy in multi-criterion fuzzy mechanical and structural optimization, Structural Engineering and Mechanics, Vol.3, No.4, pp.373-382.
6. Park, C. W. , and B.Y. Youh, M.M. kang., 2000, Sizing and Topology Optimum Design of Truss Structures Using Genetic Algorithms, Shell and Spatial Structures, Vol 2, pp. 843~850
7. Rajeev, S., and Krishnamoorthy, C. S., 1997, Genetic Algorithms-Based Methodologies For Design Optimization Of Trusses, Journal Of Structural Engineering, March, pp. 350~358.
8. Rajan, S. D., 1995, Sizing, Sharp, And Topology Design Optimization Of Trusses Using Genetic Algorithm, Journal Of Structural Engineering, October, pp.1480~1487.
9. Jenkins, W. M., 1991, Towards Structural Optimization via The Genetic Algorithm, Computers and Structures 40(5), pp.1321~1327.
10. Liebman, J. S., Khachaturian, N., and Chanaratna, V., 1981, Discrete Structural Optimization, Journal of Structural Engineering, ASCE 107(ST11), pp.2177~2197.
11. Kavlie, D., and Moe(1971), Automated Design of Frame Structures, Journal of the Structural Division, ASCE 97(ST1), pp.33~62.
12. 박춘옥, 조인기, 강문명(2000), 유전자 알고리즘에 의한 철골 연속보의 위상 및 이산화 최적설계, 대한건축학회 논문집, 대한건축학회, 제16권 제8호, pp. 3~10
13. 이동훈, 1991, 퍼지 집합이론을 이용한 시스템 신뢰도 분석, 박사학위논문, 한양대학교.
14. 김명선, 2002, 퍼지-유전자 알고리즘에 의한 트러스의 형상 이산화 최적설계, 박사학위논문, 경북대학교.
15. 박춘옥, 2001, 개선된 유전자 알고리즘에 의한 입체트러스의 단면 및 형상 이산화 최적설계, 박사학위논문, 경북대학교.
16. 박춘옥, 여백유, 강문명, 2002, 유전자알고리즘에 의한 평면 및 입체 트러스의 형상 및 위상최적설계, 한국 쉘·공간구조학회 논문집, 제2권 제3호, pp. 93~102.
17. 김기화(1994), Genetic Algorithms에 의한 다목적함수 최적구조설계, 박사학위논문, 서울대학교