

유전자 알고리즘을 사용한 강구조물의 최적설계

김 봉 익^{1)*}

교수, 경상대학교, 해양토목공학과

Optimum Design of Steel Structures Using Genetic Algorithms

Kim, Bong Ik^{1)*}

¹⁾ Professor, School of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea

ABSTRACT : We present optimum design for truss and frame structures subject to constraints on stresses, displacement, and natural frequency. The optimum design procedure is used discrete and continuous design variables and Genetic Algorithms. Genetic Algorithms is used the method of Elitism and penalty parameters in order to improved fitness in the reproduction process, and optimum design is used steel(W-section) and pre-made discrete cross-section. Truss and frame structures optimization examples are used for 10-Bar truss, 25-Bar truss, 1-bay 2-story frame, 1-bay 7-story frame, and these examples are employed to demonstrate the availability and serviceability of Genetic Algorithms for solving optimum design of truss and frame.

KEYWORDS : discrete optimization, natural frequency, genetic algorithms, truss, frame

1. 서 론

건축구조물(고층건물)이나 플랜트와 같은 대형 해양구조물은 정적하중과 지진이나 돌풍 또는 파도와 같은 여러 종류의 동적하중을 받고 있다. 이와 같이 동적하중을 받고 있는 구조물들은 구조물의 고유진동수와 동적하중에 의한 진동수가 일치할 때 발생하는 공진(Resonance)으로 인해 구조물에 큰 피해를 발생시킬 수 있다. 이처럼 구조물이 공진을 피하기 위해서는 우선 구조물의 고유진동수를 알아야 하며, 이를 바탕으로 구조물에서 동적하중에 의한 진동수와 고유진동수가 일치하지 않도록 설계되어야 할 것이다. 일반적으로 구조물설계에는 보다 안전하고 경제적인 설계가 될 수 있도록 최적설계가 되어야 한다. 구조물최적설계는 연속변수에 의한 설계와 이산변수에 의한 설계로 나눌 수 있으나, 이를 혼합하여 설계하는 경우도 있다. 최근 유전자 알고리즘과 고유진동수 및 여

러 제약조건을 고려한 구조물최적설계에 대한 연구는 이상진, 조강표 *et al.*, Lingyun *et al.*, Sadek, Sedaghati *et al.*, Tong and Liu, Pantelides and Tzan, Kaveh, Wang 등 많은 학자들에 의해 연구되었다. 이상진은 쉘의 고유진동수가 최대가 될 때 나타나는 쉘의 형상과 두께에 대해 최적화기법을 사용하여 연구하였다^[1]. 조강표 등은 풍하중에 의한 구조물의 안정성을 고려하여 건축물의 수평진동에 대한 허용가속도를 평가하는 연구를 하였다^[2]. Lingyun *et al.*은 여러 가지 동적제약조건을 고려한 트러스의 형상 및 단면의 설계에 Niche hybrid 유전자 알고리즘(NHGA)을 사용하여 최적화하였다^[3]. Tong and Liu는 동적 및 응력, 변위제약조건을 고려한 트러스구조물의 설계에 이산자료를 사용한 이산최적설계에 대해 연구하였다^[4]. Sedaghati *et al.*는 진동수제약조건을 고려한 트러스와 프레임 구조물에 Finite element force method 방법을 사용하여 최적설계 하였다^[5]. 유전자 알고리즘은 확률론적 접근방식에 근거하여 주로 전공간 탐색에 매우 효과적으로 사용되는 검색방법이며, 다양한 분야의 공학에 널리 사용되고 있다. 최근에는 유전자 알고리즘을 이용한 구조물의 이산최적화문제에 대한 연구도 많이 다루어지고 있다^{[6],[7]}. 본 연구에서는 트러스와 프레임 구조물의 설계시에 준연속변수와 이산자료를 사용한 이산최적설계를 시도하였으며, 최적화 기법으로는 유전자 알고리즘을 사용하였다.

Note.-Discussion open until June 30, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 21, 2012; revised December 13, 2012; approved on December 17, 2012. © KSSC 2012

* Corresponding author

Tel. +82-55-772-9124 Fax. +82-55-772-9120
E-mail: bikim@gnu.ac.kr

이산최적설계 예제에는 동적제약조건(고유진동수) 및 부재응력제약과 특정위치에서의 변위제약조건을 가지는 10 bar, 25 bar 트러스를 대상으로 하였으며, 프레임 구조물의 경우는 고유진동수 제약조건만을 사용하여 1경간 2층과 1경간 7층 구조물을 최적화 하였다. 트러스구조물의 최적화에 두 경우의 설계방법을 사용하였다. 첫째, 트러스구조물의 단면설계에 준 연속변수를 사용하여 최적설계를 하였으며, 둘째, 단면설계에 유한개의 이산자료 중에서 단면을 선택하는 이산최적설계를 하였다. 프레임 구조물의 경우 1경간 2층의 경우 준연속변수와 이산변수를 사용하였고, 1경간 7층의 경우는 준연속변수만을 사용하여 최적설계 하였다. 여기서 준연속변수(Pseudo continuous)란 유전자 알고리즘의 특성상 연속변수를 주어진 구간에서 유한개의 연속변수화 하여 문제를 해결하는 변수를 의미한다. 본 연구에서는 연속변수를 사용하는 최적설계에 준연속설계변수를 사용하였다^{(8),(9)}.

2. 구조물의 최적화 문제형성

구조물 최적화에는 여러 종류의 설계조건들이 있으나 주로 비용이 최소가 되게 하든지 아니면 총무게가 최소가 되게 설계하고 있다. 본 연구에서는 구조물의 총 무게가 최소가 되게 최적설계 하였다. 최적설계경우 목적함수(W)는 구조물의 총 무게가 되며, 제약조건은 고유진동수와 부재응력 및 특정 위치에서의 변위제약이다. 구조물의 최적설계에 대한 목적함수 W 및 제약조건식은 다음과 같다.

$$\text{Minimize } W = \sum_i^n \rho_i A_i L_i \quad (1)$$

subject to

$$g_j = \omega_j^2 - \tilde{\omega}_j^2 \geq 0, j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2)$$

(m natural frequency constraints)

$$A_i - \tilde{A}_i \geq 0, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

(n cross-sectional constraints)

$$\sigma_i - \tilde{\sigma}_i \geq 0, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

(n stress constraints)

$$d_i - \tilde{d}_i \geq 0, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

(n displacement constraints)

여기서,

ρ_i, A_i, L_i : i 번째 부재에 대한 밀도, 단면적 및 길이

$\omega_j, \tilde{\omega}_j$: j 번째 고유진동수 및 주어진 특정 고유진동수

A_i, \tilde{A}_i : i 번째 부재의 단면적 및 최저 한계값

$\sigma_i, \tilde{\sigma}_i$: i 번째 부재의 응력 및 최저 한계값

d_i, \tilde{d}_i : i 번째 부재의 변위 및 최저 한계값

트러스 구조물의 최적설계시 10 bar 트러스에서는 2경우의 설계방법을 선택하였다. 첫째, 단면의 설계에 연속변수를 사용하여 최적설계를 하였다. 둘째, 단면의 설계에 이산자료를 사용하여 단면을 설계하는 이산최적화를 시도하였다. 이 2경우 모두 구조물의 총무게가 최소가 되게 설계하였으며, 연속변수의 경우 제약조건으로는 고유진동수를 적용하였고, 이산변수의 경우 고유진동수 제약조건과 부재응력 및 변위제약조건을 사용하여 최적설계 하였다. 25 bar 트러스의 경우는 이산자료를 사용하여 단면을 최적설계하는 이산최적화를 시도하였다. 이 경우 구조물의 총 무게가 최소 되게 설계하였으며, 고유진동수와 부재응력 및 변위 제약조건을 사용하였다. 프레임구조물에서 1경간 2층 프레임의 경우 연속설계변수에 의한 설계와 이산자료를 사용한 이산최적설계를 시도하였으며, 1경간 7층 프레임의 경우 연속변수만을 사용하여 단면최적설계 하였다. 제약조건은 고유진동수를 적용하였다.

3. 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 생물진화 과정을 수리 모델화시켜 문제를 해결하는 방법이며, 이진코드(Binary code)를 사용함으로 이산설계변수를 사용하여 설계하는 이산최적화에 매우 효율적이다^{(10),(11),(12)}. 유전자 알고리즘은 주로 이산자료를 사용한 이산최적화에 효율적이지만 준연속변수를 사용하여 연속변수에 대한 최적설계에도 많이 사용되고 있다. 유전자 알고리즘은 제약조건 및 복잡하중에 대한 제약을 두지 않으며, 초기 설계값(초기치)이 요구되지 않는다. 유전자 알고리즘은 함수의 미분가능성이나 함수의 convexity를 요구하지 않고 단지 함수의 값만 요구되므로 이산변수를 사용하는 최적화문제의 해결에는 매우 적합한 설계방법이라 할 수 있다. 또한 유전자 알고리즘은 일반적인 최적화 방법에서처럼 초기 설계값을 사용하지 않고 설계집단을 사용하므로 설계값이 한쪽으로 치우쳐서 나쁜 결과를 가져오는 현상을 다소 해소 할 수 있다. 그러나 유전자 알고리즘은 설계집단을 사용함으로써 다른 여러 가지 최적화 방법보다는 다소 많은 계산이 요구되지만 전공간설계(Global minima)를 찾을 수 있는 이점이 있다. 유전자 알고리즘은 번식(Reproduction), 교차(Crossover), 돌연변이(Mutation)등의 과정을 거쳐 새로운 세대를 이루게 되며, 이러한 세대가 반복되면서 우수한 설계들로 구성되는 설계집단 중 가장 우수했던 설계가 최적의 해(설계)가 되는 것이다.

3.1 적합도 함수

유전자 알고리즘에서 사용된 적합도함수는 아래와 같다

$$F(x) = F(x) \quad \text{if } x \in \text{feasible} \quad (6)$$

$$F(x) = F(x)(1 + \alpha) \quad \text{otherwise}$$

여기서, $F(x)$; 부재의 적합도 함수

α ; penalty parameter(0.01-0.02)

α_i 는 제약조건의 만족 여부에 따라 0(zero)과 0.01-0.02의 값을 사용하였다. 제약조건이 만족이 되면 0의 값이 부여되고, 제약조건이 만족되지 않은 경우에도 1%-2%에 해당되는 설계는 집단에 포함시키고 그렇지 않은 경우는 큰 상수 값을 사용하여 적합도가 큰 부재는 설계집단에서 제외시켰다.

3.2 설계변수의 코드화

유전자 알고리즘은 설계변수 그 자체를 사용하지 않고 문자열(String)을 사용한다. 유전자 알고리즘은 설계변수에 해당되는 각 문자열은 생물학에서는 염색체에 해당되며, 이산설계변수의 값을 나타낼 수 있는 2진수(Binary numbers)를 사용한다. 다시 말해서, 10진수의 설계변수는 코드변환과정으로 2진수로 변환되고, 이 2진수로 구성된 문자열이 하나의 설계변수가 된다.

3.3 번식

번식은 현 세대의 설계집단에서 다음세대의 설계집단으로 보다 나은 설계를 전달하기 위한 정보를 각 개체에 제공하는 과정이다. 번식과정에서 초기 설계집단은 모두 무작위하게 집단이 구성된다. 번식은 적합성이 좋은 개체는 선택될 기회가 많이 주어지고 반면에 적합성이 나쁜 개체는 선택될 기회가 적게 주어지도록 각 개체에 확률을 부여하고, 각각의 개체에 부여된 확률에 따라 각 개체들이 새로운 집단에서 새로운 개체들로 선택되는 과정을 말한다. 본 연구에서는 번식과정에서 Elitism을 사용하였으며, Elitism이란 현 세대에서 가장 우수한 하나의 개체만 다음세대에서 전달되며, 다음세대에 전달된 하나의 개체 외에는 모두가 무작위과정(Random processor)을 거쳐 새롭게 설계집단을 구성하도록 하는 과정이다.

3.4 교차

교차는 번식의 과정 후 비교적 적합성이 우수한 개체들로

구성된 집단에서 인자를 서로 교환함으로써 이전 세대보다 나은 방향으로의 개체를 재구성하는 과정이다. 교차는 한 쌍의 2진 문자열 사이에서 이루어지며 각각의 2진 문자열들은 번식 후 구성된 현 집단에서 무작위로 선택된다. 교차는 모든 개체에 대해 전부 이루어지는 것이 아니라 교차확률(p_c)에 따라 선택적으로 이루어진다. 본 연구에서는 2점 교차방법을 사용하였으며, 교차확률(p_c)은 0.5를 사용하였다.

3.5 돌연변이

돌연변이는 번식과정중 열성 개체만으로 이루어지는 것을 방지하기 위해 개체들 사이에 새로운 변화를 주는 매우 중요한 과정이다. 생물학에서도 돌연변이를 통해 새로운 종이 나타나듯이 유전자 알고리즘에서도 돌연변이과정을 통해 또 다른 국지최적설계(Local minima)를 찾을 수 있다. 즉 돌연변이 과정은 선택 된 하나의 국지 최적설계에 머물지 않고 또 다른 국지 최적설계로 이동 할 수 있게 하는 과정이다. 돌연변이는 한 집단내의 모든 2진 문자열의 전체 비트를 대상으로 하며, 각 비트에 대해 무작위 수와 돌연변이 확률을 비교하여 무작위수가 돌연변이 확률(P_m) 보다 적은 경우 해당되는 비트가 반대값(0은 1로, 1은 0으로)을 갖는 과정이다. 돌연변이 확률은 0.02를 사용하였다.

본 연구에서는 유전자 알고리즘의 번식과정에서 새로운 설계집단을 형성하는 방법을 제시 하였으며, 특징은 다음과 같다.

- i) 번식과정에서 설계집단을 구성할 때 적합도함수의 조건에 따라 제약조건이 만족되는 경우는 수용하고 그렇지 않은 경우의 설계는 큰 Penalty를 주어 설계집단에서 제외시키고 모든 설계제약조건이 만족되는 설계만으로 새로운 설계집단을 구성하였다.
- ii) 번식과정에서 Elitism의 방법을 사용하였으며, 하나의 가장 우수한 개체가 다음 세대에서 2개의 새로운 개체가 되도록 하였다. 그리고 2개의 개체가 연속하지 않도록 무작위로 구성되도록 하였다

4. 설계예제

4.1 트러스 구조물

10 bar 트러스 구조물의 경우 연속변수와 이산변수를 사용하였으며, 25 bar 입체트러스의 경우 이산변수를 사용하여 최적설계하였다. 두 경우 재료의 탄성계수 $E=7.03 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ (10^4 Ksi), 부재의 밀도 $\rho=2770 \text{ kg/cm}^3$ (0.1 lb/in^3)를 사용하였다^{(13),(14)}.

4.1.1 10 Bar 트리스(연속변수 경우)

10 bar 트리스 구조물(Fig. 1)의 경우에 연속변수를 사용하여 최적설계 하였다. 모든 부재에서 단면의 최소값은 0.645cm^2 로 하였으며, 4개의 절점(node 1, 2, 3, 4)에 454kg (1,000.0lb)의 질량을 첨가 하였다. Active 제약조건은 고유진동수 $\omega_1 \geq 7.0\text{Hz}$, $\omega_2 \geq 15.0\text{ Hz}$, $\omega_3 \geq 20.0\text{Hz}$ 만 적용되었으며, Table 1은 본 연구에서 제시된 유전자 알고리즘에 의한 최적 설계결과이며, 여러 연구결과와 서로 비교하여 본 연구에서 제시된 유전자 알고리즘에 의해 최적 설계한 경우가 가장 나은 설계결과를 얻을 수 있었다. Table 2는 고유진동수에 대한 최적설계결과이며, 동적제약조건을 모두 만족하였다. 이 경우 Table 1에서 Wang에 의한 결과 보다는 12.38%, Kaveh에 의한 결과보다는 8.29%의 보다 나은 결과를 얻었다. Fig. 2는 집단 크기 20, 40, 60, 80의 경우 해의 수렴상태를 나타내며, 집단 크기 40일 때 가장 나은 결과를 얻었다. Fig. 3은 1, 2Elitism과 Elitism을 사용하지 않은 경우의 상태를 보여 준다.

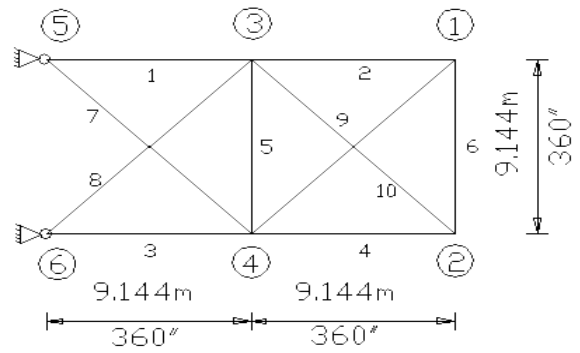


Fig. 1 Dimension of 10 bar truss

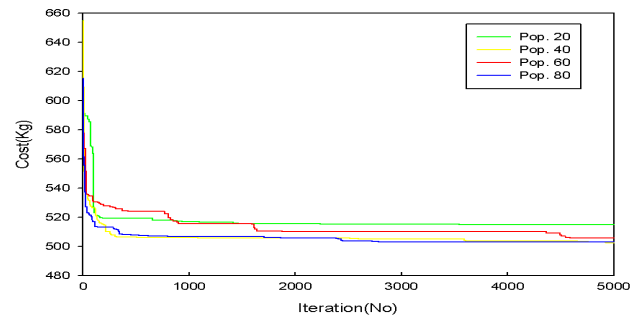


Fig. 2 Convergence history of 10 bar truss for continuous variables

Table 1. Optimum design of 10 bar truss for continuous variables(cm^2)

Element number	Wang	Sedaghati	Lingyun	Kaveh	Present
1	32.456	38.245	42.234	35.274	36.935
2	16.577	9.916	18.555	15.463	16.760
3	32.456	38.619	38.851	32.11	30.698
4	16.577	18.232	11.222	14.065	15.161
5	2.115	4.419	4.783	0.645	0.702
6	4.467	4.194	4.451	4.88	4.274
7	22.810	20.097	21.049	24.064	22.419
8	22.810	24.097	20.949	24.340	14.651
9	17.490	13.890	10.257	13.343	11.589
10	17.490	11.452	140342	13.543	12.836
Weight(Kg)	553.80	537.0	542.75	529.09	485.25

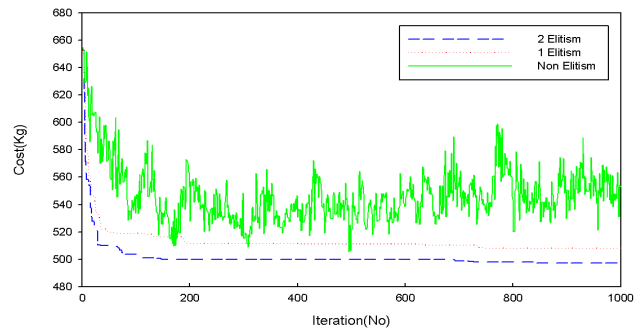


Fig. 3 Convergence history of 10 bar truss for 1,2 Elitism, NonElitism

Table 2. Frequency of 10 bar truss for continuous variables(Hz)

Frequency number	Wang	Sedaghati	Lingyun	Kaveh	Present
1	7.001	6.992	7.008	7.000	7.001
2	17.302	17.599	18.148	16.119	16.485
3	20.001	19.973	20.000	20.075	20.039
4	20.100	19.977	20.508	20.457	20.392
5	30.869	28.173	27.797	29.149	28.613
6	32.666	31.029	31.281	29.761	30.473
7	48.281	47.628	48.304	47.950	51.606
8	52.306	52.292	53.306	51.215	54.680

4.1.2 10 Bar 트리스(이산변수 경우)

10 bar 트리스 구조물의 이산 설계변수는 각 부재의 단면적이 되며, 모두 10개의 독립된 설계변수를 가진다. 트리스 구조물의 최적설계에 적용된 하중은 Fig. 1에서와 같이 절점 2, 4에 각각 수직으로 4540kgf를 작용하였다. 10 bar 트리스 구조물은 총 무게가 최소가 되게 설계하였으며, 모든 설계 부재의 주 제약조건은 고유진동수 $\omega_1 \geq 22.0\text{Hz}$ 제약조건이며, $\pm 1757.65\text{kg/cm}^2 (\pm 25\text{Ksi})$ 의 응력제약과 모든 절점에서 $50.8\text{mm} (\pm 2\text{ in})$ 의 변위제약조건을 사용하였다. 10 bar 트리스 구조물에 사용된 42개의 이산자료는 아래와 같다. {10.45, 11.61, 12.84, 13.74, 15.35, 16.9, 18.58, 18.9, 19.93, 20.19, 21.81, 22.39, 22.9, 23.42, 24.77, 24.97, 25.03, 26.97, 27.22, 28.97, 29.61, 30.97,

Table 3. Optimum design of 10 bar truss for discrete variables(cm²)

Weight (kg)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
2527.80	216.13	10.45	170.97	89.68	10.45	10.45	87.1	147.74	109.03	10.45

32.06, 33.03, 37.03, 46.58, 51.42, 74.19, 87.1, 89.68, 91.61, 100.0, 103.22, 109.03, 121.29, 128.39, 141.93, 147.74, 170.97, 193.55, 216.13}(cm²). 최적화된 구조물의 고유진동수($\omega_1, \omega_2, \omega_3$)는 $\omega_1 = 22.307\text{Hz}$, $\omega_2 = 38.8701\text{Hz}$, $\omega_3 = 45.653\text{Hz}$ 이며, 총무게는 2,527.80kg 이다. Table 3은 이산자료를 사용한 이산최적설계에 의한 최적 설계결과이며, 모든 제약조건을 만족하였다. 그리고 Table 3은 집단의 크기를 20으로 하였고 250iteration에서 해에 수렴한 결과이다. 이 경우 이산자료를 사용한 최적화에서 제약조건이 일치하는 다른 연구결과를 찾지 못했으나 계속 다른 최적화방법으로 연구를 진행하여 개선된 해를 찾고자 한다.

4.1.3 25 Bar 입체 트러스

25 bar 트러스의 제원은 Fig. 4와 같으며, 하중상태는 Table 5와 같다. 25 bar 트러스의 설계에는 부재를 8개의

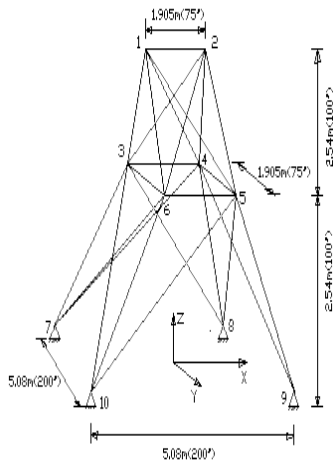


Fig. 4 Dimension of 25 bar space truss

Table 4. Design variables of 25 bar space truss

Design Variable no.	Members
1	1-2
2	1-4, 2-3, 1-5, 2-6
3	2-5, 2-4, 1-3, 1-6
4	3-6, 4-5
5	3-4, 5-6
6	3-10, 6-7, 4-9, 5-8
7	3-8, 4-7, 6-9, 5-10
8	3-7, 4-8, 5-9, 6-10

Table 5. Loading case of 25 bar space truss

Nodes	F_x (kgf)	F_y (kgf)	F_z (kgf)
1	454.16	-454.16	-454.16
2	0.0	-454.16	-454.16
3	227.08	0.0	0.0
6	272.49	0.0	0.0

Table 6. Optimum design of 25 bar space truss(cm²)

	W (kg)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Tong	237.52	0.645	3.225	21.93	0.645	0.645	5.16	9.675	21.93
Present	220.345	0.645	3.87	21.93	0.645	10.32	5.80	3.22	21.94

그룹으로 분류하여 8개의 설계변수가 되게 하였으며 Table 4에 자세히 나타내어진다. 부재 설계시 적용된 제약조건은 절점 1,2에서 x,y방향으로 $\pm 8.89\text{mm}(0.35\text{in})$ 의 변위제약과 $\pm 2812.28\text{kg/cm}^2(\pm 40\text{Ksi})$ 의 부재응력제약, 그리고 고유진동수 $\omega_1 \geq 55.0\text{Hz}$ 가 주 제약조건으로 적용되었다. 25 bar 트러스에 사용된 35개의 이산자료는 다음과 같다. {0.645, 1.29, 1.935, 2.58, 3.225, 3.87, 4.515, 5.16, 5.805, 6.45, 7.095, 7.74, 8.385, 9.03, 9.675, 10.32, 10.965, 11.61, 12.255, 12.9, 13.545, 14.19, 14.835, 15.48, 16.125, 16.77, 17.415, 18.06, 18.705, 19.35, 19.995, 20.64, 21.285, 21.93, 22.575}(cm²). Table 6은 25 Bar 입체 트러스의 최적설계 결과이다. Table 6의 결과로부터 Tong의 결과보다는 약 7.45%만큼 나은 설계를 얻었으며, 최적설계에 해당되는 고유진동수는 $\omega_1 = 61.506\text{Hz}$, $\omega_2 = 72.729\text{Hz}$, $\omega_3 = 86.022\text{Hz}$ 이다. 진동수제약조건 및 변위, 부재응력제약조건을 모두 만족하였다.

4.2 프레임 구조물

프레임구조물 최적설계시에 1경간 2층의 경우 연속변수와 이산변수를 사용 하였으며, 1경간 7층 프레임은 연속변수만을 사용하여 최적 설계하였다. 제약조건은 고유진동수(ω_1, ω_2)만 적용되었다. 사용된 재료의 탄성계수 $E = 2.10 \times 10^{10} \text{kg/m}^2$ (30^4Ksi), 부재의 밀도 $\rho = 7,757 \text{kg/m}^3$ (0.28lb/in^3)의 값을 사용하였다. 예로 사용된 프레임 구조물에서는 4번의 각기 다른 설계조건으로 최적화를 시도하였다. 연속변수를 사용하여 제

약조건을 달리한 경우와 이산자료를 사용하였으며, 프레임 구조물의 모든 경우에 Active 제약조건으로 고유진동수 제약조건을 적용하였다. 프레임 구조물의 제원은 Fig. 5와 같다^{[15],[16]}.

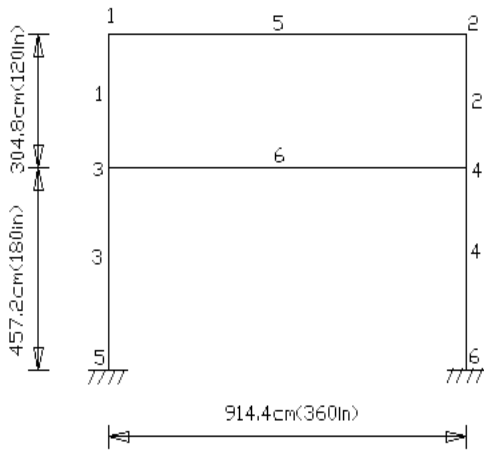


Fig. 5 Dimensions of 1 bay 2 story frame

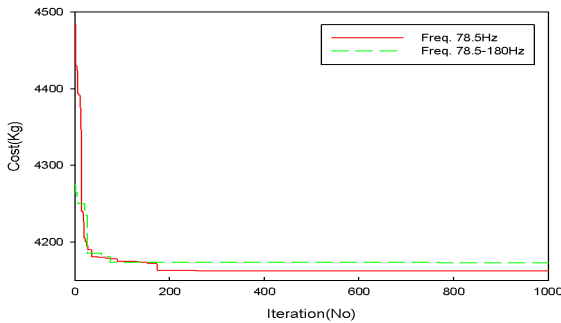


Fig. 6 Convergence history of 1 bay 2 story frame (Case 1)

4.2.1 1경간 2층 프레임

1경간 2층 프레임구조물의 경우 연속변수에 의한 설계와 이산변수에 의한 설계로 나누어 설계하였다. 이산최적설계에 사용된 이산자료는 AISC의 291개의 W-section중에서 64개의 W-section을 사용하였다(Table 11).

(첫째), 프레임구조물에서 단면설계에 연속변수를 사용하여 최적설계 하였다. 각각의 보와 기둥으로 6개의 설계변수를 사용하였으며, 제약조건은 고유진동수(ω_1, ω_2)를 적용하였다. 그리고 보에는 균등하게 분포된 4.536Kg의 하중(nonstructural)이 작용하였으며, 모든 프레임 예제에 적용된다. 부재 단면별 단면2차모멘트는 아래 식(7), (8)에 주어진 값을 사용하였다^[17].

$$I = 4.6248A^2, 0 \leq A \leq 44 \quad (7)$$

$$I = 256A^2 - 2300, 44 < A \leq 88.2813 \quad (8)$$

그리고 부재의 최소, 최대단면적을 달리하여 2경우(Case 1, 2)로 최적설계 하였다.

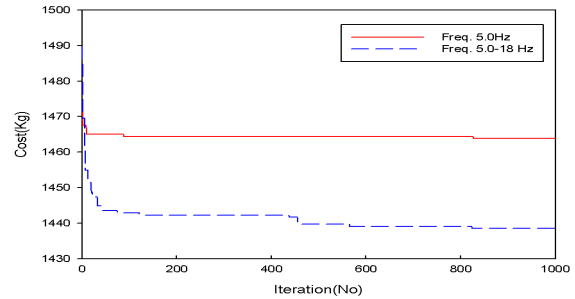


Fig. 7 Convergence history of 1 bay 2 story frame (Case 2)

Table 7. Optimum design of 1 bay 2 story frame(cm²) (Case 1)

Element No.	$\omega_1 = 78.5$		$\omega_1 = 78.5, \omega_2 \geq 180$	
	Sedaghti et al.	Present	Sedaghti et al.	Present
1	215.867	213.11	120.556	197.62
2	51.088	51.088	141.802	69.82
3	51.088	51.088	283.807	132.10
4	367.203	363.98	227.761	310.82
5	51.088	51.088	51.088	51.09
6	253.087	255.03	228.549	253.80
Weight(kg)	4,272.35	4,265.12	4,418.46	4,362.78

Table 8. Frequency of 1 bay 2 story frame(rad/s) (Case 1)

Frequency No.	$\omega_1 = 78.5$		$\omega_1 = 78.5, \omega_2 \geq 180$	
	Sedaghti et al.	Present	Sedaghti et al.	Present
1	78.50	78.50	78.50	78.50
2	146.67	143.33	220.81	180.27
3	268.40	263.75	436.42	370.71

Table 9. Optimum design of 1 bay 2 story frame(cm²) (Case 2)

Element No.	$\omega_1 = 5.0$		$\omega_1 = 5.0, \omega_2 \geq 18.0$	
	McGee and Phan	Present	McGee and Phan	Present
1	39.61	39.16	38.12	38.65
2	39.61	39.16	38.12	38.65
3	83.60	131.81	124.12	117.90
4	83.60	131.81	124.12	117.90
5	35.25	28.45	37.47	38.13
6	70.24	19.36	19.35	19.36
Weight(kg)	1,527.23	1,458.09	1,462.24	1,425.20

Table 10. Frequency of 1 bay 2 story frame(Hz) (Case 2)

Frequency No.	$\omega_1 = 5.0$		$\omega_1 = 5.0, \omega_2 \geq 18.0$	
	McGee and Phan	Present	McGee and Phan	Present
1	5.0	5.0	5.0	5.0
2	*	17.69	*	18.73
3	*	37.44	*	34.04

(Case 1) 모든 부재에서 단면의 최소값과 최대값은 51.088cm^2 , 569.55cm^2 이다. 제약조건은 고유진동수 $\omega_1 = 78.5\text{rad/s}$ 인 경우와, $\omega_1 = 78.5\text{rad/s}, \omega_2 \geq 180.0\text{rad/s}$ 의 경우로 나누어 설계하였다. (Case 2) 모든 부재에서 단면의 최소값과 최대값은 19.35cm^2 , 569.55cm^2 로 하였고, 이 경우 고유진동수 $\omega_1 = 5.0\text{Hz}$ 인 경우와 $\omega_1 = 5.0\text{Hz}, \omega_2 \geq 18.0\text{Hz}$ 의 경우로 나누어 설계하였다. Case 1에서 Table 7은 고유진동수 제약조건 $\omega_1 = 78.5\text{rad/s}, \omega_2 \geq 180.0\text{rad/s}$ 에 의한 최적설계결과이며, Table 8은 제약조건 $\omega_1 = 5.0\text{Hz}, \omega_2 \geq 18.0\text{Hz}$ 에 의한 최적설계결과이다. Table 7로부터 제약조건 $\omega_1 = 78.5\text{rad/s}$ 인 경우 Sedaghti et al.의 Displacement Method에 의한 결과에 비해 약 0.17%의 개선된 결과를 얻었으며, $\omega_1 = 78.5\text{rad/s}, \omega_2 \geq 180.0\text{rad/s}$ 의 경우는 1.28%의 나은 결과를 얻었다. Fig. 6은 해의 수렴상태를 나타낸다. Case 2에서 Table 9로부터 고유진동수 제약조건 $\omega_1 = 5.0\text{Hz}$ 의 경우는 McGee and Phan보다 4.53%가 개선된 결과이며, $\omega_1 = 5.0\text{Hz}, \omega_2 \geq 18.0\text{Hz}$ 의 경우는 약 2.54%의 좋은 설계결과를 얻었다. Table 9, 10은 최적설계결과와 고유진동수를 나타낸다. Fig. 7은 해의 수렴상태를 나타낸다. Table 7, 9의 결과로부터 본 연구에서 제시된 유전자 알고리즘에 의해 설계된 경우가 기존의 연구에 비해 보다 나은 설계결과가 됨을 알 수 있었다. 1경간 2층 프레임 구조물의 최적설계에는 집단의 크기 20을 사용하였으며, 2,000번의 Iteration중 제약조건 $\omega_1 = 78.5\text{rad/s}$ 의 경우 260번째, $\omega_1 = 78.5\text{rad/s}, \omega_2 \geq 180.0\text{rad/s}$ 의 경우 75번째, $\omega_1 = 5.0\text{Hz}$ 의 경우 250번째, $\omega_1 = 5.0\text{Hz}, \omega_2 \geq 18.0\text{Hz}$ 의 경우 301번째에서 Table 7, 9의 해에 수렴 하였다.

(둘째), 프레임 구조물에서 이산자료를 사용하여 이산최적설계 하였다. 이산자료는 2^8 에 해당되는 64개의 W-section (Table 11)을 사용하였다. 설계변수는 4개의 그룹으로 분류하였으며, 4개의 설계변수는 1층 기둥, 2층 기둥, 1층 보, 2층 보이다. 고유진동수 제약조건 $\omega_1 = 5.0\text{Hz}$ 와 $\omega_1 = 5.0\text{Hz}, \omega_2 \geq 18.0\text{Hz}$ 의 2경우를 사용하였으며, 그리고 보에는 균등하게 분포된 4.536Kg의 하중이 작용하였다. 유전자 알고리

즘에 의한 이산설계결과는 Table 12와 같다. 제약조건 $\omega_1 = 5.0\text{Hz}$ 의 경우 1층, 2층 기둥의 단면적은 각각 104.5159cm^2 ($W24 \times 55$), 256.13cm^2 ($W36 \times 135$)이며, 1층과 2층보의 단면적은 각각 104.5159cm^2 ($W24 \times 55$), 160.0m^2 ($W27 \times 84$)을 얻었다. 제약조건 $\omega_1 = 5.0\text{Hz}, \omega_2 \geq 18.0\text{Hz}$ 의 경우 1층, 2층 기둥의 단면적은 각각 178.709cm^2 ($W27 \times 94$), 223.871cm^2 ($W33 \times 118$)이며, 1층과 2층 보의 단면적은 각각 35.935m^2 ($W12 \times 19$), 223.871cm^2 ($W33 \times 118$)을 얻었다. 이 경우 전공간탐색을 통해 전공간 최적설계(Global optimum; 4,183.643kg, 4,272.193Kg)를 찾았으며, 이산최적설계결과와 일치하였다 (Table 12). Fig. 8은 해의 수렴상태를 나타낸다.

Table 11. W-Section for 1 Bay 2 Story Frame

W-Section name			
W36X300	W27X84	W18X97	W14X90
W36X260	W24X335	W18X76	W14X22
W36X230	W24X250	W18X65	W12X190
W36X210	W24X176	W18X55	W12X136
W36X194	W24X162	W18X40	W12X96
W36X150	W24X146	W18X35	W12X65
W36X135	W24X131	W16X31	W12X19
W33X130	W24X117	W16X26	W12X16
W33X118	W24X103	W14X426	W12X14
W30X191	W24X76	W14X370	W10X112
W30X173	W24X68	W14X311	W10X88
W30X148	W24X62	W14X257	W10X68
W30X116	W24X55	W14X211	W10X49
W30X108	W21X50	W14X159	W10X12
W30X99	W21X44	W14X132	W8X67
W27X94	W18X119	W14X109	W8X58

Table 12. Optimum Design(cm^2) and Frequency(Hz) of 1 Bay 2 Story Frame for Discrete Variables

Variable No.	$\omega_1 = 5.0$	$\omega_1 = 5.0, \omega_2 \geq 18.0$	Frequency No.	$\omega_1 = 5.0$	$\omega_1 = 5.0, \omega_2 \geq 18.0$
1층 기둥	104.5159	178.709	1	5.00	5.00
2층 기둥	256.1285	223.871	2	17.76	18.52
1층 보	104.5159	35.935	3	39.26	24.00
2층 보	160.00	223.871	*	*	*
Weight (kg)	4183.643	4272.193	*	*	*

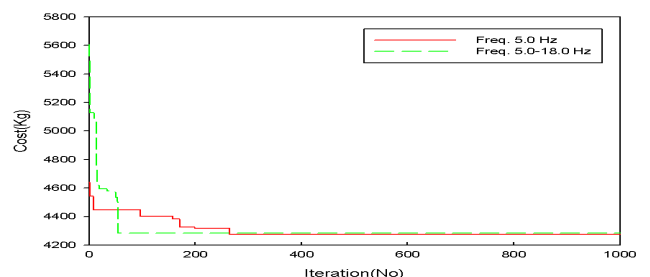


Fig. 8 Convergence History of 1 Bay 2 Story Frame for Discrete Variables

4.2.2 1경간 7층 프레임 구조물

1경간 7층프레임의 제원은 Fig. 9와 같으며, 최적설계에는 14개의 연속변수를 사용하였다. Active 제약조건으로 고유진동수 $\omega_1=10.2\text{rad/s}$ 를 사용하였으며, 모든 보에는 균등하게 분포된 4.536Kg의 하중(nonstructural)이 작용하였다. 최적설계의 결과는 Table 13과 같다. 본 연구에서 제시된 유전자 알고리즘의 설계결과가 McGee and Phan보다는 6.39% 좋은 설계결과를 얻었으며, Khan and Willmert 보다는 8.61%의 개선된 설계결과를 얻을 수 있었다^[18]. 최적설계에 의한 고유진동수는 $\omega_1=10.2\text{rad/s}$, $\omega_2=37.131\text{rad/s}$, $\omega_3=83.18\text{rad/s}$ 이다.

Table 13. Optimum Design of 1 Bay 7 Story Frame(cm²)

Element No.	Design variable No.	Khan and Willmert	McGee and Phan	Present
1	1	51.1	51.1	51.10
2	1	51.1	51.1	51.10
3	2	51.1	51.1	51.10
4	2	51.1	51.1	51.10
5	3	52.65	51.1	51.10
6	3	52.65	51.1	51.10
7	4	61.28	56.5	51.61
8	4	61.28	56.5	51.61
9	5	67.53	62.44	58.13
10	5	67.53	62.44	58.13
11	6	72.24	66.44	64.71
12	6	72.24	66.44	64.71
13	7	111.07	164.6	170.52
14	7	111.07	164.6	170.52
15	8	51.1	51.1	51.10
16	9	51.1	51.1	51.10
17	10	69.72	67.53	51.10
18	11	83.59	84.37	69.23
19	12	95.52	93.91	90.39
20	13	101.27	101.85	90.39
21	14	96.75	51.1	51.10
Weight(kg)		7657.55	7501.06	7050.75

5. 결론

동적하중을 받고 있는 구조물의 경우 공진현상으로 인해 예상치 못한 재해가 발생한다. 이를 예방하기 위해 구조물의 고유진동수를 알아야한다. 본 연구에서는 트러스 및 프레임구조물의 단면설계에 고유진동수 및 처짐과 응력제약에 따른 경우의 최적설계를 연구하였다. 트러스 및 프레임 구조물의 최적설계에는 연속변수와 이산자료를 사용한 이산최적화를

시도 하였으며, 설계변수의 수가 증가하거나 많은 제약조건이 수반되는 경우에도 적용성이 좋은 유전자 알고리즘을 사용하여 최적설계를 하였다. 10 bar트러스는 연속변수와 이산변수

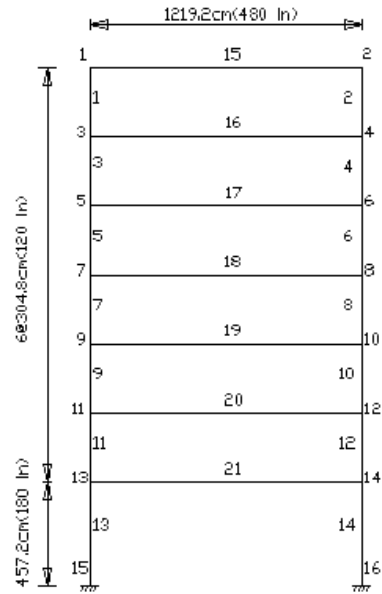


Fig. 9 Dimension of 1 Bay 7 Story Frame

를 각각 사용하여 최적 설계하였고, 25 bar 트러스의 경우는 이산자료를 사용한 이산최적화를 시도하였다. 연속변수를 사용한 10 Bar 트러스의 경우 Fig. 2,3으로부터 대략 200~300 Iteration의 초기에 의미 있는 해에 접근함을 알 수 있으며, Wang에 의한 결과 보다는 12.38%, Kaveh에 의한 결과보다는 8.29%의 나은 결과를 얻었다. 25 Bar 트러스의 경우도 Tong 보다는 7.45%의 보다 나은 결과를 얻었다. 다음으로, 1경간 2층 프레임의 경우 연속변수와 이산변수를 각각 사용하여 최적 설계하였고, 이산최적설계의 경우 전공간탐색을 통해 전공간 최적설계를 찾아 결과를 비교하였다. 1경간 7층 프레임의 경우 14개의 연속변수를 사용하여 최적 설계를 하였다. 1경간 2층 프레임 구조물의 경우 연속변수와 이산변수 및 제약조건들을 달리하여 4경우의 최적화를 시도 하여 다른 연구자들의 결과 보다 1.28%, 0.17%, 4.53%, 2.54%등의 보다 나은 결과를 얻었으며, 특히 전공간탐색을 통해 전공간설계(Global optimum)를 찾아 이를 확인 하였다. 1경간 7층의 경우는 McGee and Phan과 Khan and Willmert 보다는 각각 6.39%, 8.61%의 나은 결과를 얻었다. 트러스 구조물과 프레임 구조물의 최적설계에 연속변수와 이산변수 및 다양한 제약조건들을 사용한 최적화 통해서 여러 연구자들에 의한 결과와 비교하여 본 연구에서 제시된 최적화 방법이 비교적 안정적인 해로 접근함을 알 수 있었다.

결론적으로 유전자 알고리즘은 최적화 과정 중 함수의 연속성 및 미분값이 요구되지 않으며, 설계변수의 수 및 여러 제약조건 등에 많은 제약을 받지 않는 단순 수리 과정임을 고려하면 현실적인 트러스 및 프레임 구조물의 설계 최적화문제의 해결에 매우 적합한 방법이라 하겠으며, 본 연구에서 제시된 유전자 알고리즘은 비교적 해로 접근하는 안정성이 좋아 다른 여러 공학 분야에 적용성이 높다 하겠다.

감사의 글

이 논문은 2011년 경상대학교 연구년제연구교수 연구지원 과제임. 그리고 미국 Washington State University 김대욱교수에게 감사드립니다.

참고문헌(References)

[1] 이상진(2003) 쉘의 진동수를 최대화하기 위한 최적화기법에 대한연구, 2003년도 대한건축학회발표논문집, 대한건축학회, 제23권, 제2호, pp.237-240.
Lee, S.J. (2003) A Study on the Shell Optimization Techniques for Frequency Maximization, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 23, No. 2, pp.237-240 (in Korean).

[2] 조강표, 홍성일, 조기성(2008) 고유진동수에 따른 건축물수평 진동의 허용가속도 평가, 대한풍공학회 논문집, 대한풍공학회, 제12권, 제1호, pp.51-58.
Cho, K.P., Hong, S.I., and Cho, G.S. (2008) Estimation of Allowable Acceleration for the Horizontal Vibration in Buildings according to Natural Frequency, *Journal of The Wind Engineering institute of Korea*, WEIK, Vol. 12, No. 1, pp.51-58 (in Korean).

[3] Lingyun, W., Mei, Z., Guangming, W., and Guang, M. (2005) Truss Optimization on Shape and Sizing with Frequency Constraints Based on Genetic Algorithm, *Computer Mechanics*, Vol. 35, pp.361-368.

[4] Tong, W.H. and Liu, G.R. (2001) An Optimization Procedure for Truss Structures with Discrete Design Variables and Dynamic Constraints, *Computer & Structures*, Vol. 79, pp.155-162.

[5] Sedaghati, R., Suleman, A., and Tabarrok, B (2002) Structural Optimization with Frequency Constraints Using the Finite Element Force Method, *AIAA*, Vol. 40, No 2, pp.382-388.

[6] 이상열(2005) 마이크로 유전자 알고리즘을 이용한 자유

진동 박관구조물의 비파괴 손상규명, 한국강구조학회, 제17권, 제2호, pp.173-181.
Lee, S.Y. (2005) Nondestructive Damage Identification of Free Vibrating Thin Plate Structures Using Micro- Genetic Algorithms, *Journal of Korean Society of Steel onstruction*, KSSC, Vol. 17, No. 2, pp.173-181 (in Korean).

[7] Rajeev, S. and Krishnamoorthy, C.S. (1992) Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithm. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 5, pp.1233-1250.

[8] Pantelides, C.P., and Tzan, S.R. (1997) Optimal Design of Dynamically Constraints Structures, *Computer & Structures*, Vol. 62, No. 1, pp.141-149.

[9] Jenkins, W.M. (1992) Plane Frame Optimum Design Environment Based on Genetic Algorithm, *Journal of the Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 11, pp.103-112.

[10] 김대환(2011) 마이크로 유전자 알고리즘을 이용한 트러스구조물의 단면 및 형상 최적화, 한국강구조학회, 제23권, 제4호, pp.465-474.
Kim, D.H. (2011) Size and Shape Optimization of Truss Structures using Micro Genetic Algorithm, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 23, No. 4, pp.465-474 (in Korean).

[11] Goldberg, E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, Reading, MA.

[12] 손수덕, 이승재(2011) 실변수 유전자 알고리즘을 이용한 사인형 주름 웹 보의 최적구조설계, 한국강구조학회, 제23권, 제5호, pp.581-593.
Shon, S.D. and Lee, S.J. (2011) Optimum Structural Design of Sinusoidal Corrugated Web Beam Using Real-valued Genetic Algorithm, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 23, No. 5, pp.581-593 (in Korean).

[13] Wang, D., Zha, W.H., and Jian, J.S. (2004) Truss optimization on shape and sizing frequency constraints. *AIAA J*, Vol. 42, pp.1452-1459.

[14] Kaveh, A. and Zolghadr, A.S. (2012) Truss optimization with natural frequency constraints using a hybridized CSS-BBBC algorithm with trap recognition capability, *Computer & Structures*, Vol. 102-103, pp.14-27.

[15] Sadek, E.A. (1996) Minimum Weight Design of Structures Under Frequency and Frequency Response Constraints, *Computer & Structures*, Vol. 60, No. 1, pp.73-77.

- [16] 김봉익, 이성대(2010) 고유진동수 제약조건을 고려한 프레임 구조물의 최적화, 한국해양공학회지, 한국해양공학회, 제24권, 제6호, pp.109-113.
Kim, B.I. and Lee. S.D. (2010) Optimization of Frame Structures with Natural Frequency Constraints, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, KSOE, Vol. 24, No. 6, pp.109-113 (in Korean).
- [17] McGee, O.G. and Phan, K.F. (1991) A robust optimality criterion procedure for cross-sectional optimization of frame structures with multiple frequency limits, *Computer & Structures*, Vol. 38, No. 5-6, pp.485-500.
- [18] Khan, M.R. and Willmert, K.D. (1981) An efficient optimality criterion method for natural frequency constrained structures, *Computer & Structures*, Vol. 14, No. 5-6, pp.501-507.

요 약 : 최근에는 고층구조물이나 해양구조물(플랫폼)의 경우 대부분 대형화로 설계 및 시공되고 있다. 대형구조물의 경우 주로 강재(steel)를 사용하여 설계하고 있다. 구조물 설계는 설계단계에서 최상의 부재를 선택하는 최적화를 적용함으로써 비용을 줄이는 경제적인 효과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 트러스와 프레임 구조물의 최적설계에 연속변수와 이산변수를 사용하여 최적화 하였고, 설계에서 사용된 이산자료는 규격화된 강재에 대한 자료와 데이터화된 이산자료를 사용하였다. 최적화는 이 모두에 적합한 이산최적화를 적용하였다. 최적화 기법으로는 유전자 알고리즘을 사용하였으며, 사용된 구조물은 10-Bar, 25-Bar 트러스와 1경간 2층, 1경간 7층 프레임 구조물이다. 설계시 제약조건은 고유진동수와 부재응력, 변위제약조건들이 적용되었다. 유전자 알고리즘에는 번식과정에서 엘리트 개체가 2번 사용되도록 하였으며, 제약조건 위반시 페널티를 사용하는 방법을 사용하였다.

핵심용어 : 이산최적화, 고유진동수, 유전자 알고리즘, 트러스, 프레임
