

이산형 변수를 이용한 뼈대구조물의 다단계 최적설계

Multi-Level Optimization for Steel Frames using Discrete Variables

조 호 남*

민 대 홍†

박 준 용**

Cho, Hyo-Nam

Min, Dae-Hong

Park, Jun-Yong

(논문접수일 : 2001년 8월 9일 ; 심사종료일 : 2002년 8월 1일)

요 지

건설공사의 설계와 시공에서 표준화된 이산형 강재단면을 이용하고 있으나, 대부분의 최적화기법에서는 표준강재단면을 사용하기 위해 별도의 이산화 과정을 가지게 되므로 설계결과 최적성을 보장할 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 제안된 알고리즘의 효율성을 높이기 위해 전체구조계와 구조요소계로 나누는 다단계 알고리즘을 적용하였다. 수치해석 과정의 효율성과 최적해의 정확성을 예제를 통하여 비교·검토하였다.

핵심용어 : 다단계 최적화, 이산화 변수, 표준단면제한

Abstract

Discrete-sizing or standardized steel profiles are used in steel design and construction practice. However, most of numerical optimization methods follow additional step(round-up discrete-sizing routine) to use the standardized steel section profiles, and accordingly the optimality of the resulting design may be doubtful. Thus, in this paper, an efficient multi-level optimization algorithm is proposed to improve the shortcoming of the conventional optimization methods using the round-up discrete-sizing routine. Also, multi-level optimization technique with a decomposition method that separates both system-level and element-level is incorporated in the algorithm to enhance the performance of the proposed algorithms. The proposed algorithm is expected to achieve considerable improvement on both the efficiency of the numerical process and the accuracy of the global optimum.

Keywords : multi-level optimization, discrete-variables, standard steel profile

1. 서 론

실제적인 대형 강뼈대 구조물의 최적화 문제에 있어, 시공성을 고려하기 위하여 시방서에 규정된 강재제원표의 표준단면을 사용하는 것이 바람직하며, 이를 이용하기 위한 최적설계 방법으로는 이산형 변수를 효과

적으로 처리하면서 전역 최적해를 효과적으로 구할 수 있는 유전자 알고리즘의 사용이 필요하다.¹⁾ 이런 이유로, 이산형변수를 이용한 유전자 알고리즘의 연구^{2)~5)}와 함께 유전자 알고리즘에 분할처리(dividing procedure),⁶⁾ 해공간 제약(restricting variable space),⁷⁾ 변환기법(changing techniques),⁸⁾ 복합알고리즘(hybrid

† 책임저자, 정회원 · 안산공과대학 겸임전임강사
전화: 031-400-4027; Fax: 031-406-5660
E-mail: dh_min@hotmail.com

* 정회원 · 한양대학교 토목 · 환경공학과 교수

** 정회원 · 대한 콘설리트 사원

• 이 논문에 대한 토론을 2002년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2003년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

algorithm)⁹⁾과 같은 다양한 기법을 접목시키려는 연구가 다양한 분야에서 활발히 수행되고 있다. 하지만, 실질적인 대형구조물의 최적설계에서 설계변수의 수가 많아지게 되며, 그로 인해 전역 최적해 알고리즘 뿐만 아니라, 국부 최적해 알고리즘에서조차도 계산시간은 설계변수의 수에 대해 기하급수적으로 증가하게 되어 엄청난 계산비용이 소요된다. 전역 최적해와 계산비용 절감의 문제점을 해결할 수 있는 기법이 필요한 실정이다. 이러한 고차 비선형문제에서 다단계 알고리즘이 계산의 효율성의 증대를 기대할 수 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔다.^{10~13)} 본 논문에서는 구조 응답에 대한 엄청난 구조해석 비용이 요구되는 기존의 다단계 알고리즘¹⁴⁾이 갖는 문제점들을 개선하고자 AISC manual¹⁵⁾의 W형 표준단면을 이용하는 효율적인 다단계 알고리즘을 제안하였다. 제안한 다단계 알고리즘은 전체구조계에서 자동미분을 이용한 근사해석에 기초하는 연속형 최적설계와 구조요소계에서 구조해석이 필요하지 않은 유전자 알고리즘을 이용한 이산형 최적설계 과정으로 각각 구성하였다. 제안한 다단계 최적화 알고리즘을 Gang¹⁴⁾의 연구에서 사용한 예제와 동일한 다층 뼈대구조물에 적용하였으며, 신뢰성과 효율성을 검토하기 위해 그 결과를 기존의 다단계 알고리즘과 유전자 알고리즘을 통하여 얻은 결과와 비교하였다.

2. 구조최적화 문제

이산형 변수를 이용하는 뼈대구조물에 대한 다단계 최적화문제는 다음과 같이 전체구조계와 구조요소계로 나누어 정식화할 수 있다.

2.1 설계변수

뼈대구조물의 전체구조계 설계변수 X 는 그림 1에 서와 같이 각 층의 단면 2차 모멘트로 하였다. 구조요소계 설계변수 x 는 표준단면제원표의 단면번호로 정의하였으며, 이를 벡터형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n) = (I_1, I_2, \dots, I_n) \quad (1)$$

$$x(h_f, b_f, t_f, t_w, A, I, S) = W \text{ shape indexes} \quad (2)$$

강재제원표는 AISC manual¹⁵⁾에서 표준화된 W형식의 단면제원으로 구성하였으며, 효율적인 계산수행을 위해 128개의 단면과 5개의 단면높이별(W10, W12, W14, W16, W18)로 나누어 데이터베이스화하고 각각을 단면번호, 이름, 높이, 폭, 플랜지두께, 웹 두께와 기타 단면물성치들로서 표 1과 같이 구성하였다.

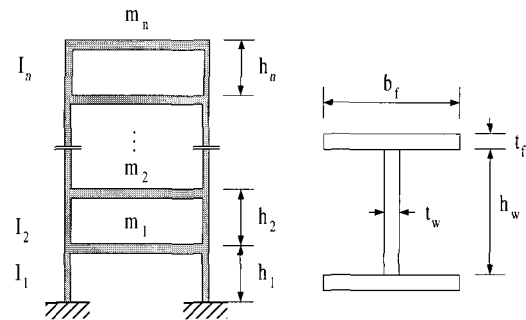


그림 1 I형 단면을 가지는 강 뼈대구조

표 1 표준단면 데이터베이스(AISC W shapes)

단면 index	단면 호칭	높이 h (in)	폭 b_f (in)	복부 t_w (in)	플랜지 t_f (in)	단면적 A (in ²)	$I(X-X)$ I (in ⁴)	$S(X-X)$ S (in ³)
1	W10×12	9.87	3.96	0.19	0.21	3.54	53.8	10.9
2	W10×15	9.99	4.00	0.23	0.27	4.41	68.9	13.8
⋮				⋮				⋮
36	W12×58	12.19	10.01	0.36	0.64	17	475	78
⋮				⋮				⋮
65	W16×100	16.97	10.425	0.585	0.985	29.4	1490	175
⋮				⋮				⋮
128	W18×311	22.32	12.005	1.520	2.740	91.5	6960	624

2.2 목적함수

전체구조계의 목적함수는 뼈대구조물의 총 중량으로 다음과 같이 정식화하였으며, 구조요소계에서는 요소 자체의 중량을 목적함수로 한다.

$$W(X) = \sum_{i=1}^n \rho A_i h_i \quad (3)$$

$$W_i(x) = \rho A_i h_i \quad (4)$$

식(3)과 (4)에서, ρ 는 단위중량, A_i 와 h_i 는 각각 i 번째 요소의 단면적과 높이를 나타낸다.

2.3 제약조건

최적화문제의 제약조건을 설계제약조건, 진동수제약조건과 관계제약조건으로 구성하여 적용하였다.

2.3.1 설계 제약조건

AISC-LRFD⁽⁶⁾와 AISC 내진규정⁽⁷⁾에 따라 강뼈대구조물의 최적내진설계에 대한 기본적인 설계제약조건을 표 2에 나타내었다.

2.3.2 진동수 제약조건

진동수 제약조건은 고유진동수가 진동수 제한구역이라고 불리는 범위를 벗어나게 하기 위해 사용된다. 진

동수 제약조건은 다음과 같다.

$$\omega_j \in [\omega_a, \omega_b] \quad j=1, \dots, m \quad (5)$$

여기서, ω_j 는 j 번째 고유진동수를 ω_a, ω_b 는 제한구역의 하한/상한경계값을 각각 나타낸다.

2.3.3 관계 제약조건

전체구조계와 구조요소계 설계변수를 확실하게 일치시키기 위해 전체구조계와 구조요소계 사이에 연결장치로 구조요소계 최적화에서 추가적인 관계제약조건을 고려하였다. 추가적인 관계제약조건은 전체구조계와 구조요소계 최적화의 수렴과 최종 최적해에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 다단계 최적화문제에서 매우 중요하다. 요소에 대한 단면 2차모멘트에 대한 등제약조건을 다음과 같은 추가적인 관계제약조건으로 나타내었다.

$$I_i \leq I_i^* \quad (6)$$

여기서, I_i 는 전체구조계의 i 번째 요소에 대한 최적단면 2차모멘트이며, I_i^* 는 구조요소계의 i 번째 요소에 대한 최적 단면 2차모멘트이다.

2.4 표준단면의 단면계수 관계식

전체 구조계에서 설계변수가 뼈대구조물의 단면 2차 모멘트이기 때문에, 다단계 최적설계를 수행하기 위

표 2 국부좌굴과 강도에 대한 제약조건

단계	설계 제약조건		비고
전체 구조계	강도	$\frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.2 \text{에 대해 } \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8M_u}{9\phi_b M_n} \leq 1.0$ $\frac{P_u}{\phi_c P_n} < 0.2 \text{에 대해 } \frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \frac{M_u}{\phi_b M_n} \leq 1.0$	P_u : 극한압축강도 P_n : 공칭압축강도 M_u : 극한휨강도 M_n : 공칭휨강도 ϕ_c : 저항계수(축력) ϕ_b : 저항계수(휨)
구조 요소계	국부 좌굴	플랜지에 대해, $\frac{t_w/2}{t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_y}}$ 웨브에 대해, $\frac{P_u}{\phi P_y} \leq 0.125$ 인 경우, $\frac{h_w}{t_w} \leq \frac{520}{\sqrt{F_y}} \left(1 - \frac{1.54P_u}{\phi_b P_y}\right)$ $\frac{P_u}{\phi P_y} > 0.125$ 인 경우, $\frac{h_w}{t_w} \leq \frac{191}{\sqrt{F_y}} \left(2.33 - \frac{P_u}{\phi_b P_y}\right) \geq \frac{253}{F_y}$	F_y : 항복강도 P_y : 공칭항복강도

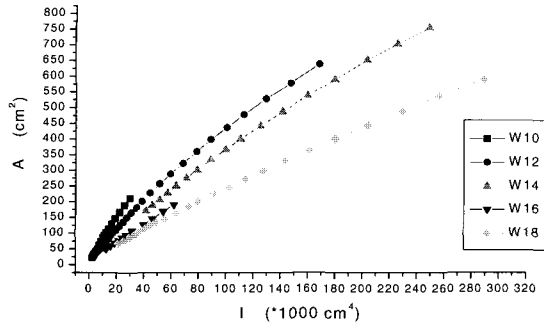


그림 2 W-Shape(AISC)에 따른 A와 I 의 상관도

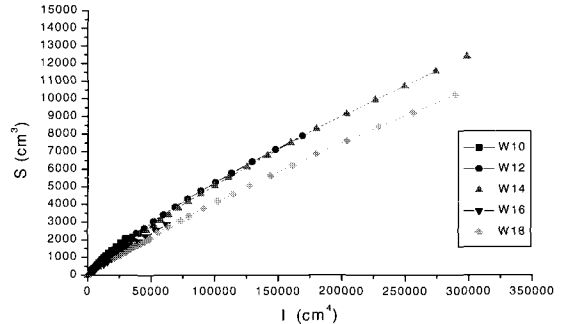


그림 3 W-Shape(AISC)에 따른 S와 I 의 상관도

하여 단면적 A 와 단면 2차 모멘트 I 간의 관계를 AISC W-형식 강제제원표를 이용하여 회귀분석을 하였다. 여기서 모든 표준단면을 하나의 관계식으로 나타낼 경우 오차가 많은 관계식이 유도된다. 따라서 단면 2차 모멘트에 가장 민감한 단면치수인 복부의 높이별로 관계식을 분리 유도하였으며, 그림 2, 3과 표 2에서 보는 바와 같이 상관관계가 매우 높은 2차 다항식의 관계식을 얻었다.

3. 효율적인 다단계 최적화 알고리즘

3.1 전체구조계 최적화

뼈대구조물에 대한 기존의 다단계 알고리즘¹⁴⁾은 수치해를 적용하는 과정에서 몇가지 문제점이 드러났다. 즉, 초기치가 최적해에 가깝게 정의된 경우에만 합당한 결과치를 얻을 수 있다. 만약 초기치가 설계가능영역안에 있을 지라도 최적해와 멀리 떨어진 값을 정의할 경우에 신뢰할 만한 결과치를 제공하지 못한다. 또한 설계 민감도분석에 의한 근사 재해석 기법을 사용하지 않으므로 엄청나게 많은 실 구조해석을 필요로 한다. 따라서 대형 구조물에 적용했을 때 만족할만한 효율성을 기대할 수 없었다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 그림 4와 같은 흐름을 가지는 효율적인 다단계 알고리즘을 제안하였으며, 수렴성 향상을 위해 중간매개변수에 대한 진동수와 모멘트 같은 구조응답의 근사 재해석을 최적화과정에 적용하였으며, 최적화 알고리즘의 효율성과 신뢰성을 향상시키기 위해 진동수 제약조건에 대하여 제약조건 소거기법을 도입하였다. 이는 우선 진동수 제약조건을 제외한 전체 제약조건에 대한 최적화를 수행 후 진동수 제약조건을 만족하는지 검토한다. 만약 진동수 제약조건을 만족하지 않은 경우는 최적화 과정이 이미 최적해에 근접해 있다고 가정하고 여기서 나온 결과를 초기치로 사용하여 진동수 제약조건을 포함한 최적화를 수행한다. 비선형 제약조건을 포함하는 뼈대구조에 대한 효율적인 최적화기법을 찾기 위해 국부최적화기법들로 구성된 ADS(Automated Design Synthesis)¹⁸⁾를 이용하여 사용 가능한 기법들을 본 논문에서 사용된 예제에 대해 적용시켜 보았으며, 각 최적화기법의 효율성과 신뢰성을 비교·검토한 결과 MMFD(Modified Method of Feasible Directions for constrained minimization)이 대부분의 경우에 대해 가장 합리적인 해를 제공해 주었기 때문에, 본 논문에서 이 방법을 전체구조계 최적화문제에 대한 기본적인 최적화기법으로 사용하였다.

표 3 강종에 따른 회귀분석식(W-Shape)

	$A-I$	$S-I$	상관도
W10	$A = 3.32112 + 0.00841I - 4.68147 \times 10^{-8}I^2$	$S = -21.50704 + 0.08574I - 5.34753 \times 10^{-7}I^2$	99.5%
W12	$A = 6.72761 + 0.00529I - 9.54865 \times 10^{-9}I^2$	$S = 43.5147 + 0.06245I - 9.77036 \times 10^{-8}I^2$	99.9%
W14	$A = 34.88029 + 0.00331I - 1.70214 \times 10^{-9}I^2$	$S = 353.66122 + 0.04685I - 2.04096 \times 10^{-8}I^2$	99.8%
W16	$A = 11.18293 + 0.00314I - 4.36645 \times 10^{-9}I^2$	$S = 3.73615 + 0.05041I - 6.64709 \times 10^{-8}I^2$	99.9%
W18	$A = 18.11681 + 0.00238I - 1.40925 \times 10^{-9}I^2$	$S = 72.79457 + 0.04279I - 2.73081 \times 10^{-8}I^2$	99.9%

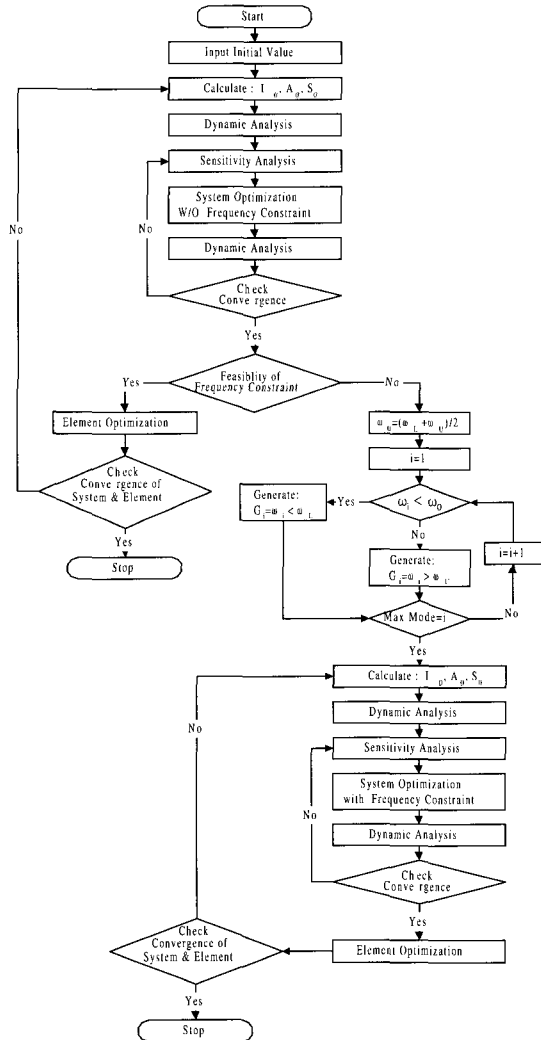


그림 4 효율적인 다단계 알고리즘

3.2 구조요소계 최적화

구조요소계에서는 유전자알고리즘을 이용한 이산형 최적설계기법을 적용하였다. 이는 최적화과정에서 전체 구조해석을 수행하지 않기 때문에, 유전자알고리즘이 개체와 세대수에 따른 많은 반복계산비용의 수반이라는 취약점을 배제할 수 있게 되었다. 유전자알고리즘은 목적함수를 최소화하고 제약조건을 모두 만족시키는 단면을 탐색하는 최적화기법으로 사용되었다. 유전자알고리즘의 적용방법은 여러 논문에서 제시되고 있으나, 본 논문에서는 가장 기본적인 SGA(simple genetic algorithm)¹⁹⁾를 적용하였다. 유전자알고리즘에서 교배방법은 일정한

배법(uniform method)을 사용하였으며, 교배확률은 0.5, 돌연변이 확률은 0.007, 번식방법은 elitism, 세대수는 30세대, 개체수는 10개체로 하여 수행하였다. 적합도함수와 벌칙함수는 식(7), (8)과 같다.

$$Fitness\ Function = \left(\sum_{i=1}^n \rho A_i h_i + PF \right)^{-1} \quad (7)$$

$$PF = Penalty\ Function = \beta (constraint - 1)^\eta \quad (8)$$

여기서, *Fitness Function*은 적합도 함수를 나타내며, β, η는 가중계수로 각각 200과 4를 사용하였으며, *Penalty Function*은 본 논문에서 구조요소계에 적용된 모든 제약조건이 이에 해당된다.

4. 자동미분을 이용한 근사 재해석

4.1 구조응답 재해석

근사재해석의 성능은 구조최적화 문제에서 대단히 중요하다. 구조최적화문제의 효율성을 향상시키기 위한 많은 연구가 진행 중에 있는데, 이 중에서 고차미분을 수행하지 않으면서 비선형성을 효과적으로 고려할 수 있는 방법은 설계변수가 실제 단면제원일 경우, 대부분 각각의 구조응답의 특성을 대표하는 중간매개변수에 대한 함수를 근사화 하는 것이다. 본 논문에서는 모든 구조응답을 중간매개변수를 사용한 재해석을 통하여 최적화의 성능을 향상시켰다.

4.1.1 등가 정적 수평하중

UBC-91¹⁷⁾의 내진규정에 따르면 구조물은 다음의 식을 이용하여 구한 전단력에 저항할 수 있게 설계하도록 하고 있다.

$$V = \frac{ZIC}{R_w} W \quad (9)$$

여기서,

Z : 내진구역에 대한 계수

I : 중요도 인자

R_w : 구조물의 종류에 따른 계수

W : 지진력을 계산하기 위해 사용된 사하중

C : 동적인자 $C = \frac{1.25S}{T^{2/3}}$
 S : 지역계수
 T : 지반의 진동주기이다.

4.1.2 근사해 해석

가장 간단한 국부근사화 방법에는 함수값과 설계점에서 기울기에 기초하는 목적함수와 제약조건에 대하여 선형근사화하는 것이다. 여기서, 각각의 요소에 대한 구조응답벡터를 R 로 표시하였으며, 만약 X 가 n 개의 미지수에 대한 설계변수의 벡터라고 한다면, R 는 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$R(X) = R(X_0) + \nabla R(X_0)\delta X \quad (10)$$

여기서, $\delta X = X - X_0$; X_0 는 Taylor 전개에서 설계변수의 초기치이다. 그리고 ∇ 는 함수의 기울기를 나타낸다. 이렇게 비선형함수를 선형근사화하여 얻은 값은 X_0 점 근처에서는 비교적 정확한 값을 얻을 수 있으나, X_0 에서 멀리 떨어진 X 에 대해서는 정확한 값을 얻기가 힘들다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Taylor 전개식에 고차항을 고려하면 더욱 정확한 근사화가 가능하지만 고차미분항을 계산해야 하므로 많은 계산비용이 소요된다. 따라서 근사함수의 거동을 더욱 선형적으로 만들어 줄 수 있는 중간매개변수를 찾는 것이 더욱 효과적인 근사화방법이 될 것이다. 일반적으로 중간매개변수 Y 는 설계변수 X 의 향으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Y = X^\beta \quad (11)$$

여기서, Y 는 중간매개변수라 불리는 설계변수의 함수이다. 선형근사화함수, $R(X)$ 를 다음과 같이 중간매개변수의 향으로 표현하면 다음과 같다.

$$R(X) = R(X_0) + \nabla R(Y_0)\delta Y \quad (12)$$

여기서, $Y_0 = Y(X_0)$ 이고 $\delta Y = Y - Y_0$ 이다. 먼저 횡모멘트와 고유진동수와 같은 모든 구조응답은 각각의 구조응답 특성을 나타내는 중간매개변수의 향으로 근사화 할 수 있다. 따라서 지진하중에 대한 등가정적수평하중으로 인한 횡모멘트는 중간매개변수를 $Y = X^{1/3}$ 을 사용함으로써 근사화 할 수 있다. 또한 구조물의 강성

에 기초한 고유진동수는 중간매개변수를 $Y = X^{1/2}$ 사용하여 보다 효과적인 근사화를 통한 재해석을 수행 할 수 있다.

4.2 자동미분

본 연구에서는 중간매개변수에 대한 구조응답값을 구하기 위해 미분치를 이용하는 설계민감도해석을 수행하여야 한다. 그러나 이것은 수계산에 의한 미분, 유한차분법, Maple, Macsyma와 같은 문자식에 의한 미분방법과 같은 종래의 기법들을 사용하면 축적오차와 계산비용이 크기 때문에 실 규모 구조에 대해 적용하는 것은 효율과 정확성이 떨어진다. 따라서 이러한 문제를 극복하기 위해 본 연구에서는 최소의 노력으로 정확하고 효과적인 중간매개변수에 대한 설계민감도해석을 수행하기 위해 자동미분을 도입하였다.²⁰⁾ 자동미분기법은 초등연산(가·감·승·제)과 초등함수(sine, cosine 등)를 이용하여 순차적으로 미분하기 때문에 함수 형태가 아무리 복잡할지라도 상관없이 식(13)과 같은 연쇄법칙을 이용하여 미분 가능하다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} f(g(t)) \Big|_{t=t_0} \\ &= \left(\frac{\partial}{\partial s} f(s) \Big|_{s=g(t_0)} \right) \left(\frac{\partial}{\partial t} g(t) \Big|_{t=t_0} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

이러한 초등연산의 조합을 반복함으로써 미분값을 정확하고 기계적으로 계산할 수 있다. 일반적으로 자동미분의 방법에는 전방모드와 후방모드의 두 가지 방법이 개발되어있다. 독립변수에 대한 도함수를 유지하며 미분하는 방법을 자동미분의 전방모드라 한다. 후방모드는 최종 결과에 대한 매개변수가 도함수값을 유지하는 방법이다. 연쇄법칙과 미분계산의 결합으로 계산비용이 큰 미분계산의 여러 가지 방법들을 가능케 했다. 이러한 연구는 Griewank & Corliss²¹⁾ 그리고 Berz et al²²⁾에 의해 수행된 바 있다. 본 연구에서는 FORTRAN 프로그램 수행에 적합한 ADIFOR^{23), 24)}를 자동미분 프로그램으로 사용하였다.

5. 수치예제

5.1 일반사항

효율적인 다단계 최적화 알고리즘의 성능을 검증하

기 위하여 W형 단면을 가지는 8층 뼈대구조물을 앞서 기술한 이론과 정식화를 기초로 최적화를 수행하였으며, 설계에 필요한 기본적인 사항과 초기 단면제원을 표 5에 나타내었다.

5.2 유전자 알고리즘 설계 일반사항

본 연구에서 제안하는 이산형 다단계 알고리즘의 신뢰도를 비교하기 위하여 이산형 유전자알고리즘을 수행하였다. 여기서, 유전자알고리즘을 수행하기 위한 세부사항은 이미 여러 연구를 통해서 다양한 방법이 사용되고 있으나, 참고문헌(Camp, 1998)등에서 신뢰할 수 있다고 추천되는 방법을 사용하였으며 일반사항을 표 4에 나타내었다.

표 4 유전자 알고리즘 일반사항

세대수	30 세대
교배확률	0.5
돌연변이 확률	0.007
번식방법	elitism
교배방법	uniform method
β, η	200, 4

5.3 결과 및 분석

본 논문에서 제안한 다단계알고리즘의 효율성과 신뢰성을 검증하기 위해, 다음의 3가지 알고리즘을 비교·검토하였다: (1) 기존의 다단계 알고리즘; (2) 효율적인 다단계 알고리즘; (3) 유전자 알고리즘. 또한 각각의 최적화 알고리즘에 대하여 해의 안정성을 검토하기 위해 초기치를 50%, 100%와 150%로 변화시켜 가며 그 수렴성을 각각 조사하였으며, 그 결과를 표 6에 나타내었다.

그림 5로부터 기존의 다단계 알고리즘은 최적화 문

제형성과정에서 서로 다른 초기치에 따라 진동수 제한 구역의 형식이 달라지기 때문에 최적해가 일정한 값으로 수렴하지 않음을 알 수 있다. 기존의 알고리즘에서 초기치 2의 경우와 같이 만약 초기치가 최적해로부터 멀리 떨어져 형성되었다면, 진동수 제약조건이 그에 맞게 형성되지 않아 전체 최적해로 수렴하지 않는다. 그러나, 제안한 알고리즘에서는 제약조건 소거기법을 적용함으로써 항상 진동수 제약조건의 형식을 합리적으로 선정할 수 있게 된다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 초기치에 관계없이 전체최적해를 얻을 수 있기 때문에, 제안한 알고리즘이 기존의 알고리즘보다 더욱 강건하다고 할 수 있으며, 최종 결과값 역시 유전자 알고리즘의 결과값에 매우 근접해 있음을 알 수 있다. 또한, AISC15)의 W형식 표준단면을 이산화 변수로 사용하여 그 결과값의 이용이 용이하다.

제안한 알고리즘의 효율성을 검증하기 위해 수행된 전체구조해석 횟수를 기존의 알고리즘과 유전자 알고리즘의 횟수와 비교하였다. 제안한 알고리즘의 해석횟수는 표 6과 그림 5, 6에서 볼 수 있듯이 기존의 알고리즘(1,442)와 유전자 알고리즘(227,100)에 비하여 재해석 횟수가 획기적으로 줄었음을 알 수 있다. 이는 근사재해석을 적용한 제안한 알고리즘과 비교해 볼 때, 기존의 알고리즘은 매 단계마다 제약조건을 계산하기 위해 수많은 전체 구조해석을 필요로 하므로, 많은 계산비용이 소요된다. 유전자 알고리즘 역시 모든 세대와 개체에 대해 각각 구조해석을 필요로 하므로 엄청난 재해석을 수행하게 된다. 그러나, 제안한 알고리즘에서는 힘모멘트, 진동수와 같은 동적응답을 직접 사용하는 대신에 중간매개변수로 치환된 근사 동적응답을 사용하기 때문에 매 반복단계마다 단 한번의 구조해석만을 필요로 하게 되었다. 이로부터, 제안한 알고리즘이 대형 구조물의 최적화에 더욱 적합하다고 할 수 있다.

표 5 설계 기본 입력자료

구분		설계자료							
구조물의 층수와 높이		$N = 8, \quad h_i = 3m$							
집중질량과 강재의 단위중량		$m_i = 4000kg, \quad \rho = 7850 \text{ kg/m}^3$							
탄성계수와 항복응력		$E = 200,000MPa, \quad F_y = 248MPa(36ksi)$							
진동수 제한구역		$(\omega_a, \omega_b) = [10, 15]$							
구조계 변수의 해 범위		$X^U = (7.0, 7.0, 5.0, 5.0, 4.0, 4.0, 3.0, 3.0), \quad X^L = (1.5, 1.5, 1.0, 1.0, 0.7, 0.7, 0.5, 0.3)$							
초기치	층수	1	2	3	4	5	6	7	8
	단면	W14×132	W14×132	W16×77	W16×77	W14×53	W14×53	W12×40	W12×40

표 6 기존의 알고리즘과 제안한 알고리즘의 최적설계 결과

알고리즘	층수	단면	단면2차모멘트(cm ⁴)	높이(cm)	폭(cm)	플랜지두께(cm)	복부두께(cm)	중량(kg)	해석횟수
기존의 알고리즘	1		48556.85	42.20	28.13	1.62	0.75	2,548.5	1,442
	2		33106.52	39.48	24.68	1.42	0.72		
	3		22448.76	33.67	24.05	1.39	0.61		
	4		14554.04	35.41	17.71	1.02	0.69		
	5		7507.69	31.68	13.77	0.79	0.64		
	6		6999.92	30.17	14.37	0.83	0.56		
	7		4998.94	29.38	12.24	0.71	0.51		
	8		4077.61	30.36	10.12	0.60	0.50		
제안한 알고리즘 (유전자 알고리즘)	1	W18×71 (W18×65)	48699.08 (44536.76)	39.37 (39.37)	19.13 (19.28)	2.06 (1.91)	1.26 (1.14)	2,634.25 (2,608.42)	23 (227,100)
	2	W18×55*	37044.60	39.37	19.13	1.60	1.00		
	3	W18×46*	29635.68	39.37	15.40	1.54	0.91		
	4	W16×35*	21227.80	34.61	15.24	1.08	0.76		
	5	W14×31*	15608.68	30.48	14.03	1.12	0.70		
	6	W14×22*	8283.01	30.48	12.70	0.85	0.58		
	7	W12×19*	5411.01	26.67	10.17	0.89	0.60		
	8	W12×16*	4287.18	26.67	10.13	0.67	0.56		

주) * : 제안한 알고리즘과 유전자 알고리즘이 동일한 W-Shape 단면을 나타냄.

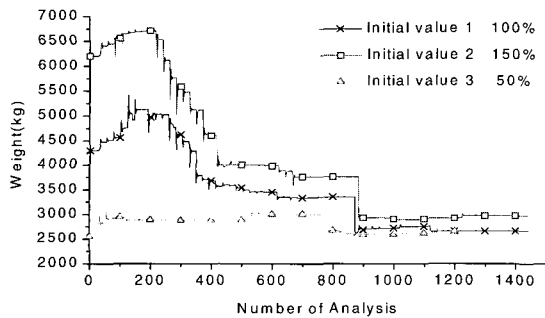


그림 5 기존 알고리즘의 목적함수 수렴곡선

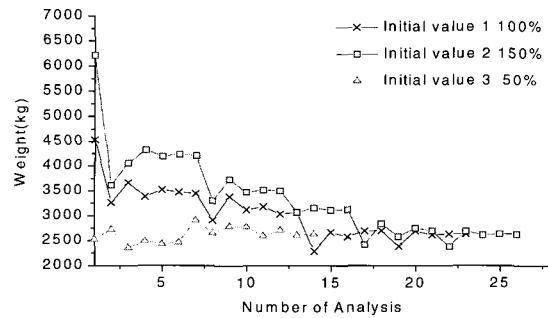


그림 6 제안한 알고리즘의 목적함수 수렴곡선

6. 결 론

본 논문에서는 이산형 변수를 사용하는 뼈대구조물의 효율적인 다단계 최적화방법을 제안하며, 제안된 알고리즘을 수치예를 통하여 효율성과 신뢰성을 검증하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 수치예의 결과로부터 제안한 알고리즘의 결과값은 전체 최적해를 찾는 가장 신뢰할 수 있고 일반적으로 사용되는 유전자 알고리즘의 결과에 매우 근접한 전역 최적해를 구하였다. 따라서, AISC의 W형식 표준단면을 이산화 변수로 사용하고 있는 제안한 알고리즘은 신뢰도가 높은 실용적인 알고리즘이다.
- 2) 제안한 다단계 알고리즘은 각각의 구조응답 특성을

중간매개변수에 의한 근사재해석기법을 적용하여 최적해가 적은 계산비용으로 수렴하였다. 수치예의 결과로부터 기존의 알고리즘(1442)와 유전자 알고리즘(227100)의 엄청난 해석수에 비해 제안한 알고리즘(23)의 해석수를 가지며, 제약조건 소거 기법을 적용하여 기존의 다단계 알고리즘에서 문제점으로 지적된 진동수제약조건의 문제점을 효과적으로 극복함으로써 강건성과 효율성을 향상시켰다.

- 3) 본 논문에서 제안한 다단계 알고리즘은 신뢰성과 효율성을 가지고 있어 대형 뼈대구조물과 같은 실제적인 최적화문제에 매우 효과적으로 최적설계를 수행할 수 있는 보다 향상된 다단계 최적설계 알고리즘이다.

감사의 글

본 연구는 BK21의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. El-Beltagy, M. A. and Keane. A. J., "A comparison of various optimization algorithms on a multilevel problem", *Artificial Intelligence*, 12, 1999, pp.639~654
2. Schoonover, P. L., "Application of a genetic algorithm to the optimization of hybrid rockets", *Journal of Spacecraft and Rockets*, 37, 2000, pp.622~629
3. Ghasemi, M. R., "Optimization of trusses using genetic algorithms for discrete and continuous variables", *Engineering Computations*, 16, 1999, pp.272~301
4. Ghasemi, M. R., "Optimization of trusses using genetic algorithms for discrete and continuous variables", *Engineering Computations*, 16, 1999, pp.272~301
5. Ip, W. H., "Multi-product planning and scheduling using genetic algorithm approach", *Computers & Industrial Engineering*, 38, 2000, pp.283~296
6. Li, QS., "Multilevel optimal design of buildings with active control under winds using genetic algorithms.", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 86, No. 1, 2000, pp.65~86
7. Kumar, R., Rockett, P., "Multiobjective genetic algorithm partitioning for hierarchical learning of high-dimensional pattern spaces: a learning-follows-decomposition strategy," *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 9, No. 5, 1998, pp.822~830
8. Lee, DK., "Hybrid system approach to optimum design of a ship," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Vol. 13, 1999, pp.1~11
9. Okamoto, M., "Nonlinear numerical optimization with use of a hybrid Genetic Algorithm incorporating the Modified Powell method," *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 91, 1998, pp.63~72
10. Kirsch, U., "Multilevel approach to optimum structural design," *ASCE Journal of the Structural Division*, Vol. 101, 1975, pp.957~974
11. Sobieszcanski-Sobieski, J., "Structural optimization by multilevel decomposition," *AIAA Journal*, Vol. 23, 1985, pp.1775~1782
12. Chattopadhyay, A., "Multilevel decomposition procedure for efficient design optimization of helicopter rotor blades," *AIAA Journal*, Vol. 33, 1995, pp.223~230
13. Chattopadhyay, A., Pagaldipti, N., "A multi-disciplinary optimization using semianalytical sensitivity analysis procedure and multilevel decomposition," *Computers Math & Applic*, Vol. 29, 1995, pp.55~66
14. Gang, L., Multi-objective and multi-level optimization for steel frames, *Engineering Structures*, 21, 1999, pp.519~529
15. AISC., *Load and Resistance Factor Design Manual of steel construction*, American Institute of Steel Construction, Chicago, 1994, p.1-26 ~1-43
16. AISC., *Load and resistance factor design specification for structural steel buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago, 1993
17. AISC., *Seismic provisions for structural steel buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago, 1992
18. Vanderplaats, G. N., *ASD : A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis*, Engineering Design Optimization, Inc, Santa Barbara, 1985
19. Goldberg, D. E., *Computer-Aided Gas pipeline using Genetic Algorithm and Rule Learning*, Ph.D. thesis, Dept. Civil Eng., Univ. Michigan., 1983.
20. Lust, R. V., Schmit, L. A., "Alternative

- Approximation Concepts for Space Frame Synthesis", *AIAA/ASME/ASCE/AHS 26th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, April 82, 1985, pp.333~348
21. Griewank, A., and Corliss, G. F., *Automatic differentiation of algorithms : thoery, implementation, and application*. Society of Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pa. 1991
22. Berz, M., *Computational differentiation-techniques, tools, and applications*, Society for Industrial and Applied Mathmatics, Philadelphia, 1996
23. Bichof, C., *ADIFOR-generating derivative codes from FORTRAN 77 programs*. Scientific Programming, 1992
24. Bischof, C., *The ADIFOR2.0 system for the automatic differentiation of FORTRAN 77 programs*, IEEE Computational Sci. & Eng., 3(3), 1996, pp.18~32
25. Camp C., Pezeshk S., and Cao G.(1998) "optimized design of using genetic algorithm", ASCE Journal of structural engineering, Vol. 124, No. 5, pp.551~559
26. 조효남, 민대홍, 박준용, 이산형변수를 이용한 뼈대구조물의 다단계 최적설계, 2000년 가을 전산구조공학회 학술발표회 논문집 제13권, 제20집