

이산형 변수를 이용한 뼈대구조물의 다단계 최적설계

Multi-Level Optimization for Steel Frames using Discrete Variables

조효남*
Cho, Hyo-Nam

민대홍**
Min, Dae-Hong

박준용***
Park, Jun-Yong

ABSTRACT

An efficient multi-level (EML) optimization algorithm using discrete variables of framed structures is proposed in this paper. For the efficiency of the proposed algorithm, multi-level optimization techniques using a decomposition method that separates both system-level and element-level are incorporated in the algorithm. In the system-level, to save the numerical efforts an efficient reanalysis technique through approximated structural responses such as moments and frequencies with respect to intermediate variables is proposed in the paper. Sensitivity analysis of dynamic structural response is executed by automatic differentiation (AD) that is a powerful technique for computing complex or implicit derivatives accurately and efficiently with minimal human effort. In the element-level, to use AISC W-sections a section search algorithm is introduced. The efficiency and robustness of the EML algorithm, compared with a conventional multi-level (CML) algorithm and single-level genetic algorithm, is successfully demonstrated in the numerical examples.

1. 서론

실제적인 대형 강뼈대 구조물의 최적설계에 있어 시공성을 고려하기 위하여 시방서에 규정된 강재제원표를 사용하는 것이 바람직하며, 이를 이용하기 위한 최적설계 방법으로는 이산형 변수를 효과적으로 처리하면서 전역 최적해를 구할 수 있는 유전자 알고리즘의 사용이 필요하다. 하지만 실질적인 대형구조물의 최적설계에서 설계변수의 수가 많아지면, 전역 최적해 알고리즘 뿐만 아니라 국부 최적해 알고리즘조차도 계산시간은 설계변수의 수에 대해 기하급수적으로 증가하여 엄청난 계산비용이 소요된다.¹⁾ 따라서 실질적인 최적화를 수행하기 위해서는 설계변수의 이산화와 계산비용의 절감이 필요한 실정이다. 최근에 연구된 지진하중에 대한 뼈대구조물의 최적설계에 최적화알고리즘을 고찰해 보면 국부 최적화 알고리즘만을 이용하는 다단계최적설계를 Gang Li(1999)가 수행하여 연속형 변수의 최적해를 구하였으며, 이산형 변수를 다루기 위한 연구로는 전역 근사화 기법에 의한 유전자 알고리즘이 이용되고있으나, 이 또한 설계변수의 수가 많은 실제구조물을 다루기에는 엄청난 계산시간이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 AISC W-형식의 표준단면을 이용하여 단면 2차 모멘트와 단면적의 관계식을 유도하여 단면 2차모멘트와 같은 전체구조계에 대한 설계변수와 단면 치수

* 정회원 · 한양대학교 토목 · 환경공학과 교수

** 학생회원 · 한양대학교 토목 · 환경공학과 박사과정

*** 한양대학교 토목 · 환경공학과 석사과정

와 같은 구조요소계에 대한 설계변수를 분리하는 다단계최적설계기법을 사용하였다.

구조요소계에 대한 최적설계는 강제제원표를 이용하여 구조요소에 대한 제약조건을 만족하면서 목적함수를 최소화하는 단면을 탐색하는 알고리즘을 이용하였다. 표준단면 탐색 알고리즘은 전체 구조시스템 해석이 필요 없으므로 계산시간이 적어 실질적인 최적화를 가능하게 할 수 있다. 더욱이 전체구조해석을 이용하는 전체구조계의 설계변수를 줄임으로서 보다 효과적인 최적설계를 수행할 수 있다. 또한 기존의 알고리즘에서는 동특성 재해석기법을 사용하지 않을 뿐 아니라 근사재해석도 수행하지 않고 있어 계산비용이 매우 커진다. 본 연구에서는 계산의 효율성을 높이기 위해 많은 동적해석을 필요로 하는 전체구조계 최적화는 지진하중으로 인한 휨모멘트와 고유진동수 같은 모든 구조응답을 자동미분을 이용한 중간매개변수에 대해 근사재해석 함으로서 효율성을 높였다. 복잡한 음함수 형태인 동적구조응답에 대한 설계민감도해석을 중간매개변수를 사용하여 수행함으로써 함수의 비선형성을 대폭 줄였으며 이러한 중간매개변수를 이용한 설계민감도해석을 효과적이고 정확하게 수행하기 위하여 자동미분기법을 적용하였다. 이 새로운 알고리즘을 기존의 Gang Li²⁾의 연구에서 사용된 다층 뼈대구조물과 동일한 예제에 대해 적용하였다. 또한 유전자 알고리즘만으로 최적해를 구하여 신뢰성을 검증하였다.

2. 문제의 정식화

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

2.1 설계 변수

뼈대구조물의 전체구조계 설계변수는 각 층의 단면 2차 모멘트이며, 구조요소계에서의 설계변수는 AISC W-형식의 표준단면제원으로 정의하여 단일변수 최적화문제로 정의하였다.

2.2 목적함수

전체구조계의 목적함수는 뼈대구조물의 총 중량으로 하였으며 다음과 같이 정식화하였다.

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

여기서, ρ 는 단위중량, A_i 는 i 번째 요소의 단면적, h_i 은 i 번째 요소의 높이를 나타낸다.

구조요소계에서는 요소자체의 중량을 목적함수로 한다.

$$W_e(t) = \rho A_e h_e \quad (2)$$

2.3 제약조건

AISC-LRFD와 AISC 내진규정에 따라 강뼈대구조물의 최적내진설계에 대한 기본적인 설계제약조건을 구성하였으며, 제약조건을 표 1과 같이 요약하였다³⁾.

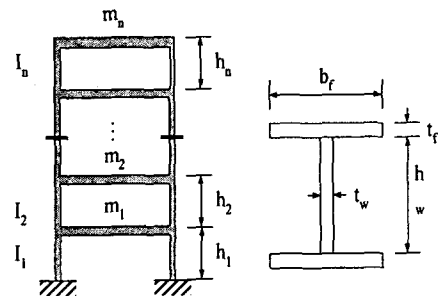


그림 1. I형 단면을 가지는 강 뼈대구조

표 1. 국부좌굴과 강도에 대한 제약조건

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

진동수 제약조건

진동수 제약조건은 고유진동수가 진동수 제한구역이라고 불리는 범위를 벗어나게 하기 위해 사용된다. 진동수 제약조건은 다음과 같다.

$$\omega_j \notin [\omega_a, \omega_b] \quad j=1, \dots, m \tag{3}$$

여기서, ω_j : j 번째 고유진동수, ω_a, ω_b : 제한구역의 하한/상한경계값을 나타낸다.

구조물의 고유진동수를 $\omega_1 \leq \omega_2 \leq \dots \leq \omega_m$ 와 같이 가정하고 다음과 같이 세가지 경우를 고려하였다.

1) 모든 구조물에서 고유진동수가 제한구역보다 작은 경우 진동수 제약조건 식(3)은 다음과 같다.

$$\omega_m \leq \omega_a \tag{4a}$$

2) 모든 구조물에서 고유진동수가 제한구역보다 큰 경우 진동수 제약조건 식(3)은 다음과 같다.

$$\omega_b \leq \omega_1 \tag{4b}$$

3) ω_i, ω_{i+1} 와 같이 한쌍의 진동수가 사용되는 경우에 진동수 제약조건은 다음과 같다.

$$\omega_i \leq \omega_a, \omega_{i+1} \geq \omega_b \tag{4c}$$

추가적인 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 2차 모멘트에 대한 등제약조건을 다음과 같은 추가적인 관계제약조건으로 나타내었다.

$$I_i \leq I_i^* \quad (5)$$

여기서, I_i^* 는 최적화과정에서의 구조요소계의 i 번째 요소에 대한 단면 2차 모멘트이다.

2.4 표준단면의 단면 2차 모멘트와 단면적의 관계식

전체 구조계에서 설계변수가 뼈대구조물의 단면 2차 모멘트이기 때문에, 다단계 최적설계를 수행하기 위하여 단면적 A 와 단면 2차 모멘트 I 간의 관계를 AISC W-형식 강재제원표를 이용하여 회기분석을 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.

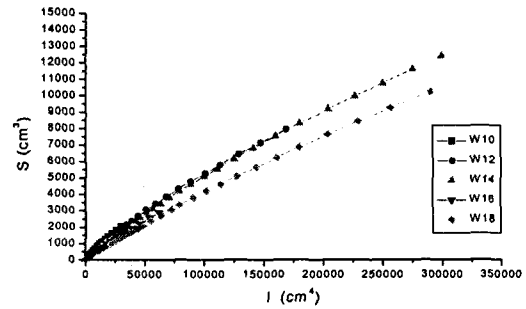
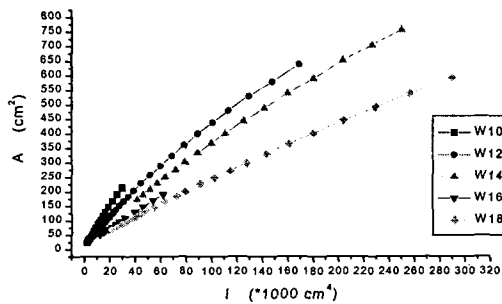


그림 2. W-Shape(AISC)에 따른 A & I 의 상관도

그림 3. W-Shape(AISC)에 따른 S & I 의 상관도

표 2. 강종에 따른 회기분석식 (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%

3. 다단계 최적화 알고리즘

3.1 기존의 다단계 알고리즘

뼈대구조물에 대한 기존의 다단계최적화 알고리즘이 Gang Li(1999)에 의해 제안되었으나 이 알고리즘은 수치해를 적용하는 과정에서 몇가지 문제점이 나타났다. 즉, 초기치가 최적해에 가깝게 정의된 경우에만 합

당한 결과치를 얻을 수 있다⁴⁾. 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 실제 해석을 필요로 한다. 따라서 대형 구조물에 적용했을 때 효율성을 기대할 수 없다. 그리고 표준단면을 사용하지 않으므로 시공성이 떨어지는 최적해를 구할 뿐만 아니라 단면 2차 모멘트와 단면적의 관계가 모든 치수의 단면에 대한 근사 비례관계식을 사용하므로 전체구조계와 구조요소계를 반복하는 해의 수렴시간이 매우 길다.

3.2 효율적인 다단계 알고리즘

기존의 다단계알고리즘²⁾에 비해 우수한 성능을 보여주는 효율적인 다단계 알고리즘의 흐름도는 그림 4과 같다. 개선된 알고리즘에서 수렴효과를 빠르게 하기 위해 중간매개변수에 대한 진동수와 모멘트 같은 구조응답의 근사 재해석을 최적화과정에 적용하였다. 또한, 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 ADS를 이용하여 사용 가능한 기법들을 본 논문에서 사용된 예제에 대해 적용시켜 보았으며, 각 최적화기법의 효율성과 신뢰성을 비교·검토한 결과 ALMM(Augmented Lagrange Multiplier Method)이 대부분의 경우에 대해 가장 합리적인 해를 제공해 주었기 때문에, 본 논문에서 이 방법을 전체구조계 최적화문제에 대한 기본적인 최적화기법으로 사용하였다. 구조요소계 최적설계에서는 최적의 AISC W-형식의 표준단면을 탐색하는 단일변수 최적화문제가 된다. 이를 위하여 전체구조계의 해석이 필요없이 구조요소계 해석으로만 단면을 탐색하여 표준단면 표본 중에서 제약조건을 모두 만족하면서 단면적이 가장 적은 표준단면을 탐색하는 방법을 사용하였다.

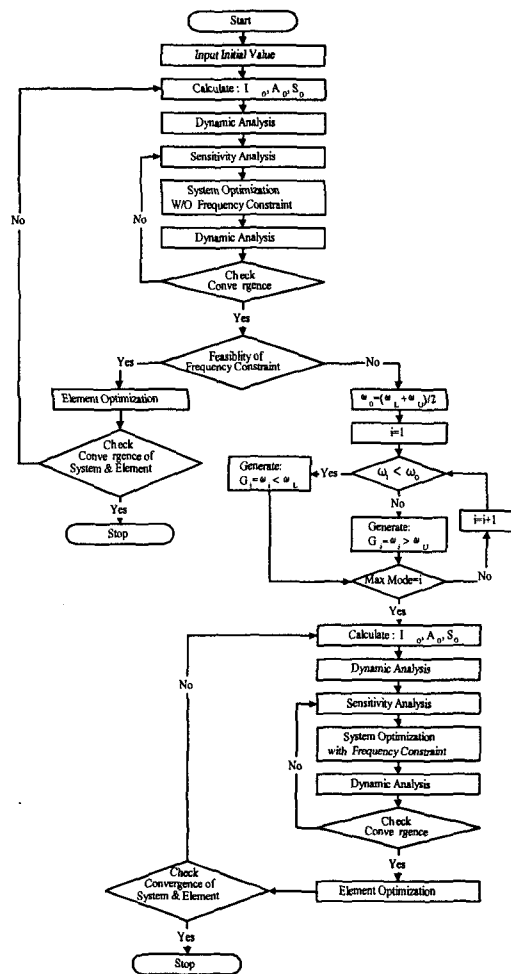


그림 4. 효율적인 다단계 알고리즘

4. 전체 구조계의 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 비선형을 효과적으로 고려할 수 있는 방법은 설계변수가 실제 단면제원일 경우 대부분 각각의 구조응답의 특성을 대표하는 중간매개변수에 대한 함수를 근사화하는 것이다. 예를 들어, 본 연구에서와 같이 변수들을 단면 2차 모멘트의 벡터로 고려할 경우 모든 함수가 중간매개변수의 값을 포함하기 때문에 중간매개변수를 사용한 설계민감도해석은 구조응답의 비선형성을 1차 미분해석만으로도 충분히 고려할 수 있어 근사화의 성능이 분명히 좋다고 할 수 있다. 또한 이러한 중간매개변수는 뼈대구조의 강성행렬식이 요소의 단면 2차 모멘트의 함수로 구성되어 있기 때문이다. 따라서 근사화기법의 성능은 중간매개변수를 사용함으로써 향상될 수 있다. 본 논문에서는 모든 구조응답을 중간매개변수를 사용한 재해석을 통하여 최적화의 성능을 향상시켰다.

1) 등가 정적 수평하중

UBC-91의 내진규정에 따르면 구조물은 다음의 식을 이용하여 구한 전단력에 저항할 수 있게 설계하도록 하고 있다.

$$V = \frac{ZIC}{R_w} W \quad (6)$$

여기서, Z : 내진구역에 대한 계수, I : 중요도 인자, R_w : 구조물의 종류에 따른 계수, W : 지진력을 계산하기 위해 사용된 사하중, C : 동적인자 $C = \frac{1.25S}{T^{0.5}}$, S : 지역계수, T : 지반의 진동주기이다.

2) 근사재해석문제

가장 간단한 국부근사화 방법에는 함수값과 설계점에서의 기울기에 기초하는 목표함수와 제약조건에 대하여 선형근사화하는 것이 그중 하나이다. 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.

$$R(X) = R(X_0) + \nabla R(X_0)\delta X \quad (7)$$

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. 이와 같은 경우 선형근사화를 여러번 반복하는 것이 더욱 효율적일 수 있다. 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.

$$Y = X^p \quad (8)$$

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

$$R(X) = R(X_0) + \nabla R(Y_0)\delta Y \quad (9)$$

여기서, $Y_0 = Y(X_0)$ 이고 $\delta Y = Y - Y_0$ 이다. 먼저 휨모멘트와 고유진동수와 같은 모든 구조응답은 각각의 구조응답 특성을 나타내는 중간매개변수의 함으로 근사화 할 수 있다. 따라서 지진하중에 대한 등가정적수평하중으로 인한 휨모멘트는 중간매개변수를 $Y = X^{1/3}$ 을 사용함으로써 근사화 할 수 있다. 또한 구조물의 강성에 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 미분 방법과 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 도입하였다⁵⁾. 자동미분기법은 초등연산(가·감·승·제)과 초등함수(sine, cosine 등)를 이용하여 순차적으로 미분하기 때문에 함수 형태가 아무리 복잡할지라도 상관없이 식(10)과 같은 연쇄법칙을 이용하여 미분 가능하다.

$$\frac{\partial}{\partial t} f(g(t)) \Big|_{t=t_0} = \left(\frac{\partial}{\partial s} f(s) \Big|_{s=g(t_0)} \right) \left(\frac{\partial}{\partial t} g(t) \Big|_{t=t_0} \right) \quad (10)$$

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 & Corliss(1991) 그리고 Berz et al(1996)에 의해 수행된 바 있다⁶⁾. 본 연구에서는 FORTRAN 프로그램 수행에 적합한 ADIFOR⁷⁾를 자동미분 프로그램으로 사용하였다.

5. 수치예제

그림 1에서와 같이 효율적인 다단계 최적화 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 8층 뼈대구조물을 앞서 기술한 이론과 정식화를 기초로 최적화를 수행하였다. 또한 해의 신뢰도를 분석하기 위하여 이산형변수 최적화방법 중 대표적인 유전자 알고리즘을 이용하여 동일한 표준단면 표본에 대하여 최적설계를 수행하였다.

5.1 일반사항

설계에 필요한 기본적인 사항을 표 3에 나타내었으며, 본 논문에서 제안한 다단계알고리즘의 효율성과 신뢰성을 검증하기 위해 기존의 다단계 최적화기법(CML)과 유전자알고리즘(GA)을 이용한 최적해를 비교하였다. CML알고리즘에 대해서 전체요소계와 구조요소계에서의 설계입력자료 및 제약조건은 본 논문에서 제안된 알고리즘과 동일하게 적용하였다.

초기치는 AISC-W강을 각층마다 변화시켜가며 적용하였으며, 또한 해의 안정성을 검토하기 위하여 초기치에 150%와 75%감소한 값에 대해서도 각각 수렴성을 조사하였다.

표 3. 설계 기본 입력자료

Item		Data							
구조물의 층수와 높이		$N=8, h_i=4m$							
집중질량과 강재의 단위중량		$m_i=4000kg \quad \rho=7850 \text{ kg/m}^3$							
탄성계수와 항복응력		$E=200,000Mpa, F_y=248Mpa (36ksi)$							
진동수 제한구역		$(\omega_a, \omega_b)=[15,20]$							
구조계 변수의 해 범위		$X^U=(7.0,7.0,5.0,5.0,4.0,4.0,3.0,3.0),$ $X^L=(1.5,1.5,1.0,1.0,0.7,0.7,0.5,0.3)$							
초기치	story	1	2	3	4	5	6	7	8
	type	W14×132	W14×132	W16×77	W16×77	W14×53	W14×53	W12×40	W12×40

5.2 유전자알고리즘 설계 일반사항

본 연구에서 제안하는 이산형 다단계 알고리즘의 신뢰도를 비교하기 위하여 이산형 유전자알고리즘⁸⁾을 수행하였다. 여기서, 유전자알고리즘을 수행하기 위한 세부사항은 이미 여러 연구를 통해서 다양한 방법이 사용되고 있으나, 기존문헌[8, 9]등에서 신뢰할 수 있다고 추천되는 방법을 사용하였으며 일반사항은 표 4와 같다. 또한, 적합도함수와 벌칙함수로 사용된 함수식은 식(11), (12)와 같다.

$$Fitness \ Function = \left(\sum_{i=1}^n \rho A_i h_i + Penalty \ Funtion \right)^{-1} \quad (11)$$

$$Pnalty \ Function = \beta (constraint - 1)^\eta \quad (12)$$

여기서, *Fitness Funtion*은 적합도 함수이며, β, η 는 가중계수이며, *constraint*는 본 논문에서 전체 구조계와 구조요소계에 적용된 모든 제약조건이 이에 해당된다.

표 4. 유전자 알고리즘의 일반사항

표준단면 개수	128개	돌연변이 확률	0.007
세대수	5000세대	번식방법	elitism
개체수	1000개체	교배방법	uniform method
교배확률	0.5	β, η	200, 4

5.3 결과 및 분석

본 논문에서 제안된 알고리즘(EML), 기존의 알고리즘(CML)과 유전자 알고리즘(GA)을 통한 각각의 결과 값은 표 5와 같다. 표 5에서 나타난 바와 같이 제안된 알고리즘(EML)이 전체 최적점을 찾는 가장 확실한 방법인 유전자알고리즘의 최적해와 똑같은 결과를 주어 해의 신뢰도가 보장된다고 할 수 있다. 제안한 알고리즘의 효율성을 증명하기 위해 본 알고리즘의 해석회수를 기존 알고리즘의 해석회수와 비교해 보았다. 표 5에

표 5. 기존의 알고리즘과 개선된 알고리즘의 최적설계 결과

알고리즘	층수	W-Shape	단면2차모멘트	hw(cm)	bf(cm)	Tf(cm)	Tw(cm)	중량(kg)	해석회수
CML	1		33053.00	44.18	19.53	1.24	1.11	1322.26	1176
	2		19921.99	38.65	18.31	1.06	0.95		
	3		12097.77	32.92	16.88	1.01	0.75		
	4		7066.21	27.17	15.51	1.00	0.51		
	5		3723.33	24.42	8.37	1.00	0.81		
	6		2654.06	22.33	7.14	1.00	0.74		
	7		4748.31	25.89	9.59	1.00	0.85		
	8		3135.88	23.28	7.79	1.00	0.77		
EML	1	W18×55	37044.60	39.37	19.13	1.60	1.00	1437.1	5
	2	W18×46	29635.68	39.37	15.40	1.54	0.91		
	3	W18×35	21227.80	39.37	15.24	1.08	0.76		
	4	W16×26	12528.57	34.61	13.97	0.88	0.64		
	5	W14×22	8283.01	30.48	12.70	0.85	0.58		
	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		
GA	1	W18×55	37044.60	39.37	19.13	1.60	1.00	1437.1	2,271,000
	2	W18×46	29635.68	39.37	15.40	1.54	0.91		
	3	W18×35	21227.80	39.37	15.24	1.08	0.76		
	4	W16×26	12528.57	34.61	13.97	0.88	0.64		
	5	W14×22	8283.01	30.48	12.70	0.85	0.58		
	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		

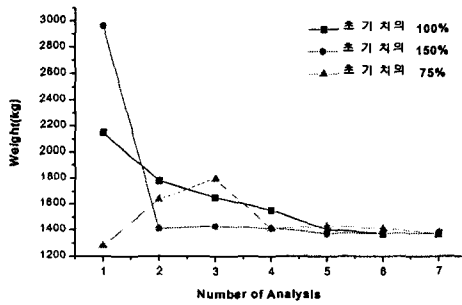


그림 5. 초기치에 따른 수렴 곡선

서 볼 수 있듯이 개선된 알고리즘의 경우 5회로 기존의 알고리즘의 경우 1,176회와 유전자알고리즘 2,271,000회 보다 훨씬 적은 반복해석 후 최적해를 찾아냈다. 이는 기존의 알고리즘(CML)이 설계민감도 해석 없이 동적인 구조응답을 얻기 위해 구조해석을 통하여 직접적으로 얻어진 결과를 이용한 반면, 제안한 효율적인 다단계 알고리즘(EML)은 자동 미분을 통한 근사재해석 기법을 이용하여 적은 수의 동적 구조응답만을 필요로 하는 알고리즘을 채택하여 동적인 구조해석수를 획기적으로 줄일 수 있었다. 또한, 그림 5에 나타난 바와 같이 서로 다른 100%, 75%, 150%의 초기치에 대해 항상 안정적인 값에 수렴하므로 제안한 알고리즘(EML)의 최적해는 정확도뿐만 아니라 안정성을 가지고 있어 신뢰성이 보장되는 알고리즘이라고 판단된다.

이와 같이 강재제한표로부터 얻은 A와 I 또는 S와 I의 2차 곡선 관계식을 이용하는 본 이산형 변수를 이용하는 다단계 최적설계 알고리즘은 실제 사용되는 AISC W형강을 이용하고 계산 비용이 적게들어 실용적일 뿐만 아니라 엄밀 해석의 결과와도 똑같은 결과를 주므로 신뢰성이 보장되는 방법이라고 사료된다.

6. 결론

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

- 1) 자동미분을 이용한 근사재해석을 수행하여 기존의 알고리즘에 비해 해석회수를 획기적으로 줄였으며, 구조요소계에서 강재제한표의 제원을 포함하는 이산화 설계변수를 이용함으로써 설계변수를 줄일 수 있어 계산비용의 절감을 가져왔다.
- 2) 이산화설계변수를 이용하여 별도의 의사이산화 과정이 필요 없으며, 실제로 제작되는 단면을 사용하여 실질적인 단면치수를 이용할 수 있다.
- 3) 본 연구에서 제안하는 알고리즘(EML)은 최적설계에 있어 가장 중요한 안정성, 효율성, 강건성이 확보되었다고 할 수 있으며, 계산의 효율성과 해의 안정성이 절실히 요구되는 대형구조물의 최적설계에 적용성이 높을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 BK21의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Berz, M., Bischof, C., Corliss, G., and Griewank, A., eds. "Computational differentiation—techniques, tools, and applications", *Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pa.*, 1996
2. Gang Li et al, "Multiobjective and Multilevel Optimization for Steel Frames", *Engineering Structures* 21, 1999, pp519-529
3. *Load & Resistance Factor Design*, American Institute of Steel Construction, 1994
4. 조효남의 3명, "자동미분을 이용한 뼈대구조물의 다단계 다목적 최적설계", 한국전산구조공학회 봄학술발표회 논문집, 2000, pp.177~187
5. Lust, R.V. and L.A.Schmit, "Alternative Approximation Concepts for Space Frame Synthesis", *AIAA/ASME/ASCE/AHS 26th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, April 82, 1985, pp. 333-348
6. Griewank, A., and Corliss, G. F., eds. (1991). Automatic differentiation of algorithms : theory, implementation, and application. Society of Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pa.
7. Bischof, C., Carle, A., Khademi, P., and Mauer, A. "The ADIFOR2.0 system for the automatic differentiation of FORTRAN 77 programs." *IEEE Computational Sci. & Engrg.*, 3(3), 1996, pp.18-32
8. 김여근, 이상복, 윤복식, 메타휴리스틱, 영지문화사, 1998, pp.3~56
9. Camp, C., Penzeshk, S., Cao, G., "Optimized Design of Two-Dimensional Structures Using Genetic Algorithm", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, May 1998, pp.551-559