

ASA알고리즘을 이용한 강구조물의 최적 중량 설계

Optimal Weight Design of Steel Structures Using Adaptive Simulated Annealing Algorithm

배 준 서*

Bae, Jun-Seo

홍 성 욱**

Hong, Seong-Uk

조 영 상***

Cho, Young-Sang

Abstract

Structural optimization is widely adopted in the design of structures with the development of computer aided design and computer technique recently. By applying the structural optimization in the last decades, designers have gained the design scheme of structures more feasibly and easily. In this paper, an optimal design of one 30-story high rise steel structure is performed considering material non-linearity. Based on finite element analysis and adaptive simulated annealing algorithm, the optimal weight of structure is derived under constraints of allowable yield stress, shear stress and serviceability.

요 지

구조최적화는 최근 CAD와 컴퓨터 기술이 발전하면서 구조설계부분에 널리 이용되고 있다. 본 연구에서는 30층의 강구조물을 대상으로 유한요소해석 및 어댑티브 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘을 이용하여 최적중량 설계를 구현하였다. 최적설계는 모든 설계상수와 설계하중들이 주어졌을 때, 목적함수가 최소로 되며 동시에 모든 설계제약조건을 만족시키는 설계변수를 결정하는 설계법이라고 정의할 수 있다. 최적설계 구현을 통해 건설 측면에 있어 성능 향상과 신뢰도 향상 효과를 가져 올 수 있을 것이다.

Keywords : Adaptive simulated annealing algorithm, Global optimum, Optimal weight, Steel structure, Structural optimization

핵심 용어 : 어댑티브 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘, 전역최적, 중량최적, 강구조, 구조최적화

* 학생회원, 한양대학교 건축환경공학과 석박사통합과정

** 학생회원, 한양대학교 건축환경공학과 박사과정

*** 정회원, 한양대학교 건축학부 부교수

E-mail : forum0407@hanyang.ac.kr 031-400-4687

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 2009년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

세계 곳곳에서 초고층 건축물의 수요 증가에 따라 구조물의 최적설계에 대한 요구가 증대되고 있다. 고층화 될수록 중, 저층 구조물과는 다른 특성을 갖고 있으므로 기존 설계 패턴을 답습하기보다는 새로운 특성에 맞는 설계 방법을 구축하여야 한다. 기존 시행착오 설계 방법에서는 설계자의 경험에 의한 직관과 주관적이고 정교한 능력에 의해 설계가 좌우되었다. 이 경우 건물이 초고층화 될수록 부재 수의 증가로 많은 반복과정에 의해 설계 소요시간이 소요되어 효율성이 저하되고 결과적으로 경비 면에서 경제성이 저하된다. 반면 구조타입, 하중조합, 재료, 코드 및 다양한 제약조건들이 기반이 된 최적설계는 최적해를 얻기 위한 최적화 이론을 컴퓨터의 기하학적 모델에 적용함으로써 효과적이고 경제적인 결과를 가져 올 수 있다.

최적화 기법 중 하나인 Simulated Annealing(SA) 알고리즘은 Kirkpatrick⁽⁸⁾에 의해 1983년에 제안되었으며, 목적함수 및 제약함수의 연속성이 불필요하며 초기 설계 선택에 의해 크게 좌우되지 않고, 설계가능 영역이 분리된 경우에도 전역 최소해로 수렴이 가능한 장점을 갖고 있다. 따라서 SA기법은 기존의 수치 해석적 또는 수학적 기법보다 복잡하고 비선형성을 갖는 구조 기준식을 비교적 쉽게 적용하여 대상 구조물을 최적화 할 수 있다. 국내에서는 2000년 이차돈⁽¹¹⁾은 SA알고리즘을 이용하여 철근콘크리트 골조의 최적 구조설계에 대한 내용을 다루었다. 하지만 SA알고리즘은 최대 반복 수행 횟수로 정의되는 모호한 종료기준, 무작위적 탐색(random search)등으로 인해 많은 반복 수행이 요구되는 단점을 갖고 있다. 이에 반해 Lester Ingber⁽¹⁰⁾에 의해 구현된 Adaptive Simulated Annealing(ASA)알고리즘은 온도감소치를 빠르게 감소시키는 장점을 갖고 있어 목적함수와의 수렴성에서 우수성을 보인다.

강재는 구조물을 구성하는 핵심부재의 하나로써 다양한 형상과 치수를 가진 부재이고 하중에 대한 탄성 거동을 나타내므로 부재 및 시스템 거동의 이해가 용이하다. 따라서 최적화 기법을 적용하여 최적설계 시 적용성 및 효율성의 판단이 용이할 수 있다. ASA알고

리즘은 제약조건에 따라 탄성/비탄성설계에 모두 적용 가능하나 본 연구에서는 탄성설계에 제한하여 30층 강구조물을 대상으로 ASA알고리즘을 응용하여 구조물의 재료적 특성, 사용성 및 부재형상 등의 제약조건을 고려하여 모든 제약조건을 만족하는 그룹핑된 부재형상의 수렴성에 기반을 두어 구조물의 중량 최적화를 구현하고, Computer Aided Optimization(CAO)의 구조물에 대한 효율성 및 적용성을 알아보려고 한다.

2. 이 론

2.1 최적설계

일반적으로 구조시스템의 최적 설계란 모든 설계상수와 설계하중들이 주어졌을 때, 목적함수가 최소로 됨과 동시에 모든 설계제약조건을 만족시키는 설계변수를 결정하는 설계법이라고 정의할 수 있다.⁽²⁾

주어진 제약조건을 만족하는 범위 내에서 목적함수의 가장 적절한 값을 유도해내는 설계변수를 찾는 과정이 구조 최적화 기법으로 다음 식(1)과 같은 형태로 표현된다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && F(x) \\ & \text{St} && g_k(x) \leq g_k^U \quad (k=1,2,\dots,m) \\ & && x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad (i=1,2,\dots,n) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $F(x)$ 는 목적함수, $g_k(x)$ 는 k 번째 제약조건 함수, $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 는 설계변수이다. 이때 제약조건

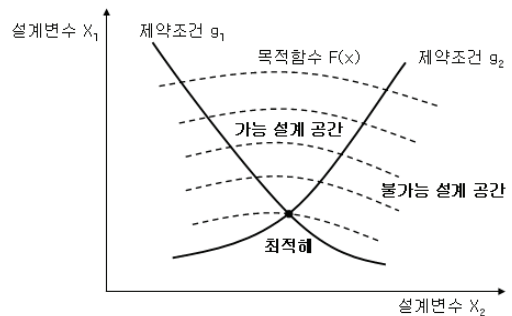


Fig. 1 최적설계공간의 개념도

함수는 상부 제한값(g_i^U), 설계변수는 상·하부 제한값(x_i^L, x_i^U)을 만족해야 한다.⁽⁹⁾

2.2 Simulated Annealing(SA)

모의담금질(Simulated Annealing, SA)기법은 조합 최적화 기법의 일종으로서 함수의 연속성을 요구하지 않으며 이산변수를 갖는 최적화 문제에 이상적일 뿐 아니라 등고선을 따라 올라가는(uphill)기능을 지님으로써 전체 최적해에 수렴하는 장점을 갖는다. 하지만 최대 반복 수행 횟수로 정의되는 모호한 종료기준, 무작위적 탐색(random search)등으로 인해 많은 반복 수행이 요구되는 단점을 갖고 있다. Fig. 2는 SA의 개념을 나타낸다.

2.3 Adaptive Simulated Annealing(ASA)

일반적인 SA알고리즘의 냉각스케줄은 다음과 같은 식(2)로 온도의 감소치가 정의된다. 식(2)에서의 R값은 일정한 상수로 적용되어진다.

$$T_i(k_i) = T_{0i} \times R \quad (2)$$

이와 달리 ASA알고리즘은 식(3)처럼 지수함수를 적용하여 온도 감소치를 빠르게 감소시키는 냉각스케줄을 구현한다.

$$T_i(k_i) = T_{0i} \exp(-c_i k_i^{1/D}) \quad (3)$$

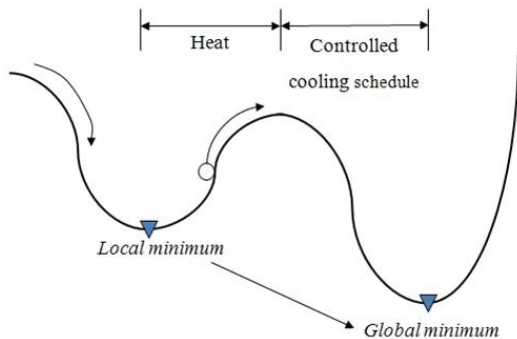


Fig. 2 SA 개념도

식(3)에서 c_i 는 알고리즘을 조율하고, 냉각스케줄을 조정하는 변수이고, D 는 모델에서의 변수개수를 의미한다. 각각의 식(2), (3)에서 T_{0i} 는 초기온도를 나타내고, k_i 는 최적화 수행 시 반복회수를 의미한다.⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

Fig. 3의 알고리즘에서 알 수 있듯이 에너지가 증가할 경우에는 확률에 근거하여 새로운 함수 값을 찾는데 그 확률에서 중요한 요소로 작용하는 부분이 바로 온도이다. 온도를 감소시키는 과정을 냉각스케줄이라고 하는데 작용 방법 여부에 따라 목적함수 값과 수렴성에 영향을 미치게 된다. 따라서 수많은 반복 개념으로 이해 할 수 있는 담금질 과정에서 효율적 성능을 추구하기 위해선 효율적인 냉각스케줄의 적용이 필요하다.

3. ASA알고리즘에 의한 최적 중량 설계 구현

3.1 Case study 모델

본 연구에서는 30층의 3차원 강구조물을 대상으로 ASA알고리즘을 적용하여 최적 중량 설계를 목적으로 하였다.

Table 1 강재 특성값

항목	사용값
단위부피당 무게(ρ)	$7.698 \times 10^5 \text{ N/mm}^3$
탄성계수(E)	$2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$
포아송 비(ν)	0.3

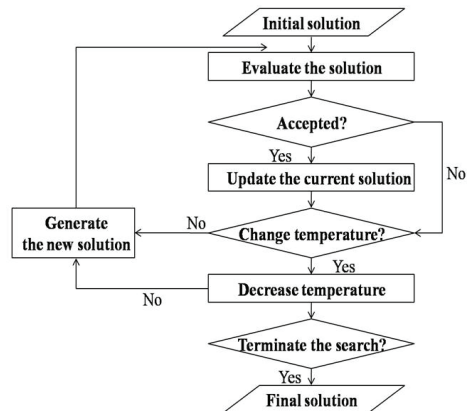


Fig. 3 SA 알고리즘

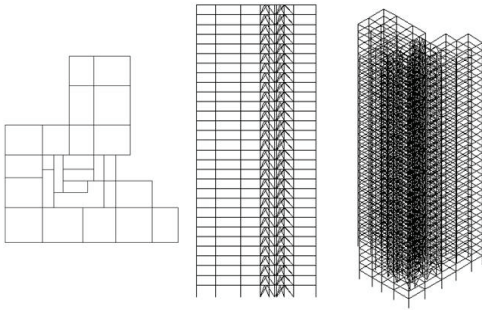


Fig. 4 Case study 모델

본 모델은 강성골조를 가진 코어 방식으로써 코어는 Chevron형의 가새로 이루어져 있고 강구조 한계상태 설계기준(AIK-LSD97)에 준하여 설계하였다. 또한 본 모델은 1998개의 절점과 4980개의 요소로 구성되어 있고 강축과 약축의 방향에 맞추어 기둥과 거더는 모멘트 접합, 보와 가새는 핀접합으로 이루어져 있다. Table 1은 적용된 모델에 사용된 강재 특성값을 나타내고, Fig. 4는 모델의 형상을 나타낸다.

3.2 가정사항

3.2.1 철골부재의 단면 형상 및 강종

구조 부재인 기둥, 거더 그리고 가새의 단면 형상은 H형강으로 제한하며 강종 역시 SS400으로 제한한다. 이는 강재 부재 형상에 따른 구조적 거동 차이를 방지하고 그에 따른 설계변수의 확장을 방지하기 위한 가정이다. 또한 강종에 따른 강도의 차이로 인한 설계변

Table 2 하중조합 조건

Case No.	하중조합
1	1.2D+1.6L
2	1.2D+1.3WX+0.5L
3	1.2D+1.3WY+0.5L
4	1.2D-1.3WX+0.5L
5	1.2D-1.3WY+0.5L
6	1.2D+1.5EX+0.5L
7	1.2D+1.5EY+0.5L
8	1.2D-1.5EX+0.5L
9	1.2D-1.5EY+0.5L

D: 고정하중 L: 활하중
 WX: 풍하중(X방향) WY: 풍하중(Y방향)
 EX: 지진하중(X방향) EY: 지진하중(Y방향)

수 확장을 방지하고 CAO의 효율성 판단을 용이하도록 하기 위한 가정이다.

3.2.2 부재위치 고정

구조물을 구성하는 각 부재의 위치는 확정된 상태로 주어진다. 이는 중량 최적에만 초점을 두고 절점 변경에 따른 형상 최적을 배제하기 위한 조건이다.

3.2.3 하중조합

최적화 과정에 있어서 하중조합은 다음 Table 2와 같이 나타나는 9가지 하중조합의 경우의 수를 고려하여 그 중 가장 임계 조합 값의 경우를 적용하도록 가정한다. 이는 각 설계기준에서 요구하는 하중조합 조건을 모두 고려하여 자동 생성 할 수 있게 하기 위한 가정이다.

3.2.4 부재의 그룹핑(grouping)

본 연구에서는 부재 그룹을 5가지로 제한하여 사용한다. 본 연구에서는 단일부재인 철골부재로만 구성된 강구조물에 새로운 알고리즘을 적용하여 총 중량 면에서 최적화기법을 실현하고자 하였고 부재 그룹핑을 최소화하여 구조모델링을 하였다. 부재 그룹을 5가지로 제한하여 30층 대상건물을 모델링 하는 과정에서 NG 부재 제거 후 최적화 기법을 적용하기 위한 단계로써 Table 3과 같은 부재크기가 초기조건으로 선정되었다. Fig. 5는 부재 그룹핑을 나타내고 저층부 10개 층 코어 기둥부재그룹, 저층부 10개 층 외부기둥 및 중층부 10개 층 코어기둥, 중층부 10개 층 외부기둥 및 고층부 10개 층 코어기둥, 고층부 10개 층 외부기둥, 수평 부재 및 가새로 구성되어 있다. 이는 실질적 부재산정과는 다소 차이가 있으나 거동이 유사할 것으로 예상되는 부재들을 그룹핑 함으로써 설계변수를 줄이고 CAO의 구조물에 대한 적용성 및 효율성을 알아보기 위한 가정이다.

Table 3 부재 그룹핑

Group No.	부재
1	H- 692×300×13×20
2	H- 400×400×40×40
3	H- 458×417×30×50
4	H- 498×432×45×70
5	H- 700×700×70×70

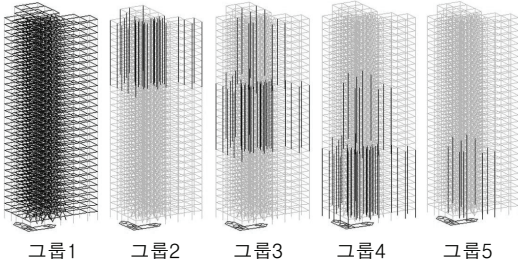


Fig. 5 부재 그룹핑

3.3 ASA알고리즘을 이용한 CAO

3.3.1 목적함수

건물의 중량 산정식을 목적함수로 둔다. m 개의 유한요소로 구성된 i 번째 요소가 일정한 단면 형상을 가지고, 그 단면적이 A_i , 길이가 L_i , 밀도가 ρ_i 라면 구조물의 총 중량은 다음 식(4)와 같다.⁽⁶⁾

$$\text{Minimize } F(x) = W = \sum_{i=1}^m \rho_i A_i L_i \quad (4)$$

3.3.2 벌점(Penalty)함수

최적화 적용 시 제약조건 문제의 위반 회수와 위반 수준을 고려하여 비제약조건 문제로 변환시키기 위한 벌점함수를 도입한다. 이는 비선형설계문제를 일련의 비제약 최적화 문제로 바꾸어 수차 적으로 최적화를 찾아가는 방법이다.⁽⁷⁾

$$\text{Minimize } P(x) = F(x) + R \sum_{k=1}^n [g_k(x)]^2 \quad (5)$$

R : penalty 변수

n : 제약조건식 수

3.3.3 제약조건

본 연구에서 사용된 제약조건들은 다음과 같다.

$$s.t \quad \sigma_i \leq \sigma_{allowable} \quad (6)$$

$$\tau_i \leq \tau_{allowable} \quad (7)$$

σ 는 부재응력을 나타내고 허용 항복응력($\sigma_{allowable}$) 값은 $250MPa$ 이다. τ 는 부재의 전단응력을 나타내고 허용 전단응력($\tau_{allowable}$) 값은 $0.4F_y$ 로서 $100MPa$ 가 적용되었다.

$$s.t \quad d_{hl} = \frac{\delta_{h30l}}{\sum_{k=1}^{30} h_k} \leq d_{hl}^U \quad (8)$$

$$d_{kl} = \frac{\delta_{kl} - \delta_{(k-1)l}}{h_k} \leq d_{kl}^U \quad (9)$$

식(8)과 식(9)는 최상층 변위와 층간 변위를 고려한 제약조건들로 h 는 층높이이고, 아래첨자 k 는 건물의 층을, l 은 횡하중 방향($l=x$ 혹은 $l=y$)을 나타낸다. 그리고 d_{hl}^U 은 최상층 횡변위 제한율을 제어하는 상한치로 $H/500$ (H : 구조물의 총 높이)가 적용되었고, d_{kl}^U 은 층간변위 제한율을 제어하는 상한치로 $h/300$ (h : 층고)가 적용되었다.⁽⁶⁾

다음 식(10)과 식(11)은 각각 웹과 플랜지의 좌굴 제약 조건을 나타낸다.

$$s.t \quad l_{w_i} = \frac{1}{124 \sqrt{235/f_y}} - \frac{t_{w_i}}{H_i} \leq l_{w_i}^U = 0 \quad (10)$$

$$l_{f_i} = \frac{1}{28 \sqrt{235/f_y}} - \frac{t_{f_i}}{B_i} \leq l_{f_i}^U = 0 \quad (11)$$

다음 식(12)는 부재형상의 설계변수 조건으로 추가된다.

$$s.t \quad H_i^L \geq 2t_{f_i}^U \quad (12)$$

4. 최적설계 결과

4.1 초기조건에 따른 설계

구조물의 최적화는 먼저 구조형태, 하중, 사용재료 등의 결정으로부터 시작되며 최적화 과정에서는 이들의 타당성은 문제 삼지 않는다. 설계 자료들이 결정되면 최적화 문제의 정식화가 가능하다. 즉, 목적함수와

제약조건 그리고 설계변수의 수식화로 최적화의 기준을 만드는 과정이 이루어진다. 본 연구에서는 최적화 결과의 기준을 만드는 과정으로써 3.2.4절 부재 그룹 평 가정 사항에 의한 결과로서 유한요소해석(FEA)을 통하여 구조물의 총 중량 값이 5758.864ton으로 도출되었다.

4.2 ASA알고리즘을 이용한 최적설계

4.2.1 설계변수 및 제약조건

Fig. 6과 Fig. 7의 가로 축 상 데이터들은 ASA기법의 무작위적 탐색에 따른 반복 수행 횟수를 나타내고, 세로 축 상의 데이터들은 부재 단면의 변수(parameter, 단위:m)와 항복응력을 의미한다.

Fig. 6과 Fig. 7과 같이 부재 단면의 변수들과 응력 모두 등고선을 따라 올라가는(uphill) 기능을 갖고

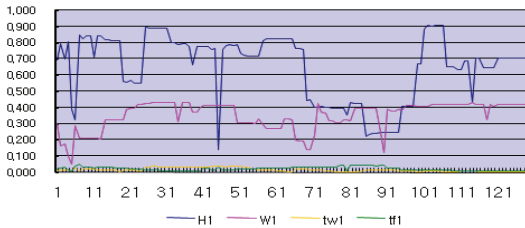


Fig. 6 그룹1 부재의 수렴도

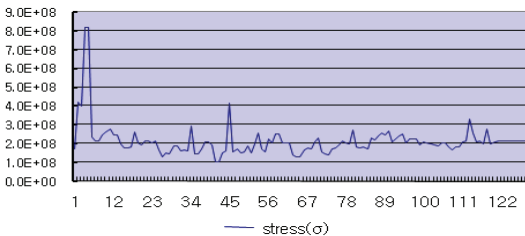


Fig. 7 항복응력의 수렴도

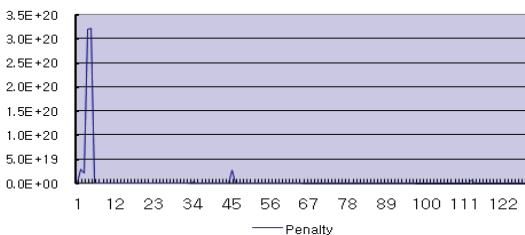


Fig. 8 벌점함수의 대응

있음을 알 수 있고 각 부재들의 경우 122번의 반복 수행 결과 이후부터 안정된 상태(stable state)로 수렴해 가며 국소 최적점(local optimum)을 지나 전역 최적점(global optimum)을 찾아가는 것을 알 수 있다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 반복 수행 중 4번째 수행 결과 값에서는 321,513,149,663,903,000,000이라는 큰 함수 값을 갖는다. 이는 Fig. 8에서 볼 수 있는 4번째 수행 결과 값이 본 연구의 제약조건식들 중 응력의 제한 값을 크게 초과함에 따라 제약조건 문제의 위반 회수와 위반 수준을 고려하여 비제약조건 문제로 변환시키고 수 차적으로 최적점을 찾아가는 것을 보여준다. 하지만 Fig. 9와 달리 Fig. 10의 부재1에서 플랜지 국부좌굴 제약조건상의 96번째 반복 수행 과정에서부터 제약조건을 만족하지 못하게 된다. ASA 기법을 이용한 최적설계 과정상에서의 벌점(penalty) 함수는 제약조건 위반정도에 따라 비제약조건으로 변환시키고 최적해를 찾아간다. 이는 ASA알고리즘이 안정상태에 도달하여 최적해를 찾는 것을 도와주는 작용을 하고 모든 제약 조건을 만족하는 데이터들이 최적해라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 모든 제약조건을 만족시키는 반복수행 값들 중에서 부재1의 플랜지 국부좌굴이 일어나기 직전의 값인 95번째의 결과 값들을 최적해로 본다.

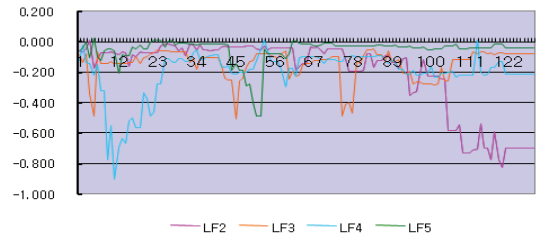


Fig. 9 그룹2-5 부재의 플랜지 국부좌굴제약의 수렴도

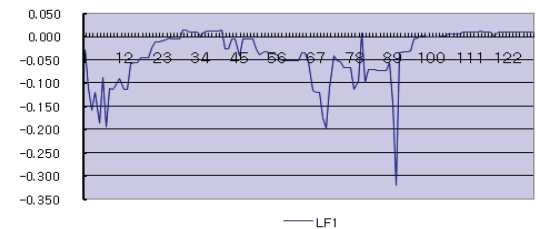


Fig. 10 그룹1 부재의 플랜지 국부좌굴제약의 수렴도

4.2.2 최적해에 따른 사용성 제한 검토

Fig. 12와 Fig. 13은 본 모델의 사용성 제한과 최적해에 따른 사용성 제한을 검토한 것이다.

층간변위의 사용성 제한은 $h/300$ (h : 층고)로서 0.010667m를 나타내고 최적해에 따른 층간변위는 0.007m로 만족한다. 그리고 최상층 변위의 경우 역시 $H/500$ (H : 구조물의 총 높이)의 제한 값인 0.1936m를 나타내고 최적해에 따른 최상층변위는 0.173m로 이에 만족한다.

4.2.3 최적해에 따른 구조물의 총 중량

Fig. 13은 문제 정식화에 따른 초기 부재들의 목적 함수인 건물의 초기 총 중량 값과 ASA알고리즘에 따른 건물의 최적 총 중량 값을 나타낸다. 이 결과 최적

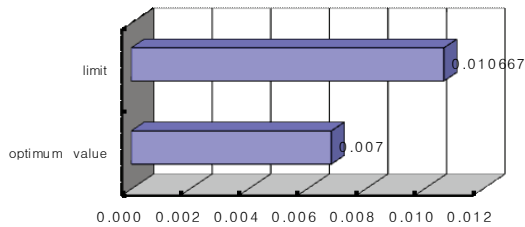


Fig. 11 최적해에 따른 층간변위 검토

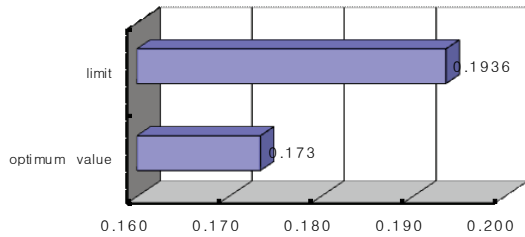


Fig. 12 최적해에 따른 최상층 변위 검토

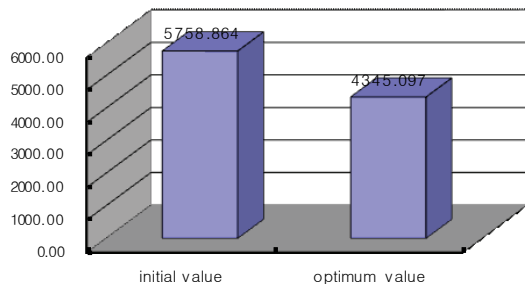


Fig. 13 최적설계에 의한 구조물 중량 감소

해에 따른 총 중량 값은 4345.096ton으로 초기해에 따른 총 중량 값인 5758.864ton에 대하여 24.55% 감소하였음을 보여준다.

5. 결론

Adaptive Simulated Annealing(ASA)기법은 조합 최적화에 근거를 둔 알고리즘으로 가열된 고체가 식어가는 과정에 근간을 두고 있으며 온도 감소치를 빠르게 감소시키는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 강구조물의 부재 단면 선정에 따른 최적 중량 설계에 대한 ASA기법의 적용성과 효율성을 제시하였다. 본 연구 결과, 결론은 다음과 같다.

- 1) 제안한 최적화 식은 부재의 허용 항복 응력과 허용 전단 응력의 제한 조건을 만족하며 층간변위와 최상층변위의 제한 조건을 만족하여 제한율을 일정하게 유지시키고, 각 부재의 국부좌굴에 대한 제한 조건을 만족하는 건물의 부재 단면을 산정해 준다.
- 2) 본 알고리즘의 경우 최적 설계 시 등고선을 따라 올라가는 기능(uphill moves)을 가짐으로써 국소 최적점(local minimum)을 탈피하고 전역 최적점(global minimum)에 도달 할 수 있는 장점을 나타내며, 최적해를 찾아감에 있어 안정상태(stable state)에 도달하는 수렴도를 나타내었다.
- 3) 본 구조물의 경우, 적용된 제약조건을 만족함에 따라 최적 설계 시 부재의 총 중량은 초기부재의 총 중량에 대하여 24.55% 감소하였음을 알 수 있다.
- 4) 본 연구에서는 CAO를 통해 설계 시행착오의 과정을 줄이고 정형화된 최적화 방법에 의해 최적해를 얻을 수 있었다. 앞으로 이 분야에 대한 끊임없는 연구를 통해 미래 건설 측면에 있어 시간 절감 효과와 경비 저감 효과를 가져 올 수 있을 것이며 나아가 성능 향상과 신뢰도 향상 효과를 가져 올 수 있을 것이라고 생각한다.

강구조물의 건설비가 고가임을 감안하여 볼 때, 본 연구를 통해 강구조물의 최적 중량 설계를 통한 건설비의 감소를 위해 실제 적용 가능성을 보이고자 하였다. 하지만 아직 많은 미비점을 가지고 있으며, 더 합리적인 최적 중량 설계를 구축하기 위해서는

다음과 같은 향후 연구가 필요하다고 사료된다.

- 5) 본 연구에서는 본 알고리즘의 적용성과 효율성을 효과적으로 보기 위해 부재를 5가지로만 제한하였다. 하지만 실제 적용 가능성을 위해서는 구체적인 부재 그룹핑(grouping) 데이터베이스의 구축 연구가 필요하다.
- 6) 본 연구 결과에 따른 모든 부재들은 압연형강이 아닌 용접형강으로 나타났다. 본 알고리즘에 따른 최종 중량 값은 감소하였지만 건설비 감소를 위한 실제 적용 가능성면에서는 미비하다고 볼 수 있다. 압연형강과 달리 용접 형강의 경우 주문 생산에 따라 가공비가 추가되기 때문이다. 따라서 이를 위해 압연형강의 최적화 데이터베이스 구축을 통한 제약 조건으로 제한식의 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 우수연구센터육성사업인 한양대학교 친환경건축연구센터지원으로 수행되었습니다.(R11-2005-056-01004-0)

참고문헌

1. 이차돈, "Simulated Annealing에 의한 3차원 철근 콘크리트 골조의 실제적인 최적구조설계," 대한건축학회 학술발표논문집, 제20권 제2호, 2000. 10.
2. 신동철, "신경망을 이용한 철골 트러스의 최적설계 모델 개발," 한양대학교 대학원, 2002.
3. 이차돈, "Stochastic Simulated Annealing기법에 의한 3차원 철골구조물의 최적 설계," 대한건축학회 논문집 12권 1호(통권 87호), 1996. 1.
4. 정석훈, 박정선, "냉각의 변수변화에 대한 어댑티브

시물레이티드 어닐링 연구," 항공우주산업기술연구소 연구지 제13집, 2003.

5. 김정자, 최규탁, 정진옥, "2단계 엔트로피를 이용한 Simulated Annealing의 개선에 관한 연구," 동아대학교 대학원, 2000.
6. 박인형, 김남희, 박홍근, "최소중량설계에 따른 최적화 기법을 이용한 고층콘크리트 건물의 단면산정," 대한건축학회논문집 구조계 18권 6호(통권 164호), 2002. 6.
7. 노민래, "SUMT법에 의한 프리스트레스트 콘크리트교의 최적설계에 관한 연구," 전북대학교 대학원, 1986.
8. Kirkpatrick, S., Gelatt C.D. Jr and Vecchi, M.P., "Optimization by Simulated Annealing," Science, Vol. 220, No. 4598, pp. 553-549.
9. Young Sang Cho, Lin Xia, Seoung Uk Hong, Mi Kyoung Kim, "Multi-objective Artificial Neural Optimization Design of Steel Brace," 6th International Symposium on Architectural Interchanges in ASIA, 2003.
10. Ingber, L., "Adaptive Simulated Annealing (ASA): lesson learned," control and cybernetics v. 25, 1996, pp. 33-54.
11. Steven M. Morill, Kam Shing Lam, Richard G. Lane, Mar Langer, Isaac I. Rosen, "Very Fast Simulated Reannealing in Radiation Therapy Treatment Plan Optimization," International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics Vol. 31, 1995, pp. 179-188.
12. Raghu K. Chundururu, Mrinal K. Sen, Paul L. Stoffa, "2-D resistivity inversion using spline parameterization and simulated annealing," Geophysics Vol. 61, 1996, pp. 151-161.

(접수일자 : 2007년 7월 13일)

(심사완료일자 : 2008년 7월 4일)