

# 2차원 가새골조의 최적내진설계를 위한 MSA 알고리즘

## Modified Simulated Annealing Algorithms for Optimal Seismic Design of Braced Frame Structures

이 상 관<sup>1)</sup> · 성 창 원<sup>2)</sup> · 박 효 선<sup>3)</sup>

Lee, Sang Kwan · Sung, Chang Won · Park, Hyo Seon

요 약 : 알고리즘의 용이성과 전역적 최적해로의 수렴가능성 등의 이점을 가진 SA 알고리즘은 구조최적화문제에 활발하게 적용되고 있으나 냉각스케줄의 설정, 모호한 종료기준, 과도한 반복해석 등의 문제점을 가지고 있다. 그러므로 본 논문에서는 기존 SA 알고리즘의 단점을 보완한 MSA 알고리즘을 개발하고자한다. MSA 알고리즘은 수렴에 요구되는 반복수를 감소시키고 국부최소점이 많은 동적최적화문제의 초기설계 선택의 자율성을 확보하기 위하여 SQ 및 SA의 2단계로 구성하여 개발하였다. 또한 기존 연구에서 제안된 냉각스케줄에 의한 수렴성 등을 비교분석하여 구조최적화에 적합한 냉각스케줄을 제안하여 그 성능을 평면가새골조 구조물의 최적내진설계에 적용하여 분석하였다.

ABSTRACT : With the positive features of simulated annealing algorithms such as simplicity of the algorithm and the possibility of finding global optimum solution, SA algorithm has been widely applied to structural optimization problems. However, the algorithms are far from practical applications in structural design or optimization of building structures due to requirement of a large number of iterations and dependency on cooling schedule and stopping criteria. In this paper, with the modification of annealing process and stopping criteria, a MSA algorithm is presented in the form of two phase annealing process for optimal seismic design of braced structures. The performance of the proposed algorithm has been illustrated in detail.

핵심 용어 : 구조최적화, SA 알고리즘, 내진설계, 가새골조

KEYWORDS : structural optimization, simulated annealing algorithm, seismic design, braced frame

### 1. 서 론

구조최적화 문제에서의 초점은 기성 열간 압연된 형강들 중에서 부재의 강도 및 구조물의 강성

조절을 위한 최적 단면을 선택하는 것이다. 최근 컴퓨터관련 기술이 발달함에 따라 철골 구조물과 같이 이산변수형으로 표현되는 최적화 문제의 해를 찾기 위한 방법으로 조합최적화 기법이 공학,

1) (주)세진구조안전기술사사무소, 공학석사

2) 영남대학교 건축공학과 박사수료

3) 정회원, 연세대학교 사회환경·건축공학부 조교수

본 논문에 대한 토의를 2001년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

전산, OR 등 여러 분야에 적용되어 그 효율성이 평가되고 있다. 특히 조합최적화 문제의 한 해법으로서 Kirkpatrick<sup>1)</sup> 등에 의해 제안된 SA (simulated annealing)는 기본개념의 단순성, 범용성과 더불어 전역적 최솟점(global minimum)으로의 수렴가능성이 이론적 증명<sup>2)</sup>과 많은 실험들을 통해 타당성이 확인되어 편리하게 사용할 수 있는 최적화 알고리즘으로서 일반적으로 받아들여지고 있다.

기존의 수치해석적 방법에 의한 최적화 기법과는 달리 목적함수 및 제약함수의 연속성 또는 미분가능성, 민감도 해석을 요구하지 않으며, 다소 국부최솟점이 많은 동적하중 상태에서도 초기설계 선택에 의해 크게 좌우되지 않고 전역적 최솟점으로 수렴가능한 장점을 가지고 있다.

그러나 이러한 장점에도 불구하고 기존 SA는 적용상에서 비교적 높은 초기 설정온도에서 최종 온도로 낮추는 냉각스케줄, 최저온도 또는 최대반복회수로 정의되는 모호한 종료기준, 그리고 구조반응의 정보에 무관한 무작위적 탐색 등으로 인해 많은 반복수행시간이 요구되는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 SA기법의 단점을 보완하기 위해 구조 최적화에 적합한 냉각스케줄, 종료기준 그리고 효과적인 탐색법 등을 중심으로 MSA(modified simulated annealing) 알고리즘을 개발하고, 이를 지진하중과 수직하중이 동시에 작용하는 평면 가새골조 구조물의 최소중량설계에 적용하여 최대층 변위와 층간변위 및 강도에 대한 제한을 만족하는 최적내진설계를 구현하고자 한다.

## 2. SA의 이론적 배경

SA는 고체물리학에서 에너지 수준이 가장 낮은 상태인 결정을 얻기 위해 이용되는 어닐링(annealing)과정을 그대로 모사한 것으로 최적해를 찾기 위한 방법으로 반복적 개선법을 기본으로

하되 비용증가의 이동을 확률적으로 허용하여 국부 최솟점에서 벗어날 수 있는 기능을 부여한다.

Metropolis<sup>3)</sup>는 Monte Carlo Method에 의해 초기온도  $T_0$ 에서 열평형상태에 도달하는 과정을 시뮬레이션 하였다. 이 과정은 고체의 초기상태를 무작위적으로 선택하여 현재상태( $X_{old}$ )에서 약간의 변동을 주어 다음상태( $X_{new}$ )인 새로운 위치로 이동하며, 이때의 에너지 차이를 계산하여 ( $\Delta E = E(X_{new}) - E(X_{old})$ ) 만약 에너지가 감소되면 ( $\Delta E \leq 0$ ) 새로운 이동을 받아들이고, 에너지가 증가하면 ( $\Delta E > 0$ ) 무조건 거부하지 않고 식 (1)의 확률로 받아들여 현재상태를 변경시키는 과정을 반복한다.

$$P = \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_b T}\right) \quad (1)$$

여기서  $k_b$ : 볼츠만 상수(Boltzmann constant)

$T$ : 온도

온도를 고정시키고 이 과정을 충분히 많이 반복하면 결국은 고체의 상태분포가 열적평형에 도달하게 된다. SA는 Metropolis 알고리즘을 기본으로 하여 어닐링에서의 온도를 낮추는 과정을 덧붙여서 얻은 방법으로 이때 온도는 알고리즘의 제어변수 역할을 하게된다.

## 3. 구조최적화를 위한 MSA 알고리즘

본 논문에서의 구조최적화 문제는 구조물의 전체 중량의 최소화를 목적함수로 한다. 최대층변위 및 층간변위 그리고 각 부재의 강도에 대한 제한을 대한건축학회의 강구조 계산규준<sup>4)</sup>을 대상규준으로 제약함수화 하며, 설계변수로는 국내에서 생산되는 압연 H형강에 대한 단면성능들(단면적, 단면2차모멘트, 단면2차반경, 단면계수, 전단면적 등)을 데이터베이스화 하여 이산변수로 사용

한다. 그리고 효과적인 탐색법으로 해의 질을 어뜨리지 않으면서 수렴까지의 반복수행회수를 줄일 수 있는 MSA 알고리즘을 개발하며, 개발된 알고리즘은 흐름도의 형식으로 제시한다.

### 3.1 2단계 탐색법

이론적으로 보아 초기해의 상태는 수렴성에는 영향이 없으나 수렴시간에는 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 MSA 알고리즘<sup>5),6),7)</sup>은 SQ(simulated quenching)와 SA의 2단계로 구성하여 비교적 적은 반복회수로 SA를 위한 양질의 초기설계를 자동화하여 최종적으로 SA단계의 반복 수행회수를 감소시킨다. SQ 단계에서는 초기설계를 임의로 선택하고 random generator에 의해 설계변수와 증분을 임의로 택하며, Cauchy가 제안한 FA(fast annealing)<sup>8)</sup>의 냉각함수를 사용하여 비교적 적은 반복회수로 최종해를 찾는다. 이러한 SQ 단계의 최종해를 SA의 초기설계로 선택하도록 하여 구조물의 최적해를 탐색한다.

MSA 과정의 1회 반복(cycle)은 총 설계변수의 수만큼 후보설계를 구성하는 것을 말하며, 이 때의 온도는 총 설계변수의 수만큼 반복 변화할 때까지 일정한 값을 가지며, 다음 사이클에서 냉각스케줄에 따라 감소하게 된다. 그리고 탐색과정에서 설계변수와 임의 증분의 선택이 구조반응의 정보와는 무관하게 random generator에 의해 임의로 선택되므로 불필요한 공간으로의 탐색에 따른 반복수행시간을 소비하게 된다. 따라서 본 연구에서는 건축구조물의 구조반응에 대한 정보와 시공성을 고려하여 식 (2)과 같이 동일수직선상에 위치하는 기둥과 가새에 대해 층의 연결성에 대한 제약을 주어 불필요한 공간으로의 탐색을 방지하여 최적해로의 수렴시간을 줄인다.

$$\begin{aligned} A_{c,i-1} &\leq A_{c,i} \\ A_{br,i-1} &\leq A_{br,i} \end{aligned} \quad (2)$$

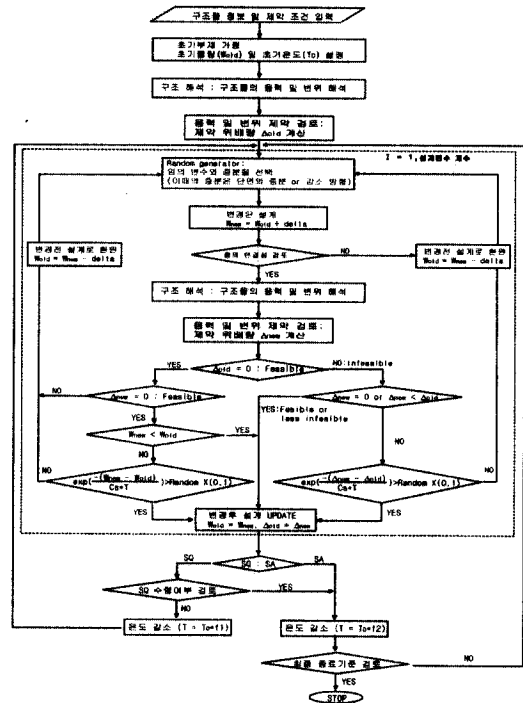


그림 1. MSA 알고리즘의 흐름도

여기서  $A_{br,i}$  :  $i$ 번째 층의 가새단면적  
 $A_{c,i}$  :  $i$ 번째 층의 기둥단면적

본 알고리즘에서는 제약 최적화문제를 무제약 최적화 문제로 전환하지 않고 탐색과정에서 직접적으로 설계 변경에 대한 제약 위반량과 목적함수 값을 판단하여 후보설계가 현재설계로 수용될지 거부될지 여부를 판단한다.<sup>9),10)</sup>

MSA 알고리즘의 전반적인 진행단계는 그림 1과 같이 흐름도의 형식으로 나타내었다.

### 3.2 냉각스케줄(Cooling Schedules)

SA에서 수용확률(acceptance probability)에 가장 크게 영향을 미치는 변수는 온도( $T$ )이며, 냉각스케줄의 형태에 따라 최적해의 수렴성과 수행시간이 좌우되므로 문제의 특성에 맞게 설정할

필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 SQ법에 의해 자동화된 양질의 초기해를 바탕으로 동적하중이 작용하는 평면 가새골조 구조물에 적합한 냉각계수의 형태를 기존 냉각스케줄의 비교 분석을 통하여 정한다.

MSA기법에서는 국부최소점을 벗어나기 위해 다음의 두가지 경우에 대해 확률적 수용을 적용한다. 후보설계와 현재설계가 모두 제약조건을 만족하면서 후보설계가 현재설계보다 더 큰 구조물 중량을 가질 경우와 후보설계와 현재설계가 모두 제약조건을 위배하는 설계 불가능영역(infeasible region)에 있으면서 후보설계의 제약 위배량이 현재설계의 제약 위배량보다 클 경우, 식 (3)와 같은 수용확률을 계산하여 임의의 수  $R$ 과 비교해서  $R < P$  이면 후보설계를 현재설계로 받아들인다.

$$P = \exp\left(\frac{-W_{diff} \text{ or } \Delta_{diff}}{C_s \cdot T}\right) \quad (3)$$

여기서

- $R$  : 임의의 난수 ( $0 \leq R \leq 1$ )
- $P$  : 후보설계의 수용확률
- $W_{diff}$  : 후보설계와 현재설계의 중량차
- $\Delta_{diff}$  : 후보설계와 현재설계의 제약 위배량차
- $C_s$  : 표준상수 (초기치=1)
- $T$  : 온도

그리고 이러한 수용확률에 사용되는 표준상수  $C_s$ 는  $M_p$ 에 따라 식 (4), (5)과 같이 수정된다.

$$C_s = \frac{(M_p \times C_{s-1} + W_{diff} \text{ or } \Delta_{diff})}{(M_p + 1)} \quad (4)$$

$$M_p = M_{p-1} + 1 \quad (5)$$

여기서  $M_p$  : 확률적 수용의 적용회수(초기치=0)

이러한 온도는 본 알고리즘의 제어변수로서 초기온도  $T_0$ 와 냉각계수  $f$ 의 곱으로 정의되는 냉각스케줄에 따라 식 (6)와 같이 반복수  $N$ 이 증가함에 따라 점차 감소하는 형태로 주어진다.

$$T(N) = T_0 \times f \quad (6)$$

이때 초기온도  $T_0$ 는 첫 번째 사이클에서 식 (4)에 의해  $C_s = W_{diff} \text{ or } \Delta_{diff}$  이므로 식 (3)에서 다음과 같이 초기온도가 초기 수용확률에 따라 결정된다.

$$T_0 = \frac{-1}{\log(P_s)} \quad (7)$$

본 연구에서는 초기 수용확률을 0.75로 설정하였다. 그리고 냉각스케줄의 정의를 위한 냉각계수는 다양한 형태로 표현되어 사용되고 있다. 본 연구에서는 기존의 연구자에 의해 제안된 BA (boltzmann annealing)<sup>8)</sup>와 FA(fast annealing)<sup>8)</sup>에 대해서 먼저 분석하고, 표 1과 같이 ~~이와 상수 값을 곱한~~ 6가지 냉각스케줄로 MSA 최적화를 위한 평면가새골조에 적용하여 일반적인 최적해의 선정기준인 최적해의 수렴성과 신뢰성, 그리고 수렴시간을 기준으로 가장 적절한 냉각스케줄을 제안하고자 한다.

그림 2의 냉각스케줄 곡선을 살펴보면 BA가 가장 느린 온도 감소를 보이는 반면 FA는 가장 빠

표 1. 냉각계수에 따른 냉각스케줄의 종류

	냉각스케줄	냉각계수
1	BA (Boltzmann annealing)	$f = \frac{1}{\log N}$
2	FA (Fast annealing)	$f = \frac{1}{N}$
3	FBA	$f = \frac{1}{k \log N}$
4	(Factored BA)	
		FBA1 ( $k=2$ )
		FBA2 ( $k=3$ )
5	FFA	$f = \frac{1}{N^c}$
6	(Factored FA)	
		FFA1 ( $c=0.5$ )
		FFA2 ( $c=0.6$ )

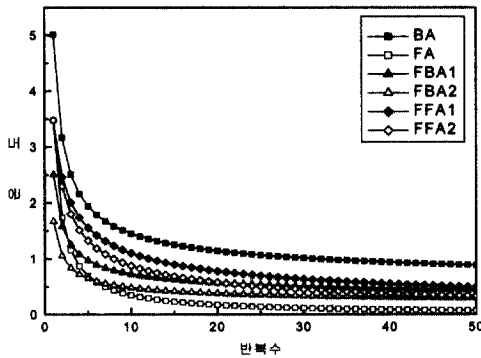


그림 2. 냉각스케줄 곡선

른 냉각을 나타낸다. 그리고 FBA와 FFA가 그 사이에서 서로 다른 기울기를 가지며 감소된다.

### 3.3. 종료기준 (Stopping Criteria)

적절한 종료기준(stopping criteria)은 최적화에서의 신뢰성과 효율성에 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 SA에서는 알고리즘의 수렴여부를 판정하는 조건으로서 최저온도나 최대 반복수행수로 종료하도록 한다. 그러나 이러한 종료기준은 문제의 규모나 특성에 따라 기준을 정하기가 불명확하며 충분한 시간이 주어진다면 최적해에 수렴할 수 있으나 낮은 온도에서 보내는 시간이 상당히 많다는 단점을 가지고 있다. 그래서 본 연구에서는 SA의 원리가 반복적 개선법을 기초로 한 방식이므로 최적화 문제의 수렴기준으로 목적함수의 상대적 변화량과 후보설계와 현재설계를 구성하는 각 변수의 평균변화량으로 종료여부를 판단한다. 목적함수의 상대적 변화량은 연속적인 반복수행에서 현재값과 이전값의 상대적인 변화량을 점검하는 것으로 식 (8)과 같다.

$$\frac{|F(X^q) - F(X^{q-1})|}{F(X^{q-1})} \leq \epsilon_A \quad (8)$$

설계변수의 평균변화량은 식 (9)와 같다.

$$\frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{GA_i^q - GA_i^{q-1}}{GA_i^{q-1}} \right|}{nv} \leq \epsilon_B \quad (9)$$

본 논문에서는 허용치  $\epsilon_A$ ,  $\epsilon_B$ 를  $10^{-3}$ 으로 설정하며, 연속하여 3회 이상 허용치를 만족하도록 하였다.

본 연구에서 개발한 MSA 알고리즘에서는 SQ단계와 SA단계의 수렴과 종료여부를 파악해야 한다. SQ단계의 종료여부는 목적함수의 상대적 변화량의 종료기준으로 파악하고, SA단계의 최종 종료여부는 모든 제약조건을 만족하면서 목적함수의 상대적 변화량과 설계변수의 평균변화량에 대한 두 가지의 기준을 동시에 만족될 때 근사최적해로 수렴할 수 있도록 하였다.

## 4. 예제적용

### 4.1. 3경간 12층 평면 가새골조 구조물

최적내진설계를 위한 가장 이상적인 냉각스케줄을 찾기 위해 3.3 절에서 소개한 6가지 냉각스케

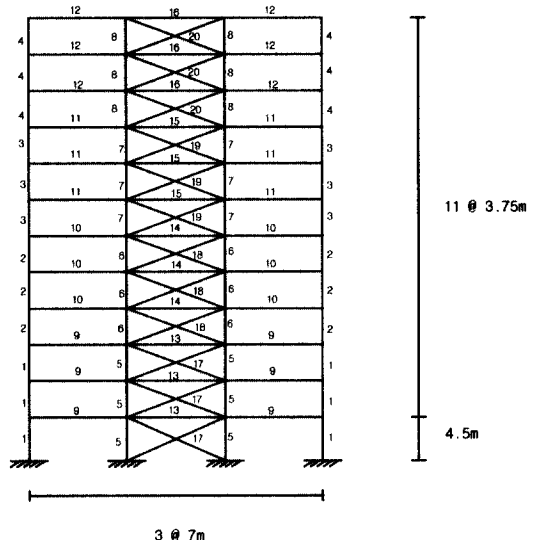


그림 3. 3경간 12층 평면 가새골조

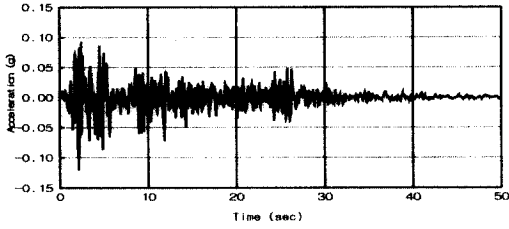


그림 4. El Centro 지진파의 기록 (PGA=0.12g)

줄을 사용한 MSA 알고리즘을 지진하중과 수직 하중이 동시에 작용하는 3경간 12층 평면 가새골조에 적용하여 최적해의 수렴성과 신뢰성, 그리고 수렴시간을 선택기준으로 분석한다.

그림 3에서와 같이 입면상 대칭되는 위치에서 같은 구조적 역할을 하는 기둥, 보, 가새에 대하여 3개 층씩 그룹화 하였으며, 하중조건으로는 수직하중으로 고정하중과 활하중을 각각 보에 3290 kg/m, 1260 kg/m로 작용시키고 수평하중으로 1940년 El Centro 지진의 남북방향 성분을 최대지반가속도(PGA) 기준으로 0.12g가 되도록 비례 축소한 반응스펙트럼을 사용하였으며 이때의 감쇄율은 5%로 가정하였다.

그리고 동적해석에 필요한 질량은 고정하중을 중력가속도로 나누어 슬래브내의 한 곳에 집중시켰다. 그리고 다음의 4가지 하중조합을 고려하였다. 순수 지진하중에 대한 최상층변위와 층간변위에 대한 허용한계를 각각 구조물 높이와 층높이의 1/500, 1/400으로 제한하여 사용성에 대한 평가를 하며, (고정하중+활하중) 과 (고정하중+활하중±지진하중)/1.5 중에서 가장 불리한 하중조합에 대해 대한건축학회의 강구조 설계규준(허용 응력 설계법)으로 부재에 대한 강도제약을 평가하였다. 사용강재는 SS400 ( $F_y = 2.4 t/cm^2$ )으로 하였으며, 재료의 탄성계수 및 단위중량은 각각  $2.04 \times 10^6 kg/cm^2$ ,  $7.85 t/m^3$ 로 가정하였다. 각 부재가 선택할 수 있는 단면은 국내 생산되는 압연 H형강으로 표 2와 같이 기둥과 가새는 팽폭(wide shape) 계열을 보는 새폭(narrow shape) 계열을 각각 21개 씩 사용하였다.

표 2. 부재 단면 List  
(기둥: 1~21번, 보: 22~42, 가새: 43~63)

No	단면	A(cm <sup>2</sup> )	I(cm <sup>4</sup> )	r(cm)	Z(cm <sup>3</sup> )
1	H-498*432*45*70	770.1	298000.0	11.10	12000.0
∴	∴	∴	∴	∴	∴
21	H-100*100*6*8	21.9	383.0	2.47	76.50
22	H-606*201*12*20	152.5	90400.0	5.11	2980.0
∴	∴	∴	∴	∴	∴
42	H-100*50*5*7	11.85	180.0	1.31	37.50
43	H-498*432*45*70	770.1	298000.0	11.10	12000.0
∴	∴	∴	∴	∴	∴
63	H-100*100*6*8	152.5	383.0	2.47	76.50

SA는 random search에 의한 탐색을 기본으로 하기 때문에 같은 초기설계에서 최적화과정을 수행하더라도 각기 다른 최종해로 수렴하게 된다. 따라서 본 연구에서는 초기설계를 주어진 단면 list 중에서 가장 큰 단면을 가지는 경우와 가장 작은 단면을 가지는 경우로 설정하여 MSA 알고리즘에 의한 최적화과정을 각기 5번씩 수행하였다. 적용결과 그림 5 와 같이 냉각스케줄에 따라 민감하게 서로 다른 수렴과정을 보였다.

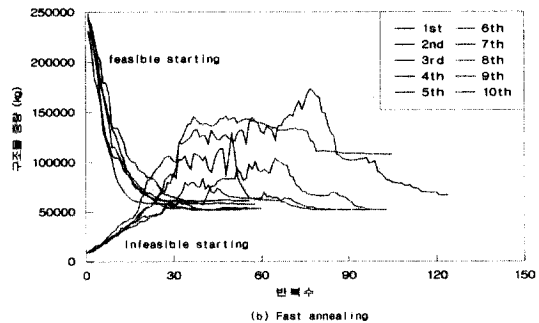
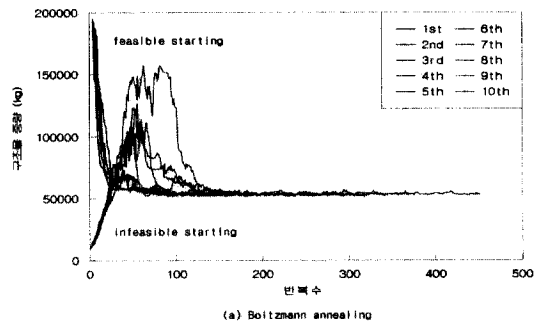
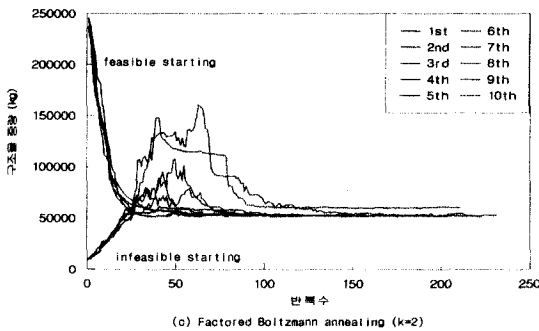


표 3. 냉각계수에 따른 MSA 최적해의 비교

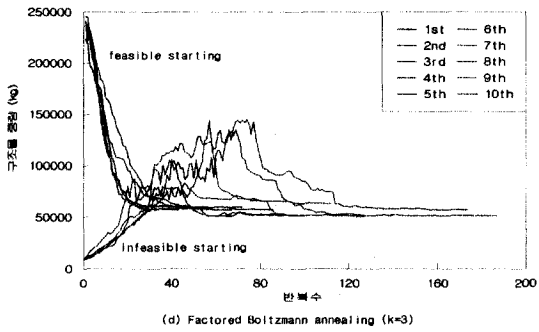
번호	냉각 스케줄	초기해	평균 반복수	평균중량 (kg)	오차 (%)
1	BA	feasible	175.4	52996.84	1.67
		infeasible	299.4	53151.54	1.80
2	FA	feasible	57.0	55188.96	16.42
		infeasible	103.8	65840.53	108.40
3	FBA1	feasible	122.8	53949.89	11.83
		infeasible	172.8	54085.85	16.20
4	FBA2	feasible	72.6	57975.77	15.54
		infeasible	140.0	55282.80	23.70
5	FFA1	feasible	156.2	52487.59	1.90
		infeasible	178.0	52502.61	1.90
6	FFA2	feasible	76.6	55005.55	14.87
		infeasible	133.4	54624.61	15.40

각 냉각스케줄에 따른 최적해의 수렴성과 신뢰성 그리고 수렴시간에 대한 척도로 최종해의 평균중량, 오차 그리고 수렴까지의 평균반복수를 평가하였으며, 표 3에 정리하였다. 본 연구에서는 해의 신뢰성을 파악하기 위해 각 초기해(initial starting point)에서 5번씩 MSA를 수행하여 그때의 최종해의 최대값과 최소값의 상대적 변화량(오차)이 5% 이내가 되었을 때 신뢰도가 있다고 판단하였다.

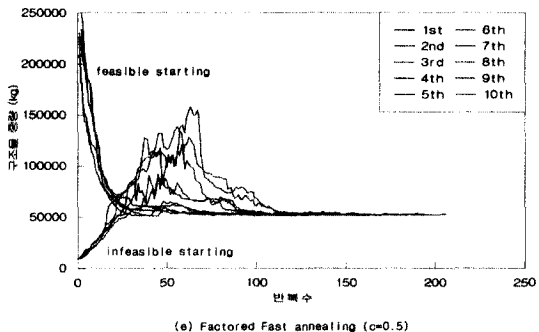
적용결과 BA는 가장 느린 냉각스케줄로서 전역적 수렴성과 최적해의 신뢰성은 좋지만 수렴에 요구되는 반복수가 가장 많았으며, 반면 FA는 가장 빠른 온도감소로 인해 수렴까지의 반복수는 가장 작았지만 전역적 수렴성과 최적해의 신뢰도가 가장 떨어졌다. FBA1은 BA의 온도감소를 가속화한 것으로 수렴 반복수는 BA보다 줄었지만 전역적 수렴성과 최적해의 신뢰도가 다소 떨어지는 것으로 나타났다. BA를 더욱 가속화한 FBA2는 수렴 반복수는 더욱 줄었으나 전역적 수렴성과 최적해의 신뢰도 또한 더욱 떨어졌다. 그리고 FA의 온도감소를 완화한 FFA1은 전역적 수렴성과 최적해의 신뢰도가 좋으면서 수렴까지의 반복수도 BA보다 상당히 감소한 것으로 나타났다. FFA2는 FFA1을 좀 더 가속화한 것으로 수렴



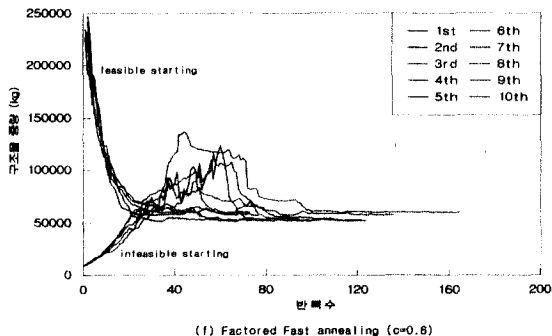
(c) Factored Boltzmann annealing (k=2)



(d) Factored Boltzmann annealing (k=3)



(e) Factored Fast annealing (c=0.5)



(f) Factored Fast annealing (c=0.8)

그림 5. 냉각스케줄에 따른 수렴곡선

반복수는 FFA1보다 줄었지만 전역적 수렴성과 최적해의 신뢰성이 다소 떨어졌다.

6가지 냉각스케줄 중에서 BA와 FFA1만이 오차가 5% 이내로 신뢰성이 확보되었으며, BA는 수렴에 요구되는 반복수가 가장 많아서 실용성이 떨어짐을 알 수 있었다. 따라서 최적내진설계를 위한 가장 이상적인 냉각스케줄로 전역적 수렴성과 최적해의 신뢰성이 좋으면서 수렴에 요구되는 반복수도 BA보다 적은 FFA1의 냉각계수를 사용함이 효율적임을 알았다.

#### 4.2. 3경간 21층 평면 가새골조 구조물

최적내진설계를 위한 MSA 알고리즘의 냉각스케줄로 제안된 FFA1의 효율성과 타당성을 검증하기 위해 다소 설계변수가 많은 3경간 21층 평면 가새골조 예제에 적용하였다. 하중조건과 단면 List는 3경간 12층 평면 가새골조에서와 동일하며 그림 6과 같이 35 설계변수로 그룹핑하였다.

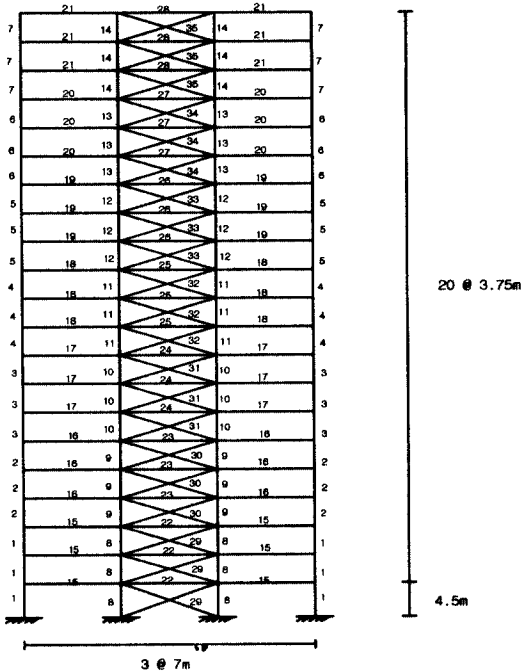


그림 6. 3경간 21층 평면 가새골조

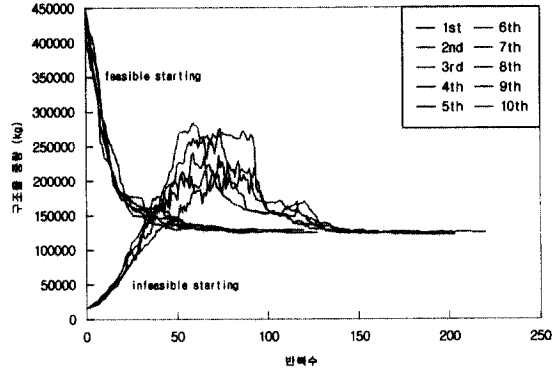


그림 7. 3경간 21층 가새골조의 MSA 수렴곡선

가장 높은 초기해와 가장 낮은 초기해에서 출발하여 각각 5번 씩 MSA 과정을 수행하였으며, 그림 7의 수렴곡선과 같이 초기설계에 관계없이 전역적 최소해로 수렴하였다. 가장 높은 초기해에서 출발했을 때는 평균 중량 126730.58 kg, 평균 반복수 103.8 회, 오차 3.3%로 수렴하였으며, 가장 낮은 초기해에서 출발했을 때는 평균 중량 124100.38 kg, 평균 반복수 185.8 회, 오차 2.6%로 수렴하였다.

따라서 적용결과 FFA1에 의한 MSA 최적화는 전역적 수렴성, 신뢰도, 수렴시간 면에서 충분히 효율적임을 알 수 있었으며, 초기해의 설정은 제약조건을 모두 만족시키는 설계 가능영역(feasible

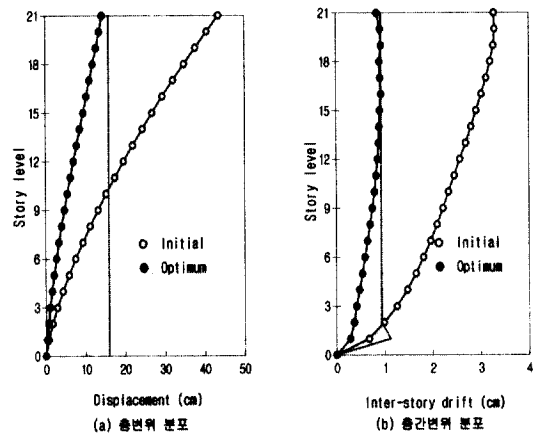


그림 8. 최적화 전·후의 최대층변위 및 층간변위 분포 (초기설계 : infeasible regions)



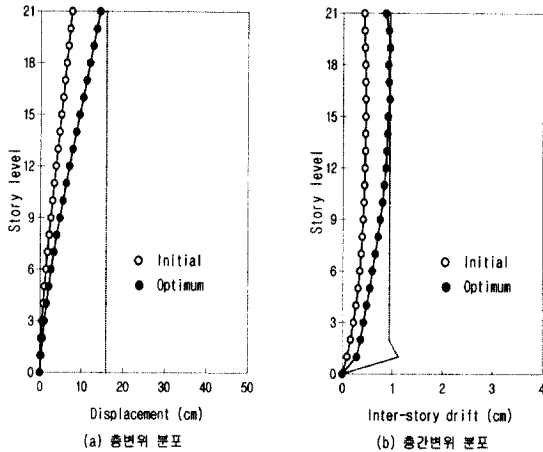


그림 9. 최적화 전·후의 최대층변위 및 층간변위 분포  
(초기설계 : feasible regions)

regions)으로 출발하는 것이 보다 적은 반복수로 수렴함을 알 수 있었다. 그리고 초기설계에 따른 최적해의 선택은 다소 차이가 났으나 최종 중량의 값에는 큰 차이가 없었으며, 초기설계에 관계없이 최상층변위 및 층간변위의 허용치가 그림 8, 9와 같이 만족함을 알 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 구조최적화를 위한 MSA기법을 개발하여 6가지 냉각스케줄을 사용하여 지진하중과 수직하중이 동시에 작용하는 평면 가새골조의 최소중량설계에 적용하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 냉각스케줄 FFA1이 최적해의 수렴성과 신뢰성, 그리고 수렴시간면에서 가장 효율적임을 비교분석을 통해 알 수 있었다.  
따라서  $T(N) = T_0 \times (1/N^{0.5})$ 를 칠골 가새골조 구조물(braced frame structures)의 최적내진설계를 위한 MSA 알고리즘의 냉각스케줄로 제안한다.
- 2) 2단계 탐색법으로 구성된 MSA 최적화가 다

소 국부최소점이 많은 동적하중 상태에서도 초기설계에 관계없이 전역적 최소해로 수렴하는 것을 통해 알고리즘의 안정성을 확인할 수 있었다. 그리고 SQ단계에서 SA단계의 초기설계를 자동화하지만 초기해의 출발은 제약조건을 모두 만족하는 설계 가능영역(feasible regions)으로 출발하는 것이 더욱 적은 반복수로 수렴함을 알 수 있었다.

- 3) 문제의 규모나 특성에 따라서 기준설정이 모호했던 기존 SA의 종료기준을 목적함수의 상대적변화량과 설계변수의 평균변화량에 의한 새로운 종료기준의 제시를 통해 전체 알고리즘의 수렴성과 효율성을 높일 수 있었다.
- 4) 본 연구를 통해 개발된 MSA 알고리즘에 의한 구조최적화는 국내의 강구조 계산기준과 실제 시공 가능한 공장 생산된 기성 구조용형강의 사용으로 최적설계법의 실용화를 유도할 수 있었다.

## 참고 문헌

1. Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., and Vecchi, M.P., Optimization by simulated annealing, Science 220, pp. 87-100, 1992.
2. 김여근, 윤복식, 이상복, "메타 휴리스틱", 영지문화사, 1997.
3. Metropolis, N., A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller and E. Teller, Equation of State Calculations by Fast Computing Machines, J. of Chem. Physics, 21(6), pp. 1087-1092, 1953.
4. 강구조계산 기준 및 해설, 대한건축학회, 1983.
5. 정제원, 박효선, 입체 트러스구조물의 최적설계를 위한 SA기법, 전산구조공학회 춘계발표논문집, 제 12권 제 1집, pp. 102-109, 1999.
6. 정제원, 박효선, SA 알고리즘을 이용한 칠골트러스 구조물의 이산 최적설계, 한국강구조학회 논문집, 제 11권, 제6호, pp. 679-687, 1999.
7. 이상관, 박효선, 한계상태설계법 및 허용응력설계법에 의한 강골조의 최적설계 -수직하중과 지진하중이 작용하는 경우-, 한국강구조학회 학술

- 발표대회 논문집, pp. 208-213, 2000.
8. L. Ingber, Genetic Algorithms and Very Fast Simulated Re-annealing: A Comparison, Mathl. Comput. Modeling Vol. 16, No. 11, pp. 87-100, 1992.
  9. Balling, R.J., Optimal steel frame design by simulated annealing, Journal of Structural Engineering, Vol. 117, pp. 1780-1795, 1991.
  10. Pantelides, C.P. and Tzan, S-R., Simulated Annealing for the Design of Structures with Time Varying Constraints, Structural Optimization, Vol. 13, pp. 36-44, 1997.

(접수일자 : 2000년 9월 4일)