

변위계수법을 활용한 최적 내진 성능기반 설계기법 개발

Development of Optimal Performance based Seismic Design Method using Displacement Coefficient Method

이 현 국* 권 윤 한** 박 효 선***
Lee Hyun Kook Kwon Yun Han Park, Hyo Seon

ABSTRACT

Recently, performance based seismic design (PBSD) methods in numerous forms have been suggested and widely studied as a new concept of seismic design. The PBSDs are far from being practical due to complexity of algorithms resided in the design philosophy. In this paper, optimal seismic design method based on displacement coefficient method (DCM) described in FEMA 273 is developed. As an optimizer simple genetic algorithms are used for implementations. In the optimization problem formulated in this paper, strength design criteria, stiffness design criteria, and nonlinear response criteria specified in DCM are included in design constraints. The optimal performance based design (OPBD) method is applied to seismic design of a 9-story two-dimensional steel frame structures.

1. 서론

최근 내진설계 규준은 기존의 인명안전에 대한 기본적인 성능 목표만을 위주로 제시된 내진설계법에서 인명안전뿐만 아니라 경제성과 구조물의 기능에 따른 다양한 성능 목표를 만족시키는 성능에 기초한 내진설계법으로 변화되어 가고 있다.

그러나, 성능에 기초한 내진설계는 그 이론이 복잡하기 때문에 실무자들이 쉽게 접근하여 실제 건물의 내진설계에 반영하는 것이 어려운 실정이다. 또한 기존의 구조설계과정은 설계자의 경험과 직관에 의존하고 있으므로, 이러한 방법의 설계법은 복잡한 구조 설계에서 효율성을 저하시키고 비용을 증대시키며 결과에 대한 신뢰성을 보장할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 특히 구조물이 고층화, 대형화됨으로 인해 규준에 의해 고려되어야 할 구조적 요소가 많아 많은 제약 조건들을 만족시키면서 최적의 구조물을 설계한다는 것은 힘든 일이다.

이러한 문제들을 해결하기 위한 방법으로 컴퓨터의 급속한 발달에 힘입어 최근 수년 동안 최적화 문제를 해결하기 위하여 선형 및 비선형 프로그래밍을 이용한 수많은 수치해석 기반의 최적화 기법이 개발되어 왔다.

특히 조합 최적화의 한 방법인 유전알고리즘은 자연 진화에 근거한 강력한 탐색 능력과 광범위한 적용성을 가진 알고리즘으로, 개념과 이론이 단순하고 전역적 탐색능력이 우수하며 여러 분야의 최적화 문제에 유

* (주)LG건설 사원, 공학석사
** 연세대학교 건축공학과 박사과정
*** 연세대학교 건축공학과 부교수

연하게 적용할 수 있는 발견적(Heuristic) 기법 이다. 또한 복잡한 해공간의 탐색 성능이 우수하여 변수와 제약이 많은 대형 수리문제에도 적합한 기법이다.⁽²⁾

따라서 본 연구에서는 성능에 기초한 내진설계의 한 방법인 FEMA 273⁽¹⁾에서 '비선형 정적해석 절차'로 제시하고 있는 변위계수법(Displacement Coefficient Method, DCM)을 활용하여, 단순 유전알고리즘을 통한 최적내진설계법을 개발하고자 한다.

2. 성능설계법

2.1. FEMA 273의 성능단계, 지진위험도 및 성능목표

FEMA 273에서는 지진위험도와 성능단계를 조합하여 표 1 와 같은 보강목표를 제시하고 있다. 보강설계를 수행한 건물이 보강목표를 만족시키는지 여부는 해석적인 평가를 통하여 증명해야 한다. FEMA 273에서 제시하는 보수·보강 성능목표는 다음의 3가지로 분류된다.

- 기본안전목표 (Basic Safety Objective, BSO) : 내진 보수·보강에 가장 바람직한 목표
- 강화된 목표 (Enhanced Rehabilitation Objective, ERO) : BSO보다 좀 더 나은 성능으로 보수·보강
- 제한된 목표 (Limited Rehabilitation Objective, LRO) : BSO보다 다소 하위의 성능목표

FEMA 273은 주로 기존에 존재하는 건물에 적용할 수 있는 기준을 제시하고 있지만, 새로운 건물의 설계에 있어서도 그 건물이 지진에 대한 충분한 구조적 성능을 발휘하는 지에 대한 내진성능평가 방법으로도 유용하게 사용될 수 있다.

표 1. 성능목표 (FEMA 273)

지진위험도	재현주기	초과확률	건물의 성능단계			
			Operational	Immediate Occupancy	Life Safety	Collapse Prevention
자주(Frequent)	72년	50%/50년	A	B	C	D
가끔(Occasional)	2225년	20%/50년	E	F	G	H
드문(Rare)	474년	10%/50년	I	J		L
아주 드문(Very Rare)	2475년	2%/50년	M	N	O	
기본안전목표 (BSO)			K + P			
강화된 목표 (ERO)			K + P + any of A, E, I, M, B, F, J, N			
			O			
제한된 목표 (LRO) : 전통적인 설계			K alone or P alone			
제한된 목표 (LRO)			C, G, D, H			

2.2. 변위계수법의 내진성능평가 방법

FEMA 273에서는 선형 정적해석 절차(Linear Static Procedure, LSP), 선형 동적해석 절차(Linear Dynamic Procedure, LDP), 비선형 정적해석 절차(Nonlinear Static Procedure, NSP), 비선형 동적해석 절차(Nonlinear Dynamic Procedure, NDP)와 같은 4가지 지진해석 방법을 제시하고 있다. 이 중에서 가장 많이 적용되는 해석방법이 Pushover analysis 라고 일컬어지는 비선형 정적해석이다.

구조물의 내진성능을 평가하기 위해서 먼저 목표변위(Target Displacement)를 산정하게 된다. FEMA 273에서는 비선형특성이 반영된 구조물의 목표변위에 대한 산정식을 다음 식 (1)과 같이 제시하고 있다.

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (1)$$

여기서, T_e : 건물의 유효주기 [sec]

C_0 : 모드참여계수에 의한 응답 변위와 관계되는 수정계수

C_1 : 탄성 반응으로 산정된 변위에 대해 예상되는 최대 비선형 변위와 관련된 수정계수

C_2 : 최대 변위 응답에 대한 시간 이력의 효과를 나타내는 수정계수

C_3 : 동적 $P-\Delta$ 효과에 따라 증가된 변위를 나타내는 수정계수

S_a : 응답가속도

변위 계수법은 비선형 정적해석의 결과를 이용하여 목표변위 δ_t 를 산정하여 목표변위에서 부재검토를 수행하여 건물의 내진성능을 판정하게 된다. 내진성능평가는 목표변위에서의 부재의 변형(소성힌지 회전각, 변위)정도가 각 성능단계와 지진위험도의 조합에 의해 결정되는 여러 단계의 성능목표를 만족하는지 여부를 확인하여 평가한다.

본 논문에서는 표 1의 성능목표 중에서 기본안전목표(BSO)를 달성하기 위해 목표변위에서의 부재 변형 제약을 Life Safety 단계(K)와 Collapse Prevention 단계(P)에 대해 성능 검토를 한다.

3. 최적내진설계법의 정식화

본 연구에서는 지진하중과 수직하중이 동시에 작용하는 철골구조물의 최소 중량설계의 최적화를 목적으로 한다. 정적 및 동적해석을 동시에 수행하는 강도설계와 더불어 Pushover analysis를 통해 FEMA 273에서 제시하고 있는 변위계수법을 활용하여 강성설계인 성능에 기초한 내진설계를 동시에 수행하는 최적내진설계법을 개발한다.

본 연구에서 개발한 최적내진설계법(OPBD)의 알고리즘 흐름도는 그림1과 같으며, 흐름도에서 알 수 있듯이 개발된 최적내진설계법은 강도설계, 강성설계 및 최적화 기법의 3가지 구성요소로 이루어져 있다.

3.1. 최적화기법

Goldberg가 제안한 가장 기본적인 유전알고리즘인 단순 유전알고리즘(Simple Genetic Algorithm, SGA)은 다윈이 주장한 진화 법칙인 적자생존과 자연도태의 원리를 토대로 개발된 알고리즘으로 개념이 단순하고 다른 알고리즘과 이식성이 용이하며 유연성이 높은 알고리즘이다.

본 연구에서 개발한 최적내진설계 알고리즘에서 사용하는 단순 유전알고리즘은 De Jong이 제시한 표준

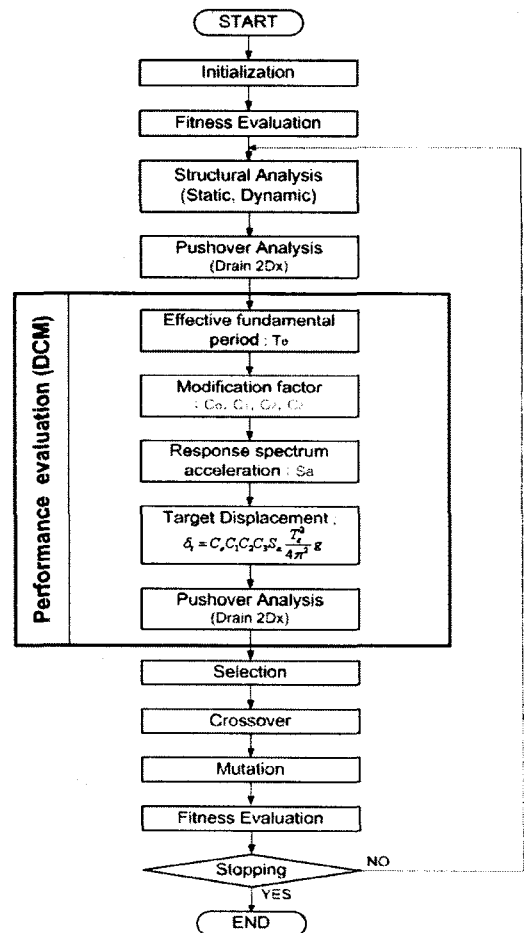


그림 1. 최적내진설계(OPBD) 흐름도

파라미터를 기초로 하여 16개의 개체수와 다양한 탐색을 위하여 0.4에서 0.8사이의 교배율을 사용해야 한다는 연구결과에 의해 0.6의 교배율을 사용하였다. 또한 돌연변이율이 0.05 이상일 경우 그 세대의 최고 적응도를 갖는 개체가 다음 세대에 생존하기 어렵다는 연구를 토대로, 0.01~0.03의 돌연변이율을 사용한다.⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

본 연구에서 사용된 유전자 파라미터들을 정리하면 표2와 같다.

표 2. SGA 의 파라미터 설정

Population size	16
Crossover rate	0.6
Mutation rate	0.01
Inversion rate	0.01
Tournament size	8

3.2. 강도설계

최적내진설계과정으로 정적 및 동적해석을 각각 수행하여, 그 결과를 이용해서 구조물의 강도측면에서 제한값을 만족하도록 하는 강도설계를 한다.

정적 및 동적 구조해석법은 대한건축학회의 강구조 계산규준 및 해설을 대상규준으로 한다. 작용하중으로는 정적하중(Static load)인 고정하중과 적재하중이, 그리고 동적하중(Dynamic load)인 지진하중이 작용한다.

동적해석법으로는 본 연구가 고층구조물의 대상으로 수행되므로, 1차 진동모드에 의해 반응을 계산하는 등가정적해석법은 부적절하고, 시간이력해석법은 자유도수가 많은 고층건물의 경우 많은 계산량과 해석시간을 요구하므로 비실용적일 수 있다. 따라서 본 논문에서는 각 모드별 최대응답을 설계용 스펙트럼에서 구해 전체 모드에 대해 중첩함으로써 구조물의 최대응답을 계산하는 반응스펙트럼법(Response Spectrum Analysis, RSA)을 사용한다. 최대변위는 각 모드에 의한 최대반응을 SRSS(Square Root of Sum of Squares)법으로 조합한다.

3.3. 강성설계

본 연구에서는 정적 및 동적해석을 동시에 수행하는 강도 설계와 더불어 FEMA 273에서 제시하고 있는 변위계수법을 활용하여 구조물이 보유하고 있는 내진성능을 평가하는 강성설계를 동시에 수행하는 내진설계법을 개발한다. 여기서 비선형 정적해석(Pushover analysis)은 DRAIN-2DX 프로그램을 이용하여 수행한다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾

3.4. 정식화

본 연구에서는 총 구조물의 중량을 최소화하는 것을 목적함수로 하며, 설계변수로는 W Shape에 대한 단면성능(단면적, 전단면적, 단면2차모멘트, 단면계수, 단면2차반경)들을 데이터베이스화 하여 이산변수로 사용하였다.

$$\text{Minimize } F(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^M \rho_i A_i L_i \quad (2)$$

$$X_i = A_i, A_{V_i}, I_i, Z_i, r_i \quad (3)$$

여기서, ρ (부재의 단위 하중), A (단면적), L (부재의 길이), M (전체 부재의 개수)

적용된 제약조건은 1983년 제정된 대한건축학회의 강구조계산 규준과 FEMA 273의 비선형 절차에 의한 적합도 기준을 대상 규준으로 하여 아래와 같이 변위, 응력 및 시공성에 대한 제약 조건들과 목표변위에서의 부재의 변형에 대한 제약을 제약함수화 한다.

- 변위제약 : 최대변위 및 층간변위에 대한 한계를 제한한다.

$$g_1 = \frac{\Delta^{Top}}{\Delta^{Top}_{allow}} \leq 1, g_2 = \frac{\Delta^i - \Delta^{i-1}}{\Delta^i_{allow}} \leq 1 \quad i = 1, N \quad (4)$$

- 응력제약 : 각 부재에 대해 작용하는 응력이 규준에서 제한하는 허용응력을 초과하지 않도록 제한한다.

$$h = \frac{\sigma^j}{\sigma^j_{allow}} \leq 1 \quad j = 1, M \quad (5)$$

- 시공성 제약 : 건축물의 구조반응에 대한 정보와 시공성을 고려하여 동일 수직선상에 위치하는 기둥에 대해 층의 연결성을 제한한다.

$$k_1 = \frac{A_c^{i+1}}{A_c^i} \leq 1 \quad i = 1, N \quad (6)$$

Δ^{Top} , Δ^{Top}_{allow} 는 최상층의 최대 변위 및 최상층의 허용수평변위

Δ^i , Δ^i_{allow} 는 i 번째 층의 최대 수평변위 및 허용 수평변위

σ^j , σ^j_{allow} 는 j 번째 부재에 발생하는 응력과 허용응력

A_c^i 는 i 번째 층의 기둥 단면적의 넓이

M 은 전체 부재의 개수

N 은 전체 층높이

- 목표변위에서의 부재의 변형(소성힌지 회전각, 변위) 제약 : FEMA 273의 비선형 절차에 의한 적합도 기준을 이용하여 Life Safety 단계와 Collapse Prevention 단계에 대해 성능 검토를 한다.

4. 예제적용

4.1. 9층 모멘트 골조 구조물 예제

9층 모멘트 골조 예제는 그림 2에서 보는 바와 같이 5개의 경간을 가지며 각 경간은 30 ft로 동일하고, 1층은 18 ft이고 그 상층부의 각 층은 13ft로 동일한 층고를 갖는다⁽⁷⁾. 9층 모멘트 골조 예제는 2차원 평면 골조로 이상화하면, 60노드를 가지며 99개의 부재로 구성되어 있다. 99개의 부재는 같은 위치의 같은 구조적 거동을 하는 부재를 그룹화하여 그림 2의 숫자와 같이 9개의 그룹으로 구분한다.

하중 조건으로는, 수직하중으로 적재하중(Live Load)을 50psf 를 작용시키고, 고정하중(Dead Load)을 슬래브, 외벽, 기타 고정하중 75psf 과 철골조의 자중을 작용시켰다. 동적해석을 위한 수평하중으로 그림 3과 같은 IBC2000⁽⁸⁾(Site Class = D, $S_s = 1.0$, $S_1 = 0.5$)의 반응스펙트럼을 사용하였으며, 이때의 감쇠율은 5%로 가정하였다. 그리고 동적해석에 필요한 질량은 고정하중을 중력가속도로 나누어 슬래브내의 한 곳에 집중시켰다.

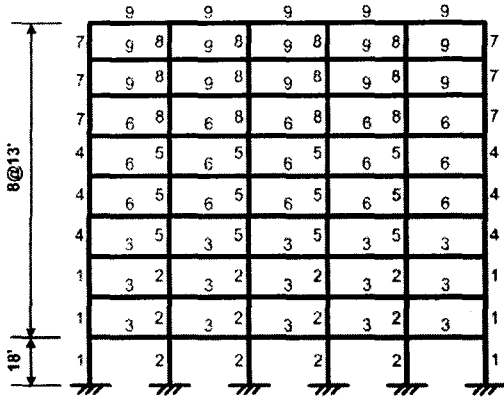


그림 2. 9층 모멘트 골조 예제

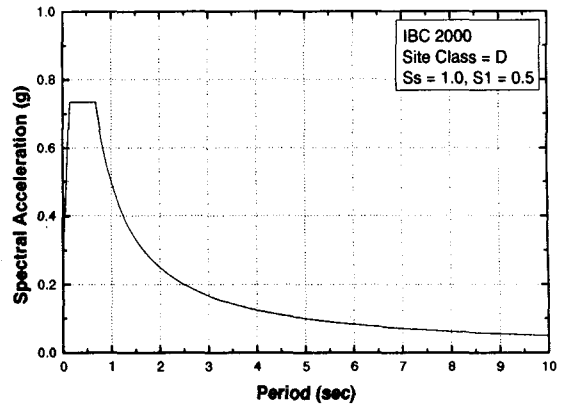


그림 3. 설계용 반응 스펙트럼

하중조합은 다음의 3가지 하중조합을 고려하였다. 순수 지진하중에 대한 최대층변위와 층간변위에 대한 허용한계를 각각 구조물 높이와 층높이의 1/500, 1/400으로 제한하여 사용성에 대한 평가를 하였으며, 고정하중(D.L.)+적재하중(L.L.)과 {고정하중(D.L.)+적재하중(L.L.)±지진하중(E.L.)}/1.5 중에서 가장 불리한 하중조합에 대해 대한건축학회의 강구조 계산규준(허용 응력 설계법)으로 부재에 대한 강도제약을 평가하였다.

변위계수법을 이용한 성능기반 내진성능평가를 위한 지진하중으로, 1997 NEHRP provisions 및 FEMA

표 3. 부재단면 리스트 [단위 : in.]

No	단면	단면적 [in. ²]	치수[in.]					플랜지면적 [in. ²]	전단 면적 [in. ²]	단면2차 모멘트 [in. ⁴]	단면 계수 [in. ³]	단면2차 반경 [in.]	힘용력에 대한 단면 성능[in.]
			A	d	t _w	b _f	t _r						
1	W12X210	61.8	14.7	1.18	12.8	1.90	24.32	17.35	2140	348	3.28	3.65	
2	W12X230	67.7	15.1	1.29	12.9	2.07	26.70	19.48	2420	386	3.31	3.68	
3	W14X257	75.6	16.4	1.18	16.0	1.89	30.24	19.35	3400	487	4.13	4.55	
4	W14X283	83.3	16.7	1.29	16.1	2.07	33.33	21.54	3840	542	4.17	4.59	
5	W14X311	91.4	17.1	1.41	16.2	2.26	36.61	24.11	4330	603	4.20	4.62	
6	W14X342	101	17.5	1.54	16.4	2.47	40.51	26.95	4900	672	4.24	4.69	
7	W14X370	109	17.9	1.66	16.5	2.66	43.89	29.71	5440	736	4.27	4.73	
8	W14X398	117	18.3	1.77	16.6	2.85	47.31	32.39	6000	801	4.31	4.77	
9	W14X426	125	18.7	1.88	16.7	3.04	50.77	35.16	6600	869	4.34	4.81	
10	W14X455	134	19.0	2.02	16.8	3.21	53.93	38.38	7190	936	4.38	4.85	
11	W14X500	147	19.6	2.19	17.0	3.50	59.50	42.92	8210	1050	4.43	4.93	
12	W14X550	162	20.2	2.38	17.2	3.82	65.70	48.08	9430	1180	4.49	5.01	
13	W14X605	178	20.9	2.60	17.4	4.16	72.38	54.34	10800	1320	4.55	5.08	
14	W14X665	196	21.6	2.83	17.7	4.52	80.00	61.13	12400	1480	4.62	5.19	
15	W14X730	215	22.4	3.07	17.9	4.91	87.89	68.77	14300	1660	4.69	5.27	
16	W14X808	237	22.8	3.74	18.6	5.12	95.23	85.27	16000	1830	4.82	5.51	
17	W14X22	6.49	13.7	0.23	5.0	0.34	1.68	3.15	199	33	1.04	1.28	
18	W18X35	10.3	17.7	0.30	6.0	0.43	2.55	5.31	510	67	1.22	1.52	
19	W18X46	13.5	18.1	0.36	6.1	0.61	3.67	6.52	712	91	1.29	1.57	
20	W24X55	16.3	23.6	0.40	7.0	0.51	3.54	9.32	1360	135	1.34	1.72	
21	W24X62	18.3	23.7	0.43	7.0	0.59	4.15	10.19	1560	154	1.37	1.75	
22	W24X76	22.4	23.9	0.44	9.0	0.68	6.11	10.52	2100	200	1.92	2.33	
23	W24X84	24.7	24.1	0.47	9.0	0.77	6.95	11.33	2370	224	1.95	2.36	
24	W27X94	27.7	26.9	0.49	10.0	0.75	7.44	13.18	3270	278	2.12	2.58	
25	W30X99	29.1	29.7	0.52	10.5	0.67	7.04	15.44	3990	312	2.10	2.64	
26	W30X108	31.7	29.8	0.55	10.5	0.76	7.98	16.24	4470	346	2.15	2.67	
27	W30X116	34.2	30.0	0.57	10.5	0.85	8.93	16.95	4930	378	2.19	2.70	
28	W33X118	34.7	32.9	0.55	11.5	0.74	8.51	18.10	5900	415	2.32	2.91	
29	W33X130	38.3	33.1	0.58	11.5	0.86	9.83	19.20	6710	467	2.39	2.94	
30	W36X150	44.2	35.9	0.63	12.0	0.94	11.28	22.44	9040	581	2.47	3.06	
31	W36X170	50.1	36.2	0.68	12.0	1.10	13.20	24.62	10600	668	2.53	3.09	
32	W40X211	62	39.4	0.75	11.8	1.42	16.76	29.55	15500	906	2.51	3.07	

273을 적용하였다. 즉, 밀면전단력을 계산하기 위하여, USGS/BSSC MCE Maps (Los Angeles 지역, Stiff soil, Site category D)에 근거하여 초과확률 10%/50년(BSE1)인 지진하중은 $S_s = 1.07g$, $S_1 = 0.68g$, $F_a = 1.072$, $F_v = 1.5$ 의 계수를, 초과확률 2%/50년(BSE2)인 지진하중은 $S_s = 1.61g$, $S_1 = 1.19g$, $F_a = 1.0$, $F_v = 1.5$ 의 계수를 사용하였다. 여기서, S_s 과 S_1 는 각각 단주기(0.3초)와 1초인 주기에서의 응답가속도 스펙트럼이다. 본 연구에서는 초과확률 10%/50년(재현주기 474년)과 초과확률 2%/50년(재현주기 2475년)인 지진하중에 대해서 각각 Life Safety와 Collapse Prevention 의 성능단계를 만족하도록 다단계 설계를 통해, 기본안전목표 (Basic Safety Objective, BSO)를 만족시키도록 한다.

사용강재는 A572 Grade 50 steel ($F_y = 50$ ksi)으로 하였으며, 재료의 탄성계수 및 단위중량은 각각 29000 ksi, 2.836×10^{-4} kips/in.³로 가정 하였다. 각 부재가 선택할 수 있는 단면은 W Shape 으로 표 3과 같이 기둥과 보 각각 16개 씩 사용하였다.

적응도의 평가는 벌칙함수를 사용하여 Powell 등⁽⁹⁾이 제안한 방법을 사용하여 비가능해가 가능해보다 항상 적응도가 낮게 평가되게 하였다. 제약조건을 위배할 경우 제약 위배량을 벌칙함수에 더할 때 목표변위에서의 부재변형에 관한 제약조건이 지배적이 되도록 표준화하였다. 그리고 선택 전략은 토너먼트 선택을 사용하였고 교배는 2점 교배로 기둥과 보에서 각각 2점이 선택되어 교배되도록 하였다.⁽²⁾

표 4. 알고리즘의 최적값, 수행 시간 및 세대수

	1st	2nd	3rd	4th	5th	Average
Weight (Kips)	225.3	253.2	256.5	222.4	266.6	244.8
Elapsed time (sec)	5869	5320	3210	3908	3632	4388
Number of Generation	39	47	48	38	46	42

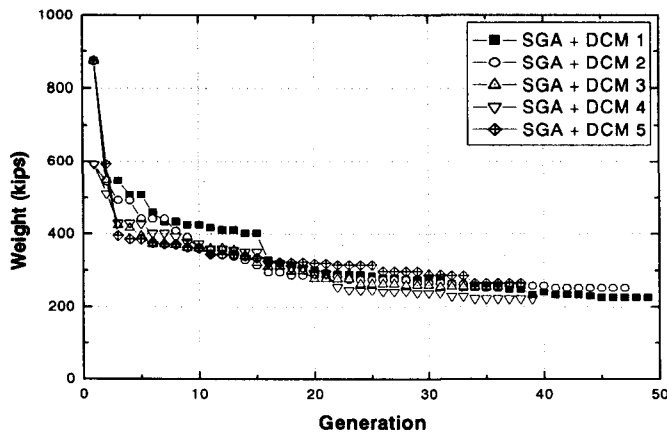


그림 4. 9층 모멘트 골조의 수렴곡선

4.2. 9층 모멘트 골조 결과 분석

개발된 최적내진설계기법을 9층 모멘트 골조예제에 적용한 결과는 그림 4와 표4와 같다. 그림4는 9층 모멘트 골조 예제의 수렴곡선 및 세대수를 나타내는 그래프이고, 표 4는 알고리즘의 최적값, 수행시간 및 반복 세대수를 표시하고 있다. 5회 반복실행한 평균 최적값 244.8 kips에 대해서 각각의 최종 수렴값의 편차는 평

평균의 $\pm 9\%$ 미만을 보이며, 세대수 39회~48회 사이에서 모두 안정적으로 수렴한다는 것을 알 수 있다.

기존 논문에서는 DCM을 이용하여 내진 성능 평가를 수행한 결과 또는 설계된 예제가 아직 발표되어 있지 않아 본 연구에서 개발한 최적설계 기법의 효율성을 직접 평가하기 어려움이 있다. 그러나 그림 4 및 표 4에서와 같이 본 연구에서 개발한 OPBD는 최적화 알고리즘 평가 기준 중의 중요한 요소인 전역적 수렴성을 만족하는 것으로 판단하며, 병렬최적 내진 성능 기반 설계법을 개발하게 되면 그 적용성이 보다 개선되리라 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 성능에 기초한 내진설계의 한 방법인 FEMA 273에서 제시하고 있는 변위계수법을 활용하여 최적내진설계법을 개발하였다. 개발한 최적내진설계법을 9층 철골 모멘트 골조의 최소 중량설계에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 개발한 최적내진설계법(OPBD)으로 최적내진설계를 수행한 결과 안정적이고, 신뢰할 수 있는 최적해를 얻을 수 있었다.
- 2) 최적화기법으로 적용된 단순 유전알고리즘을 통해 De Jong이 제시하였던 일반적인 파라미터를 이용하여 적은 수의 개체(16개)를 운용한 결과 안정적인 최적해를 얻을 수 있었다.
- 3) 개발한 최적내진설계법을 철골 모멘트 골조의 최소 중량설계에 적용한 결과, 본 설계법이 유용한 최적내진설계법임을 확인하였다.
- 4) 보다 효율적인 내진설계기법을 개발하기 위해 향후 추가되어야 할 연구로는 실용성을 위해 병렬최적내진설계기법의 개발 및 다양한 모델을 통한 성능 분석이 수행되어야 한다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연C-04)의 연구비 지원으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. BSSC, "NEHRP GUIDLINS FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS (FEMA Publication 273)", 1997
2. De Jong, K. A. (1975) "An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems", Doctoral Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
3. Goldberg, D. E. (1989) "Genetic Algorithms in search, Optimization and machine learning", Addison-Wesley.
4. 이준호, 박효선 (2000) "구조 최적화를 위한 병렬 유전자 알고리즘", 전산구조공학회 추계학술대회 발표 논문집, pp40-47.
5. V. Prakash, G. H. Powell, S. Campbell (1993), "DRAIN-2DX Base program description and user guide", Version 1.10, University of California at Berkeley
6. G. H. Powell (1993), "DRAIN-2DX Element description and user guide for Element TYPE01, TYPE02, TYPE04, TYPE06, TYPE09 and TYPE015", Version 1.10, University of California at Berkeley
7. Kihak Lee and Douglas A. Foutch (2002), "Performance evaluation of new steel frame buildings for seismic loads", Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 2002;31, pp.653-670
8. International Code Council, "International Building Code", 2000
9. Singiresu S. R., "Engineering Optimization - Theory and Practice", John Wiley & Sons, Inc., 1996