

2차원 철골 구조물의 최적 성능기반 내진설계법 개발

Development of the Optimal Performance Based Seismic Design Method for 2D Steel Moment Resisting Frames

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

ABSTRACT

Recently, performance based seismic design (PBSD) methods have been suggested in numerous forms and widely studied as a new concept of seismic design. The PBSDs are far from being practical method 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 3-story two-dimensional steel frame structures.

Key words : PBSD, Displacement Coefficient Method, Optimization, , Genetic Algorithm

1. 서 론

Northridge 지진(1994), 고베지진(1995) 등 근래 여러나라에서 발생한 지진 피해를 통해, 기존의 내진설계 규준이 실제 지진 발생시 건물의 성능을 제대로 보장할 수 없음이 나타났다. 이에 따라 미국, 일본 등 세계 각지에서 많은 연구들이 수행 되었으며, 기존 내진 규준들의 문제점을 극복하기위해, 성능에 기초한 내진설계법(Performance-Based Seismic Design)이 제안되었으며, 최근 발행되는 규준에 점차 적용되어 가고 있다.

하지만, 성능에 기초한 내진설계법은 구조물의 비탄성 거동을 전제로 하기 때문에, 그 과정이 복잡하며, 특히 최근 구조물이 고층화, 대형화됨으로 인해 고려할 구조적 요소가 많은 점을 감안할 때, 경험이나 직관에 의한 구조설계과정은 설계의 효율성 및 경제성을 저하시킬 수 있다.

이러한 문제점은 선형 및 비선형 프로그래밍을 이용한 수많은 수치해석 기반의 최적화 기법을 통해 해결

* 정회원, 연세대학교 건축도시공학부 석사과정
** 정회원, GS 건설 사원
*** 정회원, 연세대학교 건축도시공학부 박사과정
**** 정회원, 연세대학교 건축도시공학부 부교수

할 수 있다. 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 유연하게 적용할 수 있는 발전적(Heuristic) 기법이다. 또한 복잡한 해공간의 탐색 성능이 우수하여 변수와 제약이 많은 대형 수리문제에도 적합한 기법이다.⁽²⁾

최적 성능 내진설계법에 대한 기존 연구는 S. Ganzerli(2000)⁽¹²⁾, 이현국⁽¹⁰⁾ 등에 의해 수행되었으나, 철근콘크리트 골조에 대한 포탈 프레임에 한정되며, 그 최적값에 대한 신뢰도가 아직 부족한 편이다.

따라서 본 논문에서는, 이현국⁽¹⁰⁾의 이전 연구 성과인, 성능에 기초한 내진설계의 방법 중 변위계수법(Displacement Coefficient Method, DCM) 및 단순 유전알고리즘을 통한 최적 내진설계법을 계속 개발하고 검증하고자 한다.

2. 성능에 기초한 내진설계법

2.1. FEMA 273의 성능목표

FEMA 273에서는 지진위험도와 성능수준을 조합하여 표 1. 와 같은 성능목표를 제시하고 있으며 이 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.

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	K	L
아주 드문(Very Rare)	2475년	2%/50년	M	N	O	P
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			

표 1. 성능목표 (FEMA 273)

2.2. 변위계수법을 통한 내진 성능평가 방법

FEMA 273에서는 선형정적해석, 비선형정적해석, 선형동적해석, 비선형동적해석 등 4가지 방법의 해석 기법을 제시하고 있으며, 이 중 비선형 정적해석이 가장 많이 적용되고 있다. 비선형 정적해석은, 모드 응답 스펙트럼 해석을 통해, 90% 질량 참여율을 얻기 위해 요구되는 모든 모드를 고려하여 구한 총 전단력이, 1차

모드만을 고려한 층 전단력의 1.3배 이상일 때, 즉 고차모드 응답의 영향이 중요치 않을 때 사용된다.

그 기본 과정은, 다음과 같다. 통제점(Control Node, 보통 최상층 절점)가 목표변위(target displacement, δ_t)에 도달할 때 까지, 구조물을 정적으로 가력한 후, 부재의 소성힌지각 및 층간변위각을 결정하고, 그 값이 표 2. 의 허용기준(Acceptance Criteria)을 만족하는지를 비교한다.

여기서 목표변위(δ_t)는 FEMA 273에서 제안한 식 1.로 구할 수 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

Δ/Δ_y		잔류 강도비	소성힌지 제한값			
d	e		c	IO	LS	
10	12	0.6	2	7	9	

※ 위 제한값은 완전 구속 모멘트 철골조의 조밀단면에 대한 보와 기둥에 한함

표 2. 성능 수준별 허용기준 (FEMA 273)

본 논문에서는 표 1. 의 성능목표 중에서 기본안전목표(BSO)를 달성하기 위해, 목표변위에서 소성힌지 제한값을 L.S.수준(K단계)과 C.P.수준(P단계)에 대해 성능 검토를 한다.

3. 최적 내진설계법

3.1. 정식화

본 논문에 사용된 목적함수, 설계변수, 제약조건은 아래와 같다.

- 목적함수 : 총 구조물의 중량을 최소화하는 것을 목적함수로 한다.

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

- 설계변수 : W Shape에 대한 단면성능(단면적, 전단면적, 단면2차모멘트, 단면계수, 단면2차반경)들을 데이터베이스화하여 이산변수로 사용한다.

$$X_i = A_i, A_w, I_i, Z_i, r_i \quad (3)$$

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

- 변위제약 : 층간변위에 대한 한계를 제한한다.

$$\frac{R(\Delta^i - \Delta^{i-1})}{H^i} \leq 0.015 \quad i = 1, N \quad (4)$$

- 응력제약 : 각 부재에 대해 작용하는 응력이 규준에서 제한하는 허용응력을 초과하지 않도록 제한한다. (대한건축학회의 강구조계산 규준, 1983년)

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

- 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^i , Δ_{allow}^i 는 i 번째 층의 최대 수평변위 및 허용 수평변위

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

A_c^i 는 i 번째 층의 기둥 단면적의 넓이

H^i 은 i 번째 층의 층고

M 은 전체 부재의 개수

N 은 전체 층수

R 은 강도저감계수

- 소성힌지각 제약 : 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.

3.2. 최적화 기법

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 파라미터를 기초로 하여 16개의 개체수와 다양한 탐색을 위하여 0.4에서 0.8사이의 교차율을 사용해야 한다는 연구결과에 의해 0.6의 교차율을 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 표 3. 과 같다.

모집단의 크기	교차율	돌연변이율	전도율	토너먼트 크기
16	0.6	0.01	0.01	8

표 3. SGA 의 파라미터 설정

3.3. 최적화 알고리즘

위에서 언급한 GA 최적화 기법으로, 제약조건들을 만족하면서, 목적함수를 달성하기 위한 최적화 알고리즘의 흐름도는 그림 1. 와 같다. 먼저 초기모집단에 대하여 강도설계 및 강성설계를 수행하며, 설계 제한값에 벗어난 구조물에 대해서는 적합도 값이 낮게 평가되어 다음 세대 때 선별될 확률을 낮게 제한한다. 강도 설계는 대한건축학회의 강구조계산 규준(1983년)을 기준으로 하였으며, 지진하중에 대한 해석법으로는 각 모드별 최대응답을 설계용 스펙트럼에서 구해 전체 모드에 대해 중첩함으로써 구조물의 최대응답을 계산하는 반응스펙트럼법(RSA)을 사용하였다. 최대변위는 각 모드에 의한 최대반응을 SRSS(Square Root of Sum of Squares)법으로 조합하였다. 또한 FEMA 273에서 제시하고 있는 변위계수법을 활용하여 구조물이 보유하고 있는 내진성능을 평가하는 강성설계를 수행하는데, 비선형 정적해석(Pushover analysis)은 DRAIN-2DX 프로그램을 이용하여 수행하였다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾

4. 예제 적용

4.1. 3층 모멘트 골조 구조물 예제

예제에서 사용한 3층 모멘트 골조 구조물은 R. Hasan⁽¹¹⁾이 사용한 예제이다. 그림 2. 에서 보는 바와 같이 4경간 3층 강접 골조이며, 20개의 노드와 27개의 부재를 가지고 있다. 부재의 거동을 이상화하여, 그림의 숫자와 같이 9개의 그룹으로 구분한다. 하중 조건 및 지진에 대한 질량은 표 4. 와 같으며, 동적해석을 위한 수평하중으로 그림 3. 과 같은 IBC2003⁽⁸⁾(Site Class = D, Ss = 1.0, S1 = 0.5)의 반응스펙트럼을 사용하였다. 하중조합은, 고정하중(DL)+적재하중(LL)과, (고정하중(DL)+적재하중(LL)±(EQ))/1.5 중에서 가장 불리한 하중조합에 대해 응력제약 및 변위 제약조건을 적용하였다. 이에 대한 기준은 대한 건축학회의 강구조 계산 규준(1983) 및 건축물 하중기준 및 해설(2000)을 적용하였다.

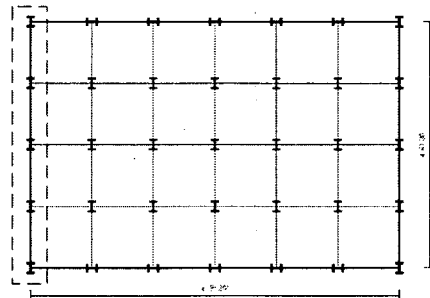
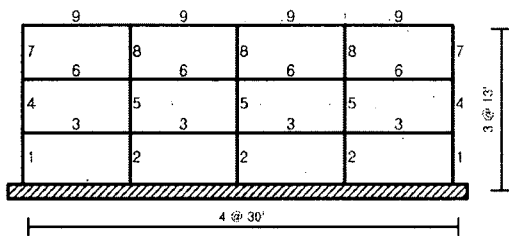


그림 2. 3층 모멘트 골조 평면 및 입면

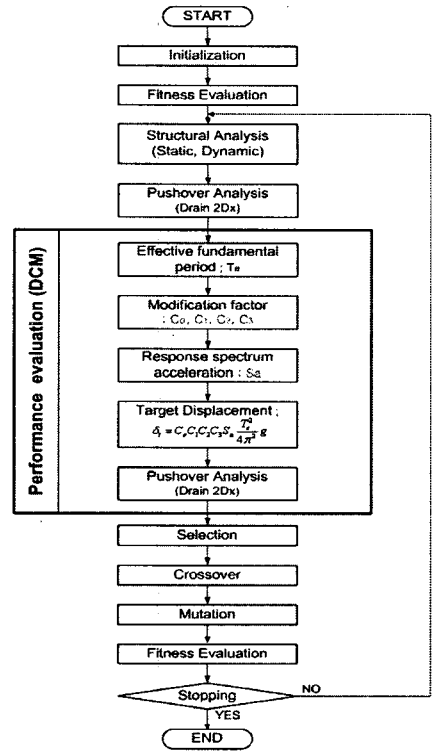


그림 1. 최적내진설계(OPBD) 흐름도

변위계수법을 이용한 성능기반 내진성능평가를 위한 지진하중으로, FEMA 273을 적용하였다. 즉, 밀면전단력을 계산하기 위하여, USGS/BSSC MCE Maps (LA 지역, Stiff soil, Site category D)에 근거하여 초과확률 10%/50년(BSE 1)인 지진하중은 $S_s = 0.945g$, $S_1 = 0.347g$, $F_a = 1.122$, $F_v = 1.706$ 의 계수를, 초과확률 2%/50년(BSE 2)인 지진하중은 $S_s = 1.622g$, $S_1 = 0.624g$, $F_a = 1.0$, $F_v = 1.5$ 를 사용하였다. 본 연구에서는 초과확률 10%/50년과 2%/50년인 지진하중에 대해서 각각 LS와 CP 성능수준을 만족하도록 단단계 설계를 통해, 기본안전목표(BSO)를 만족시키도록 한다.

강재의 항복응력은, 기둥은 50 ksi, 보 및 거더는 36 ksi를 사용하였으며, 재료의 탄성계수 및 단위중량은 각각 29000 ksi, 2.836×10^{-4} kips/in.³ 로 가정 하였다. 각 부재가 선택할 수 있는 단면은 W Shape 으로 기둥과 보 각각 16개 씩 사용하였다.

적용도의 평가는 Powell 등⁽⁹⁾이 제안한 벌칙함수 방법을 사용하여 비가능해가 가능해보다 항상 적용도가 낮게 평가되게 하였다. 선택 전략은 토너먼트 선택을 사용하였고, 교배는 2점 교배로 기둥과 보에서 각각 2점이 선택되어 교배되도록 하였다.⁽²⁾

	1, 2 층	지붕 층	
D.L.	철골조	- ¹⁾ psf	- ¹⁾ psf
	슬래브	30 psf	30 psf
	벽체	25 psf	25 psf
	옥탑	0 psf	40 psf
	기타	20 psf	14 psf
	소계	75+¹⁾ psf	109+¹⁾ psf
L.L.		50	50
지진에 대한 총질량		1054 kips	1140 kips

¹⁾ Steel Frame 자중은 프로그램상에서 계산하여 하중에 추가됨

표 4. 하중 및 총질량

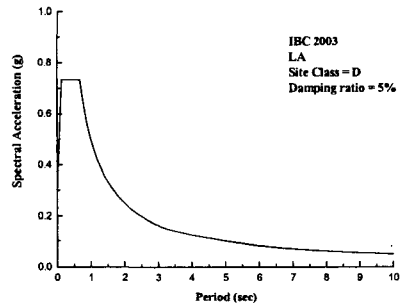


그림 3. 설계 반응 스펙트럼

4.2. 3층 모멘트 골조 구조물 결과 분석

개발된 최적내진설계기법을 3층 모멘트 골조예제에 적용한 결과는 그림 4와 표 5와 같다. 그림 4는 3층 모멘트 골조의 수렴곡선 및 세대수를 나타내는 그래프이고, 표 5는 알고리즘의 최적값, 반복 세대수를 표시하고 있다. 5회 반복 실행한 평균 최적값 89.39 kips에 대해서 각각의 최종 수렴값의 편차는 평균값의 ±9.4%미만을 보이며, 세대수 41회~70회 사이에서 수렴한다는 것을 알 수 있다. Hasan⁽¹¹⁾의 연구결과에서 같은 구조물에 대해 92.81 kips로 설계되었다. 본 연구결과와 최적값과 Hasan의 결과는, PBD 설계 철학 및 강도 설계가 서로 상이하므로 직접 비교는 할 수 없지만, 합리적인 수준에서 최적값이 형성됨을 예상할 수 있다.

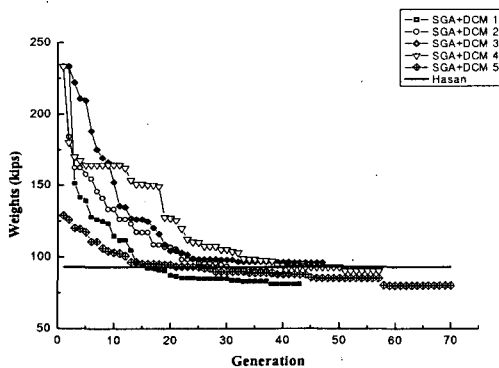


그림 4. 중량 수렴곡선

	중량(kips)	세대수
1회	80.98	43
2회	87.23	41
3회	95.93	47
4회	90.00	57
5회	92.81	70
평균	89.39	51.6

표 5 최적 중량 및 세대수

각 세대별 엘리트개체(제약조건을 모두 만족하면서 적합도가 가장 높은 개체)의 허용응력, 층간변위각, 소성힌지각에 대한 실제 구조물의 각 최대값에 대한 비율이 그림 5-8.에 나타나 있다. 응력 및 층간변위각은 세대수가 증가하면서, 100%에 수렴하는 모습을 볼 수 있으나, 소성힌지각은 세대수가 증가하여 최적값에 도달하여도 아직 여유가 있음을 볼 수 있다. 이는 최적값에 도달함에 있어, 소성힌지각 보다 응력 및 층간변위각이 주된 제약조건으로 작용함을 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 5.에서와 같이 본 연구에서 개발한 OPBD는 최적화 알고리즘 평가 기준 중의 중요한 요소인 전역적 수렴성을 만족하는 것으로 판단되며, 병렬최적 내진 성능 기반 설계법을 개발하게 되면 그 적용성이 보다 개선되리라 판단된다.

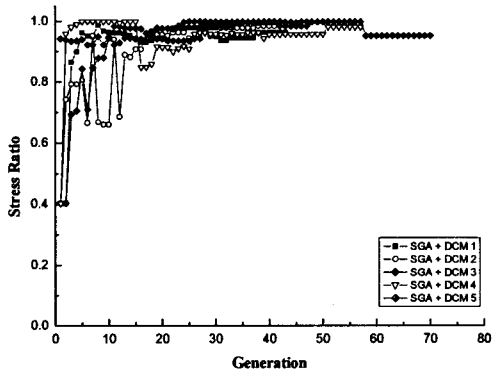


그림 5. 세대수에 따른 응력 비율

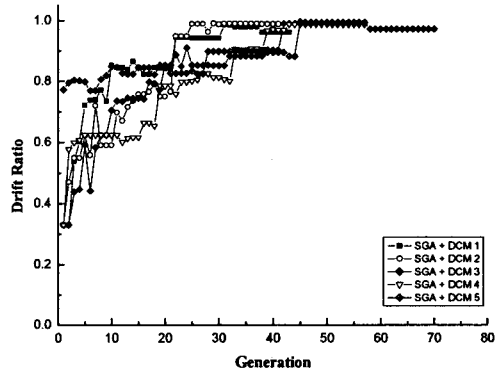


그림 6. 세대수에 따른 층간변위각 비율

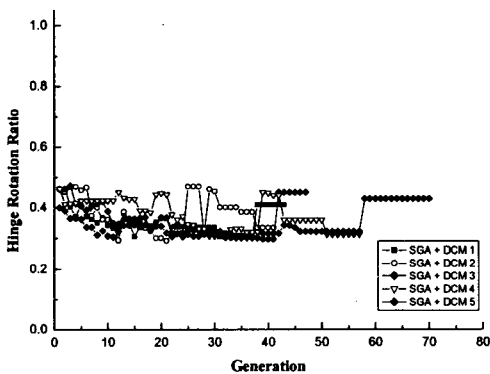


그림 7. 세대수에 따른 소성힌지 회전각 비율 (성능목표 K)

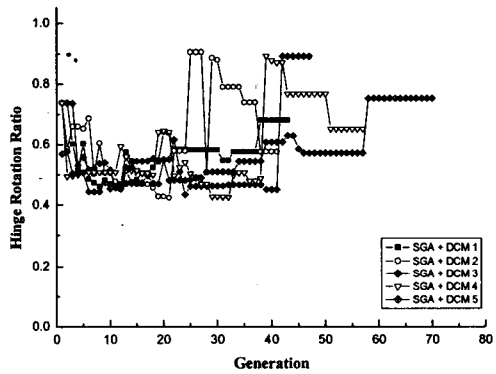


그림 8. 세대수에 따른 소성힌지 회전각 비율 (성능목표 P)

5. 결 론

본 연구에서는 성능에 기초한 내진설계의 한 방법인 FEMA 273에서 제시하고 있는 변위계수법을 활용하여 최적내진설계법을 개발하였다. 개발한 최적내진설계법을 9층 철골 모멘트 골조의 최소 중량설계에 적용한 결

과 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 접합부 및 가새 골조 등 다양한 모델에 대한 성능 분석이 이루어져야 한다.

감사의 글

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

참고문헌

1. BSSC, "NEHRP GUIDELINES 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 "구조 최적화를 위한 병렬 유전자 알고리즘", 전산구조공학회 추계학술대회 발표 논문집, 2000, 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", 2003
9. Singiresu S. R., "Engineering Optimization - Theory and Practice", John Wiley & Sons, Inc., 1996
10. 이현국, 권윤한, 박효선, 변위계수법을 활용한 최적 내진 성능기반 설계기법 개발, 한국전산구조공학회 봄 학술발표회 논문집, 17권 제1집, 2004, pp. 103-110
11. R. Hasan, L. Xu, D.E. Grierson, "Push-over analysis for performance-based seismic design", Computers & Structures, Volume 80, Issue 31, December 2002, pp. 2483-2493
12. S. Ganzerli, C.P. Pantelides and L.D. Reaveley, "Performance-based design using structural optimization", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, April 2000, pp. 1677-1690