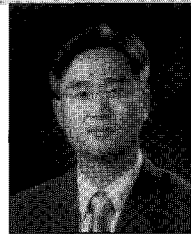
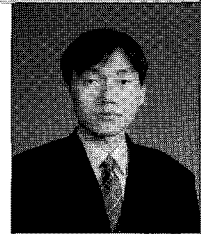


# 구조 최적화 알고리즘을 이용한 성능 기반 내진설계

## Performance Based Seismic Design Using Structural Optimization



박 호 선\*



최 세 운\*\*

\* 연세대학교 건축공학과 교수

\*\* 연세대학교 건축공학과 박사과정

### 1. 서 론

노스리지 지진(1994) 이후 구조물의 지진 거동에 대한 다양한 해석 및 실험적 연구가 수행되었다. 이에 따른 결과물으로써, FEMA 273, FEMA 445 등과 같은 성능기반 내진설계 기법이 제시되었고, 여러 나라의 내진설계 기준에 점차 반영이 되고 있다. 성능기반 내진설계는 표 1과 같이 사용연한 동안 발생 가능한 다양한 크기의 지진수준에 대하여 구조물의 성능수준을 규정함으로써, 구조물이 발휘할 수 있는 내진목표를 명확하게 보장하도록 유도하는 내진설계 철학이다. 이러한 성능기반 내진설계법의 가장 큰 특징은 다음의 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 기존의 설계법이 강

도기반 설계법이라면, 성능기반 설계법은 변위기반 설계라는 것이며, 둘째는 변위기반 설계를 통해 구조물의 실제 거동을 여러 성능 목표로 분류하며, 이에 대한 정량적인 기준(부재의 소성흔지각 혹은 구조물의 최대 층간변위를 등에 관한 한계값 제시)을 제시하고 있다는 것이다.

그러나 성능에 기반한 설계는 구조물의 비탄성 거동을 전제로 하기때문에, 그 과정이 복잡하며, 이를 경험이나 직관에 의해 구조설계를 한다면 효율성 및 경제성을 저하시킬 수 있다. 특히 최근 구조물이 고층화, 대형화됨으로 인해 고려할 구조적 요소가 많은 점을 감안할 때, 성능 기반 설계를 실무에 직접 반영하여 최적의 구조물을 설계한다는 것은 어려운 문제이다. 이러한 문제를 해결하고자 전산 해

표 1 성능목표 (FEMA 273)

지진위험도	재현주기	초과확률	건물의 성능수준			
			Operational	Immediate Occupancy	Life Safety	Collapse Prevention
자주(Frequent)	72년	50%/50년	A	B	C	D
가끔(Occasional)	225년	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

석 및 알고리즘에 기반하는 최적화 기법을 이용한 성능기반 최적내진설계에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 현재 연구 동향은 RC 및 철골 구조물 등 다양한 구조물에 대해서 고르게 진행되고 있으며, 부재의 소성힌지 및 구조물의 최대 층간변위를 등의 변형조건을 제약조건으로 고려하면서 구조물량, 초기 건설비용, 생애주기비용 등을 최소화하는 연구가 주로 수행되고 있다. 본 기사에서는 이러한 성능기반 최적내진설계 기법에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 내진성능 평가

구조물의 성능기반 내진설계를 위해서는 먼저 구조물의 내진성능을 평가해야 한다. 이 과정은 일반적으로 전산구조해석을 통해 이루어지며 이를 위해 사용되는 해석법은 선형 정적해석, 비선형 정적해석, 선형 동적해석, 비선형 동

적해석 등 4가지로 구분할 수 있다. 이 중에서 비선형 동적해석이 가장 정확한 해석기법으로 인정받고 있지만, 최적내진설계 분야에서는 비선형 정적해석이 주로 사용되고 있다. 그 이유는 구조물의 최적설계를 위해서는 일반적으로 반복적인 구조해석 과정이 요구되기 때문에, 해석 시간에 대한 부담이 큰 비선형 동적해석 대신 비선형 정적해석이 주로 사용되고 있다. 이와 같은 이유로 본 기사에서는 비선형 정적해석에 대해서 설명하고자 한다.

비선형 정적해석법의 목적은 설계용 지진에서 예상되는 구조물의 부재력과 구조물 전체 혹은 국부적 변위의 대략적인 값을 획득하여, 해당 구조물의 내진성능을 평가하는데 있다. 이는 일방향 정적 가력을 한다고 해서 Pushover 해석법이라고도 한다. 비선형 정적해석법은 재료 및 기하 비선형 거동을 고려하여 구조물이 보유한 성능 산정에 있어 구조물의 항복이 진행되는 동안의 거동과 하중의 재분

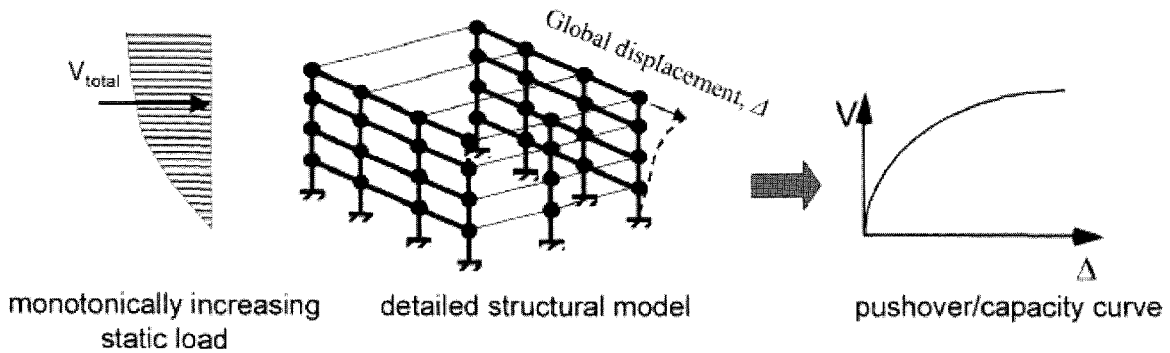


그림 1 비선형 정적해석 개념도 (FEMA 440)

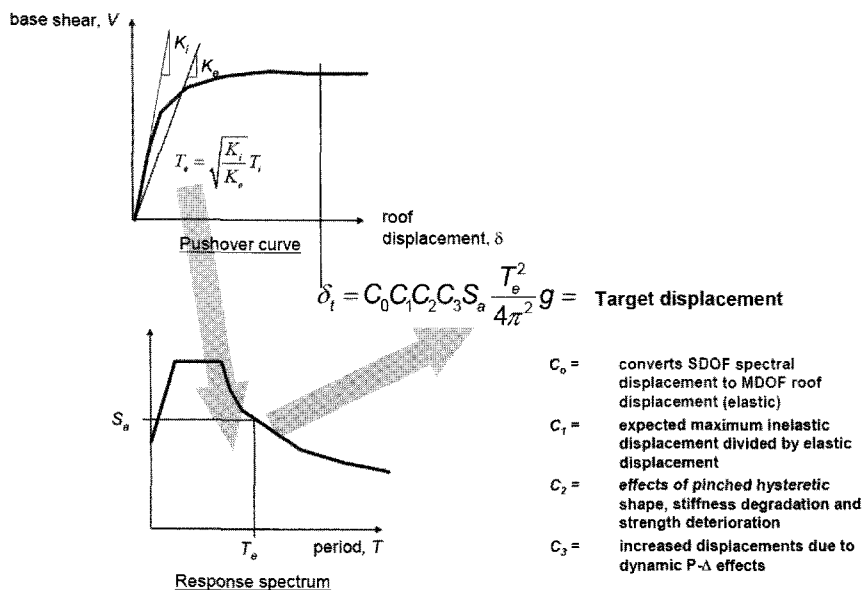


그림 2 FEMA 273에서 제시한 변위계수법 (FEMA 440)

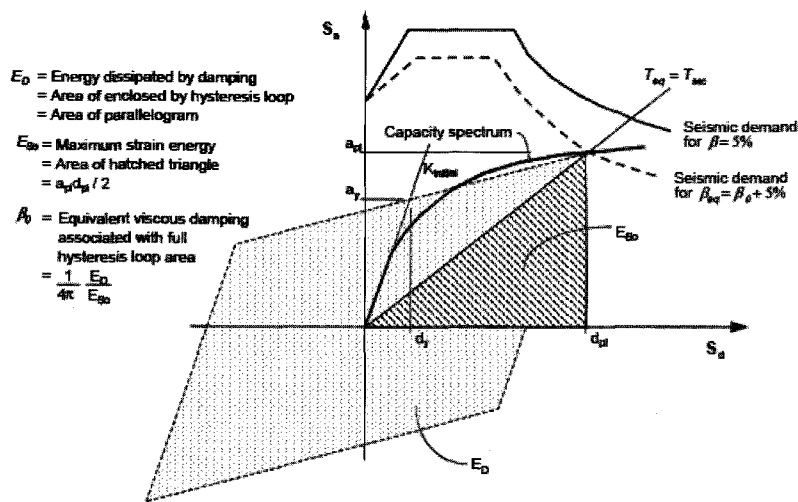


그림 3 ATC 40에서 제시한 능력스펙트럼법 (FEMA 440)

배를 고려한 시스템의 안정한계상태를 효과적으로 파악할 수 있는 가장 간단하면서도 실용적인 해석방법이다. 비선형 정적 해석법의 과정은 그림 1과 같이 먼저 횡하중 패턴을 정하고, 설계용 지진을 가력하였을 시 예상되는 변위수준(목표변위)까지 이미 결정한 횡하중 패턴에 따라 일방향으로 구조물을 정적 가력하여 부재의 내력 및 변위를 산정하게 된다. 해석이 완료되면 그 결과로 횡하중-변위의 관계 (Pushover curve)가 생성된다. 이 횡하중-변위 곡선은 일반적으로 하중이 점진적으로 증가함에 따라, 소성힌지의 발생으로 구조물의 강성은 감소하게 되고, 횡변위는 감소한 강성에 따라 증가하게 된다.

이 비선형 정적해석을 통한 내진성능 평가법은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 하나는 FEMA 273에서 제시한 변위계수법(Displacement Coefficient Method, DCM)이며, 다른 하나는 ATC 40에서 제시한 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method, CSM)이다. 이 두 가지 방법은 성능목표를 만족시키기 위한 지표인 목표변위를 결정하는 과정이 다를 뿐, 성능목표를 결정된 후, 결정된 성능목표에 따라 구조물의 성능과 요구량을 비교함으로써 구조물의 내진성능을 평가하는 공통적인 개념을 가지고 있다. 그림 2와 3은 FEMA 440에서 제시한 각 방법에 대한 개념도이다. 구체적인 내용은 참고문헌을 참고하기 바란다.

### 3. 최적화 알고리즘

구조 최적화를 위해서는 구조물을 구성하는 물리적 요소와 기하적 요소로 이루어진 목적함수와 제약조건이 수학적으로 표현되어야 한다. 수학적으로 표현된 수식에서 최적

화 기법을 통해 결정해야 하는 값을 설계변수라 하며, 이는 최적화 알고리즘을 통해 제약조건을 만족시키면서 동시에 목적함수를 최대화 혹은 최소화하는 변수값이 결정된다.

일반적으로 구조최적화 과정에서 고려하는 제약조건은 설계변수로 이루어진 비선형 수학적식이다. 따라서 최적해를 찾는 과정은 이러한 비선형 수학적식의 해를 찾는 과정이라 볼 수 있다. 그러나 구조물과 같이 설계변수가 많은 경우에는 이러한 수학적식을 설계변수를 이용하여 정의하고 해를 찾기가 어렵다. 특히 성능기반 최적내진설계 분야에서 고려되는 제약조건은 각 부재의 소성변형값, 구조물의 최대층간변위를 등이기 때문에 이를 비선형 수학적 계획법 등과 같은 기존 최적화 기법으로 풀기는 매우 어렵다. 이러한 이유로 성능기반 최적내진설계 분야에서 가장 널리 사용되는 최적화 기법은 Genetic Algorithm(GA), Particle Swarm Optimization(PSO), Ant Colony Optimization(ACO) 등과 같은 발전론적인 기법이 주로 사용되고 있다.

본 기사는 이러한 여러 발전론적인 기법 중에서도 가장 널리 사용되고 있는 GA에 대해서 설명하고자 한다. GA는 1975년 Michigan 대학의 Holland 교수에 의해 개발되어 그의 논문 "Adaptation in Natural and Artificial Systems"에서 처음으로 소개되었다. GA는 다윈이 주장한 진화 법칙인 적자생존과 자연도태의 원리를 토대로 개발된 알고리즘이다. 진화론에 의하면 특정지역에 분포해 있는 개체들은 지역적 환경에 적합할수록 보존될 확률이 높으며 교배와 돌연변이를 거치면서 우성인 형질이 보존되고 열성인 형질은 도태된다. 다시 말하면 어떤 세대(Generation)를 구성하는 개체(Individual)들의 집합, 즉 개체군(Population)에서 환경에 대한 적합도(Fitness)가 높은 개체가 높은 확률로 살아남아 재

생 (Reproduction) 할 수 있게 되며, 이때 교배(Crossover) 및 돌연변이(Mutation)로서 다음 세대의 개체군을 형성하게 된다. GA에서 개체의 수를 개체군의 크기(Population Size)라고 한다. 각각의 개체는 염색체(Chromosome)를 가지고 있으며 염색체는 복수개의 유전자 (Gene)의 집합으로 구성된다. 유전자에 의해 결정되는 개체의 형질을 표현형(Phenotype)이라고 하고, 이에 대응되는 염색체의 구조를 유전형(Genotype)이라 한다. 또한 표현형을 유전형으로 바꾸는 것을 코드화(Coding) 그 반대를 디코드화(Decoding)이라 한다.

GA는 개념이 단순하고 해의 탐색능력이 우수하다. 또한 다른 알고리즘과 이식성이 용이하며 유연성이 높은 알고리즘이다. 이러한 특징은 공학 문제를 포함한 다양한 문제에 대하여 GA의 적용성이 높다는 것을 말해주고 있다. 그러나 GA의 유연성은 다양한 문제에서 범용적으로 사용할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 일반적인 사용자들에게는 특정 문제에서 어떠한 유전 연산자를 사용해야할지 혼란을 가져다 준다. 이러한 문제는 각각 문제에 의존적이며 알고리즘이 달라지는 효과를 가져오게 되어 범용성이 떨어진다. 또한 GA는 개체기반 알고리즘이기 때문에 계산량이 매우 많다는 단점을 가진다.

GA의 적용에 있어서 고려해야 될 부분은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데 유전 연산자의 선택과 유전 연산자에 대한 확률 파라미터의 설정이다. 유전 연산자는 파라미터 설정에 비하여 문제에 의존적이지 않으며 최적값을 찾는 동안 탐색을 풍부하게 하거나 가능해를 보존하는 전략으로 사용된다. 그러나 파라미터의 경우 해결하려는 문제에 의존적이며 특히 공학적인 문제에서 해공간의 크기나 설계변수 등에 따라서 적절한 값을 설정하여야 한다. 특히 돌연변이율은 해의 이용(Exploit)과 탐색(Explore)을 조절할 수 있으며 반복수나 탐색 영역 등을 제한할 수 있다.

#### 4. 성능기반 최적내진설계 예제

본 기사에서는 성능기반 최적내진설계를 설명하기 위해 3층 철골모멘트골조에 대한 성능기반 최적내진설계 연구사례 (권봉근 등, 2005)를 소개하고자 한다.

##### 4.1 3층 철골모멘트골조

###### 4.1.1 성능기반 최적내진설계 정식화 및 알고리즘

연구에서 사용된 설계변수, 목적함수, 제약조건은 아래와 같다.

표 2 3층 철골모멘트골조 예제의 성능기반 최적내진설계 기법의 정식화 (권봉근 등, 2005)

설계변수	· 형강에 대한 단면성능들을 데이터베이스화하여 이산변수로 사용
목적함수	· 구조물의 중량 최소화 $\text{Minimize } F(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^M \rho_i A_i L_i$
제약조건	· 층간변위 제약 $d = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_{allow}} \leq 1$ · 응력제약 : 각 부재에 대해 작용하는 응력이 규준에서 제한하는 허용응력을 초과하지 않도록 제한 $h = \frac{\sigma^j}{\sigma_{allow}^j} \leq 1 \quad j = 1, M$ · 건축물의 구조반응에 대한 정보와 시공성을 고려하여 동일 수직선상에 위치하는 기둥에 대해 층의 연결성을 제한 $k_1 = \frac{A_c^{i+1}}{A_c^i} \leq 1 \quad i = 1, N$ · 목표변위에서의 부재의 변형(소성힌지 회전각, 변위) 제약 : FEMA 273의 비선형 절차에 의한 적합도 기준을 이용하여 Life Safety 단계와 Collapse Prevention 단계에 대해 성능 검토

여기서,

$\rho, A, l, M$  는 부재 밀도, 단면적, 길이, 전체 부재 개수

$\Delta_{max}, \Delta_{allow}$  는 최대층간변위를 및 허용층간변위를

$\sigma^j, \sigma_{allow}^j$  는  $j$  번째 부재에 발생하는 응력과 허용응력

$A_c^i$  는  $i$  번째 층의 기둥 단면적의 넓이

$N$  은 전체 층수

이와 같은 정식화를 GA기법을 이용하여 최적해를 찾았다. 제약조건들을 만족하면서, 목적함수의 최소화를 달성하기 위한 최적화 알고리즘의 흐름도는 그림 4와 같다. 먼저 초기모집단에 대하여 구조해석 및 설계를 수행하며, 제약조건을 만족시키지 못하는 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 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 성능설계를 수행하는데, 비선형 정적해석(Pushover analysis)은 DRAIN-2DX 프로그램을 이용하여 수행하였다.

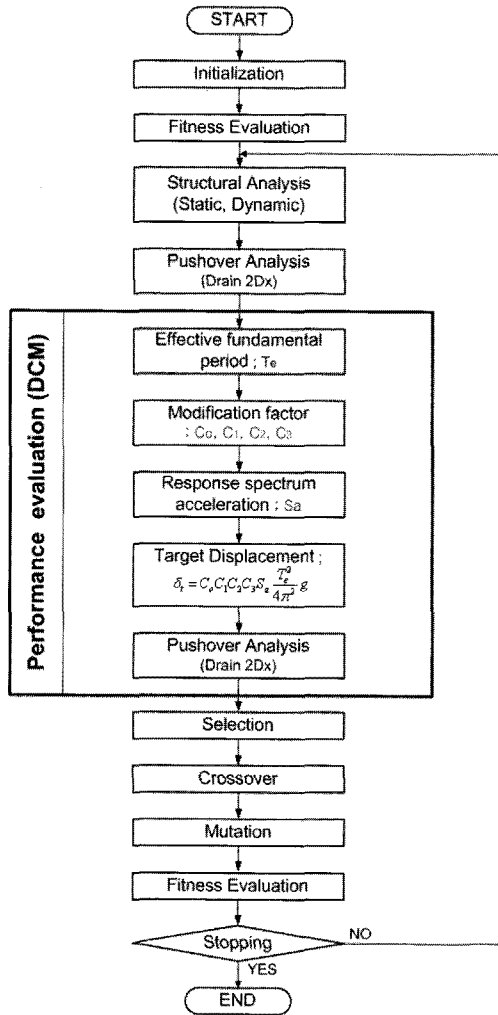
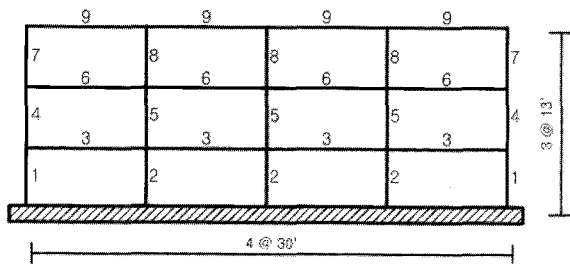


그림 4 최적내진설계 흐름도 (권봉근 등, 2005)



4.1.2 예제 적용 결과

그림 5와 같은 예제(총 9개의 그룹핑)를 사용하여 최적알고리즘을 수행하였다. 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 대한건축학회의 강구조 계산 기준(1983) 및 건축물 하중기준 및 해설(2000)을 적용하였다. 변위계수법을 이용한 성능기반 내진성능 평가를 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. 해당 연구에서는 초과확률 10%/50년과 2%/50년인 지진하중에 대해서 각각 LS와 CP 성능수준을 만족하도록 다단계 설계를 통해, 기본안전목표(BSO)를 만족시키도록 하였다. 적응도의 평가는 벌칙함수 방법을 사용하여 비가능해가 가능해보다 항상 적응도가 낮게 평가되게 하였다. 선택 전략은 토너먼트 선택을 사용하였고, 교배는 2점 교배로 기동과 보에서 각각 2점이 선택되어 교배되도록 하였다.

제시된 최적내진설계기법은 3층 모멘트 골조예제에 적용한 결과는 그림 6과 같다. 그림 6은 3층 모멘트 골조의 수렴곡선 및 세대수를 나타내는 그래프이다. 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 있었다.

각 세대별 엘리트개체(제약조건을 모두 만족하면서 적합도가 가장 높은 개체)의 허용응력, 층간변위각, 소성힌지각에 대한 실제 구조물의 각 최대값에 대한 비율이 그림 7-10에 나타내었다. 응력 및 층간변위각은 세대수가 증가하면서, 100%에 수렴하는 모습을 볼 수 있으나, 소성힌지각은

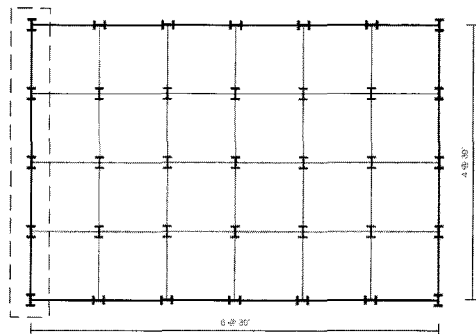


그림 5 3층 모멘트 골조 평면 및 입면 (권봉근 등, 2005)

세대수가 증가하여 최적값에 도달하여도 아직 여유가 있을 수 있다. 이는 최적값에 도달함에 있어, 소성힌지각보다 응력 및 층간변위각이 주된 제약조건으로 작용함을 알 수 있다.

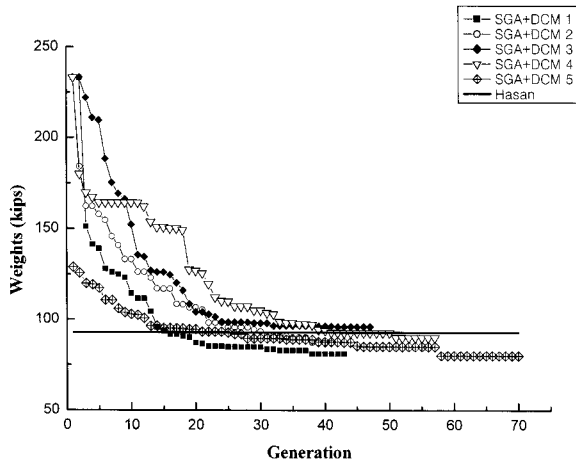


그림 6 중량 수렴곡선 (권봉근 등, 2005)

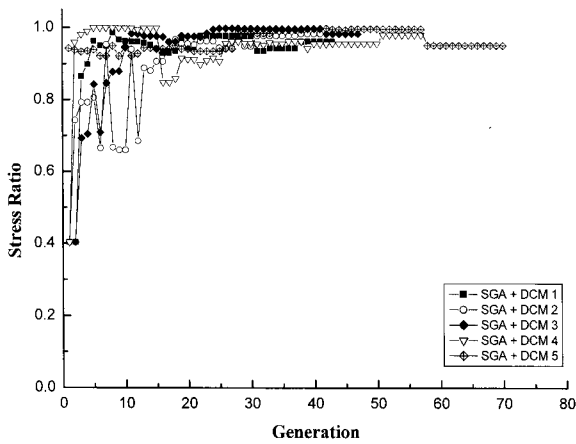


그림 7 세대수에 따른 응력 비율(권봉근 등, 2005)

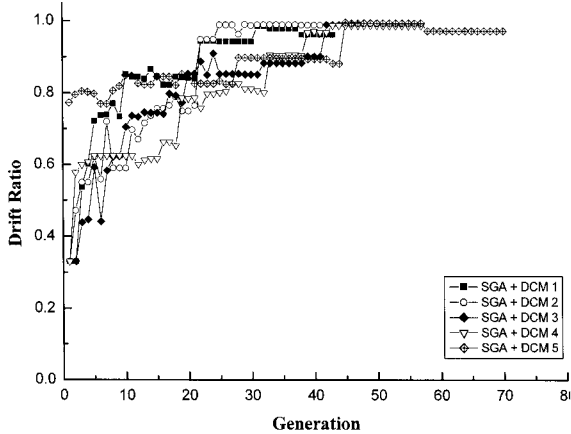


그림 8 세대수에 따른 층간변위각 비율(권봉근 등, 2005)

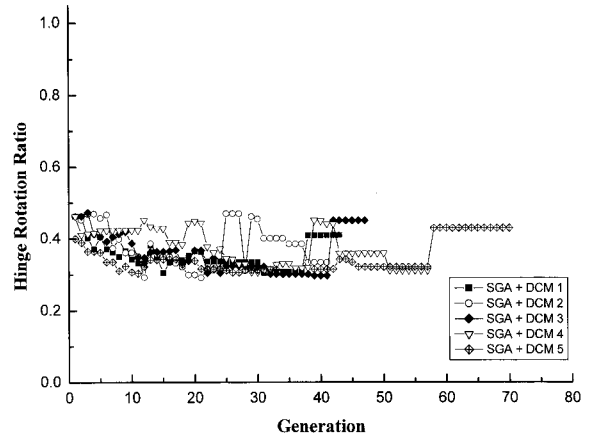


그림 9 세대수에 따른 소성힌지 회전각 비율(성능목표 K) (권봉근 등, 2005)

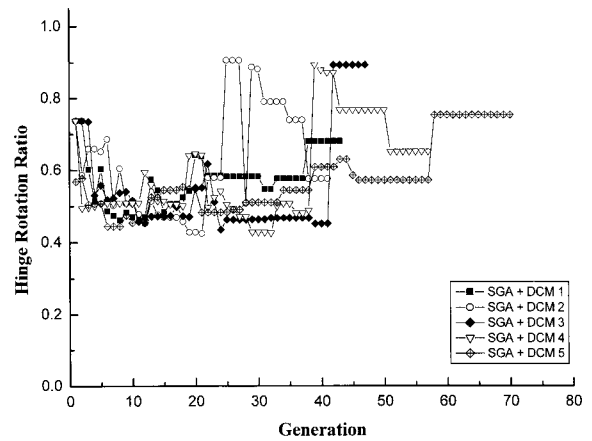



그림 10 세대수에 따른 소성힌지 회전각 비율(성능목표 P) (권봉근 등, 2005)

## 5. 맺음말

최근 발생한 아이티 지진(2010), 도후쿠 지진(2011) 등으로 인해 지진에 대한 불안감이 커졌으며, 점차 삶의 질이 향상 되면서 건물 성능에 대한 요구는 점점 높아지고 있다. 더불어 지구의 녹색화를 위해 건설자원의 효율적인 사용의 필요성은 증대되고 있다. 이러한 배경으로 인해 성능기반 내진설계에 대한 연구 및 활용은 점차 증가할 것으로 보이며, 특히 자원의 효율적인 사용을 위해서 전산해석 및 알고리즘에 기반하는 최적화 기법을 활용한 성능기반 최적내진설계기술의 중요성은 증대될 것이다. 그러나 성능기반 내진설계는 계산량이 많은 비선형해석을 요구하기 때문에 아직까지는 현실적인 성능기반 최적내진설계 기술이 제시되지 못하고 있다. 따라서 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. FEMA, 1997, Nhrp guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 273), Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
2. FEMA, 2006, Next-generation performance based seismic design guidelines (FEMA 445), Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
3. FEMA, 2005, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (FEMA 440), Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
4. ATC, 1996, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings (ATC 40), Applied Technology Council, Redwood City, California.
5. 권봉근, 이현국, 권윤한, 박효선, 2005, 2차원 철골 구조물의 최적 성능기반 내진설계법 개발, 한국전산구조공학회 봄 학술발표회 논문집, pp.636-643. 

[담당 : 김명한, 편집위원]