

구조-제어시스템의 동시최적설계를 위한 유전자알고리즘 및 Goal Programming 기법

Genetic Algorithm and Goal Programming Technique for Simultaneous Optimal Design of Structural Control System

옥승용*

Ok, Seung-Yong

박관순**

Park, Kwan-Soon

고현무***

Koh, Hyun-Moo

Abstract

An optimal design method for hybrid structural control system of building structures subject to earthquake excitation is presented in this paper. Designing a hybrid structural control system may be defined as a process that optimizes the capacities and configuration of passive and active control systems as well as structural members. The optimal design proceeds by formulating the optimization problem via a multi-stage goal programming technique and, then, by finding reasonable solution to the optimization problem by means of a goal-updating genetic algorithm. The process of the integrated optimization design is illustrated by a numerical simulation of a nine-story building structure subject to earthquake excitation. The effectiveness of the proposed method is demonstrated by comparing the optimally designed results with those of a hybrid structural control system where structural members, passive and active control systems are uniformly distributed.

1. 서 론

최근 들어 세계 각지에서 빈번하게 발생하는 지진피해로 인하여 기존 대형구조물의 설계방법에 대한 문제점 및 한계점을 인식하고 이를 극복하기 위한 많은 시도가 이루어져 왔다. 이 중에서 복합 제어시스템(hybrid control system)은 개별적 제어시스템이 갖는 단점들을 상호 보완하면서 구조물에 요구되는 제어시스템의 용량을 각 제어시스템의 제어특성에 따라 효율적으로 분산시켜서 제어목

* 학생회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

** 정회원 · 서울대학교 BK계약교수

*** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

표를 달성할 수 있는 장점으로 인하여 최근 들어 활발히 연구되고 있다⁽¹⁾. 이 논문에서는 기존의 수동 및 능동제어시스템만을 고려한 복합제어시스템을 보다 일반화하여, 구조물의 추가적인 부재도 포함시킨 복합구조제어시스템을 최적화하는 방법으로 Multi-Stage Goal Programming 방법을 제시한다. 이 방법은 광범위한 해 영역(solution space)을 갖는 최적화문제에서 하위단계의 설계목표부터 단계적으로 검색하여 상위수준의 설계목표로 점진적으로 진행해감으로써 가장 합리적인 최적해를 구할 수 있는 장점을 갖는다. 제시하는 방법의 효율성을 검증하기 위한 예제로서 빌딩구조물에 대한 복합구조제어시스템의 최적설계방법을 모사하는 수치해석을 수행하였다. 최적설계 과정을 통하여 제시하는 알고리즘의 효율성을 검증하였으며, 동일한 용량으로 구조물에 등분포시킨 시스템과 제시하는 기법에 따라 설계된 시스템간의 제어성능을 비교하였다.

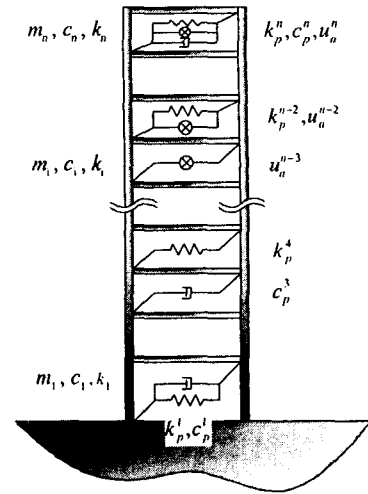


그림 1. 복합구조제어시스템

2. 제어알고리즘

그림 1과 같은 지진하중을 받는 n 개의 자유도를 갖는 구조시스템에 복합구조제어시스템을 장착한 운동방정식은 식 (1)로 표현된다.

$$M_s \ddot{q}(t) + (C_s + C_p) \dot{q}(t) + (K_s + K_p) q(t) = E_n x_g(t) + E_u u(t) \quad (1)$$

여기서, M_s , C_s , K_s 는 각각 $[n \times n]$ 크기의 질량, 감쇠, 강성행렬이고, $\ddot{q}(t)$, $\dot{q}(t)$, $q(t)$ 는 $[n \times 1]$ 크기를 갖는 시스템의 가속도, 속도, 변위벡터이며, $x_g(t)$ 는 지진가속도, E_u 는 외부하중의 작용위치벡터로서 지진하중에 대하여 $-M_s^{-1} \cdot \vec{1}_{[n \times 1]}$ 이다. K_p 및 C_p 는 구조부재 및 수동형 댐퍼의 강성 및 감쇠행렬로서 설치되는 층에 해당하는 자유도별로 삽입된다. 그리고 E_n 는 제어력의 위치행렬로서, m 개의 능동제어장치가 독립적으로 장착되는 경우, $[n \times m]$ 크기를 가지며, $u(t)$ 는 제어력벡터로서, $[u_1^T \ u_2^T \ \dots \ u_m^T]^T$ 으로 표현된다.

식 (1)의 운동방정식은 제어기설계를 위한 식 (2)의 상태공간방정식으로 변환된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_s x(t) + B_u \ddot{u}_g(t) + B_u u(t) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_s^{-1}(K_s + K_p) & -M_s^{-1}(C_s + C_p) \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ M_s^{-1} E_u \end{bmatrix} \ddot{u}_g(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ M_s^{-1} E_u \end{bmatrix} u(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, 상태벡터(state vector) $x(t)$ 는 변위와 속도로 정의되고, A_s , B_u , 및 B_u 는 각각 시스템행렬, 외란행렬 및 제어행렬이다.

복합구조제어시스템을 구성하는 능동제어시스템의 제어기로는 식 (2)의 상태공간방정식을 제한 조건으로 갖는 성능지수, 식 (3)을 최소화하는 LQR제어기법⁽²⁾을 적용하였다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [y(t)^T y(t) + u(t)^T R u(t)] dt = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)] dt \quad (3)$$

여기서, 제어변수 $y(t)$ 는 각 층의 층간 상대변위로 정의되며, 각 층의 변위로부터 층간 상대변위의 환산행렬을 이용하여 $y(t) = C \cdot x(t)$ 로 표현된다. $Q = C^T C$ 는 $[2n \times 2n]$ 크기의 준양한정 가중행렬 (semi-positive definite weighting matrix), $u(t)$ 는 제어력, $R = r \cdot I_{m \times m}$ 은 양한정 가중행렬(positive definite weighting matrix)이다.

최적제어이론에 의하면 식 (2)를 만족하면서 식 (3)의 성능지수를 최소화하는 최적 제어력은 식 (4)로 표현되며, 제어이득행렬 G 를 구성하는 S_r 행렬은 가중행렬 Q, R 에 대하여 식 (5)의 Riccati방정식을 만족하는 해이다.

$$u(t) = -G \cdot x(t) = [-R^{-1} B_r^T S_r] \cdot x(t) \quad (4)$$

$$A_r^T S_r + S_r A_r - S_r B_r R^{-1} B_r^T S_r + Q = 0 \quad (5)$$

3. 다목적 최적화문제의 구성 및 최적화기법

3.1 다목적 최적화문제

복합구조제어시스템의 설계문제는 비용에 해당하는 제어시스템의 용량과 제어성능에 해당하는 구조물의 응답을 최소화 대상으로 갖는 다목적 최적화문제를 구성하게 된다. 다목적 최적화문제는 원칙적으로 그림 2와 같이 다수의 최적해를 갖게 된다. 이러한 최적해들은 두 개의 목적함수를 동시에 최소화할 수 없지만 서로에게 열등하지 않는 최적해로서 pareto (nondominated 또는 noninferior) optimal solutions라 하며 식 (6)으로 정의된다⁽³⁾.

$$f_1(x_1) < f_1(x_2) \quad \& \quad f_2(x_1) > f_2(x_2) \quad (6)$$

설계의 입장에서는 다수의 최적해들 중에서 합리적인 의미를 갖는 단일한 최적해를 결정하도록 요구된다. 그러므로 다목적 최적화문제에 있어서 가장 중요한 것은 설계기준이나 설계조건을 어떻게 선정하는가에 달려있다. 실제 공학문제에서는 적절한 설계목표 값을 미리 결정하는 것은 쉽지 않은 문제이다. 이 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 Multi-Stage Goal Programming 방법을 제시한다.

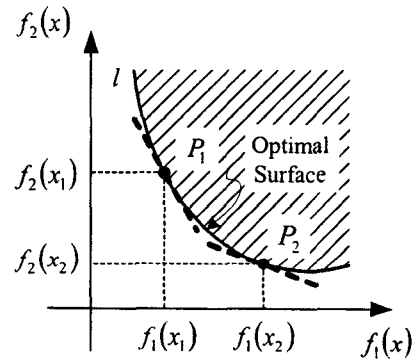


그림 2. Pareto Optimal Solutions

3.2 Multi-Stage Goal Programming 방법

복합구조제어시스템의 경우, 최소화의 대상이 되는 목적함수들은 비용의 측면에서 구조부재 및 수동 제어시스템의 사용량과 능동제어시스템의 최대제어력으로, 구조물의 안정성 및 제어성능의 측면에서 빌딩구조물의 층간 상대변위의 최대값으로 정의할 수 있다. Multi-Stage Goal Programming 방법에서는 다목적함수를 구성하는 개별적 목적함수들에 대한 설계목표 값을 여러 개의 수준으로 분류하여, 식 (7)과 같이, 개별적 목적함수들과 각 수준에서의 목표설계 값의 정규화된 거리 합으로 각 단계별 목적함수를 구성한다.

$$F(x)_j = \sum_{k=1}^{n+4} \left\{ \frac{f_{obj}^k(x) - \{g_{desired}\}_j}{\{g_{desired}\}_j} \right\} \quad (7)$$

여기서, $F(x)_j$ 는 j 단계에서의 목적함수 값으로서, 설계목표 값에 대하여 정규화된 개별적 목적함수의 합을 의미하고, 연산자 $\langle z \rangle$ 는 $\max\{z, 0\}$ 으로 정의된다. f_{obj}^k 는 k 번째 목적함수이고, $\{g_{desired}^k\}_j$ 는 j 단계에 대하여 정의된 k 번째 목적함수에 대한 설계목표 값을 의미한다. 따라서 $F(x)_j = 0$ 은 j 단계에서 모든 설계목표 값을 만족하는 것을 의미하고, 이 때, $j+1$ 단계의 목적함수 $F(x)_{j+1}$ 를 재구성하여 정의된 목적함수에 대한 최적화 과정을 반복함으로써 가장 높은 수준의 제어목표를 만족하는 최적해를 검색한다.

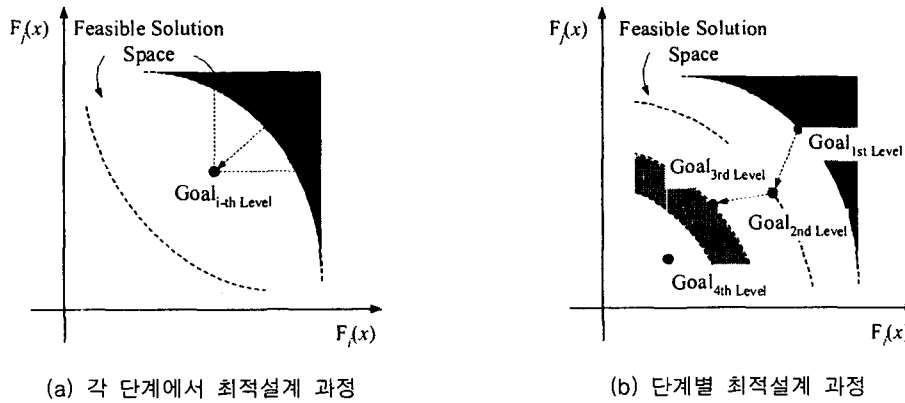


그림 3. Multi-Stage Goal Programming 방법의 최적화 과정

제시하는 방법에 따른 최적화 과정의 개념도가 그림 3에 도시되어 있다. 그림 3의 (a)는 i 번째 단계에서의 최적화 과정으로서, 설정된 설계목표가 검색 가능한 해 영역(feasible solution space)에 존재하는 경우에는 $i-1$ 번째 최적해에서 i 번째 설계목표를 만족하는 최적해로 갱신된다. 각 단계에서 설계목표를 만족하는 최적해를 검색할 때, 그림 3의 (b)처럼 상위 수준의 설계목표를 만족하는 최적해로 진행되어 최종적인 설계목표에 가장 근접하는 최적해를 검색하게 된다.

복합구조제어시스템은 장착되는 수동 제어시스템과 구조물간의 상호작용으로 인하여 구조시스템의 동특성이 달라지므로, 수동 제어시스템의 위치 및 용량에 따른 구조물과의 상호작용을 고려하여 능동 제어시스템의 최적설계, 즉 제어이득이 결정되어야 한다. 또한, 능동제어기 자체의 설치위치 및 개수에 따라서도 최적의 제어이득은 조정되어야 한다. 따라서 매 순간 제어기의 용량한계를 고려한 최적의 제어이득행렬을 구하기 위해서는 무수히 많은 반복과정이 필요하게 된다. 특히, 각 시스템의 최적 위치를 얻기 위해서는 이산량(discrete number)으로 표현되는 설계변수를 갖게 되므로, 기존의 미적분값에 기초한 최적화기법으로는 해를 찾는 데 어려움이 있다. 일반적으로 이러한 최적화문제에는 유전자알고리즘(genetic algorithm)이 효율적으로 적용될 수 있다^{(4) (5)}.

Multi-Stage Goal Programming 방법에 따라 구성된 최적화문제는 그림 4와 같은 두 단계의 계층적인 구조를 갖는 Goal-Updating Genetic Algorithm으로 해석된다. 상위계층에서는 각 단계별 설계목표를 설정하고, 하위계층에서는 설정된 설계목표를 만족하는 최적해를 검색하는 유전자알고리즘을 이용한 최적화 과정으로 이루어진다. 유전자알고리즘은 기존의 단일목적함수에 대한 유전자알고리즘과 동일한 방식으로 진행된다. 먼저, 설계변수의 이진코드인 염색체(chromosome)로 구성된 개체군(population)을 생성한 다음, 생성된 개체군에 대한 적합도(fitness)를 목적함수 값으로부터 산정한다. 산정된 적합도에 따라 우수한 염색체를 보존하고, 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변

이(mutation) 등의 유전연산을 통해 새로운 세대 (generation)의 진화된 개체군을 구성하는 과정을 반복하여 점점 우수한 유전자(gene), 즉 설계변수를 얻게 된다. 우수한 염색체를 보존하는 Elitism 단계에서 검색된 최적해가 설계목표를 만족하는지를 판단하여 상위 수준의 설계목표의 개선여부를 결정한다.

4. 수치예제

수치예제로서 9층의 빌딩구조물을 고려하였다. 각 층의 질량은 120(1층), 100(2~6층), 80(7~9층) (ton), 모든 층의 초기 강성은 50 (MN/m), 9개 모드에 대한 감쇠비는 [1.0, 1.0, 1.37, 1.77, 2.11, 2.45, 2.71, 2.92, 3.13]T (%)로 가정하였다. 복합형 구조제어시스템을 구성하는 수동 제어시스템은 감쇠계수로 표현하였으며, 능동제어시스템으로는 Active Tendon 형식을 적용하였다.

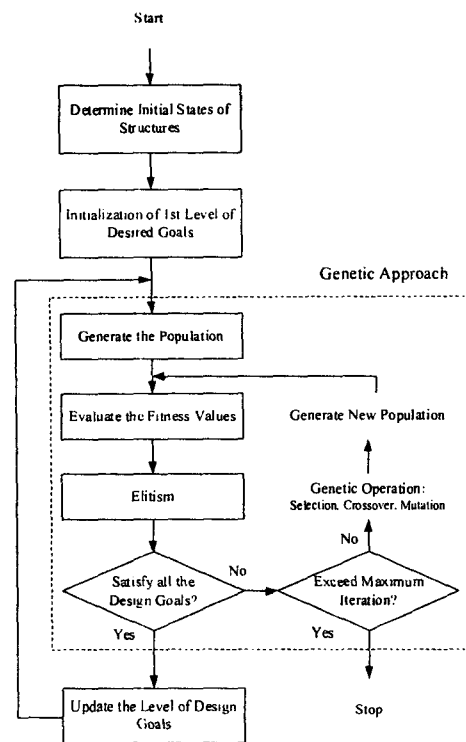


그림 4. Goal Updating Genetic Algorithm의 Flowchart

표 1. 유전자알고리즘의 매개변수

| 세대별 개체 수 | 교배 확률 | 돌연변이 확률 | 비트 수 | 최적해 검색회수 | 판별 반복회수 |
|-------------|-------|---------|--------|-------------|------------|
| 100 | 0.9 | 0.1 | 8 bits | 100,000 | 500 |

표 2. 각 설계변수의 검색영역의 최대최소값

| $k_{p,max}$ | $c_{p,max}$ | $r_{a,min}$ | $r_{a,max}$ |
|-------------|--------------|-------------|-------------|
| 50(MN/m) | 63(MN · s/m) | 10^{-20} | 10^{-10} |

시스템설계를 위한 외부입력하중으로는 인공지진 생성방법을 통하여 0.42g의 최대 지반가속도 및 지반조건 I의 지진특성을 갖는 가속도시간이력을 생성하여 적용하였다. 유전자알고리즘에서 적용되는 각 세대별 생성되는 개체 수, 교배확률, 돌연변이 확률, 유전자의 비트(bits) 수 및 최적해 판별의 반복회수 등의 매개변수 값이 표 1에, 검색영역은 표 2에 각 설계변수들의 최대/최소값으로 제시되어 있다.

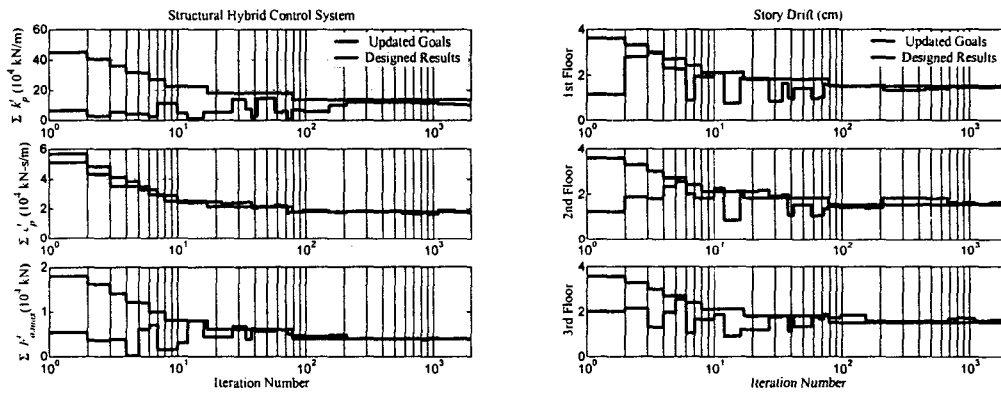
설계변수들인 각 층의 강성(k_p^i), 감쇠계수(c_p^i) 및 능동제어시스템의 설계를 위한 가중치(r)는 각각 8 비트로 이진코드화(encoding)하였으며, 능동제어기의 설치층 수만큼의 비트 수를 사용하여 각각 설치여부(1=설치함, 0=설치안함)를 결정하였다. 또한, 각 층의 강성 값은 과도한 가분수 형태의 강성분포를 방지하기 위하여 상위 층의 강성이 하위 층보다 크지 않도록 설계제한조건식을 두었다. 설계목표는 상위 수준으로 갈수록 비용은 감소하고, 제어성능은 증가하도록 아래의 식들로 설정하였다. 여기서, i 는 층 수를 의미하며, $i = 1, 2, \dots, n$ 의 범위를 갖는다.

$$[g_{desired}^1]_j = \sum_{i=1}^n k_p^i = (1 - 0.1 \cdot j) \cdot 9 \cdot 50 (MN/m) \quad [g_{desired}^2]_j = \sum_{i=1}^n c_p^i = 0.85^j \cdot 9 \cdot 6.5 (MN \cdot s/m)$$

$$[g_{desired}^3]_j = \sum_{u=1}^{m_u} u_u^m = (1 - \frac{j}{9}) \cdot n \cdot 2000 (kN) \quad [g_{desired}^{j+3}]_j = \max_t \{q_{rel}^i(t)\} = (0.012 - 0.001 \cdot j) \cdot H (= 3m)$$

4.1 최적설계 과정 및 결과

그림 5는 각 단계별 설계목표를 만족하는 최적해들이 갱신되는 최적화 과정을 나타낸다. x축은 유전자 알고리즘에서 최적해를 검색하는 반복회수를 나타내고, y축은 개별적 목적함수 값을 나타낸다. 각 그림들에서 점선은 각 목적함수에 대한 단계별 설계목표 값을, 실선은 최적설계 결과를 의미한다. 최적화 과정 도중에 부분적으로 목표설계를 만족하지 못하는 최적설계 결과를 보이지만, 최적화 과정이 진행됨에 따라 각 단계별 설계목표로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 유전자 알고리즘이 교배, 돌연변이 등의 유전연산에 의하여 보다 진화된 우수한 개체를 효과적으로 검색하고 있음을 알 수 있다.



(a) 복합형 구조제어시스템의 사용량 (b) 층간상대변위(1,2,3층)
그림 5. 각 단계별 설계목표별 최적화과정

표 3. 최적설계결과

| | 1층 | 2층 | 3층 | 4층 | 5층 | 6층 | 7층 | 8층 | 9층 |
|----------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| $k_p (MN/m)$ | 32.75 | 32.62 | 29.68 | 6.05 | 0.90 | 0.82 | 0.05 | 0.02 | 0.00 |
| $c_p (MN \cdot s/m)$ | 1.24 | 5.53 | 1.93 | 0.15 | 1.19 | 5.39 | 1.33 | 0.05 | 0.74 |
| 능동제어기 | ○ | × | × | ○ | ○ | × | × | × | ○ |
| $u_u (kN)$ | 1418 | 0 | 0 | 1272 | 1023 | 0 | 0 | 0 | 289 |

이 연구에서 수행된 최적화 과정은 총 1970회의 반복계산이 소요되었으며, 그 결과 최적 설계된 복합형 구조제어시스템을 표 3에 도시하였다. 능동제어기는 1, 4, 5, 9층에 할당되었으며, 0.42g의 최대 가속도 값을 갖는 설계지진에 대하여, 각각 1418, 1272, 1023, 289ton의 최대 제어력을 발휘하였다. 따라서 1층과 4층에는 1500ton 용량의 능동제어기를, 5층에는 1000ton, 9층에는 300ton용량의 제어시스템을 장착하도록 설계안을 제시할 수 있다.

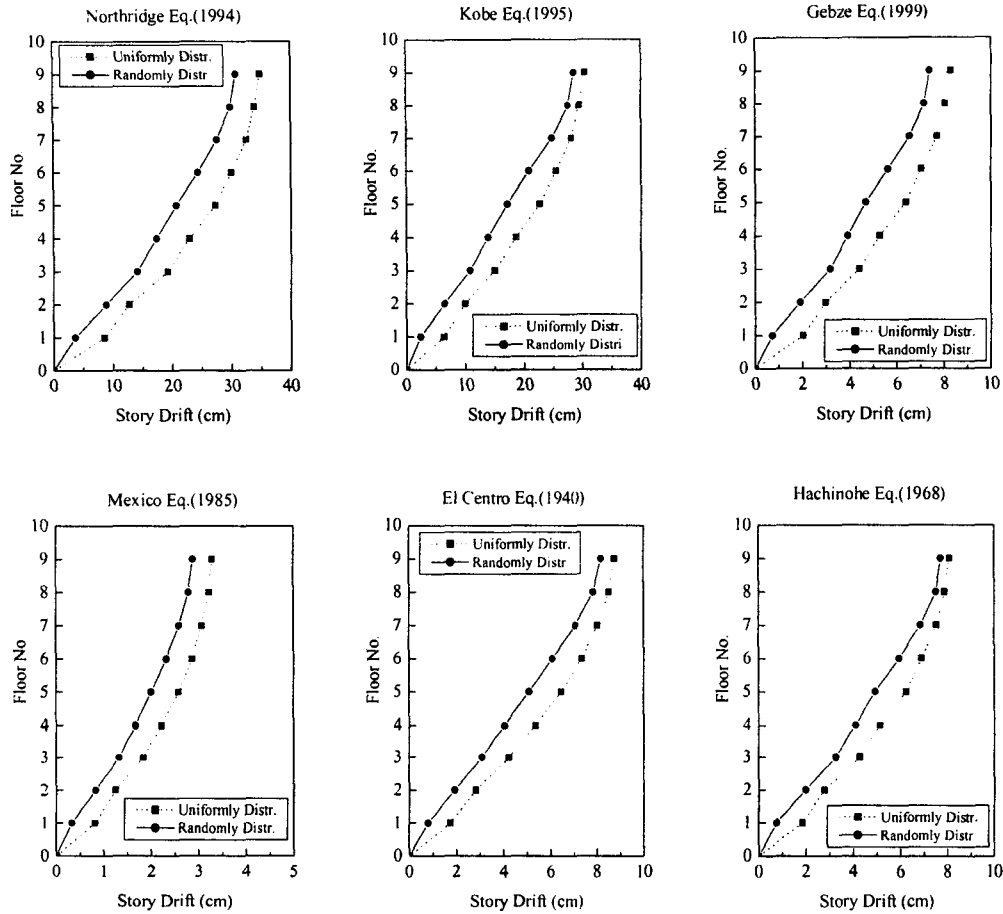


그림 6. 지진별 최대 층간 상대변위

4.2 제어성능 비교

설계된 최적제어시스템의 제진성능을 평가하기 위한 비교예제로서, 동일한 양의 제어시스템을 균등분포한 제어시스템을 고려하였다. 즉, 표 4에서 설계된 강성과 감쇠계수의 총 합을 전 층(1~9층)에 균등하게 분포하여 각 층별 11.43 MN/m의 강성과 1.95MN-s/m의 감쇠계수를 가지며, 능동제어시스템도 2, 4, 6, 8층에 균등하게 배치하였다. 제진성능을 평가하기 위한 지진입력으로는 다양한 주파수 성분과 최대 지진크기 및 지반특성을 갖는 Northridge 지진(1994), Kobe 지진(1995), Gebze 지진(1999), Mexico 지진(1985), El Centro 지진(1940), Hachinohe 지진(1968) 등의 6개 실제 지진기록을 사용하였다. 두 시스템이 발휘하는 최대 층간 상대변위를 각 지진별로 정리하여 그림 6에 제시하였다. 그림 6을 보면, 제시하는 기법에 따라 설계된 제어시스템이 동일한 용량을 사용하면서 위치최적화를 고려하지 않은 시스템과 비교할 때, 층간 상대변위를 보다 효율적으로 저감시키고 있음을 알 수 있다. 각 층에 설치된 최대 능동제어력의 비교결과도 균등하게 분포된 제어시스템보다 입력지진에 따라 최소 4.4~18.3%만큼 적게 사용하는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

내진성능을 향상시키기 위한 구조제어시스템의 설계에 있어서 구조부재, 수동 및 능동 제어시스템을 동시에 고려한 복합구조제어시스템의 용량 및 위치 최적화기법을 연구하였다. 이를 위하여 구조부재의 사용량, 수동 및 능동제어시스템의 용량과 각 층의 층간 상대변위응답의 최대값들에 대한 설계목표를 다단계로 선정하고, 각 단계별 설계목표들을 만족하는 최적의 구조부재와 제어시스템의 용량 및 위치검색을 순차적으로 수행함으로써 보다 합리적인 최적해로 진행해가는 Multi-Stage Goal Programming 기법을 제시하였다. 합리적인 설계목표 결정을 위하여 반복적인 설계가 필요한 Goal Programming과 달리, 제시하는 기법은 설계자에 의하여 미리 선정된 다단계 설계목표를 만족하는 단계별 최적해를 순차적으로 검색하여 상위 수준의 최적해로 근접해 감으로써 적합한 최종 설계목표를 얻기 위한 반복적인 설계절차를 줄일 수 있다. 지진하중을 받는 9층 전단발딩구조물에 대한 설계 예를 통하여 각 단계별 설계목표를 만족하는 최적해의 검색을 효율적으로 진행해 가는 것을 확인하였으며, 최적설계된 복합구조제어시스템과 동일용량을 균등하게 분배한 제어시스템에 대하여 6개의 실제 지진에 대한 제어성능을 비교한 결과, 제시하는 기법은 보다 작은 용량의 제어력에도 불구하고 개선된 제어성능을 발휘함으로써 복합구조 제어시스템의 설계에 효율적으로 적용될 수 있음을 검증하였다.

감사의 글

이 연구는 2003년도 두뇌한국21사업 핵심분야 지원사업 및 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의하여 이루어졌음을 밝히며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Ahlawat, A.S. and Ramaswamy, A., "Multi-objective optimal design of FLC driven hybrid mass damper for seismically excited structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 7, 2002, pp. 1459-1479.
2. Kirk, D.E., "Optimal control theory - an introduction, Prentice Hall", 1970.
3. Kursawe, F., "A Variant of Evolution Strategies for Vector Optimization", In H.-P. Schwefel and R. Mnner(Ed.), *Parallel Problem Solving from Nature, Proceedings of the First Workshop PPSN*, Vol. 496 of Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, Berlin, 1991, pp. 193-197.
4. Li, Q.S., Liu, D.K., Zhang, N., Tam, C.M. and Yang, L.F., "Multi-Level Design Model and Genetic Algorithm for Structural Control System Optimization", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, No. 6, 2001, pp. 927-942.
5. 박관순, 고현무, "복합구조제어시스템의 동시최적설계", *한국지진공학회 논문집*, 제6권, 제5호, 2002, pp. 37-43.