

추계학적 선형화 방법 및 다목적 유전자 알고리즘을 이용한 지진하중을 받는 인접 구조물에 대한 비선형 감쇠시스템의 최적 설계

Optimal design of nonlinear damping system for seismically-excited adjacent structures using multi-objective genetic algorithm integrated with stochastic linearization method

옥승용¹⁾ · 송준호²⁾ · 박관순³⁾ · 고현무⁴⁾

Ok, Seung-Yong · Song, Junho · Park, Kwan-Soon · Koh, Hyun-Moo

국문 요약 >> 인접 구조물의 지진응답 제어를 위한 비선형 감쇠시스템의 최적 설계 방법에 관하여 연구하였다. 최적 설계를 위한 목적 함수로는 구조물의 응답과 감쇠기의 총 사용량을 고려하였으며, 상충하는 두 목적함수를 합리적인 수준에서 동시에 최소화하는 해를 구하기 위하여 유전자 알고리즘에 기반한 다목적 최적화 방법을 도입하였다. 또한, 최적화 과정에서 요구되는 비선형 시간이력해석을 수행하지 않고도, 비선형 이력감쇠기로 연결된 구조물의 지진응답을 효율적으로 평가하기 위하여 추계학적 선형화 방법을 접목하였다. 제시하는 방법의 효율성을 검증하기 위한 수치 예로서 20층과 10층의 인접 빌딩을 고려하였으며, 두 빌딩을 연결하는 비선형 감쇠시스템으로는 입력전압의 크기에 따라 변화하는 감쇠성능을 보이는 MR 감쇠기를 도입하였다. 제시하는 방법을 통하여 MR 감쇠기의 각 층별 최적 개수 및 감쇠용량을 결정할 수 있었으며, 이는 일반적인 균등분포 시스템에 비해 유사한 제어성능을 보이면서도 훨씬 경제적이었다. 또한, 인접구조물간 충돌에 대하여도 확률적으로 안정적인 거동을 보임을 검증하였으며, 제시하는 방법이 준능동 제어시스템의 최적 배치를 결정하기 위한 설계문제에도 적용할 수 있음을 보였다.

주요어 인접구조물, 다목적 최적화 방법, 유전자 알고리즘, 추계학적 선형화 방법, 비선형 이력감쇠기, 지진응답제어

ABSTRACT >> Optimal design method of nonlinear damping system for seismic response control of adjacent structures is studied in this paper. The objective functions of the optimal design are defined by structural response and total amount of the dampers. In order to obtain a solution minimizing two mutually conflicting objective functions simultaneously, multi-objective optimization technique based on genetic algorithm is adopted. In addition, stochastic linearization method is embedded into the multi-objective framework to efficiently estimate the seismic responses of the adjacent structures interconnected by nonlinear hysteretic dampers without performing nonlinear time-history analyses. As a numerical example to demonstrate the effectiveness of the proposed technique, 20-story and 10-story buildings are considered and MR dampers of which hysteretic behaviors vary with the magnitude of the input voltage are considered as nonlinear hysteretic damper interconnecting two adjacent buildings. The proposed approach can provide the optimal number and capacities of the MR dampers, which turned out to be more economical than the uniform distribution system while maintaining similar control performance. The proposed damper system is verified to show more stable performance in terms of the pounding probability between two adjacent buildings. The applicability of the proposed method to the design problem for optimally placing semi-active control system is examined as well.

Key words adjacent structures, multi-objective optimization technique, genetic algorithm, stochastic linearization method, nonlinear hysteretic damper, seismic response control

¹⁾ 공학박사, 박사후 연구원, Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign

²⁾ Assistant Professor, Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign

³⁾ 정회원·동국대학교 건축공학과 조교수
(교신저자: kpark@dongguk.edu)

⁴⁾ 정회원·서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

본 논문에 대한 토의를 2008년 2월 29일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 1. 29 / 심사종료일 : 2007. 6. 5)

1. 서론

현대사회가 발전하면서 경제성이 높은 대도시로 인구가 집중됨에 따라 한정된 도심환경 속에서 건물은 점점 고층화 되어 왔다. 이처럼 구조물이 높아짐에 따라 지진과 같은 극한 하중에 대한 구조물의 횡방향 변위는 더욱 증가하였으며, 이는 밀집된 도심환경과 맞물려 구조물간 충돌(pounding)

을 초래하게 되었다. 실제 지진이 발생한 지역들에서의 인접한 구조물끼리의 충돌로 인한 파괴내지 손상 사례를 옥승용 등⁽¹⁾에서 확인할 수 있다. 이에 인접한 구조물들의 내진 성능을 향상시키기 위한 연구들이 활발히 진행되어 왔으며, 두 건물을 진동제어시스템으로 연결하는 방법이 대표적이라 할 수 있다⁽²⁾. 이와 관련한 연구로는 여러 종류의 감쇠장치에 대한 최적 설계연구와 비선형 감쇠시스템의 확률적 지진응답 평가방법에 대한 연구로 분류할 수 있다. 먼저, 감쇠시스템의 최적설계 연구는 적용되는 감쇠장치의 유형에 따라 보다 상세히 분류할 수 있으며, Christenson 등⁽³⁾에서 잘 정리되어 있다. 이처럼 많은 연구자들에 의하여 다양한 연구들이 이루어졌지만, 그 중에서도 경제성과 안정성의 장점을 가지는 수동형 감쇠시스템에 대한 연구가 가장 활발히 이루어졌다고 할 수 있다. 대표적인 예로 Iwanami 등⁽⁴⁾, Westermo⁽⁵⁾, Gurley 등⁽⁶⁾, Luco와 Wong⁽⁷⁾, Kageyama 등^(8,9), Fukuda 등⁽¹⁰⁾, Kamagata 등⁽¹¹⁾, Luco와 De Barros⁽¹²⁾, Zhang과 Xu⁽¹³⁾ 그리고 Zhu와 Iemura⁽¹⁴⁾에 의하여 수행된 감쇠장치의 최적설계 연구들을 들 수 있다. 그러나 대부분의 연구들은 인접구조물의 연결재로 선형감쇠기를 고려하였으며 비선형 감쇠시스템에 대한 최적설계 연구를 다루지는 않았다. 하지만, Ni 등⁽¹⁵⁾이 지적한 바와 같이, 일반적으로 선형 감쇠기보다는 비선형 이력감쇠기가 불확실한 지진에 대하여 보다 강인한 제어성능을 발휘할 수 있는 장점을 가지며, 아울러 실제 이력감쇠기들의 응답을 보다 정확히 모사하기 위해서는 비선형 감쇠모델을 사용하는 것이 합당하다고 할 수 있다. 이에 비선형 감쇠기에 대한 최적 모델인자를 결정하는 연구들이 몇몇 연구자들에 의하여 최근 수행되기도 하였다⁽¹⁶⁻¹⁸⁾. 이들은 확률적 지반운동에 대한 비선형감쇠기로 연계된 인접구조시스템의 추계학적 응답을 예측하는 방법들을 개발하고, 이를 통하여 비선형 감쇠기의 최적 모델계수들을 제시하고 있다. 그러나 이 연구들에서는 동일한 용량의 감쇠기를 균등하게 설치하는 가정 하에서 감쇠기 모델 변수들에 대한 매개변수연구를 수행하였을 뿐이며, 체계적인 최적화 방법에 따른 감쇠기의 최적 배치 및 감쇠용량에 대한 연구는 아직까지 수행된 바가 없다. 따라서 이 논문에서는 인접구조물의 지진응답 제어를 위한 비선형 감쇠시스템의 최적 설계방법으로서 비선형 감쇠기의 층별 배치 및 용량의 최적화를 포함하는 설계기법을 제시하고자 한다. 옥승용 등⁽¹⁹⁾의 연구결과에서도 확인할 수 있듯이, 층별 감쇠용량의 최적 분포를 결정할 수 있다면 이러한 인접한 구조물의 지진응답을 효과적으로 줄이면서도 훨씬 경제적인 감쇠 시스템을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

최적화 문제를 구성하기 위한 목적함수로는 지진하중에 의한 인접구조물의 최대 층간변위의 RMS (root-mean-square) 값과 감쇠기의 총 설치개수를 고려하였으며, 이들은 어느 하나를 감소시키면 다른 하나가 증가하는 물리량으로서 상충하는 다목적 최적화문제(multi-objective optimization problem)를 구성하게 된다. 기존 최적화기법에서는 목적함수간 가중치를 이용하여 단일 목적함수로 변환하는 가중합 방법(weighted summation approach)을 이용하여 최적해를 검색하는 방법이 일반적이다⁽²⁰⁾. 하지만 대부분의 공학문제에서는 최적화를 수행하기 전에는 목적함수별 합리적인 가중치를 미리 알지 못하는 단점을 가진다. 또한 미리 선정되는 목적함수간 가중치의 값에 따라 최적해가 크게 변할 수 있으므로 합리적인 가중치를 선정하는 것이 쉽지 않기도 하다⁽¹⁹⁾. 이러한 한계를 극복하고자 이 논문에서는 유전자 알고리즘(genetic algorithm, GA)에 기반한 다목적 최적화 방법을 제시하였다. 이는 기존 단일목적함수에 기반한 최적화 방법과 달리, 별도의 가중치를 필요로 하지 않는다. 즉 여러 개의 목적함수들을 벡터 형식으로 정의함으로써 각 목적함수들을 동시에 최소화하도록 한다. 이러한 새로운 개념의 목적함수를 사용함에 따라 다목적 최적화방법은 다수의 Pareto 최적해들을 검색하게 된다. Pareto 최적해는 여러 목적함수들의 관점에서 서로 월등하지 않으며 동시에 우월하지 않는, 즉 최소한 어느 하나 이상의 목적함수에서는 다른 해들보다 우수한 해들을 말한다⁽²¹⁾. 이 논문에서는 다목적 최적화의 방법으로 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)⁽²²⁾을 도입하였다. NSGA에 의하여 검색되는 다수의 Pareto 최적해는 의사결정 과정을 통하여 합리적인 하나의 최적해를 도출하게 된다.

한편, 최적화 과정에서의 목적함수 중 하나인 인접구조물의 지진응답은 비선형 이력감쇠기로 인하여 다양한 지진하중에 대한 수많은 비선형 시간이력해석을 필요로 한다. 이는 최적화 과정에서 매우 많은 계산시간을 요하며 때때로 최적화 자체를 불가능하게 만들기도 한다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 이 연구에서는 추계학적 선형화 방법⁽²³⁾을 NSGA와 접목하였다. 일반적인 비선형 시스템의 시간영역에서의 지진응답 해석과 달리, 추계학적 선형화 방법은 시간영역에서의 반복적 해석을 수행하지 않고도 불확실한 지진에 대한 비선형 구조물의 확률적 응답을 효과적으로 예측할 수 있는 장점을 갖는다.

제시하는 방법의 효율성을 검증하기 위한 예제로 서로 다른 높이를 갖는 두 인접빌딩을 고려하였으며, 이들을 연결하는 비선형 감쇠시스템으로는 고정된 입력전압을 갖는 수

동형 MR 감쇠기를 사용하였다. 설계예에서 인접빌딩간에 설치된 MR 감쇠기 시스템의 최적 배치 및 감쇠용량을 결정하고, 수치모사를 통하여 성능을 평가하였다. 또한, 준능동 MR 감쇠기를 최적설계하고 제어성능을 비교하여 그 결과를 제시하였다.

2. MR 감쇠기로 연결된 인접구조물의 운동방정식

서로 다른 n_1 층과 n_2 층($n_1 > n_2$)을 갖는 인접한 전단빌딩의 운동방정식은 각각 식 (1)과 식 (2)로 표현된다.

$$M_1 \ddot{x}_1(t) + C_1 \dot{x}_1(t) + K_1 x_1(t) = -M_1 \ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

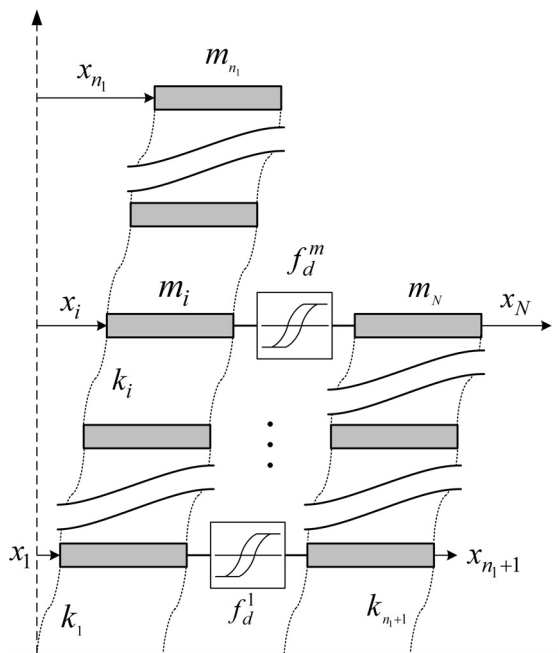
$$M_2 \ddot{x}_2(t) + C_2 \dot{x}_2(t) + K_2 x_2(t) = -M_2 \ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

여기서, M_i , C_i , K_i ($i=1,2$)는 각각 n_i 층 빌딩의 질량, 감쇠 및 강성행렬로서 $n_i \times n_i$ 크기의 정방행렬이다. $\ddot{x}_i(t)$, $\dot{x}_i(t)$, $x_i(t)$ 는 각각 n_i 층 빌딩의 가속도, 속도 및 변위벡터이며, $\ddot{x}_g(t)$ 는 입력 지진 가속도이다.

그림 1과 같이, 인접한 두 빌딩을 비선형 MR 감쇠기로서 연결한 경우 전체 구조시스템은 감쇠력에 의하여 상호 연계(coupled)되며, 이는 식 (3)의 연립방정식으로 표현된다.

$$M \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + K x(t) + F_d(\Delta x, \Delta \dot{x};(t)) = -M \ddot{x}_g(t) \quad (3)$$

여기서, $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{x}(t)$ 는 각각 전체 구조시스템의 변위, 속도 및 가속도 벡터이며, M , C , K 는 전체 구조시스템의



<그림 1> 비선형 MR 감쇠기로 연결된 인접빌딩

질량, 감쇠 및 강성행렬로서 $N \times N$ ($N=n_1+n_2$) 크기를 갖는다. $F_d(\Delta x, \Delta \dot{x};(t))$ 는 $N \times 1$ 크기의 감쇠력 벡터로서, MR 감쇠기의 역학적 모델에 따라 두 인접빌딩의 응답(상대 변위 Δx 또는 상대속도 $\Delta \dot{x}$)에 대한 비선형 함수로서 표현된다.

전체 구조시스템의 변위 $x(t)$ 를 두 빌딩의 변위 $x_1(t)$ 과 $x_2(t)$ 를 결합한 식 (4)로 정의할 때,

$$x(t) = \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

질량, 감쇠 및 강성행렬은 식 (5)~(7)로 정의된다.

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

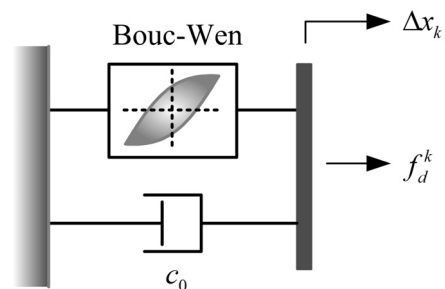
$$K = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

한편, $n_1 > n_2$ 인 경우 감쇠력 벡터 $F_d(\Delta x, \Delta \dot{x};(t))$ 는 작용-반작용의 원리에 의하여 식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$F_d(\Delta x, \Delta \dot{x};(t)) = \begin{bmatrix} -f_d(\Delta x, \Delta \dot{x};(t)) \\ 0 \\ f_d(\Delta x, \Delta \dot{x};(t)) \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, $f_d(\Delta x, \Delta \dot{x};(t))$ 는 $n_2 \times 1$ 크기의 감쇠력 벡터로서, m ($m \leq n_2$)개 층에 감쇠기를 장착한 경우, 각 감쇠력 값은 감쇠기의 역학적 모델로부터 결정되어 설치위치에 상응하는 자유도로 배치되며 감쇠기가 설치되지 않은 위치의 자유도에는 0의 값을 가지게 된다.

감쇠기의 역학적 모델로는 Spencer 등⁽²⁴⁾이 제시한 여러 모델 중에서 그림 2와 같이 선형 점성요소 및 Bouc-Wen 요소⁽²⁵⁾의 병렬 연결모델을 사용하였다. Dyke 등⁽²⁶⁾과 Yi 등⁽²⁷⁾은 이 모델이 일련의 실험을 통하여 넓은 영역에 걸친 주파



<그림 2> MR 감쇠기의 역학적 모델

수 성분의 입력에 대한 MR 감쇠기의 거동을 정확하게 예측할 수 있음을 검증하였다.

그림 2의 감쇠기 모델을 사용하는 경우, 식 (8)의 감쇠력 벡터에서 k 번째 감쇠기의 감쇠력 f_d^k ($k=1,2,\dots,m$)는 식 (9)로 결정된다.

$$f_d^k = c_0 \Delta \dot{x}_k + \alpha y_k \quad (9)$$

여기서, c_0 와 α 는 각각 감쇠력의 탄성 및 비탄성 부분을 나타내는 계수로서 식 (10)과 식 (11)로 표현되는 입력전압 u 의 함수이다. 여기서, c_{0a} , c_{0b} , α_a , α_b 는 감쇠기 용량을 결정하는 상수들이다.

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b} \cdot u \quad (10)$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b \cdot u \quad (11)$$

식 (9)에서 $\Delta \dot{x}_k$ 는 k 번째 감쇠기가 설치된 양 빌딩의 상대속도로서 감쇠기의 설치 위치에 따라 식 (12)의 변환행렬을 이용하여 전체 시스템의 속도벡터 $\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix}$ 로 나타낼 수 있다.

$$\Delta \dot{x}_k = x_2^k - x_1^k = [\dots 0 -1 0 \dots 0 1 0 \dots] \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

또한, y_k 는 k 번째 감쇠기의 비선형 이력거동을 나타내기 위한 내부 변수로서 식 (13)의 비선형 미분방정식을 만족하여야 한다.

$$\dot{y}_k = -\gamma \cdot |\Delta \dot{x}_k| \cdot y_k \cdot |y_k|^{n-1} - \beta \cdot \Delta \dot{x}_k \cdot |y_k|^n + A_d \cdot \Delta \dot{x}_k \quad (13)$$

여기서, 계수 γ , β , A_d 및 n 은 감쇠기 이력형상 및 항복 전후 이력곡선의 기울기변화 등을 결정하는 상수이다.

m 개의 감쇠기에 대한 이력변수 y_k , ($k=1,2,\dots,m$)를 식 (14)의 벡터형식으로 표기할 때,

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} \quad (14)$$

식 (8)의 감쇠력 벡터 f_d 는 감쇠기 양단의 상대속도 $\Delta \dot{x}$ 및 이력변수 y 의 함수 $f_d(\Delta \dot{x}, y; t)$ 가 되며, 식 (12)와 식 (14)의 관계식을 이용하여 식 (15)로 변환된다.

$$f_d = [-\tilde{C}_0 \quad 0_{n_2 \times (n_1 - n_2)} \quad \tilde{C}_0] \dot{x} + \tilde{A} y \quad (15)$$

여기서, \tilde{C}_0 는 $n_2 \times n_2$ 크기의 대각행렬로서 각 대각요소는 감쇠기가 설치된 자유도에 c_0^k 값을, 감쇠기가 설치되지 않은

자유도에는 0의 값을 가진다. $0_{n_2 \times (n_1 - n_2)}$ 는 $n_2 \times (n_1 - n_2)$ 크기의 0 행렬이다. \tilde{A} 는 $n_2 \times m$ 크기의 행렬로서, 만약 k 번째 감쇠기가 j 층에 설치된 경우 j 번째 행과 k 번째 열의 요소 값이 α^k 가 되며 그 외는 모두 0이 된다.

식 (15)를 이용하여 감쇠력 벡터 F_d 는 식 (16)으로 다시 정의되며, 행렬 C_0 및 A 는 각각 식 (17)과 식 (18)로 표현된다.

$$F_d = C_0 \dot{x} + A y \quad (16)$$

$$C_0 = \begin{bmatrix} \tilde{C}_0 & 0_{n_2 \times (n_1 - n_2)} & -\tilde{C}_0 \\ 0_{(n_1 - n_2) \times n_2} & 0_{(n_1 - n_2) \times (n_1 - n_2)} & 0_{(n_1 - n_2) \times n_2} \\ -\tilde{C}_0 & 0_{n_2 \times (n_1 - n_2)} & \tilde{C}_0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} -\tilde{A} \\ 0_{(n_1 - n_2) \times n_2} \\ \tilde{A} \end{bmatrix} \quad (18)$$

식 (16)을 식 (3)에 삽입함으로써 비선형 MR 감쇠기로 연결된 인접빌딩의 최종적인 운동방정식은 식 (19)와 식 (20)이 된다. 이는 감쇠기의 역학적 모델에 의하여 결정되는 감쇠력이 감쇠기 양단의 상대속도뿐만 아니라 추가적인 변수 y 의 함수이기 때문이다.

$$M \ddot{x}(t) + (C + C_0) \dot{x}(t) + Kx(t) + Ay = -M \underline{1} \ddot{x}_g(t) \quad (19)$$

$$g(\Delta \dot{x}, y) = 0 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{y}_k + \gamma \cdot |\Delta \dot{x}_k| \cdot y_k \cdot |y_k|^{n-1} + \beta \cdot \Delta \dot{x}_k \cdot |y_k|^n - A_d \cdot \Delta \dot{x}_k \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (20)$$

3. 추계학적 선형화 방법

서론에서 언급하였듯이, 시간영역에서의 비선형 감쇠기-인접빌딩 시스템의 지진응답해석은 감쇠기의 비선형성으로 인하여 많은 계산시간을 요하므로 현실적이지 못한 방법이 된다. 특히, 지진하중의 높은 불확실성으로 인하여 시간영역 해석방법에서는 수많은 인공지진하중의 생성을 요하므로, 계산시간은 기하급수적으로 늘어나게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 이 연구에서는 시간영역에서의 반복적 비선형해석을 필요로 하지 않으면서 확률적 지진운동에 대한 비선형 시스템의 평균응답을 예측할 수 있는 추계학적 선형화 방법(stochastic linearization method)⁽²³⁾을 도입하였다.

이는 비선형 시스템과의 응답오차를 평균적으로 최소화 하는 등가의 선형시스템을 구현하는 방법이다. 임의의 지진입력이 평균 0의 정상상태 Gaussian 과정(zero-mean stationary Gaussian process)을 따르고 구조물의 응답도 Gaussian 과정에 근접할 때, 식 (20)의 비선형 시스템에 대한 등가의 선

형시스템은 식 (21)로 표현될 수 있다⁽²⁸⁾. 따라서 식 (20)의 감쇠기에 대한 비선형 미분방정식은 식 (21)의 등가의 선형 미분방정식으로 대체된다.

$$\dot{y} + C_d^{eq} \Delta \dot{x} + K_d^{eq} y = 0 \quad (21)$$

여기서, 등가선형 행렬 C_d^{eq} 와 K_d^{eq} 의 k 번째 대각 요소는 각각 식 (22)와 식 (23)에 의하여 구할 수 있다⁽²⁸⁾.

$$c_k^{eq} = E \left[\frac{\partial g_k}{\partial \Delta x_k} \right] \quad (22)$$

$$k_k^{eq} = E \left[\frac{\partial g_k}{\partial y_k} \right] \quad (23)$$

여기서, $E[\cdot]$ 는 대상 물리량의 확률적 평균값(expectation)이며, g_k 는 $g(\Delta x, y)$ 의 k 번째 비선형 미분방정식을 나타낸다.

Bouc-Wen 이력모델에서 $n = 1$ 이라면, k 번째 감쇠기의 등가계수는 각각 식 (24)와 식 (25)로 결정된다⁽²⁸⁾.

$$c_k^{eq} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \times \left[\gamma \cdot \frac{E(\Delta \dot{x}_k y_k)}{\sigma_{\Delta \dot{x}_k}} \right] - A_d \quad (24)$$

$$k_k^{eq} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \times \left[\gamma \cdot \sigma_{\Delta \dot{x}_k} + \beta \cdot \frac{E(\Delta \dot{x}_k y_k)}{\sigma_{y_k}} \right] \quad (25)$$

여기서, $\sigma_{\Delta \dot{x}_k}$ 와 σ_{y_k} 는 각각 감쇠기 응답 $\Delta \dot{x}_k$ 와 y_k 의 표준편차로서 각 응답의 2차 모멘트인 분산의 제곱근이 되며, $E(\Delta \dot{x}_k y_k)$ 는 두 응답의 2차 모멘트를 나타낸다.

따라서 비선형 MR 감쇠기의 등가 계수 c_k^{eq} 와 k_k^{eq} 는 각각 감쇠기 양단의 상대속도 $\Delta \dot{x}_k$ 및 이력변수 y_k 응답의 2차 모멘트로부터 구할 수 있다. 이러한 응답의 2차 모멘트는 Lyapunov 방정식의 해인 공분산행렬(covariance matrix)의 요소에 상응한다. 그러므로 Lyapunov 방정식의 해로부터 비선형 감쇠기의 등가선형모델을 얻을 수 있다.

Lyapunov 방정식을 유도하기 위해서는 상태공간방정식(state space equation)을 필요로 한다. 이를 위하여 식 (26)의 상태벡터 z 를 도입하면,

$$z = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_1 \\ x_2 \\ y \end{bmatrix} \quad (26)$$

식 (19)와 식 (21)로 표현되는 전체 시스템의 운동방정식은 식 (27)의 상태공간방정식으로 변환된다.

$$\dot{z} = A_s z + B_w \ddot{x}_g \quad (27)$$

여기서, A_s 와 B_w 는 각각 시스템 행렬과 외부입력 행렬로서 식 (28)로 정의된다.

$$A_s = \begin{bmatrix} 0_{N \times N} & I_{N \times N} & 0_{N \times m} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}(C + C_0) & -M^{-1}A \\ 0_{m \times N} & -C_d^{eq} & -K_d^{eq} \end{bmatrix}$$

$$B_w = \begin{bmatrix} 0_{N \times 1} \\ -I_{N \times 1} \\ 0_{m \times 1} \end{bmatrix} \quad (28)$$

확률적 입력지진 모델은 식 (29)의 Kanai-Tajimi power spectral density 함수를 사용하여 구성하였다^{(29),(30)}.

$$\Phi_{x_g x_g}(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2 \cdot \omega_g^2 \cdot \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \Phi_0 \quad (29)$$

여기서, ω_g , ζ_g 및 Φ_0 는 각각 입력지진 power spectral density의 주파수(dominant frequency), 밴드 폭(bandwidth) 및 세기(intensity)를 나타낸다.

식 (29)의 Kanai-Tajimi 입력지진 모델은 기저(base)에 대한 지반운동의 상대변위 x_g^r 에 대한 2차 상미분 방정식에 상응한다.

$$\ddot{x}_g^r(t) + 2\zeta_g \omega_g \dot{x}_g^r(t) + \omega_g^2 x_g^r(t) = w(t) \quad (30)$$

여기서, $w(t)$ 는 세기 Φ_0 를 갖는 백색잡음(white noise)이다.

따라서 지반운동에 대한 상태공간방정식은 식 (31)로, 절대 지반가속도 \ddot{x}_g 는 식 (32)로 정의된다.

$$\dot{x}_g = \begin{bmatrix} x_g^r \\ \dot{x}_g^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_g^2 & -2\zeta_g \omega_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_g^r \\ \dot{x}_g^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w = A_g x_g + B_g w \quad (31)$$

$$\ddot{x}_g(t) = \ddot{x}_g^r - w = \begin{bmatrix} -\omega_g^2 & -2\zeta_g \omega_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_g^r \\ \dot{x}_g^r \end{bmatrix} = C_g x_g \quad (32)$$

따라서 식 (32)를 식 (27)에 대입하고 식 (31)을 추가함으로써 식 (33)과 같은 상태공간방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{z}_{aug} = \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{x}_g^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_s & B_w C_g \\ 0 & A_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ x_g^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_g \end{bmatrix} w = A_{aug} z_{aug} + B_{aug} w \quad (33)$$

따라서 식 (33)의 상태공간방정식에서 상태벡터 z_{aug} 에 대한 공분산행렬 S 를 $S = E[z_{aug} \cdot z_{aug}^T]$ 라 할 때, 식 (34)의 Lyapunov 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{S} = A_{aug} S + S A_{aug}^T + B \quad (34)$$

여기서, 행렬 B는 지반운동에 상응하는 마지막 대각요소 $B_{ii} = 2\pi \cdot \Phi_0$ 를 제외하고는 모두 0의 값을 갖는 행렬이다⁽³¹⁾⁽³²⁾. 따라서 행렬 A_{aug} 와 B는 각각 식 (35)와 식 (36)으로 정의된다.

$$A_{aug} = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}(C+C_0) & -M^{-1}A \\ 0 & -C_d^{eq} & -K_h^{eq} \\ & 0 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -\omega_g^2 & -2\zeta_g\omega_g \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times m} \\ 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times m} \\ 0_{m \times N} & 0_{m \times N} & 0_{m \times m} \\ & 0_{2 \times (2N+m)} & \begin{bmatrix} 0_{N \times 2} \\ 0_{N \times 2} \\ 0_{N \times 2} \\ 0 \\ 2\pi \cdot \Phi_0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (36)$$

또한, 정상상태 응답에 대하여 공분산 행렬은 시간에 대하여 상수행렬이 되므로, 식 (34)의 공분산 행렬식은 식 (37)의 Algebraic Lyapunov 방정식이 된다.

$$A_{aug}S + SA_{aug}^T + B = 0 \quad (37)$$

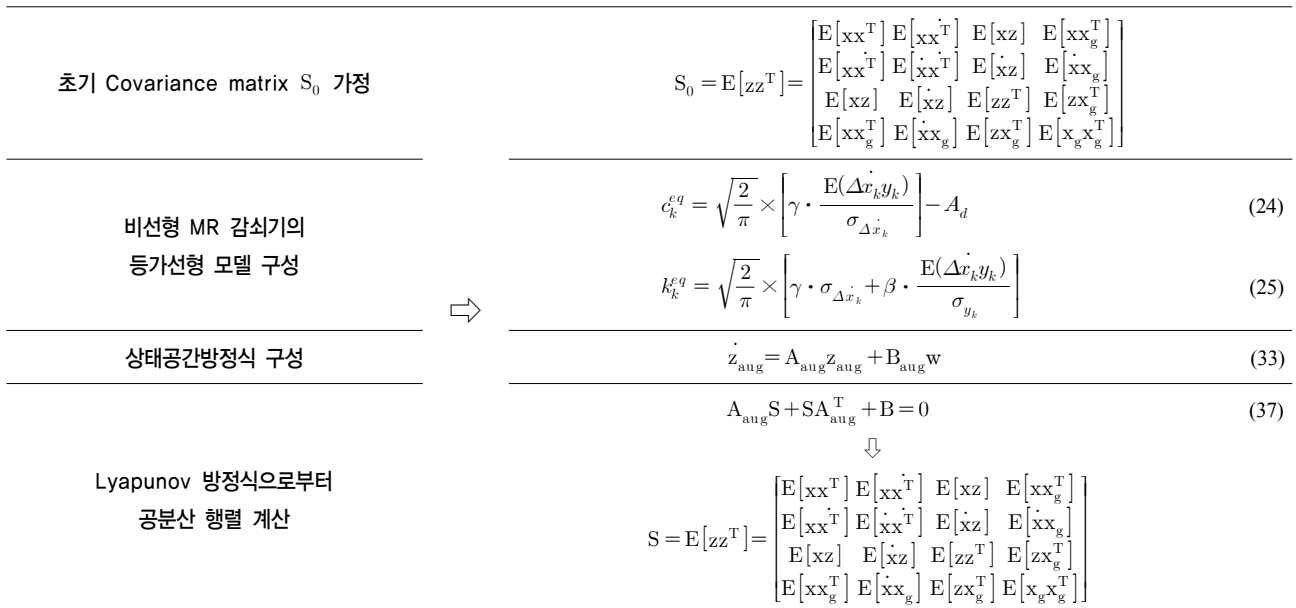
이 방정식의 해 공분산 행렬 S는 Bartels와 Stewart⁽³³⁾가 제시한 방법에 의하여 얻을 수 있다. 얻어진 공분산 행렬의 각 요소는 상태벡터 x_{aug} 를 구성하는 각 응답들의 2차 모멘트에 해당한다. 따라서 비선형 MR 감쇠기가 장착된 시스템의 추계학적 선형화 방법은 그림 3의 Flowchart로부터 설명될 수 있다.

먼저, 초기 공분산 행렬 S_0 을 가정한다. S_0 행렬의 각 요소는 응답의 2차 모멘트 값을 나타내므로 설치된 MR 감쇠기에 대한 응답의 2차 모멘트 값을 식 (24)와 식 (25)에 대입함으로써 등가선형 모델을 얻을 수 있다. 다음으로, 선형

화된 MR 감쇠기 모델을 이용하여 식 (33)의 상태공간방정식을 구성할 수 있으며, 이로부터 식 (37)의 Lyapunov 방정식에 대한 해인 공분산 행렬을 새로이 계산할 수 있다. 공분산 행렬을 구하기 위하여 이용된 비선형 MR 감쇠기의 등가선형 모델이 응답의 2차 모멘트의 함수이므로, 새롭게 얻어지는 공분산 행렬도 응답의 2차 모멘트의 함수가 된다. 따라서 전 단계의 공분산 행렬과 새롭게 구해진 공분산 행렬은 매 순간 달라지며 두 행렬이 수렴할 때까지 일련의 과정을 반복하게 된다. 최종적으로 수렴되는 공분산 행렬로부터 응답의 2차 모멘트 값, 즉 RMS 응답을 얻을 수 있으며, 이는 다음 단계의 최적화기법에서 정의되는 2가지 목적함수 중 하나인 구조물의 최대 층간 변위응답을 산정하는 데 이용된다. 따라서 추계학적 선형화 방법을 통하여 비선형 이력거동을 보이는 감쇠기가 장착된 구조물의 평균 응답을 무수히 많은 시간이력해석을 수행하지 않고서도 예측할 수 있으며 최적화 방법과 접목함으로써 효율적인 최적 해를 구할 수 있게 된다.

4. 다목적 유전자 알고리즘

인접빌딩을 연결하는 감쇠기를 최적 설계하기 위해서는 감쇠기의 성능 측면과 감쇠기 사용에 대한 경제성 측면을 동시에 고려하여야 한다. 따라서 목적함수로는 인접빌딩의 최대 응답과 감쇠기의 전체 사용량을 고려할 수 있다. 대부분의 최적화문제와 같이, 감쇠기의 성능과 감쇠기의 사용량은 서로 상충하는 물리량이다. 즉, 감쇠기의 사용량을 줄이는 것은 구조물 응답을 증가시키는 결과를 초래할 것이며,



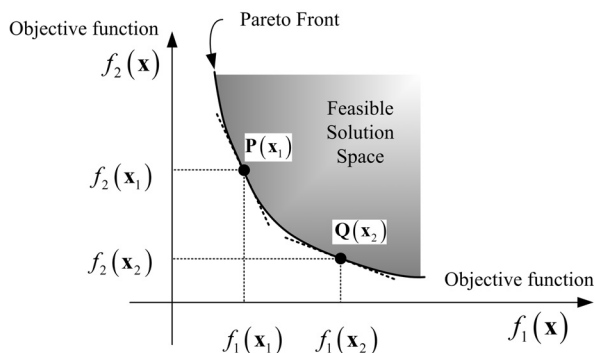
〈그림 3〉 추계학적 선형화 방법

반대로 구조물의 응답을 더욱 줄이기 위해서는 감쇠기의 사용량이 증가할 것이다. 기존 최적화기법에서는 이러한 다중 목적함수를 적절하게 선정된 가중치를 이용하여 하나의 목적함수로 변환하여 최적해를 검색한다⁽¹⁹⁾. 그러나 대부분의 공학문제에서는 최적화를 수행하기 전에는 목적함수별 합리적인 가중치를 미리 알기 힘들다. 따라서 가중치에 대한 매개변수 연구를 통하여 목적함수의 변화양상 또는 민감도를 파악한 후, 이들로부터 설계자의 공학적 지식이나 경험 등의 주관적 판단에 의하여 합리적인 가중치 및 최적해를 결정하는 것이 일반적이다. 하지만 이러한 단일 목적함수를 통한 최적화기법은 모든 가중치에 대한 최적화 결과를 얻을 수는 없으므로, 제한적인 범위 내의 가중치에 대한 최적화 결과만을 얻을 뿐이며, 이러한 제한된 결과로부터 의사결정(decision making)을 하게 된다. 게다가 이 연구에서는 구조물의 응답이 연속적인 물리량(continuous quantity)인데 반해 감쇠기의 설치개수는 이산적인 수(discrete number)이므로, 단일 목적함수를 구성하기 위한 가중치의 결정은 더욱 쉽지 않다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 GA에 기반한 다목적 최적화기법⁽²¹⁾을 도입하였다. 이는 목적함수 값 자체를 벡터(vector) 형식으로 표기함으로써 별도의 가중치를 필요로 하지 않는다. 이 연구에서 다루는 인접빌딩의 경우 식 (38)과 같이 목적함수를 정의할 수 있다.

$$\text{Minimize } \left[\max \{d_i\}, (i = 1, 2, \dots, N) \right] \quad (38)$$

여기서, d_i 는 $i-1$ 층과 i 층 사이의 상대변위에 대한 RMS 값이며 N_d 는 설치된 감쇠기의 총 개수이다.

다목적 최적화 기법은 벡터 형식을 통하여 각 목적함수 값을 개별적으로 인지하므로, 검색되는 각 해들은 그림 4와 같이 목적함수 공간에서 하나의 점으로 표현될 수 있다. 목적함수를 최소화하는 최적화 문제에서 빗금 친 영역(shaded area)을 실현가능한 해 영역(feasible solution space)이라



〈그림 4〉 다목적함수 공간 및 Pareto 최적해

할 때 최적화 기법을 통하여 검색되는 각 해들은 빗금 친 영역 내에 분포된다. 이들은 경계로부터 멀어질수록 목적함수 값들이 증가하므로 열등한 해가 되며, 경계(Pareto front)에 분포하는 점들은 목적함수 값들이 서로 상충하므로 모두 우수한 해라 할 수 있다. 예를 들어, 그림 4에서 두 점 x_1 과 x_2 의 목적함수 값은 식 (39)의 관계를 만족한다. 점 x_1 은 목적함수 f_1 에 대해서는 점 x_2 보다 작은 목적함수 값을 가지므로 우수한 점이 되지만, 목적함수 f_2 에 대해서는 열등한 점이 된다.

$$f_1(x_1) < f_1(x_2) \quad \& \quad f_2(x_1) > f_2(x_2) \quad (39)$$

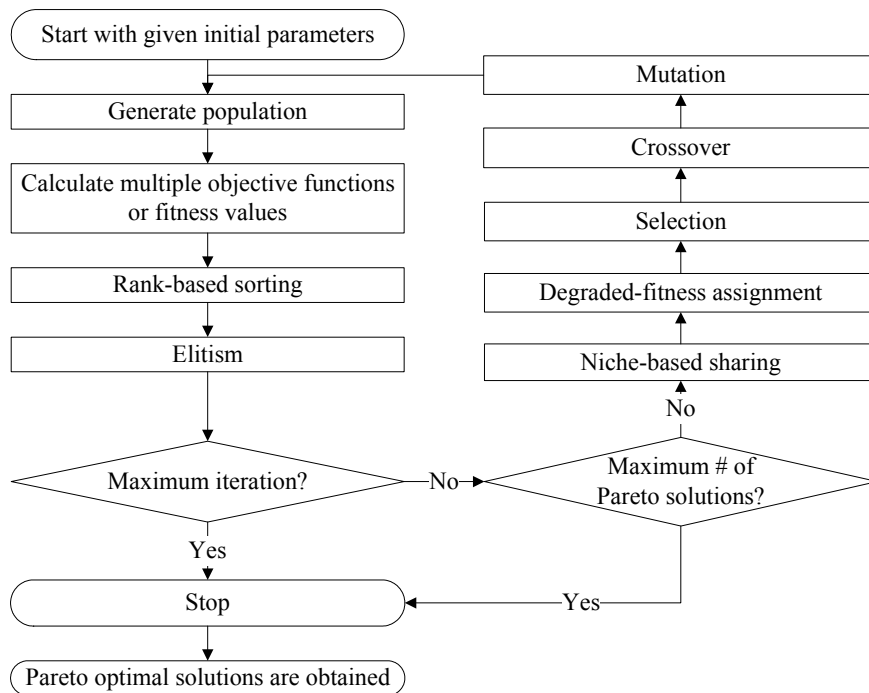
따라서 경계에 존재하는 점들끼리는 어느 하나가 절대적으로 우수한 점이라 할 수 없으므로 모두 최적해가 되며, 이들을 Pareto 최적해(Pareto optimal solution, non-dominated optimal solution, non-inferior optimal solution)라 한다.

기존의 단일 최적화 기법은 이러한 Pareto 최적해 중에서 미리 선정된 목적 함수간의 가중치에 의하여 결정되는 하나의 해를 최적해로서 결정할 뿐이다. 이와는 달리, 다목적 최적화 기법에서는 모든 Pareto 최적해를 검색한다.

Pareto 최적해를 구하기 위하여 Goldberg⁽²¹⁾는 non-dominated sorting 및 sharing 기법에 대한 개념을 제시하였으며, Srinivas와 Deb⁽²²⁾은 이를 보다 발전시켜 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)을 제시하였다. 이는 전체적으로 기존 GA와 동일한 과정을 따르지만, 단일 최적해가 아닌 Pareto 최적해 집합을 구하는 것이 목적이므로 목적함수를 다루는 과정에서 Rank-based Sorting과 Niche-based Sharing 기법을 추가적으로 필요로 한다. 이러한 다목적함수를 다루는 NSGA의 구체적인 Flowchart를 그림 5에 나타내었다.

NSGA도 기본적으로 전형적인 유전자알고리즘과 동일한 과정을 따르므로, 먼저 여러 개의 개체(individual)를 생성함으로써 이의 집합체인 개체군(population)을 구성하게 되며, 이를 하나의 세대(generation)라 한다. 각 개체는 설계변수들의 집합체로서 식 (40)과 같이 이진코드(binary code)로 변환하여 순차적으로 연결함으로써 하나의 염색체(chromosome)로 표현된다.

1st chromosome	11010101...0010101101010111...11010011	(40)
⋮	⋮	
i-th chromosome	01100100...1101010101101000...01000110	
⋮	⋮	
N_d -th chromosome	10110110...101110101001110...00011010	

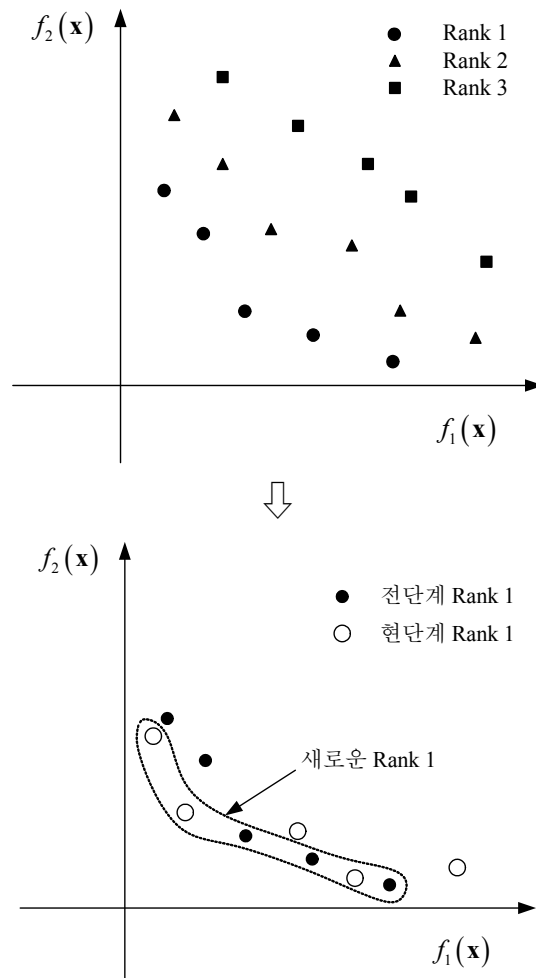


〈그림 5〉 NSGA의 Flowchart

예를 들어 1층부터 10층까지 설치되는 MR 감쇠기의 층별 개수 및 각 감쇠기의 입력전압을 설계변수로 사용하는 경우, 식 (40)에서 n_d^i 와 u_i 는 각각 i 층($i=1,2,\dots,10$)에 설치된 MR 감쇠기의 개수와 입력전압을 의미한다. N_g 는 한 세대를 이루는 개체의 총 개수이다.

다음 단계로서, NSGA는 이진수로 부호화된 각 개체를 해독(decoding)하여 식 (38)의 목적함수 값 또는 적합도(fitness)를 판별한다. 그림 5에서 알 수 있듯이, NSGA는 적합도를 평가한 후 Rank-based Sorting을 진행한다. Rank-based Sorting 기법은 전 단계에서 평가된 각 개체들의 적합도(또는 목적함수)로부터 개체들간의 지배여부(non-dominance)에 따른 순위(rank)를 그림 6과 같이 순차적으로 결정하는 과정이다. 그림 6에서 알 수 있듯이, 첫 번째 순위(Rank 1)로 평가된 개체들은 우수한 개체이므로 Elitism 과정에서 살아남으며, 이들은 다음 세대에서의 우수개체(Rank 1)들과 비교됨으로써 매 순간 새로이 업데이트된다.

이러한 과정을 통하여 특정 세대에서의 우수한 개체들을 저장한 후에는 유전적 진화과정을 모사하기 위하여 새로운 세대를 구성하는 반복과정이 필요하게 된다. 이 단계에서는 검색되는 Pareto 최적해들이 특정 구역으로 집중되지 않고 목적함수 공간에서 다양하게 분포되어 검색될 수 있도록 하는 방법이 요구되며, 이를 Niche-based sharing 기법이라 한다. 이를 위하여 Srinivas와 Deb⁽²²⁾은 식 (41)의 Sharing 함수를 정의하였다.



〈그림 6〉 Rank-based Sorting 기법과 Elitism 과정

$$F_{sh}(r_{ij}) = \begin{cases} 1 - (\frac{r_{ij}}{r_{sh}})^2 & r_{ij} \leq r_{sh} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (41)$$

여기서, r_{sh} 는 niche 반지름으로서 설계자에 의하여 미리 설정된다. r_{ij} 는 i 번째 개체와 j 번째 개체간 거리이다.

식 (41)로 알 수 있듯이, Sharing 함수는 niche 반지름 내에 존재하는 각 Pareto 최적해들의 인접한 정도를 의미한다. 따라서 Sharing 함수를 이용하여 i 번째 개체의 밀집도를 정의할 수 있으며, 이는 식 (42)로 정의된다.

$$m_i = \sum_{j \in population} F_{sh}(r_{ij}) \quad (42)$$

여기서, m_i 는 i 번째 개체의 밀집도를 나타내는 수로서 niche 수라 명명한다.

이렇게 산정된 각 개체의 niche 수는 앞서 산정된 각 개체의 목적함수(또는 적합도)를 저하시키는 계수로서 이용된다. 따라서 밀집정도가 높은 개체일 수록 상대적으로 저하된 적합도(degraded fitness)를 새로이 얻게 된다. 그러므로 Niche-based Sharing 기법은 밀집되지 않은 Pareto 최적해들이 상대적으로 우수한 적합도를 갖도록 하며 이를 통하여 검색되는 최적해들이 목적함수 공간에서 다양하게 분포되도록 유도한다.

이렇게 산정된 새로운 적합도에 따라 기존 GA에서와 동일한 방식으로, 선택(selection), 교배(crossover) 및 돌연변이(mutation) 과정을 통하여 새로운 개체를 생성함으로써 다음 세대를 반복적으로 구성하게 된다. 선택 과정은 적합도 값에 기반하여 다음 세대의 부모(parents) 개체를 선택한다. 이 연구에서는 높은 적합도를 가진 개체가 높은 확률로서 선택되는 룰렛휠 (Roulette Wheel) 선택방법을 사용하였다. 교배 과정은 선택된 부모 개체(우수한 개체)들을 서로 교배함으로써 자식(offsprings) 개체를 생성한다. 이는 우수한 부모 개체로부터 우수한 자식 개체가 나올 확률이 높다는 개념을 모사한다. 이 연구에서는 2점 교배(two-point crossover) 방식을 사용하였다. 이는 일정한 교배확률(crossover probability)에 따라 부모 개체의 교배 점을 2개 선택하고 선택된 교배점 사이의 유전인자를 교환하는 방식이다. 다음으로, 돌연변이 과정은 돌연변이 확률(mutation probability)에 의거하여 부모 개체의 특정 유전인자를 변종시킴으로써 불특정으로 우수한 개체를 검색하는 방식이다. 이러한 유전자 연산(genetic operation)을 통하여 세대가 진행될수록 개체들은 우수한 개체로 진화해 간다. 이러한 일련의 연산은 최대 반복횟수에 도달하든지 또는 Pareto 최적해의 최대개수를 검색함으로써 종료된다.

5. 수치 예제

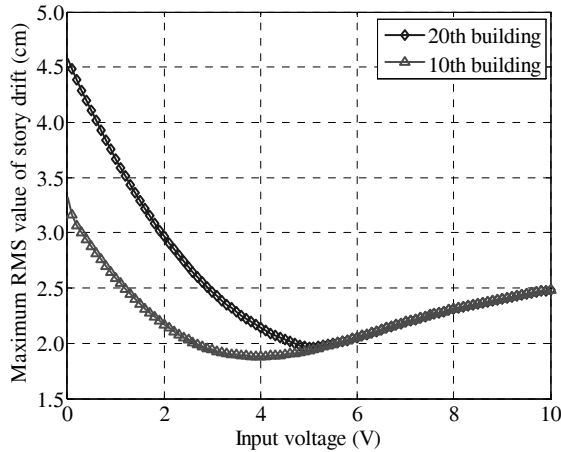
제시하는 다목적 최적화방법의 효율성을 검증하기 위한 예제로 10층 및 20층 전단빌딩을 고려하였다. 두 빌딩의 층별 질량은 800(ton), 층간 강성은 1.4×10^9 (kN/m)으로 모두 동일하며, 각 모드별 감쇠비는 2%로 가정하였다. 20층 빌딩의 초기 7개 모드에 대한 고유 주파수는 각각 0.51, 1.52, 2.54, 3.53, 4.50, 5.45, 6.36Hz이고, 10층 빌딩의 초기 4개 모드의 고유 주파수는 각각 1.00, 2.96, 4.86, 6.66Hz이다. 적용 감쇠기로는 용량 1000kN의 MR 감쇠기를 고려하였으며, 이에 대한 계수 값은 Yoshida와 Dyke⁽³⁴⁾가 제시한 표 1을 따른다. 지반 운동을 나타내는 Kanai-Tajimi 모델의 계수 값으로는 주파수 $\omega_g = 5\pi$ (rad/sec), 지반감쇠 $\zeta_g = 0.6$, 그리고 세기 $\phi_0 = 0.0871m^2/s^3$ 을 사용하였다.

5.1 MR 감쇠기 시스템의 위치별 개수 및 입력전압의 최적 설계

먼저 동일한 개수의 MR 감쇠기를 전 층(1~10층)에 설치한 후 입력전압의 분포만을 달리하는 균등분포 시스템(uniform distribution system, UDS)의 지진응답 제어성능을 평가하였다. 감쇠기는 모든 층에 5개씩 설치하였으며 모든 감쇠기가 동일한 입력전압을 가지도록 하였다. 따라서 입력전압을 변화시켜 가면서 주계학적 선형화 방법을 통하여 MR 감쇠기의 선형화 모델을 구하고, 이로부터 인접빌딩의 층별 RMS 응답을 계산하였다. 입력전압의 변화에 따른 최대 층간변위의 RMS 값을 산정하는 매개변수결과를 그림 7에 도시하였다. 그림 7에서 마커 ‘◇’ 및 ‘△’로 표현되는 결과들은 각각 MR 감쇠기의 입력전압별 20층과 10층 구조물의 최대 층간 상대변위 응답을 나타낸다. 그림 7로부터 각 구조물에 대한 최적 입력전압 값은 다른 것을 알 수 있으며, 각각의 최적 입력전압은 20층에 대하여 5.1V, 10층에 대하여 3.9V로 결정되었다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 20층에 대한 최

〈표 1〉 최대용량 1000kN의 MR 감쇠기모델

계수	값
γ	$3(cm^{-1})$
β	$3(cm^{-1})$
A_d	1.2
n	1
c_{0a}	$4.40(N \times s/cm)$
c_{0b}	$44.0(N \times s/cm/V)$
α_a	$1.0872 \times 10^5(N/cm)$
α_b	$4.9616 \times 10^5(N/cm/V)$

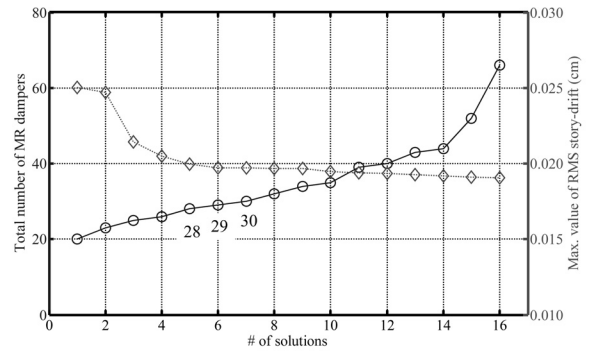


〈그림 7〉 20층 및 10층 구조물에 대한 입력전압별 MR 감쇠시스템의 제어성능

적 입력전압 5.1V를 적용하는 경우와 비교할 때, 10층에 대한 최적 입력전압 3.9V를 적용하는 경우에는 10층 빌딩의 층간 상대변위를 최소화하는 양보다 상대적으로 큰 폭으로 20층 빌딩의 응답이 증가하게 된다. 따라서 최대 응답의 관점에서 5.1V의 입력전압이 대상 구조물에 대한 최적 값을 알 수 있다. 이처럼 인접빌딩의 응답제어문제는 최적 감쇠 용량이 존재하고 있으며, 유사한 결과를 기존 연구들에서도 찾아볼 수 있다^{(8),(9),(11-13),(16)}.

균등분포 시스템은 모든 층에 동일한 개수의 감쇠기를 설치하고 또한 모든 감쇠기가 동일한 입력전압을 사용한다는 가정을 도입하였다. 하지만 보다 최적인 감쇠시스템을 구하기 위해서는 층별 감쇠기의 개수 및 입력전압을 모두 달리 하는 경우를 고려하여야 할 것이다. 따라서 감쇠기의 층별 개수 및 입력전압을 모두 설계변수로 하는 최적화 문제를 구성하고, 이 연구에서 제시하고자 하는 다목적 최적화 방법을 적용하여 최적 시스템을 설계하였다. 다목적 최적화 방법을 통하여 검색된 다수의 Pareto 최적해를 각 목적함수 별로 그림 8에 도시하였다.

그림 8은 다목적 최적화 과정을 통하여 얻어진 Pareto 최적해들의 각 목적함수 값, 즉 감쇠기의 개수 및 최소화된 층간 상대변위의 최대값을 도시한 결과이다. 수평축은 각 Pareto 최적해별 index이며, 좌측의 수직축은 감쇠기의 총 사용량을, 우측의 수직축은 층간상대변위(story drift)의 r.m.s 응답 중 최대 값을 나타낸다. 그림 8로부터 감쇠시스템의 성능과 비용을 나타내는 두 목적함수 사이에 명확한 상충관계가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 감쇠기의 사용 개수를 늘릴수록 구조물의 응답은 감소하고 있으며 반대로 감쇠기의 사용량이 작아질수록 구조물의 응답은 늘어나고 있다. 그림 8에서 주목할 점은 두 목적함수의 변화가 특정 영역을



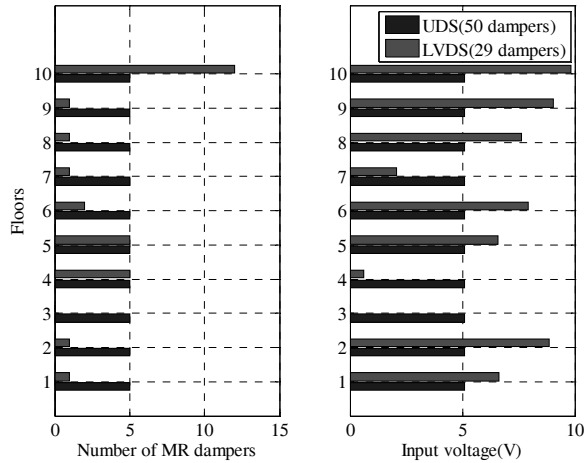
〈그림 8〉 목적함수공간 및 Pareto 최적해

기점으로 다른 양상을 보인다는 점이다. 즉, 감쇠기의 사용을 28 또는 29개 이상을 사용하더라도 구조물의 응답감소는 크게 개선되지 않는 반면, 그보다 작은 개수의 감쇠기를 사용하는 경우에는 구조물의 응답 증가가 보다 큰 폭으로 변화하고 있다. 따라서 설계자의 입장에서는 28개 또는 29개의 MR 감쇠기를 사용하는 경우를 최적 설계안으로 결정할 수 있다. 이 연구에서는 29개의 감쇠기 사용을 최적 설계안 안으로 결정하였다. 이는 감쇠기를 50개 사용하는 경우와 비교해서 감쇠기를 20여 개 정도를 줄이더라도 응답의 증가 폭이 크지 않은 반면 경제적인 측면에서 많은 비용을 줄일 수 있기 때문이다. 이처럼 다목적 최적화 방법은 Pareto 최적해를 통하여 의사결정(decision-making) 과정에 대한 합리적인 근거를 제시해줄 수 있다.

그림 9는 제시한 방법에 따라 29개 MR 감쇠기를 최적 배치한 감쇠시스템(location and voltage distribution system, LVDS)과 50개의 MR 감쇠기를 균등 분포한 감쇠시스템(UDS)의 층별 설치개수, 입력전압의 분포를 비교하여 나타낸 결과이다. LVDS의 분포를 살펴보면, 3층에는 감쇠기가 설치되지 않았으며 1층과 2층 및 7~9층에도 1개의 감쇠기만 배치된 반면, 10층에는 12개의 감쇠기가 배치되었다. 이러한 결과로부터 1~3층의 저층부와 7~9층의 중상층부에 설치되는 감쇠기는 구조물 응답저감에의 기여도가 매우 낮으며, 10층에 설치되는 감쇠기가 응답저감에 기여하는 정도가 매우 높다는 사실을 알 수 있다. Ni 등⁽¹⁵⁾이 제시한 매개변수 연구에서도 상층부에 설치되는 감쇠기의 응답저감 효과가 다른 층에 설치되는 감쇠기들보다 높게 평가되는 유사한 결과를 확인할 수 있다.

5.2 인접한 구조물의 충돌에 대한 성능평가

인접한 구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 구조물 자체의 층간상대변위뿐만 아니라 구조물간 상대거리도 일정 수준 이내로 유지되어야 한다. 여기서는 구조물간 충돌에



〈그림 9〉 MR 감쇠기의 개수 및 입력전압의 최적분포

대한 감쇠시스템의 성능을 평가하였다. 인접한 구조물이 충돌할 확률은 최초통과확률문제(first-passage probability problem)로서 표현될 수 있다. 평균 0의 확률과정(zero-mean stochastic process) $X(t)$ 이 시간 τ 동안 크기 a (threshold)를 초과할 확률은 VanMarcke^{(35),(36)}가 제시한 식 (43)으로부터 계산될 수 있다.

$$p(a;\tau) \cong 1 - B \cdot \exp\left[-\int_0^\tau \eta(a;t) dt\right] \quad (43)$$

한편, 추계학적 선형화 방법에서 감쇠기의 선형화 모델을 유도하기 위하여 도입한 가정(확률과정 $X(t)$ 가 평균 0의 정상상태 Gaussian 과정을 따른다)에 따라, 식 (43)의 각 계수들은 식 (44)와 식 (45)에 의하여 산정된다.

$$B = 1 - e^{(-r^2/2)} \quad (44)$$

$$\eta(a) = \nu(a) \left[\frac{1 - e^{(-\sqrt{\frac{\pi}{2}} \delta^{1.2} r)}}{B} \right] \quad (45)$$

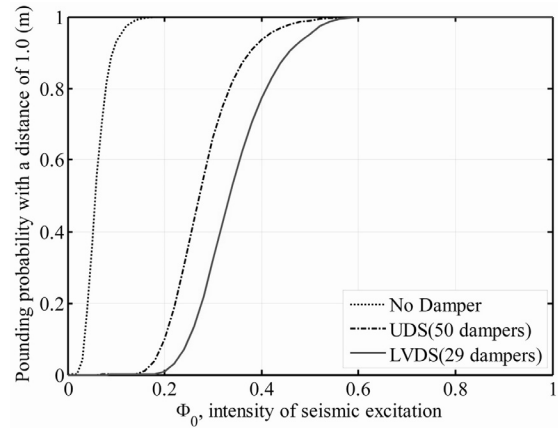
여기서, 계수 r 은 정규화된 threshold로서 식 (46)으로 정의되며, 계수 $\nu(a)$ 는 식 (47)로 정의된다.

$$r = \frac{a}{\sigma_x} \quad (46)$$

$$\nu(a) = \frac{\sigma_x}{\pi \sigma_x} \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) \quad (47)$$

여기서 σ_x 와 $\sigma_{\dot{x}}$ 는 각각 확률과정 $X(t)$ 와 $\dot{X}(t)$ 의 표준편차이다.

따라서 설계된 두 시스템을 장착한 구조물의 충돌확률을 지진세기의 변화에 따라 그림 10에 도시하였다. 두 구조물은 서로 1m 떨어져서 건설되었으며, 강진지속시간은 20초라 가정하였다. 이에 따라 식 (43)~(47)에서의 threshold a 및 지진지속시간 τ 는 각각 1m와 20초를 사용하였다. 그림



〈그림 10〉 1m 간격에 위치한 두 인접 구조물의 지진세기에 따른 감쇠 시스템(UDS, LVDS)별 충돌확률

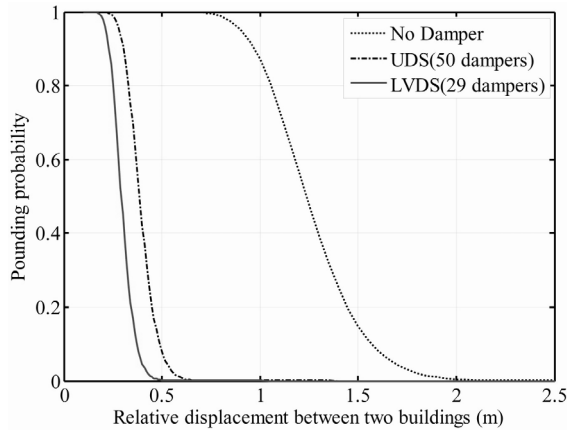
10에서 알 수 있듯이 감쇠시스템이 장착되지 않은 독립된 두 구조물은 지진세기 $\Phi_0 = 0.0871m^2/s^3$ 를 갖는 설계하중에 대하여 충돌 가능성이 0.87로서 매우 높은 것을 알 수 있다. 이에 반해 감쇠기를 장착함으로써 구조물간 충돌확률은 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 제안하는 방법에 의하여 설계된 감쇠시스템(LVDS)이 구조물간 충돌확률을 보다 효과적으로 저감시키고 있음을 알 수 있다.

한편, 설계하중에 대하여 구조물간 간격이 달라지는 경우의 충돌확률을 그림 11에 도시하였다. 그림 11으로부터 알 수 있듯이, 감쇠시스템을 장착하지 않는 경우에는 구조물간 충돌확률을 확연히 저감시키기 위해서 최소 2m이상의 구조물간 간격을 필요로 하며, 이 때의 충돌확률은 4.43×10^{-3} 이다. 이에 반해, 균등 감쇠시스템을 장착하는 경우에는 62cm의 간격으로도 동일한 충돌확률을 확보할 수 있으며, 제시하는 방법에 따른 최적 감쇠시스템(LVDS)을 장착하는 경우에는 그 간격이 48cm로 더욱 줄어든다. 따라서 고층구조물이 밀집한 도심지역에서는 제안하는 방법에 따른 감쇠기 적용이 구조물간 충돌문제를 해결할 수 있는 매우 효율적인 대안이 될 수 있음을 알 수 있다.

앞의 결과들로부터 제시하는 다목적 최적화 방법은 합리적 의사결정을 위한 논리적 근거를 제공해주며 이를 통하여 효율적이며 경제적인 감쇠시스템을 설계할 수 있음을 검증하였다.

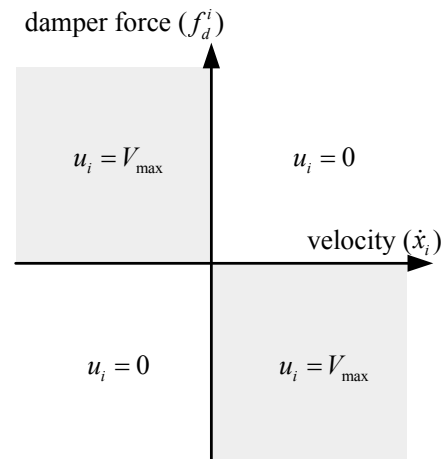
5.3 준능동 MR 감쇠시스템의 제어 성능 (control performance)

여기서는 제시하는 방법을 준능동 제어시스템의 최적 배치 문제에 적용하였다. 일반적으로 준능동 제어시스템은 준능동 제어알고리즘에 의하여 산정되는 최적 제어력을 모사하도록 제어장치의 동적 특성을 매 순간 실시간으로 변화시키는 시스템이다. 예를 들어, 이 연구에서 다루는 MR 감쇠



〈그림 11〉 두 구조물 간격에 따른 감쇠시스템(UDS, LVDS)별 충돌확률

기는 매 순간 입력전압을 조절함으로써 감쇠성능을 극대화하는 시스템이다. 이 때 변화되는 동특성은 준능동 시스템에 내재된 소산성 제한조건으로 인하여 비선형성을 띄게 된다. 이러한 비선형성으로 인하여 준능동 제어시스템의 최적 설계 문제는 수많은 비선형 시간이력을 요하며, 특히 최적 배치 문제는 가능한 경우의 수가 많은 복잡한 구조물을 대상으로 하는 경우 거의 불가능해지게 된다. 이 연구에서는 이러한 준능동 제어시스템의 동특성 변화를 시간 축에 대하여 하나의 평균값으로 대표할 수 있다고 가정하였다. 이 논문에서 다루는 MR 감쇠기는 실시간으로 변화하는 입력전압을 입력전압의 평균값으로 가정하였다. 도입된 가정에 따라 준능동 제어알고리즘에 의하여 실시간으로 변화하는 MR 감쇠기의 입력전압을 설계변수로 설정할 수 있다. 이는 전 절에서 수행한 최적화 방법과 동일하므로, 전 절에서 제시한 감쇠기의 최적 배치를 준능동 제어시스템에도 동일하게 적용할 수 있다. 이는 입력전압이 고정된 값으로 대표되므로, 실제 준능동 제어시스템의 경우에는 입력전압을 실시간으로 조절하는 준능동 제어가 추가로 요구된다. 비록 제시하는 최적화 방법에 따라 준능동 MR 감쇠기의 최적 배치 및 평균 입력전압을 결정하기는 하였지만, 실제 준능동 시스템의 성능은 제어 알고리즘에 따라 가변적일 수 있다. 따라서 보다 최적의 준능동 제어시스템을 구현하기 위해서는 최적화된 배치에 대하여 보다 효율적인 제어 알고리즘 자체의 최적 설계에 대한 추가적인 연구가 엄밀히 수행되어야 할 것이다. 이는 이 논문에서 다루는 연구범위를 넘어서는 분야이므로 여기서 상세히 다루지는 않았다. 따라서 준능동 MR 감쇠기 시스템으로 전 절에서 결정한 29개 감쇠기를 사용하는 LVDS와 동일한 배치를 사용하였으며, 준능동 알고리즘으로는 가장 단순히 적용할 수 있는 형태의 clipped optimal control 기법을 적용하였다^{(37),(38)}. 이의 입력전압은 그림 12와 같이 감쇠력과 감쇠기 양단의 속도의

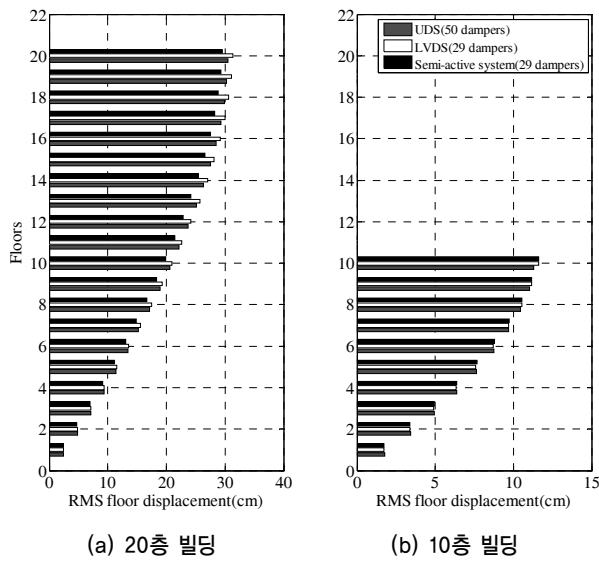


〈그림 12〉 Clipped optimal 제어기법에 따른 입력전압 결정

부호에 의하여 결정된다.

그림 12에서 f_d^i 는 i -번째 감쇠기의 감쇠력이며, \dot{x}_i 는 i -번째 감쇠기 양단의 속도이다. 그리고 u_i 는 i -번째 감쇠기의 입력전압이다.

준능동 시스템의 제어성능을 평가하기 위하여 설계하중과 동일한 탁월 주파수, 지반감쇠 및 지진세기를 갖는 Kanai-Tajimi 모델로부터 스펙트럼모사법(Spectral representation method)⁽³⁹⁾을 이용하여 100개의 인공지진을 생성하고, 제시하는 준능동 MR 감쇠시스템에 대한 비선형 시간이력 해석을 수행하였다. 제어성능의 비교를 위하여 앞서 제시된 UDS 및 LVDS의 비선형 시간이력 해석도 수행하였으며, 각 층별 응답을 그림 13에 비교, 도시하였다. 여기서, UDS와 LVDS는 고정된 입력전압(그림 9 참조)을 사용하므로 일반적인 수동형 이력감쇠 시스템에 상응하며, 각 층별 응답은 100개 지진에 대한 평균 변위응답 RMS 값을 의미한다. 20층 빌딩의 각 층별 응답을 비교하면, 50개의 수동형 MR 감쇠기를 사용하는 UDS가 LVDS보다는 응답저감효과가 큰 것을 알 수 있다. 이는 그림 8에 제시된 결과로부터 이미 밝혀진 바로서, LVDS는 제어성능이 약간 저하되기는 하지만 월등한 경제성을 확보한 시스템이기 때문이다. 한편, 이들보다는 29개의 MR감쇠기를 사용하는 준능동 시스템이 가장 큰 응답저감효과를 보임으로써 가장 개선된 제어성능을 발휘하고 있음을 알 수 있다. 그러나 실질적으로 세 시스템간의 제어성능은 매우 근소한 차이만을 보이고 있다고 평가할 수 있다. 특히 10층 응답결과에서는 세 가지 시스템의 응답저감 효과는 매우 유사함을 그림에서 확인할 수 있다. 이처럼 준능동 제어시스템이 수동형 제어시스템보다 응답개선 효과가 그다지 크지 않은 이유는 그림에서 제시한 응답이 100개 지진에 대한 평균응답이기 때문에 준능동 제어시스템의 지진하중에 대한 적응성이 수동 제어시스템에 비해 큰 차이를 보이기 힘들다



(a) 20층 빌딩 (b) 10층 빌딩

〈그림 13〉 수동 및 준능동 감쇠시스템의 성능비교

고 할 수 있다. 또한, 준능동 제어알고리즘도 감쇠기의 소산성만을 이용하여 운용되므로, 엄밀한 의미에서는 최적 설계된 제어알고리즘이라고 보기는 힘들다. 따라서 보다 개선된 제어성능을 발휘하기 위해서는 여러 연구자들에 의하여 제시된 다양한 제어알고리즘^{(37),(38)}을 이용한 최적 설계가 추가적으로 수행되어야 할 것이며, 이들을 통하여 제어성능의 향상을 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

6. 결론

이 논문에서는 인접 구조물의 지진응답 제어를 위한 비선형 감쇠시스템의 효과적 최적 설계 방법으로 추계학적 선형화 방법을 접목한 다목적 유전자 알고리즘을 제시하였다.

최적화를 위한 목적함수로는 지진하중에 의한 인접구조물의 최대 층간변위 RMS 값과 감쇠기의 총 설치개수를 고려하였으며, 이들은 어느 하나를 감소시키면 다른 하나가 증가하는 물리량으로서 상충하는 다목적 최적화문제를 구성하게 된다. 이 연구에서 제시하는 다목적 최적화 방법은 기존 단일목적 최적화 방법의 한계를 극복할 수 있는 기법으로서 별도의 가중치 없이 다목적함수들을 독립적으로 고려함으로써 다수의 Pareto 최적해들을 검색해주며, 이로부터 합리적인 최적해를 판별할 수 있는 의사결정 과정을 원활히 할 수 있도록 해준다. 또한, 최적화 과정에서의 목적함수인 비선형 감쇠기-인접구조물의 지진응답을 효율적으로 산정하기 위하여 추계학적 선형화 방법을 접목하였다. 이는 시간영역에서의 반복적 해석을 수행하지 않고도 불확실한 지진에 대한 비선형 구조물의 확률적 응답을 효과적으로 예측할 수 있는 장점을 갖는다.

제시하는 방법의 효율성을 검증하기 위한 수치 예로서 20층과 10층 높이를 갖는 두 인접 빌딩과 두 빌딩을 연결하는 비선형 감쇠시스템으로 MR 감쇠기를 고려하였다. 제안된 감쇠시스템의 성능평가를 비교하기 위하여, 감쇠기가 전 층에 동일한 개수로 사용된 균등분포시스템과 성능을 비교한 결과 제시하는 감쇠시스템이 최적 배치를 고려하지 않는 균등분포시스템보다 매우 작은 개수의 감쇠기를 사용하면서도 유사한 강인 성능을 발휘할 수 있는 것을 확인하였다. 구조물간 충돌문제에 있어서는 감쇠기를 사용함으로써 충돌 확률을 현저히 줄일 수 있으며 특히 제안하는 방법에 따라 설계된 감쇠시스템은 균등분포 시스템보다 더욱 효율적인 것을 검증하였다. 또한, 준능동 제어시스템의 최적 배치문제에 제시하는 방법을 적용하였으며 수치해석결과로부터 타당성을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2006-214-D00164)을 받아 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 옥승용, 박관순, 고현무, “인접구조물의 진동제어를 위한 선형 감쇠시스템의 최적설계”, 한국지진공학회 논문집, 제 10권, 제 3호, 2006, pp. 85-100.
2. Klein, R.E., Cusano, C. and Stukel, J., “Investigation of a method to stabilize wind induced oscillations in large structures,” Proc. ASME Winter Annual Meeting, New York, Paper No. 72-WA/AUT-H, November, 1972.
3. Christenson, R.E., Spencer Jr., B.F., Johnson, E.A. and Seto, K., “Coupled building control considering the effects of building/connector configuration,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 6, June 2006, pp. 853-863.
4. Iwanami, K, Suzuki, K. and Seto, K., “Studies of the vibration control method of parallel structures,” *Trans. JSME*, No. 86-0247A, 1986, pp. 3063-3072.
5. Westermo, B., “The dynamics of interstructural connections to prevent pounding,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 18, 1989, pp. 687-699.
6. Gurley, K., Kareem, A., Bergman, L.A., Johnson, E.A. and Klein, R. E., “Coupling tall buildings for control of response to wind,” Proc. 6th Int. Conf. on Structural Safety and Reliability, Schueller, Shinozuko & Yao, (eds.), Balkema Publishers: Rotherdam, Netherlands, 1994, pp. 1553-1560.
7. Luco, J.E. and Wong, H.L., “Control of the seismic response of adjacent structures,” Proc. 1st World Conf. on Structural Control, Pasadena, Calif., TA2-21-30, 1994.

8. Kageyama, M., Yoshida, O., and Yasui, Y., "A study on optimum damping systems for connected double frame structures," *Proceedings of the 1st world Conference on Structural Control*, Los Angeles, CA, Vol. 1, WP4, 1994, pp. 32-39.
9. Kageyama, M., Yasui, Y., Suzuki, T. and Seto, K., "A study on optimum design of joint dampers connecting two towers: the case of connecting two same height towers at multiple points," *Proceedings of the 2nd World Conference on Structural Control*, Vol. 2, 1999, pp. 1463-1472.
10. Fukuda, Y., Matsumoto, Y. and Seto, K., "Bending and torsional vibration control of flexible structures arranged in parallel," *Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control*, Chiba, Vol. 3, 1996, 12-17.
11. Kamagata, K., Miyajima, K. and Seto, K., "Optimal design of damping devices for vibration control of parallel structures," *Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control*, Chiba, Vol. 2, 1996, pp. 334-339.
12. Luco, J.E., and De Barros, F.C.P., "Optimal damping between two adjacent elastic structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 7, No. 7, 1998, pp. 649-659.
13. Zhang, W.S. and Xu, Y.L., "Vibration analysis of two buildings linked by Maxwell Model-defined fluid dampers," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 233, 2000, pp. 775-796.
14. Zhu, H.P. and Iemura, H., "A study of response control on the passive coupling element between two parallel structures," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 9, 2000, pp. 383-396.
15. Ni, Y.Q., Ko, J.M. and Ying, Z.G., "Random seismic response analysis of adjacent buildings coupled with non-linear hysteretic dampers," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 246, No. 3, 2001, pp. 403-417.
16. Xu, Y.L., He, Q. and Ko, J.M., "Dynamic response of damper-connected adjacent buildings under earthquake excitation," *Engineering Structures*, Vol. 21, No. 2, 1999, pp. 135-148.
17. Zhang, W.S. and Xu, Y.L., "Dynamic characteristics and seismic response of adjacent buildings linked by discrete dampers," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, No. 10, 1999, pp. 1163-1185.
18. Zhang W.S. and Xu Y.L., "Vibration analysis of two buildings linked by Maxwell-defined fluid dampers," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 233, No. 5, 2000, pp. 775-796.
19. 옥승용, 김동석, 박관순, 고현무, "선형 점성 감쇠기가 장착된 인접구조물의 진동제어를 위한 유전자 알고리즘 기반 최적설계", 한국지진공학회 논문집, accepted, in press, 2007, pp. -.
20. Rao, S.S., *Engineering optimization: theory and practice*, John Wiley & Sons, Inc., 3rd ed., New York, 1996.
21. Goldberg, D.E., *Genetic algorithms for search, optimization, and machine learning*, Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
22. Srinivas, N. and Deb, K., "Multi-objective function optimization using non-dominated sorting genetic algorithms", *Evolutionary Computation*, Vol. 2, No. 3, 1994, pp. 221-248.
23. Wen, Y.K., "Equivalent linearization for hysteretic systems under random excitation," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 47, 1980, pp. 150-154.
24. Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. and Carlson, J.D., "Phenomenological model of magnetorheological damper," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 3, 1997, pp. 230-238.
25. Wen, Y.K., "Method of random vibration of hysteretic systems," *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 102, No. 2, 1976, pp. 249-263.
26. Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Sain, M.K., Carlson, J.D., "An experimental study of MR dampers for seismic protection," *Smart Materials and Structures*, Special Issue on application to large civil infrastructure, Vol. 7, No. 5, 1998, pp. 693-703.
27. Yi, F., Dyke, S.J., Caicedo, J.M. and Carlson, J.D., "Experimental verification of multiinput seismic control strategies for smart dampers," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 127, No. 11, 2001, pp. 1152-1164.
28. Atalik, T.S. and Utku, S., "Stochastic linearization of multi-degree-of-freedom nonlinear systems," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 4, No. 3, 1976, pp. 411-420.
29. Kanai, K., "Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground," *Bull. of the Earthquake Research Institute*, University of Tokyo, Vol. 35, 1957, pp. 309-325.
30. Tajimi, H., "A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake," *Proc. 2nd World Conf. on Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan, Vol. 2, 1960, pp. 781-897.
31. Lin, Y.K., *Probabilistic theory of structural dynamics*, McGraw-Hill, New York, NY, 1967.
32. Song, J., *Seismic response and reliability of electrical substation equipment and systems*, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, 2004.
33. Bartels, R.H. and Stewart, G.W., "Solution of the matrix $AX+XB=C$," *Communications of the ACM*, Vol. 15, No. 9, 1972, pp. 820-826.
34. Yoshida, O. and Dyke, S.J., "Seismic control of a nonlinear benchmark building using smart dampers," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 130, No. 4, 2004, pp. 386-392.
35. VanMarcke, E.H., "On the distribution of the first-passage time for normal stationary random processes," *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol. 42, No. 1, 1975, pp. 215-220.
36. Song, J. and Kiureghian, A.D., "Joint first-passage probability and reliability of systems under stochastic excitation," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 132, No. 1, 2006, pp. 65-77.
37. Jansen L.M. and Dyke, S.J., "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 8, 2000, pp. 795-803.
38. Ok, S.-Y., Kim, D.-S., Park, K.-S. and Koh, H.-M., "Semi-active fuzzy control of cable-stayed bridges using magnetorheological dampers," *Engineering Structures*, In Press, Available online, Aug. 2006
39. Shinozuka, M. and Deodatis, G., "Simulation of stochastic processes by spectral representation," *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 44, No. 4, 1991, pp. 191-203.