

스마트 최상층 면진시스템의 중약진지역 적용성 평가

Investigation of Adaptability of Smart Top-Story Isolation System to Structures in Regions of Low-to-Moderate Seismicity

김 현 수*
Kim, Hyun-Su

강 주 원**
Kang, Joo-Won

Abstract

Because a smart isolation system cannot be used as a base isolation system for tall buildings, top-story or mid-story isolation systems are required. In this study, adaptability of a smart top-story isolation system for reduction of seismic responses of tall buildings in regions of low-to-moderate seismicity has been investigated. To this end, 20-story example building structure was selected and an MR damper and low damping elastomeric bearings were used to compose a smart base isolation system. Artificial earthquakes generated based on design spectrum of low-to-moderate seismicity regions are used for structural analyses. Based on numerical simulation results, it has been shown that a smart top-story isolation system can effectively reduce both structural responses and isolation story drifts of the building structure in low-to-moderate seismicity regions in comparison with a passive top-story isolation system.

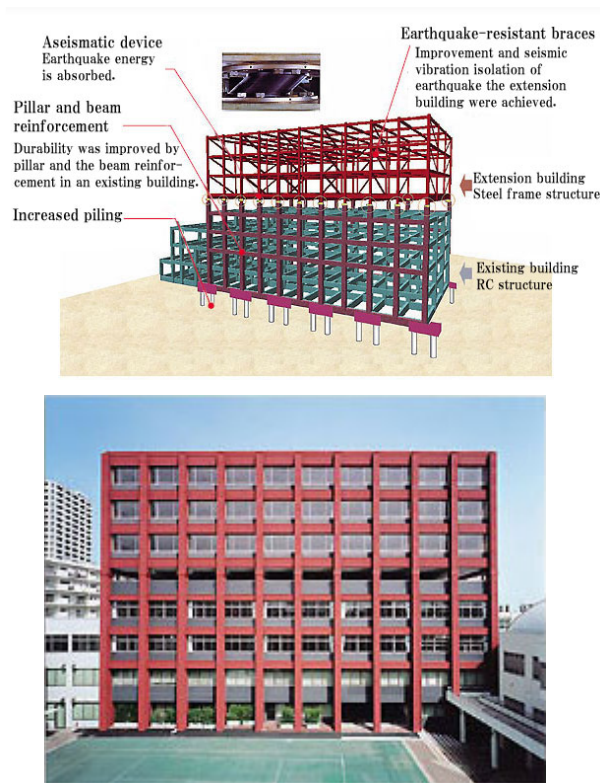
Keywords : Top-story isolation system, Regions of Low-to-Moderate Seismicity, Smart control, Vibration control

1. 서 론

지진하중에 대한 구조물의 피해를 저감시키기 위해서 현재까지 다양한 형태의 제진 기술이 개발되고 적용되어 왔다. 이러한 제어기법 중에서 실제구조물에 가장 널리 사용되고 있는 방법은 면진시스템이다. 구조물의 지진응답을 저감시키기 위한 효율적인 기법으로 알려져 있는 면진기술은 국내·외에서 건물, 교량, 원자력발전소 등 대형구조물의 지진하중에 대한 피해를 최소화하기 위하여 널리 적용되고 있으며 비교적 경제성 및 제진성능이 양호하기 때문에 많은 연구자들에 의하여 연구 및 응용이 활발하게 진행되고 있다¹⁻³⁾. 면진시스템은 구조물과 지반 사이에 베어링을 삽입하여 지진하중이 구조물로 전달되는 것을 최소화하는 것을 목적으로 하고

있다. 이러한 면진시스템은 중저층 건물의 지진응답을 저감시키기 위하여 일반적으로 기초면진의 형태로 널리 활용되고 있다. 중저층 건물용으로 개발된 일반적인 면진시스템을 고층 구조물의 기초면진에 사용할 경우에는 다양한 문제가 발생할 수 있다. 즉, 고층 건물은 중저층 건물에 비하여 기초부에서 축력이 크게 발생하고 주기는 중저층 건물에 비하여 상대적으로 길기 때문에 면진장치를 이용하여 주기를 증가시킨다면 면진장치에서 발생하는 수평변위가 매우 커지게 되고 큰 축력과 함께 횡하중에 의한 전도모멘트도 커져서 면진장치에서 인장력이 발생할 가능성도 있다. 이렇게 고층건물의 기초면진에는 어려운 점이 있기 때문에 최근에는 <Fig. 1>에 나타난 예와 같이 고층 건물의 상부를 부분적으로 분리시켜서 면진기술을 적용하는 중간층 면진이 많이 연구되고 있다.

* 정회원, 선문대학교 건축학부 조교수
Division of Architecture, Sunmoon University
** 교신저자, 정회원, 영남대학교 건축학부 교수
School of Architecture, Yeungnam University
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625
E-mail : kangj@ynu.ac.kr



<Fig. 1> Kaijyo highschool building having mid-story isolation system (Japan)

이러한 중간층 면진시스템을 고층 구조물에 적용하는 경우에는 면진층 이하의 하부구조물은 반드시 탄성거동을 해야 하기 때문에 반응수정계수를 1로 사용함으로써 발생하는 설계상의 문제가 유발될 수 있다⁴⁾. 또한 과도한 면진층 변위는 구조물의 안정성에 문제를 일으킬 수도 있다. 따라서 고층 구조물의 경우에는 중간층면진 보다는 건물 최상부의 한 개 층만을 면진시킴으로서 최상층을 TMD (Tuned Mass Damper)와 같은 질량 제어장치로서 활용하여 하부 구조물의 설계에 여유를 둘 수 있으며 상부 구조물의 질량이 상대적으로 크지 않아 면진장치의 설계도 충분한 여유를 가질 수 있는 방법이 제안되었다⁵⁾. 이러한 최상층 면진시스템의 경우에는 일반적인 TMD와는 달리 추가적인 질량을 요구하지 않고 구조체의 질량을 이용하여 고층 건물의 제어성능을 향상시킬 수 있으므로 더욱 효율적이다.

최상층 면진시스템의 첫 번째 목적은 최상층 이하의 주구조물 동적응답을 저감시키는 것이다. 이를 위해서는 최상층 면진시스템의 진동주기를 주구조

물의 1차모드 진동주기와 맞추어 최상층이 TMD처럼 거동하도록 하는 것이 가장 효과적일 것이다. 즉, 면진된 최상층의 동적움직임이 클수록 주구조물의 동적응답이 줄어들게 된다. 그러나 주구조물의 진동저감만을 목적으로 최상층 면진시스템을 설계한다면 면진층에서 과도한 동적변위가 발생하게 되어 구조물의 안전성에 심각한 문제를 초래할 가능성이 있다⁶⁾. 이러한 문제를 해결하기 위해서 면진층에 추가적인 감쇠기를 설치하여 면진층의 변위를 줄이는 방법을 생각해 볼 수 있으나 그렇게 되면 질량감쇠기로 사용되는 상부층의 동적움직임이 줄어들어서 최상층 면진시스템에 의한 진동제어효과도 줄어들게 된다.

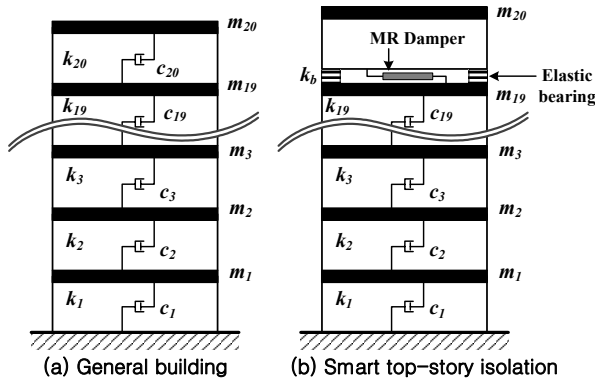
이러한 기존의 최상층 면진시스템이 가지는 문제점을 고려하여 본 연구에서는 최상층 면진시스템의 진동제어성능을 저감시키지 않으면서도 면진층의 변위를 저감시켜 시스템의 안전성을 향상시킬 수 있도록 스마트 감쇠기를 도입한 스마트 최상층 면진시스템을 제안하였다. 스마트 최상층 면진시스템을 구성하기 위하여 저감쇠 탄성베어링을 면진장치로 사용하였고 스마트 제어장치로는 MR (magnetorheological) 감쇠기를 사용하였다. 제안된 스마트 면진시스템을 제어하기 위하여 퍼지제어 알고리즘을 사용하였으며 이를 최적화하기 위하여 유전자 알고리즘을 적용하였다. 일반적으로 스마트 면진시스템은 강진지역에서 구조물의 지진응답을 저감시키기 위하여 주로 사용되고 있으며 중약진지역에 대한 적용성은 아직 널리 검토되지 못하였다. 특히 스마트 최상층 면진시스템의 중약진지역 구조물에 대한 제어성능은 아직까지 국내외적으로 검토된 바가 없기 때문에 본 연구를 통하여 이에 대해서 검토해 보고자한다.

2. 수치해석모델

2.1 20층 빌딩 예제구조물

본 연구에서는 중약진지역에 있는 고층구조물에 대한 스마트 최상층 면진시스템의 적용성을 검토하기 위하여 <Fig. 2>에 나타난 20층 예제구조물을 사용하였다. <Fig. 2(a)>에서 보는 바와 같이 20층의

전형적인 전단빌딩모델을 기본 예제구조물로 사용하였으며 이 모델의 20층과 19층 사이에 면진시스템이 설치되는 것으로 가정하였다. 스마트 면진시스템은 <Fig. 2(b)>에 나타낸 바와 같이 탄성베어링과 MR 감쇠기로 구성하여 면진층에 설치되며 이에 대해서는 다음 절에서 보다 상세히 설명하였다. 스마트 최상층 면진시스템의 제어성능을 비교하기 위하여 수동 최상층 면진시스템을 검토하였다. 이를 위하여 <Fig. 2(b)>에 나타낸 스마트 최상층 면진시스템에서 MR 감쇠기 대신에 적절한 용량의 점성감쇠기를 사용하여 수동 최상층 면진시스템을 구성하였다.



<Fig. 2> Analytical model of example structure

지진하중을 받는 20층의 일반 구조물과 및 최상층 면진구조물의 운동방정식은 각각 아래의 식 (1)과 (2)로 표현할 수 있다.

$$M\ddot{x}_1 + C_1\dot{x}_1 + K_1x_1 = -ME\ddot{x}_g \quad (1)$$

$$M\ddot{x}_2 + C_2\dot{x}_2 + K_2x_2 = -ME\ddot{x}_g + E^F F_c \quad (2)$$

여기서, E 는 지진하중에 대한 위치벡터로서 $[20 \times 1]$ 의 크기를 가진 단위벡터(가진 방향에 대하여 원소가 '1'인 벡터)이다. F_c 는 스마트 면진시스템에서 MR 감쇠기의 감쇠력을 나타내며 실시간으로 변하게 된다. 이 값이 구조물의 실시간 응답 및 제어 명령에 의하여 계산되는 방법은 다음 절에서 설명하였다. E^F 는 면진시스템이 설치된 위치를 나타내는 위치행렬로서 면진층이 설치된 자유도 위치에서만

1의 값을 가지고 나머지 자유도에서는 0의 값을 가진다. $x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1$ 와 $x_2, \dot{x}_2, \ddot{x}_2$ 는 각각 일반 구조물 및 최상층 면진 구조물의 변위, 속도, 가속도 벡터를 나타내고 \ddot{x}_g 는 입력되는 지반가속도를 나타낸다. M 은 일반 구조물과 최상층 면진 구조물의 질량 행렬을 나타내며 아래의 식 (3)과 같이 대각행렬로 표현된다. 여기서, m_i ($i = 1, 2, \dots, 20$)는 20층 건물의 i 번째 층의 질량을 나타내며 본 연구에서는 m_i 를 $8 \times 10^5 kg$ 으로 두었다.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{19} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{20} \end{bmatrix} \quad (3)$$

K_1 과 K_2 는 일반 구조물과 및 최상층 면진구조물의 강성행렬로서 식 (4) 및 식 (5)와 같이 정의된다. 여기서, k_i ($i = 1, 2, \dots, 20$)는 각각 i 번째 층의 강성을 나타내고 본 연구에서는 k_i 를 $1.35 \times 10^9 N/m$ 로 두었다.

$$K_1 = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & k_{19} + k_{20} & -k_{20} \\ 0 & \dots & \dots & -k_{20} & k_{20} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} k_b + k_1 & -k_1 & \dots & \dots & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & k_{19} + k_b & -k_b \\ 0 & \dots & \dots & -k_b & k_b \end{bmatrix} \quad (5)$$

최상층 면진구조물의 면진층 강성(k_b) 및 면진층 감쇠(c_b)는 면진시스템을 이루는 탄성베어링 및 수동 면진시스템에 추가되는 점성감쇠기의 재료적 특성에 의하여 결정되며 이 값은 다음절에 설명한다. 예제 구조물의 감쇠행렬을 구성하기 위하여 Rayleigh 댐핑을 사용하였으며 이때 1차 및 2차모드의 감쇠비를 2%로 하였다. 본 연구에서 사용한 20층의 일반 예제구조물을 이용하여 고유치해석 한 결과 5개 저차모드 고유진동주기는 2.00, 0.67, 0.40, 0.29, 0.23초로 나타났다.

2.2 최상층 면진시스템의 구성

본 연구에서는 <Fig. 3>에 나타낸 바와 같이 최상층을 아래층과 분리하여 최상층 면진시스템을 구성한다. 이때 면진층에 저감쇠 탄성베어링을 사용하여 스마트 제어장치의 제어가능 범위를 넓게 하였다. 최상층 면진시스템에 탄성베어링과 함께 MR 감쇠기를 추가함으로써 스마트 최상층 면진시스템을 구성한다. MR 감쇠기를 모형화하기 위해서는 일반적으로 사용되는 Bouc-Wen 모델⁷⁾을 사용하였다. 이 모델에서 MR 감쇠기의 감쇠력은 아래의 식 (6)과 같이 표현된다.

$$f = c_0 \dot{x}_d + \alpha z \tag{6}$$

여기서, x_d 는 감쇠기 양단의 상대변위(stroke)를 나타내고 변수 c_0 와, α , z 는 아래의 식 (7), (8), (9)를 통해서 각각 얻을 수 있다.

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b}u \tag{7}$$

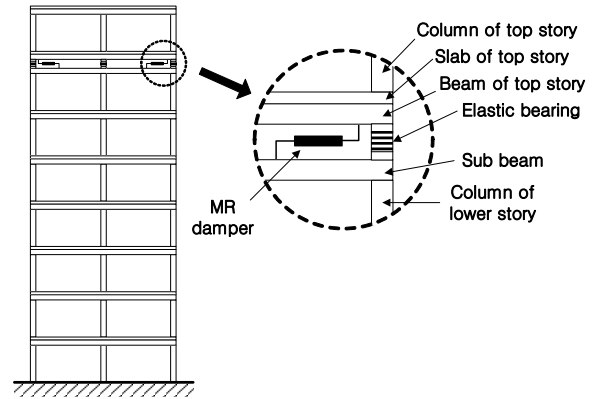
$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \tag{8}$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}_d| |z|^{n-1} - \beta \dot{x}_d |z|^n + A_m \dot{x}_d \tag{9}$$

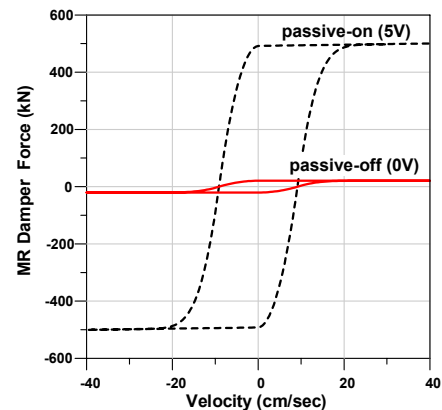
식 (7)은 감쇠상수를 식 (8)은 MR 감쇠기의 변화하는 거동 특성을 모사하기 위한 변수로서 수동 감쇠기의 경우에는 이 변수들이 고정된 상수값을 가지며 고정된 이력거동을 보이게 되지만 MR 감쇠기에서는 식에 나타난 바와 같이 입력전압(u)의 함수로서 표현되며 입력전압의 값에 따라서 감쇠력이 매 순간 변화할 수 있다. 식 (7)과 (9)의 변수 z 는 MR 감쇠기의 이력거동을 모사하기 위한 가상의 변수로서 매개변수 γ , n , β , A_m 은 항복 전후의 기울기와 같이 감쇠기의 이력거동의 형상을 결정하는데 사용되는 계수들이다.

본 연구에서는 <Fig. 4>에서 볼 수 있듯이 약 500 kN의 최대 감쇠력을 가지는 MR 감쇠기를 면진층에 설치하여 사용하였다. 이 최대 감쇠력은 예제 구조물의 최적제어를 위한 값을 찾기 위해 반복해석을 통하여 결정하였다. MR 감쇠기의 감쇠력은 감쇠

기로 전달되는 명령전압에 의해서 결정되는데 사용된 MR 감쇠기는 0 volt의 전압이 전달될 때 최소 감쇠력을 나타내고 5 volt의 전압에서 최대 감쇠력을 나타낸다.



<Fig. 3> Configuration of smart top-story isolation system



<Fig. 4> Force-velocity relationship of MR damper

본 연구에서는 제안된 스마트 최상층 면진시스템의 지진응답 제어성능을 검토하기 위하여 일반적으로 사용되는 수동 면진시스템의 진동제어성능과 비교하고자 한다. 이를 위하여 MR 감쇠기 대신에 점성감쇠기를 사용하는 수동 최상층 면진시스템을 구성하였다. 수동 면진시스템 및 스마트 면진시스템에서 사용한 탄성베어링의 특성은 최상층이 TMD와 같은 역할을 하여 구조물의 지진응답을 효과적으로 저감할 수 있도록 설정하였다. 즉, 최상층 이하 주 구조물의 1차 모드 진동수와 면진된 최상층의 고유진동수를 같도록 조율하였다. 수동 최상층 면진시스

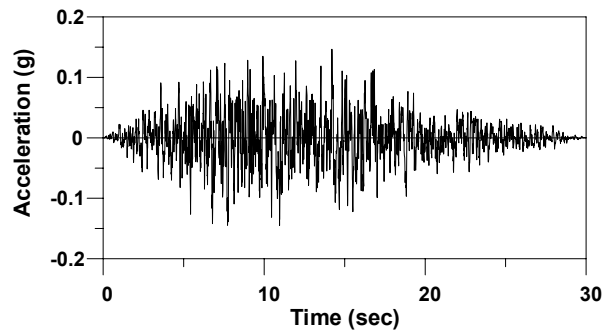
템에 적용할 최적의 감쇠비에 대한 연구는 지금까지 거의 수행된 바가 없기 때문에 역학적으로 최상층 면진시스템과 동일한 원리로 작동하는 수동 TMD의 최적설계변수에 대한 연구결과를 사용하여 결정했다. 수동 TMD의 설계에 있어서 주어진 질량비에 대한 최적 감쇠비는 여러 가지 제안식이 있다. Den Hartog⁸⁾는 처음으로 TMD 파라미터의 적절한 선택을 위한 기초 원리를 개발하였고 Warburton⁹⁾는 주구조물의 감쇠비와 질량비의 특정한 수치에 대한 TMD의 감쇠비와 진동수비 그리고 최대 진동 증폭계수를 각각 도표화하여 발표하였다. 본 연구에서는 Warburton의 논문에서 제시한 랜덤하중이 구조물에 직접 가려질 경우에 대한 TMD의 최적 감쇠비를 사용하였으며 이를 식 (10)에 나타내었다. 비록 식 (10)에 나타낸 식이 단자유도 구조물을 대상으로 하고 있지만 본 연구의 예제구조물이 정형적인 캔틸레버 구조물로서 1차모드가 전체 구조물의 동적거동에 미치는 영향이 탁월하므로 본 연구에서는 식 (10)을 사용하여 수동 면진시스템의 최적 감쇠비를 계산하였다. 식에서 μ 는 최상층과 주구조물과의 질량비로서 5%이고 이 식에 의해서 계산된 최적감쇠비는 10.9%이다.

$$\sqrt{\frac{\mu(1+3\mu/4)}{4(1+\mu)(1+\mu/2)}} \quad (10)$$

2.3 중앙진 지역의 인공지진하중

전술한 바와 같이 본 연구에서는 중앙진지역의 특성을 나타내는 지반운동성분을 생성하기 위하여 국내 건축구조설계기준(KBC2009)을 바탕으로 설계 응답 가속도스펙트럼을 작성하였고 이를 잘 표현할 수 있는 인공지진을 생성하여 수치해석에 사용하였다. 설계응답 가속도스펙트럼 작성시 지역계수는 0.22, 지반종류는 S_B의 보통암 지반으로 선택하였다. 이렇게 생성한 인공지진하중의 가속도 시간이력을 <Fig. 5>에 나타내었다. 생성된 인공지진하중 가속도시간이력 데이터 중의 가장 큰 값(Peak Ground Acceleration; PGA)은 0.144g로서 우리나라에서 주로 발생하는 지진하중의 특성이 고려된 중앙진지역

의 지진하중으로 생각할 수 있다. 생성된 지진하중의 길이는 30초로 하였고 시간간격은 0.01초로 하였다.

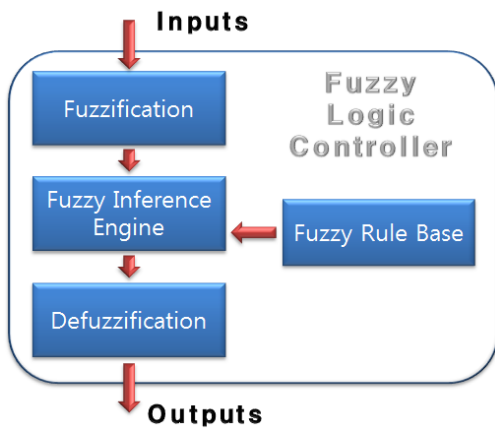


<Fig. 5> Acceleration time history of artificial earthquake

3. 제어알고리즘의 개발

본 연구에서는 스마트 최상층 면진시스템에 사용된 MR 감쇠기를 효과적으로 제어하기 위하여 퍼지논리제어기(Fuzzy Logic Controller)를 사용한다. 퍼지제어기법은 구조물의 동적응답정보로부터 퍼지연산을 수행함으로써 매 순간 보다 효율적인 제어 성능을 발휘하도록 MR 감쇠기에 입력되는 전류를 조절한다. 퍼지논리제어기는 엔지니어나 제어전문가의 지식을 바탕으로 구조물 제어에 필요한 제어규칙을 기술하게 되며 제어대상 시스템에 대한 불확실성과 비선형성을 보다 용이하게 취급할 수 있는 장점이 있다. 종래에는 입·출력량과 시스템파라미터를 분명히 알 수 있다는 가정 하에서 정확한 수치를 이용하는 하나의 수식에 의해서 제어가 이루어졌다. 그러나 실제 시스템에서는 어떤 모델도 실제 모델에 대한 근사치에 지나지 않고 확률론적 모델로부터 얻어진 기대치에 불과한 모델이므로 시스템을 모델링할 때 근사치를 고려해야 하며 불확실하게 모델링된 시스템을 제어할 때에는 불확실한 모델에 대한 불확실한 제어기법이 필요하게 되었다. 이러한 관점에서 다루어지는 지능제어기법 중에 하나가 퍼지논리제어이다. 본 연구에서 사용하는 퍼지논리제어기는 면진층 변위 및 구조물의 19층 가속도를 입력받아서 입력소속함수를 사용하여 입력퍼

지변수로 변환하는 퍼지화작업을 우선적으로 한다. 입력퍼지변수는 퍼지규칙에 따라서 퍼지추론과정을 통하여 출력퍼지변수로 사상(mapping)되고 비퍼지화(defuzzification)과정을 통하여 물리적 의미를 가지는 0V-5V 사이의 명령전압으로 출력된다. 이러한 퍼지논리제어기의 추론 과정¹⁰⁾을 <Fig. 6>에 나타내었다.



<Fig. 6> Inference process of fuzzy logic controller

비록 퍼지제어기가 수많은 구조시스템을 제어하는데 이용되어 왔지만 적합한 소속함수를 선택하고 제어규칙을 찾아내는 일은 시간이 많이 소요되는 쉽지 않은 작업이다. 본 논문에서는 퍼지제어기의 효과적인 설계를 위하여 다목적 유전자 알고리즘을 이용한다.

다목적 최적화문제에서는 본질적으로 서로 우열을 판별할 수 없는 다수의 최적해가 존재하게 되는데 이를 파레토 최적해집합이라고 한다. 이는 다수의 목적함수가 서로 상충하는 특성 때문에 발생한다. 스마트 최상층 면진장치가 설치된 구조물에서 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 크게 하면 면진층의 변위가 감소하지만 제어장치로 작용하는 최상층의 움직임이 줄어들어 19층 이하의 구조물의 가속도는 증가하게 된다. 반대로 명령전압을 작게 하면 최상층의 응답이 커져서 19층 이하의 구조물 가속도는 감소하지만 면진층 변위가 증가하게 된다. 이처럼 두 응답의 저감이 모두 중요하지만 서로 상충되는 특성이 있기 때문에 다목적 유전자알고리즘

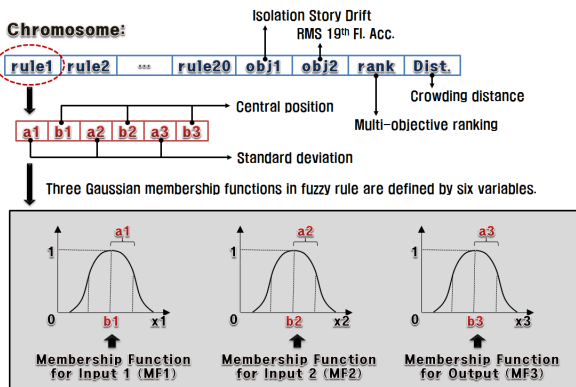
의 목적함수로 사용하였다. 사용된 두 목적함수는 <Table 1>에 나타낸 바와 같이 스마트 최상층 면진시스템이 설치된 구조물의 응답을 수동 최상층 면진시스템이 설치된 구조물의 응답으로 나누어 정규화된 값으로 표현하였다. 따라서 이 값이 1보다 작으면 스마트 면진시스템이 수동 면진시스템에 비하여 우수한 제어성능을 나타내는 것을 의미한다. 수동 최상층 면진시스템이 설치된 경우의 최대 면진층 변위 및 19층의 RMS 가속도는 19.12cm 및 63.57cm/s²이다.

<Table 1> Multi-objective functions

Objective function	Description
J1	Peak drift of isolator with smart isolation system
	Peak drift of isolator with passive isolation system
J2	19 th story RMS acceleration with smart isolation system
	19 th story RMS acceleration with passive isolation system

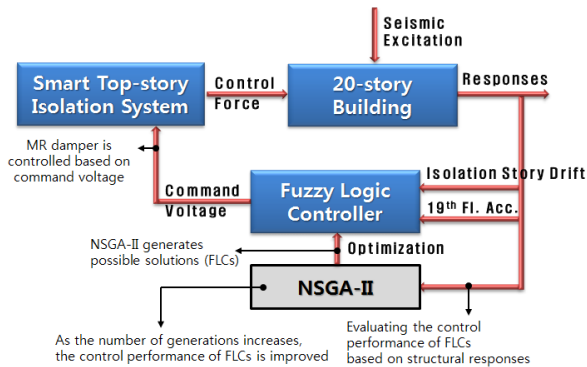
본 연구에서는 다목적 유전자알고리즘 중의 하나인 NSGA-II¹¹⁾(a fast elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)를 사용하여 퍼지제어기를 최적화하였다. 유전자알고리즘을 통해서 최적화하기 위해서는 암호화(encoding)과정을 거쳐서 퍼지제어기를 구성하는데 필요한 모든 정보를 염색체라 불리는 하나의 구조로 표현되어야 한다. 본 연구에서 사용한 퍼지제어기의 입출력 변수는 가우스함수를 통해서 표현이 되고 사용된 염색체의 구조를 <Fig. 7>에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 하나의 염색체에는 20개의 퍼지 제어규칙과 다목적 최적화에 필요한 목적함수별 적합도 값 (obj1, obj2) 및 우선순위(rank)와 혼잡도거리(dist)가 저장된다. 각각의 퍼지 제어규칙은 6개의 파라미터를 통해서 표현이 되는데 a는 가우스 소속함수의 중앙부 위치, σ는 표준편차를 각각 나타낸다. 여기서 a1, b1 및 a2, b2는 입력변수를 위한 가우스 소속함수를 나타내고

a3, b3는 출력변수를 위한 가우스 소속함수를 나타낸다.



<Fig. 7> Encoding method

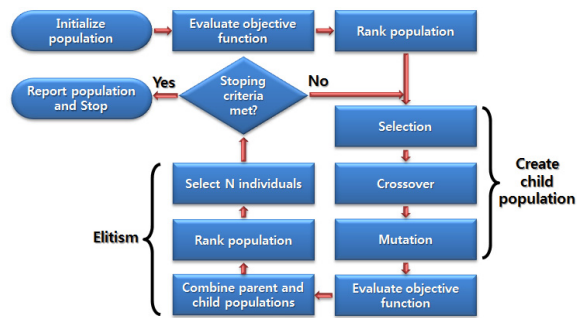
이와 같이 암호화된 퍼지논리제어기를 NSGA-II를 사용해서 최적화하는 과정의 개념도를 <Fig. 8>에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 20층 구조물의 응답 중에서 면진층의 변위와 19층의 가속도를 입력변수로 하고 스마트 최상층 면진시스템을 구성하는 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 출력변수로 하는 퍼지논리제어기가 NSGA-II에 의해서 최적화되는 것을 알 수 있다.



<Fig. 8> Optimization of fuzzy logic controller using NSGA-II

<Fig. 7>에 나타난 방법으로 암호화된 퍼지논리제어기는 목적함수를 이용하여 적합도가 평가되고 평가된 적합도 값을 이용하여 각각의 퍼지제어기에 우선순위 값이 할당된다. 우선순위가 높은 염색체는 임의로 선택되어 유전자 알고리즘의 일반적인 연산자인 crossover, mutation 연산자가 적용되어 새로운 퍼지제어기의 염색체를 생성하게 된다. 이렇게 다목적 유전자알고리즘인 NSGA-II를 이용한 퍼지

제어기의 최적화 과정을 <Fig. 9>에 나타내었다.

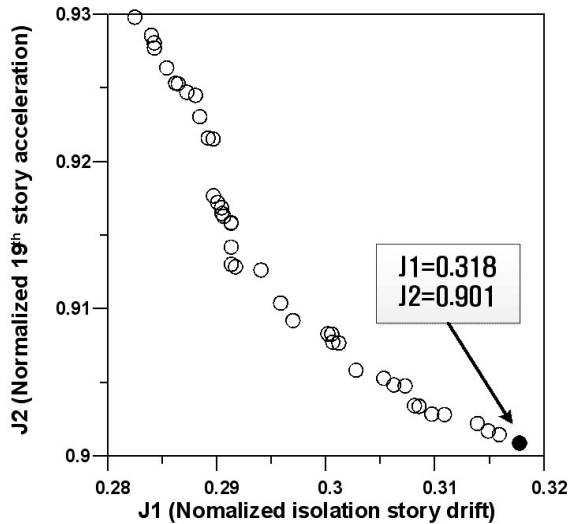


<Fig. 9> Optimization process of NSGA-II

4. 지진응답 제어성능 평가

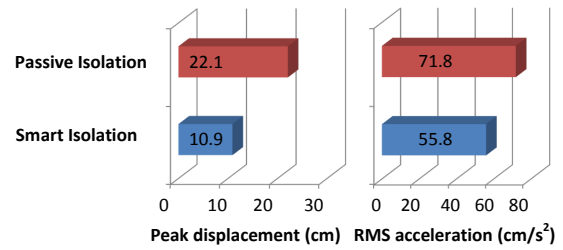
스마트 최상층 면진시스템을 효과적으로 제어할 수 있는 퍼지제어기를 개발하기 위하여 사용한 NSGA-II에서 한 세대를 이루는 개체군은 100개의 개체로 이루어지며 최적화는 1000세대까지 수행하였다. 최적화작업 및 수치해석은 MATLAB 버전 2009b를 사용하였고 SIMULINK를 사용하여 모델링하였다. <Table 1>에서 밝힌 2개의 목적함수를 이용하여 최적화를 수행하였고 500kN MR 감쇠기를 사용한 면진시스템의 최적화 수행결과를 <Fig. 10>에 나타내었다. 그림을 보면 정규화된 면진층 변위를 나타내는 목적함수인 J1은 0.28에서 0.32 사이에 존재하고 정규화된 19층 RMS 가속도를 나타내는 J2는 0.9에서 0.93 사이에 존재한다. 이 값들은 스마트 최상층 면진시스템을 적용했을 경우의 구조물응답을 수동 최상층 면진시스템을 적용한 경우의 응답으로 정규화한 것이므로 1보다 작을수록 스마트 면진시스템의 제어성능이 우수한 것을 나타낸다. 최적화 결과를 보면 스마트 최상층 면진시스템을 적용하면 수동 면진시스템을 적용한 경우에 비하여 면진층 변위를 대략 70% 가량 줄일 수 있고 19층 RMS 가속도는 약 10% 정도 줄일 수 있음을 알 수 있다. 즉 스마트 면진시스템은 수동 시스템에 비하여 최상층의 동적 움직임을 줄여서 안전성을 대폭 향상시키면서도 구조물의 응답을 어느 정도 효과적으로 제어할 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 <Fig. 10>에 나타난 퍼지제어기의 파레토 최적해 집합 중에서 검정색 동그라미로 표시한 제어알고리

즘을 선택하여 스마트 최상층 면진시스템의 제어성능을 검토하였다.

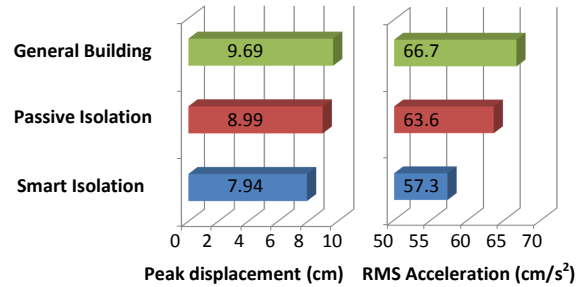


<Fig.10> Optimization results

선택한 퍼지제어기를 사용하여 스마트 최상층 면진시스템을 제어한 경우의 구조물 응답과 TMD와 같은 제어효과를 나타내는 수동 최상층 면진시스템의 응답, 그리고 아무런 제어시스템이 없는 일반 구조물의 응답을 비교하여 <Fig. 11>과 <Fig. 12>에 나타내었다. 수동 면진시스템은 최상층인 20층이 TMD의 질량감쇠기와 같은 역할로 사용되기 때문에 22.1 cm의 작지 않은 최대변위가 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 응답은 스마트 최상층 면진시스템을 활용하면 10.9 cm로 50%이상 줄어든다. 이 변위는 면진층 변위를 포함한 층의 최대변위이다. 이와 함께 최상층의 RMS가속도도 줄어들기 때문에 스마트 면진시스템을 적용하면 구조물의 안전성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 최상층 면진시스템을 적용하면 최상층의 바로 아래층, 즉 19층 RMS 가속도 응답을 효과적으로 줄일 수 있다. <Fig. 12>에 나타낸 바와 같이 스마트 면진시스템을 사용하면 수동 면진시스템에 비하여 응답을 크게 개선시킬 수 있었다.

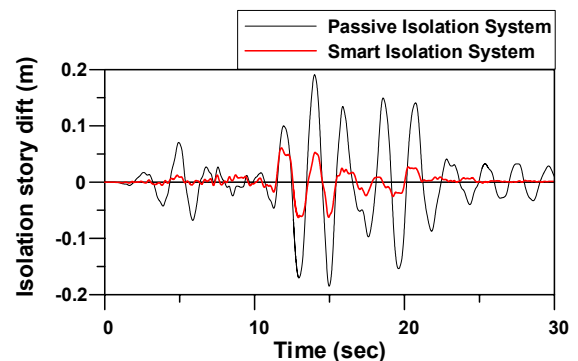


<Fig. 11> 20th story responses



<Fig. 12> 19th story responses

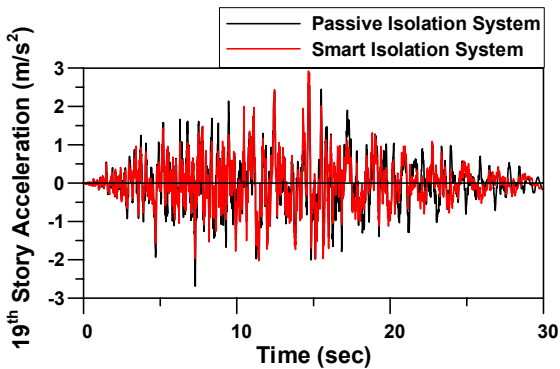
아래의 <Fig. 13>과 <Fig. 14>에서는 제어시스템에 따른 면진층 변위와 19층 가속도의 시간이력을 비교하였다. 구조물의 안전성과 밀접한 관계가 있는 면진층 변위는 <Fig. 11>에 나타낸 20층의 최대변위와 마찬가지로 스마트 면진시스템을 사용하면 응답을 대폭 줄일 수 있는 것을 알 수 있다. 수동 최상층 면진시스템의 경우에도 면진층에 추가적인 수동 감쇠기를 설치하면 면진층 변위와 20층의 변위응답을 줄일 수 있지만 그렇게 한다면 질량감쇠기 역할을 하는 최상층의 움직임이 줄어들어서 구조물응답의 제어효과가 저감될 것이다.



<Fig. 13> Isolator drift time history

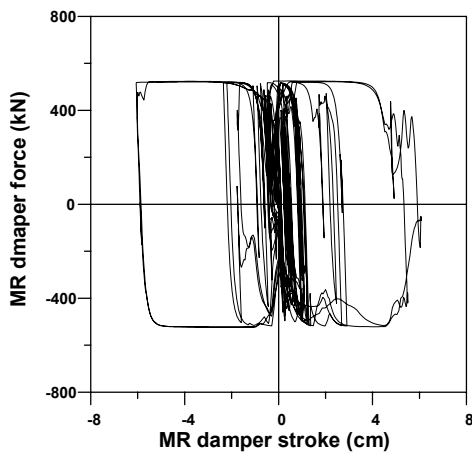
<Fig. 13>의 19층 가속도 시간이력의 비교를 보면 스마트 면진시스템을 사용하면 수동 면진시스템

에 비하여 지진하중이 가해지는 전체 기간에 걸쳐서 응답이 대체적으로 줄었지만 최대 응답을 줄이는데는 효과적이지 않은 것을 볼 수 있는데 이것은 NSGA-II를 이용한 퍼지제어의 최적화 과정에서 19층 가속도의 최대치응답이 아니라 RMS응답을 효과적으로 저감시킬 수 있도록 목적함수를 설정하였기 때문인 것을 판단된다.



<Fig. 14> 19th story acceleration time history

앞에서 생성한 중약진 인공지진하중이 가해졌을 때 발생하는 MR 감쇠기의 힘-변위 관계 그래프를 <Fig. 15>에 나타내었다. 이때 이력곡선 내부면적의 합만큼 지진에너지가 소산되게 되는데 그림에서 보는 바와 같이 MR 감쇠기가 최대 용량 500kN이내에서 적절하게 거동하여 입력되는 지진에너지를 소산시키는 것을 알 수 있다.



<Fig. 15> Force-displacement relationship of MR damper

KBC2009를 바탕으로 생성된 인공지진하중은 중

약진 지진하중으로 생각할 수 있으며 따라서 MR 감쇠기의 양단 상대변위(stroke)는 그림에서 볼 수 있듯이 9cm 이하로 비교적 작은 값이다. 만약 지진하중에 의하여 전기시설이 파괴되어 MR 감쇠기로 전달되는 전류가 끊겨서 제어를 할 수 없는 상황이라고 하더라도 MR 감쇠기는 수동감쇠기와 같은 역할을 할 수 있기 때문에 스마트 면진시스템은 최소한 수동 면진시스템과 같은 제어성을 발휘할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 중약진지역에 위치한 20층 건물의 지진응답 제어를 위하여 스마트 최상층 면진시스템의 적용성을 검토해보았다. 이를 위하여 KBC2009에서 제시한 설계 가속도 응답스펙트럼을 바탕으로 중약진지역의 특성에 적합한 인공지진을 생성하였다. 스마트 최상층 면진시스템을 구성하기 위하여 20층과 19층 사이의 면진층에 저감쇠 탄성베어링과 500kN 용량의 MR 감쇠기를 사용하였다. 이렇게 구성된 스마트 최상층 면진시스템을 효율적으로 제어하기 위하여 퍼지제어 알고리즘을 사용하였다. 퍼지제어기를 최적화하기 위해서 다목적 유전자알고리즘인 NSGA-II를 사용하였고 면진층 변위와 구조물의 19층 RMS 가속도를 목적함수로 사용하였다. 제안된 스마트 최상층 면진시스템의 지진응답 제어성을 수동 최상층 면진시스템과 비교하여 검토하였다.

수치해석결과 중약진지역에 위치한 예제 20층 구조물의 지진응답은 TMD와 같은 역할을 하는 수동 최상층 면진시스템을 이용하여 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다. 그러나 수동 최상층 면진시스템은 최상층을 TMD와 같은 질량감쇠기로 생각하여 19층 이하의 주구조물의 응답을 저감시키는 것을 목적으로 하여 개발되었기 때문에 최상층에서 과도한 응답이 발생할 수 있고 이것은 구조물의 안전성이 저하되는 결과를 초래할 수 있다. 스마트 최상층 면진시스템을 적용한 경우에는 수동 면진시스템을 적용한 경우에 비하여 면진층 변위를 대폭 줄이면서도 구조물의 가속도 응답을 효과적으로 제어

할 수 있었다. 이러한 최상층 면진시스템이 설치되지 않은 일반 구조물의 응답에 비하여 최상층 면진시스템으로 제어한 경우에는 구조물의 응답을 효과적으로 저감시킬 수 있음을 확인하였다. 그러나 강진지역에서는 매우 효과적인 제어성능을 나타낸다고 알려진 스마트 제어시스템이 중약진지역에서 본 연구에서 제안된 최상층 면진시스템의 형태로 적용될 경우에 매우 큰 제어성능의 향상은 나타내지 않는 것으로 나타났다. 스마트 최상층 면진시스템을 활용함으로써 면진층의 변위와 주구조물의 가속도 응답을 적절하게 제어할 수 있었지만 이러한 시스템을 운용하기 위해서는 추가적인 경비가 발생하므로 이러한 시스템 도입에 대한 경제성에 대한 검토는 충분히 이루어져야할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012-0005239).

참고문헌

1. Naeim, F. and Kelly, J.M., Design of Seismic Isolated Structures: from Theory to Practice. Wuley: New York. 1999.
2. Kelly, J.M., "The current state of base isolation in the Unite States", Proc. Second World Conference on Structural Control, Kyoto, Japan, 1999, pp.1043-1052.
3. Kang, J.W., Kim, H.S. and Lim, J.H., "Multi-objective fuzzy control of a spacial structure using smart base isolation system", Journal of the Korean Association for Spacial Structures, Vol. 11, No. 2, 2011, pp.89-99.
4. ASCE, Minimun Design Loads for Building and Other Structures, 2006.
5. Melkumyan, M.G., "Seismic isolation of civil buildings in Armenia", Prog. Struct. Engng

- Mater. Vol.4, No.4, 2002, pp.344-352.
6. Kang, J.W., Kim, T.H. and Kim, H.S., "Performance evaluation of vibration control of a smart top-story isolation system", Journal of the Korean Association for Spacial Structures, Vol. 10, No. 3, 2010, pp.49-56.
7. Sues, R.H., Mau, S.T. and Wen, Y.K., "System identifcation of degrading hysteretic restoring forces", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 114, No. 5, 1988, pp.833- 846.
8. Den Hartog, J.P., Mechanical Vibrations, 4th Edition, McGraw-Hill, N.Y., 1956.
9. Warburton, G.B., "Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters", Earthquake Engrg. and Struct. Dyn., Vol. 10, 1982, pp.381-401.
10. Mamdani, E.H. and Assilian, S., "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 7, No. 1, 1975, pp. 1-13.
11. Deb, K., Pratap, A., Agrawal, S. and Meyarivan, T. "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II," Technical Report No. 200001, Kanpur: Indian Institute of Technology Kanpur, India., 2000.

(접 수 일 자 : 2012년 09월 04일)
 (심사완료일자 : 2012년 11월 15일)
 (게재확정일자 : 2012년 11월 30일)