

중약진지역에 대한 MR 감쇠기로 구성된 스마트 면진시스템의 특성연구

Study of Characteristics of Smart Base Isolation System with MR Damper for Regions of Low-to-Moderate Seismicity

김 현 수¹⁾ · 강 주 원²⁾
Kim, Hyun Su · Kang, Joo Won

요약 : 강진지역에 있는 건축물을 지진하중으로부터 보호하기 위하여 개발된 스마트 면진시스템은 우리나라와 같은 중약진지역에 있는 건축물에 그대로 적용되기에는 많은 한계점이 있다. 따라서 본 연구에서는 강진지역에 있는 건축물을 위한 스마트 면진시스템을 중약진지역에 건설되는 건축물에 적용하였을 때 발생하는 문제점을 검토해보았다. 또한 이를 토대로 중약진지역에 건설되는 건축물을 위한 스마트 면진시스템의 개발시 고려해야할 사항에 대해 알아보았다. 수치해석을 위한 예제구조물로 5층 건물을 선택하였고 스마트 면진시스템은 MR 감쇠기와 저감쇠 탄성베어링을 사용하여 구성하였다. 강진지역과 중약진지역에서 발생하는 지진하중으로는 기존에 발생한 역사지진을 바탕으로 인공지진을 생성하였다. 수치해석결과 스마트 면진시스템이 우수한 성능을 발휘하는 MR 감쇠기의 용량이 강진지역과 중약진지역에 대하여 크게 다른 것을 알 수 있었다. 또한, 강진지역에 건설되는 구조물을 위하여 개발된 스마트 면진시스템을 그대로 중약진지역에 적용하면 면진효과가 상당히 줄어들므로 스마트 제어장치의 특성을 중약진지역에 맞추어 주의 깊게 설계되어야 함을 알 수 있었다.

ABSTRACT : Smart base isolation systems developed for structures in high seismic regions cannot be directly applied to structures in regions of low-to-moderate seismicity, such as Korea. Therefore, the problems that occur by applying the smart base isolation system for high seismic regions to the structures in regions of low-to-moderate seismicity have been investigated in this study. To this end, a five-story building is used as an example, and an MR damper and low damping elastomeric bearings were used to compose a smart base isolation system. Artificial earthquakes are simulated for ground motions in regions of high and low-to-moderate seismicity. Based on numerical simulation results, the MR damper capacity that can provide good control is quite different among regions of high and low-to-moderate seismicity. Moreover, it is noted that the properties of a smart base isolation system for the regions of low-to-moderate seismicity should be carefully designed because the base isolation effects of the smart base isolation system for high seismic regions deteriorate when it is applied to the structures in regions of low-to-moderate seismicity.

핵심용어 : 스마트 면진시스템, 중약진지역, MR 감쇠기, 퍼지로지제어, 지진응답제어

KEYWORDS : smart base isolation system, regions of low-to-moderate seismicity, MR damper, fuzzy logic control, seismic response control

1. 서론

면진시스템은 지진하중을 받는 구조물의 피해를 저감시키기 위하여 지반과 구조물 사이에 면진장치를 설치함으로써 면진층에서 집중적으로 지진동의 에너지를 흡수하고 구조물로 지진동 입력을 크게 저감시킬 수 있는 시스템이다. 이러한 면진

시스템은 지진하중에 대하여 건축 및 토목구조물을 보호하는데 가장 널리 사용되고 있는 방법 중의 하나이다. 마찰진자 베어링이나 적층 고무 베어링과 같은 일반적인 면진장치를 사용하여 구조물을 지반과 격리시키는 방법은 근래에까지 많이 연구되고 사용되고 있는 일반적인 면진기법이다(Naeim과 Kelly, 1999). 최근에 와서는 대형 건축구조물의 밀면변위

1) 선문대학교 건축학부 조교수, 공학박사(hskim72@sunmoon.ac.kr)

2) 교신저자, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사

(Tel: 053-810-2429, Fax: 053-810-4625, E-mail: kangj@ynu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2012년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

를 보다 효과적으로 줄이기 위하여 보조감쇠장치를 추가하는 것에 대한 다양한 연구가 진행 중이다. 그러나 면진된 구조물의 밀면변위를 줄이기 위하여 면진장치에 추가적인 수동감쇠장치를 도입하는 것은 지반과 구조물을 격리시킴으로써 발생하는 여러 가지 이점들을 감소시킬 수 있으며 상부구조물의 절대가속도나 층간변위를 증가시키는 결과를 초래할 수 있다 (Kelly, 1999). 이러한 문제점에 대한 해결책으로 준능동 스마트 제어장치를 도입한 스마트 면진시스템이 제안되어 연구되고 있다(Johnson 등, 1999; Spencer 등, 2000). 준능동 스마트 감쇠기를 이용한 스마트 면진시스템은 면진된 구조물의 절대가속도나 층간변위 등의 증가 없이 구조물의 면진층 변위를 효과적으로 줄이는 좋은 성능을 보여주고 있다(김현수와 Roschke, 2005; 정형조 등, 2005). 이러한 스마트 면진시스템은 주로 일본이나 미국서부 같은 강진지역에서 개발되기 시작하여 많이 연구되고 있으며 일본에서는 그림 1 및 2에 나타낸 바와 같이 MR 감쇠기로 구성된 스마트 면진시스템이 4층 주거용 건물에 실제로 적용된 사례도 있다.



그림 1. 스마트 면진시스템이 설치된 건물



그림 2. 스마트 면진시스템을 구성하는 400kN MR 감쇠기

이렇게 스마트 면진시스템은 지진하중에 대한 효과적인 제어 성능 때문에 강진지역의 구조물을 대상으로 활발히 연구되고 있는 상황이며 우리나라와 같은 중약진지역에 있는 구조물에도 향후 적용가능성이 높은 제어시스템이다. 그러나 강진지역에 건설

되는 구조물의 지진피해를 줄이기 위해서 개발된 스마트 면진시스템을 그대로 중약진지역에 건설되는 구조물에 적용한다면 효과적인 지진제어가 불가능하고 예상치 못한 문제가 발생할 것이다. 따라서 본 연구에서는 강진지역에 위치한 구조물을 위해서 개발된 스마트 면진시스템이 우리나라와 같은 중약진지역에 건설되는 구조물에 적용될 때 어떤 문제가 발생하는지 살펴보고 적용성을 검토하고자 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 5층의 일반적인 전단빌딩을 예제구조물로 사용하였고 5자유도 해석모델을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 스마트 면진시스템은 MR 감쇠기와 저감쇠 탄성베어링으로 구성하였고 제안된 스마트 면진시스템을 제어하기 위하여 퍼지제어 알고리즘(Yen과 Langari, 1999) 및 스카이훅(Narasimhan 등, 2006) 제어알고리즘을 사용하였다. 다양한 준능동 제어알고리즘 중에서 비교적 단순한 연산으로 효과적인 실시간 제어가 가능한 스카이훅 알고리즘을 사용하여 강진지역 및 중약진지역에 대하여 최적의 제어를 수행할 수 있는 MR 감쇠기의 용량을 검토하였다. 선택된 용량을 가진 MR 감쇠기를 사용하여 스마트 면진시스템을 구성하였고 이렇게 구성된 스마트 면진시스템을 최적제어하기 위하여 퍼지제어알고리즘을 사용하였다. 비록 퍼지제어기가 수많은 구조시스템을 제어하는데 이용되어 왔지만 적합한 퍼지 소속함수(membership function)를 선택하고 퍼지 제어규칙을 찾아내는 일은 시간이 많이 소요되는 쉽지 않은 작업이다. 이러한 문제점을 해결하기 본 연구에서는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm; GA)을 사용하여 퍼지제어기를 최적화하였다(Fonseca와 Fleming, 1993). 이때 스마트 면진시스템의 주요한 제어대상인 면진된 구조물의 가속도 응답과 면진층 변위의 저감은 서로 상충된다. 이렇게 상충되는 두 개 이상의 목적을 대상으로 하는 최적화를 수행하기 위하여 다목적 유전자알고리즘을 사용하였다. 그 중에서 본 연구에서는 NSGA-II(a fast elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)를 이용하여 최적해 집합을 찾는다(Deb 등, 2000).

본 연구에서는 강진지역 및 중약진지역의 특성을 나타내는 지진하중을 생성해 내는 것이 매우 중요하다. 수치해석에서 사용되는 중약진 및 강진지역을 나타내는 지반운동을 위하여 인공지진하중을 생성하여 사용하였다. 중약진지역에서 발생하는 지진하중을 생성하기 위해서는 국내 건축구조기준(KBC2009) 설계기준에 근거하여 설계응답스펙트럼을 작성하였고 이를 바탕으로 인공지진하중을 생성하였다. 이때 인공지진하중을 랜덤지진파를 사용하여 생성하지 않고 과거에 발생한 기록된 지진하중을 사용함으로써 실제 발생했던 지진동파형과 동일한 위상특성을 가지는 인공지진하중을 생성하였다. 강진지역의 지진하중을 생성하기 위해서는 미국 건축구조기준(IBC2006) 설계기준에 근거하여 작성한 설계응답스펙트럼을 사용하였다. 이렇게 생성된 강진지역의 특성을 나타내

는 지진하중을 사용하여 예제구조물의 지진응답을 효과적으로 제어할 수 있는 스마트 면진시스템을 설계하였다. 그리고 개발된 스마트 면진시스템이 설치된 구조물에 중약진지역을 나타내는 지진하중을 가하여 지진응답 제어성능을 검토하였다. 이때 스마트 면진시스템의 지진응답 제어성능을 객관적으로 검토하기 위하여 일반적으로 널리 사용되는 LRB 면진시스템이 설치된 예제구조물의 응답과 비교하였다.

2. 수치해석을 위한 인공지진하중의 생성

2.1 목표 설계 응답스펙트럼

전술한 바와 같이 본 연구에서는 중약진지역의 특성을 나타내는 지반운동성분을 생성하기 위하여 KBC2009 설계기준에 근거하여 설계응답스펙트럼을 사용하였고 강진지역의 특성을 나타내는 지진하중을 작성하기 위하여 IBC2006 설계기준에 근거한 설계응답스펙트럼을 사용하였다. KBC2009를 이용한 설계응답스펙트럼을 작성할 때 지역계수는 0.22, 지반종류는 SA를 사용하였다. 이때 SDS는 0.2933, SD1은 0.1173, TO는 0.08초 TS는 0.4초로 각각 계산되었다. IBC2006에 의한 설계응답스펙트럼 작성시 건물이 건설될 위치는 미국 Los Angeles로 선택하였고 이에 따라 SS는 1.70, S1은 0.61으로 결정되었다. Site class는 C로 선택하여 Fa와 Fv는 각각 1.0과 1.3으로 하였다. 이에 따라서 SMS는 1.70, SM1은 0.793, SDS는 1.1333, SD1은 0.5287로 계산되고 TO는 0.0933초 TS는 0.4665초로 각각 계산되었으며 TL은 30층 이상의 건물에서만 의미가 있으므로 본 논문에서는 고려하지 않았다. 이렇게 생성한 KBC2009 및 IBC2006에 근거한 설계응답스펙트럼을 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 IBC2006으로 생성된 설계응답스펙트럼의 단주기 영역 스펙트럼가속도는 1.13g이고 KBC2009에 의해 생성된 단주기 영역의 스펙트럼 가속도는 0.293g로서 약 3.86배의 차이가 나는 것을 알 수 있다.

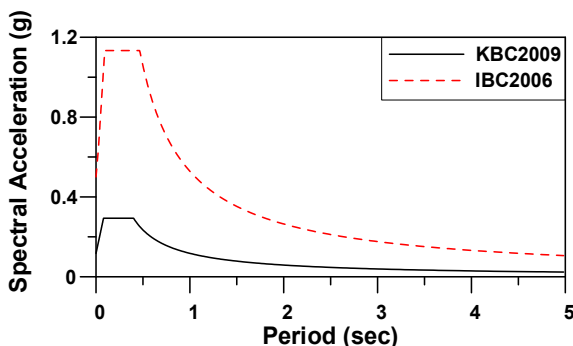


그림 3. 강진 및 중약진지역의 설계응답스펙트럼

2.2 목표 설계 응답스펙트럼에 부합하는 인공지진하중

본 연구에서는 그림 3에 나타난 중약진지역과 강진지역을 대표하는 설계응답스펙트럼을 기반으로 인공지진을 작성한다. 랜덤 진동이론에 의하여 인공지진을 생성하는 방법 중 가장 널리 알려진 방법은 Vanmarcke과 Gasparini(1976)에 의한 방법으로 많이 사용되고 있는 SIMQKE의 기본이론이기도 하다. 이 방법은 인공지진을 다음과 같이 임의의 주기함수의 합으로 나타낼 수 있다고 가정한다.

$$\ddot{u}_g(t) = I(t) \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i t - \phi_i) \quad (1)$$

여기서 $I(t)$ 는 중첩된 조화함수의 외형을 실제 지진과 유사한 형태로 크기를 조절해 주는 포락함수(envelope function)이고, A_i , ω_i , ϕ_i 는 각각 i 번째 성분파의 진폭, 진동수(rad/sec) 및 위상각을 의미한다. 위상각은 $0 \sim 2\pi$ 사이에서 균일한 발생확률을 갖는 랜덤변수이고 진폭은 스펙트럼밀도함수로부터 계산하거나 응답스펙트럼으로부터 계산할 수 있다. 이와 같이 작성된 인공지진을 최대 지반가속도 및 응답스펙트럼의 목표값과 부합하도록 조정하고 기저선(base line)을 보정하는 작업을 거친다. 본 연구에서는 지각 내부의 특성 및 지반 종류의 특성이 반영되어 기록된 역사지진을 가정된 초기의 지진파형으로 사용하여 인공지진을 생성한다. 이를 위해서 가정된 초기 지진파형으로 사용되는 기록된 역사지진의 지진동 파형과 동일한 위상특성을 가지면서 설계용 가속도 응답스펙트럼에 매우 근접한 응답스펙트럼을 갖는 인공지진을 작성하는 방법을 사용한다(전대한 등, 2006). 이 방법은 기존의 SIMQKE에서 사용된 이론과는 달리 가정된 초기지진의 개략적인 파형을 그대로 유지하면서 위상특성의 변화가 전혀 없고 설계용 가속도 스펙트럼에 대응하는 여러 종류의 기록된 역사지진을 바탕으로 하는 인공지진을 손쉽게 대량으로 작성할 수 있다.

과거에 기록된 역사지진을 이산 푸리에(Fourier)변환을 통하여 분해하면 식(1)에서 포락함수를 나타내는 $I(t)$ 를 제외한 형태의 근사식으로 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 식(1)을 구성하는 인자들 중에서 위상각 성분(ϕ_i)은 그대로 유지하면서 각각의 성분파의 진폭(A_i)을 조정하여 선택된 설계용 가속도 응답스펙트럼과 일치하도록 한다. 이때 가속도 응답스펙트럼과 일치시킬 주기영역은 일반적인 건축물의 설계에 사용되는 0초-10초 사이로 선택하였다. 이렇게 조정된 푸리에 진폭을 사용하여 푸리에 역변환을 수행하면 수정된 인공지진의 가속도시간이력을 얻을 수 있다. 여기서 각 주파수

성분의 진폭은 다음의 식과 같이 계산하여 조정한다.

$$A_i' = \frac{S_A^T}{S_A} \times A_i \quad (2)$$

여기서, A_i' 는 수정된 진폭, A_i 는 원래 기록된 지진동의 진폭, S_A^T 는 설계용 가속도 응답스펙트럼, S_A 는 기록된 지진동 그리고 수정된 지진동의 가속도 응답스펙트럼을 나타낸다.

본 연구에서는 전술한 바와 같이 지각내부의 특성 및 지반 종류의 특성이 반영되어 기록된 역사지진을 가정된 초기의 지진파형으로 사용하여 인공지진을 생성한다. 이를 위해서 일반적으로 구조물의 지진응답 거동을 분석할 때 널리 사용되고 있는 El Centro (1940, NS) 지진하중을 사용하였다. 이 El Centro 지진하중의 개략적인 파형을 그대로 유지하면서 위상 특성의 변화가 전혀 없고 설계용 가속도 스펙트럼에 대응하는 인공지진하중을 생성한다. 이러한 방법으로 작성한 인공지진동의 가속도 응답스펙트럼을 생성하여 인공지진하중을 작성할 때 사용한 KBC2009 및 IBC2006에 근거한 설계응답스펙트럼과 함께 그림 4와 그림 5에 각각 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 인공지진하중의 가속도 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼이 전반적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

이렇게 작성된 인공지진동의 시간이력곡선을 그림 6-8에 El Centro 지진하중 원본과 함께 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 생성된 지진하중의 파형이 El Centro 지진하중의 파형과 개략적으로 일치하는 것을 알 수 있다. 기록된 El Centro 지진하중의 최대 지반가속도는 3.07m/s²인데 반하여 KBC2009의 설계응답스펙트럼에 적합하도록 조정된 중앙진지역 인공지진하중의 최대 지반가속도는 1.14m/s²이고 IBC2006 설계응답스펙트럼에 적합하도록 조정된 강진지역 인공지진하중의 최대지반가속도는 4.26m/s²이므로 각각의 지역특성에 맞도록 El Centro 지진하중이 적절하게 조정된 것으로 판단된다.

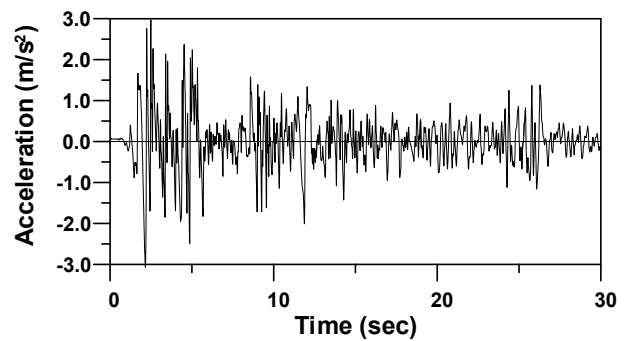


그림 6. El Centro (1940, NS) 지진하중 원본

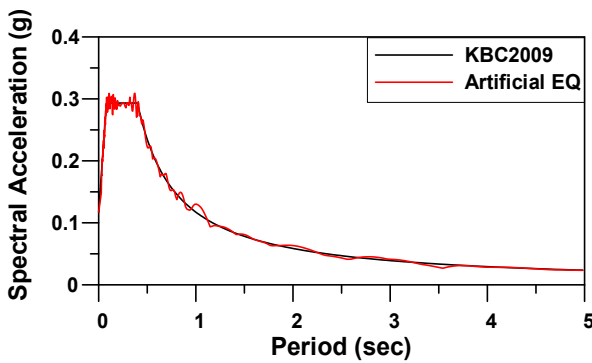


그림 4. KBC2009의 설계응답스펙트럼과 인공지진동의 가속도스펙트럼

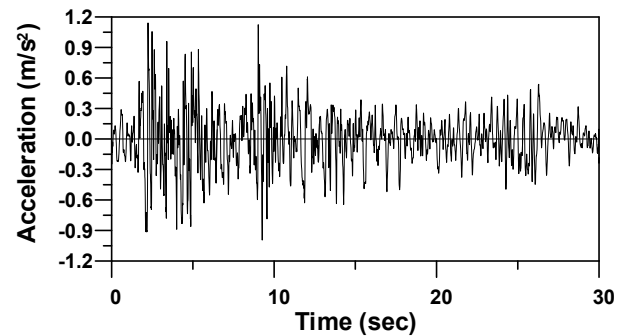


그림 7. KBC2009의 설계응답스펙트럼에 기반한 인공지진하중

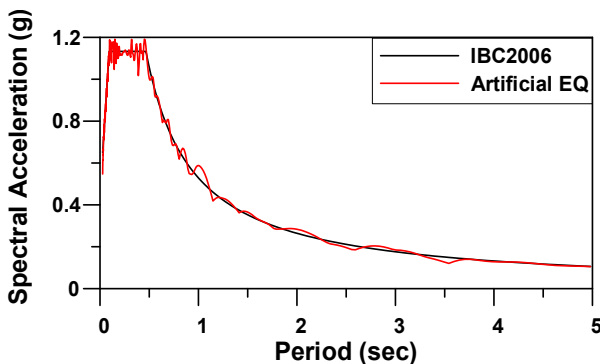


그림 5. IBC2006의 설계응답스펙트럼과 인공지진동의 가속도스펙트럼

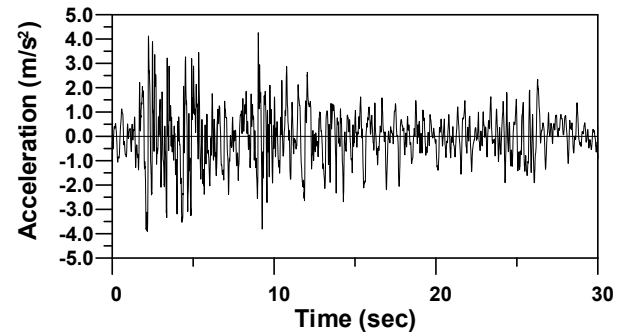


그림 8. IBC2006의 설계응답스펙트럼에 기반한 인공지진하중

3. 스마트 면진시스템이 설치된 예제구조물

3.1 5층 예제구조물

본 연구에서는 그림 9에 나타난 바와 같이 5층 예제구조물을 선택하였고 각 층별 집중질량(m_i)과 기동강성(k_i)으로 표현되는 전단빌딩모델을 사용하여 모형화하였다. 따라서 층별 하나의 자유도로 모형화되어 고정기초 구조물은 5개의 자유도를 면진기초 구조물은 6개의 자유도를 가지는 운동방정식으로 표현된다.

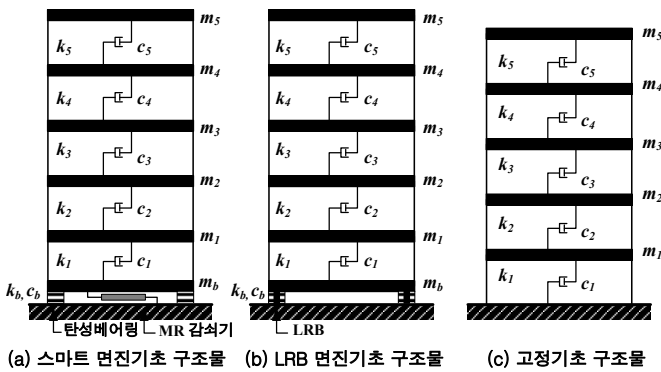


그림 9. 기초종류에 따른 예제구조물 해석모델

지진하중을 받는 고정기초 및 면진기초 구조물의 운동방정식은 각각 아래의 식(3)과 식(4)로 표현할 수 있다.

$$M_1 \ddot{x}_1 + C_1 \dot{x}_1 + K_1 x_1 = -M_1 E_1 \ddot{x}_g \quad (3)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 + C_2 \dot{x}_2 + K_2 x_2 = -M_2 E_2 \ddot{x}_g \quad (4)$$

여기서, E_1 과 E_2 는 지진하중에 대한 위치벡터로서 각각 $[5 \times 1]$ 과 $[6 \times 1]$ 의 크기를 가진 단위벡터(원소가 '1'인 벡터)이다. $x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1$ 와 $x_2, \dot{x}_2, \ddot{x}_2$ 는 각각 고정기초 구조물 및 면진기초 구조물의 변위, 속도, 가속도 벡터를 나타내고 \ddot{x}_g 는 입력되는 지반가속도를 나타낸다. M_1 과 M_2 는 각각 고정기초와 면진기초 건물의 질량행렬로서 식(5) 및 식(6)과 같이 대각행렬로 표현되며 여기서, m_i ($i = 1, 2, \dots, 5$)는 5층 건물의 i 번째 층의 질량을 나타내며, m_b 는 면진기초 구조물의 면진층 질량을 나타낸다. 본 연구에서는 m_i 과 m_b 를 모두 $1.6 \times 10^6 \text{ kg}$ 으로 동일하게 두었다.

$$M_1 = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} m_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} \quad (6)$$

K_1 과 K_2 는 두 가지 구조물의 강성행렬로서 식(7) 및 식(8)과 같이 정의되고 C_1 과 C_2 는 각각의 구조물의 감쇠행렬로 식(9) 및 (10)과 같이 정의된다. 여기서, k_i 및 c_i ($i = 1, 2, \dots, 5$)는 각각 i 번째 층의 강성 및 질량을 나타내며, k_b 및 c_b 는 면진기초 구조물의 면진층 강성 및 감쇠를 나타낸다. 본 연구에서는 k_i 를 $1.2 \times 10^{10} \text{ N/m}$ 로 두었고 c_i 를 $2.4 \times 10^8 \text{ Ns/m}$ 로 두었다. 스마트 면진기초 구조물과 LRB 면진기초 구조물의 면진층 강성(k_b) 및 면진층 감쇠(c_b)는 스마트 면진시스템을 이루는 탄성베어링 및 LRB의 재료적 특성에 의하여 결정되며 이 값은 다음절에 설명한다.

$$K_1 = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & k_4 + k_5 - k_5 & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & -k_5 & k_5 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} k_b + k_1 & -k_1 & \dots & \dots & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & k_4 + k_5 - k_5 & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & -k_5 & k_5 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & \dots & \dots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & c_4 + c_5 - c_5 & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & -c_5 & c_5 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} c_b + c_1 & -c_1 & \dots & \dots & 0 \\ -c_1 & c_1 + c_2 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & c_4 + c_5 - c_5 & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & -c_5 & c_5 \end{bmatrix} \quad (10)$$

이 값을 이용하여 고유치해석 한 결과 고정기초 구조물의 5개 저차모드 고유진동주기는 0.255, 0.087, 0.055, 0.043, 0.038초이다. 위의 식(4)에 나타난 면진기초 구조물의 운동방정식은 스마트 면진시스템에서 MR 감쇠기의 감쇠력과 LRB 면진시스템에서 납의 항복에 의한 저항력이 고려되지 않은 상태이다. 이렇게 면진층에 추가로 도입되는 제어력을 포함한 형태의 면진기초 구조물 운동방정식을 식(11)에 나타내었다.

$$M_2 \ddot{x}_2 + C_2 \dot{x}_2 + K_2 x_2 = -M_2 E_2 \ddot{x}_g + E^F F_c \quad (11)$$

여기서, F_c 는 LRB 면진시스템에서는 삽입된 납의 항복에 의한 비선형 거동으로 발생하는 저항력을 의미하고 스마트 면진시스템에서는 MR 감쇠기의 감쇠력을 나타내며 실시간으로 변하게 된다. 이 값이 구조물의 실시간 응답 및 제어명령에 의하여 계산되는 방법은 다음 절에서 설명하였다. E^F 는 면진시스템이 설치된 위치를 나타내는 위치행렬로서 면진층이 설치된 첫번째 자유도 위치에서만 1의 값을 가지고 나머지 자유도에서는 0의 값을 가진다.

3.2 LRB 면진시스템

본 연구에서는 스마트 면진시스템의 지진응답 제어성을 비교검토하기 위하여 일반적으로 널리 사용되는 LRB 면진시스템을 사용하여 예제구조물을 제어하였다. LRB 면진시스템을 설계하기 위해서는 면진시스템의 진동주기를 우선 결정해야 한다. 면진시스템의 진동주기는 예상되는 지진하중에 대하여 상부구조물의 가속도응답 뿐만 아니라 변위응답을 적절하게 줄일 수 있는 값으로 선택되어야 한다. 이를 위해서는 대상 지진하중을 사용하여 가속도-변위 스펙트럼을 그려보는 것이 필요하다. 따라서 그림 7과 8에 나타난 중앙진 및 강진지역을 대표하는 인공지진하중을 사용하여 가속도-변위 스펙트럼을 작성하였고 이를 그림 10과 11에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 변위응답스펙트럼과 가속도응답스펙트럼은 일반적으로 반비례 관계를 나타낸다. 즉, 구조물의 주기가 길어지면 가속도응답은 감소하는 반면에 변위응답은 증가하는 경향이 있고 구조물의 주기가 짧아지면 그 반대의 경향을 나타낸다. 따라서, 두 응답사이에 서로 상충관계(trade-off)가 발생하므로 면진시스템을 설계할 때에는 두 가지 응답을 적절하게 저감시킬 수 있는 주기를 면진된 구조물의 1차모드 진동주기로 선택하는 것이 필요하다. 그림 10과 11에서 보면 구조물의 주기가 증가함에 따라서 가속도응답이 급격히 감소하다가 3.5초 이후에는 가속도응답의 저감은 거의 없고 변위응답이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 3.5초를 면진된 구조물의 1차모드 진동주기로 선택하였다.

LRB 면진시스템의 이력거동을 모형화하기 위하여 일반적으로 그림 12에 나타난 이선형(bi-linear)모델이 널리 사용되고 있다. 여기서 LRB의 초기전단강성은 $K_{initial}$ 로 표현되었고 항복 후 전단강성은 K_{yield} 로 표현되었다. 그러나 이러한 이선형모델은 면진된 구조물의 가속도응답을 과대평가하는 것으로 알려져 있다(Skinner 등, 1993). 이에 반하여 Bouc-Wen 모델(Wen, 1976)은 실험 데이터와 매우 유사

한 결과를 나타내므로 본 연구에서는 Bouc-Wen 모델을 사용하여 LRB 면진시스템을 모형화하였다.

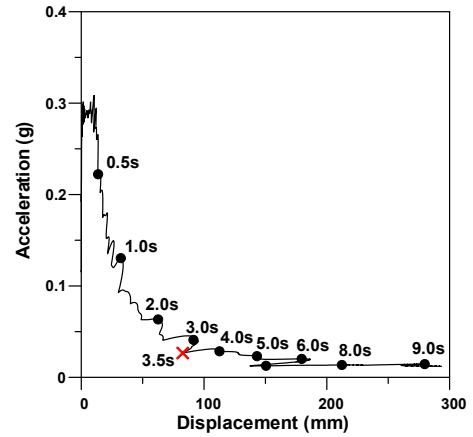


그림 10. 중앙진지역 인공지진하중의 변위-가속도 스펙트럼

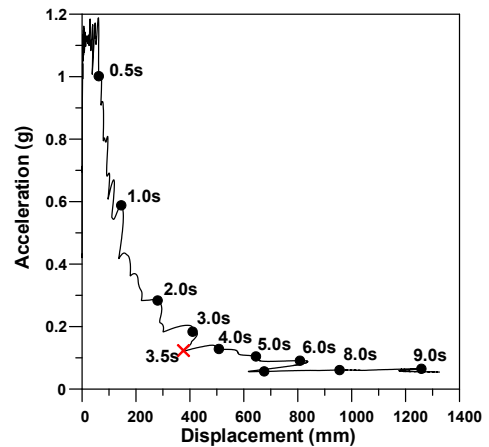


그림 11. 강진지역 인공지진하중의 변위-가속도 스펙트럼

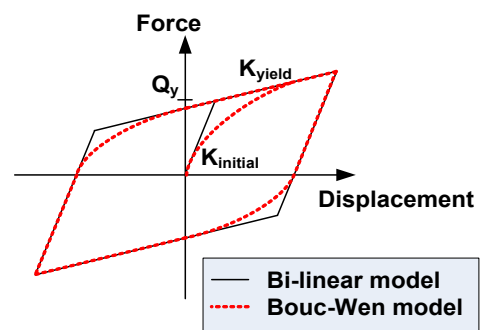


그림 12. LRB 면진시스템의 이력모델

일반적으로 LRB 면진시스템에서 발생하는 횡방향 저항력은 식(12)와 같이 표현할 수 있는데

$$f_{LRB} = Q_{pb} + k_b x_b + c_b \dot{x}_b \quad (12)$$

여기서, Q_{pb} 는 납의 항복하중이고 k_b 와 c_b 는 각각 LRB 고무부분의 수평강성과 점성감쇠계수를 의미하며 x_b 와 \dot{x}_b 는 베어링의 상대변위 및 속도를 나타낸다. Q_{pb} 는 아래의 식(13)과 같이 표현되는데

$$Q_{pb} = (1 - K_{yield}/K_{initial}) \cdot Q_y \quad (13)$$

여기서, Q_y 는 납과 탄성고무를 합한 LRB의 항복하중이고 $K_{initial}$ 과 K_{yield} 는 각각 LRB의 납이 항복하기 전의 강성과 항복한 후의 강성을 나타낸다. Bouc-Wen 모델에서는 LRB의 이력거동을 표현하기 위하여 z 변수를 도입해서 $Q_{hyst} = zQ_{pb}$ 와 같이 사용하며 z 변수는 식(14)와 같이 표현된다.

$$\dot{z} = -\gamma z |\dot{x}_b| |z|^{n-1} - \beta \dot{x}_b |z|^n + A \dot{x}_b \quad (14)$$

여기서 β , γ , A , n 은 모두 이력곡선의 형태를 나타내는 변수로서 $n = 1$, $A = 2\gamma = 2\beta = K_{initial}/Q_y$ 로 두었다.

본 연구에서 사용하는 5층 예제구조물은 9.6X106kg의 총 질량을 가지고 있다. 면진시스템을 적용한 예제구조물의 1차 모드 고유진동주기를 3.5초로 만들기 위하여 LRB의 납이 항복한 후 탄성베어링만의 강성을 $3.1 \times 10^7 \text{N/m}$ 로 두었다. 이 값은 LRB의 항복후 강성(K_{yield})이 되고 이것은 LRB 중 고무부분만의 강성(k_b)과 같다. 따라서 LRB를 설계할 때 결정해야할 중요한 변수로는 항복전과 항복후의 강성비 ($K_{initial}/K_{yield}$)와 LRB의 항복하중(Q_y)이 남게 된다. 본 연구에서는 파라미터 스터디를 통하여 면진층 변위와 구조물 가속도를 동시에 적절하게 제어할 수 있는 값으로 LRB의 항복하중(Q_y)을 전체구조물 무게의 5%로 선택하였고 $K_{initial}/K_{yield}$ 를 5로 선택하였다. LRB 면진시스템의 감쇠는 2%로 하여 저감쇠 시스템으로 구성하였다.

3.3 스마트 면진시스템

본 연구에서는 대표적인 스마트 제어장치 중에 하나인 MR 감쇠기를 사용하여 스마트 면진시스템을 구성하였다. MR 감쇠기는 작은 전력으로 변화시킬 수 있는 자기장에 반응하여 구조물에 가해지는 저항력의 크기를 실시간으로 조절할 수 있고 기계적으로 단순하면서도 빠른 반응속도를 가지고 외부 온도가 변하거나 불순물이 첨가되어도 항복응력의 변화가 거의 없이 일정한 성능을 유지하는 장점 때문에 최근에 많은 연구가 진행되고 있고 건축 및 토목구조물 제어에 다양한 형

태로 활용되고 있다. 이러한 MR 감쇠기의 동적 거동을 모사하기 위한 수치해석 모델로서는 많은 연구자들에 의해서 널리 사용되고 있는 Bouc-Wen 모델(Wen, 1976)을 사용하였다. 이 모델은 전단형태의 MR 감쇠기의 거동을 잘 모사하며 실제규모의 MR 감쇠기 모델링에도 효과적으로 적용될 수 있다고 알려져 있다. 이 모델에서 MR 감쇠기의 감쇠력은 아래의 식(14)와 같이 표현된다.

$$f = c_0 \dot{x}_d + \alpha z \quad (14)$$

여기서, x_d 는 감쇠기 양단의 상대변위(stroke)를 나타내고 변수 c_0 와, α , z 는 아래의 식(15), (16), (17)을 통해서 각각 얻을 수 있다.

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b}u \quad (15)$$

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (16)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}_d| |z|^{n-1} - \beta \dot{x}_d |z|^n + A_m \dot{x}_d \quad (17)$$

식(15)는 감쇠상수를 식(16)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 입력 전압(u)의 함수로서 표현되며 입력전압의 값에 따라서 감쇠력이 매 순간 변화할 수 있다. 식(14)와 (17)의 변수 z 는 MR 감쇠기의 이력거동을 모사하기 위한 가상의 변수로서 매 개변수 γ , n , β , A_m 은 항복 전후의 기울기와 같이 감쇠기의 이력거동의 형상을 결정하는데 사용되는 계수들이다. 본 연구에서 사용한 MR 감쇠기는 Bani-Hani와 Sheban의 연구(2006)에서 사용된 최대용량이 50kN을 가지도록 설계된 모델로서 입력전압이 0V일 때 passive-off 상태를, 5V일 때 passive-on 상태를 나타낸다. 이러한 MR 감쇠기를 모사하는데 사용한 계수들의 값을 표 1에 나타내었고 입력전압에 따른 MR 감쇠기의 이력거동 변화 그래프를 그림 13에 나타내었다.

표 1. MR 감쇠기 해석모델의 변수 특성치

변수	값	변수	값
c_{0a}	0.44N·s/cm	γ	3cm ⁻¹
c_{0b}	4.4N·s/cm	n	1
α_a	10872N/cm	β	3cm ⁻¹
α_b	49616N/(cm·V)	A_m	1.2

MR 감쇠기의 여러 가지 특성 중 제어성능을 결정하는 가장 중요한 요소는 passive-off 상태의 최대 제어력에 대한 passive-on 상태의 최대 제어력의 비로 나타내는 제어범위(dynamic range)이다. 그림 13에 나타낸 50kN MR 감쇠기의 제어범위는 약 24이다. 본 연구에서는 강진지역 및 중약진지역에 적합한 스마트 면진시스템을 검토하기 위하여 이를 구성하는 MR 감쇠기의 최대 제어용량을 변화시킨 파라미터 연구를 수행한다. 이때 MR 감쇠기의 최대용량을 변화시켜도 제어범위는 24로 계속 유지하였다.

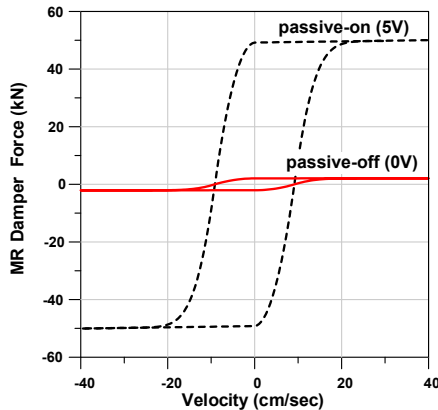


그림 13. MR 감쇠기의 힘-속도 이력곡선

정의된다. 본 연구에서는 MR감쇠기를 사용하여 스마트 면진 시스템을 구성하므로 제어알고리즘에 의해서 결정된 제어 명령을 바탕으로 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 조절한다. MR 감쇠기로 전달되는 최대 명령전압은 5V이므로 아래의 식에서 V_{max} 는 5V를 V_{min} 은 0V를 의미한다. 아래의 식에서 볼 수 있듯이 스카이훅 제어알고리즘은 면진층의 변위와 속도의 단순한 계산으로 제어명령을 결정하므로 계산량이 매우 작아서 실시간 제어에 상당히 유리하다.

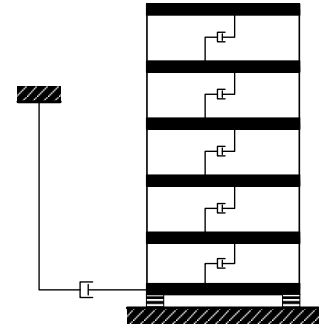


그림 14. 스카이훅 감쇠장치의 개념도

$$V = V_{max} \quad x \cdot v \leq 0 \quad (18)$$

$$V = V_{min} \quad x \cdot v > 0 \quad (19)$$

4. 제어알고리즘

4.1 스카이훅 제어알고리즘

본 연구에서는 강진 및 중약진지역에 위치한 예제구조물을 효과적으로 제어할 수 있는 MR 감쇠기의 용량을 결정하기 위하여 MR 감쇠기의 최대 제어력을 변화시켜서 수치해석을 수행하였다. 이때 스마트 면진시스템을 제어할 적절한 제어알고리즘이 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 준능동 제어알고리즘 중에서 계산과정이 매우 단순하면서도 효과적인 제어성능을 발휘하는 스카이훅 제어알고리즘을 사용하였다. 스카이훅 제어알고리즘의 개념도를 그림 14에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 스카이훅 제어알고리즘은 면진층에 연결된 감쇠기를 하늘에 고정시킨 것과 같은 효과를 내도록 MR 감쇠기의 감쇠력을 조절함으로써 지진하중에 의한 구조물의 응답을 최소화하는데 효과적이다. 일반적으로 이 제어알고리즘은 지반과 격리되어 움직이는 구조체의 응답을 최소화시키는데 효과적이므로 자동차의 현가시스템에 효과적으로 이용되고 있다. 이 제어알고리즘은 평형위치에 대한 면진층의 변위(x)와 면진층의 지반에 대한 상대속도(v)의 관계를 이용하여 식(18), (19)에 나타낸 바와 같이 간단한 수식으로

4.2 유전자알고리즘으로 최적화한 퍼지제어알고리즘

앞 절에서 소개한 스카이훅 제어알고리즘을 사용한 파라미터 연구를 통해서 적절한 MR 감쇠기의 용량이 선택되면 선택된 MR 감쇠기로 구성된 스마트 면진시스템을 보다 효과적으로 제어하기 위하여 퍼지제어알고리즘을 사용한다. 퍼지제어기의 입력변수는 스마트 면진시스템이 설치되는 면진층의 변위와 예제구조물 최상층(5층)의 절대가속도로 하였고 스마트 면진시스템을 구성하는 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 출력변수로 하였다. 퍼지제어기는 면진층 변위 및 구조물 가속도를 입력받아서 입력소속함수를 사용하여 입력퍼지변수로 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. 본 연구에서 입력 및 출력소속함수는 가우스함수를 사용하였고 소속함수의 형태와 퍼지규칙은 다목적 유전자알고리즘(NSGA-II)을 사용해서 최적화하였다(Deb 등, 2000). 이러한 최적화 과정의 개념도를 그림 15에 나타내었다.

다목적 최적화문제에서는 본질적으로 서로 우열을 판별할 수 없는 다수의 최적해가 존재하게 되는데 이를 파레토 최적해집합

이라고 한다. 이는 다수의 목적함수가 서로 상충하는 특성 때문에 trade-off가 발생한다. 즉, 스마트 면진장치가 설치된 구조물에서 명령전압을 크게 하면 면진층의 변위가 감소하지만 구조물의 가속도는 증가하게 된다. 반대로 명령전압을 작게 하면 지반과의 격리효과가 커져서 구조물의 가속도는 감소하지만 면진층 변위가 증가하게 된다. 이처럼 두 응답이 서로 상충되기 때문에 다목적 유전자알고리즘의 목적함수로 사용하였다. 사용된 두 목적함수는 표 2에 나타난 바와 같이 스마트 면진시스템이 설치된 구조물의 응답을 LRB가 설치된 구조물의 응답으로 나누어 정규화된 값으로 표현하였다. 따라서 이 값이 1보다 작으면 스마트 면진시스템이 LRB 면진시스템보다 더 우수한 제어 성능을 나타내는 것이고 1보다 크면 그 반대를 의미한다.



그림 15. 다목적 유전자알고리즘을 이용한 퍼지제어의 최적화 개념도

표 2. 다목적 최적화의 목적함수

목적함수	내용
f_1	스마트 면진시스템이 적용된 경우의 최대 면진층 변위
	LRB면진시스템이 적용된 경우의 최대 면진층 변위
f_2	스마트 면진시스템이 적용된 경우의 최대 5층 가속도
	LRB면진시스템이 적용된 경우의 최대 5층 가속도

5. 지진응답 제어성능 평가

5.1 MR 감쇠기의 용량변화에 따른 제어성능 분석

본 연구에서는 강진지역 및 중약진 지역에 적합한 스마트 면진시스템의 특성을 분석하기 위해서 그림 7 및 8에 나타난 인공지진하중을 적용하여 그림 9(a)의 스마트 면진시스템이 설치된 예제구조물에 대한 파라미터 연구를 수행하였다. 강진지역 인공지진하중이 가해지는 예제구조물의 경우에는 스마트 면진시스템을 구성하는 MR 감쇠기의 용량을 2,500kN에서

7,500kN까지 변화시켜서 수치해석을 수행한 후 최대 면진층 변위, 최대 5층 가속도 및 RMS 5층 가속도를 정리하여 그림 16-18에 나타내었다.

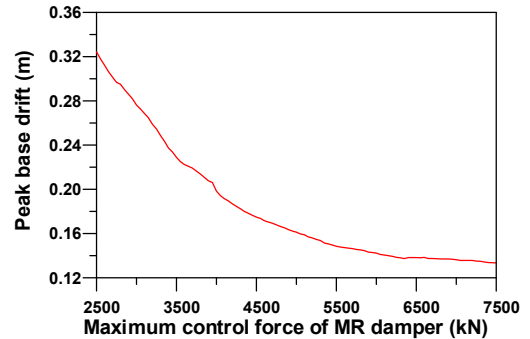


그림 16. MR감쇠기 용량에 따른 최대 면진층변위 (강진지역)

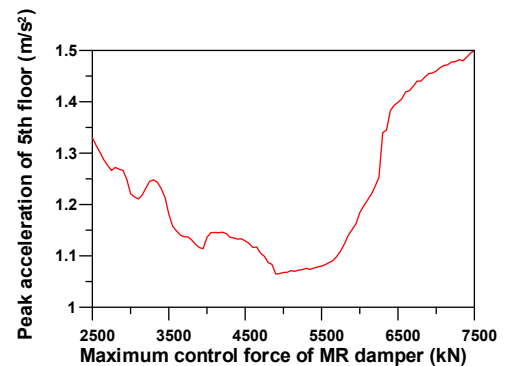


그림 17. MR감쇠기 용량에 따른 최대 5층 가속도 (강진지역)

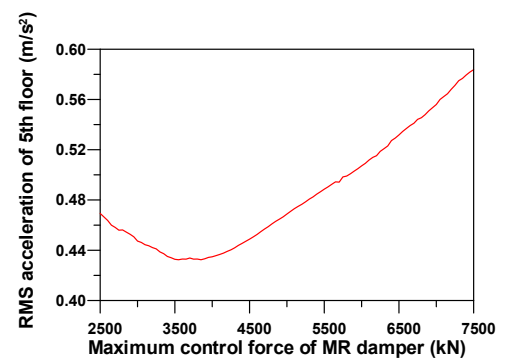


그림 18. MR감쇠기 용량에 따른 RMS 5층 가속도 (강진지역)

그림 16을 보면 MR 감쇠기의 용량이 커질수록 면진층에 도입되는 감쇠력이 커져서 면진층 변위가 줄어드는 것을 알 수 있다. 그림 17에 나타난 최대 5층 가속도의 변화를 보면 MR 감쇠기의 용량이 커질수록 가속도응답이 줄어들다가 대략 5,000kN을 넘어서면 다시 가속도응답이 급격히 늘어나는 것을 알 수 있다. RMS 5층 가속도응답의 경우에도 MR 감쇠기의 용량이 늘어남에 따라 응답이 줄어들다가 다시 늘어나는데 가장 작은 응답을 나타내는 MR 감쇠기의 용량은

대략 3,700kN이다. 앞에서 설명한 바와 같이 면진층의 변위는 MR 감쇠기의 용량이 증가할수록 줄어들기 때문에 강진지역 인공지진하중에 대해서 스마트 면진시스템이 가장 효과적인 제어성능을 발휘하는 MR 감쇠기의 용량은 가속도응답 제어효과에 의하여 결정된다. 본 연구에서는 면진층 변위와 함께 최대 5층 가속도를 진동제어 목표로 선택하였으므로 강진지역 지진하중에 대해서 적절한 제어성능을 나타내는 MR 감쇠기의 용량으로 5,000kN을 선택하였다.

중약지역 인공지진하중이 가해지는 예제구조물의 경우에는 스마트 면진시스템을 구성하는 MR 감쇠기의 용량을 50kN에서 5,000kN까지 변화시켜서 수치해석을 수행한 후 최대 면진층변위, 최대 5층 가속도 및 RMS 5층 가속도를 비교하여 그림 19-21에 나타내었다.

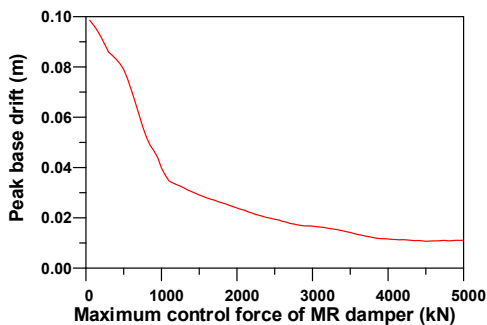


그림 19. MR감쇠기 용량에 따른 최대 면진층변위 (중약진지역)

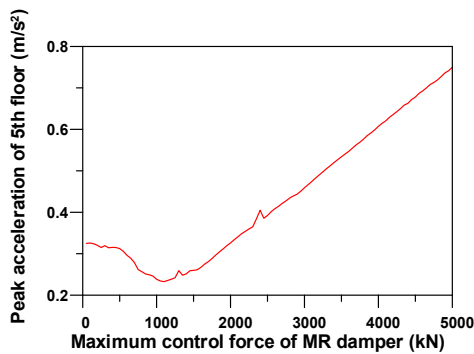


그림 20. MR감쇠기 용량에 따른 최대 5층 가속도 (중약진지역)

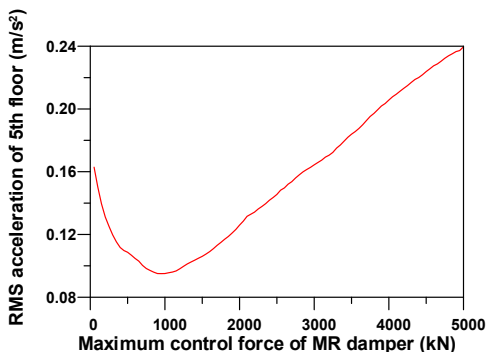


그림 21. MR감쇠기 용량에 따른 RMS 5층 가속도 (중약진지역)

그림 19에 나타난 최대 면진층변위는 강진지역의 경우와 마찬가지로 MR 감쇠기의 용량이 커질수록 응답이 급격히 줄어들다가 4,000kN을 지나면 줄어드는 경향이 감소하는 것을 볼 수 있다. 최대 5층 가속도 및 RMS 5층 가속도의 경우에는 MR 감쇠기의 용량이 커짐에 따라서 응답이 줄어들다가 대략 1,000kN을 지나면 다시 가속도 응답이 급격하게 줄어든다. 따라서 중약진지역에 위치한 예제구조물의 지진응답을 효과적으로 제어하기 위해서는 1,000kN 용량의 MR 감쇠기를 사용하여 스마트 면진시스템을 구성하는 것이 효과적이라는 것을 알 수 있다.

5.2 강진지역의 스마트 면진시스템에 대한 중약진지역의 적용성 평가

앞 절에서는 강진지역 인공지진하중에 대해서 5,000kN 용량의 MR 감쇠기로 구성된 스마트 면진시스템이 가장 효과적인 제어성능을 나타낸다는 것을 확인하였다. 이때 MR 감쇠기를 제어하기 위하여 비교적 단순한 준능동 제어알고리즘인 스카이훅 제어알고리즘을 사용하였다. 그러나 이 제어알고리즘은 MR 감쇠기와 같은 비선형성(nonlinearity)이 강한 스마트 제어장치를 효과적으로 제어하는데에는 많은 한계점을 가진다. 따라서, 전술한 바와 같이 스마트 면진시스템의 보다 효과적인 제어를 위하여 고유의 견실성(robustness)과 비선형(nonlinearity) 및 불확실성(uncertainty)을 쉽게 다룰 수 있는 능력이 있는 퍼지제어알고리즘을 사용하였다. 다목적 유전자 알고리즘인 NSGA-II를 사용하여 최적화를 수행한 후 얻은 퍼지제어알고리즘의 파레토 최적해집합을 그림 22에 나타내었다. 이때 그림 8에 나타난 강진지역을 대표하는 인공지진동을 사용하였다. 한 세대를 이루는 개체군은 100개로 하였고 최적화는 1000세대까지 수행하였다. 최적화작업 및 수치해석은 MATLAB 버전 2009b를 사용하였고 SIMULINK를 사용하여 모델링하였다.

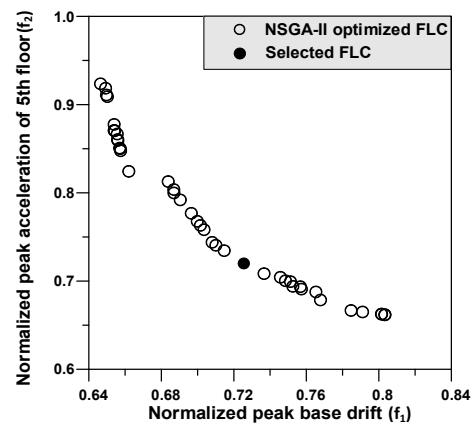


그림 22. 강진지역 지진하중에 대한 다목적 최적화 결과

그림 22를 보면 모든 개체의 f_1 과 f_2 의 값이 1보다 작으므로 LRB 면진시스템보다 스마트 면진시스템이 더 우수한 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 파레토 최적해 집합에 있는 총 42개의 퍼지제어알고리즘 중에서 그림에서 검정색 원으로 나타난 제어알고리즘을 선택하여 수치해석을 수행하였다. 선택된 제어알고리즘의 f_1 과 f_2 값은 각각 0.726과 0.720으로 면진층 변위와 구조물 가속도를 동시에 효과적으로 제어할 수 있는 제어알고리즘이다.

수치해석결과 각 시스템의 지진응답 제어성능을 정량적으로 파악하기 위하여 최적 설계된 LRB 면진시스템과 스마트 면진시스템 그리고 고정기초를 가진 예제구조물의 최대치 지진응답을 비교하여 그림 23과 24에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 LRB 면진시스템을 사용하면 면진층에서 16.8cm의 변위가 발생하지만 스마트 면진시스템을 사용하면 12.2cm의 변위가 발생한다. 고정기초 예제구조물의 경우에는 5층 가속도응답이 750.8cm/s²이 발생하였고 LRB 면진시스템을 적용하였을 경우에는 이를 94.6cm/s²로 줄일 수 있었다. 스마트 면진시스템을 적용할 경우에는 이를 68.1cm/s²로 더욱 줄일 수 있다.

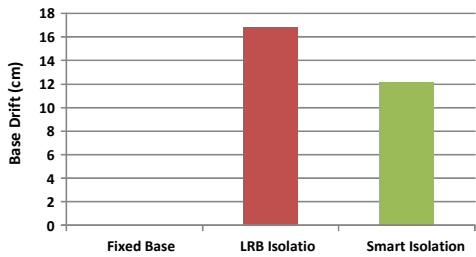


그림 23. 강진 지진하중에 대한 최대 면진층변위 비교

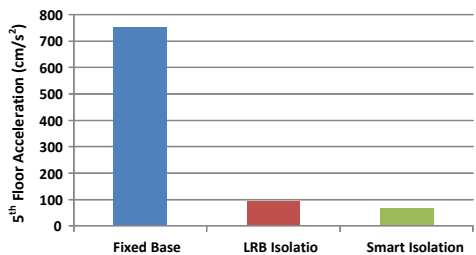


그림 24. 강진 지진하중에 대한 최대 5층 가속도 비교

위와 같이 강진지역 인공지진하중이 가해진 5층 예제구조물에 설치된 스마트 면진시스템은 LRB 면진시스템에 비하여 면진층 변위와 구조물의 가속도를 동시에 효과적으로 저감시킬 수 있음을 확인하였다. 이렇게 강진지역에 있는 대공간 구조물을 위하여 개발된 스마트 면진시스템을 중약진지역에 있는 구조물에 적용할 때 나타나는 제어성능을 검토하기 위하여 그림 7에 나타낸 중약진지역을 대표하는 인공지진을 사용

하여 수치해석을 수행하였다. 그림 25와 26에 나타난 수치해석결과를 보면 스마트 면진시스템이 설치된 구조물의 응답이 LRB 면진시스템이 설치된 응답보다 더 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 강진지역에 위치한 구조물을 위해서 개발된 스마트 면진시스템을 중약진지역에 위치한 구조물에 적용하면 효과적으로 지진응답을 제어할 수 없음을 확인할 수 있다. 따라서 강진지역에 있는 구조물을 위하여 개발된 스마트 면진시스템을 그대로 중약진 지역에 있는 구조물에 적용하면 구조물의 동적응답을 증폭시킬 수 있으므로 MR 감쇠기의 용량 등 스마트 면진시스템을 새롭게 설계해야함을 알 수 있다. 이때 MR 감쇠기의 passive-on 용량은 스마트 면진시스템의 최대 제어력을 결정하게 되므로 매우 신중하게 선택해야한다.

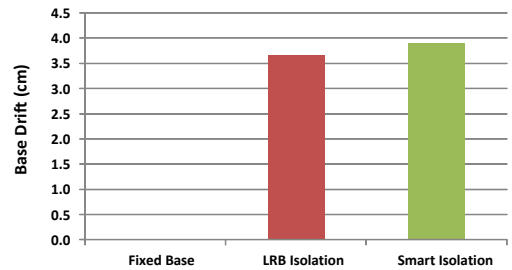


그림 25. 중약진 지진하중에 대한 최대 면진층변위 비교

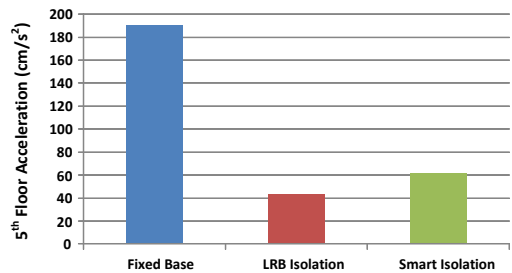


그림 26. 중약진 지진하중에 대한 최대 면진층변위 비교

6. 결론

본 연구에서는 강진지역 및 중약진지역에 위치한 구조물의 지진응답을 효과적으로 저감할 수 있는 스마트 면진시스템의 특성을 검토하였다. 이를 위해서 강진 및 중약진지역 지진하중을 대표하는 인공지진하중을 생성하였고 5층 예제구조물에 적용하여 지진응답을 분석하였다. 스마트 면진시스템의 지진응답 제어성능을 객관적으로 비교하기 위하여 최적 설계된 LRB 면진시스템과 제어성능을 비교하였다. 본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구에서 선택한 5층 예제구조물에 대하여 강진 지진하중이 가해질 경우에는 5,000kN 용량의 MR 감쇠기

를 사용하여 스마트 면진시스템을 구성하는 것이 가장 우수한 지진응답 제어성능을 나타내었다.

- (2) 동일한 구조물에 대하여 중약진 지진하중이 가해지는 경우에는 1,000kN MR 감쇠기를 사용하는 것이 우수한 지진응답 제어성능을 보여준다. 즉, 동일한 구조물에 설치되는 스마트 면진시스템이라도 지진지역에 따라서 스마트 제어장치의 용량이 적절하게 선택되어야함을 알 수 있다.
- (3) 제안된 스마트 면진시스템의 지진응답 제어성능을 최적 설계된 LRB 면진시스템과 비교한 결과 스마트 면진시스템을 적용하면 LRB 면진시스템을 적용한 경우에 비하여 면진층 변위와 구조물 가속도 모두 큰 폭으로 더 줄일 수 있었다.
- (4) 강진지역에 설치된 구조물을 위하여 개발한 스마트 면진시스템을 그대로 중약진 지역의 구조물에 적용한다면 구조물의 지진응답이 LRB 면진시스템을 적용한 경우에 비하여 오히려 증가할 수도 있음을 확인하였다. 따라서 강진지역의 스마트 면진시스템을 그대로 중약진 지역에서 사용하는 것은 위험하며 MR 감쇠기 용량 등을 재설계하는 것이 필요함을 알 수 있다.
- (5) 본 연구에서는 강진지역 및 중약진지역을 각각 대표하는 한 개의 지진하중을 사용하였으므로 본 연구에서 나타난 결과가 일반화될 수는 없다. 그러나, 본 연구의 결과와 같이 스마트 면진시스템의 용량을 잘못 결정하면 일반 면진시스템에 비하여 성능이 저하될 가능성이 있으므로 신중하게 설계하는 것은 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0015166).

참 고 문 헌

김현수, Roschke P.N. (2005) 퍼지관리제어기법을 이용한 스마트 면진 벤치마크 건물의 제어, 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제9권, 제4호, pp.77-85.

전대한, 강병두, 김재용 (2006) 설계용 스펙트럼에 적합한 인공지진파에 의한 비선형 응답 특성의 분석, 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제10권, 제5호, pp.63-71.

정형조, 최강민, 장지은, 이인원 (2005) MR감쇠기가 설치된 지진격리 건물의 스마트 진동제어, 한국지진공학회 학술대회 논문집, 한국지진공학회, pp.544-551.

Bani-Hani, K.A. and Sheban, M.A. (2006) Semi-active neuro-control for base-isolation system using magnetorheological (MR) dampers, *Earthquake*

Engng Struct. Dyn., Vol. 35, pp.1119-1144.

Deb, K., Pratap, A., Agrawal, S., and Meyarivan, T. (2000) 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.*

Fonseca, C.M. and Fleming, P.J. (1993) Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization. *Genetic Algorithms: Fifth International Conference*, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, pp.416-423.

Johnson, E.A., Ramallo, J.C., Spencer, B.F. Jr., and Sain, M.K. (1999) Intelligent base isolation systems, *Proc. Second World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, pp.367-376.

Kelly, J.M. (1999) The current state of base isolation in the United States, *Proc. Second World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, Vol. 1, pp.1043-1052.

Naeim, F. and Kelly, J.M. (1999) *Design of Seismic Isolated Structures: from Theory to Practice*. Wiley: New York.

Narasimhan, S., Nagarajaiah, S., Johnson, E.A., and Gavin, H.P. (2006) Smart base isolated benchmark building part I: problem definition, *Journal of Struct Control and Health Monitoring*, Vol. 13, pp.573-588.

Ramallo, J.C., Johnson, E.A., and Spencer, B.F. Jr. (2002) "Smart" Base Isolation Systems, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 128, No. 10, pp.1088-1100.

Skinner, R.I., Robinson, W.H., and Verry, G.H. (1993) *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley & Sons, Chichester, England.

Spencer, B.F. Jr., Johnson, E.A., and Ramallo, J.C. (2000) Smart isolation for seismic control, *JSME Int. J. Ser. C.*, Vol. 43, No. 4, pp.704-711.

Vanmarcke, E.H. and Gasparini, D.A. (1976) *SIMQKE: A program for artificial motion generation*, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

Wen, Y.K. (1976) Method of Random Vibration of Hysteretic Systems, *J. Engng. Mech. Division, Proceedings, ASCE*, Vol. 102, pp. 249-263.

Yen, J. and Langari, R. (1999) *Fuzzy logic: intelligence, control, and information*. New York: Prentice Hall, Inc.

(접수일자 : 2012. 01. 09 / 심사일 2012. 01. 12 / 심사완료일 2012. 06. 01)