열차진동하중을 받는 첨단시설물의 스마트 면진시스템을 이용한 미진동제어

Microvibration Control of High Technology Facilities Subjected to Train-induced Excitation using Smart Base Isolation

김 현 수* 강 주 원** 김 영 식***
Kim, Hyun-Su Kang, Joo-Won Kim, Young-Sik

요 약

정밀한 공정을 요구하는 반도체 및 TFT-LCD와 같은 첨단 기술산업 공장의 미진동 문제는 제품의 성능에 영향을 주는 주요한 인자로서 정밀기기 및 부품의 제조공정에 있어서 중요시 되어왔다. 본 논문에서는 이러한 첨단시설물의 미진동 문제를 해결하기 위하여 기초면진시스템의 미진동제어성능을 검토하였다. 이를 위하여, 기차에서 유발되는 인공지반운동을 생성하여 시간이력해석을 수행하였고 3층 예제구조물을 사용하였다. 수치해석을 통하여 수동 기초면진 및 스마트 면진시스템의 미진동제어성능을 고정기초구조물과 비교하였다. 그 결과 스마트 면진시스템이 미진동제어에 있어서 우수한 제어성능을 나타내는 것을 확인하였다.

Abstract

Microvibration problem of high-technology facilities, such as semi-conductor plants and TFT-LCD plants, has been considered as important factors that affects the performance of products and thus it is regarded as important in facilities with high precision equipments. In this paper, various base isolation control systems are used to investigate their microvibration control performance. To this end, train-induced ground acceleration is used for time history analysis and three-story example building structure is employed. Microvibration control performance of passive and smart base isolation systems have been investigated in this study. Based on numerical simulation results, it has been verified that smart base isolation system can control microvibration of a high-technology facility subjected to train-induced excitation.

키워드 : 첨단시설물, 미진동제어, 스마트 면진시스템, MR 감쇠기

Keywords : High-technology facility, Microvibration control, Smart base isolation system, MR damper

1. 서 론

정밀한 공정을 요구하는 반도체 및 TFT-LCD와 같은 첨단 기술산업 공장의 미진동 문제는 제품의 성능에 영향을 주는 주요한 인자로서 공기청정 문제와 함께 종래부터 정밀기기 및 부품의 제조공정에 있어서 중요시 되어왔다. 현재의 첨단 정밀기기 공장에서는 요구되고 있는 미진동의 허용한계는 다른 분야에 비해 대단히 엄격한 실정이며 또한 첨단 IT

부품산업의 발전 속도를 고려할 때 이 요구사항은 날로 엄격해 질 것으로 예상된다. 따라서 첨단 정밀 부품의 설계시 뿐만 아니라 이러한 부품을 생산하는 공장의 건설시에도 이와 같은 사항을 사전에 충분히 고려하여 초기부터 이에 대한 대책을 수립하여야 한다. 건축구조공학적인 측면에서 볼 때 반도체나 TFT-LCD 공장과 같은 대형 구조물에서 서브 마이크로 수준의 미진동을 다루어야 하는 문제는 매우 어려운 과제로 남아있다. 이는 진동응답을 결정하는 구조와 재료는 복잡하고 다양한 형태를 갖고 있는 반면에 다루어야 할 동적응답은 극히 작은 마이크로미터 이하의 값을 다루어야 하기 때문이다. 현재 일반적으로 널리 사용되고 있는 진동설계기준

* 정회원, 선문대학교 건축학부 조교수

** 정회원, 영남대학교 건축학부 교수

*** 교신저자, 정회원, 대구과학대학교 건축인테리어과 부교수
Tel: 053-320-1182 Fax: 053-320-1777
E-mail : yosikim@tsu.ac.kr

은 BBN (Bolt Beranek and Newman) 기준^{1,2)}으로 1/3 옥타브밴드 속도 스펙트럼을 사용하여 첨단시설물 공장의 미진동 허용기준을 나타내고 있다.

지진하중과 같은 대형 자연재해가 발생했을 때 첨단시설물이 설치된 구조물의 진동수준을 BBN 기준에서 제시하는 미진동 허용기준으로 맞추는 것을 거의 불가능한 일이다. 지진하중을 받는 첨단제품 생산공장의 진동제어 목표는 고가의 첨단시설물이 파괴되지 않고 보호하는데 있다. 이러한 연구는 건축구조분야에서 지진하중에 대하여 구조물의 제진 및 면진의 방법으로 일반적으로 널리 사용되고 있는 면진베어링이나 점성/점탄성 감쇠기 또는 능동/준능동 제어장치를 사용한 내용이 주를 이루고 있다. 첨단부품 생산공장이 가동 중에 받는 외부하중으로 가장 일반적인 것은 차량이나 열차하중과 같은 교통하중으로 이러한 하중이 가해질 경우에도 공장은 운영되어야 하므로 진동수준을 BBN 기준으로 맞추는 것이 필요하다.

건축 및 토목구조물의 지진응답을 제어하기 위하여 가장 널리 사용되고 있는 제어장치 중의 하나가 면진시스템이다. 일반적으로 면진시스템은 지반과 구조물 사이에 다양한 형태의 베어링을 삽입하여 지진에 의한 지반의 동적 움직임으로부터 구조물을 격리시키는 것을 목적으로 하고 있다³⁾. 근래에는 면진된 구조물의 응답뿐만 아니라 면진층의 변위를 줄이기 위하여 능동 및 스마트 제어장치를 일반적인 면진장치와 함께 사용하는 방법에 관한 연구가 수행되어 왔다. 그러나 능동제어장치는 안정성(stability)과 견실성(robustness) 등에 관한 우려와 더불어 실제 지진하중이 왔을 때 공급되지 못 할 수도 있는 큰 전력의 필요성 때문에 실제로 널리 사용되지 못하고 있다. 이러한 능동 면진시스템의 단점을 해결하고 수동 면진시스템보다 우수한 면진성능을 발휘할 수 있도록 하기 위하여 기존의 면진장치에 스마트 감쇠기를 조합한 스마트 면진시스템이 제안되었다^{4,5)}. 최근까지 이러한 스마트 면진시스템에 대한 연구가 활발히 수행되고 있으며 구조물의 지진응답제어에 매우 우수한 제어성능을 성능을 보여주고 있다⁶⁻⁸⁾. 그러나 이러한 스마트 면진시스템을 활용하여 첨단시설물의 미진동제어를 수행한 연

구는 아직 국내외적으로 찾아보기 어려운 상태이다. 따라서 본 연구에서는 열차진동하중을 받는 첨단시설물의 미진동제어를 위하여 MR 감쇠기를 이용하여 구성된 스마트 면진시스템을 적용하였고 그 제어성능을 검토하였다. 스마트 면진시스템의 미진동 제어성능을 객관적으로 분석하기 위하여 열차하중이 가해지는 고정기초구조물과 일반적인 LRB 면진시스템을 적용한 구조물의 동적응답을 비교하였다. 스마트 면진시스템을 구성하는 MR 감쇠기를 제어하기 위해서 비교적 단순한 연산과정으로 우수한 제어성능을 나타내는 스카이크 제어알고리즘⁹⁾을 사용하였다.

2. 첨단시설물을 위한 BBN 진동기준

첨단시설물 기계장치의 미진동제어를 위하여 사용되고 있는 일반적인 진동기준이 여러 개 존재하고 있다²⁾. 그 중에서 BBN 진동기준이 현재 실무에서 가장 널리 사용되고 있다. 첨단기계장치 시설물을 위한 BBN 진동기준은 1/3 옥타브밴드 속도 스펙트럼의 형태로 표현되며 <그림 1>에 나타난 바와 같이 VC-A에서 VC-E까지가 정밀진동기준에 해당한다. 여기서 1데시벨(dB)은 $1\mu\text{inch/s}$ 와 상응한다. <그림 1>에 나타난 진동등급별 사용 장비 및 용도를 정리하여 <표 1>에 나타내었다.

<그림 1> 첨단시설물을 위한 BBN 진동기준

〈표 1〉 BBN 진동기준의 등급별 용도

진동등급	사용 장비 및 용도
일반적인 진동환경	일반 작업장
	사무실
	거주지 및 computer system
	100X 현미경, 로봇 수술실, 일반 연구실 기타
정밀진동 Class : A	400X 현미경, 측정실 Optical or Other Balance Optical Comparators, 전자장비, 생산 설비 등 *. 검사, Probe Test, 생산 지원설비 및 장비
정밀진동 Class : B	400X이상 현미경, 정밀 안과, 신경계 수술실, 방진설비를 갖춘 광학장비, 반도체 생산설비 등 * Aligner, Stepper등 3 μm 이상 선폭 노광장치
정밀진동 Class : C	30000X 전자현미경, Magnetic Resonance Imagers, 반도체 생산설비 *. Aligner Steppers등 1 μm 선폭 노광장치 =>1M DRAM 정도
정밀진동 Class : D	30000X 이상 전자현미경, Mass Spectrometer 세포이식 장치, 반도체 생산설비 *. Aligner Steppers등 0.5 μm 선폭 노광장치 =>4M DRAM 정도
정밀진동 Class : E	Unisolated laser and Optical research System *. Aligner Steppers등 0.25 μm 선폭 노광장치 =>64M DRAM 정도

<그림 1>에 나타난 VC-A에서 VC-E의 기준곡선은 8에서 80Hz 진동수 구간에서 허용 RMS 속도가 2000 $\mu\text{inch/s}$ (50 $\mu\text{m/s}$)부터 125 $\mu\text{inch/s}$ (3 $\mu\text{m/s}$)까지 각각 대응하는 것을 볼 수 있다. <그림 1>에는 ISO (International Standard Organization) 가이드 라인에서 제시하는 일반적인 진동환경에서의 기준도 함께 나타내었다. 본 연구에서는 BBN 진동기준을 이용하여 각 시스템의 진동제어성능을 평가하므로 각각의 면진시스템이 설치된 구조물의 1층 속도 시간이력을 먼저 구한 후 이 응답을 1/3 옥타브 밴드로 변환하여 표현한다. 수치해석을 통하여 얻은 속도응답 시간이력 ($\dot{x}(t)$)의 1/3 옥타브 밴드는 그것의 푸리에변환^{10,11)}($X(f)$)을 통하여 다음의 식 (1)과 같이 얻을 수 있다.

$$X_{1/3}(f_c) = \left[\sum_{0.89f_c}^{1.12f_c} |X(f)|^2 \Delta f \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서, Δf 은 FFT(Fast Fourier Transform)의 진동수 간격이고 f_c 는 중심진동수이다. 1/3 옥타브 밴드의 중심진동수는 $f_c = 2^{(m/3)}$ 에 의해서 결정되며 여기서 m 은 임의의 정수이다. 1/3 옥타브 밴드의 중

요한 특징은 밴드의 폭이 중심진동수의 약 23%에 해당한다는 것이다. 위의 식 (1)을 통해서 계산된 1/3 옥타브 밴드는 $0.89f_c$ 와 $1.12f_c$ 진동수 구간에서 일정한 값을 가지므로 결과적으로 그래프가 히스토그램처럼 나타난다. 최종적으로 BBN 진동기준에서 데시벨(dB) 값으로 표현하기 위해서 아래의 계산과정을 거친다.

$$Y(f_c) = 20\log_{10} [X_{1/3}(f_c)/\tilde{x}_0] \quad (2)$$

여기서 $\tilde{x}_0$ 는 1 $\mu\text{inch/s}$ 이다. 예를 들어 <그림 1>에서 VC-E 곡선은 125 $\mu\text{inch/s}$ 값을 기준으로 하는데 이 값은 식 (2)에 의하여 $20\log_{10}(125) = 41.938\text{ dB}$ 로 계산된다.

3. 인공열차하중

본 연구에서는 첨단제품 생산공장의 주변에서 상시 발생할 수 있는 열차하중을 사용하여 스마트 면진시스템의 미진동제어성능을 검토하였다. 열차에 의해서 유발되는 지반운동에 대한 연구가 여러 연구자들에 의해서 수행되었다¹²⁻¹⁴⁾. Tekemiya¹⁵⁾는 철로 근처에서 계측된 지반진동의 특성을 분석하였다. 철로 근처에서 계측된 지반가속도의 푸리에 스펙트럼은 주로 0-50Hz의 주파수성분을 가지고 있다. 그러나 저주파수 및 고주파수 성분은 철로에서의 길이가 멀어질수록 급격히 감쇠되어 사라진다. 철로에서 25m 떨어진 위치에서의 지반가속도 측정치는 주로 10-30Hz 사이의 주파수성분을 가지고 있다. 본 연구에서는 열차유발 지반운동을 생성하기 위하여 널리 사용되고 있는 수정된 Kanai-Tajimi 파워스펙트럼 필터를 이용하여 인공의 열차유발 지반운동 데이터를 생성한다. 본 연구에서 사용한 Kanai-Tajimi 필터를 식 (3)에 나타내었다.

$$S_{xx}(\omega) = \frac{[1 + 4\zeta_{g1}^2 (\omega/\omega_{g1})^2] (\omega/\omega_{g2})^2 S_0^2}{\{ [1 - (\omega/\omega_{g1})^2]^2 + 4\zeta_{g1}^2 (\omega/\omega_{g1})^2 \}} \quad (3)$$

$$\times \frac{1}{\{ [1 - (\omega/\omega_{g2})^2]^2 + 4\zeta_{g2}^2 (\omega/\omega_{g2})^2 \}}$$

여기서, ω_{g1} , ζ_{g1} , ω_{g2} , ζ_{g2} 는 지반운동을 생성하기 위한 변수로써 본 연구에서는 각각, 6Hz, 0.58, 35Hz, 0.45의 값을 사용하였다. S_0 는 생성된 인공지반운동과 계측된 지반운동의 최대속도값을 맞추기 위한 변수이다. 식 (3)에 나타난 지반운동 스펙트럼의 주요 주파수대역은 6-35Hz이다. 스마트 면진시스템의 제어성능을 강조하기 위해서는 예제구조물에 공진을 일으킬 수 있는 하중을 사용해야 하지만 이러한 것은 실제 발생할 수 있는 현상을 왜곡할 수 있으므로 계측된 열차유발 지반운동을 적절하게 표현할 수 있는 인공열차하중을 사용하였다. 정상상태의 지반운동 시간이력을 15초 길이로 생성한 후 생성된 지반운동 가속도 시간이력데이터에 식 (4)에 나타난 포락함수를 곱해서 최종적인 지반운동 가속도 시간이력을 생성한다.

$$\psi(t) = \begin{cases} t^2/t_1^2 & 0 < t \leq t_1 \\ 1 & t_1 < t \leq t_2 \\ (t_f - t)^2/(t_f - t_2)^2 & t_2 < t \leq t_f \end{cases} \quad (4)$$

여기서, t_1 은 5초, t_2 는 10초, t_f 는 시간이력 데이터의 전체 길이로 15초이다. 이렇게 생성된 열차유발 지반운동의 가속도 및 속도를 <그림 2, 3>에 나타내었다.

〈그림 2〉 인공열차하중의 지반가속도

〈그림 3〉 인공열차하중의 지반속도

4. 예제구조물 및 면진시스템

4.1 3층 예제구조물

본 연구에서는 <그림 4>에 나타난 바와 같이 3층 예제구조물을 선택하여 미진동제어를 위한 연구에 사용하였고 각 층별 집중질량(m_i)과 기둥강성(k_i)으로 표현되는 전단빌딩모델을 사용하여 모형화 하였다. 따라서 층별 하나의 자유도로 모형화되어 고정 기초 구조물은 3개의 자유도를 가지는 운동방정식으로 표현된다. 예제구조물은 대략 22m×22m 크기의 평면을 가지고 있다고 가정한다. 구조물의 1, 2, 3층의 질량은 각각 $m_1=350,250\text{kg}$, $m_2=262,690\text{kg}$, $m_3=175,130\text{kg}$ 을 가지고 강성은 $k_1=4,728,400\text{kN/m}$, $k_2=312,230\text{kN/m}$, $k_3=157,610\text{kN/m}$ 이고, 감쇠값은 $c_1=4369\text{kNs/m}$, $c_2=291.3\text{kNs/m}$, $c_3=145.6\text{kNs/m}$ 를 갖는다. 이러한 특성치를 가지는 3층 예제구조물에 대하여 고유치해석을 수행한 결과 1, 2, 3차 모드的高유진동수는 3.447, 7.372, 19.155 Hz로 계산되었다. 또한 예제구조물의 1, 2, 3차 모드의 감쇠비는 각각 1%, 2.14%, 5.56%이다. 본 예제구조물의 1층의 강성이 상대적으로 큰 이유는 클린룸이 1층에 존재하기 때문이다.

〈그림 4〉 3층 전단빌딩 예제구조물

4.2 면진시스템

본 연구에서는 지진하중에 대하여 구조물의 피해를 저감시키기 위하여 가장 널리 사용되고 있고 그 효과가 검증된 제어장치인 면진시스템이 첨단시설물을 위한 미진동제어에도 효과가 있는지 검토해보고자 한다. 이를 위해서 가장 일반적으로 사용되고

있는 수동 면진시스템인 LRB 면진시스템과 MR 감쇠기로 구성된 스마트 면진시스템을 이용하였다. 면진시스템이 적용된 구조물의 특성은 앞에서 설명한 고정기초 구조물과 같다. 여기서 추가된 면진층의 질량은 $m_4=250,000\text{kg}$ 으로 하였다. 면진층의 강성(k_4)은 면진된 구조물의 1차모드 고유진동 주기가 1.5초가 되도록 조정하였고 면진층의 감쇠비는 2%로 두어 감쇠상수 c_4 를 얻었다.

〈그림 5〉 면진시스템을 적용한 예제구조물

지진하중을 받는 고정기초 및 면진기초 구조물의 운동방정식은 각각 아래의 식 (5)와 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$M_1 \ddot{x}_1 + C_1 \dot{x}_1 + K_1 x_1 = -M_1 E_1 \ddot{x}_g \quad (5)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 + C_2 \dot{x}_2 + K_2 x_2 = -M_2 E_2 \ddot{x}_g \quad (6)$$

여기서, E_1 과 E_2 는 지진하중에 대한 위치벡터로서 각각 $[3 \times 1]$ 과 $[4 \times 1]$ 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 (7) 및 식 (8)과 같이 대각행렬로 표현되며 여기서, m_i ($i=1,2,3$)는 3층 건물의 i 번째 층의 질량을 나타내며, m_4 는 면진기초 구조물의 면진층 질량을 나타낸다. K_1 과 K_2 는 두 가지 구조물의 강성행렬로서 식 (9) 및 식 (10)과 같이 정의되고 C_1 과 C_2 는 각각의 구조물의 감쇠행

렬로 식 (11) 및 (12)와 같이 정의된다. 여기서, k_i 및 c_i ($i=1,2,3$)는 각각 i 번째 층의 강성 및 질량을 나타내며, k_4 및 c_4 는 면진기초 구조물의 면진층 강성 및 감쇠를 나타낸다. 스마트 면진기초 구조물의 면진층 강성 및 면진층 감쇠는 LRB 면진기초시스템과 같게 하였다.

$$M_1 = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$K_1 = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & -k_1 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 & 0 \\ -k_1 & 0 & 0 & k_4 + k_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & -c_1 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 & 0 \\ -c_1 & 0 & 0 & c_4 + c_1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

앞의 식(6)에 나타난 면진기초 구조물의 운동방정식은 스마트 면진시스템에서 MR 감쇠기의 감쇠력이 고려되지 않은 상태이다. 이렇게 면진층에 추가로 도입되는 제어력을 포함한 형태의 면진기초 구조물 운동방정식을 식 (13)에 나타내었다.

$$M_2 \ddot{x}_2 + C_2 \dot{x}_2 + K_2 x_2 = -M_2 E_2 \ddot{x}_g + E^F F_c \quad (13)$$

여기서, F_c 는 스마트 면진시스템에서 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 네 번째 자유도 위치에서만 1의 값

을 가지고 나머지 자유도에서는 0의 값을 가진다.

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 형태로 활용되고 있다. 이러한 MR 감쇠기의 동적 거동을 모사하기 위한 수치해석 모델로서는 많은 연구자들에 의해서 널리 사용되고 있는 Bouc-Wen 모델¹⁶⁾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 입력전압(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 매개변수 γ , n , β , A_m 은 항복 전후의 기울기와 같이 감쇠기의 이력거동의 형상을 결정하는데

사용되는 계수들이다. 본 연구에서 사용한 MR 감쇠기는 Bani-Hani와 Sheban의 연구¹⁷⁾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 2>에 나타내었다.

<표 2> 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. Bani-Hani와 Sheban의 연구에서 사용된 MR 감쇠기의 제어범위는 약 24이다. 본 연구에서는 열차진동을 받는 예제구조물의 미진동제어를 위해 최적의 제어성능을 나타내는 MR 감쇠기의 용량을 찾기 위하여 MR 감쇠기의 최대 제어용량을 변화시킨 파라미터 연구를 수행하였다. 이때 MR 감쇠기의 제어용량을 변화시켜도 제어범위는 24로 계속 유지하였다. 연구결과 본 연구에서는 25kN의 MR 감쇠기가 가장 우수한 제어성능을 나타내었다. 본 연구에서 사용한 MR 감쇠기의 입력전압에 따른 이력거동 변화 그래프를 <그림 6>에 나타내었다.

<그림 6> MR 감쇠기의 힘-속도 이력곡선

4.3 스카이훅 제어알고리즘

본 연구에서는 열차유발 하중을 받는 첨단시설물의 미진동을 효과적으로 제어하기 위하여 스마트 면진시스템의 적용가능성을 검토하였다. 이때 스마트 면진시스템을 제어할 적절한 제어알고리즘이 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 준능동 제어알고리즘 중에서 계산과정이 매우 단순하면서도 효과적인 제어성능을 발휘하는 스카이훅 제어알고리즘을⁹⁾ 사용하였다. 3층 예제구조물에 적용된 이상적인 스카이훅 제어알고리즘의 개념도를 <그림 7>에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 스카이훅 제어알고리즘은 면진층의 응답을 감소시키기 위하여 수동 감쇠기를 구조물과 “sky” 사이에 연결한 것을 볼 수 있다. 이러한 가상의 시스템이 존재한다면 스카이훅 댐퍼는 다양한 외부의 동적하중에 대하여 주구조물이 정상 평형상태에서 벗어나려는 것을 방해하는 역할을 하게 된다. 그러나 이러한 시스템은 실제 구현이 불가능하기 때문에 본 연구에서는 MR 감쇠기를 이용하여 가상의 스카이훅 시스템을 모사한다. 즉, 스카이훅 제어알고리즘의 목적은 스카이훅 감쇠기가 발휘하는 감쇠력을 스마트 면진시스템을 이용하여 제공하는 것이다. 일반적으로 이 제어알고리즘은 지반과 격리되어 움직이는 구조체의 응답을 최소화 시키는데 효과적이므로 자동차의 현가시스템에 효과적으로 이용되고 있다. 이 제어알고리즘은 제어하고자 하는 면진층의 속도(v_1)와 면진층의 지반에 대한 상대속도($v_1 - v_2$)의 관계를 이용하여 <표 3>에 나타난 바와 같이 4가지 조건의 경우에 대하여 제어방법이 결정된다. 이러한 조건은 식(18), (19)에 나타난 바와 같이 간단한 수식으로 정의된다. 본 연구에서는 MR감쇠기를 사용하여 스마트 면진시스템을 구성하므로 제어알고리즘에 의해서 결정된 제어명령을 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 변위

와 속도의 단순한 계산으로 제어명령을 결정하므로 계산량이 매우 작아서 실시간 제어에 상당히 유리하다.

<그림 7> 이상적인 스카이훅 감쇠장치의 개념도

<표 3> 스카이훅 제어 알고리즘

조건	부호관계	감쇠력 종류	감쇠력 크기
	$v_1 > 0$ $v_1 - v_2 > 0$	인장력	최대
	$v_1 > 0$ $v_1 - v_2 < 0$	압축력	최소
	$v_1 < 0$ $v_1 - v_2 < 0$	인장력	최대
	$v_1 < 0$ $v_1 - v_2 > 0$	압축력	최소

$$V = V_{max} \quad v_1(v_1 - v_2) \geq 0 \quad (18)$$

$$V = V_{min} \quad v_1(v_1 - v_2) < 0 \quad (19)$$

5. 수치해석을 통한 제어성능 평가

본 절에서는 앞에서 생성한 인공열차진동 지반운동을 3층 예제구조물에 가한 후 고정기초 구조물, LRB 면진시스템, 스마트 면진시스템의 미진동 제어성능을 검토하였다. 이를 위하여 시간이력해석을 수행하였고 이때 시간 간격을 0.001초 해석 시간은 15초로 하였다. 수치해석은 MATLAB 버전 2009b를 사용하였고 SIMULINK를 사용하여 모델링하였다.

해석 결과 우선 아무런 진동제어장치를 사용하지

얇은 고정기초구조물을 살펴보았다. 고정기초구조물의 1층 속도시간이력을 계산한 후 이 값을 속도스펙트럼으로 변환하여 <그림 8>의 1/3 옥타브밴드 형태로 나타내었다. 미진동응답의 비교를 편하게 하기 위하여 BBN 진동기준의 정밀진동 등급을 함께 표현하였다. 그림에서 보는 바와 같이 중심주파수 16-25Hz 구간에서 정밀진동 VC-A등급의 기준을 넘어서는 것을 알 수 있다. 특히 중심주파수 20Hz 구간의 미진동 속도레벨은 86.8dB로서 ISO기준의 사무소 진동등급도 초과하는 것을 볼 수 있다. 따라서 <그림 2> 및 <그림 3>에 나타난 인공열차 하중이 가해지는 3층 고정기초구조물은 첨단제품 생산 공장으로서 사용하기에는 부적절하고 일반 사무소의 용도로서도 특정 주파수 레벨에서 기준을 조금 초과하는 진동이 예측된다.

<그림 8> 고정기초구조물 1층의 속도스펙트럼

일반적으로 구조물의 지진응답 저감을 위하여 널리 사용되고 있는 LRB 시스템이 구조물의 미진동 제어에 얼마나 효과가 있는지 검토해 보기 위하여 LRB 면진시스템이 설치된 예제구조물의 1층 속도스펙트럼을 BBN 진동기준과 함께 <그림 9>에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 고정기초구조물에서 가장 큰 응답을 보였던 중심주파수 20Hz 구간의 응답이 대폭 줄어든 것을 알 수 있다. LRB 면진시스템을 적용하면 전반적인 주파수대역에서 정밀진동 VC-A등급의 기준을 만족시키는 것을 그림에서 볼

수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 예제구조물의 경우에는 LRB 면진시스템이 열차하중에 의해서 유발되는 미진동을 어느정도 제어하는 효과가 있음을 알 수 있다.

<그림 9> LRB 면진구조물 1층의 속도스펙트럼

마지막으로 스마트 면진시스템의 미진동제어성능을 검토해보기 위하여 스마트 면진시스템이 사용된 3층 예제구조물의 1층 속도스펙트럼을 BBN 진동기준과 함께 <그림 10>에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 스마트 면진시스템이 LRB 면진시스템이나 고정기초구조물에 비하여 미진동제어성능이 매우 우수함을 확인할 수 있다.

<그림 10> 스마트 면진구조물 1층의 속도스펙트럼

중심주파수 16-20Hz 구간에서 가장 큰 미진동 속도레벨이 나타나지만 전체적으로 볼 때 BBN 기준의 정밀진동 VC-C등급의 기준을 만족시키는 것을 알 수 있다. 따라서 예제구조물에 스마트 면진시스템을 적용하면 30000X 전자현미경이나 반도체 생산설비를 사용할 수 있다.

앞에서 비교한 고정기초 구조물, LRB 면진시스템이 적용된 구조물, 스마트 면진시스템이 적용된 구조물의 1층 속도응답을 주파수영역 뿐만 아니라 시간영역에서 비교해보기 위하여 <그림 11>에 속도시간이력을 비교하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 고정기초 구조물의 1층 속도응답을 LRB 면진시스템을 적용하면 많이 줄일 수 있고 스마트 면진시스템을 사용하면 LRB 면진시스템보다 더 크게 저감시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다.

<그림 11> 1층 속도 시간이력의 비교

본 연구를 통해서 스마트 면진시스템을 적용하면 예제구조물에 대하여 BBN 기준의 정밀진동 VC-C등급을 만족시키는 등 어느 정도 미진동제어에 효과가 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 이보다 더 정밀한 첨단시설물을 사용하고자 할 때에는 즉, 정밀진동 VC-D나 VC-E 등급을 만족시키고자 할 때에는 본 연구에서 사용한 스카이훅 제어알고리즘을 이용한 스마트 면진시스템으로는 어렵고 보다 성능이 우수한 미진동 제어알고리즘을 사용하거나 능동제어장치를 이용하는 것이 필요하다고 판단된다. 능동제어장치는 전술한 바와 같이 지진하중에 대해서는 전력공급장치의 피해로 인한 안정성과 견실성 등에 관한 우려가 높지만 본 연구에서 다룬 열차하중에 대한 미진동 제어에서는 이러한 우려가 크게 줄어들 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 지진하중을 받는 구조물의 피해를 저감시키기 위해 널리 사용되고 있고 그 성능이 검증된 LRB 면진시스템 및 스마트 면진시스템의 미진동제어성능을 검토하여보았다. 이를 위하여 상시진동의 하나인 교통하중 중에서 열차하중을 받는 구조물에 대하여 스마트 면진시스템과 LRB 면진시스템이 설치한 후 예제구조물의 동적응답을 수치해석을 통하여 검토하였다. 이때 Kanai-Tajimi 파워스펙트럼 필터를 이용하여 인공의 열차유발 지반운동데이터를 생성하였다. 스마트 면진시스템은 일반 LRB 시스템과 25kN MR 감쇠기를 사용하여 구성하였다. 스마트 면진시스템을 제어하기 위한 알고리즘으로는 스카이훅 제어기를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 예제구조물에서 클린룸은 1층에 설치되어 있기 때문에 1층의 미진동 속도응답을 비교하였다. 수치해석결과 1층의 미진동 속도응답은 LRB 면진시스템을 사용하여 어느 정도 효과적으로 제어할 수 있었고 LRB 시스템이 없는 경우에는 사무실 용도로도 사용하기 어려웠던 구조물이 정밀진동 등급인 BBN 기준의 VC-A 등급을 만족시킬 수 있을 정도로 개선되었다. 예제구조물에 스마트 면진시스템을 사용한 경우에는 전체 주파수 영역에 걸쳐서 BBN 기준의 VC-C 등급을 만족시킬 수 있었다. 본 연구에서는 스마트 면진시스템을 제어하기 위하여 널리 사용되고 있는 비교적 간단한 준능동 제어알고리즘인 스카이훅 제어알고리즘을 사용하였으나 미진동제어에 적합하고 MR 감쇠기의 비선형성을 제대로 조절할 수 있는 보다 우수한 성능을 제어알고리즘을 개발하는 것이 필요하다고 판단되어 추후 연구를 수행할 계획이다. 또한 미진동제어를 위한 기초면진시스템 뿐만 아니라 작업 플랫폼을 스마트 제어장치로 제어하여 미진동을 저감시키는 방법에 대한 연구도 병행하여 수행할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원

으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2011-0011165).

참고문헌

1. C.G. Gordon (1991), Generic criteria for vibration sensitive equipment. In: Proceedings of SPIE 1619, pp. 71-85.
2. H. Amick (1997) On the generic vibration criteria for advanced technology facilities, Journal of the Institute of Environmental Sciences, Vol. 5, pp. 35-44.
3. F. Naeim and J.M. Kelly (1999) Design of Seismic Isolated Structures: from Theory to Practice. Wuley: New York.
4. B.F. Spencer Jr., E.A. Johnson and J.C. Ramallo (2000) Smart isolation for seismic control, JSME Int. J. Ser. C., 43(4), pp. 704-711.
5. E.A. Johnson, J.C. Ramallo, B.F. Spencer Jr. and M.K. Sain (1999) Intelligent base isolation systems, Proc. 2nd World Conf. on Structural Control, Kyoto, Japan, pp. 367-376.
6. 강주원, 김현수, 임준호 (2011) 스마트 면진시스템을 이용한 대공간 구조물의 다목적 퍼지제어, 한국공간구조학회 논문집, 11(2), pp. 89-99.
7. 김현수, 강주원 (2011) 중약진지역 대공간 구조물에 대한 스마트 면진시스템의 적용성 검토, 한국공간구조학회 논문집, 11(4), pp.109-119.
8. S. Narasimhan and S. Nagarajaiah (2006) Phase I smart base isolated benchmark building - sample controllers for linear isolation system: part II, J. of Struct. Control and Health Monitoring, 13, 589-604.
9. D. Karnopp, M.J. Crosby and R.A. Harwood (1974) Vibration control using semi-active force generators, J. of Engineering for Industry, ASME, 96(2), pp. 619-626.
10. J.N. Yang and A.K. Agrawal (2000) Protective systems for high-technology facilities against microvibration and earthquake. Journal of Structural Engineering and Mechanics, 10(6), pp. 561-567.
11. H. Amick and S.K. Bui SK (1991) A review of several methods for processing vibration data. In: Proceedings of SPIE 1619. pp. 253-264.
12. H. Kuppelwieser and A. Ziegler (1996) A tool for predicting vibration and structure-borne noise emissions caused by railways, J. of Sound and Vibration, 193(1), pp. 261-267.
13. C.J.C. Jones and R. Block (1996) Prediction of ground vibration from freight trains, Journal of Sound and Vibration, 193(1), pp. 205-213.
14. H.E.M. Hunt (1996) Modelling of rail vehicles and track for calculation of ground-vibration transmission into buildings, Journal of Sound and Vibration, 193(1), pp. 185-194.
15. H. Takemiya and L. Kellezi (1998) Paraseismic behaviour of wave impeding block measured for ground vibration reduction, Workshop on Effect of High-Speed Vibration on Structures and Equipment, Taiwan, pp. 51-56.
16. Y.K. Wen (1976) Method of Random Vibration of Hysteretic Systems, J. Engng. Mech. Division, Proceedings, ASCE, 102, pp. 249-263.
17. K. A. Bani-Hani and M.A. Sheban (2006) Semi-active neuro-control for base-isolation system using magnetorheological (MR) dampers, Earthquake Engng Struct. Dyn., 35, pp. 1119-1144