

# 선형화 기법을 이용한 MR 감쇠기 성능평가

## Performance Evaluation of MR Damper using Equivalent Linearization Technique

이 상 현\*  
Lee, Sang-Hyun

민 경 원\*\*  
Min, Kyung-Won

이 명 규\*\*\*  
Lee, Myoung-Kyu

### 국문요약

본 논문의 목적은 구조물의 지진응답제어를 위해 사용되는 MR 감쇠기의 성능을 선형화기법을 이용하여 등가의 선형 점성으로 표현하고, 이를 MR감쇠기가 설치된 축소건물에 대한 시스템식별 실험을 통해 얻은 결과와 비교하여, MR 감쇠기의 성능평가에 대한 선형화 기법의 타당성을 검증하는 것이다. 먼저, MR 감쇠기의 이력모델로 많이 사용되는 모델 중, 수학적 표현이 간단한 Bingham 모델에 등가선형화 기법을 적용하여 등가의 점성을 구하였다. 그리고, 진동대 가진실험을 통해 얻어진 MR감쇠기가 설치된 3층 소형구조물의 전달함수로부터 모드정보를 추출하고 이를 사용하여 구조물의 점성행렬을 구하였다. 선형화기법을 통해 Bingham 모델을 사용하여 예측된 점성과 실험을 통해 얻어진 MR감쇠기에 의해 증가된 점성은 5% 오차범위 이내로 일치된 결과를 보여준다.

주요어 : MR 감쇠기, 선형화기법, 등가 점성, 시스템 식별, Bingham 모델

### ABSTRACT

The purpose of this paper is to evaluate the performance of an MR fluid damper for seismic vibration control of a structure in terms of equivalent linear damping based on linearization technique and to experimentally verify the results from linearization technique by comparing them to those from system identification testing of a building structure with the MR damper. First, among various models for the MR damper, the equivalent damping is estimated for the Bingham model which is mathematically simple. Second, the transfer function of a building structure with the MR damper is obtained by performing shaking table tests and the damping matrices of the structure are constructed using the modal information obtained by the transfer function. It is observed that the damping mathematically estimated using linearization technique for the Bingham model matches well with the damping coefficient experimentally obtained by system identification.

Key words : MR damper, linearization technique, equivalent damping, system identification, Bingham model

## 1. 서 론

최근 들어 많은 국내외 학자들에 의해 건축 및 토목구조물과 같은 대형 구조물의 진동제어를 위해 사용되고 있는 자기유변유체(magnetorheological fluid) 감쇠기(이하 MR 감쇠기)는 비선형 힘-변위, 그리고 힘-속도 관계를 가지고 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 비선형 MR 감쇠기의 성능은 일반적인 선형감쇠기와 달리, 가진 하중의 주파수 및 크기, 그리고 하중에 따른 응답의 주파수 및 크기특성에 따라 크게 좌우된다. 따라서, MR 감쇠기는 반드시 대상구조물과 대상구조물을 고려하여 설계되어야 하며<sup>(2)</sup>, 그에 따른 설계절차도 매우 어려워진다. 만일, 이러한 MR 감쇠기의 성능을 등가의 선형시스템으로 치환하여 평가할 수 있다면, 설계절차의 단순화와 함께 MR 감쇠기를 사용하는데 많은 시간 노력을 줄일 수 있을 것이다. 그러나, 이 경우에 가장 중요한 것은 비선형 MR 감쇠기와 등가의 선형시스템과의 오차를 최소화하는 것이다.

비선형시스템을 등가의 선형시스템으로 치환하는 것에 대하여 기존의 많은 연구가 수행되었다.<sup>(3)</sup> Caughey는 무

작위 외력을 받는 이력특성을 가지는 시스템에 대하여, 오차의 제곱평균크기가 최소화하는 등가시스템을 개발했으며, 응답이 가우시안(Gaussian) 분포를 이룰 때의 특성을 규명하였다.<sup>(4)</sup> Li와 Reinhorn은 진동대 실험을 통해 마찰감쇠기가 설치된 구조물의 전달함수를 구하고, 이로부터 구조물의 질량, 점성, 그리고 강성을 구함으로써, 마찰감쇠기의 성능을 증가된 질량, 점성, 그리고 강성으로 표현하였다.<sup>(5)</sup> Barber와 Wen은 일반적인 모든 형태의 이력거동을 모사할 수 있고 MR 감쇠기의 모델링에도 많이 사용되는 Bouc-Wen 모델에 대하여 닫힌 형태의 등가선형시스템을 제시하였다.<sup>(6)</sup> Yalla는 동조액체기둥 감쇠기의 비선형 점성을 등가의 선형 점성으로 표현하였으며, 등가의 선형 점성은 반복을 통해 얻어져야 함을 보였다.<sup>(7)</sup> Chang 등은 모달 변형에너지법(modal strain energy method)을 적용하여 점탄성감쇠기가 설치된 구조물의 등가감쇠비를 구하였다.<sup>(8)</sup> 이상현 등은 수정된 에너지 개념을 사용한 등가감쇠비를 제안하고, 점성, LQR(Linear Quadratic Regulator) 제어알고리즘을 사용한 질량형감쇠기와 같은 선형감쇠기, 마찰감쇠기와 같은 비선형감쇠기의 성능을 선형 감쇠비로 평가하는 방법을 제시하였다.<sup>(9)</sup> 문석준 등은 Bouc-Wen 모델을 사용하여 모델링된 MR 감쇠기에 등가선형화 기법을 적용한 후 최적설계를 수행하였다.<sup>(10)</sup> 그러나 기존의 비선형 구조물 혹은 감쇠기의 등가

\* 정회원 · 서울대학교 공학연구소 객원연구원, 공학박사

\*\* 정회원 · 단국대학교 건축대학 건축공학과, 부교수  
(대표지자 : kwmin@dankook.ac.kr)

\*\*\* 단국대학교 건축대학 건축공학과, 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2005년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2004. 9. 24 / 심사종료일 : 2005. 4. 7)

선형시스템에 대한 연구는 대부분 실험 혹은 해석 각각에 국한된 연구결과를 제시할 뿐 실험과 해석에 의한 예측값을 비교한 연구는 부족한 실정이다.

본 논문의 목적은 구조물의 지진응답제어를 위해 사용되는 MR 감쇠기의 성능을 선형화기법을 이용하여 등가의 선형 점성으로 표현하고, 이를 MR감쇠기가 설치된 축소건물에 대한 전달함수에 기반한 시스템식별 실험을 통해 얻은 결과와 비교하여, MR 감쇠기의 성능평가에 대한 선형화 기법의 타당성을 검증하는 것이다. 일반적인 시스템식별기법이 단순히 입출력관계만을 모사할 뿐 물리적 의미를 가지지 못하는 시스템행렬을 산정하는 반면, 전달함수에 기반한 시스템식별은 일반적으로 비선형 특성을 가지는 MR 감쇠기의 성능을 등가의 선형 점성으로 표현한다.<sup>(11)</sup> 먼저, MR 감쇠기의 이력모델로 많이 사용되는 모델 중, 수학적 표현이 간단한 Bingham 모델<sup>(12)</sup>에 등가선형화 기법을 적용하여 등가의 점성을 구하였다. 그리고, 백색잡음을 사용한 진동대 가진실험을 통해 얻어진 MR감쇠기가 설치된 3층 소형구조물의 전달함수로부터 모드정보를 추출하고 이를 사용하여 구조물의 점성행렬을 구하였다. 끝으로, 선형화기법을 통해 Bingham 모델을 사용하여 예측된 점성과 실험을 통해 얻어진 MR감쇠기에 의해 증가된 점성을 비교하여 MR 감쇠기의 성능평가에 대한 선형화 기법의 타당성을 검증하였다.

## 2. 등가 선형화 기법(Equivalent linearization technique)

### 2.1 등가 선형 시스템

다음과 같이 비선형 시스템을 등가의 선형 시스템으로 치환할 수 있다.

$$g(x, \dot{x}) \approx l_0 + k_{eq}x + c_{eq}\dot{x} \quad (1)$$

여기서,  $g(x, \dot{x})$ 는 비선형시스템을 나타내고,  $l_0$ 는 평균 성분,  $k_{eq}$ 과  $c_{eq}$ 는 각각 등가강성계수와 등가점성계수를 나타낸다.

비선형 선형시스템과 등가선형시스템의 오차는 일반적으로 다음과 같이 차이의 제곱평균으로 정의된다.

$$c = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{g(x, \dot{x}) - l_0 - k_{eq}x - c_{eq}\dot{x}\}^2 dt \quad (2)$$

$l_0$ ,  $k_{eq}$  그리고  $c_{eq}$ 는 다음과 같이 (2)식의 오차를 최소화하도록 응답이 가우시안 분포를 이루는 경우에 대하여 구할 수 있다.<sup>(4),(7)</sup>

$$l_0 = \int_{-\infty}^{\infty} g(x, \dot{x})p(x)dx \quad (3)$$

$$k_{eq} = \frac{1}{\sigma_x^2} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, \dot{x})xp(x)dx \quad (4)$$

$$c_{eq} = \frac{1}{\sigma_x^2} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, \dot{x})\dot{x}p(x)dx \quad (5)$$

여기서,  $\sigma_x$ 는  $x$ 의 표준편차를 나타내고,  $p(x)$ 는 다음 식에 의해 정의되는 가우시안 확률밀도함수이다.

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (6)$$

### 2.2 MR 감쇠기의 모델링 및 등가선형화

MR 감쇠기의 비선형 이력거동을 모사하기 위해 많은 동적 모델들이 개발되었으며, 이 모델 중에는 Bingham, 이점성(biviscous), 이력 이점성(hysteretic biviscous) 모델, 그리고 임의의 이력곡선을 모사할 수 있는 미분방정식 형태의 Bouc-Wen 모델을 이용한 모델 등이 있다. 본 절에서는 수학적으로 제일 간단한 Bingham 모델에 선형화기법을 적용하여 그 특성을 알아본다.

Bingham 모델은 다음과 같다.

$$F_1 = f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + c\dot{x} \quad (7)$$

여기서,  $f_c$ 는 최대마찰력,  $c$ 는 점성계수이다.

(7)식은 쿨롱 마찰력과 선형 점성으로 구성되어 있으며, 모두 속도에 대해서만 관련을 가지는 함수이다. Bingham모델은 실제 MR감쇠기가 속도-힘관계에서 저속도에서 폐곡선을 이루는 이력특성을 모사하지 못한다는 단점을 가지고 있다. (7)식은 변위에 대한 연관을 전혀 가지지 않기 때문에 등가강성은 0이며, 등가 점성은 선형 점성과 (5)식에 의해 얻어지는 마찰력의 등가점성의 합으로 주어진다.

$$c_{eq} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{f_c}{\sigma_x} + c; \text{ 가우시안 분포의 응답인 경우} \quad (8)$$

(8)식은 최대마찰력의 크기가 증가함에 따라 등가감쇠도 선형적으로 증가함을 보여준다. 그러나 응답의 크기가 증가할수록 등가점성의 크기는 작아진다. 이는 응답의 크기에 관계없이 일정한 크기의 힘을 작용하는 마찰력의 효과가 응답의 크기가 증가함에 따라 작아짐을 의미한다.

## 3. 시험 사양 (Experimental Setup)

단국대학교 동역학 연구실에서 실험이 수행되었으며, 실험 축소모형 구조물은 3층의 1경간 철골조 (그림 1)로 높이가 155cm, 바닥판 60cm×60cm를 사용하였고 1층방향의 동적신호를 측정할 수 있도록 가진 방향으로 기둥의 약축 방향을 위치하였다. 구조물의 질량행렬은 바닥 판에 집중된 것으로 가정하였으며, 측정된 1, 2, 3층 질량은 각각 26.24kg, 26.24kg, 23.14kg이다. 그림 1에 보여 지는 진동대는 서보모터를 사용하여 구동되는 1방향 가진 장치

이며 입력 전압신호로 모터의 속도를 제어함으로써 목표로 하는 바닥판 가속도를 구현하는 장치이다.

모터의 최대입력 전압은 10V이고, 이때 발생하는 모터의 최대 속도는 33cm/sec 이다. 또한, 모터 최대 스트로크는 20cm, 최대토크는 16.7N·m이다. 진동대는 Lab-view 프로그램에 의해 제어되며, 진동대는 AC 서보모터를 사용하였고 내셔널 인스트루먼트(NI)사의 DAQCard-6036E 보드로 제어하였다. 진동대 상판을 포함한 각종 바닥판에 4개의 가속도계를, 1층에 동적변위측정계를 설치하고 실시간 디지털 신호 처리기를 사용하여 가속도와 바닥판과 1층 사이의 층간변위를 측정하였다. 그림 2는 본 연구에서 사용된 Lord사 RD-1097-01 MR 감쇠기의 변위-힘 관계를 보여준다. 이 MR 감쇠기를 그림 3에서 보여지는 바와 같이 바닥판 중앙에 설치하고 지그를 사용하여 댐퍼 수평을 조절하여 수직마찰발생을 억제함과 동시에 불균형적인 거동을 방지하였다.

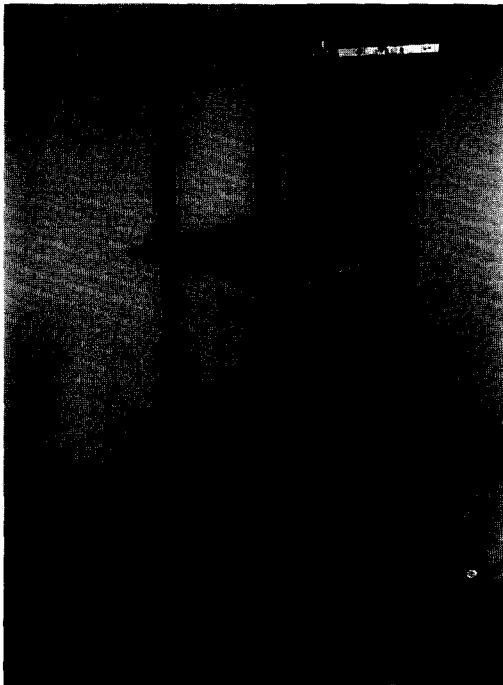


그림 1 진동대와 MR감쇠기가 설치된 3층 축소 건물

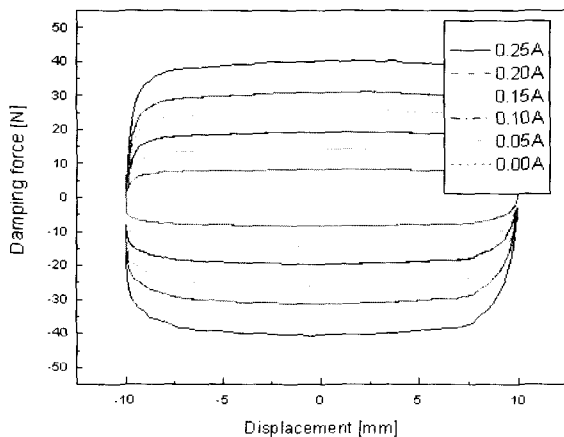


그림 2 MR 감쇠기 이력곡선

#### 4. 시스템 식별

시스템 식별은 주어진 입력신호와 그에 따른 출력신호의 관계를 정확히 묘사할 수 있는 시스템행렬을 구하는 것이다. 능동제어의 경우에는 정확한 시스템행렬을 구하는 것이 제어성능의 확보에 있어 가장 중요하다. 이러한 시스템식별기법을 감쇠기가 설치된 구조물에 적용함으로써 감쇠기가 대상 구조물에 미치는 영향을 정량적으로 파악할 수 있다. 본 연구에서는 1층에 MR 감쇠기가 설치된 3층 구조물 시스템식별을 통해 얻어진 모드정보를 이용하여 MR 감쇠기가 구조물에 미친 효과를 등가의 선형 점성으로 평가하고자 한다. 그림 4 (a), (b), (c)는 바닥판 가진 신호가 cut-off 진동수가 25Hz인 백색잡음신호인 경우의 1층, 2층, 3층 가속도 응답을 보여준다. 가진과 계측은 정밀한 주파수정보를 얻기 위해 0.01초 간격으로 100초간 수행되었다. cut-off 진동수를 25Hz로 설정한 이유는 대상구조물의 고유진동수가 모두 이 대역에 포함되어 25Hz 이하의 성분이 구조물의 모든 모드를 가진하는데 충분하고, 오히려 25Hz 이상의 입력신호는 고주파수의 잡음을 발생시킬 수 있기 때문이다. passive-off는 MR 감쇠기에 입력되는 전기신호가 0 ampere(A)인 경우이고, passive-on은 0.1A인 경우이다. 그림 6을 통해 MR 감쇠기가 지진하중을 받는 3층 구조물의 가속도 응답을 크게 줄이는 것과, passive-on인 경우에 가장 우수한 제어성능을 보임을 확인할 수 있다. 그리고 이러한 경향은 바닥판 가속도에 대한 1층, 2층, 3층 가속도의 전달함수의 크기를 각각 보여주는 그림 5 (a), (b), (c)을 통해서도 확인할 수 있다. 비제어시와 passive-off인 경우에는 모든 가속도응답에서 1, 2, 3차 모드가 확연히 구분되어 나타나나, passive-on인 경우 2차 모드의 응답이 거의 존재하지 않는다. 비제어시와 같이 모든 층에서 구조물의 모든 모드를 계측할 수 있고 이로부터 구조물의 진동수와 감쇠비를 추출할 수 있는 경우에는 다음과 같이 강성행렬과 점성행렬을 구성할 수 있다. 본 연구에서는 Li와 Reinhorn이 사용한 마찰감쇠기가 설치된 구조물의 바닥

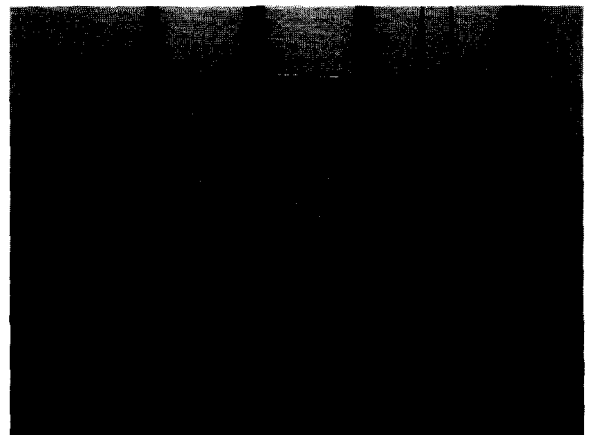


그림 3 1층 층간에 설치된 MR 감쇠기의 상세

판 가속도에 대한 각 층 가속도의 전달함수를 curve-fitting하는 방법을 이용하여 구조물의 모드 벡터, 진동수, 그리고 감쇠비를 구하였다.<sup>(5)</sup>

$$K = A\Phi\Omega\Phi^T M \quad (9)$$

$$C = A\Phi A\Phi^T M \quad (10)$$

여기서,  $M$ 은 3장 시험사양에서 주어진 질량행렬이고,  $A$ 와  $\Omega$ 는 다음과 같다.

$$A = \Phi^T C \Phi = \text{diag}(2\xi_m \omega_m, i = 1, \dots, n) \quad (11)$$

$$\Omega = \Phi^T K \Phi = \text{diag}(\omega_m^2, i = 1, \dots, n) \quad (12)$$

여기서,  $\omega_m$ 와  $\xi_m$ 는 각각  $i$ 차 모드의 고유진동수와 감쇠비이다.

비제어시 구조물의 고유주파수는 2.48Hz, 7.00Hz, 10.48Hz이고, 모드 감쇠비는 0.94%, 0.32%, 0.45%이다. 모드 벡터는 다음과 같다.

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.0656 & 0.1473 & 0.0979 \\ 0.1168 & 0.0425 & -0.1466 \\ 0.1420 & -0.1208 & 0.0839 \end{bmatrix} \quad (13)$$

(9)-(13)식을 이용하여 구한 MR 감쇠기가 설치되지 않은 구조물의 강성행렬과 감쇠행렬은 다음과 같다.

$$K = \begin{bmatrix} 58.231 & -33.222 & -2.357 \\ -33.222 & 68.856 & -40.778 \\ -2.357 & -40.778 & 43.815 \end{bmatrix} \text{ kN/m},$$

$$C = \begin{bmatrix} 9.0227 & -3.0468 & 1.7258 \\ -3.0468 & 11.8465 & -2.6404 \\ 1.7258 & -2.6404 & 9.8111 \end{bmatrix} \text{ N sec/m} \quad (14)$$

MR 감쇠기를 설치하는 경우에는 구조물의 모드가 확연히 구분되지 않고 감쇠가 크게 증가하기 때문에 (9)식

과 (10)식을 이용하여 강성과 점성을 식별하는 것은 적합하지 않다. 또한, 이 방법은 1층에 설치된 감쇠기의 효과가 전체 강성 혹은 점성행렬에 퍼트림(distribution)으로써 감쇠기의 집중된 효과를 알 수 없다. 따라서 MR 감쇠기 설치위치를 고려하여 점성행렬의 (1,1)요소만을 갱신(updating)하도록 한다. 점성행렬만을 갱신한 이유는 그림 5에서 확인할 수 있듯이 MR 감쇠기가 구조물의 고유진동수의 변화에는 큰 영향을 주지 않아 강성행렬의 변화는 크지 않을 것으로 판단했기 때문이다. 또한, MR 감쇠기는 모든 모드의 감쇠비에 영향을 주지만 본 연구에서 갱신되는 요소는 하나이기 때문에 하나의 감쇠비만을 맞출 수밖에 없다. 본 연구에서는 응답에 대한 영향이 가장 큰 1차 모드 감쇠비만을 맞추도록 점성행렬을 조정하도록 한다. 1층에 추가되는 점성에 의해 다음 등식이 성립해야 한다.

$$f(c_1) = \frac{1}{2\omega_{m1}} \phi_1^T C \phi_1 - \xi_{m1} = 0 \quad (15)$$

여기서,  $\phi_1$ 은 (13)식에서 강성과 질량의 고유치해석을 통해 구한 모드 벡터의 1차 모드이다. (15)식이 만족하지 않은 경우에는 다음과 같이 부가의 점성을 추가하여 등식을 만족시킬 수 있다.

$$f(c_1 + \Delta c_1) = 0 \quad (16)$$

(16)식을 일차항 이하만 사용한 테일러급수로 표현하면 다음과 같다.

$$f(c_1) + \frac{\partial f(c_1)}{\partial c_1} \Delta c_1 = 0 \quad (17)$$

다음과 같이  $\Delta c_1$ 을 설정하여 (17)식을 만족시킬 수 있다.

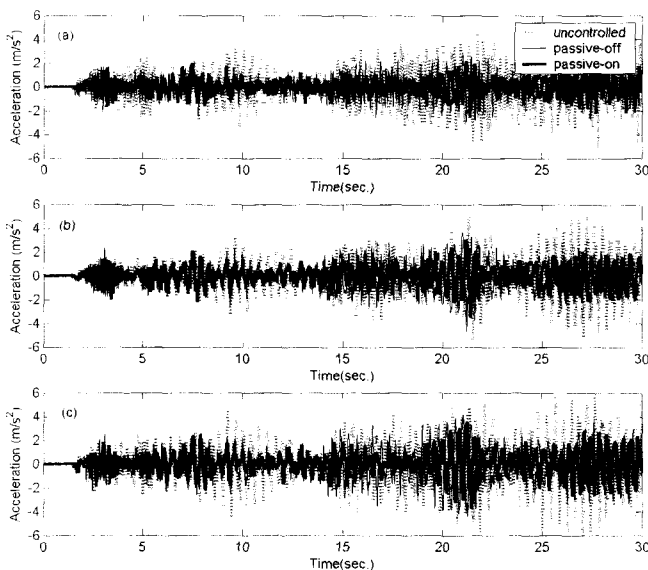


그림 4 각 층 가속도 시간이력

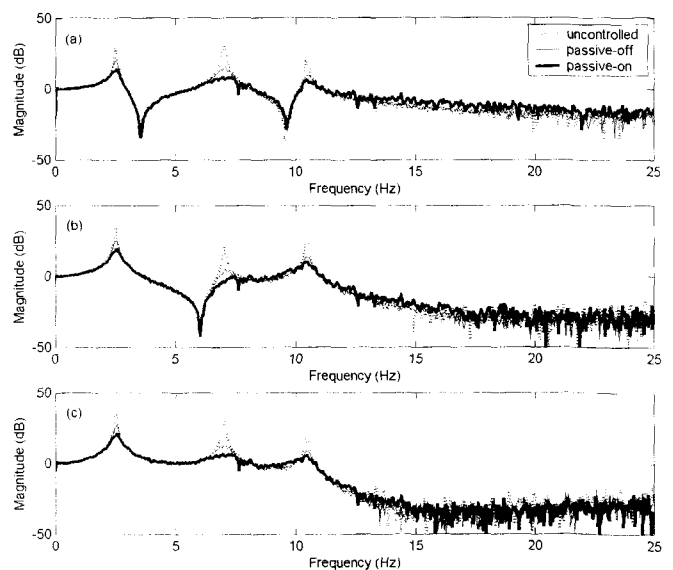


그림 5 바닥판 가속도에 대한 각 층 가속도 전달함수

$$\Delta c_1 = - \left( \frac{\partial f(c_1)}{\partial c_1} \right)^{-1} f(c_1) = - \left( \frac{1}{2\omega_{n1}} \phi_1^T \frac{\partial C}{\partial c_1} \phi_1 \right)^{-1} f(c_1) \quad (18)$$

여기서,  $\frac{\partial C}{\partial c_1} = \begin{bmatrix} 100 \\ 000 \\ 000 \end{bmatrix}$

표 1은 Bingham 모델의 MR 감쇠기의 응답이 가우시안 분포를 가진다는 가정 하에 유도된 (8)식에 의해 얻어진  $c_{eq}$ 와 시스템식별을 통해 얻어진 1차 모드 감쇠비를 맞추도록 (18)식을 이용해 설정된  $\Delta c_1$  값을 보여준다. (8)식을 사용한 이유는 그림 4에 보여지는 MR 감쇠기의 이력곡선이 Bingham 모델의 힘-변위 관계와 거의 동일한 거동을 보였고, 백색잡음 하중에 대한 구조물의 응답은 일반적으로 가우시안 분포를 가지기 때문이다. Passive-off와 passive-on 상태의 1차 모드 감쇠비는 각각 2.67%, 5.44%이다. (8)식에서  $\sigma_x$ 는 다음과 같이 실험에서 측정된 가속도 값을 이용하여 추정하였다. (8)식에서 점성  $c$ 는 0으로 가정하였다.

$$\sigma_x = \sigma_x / \omega_{n1} \quad (19)$$

여기서,  $\sigma_x$ 는 측정된 1층 가속도와 지반가속도의 차의 표준편차이다. (19)식은 MR감쇠기와 같이 비선형시스템의 증가점성을 구하는데 있어서 설치된 후의 응답이 있어야 함을 보여준다. 설치된 후의 응답은 다시 감쇠비로 예측될 수 있으며, 이 둘의 관계식을 이용하여 설치하기 전의 응답만을 이용하여 증가점성을 구할 수도 있다 [9].

표 1 MR감쇠기의 증가점성

	$c_{eq}$ (N s/m)	$\Delta c_1$ (N s/m)	Error (%) $100 \times (c_{eq} / \Delta c_1 - 1)$
Passive-off ( $f_c = 9N$ )	138.9	132.9	4.6
Passive-on ( $f_c = 15N$ )	333.7	342.2	-2.5

표 1은 예측식과 실험으로부터 구한 MR 감쇠기에 의해 증가된 구조물의 증가 점성의 오차가 passive-off 인 경우와 passive-on인 경우 모두에 대하여 5% 이내임을 보여준다. 이는 MR 감쇠기의 성능이 증가의 선형점성으로 표현될 수 있고, 그 값이 수식에 의하여 예측될 수 있음을 의미한다. 본 연구에서 선형화기법에 의한 증가점성은 실제 해석결과와 전달함수로부터 얻어진 값과 비교된 것으로, 전달함수는 평균화의 의미가 있기 때문에 최대값과 같은 비정상 응답보다는 표준편차와 같은 응답예측에 더 적합할 것으로 판단된다. 또한  $c=0$ 으로 가정하고, 단순히 최대제어력을 마찰력으로만 모사하여도 큰 오차가

발생하지 않은 이유는 증가점성의 크기가 MR감쇠기의 힘의 최대크기에 주로 관계되기 때문인 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

본 연구의 목적은 MR 감쇠기가 구조물의 응답에 미치는 효과를 증가의 점성으로 표현하는 것이다. 이를 위해, 먼저 비선형 특성을 갖는 MR감쇠기를 Bingham을 사용하여 모델링하였으며, 증가선형화 기법을 적용하여 MR 감쇠기에 의해 증가되는 증가의 점성을 구하였다. 그리고 1층에 MR 감쇠기가 설치된 3층 축소건물에 대한 진동대 실험을 수행하여 건물-MR 감쇠기 시스템의 점성행렬을 구성하였다. MR 감쇠기가 설치된 구조물의 점성행렬은 MR 감쇠기의 위치의 영향을 고려하면서 증가된 1차 모드 감쇠비를 맞추도록 비제어시의 점성행렬을 갱신하여 얻어졌다. 실험에 의해 얻어진 점성 값과 증가선형화기법에 의해 예측된 점성 값은 5% 이내의 오차를 가지며, 이는 MR감쇠기의 효과가 증가의 점성으로 표현될 수 있고, 그 값이 증가 선형화기법을 사용하여 예측될 수 있음을 의미한다. 그러나, 일반적으로 큰 용량을 가지는 MR감쇠기의 경우에는 강성의 영향 또한 큰 것으로 알려져 있기 때문에, 본 연구에서와 같이 MR 감쇠기의 효과가 점성의 증가로만 나타난 것은 MR 감쇠기의 용량이 작은 경우에 국한되어야 한다. MR 감쇠기의 힘이 증가하여 MR-구조물 시스템의 비선형성이 더욱 증가하는 경우, MR 감쇠기의 강성에 대한 영향이 존재하는 경우, 그리고 여러 개의 MR 감쇠기가 설치된 경우에 대한 추후의 연구가 필요하다.

### 감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연C103A2000010-03A0200-01010)에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. Dyke, S.J., Spencer, Jr. B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D., "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction," *Smart Materials and Structures*, Vol.5, pp.565-575.
2. Jansen, L.M. and Dyke S.J., "Semi-active control strategies for MR dampers: comparative study," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE Vol.126, No.8, 2000, pp. 795-803.
3. Proppe, C., Pradlwarter, H.J. and Schüller, G.I., "Equivalent linearization and Monte Carlo simula

- tion in stochastic dynamics," *Journal of Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol.18, 2003, pp.1-15.
4. Caughey, T.K., "Random excitation of a system with bilinear hysteresis", *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol.27,1960, pp.649-652.
  5. Li, C. and Reinhorn, L.C., "Experimental and analytical investigation of seismic retrofit of structures with supplemental damping: part II-friction devices," *Technical Report NCEER-95-0009*, State University of New York at Buffalo, Buffalo, Ny, 1995.
  6. Barber, T.T and Wen, Y.K, "Random vibration of hysteretic, degrading systems," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol.107, No. EM6, 1981, pp.1069-1087.
  7. Yalla, S.K., "Liquid dampers for mitigation of structural response : theoretical development and experimental validation," Ph.D dissertation, University of Notre Dame, Indiana, 2001
  8. Chang, K.C., Lai, M.L., Soong, T.T., Hao, D.S. and Yeh, Y.C., "Seismic behavior and design guidelines for steel frame structures with added viscoelastic dampers," *Technical Report NCEER-93-0009*, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, N.Y., 1993.
  9. Lee, S.H., Min, K.W., Kim, J. K. and Hwang, J.S., "Equivalent damping ratio of a structure with added dampers," *Engineering Structures*, Vol.26, No.3, 2004, pp.335-346.
  10. 문석준, 정정훈, 김병현, "Bouc-Wen 모델을 이용한 면진장치의 최적설계", 한국지진공학회 추계학술발표회논문집, Vol.7, No.2, 2003, pp.395-400.
  11. Friswell, M. I. and Mottershead, J. E., *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*, Kluwer Academic Publishers, Boston, London, 1995.
  12. Yang, G., "Large-scale magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control," Ph.D dissertation, University of Notre Dame, Indiana, 2001.