

실시간 하이브리드 실험법을 이용한 대형 MR감쇠기의 제진 성능평가

Performance Evaluation of a Large-scale MR Damper for Controlling Seismic Response using a Real-time Hybrid Test Method

정희산*·이성경*·박은천*·윤경조*·민경원†·이헌재**·최강민**·문석준***·정형조**

Hee-San Chung, Lee Sung-Kyung, Eun Churn Park, Kyung-Jo Youn, Kyung-Won Min, Heon-Jae Lee, Kang-Min Choi, Suk-Jun Moon, Hyung-Jo Jung

Key Words : real-time hybrid test method(실시간 하이브리드 실험법), large-scale MR damper(대형 MR감쇠기), passive control(수동제어)

ABSTRACT

This paper presents real-time hybrid test method of large-scale MR damper applied to a building structure under seismic excitation. The real-time hybrid test using an actuator for the control performance evaluation of a MR damper controlling the response of earthquake-excited building structure is experimentally implemented. In the test, the building structure is used as a numerical part, on which a large-scale MR damper adopted as an experimental part was installed to reduce its response. At first, the force that is acting between a MR damper and building structure is measured from the load cell attached on the actuator system and is fed-back to the computer to control the motion of the actuator. Then, the actuator is so driven that the error between the interface displacement computed from the numerical building structure with the excitations of earthquake and the fed-back interface force and that measured from the actuator. The control efficiency of the MR damper used in this paper is experimentally confirmed by implementing this process of experiment on real-time.

1. 서 론

현재까지 토목 또는 건축구조물의 소음 및 진동제어 분야에서 상당히 많은 제어 기법이 제안 되었으며, 수동제어기 성능의 제한적 기능을 개선하기 위해 다양한 능동, 준 능동 형식의 감쇠기가 소음 및 진동제어용으로 제안되고 있다. 이중 준능동 제어장치로 조작성 용이하며 반응속도가 매우 빠른 MR감쇠기를 이용하여 구조물 지진응답을 제어 하기 위한 많은 해석적인 연구와 실험적인 연구가 진행되었 으며, 많은 제어알고리즘 특히 MR감쇠기에 적용할 수 있는 준능동 제어알고리즘이 많이 제안되었고 이렇게 제안 된 준능동 제어알고리즘의 비교연구 또한 많이 수행되었

다.⁽¹⁾ 또한 MR감쇠기의 이력을 모사하기 위한 해석모델은 Bingham모델, 단순 Bouc-Wen모델 및 현상학모델등 많은 연구자에 의해 개발되었다.⁽²⁾ 그러나 기존에 제안된 MR감 쇠기 모델이 MR감쇠기 설계에 유용하더라도, 실제 동적하 중을 받는 MR감쇠기의 비선형 거동, 특히 비선형 저항력-속도 거동을 묘사하는 데는 충분하지 않다. 또한 전류를 공 급하는 장치에 의해 MR감쇠기의 성능이 불확실하며 준능 동 제어장치로 거동할 때 전류에 따라 변하는 이력모델이 불확실하다.⁽³⁾ 따라서 이론적으로 개발된 제어알고리즘과 해석적으로 그 성능을 검증함에 있어서 MR감쇠기를 설치 한 구조물에서는 그 응답과 이력이 많은 차이가 있을 수 있다.

따라서 실험적 연구가 많이 진행되었으며 현재 미국 노틀담 대학에 20톤 용량의 MR감쇠기가 설계되고 제작되어서 실험한 사례와 중국 후난의 동팅교의 진동을 막기 위해 MR감쇠기가 설치된 사례도 있다.⁽⁴⁾ 그러나 이러한 사례와 실험연구는 많은 제반비용이 수반되고 특히 MR감쇠기만의 이력특성 조사를 통한 수치모델의 수립에 만족해야한다. 그 리고 실제 구조물에 설치하고 그 성능을 검증함에 있어서 구조물의 안정성에 의해 충분한 가진력을 제공받기 어려우

† 교신저자; 단국대학교 건축공학과
E-mail : kwmin@dankook.ac.kr
Tel : (031) 8005-3734, Fax : (031) 8005-3741

* 단국대학교 건축공학과
** 한국과학기술원
*** 한국기계연구원

며 이를 통해 수동제어상태의 제어성능을 검토하기에 부족함이 발생한다.

본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 실물규모 스케일의 모델구조물을 바탕으로 설계된 대용량 MR감쇠기를 이용하여 실시간 하이브리드 실험기법을 제안한다. 실시간 하이브리드 실험기법은 실험체의 크기와 무게의 제한, 그리고 경제성으로 인한 실물크기 구조물의 동적 실험을 수행하기 어려움을 해결하기 위한 방법으로 실시간 부분구조 실험법을 응용한 실험법이다. 실시간 하이브리드 실험방법이 Nakashima 등(1992)에 의해 처음으로 개발되어진 후, 많은 연구자들은 여러가지 하이브리드기법을 이용한 제어기술개발에 대한 연구를 수행하여 왔다. 하이브리드 실험법은 비선형거동이 예측되는 부분을 물리적 실험체로 제작하여 해석적인 방법과 동시에 실시간으로 실험하는 방법으로 대형구조물과 상호작용하는 제어장치의 동적특성 또는 통합 제어성능을 파악하는데 매우 유용하다.⁽⁵⁾

본 논문에서는 이러한 실시간 하이브리드 실험법을 이용하여 대용량 MR감쇠기가 설치된 구조물의 지진응답 제어 성능검토를 수행하였다.

2. 실시간 하이브리드 실험법

2.1 실시간 하이브리드 실험의 개념

본 연구에서 제안하는 MR감쇠기 실시간 하이브리드 실험법의 개념은 그림.1에 나타나있다. MR감쇠기가 설치된 전체 구조물에서 MR감쇠기와 구조물로 나누면 수치적 부분 구조와 물리적 부분구조로써 각각 구조물과 MR감쇠기로 나뉘고 그 사이에 존재하던 상호작용하는 힘이 남게 된다. 실제 제작된 MR감쇠기를 실험적 부분구조로 UTM에 장착하여 피스톤에 원하는 응답과 힘을 계측할 수 있게 하였고, 수치해석적 부분구조인 모델구조물은 제어알고리즘과 함께 컴퓨터계산을 통해 전류신호와 원하는 UTM 응답을 UTM에 전송하여 간접적으로 UTM을 제어할 수 있게 하였다. 여기서 UTM에 장착된 로드셀에서 계측되는 힘이 상호작용력이 되고 구조물에 제어력으로 작용하게 되며 이는 그림 2의 흐름도와 같이 실시간으로 페루프 시스템을 수행하여야 한다.

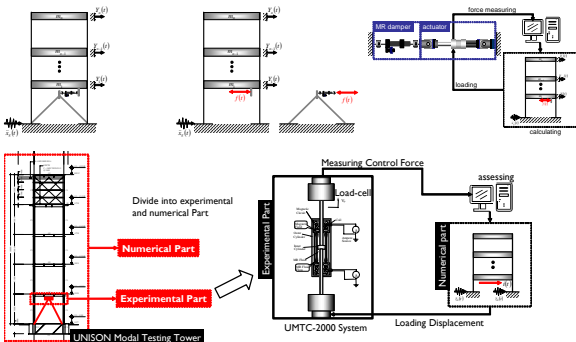


그림 1. 대형 MR감쇠기의 실시간 하이브리드 실험 개념도

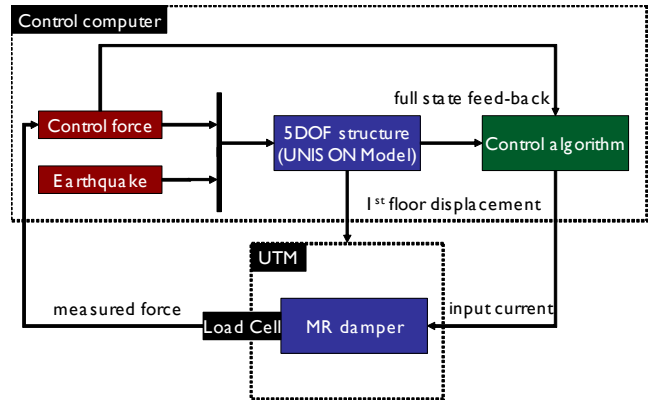


그림 2. MR감쇠기 준능동 하이브리드 실험의 흐름도

2.2 구조물 제어기 설계

지반가속도 가진을 받고 MR감쇠기가 설치된 n 자유도 구조물의 운동방정식은 다음 식과 같다.

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_s \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{f} - \mathbf{M}_s \Gamma \ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서, \mathbf{M}_s , \mathbf{C}_s 그리고 \mathbf{K}_s 는 각각 구조물의 질량행렬, 감쇠행렬 및 강성행렬이다. \mathbf{x} 는 구조물 각층의 상대변위 벡터, \ddot{x}_g 는 1차원의 지반가속도이고 \mathbf{f} 는 크기 $n \times 1$ 를 가지며 $[f_1, f_2, \dots, f_n]^T$ 과 같고 계측된 MR감쇠기의 힘이다. \mathbf{A} 는 MR감쇠기가 설치된 위치를 정의하는 대각행렬이고 Γ 는 스칼라값 1로 구성된 열벡터이다.

위의 운동방정식을 다음과 같은 상태공간 형식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A} \mathbf{z} + \mathbf{H} \mathbf{f} + \mathbf{E} \ddot{x}_g = \mathbf{A} \mathbf{z} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{z} + \mathbf{D} \mathbf{f}$$

여기서, \mathbf{z} 는 상태벡터이고, \mathbf{u} 는 입력벡터로 $\begin{Bmatrix} \mathbf{f} \\ \ddot{x}_g \end{Bmatrix}$ 과 같고, \mathbf{y} 는 출력벡터로써 계측된 상태벡터 전체와 절대가속도를 포함한다. \mathbf{A} 는 시스템 행렬이고 \mathbf{B} 는 $[\mathbf{H} \ \mathbf{E}]$ 이며 \mathbf{H} 와 \mathbf{E} 는 각각 제어력과 지반가속도의 입력행렬이고 다음식과 같다.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} \\ -\mathbf{M}_s^{-1} \mathbf{A} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times 1} \\ -\Gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

그리고 \mathbf{C} 는 출력행렬로써 전체 상태벡터와 절대가속도 응답을 출력하도록 하는 행렬이며, 직접전송행렬인 \mathbf{D} 는 절대가속도 출력에 제어력이 관여하도록 하는 행렬이다. \mathbf{A} , \mathbf{B} ,

C 그리고 D는 각각 다음과 같다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}_s^{-1}\mathbf{K}_s & -\mathbf{M}_s^{-1}\mathbf{C}_s \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{0}_{n \times 1} \\ -\mathbf{M}_s^{-1}\mathbf{A} & -\mathbf{I} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}_s^{-1}\mathbf{K}_s & -\mathbf{M}_s^{-1}\mathbf{C}_s \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2n \times n} & \mathbf{0}_{2n \times 1} \\ -\mathbf{M}_s^{-1}\mathbf{A} & \mathbf{0}_{n \times 1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, 행렬 $\mathbf{0}$ 과 \mathbf{I} 는 $n \times n$ 크기이며 행렬 \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} 와 \mathbf{D} 는 각각 $2n \times 2n$, $2n \times (n+1)$, $3n \times 2n$, $3n \times (n+1)$ 의 크기를 가진다.

본 연구에서는 5층 철골구조물 1층에 설치된 MR감쇠기 모델을 목표로 실험을 진행하였으므로 MR감쇠기의 제어력 \mathbf{f} 는 스칼라 f_1 이 되고 설치층의 위치벡터인 \mathbf{A} 는 $diag\{1,0,0,0,0\}$ 이 된다. 실시간 하이브리드 실험 진행시 MR감쇠기의 제어력 f_1 을 로드셀에서 계측하고 지반가속도 \ddot{x}_g 를 가진하여 위의 구조물 상태공간 필터를 통과하게 되며 출력변수에서 1층의 상대변위를 추출하여 MR감쇠기가 설치된 UTM변위를 구현하게 하는 제어를 설계하였다.

3. 구조물 모델과 가진 및 계측시스템

3.1 구조물 모델 및 대용량 MR감쇠기

예제 구조물은 충청남도 천안시 유니스기술연구소에 설치된 실물규모의 진동실험용 5층 철골 구조물, (Modal testing tower)의 수치모델을 사용하였다. 선행연구를 통해 구조물의 시스템 식별을 수행하였으며 그 결과는 그림 3과 같다.

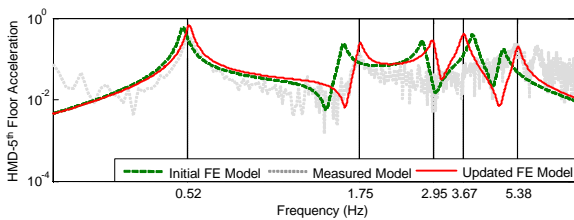


그림 3. 모델구조물의 실험에 의한 시스템식별 결과

또한 본 예제구조물의 진동제어용으로 설계된 대용량 MR감쇠기는 한국기계연구원과 한국과학기술원의 공동으로 설계되고 제작된 MR감쇠기를 사용하였다. 그림 4는 MR감쇠기의 그림 5(a),(b)는 전류를 통하지 않은 수동상태(passive off)의 계측된 MR감쇠기의 속도및 변위이력을 보여준다. 수치모델은 MR감쇠기 모델중 단순 Bouc-Wen 모델을 이용하였다. 단순 Bouc-Wen 모델은 다음식과 같다.

$$F_{MR} = \alpha z + c\dot{x} + kx + f_o \quad (4)$$

여기서, k 는 축압기(accumulator)의 강성이고, c 는 점성, f_o 는 밀봉과 측정시의 편중성분(bias)에 의하여 발생하는 초기 마찰력이다. z 는 이력특성을 모사하기 위하여 도입한 무차원 변수이고, α 는 z 의 F_{MR} 에 대한 영향의 크기를 조절하는 상수이다. z 는 다음 미분방정식에 의하여 주어진다.⁽⁶⁾

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x}|z|z|^{n-1} - \beta\dot{x}|z|^n + A\dot{x} \quad (5)$$

여기서, γ, β, A, n 는 이력곡선의 모양을 결정하는 계수이다. 본 연구의 대용량 MR감쇠기의 실험데이터를 이용하여 최소자승법에 의해 얻은 단순 Bouc-Wen 모델의 변수는 다음과 같고, 그림 5(a)-(c)의 실선의 수치모델과 점선의 실측된 데이터와 일치한 결과를 얻었다.

$$\alpha = 13288.130 N, \quad c = 81418.582 N \cdot sec/m,$$

$$k = 16,647.46 N/m, \quad f_o = 6.106 N,$$

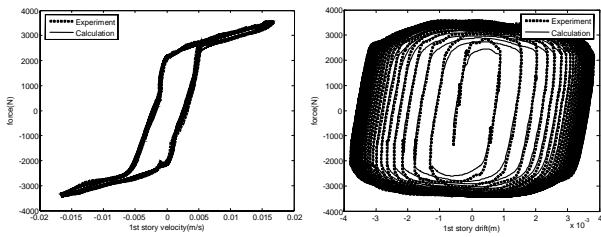
$$\gamma = 471409.377 m^{-1}, \quad n = 3.0851,$$

$$\beta = -335518.804 m^{-1}, \quad A = 497.295 m^{-1}$$

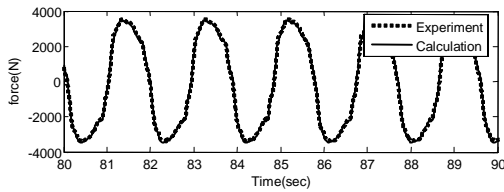
또한 단품테스트에 의한 MR감쇠기의 용량은 passive off 일때 3kN을 최대(passive on) 12kN으로 나타났다.



그림 4. 제작된 MR감쇠기 모습



(a) 힘-속도 이력 (b) 힘-변위 이력



(c) MR감쇠기 제어력 시간영역 비교결과

그림 5. MR감쇠기의 단순 Bouc-Wen 모델링

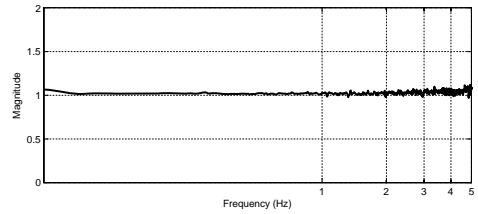
3.3 계측 및 가진시스템 설계

가진시스템은 경기도 부천 동양시스템의 UMTC-2000 System을 이용하였으며, 이 가진기 제어컴퓨터의 analog output으로 로드셀의 힘신호를 보내며 analog input으로 변위 제어신호를 받는 외부제어상태로 설정하였다. 데이터 수집과 가진신호제어는 랩탑컴퓨터를 이용하여 수행하였으며, 데이터 수집시스템은 NI-DAQCard-6036E와 BNC-2110을 사용하였고, MR감쇠기 전류제어신호는 전류증폭기를 통과하여 MR감쇠기에 전달된다.

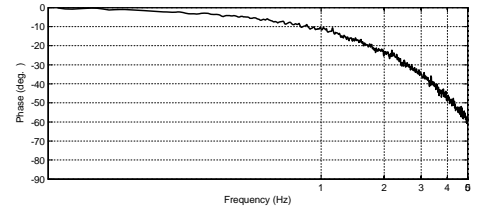
가진기 제어컴퓨터와 가진 및 데이터 수집 시스템은 동시에 실시간으로 진행이 되며 폐회로 시스템으로 되어 있다. 따라서 이러한 시스템은 약간의 시간지연 또는 위상지연에 매우 민감하며 때로는 시스템을 불안정하게 만든다. 또한 미소한 위상지연은 MR감쇠기에서 계측된 제어력이 심지어 구조물을 가진하게 되는 결과를 초래하여 chattering 효과와 같은 결과를 얻게 된다.

이러한 시간지연 및 위상지연에 따른 동특성을 상쇄시키기 위하여 가우스 분포에 따른 백색잡음을 생성한 변위데이터를 명령신호로 가진하고 이에 따른 UTM가진기에서 전달되는 변위신호를 계측하여 가진 및 제어시스템의 동적특성을 예측하였다.

그림 6은 명령 변위신호에 대한 계측된 변위신호의 전달함수를 보여준다. 증폭은 1의 크기로 동일하나 위상에서 1Hz에서 약 10도 5Hz에서 약 60도의 위상지연을 보인다.



(a) 가진 및 계측시스템의 전달함수 크기

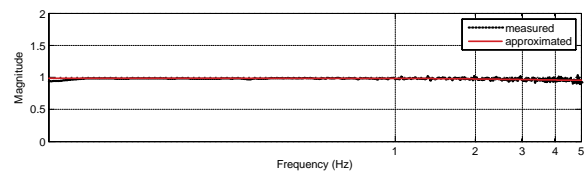


(b) 가진 및 계측시스템의 전달함수 위상

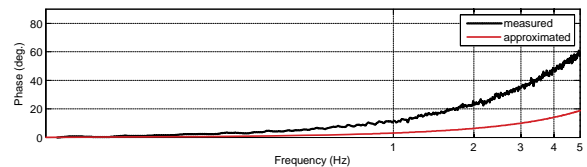
그림 6. 명령신호에 대한 계측된 변위신호의 전달함수

가진 및 계측시스템의 변위 전달 특성을 상쇄시키기 위하여 계측된 변위신호에 의한 명령 변위신호의 역전달함수를 곡선적합하였다. 그러나 시스템이 증폭이 1로 동일하면서 위상을 변경할 때 어느 수준 이상의 시스템에선 시스템이 불안정해지는 결과를 얻는다. 역전달함수의 곡선적합은 Matlab내장함수 fitsys()를 사용하였으며 관심 있는 주파수 구간 0Hz~5Hz에서의 최소 안정수준에서 최적 곡선적합 결과 그림 7과 같다. 역전달함수의 증폭은 1로 동일하였고 위상에서 실제로 발생한 5Hz 위상차는 60도에 달하지만 역전달함수 곡선적합결과는 20도 수준에 그쳤다.

$$G^{-1}(s) = \frac{7.1945s^2 + 636.4862s + 27368.6533}{s^2 + 412.4726s + 27758.6756} \quad (6)$$



(a) 역전달함수의 크기 곡선적합



(b) 역전달함수의 위상 곡선적합

그림 7. 가진 및 계측시스템의 역전달함수

4. 실험 제어기 설계

본 논문에서 제안하는 방법을 하나의 컴퓨터 제어시스템에서 실시간으로 동시에 작동해야 하기 때문에 하이브리드 알고리즘과 위상보상 역전달함수가 통합되는 제어기를 설계하였다. 실험 제어기는 Matlab Simulink의 Real-Time Windows Target을 사용하여 설계하였다.

그림 8은 실시간 하이브리드 실험 제어기 모습이다.

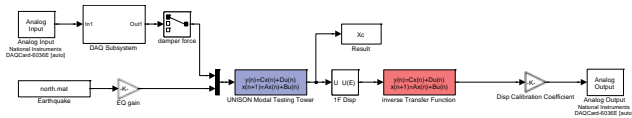
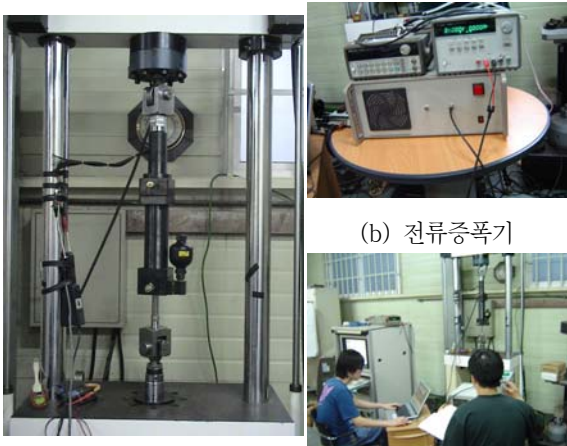


그림 8. 실시간 제어알고리즘 하이브리드 통합 실험제어기

본 연구에서는 MR감쇠기가 1층에만 웨브론(chevron)가새에 앞뒀던 대칭으로 설치된 경우 실험하였으며 El Centro, Kobe 그리고 Northridge 지진데이터를 0.05스케일을 줄인 지진데이터로 가진하였다.

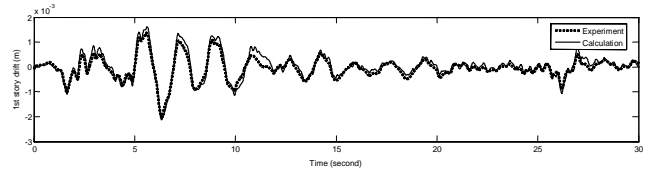


(a) MR감쇠기 및 가진시스템 (b) 전류증폭기 (c) 실험전경

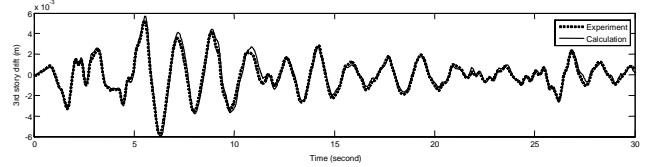
그림 9. MR감쇠기 실시간 하이브리드 실험 전경

5. 실험결과

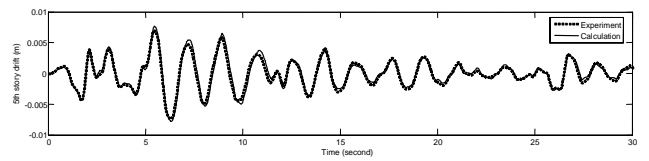
그림 10은 MR감쇠기의 단순 Bouc-Wen 모델로 수치모델 수립후 구조물에 설치했을 경우 수치해석 결과와 하이브리드 실험결과와 비교한 것이다. 1층, 3층 및 5층의 상대변위가 일치함으로 단순 Bouc-Wen 모델의 변수와 제작된 MR감쇠기가 일치함을 알 수 있으며 이는 실시간 하이브리드 실험이 유효함을 검증한다.



(a) 1층 상대변위



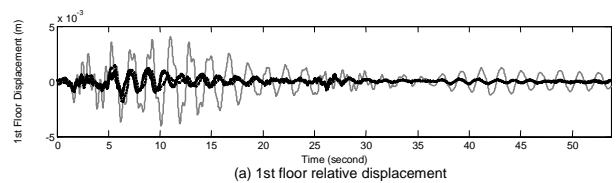
(b) 3층 상대변위



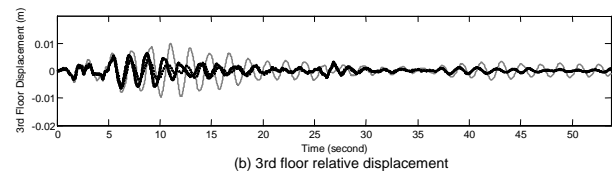
(c) 5층 상대변위

그림 10. MR감쇠기를 설치한 구조물의 수치해석 결과와 실험결과 비교 (El Centro 지진)

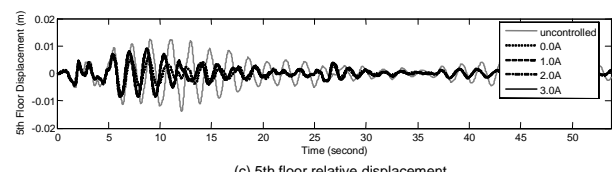
그림 11, 12는 MR감쇠기에 각각 전류 0A, 1A, 2A 및 3A를 주었을 때 구조물의 1층, 3층, 5층 상대변위와 절대가속도 응답을 시간영역으로 비교한 것이다. 전류 1A이후 변위 응답은 크게 줄어들지 않았으며 어느 구간에서는 증폭이 되는 경우도 발생하였다. 이것은 MR감쇠기 축압기의 강성이 구조물의 강성을 작용한 결과로 보여지며 주파수 영역 결과에서 MR감쇠기 설치 후 주파수가 증가한 결과를 얻었기 때문에 이것은 강성이 추가된 구조물과 유사한 것으로 사료된다.



(a) 1st floor relative displacement



(b) 3rd floor relative displacement



(c) 5th floor relative displacement

그림 11. El Centro지진 가진에 대한 MR감쇠기 전류에 따른 구조물의 상대변위 제어응답 비교 (시간영역)

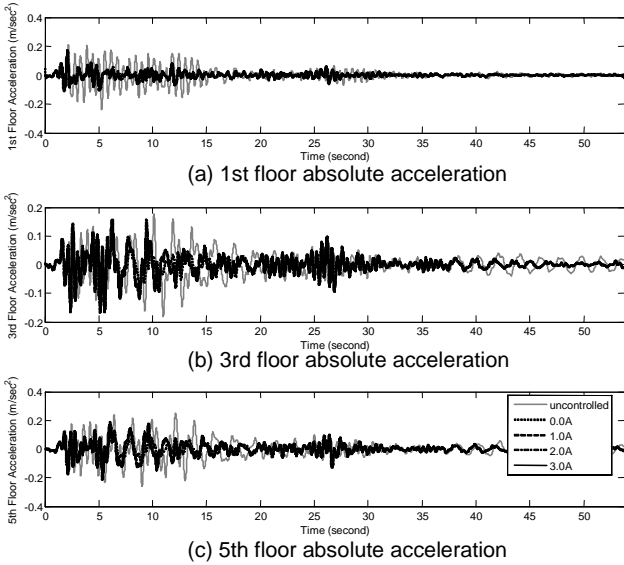


그림 11. El Centro 지진 가진에 대한 MR감쇠기 전류에 따른 구조물의 절대가속도 제어응답 비교 (시간영역)

그림 12는 MR감쇠기에 각각 전류 0A, 1A, 2A 및 3A를 주었을 때 구조물의 1층, 3층, 5층 상대변위와 절대가속도 응답을 시간영역으로 비교한 것이다. 마찬가지로 MR감쇠기 설치 후 주기변화(frequency shift)가 발생하였으며 이것은 구조물에 강성이 추가된 효과로 볼 수 있다.

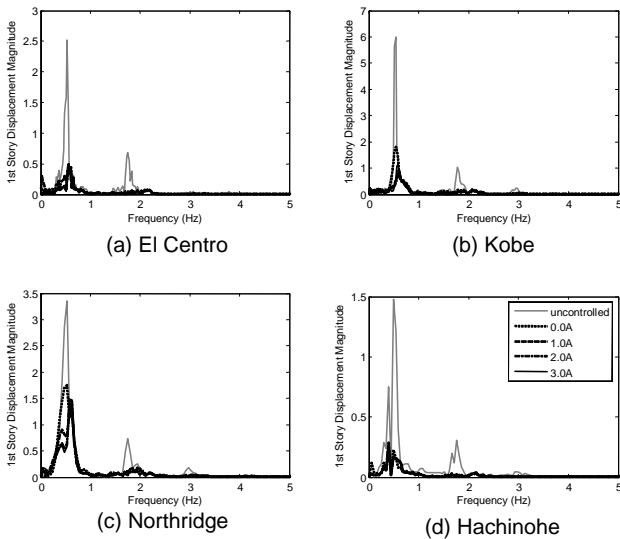


그림 12. 지진과 가진에 대한 MR감쇠기 전류에 따른 구조물의 상대변위 제어응답 비교 (주파수 영역)

4. 결론

본 논문은 실시간 하이브리드 실험기법을 이용하여 MR감쇠기가 설치된 구조물의 응답 제어성능을 평가하였다. 실시간 하이브리드 실험법은 비선형거동이 예측되는 부분을 물리적

실험체로 제작하여 해석적인 방법과 동시에 실시간으로 실험하는 방법으로 대형구조물과 상호작용하는 제어장치의 동적특성 또는 통합제어성능을 파악하는데 매우 유용하며 본 연구에서는 MR감쇠기만을 이용하여 구조물에 제어장치가 설치된 효과를 검증하였고 그 제어성능을 확인하였다. 추후 연구로써 새로운 준능동 제어 알고리즘을 개발하고 다른 알고리즘과 실험적으로 비교분석하는 연구가 필요하며, 더욱 정확한 제어성능을 파악하기 위해 실시간 하이브리드 가진 및 계측시스템의 시간지연등을 최소화 할 수 있는 새로운 보상기법등을 적용해야할 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업(R11-2002-101-03004-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 이 연구에 참여한 연구자는 「2단계 BK21사업」의 지원을 받았습니다.

참 고 문 헌

- (1) Jansen L. M., Dyke S. J., "Semi-Active Control strategies for MR Dampers : A Comparative Study", ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126, No. 8, pp.795-803
- (2) Lee H.-J., Yang G., Jung H.-J., Spencer Jr. B. F., Lee I.-W., 2006, "Semi-active neurocontrol of a base-isolated benchmark structure", Struct. Control Health Monit., vol.13, pp.682-692
- (3) Yang G., Spencer Jr. B. F., Jung H.-J., Carlson J. D., 2004 "Dynamic Modeling of Large-Scale Magnetorheological Damper Systems for Civil Engineering Applications" ,J. Engrg. Mech., Vol.130, no.9, pp. 1107-1114
- (4) M. Nakashima, H. Kato and E. Takaokas, 1992, "Development of real-time pseudo dynamic testing", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, pp.79-92.
- (5) Lee S.-K, Park E. C., Min K.-W., Lee S.-H., Chung L., Park J.-H., 2007, "Real-time hybrid shaking table testing method for the performance evaluation of a tuned liquid damper controlling seismic response of building structures", Journal of Sound and Vibration Vol. 302, pp.596-612.
- (6) Dyke S. J., Spencer Jr. B. F., Sain M. K., Carlson J. D., 1996 "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction", Smart Materials and Structures, Vol.5, pp.565-575.