

대형 MR감쇠기가 설치된 건축구조물의 실시간 하이브리드 실험 및 준능동 알고리즘 적용

Real-time Hybrid Testing a Building Structure Equipped with Full-scale MR dampers and Application of Semi-active Control Algorithms

박은천† 이성경* 이헌재** 문석준*** 정형조**** 민경원*****
Park, Eun-Churn Lee, Sung-Kyung Lee, Heon-Jae Moon, Suk-Jun Jung, Hyung-Jo Min, Kyung-Won
(논문접수일 : 2008년 5월 6일 ; 심사종료일 : 2008년 7월 21일)

요 지

실시간 하이브리드 실험법(real-time hybrid testing method)은 구조물의 수치해석부와 실험부 부분구조를 운동방정식으로 통합하여 실시간으로 동시에 계산과 실험을 수행하는 방법이다. 본 연구는 실시간 하이브리드 실험법을 사용하여 수동 및 준능동 MR감쇠기가 설치된 건축구조물의 내진성능을 정량적으로 평가한다. 건물 모델은 실험 크기 5층 건물을 강제진동 실험 결과를 통해 식별한 수치모델로 사용하였고, MR감쇠기는 실험적 부분구조로 UTM에 설치되었다. 본 연구에서 수행되는 실시간 하이브리드 실험은 사인파 및 지진파 가진을 통하여 얻은 결과와 전류에 따른 MR감쇠기의 제어력을 이용하여 얻은 Bouc-Wen 모델을 사용하여 얻은 해석모델과 일치함으로써 그 유효성을 입증하였다. 또한 예비연구로써 구조물의 응답을 최적으로 제어하기 위한 clipped-optimal 제어알고리즘과 modulated homogeneous friction 준능동 제어알고리즘을 MR감쇠기에 적용하였다. 각 전류별 Bouc-Wen 모델을 곡선맞춤하여 각각의 Bouc-Wen 모델 파라미터를 식별하였으며 그 결과를 준능동 제어알고리즘 수치해석에 적용하였다. 또한 실시간 하이브리드 실험법을 이용한 준능동 제어 실험결과와 해석결과를 비교하여 준능동 제어알고리즘의 성능을 평가함에 있어 실시간 하이브리드 실험이 합리적임을 보여준다.

핵심용어 : 실시간 하이브리드 실험법, 대형 MR감쇠기, Bouc-Wen 모델, 준능동 제어알고리즘

Abstract

The real-time hybrid testing method(RT-HYTEM) is a structural testing technique in which the numerical integration of the equation of motion for a numerical substructure and the physical testing for an experimental substructure are performed simultaneously in real-time. This study presents the quantitative evaluation of the seismic performance of a building structure installed with an passive and semi-active MR damper by using RT-HYTEM. The building model that was identified from the force-vibration testing results of a real-scaled 5-story building is used as the numerical substructure, and an MR damper corresponding to an experimental substructure is physically tested by using the universal testing machine(UTM). The RT-HYTEM implemented in this study is validated because the real-time hybrid testing results obtained by application of sinusoidal and earthquake excitations and the corresponding analytical results obtained by using the Bouc-Wen model as the control force of the MR damper respect to input currents were in good agreement. Also for preliminary study, some semi-active control algorithms were applied to the MR damper in order to control the structural responses optimally. Comparing between the test results of semi-active control using RT-HYTEM and numerical analysis results show that the RT-HYTEM is more reasonable than numerical analysis to evaluate the performance of semi-active control algorithms.

Keywords : real-time hybrid test method, large-scale mr damper, bouc-wen model, semi-active control algorithms

† 책임저자, 학생회원 · 단국대학교 건축공학과 박사과정
* 단국대학교 건축공학과 연구교수
** 삼성엔지니어링 연구원
*** 한국기계연구원
**** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수
***** 교신저자, 정회원 · 단국대학교 건축공학과 교수
Tel: 031-8005-3734 ; Fax: 031-8005-3741
E-mail: kwmin@dankook.ac.kr

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

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, 준능동 형식의 감쇠기가 소음 및 진동제어용으로 제안되고 있다. 이중 준능동 제어장치로 조작이 용이하며 반응속도가 매우 빠른 MR감쇠기를 이용하여 구조물 지진응답을 제어하기 위한 많은 해석적인 연구와 실험적인 연구가 진행되었으며, 많은 제어알고리즘 특히 MR감쇠기에 적용할 수 있는 준능동 제어알고리즘이 많이 제안되었고, 이렇게 제안된 준능동 제어알고리즘의 비교연구 또한 많이 수행되었다(Jansen 등, 2000). 또한 MR감쇠기의 이력을 모사하기 위한 해석모델은 Bingham모델, 단순 Bouc-Wen모델 및 현상학모델 등 많은 연구자에 의해 개발되었다(Lee 등, 2006). 그러나 기존에 제안된 MR감쇠기 모델이 MR감쇠기 설계에 유용하다라도, 실제 동적하중을 받는 MR감쇠기의 비선형 거동, 특히 비선형 저항력-속도 거동을 묘사하는 데는 충분하지 않다. 또한 전류를 공급하는 장치에 의해 MR감쇠기의 성능이 불확실하며 준능동 제어장치로 거동할 때 전류에 따라 변하는 이력모델이 불확실하다(Yang 등, 2004). 따라서 이론적으로 개발된 제어알고리즘과 해석적으로 그 성능을 검증함에 있어서 MR감쇠기를 설치한 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. 그러나 이러한 사례와 실험연구는 많은 제반비용이 수반되고, 특히 MR감쇠기만의 이력특성 조사를 통한 수치모델의 수립에 만족해야 한다. 그리고 실제 구조물에 설치하고 그 성능을 검증함에 있어서 구조물의 안정성에 의해 충분한 가진력을 제공받기 어려우며, 이를 통해 수동제어 상태의 제어성능과 준능동 제어알고리즘 적용시의 제어성능을 비교·검토하기에 부족함이 발생한다.

본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 실물규모 스케일의 모델구조물을 바탕으로 설계된 대용량 MR감쇠기를 이용하여 실시간 하이브리드 실험기법을 제안한다. 실시간 하이브리드 실험법은 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 예

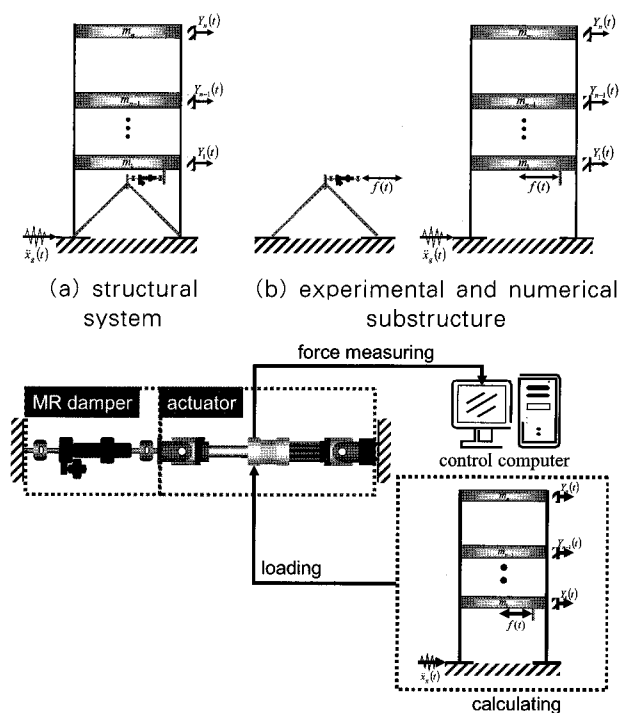
측되는 부분을 물리적 실험체로 제작하여 해석적인 방법과 동시에 실시간으로 실험하는 방법으로 대형구조물과 상호작용하는 제어장치의 동적특성 또는 통합제어성능을 파악하는데 매우 유용하다(Lee 등, 2007).

본 논문에서는 이러한 실시간 하이브리드 실험법을 이용하여 대용량 MR감쇠기가 설치된 구조물의 지진응답 제어성능을 검토하며 준능동 제어알고리즘을 적용하여 제어알고리즘별 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 부분구조와 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 UTM응답을 UTM에 전송하여 간접적으로 UTM을 제어할 수 있게 하였다. 여기서 UTM에 장



(c) implementation of real-time hybrid testing method
 그림 1 대형 MR감쇠기의 실시간 하이브리드 실험 개념도

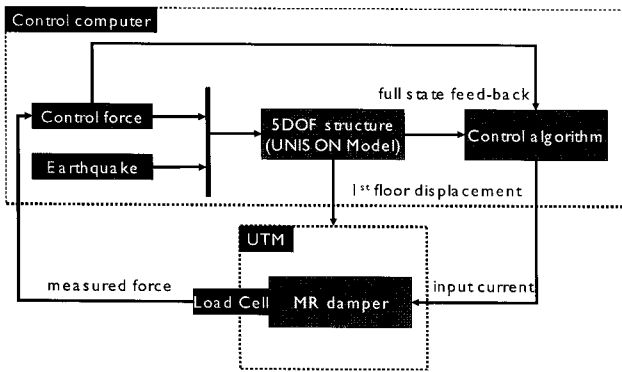


그림 2 MR감쇠기 준능동 하이브리드 실험의 흐름도

착된 로드셀에서 계측되는 힘이 상호작용력이 되고 구조물에 제어력으로 작용하게 되며 이는 그림 2의 흐름도와 같이 실시간으로 폐루프 시스템을 수행하여야 한다.

2.2 구조물 제어기 설계

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

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

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 $\mathbf{\Gamma}$ 는 스칼라 값 1로 구성된 열벡터이다.

위의 운동방정식을 다음과 같은 상태공간 형식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{A} \mathbf{z} + \mathbf{H} \mathbf{f} + \mathbf{E} \ddot{x}_g = \mathbf{A} \mathbf{z} + \mathbf{B} \mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C} \mathbf{z} + \mathbf{D} \mathbf{f} \end{aligned} \quad (2)$$

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.

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

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} , \mathbf{C} 그리고 \mathbf{D} 는 각각 다음과 같다.

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

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

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2n \times n} & \mathbf{0}_{2n \times 1} \\ -\mathbf{M}_s^{-1} \mathbf{A} & \mathbf{0}_{n \times 1} \end{bmatrix}$$

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.

또한 본 예제구조물의 진동제어용으로 설계된 대용량 MR감쇠기는 한국기계연구원과 한국과학기술원의 공동으로 설계되고 제작된 MR감쇠기를 사용하였다. 그림 4(a)은 제작된 MR감쇠기의 사진이고 그림 4(b)는 전류를 통하지 않은 수

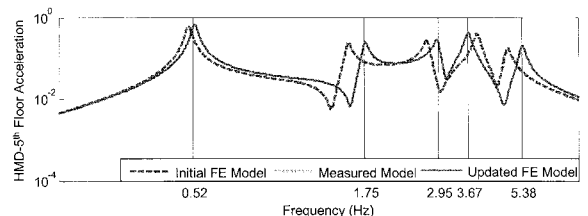


그림 3 모델구조물의 실험에 의한 시스템식별 결과

동상태(passive off)의 계측된 MR감쇠기의 속도이력을 보여준다. 수치모델은 MR감쇠기 모델중 단순 Bouc-Wen모델을 이용하였다. 단순 Bouc-Wen모델은 다음식과 같다.

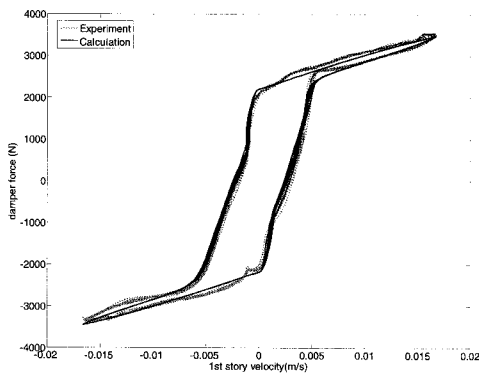
$$F_{MR} = \alpha z + c\dot{x} + kx + f_o \quad (4)$$

여기서, k 는 축압기(accumulator)의 강성이고, c 는 점성, f_o 는 밀봉과 축증시의 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.(Dyke 등, 1996)

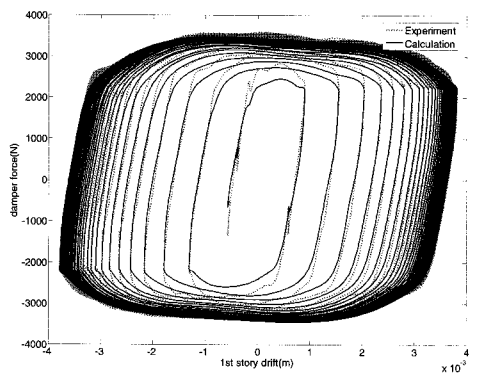
$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x}|z|z|^{n-1} - \beta\dot{x}|z|^n + A\dot{x} \quad (5)$$

여기서, γ, β, A, n 는 이력곡선의 모양을 결정하는 계수이다. 본 연구의 대용량 MR감쇠기의 실험데이터를 이용하여 최소자승법에 의해 얻은 단순 Bouc-Wen모델의 변수는 다음과 같고, 그림 4에서 볼 수 있듯이 실선의 수치모델과 점선의 실측된 데이터와 일치한 결과를 얻었다.

$$\alpha=13288.130N, c=81418.582N \cdot sec/m, k=16,647.46$$



(a) passive 상태의 속도이력



(b) passive 상태의 변위이력

그림 4 MR감쇠기의 passive 상태의 속도 및 변위이력 성능

$$N/m, f_o=6.106N, \gamma=471409.377m^{-1}, n=3.0851, \beta=-335518.804m^{-1}, A=497.295m^{-1}$$

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

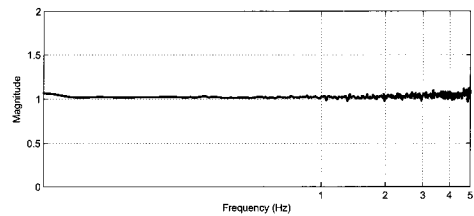
3.2 계측 및 가진시스템 설계

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

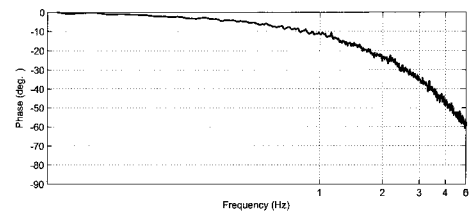
가진기 제어컴퓨터와 가진 및 데이터 수집 시스템은 동시에 실시간으로 진행되며, 폐회로 시스템으로 되어있다. 따라서 이러한 시스템은 약간의 시간지연 또는 위상지연에 매우 민감하며 때로는 시스템을 불안정하게 만든다. 또한 미소한 위상지연은 MR감쇠기에서 계측된 제어력이 심지어 구조물을 가진하게 되는 결과를 초래하여 chattering효과와 같은 결과를 얻게 된다.

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 5는 명령 변위신호에 대한 계측된 변위신호의 전달함수를 보여준다. 증폭은 1의 크기로 동일하나 위상에서

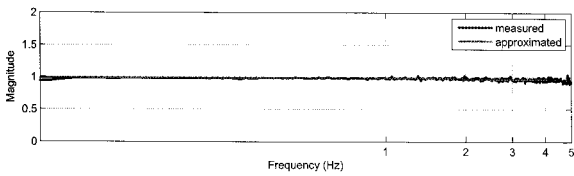


(a) 가진 및 계측시스템의 전달함수 크기

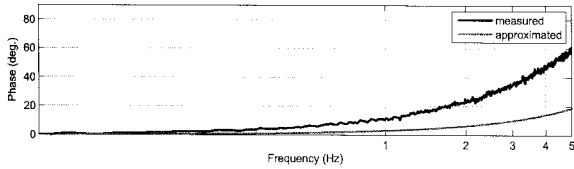


(b) 가진 및 계측시스템의 전달함수 위상

그림 5 명령에 대한 계측된 변위신호의 전달함수



(a) 역전달함수의 크기 곡선적합



(b) 역전달함수의 위상 곡선적합

그림 6 가진 및 계측시스템의 역전달함수

1Hz에서 약 10도 5Hz에서 약 60도의 위상지연을 보인다.

가진 및 계측시스템의 변위 전달 특성을 상쇄시키기 위하여 계측된 변위신호에 의한 명령 변위신호의 역전달함수를 곡선적합하였다. 그러나 시스템이 증폭이 1로 동일하면서 위상을 변경할 때 특정 시스템에서는 불안정한 시스템을 유발한다. 따라서 이를 최소화하는 시스템을 설계할 필요가 있다. 역전달함수의 곡선적합은 Matlab내장함수 fitsys()를 사용하였으며, 관심 있는 주파수구간 0Hz~5Hz에서의 최소 안정 수준에서 최적 곡선적합 결과 그림 6과 같다. 역전달함수의 증폭은 1로 동일하였고 위상에서 실제로 발생한 5Hz 위상차는 60도에 달하지만 역전달함수 곡선적합결과는 20도 수준에 그쳤다. 그러나 예제구조물의 주요한 모드는 1차모드이며 0.5Hz이므로 위상지연의 효과는 미미하다. 따라서 최적화 결과로 얻은 다음 식을 이용하여 가진 제어기에 적용하였다.

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

4. 적용된 준능동 제어알고리즘

4.1. Clipped-Optimal Control 알고리즘

MR감쇠기 제어에 효과적인 알고리즘으로서 잘린 최적제어 알고리즘(clipped-optimal control algorithm)이 Dyke 등(1996)에 의해 제안되었다. 잘린 최적제어방법은 선형최적제어기(linear optimal controller) $K_c(s)$ 을 설계하는 것이다. 이것은 계측된 제어력 f 이 적용된 구조물의 계측된 응답 y 에 기초하여 요구제어력 $f_c = [f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{cn}]^T$ 을 계산한다.

$$f_c = L^{-1} \left\{ -K_c(s) L \begin{Bmatrix} y \\ f \end{Bmatrix} \right\} \quad (7)$$

여기서, $L\{\cdot\}$ 는 라플라스 변환이다.

MR감쇠기에서 발생하는 힘은 구조물의 개별 응답에 의존적이므로, 요구최적제어력 f_{ci} 는 MR감쇠기에 의해 항상 발생될 수 없고 제어전압 v_i 만이 직접적으로 장치에 힘을 증가시키거나 감소시키며 제어할 수 있다. 따라서 힘피드백 루프는 MR감쇠기가 요구최적제어력 f_{ci} 를 근사하게 생산할 수 있도록 통합되었다.

MR감쇠기가 요구최적제어력 f_{ci} 에 따라서 근사한 제어력을 발휘하기 위해서는 명령신호 v_i 가 아래와 같이 선택되어 진다. MR감쇠기가 요구최적제어력을 제공할 때(i.e., $f_i = f_{ci}$), 감쇠기는 그 상태에 준하는 제어력이 발휘되도록 전압신호를 생성하여야 한다. 만약 감쇠기에 의한 제어력이 요구제어력보다 작으며 두 힘이 같은 부호를 가질 때 감쇠기의 제어력은 요구제어력에 맞게 최대 제어력을 발휘하도록 전류증폭기에 최대전압을 보낸다. 그 외의 경우에는 감쇠기에 0의 신호를 보낸다.

$$v_i = V_{\max} H(\{f_{ci} - f_i\}f_i) \quad (8)$$

여기서, V_{\max} 는 감쇠기에 적용되는 최대전압, $H(\cdot)$ 는 헤비사이드 계단함수로서 $(f_{ci} - f_i)f_i$ 값이 0보다 큰 경우 1, 그 외의 경우 0을 되돌려주는 함수이다(Jansen and Dyke, 2000).

본 연구에서 최적제어기의 설계는 선형이차안정기(linear quadratic regulator, LQR)를 사용하였고 상태변수에 대한 가중치 행렬은 선행 수치연구를 통해 얻은 다음값을 사용하였다.

$$G_{LQR} = [-98301479.1 \quad 110902868.9 \quad -36659599.6 \quad 24569454.5 \quad -12841877.0 \quad -4926535.9 \quad -3813412.5 \quad -331115.5 \quad -1239172.8 \quad -1309155.8]$$

4.2. MHF 알고리즘

준능동 제어알고리즘으로써 마찰력을 조절할 수 있는 마찰 감쇠기에 적용할 수 있는 알고리즘으로 MHF(modulated homogeneous friction)제어알고리즘이 Inaudi(1997)에 의해 제안되었다. 마찰감쇠기의 거동과 MR감쇠기의 거동이 매우 유사하기 때문에 본 알고리즘이 MR감쇠기의 제어알고

리즘으로 고려되었다. 장치의 변형에 구간 최대 극점 즉, 준능동 제어장치의 양끝단의 상대속도가 0일 때, 마찰표면의 수직항력이 새로운 값으로 수정된다. 수직항력, $N_i(t)$ 는 준능동제어장치의 변형 절대값으로 비율적으로 선택된다. 제어 법칙은 다음과 같다.

$$N_i(t) = g_i |P[\Delta_i(t)]| \quad (9)$$

여기서, g_i 는 양의 계인이고, $P[\cdot]$ 연산자(앞선 구간의 최대값 연산자)는 다음식과 같다.

$$P[\Delta_i(t)] = \Delta_i(t-s), \text{ where } s = \{\min x \geq 0 : \Delta_i(t-x) = 0\} \quad (10)$$

$\Delta_i(t-s)$ 는 i 번째 장치의 변형의 가장최근에 발생한 구간 극점으로 정의한다.

이 알고리즘은 변화마찰형 감쇠기를 위해 개발되었기 때문에 MR감쇠기에 적용하기 위해서는 다음과 같은 수정이 필요하다.

- i) MR감쇠기는 정지 마찰력에 지배를 받지 않기 때문에, 제어력이 정지 마찰력 $\mu N_i(t)$ 를 넘는지 체크할 필요가 없다. 여기서, μ 는 정지 마찰계수.
 - ii) 제어력 계산은 MR감쇠기가 요구수직항력에 따른 근사화된 마찰력을 발휘하도록 수행되어 진다.
- 따라서 제어목표는 다음 크기만큼의 요구제어력을 생성하는 것이다.

$$f_{ni} = \mu g_i |P[\Delta_i(t)]| = g_{ni} |P[\Delta_i(t)]| \quad (11)$$

여기서, 비율상수 g_{ni} 는 강성단위(N/mm)를 갖는다.

clipped-optimal 제어에서 처럼 MR감쇠기는 직접적으로 명령을 수행할 수 없기 때문에 제어력 피드백이 사용된다. 계측된 제어력은 식 (11)에서 구한 요구 제어력과 비교하며 다음식과 같은 제어법칙의 결과를 얻는다.

$$\nu_i = V_{\max} H(f_{ni} - |f_i|) \quad (12)$$

적절한 g_{ni} 의 선택이 중요하지만 g_{ni} 의 최적값은 지반가속도의 크기에 의존적이며, 본 연구에서는 3개의 역사지진 지반가속도에 의하여 g_{ni} 값은 150,000N/m로 선택하였다.

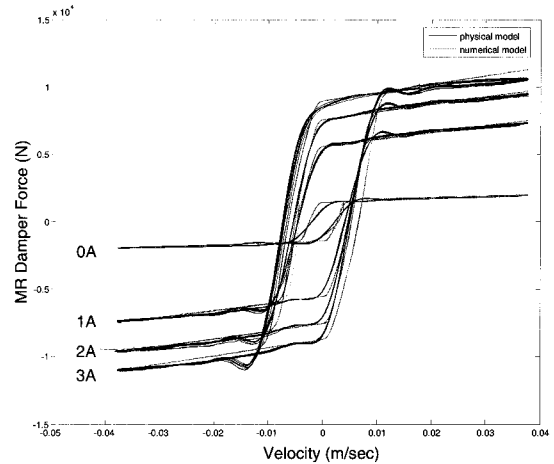
이 제어알고리즘은 단지 계측되는 하중과 제어장치의 상대변위만을 필요로 하기 때문에 수행하기에 상당히 직관적인 장점이 있다.

5. 수치해석 및 통합제어기 설계

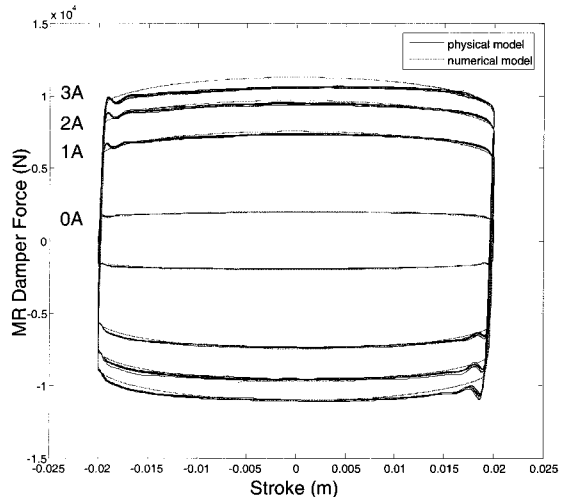
5.1 준능동제어 알고리즘 수치해석

제작된 MR감쇠기를 수치모델로써 검토하고 준능동 제어 알고리즘을 적용하기 위해서는 각 전류별 MR감쇠기의 수치 모델을 찾고, 이때의 각각의 Bouc-wen모델의 파라미터를 식별해야 한다. 본 논문에서는 MR감쇠기에 가진주기 0.3Hz 및 가진변위 20mm의 sine파 실험을 통하여 그림과 같은 각 전류별 이력곡선을 얻었다. 또한 Bouc-wen모델의 파라미터를 식 (13)의 최적화방법을 통해 성능지수를 최소화 하는 전류별 파라미터를 식별하였다.

$$J(\{p\}) = \sum_{k=1}^N [f_e(k\Delta t) - f_{MR}(\{p\}, k\Delta t)]^2 \quad (13)$$



(a) Force-velocity relation



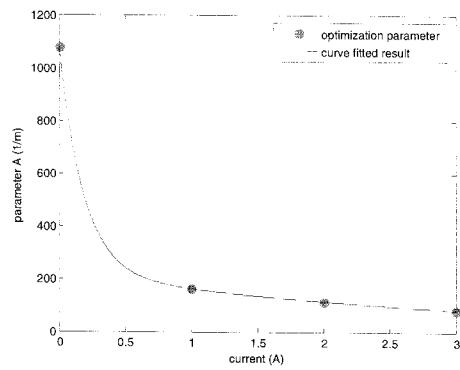
(b) Force-displacement relation

그림 7 계측응답과 최적화된 Bouc-wen모델의 각각 전류에 따른 속도이력

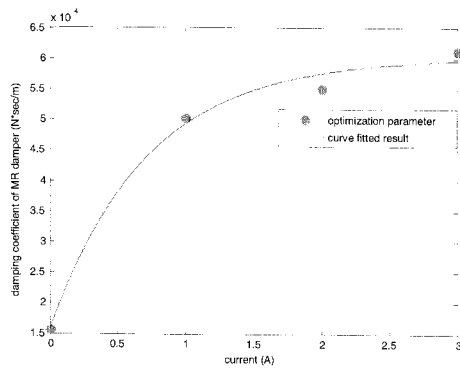
여기서, $f_e(k\Delta t)$ 는 k 번째 샘플링타임에 측정된 힘이며, $\{p\}$ 는 1×8크기의 식별 파라미터로 $\{\alpha, c_{MR}, k_{MR}, f_0, \gamma, n, \beta, A\}$ 이고 $f_{MR}(\{p\}, k\Delta t)$ 는 k 번째 이산해석시간에서의 계산된 힘이다.

최적화방법을 통해 얻은 계측모델과 수치모델의 결과는 그림 7과 같다. 단순 Bouc-wen 모델로 최적화하였기 때문에 힘의 roll-off현상의 모사를 제외하고 각각 일치하는 결과를 얻었다.

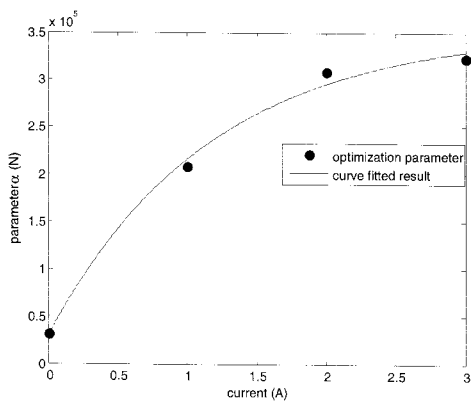
그림 8은 각 전류별 Bouc-wen 파라미터를 곡선적합한 결과이다. 이를 통하여 준능동 제어알고리즘 적용시 표 1과 같은 파라미터를 적용하여 수행할 수 있다.



(a) shape parameter A



(b) damping coefficient of MR damper



(c) shape parameter α

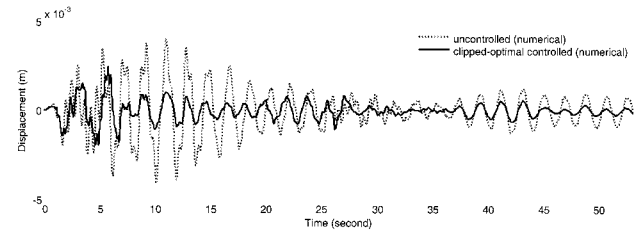
그림 8 각 전류별 Bouc-wen parameter 곡선적합

표 1 각전류에 따른 Bouc-Wen 파라미터 식별(x=input current)

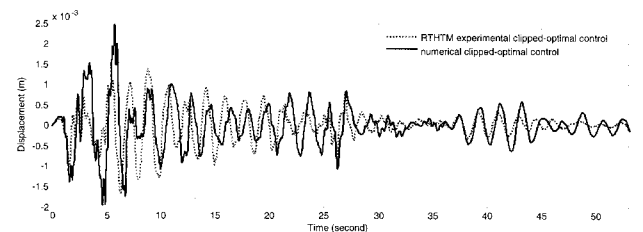
Parameter	Identified value
shape parameter α	$\alpha = -324676.08e^{-0.85x} + 354777.40$ (N)
damping coefficient c_{MR}	$c = -44567.17e^{-1.4x} + 60330.96$ (N·sec/m)
stiffness of damper k_{MR}	16647.456 N/m
initial force f_0	6.10N
shape parameter γ	471409.377m ⁻²
Bouc-wen parameter n	3.058
shape parameter β	3.35518m ⁻²
shape parameter A	$A = 854.7e^{-5.476x} + 222.5e^{-0.3321x}$ (m ⁻¹)



그림 9 식별된 파라미터를 적용한 passive상태의 제어력 비교



(a) 비제어 및 제어시 수치해석 결과



(b) RT-HYTEM 실험과 수치해석결과의 비교

그림 10 식별된 파라미터와 clipped-optimal control 알고리즘을 적용한 결과

그림 9는 수동제어상태의 Bouc-wen모델을 통해 수치해석한 결과와 실험결과의 비교이다. 서로 잘 일치함을 보여준다.

그림 10(a)는 식별된 MR감쇠기 모델 그리고 준능동 제어알고리즘을 적용하여 얻은 제어 및 비제어 결과이다. 수치해석적으로는 합리적인 제어성능을 보인다. 하지만 그림 10(b)와 같이 준능동 제어알고리즘을 적용하면 실험결과와 다른경향을 보임을 알 수 있다. 심지어 최대변위응답에서 2배이상의 많은 차이를 보인다. 이것은 식별된 MR감쇠기 모델 즉 Bouc-Wen모델이 전류에 따라 변화하는 양상이 실제 MR감쇠기와는 다르다는 것을 반증하며, 각 전류마다 MR감쇠기가 정확히 Bouc-Wen모델을 따른다는 가정과 전류가 입력될 때 반응하는 속도의 반영이 되지 않고, 또한 가진 주기에 따라 모델이 변화하는것에 기인한다. 따라서 이러한 전류별

변화하는 비선형 감쇠기모델은 실시간 하이브리드 실험으로 준 능동 제어성능을 평가하는 것이 합리적임을 알 수 있다.

4.4 통합 제어기 설계

본 논문에서 제안하는 방법을 하나의 컴퓨터 제어시스템에서 실시간으로 동시에 작동해야 하기 때문에 하이브리드 알고리즘 과 위상지연보상 그리고 준능동 제어알고리즘 적용이 되는 통합 제어기를 설계할 필요가 있다. 특히 clipped-optimal control 알고리즘에서는 선형이차안정기를 사용하기 때문에 구조물의 full-state를 사용해야 한다. 실제 구조물에 적용시에는 전체상 태변수를 계속하기 어렵기 때문에 Kalman필터를 적용해야 하 지만 실시간 하이브리드 실험은 구조물의 full-state를 모두 제 공하는 장점이 있다. 통합제어기는 Matlab Simulink의 Real-Time Windows Target을 사용하여 설계하였다.

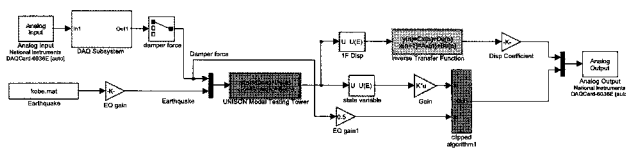
그림 11(a)는 clipped-optimal control 알고리즘의 실시간 하이브리드 실험 통합제어기이고, 그림 11(b)는 modulated homogeneous friction 알고리즘의 실시간 하이브리드 실험 통합 제어기이다.

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

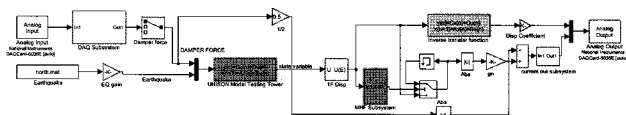
각각의 경우의 제어성능을 확인하기 위하여 다음과 같은 각각 최대응답 변위 및 가속도 성능지수와 RMS응답 변위 및 가속도 성능지수를 선정하였다.

$$J_1 = \frac{\max\{|y_{ic}(t)|\}}{\max\{|y_{iu}(t)|\}}, J_2 = \frac{E[y_{ic}(t)^2]}{E[y_{iu}(t)^2]}$$

$$J_3 = \frac{\max\{|y_{ic}''(t)|\}}{\max\{|y_{iu}''(t)|\}}, J_4 = \frac{E[y_{ic}''(t)^2]}{E[y_{iu}''(t)^2]} \quad (14)$$



(a) Clipped-optimal control algorithm



(b) Modulated homogeneous friction control algorithm

그림 11 실시간 제어알고리즘 하이브리드 통합 실험제어기

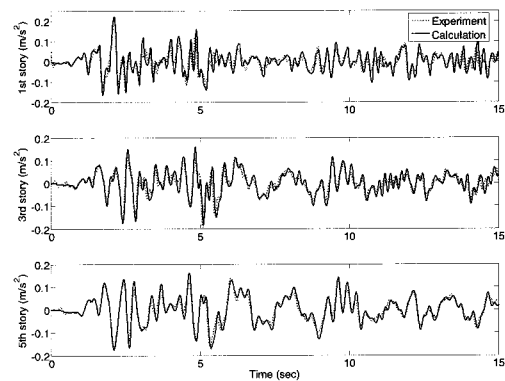
5. 실험결과

그림 12는 El Centro지진파 실험에서 passive상태의 MR감쇠기의 제어시 1,3,5층의 수치해석과 실험결과와 절대 가속도와 변위를 비교한 것이다. 실험결과와 수치해석이 일 치함으로 실시간 하이브리드 실험의 타당성을 보여준다.

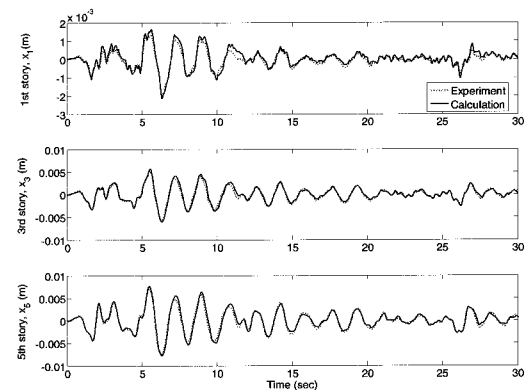
그림 13은 El Centro지진파 가진시 MR감쇠기의 이력을 보여준다. 수치해석에 의한 결과와 실험결과가 최대제어력 모 사부분에서 오차가 있으나 대체적으로 일치함을 보여준다.

그림 14는 각 지진파 실험에서 1층 변위응답을 알고리즘 별 시간영역 응답을 비교한 그림이며, 그림 15는 5층 가속도 응답의 알고리즘별 주파수영역 응답을 비교한 그림이다.

실험결과는 El Centro지진의 경우 변위 제어성능은 수동 상태가 적절한 제어성능을 보였으며, 두가지 알고리즘이 크 게 차이를 보이지 않았다. 이것은 구조물의 주기가 2초인 장 주기 구조물인 점과 실제 모델구조물 실험시 가진하중을 많 이 줄인 상태와 동일한 가진이 되어, 1층 변위 응답이 크지 않은 결과로 볼 수 있다. Kobe지진의 실험결과는 준능동 제 어알고리즘의 1층 변위 제어성능이 수동상태보다 약간 좋은

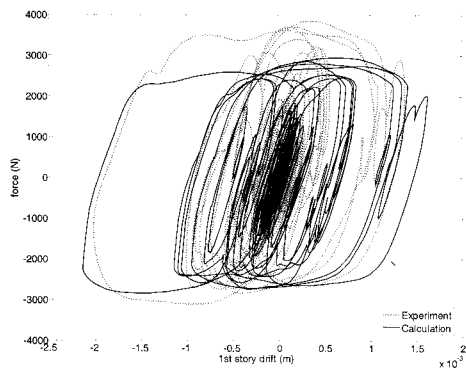


(a) absolute acceleration response under El Centro

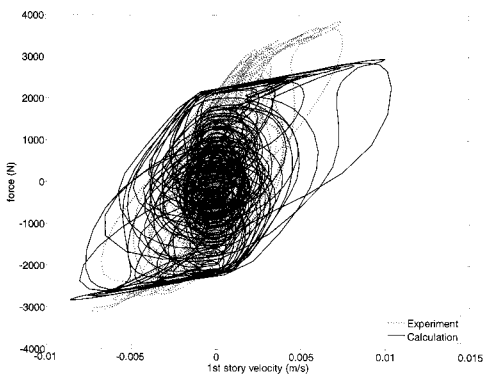


(b) displacement response under El Centro

그림 12 Comparison between calculated and experimentally measured responses to El Centro wave

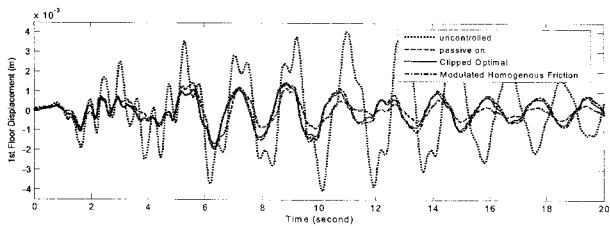


(a) Force-displacement curve

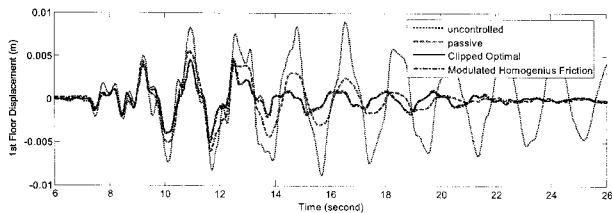


(b) Force-velocity curve

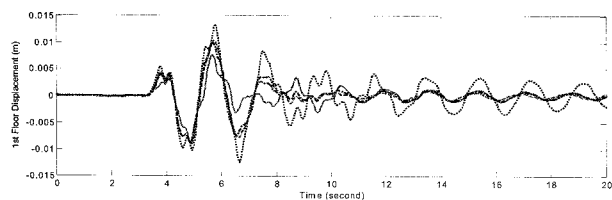
그림 13 Comparison between calculated and experimentally measured hysteresis under El Centro wave excitation



(a) El Centro



(b) Kobe



(c) Northridge

그림 14 지반가속도 가진에 의한 1층 변위 응답(시간영역)

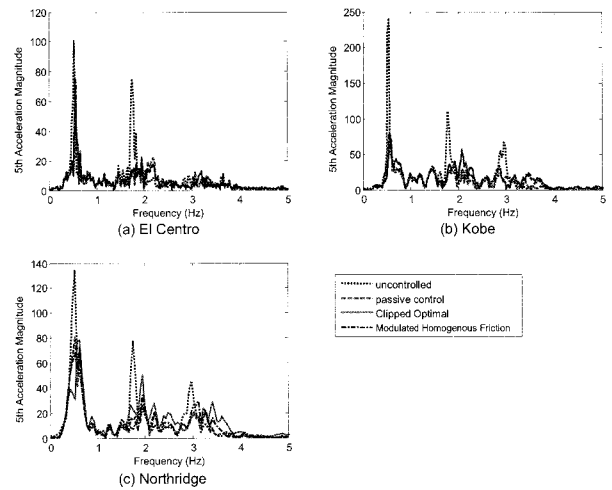


그림 15 지진가진에 의한 5층 가속도 응답(주파수 영역)

표 2 제어알고리즘별 성능비교

Earthquake	Floor	Performance Measure	clipped-optimal	MHF
El Centro	1F	J_1	0.411	0.453
		J_2	0.341	0.381
		J_3	0.880	0.880
		J_4	0.517	0.526
	5F	J_1	0.662	0.693
		J_2	0.573	0.606
		J_3	0.778	0.781
		J_4	0.637	0.653
Kobe	1F	J_1	0.503	0.567
		J_2	0.273	0.286
		J_3	1.149	1.112
		J_4	0.690	0.705
	5F	J_1	0.771	0.811
		J_2	0.367	0.389
		J_3	0.883	0.900
		J_4	0.603	0.619
Northridge	1F	J_1	0.660	0.749
		J_2	0.473	0.628
		J_3	1.030	0.691
		J_4	0.777	0.618
	5F	J_1	0.745	0.804
		J_2	0.573	0.675
		J_3	1.350	1.072
		J_4	0.762	0.705

결과를 얻었고 두 제어알고리즘의 성능이 비슷하게 나타났다. Northridge지진 실험결과는 변위제어성능이 초반에는 clipped-optimal control 알고리즘이 좋은 성능을 보였다.

표 2에서 제어알고리즘별 각 지진파에 대해 성능을 비교하였

다. El Centro지진과 Kobe지진의 경우 Clipped-Optimal 알고리즘이 MHF알고리즘에 비하여 좋은 성능을 보였지만, Northridge 지진의 경우 MHF알고리즘이 좋은 성능을 보였다. MHF알고리즘은 지반가속도 즉 가진하중에 따라 g_n 값을 선택해야 하는데, 본 실험에서는 150,000N/m으로 고정하였기 때문에 특정한 가진하중에 대해서만 좋은 성능을 보이는 것으로 확인되었다.

6. 결 론

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, 준능동 제어알고리즘을 적용하여 그 제어성능을 확인하였다. 추후 여러 준능동 알고리즘을 실험적으로 적용하여 분석할 필요가 있으며, 또한 각 알고리즘의 파라미터 연구로써 MR감쇠기가 비선형성이 매우크기 때문에 실시간 하이브리드 실험법은 수치해석 방법에 비해 합리적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 더욱 정확한 제어성능을 파악하기 위해 실시간 하이브리드 가진 및 계측시스템의 시간지연등을 최소화할 수 있는 새로운 보상기법등을 적용하는 연구를 수행하여 실시간 하이브리드 실험법의 신뢰성을 높여야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업(R11-2002-101-03004-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 이 연구에 참여한 연구자는 '2단계 BK21

사업」의 지원을 받았습니다.

참 고 문 헌

- 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*, pp.565~575.
- Inaudi J.A.** (1997) Modulated Homogeneous Friction : a Semi-active Damping Strategy, *Earthquake Engineering and structural Dynamics*, 26, pp.361~376.
- Jansen L. M., Dyke S. J.** (2000) Semi-Active Control strategies for MR Dampers : A Comparative Study, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 126(8), pp.795~803.
- 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.*, 13, pp.682~692.
- 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* 302, pp.596~612.
- Nakashima M., Kato H., Takaokas E.** (1992) Development of real-time pseudo dynamic testing, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21, pp.79~92.
- 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.*, 130(9), pp.1107~1114.