MR 댐퍼를 이용한 비대칭 사장교의 지진 진동제어 성능평가

허광희* · 김충길** · 공영이***

Heo, Gwanghee*, Kim, Chunggil**, Gong, Yeong I***

Performance Evaluation of Seismic Vibration Control of Asymmetrical Cable-Stayed Bridge Using MR Damper

ABSTRACT

A study has been carried out that effectively controls the vibration of asymmetric cable-stayed bridges caused by earthquakes with MR dampers. In order to enhance the practical serviceability of MR dampers, an asymmetric cable-stayed bridge structure has been designed and produced, and a MR damper has been produced so as to have this bridge structure controlled appropriately. An experiment that controls vertical and horizontal vibrations has been carried out by exciting the asymmetric cable-stayed bridge in the horizontal direction with the El-centro seismic wave. The control performance of the MR damper has been evaluated under the five control conditions in the experiments of vibration control in each direction. As a result of the experiment, MR dampers were proved to control vibrations more effectively when either Lyapunov control algorithm or Clipped-optimal control algorithm was used to control vibrations of the asymmetric cable-stayed bridge caused by earthquakes. In addition, different controlling effects were found in vibration controls in vertical and horizontal directions due to the asymmetry of the structure and the horizontal excitation. With such controlling effects, semi-active MR dampers are evaluated to effectively control vibrations caused by earthquakes in flexible and asymmetric structures such as asymmetric cable-stayed bridges.

Key words : Real-time control, Feedback control, Lyapunov algorithm, Clipped-optimal control, MR damper

초 록

비대칭 사장교에 지진으로 인한 진동을 MR(Magneto-rheological) 댐퍼를 이용하여 효과적으로 제어하는 연구를 수행하였다. MR 댐퍼의 실용적인 사용성을 높이기 위하여 비대칭 사장교 구조물을 설계/제작하고, 이 교량구조물을 적정하게 제어할 수 있도록 MR 댐퍼를 제작하였다. El-centro 지진파로 비대칭 사장교를 수평방향으로 가진하여 수직방향과 수평방향의 진동을 제어하는 실험을 하였다. 각 방향의 진동제어 실험에 5가지의 제어 조건으로 MR 댐퍼의 제어성능을 평가 하였다. 실험결과 MR 댐퍼는 지진진동으로 인한 비대칭사장교를 진동제어 하기 위하여 Lyapunov Control 알고리즘과 Clipped-optimal control 알고리즘을 이용하여 제어를 할 경우, 보다 효과적으로 진동을 제어하는 것을 알 수 있었다. 그리고 구조물의 비대칭성과 수평 가진으로 인하여 수직 및 수평 방향의 진동제어가 서로 다른 제어효과를 보였다. 이와 같은 제어효과는 비대칭 사장교와 같은 유연하며 비대칭인 구조물에 준능동의 MR 댐퍼가 효과적으로 지진진동을 제어하는 것으로 평가되었다.

검색어 : 실시간 제어, 피드백 제어, 리아프노프 알고리즘, Clipped-optimal 알고리즘, MR 댐퍼

* 정희원 · 건양대학교 건설환경공학과 교수 (heo@kyu.ac.kr)

** 교신저자 · 충남대학교 토목공학과 박사과정 (Corresponding Author · Chungnam National University · cg-kim@hanmail.net)

*** 정희원 · (주)정신이앤시 (yelin002@hanmail.net)

Received October 16, 2013/ revised December 24, 2013/ accepted March 30, 2014

1. 서론

최근 중국 등 신흥국가를 중심으로 구조적 안정성 및 기능적 사용성 측면뿐만 아니라, 미(美)적 상징성을 반영하도록 랜드마크 구조물 건설에 막대한 자본과 노력이 집중되고 있다. 이러한 대표적인 구조물인 장대형 비대칭 사장교는 불특정 진동 하중에 취약한 단점에도 불구하고 앞서 언급한 상징성, 안정성, 또는 지형적인 특성에 따른 사용성 등으로 인하여 꾸준히 건설되고 있다. 이러한 유연한 구조적 특성의 비대칭 사장교 구조물은 중·장기적인 관점에서 발생된 진동을 효과적으로 관리하고, 구조적 안전성을 확보하여, 내구수명의 연장을 위한 적절한 대응책이 요구된다. 이와 같은 교량의 안전과 유지관리를 위하여 장대 케이블 교량의 진동을 제어하는 연구가 꾸준히 진행되고 있다(Kobori, 1994; Jolly, 2000; Heo, 2010; 2011).

Soong et al. (1990)은 진동제어에 관한 다양한 기술 중 준능동형 진동제어 기술이 기존 수동 및 능동형 제어 방법의 한계를 극복하면서도, 경제적/효율적인 진동 제어를 실현할 수 있는 가능성을 제시하였다. 준능동형 진동제어 기술을 위한 준능동 댐퍼는 Carlson and Spencer (1996)이 1990년대 들어서서 미국 Lord사에서 개발한 MR 유체를 이용한 MR 댐퍼를 처음으로 건설 분야에 도입하면서 활발히 연구되고 있다. 또한, 미국의 Spencer et al. (1997) 및 Dyke et al. (1998)은 이러한 MR 유체를 활용한 MR 댐퍼 구동을 위한 준능동 제어알고리즘을 개발·제안하였고, 이에 대한 수치적 검증과 더불어 실험적 연구를 수행하였다. 또한, 일본에서는 Sodeyama et al. (2003; 2004)이 바이패스 형태의 대용량 MR 댐퍼를 개발하고, 앞서 Spencer et al. (1997) 및 Dyke et al. (1998)이 제안한 동적모델을 이용해 MR 댐퍼의 성능을 평가한 바 있다. 이와 같은 MR 댐퍼는 지진 진동을 제어하기에 적절한 제어 알고리즘이 필요하다. 앞서 언급한 Spencer et al. (1997) 및 Dyke et al. (1998)은 MR 댐퍼의 메커니즘에 대한 규명뿐만 아니라, 이를 활용할 수 있도록 다양한 준능동제어 알고리즘을 정리하고 제안하였으며, 이에 대한 수치적 또는 실험적 검증을 통해 타당성을 입증하였다. 최근에는 건설분야에 IT기술을 접목한 무선 I/O 기반의 피드백 진동제어 개념이 새로이 도입되면서, Heo and Kim (2012)은 통합무선계측 및 제어 시스템을 개발하고, 전단형 MR 댐퍼를 이용하여 모형 사장교의 진동을 제어하고자 하였다. 하지만, 통신 거리 및 속도, 장애물의 간섭, 구조물의 동적응답 증가 등으로 인하여 단순 모델 기반의 실내 규모의 실험과 평가에 그치고 있고, 실 교량 구조물에 적용하고 평가를 수행한 실험적 연구는 아직 미진한 실정이다. 따라서, 실제 비대칭 사장교의 지진 진동을 제어하기 위해서는 장대 구조물의 강성을 잘 반영한 최적 제어 알고리즘의 선성과 MR 댐퍼의 효율성에 관한 연구가 필요하다.

이와 같은 모형 비대칭 사장교에 지진으로 인한 진동을 효과적으로 제어할 수 있는 제어시스템을 연구하고자 한다. 연구의 목적에 따라 모형 비대칭 사장교를 제작하고 이 구조물을 제어 할 수 있는 용량의 MR 댐퍼를 만들어 성능을 검증하는 실험을 한다. 그리고 대형 구조물의 구조적인 특성을 반영한 제어알고리즘을 선정하여 실험을 통한 MR 댐퍼의 진동 제어 효과를 평가하고자 한다. 특히 지진으로 인해 발생하는 구조물의 수직과 수평 방향의 진동을 제어 알고리즘이 적용된 MR 댐퍼가 효율적으로 제어 할 수 있는 지를 실험적으로 확인하고 유용성을 입증하고자 한다.

2. 준능동 제어 장치 및 제어 알고리즘

2.1 MR 댐퍼 설계 및 성능 평가 실험

준능동형 제어 기술의 제어 장치인 MR 댐퍼는 실험 대상 교량의 수평 및 수직 강성을 계산하여 강성의 약 20% 내외의 제어력 갖도록 산정하여 설계하였다. 설계한 MR 댐퍼는 Sodeyama et al. (2004)가 개발한 바이패스 형태의 MR 댐퍼의 제작을 진행한 일본의 산와데기 회사에 의뢰하여 Fig. 1과 같이 제작하였다.

Fig. 1의 MR 댐퍼는 전체 길이는 777mm이고, 목표 제어력은 3A일 때 30KN의 제어력을 발휘하도록 설계하였다. MR 댐퍼의 피스톤 최대 스트로크는 140mm (± 70 mm), 제어력에 큰 역할을

Fig. 1. Design of MR Damper

Fig. 2. MR Damper (30KN)

Fig. 3. Force-Displacement Curve of MR Damper

Table 1. Test Results of MR Damper

Test Results			Extension		Compression	
Test Condition	Velocity (m/s)	Ampere (A)	Velocity (m/s)	Load (N)	Velocity (m/s)	Load (N)
18	0.05634	0	0.057	3,518	0.056	2,931
		1	0.055	11,220	0.055	10,520
		1.5	0.055	16,230	0.054	15,680
		2	0.057	21,130	0.059	20,560
		3	0.057	28,300	0.056	30,420

하는 자기관의 외부덮개와 전자석 사이의 간격은 1.0mm를 갖도록 하였다. 메인실린더 및 자기관 오리피스에 충전되는 유체는 독일의 BASF사의 MR유체로 충전하였다. 특히 자기관의 재료는 탄소합 유량이 낮은 저탄소강으로 제작하여 자기력을 극대화하였으며, 오리피스의 전체 자기장길이는 58mm 제작하였다. Fig. 2는 제작한 MR 댐퍼이다.

진동제어 실험을 위하여 Fig. 2와 같이 제작한 MR 댐퍼의 성능시험은 한국철도기술연구원의 장비를 이용하여 진행하였다. 실험은 MR 댐퍼의 제어조건(주파수, 변위, 속도)을 일정하게 하고 전류를 제어하여 진행하였다. 그에 따른 대표적인 결과 그래프는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3의 힘변위 곡선은 실험 조건을 주파수 0.5Hz, 변위 18mm, 속도 0.05634m/s로 일정하게 하고, 전류를 0A, 1A, 1.5A, 2A, 3A로 변화하여 실험을 한 결과이다. 설계 · 제작한 MR 댐퍼는 설계한 제어 성능과 같이 3A 전류인가 시에 약 30KN의 제어력을 보여 설계-제작에 문제가 없음을 입증하였다. Fig. 3의 결과를 보다 수치적으로 비교하기 위하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 보는 바와 같이 MR 댐퍼는 3A 전류 인가 상태에서 30.4KN의 압축력을 발휘하였고, 전류를 인가하지 않은 상태에서 약 3.5KN의 인장력을 발휘하여 수동 제어력을 나타내었다.

2.2 최적 제어 알고리즘

일반적으로 준능동 댐퍼를 이용한 진동을 제어하는 알고리즘은 사용의 용도나 구조물에 따라 약간의 편의성을 고려하여 적용된다. 예를 들어 Lyapunov 제어, Clipped-optimal 제어이론은 구조물의 상태공간 방정식에서 강성과 질량을 제어 변수로 사용함으로 인하여 구조가 복잡한 대형 구조물의 제어에 유리하다. Lyapunov 제어이론은 초기에 Leitmann (1994)이 준능동 제어기의 설계를 위하여 Lyapunov 직접 접근법을 적용하였으며, 이 접근법에서 선택된 Lyapunov 함수는 Eq. (1)과 같이 유도된다.

$$V(z) = \frac{1}{2} \|z\|_p^2 = \frac{1}{2} [z^T P z] \quad (1)$$

여기서, $\|z\|_p$ 는 시스템 상태의 P-노름이고, 이때 P는 실수이면서 대칭인 양의 한정행렬이다. Lyapunov 제어 알고리즘이 적용된 준능동형 피드백 진동제어시스템의 제어법칙은 Eq. (2)와 같다.

$$v_i = V_{\max} H((-z)^T P B_i f_i) \quad (2)$$

여기서, $H(\cdot)$ 는 Heaviside step 함수로 제어기에 인가될 전압의 크기를 0과 $V_{\max}$ 로 제한시켜 주는 함수이고, 아래 첨자 i 는 다수의 제어기를 사용하는 경우 제어기의 수를 고려하기 위한 표현이다. 또한, v_i 는 현재 단계에서 각 제어기에 입력되어야 할 제어 전압, B_i 는 초기 상태방정식에서 보인 제어기 수와 같은 열을 갖는 B행렬의 i 번째 열, f_i 는 이전 단계에서 i 번째 제어기로부터 생성 · 관측된 제어력, 마지막으로 $V_{\max}$ 는 현재 단계에서 제어기의 제약조건에 따라 제어기에 유입되어야 할 최대 전압이다. 최종적으로 Lyapunov 제어 알고리즘은 시스템이 안정화 되도록 적절한 양의 한정 행렬인 Eq. (3)의 Q_p 행렬을 결정함으로써 제어의 성능을 결정할 수 있다.

$$A^T P + P A = -Q \quad (3)$$

여기서, A는 시스템 행렬이며, Q_p 행렬은 설계자의 가정과 경험을 바탕으로 결정된다.

Clipped-optimal 제어 알고리즘은 준능동 제어를 위하여 Dyke et al. (1996)이 MR 댐퍼를 이용한 진동제어에 적용하였다. Clipped-optimal 제어 알고리즘은 선형 최적 제어기 $K_c(s)$ 을 설계하기 위하여, Eq. (5)와 같이 구조물로부터 관측된 제어력 f 와 구조물의 응답 y 를 이용해 MR 댐퍼의 요구 제어력 $f_c = [f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{cn}]^T$ 을 Eq. (4)와 같이 산정하는 방법이다.

$$f_c = L\{-K_c(s)L\{y\}\} \quad (4)$$

여기서, $L\{\cdot\}$ 는 라플라스 변환이다. MR 댐퍼가 요구 제어력 f_c 에 근접하기 위해서는 MR 댐퍼를 제어하는 제어 전압 v_i 를 조절하여야 한다. 이를 위하여 제어 전압 v_i 는 Eq. (5)에 의해 생성할 수 있으며, 이때 Eq. (5)는 Clipped-optimal 제어알고리즘이 적용된 준능동형 피드백 진동제어시스템의 제어법칙이 된다.

$$v_i = V_{\max} H(\{f_{ci} - f_c\}f_i) \quad (5)$$

여기서, v_i 는 현 단계에서 각 제어기에 입력되어야 할 제어전압이고, $V_{\max}$ 는 현 단계에서 제어기에 유입되어야 할 최대 전압이다. 또한, f_{ci} 는 i^{th} MR 댐퍼의 요구 제어력, f_i 는 i^{th} MR 댐퍼로부터 관측된 제어력이다. MR 댐퍼가 요구 제어력을 제공할 때, MR 댐퍼에는 현재 구조물의 상태에 상응하는 제어력을 발생시키도록 제어 전압이 인가되어야 하며, $f_{ci} = f_i$ 인 경우에는 비로소 0의 제어 전압신호가 인가된다.

3. 진동제어 실험을 위한 시스템 구성

3.1 비대칭 사장교 구조물

최근까지 국내외에서 MR 댐퍼를 이용한 진동제어의 연구에서 빌딩 구조물에 관한 연구는 많이 진행되었으나, 교량 구조물에 적용하여 실험한 사례를 부족한 상황이다. 따라서 비대칭 사장교의 동적인 구조적 특성을 포함한 실험에 적절한 모형 구조물을 Fig. 4와 같이 제작하여, 부산대학교 지진방재연구센터에서 실험을 하였다. 이 비대칭사장교는 총 길이 28m, 주탑 높이 10.2m로 제작하여 진동대에 고정시켰다.

3.2 진동제어 시스템

MR 댐퍼와 진동제어 알고리즘을 이용한 비대칭사장교의 피드백진동제어를 수행하기 위한 실험 장비는 Fig. 5와 같다. 먼저, 실시간으로 대상 구조물로부터 구조적 응답을 획득하고, 획득된 응답을 이용하여 제어여부를 결정하고, 그에 따라 제어신호를 출력하기 위한 H/W는 실시간 보장형 I/O보드인 dSPACE CP1103을 기반으로 구성하였고, 여기에 Voltage형 데이터 계측 시 부가적으로 사용되는 정적로거 FYLDE 379TA와 가속도 센서를 위한 증폭기 Dytran 4123B를 이용하였다. 다음으로 H/W를 작동하는 S/W는 S/W는 Matlab, Simulink를 이용하여 제어알고리즘을 프로그래밍 하였으며, 제어알고리즘을 효과적으로 구동할 수 있도록 dSPACE 1103 모델이 제공하는 Control Desk을 이용하였다. MR 댐퍼에 전류 인가를 위한 Power Supply는 PMC18-3A를 이용하였고, 각 교각의 변형을 측정을 위한 Strain Gage, 케이블의 장력 측정을 위한 로드셀을 설치하여 필요한 정보를 수집하였다.

Fig. 4. Asymmetrical Cable-Stayed Bridge

Fig. 5. Control Device for Vibration Control

4. 진동제어 실험

4.1 수직수평 진동제어 실험

지진하중으로 인한 비대칭 사장교 모형에 발생하는 진동을 제어하기 위하여, 구조물이 설치된 3대의 가진대를 El-centro 지진파형으로 수평방향 구동한 상태에서 실험을 진행하였다. 이때, 실험을 위하여 구조물에 부착된 MR 댐퍼, MR 댐퍼에 전류를 인가하기 위한 DC Power Supply, 그리고 진동제어 시스템의 배치는 Fig. 6과 같다.

진동제어 실험은 수평방향으로 가진을 하여 가진 방향과 수직인 연직방향을 제어하는 실험과 가진방향과 같은 방향의 수평방향 진동을 제어하는 실험을 수행하였다. 각 조건에 따른 진동제어 실험을 위하여 Fig. 7(a)는 수직방향제어, Fig. 7(b)는 수평방향제어의 댐퍼를 설치하였다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 수직방향 제어의 경우, 추가적인

Fig. 6. Disposition of Control Device

Fig. 7. Disposition of MR Damper for Vertical and Horizontal Direction

지그를 제작하여 진동대에 고정시킨 상태에서 MR 댐퍼를 지그와 교량의 상판 가로보 사이에 연결시켰다. 수평방향 제어의 경우, MR 댐퍼가 가진 방향으로 거동할 수 있도록 지그를 수정하여, 정적인 높이에서 지그와 교량의 상판 가로보를 MR 댐퍼로 연결하였다. 수직방향 진동제어 실험의 경우 El-centro 지진의 80%의 지진파로 구조물을 가진하였고, 수평방향 진동제어의 경우 El-centro 30%의 지진파로 구조물을 가진하였다.

4.2 진동제어 실험 및 결과 분석

진동제어 실험은 설계한 알고리즘을 바탕으로 중앙통제 센터의 가진 신호와 함께 제어 및 계측 시스템을 가동하고, 그에 따른 제어 결과를 획득하는 방법으로 진행하였다. 실험에 따른 결과는 각 조건 별 진동 감쇠가 없는 상태(Un-damping), 구조물에 MR

댐퍼를 부착한 후 전류를 인가하지 않은 상태(Passive off), MR 댐퍼에 조건없이 전류를 인가한 상태(Passive on), Lyapunov 제어 알고리즘을 적용한 상태(Lyapunov Control), Clipped-optimal 제어 알고리즘을 적용한 상태(Clipped-optimal Control)에서 각각 가속도와 변위, Force 데이터를 획득하여 상호 비교하였다. 비교를 위하여 진동제어 성능지수 중 일부를 활용하였다(Dyke et al., 2003). 활용된 진동제어 성능지수는 절대 최대 가속도(J_2), 인가전압의 소모량(J_3)이며, 특별히 MR 댐퍼가 부착된 지점에서 발생하는 힘(제어력)을 절대 최대 힘(J_4)의 향으로 정형화하여 활용하였다. 여기서, 인가전압의 소모량(J_3)의 경우 준능동 제어 장치와 같은 별도의 외부전원 공급을 요구하는 장치를 제어시스템에 적용할 경우 반드시 평가되어야 하는 성능지수이다. 상기의 성능 지수는 다음의 Eqs. (6)~(8)와 같다.

$$J_2 = \max \left\{ \frac{|x_i^a|}{x^{a, \max}} \right\} \quad (6)$$

$$J_3 = \max \left\{ \frac{\sum V_i}{\sum V_{on}} \right\} \quad (7)$$

$$J_4 = \max \left\{ \frac{|F_i^a|}{F^{a, \max}} \right\} \quad (8)$$

여기서, x_i^a 와 $x^{a, \max}$ 는 각각 시간 단계별 가속도 응답과 비제어 시의 최대가속도 응답이고, V_i 와 V_{on} 은 각각 제어 알고리즘에 의한 제어 상태에서의 인가전압 크기와 Passive on 상태에서의 인가전압의 크기이다. 마지막으로 F_i^a 와 $F^{a, \max}$ 는 각각 시간 단계별 MR 댐퍼의 힘 응답과 Passive off 상태에서의 최대 힘 응답이다.

제어 실험을 통하여 획득한 각 상태 별 데이터의 비교는 그래프를 활용한 비교와 성능지수를 활용한 비교로 진행하였다. 각 수평 및 수직 방향 제어 실험 결과에 따라 획득된 가속도 응답 그래프는 Fig. 8과 같다.

수직방향과 수평방향 제어결과와 가속도 응답은 Figs. 8(a) and 8(b)에 같이 Un-damping 상태를 기준으로 상호 비교하였다. 이 그래프에서 확인 할 수 있는 바와 같이 MR 댐퍼는 모든 경우에서 Un-damping의 결과보다 감쇠된 가속도 응답을 보였다. 각각 상호 간의 가속도 감쇠 정도를 정량으로 평가하기 위하여 응답 데이터 별 Maximum Response (MR), Performance Index (PI), 그리고 control Effect (CE)를 Tables 2 and 3에 성능지수와 RMS로 나타내었다. 여기서, PI는 계산된 값을 백분율로 나타내었으며, CE는 PI 값을 이용하여 계산한 제어 효과이다.

Tables 2 and 3의 결과에 따라 RMS값을 비교하였을 때, 수직방

Fig. 8. Acceleration Response Comparisons by Control Condition

Table 2. Max. Acceleration Response and Performance Index (Vertical Direction)

Control Case	Maximum Response		Performance Index		Control Effect	
	Accel.(m/s^2)		J_2		Accel.(%)	
	MAX.	RMS	MAX.	RMS	MAX.	RMS
Un-control	0.248	0.0548	-	-	-	-
Passive on	0.110	0.0282	44.51	51.46	55.49	48.54
Lyapunov	0.107	0.0255	43.05	46.53	56.95	53.47
Clipped-optimal	0.124	0.0245	50.00	44.71	50.00	55.29

Table 3. Max. Acceleration Response and Performance Index (Horizontal Direction)

Control Case	Maximum Response		Performance Index		Control Effect	
	Accel.(m/s^2)		J_2		Accel.(%)	
	MAX.	RMS	MAX.	RMS	MAX.	RMS
Un-control	0.121	0.0259	-	-	-	-
Passive on	0.068	0.0179	56.45	69.11	43.55	30.89
Lyapunov	0.049	0.0104	40.74	40.15	59.26	59.85
Clipped-optimal	0.073	0.0157	60.33	60.62	39.67	39.38

Fig. 9. Control Force Response Comparisons

Table 4. Max. Control Force Response and Performance Index (Vertical Direction)

Control Case	Maximum Response		Performance Index		Control Effect	
	Force(kgf)		J_4		Force	
	Max.	RMS	Max.	RMS	Max.	RMS
Passive off	237.6	48.27	-	-	-	-
Passive on	436.3	119.65	183.6	247.9	83.6	147.9
Lyapunov	321.9	82.84	135.5	171.6	35.5	71.6
Clipped-optimal	369.8	83.44	155.6	172.9	55.6	72.9

Table 5. Max. Control Force Response and Performance Index (Horizontal Direction)

Control Case	Maximum Response		Performance Index		Control Effect	
	Force(kgf)		J_4		Force	
	Max.	RMS	Max.	RMS	Max.	RMS
Passive off	695.2	88.68	-	-	-	-
Passive on	1310	249.95	188.4	281.9	88.4	181.9
Lyapunov	1011	132.56	145.4	149.5	45.4	49.5
Clipped-optimal	1204	211.15	173.2	238.1	73.2	138.1

Table 6. Output Voltage Response and Performance Index

Control Case	Maximum Response		Performance Index		Control Effect	
	Input Voltage(v)		J_3		Input Voltage(%)	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
Passive on	35005	35005	-	-	-	-
Lyapunov	12295	6240	35.12	17.83	64.88	82.17
Clipped-optimal	6365	7740	18.18	22.11	81.82	77.89

향의 진동제어의 경우 Un-damping 상태와 비교하였을 때 Clipped-optimal은 55.29%, Lyapunov는 53.47%, Passive on은 48.54%의 가속도 감쇠효과를 보였으며, 수평제어의 경우 Lyapunov는 59.85%, Clipped-optimal은 39.38%, Passive on은 30.89% 순으로 가속도 감쇠효과가 우수하였다. 다음으로 MR 댐퍼에 연결된 Load Cell로부터 획득한 각 상태 별 힘의 응답 그래프는 Fig. 9와 같다.

Figs. 9(a) and 9(b)는 Passive off 상태를 기준으로 각 실험 조건 별 제어 실험 결과에 따라 획득된 제어력 응답을 상호 비교하기 위하여 나타낸 그래프이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 제어 방향에 따라 제어력의 증가 추세는 차이가 있으나 두 실험 모두 Passive on 상태의 결과가 가장 우수하였다. 각각 상호간 제어력의 증가율을 정량적인 평가를 위하여 Tables 4 and 5에 성능지수와 RMS로 나타내었다. 조건은 Table 2와 동일하다.

Tables 5 and 6의 결과를 Passive off 상태 기준(0%)으로 비교하였을 때, 수직방향 진동제어에서 제어력은 Passive on은 147.9%,

Clipped-optimal은 72.9%, Lyapunov는 71.6% 순으로 증가함을 확인 할 수 있었으며, 수평방향 진동제어에서는 Passive on은 181.9%, Clipped-optimal은 138.1%, Lyapunov는 49.5% 순으로 제어력이 증가함을 확인 하였다. 마지막으로 제어 상황에 따라 MR 댐퍼의 제어를 위하여 인가된에 인가 전압의 그래프를 Fig. 10과 같이 나타내었다.

Fig. 10에서 보는 바와 같이 수직제어와 수평제어 모두 Passive on 상태보다 Lyapunov 상태와 Clipped-optimal상태에서 인가전류의 감소가 확인되었다. 이를 정량적으로 확인하기 위하여 Table 6에 나타내었다.

Table 6에서 보는 바와 같이 제어 알고리즘이 적용된 제어 상태에서 인가전류는 계속적으로 전류를 인가한 passive on상태를 기준으로 수직방향 진동제어 상황에서 Clipped-optimal은 81.82%, Lyapunov는 64.88%의 감소효과를 보였고, 수평방향 진동제어 상황에서 Clipped-optimal은 77.89%, Lyapunov는 82.17% 인가전류가 감소함을 확인하였다.

Fig. 10. Control Voltage Response Comparisons

5. 결론

본 논문은 지진에 따라 발생하는 비대칭 사장교 구조물의 진동을 준능동 제어 장치인 MR 댐퍼를 이용하여 효과적으로 제어하고자 연구를 진행하였다. 대상 구조물은 실험에 적절한 비대칭 사장교를 설계 제작하였으며, 대상 구조물에 적합한 MR 댐퍼를 설계 제작하여 준능동제어 장치로 활용하였다. 실험 전 MR 댐퍼의 성능 및 진동제어 효과를 확인하기 위하여, MR 댐퍼 성능평가 실험을 진행하였다. 지진 진동제어 실험은 구조물에 발생하는 수평 방향과 수직방향의 진동을 각각 MR 댐퍼의 부착을 달리하여 제어하였으며, 이때 제어 알고리즘을 적용하여 MR 댐퍼의 성능을 극대화하고자 하였다. 이상의 이론적 실험적 연구에 따른 결과는 다음과 같다.

- (1) 대상 구조물에 적합하게 설계 제작한 MR 댐퍼는 성능 평가 실험 결과 수동제어 장치의 특성과 수동제어 장치의 특성을 모두 지닌 준능동제어 장치의 일반적인 거동 특성을 보임을 확인하였으며, 인가 전압의 조절에 따라 제어력 변화가 가능함을 확인함으로써 구조물에 발생하는 진동의 정도에 적합한 제어가 가능함을 입증하였다.
- (2) 지진하중으로 인해 발생하는 구조물의 진동을 수평 및 수직 방향으로 나누어 제어 실험을 진행한 결과, MR 댐퍼는 감쇠 정도의 차이는 있으나 수평 및 수직 방향의 진동을 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다. 특히, 제어 방향에 따라 제어알고리즘 성능의 차이가 발생하는 것을 확인하였다.
- (3) 다양한 제어 조건에 따른 진동제어 실험결과, 수직방향 진동 제어의 경우, Clipped-optimal은 약 82%의 전류 소모를 절감하면서 약 73%의 제어력 증가를 보였고, Lyapunov는 약 65%의 전류를 절감하면서 약 72%의 제어력을 증가 시켰다. 또한,

수평 방향 진동제어의 경우 Clipped-optimal은 약 78%의 전류 소모를 절감하면서 약 138%의 제어력 증가를 보였고, Lyapunov는 약 82%의 전류를 절감하면서 약 50%의 제어력을 증가 시켰다. 이와 같이 구조물의 특성이 반영된 제어 알고리즘은 MR 댐퍼의 성능을 극대화 시키면서, 전류의 소모량을 줄일 수 있으므로 최적의 진동제어를 위해서 제어 알고리즘의 적용이 필수임을 입증하였다.

이상의 결과를 통하여 지진 등의 유해하중으로 인해 비대칭 사장교와 같이 유연한 구조물에 발생하는 진동제어에 MR 댐퍼가 효과적임을 입증하였다. 특히, 제어 효과의 극대화를 위해서는 적합한 진동제어 알고리즘의 선정이 매우 중요함을 확인하였다.

감사의글

본 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 : NRF-2011-220-D00105, NRF-2013R1A2A1A01016192). 본 연구가 이루어지도록 지원하여 준 한국연구재단에 대단히 감사합니다.

References

- Carlson, J. D. and Spencer, Jr. B. F. (1996). "Magneto-rheological fluid dampers for semi-active seismic control." *Proc. 3rd International Conference on Motion and Vibration Control*, Chiba, Japan, Vol. 3, pp. 35-40.
- Dyke, S. J., Caicedo, J. M., Turan, G., Bergman, L. A. and Hague, S. (2003). "Phase I benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 7, pp. 857-872.
- Dyke, S. J., Spencer Jr, B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D. (1998).

- “An experimental study of MR dampers for seismic protection.” *Smart Materials and Structures: Special Issue on Large Civil Structures* 7, pp. 693-703.
- Dyke, S. J., Spencer, Jr. B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D. (1996). “Experimental verification of semi-active structural control strategies using acceleration feedback.” *Proc. of 3rd International Conference on Motion and Vibration Control*, Chiba, Japan, Vol. 3, pp. 291-296.
- Heo, G. and Kim, C. (2012). “Designing a unified wireless system for vibration control.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 38, pp. 72-80.
- Heo, G. H. and Jeon, J. R. (2011). “Performance estimation of semi-active real-time feedback vibration control system.” *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 15, No. 1, pp. 85-94 (in Korean).
- Heo, G. H., Jeon, J. R., Park, S. B. and Oh, S. K. (2010). “Real-time vibration control of bridges by MR damper and lyapunov control algorithm.” *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 14, No. 4, pp. 55-61 (in Korean).
- Jolly, M. R., Bender, J. W. and Carlson, J. D. (1999). “Properties and applications of commercial magnetorheological fluid.” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 10, No. 1, pp. 262-275.
- Kobori, T. (1996). “Future direction on research and development of seismic response controlled structure.” *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 11, No. 5, pp. 297-324.
- Sodeyama, H., Sunakoda, K., Fujitani, H., Sode, H. and Iwata, N. (2003). “Dynamic test and simulation of magneto-rheological damper.” *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18, pp. 45-57.
- Sodeyama, H., Suzuki, K. and Sunakoda, K. (2004). “Development of large capacity semi-active seismic damper using magneto-rheological fluid.” *Journal of Vessel Technology*, ASME, 126, pp. 105-109.
- Soong, T. T. (1990). *Active structural control theory and practice*, Longman Science & Technical.
- Spencer, Jr. B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K. and Carlson, J. D. (1997). “Phenomenological model of a magnetorheological damper.” *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 3, pp. 230-238.