

준능동형 실시간 Feedback 진동제어시스템의 성능평가

Performance Estimation of Semi-active Real-time Feedback Vibration Control System

허 광 희¹⁾ 전 준 용^{2)*}

Heo, Gwang Hee Jeon, Joon Ryong

Abstract

This paper is concerned to constitute a semi-active realtime feedback vibration control system and evaluate it through experiments in order to control in realtime the vibration externally generated, specially on the bridges which is structurally flexible. For the experiment of vibration control, we built a model bridge structure of Seohae Grand Bridge in a 1/200 reduced form and inflicted El-centro wave on the model structure also in a reduced force considering the lab condition. The externally excited vibration was to be controled by placing a shear type MR damper vertically on the center of bridge span, and the response (displacement and acceleration) of structure was to be acquired by placing LVDT and Accelerometer at the same time. As for the experiment concerning controlling vibration, a realtime feedback vibration control experiments were performed under each different condition largely such as un-control, passive on/off control, Lyapunov stability theory control, and Clipped-optimal control. Its control performance under different condition was quantitatively evaluated in terms of the peak absolute displacements, the peak absolute accelerations and the power required for control on the center of span. The results of experiments proved that the Lyapunov control and clipped-optimal control were effective to decrease the displacement and acceleration of the structure, and also to decrease the power consumption to a great extent. Finally, the semi-active realtime feedback vibration control system constituted in this research was proven to be an effective way to control and manage the vibration generated on bridge structure.

Keywords : MR damper, Vibration control, Lyapunov control, Clipped-optimal control, Real-time feedback control

1. 서 론

최근 건설분야의 고도·집약적인 구조설계 및 시공 기술력은 다양한 시공현장의 제약조건을 효과적으로 극복하고, 구조형식의 다각화를 꾀할 수 있게 하였으며, 결국 이러한 기술력을 바탕으로 건설구조물은 날로 장·대형화 되고 있다. 특히 교량 구조물의 경우, 구조적 성능과 효율성, 그리고 미적 측면까지 고려한 장경간 교량이 국내·외에서 경쟁적으로 출현하고 있다. 비근한 예로써 중국(수통대교[2008년], 주경간장 L=1,088m) 및 일본(아카시대교[1998년], 주경간장 L=1991m) 등에서는 현존하는 최장의 사장교와 현수교가 건설되었고, 국내에서도 최근 세계 5위 규모의 사장교(인천대교[2009년], 주경간장 L=800m)가 건설된 바 있으며, 이러한 건설구조물의 장

·대형화 추세는 앞으로도 지속될 전망이다.

한편, 현재까지도 지진, 해일, 돌풍 등 다양한 형태와 크기를 갖는 돌발적인 자연재난은 끊임없이 발생되고 있으며, 예견치 못한 재난상황에 따른 인적·물적 피해 규모 또한 현격히 증가하고 있다. 특히, 장·대형화된 교량구조물의 경우에는 대부분 장경간을 실현하기 위하여 케이블을 사용하기 때문에 유연한(flexible) 구조적 특성을 갖고 있으며, 결국 외부 유해환경에 대한 노출과 더불어 이로 인해 발생된 진동영향이 커지게 되었다. 따라서 이러한 교량 구조물뿐만 아니라, 건설분야 전반에 걸친 장·대형화 추세 및 돌·다발적인 외부 유해환경 속에서 건설 구조물에 직·간접적인 작용하는 구조적 외부영향을 최소화하고, 이때 발생된 유해진동을 효과적으로 제어하여, 종국적으로는 구조물의 안전성을 확보하고, 중·장기적인 내구수명의 유

1) 정회원, 건양대학교 건설시스템공학과 교수

2) 학생회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정

* Corresponding author : ryong3412@hanmail.net 041-734-5302

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2011년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

지관리를 위한 기술이 중요한 이슈가 되고 있다(Kobori, 1994; Spencer, 1996; Jolly et. al, 1999).

일반적으로 구조물에 발생한 진동의 제어는 진동에너지를 소산시키는 방법에 따라 크게 수동형과 능동형으로 구분할 수 있으며, 이때 각 방법별 에너지 소산을 위한 장치(damper)가 별도로 요구된다. 먼저 점탄성 댐퍼, 마찰 댐퍼, 동조질량 댐퍼 및 기초격리 시스템 등을 이용한 수동형 제어방법은 장치의 구조가 간단하여 실 구조물에 적용이 용이하고, 장치가 갖는 성능범위 내에서는 높은 신뢰도를 기대할 수 있으며, 특히 구조물의 진동저감을 위해 추가적인 외부전원을 요구하지 않는다는 점에서 현재까지도 다양한 형태로 이·응용되고 있다. 또한 능동질량 댐퍼, 혼성질량 댐퍼 및 능동가변강성시스템 등을 이용한 능동형 제어방법은 구조물에 발생하는 다양한 외부 하중 조건에 대하여 폭넓게 적용할 수 있고, 특히 구조물의 응답에 직접적으로 대응할 수 있다는 큰 장점을 갖는다. 하지만, 수동형 제어방법은 제어장치의 기계적인 한계로 인해 다양한 하중조건에 충분한 대응이 어렵다는 점에서, 한편 능동형 제어방법은 초기 높은 설치비용과 경우에 따라 큰 외부전원을 요구한다는 점 등에서 효과적인 진동제어를 위해 한계가 있을 수 있다. 결국 건설구조물에 적합한 진동제어방법이 요구되었으며, 이를 위하여 근년에는 스마트 재료를 활용한 준능동형 제어방법이 새로운 대안으로 제안되었다(Dyke et. al, 1998; Spencer et. al, 1997). 준능동형 제어방법은 스마트 재료인 자기유변(MR) 유체가 충전된 MR 댐퍼를 이용하며, 이때 MR 댐퍼를 활용한 준능동형 제어방법은 MR 유체의 재료적 거동 메커니즘 상 적은 외부 전원공급만으로 높은 제어효과와 빠른 제어응답을 기대할 수 있으며, 또한 MR 댐퍼의 기계적인 단순성 및 강인성 등을 이유로 장·대형화된 건설구조물에 발생한 진동을 효율적으로 제어하기 위한 방법으로 부각되고 있다(Heo et. al, 2005(a), (b); 허광희 등, 2010; 윤경조 등, 2008). 한편, 이들 연구에서 보면, 구조물에 발생한 진동을 실시간으로 제어하고, 이때 제어효과의 향상을 위해서는 MR 댐퍼의 성능과 더불어 적절한 제어알고리즘의 적용이 중요한 것으로 평가되었다.

따라서 본 논문에서는 크게 두 가지 제어알고리즘(Lyapunov 제어알고리즘 및 Clipped-optimal 제어알고리즘)을 바탕으로 준능동형 실시간 피드백 진동제어 시스템을 구성하였고, 각 제어알고리즘 별 진동제어 성능을 실험적으로 평가하였다. 여기서 진동제어실험셀은 규모화

된 모형 교량구조물과 랜덤지진파형의 외부가진력, 그리고 전단형 MR 댐퍼를 사용하였으며, 이때 진동제어의 성능평가는 크게 3가지 평가지표(절대최대변위, 절대최대 가속도, 소모전원 등)를 활용하였다. 최종적으로 본 논문에서 MR 댐퍼와 두 가지 제어알고리즘으로 구성된 준능동형 실시간 피드백 진동제어 시스템은 구조물의 발생된 랜덤진동을 실시간으로 제어하기 위하여 효과적으로 적용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 제어 시스템의 상태 공간 표현

일반적으로 구조물에 작용하는 진동을 제어한다는 관점에서 볼 때, 이러한 제어 가능한 시스템(대상구조물)의 동역학적 운동방정식은 다음 식(1)의 우변과 같이 임의의 외부 가진력과 이에 대응된 제어력을 동시에 포함하여 표현될 수 있으며, 이들 두 항은 결국 시스템의 안정을 위해서 서로 상쇄되어야 한다.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\gamma\ddot{x}_e(t) + \lambda f(t) \quad (1)$$

식(1)에서 M , C , K 는 시스템의 질량, 감쇠 그리고 강성 행렬이고, $\ddot{x}(t)$, $\dot{x}(t)$, $x(t)$ 는 시간에 대한 각 자유도의 가속도, 속도, 그리고 변위이다. 또한, $\ddot{x}_e(t)$ 와 $f(t)$ 는 시간에 대한 임의의 외부 가진력 및 이에 대응된 제어력이며, 이때 γ 및 λ 는 각 외부 가진력과 제어력에 대한 위치 벡터이다. 여기서, 식(1)과 같이 표현된 제어 가능한 시스템은 현재단계의 제어력 즉, 출력값이 과거부터 현재까지의 응답 즉, 입력값에 의존하므로 이는 제어이론의 관점에서 동적시스템(dynamic system)으로 생각할 수 있으며, 결국 이러한 동적시스템은 일반적으로 다음 식(2)와 같은 형태의 상태공간방정식(state-space equation)으로 표현된다(Soong, 1989).

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Az(t) + Bf(t) + E\ddot{x}_e(t) \\ y(t) &= Cz(t) + Df(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, 상태변수의 수를 n , 입력의 수를 m , 출력의 수를 r 이라고 하면, 이때 z 는 시스템의 상태벡터($n \times 1$)

이고, y 는 출력벡터($r \times 1$)이다. 또한 A 는 시스템 행렬($n \times n$), B 는 입력행렬($n \times m$), C 는 출력행렬($r \times n$), D 는 직접전달행렬($r \times m$) 그리고, E 는 B 와 같은 크기(size)의 외부 가진에 대한 위치 행렬이다. 이들 행렬은 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}\lambda \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ -\gamma \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} -M^{-1}K & -M^{-1}C \\ 0 & I \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} M^{-1}\lambda \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 Lyapunov안정론 기반의 제어 알고리즘

준능동형 피드백 진동제어시스템을 구성하기 위하여 다양한 제어알고리즘들이 제안되었다. 본 논문에서는 그 중 대표되는 두 가지 방법을 이용하였으며, 먼저 그 첫 번째 제어알고리즘으로써, 시스템의 안정도 해석을 위한 Lyapunov 직접 접근법을 고려하였다(Brogan, 1991). 이 접근법은 Lyapunov 함수 $V(z)$ 를 사용하며, 이는 시스템의 상태 z 에 대해 양의 한정(positive definite) 함수이어야 한다. 이때, 원점(origin)은 안정 평형 위치라고 가정한다. 여기서, Lyapunov 함수의 변화율을 $\dot{V}(z)$ 로 표현한다면, Lyapunov 안정도 이론으로부터 $\dot{V}(z)$ 는 음의 반-한정(negative semi-definite) 함수이고, 이때 원점은 Lyapunov의 관점에서 안정이다. 결국 Lyapunov 안정도 이론에 의해 제어법칙을 개발함의 궁극적인 목표는 $\dot{V}(z)$ 가 가능한 음(negative)의 결과를 갖도록 각 장치에 대한 제어 입력을 선택하는 것이다. 여기서 Lyapunov 함수는 다양하게 선택될 수 있다. Leitmann(1994)은 준능동(semi-active) 제어기의 설계를 위하여 Lyapunov 직접 접근법을 적용하였으며, 이때 선택된 Lyapunov 함수는 다음 식(4)와 같다.

$$V(z) = \frac{1}{2} \|z\|_p = \frac{1}{2} [z^T P z]^{1/2} \quad (4)$$

여기서, $\|z\|_p$ 는 시스템 상태의 P-노름(P-norm)이고, 이때 P 는 실수이면서 대칭인 양의 한정행렬이다. 선형시스템에서 $V(z)$ 는 양의 한정인 스칼라 함수이므로, 시스템의 점근 안정성을 위해서는 Lyapunov의 정리에

의해 $\dot{V}(z)$ 는 음의 한정이어야 한다. 따라서 $\dot{V}(z)$ 가 확실한 음의 한정이 되도록 다음 식(5)의 Lyapunov 방정식을 사용해 행렬 P 를 구해야 한다.

$$A^T P + P A = -Q_p \quad (5)$$

여기서, Q_p 는 양의 한정 행렬이다. 식(1)의 해를 구하기 위해 Lyapunov 함수의 미분형태로 상태공간 방정식을 유도하면, 다음 식(6)과 같다. 이는 Lyapunov 함수의 시간 변화율($\Delta V = \dot{V}$)이다.

$$\dot{V}(z) = -\frac{1}{2} z^T Q_p z + z^T P B f_c + z^T P E \ddot{x}_e \quad (6)$$

여기서, P 는 시스템에 대한 Lyapunov 방정식의 해이고, Q_p 는 가중행렬(weight matrix)을 나타내며, 위 첨자 T 는 행렬의 전치(transpose)를 나타낸다. 이때, 시스템에 대한 제어 전압의 변화에 직접적인 영향을 미치는 유일한 항은 힘 벡터 f_c 가 포함된 가운데 항으로 한정된다. 결국 시스템이 안정화되기 위한 즉, MR 댐퍼를 이용할 경우 $\dot{V}(z)$ 를 최소화시키기 위한 제어 전압은 v_i 는 다음 식(7)에 의해 생성할 수 있으며, 이때 식(7)은 Lyapunov 제어 알고리즘이 적용된 준능동형 피드백 진동제어시스템의 제어법칙(control law)이 된다.

$$v_i = V_{\max} H\left((-z)^T P B_i f_i\right) \quad (7)$$

여기서, $H(\cdot)$ 는 Heaviside 계단 함수로써 제어기로 인가될 전압의 크기를 0과 V_{\max} 로 한정시켜주는 함수이고, 아래 첨자 i 는 다수의 제어기를 사용하는 경우 제어기의 수를 고려하기 위한 표현이며, v_i 는 현재 단계에서 각 제어기에 입력되어야 할 제어 전압, B_i 는 초기 상태방정식에서 보인 제어기 수와 같은 열을 갖는 B 행렬의 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 전압(maximum voltage)이다. 중국적으로 Lyapunov 제어 알고리즘은 시스템이 안정화 되도록 적절한 Q_p 행렬을 정의함으로써 제어의 성능을 결정할 수 있다.

2.3 Clipped-optimal 제어 알고리즘

MR 댐퍼를 이용한 준능동 제어전략을 위한 또 다른 방법으로는 Dyke et. al(1996) 등이 제안한 Clipped-Optimal 제어 알고리즘을 고려할 수 있다. 여기서, Clipped-optimal 제어 알고리즘은 다음 식(8)과 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 산정하기 위하여, 선형 최적 제어기 $K_c(s)$ 를 설계하는 것이다. 여기서, $\mathcal{L}\{\cdot\}$ 는 라플라스 변환이다.

$$f_c = \mathcal{L}^{-1}\left\{-K_c(s)\mathcal{L}\left\{\begin{matrix} y \\ f \end{matrix}\right\}\right\} \quad (8)$$

여기서, i th MR 댐퍼의 요구 제어력을 f_{ci} 로, i th MR 댐퍼로부터 관측된 제어력을 f_i 로 각각 표현할 수 있으며, 이는 각각의 MR 댐퍼로부터 발생된 제어력이 요구 제어력에 근접하도록 하기 위해 n 개의 힘-피드백 루프를 추가하기 위한 것이다. 결국 MR 댐퍼로부터 관측된 제어력 f_i 가 요구 제어력 f_{ci} 에 최대한 근접하도록 하기 위해 제어 전압 v_i 는 다음 식(9)에 의해 생성할 수 있으며, 이때 식(9)는 Clipped-optimal 제어알고리즘이 적용된 준능동형 피드백 진동제어시스템의 제어법칙(control law)이 된다.

$$v_i = V_{\max}H(\{f_{ci} - f_i\}f_i) \quad (9)$$

여기서, v_i 는 현 단계에서 각 제어기에 입력되어야 할 제어전압이고, V_{\max} 는 현 단계에서 제어기에 유입되어야 할 최대 전압(maximum voltage), $H(\cdot)$ 는 Heaviside step 함수, 첨자 i 는 다수의 제어기를 사용하는 경우 제어기의 수를 고려하기 위한 표현, f_{ci} 는 요구 제어력, 마지막으로 f_i 는 이전 단계에서 i 번째 제어기로부터 관측된 제어력이다. MR 댐퍼가 요구 제어력을 제공할 때까지(즉, $f_{ci} = f_i$), MR 댐퍼에는 현재 구조물의 상태에 상응하는 제어력을 발생시키도록 제어 전압이 인가되어야 하며, $f_{ci} = f_i$ 인 경우에는 비로소 0의 제어 전압 신호가 인가된다. 단, 제어 전압신호의 인가 조건은 MR 댐퍼로부터 관측된 제어력이 요구 제어력 보다 작은 경우와 이들 두 힘이 서로 같은 부호일 경우 등이며, 이들 조

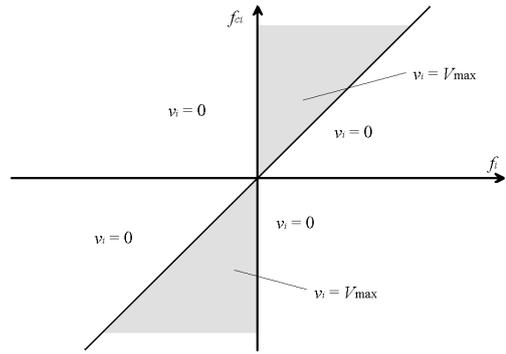


Fig. 1 Conception of Control Order Signal to Clipped-optimal Control Algorithm

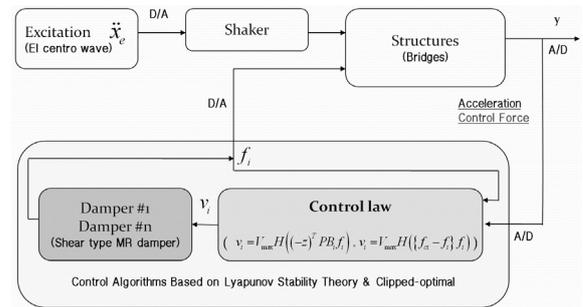


Fig. 2 Flowchart of Feedback Control System based on Lyapunov & Clipped-optimal Control Algorithm

건을 그림으로 나타내면 다음 Fig. 1과 같다.

본 논문에서는 MR 댐퍼를 이용해 구조물에 발생된 진동을 실시간으로 제어하고자 이상의 Lyapunov안정론 기반의 제어 알고리즘과 Clipped-optimal 제어 알고리즘을 바탕으로 준능동형 피드백 진동제어시스템을 구성하였으며, 구성된 시스템의 개념도는 다음 Fig. 2와 같다.

2.4 진동제어 성능지수

본 논문에서는 진동제어실험 조건 별 제어효과를 평가하기 위하여, Dyke et. al(2003) 등이 사장교 진동제어 벤치마크 문제에서 이용하였던 진동제어성능지수를 활용하였다. 활용된 진동제어성능지수는 절대최대변위(J_1), 절대최대가속도(J_2) 그리고, 인가전압의 소모량(J_3) 등으로 이들 성능평가지수는 동적구조물의 진동제어를 위해 대상구조물과 그 제어형식에 관계없이 공통적으로 평가해야 할 기본 항목들이며, 특히 인가전압의 소모량(J_3)의 경우 본 논문에서 적용된 준능동 제어장치와 같이 별도의 외부 전원공급을 요구하는 장치를 제어시스템에 적용함에 있어 궁극적으로 평가되어야 할 필수 항목이다.

따라서 본 논문에서는 이상의 평가지수를 바탕으로 제어 실험 조건 별 제어성능을 평가하였고, 이에 대한 표현은 다음 식(10)~(12)에 나타난 것과 같다.

$$J_1 = \max \left\{ \frac{|x_i^d|}{x^{d, \max}} \right\} \quad (10)$$

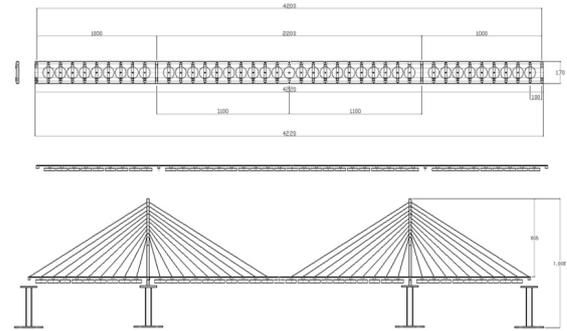
$$J_2 = \max \left\{ \frac{|x_i^a|}{x^{a, \max}} \right\} \quad (11)$$

$$J_3 = \max \left\{ \frac{\sum V_i}{\sum V_{on}} \right\} \quad (12)$$

식(10)에서, $x^{d, \max}$ 는 비-제어시의 최대 변위 응답, x_i^d 는 시간 단계별 변위 응답이고, 식(11)에서, $x^{a, \max}$ 는 비-제어시의 최대 가속도 응답, x_i^a 는 시간 단계별 가속도 응답이다. 또한, 식(12)에서의 V_{on} 은 수동-on 상태에서의 전체(full) 인가전압의 크기이고, V_i 는 Lyapunov 제어 알고리즘에 의한 제어상태에서의 인가전압 크기이다.

2.5 모형 교량의 제작

본 논문에서는 실시간 진동제어 성능을 평가하기 위하여 모형 교량구조물을 제작하여 활용하였다. 이때 대상 교량구조물은 서해대교의 사장교 구간을 약 1/200 크기로 규모화 하여, 전체길이 4.2m, 교폭 0.17m 그리고, 주탑 높이 0.70m로 설계하였고, 이때 주탑단의 경계조건은 일단 힌지 및 타단 롤러, 양 측단 경계조건은 모두 롤러로 설정하였다. 이렇게 설계된 모형 교량 구조물은 Fig. 3(a)와 같고, 설계를 바탕으로 제작된 모형 교량구조물은 Fig. 3(b)와 같다. 여기서, 축소모형에 따른 제어시스템의 설계 시 실 구조물에 대한 적용성을 고려하기 위하여 본 논문에서는 기본적으로 서해대교 설계도면을 참고하여 구조물의 구조적 특성이 반영되도록 전체적인 크기에 대한 축소화에 충실하였고, 이때 축소모형은 유연한 특성을 갖도록 설계·제작하였으며, 이로 인하여 상부구조물에 발생된 변형(처짐)은 구조해석을 통해 산출된 케이블의 장력을 순차적으로 도입하여 상부구조물의 전 구간에 걸쳐 변형(처짐)없이 수평상태를 유지하도록 조립·완성하였다.



(a) Design of Model Bridge



(b) Fabrication of Model Bridge

Fig. 3 Model Bridge for Vibration Control Tests

2.6 모형 교량의 수치해석

본 논문에서는 교량 구조물의 동특성을 파악하고, 이 결과로부터 상태공간방정식의 구성 행렬($A \sim D$ 행렬)을 결정하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 상용 구조해석 프로그램인 UGS사의 I-DEAS를 활용하였고, 이때 상부구조는 2D 얇은 Shell 요소, 가로보 및 주탑은 1D Beam 요소 그리고, 케이블은 1D Rod 요소를 사용하였다. 여기서 주탑단의 경계조건은 일단 Pin, 타단 Roller로, 양 측단 경계조건은 모두 Roller로 각각 설정하였고, 이때 구조물의 자유도(DOF)는 상부구조 중앙점에 대하여 총 9개(수직방향)를 부여하였다. 마지막으로 구조해석방법은 가이언 응축(Guyan reduction)법을 활용하였고, 이로부터 구조물의 동적 파라메타(고유주파수, 모드형상, 질량, 감쇠, 강성 행렬 등)를 산출하였다. 여기서 구성된 FE 모델은 Fig. 4(a)와 같고, 이때 산출된 대표적인 해석(1차, 2차 휨모드) 결과는 다음 Fig. 4(a), (b)와 같다.

2.7 MR 댐퍼를 이용한 진동제어실험

본 논문에서는 교량 구조물에 발생하는 진동을 효과적

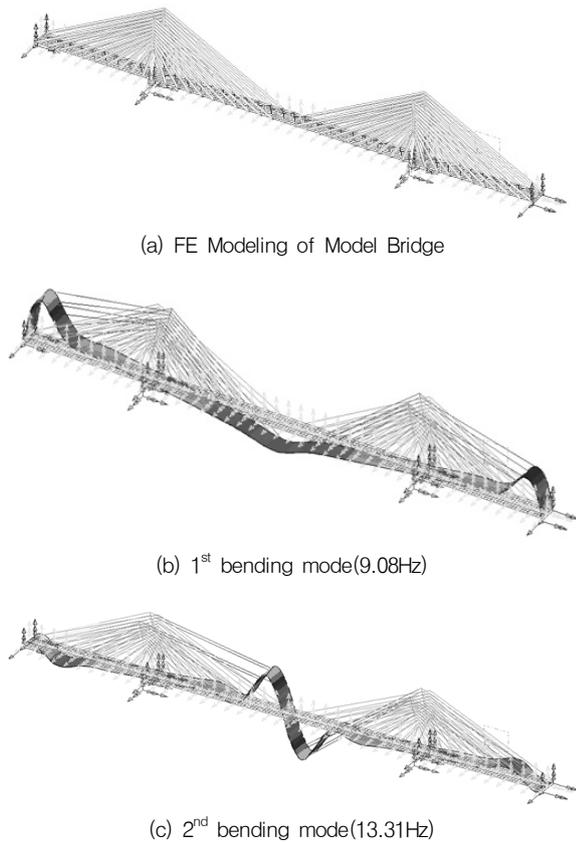


Fig. 4 FE Modeling & Analysis results to Model Bridge

으로 제어하고자 준능동 제어장치인 MR 댐퍼를 이용해 다양한 제어 조건 별 진동제어실험을 수행하고, 각 제어 조건 별 제어성능을 정량적으로 평가하였다. 이를 위하여, 본 논문에서 사용된 진동제어장치로는 직경 0.4mm 코일을 2000번으로 감아 제작한 전자석 요크를 갖는 전단형 MR댐퍼를 이용하여, 상판 중앙지점의 하단에 수직방향으로 설치하였다. 이때, MR 유체는 Lord 사의 MRF-132AD를 사용하였으며, MR 유체가 함침된 스펀지는 자기장의 전단방향에 위치하도록 하였다. 대상 구조물의 외부 가진은 실험실 여건을 고려하여 규모화 된 El-centro 지진파형을 이용하였으며, 이는 모형 교량 구조물의 좌측 경간 중앙에 설치된 가진기(EDS50-120)로부터 인가되도록 하였다. 이때 진동제어 시 가진력의 진동수 성분에 따라 그 효과가 달라질 수 있다. 하지만 특정 진동수 성분을 갖는 가진력 및 가진방법을 이용하여 구조물의 진동제어 효과를 판단하는 것은 현실적인 진동제어 문제에도 적합하지 않다고 판단되며, 따라서 본 논문에서는 다양한 진동수 성분을 갖는 대표적인 랜덤 가진력(El-centro 지진력)을 바탕으로 구조물의 상·하방향의 진동에 대한 제



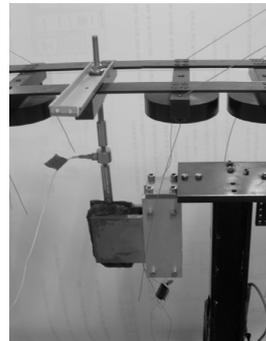
(a) Real-time I/O System for Vibration Control Tests



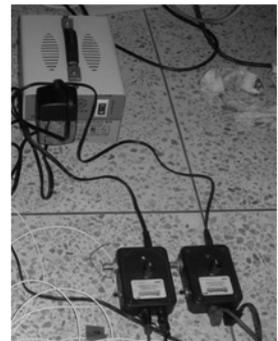
(b) Shaker



(c) Accel. & LVDT



(d) Controller & Force sensor



(d) Current driver

Fig. 5 Vibration Control Tests Setup of Model Bridge

어효과를 검증하고자 하였다. 이때, 본 논문에서 사용된 El-centro 지진력은 특정 진동의 종류 및 특성을 고려하기 위한 것이 아닌, 단지 모형 교량 구조물에 임의의 진동을 생성시키기 위한 목적·수단의 개념으로 채택한 것이다. 또한, 구조물의 응답은 교량상판에 등 간격으로 설치된 9개의 가속도계(3134D)와 교량 상판중앙에 설치된 1개의 변위계(CDP-50) 그리고, MR댐퍼의 지탱 축에 설치된 1개의 force 센서(1051V5)로부터 가속도와 변위 그리고, 제어력을 동시에 획득하였다. 이상으로부터 본 논문에서 구성된 진동제어실험셀과 관련된 세부사항은 다음 Fig. 5와 같다.

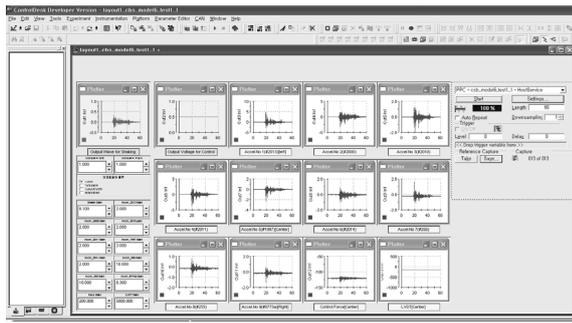
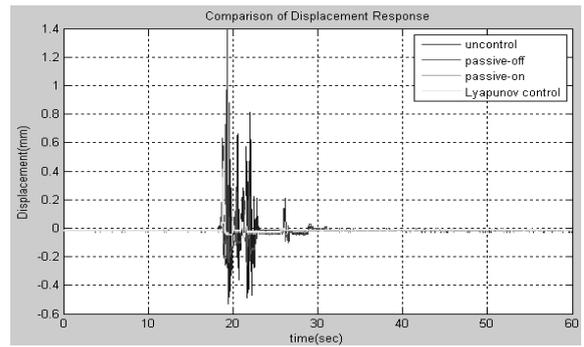


Fig. 6 Control GUI for Real-time Feedback Control System

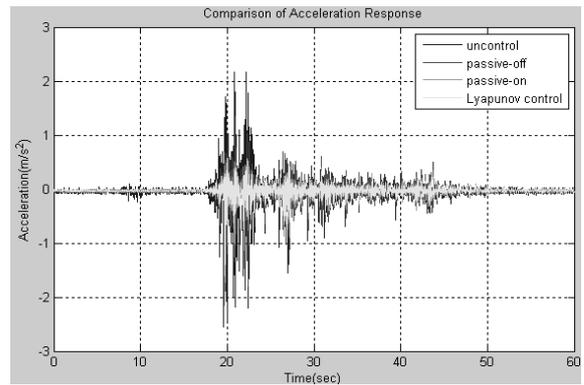
마지막으로, 본 논문에서 고려한 진동제어실험 조건은 비-제어(기본구조물 상태), 수동-off(인가전류 0A) 제어, 수동-on(인가전류 2A) 그리고, Lyapunov 제어(제어법칙 적용)의 총 4가지 방법으로 수행하였고, 이때 MR 댐퍼로의 전류인가는 0~2A 출력범위를 갖는 Lord사의 전류공급 장치(RD-3002-03)를 이용하였다. 마지막으로, 제어시스템의 설계와 입·출력 신호의 실시간 획득·처리를 위하여 Matlab Simulink 및 dSPACE 1103 보드를 활용하였다.

2.8 제어실험 결과 및 제어성능 평가

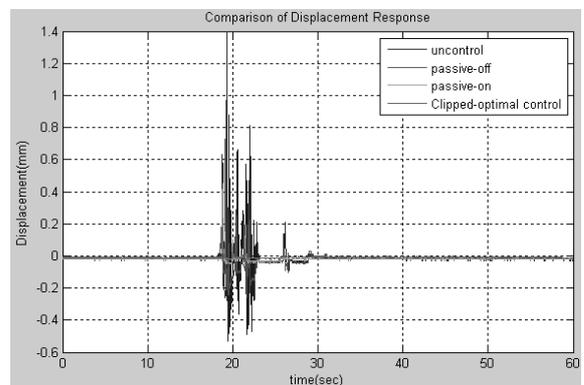
본 논문에서는 모형 교량 구조물에 발생한 진동을 제어하기 위하여 크게 5가지 실험조건(비-제어(기본구조물 상태), 수동-off제어(인가전류 0A), 수동-on제어(인가전류 2A), Lyapunov 제어(식(7)의 제어법칙 적용), 그리고 Clipped-optimal 제어(식(9)의 제어법칙 적용))을 바탕으로 진동제어 실험을 수행하였고, 이때 획득된 교량 상판 중앙지점에서의 변위 및 가속도 응답을 각 실험조건 별로 상호 비교하여 제어성능을 정량적으로 평가하였다. 여기서, 수동-on 상태에서 제어장치로 인가된 전류의 크기 설정은 준능동 제어장치의 특성상 저전력을 소모하면서도 높은 동적범위 및 제어성능을 발휘하도록 하는 설계 조건에 충실하고, 더불어 사용된 전류공급장치의 용량 등을 복합적으로 고려해야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 사용된 전류공급장치의 용량이 최대 2A이라는 점과, 이는 기존 연구문헌에서 활용된 최대인가전류 범위를 만족한다는 점 등을 고려하여, 인가전류의 크기를 2A로 설정하였다. 하지만 이때 설정된 2A는 반드시 사용된 제어장치가 최적의 제어성능을 발휘하도록 하는 요구인가전류의 크기를 의미하는 것은 아니며, 설계자의 요구 혹은 제어장치의 용량 등에 따라 달라질 수 있다. 본 논문에서



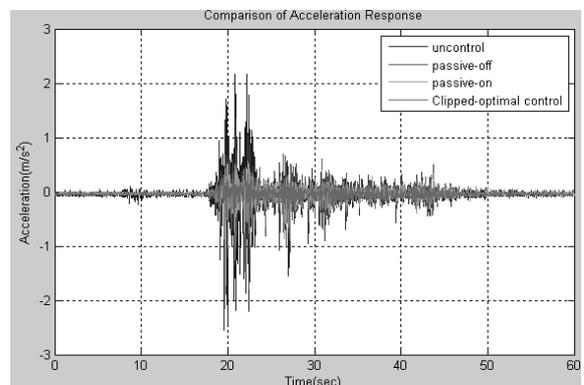
(a) Comparison of Vibration Control Results(LYC - Disp.)



(b) Comparison of Vibration Control Results(LYC - Accel.)

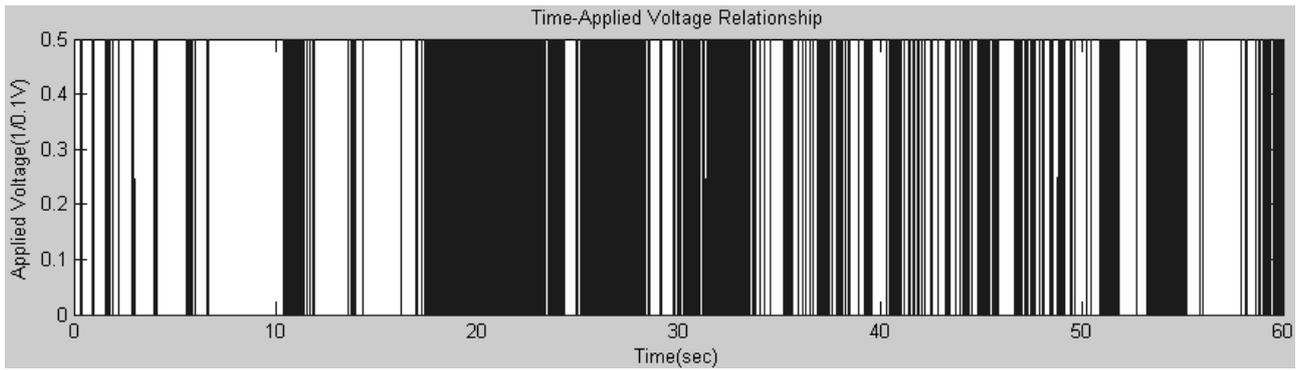


(c) Comparison of Vibration Control Results(COC - Disp.)

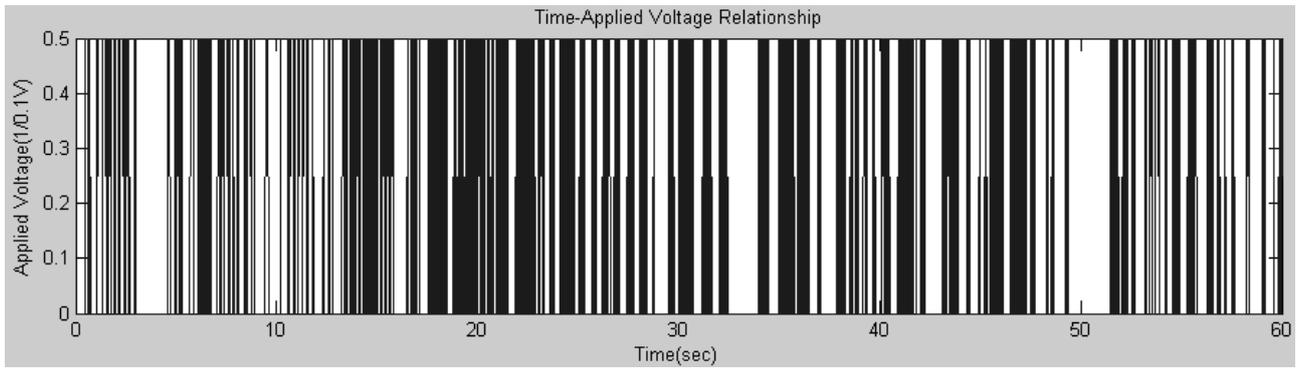


(d) Comparison of Vibration Control Results(COC - Accel.)

Fig. 7 Results of Vibration Control Test (Disp. & Accel.)



(a) Applied Voltage for Lyapunov Control



(b) Applied Voltage for Clipped-optimal Control

Fig. 8 Distribution of Applied Voltage for Vibration Control

는 실시간 준능동 피드백 제어시스템의 운영을 위하여 Fig. 6과 같이 Matlab Simulink 기반의 Control GUI를 구성하여 활용하였다.

먼저, 이상의 실험조건으로부터 획득된 구조물의 변위 응답과 가속도 응답에 대한 실험 결과는 다음 Fig. 5에 나타내었다. 여기서, Lyapunov 제어 시 변위 응답과 가속도 응답은 각각 Fig. 7(a) 및 Fig. 7(b)에 나타내었고, Clipped-optimal 제어 시 변위 응답과 가속도 응답은 각각 Fig. 7(c) 및 Fig. 7(d)에 나타내었다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)에서 보면, Lyapunov 제어 시 변위 및 가속도

모두 비제어 혹은 수동제어 시 보다 응답의 감소효과가 나타내었다. 또한, Fig. 7(c)와 Fig. 7(d)에서 보면, Clipped-optimal 제어 시 역시 변위 및 가속도 응답에서 비제어 혹은 수동제어 시 보다 감소효과가 나타남을 확인할 수 있었다.

다음으로, Fig. 7의 제어응답을 위해 사용된 Lyapunov 및 Clipped-optimal 제어방법 별 외부 인가전원의 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 보면, 수동-on 제어상태(전체(full) 인가전원)보다 이들 두 제어방법 모두 인가전원의 크기를 감소시키는 것으로 나타났다.

Table 1 Maximum Response and Performance Index to Vibration Control Methods

Control Case	Estimation Results	Maximum Response			Performance Index			Control Effect		
		Disp. (mm)	Accel. (m/s^2)	Input Sample (Circle)	J_1	J_2	J_3	Disp. (%)	Accel. (%)	Input Sample (%)
Un-control		1.40	2.54	-	-	-	-	-	-	-
Passive-off		0.97	1.94	-	69.0	76.0	-	31.0	24.0	-
Passive-on		0.45	1.61	3000	32.0	63.0	100	68.0	37.0	-
Lyapunov		0.47	1.15	1993	33.0	45.0	66.0	67.0	55.0	34.0
Clipped-optimal		0.42	1.12	1933	30.0	44.0	64.0	70.0	56.0	36.0

이상의 실험 결과에 대한 각 실험 조건 별 최대응답 및 제어성능지수는 다음 Table 1에 나타내었다. Table 1에서, 측정된 변위 응답은 비-제어의 경우에 1.40mm를 보였고, 수동-off 제어의 경우에 0.97mm, 수동-on 제어의 경우에 0.45mm, Lyapunov 제어의 경우에 0.47mm 그리고, Clipped-optimal 제어의 경우에는 0.42mm로 나타났다. 또한 측정된 가속도 응답은 비-제어의 경우에 $2.54 m/s^2$ 를 보였고, 수동-off 제어의 경우에 $1.94m/s^2$, 수동-on 제어의 경우에 $1.61m/s^2$, Lyapunov 제어의 경우에 $1.15m/s^2$ 그리고, Clipped-optimal 제어의 경우에는 $1.12m/s^2$ 로 나타났다.

이상의 결과로부터 Lyapunov 제어 방법은 비-제어 시와 비교하여 변위의 경우 약 67%, 가속도의 경우 약 55%의 제어효과를 보임을 확인되었고, Clipped-optimal 제어 방법은 비-제어 시와 비교하여 변위의 경우 약 70%, 가속도의 경우 약 56%의 제어효과를 보였다. 특히 Lyapunov 제어 방법은 수동-on 제어 상태와 비교하여 약 34%의 인가전원의 약 34%를, Clipped-optimal 제어 방법은 인가전원의 약 36%를 절감하면서도 우수한 제어성능을 보였다.

3. 결론

본 논문에서는 준능동 제어장치인 MR댐퍼를 이용해 구조물에 발생된 진동을 제어하기 위하여 Lyapunov 제어 및 Clipped-optimal 제어알고리즘 기반의 준능동형 실시간 피드백 진동제어시스템을 구성하고, 각 제어방법 별 진동제어 성능을 실험적으로 평가하였다. 이때, 임의의 랜덤하중(EI-centro 지진파)이 부여된 모형 교량 구조물을 대상으로 진동제어 실험을 수행하였으며, 실험조건은 비-제어, 수동 off/on 제어, Lyapunov 제어 그리고, Clipped-optimal 제어상태로 구분하여 수행하였다. 각 제어조건 별 실험결과는 절대최대변위, 절대최대가속도 그리고, 인가전원의 소모량으로 제어성능을 평가하였다. 이상의 진동제어에 관한 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 모형 교량 구조물에 발생된 랜덤진동에 대하여 비-제어(기본구조물)상태 기준 제어효과는 Lyapunov 제어 및 Clipped-optimal 제어방법 모두 발생 변위 및 가속도를 실시간적으로 감소시키는데 효과적인

것으로 확인되었다. 특히 이들 두 제어 방법은 수동-on 제어 방법과 비교하여 인가전압의 소모량 대비 제어성능을 볼 때, 진동제어 시 요구되는 외부 인가 전원의 소비를 1/3 정도로 감소시킬 수 있었다.

- 2) 한편 Lyapunov 제어 시, 변위의 경우에는 수동-on 제어와 비교하여 근사한 차이로 감소된 제어성능을 보였다. 이는 활용된 제어장치가 충분한 제어력을 발휘하지 못하였기 때문으로 판단되며, 이를 개선하기 위해서는 신뢰성 높은 동적범위 및 충분한 제어 용량을 갖도록 제어장치의 개발이 선행되어야 할 것으로 사료된다.
- 3) 이상의 결론으로부터, 본 연구에서 구성한 준능동형 실시간 피드백 진동제어시스템이 구조물에 발생된 랜덤진동을 실시간적으로 제어하는데 활용되어 질 수 있는 가능성을 확인하였다. 더불어 향후 이러한 실시간 준능동 피드백 진동제어 시스템을 목적 대상 구조물에 적합하도록 보완·적용한다면, 수동 및 능동 제어시스템이 갖는 단점을 극복하면서도, 구조물의 응답에 근거한 실시간 피드백 제어력을 구조물에 부여하여 구조물의 진동을 효율적으로 제어·관리 할 수 있는 방법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 더불어, 본 논문에서 구성한 준능동형 실시간 피드백 진동제어시스템이 축소모델 기반의 실내실험 영역을 극복하고 나아가 실무적인 측면에서 적용되기 위해서는 제어장치의 부착위치 및 개소 결정, 충분한 제어용량의 확보, 그리고 체계적인 제어로직의 설계 등이 복합적으로 검토/검증되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 : KRF-2008- 521-D00465). 본 연구가 이루어지도록 지원하여 준 한국연구재단에 대단히 감사합니다.

참고문헌

1. 윤경조, 박은천, 이현재, 문석준, 민경원, 정형조, 이상현 "준능동 MR감쇠기가 설치된 실험목기 구조물의 분산제어 알고리즘 성능평가", 한국소음진동공학회, 제18권 제2호, 2008, pp.255-262.
2. 허광희, 전준용, 박승범, 오성근 "MR댐퍼 및 Lyapunov제어

- 알고리즘을 이용한 교량구조물의 실시간 진동제어”, 한국구조물진단유지관리공학회, 제14권 제4호, 2010, pp.55-61.
3. Brogan, W. L. Modern Control Theory, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
 4. Dyke, S. J., Spencer, Jr. B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D. Modeling and Control of Magnetorheological Damper for Seismic Response Reduction, Smart Materials and Structures, 5, August 1996, pp.565-575.
 5. Dyke, S. J., Spencer Jr, B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D. “An Experimental Study of MR Dampers for Seismic Protection”, Smart Materials and Structures: Special Issue on Large Civil Structures 7, 1998, pp.693-703.
 6. Dyke, S. J., Caicedo, J. M., Turan, G., Bergman, L. A. and Hague, S. “Phase I Benchmark Control Problem for Seismic Response of Cable-Stayed Bridges”, Journal of Structural Engineering, Vol.129, No. 7, 2003, pp.857-872.
 7. Heo G. H., Lee W. S., Jeon J. R. and Lee D. G. “An Experimental Comparative Study of Smart Damping System for Vibration Mitigation”, CANSMART 2005 Proceedings: International Workshop Smart Materials & Structures, Tronto, Ontario, Canada, 13-14 October, 2005(a), pp.133-140.
 8. Heo, G. H., Lee, G. and Choi, M. Y. “Magneto-Rheological fluid damper for Smart Semi-Active Control System”, The 1st International Conference on Advanced Nondestructive Evaluation, 2005(b), p.234.
 9. Jolly M. R., Bender J. W. and Carlson J. D. “Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluid”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 10(1), 2000.
 10. Kobori, T. “Future Direction on Research and Development of Seismic Response Controlled Structure”, Proceedings of the First World Conference on Structural Control, Los Angeles, California, Vol.1, 1994, pp.Panel:19-31.
 11. Leitmann, G. “Semiactive Control for Vibration Attenuation”, Journal of Intelligent Material System and Structures(5), 1994, pp.841-846.
 12. Spencer Jr, B. F. “Recent Trends in Vibration Control in the U.S.A”, Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control, September 1-6, Chiba, Japan, Vol.II K1-K6, 1996.
 13. Spencer Jr, B. F., Dyke, S. J. and Carlson, J. D. “Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers”, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.123, No.3, 1997, pp.230-238.
 14. Soong, T. T. Active Structural Control Theory and Practice, Lognman Scientific and Technica, Essex England, 1989.

(접수일자 : 2010년 7월 20일)
(심사완료일자 : 2010년 8월 30일)

요 지

본 논문에서는 구조적으로 유연한 특성을 갖는 교량 구조물을 대상으로 외력에 의해 발생하는 진동을 실시간으로 제어하고자 준능동형 실시간 피드백 진동제어시스템을 구성하고, 이를 실험적으로 평가하였다. 여기서 진동제어를 위한 대상 교량 구조물은 서해대교를 약 1/200 크기로 규모화 하여 설계/제작한 모형 교량 구조물을 사용하였고, 실험실 여건을 고려해 규모화 된 EI-centro 지진파형으로 구조물을 가진하였다. 또한, 교량 상판 중앙지점에는 전자석이 채용된 전단형 MR 댐퍼를 수직방향으로 설치하여 발생된 진동을 제어하도록 하였고, 동시에 변위계 및 가속도계를 설치하여 구조물의 응답(변위, 가속도)을 획득하였다. 이때 진동제어의 실험은 크게 비-제어, 수동 on/off 제어, Lyapunov 안정론 기반 제어 그리고, Clipped-optimal 제어조건으로 구분하여 실시간 피드백 진동제어실험을 수행하였고, 이때 진동제어의 효과는 상판 중앙지점에 대하여 각 실험방법 별 절대최대변위와 절대최대가속도 그리고, 인가전원의 소모량 등을 성능지수를 이용해 정량적으로 평가하였다. 진동제어실험의 결과로부터, Lyapunov 제어 및 Clipped-optimal 제어방법 모두 구조물의 발생 변위 및 가속도를 효과적으로 감소시켰으며, 특히 진동제어 시 요구되는 외부 인가전원의 소비를 크게 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 최종적으로, 본 논문에서 구성한 준능동형 실시간 피드백 진동제어시스템은 교량 구조물에 발생된 진동을 제어·관리하기 위한 적극·효율적인 방법으로 활용될 가능성이 있음을 확인하였다.

핵심 용어 : 전단형 MR 댐퍼, 진동제어, 성능지수, Lyapunov 제어 알고리즘, Clipped-optimal 제어 알고리즘