

MR댐퍼 및 Lyapunov제어알고리즘을 이용한 교량 구조물의 실시간 진동제어

Real-time Vibration Control of Bridges by MR damper and Lyapunov Control Algorithm

허 광 희¹⁾

Heo, Gwang Hee

전 준 용^{2)*}

Jeon, Joon Ryong

박 승 범³⁾

Park, Seung Bum

오 성 근⁴⁾

Oh, Sung Keun

Abstract

This paper is concerned with an experimental research to random vibration control caused by external loads specially in bridges which tend to be structurally flexible. Experimenting on a reduced structure modelled on Seohae Grand Bridge, we inflicted a reduced form of El-centro wave on the model structure to a proper proportion. On the center of its middle span, we placed a shear type MR damper which was to control its vibration and also acquire its structural responses such as displacement and acceleration at the same site. The experiments concerning controlling vibration were performed according to a variety of theories including un-control, passive on/off control, and Lyapunov stability theory. Its control performance was evaluated in terms of the peak absolute displacements, the peak absolute accelerations and the total power required to control the bridge which differ from each different experiment method. Among all the methods applied in this paper, case of Lyapunov control method turned out to be the most effective to reduce displacement and acceleration. Also, this method could decrease consuming of external power for vibration control. Finally, it was noteworthy that Lyapunov control method was specially effective in the vibration control employing a semi-active damper such MR damper.

Keywords : Shear Mode MR damper, Vibration Control, Performance Index, Lyapunov Control Algorithm

1. 서론

최근 건설구조물은 날로 장·대형화 되고, 고효율화 되고 있으며, 더불어 구조물의 안전성을 확보하고 구조적 기능을 원활히 수행 할 수 있도록 성능을 개선·평가·관리하는 기술이 크게 부각되었다. 특히 케이블을 이용한 장경간의 사장교 혹은 현수교 구조물은 구조적으로 유연(flexible)한 특성을 갖기 때문에, 반복 혹은 돌발적인 동하중과 기타 외부환경적인 요인으로 발생된 불규칙한 진동에 보다 민감하게 반응한다. 결국 이러한 여러 원인으로 인한 진동은 사용자의 불안감 조성은 물론 심각한 손상 등으로 인한 구조적 성능저하를 야기 시킬 수 있어, 많은 연구자들로 하여금 이러한 유연한 건설구조물에 발생된 진동을 효과적으로 제어하고자 다양한 연구가 수행되고 있다(Kobori, 1994; Spencer, 1996; Jolly et. al, 1999).

구조물에 발생된 진동을 제어하기 위한 기존방법은 크

게 수동, 능동 제어방법으로 구분할 수 있다. 여기서, 여러 장점에도 불구하고 수동형 제어방법은 구조물에 발생되는 다양한 하중조건에 충분히 대응할 수 없어 사용성 측면에 한계가 있을 수 있고, 또한 능동형 제어방법은 초기설치비가 크고, 경우에 따라 대응량의 외부 에너지를 필요로 하기 때문에 경제성 및 관리측면에 한계가 있을 수 있다. 이러한 기존 제어방법이 갖는 난점을 극복하기 위해 근자에는 MR 유체를 활용한 준능동 제어방법이 제안되었다. 여기서 MR 유체를 이용한 준능동 제어방법은 적은 외부에너지 공급만으로 높은 제어효과를 발휘할 수 있을 뿐만 아니라, 제어장치의 강인성 및 빠른 제어응답을 기대할 수 있어 건설구조물의 진동제어를 위한 새로운 대안으로 부각되고 있다. 이를 위하여 국외의 경우 다양한 형식의 MR댐퍼를 개발하여, 이를 이용한 구조물의 진동제어에 관한 실험적 연구를 수행하였고(Dyke et. al, 1998; Spencer et. al, 1997), 국내에서도 이와 관련된 연구를 일부 수행한 바 있다(Heo et. al, 2005(a),(b); 윤경조 등, 2008). 이들 연구에 의하면 MR댐퍼를 이용한 구

1) 정회원, 건양대학교 건설시스템공학과 교수
2) 학생회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정
3) 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수
4) 정회원, 현대건설(주) 충청지사장, 공학박사

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

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

조물의 진동제어성능은 적용된 제어알고리즘에 의해 크게 영향을 받는 것으로 평가되고 있으며, 결국 대상구조물에 적합한 진동제어를 위해서는 구조물의 명확한 수치 해석치 산출 및 상태별 응답 특성치 산출과 더불어, 효율적인 제어알고리즘의 선택이 무엇보다 중요한 것으로 평가되고 있다.

따라서 본 논문에서는 교량 구조물에 발생하는 진동을 제어하고자 Lyapunov 안정도 이론에 의한 제어알고리즘과 전단형 MR댐퍼를 결합한 실시간 준능동 피드백 진동 제어 시스템을 구성하고, 랜덤하중을 받는 대상 모형 교량 구조물을 대상으로 진동제어 실험을 수행하여 구성된 시스템의 성능을 평가하였다. 또한, 수동 on/off 방식의 진동제어실험을 추가로 수행하고, 이때 획득된 구조물의 응답치(변위 및 가속도)를 비-제어 시(기본구조물 상태)의 결과와 비교하여, 각 제어방법 별 진동제어성능을 정량적으로 평가하였다. 최종적으로 본 논문에서 평가된 Lyapunov 제어방법은 구조물의 발생 변위 및 가속도를 효과적으로 감소시켰으며, 특히 진동제어 시 요구되는 외부 인가전원의 소비를 크게 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 중국적으로 본 논문에서 구성된 시스템은 구조물에 발생된 진동을 효과적으로 제어·관리하기 위한 적극·효율적인 방법으로 활용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

2. 본론

2.1 제어 시스템의 상태 공간 표현

일반적으로 외부 가진력과 제어력을 포함하는 제어 가능한 시스템의 동역학적 운동방정식은 다음 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서, M , C , K 는 시스템 즉, 제어 구조물이 갖는 질량, 감쇠 그리고 강성 행렬이며, $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{x}(t)$ 는 시간에 대한 각 자유도의 변위, 속도, 그리고 가속도이다. 또한, $\ddot{x}_e(t)$ 와 $f(t)$ 는 시간에 대한 외부 가진 및 제어력이며, γ 및 λ 는 각 외부 가진과 제어력에 대한 위치 벡터이다. 이때, 식(1)의 동역학적 운동방정식은 다음 식(2)와 같이 상태공간방정식(state-space equation)의 형태로 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.

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

2.2 Lyapunov안정성 이론에 의한 제어알고리즘

피드백 제어기의 설계 시, 안정도 해석을 위한 Lyapunov 직접 접근법을 채택할 수 있다(Brogan, 1991). 이 접근법은 Lyapunov 함수 $V(z)$ 를 사용하며, 또한 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 표현하면, 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. Leitmann(1994)은 준-능동(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 P -노름이고, 이때 P 는 실수이면서 대칭인 양의 한정행렬이다. 선형시스템에서 $V(z)$ 는 양의 한정인 스칼라 함수이므로, 시스템의 접근 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, $\dot{V}(z)$ 를 최소화시키기 위한 준-능동 제어 전압은 다음 식(7)에 의해 생성할 수 있으며, 이때 식(7)은 시스템의 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 제어기로부터 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. 이러한 맥락에서 Lyapunov 제어 알고리즘 기반의 실시간 피드백 제어시스템은 차량 및 풍하중 등 다양한 진동수 범위를 갖는 외력성분을 포괄적으로 고려할 수 있을 뿐만 아니라, 제어장치를 구동함에 있어 Heaviside 계단 함수를 사용하므로 별도의 동적모델을 요구하지 않는다는 특징을 갖는다. 또한, 진동제어 과정 중에 발생될 수 있는 구조물의 동적 특성 변화(케이블 장력 변화 및 강성 변화 등)에 대해서는 구조물로부터의 응답을 실시간으로 획득하고, 이때 획득된 응답은 제어법칙을 통해 현재 시점에 요구되는 제어력으로 출력되기 때문에, 구조물의 파괴 임

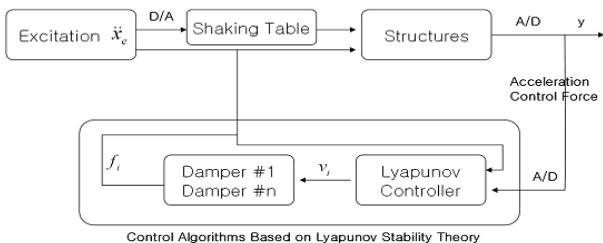


Fig. 1 Flowchart of Feedback Control System based on Lyapunov Control Algorithm

계점 도달 범위 내에서는 제어 동안 발생될 수 있는 구조물의 특성 변화에도 충분히 대응할 수 있다. 본 논문에서는 이상의 Lyapunov 제어 알고리즘을 적용하여 다음 Fig. 1과 같이 피드백 제어시스템을 구성하였다.

2.3 MR 댐퍼를 이용한 진동제어실험

본 논문에서는 모형 교량 구조물에 발생되는 진동을 효과적으로 제어하고자 준능동 제어장치인 MR댐퍼를 이용해 다양한 제어 조건 별 진동제어실험을 수행하고, 각 제어조건 별 제어성능을 정량적으로 평가하였다. 실험을 위한 대상구조물은 서해대교의 사장교 구간을 약 1/200 크기로 규모화 하여, 전체길이 4.2m, 교폭 0.17m 그리고, 주탑 높이 0.70m의 모형 교량 구조물을 Fig. 2(a)와 같이 제작·활용하였고, 이때 실험을 위한 장비구성은 Fig. 2(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·완성하였



(a) Model Bridge for Vibration Control Tests



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

Fig. 2 Tests Setup of Model Bridge

다. 또한 본 논문에서 사용된 진동제어장치로는 직경 0.4mm 코일을 2000번으로 감아 제작한 전자석 요크를 갖는 전단형 MR댐퍼를 이용하였으며, 이는 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 좌측경간 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 진동제어 효과를 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 것이며, 결과적으로는 이러한 랜덤하중을 이용해 교량 구조물의 상판 상·하 진동을 발생시켰다. 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. 본 논문에서 고려한 진동제어실험 조건은 비-제어(기본구조물 상태), 수동-off(인가전류 0A) 제어, 수동-on(인가전류 2A) 제어, 수동-on(인가전류 2A) 그리고, Lyapunov 제어(제어법칙 적용)의 총 4가지 방법으로 수행하였고, 이때 MR댐퍼로의 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.

본 논문에서는 이상의 진동제어실험으로부터 획득된 구조물의 응답을 이용해 각 제어실험 조건 별 진동제어 효과를 평가하기 위하여, Dyke et. al(2003) 등이 사장교 진동제어 벤치마크 문제에서 이용하였던 진동제어성능지수를 활용하였다. 활용된 진동제어성능지수는 절대 최대변위(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 제어실험 조건 별 진동제어에 관한 성능을 평가하였고, 이에 대한 표현은 다음 식(8)~(10)에 나타난 것과 같다.

$$J_1 = \max \left\{ \frac{|x_i^d|}{x^{d,max}} \right\} \quad (8)$$

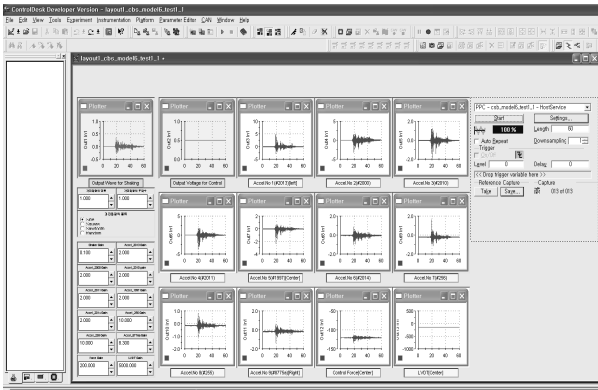
$$J_2 = \max \left\{ \frac{|x_i^a|}{x^{a,max}} \right\} \quad (9)$$

$$J_3 = \max \left\{ \frac{\sum V_i}{\sum V_{on}} \right\} \quad (10)$$

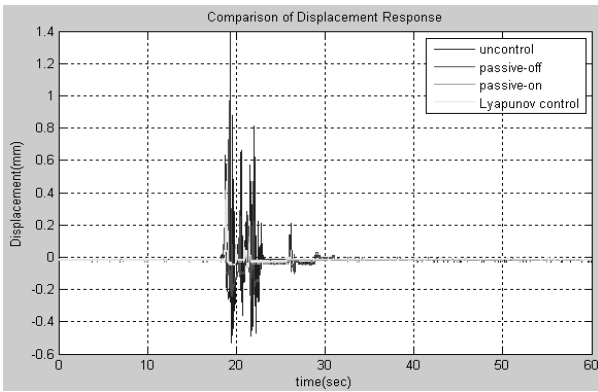
식(8)에서, $x^{d,max}$ 는 비-제어시의 최대 변위 응답, x_i^d 는 시간 단계별 변위 응답이고, 식(9)에서, $x^{a,max}$ 는 비-제어시의 최대 가속도 응답, x_i^a 는 시간 단계별 가속도 응답이다. 또한, 식(10)에서의 V_{on} 은 수동-on 상태에서의 전체(full) 인가전압의 크기이고, V_i 는 Lyapunov 제어 알고리즘에 의한 제어상태에서의 인가전압 크기이다.

2.4 제어실험 결과 및 제어성능 평가

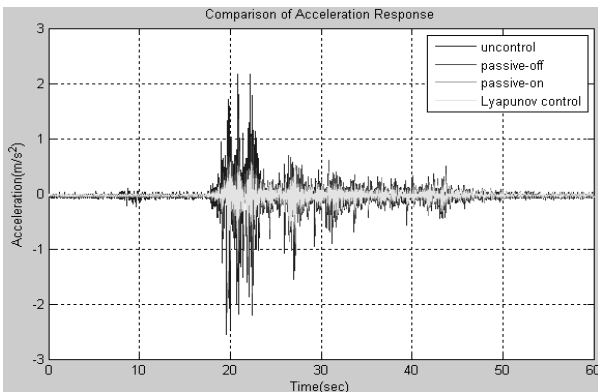
본 논문에서는 모형 교량 구조물에 발생한 진동을 제어하기 위하여 크게 4가지 실험조건(비-제어(기본구조물 상태), 수동-off(인가전류 0A) 제어, 수동-on(인가전류 2A) 그리고, Lyapunov 제어(제어법칙 적용))을 바탕으로 진동제어 실험을 수행하였고, 이때 획득된 교량 상판 중앙지점에서의 변위 및 가속도 응답을 각 실험조건별로 상호 비교하여 조건 별 제어성능을 정량적으로 평가하였다. 여기서, 수동-on 상태에서 제어장치로 인가된 전류 크기의 설정은 준능동 제어장치의 특성상 저전력을 소모하면서도 높은 동적범위 및 제어성능을 발휘하도록 하는 설계조건에 충실하고, 더불어 사용된 전류공급장치의 설계용량 등을 복합적으로 고려해야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 사용된 전류공급장치의 설계용량이 최대 2A이라는 점과, 이는 기존 연구문헌에서 상기 준능동 제어장치의 설계조건에 충실하도록 활용된 최대인가전류 범위를 만족한다는 점 등을 고려하여, 인가전류의 크기를 2A로 설정하였다. 하지만 이때 설정된 2A는 반드시 사용된 제어장치가 최적의 제어성능을 발휘하기 위한 요구 인가전류의 크기를 의미하는 것은 아니다. 본 논문에서는 실시간 준능동 피드백 제어시스템의 운영을 위하여 Fig. 3(a)와 같이 Matlab Simulink 기반의 Control GUI를 구성하였으며, 이때 각 조건 별 진동제어 실험으로부터 획득된 구조물의 변위응답에 대한 실험 결과는 Fig. 3(b)에, 구조물의 가속도 응답에 대한 실험 결과는 Fig. 3(c)



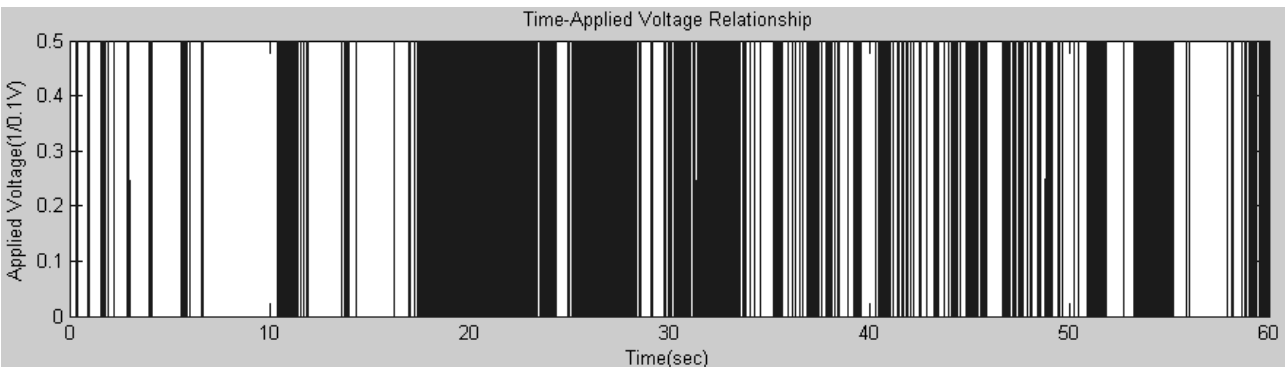
(a) Control GUI for Real-time Feedback Control



(b) Comparison of Vibration Control Results(Displacement)



(c) Comparison of Vibration Control Results(Acceleration)



(d) Distribution of Applied Voltage for Vibration Control

Fig. 3 Results of Vibration Control Test to Model Bridge

에 그리고, 인가전압의 분포는 Fig. 3(d)에 보였다.

먼저, Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)에서 보면, Lyapunov 제어 시 변위 및 가속도 응답 모두 감소효과가 나타남을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 3(d)의 제어를 위해 사용된 인가전압의 분포를 보면, 제어를 요구하는 시점에서부터 인가전압의 분포가 집중되는 것을 확인할 수 있다. 이상의 실험 결과에 대한 각 실험 조건 별 최대응답 및 제어성능 지수는 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 그리고, Lyapunov 제어의 경우에는 0.47mm로 나타났다. 또한 측정된 가속도 응답은 비-제어의 경우에 $2.54m/s^2$ 를 보였고, 수동-off 제어의 경우에 $1.94m/s^2$, 수동-on 제어의 경우에 $1.61m/s^2$ 그리고, Lyapunov 제어의 경우에 $1.15m/s^2$ 로 나타났다. 이상의 결과로부터 Lyapunov 제어 방법은 비-제어 시와 비교하여 변위의 경우 약 67%, 가속도의 경우 약 55%의 제어효과를 보임을 확인되었다. 특히 Lyapunov 제어 방법은 수동-on 제어 상태와 비교하여 약 34%의 소모전압을 절감하면서도 우수한 제어성능을 보였다.

3. 결론

본 논문에서는 MR댐퍼와 Lyapunov제어알고리즘이 결합된 실시간 준능동 피드백 진동제어 시스템의 성능을 평가하기 위하여, 임의의 랜덤하중(EI-centro 지진파)이 부여된 모형 교량 구조물을 대상으로 진동제어 실험을 수행하였다. 여기서, 진동제어실험은 비-제어, 수동 off/on 제어 그리고, Lyapunov 제어상태로 구분하여 수행하였고, 각 제어조건 별 실험결과는 절대최대변위, 절대최대가속도 그리고, 인가전압의 소모량을 바탕으로 제어성능을 비교·분석하였다. 이상의 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

Table 1. Maximum Response and Performance Index to Vibration Control Methods

Estimation Results Control Case	Maximum Response			Performance Index			Control Effect		
	Disp. (mm)	Accel. (m/s^2)	Input Sample (Circle)				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

1) 모형 교량 구조물에 발생된 진동에 대하여 비-제어(기본구조물)상태 기준 제어효과는 Lyapunov 제어방법이 발생 변위 및 가속도를 실시간적으로 감소시키는데 효과적인 것으로 확인되었다. 특히 Lyapunov 제어 방법은 수동-on 제어 방법과 비교하여 인가전압의 소모량 대비 제어성능을 볼 때, 진동제어 시 요구되는 외부 인가전원의 소비를 크게 감소시킬 수 있었다.

2) 한편, 변위 제어의 경우에는 수동-on 제어와 비교하여 근사한 차이로 감소된 제어성능을 보였다. 이는 활용된 제어장치가 충분한 제어력을 발휘하지 못하였기 때문으로 판단되며, 향후 신뢰성 높은 동적범위 및 충분한 제어용량을 갖도록 제어장치를 개발·적용할 경우 향상된 제어효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

3) 최종적으로, 본 연구에서 MR댐퍼와 Lyapunov제어 알고리즘을 바탕으로 구성된 실시간 준능동 피드백 진동 제어 시스템은 목적 대상 구조물에 적합하도록 보완·적용한다면, 수동 및 능동 제어시스템이 갖는 단점을 극복할 수 있을 뿐만 아니라, 구조물의 응답에 근거한 피드백 제어력을 구조물에 실시간적으로 부여할 수 있다는 측면에서 구조물의 진동을 효과적으로 제어·관리하기 위한 적극·효율적인 방법으로 활용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

감사의 글

본 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 2007년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호 : 2009-0083565)과 2008년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호 : 2009-0083857)의 일부 연구비 지원으로 수행되었음. 본 연구가 이루어지도록 지원하여 준 한국연구재단에 대단히 감사합니다.

참고문헌

1. 윤경조, 박은천, 이헌재, 문석준, 민경원, 정형조, 이상현, “준능동 MR감쇠기가 설치된 실물크기 구조물의 분산제어 알고리즘 성능평가”, 한국소음진동공학회, 제18권 제2호, 2008, pp.255-262.

2. Brogan, W. L. “Modern Control Theory”, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
 3. 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.
 4. 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.
 5. 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.
 6. 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), pp.234.
 7. 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.
 8. 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.
 9. Leitmann, G. “Semiactive Control for Vibration Attenuation”, Journal of Intelligent Material System and Structures(5), 1994, pp.841-846.
 10. 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.
 11. 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.
 12. Soong, T. T. “Active Structural Control Theory and Practice”, Lognman Scientific and Technica, Essex England, 1989.

(접수일자 : 2009년 7월 28일)
 (1차수정일자 : 2009년 12월 30일)
 (2차수정일자 : 2010년 3월 31일)
 (심사완료일자 : 2010년 4월 2일)

요 지

본 논문에서는 구조적으로 유연한 특성을 갖는 교량 구조물을 대상으로 외력에 의해 발생하는 진동을 실시간으로 제어하고자 실험적 연구를 수행하였다. 여기서 진동제어를 위한 교량 구조물은 서해대교를 규모화 한 모형 교량 구조물을 사용하였고, 실험실 여건을 고려해 규모화 된 EI-centro 지진파형으로 구조물을 가진하였다. 또한, 교량 상판 중앙지점에는 전자석이 채용된 전단형 MR 댐퍼를 설치하여 발생한 진동을 제어하도록 하였고, 동시에 변위계 및 가속도계를 설치하여 구조물의 응답(변위, 가속도)을 획득하였다. 이때 진동제어의 실험은 크게 비-제어, 수동 on/off 제어, 그리고 Lyapunov 안정도 이론에 의한 실시간 피드백 진동제어방법을 이용하여 수행하였고, 이때 진동제어의 효과는 상판 중앙지점에 대하여 비-제어 시 기준 각 실험방법 별 절대최대변위와 절대최대가속도 그리고, 인가전압의 소모량으로 평가하였다. 진동제어실험의 결과로부터, Lyapunov 제어방법은 구조물의 발생 변위 및 가속도를 효과적으로 감소시켰으며, 특히 진동제어 시 요구되는 외부 인가전압의 소비를 크게 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 최종적으로, 본 논문에서 구성한 실시간 준능동 피드백 진동제어 시스템은 구조물에 발생한 진동을 제어관리하기 위한 적극, 효율적인 방법으로 활용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

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