

전단형 MR 댐퍼 및 Clipped-optimal 제어알고리즘을 이용한 사장교의 실시간 준능동 진동제어

Real-time Semi-active Vibration Control in Cable-stayed Bridges by Shear-type MR damper and Clipped-optimal Control Algorithm

허광희¹⁾ · 전준용* · 전승곤²⁾

Heo, Gwanghee¹⁾ · Jeon, Joonryong* · Jeon, Seunggon²⁾

¹⁾건양대학교 토목공학과, ²⁾충남대학교 토목공학과

¹⁾Research Professor, Department of Civil Engineering, Konyang University, ²⁾Department of Civil Engineering, Chungnam National University

/ A B S T R A C T /

This paper is concerned with an experimental research to control of random vibration caused by external loads specially in cable-stayed bridges which tend to be structurally flexible. For the vibration control, we produced a model structure modelled on Seohae Grand Bridge, and we designed a shear type MR damper. 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 clipped-optimal control. Its control performance was evaluated in terms of the absolute maximum displacements, RMS displacements, the absolute maximum accelerations, RMS 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, clipped-optimal control method turned out to be the most effective to reduces of displacements, accelerations, and external power. Finally, it is proven that the clipped-optimal control method was effective and useful in the vibration control employing a semi-active devices such MR damper.

Key words: Semi-active Vibration Control, MR Damper, Bingham Model, Clipped-optimal Control Algorithm, Cable-stayed Bridge

1. 서론

최근, 국내외 건설 분야에서는 고성능의 장대형 구조물이 경쟁적으로 출현하고 있으며, 이러한 추세는 앞으로도 지속될 전망이다(Fujino 2002, Savor *et al.*, 2006). 특히 장대형 토목 구조물인 케이블 교량의 경우, 중국 등 신흥국가를 중심으로 구조적 안전성 및 기능적 사용성 측면뿐만 아니라, 미(美)적 상징성을 반영하도록 막대한 자본과 노력이 집중되고 있다(Gu *et al.*, 2008). 반면, 대형화된 케이블 교량은 구조적으로 유연하고 낮은 고유진동수와 감쇠 능력을 갖기 때문에 예견치 못한 외력환경에서 구조적 유해진동이 발생할 수 있으며, 결국 구조물의 유해진동을 효과적으로 관리하고, 구조적 안전성을 확보하기 위한 적절한 대응책이 요구된다(Spencer 1996,

Lee *et al.*, 2006).

교량의 구조적 유해진동 문제를 해결하고자, 기존 구조물은 주로 설계당시 구조물의 강성을 크게 고려하여 상대적인 유연성을 줄이고, 보다 견고한 구조가 되도록 설계하였다(Yao 1972). 하지만, 이 방법은 구조물의 추가적인 강성 대책에 필요한 비용과 노력이 가중되었다. 결국 경제성과 사용성 측면에서 새로운 유해진동 대책이 요구되었으며, 이후 진동회피 대책이 아닌 발생 진동을 제어하는 방법들이 소개되었다. 대표적인 진동제어 방법은 수동, 능동, 준능동 및 기타 복합제어방법 등이며, 이때 각 방법들은 특정한 제어장치를 사용한다(Soong 1990). 특히 수동형 제어방법에 비해 능동형 제어방법은 구조물의 정보를 실시간 획득·활용하여 적절한 제어력을 계산하고, 이를 구조물에 직접적으로 부여한다는 측면에서 높은 진동제어효과를 기대할 수 있다(Carlson and Spencer 1996). 하지만 능동형 제어방법은 제어장치의 높은 초기 설치비용과 일반적으로 큰 외부전원을 요구한다는 점에서 효과적인 진동제어를 위한 기술적 한계를 내포하고 있다. 이러한 측면에서 근자에는 스마트 재료인 MR(Magneto-rheological) 유체를 활용한

*Corresponding author: Jeon, Joonryong

E-mail: jrjeon@konyang.ac.kr

(Received November 13, 2015; Revised December 29, 2015; Accepted December 31, 2015)

준능동형 진동제어기술이 새로운 대안으로 부각되었다(Jansen and Dyke 2000; Datta 2003).

준능동형 진동제어기술은 1990년대 들어 Carlson and Spencer (1996) 등이 미국 Lord 사에서 개발한 MR 유체(<http://www.lord.com/tabid/3317/Default.aspx>)를 건설분야에 도입하면서 Spencer et al. (1997) 및 Dyke et al. (1998) 등 많은 연구자들로 하여금 MR 제어장치(댐퍼)를 활용한 진동제어방법의 연구가 수행되었다. 이때 Soong (1990) 등은 이러한 준능동형 진동제어기술이 기존 수동형 및 능동형 제어방법 대비 경제·효율적인 진동제어를 실현할 수 있는 가능성을 제시하였고, 또한 관련된 제어장치의 개발 및 운영시스템을 구축하였으며, 일부 실 교량 구조물의 적용에 관한 사례적인 연구를 수행하였다. 특히, 미국의 Spencer et al. (1997) 및 Dyke et al. (1998) 등은 이러한 MR 유체를 활용한 MR 댐퍼의 이력거동을 모사하기 위한 동적모델과 MR 댐퍼의 구동을 위한 준능동 제어알고리즘을 개발 제안하였고, 이에 대한 수치·실험적 검증연구를 수행하였다. 또한, 일본에서는 Sodeyama et al. (2003; 2004) 등이 바이패스 형태의 대용량 MR 댐퍼를 개발하고, 앞서 제안된 동적모델을 이용해 MR 댐퍼의 성능을 평가한 바 있다. 하지만, 선행연구에서 MR 유체를 활용한 제어장치는 많은 장점에도 불구하고, MR 유체 내 포함된 카본(Carbon)분말의 침전현상으로 인해 돌발적인 외력하중 하에서는 초기 대응력이 다소 부족할 수 있다는 문제와, 전자석의 자화현상으로 인한 잉여응력 발생 등의 문제는 지속적인 연구가 필요하다.

상기와 같이 미국과 일본을 중심으로 한 교량 구조물의 준능동 진동제어에 관한 다양한 연구가 활발한 가운데, 한국에서의 기존 연구는 일부 MR 댐퍼의 개발과 제어알고리즘의 검증단계에 그치고 있고(Moon et al., 2004, Jang et al., 2010), 그마저도 빌딩 등의 건축 구조물에 치중하여 연구가 수행되었다(Youn et al., 2008). 이에 반해 교량 구조물에 대한 진동제어 문제는 주로 수치해석적 연구가 대부분이며, 교량의 케이블 진동제어에 관한 연구가 제한적으로 수행되었다(Jung et al., 2006). 이들 연구에서는 기존의 El-centro 및 Kobe 등 랜덤지진파를 이용해 진동제어효과를 평가하였다. 그러나 케이블 진동의 경우에는 풍하중에 민감하므로 제어전략 수립 시 실제의 풍하중 조건을 고려해 보완적 연구가 병행되어야 한다. 결국 상대적으로 외력하중에 취약한 장대형 케이블 교량에 대하여 실제모사 하중조건을 부여하고, 이때 검증된 제어 알고리즘으로 구동되는 MR 댐퍼를 사용했을 때 구조적 유해진동의 제어성능을 정량적으로 평가하는 실험적 연구가 필요하다(Hwang 2004; Heo and Jeon 2010, 2011). 특히 매년 여름 7~9월 사이에 호우와 강풍을 동반한 태풍이 집중되는 한국의 지라기

후적 특성(Park et al., 2005)상, 동적 풍하중에 의해 발생한 국내 장대형 교량의 유해진동 제어에 관한 연구가 반드시 수행되어야 한다(Kim 2011).

본 논문에서는 풍하중 조건에서 유발된 유해진동의 효과적인 제어관리의 필요성을 이유로, 상대적으로 유연한 거동특성을 갖는 케이블 교량을 대상으로 실시간 진동제어에 관한 실험적 연구를 수행한다. 실험을 위해 한국의 서해대교를 축소하여 실험체를 구성하고, 실 교량에서 취득한 풍하중 성분을 실험구모로 재현하여 외부 유해진동 조건을 모사한다. 또한 준능동 제어를 위한 전단형 MR 댐퍼를 자체적으로 설계 제작하고, 준능동형 진동제어를 위한 Clipped-optimal 제어알고리즘을 적용하여 실시간 피드백 진동제어시스템을 완성한다. 개발된 MR 댐퍼는 동하중 실험을 통해 동적범위 및 최대 제어력을 평가한다. 마지막으로, 교량 구조물의 진동제어 효과는 목적 위치의 발생 변위, 가속도, 그리고 제어 시 소모 전원량에 대한 제어성능지수를 활용하여 정량적으로 평가한다. 최종적으로 본 논문에서의 준능동형 진동제어 전략이 실 교량에 발생된 상사돌발적 랜덤 진동의 실시간 제어관리를 위한 활용 가능성을 제시하고, 나아가 상대적으로 유연한 교량의 준능동형 진동제어에 관한 실험적 연구의 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 준능동형 진동 제어장치

2.1 전단형 MR 댐퍼의 용량결정

본 논문에서는 제어장치의 용량을 결정하기 위해 진동제어 실험에 사용된 외부가진 신호 대비 구조물에 발생된 최대 외력을 산출하였고, 이때 산출된 최대 외력을 초과하지 않도록 전단형 MR 댐퍼의 용량을 결정하였다. 우선, 진동제어를 위한 외부 가진력은 Fig. 1(a)와 같이 한국의 서해대교를 대상으로 2011년 02월 27일, 오후 11시 20분~11시 30분경에 발생한 돌발적인 풍하중 조건에서, 사장교 주경간의 중앙 보강형의 연직방향 가속도 응답을 약 50초 동안 획득하여 활용하였다. 이때 최대 풍속은 약 15 m/s, 최대 가속도는 약 0.01 g 정도로 나타났다. 다음으로, 이상의 외부가진 조건에서 모형 구조물에 발생된 최대 외력을 산출하기 위해, 먼저 전단형 MR 댐퍼가 부착될 위치에서의 가속도 및 변위응답을 Fig. 1(b) 및 (c)와 같이 실험적으로 획득하여, 이때의 최대 가속도, 속도, 변위응답을 Table 1과 같이 산출하였고, 이를 이용해 계산된 발생 관성력, 감쇠력, 복원력을 Table 2와 같다. 여기서, 계산을 위해 사용된 질량, 감쇠, 강성은 1차 휨 모드를 기

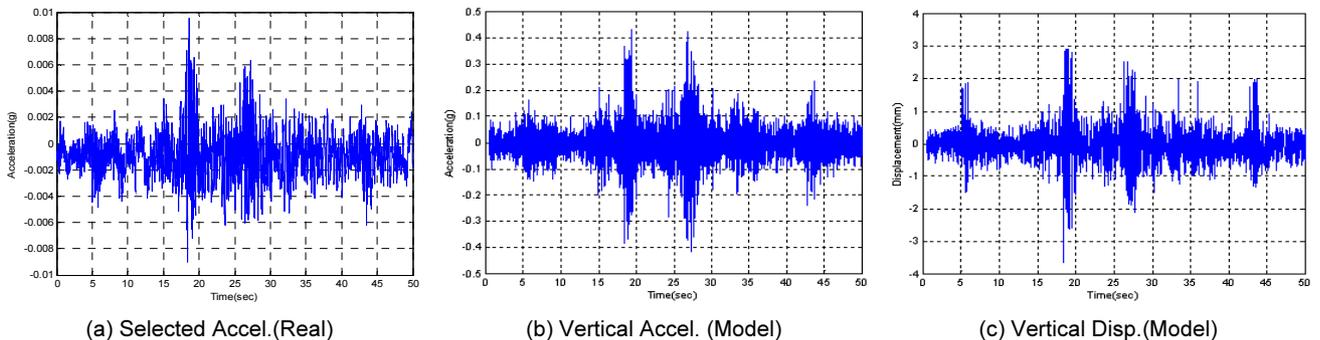


Fig. 1. Response from Real & Model Cable-stayed Bridge

Table 1. Maximum Response of Model Bridge

Kinds of Response	Acceleration (m/s^2)	Velocity (m/s)	Displacement (m)
Maximum Response	4.3122	0.1255	0.0036

Table 2. Maximum Force of Model Bridge

Kinds of Force	Inertia Force (N)	Damping Force (N)	Restoring Force (N)
Maximum Force	139	3.61	0.74

준하여 응답 가속도의 주파수 분석을 통해 산출하였으며, 최종적으로 모형 사장교에 대한 풍하중 성분의 가진으로부터 약 140 N의 총 발생력이 확인되었다. 이때 MR 댐퍼의 제어용량이 산출된 총 발생력을 초과할 수 없다는 점을 고려하여, 식(1)을 이용해 총 발생력 대비 약 1/10 내외의 제어력을 갖도록 약 10N급으로 MR 댐퍼의 용량을 결정하였다.

$$F = F_{\eta} + F_r(H) = \frac{\eta SA}{g} + \tau_y A \quad (1)$$

여기서, F 는 전체 전단형 MR 댐퍼의 제어력, F_{η} 는 MR 유체의 점성으로 인한 점성 제어력, F_r 는 전류인가에 따른 자기 제어력, H 는 자기장도, η 는 유체의 소성점성, S 는 자극의 상대속도, τ_y 는 적용된 MR 유체의 항복응력, A 는 자기장이 작용하는 판 면적, 마지막으로 g 는 유로의 간격(gap)이다.

2.2 전단형 MR 댐퍼의 설계

일반적으로 MR 유체의 재료적인 특성은 인가되는 전류의 세기를 조절함으로써 발생 자기장에 영향을 받는 MR 유체의 제어응력을 조절할 수 있고, 일정 크기의 전류를 인가하면 상승된 MR 유체의 제어응력을 기대할 수 있다. 본 논문에서는 전단형 MR 댐퍼를 위해 미국 Lord사에서 제공하는 하이드로카본 타입의 MR 유체(MRF-132DG)를 사용하였다. 그리고 강(Steel)은 탄소함량이 적은 순철에 가까울수록 자기 포화 및 풀림이 극대화되는 특성으로부터 전단형 MR 댐퍼의 전자석 요크 및 전단판은 S15C~S20C 정도의 저탄소강으로 제작하였다. 마지막으로 전단판 연결봉 및 전자석 외부 덮개 부분은 자기장이 전단판 영역에 집중될 수 있도록 자기의 영향이 없는 알루미늄으로 제작하였다. 여러 설계요소를 종합적으로 고려하여 본 논문에서 설계제작한 전단형 MR 댐퍼는 Fig. 2와 같다. 이때 전단형 MR 댐퍼는 직경 0.4 mm의 에나멜 코일을 요크에 2000번 감아 전자석을 제작하였고, 요크와 마찰판과의 간격은 좌우 동일하게 6 mm로 설정하였다. 전단판과 마찰판 사이에는 MRF-132DG가 함침된 스펀지를 삽입하여 제어장치를 완성하였으며, 안정적인 전류 공급을 위해 미국 Lord사의 Current Driver(RD-3002-03)를 이용하였다.

**Fig. 2.** Prototype Shear Type MR Damper

2.3 전단형 MR 댐퍼의 동하중 실험

앞서 설계제작한 전단형 MR 댐퍼의 제어성능을 정량적으로 평가하고자, 본 논문에서는 다양한 실험조건을 바탕으로 동하중 실험을 수행하였다. 특히, 준능동 방식의 MR 댐퍼의 제어성능은 일반적으로 인가전류의 Off 상태에 따른 최소 발생 제어력과 인가전류의 On 상태에 따른 최대 발생 제어력을 바탕으로 크게 제어 가능력(Controllable Force) 및 동적 범위(Dynamic Range, DR) 등의 성능평가 지표로 나타낸다. 먼저, 제어 가능력 F_C 는 식(2)와 같이 표현될 수 있고, F_{cmax} 은 최대 발생 제어력, F_{cmin} 은 최소 발생 제어력이다.

$$F_C = F_{cmax} - F_{cmin} \quad (2)$$

두 번째 평가지표인 동적범위는 준능동형 제어기로써의 중요한 평가지표로써, Carlson and Spencer (1996) 등은 준능동 제어기의 동적범위를 1~20까지로 제시하고 있으며, 이러한 동적범위는 식(2)에서 산출된 최대 및 최소 발생 제어력의 상대적인 비율로 산출될 수 있으며, 이러한 동적 범위(DR)를 수식적으로 표현하면 식(3)과 같다.

$$DR = \frac{F_{cmax}}{F_{cmin}} \quad (3)$$

마지막으로 동하중 실험을 위한 실험 테이블의 셋업은 MR 댐퍼의 강제 전단판 운동을 발생시키기 위하여 최대 변위 ± 1.0 inch 용량의 가진기(VTS-600)를 이용하였고, 다양한 가진 주파수 별 가진기의 구동을 위하여 MTS사의 T-DAS를 사용하였다. 발생 제어력을 측정하기 위해 Load cell(DBBP-500)을 이용하였으며, MR 댐퍼의 발생변위를 측정하기 위하여 LVDT(CDP-50)를 이용하였다. 이때, 측정시스템 구성은 측정장치로부터의 데이터를 일괄적으로 획득하기 위하여 동적 Strain 로거(DRA-107A)를 사용하였고, 0.01초의 샘플링 주기로 40초 동안 데이터를 획득 활용하였다.

준능동형 진동제어를 위해 설계제작한 전단형 MR 댐퍼의 제어성능을 평가하기 위하여, 동하중 실험의 조건은 크게 가진 속도 및 가진 주파수의 변화로 구분하였고, 각각의 경우에 대해서는 인가전류의 세기를 Off(0A) 및 On(2A) 상태로 설정하였다. 먼저 가진 속도의 변화는 실험실 여건을 고려하여 1 Hz의 사인파 가진 조건 시 각각 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 및 40

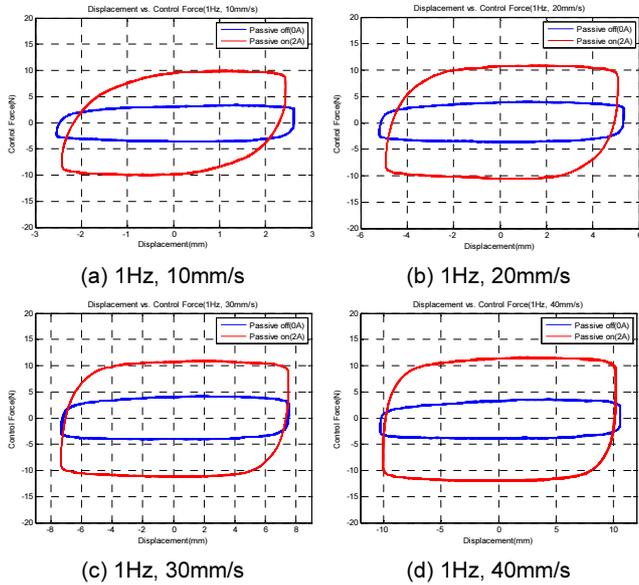


Fig. 3. Disp. vs. Control Force to Velocity Cases

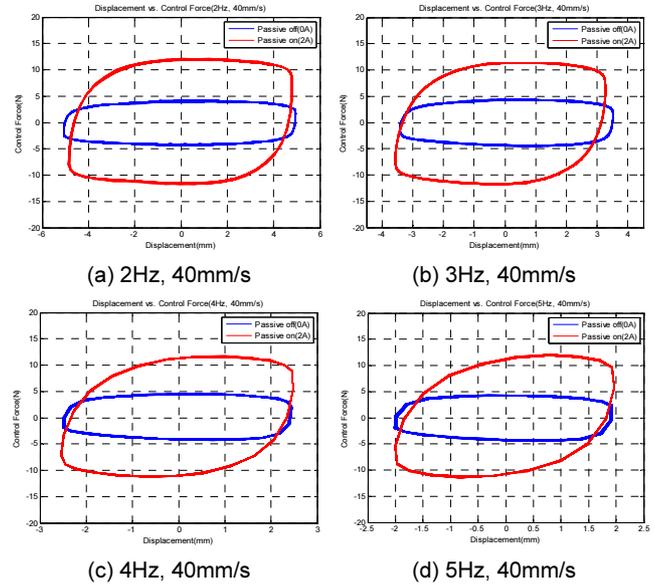


Fig. 4. Disp. vs. Control Force to Velocity Cases

Table 3. Control Forces and DR to Velocity Cases

1Hz	Velocity(mm/s)								Avg.
	5	10	15	20	25	30	35	40	
Passive off Force(N)	3.26	3.51	3.59	3.98	4.25	4.30	4.42	3.76	3.88
Passive on Force(N)	8.95	9.97	10.45	10.97	10.80	10.96	11.57	11.74	10.67
Controllable Force(N)	5.68	6.46	6.86	6.98	6.54	6.66	7.15	7.97	6.79
DR	2.74	2.83	2.90	2.75	2.53	2.54	2.61	3.11	2.75

mm/s의 속도 조건으로 동하중 실험을 수행하였고, Fig. 3 및 Table 3과 같이 힘-변위 이력곡선 및 결과값을 얻었다. 그리고 가진 주파수의 변화는 모달 가진기를 이용해 40 mm/s 속도에서 각각 2, 3, 4 및 5Hz의 주파수 조건으로 동하중 실험을 수행하여, Fig. 4 및 Table 4의 힘-변위 이력곡선 및 결과값을 얻었다.

먼저, Fig. 3 및 Fig. 4를 살펴보면, 일정한 가진 파형을 이용한 속도 변화에 따라 혹은 가진 주파수 변화에 따라 MR 댐퍼의 제어력이 함께 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 인가전류의 변화에 따라 MR 댐퍼의 제어력 역시 함께 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 이상으로부터 설계제작된 전단형 MR 댐퍼가 인가전류의 세기에 따라 변화하는 것으로부터 정상적인 작동여부와, 인가전류를 증가시키면 제어력 역시 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 다음으로 가진 주파수의 변화보다 가진 속도의 변화에 따라 발생 제어력의 변화가 지배되는 것을 확인하였으며, 가진 속도가 발생 제어력에 영향을 미치는 주요 설계요소임을 확인하였다.

다음으로, Table 3 및 Table 4를 살펴보면, 본 논문에서의 전단형 MR 댐퍼는 인가전류 Off 상태에서 평균적으로 약 3.88~4.28 N의 최소 발생 제어력을 보였고, 인가전류 On 상태에서는 평균적으로 약 10.67~11.86 N의 최대 발생 제어력을 발휘하였다. 이로부터 제어 가능성은 약 6.79~7.58 N 정도를 보였으며, 이때 동적범위는 약 2.75~2.77 정도를 보였다. 이상의 결

Table 4. Control Forces and DR to Freq. Cases

40mm/s	Frequency(Hz)					Avg.
	1	2	3	4	5	
Passive off Force(N)	3.76	4.26	4.463	4.573	4.346	4.28
Passive On Force(N)	11.74	12.25	11.43	11.83	12.07	11.86
Controllable Force(N)	7.93	7.98	6.97	7.26	7.72	7.58
DR	3.11	2.87	2.56	2.58	2.77	2.77

과에서 본 논문에서의 전단형 MR 댐퍼는 고성능의 제어력을 기대하기 보다는, 진동제어 실험 시 인가전류를 변화시켜 제어력의 발생 시킬 수 있는 준능동 제어장치로의 타당함을 확인하였다.

2.4 전단형 MR 댐퍼의 동적 모델링

개발된 전단형 MR 댐퍼의 동적 거동을 수치적으로 모사규명하기 위하여, 본 논문에서는 여러 동적 모델 중 실용적인 측면이 고려해 Bingham 모델을 채택하였다. Bingham 모델은 MR 댐퍼의 동적 거동을 모사규명하기 위한 대표적인 동적 모델중의 하나이다(Gavin et al., 1996(1),(2)). 여기서, 감쇠장치(Dashpot) 및 마찰장치(Coulomb friction slider)는 서로 평행하게 연결되어 있다고 간주하며, 이 경우 Bingham 모델의 힘-속도 관계는 식 (4)와 같이 표현된다. 여기서, F 는 감쇠기의 전체 제어력이고, V 는 감쇠기의 피스톤 속도이며, c_0 는 감쇠계수, 마지막으로 F_F 는 마찰력이다. 이들 두 모델들은 모두 그 관계식이 간단하면서도 우수한 성능을 보임으로서 MR 댐퍼의 동적 거동특성을 수치적으로 모사규명하는데 효과적일 수 있다.

$$F = F_F \operatorname{sgn}(V) + C_0 V \tag{4}$$

Table 5. Model Parameters of MR Damper

Current (A)	Parameters of Bingham Model	
	C_0 (N/(mm/sec))	F_F (N)
0.0	0.0248	3.3288
2.0	0.0687	9.1316

Table 6. Analysis Results of Bingham Model

Dynamic Modeling	Velocity(mm/s)								Avg.
	5	10	15	20	25	30	35	40	
Predict (0A) Force(N)	3.45	3.57	3.70	3.82	3.94	4.07	4.19	4.32	3.89
Predict (2A) Force(N)	9.47	9.81	10.16	10.50	10.84	11.19	11.53	11.88	10.68
Predict Controllable Force(N)	6.02	6.24	6.46	6.68	6.90	7.12	7.33	7.55	6.79
Predict DR	2.74	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75

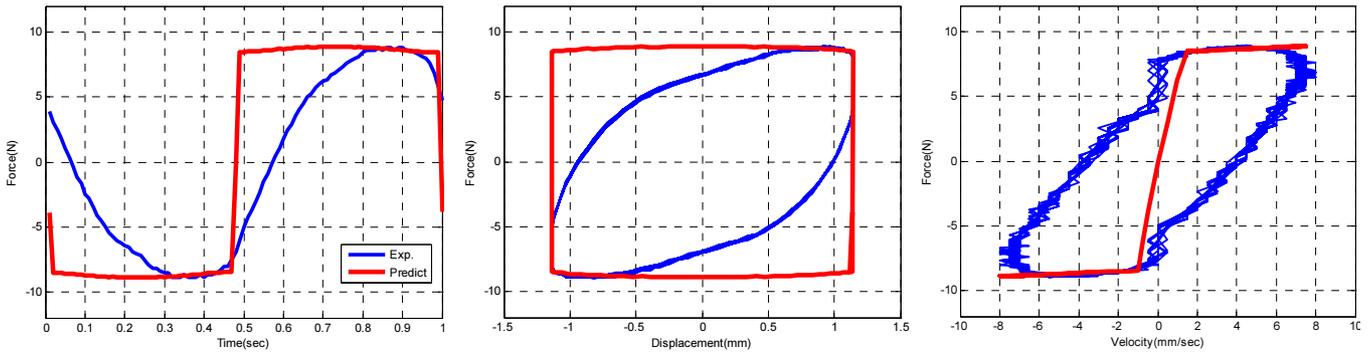


Fig. 5. Bingham Model Results to Freq. Cases

Bingham 모델의 수치모사 경향을 파악하기 위하여 본 논문에서는 상기 Table 2와 3에서 보인 실험결과와 Passive Off(0 A) 조건과 Passive On(2 A) 조건 고려하여 동적모델링을 수행하였으며, 이때 규명된 각 동적모델 별 변수(Parameters)는 Table 5에 나타내었다. 이때, Table 5에서 규명된 동적모델 변수에 의해 각 속도별로 예측(Predict)된 Bingham 모델의 제어력, 제어가능력, 동적범위 등을 Table 6에 나타내었다. 마지막으로, Bingham 모델로부터 예측된 제어력을 평가하기 위하여, 1 Hz의 2 A조건에 대한 실험값 대비 해석값을 Fig. 5에 나타내었다.

Table 6 및 Fig. 5로부터, Bingham 모델은 MR 유체의 항복 이후의 특성이 일정하게 나타난다고 가정하고 있기 때문에 항복 이후의 동적 거동 특성 모사에서 다소 오차가 발생할 수 있지만, 근소한 오차를 갖는 선형성 거동을 보임으로써 개발된 MR 댐퍼의 거동을 효율적으로 모사하였다. 따라서 Bingham 모델은 MR 유체를 이용한 감쇠장치의 동적 거동을 선형성을 고려할 수 있는 단순 모델링에 효과적인 것으로 평가되었고, 전단형 MR 댐퍼가 준능동 제어장치로 타당함이 입증되었다.

3. 준능동 제어법칙 및 제어성능평가 지수

3.1 Clipped-optimal 제어법칙

MR 댐퍼를 이용한 준능동형 제어전략으로서 Dyke *et al.* (2001) 등이

Clipped-optimal 제어알고리즘을 제안하였다. 이때 Clipped-optimal 제어알고리즘의 기본 개념은 구조물로부터의 제어력(f) 및 응답(y) 그리고 설계된 선형 최적 제어기 $K_c(s)$ 를 이용해 MR 댐퍼의 요구된 제어력(f_{ci})을 산정한다. 따라서 힘-피드백 루프는 MR 댐퍼에서 생성된 힘 f_i 가 요구되는 최적 제어력 f_{ci} 에 근접되도록 이를 상호 부합시켜야 한다. 결국, MR 댐퍼에서 생성된 힘 f_i 가 요구되는 최적 제어력 f_{ci} 에 근접되도록 결정된 제어법칙은 식 (5)와 같다.

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

여기서, MR 댐퍼가 요구된 제어력을 제공할 때($f_i = f_{ci}$), MR 댐퍼에는 그 상태에 준하는 제어력이 발휘되도록 전압신호가 인가되어야 한다. 만약, MR 댐퍼에 의한 제어력이 요구된 제어력 보다 작으며, 두 힘이 같은 부호를 가질 때, MR 댐퍼의 제어력은 요구제어력에 상응되는 최대 제어력을 발휘하도록 전류증폭기에 최대전압을 보낸다. 그 외의 경우에는 MR 댐퍼에 “0”의 신호를 보낸다.

3.2 진동제어 성능지수

일반적으로, 진동의 크기를 나타내는 진폭은 Peak 값, Peak to Peak 값, Average 값, RMS 값 등으로 정량화시킬 수 있다(Dyke *et al.*, 2001). 본

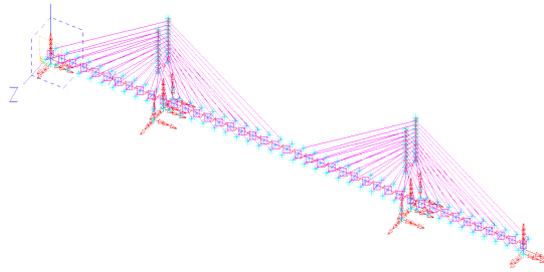


Fig. 7. FE Modeling of Model Bridge using I-DEAS

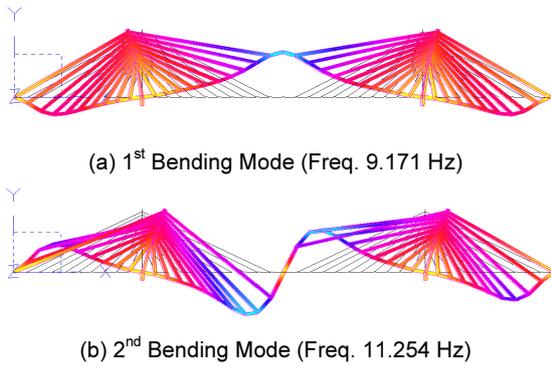
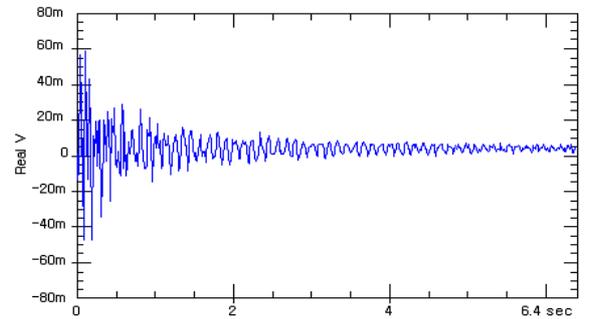


Fig. 8. Frequency and Mode Shape by FE Analysis

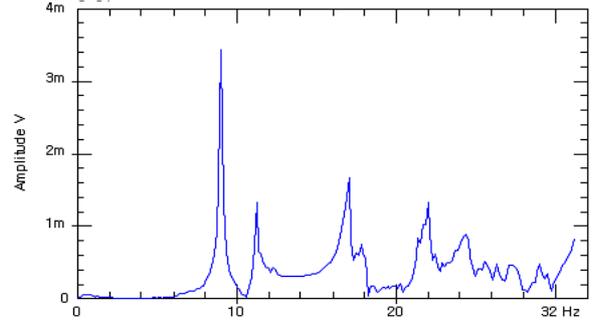
주탑 하부는 Clamp, 상부구조의 양측단과 우측 주탑 연결부는 Roller, 좌측 주탑 연결부는 Pin으로 고려하였다. 마지막으로 구조물의 자유도 조건은 상판 중앙의 총 39개 절점을 기준으로 Y축 방향으로 자유도(DOF)를 부여하여 3차원 상세 FE 모델을 완성하였다. 이때 모형 교량 구조물의 FE 해석은 수직방향의 진동제어를 목적으로 총 2개의 최 저차 휨(Bending) 모드를 고려하였으며, Guyan 소거법(Ewins 2000)을 적용해 해석한 모형 교량의 고유진동수 및 모드형상은 Fig. 8과 같다.

4.3 사장교 모델의 모달 실험

앞서 구성된 FE 모델의 타당성과, 모형 사장교의 동적 특성을 분석하기 위하여 본 논문에서는 모달 실험을 수행하였다. 이를 위해 HP-VXI 1432를 이용해 구조물의 응답 신호를 측정하였고, MTS사의 T-DAS를 활용하여 데이터를 획득·분석하였다. 구조물의 가속도 응답을 획득하기 위해 교량 상판의 등 간격으로 선정된 총 39 지점에 대하여 Dytran 모델 3134D를 사용하였다. 또한 구조물의 가진을 위한 충격해머(Hammer)의 가진위치는 교량 상판 중앙을 선택하여 Dytran 모델 5850A를 사용하였다. 이때 최대 응답주파수 범위는 35 Hz까지 30회 평균하여 데이터를 획득하였으며, 이때 기준 채널(Reference)은 가진 해머로 설정하여 FRF를 획득·분석하였다. 여기서 획득된 시간응답 및 주파수 응답은 Fig. 9와 같고, 이때 산출된 고유진동수 및 모드형상은 Fig. 10과 같다. 이때, 3차원 상세 FE 모델의 해석과 모달 실험을 수행하여 Table 9와 같이 고유주파수를 상호 비교하였다. Table 9에서 보면, 해석과 실험의 오차율이 약 1% 내외를 보임으로써 만족할만한 결과를 얻었다. 이 결과를 바탕으로 본 논문에서 구성된 FE 상세 모델은 실 모형 구조물의 거동 특성을 충분히 모사할 수 있으며, 이로부터 본



(a) Time history



(b) Spectra

Fig. 9. Modal Test Results to Model Bridge

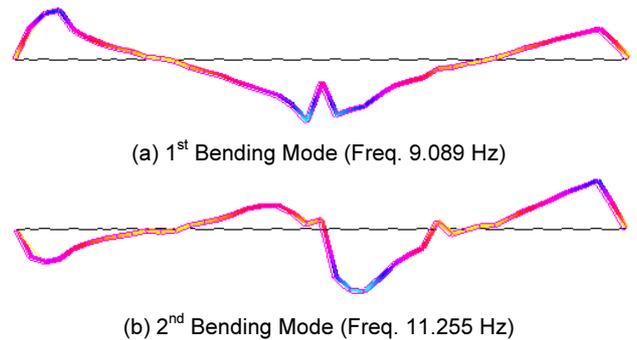


Fig. 10. Frequency and Mode Shape by Modal Test

Table 9. Comparison of Anal. and Exp. Frequency

Bending Mode	FE Anal. Results	Exp. Results	Error Ratio (%)
1 st Mode	9.171 Hz	9.089 Hz	0.912
2 nd Mode	11.254 Hz	11.255 Hz	0.011

논문에서 구성한 FE 모델의 타당성을 확인하였다.

5. 사장교 모델의 진동제어

5.1 Clipped-optimal 제어법칙 프로그래밍

본 논문에서는 Clipped-optimal 제어방법을 적용하여, 모형 교량을 대상으로 풍하중 성분의 랜덤하중 조건에서 발생된 진동을 실시간으로 제어

하고자하였다. Clipped-optimal 제어방법의 경우 최적제어기로부터 산정된 제어력은 현재상태의 구조물의 제어력과 비교하여 제어여부를 판단하는 중요한 지표로 제공되기 때문에, 구조물의 최적 진동제어를 위해 중요한 설계부분이며, 이때 가중행렬 (P) 및 (Q)의 결정이 요구된다. 이는 경험적으로 선택될 수 있으며, 본 논문에서는 대상 구조물에 대한 응답신호의 노이즈 영향은 상대적으로 미소한 것으로 가정하고, 두 행렬 모두 초기 단위행렬 (I)로부터 시행착오적으로 결정하였다. 최종적으로 Matlab Simulink를 이용해 구성된 Clipped-optimal 제어전략의 블럭선도는 Fig. 11과 같다.

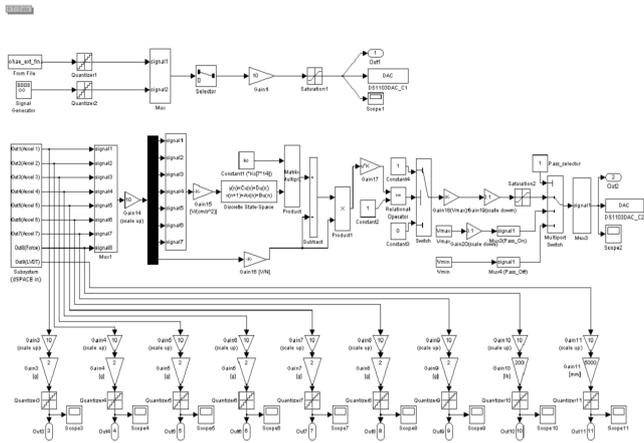
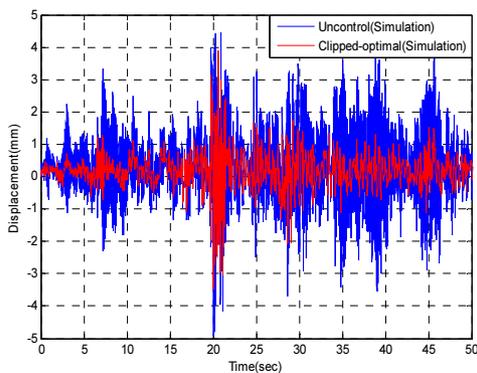
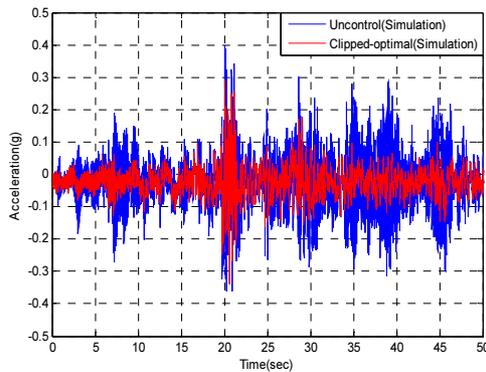


Fig. 11. Programming to Clipped-optimal Control



(a) Displacement



(b) Acceleration

Fig. 12. Simulate Results of Clipped-optimal Control

한편, 본 논문에서는 상기 구성된 제어법칙에 따른 제어효과를 사전 검토하기 위하여, 시뮬레이션을 통해 제어 전후의 진동제어 패턴을 검토하였다. 이때 MR 댐퍼는 Bingham 모델을 적용하였으며, 비제어 시 대비 Clipped-optimal 제어전략 시 제어응답을 Fig. 12와 같이 도식적으로 평가하였다. 이때 Clipped-optimal 제어법칙은 만족스러운 진동저감의 효과를 보였다.

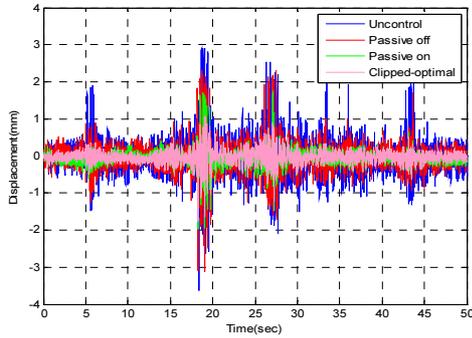
5.2 준능동 진동제어 실험

본 논문에서는 모형 사장교를 대상으로 실시간 진동제어실험을 위하여 구조물로부터의 구조적 응답을 실시간으로 획득하고, 또한 획득된 응답을 이용해 출력된 제어신호를 실시간으로 처리하기 위한 통합적인 진동제어 시스템을 Fig. 13과 같이 구성하였다. 이때, 응답획득을 위한 센서로는 가속도 센서(Dytran, 3134D), 변위 센서(Tokyo Sokki, CDP-50) 그리고 Force 센서(Dytran, 1051V5) 등을 활용하였다. 여기서 획득 가속도 데이터는 구조물의 상태 평가를 위한 기준 응답이고, 획득 변위 데이터는 제어장치가 설치된 위치의 가속도 데이터와 함께 제어효과를 판단하는 기준 응답이며, 획득 Force 데이터는 제어장치의 실시간 제어력을 측정하여 제어출력을 계산하기 위한 응답으로 활용하였다. 또한 제어실험을 위한 데이터 로거는 응답 데이터의 특성상 정동적 데이터로 구분되므로 이를 동시적으로 획득하기 위하여 정적로거(FYLDE, 379TA) 및 증폭기(Dytran, 4123B) 등의 상용 정동적 로거를 상호 결합하여 사용하였다. 그리고 가진기는 교량 좌측 경간 중앙점에 모달 가진기(Famech, EDS50-120)를 설치하여 일정한 크기의 진동을 구조물에 부여하였으며, 이때 가진파형은 실험실 여건을 고려하여 규모화된 실 사장교의 연직방향 랜덤 파형을 활용하였다. 마지막으로 이상의 상호 구분된 각각의 H/W는 사용자 환경인 PC와 서로 연결하기 위해 실시간 보장형 I/O보드인 dSPACE(CP1103)을 활용하였다.

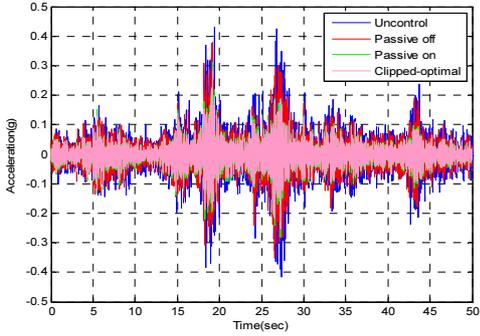
모형 교량의 상판 중앙지점에서 획득된 변위 응답과 가속도 응답에 대한 Clipped-optimal 제어의 결과는 Fig. 14에 나타났다. Fig. 14의 변위 응답 및 가속도 응답의 경우 비-제어 시 대비 수동-Off 제어, 수동-On 제어, Clipped-optimal 제어 순으로 제어효과가 향상되는 것을 알 수 있다. 또한 Clipped-optimal 제어 시 인가전압의 소모량 분포를 도식화 하여 Fig. 15에 나타났다. 여기서 보면, 전체 50초 동안의 진동제어 시 제어전압의 소모량이 크게 감소됨을 명확히 확인할 수 있다.



Fig. 13. Setup of Semi-active Vibration Control Test



(a) Displacement



(b) Acceleration

Fig. 14. Test Results of Clipped-optimal Control

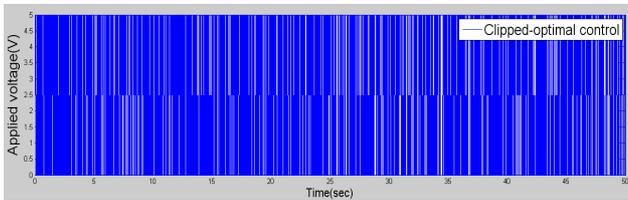


Fig. 15. Input Voltage of Clipped-optimal Control

6. 진동제어 성능평가

실험을 통한 진동제어 알고리즘 성능을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 진동의 순간 크기를 평가하기 위한 Peak 값, 관심 있는 시간(T) 동안의 에너지량을 평가하기 위한 RMS 값 그리고, 준능동 제어 시 인가전압의 소모율 등을 Table 7과 같이 선택하여 진동제어 효과를 평가하였다. 이때 본 논문에서는 총 5가지 실험조건 하에서 진동제어 실험을 수행하였고, 이때 각 실험 조건 별 응답의 크기를 상호 비교하여 진동제어 성능지수($J_1 \sim J_5$)를 산출하였으며, 최종적으로 각 실험조건 별 제어효과를 Table 10에 나타내었다.

6.1 절대최대변위 (J_1)

절대최대변위는 비-제어 시 약 3.64 mm, 수동-Off 제어 시 약 3.13 mm, 수동-On 제어 시 약 1.96 mm, 그리고 Clipped-optimal 제어 시 약 1.75 mm 로 나타났다. 이때 절대최대변위(J_1)는, 비-제어 시 기준 수동-Off 제어 시 약 86.05%, 수동-On 제어 시 약 54.06%, 그리고 Clipped-optimal 제어 시 약 48.29%로 나타났다. 제어효과를 보면 비-제어 시 기준 수동-Off

Table 10. Comparison of Control Test Results

Estimation Results Control Case	Response				
	Peak Disp. (mm)	RMS Disp. (mm)	Peak Accel. (g)	RMS Accel. (g)	Input Voltage (Sample)
Un-control	3.642	0.495	0.431	0.067	-
Passive-Off	3.134	0.387	0.378	0.055	-
Passive-On	1.969	0.232	0.311	0.037	5000
Clipped	1.759	0.181	0.281	0.035	2398

Estimation Results Control Case	Performance Index				
	J_1 (%)	J_2 (%)	J_3 (%)	J_4 (%)	J_5 (%)
Un-control	100	100	100	100	-
Passive-Off	86.05	78.11	87.68	83.18	-
Passive-On	54.06	46.93	72.24	56.39	100
Clipped	48.29	36.53	65.19	52.82	47.96

Estimation Results Control Case	Control Effect				
	Peak Disp. (%)	RMS Disp. (%)	Peak Accel. (%)	RMS Accel. (%)	Input Power (%)
Un-control	0	0	0	0	-
Passive-Off	13.95	21.89	12.32	16.82	-
Passive-On	45.94	53.07	27.76	43.61	0
Clipped	51.71	63.47	34.81	47.18	52.04

제어 시 약 13.95%, 수동-On 제어 시 약 45.94%, 그리고 Clipped-optimal 제어 시 약 51.71%의 진동크기에 대한 저감효과를 얻었다.

6.2 RMS변위 (J_2)

RMS변위는 비-제어 시 약 0.49 mm, 수동-Off 제어 시 약 0.38 mm, 수동-On 제어 시 약 0.23 mm, 그리고 Clipped-optimal 제어 시 약 0.18 mm 로 나타났다. 이때 RMS변위(J_2)는, 비-제어 시 기준 수동-Off 제어 시 약 78.11%, 수동-On 제어 시 약 46.93%, 그리고 Clipped-optimal 제어 시 약 36.53%로 나타났다. 제어효과를 보면 비-제어 시 기준 수동-Off 제어 시 약 21.89%, 수동-On 제어 시 약 53.07%, 그리고 Clipped-optimal 제어 시 약 63.47%의 진동크기에 대한 저감효과를 얻었다.

6.3 절대최대가속도 (J_3)

절대최대가속도는 비-제어 시 약 0.43g, 수동-Off 제어 시 약 0.37g, 수동-On 제어 시 약 0.31g, 그리고 Clipped-optimal 제어 시 약 0.28g 로 나타났다. 이때 절대최대가속도(J_3)는, 비-제어 시 기준 수동-Off 제어 시 약 87.68%, 수동-On 제어 시 약 72.24%, 그리고 Clipped-optimal 제어 시 약 65.19%로 나타났다. 제어효과를 보면 비-제어 시 기준 수동-Off 제어 시 약 12.32%, 수동-On 제어 시 약 27.76%, 그리고 Clipped-optimal 제어 시 약

34.81%의 진동크기에 대한 저감효과를 얻었다.

6.4 RMS가속도 (J_4)

RMS 가속도는 비-제어 시 약0.06 g, 수동-Off 제어 시 약0.05 g, 수동-On 제어 시 약0.03 g, 그리고 Clipped-optimal 제어 시 약0.03 g로 나타났다. 이때 RMS 가속도(J_4)는, 비-제어 시 기준 수동-Off 제어 시 약 83.18%, 수동-On 제어 시 약56.39%, 그리고 Clipped-optimal 제어 시 약 52.82%로 나타났다. 제어효과를 보면 비-제어 시 기준 수동-Off 제어 시 약 16.82%, 수동-On 제어 시 약43.61%, 그리고 Clipped-optimal 제어 시 약 47.18%의 진동크기에 대한 저감효과를 얻었다.

6.5 인가전압 소모량 (J_5)

본 논문에서 진동제어 성능지수로 평가된 인가전압 소모량(J_5)은 수동-On 제어 시의 인가전압 소모량 기준 각 준능동 제어방법 별 인가전압 소모량의 비로 산출하였다. Table 10에서 각 준능동 제어방법 별 소모된 인가전압의 샘플(Samples) 수는 Clipped-optimal 제어의 경우 2398 개로 나타났다. 이를 인가전압 소모량(J_5)으로 나타내면, 수동-On 제어 시 기준 Clipped-optimal 제어의 경우 47.96%로 나타났다. 제어효과를 보면, 수동-On 제어 시 기준 Clipped-optimal 제어의 경우 52.04%로 나타났다. 이상의 결과로부터, 본 논문에서 고려한 Clipped-optimal 제어 시 응답 저감 성능과 비교했을 때, 비-제어 및 수동-Off 제어 시 보다 상대적으로 근소한 차이를 보였지만, 이 경우 진동제어를 위해 요구된 출력신호의 샘플 수가 수동-On 제어 시와 비교하여 Clipped-optimal 제어 시 52.04%로 각각 감소된 것으로 평가되었다.

7. 결론

- 1) 제어 대상 구조물에 발생된 진동을 준능동적으로 제어하기 위해 관심 위치의 최대 발생 외력의 크기 대비 약 1/10 내-외의 제어력을 발휘할 수 있는 전단형 MR 댐퍼를 사용한 결과, 발생 진동을 일부 허용하면서도 만족할 만한 진동제어의 성능을 보였으며, Bingham 모델은 전단형 MR 댐퍼의 거동을 선형적으로 모사하는데 효과적인 동적모델로 평가되었다.
- 2) 제어 대상 구조물에 발생된 연직방향 랜덤진동에 대하여 비-제어 상태 기준으로 진동제어의 효과를 볼 때, 수동 On 및 Off 제어상태 보다 Clipped-optimal 제어 시 발생 변위 및 가속도를 감소시키는데 효과적이며, 수동-On 제어상태와 비교하여 인가전압의 소모량을 약 50% 정도로 감소시킬 수 있어 수동 제어방법보다 경제적·효율적 측면에서 우수하였다.
- 3) 종국적으로, 전단형 MR 댐퍼 및 Clipped-optimal 제어알고리즘을 이용한 진동제어방법이 구조물의 상태응답을 바탕으로 실시간 준능동 진동제어에 효과적으로 적용될 수 있는 가능성을 보였으며, 또한 본 논문의 실험결과를 통해 교량의 실시간 준능동 진동제어에 관한 실험적 연구의 기초자료를 제공하였다. 아울러, 향후 추가적으로 최적의 준능동

진동제어기술을 구현하기 위해서는 제어기의 적정용량 선정, 제어의 설치 위치 및 방향 선정, 그리고 제어방법들의 비교·평가가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

/ 감사의 글 /

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부, 미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2013 R1A2A1A01016192, No. NRF-2013R1A1A1063540).

/ REFERENCES /

1. Carlson JD, Spencer JrBF. Magneto-rheological Fluid Dampers for Semi-active Seismic Control, Proc, 3rd International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, Japan, c1996;3:5-40.
2. Datta TK. A State-of-Art Review on Active Control of Structures, ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No.430, 2003;40(1):1-17.
3. Dyke SJ, Spencer JrBF, Sain MK, Carlson JD. An Experimental Study of MR Dampers for Seismic Protection, Smart Materials and Structures: Special Issue on Large Civil Structures, 1998;7:693-703.
4. Dyke SJ, Caicedo JM, Bergman LA, Turan G (2001). Introducing a Benchmark control Problem for a Cable-stayed bridge subjected to seismic excitation, Earthquake Engineering; Earthquake Engineering Frontiers in the New Millennium, c2001, pp.287-292.
5. Ewins D J. Modal Testing: Theory, Practice and Application, R,S,P, c2000.
6. Fujino Y. Vibration Control and Monitoring of Long-Span Bridge-Recent Research, Developments and Practice in Japan. Journal of the Constructional Steel Research, 2002;58:71-97.
7. Gavin HP, Hanson RD, Filisko FE, Electrorheological Dampers I: Analysis and Design, Journal of Applied Mechanics, 1996;63(3):669- 675.
8. Gavin HP, Hanson RD, Filisko FE, Electrorheological Dampers II: Testing and Modeling. Journal of Applied Mechanics, 1996;63(3):676- 682.
9. Gu M, Du XQ, Li SY. Experimental and theoretical simulations on wind-rain induced vibration of 3-D rigid stay cables. Journal of Sound and Vibration, 2006;320(1/2):184-200.
10. Hwang JS. Vibration Control System for Serviceability Enhancement of a Structure. Journal of the Architectural institute of Korea, 2004;48(7): 56-61.
11. Heo G, Jeon J. Application of Unified Lyapunov Control Algorithm and Mathematical Demonstration for Structural Control. KSCE Journal of Civil Engineering, 2011;15(3):479-486.
12. Heo GH, Jeon JR. Performance Estimation of Semi-active Real-time Feedback Vibration Control System, Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2010;15(1):85-94.
13. Jansen LM, Dyke SJ. Semi-Active Control Strategies for the MR Damper: A Comparative Study. Journal of Engineering Mechanics (ASCE). 2000;126(8):795-803.
14. Jang DD, Jung HJ, Moon SJ. Performance Evaluation of the New Smart Passive Control Device using Shaking Table Test, Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, 2010;23(1): 27-35.
15. Jung HJ, Jang JE, Jeong W, Lee IW. An Experimental Study on Smart

- Damping System for Suppressing of Stay Cable, *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, 2006;10(2):175-181.
16. Kim HJ, Application of Wind-induced Vibration Control Devices in Korea, *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, 2011;15(3):49-55.
 17. Lee DG, Kim TH, Application of Seismic Isolation and Vibration Control in Korea, *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, 2006;10(6):67-77.
 18. Moon SJ, Kim BH, Jeong JA, An Experimental Study on the Structural Vibration Control Using Semi-Active Orificed Fluid Dampers, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2004;8(2):55-62.
 19. Park JK, Kim BS, Jung WS, Kim EB, Lee DG, Change in Statistical Characteristics of Typhoon Affecting the Korean Peninsula, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 2006;16(1):pp.1-17.
 20. Spencer JrBF, 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, c1996.
 21. Soong TT, *Active Structural Control Theory and Practice*, Longman Science & Technical, c1990.
 22. Spencer JrBF, Dyke SJ, Sain MK, Carlson JD, Phenomenological Model of a Magneto rheological Damper, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1997;123:3:230-238.
 23. Sodeyama H, Sunakoda K, Fujitani H, Sode H, Iwata N, Dynamic Test and Simulation of Magneto-Rheological Damper, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2003;18:45-57.
 24. Sodeyama H, Suzuki K, Sunakoda K, Development of Large Capacity Semi-Active Seismic Damper Using Magneto-Rheological Fluid, *Journal of Vessel Technology*, ASME, 2004;126:105-109.
 25. Savor Z, Radic J, Herlja G, Cable Vibration at Dubrovnik Bridge, *Bridge Structures*, 2006;2(2):97-106.
 26. Yao JTP, Concept of Structural Control, *ASCE Journal of Structural Division* 1972;98:1567-1574.
 27. Youn KJ, Park EC, Lee HJ, Moon SJ, Min KW, Jung HJ, Lee SH, Performance Evaluation of Decentralized Control Algorithm of a Full-scale 5-story Structure Installed with Semi-active MR Damper Excited by Seismic Load, *Transactions of the Korean Society for Noise Vibration Engineering*, 2008;18(2):255-262.
 28. Load[Internet], Available from: <http://www.lord.com/tabid/3317/Default.aspx>