

구조물의 진동제어를 위한 MR-damper의 최적 제어력 산정

Calculating a MR Damper's Optimal Capacity for a Control of Structural Vibration

허광희¹⁾ · 전승곤^{2)*} · 김충길²⁾ · 전준용¹⁾ · 이진욱²⁾ · 서상구³⁾

Heo, Gwanghee¹⁾ · Jeon, Seunggon^{2)*} · Kim, Chunggil²⁾ · Jeon, Joonryong¹⁾ · Lee, Chinok²⁾ · Seo, Sanggu³⁾

¹⁾건양대학교 해외건설플랜트학과, ²⁾충남대학교 토목공학과, ³⁾충남도립대학교 건설정보과

¹⁾Department of International Civil & Plant Engineering, Konyang University, ²⁾Department of Civil Engineering, Chungnam National University,

³⁾Department of Construction and Informatics, Chungnam State University

/ A B S T R A C T /

In the case where a MR-damper is employed for vibration control, it is important to decide on how much control capacity should be assigned to it against structural capacities (strength and load, etc). This paper aims to present a MR-damper's control capacity suitable for the capacities of the structure which needs to be controlled. First, a two span bridge was built equipped with a MR-damper, which constitutes a two-span MR-damper control system. Then, inflicting an earthquake load on the system, a basic experiment was performed for vibration control, and a simulation was also carried out reflecting specific control conditions such as MR-damper and rubber bearing. The comparison of the results against each other proved their validity. Then, in order to calculate an optimal control capacity of the MR-damper, structural capacity was divided into eleven cases in total and simulated. For each case, an additional load of 30 KN was inflicted everytime, thereby increasingly strengthening structural capacity. As a result of the study, it was found that the control capacity of MR-damper of 30 KN was safely secured only with lumped mass of more than 150 KN(case 6). Therefore, it is concluded the MR-damper showed the best performance of control when it exerted its capacity at around 20% of structural capacity.

Key words: MR-damper, Rubber Bearing, Simulation, Two-Span Bridge, Vibration Control

1. 서론

다양한 외부 하중으로부터 교량구조물에 설계하중 이상으로 발생하는 과도한 진동을 제어하기 위하여 많은 연구자들은 MR-damper를 활용한 연구를 진행하고 있다. MR-damper는 Passive 성능과 Active 성능을 동시에 갖고 있는 Semi-active Damper이며, 1990년대 들어 Carlson et al.(1996) 등이 건설 구조물에 도입한 이후 많은 연구자들은 다양한 방법을 적용하여 연구를 진행하고 있다. MR-damper를 구조물에 적용하기 위하여 진행된 대표적인 연구로는, Spancer et al.(1997), Dyke et al.(1998), Heo and Jeon(2013) 등이 R-damper에 적합한 모델을 개발하기 위하여 동하중실험을 수행하였다. 그 후 Iwata et al.(2002), Heo et al.(2013) 등은 개발된

MR-damper를 적용한 진동 및 이상거동을 제어하기 위하여 단순 base-isolated specimen 및 20ton 질량의 3층 스틸 구조물을 대상으로 실험을 수행하였고, Renzi et al.(2004) 등은 큰 규모의 4층 강철 빌딩 모형을 대상으로 MR-damper의 성능을 평가하였다. Sodeyama et al.(2003, 2004)는 기존의 MR-damper에서 확인된 자기장 형성에 따른 실린더의 고열 발생문제를 해결하기 위하여 전자석을 메인 실린더와 분리한 Bypass 형태의 MR-damper를 개발하였다. 또한 Anxin Guo et al.(2009) 등은 2개의 MR-damper를 Rubber bearing이 설치된 각 span과 교각에 연결하여 충격을 방지하고자 하는 연구를 진행하였다. J. M. Caicedo et al.(2003)은 MR-damper의 개발 및 기계적 혹은 단순한 모형실험을 통한 성능분석, 제어 알고리즘 개발 등과 같은 MR-damper의 자체적인 성능을 향상시키기 위한 연구를 진행해 왔다. 하지만 기존의 연구는 개발된 MR-damper의 성능을 분석하기 위하여 다양한 모델을 개발하는 등 제어성능에 관한 연구가 대부분이었다. 실제 구조물에 MR-damper가 적용되었을 때 구조물의 강성이나 질량에 따라 어느 정도 변화하는지 또는 어느 정도의 제어력을 갖는 때

*Corresponding author: Jeon, Seunggon

E-mail: gonylife@hanmail.net

(Received November 24, 2015; Revised February 26, 2016; Accepted March 11, 2016)

피가 적정한지에 대한 분석 및 평가를 진행한 연구는 미미한 실정이다. MR 유체를 사용하는 MR-damper는 기본적으로 Passive 성분을 보유하고 있기 때문에 구조물의 거동 에너지보다 MR-damper의 용량이 지나치게 크면 Active 성능이 급감하게 되어 MR-damper 본래의 성능을 제대로 발휘할 수 없다. 또한, 구조물의 성능과 구속조건을 고려하지 않은 상태에서 상대적으로 구조물의 성능(관성력, 댐핑력, 강성력 등)보다 용량이 큰 MR-damper를 부착할 경우 구조물의 거동에 영향을 줄 수 있으며, 이러한 영향은 오히려 구조물의 거동을 증폭시켜 구조물에 피해를 줄 수 있다. 따라서 구조물의 성능에 따른 MR-damper의 최적 제어력을 산정하여 제시하고자 한다. 최적제어력을 산정하기 위해서 2-Span 거동제어모사시스템을 개발하고 simulation을 통하여 성능을 검증하고, 이 모델을 이용하여 MR-damper의 제어력을 계산하였다.

2. 제어 시스템

2.1 2-Span MR-damper 제어 시스템

MR-damper의 제어 성능을 검토하기 위해서 Fig. 1과 같은 구조물제어 시스템을 선정하였다. 이 제어시스템은 일정한 질량을 갖는 두 개의 교량 상판을 MR-damper로 연결하여 진동을 제어하도록 되어있다. 이 시스템을 2-Span 거동제어모사시스템이라고 하고, Fig. 1의 왼쪽 상판을 Span A, 오른쪽 상판을 Span B라고 명명하였다. 2-Span 단순보 교량은 각 span과 상부 지지대와 하부지지대 사이에 각 Span을 지지하는 Rubber Bearing으로 설계하였다. 이 교량의 Span A는 2300 mm의 길이와 질량이 1476 kg이고 Span B는 길이 6000 mm, 질량 3492 kg의 단순교량으로 설계하고 제작하였다.

이 교량의 상부 구조는 I형강 거더를 횡방향으로 배치하고, 철근콘크리트 상부슬래브를 제작하여 완성하였다. 2-Span 거동제어모사시스템을 수학적인 모델링을 위하여 2계도 시스템으로 단순화 하면 Fig. 1(b)와 같이 나타낼 수 있다.

이 시스템에 연결된 MR-damper와 Rubber Bearing(RB)을 포함하여 나타내면 Fig. 2와 같다. 또한, 이 시스템의 일반적인 운동방정식은 식 (1)

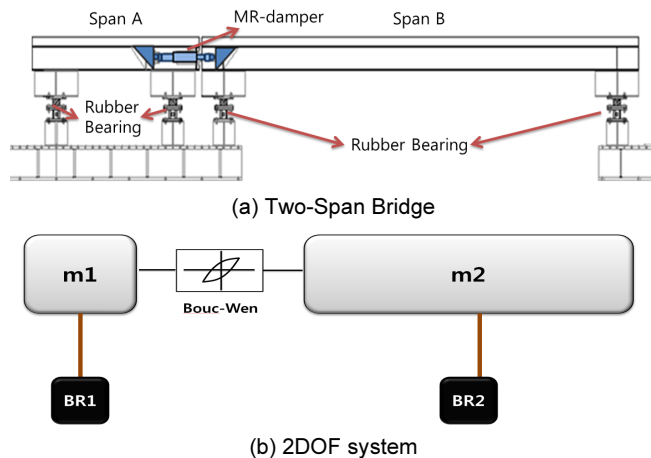


Fig. 1. Two-Span MR-damper Control Systems

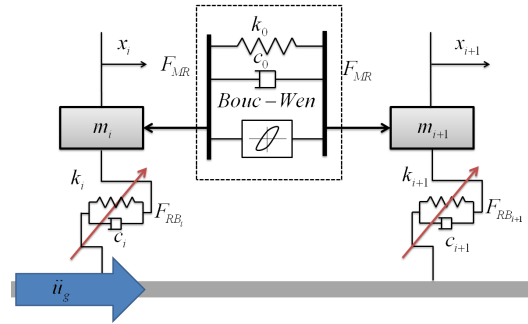


Fig. 2. Definition of Two-Span MR Control Systems

과 같이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} m_i & 0 \\ 0 & m_{i+1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{x}_{i+1} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{RBj} \\ F_{RBj+1} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{MR} \\ -F_{MR} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m_i & 0 \\ 0 & m_{i+1} \end{bmatrix} \ddot{u}_g \quad (1)$$

여기서, m 은 구조물의 질량이고 F_{RB} 는 구조물의 상부와 하부 구조물 사이에 위치하는 RB의 제어력을 나타내며, F_{MR} 은 두 개의 Span사이에 연결된 MR-damper의 제어력이다. \ddot{x} 와 \ddot{u}_g 는 구조물의 가속도와 지반의 가속도를 각각 나타낸다.

2.2 Rubber Bearing의 제어력

이 교량에 Span A와 B에 각각 4개의 RB를 설치하였다. Span A에 설치된 RB의 강성은 10 kN이고 Span B에 설치된 RB의 강성은 20 kN을 사용하였다. 2-Span 교량에 설치된 Rubber Bearing의 횡방향 강성을 결정하기 위하여 El-centro 100% 하중으로 진동대를 가진하였으며, 교량 하부에 설치된 Loadcell을 통하여 데이터를 획득하고, 획득된 데이터를 이용하여 RB의 이력모델변수 추출 및 RB모델을 검증하였다. RB의 제어력은 비선형 이력변수에 영향을 받으므로, 이러한 이력변위를 반영할 수 있는 Bouc-wen 이론을 이용하여 RB를 모델링하였다.

비선형거동을 하는 RB의 제어력은 RB의 강성과 감쇠력에 의해 좌우가 되는데, 이들은 이력변위 z 에 의해서 결정된다. 이력변위 z 는 식 (2)와 같다(Sapiński. and Filuś 2003).

$$\dot{z} = A\dot{x} - \beta|\dot{x}|z|z|^{n-1} - \gamma\dot{x}|z|^n \quad (2)$$

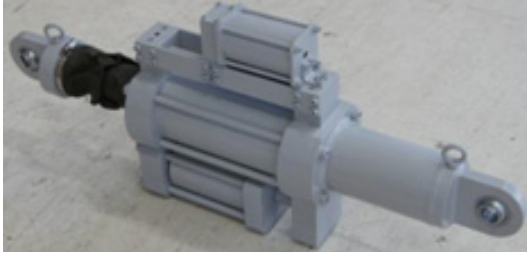
여기서, \dot{x} 는 상부구조물에 발생하는 속도를 나타내며 A, γ, β, n 은 보정변수(fitting parameters)이다. 식 (2)로부터 계산된 이력변위를 적용하면 식 (3)과 같이 RB의 제어력을 계산할 수 있다.

$$F_{RB} = k(ax + 1(1-a)Z_{RB}) \quad (3)$$

여기서, a 는 항복후의 강성계수이며, $a \leq 1$ 이다. 획득한 데이터를 이용하여 식 (2)와 (3)의 변수를 추출하였으며, 추출된 변수는 Table 1과 같다.

Table 1. Bouc-wen parameters of Rubber Bearing

SPAN Parameters	A	B
A	0.751	2.209
γ	0.800	0.992
β	0.200	0.008
n	1.000	1.000
k (N/mm)	2401.899	960.017
a	0.589	0.708

**Fig. 3.** 30 kN MR-damper

2.3 MR-damper의 제어력

MR-damper의 제어 성능을 평가하기 위해서 30 kN의 Bypass형 MR-damper를 Fig. 3과 같이 설계하고 제작하였다.

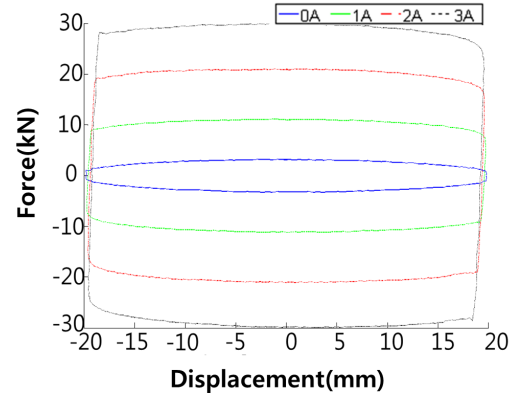
이 MR-damper는 전체 길이 777 mm, 목표 제어력은 1A의 인가전류에 10 kN씩 증가하도록 하여 최대 인가전류, 3A에서 30kN의 제어력을 발휘하도록 하였다. 실험에 사용되는 구조물의 최대 거동범위를 고려하여 MR-damper 피스톤의 최대 이동 범위는 140 mm(± 70 mm)로 설계하였다. MR-damper의 제어력에 큰 역할을 하는 자기관의 외부덮개와 전자석 사이의 간격은 1.0 mm로 설계하였으며, 독일 BASF사의 MR 유체를 사용하였다.

MR-damper의 성능 확인 및 모델 규명을 위한 기계적 성능 실험은 한국철도기술연구원의 스프링 시험기를 이용하였다. 성능 실험 조건은 sin파 0.4 Hz, 변위 ± 20 mm, 속도 40 mm/s의 조건에서 0~3A의 전류를 인가하여 진행하였다. 위와 같은 조건으로 성능실험을 진행한 이유는 MR-damper가 작동할 수 있는 최대 속도가 60 mm/s이므로 안정성을 고려하여 최대속도의 2/3인 40 mm/s로 실험을 진행하였다. 전류의 공급은 0~3 Ampere의 전류 공급이 가능한 Kikusui 사의 PMC18-3A를 사용하였다. 기계적 성능실험 결과, 대표적인 힘-변위응답 곡선그래프는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4 에서 보는 바와 같이 기계적 성능 실험 결과, 발생된 최대 제어력은 0A 상태에서 3.254 kN, 1A 상태에서 11.17 kN, 2A 상태에서 21.07 kN, 3A 상태에서 29.95 kN을 나타내었다. 실험데이터를 활용한 MR-damper의 모델링을 위한 Bouc-wen 모델은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$F_{MR} = a_x \dot{x}_{MR} + a_z x_{MR} \quad (4)$$

여기서, \dot{x}_{MR} 과 x_{MR} 은 MR-damper의 속도와 이력변위이고, a_x 와 a_z 는 식

**Fig. 4.** Force-Displacement Hysteresis($v=40$ mm/s)**Table 2.** Bouc-wen parameters of MR-damper

a_{x1} (N.sec/mm.A)	126.800
a_{x0} (N.sec/mm)	64.700
a_{z1} (N/mm.A)	455.700
a_{z0} (N/mm)	12.000
i_{max} (A)	3.000
A_{mr}	5.585
γ_{mr}	0.193
β_{mr}	0.807
n	1.000

(5)와 같이 정의 되는 감쇠와 이력 파라메타이다.

$$\begin{aligned} a_x &= a_{x1}I + a_{x0} \\ a_z &= a_{z1}I + a_{z0} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, a_{x1} 과 a_{z1} 은 MR-damper에 인가되는 전류 I 에 의하여 발생하는 능동제어력의 능동 감쇠상수이고, a_{x0} 과 a_{z0} 은 MR-damper의 기계적 성능에 의하여 발생하는 수동제어력의 수동 감쇠상수이다. 식 (4)의 MR-damper의 모델은 비선형이력의 영향을 받으며, 비선형이력은 식 (2)를 이용하여 계산된다.(Sapiński. and Filuś 2003). MR-damper의 성능 실험을 통하여 획득한 데이터를 이용하여 식 (2)와 (4)의 변수를 추출하였으며, 추출된 변수는 Table 2와 같다.

2.4 수학적 모델링의 적정성 검토

실험에 사용할 2-Span 거동제어모사시스템의 수학적 모델링의 적정성 검토를 통한 simulation의 신뢰성을 높이기 위하여 실제 2-Span 거동제어모사시스템의 진동제어 시험과 simulation의 결과를 Fig. 5와 같이 상호 비교하였다. 실험은 El-centro 100% 지진하중을 사용하여 Shaking Table 실험(부산대 지진센터)을 진행하였다. 구조물의 변위와 상대변위를 그래프 상으로 비교하였다.

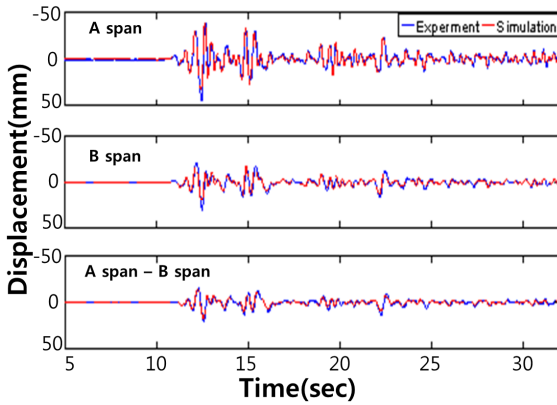


Fig. 5. Verification of simulation model

Fig. 5에서 보는 바와 같이 2-Span 거동제어모사시스템의 각 구성 요소 인 RB와 MR-damper의 모델을 적용한 simulation의 결과가 실험 결과와 매우 일치하는 것을 보여주고 있다. 따라서 RB와 MR-damper의 모델을 포함한 2-Span 거동제어모사시스템의 수학적 모델링이 적절함을 검증하였다.

3. MR-damper의 최적 제어성능

3.1 MR-damper의 제어조건

본 논문의 주요 목적 중의 하나가 구조물의 내력에 비례하여 어느 정도 용량의 MR-damper를 사용할 때 적절한 제어가 이루어지는가를 평가하기 위한 연구이다. 따라서 이와 같은 조건을 MR-damper의 최적 제어조건이라 정의하고, 모형구조물의 내력(관성력, 댐핑력, 강성력 등) 조건을 질량항목으로 제시하고 구조물의 질량 증가에 따른 MR-damper의 제어력을 계속하여 성능을 평가 하였다. 제어장치의 위치는 각 span에 발생하는 변위를 동시에 제어할 수 있는 span과 span 사이에 MR-damper를 설치하여 각 스패의 질량을 구조물의 관성력과 댐핑력과의 관계를 갖도록 하였다.

MR-damper의 최적 제어조건을 평가를 위해서 MR-damper가 부착된 Fig. 1의 2-Span 거동제어모사시스템을 이용하여 구조물제어시스템 모델을 개발하였다. 개발된 simulation 모델에 짧은 Span A에는 10 kN 씩, Span B에는 20 kN 씩 추가하여 A, B Span의 제어하중의 합이 최대 300 kN까지 증가하여 simulation을 수행하였다. Table 3에 제어하중의 case를 11가지로 구분하였다. 일반적으로 제어장치의 제어력을 산정할 때에는 제어하는 구조물의 저항력(강성과 질량이 포함)의 10-20%내외의 제어력을 발휘하는 제어장치를 사용하도록 권고하는 문헌에 따라 최대 적재 하중을 300 kN까지 수행하였다(Geoffrey W. Rodgers 2008). 각 case별로 El-centro 100%의 지진하중을 MR-damper에 0A를 인가한 Passive OFF 상태와 3A를 인가한 Passive ON상태로 분류하여 진행하였다.

2-Span 거동제어모사시스템에 재하 되는 하중변화에 따라 case별로 MR-damper의 최적제어 성능을 확인하기 위하여 simulation을 통하여 각 Span의 최대 거동 범위와 Span과 Span 간의 상대 거동 범위, 그리고 MR-damper의 제어력과 RB의 제어력으로 분류하여 정밀하게 분석하였

Table 3. Test cases

		Unit : kN										
case		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Span A		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Span B		0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Total		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300

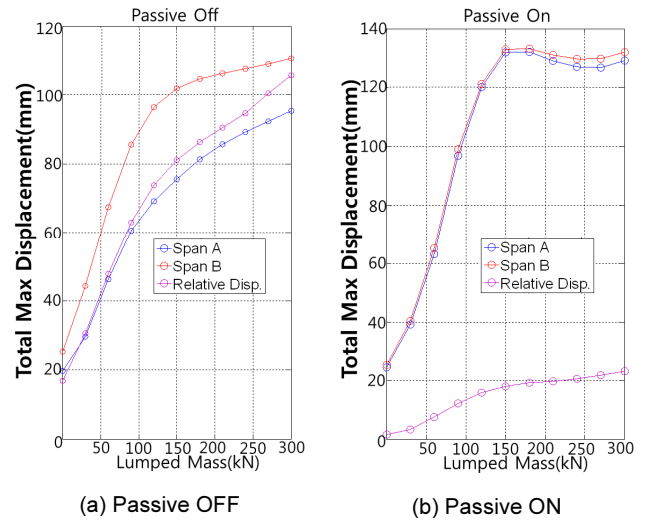


Fig. 6. Analysis of simulation result : Maximum Displacement

다. 또한, 분석한 데이터를 근거로 제어구조시스템에 적합한 MR-damper의 최적 제어 성능을 제시하였다.

3.2 최적 제어 거동 범위

각 Span의 최대 거동범위와 Span과 Span 간의 상대 거동 범위를 Fig. 6과 같이 거동 제어 simulation을 수행하여 결과를 도출하였다. 여기서, 최대 거동 범위는 획득된 변위 데이터의 좌측거동 변위와 우측거동변위의 최댓값을 의미하며, 상대 거동 범위는 각 Span A와 Span B의 거동범위의 상대적인 차를 의미한다. 실험 결과를 분석한 거동 범위는 좌우측 거동의 최대 변위를 절댓값으로 합하여 Fig. 6의 그래프와 같이 (a) Passive off 상태, (b) Passive on 상태로 나타내었다.

Fig. 6의 그래프를 정량적인 분석을 위하여 Table 4와 Table 5에 정확한 수치를 기록하였다.

Fig. 6(a)와 Table 4의 Passive OFF상태에서 확인 할 수 있는 바와같이, Span A와 B의 최대 거동 범위와 그에 따른 상대 거동 범위가 case 1~6까지는 재하하중이 추가됨에 따라 선형에 가깝게 증가 추이를 보이지만, case 6 (총 재하하중 150 kN) 이후로는 비선형을 나타내면서 재하 하중이 증가하여도 최대 거동범위와 상대 거동범위의 수치는 크게 증가되지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 6(b)와 Table 5의 Passive ON상태 역시 case 1~6까지는 최대 거동 범위의 증가량이 선형에 가까운 그래프를 그렸으나, case 6 이후에는 비선형성이 뚜렷하게 나타내면서 Passive OFF와 같이 최대 거동범위와 상대거동범위의 증가량이 감소하였다. 이는 재하하중(구조물의 저항력)이 적을 경우 Span과 Span 사이에 부착된 MR-damper의 Passive

Table 4. Maximum Behavior of span(Passive OFF)

case	Span A(mm)		Span B(mm)		Relative(mm)	
	max (R)	max (L)	max (R)	max (L)	max (R)	max (L)
1	11.07	-8.69	10.63	-14.62	7.10	-9.83
2	16.88	-12.73	19.06	-25.28	13.21	-17.38
3	23.47	-22.79	28.16	-39.21	20.29	-27.53
4	27.43	-33.06	35.31	-50.32	26.36	-36.64
5	27.89	-41.26	40.04	-56.42	30.81	-43.02
6	28.69	-46.89	43.01	-58.94	33.89	-47.20
7	30.65	-50.68	45.04	-59.63	36.13	-50.16
8	32.27	-53.41	46.71	-59.58	37.95	-52.56
9	33.71	-55.56	48.34	-59.30	39.89	-54.78
10	35.05	-57.30	50.06	-58.97	43.51	-56.96
11	36.77	-58.69	51.87	-58.71	46.66	-59.05

the left : L, the right : R

Table 5. Maximum Behavior of span(Passive ON)

case	Span A(mm)		Span B(mm)		Relative(mm)	
	max (R)	max (L)	max (R)	max (L)	max (R)	max (L)
1	12.23	-12.40	12.69	-12.72	0.88	-0.78
2	19.97	-19.20	21.09	-19.39	1.93	-1.45
3	32.46	-30.73	33.58	-31.73	3.97	-3.69
4	46.82	-50.03	46.43	-52.62	5.57	-6.70
5	53.72	-66.42	52.15	-69.08	6.76	-9.20
6	59.03	-72.95	57.71	-75.31	7.64	-10.50
7	59.87	-72.27	58.78	-74.37	8.40	-10.92
8	60.27	-68.76	60.30	-70.77	8.75	-11.04
9	61.67	-65.40	62.27	-67.47	9.38	-11.29
10	63.59	-63.16	64.43	-65.37	10.17	-11.70
11	65.66	-63.53	66.54	-65.44	11.04	-12.25

the left : L, the right : R

성격으로 인하여 정상적인 피스톤 운동을 시키지 못하게 된다. 따라서 Span 이 각자의 자유거동을 보이지 못하고 마치 하나의 Span과 같이 일체거동을 보이게 되면서 재하하중이 증가함에 따라 거동 범위가 증가하는 것이다. 그렇지만 case 6 이상부터는 더 이상 거동범위가 큰 폭으로 증가하지 않음을 알 수 있다. 이는 각각의 Span에 재하된 하중이 증가하면서 일체거동을 하게 한 MR-damper의 Passive 성격을 넘어서는 재하하중이 작용함으로 피스톤운동이 정상적으로 이루어지면서 각자의 거동을 하게 된다. 결국, case 6 이후부터는 MR-damper의 제어 성능에 의해 거동을 함으로써 재하하중에 따른 큰 폭의 거동증가는 발생하지 않는 것이다.

3.3 MR-damper의 제어력과 RB의 제어력

2-Span 거동제어모사시스템에 재하 하중 점차 증가시켜 MR-damper와 RB의 제어력을 확인하기 위하여 Fig.7과 같이 simulation 결과를 제어력 대비 하중의 그래프로 나타내었다. 또한, 정량적인 분석을 위하여 Table 6, 7, 8에 각각 MR-damper와 RB의 제어력을 수치로 표기하였다.

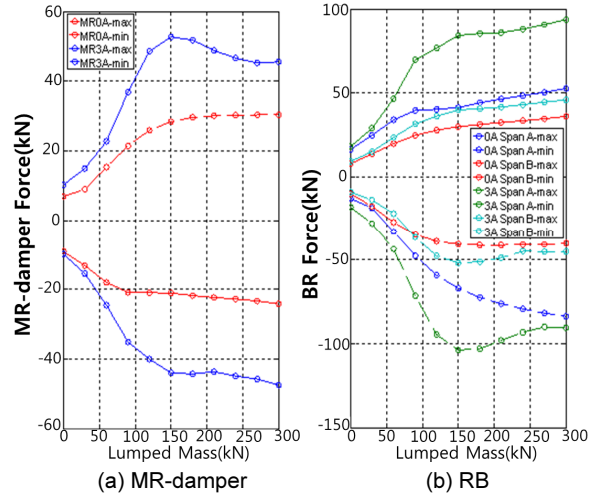


Fig. 7. Analysis of simulation result : maximum control force of MR-damper and RB

Table 6. Maximum control force of MR-damper

case	Unit : kN			
	MR-damper 0A		MR-damper 3A	
	max (compression)	max (tension)	max (compression)	max (tension)
1	6.91	-9.11	10.24	-9.96
2	9.00	-13.24	14.91	-15.48
3	15.34	-18.01	22.69	-24.61
4	21.44	-20.88	36.90	-35.17
5	25.93	-21.01	48.58	-40.10
6	28.38	-21.11	52.71	-44.04
7	29.58	-21.81	51.81	-44.33
8	30.10	-22.37	48.81	-43.65
9	30.24	-22.80	46.58	-44.92
10	30.29	-23.33	45.23	-45.79
11	30.31	-24.19	45.55	-47.53

※ 본 실험에 사용된 MR-damper의 최대제어력은 30 kN인데 0A에서 case 8부터 11까지, 3A에서 case 4부터 11까지 최대제어력 이상을 보이는 것은 simulation을 통한 결과임으로 가상제어력을 산정하여 보여준 결과이다.

Table 7. Maximum control force of RB(0A)

case	Unit : kN			
	Span A(0A)		Span B(0A)	
	max (compression)	max (tension)	max (compression)	max (tension)
1	16.40	-13.03	7.85	-10.06
2	24.63	-18.76	13.58	-17.80
3	33.95	-32.99	19.77	-27.28
4	39.56	-47.51	24.63	-34.83
5	40.20	-59.20	27.84	-38.98
6	41.33	-67.08	29.86	-40.69
7	44.10	-72.44	31.24	-41.16
8	46.40	-76.31	32.38	-41.13
9	48.44	-79.35	33.49	-40.94
10	50.33	-81.80	34.65	-40.71
11	52.76	-83.78	35.89	-40.05

Table 8. Maximum control force of RB(3A)

Unit : kN

case	Span A(3A)		Span B(3A)	
	max (compression)	max (tension)	max (compression)	max (tension)
1	18.05	-18.28	9.25	-9.26
2	28.99	-27.90	14.96	-13.80
3	46.67	-43.46	23.45	-22.19
4	69.70	-71.53	31.51	-36.39
5	76.74	-94.72	36.07	-47.59
6	84.25	-103.95	39.86	-51.82
7	85.45	-102.99	40.59	-51.18
8	86.01	-98.03	41.62	-48.73
9	88.00	-93.27	42.96	-44.92
10	90.71	-90.11	44.42	-45.07
11	93.64	-90.62	45.86	-45.11

Fig. 7(a)와 Table 6을 보면 MR-damper의 Passive ON상태와 Passive OFF상태 모두 좌/우측 최대 거동범위 발생 지점에서 최대 압축제어력과 최대 인장제어력이 발생된다. 이는 Span의 거동범위에 따라 MR-damper의 제어력에 영향을 주기 때문이다. 최소 거동범위에서 최소 제어력을 발휘하는 것은 거동범위가 짧게 되면 제어력이 충분히 발휘되기 전에 Span은 역방향으로 거동함으로써 MR-damper의 제어력 역시 역방향으로 바뀌기 때문에 원래의 방향으로 작용하고 있던 제어력은 소산되게 된다. 결국, 거동범위의 길어지면 길어질수록 MR-damper에서 발생할 수 있는 제어력까지는 계속적으로 커지게 된다. 전체적으로 제어력을 분석해 보면, 최대 압축제어력과 최대 인장제어력의 경우, Passive OFF 상태에서는 case 6 이후에는 case 1~6까지 제어력의 증가추세와 비교해 볼 때 현저히 낮은 증가폭을 보임을 확인할 수 있다. 또한, Passive ON 상태의 경우에는 case 6 이후에는 더 이상의 증가 없이 제어력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 MR-damper의 최대 제어력을 보이는 조건이 case 6이므로 최소한 case 6 이상의 재하하중이 가중되어야 MR-damper의 최대 제어력을 나타내는 것으로 확인하였다. 결과적으로 case 6의 상태, 즉, 150 kN 이상의 재하하중(구조물저항력)이 작용하여야 30 kN MR-damper의 최적 제어력을 발휘하는 것으로 판단된다. 따라서 구조물에 부착하여 사용되는 MR-damper의 제어용량 산정 시 구조물의 저항력 대비 20%의 제어용량을 갖는 MR-damper를 사용하여야 할 것이다.

구조물의 재하하중 변화에 따른 MR-damper의 거동 특성 분석을 위한 simulation에서 MR-damper 이외에도 RB의 영향이 구조물의 거동을 지배하는 중요한 요인으로 작용한다. 그에 따라 질량변화에 따른 RB의 제어력 변화도 확인하였다. Fig. 7(b)는 simulation 조건에 따른 Span A와 B 하부의 RB의 제어력을 그래프로 표현한 것이며, Table 7과 8에 정량적인 데이터를 나타내었다. Fig. 7(b)와 Table 7에서 확인할 수 있듯이 Passive OFF 상태에서는 case 6 이후에는 case 1~6까지 제어력의 증가추세와 비교해 볼 때 현저히 낮은 증가폭을 보임을 확인할 수 있다. 또한, Table 8의 Passive ON 상태의 경우에는 case 6 이후에는 더 이상의 증가 없이 제어력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 MR-damper의 최대제어력과 유사한 제어력 증가추세를 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한, Span A는 Span B

에 비하여 큰 강성의 베어링을 사용하였기에 Span A의 RB 제어력이 크게 나타났다.

3.4 MR-damper 최적 제어력 결과 분석

MR-damper가 적용된 구조물의 재하하중 변화에 따른 MR-damper의 제어력 simulation결과, case 6의 Passive ON상태에서 최대의 제어력을 보였다. 이때, Passive OFF 상태와 Passive ON상태의 최대 제어력의 차이도 가장 크게 발생하였다. case 6 이후에는 MR-damper의 Passive ON의 제어력이 감소하기 시작하며, Passive OFF 상태와 Passive ON 상태의 최대 제어력의 차이도 감소되었다. 이와 같이 나타난 현상은 MR-damper가 보유하고 있는 최대 제어용량의 제어 한계점으로써 그 이상의 하중이 발생 되어질 때 MR-damper 제어력의 항복점 이라고 판단된다. MR-damper가 적용된 구조물의 최대 거동 범위와 MR-damper의 제어력 분석 결과, case 6 이상의 하중이 추가되어야 MR-damper의 최대 제어력을 나타내는 것으로 확인하였다.

결과적으로 case 6(150 kN) 이상의 재하하중(구조물저항력)이 작용하여야 30 kN MR-damper의 최적 제어력을 발휘하는 것으로 판단된다. 따라서 구조물에 부착하여 사용되는 MR-damper의 제어용량 산정 시 구조물의 저항력 대비 20%의 제어용량을 갖는 MR-damper를 사용하여야 한다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 제어하고자 하는 구조물의 성능에 적합한 MR-damper의 제어력을 제시하기 위하여 연구를 수행하였다. 연구수행을 위하여 제작된 2-span 교량과 MR-damper의 모델링을 위하여, 구조물에 MR-damper가 부착되지 않은 상태에서의 shaking table test와 MR-damper 성능 실험을 진행하였으며, 각 모델링 결과를 포함한 거동모사시스템을 구성하였다. 거동모사시스템을 적용한 simulation 결과와 MR-damper가 부착된 이경간 교량의 shaking table test 결과를 상호 비교하였을 때 우수한 일치도를 보이면서 거동모사시스템의 신뢰성을 입증하였다. 신뢰성이 입증된 거동모사시스템을 활용하여 구조물의 성능과 MR-damper의 제어력 간의 관계를 분석하여, 구조물의 거동제어를 위한 MR-damper의 적정 제어력을 제시하였다. 이와 같은 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 구조물의 모델과 MR-damper의 모델을 포함하여 구성된 거동모사시스템을 활용한 simulation 결과와 실제 MR-damper가 부착된 구조물의 shaking table test 결과를 상호 비교하였다. 그 결과 거동모사시스템은 실제 구조물의 거동을 매우 잘 모사함을 확인하였다. 이러한 결과로부터, 거동모사시스템은 구조물의 성능과 MR-damper의 제어력 간의 관계 규명을 위한 시스템으로 사용할 수 있는 신뢰성을 확보하였다.
- 2) 총 11개의 case로 분류하여 진행한 구조물의 성능과 MR-damper의 적정 제어력 산정을 위한 simulation을 수행하였다. 그 결과, MR-damper가 발휘할 수 있는 제어력이 구조물 성능의 20%를 초과할 경우, passive on 상태에서 span A와 Span B가 하나의 구조물과 같은 거동을 보였다. 20% 미만일 때는 MR-damper의 제어력의 변화가 불안정하였다. 따라

서 El-centro 100%의 지진하중이 가진된 구조물의 진동을 제어하기 위한 MR-damper의 최대 제어용량은 구조물의 성능 대비 약 20% 내외로 확보되어야 최대 제어력을 발휘하는 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 : NRF-2013R1A2A1A01016192 and NRF-2013 R1A1A2059914). 본 연구가 이루어지도록 지원하여 준 한국연구재단에 대단히 감사합니다.

/ REFERENCES /

1. Anxin Guo, Zhongjun Li, Hui Li, Jinping Ou, Experimental and analytical study on pounding reduction of base-isolated highway bridges using MR dampers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2009;38:1307-1333.
2. Bogdan Sapiński, Jacek, Filuś, Analysis of Parametric Models of MR Linear Damper, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2003;41(2):215-240.
3. Carlson JD, Spencer JrBF, Magneto-rheological Fluid Dampers for Semi-active Seismic Control, Proc. 3rd International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, Japan, 1996;3:35-40.
4. 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.
5. Caicedo JM, Dyke SJ, Moon SJ, Bergman LA, Turan G, Hague S, Phase II benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges, *Journal of Structural Control*, 2003;10: 137-168.
6. Heo G, Kim C, Jeon S, Kim E, Control Performance Evaluation to Avoid Pounding of Bridges, *Key Engineering Materials*, vols. 2013: 569-570.
7. Heo G, Jeon S, Characteristics and Dynamic Modeling of MR Damper for Semi-active Vibration Control, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 2013;17(6): 61-69.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Iwata N, Sodeyama H, Sunakoda K, Hata K, Hiwatashi T, Shiozaki Y, Fujitani H, Soda S, Experimental Study on the Effectiveness of a Simple Semi-Active Control Algorithm for Base-Isolated Structures, *The 11th Japan Earthquake Engineering Symposium*, 2002;326: 1761-1766.
12. Renzi E, Giorgio S, Testing and modelling a semi-actively controlled steel frame structure equipped with MR dampers, *Structural Control and Health Monitoring*, 2004;11:189-221.