

건설구조물의 스마트 제어를 위한 준능동 MR 감쇠기의 설계 및 성능평가

A Design and Performance Evaluation of Semi-active MR Damper
for the Smart Control of Construction Structures

허 광 희*

전 준 용**

Heo, Gwang-Hee

Jeon, Joon-Ryong

Abstract

This research developed two semi-active MR dampers whose gaps in the orifice area were different from each other, and evaluated their damping performance by loading tests. The Damping performance of MR dampers characteristically depends on various factors like their material and mechanical ones, but most importantly on the size of gap in the orifice area. For this research, we designed the orifice gaps of two dampers as each 1.0mm and 2.0mm, both with the 80mm outer diameter of the orifice. We also designed two loading test sets with different input currents, and acquired different control ability from them. The acquired test results were analyzed and evaluated with their maximum and minimum damping force and also their dynamic range from the force-displacement hysteresis loops and the force-input current relationship curve. This research clearly proved how the damping performance of control devices depends on the gap effect, and also presented a possibility that the two dampers developed in this research could be used for the smart control of construction structures by effectively adapting the input current and the number of coil turns.

요 지

본 논문에서는 건설구조물의 스마트 제어를 위해 오리피스 구간의 갭(gap) 조건을 달리한 2개의 준능동 MR 감쇠기를 개발하고, 동하중 실험을 통해 갭 조건에 따른 감쇠성능을 비교·평가하였다. 여기서, MR 감쇠기는 그 특성상 재료적 및 기계적인 다양한 변수들로 인해 그 감쇠성능이 크게 좌우될 수 있으나, 특히 MR 감쇠기의 오리피스 구간에 대한 갭 크기의 영향은 MR감쇠장치의 설계 시 핵심적인 요소 중에 하나이다. 따라서 본 논문에서는 오리피스 구간의 갭 조건을 1.0mm와 2.0mm로 각각 설계하였으며, 인가전류 조건을 달리한 동하중 실험을 통해 발생 감쇠력을 획득하였다. 이들 획득결과는 힘-변위 이력곡선과 힘-전류 관계곡선으로부터 최대·최소 감쇠력 및 동적범위로 분석·평가되었다. 이상의 결과로부터, 갭의 조건에 따른 MR감쇠장치의 감쇠성능 변화를 규명하였으며, 본 연구에서 개발된 2개의 MR 감쇠기는 인가전류셀 및 코일 권선수 등의 추가핵심설계요소를 효과적으로 고려함으로써 건설구조물의 스마트 제어를 위해 유용하게 활용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

Keywords : Damping performance, Damping force, Dynamic range, Gap effect, MR damper, Semi-active control

핵심 용어 : 감쇠성능, 감쇠력, 동적범위, 갭 효과, MR감쇠기, 준능동 제어

* 정희원, 건양대학교 건설시스템공학과 교수

** 학생회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정

E-mail : heo@konyang.ac.kr 041-730-5631

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2009년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론(Introduction)

산업혁명 이후 건설분야의 기술은 현격히 진보하였고, 이로부터 현대에 들어서는 영종대교(2002), 아카시대교(1998), 타이베이 금융센터(2004) 및 페트로나스타워(1998) 등 국내·외적으로 건설구조물이 대형화 되고 있다. 이러한 국가 간 경쟁적인 건설구조물의 대형화 흐름은 앞으로도 지속될 전망이다. 국내에서도 2009년과 2011년도에 완공예정인 인천대교(인천, 사장교구간 1480m) 및 국제비즈니스센터(서울, 540m) 등을 보더라도 이러한 국제적 건설흐름에 동참하고 있음을 짐작케 한다.

한편, 이러한 대형화된 건설구조물은 지진, 돌풍 등에 견디지 못한 외부 하중환경에 보다 쉽게 노출되었고, 결국 혹시 발생할지 모를 손상 및 붕괴사고로부터 막대한 인적·물적 손실 피해 가능성은 점차 가중되고 있는 실정이다. 따라서, 이러한 유해진동 및 외력 등에 대한 적절한 대응책이 요구되었으며, 근자에 들어서는 스마트 제어 시스템이 건설분야에 도입되기에 이르렀다(Carlson and Spencer, 1996). 이러한 스마트 제어 시스템은 다양한 조건의 하중에 적극적으로 대응하기 어려운 수동형 제어시스템과 초기 설치비용 및 유지관리 비용이 크고, 고용량의 별도의 외부전원을 필요로 하는 능동형 제어시스템의 단점을 보완한 형태로써, 최근 스마트 재료인 MR 유체의 개발과 함께 준능동형 MR감쇠기가 국내·외적으로 각광을 받고 있다(정형조 등, 2003), (heo et. al, 2006), (Spencer et. al, 1997).

이러한 스마트 제어시스템을 위한 준능동형 MR감쇠기가 이슈화 되면서, 국외적으로는 미국과 일본 등이 자체 기술력을 바탕으로 MR 유체를 개발·생산하고 있으며, 이를 활용한 MR감쇠기의 개발에 다각적인 연구가 활발히 수행되고 있다. 여기서, Spencer et. al(1997) 및 Yang et al(2002) 등은 최근에 임베디드 형태의 자기관을 갖는 20tf 급 대용량 MR 감쇠기를 개발하였고, Sodeyama et al(2004⁽¹⁾) 등은 바이패스 형태의 대용량 MR 감쇠기를 개발하였다. 또한, Sodeyama et al(2004⁽²⁾)와 Savor et al(2006) 등은 외부 진동의 흡수 및 제어를 목적으로 이러한 준능동형 MR 감쇠기를 실 구조물에 설치하여 실험적

연구를 수행하였다. 한편, 국외의 활발한 연구와 성과에도 불구하고 국내의 경우 건설구조물에 적용할 만한 용량을 갖는 MR감쇠기의 개발은 그 사례가 미비한 상태이며, 따라서 이러한 준능동형 MR감쇠기에 대한 다양한 연구가 요구된다(백운경 등, 2004), (이기학 등, 2007), (남윤주 등, 2006).

따라서 본 논문에서는 국내의 연구실정 및 건설분야의 요구 측면 등을 고려해 자체기술력에 기반한 준능동 MR감쇠기를 개발하여, 다양한 조건에서의 동하중 실험으로부터 개발된 MR감쇠기의 감쇠성능을 확인하고, 준능동형 제어기로서의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 준능동 MR감쇠기

2.1.1 준능동 MR감쇠기의 개발

본 연구에서는 건설 구조물의 효과적인 진동제어를 목적으로 스마트 제어시스템을 위한 준능동 MR감쇠기를 개발하였다. 특히 이러한 MR감쇠기는 설계조건에 따라 그 성능이 상이하며, 크게 외부 인가전류의 세기, 전자석에서 발생하는 자기장의 세기 및 오리피스 구간의 갭(gap) 조건 등은 MR감쇠기의 감쇠성능에 직접적인 영향을 미치는 핵심설계요소이다. 따라서 본 논문에서는 이들 핵심설계요소 중 오리피스 구간의 갭 크기에 대한 영향을 실험적으로 평가하고자 하였으며, 개발된 MR감쇠기의 기본 개념도 다음 Fig. 1과 같다.

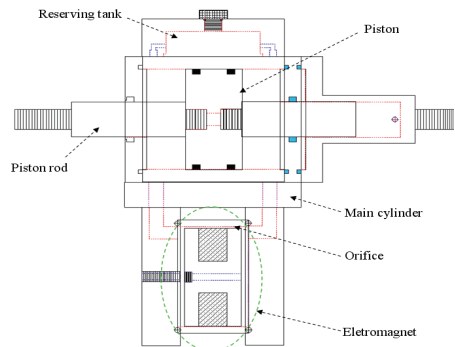


Fig. 1 Concept of Semi-active MR Damper

여기서, 본 연구에서 개발된 MR감쇠기는 장치의 전체 길이를 줄이면서 효과적으로 감쇠용량을 조절하고자 Fig. 1과 같이 전자석 시스템 부분을 메인 실린더 부분에서 분리시킨 독립식 전자석 시스템을 채용하였다. 이러한 독립식 전자석 시스템의 채용은 감쇠기의 전체 길이를 조절할 수 있어 교량의 하부 및 구조물의 협소구역에도 효과적으로 설치가 가능할 뿐만 아니라, 독립식 전자석의 실린더 외부에 다중적으로부터 감쇠용량의 확장에도 유리한 장점이 있다. 이러한 개념을 도입해 개발된 MR감쇠기는 오리피스 구간의 갭 크기를 달리 설정하여 그 효과를 평가하고자 하였으며, 오리피스 구간의 갭 크기를 1mm로 설정하였을 경우에 대한 전자석 시스템의 상세도는 다음 Fig. 2와 같다.

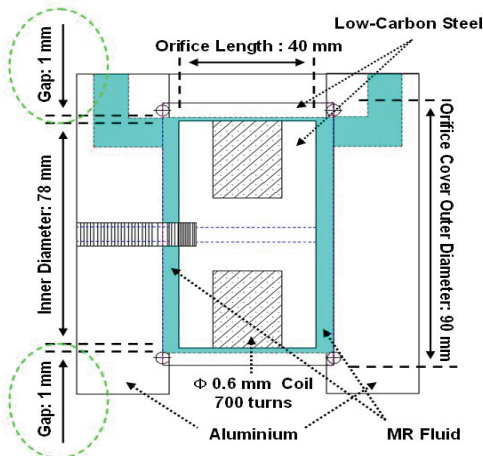


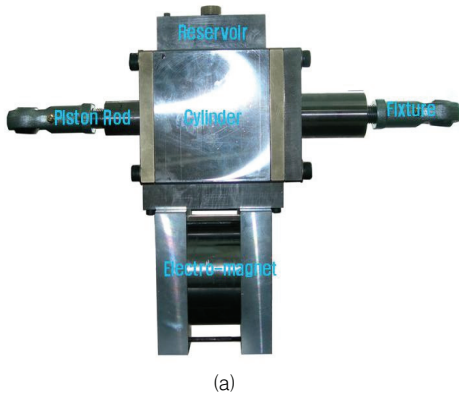
Fig. 2 Separated Electro-magnet System

본 연구에서는 Fig. 2에 보인 오리피스 구간의 갭을 1mm와 2mm로 각각 설정하였으며, 이러한 독립식 전자석 시스템의 설계 시 고려된 사항으로는 전자석 부분이 MR 유체 내에 온전히 위치될 수 있도록 하여 전자석에서 발생하는 자기장의 영향이 MR 유체에만 작용할 수 있도록 하였고, 발생한 자기의 유출을 피하고자 오리피스의 외부 덮개는 비자성체인 알루미늄을 적용하였다. 또한, 전자석 요크(yoke)는 자기의 포화 및 풀림 작용이 원활하도록 저탄소강(Low-carbon steel)으로 적용하였다. 이러한 전자석 시스템의 설계조건을 고려해 개발된 준능동 MR 감쇠기의 상세 설계제원은 다음 Table 1과 같다.

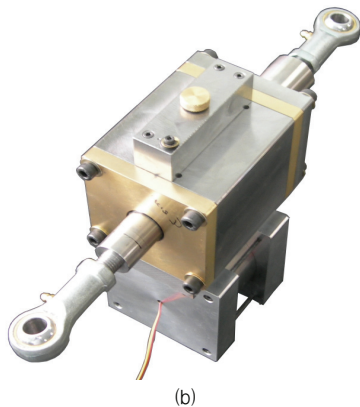
Table 1에서, 오리피스 구간의 갭 크기가 2mm 인 경우 감쇠용량이 2000N, 갭 1mm의 경우 감쇠용량이 4000N을 갖도록 각각 설계하였다. 이때 피스톤 스트로크는 최대 45mm ($\pm 22.5\text{mm}$)이며, MR유체 보충탱크, 메인 실린더 및 자기관 내에는 미국 Lord사에서 개발한 하이드로카본 타입의 MRF-132DG로 채워졌다. 또한 내경이 약 25mm로 제작된 전자석 요크에는 직경 0.6mm의 구리선을 각각 700턴 씩 조밀하게 권선하여 자기장의 형성을 유도하였다. 이렇게 제작된 전자석 요크의 오리피스 길이는 약 40mm이며, 이 중 자기장의 영향을 받는 응력 길이(Stress length)는 총 20mm이다. 여기서, 오리피스 구간의 갭 크기의 설정을 달리한 결과로부터 전자석의 내경이 76mm와 78mm로 설계되었음을 확인할 수 있다. 이상의 제원으로부터 개발된 준능동 MR 감쇠기는 다음 Fig. 3과 같다.

Table 1 Design Specifications of Semi-active MR Damper

Maximum stroke		45mm ($\pm 22.5\text{mm}$)	
Maximum force		4000N	2000N
Cylinder bore		80mm	
Piston rod diameter		28mm	
Coil diameter		$\varnothing 0.6\text{mm}$	
Separated electro-magnetic	Outer diameter	$\varnothing 80\text{mm}$	$\varnothing 80\text{mm}$
	Inner diameter	$\varnothing 78\text{mm}$	$\varnothing 76\text{mm}$
	Coil turns	700turns	
Orifice length		40mm	
Orifice gap		1.0mm	2.0mm
MR fluid		LORD MRF-132DG	



(a)



(b)

Fig. 3 Developed Semi-active MR Damper

2.1.2 준능동 MR 감쇠기의 동하중 실험

본 연구에서 개발된 두 가지 타입의 MR감쇠기는 감쇠성능 및 준능동 제어장치로서의 타당성을 검증·평가하고자 다양한 인가전류 조건을 고려해 동하중 실험을 수행하였다. 동하중 실험은 다음 Fig. 4와 같이 구성된 건양대학교 SIS Lab의 실험테이블 및 장비설을 이용하였다. Fig. 4에서, MR감쇠기의 강제 피스톤운동은 최대 변위 ± 1.0 inch의 가진기(VTS-600)를 이용하였다. 데이터의 획득은 동적 데이터로거인 DRA-107A를 이용하였으며, 0.01초의 샘플링 주기로 실험 데이터를 획득·분석하였다. 발생 감쇠력의 측정에는 최대 5kN 용량의 인·압축형 Load cell(DBBP-500)을 이용하였으며, 발생 변위의 측정에는 전체 스트로크 길이가 50mm인 변위계(CDP-50)를 이용하였다.

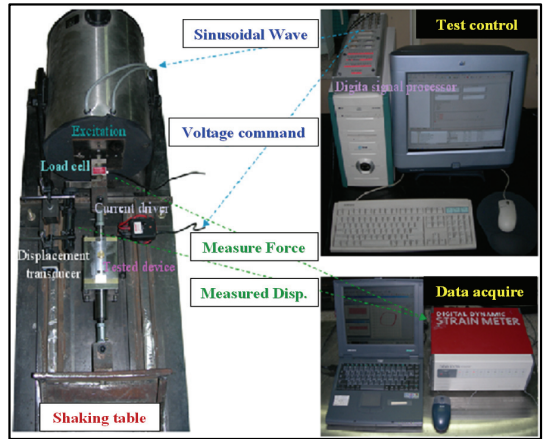
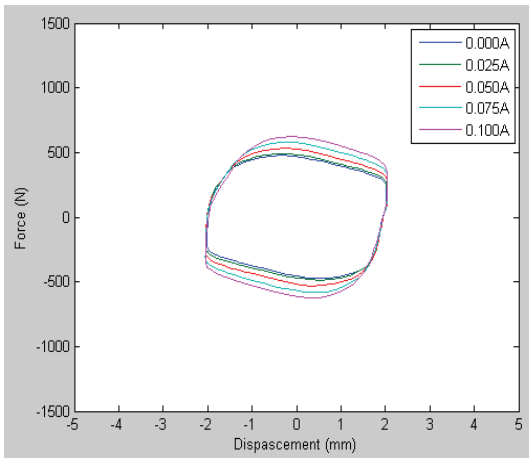
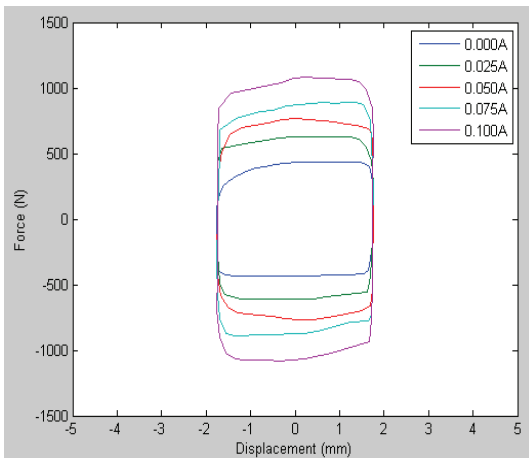


Fig. 4 Experimental Setup for Dynamic Loading Test

개발된 MR감쇠기의 동하중 실험은 가진기를 이용해 8mm/sec 속도의 1Hz 사인파를 MR감쇠기에 가하였으며, 실험결과는 인가전류 세기 별 발생된 감쇠력을 바탕으로 힘-변위 이력곡선 및 힘-인가전류 관계곡선을 획득·평가하였다. 여기서, 인가전류 세기에 따른 MR감쇠기의 감쇠성능에 대한 변화추이를 평가하고자 실내 실험의 여건 상 0.000A, 0.025A, 0.050A, 0.075A 및 0.100A의 입력전류(input current) 조건 하에서 1차 동하중 실험을 수행하였고, 이로부터 힘-변위 이력곡선을 획득하였다. 또한, 개발된 MR 감쇠기의 최대 감쇠력, 제어 가능한 힘 및 동적범위를 산출하기 위하여 상기 설정된 인가전류셀에 0.250A, 0.500A, 1.000A, 1.500A 및 2.000A까지의 추가 전류셀을 설정하여 2차 동하중 실험을 수행하였고, 이로부터 힘-인가전류 관계곡선을 획득하였다. 이때 전자석의 자기장을 유도하기 위한 안정적인 전류의 공급은 0~2 Ampere의 출력범위를 갖는 Lord사의 전류공급 장치(current driver) RD-3002-03을 이용하였으며, 또한 전자석의 자기 포화 및 풀림 현상이 원활한지 판단하기 위하여 전류 인가 on/off 상태에서의 동하중 실험을 반복 수행하였다. 마지막으로 가진기로 인가할 파형의 종류, 가진 속도 및 정량적인 인가전류 세기의 조절(Control)을 위해서 dspace CP-1103을 사용하였다. 이상의 다양한 실험조건으로부터 획득된 값 크기별 힘-변위 이력곡선은 다음 Fig. 5와 같다.



(a) Gap 2.0 mm



(b) Gap 1.0 mm

Fig. 5 Force-Displacement Hysteresis Loops

Fig. 5(a)는 오리피스 갭의 크기가 2mm인 2000N급 MR 감쇠기로부터 획득된 힘-변위 이력곡선이고, Fig. 5(b)는 오리피스 갭의 크기가 1mm인 4000N급 MR 감쇠기로부터 획득된 힘-변위 이력곡선이다. Fig. 5(a) 및 (b)로부터 개발된 두 가지 타입의 MR 감쇠기는 모두 인가전류의 세기를 증가시키에 따라 발생 감쇠력이 함께 상승함을 확인할 수 있다. 이로부터, 본 연구에서 개발된 MR 감쇠기는 인가전류의 세기에 따라 발생 감쇠력을 효과적으로 조절이 가능함을 확인되었다. 이때, Fig. 5(a)와 (b)를 비교

한 결과에서는 초기 비제어 시(0.000A)의 초기 감쇠력은 서로 큰 차이를 보이지 않는 반면, 인가전류의 크기를 증가시키에 따라 Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)보다 발생 감쇠력의 상승폭이 크게 향상됨을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 본 연구에서 평가하고자 한 오리피스 갭의 크기에 대한 영향으로써, 결국 오리피스 갭의 크기가 작아짐에 따라 MR 유체의 전단항복응력이 증가되고, 이는 동일한 세기의 전류를 인가한 경우 더 큰 효율 즉 향상된 감쇠력을 발생시킬 수 있음을 의미한다. 이상의 1차 동하중 실험결과로부터 개발된 두 가지 타입의 MR 감쇠기는 모두 인가전류에 의해 그 동적성능이 좌우됨이 명확히 확인되었고, 또한 오리피스 구간의 갭 설정이 MR 감쇠기의 발생 감쇠력에 직접적으로 관계됨을 알 수 있었다. 마지막으로, 전자석의 원활한 자기 포화 및 플림현상을 판단하고자 수행된 전류인가설의 반복적용 실험에서는 Fig. 5에서와 동일한 결과를 보임으로써 잔류자기의 영향으로 인한 발생 감쇠력 변화는 나타나지 않음이 확인되었다. 단, 여기서 주의해야 할 점은 이와 같이 오리피스 갭의 크기가 작아짐에 따라 발생 감쇠력이 향상될 지라도, 그 크기가 너무 미소한 경우에는 전자석의 자기가 완전히 플림상태임에도 불구하고 MR 유체 내 포함되어 있는 미소 철입자가 오리피스 구간 내에 집중되어 막힘(plugging)현상을 초래할 수 있고, 결과적으로는 감쇠장치로서의 기능을 상실할 수도 있다. 따라서 이러한 점을 MR 감쇠기 설계·개발 시 충분히 고려해 합리적인 크기의 갭 설정이 요구된다.

다음으로 본 연구에서는 상기와 같이 힘-변위 이력곡선으로부터 나타난 인가전류에 의한 감쇠력 향상의 효과를 확인하고, 이를 바탕으로 개발된 두 가지 타입의 MR 감쇠기에 대한 최대 발생 감쇠력, 제어 가능한 힘 및 동적범위 등을 산출하고자 0.250A, 0.500A, 1.000A, 1.500A 및 2.000A까지의 추가 전류셀을 설정하여 2차 동하중 실험을 수행하였다. 이때, 최대 발생 감쇠력은 인가 전류 2.000A 시 발생 감쇠력으로 산출되고, 제어 가능한 힘은 인가전류 0.000A와 2.000A의 발생 감쇠력 차이로 산출되며, 마지막으로 동적범위는 0.000A 시와 2.000A 시의 발생 감쇠력의 비율로써 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 이러한 2

차 동하중 실험으로부터 힘-인가전류 관계곡선을 획득하였으며, 이러한 관계곡선은 다음 Fig. 6과 같다.

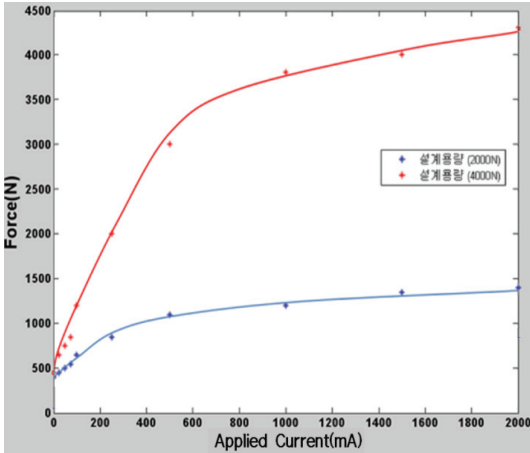


Fig. 6 Force-Applied Current Relationship Curve

Fig. 6과 같이, 인가전류를 최대 2.000A 까지 점진적으로 증가시켜 수행된 2차 동하중 실험의 결과, 두 가지 타입의 MR감쇠기 모두 감쇠력의 상승효과를 명확히 확인할 수 있었다. 여기서, 갭 2mm의 2000급 MR감쇠기는 최소 감쇠력이 약 400N 정도이며, 최대 감쇠력은 약 1400N 정도를 보였다. 또한, 갭 1mm의 4000급 MR감쇠기는 최소 감쇠력이 약 450N 이고, 최대 감쇠력은 약 4300N 정도를 보였다. 이상의 결과로부터 개발된 감쇠기의 제어 가능한 힘은 갭 2mm의 경우 약 1000N 정도이고, 갭 1mm의 경우 약 4000N 정도임을 확인하였다. 마지막으로 이들 최대 및 최소 감쇠력의 상대적인 비율을 계산한 결과 갭 2mm의 경우 동적범위가 약 3 정도를 보였으며, 갭 1mm의 경우에는 동적범위가 약 10정도를 보였다. 여기서 갭 2mm의 경우가 갭 1mm의 경우보다 동적범위가 비교적 낮게 산출된 것은 인가전류셀에 의해 자기장의 세기는 증가하더라도 오리피스 갭이 커짐에 따라 MR유체의 항복전단응력이 감소하여 나타난 결과로 판단된다. 여기서, Carlson 등은 연구문헌을 통해 준능동형 MR감쇠기의 동적범위는 1부터 최대 20까지를 제시하고 있으며, 이는 MR유체의 재료

적인 요인, MR감쇠기가 적용된 환경적인 요인 그리고, 장치의 구조 등에 의한 기계적 요인들로부터 MR감쇠기의 동적범위가 20보다 낮게 산출됨을 시사하고 있다. 따라서, 본 논문에서 개발한 두 가지 타입의 MR 감쇠기는 준능동 제어기로서의 타당성을 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 토목구조물의 스마트 제어를 위해 오리피스 갭의 크기를 달리한 두 가지 타입의 준능동 MR 감쇠기를 개발하였고, 오리피스 갭의 크기와 발생 감쇠력의 상관관계를 규명하고자 1차, 2차 동하중 실험을 수행하여 감쇠성능을 정량적으로 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 개발된 두 가지 타입의 MR 감쇠기는 우선, 갭 2mm의 경우 최소 감쇠력 및 최대 감쇠력이 400N 및 1400N으로 제어 가능한 힘은 약 1000N이고, 이때 산출된 동적범위는 3 정도를 보였다. 이로부터 개발된 2000급 MR 감쇠기는 설계용량을 충분히 만족시키지는 못하였지만, 준능동형 MR 감쇠기로써 활용될 수 있는 가능성을 제시하였다.
- 2) 다음으로, 갭 1mm의 경우 최소 감쇠력 및 최대 감쇠력이 430N 및 4300N으로 제어 가능한 힘은 약 4000N이고, 이때 산출된 동적범위는 10 정도를 보였다. 이로부터 4000N급 MR감쇠기는 설계용량을 충분히 만족시키는 결과를 보였다.
- 3) 이상으로부터 본 논문에서 개발한 두 가지 타입의 MR 감쇠기는 만족할 만한 결과를 보였고, 특히 오리피스 구간의 갭 설정을 발생 감쇠력과 직접적인 상관관계가 있음이 확인 되었으며, 향후 개발된 MR감쇠기에 대하여 인가전류셀 및 코일턴수 등의 추가핵심설계요소를 효과적으로 고려함으로써 건설 구조물의 스마트 제어를 위해 유용하게 활용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

향후 연구 과제로는 다양한 입력하중을 바탕으로 감쇠기의 성능을 객관적으로 평가하고, 또한 적합한 동적모델 및 제어알고리즘을 개발하여 본 논문에서 개발된 MR감쇠기를 구조물의 진동제어에 적용할 수 있도

록 단계적인 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 한국과학재단의 연구비 지원으로 연구되었음. 본 연구가 이루어지도록 지원하여준 한국과학재단(과제번호 : R01-2007-000-21080-0(2007))에 대단히 감사합니다.

참고문헌

1. 남윤주, 김동욱, 박명관, 이육형, "바이패스형 MR 충격 댐퍼의 설계 및 성능 해석", 대한기계학회논문집 A 권, 제30권, 제5호, 2006, pp. 550-559.
2. 백운경, 이종석, "고성능 MR댐퍼의 설계", 한국소음진동공학회논문집, 제14권, 제6호, 2004, pp. 470-477.
3. 이기학, 김기철, 이은숙, "진동제어를 위한 준능동 TMD의 제어기법" 한국공간구조공학회, 제7권, 제2호, 2007, pp. 53-61.
4. 정형조, 이인원, "토목/건축 분야의 스마트제어 기술: MR 댐퍼-기반 스마트제어 기술을 중심으로" 전산구조공학회논문집 제 16권, 제3호, 2003, pp. 41-50.
5. Carlson, J.D., and Spencer Jr., B.F., "Magneto-Rheological Fluid Dampers for Semi-active Seismic Control." Proc. 3rd International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, Japan, Vol. 3, 1996, pp. 35-40.
6. Heo, G.H., Jeon, J.R., Lee, G., Lee, W.S., Shin, H.C., "Structural Vibration Control of Civil Structure with Squeeze-mode Smart Damper: Experimental Comparisons." Smart Structures and Materials and NDE for Health Monitoring and Diagnostics an SPIE Event, vol. 6174-20, 2006.
7. Savor, Z., Radic, J. and Herlja, G., "Cable vibration at Dubrovnik Bridge." Bridge Structures, Vol. 2, No. 2, 2006, pp. 97-106.
8. Sodeyama, H., Sunakoda, K., Fujitani, H., Sode, H., Iwata, N., "Dynamic Test and Simulation of Magneto-Rheological Damper." Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 18, 2004, pp. 45-57.
9. Sodeyama, H., Suzuki, K., Sunakoda, K. "Development of Large Capacity Semi-Active Seismic Damper Using Magneto-Rheological Fluid." Journal of Vessel Technology, ASME, 126, 2004, pp. 105-109.
10. 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.
11. Yang, G., Spencer Jr, B.F., Carlson, J.D., Sain, M.K. "Large-scale MR Fluid Dampers: Modeling and Dynamic Performance Considerations." Engineering Structures, 24, 2002, pp. 309-323.

(접수일자 : 2008년 6월 25일)

(심사완료일자 : 2008년 12월 15일)