

MR감쇠기와 토글시스템을 이용한 건축물의 진동제어

구조물의 소음 및 진동제어를 위해 최근 MR감쇠기 토글시스템이 이용되고 있는데, 이 시스템을 이용하여 제어성능을 크게 향상시킬 수 있는 방안을 소개한다.

이성경

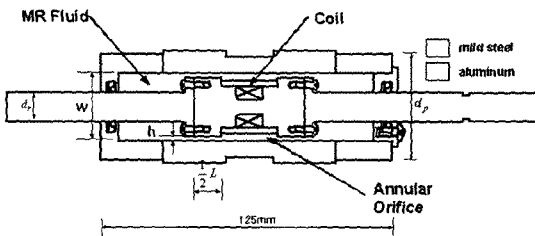
단국대학교 건축공학과(sungkyunglee@dankook.ac.kr)

MR감쇠기

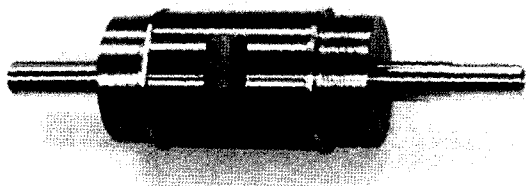
최근 컴퓨터, 첨단재료 그리고 제어시스템과 연관된 첨단기술이 실현됨으로써 바람 및 지진과 같은 불확실한 외부하중에 대하여 더욱 안정적이고 안락한 건물을 실현할 가능성이 점차 증가하고 있다. 현재까지, 구조물의 소음 및 진동제어 분야에서 상당히 많은 제어 기법이 제안 되었으며, 수동제어기 성능의 제한적 기능을 개선하기 위해 다양한 능동, 준능동 형식의 감쇠기가 소음 및 진동제어용으로 제안되고 있다. 건물에 발생하는 진동에 대하여 형상기억합금, 전기유변(Electro Rheological: ER) 유체, 자기유변(Magneto Rheological: 이하 MR)유체 등의 스마트 재료가 능동 또는 준 능동적으로 이용된다. 특히, MR 유체는 유체 내 흐트러진 입자들에 자기장이 가해질 때 흐트러져 유동적이었던 성질이 체인구조로 정렬되어 자기장의 크기에 비례하는 마찰력

을 발생시킨다. MR 유체를 사용한 MR 감쇠기는 감쇠기 조작에 요구되는 전력이 매우 작고 MR 유체의 자기장에 대한 반응 속도가 매우 빠르다는 장점을 가지고 있기 때문에, 준능동 제어 시스템으로 자동차 흔들림 충격 흡수제, 엔진 진동제어, 면진 테이블, 유압 밸브 체계에 많이 이용되어 왔으며, 또한 전력소모가 크고, 대형 지진이 발생할 경우 전원이 차단되어 제어력을 발휘할 수 없는 기존의 능동제어 장치에 비해서 상대적으로 안정적이고 제어력의 조절이 용이하기 때문에 대형 토목 및 건축구조물의 진동제어 분야에서 많이 이용되고 있다. MR 감쇠기는 내부의 MR유체에 부과되는 자기장의 세기에 의해 감쇠력을 발휘하게 되며, 자기장의 세기는 MR감쇠기에 입력되는 전류에 의해 조절된다.

그림 1은 감쇠기의 성능평가 실험에 사용된 MR 감쇠기의 단면을 보여주고 있으며, 그림 2는 결합된 형상을 보여준다. 피스톤 운동에 의해, MR유체는



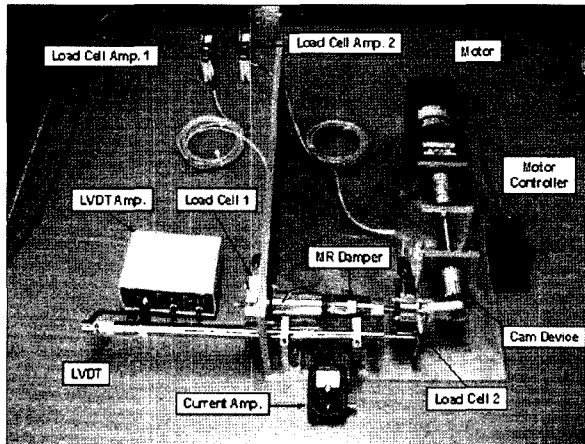
[그림 1] MR감쇠기의 단면



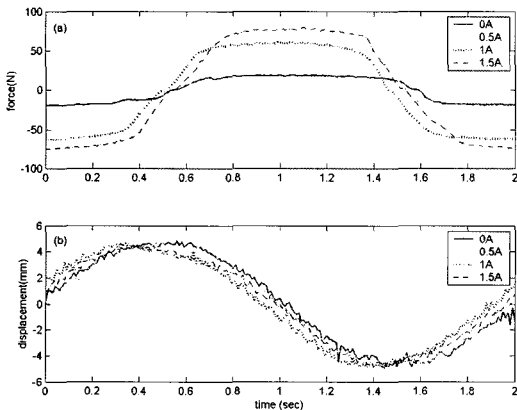
[그림 2] MR감쇠기의 외형

한쪽 챔버에서 다른 쪽으로 움직이며 전극을 통과한다. 이와 같은 MR 유체의 이동을 원활하게 하기 위해서 피스톤 몸체를 원형단면으로 하였다. 그림 1에서 회색부분은 연강을, 흰색 부분은 알루미늄을 나타내고, 알루미늄은 자기가 통과하지 않기 때문에 코일에 전류가 통과될 때 피스톤 몸체 중 연강과 연강 사이에 MR 유체가 저장되어 있는 L길이에 해당하는 부분에서만 MR 유체의 고형현상이 발생한다. 그 이외의 부분은 자기장 손실을 방지하기 위해 외부 실린더와 각각의 피스톤의 끝부분을 자기가 통하지 않는 재료로 만들었다. 그림 3은 제작된 MR 감쇠기

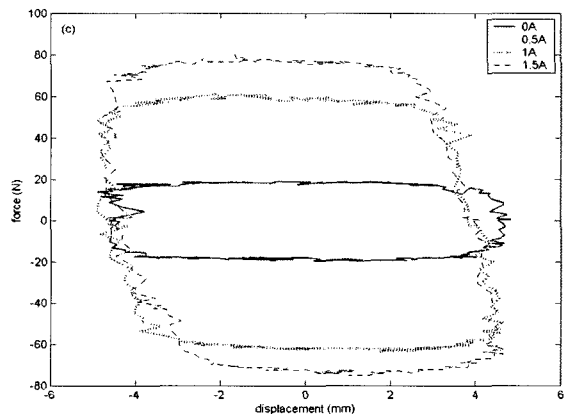
의 제어력을 측정하기 위한 실험 장치를 보여준다. 모터에 의한 회전운동이 캠을 통과하여 MR 감쇠기에 일정한 진폭의 변위를 가지는 직선 왕복운동으로 전달되고, 이때 발생한 MR 감쇠기 제어력과 변위를 로드셀(Model 41, Sensotec)과 변위계를 사용하여 계측하였다. 전류는 전류앰프를 사용하여 코일에 직접 입력하였으며, 모터제어기의 RPM을 조절함으로써 변위제어신호의 진동수를 조절할 수 있다. MR 감쇠기에 부과되는 자기장은 0 A에서 1.5 A까지의 전류를 적용하였다. 가진은 크기가 ± 5 mm이고 진동수가 0.5 Hz인 사인파를 사용하였다. 그림 4의 a)는



[그림 3] MR감쇠기 실험장치



a) 감쇠력과 변위의 시간이력



b) 힘-변위 곡선

[그림 4] MR감쇠기의 제어력 특성



각각 측정된 감쇠력과 변위의 시간이력이다. 전류가 증가함에 따라 감쇠력이 증가하는 것이 명확히 나타난다. 이것은 피스톤의 속도에 상관없이 단지 입력 전류를 조절함으로써, 어떤 요구되는 감쇠력을 발휘할 수 있다는 것을 나타낸다. 자기장이 없을 때 감쇠력 20N은 1.5 A의 전류를 적용하였을 때 80N까지 증가된다. 특히, 각각 0.5 A에서 51N, 1 A에서 67N으로 측정되었다. 힘-변위 결과는 그림 4 b)에 나타났다. 그림 4 b)로부터, 자기장이 증가함에 따라 MR 감쇠기에 의한 소산에너지의 크기가 증가되는 것을 명확히 알 수 있다.

토글시스템

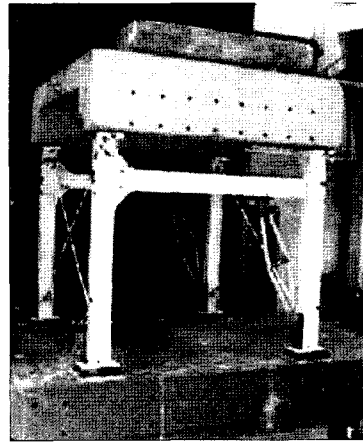
구조물의 상대적 물리량에 의해 제어력을 발휘하는 감쇠장치는 장치의 양단을 구조물의 층과 층 사이에 고정시킬 수 있는 별도의 가새 시스템이 필수적으로 사용된다. 그러나, 감쇠장치의 크기의 한계, 설치상의 제약조건으로 인하여 감쇠장치가 연결되는 지점은 구조물의 크기에 비하여 매우 작은 값을 가지며, 일반적으로 큰 강성을 가지는 건축 및 토목 구조물의 경우 작은 지점간에 발생하는 변위, 속도, 가속도는 매우 작은 값을 가진다. 이러한 작은 크기의 물리량에 비례하는 감쇠력을 발생시키는 감쇠장치가 적정수준의 제어효과를 가지기 위해서는 감쇠

장치의 용량이 커지거나 다수의 감쇠장치가 사용되어야 한다. 특히, 일반적인 가새 시스템인 대각형이나 웨브론 형태의 가새는 구조물의 층간 변위보다 작은 크기의 변위가 가새에 발생하기 때문에 이러한 문제는 더욱 심각해진다. 가새 시스템에 의하여 구조물의 상대변위 등이 증폭되어 감쇠장치 양 단부에 전달된다면 그 증폭된 비율만큼 감쇠장치의 용량을 줄이거나, 또는 그 비율만큼 같은 용량의 댐퍼에 의하여 더욱 큰 제어효율을 가질 수 있다. 변위를 증폭하거나 역으로 감소시켜 힘을 전달하는 장치 중의 하나가 토글이다. 토글은 기계장치에 매우 광범위하게 사용되고 있으며, 작용 매커니즘에 따라 분쇄기, 압축기, 그리고 충격완화장치 등으로 응용되고 있다. 토글시스템은 구조물의 변형이 발생할 경우, 그림 5와 같이 층간에 설치된 가새에 발생하는 상대변위를 증폭시켜 이와 연결된 감쇠기의 제어효과를 증가시키는 장치로서, 가새의 형태에 따라 여러 가지 명칭으로 불리워진다.

그림 5는 감쇠기의 양 단부가 구조물의 상부보의 임의의 지점과 가새의 연결부에 설치되는 상부토글시스템의 형상을 보여준다. 상부 토글시스템은 감쇠기의 축과 하나의 가새가 직각의 각도를 가진다. 이러한 형상을 가지는 경우 수직적으로 쉽게 증폭비가 얻어질 수 있는 장점을 가지지만, 실제 적용의 경우 여러 가지 이유에 의하여 직각과는 다른 각도로 설



a) 역 토글

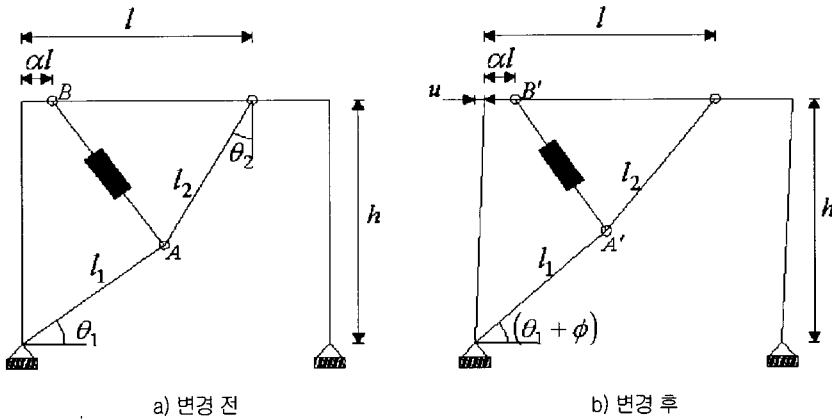


b) 가위 - 잭 토글

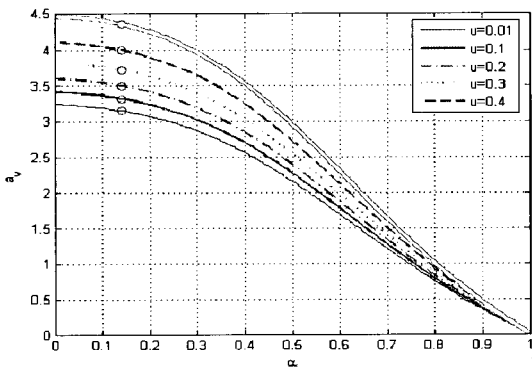
[그림 5] 토글시스템

치될 수도 있다. 여기에서는 이러한 점을 고려하여, 감쇠기가 구조물의 상부보와 연결되는 위치에 따른 증폭비의 변화를 살펴보았다. 그림 6에서 l_1 과 l_2 는 각각 감쇠기가 연결된 힌지와 구조물의 지점 및 상부보까지의 길이이고, l 은 상부보에 연결된 가새와 골조단부 사이의 길이이며, α 는 감쇠기와 상부보의 접합부의 위치를 l 에 대한 비율로 나타내는 변수이다. 그림 7은 $h=4.5$ m, $l_1=3.0$ m, $\theta_1=31.9^\circ$ 과 $\theta_2=43.2^\circ$ 인 경우에 와 골조변위의 크기에 따른 속도 증폭비를 보여준다. $\alpha=0$ 일 때 최대값을 가지고 α 가 증가함에 따라 증폭비가 점차적으로 감소함을 알 수 있다. 이것은 현재의 기하형상에서는 감쇠기를 가새와 보와 기둥의 접합부에 연결하는 것이 가장 효율

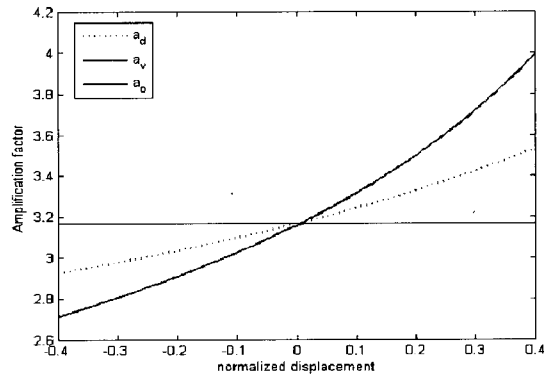
적임을 의미한다. α 가 약 0.8 이상인 위치에서는 증폭비가 1보다 작아져 토글시스템이 의도한 대로 속도를 증폭시키지 못함을 알 수 있다. 변위의 크기가 양의 방향으로 증가할수록 증폭비는 커지는 경향을 보인다. 그림 8은 가새와 감쇠기가 직각을 이루는 경우에 변위의 크기에 따른 변위증폭비, 속도증폭비, 그리고 층간변위에 대한 감쇠기 변위의 선형 증폭비를 보여준다. 그림 8에서 보여지는 바와 같이 선형증폭비는 변위의 크기에 관계없이 일정한 반면에 변위증폭비와 속도증폭비는 변위가 양의 방향으로 증가할수록 선형증폭비보다 커지고, 변위가 음의 방향으로 증가할수록 작아지는 경향을 보이며, 속도 증폭비의 변화가 변위증폭비보다 큼을 알 수 있다.



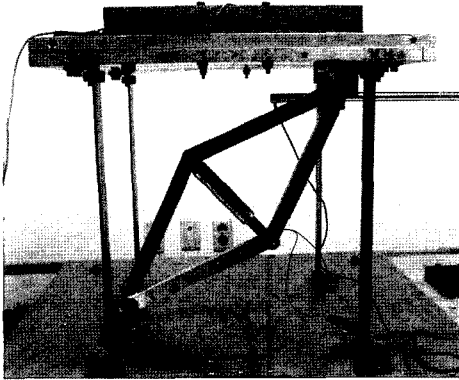
[그림 6] 상부토글 시스템



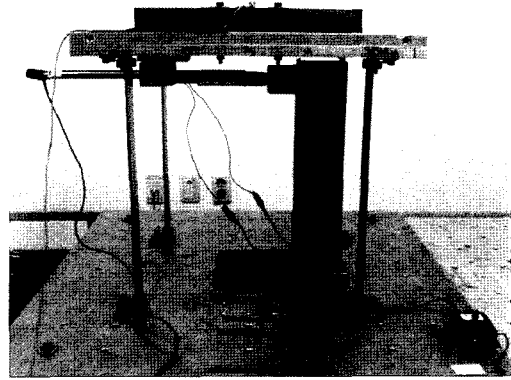
[그림 7] 속도증폭비



[그림 8] 증폭비



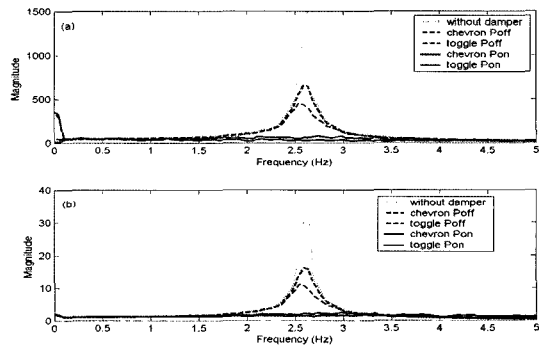
[그림 9] 단자유도 시스템 (증폭시스템)



[그림 10] 단자유도 시스템 (비증폭시스템)

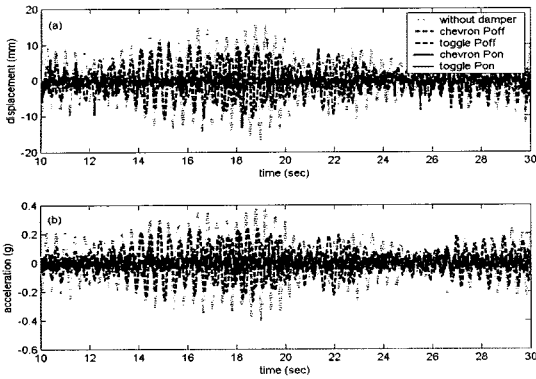
토글시스템에 설치된 MR감쇠기의 제진성능

여기에서는 동일한 용량의 MR감쇠기를 토글시스템과 일반적인 가새시스템을 사용하여 구조물에 설치한 경우의 제어효과의 차이를 실험적으로 검증하기 위하여 변위 증폭형 토글시스템과 층간변위와 동일한 변형을 발생시키는 웨브론형 가새시스템을 사용하여 단자유도 소형구조물에 MR 감쇠기를 설치한 후 진동대 실험에 대해서 살펴본다. 첫째로 대상건물에 가속도계와 변위계를 장치한 후 백색잡음 실험을 수행하고 고유진동수와 전달함수의 크기를 측정하였다. 다음으로 토글시스템을 장치하고 백색잡음 하중실험을 통하여 고유진동수의 변화를 측정하고 MR감쇠기를 달아서 입력전류의 변화를 주어 실험을 수행한 후 전달함수의변화를 확인하였다. 마찬가지로 웨브론 가새와 같이 층간변위와 동일한 크기의 감쇠기 변위를 발생시키는 강성이 매우 큰 레퍼런스 부재에 MR 감쇠기를 달고 토글시스템의 실험방식과 동일한 조건으로 실험을 수행하였으며 그 결과를 토글시스템의 실험 결과와 비교하였다. 실험에 사용된 토글-가새시스템의 증폭비는 변위가 미세한 경우, 토글의 사이각 ($\theta = 140, 25^\circ$),과 대각가새와 층간의 사이각 ($\theta = 43^\circ$)에 의하여 2.0231이 되고 층간변형이 커질수록 θ 가 커지게 되므로 증폭비는 더 커진다. 실제로 본 실험구조물의 기하학적 조건상 2 cm 변형이 일어났을 때 MR댐퍼의 변형은 4.5 cm 이상이 된다. 따라서, 웨브론 타입의 비증폭 가새시스템



[그림 11] 전달함수 (변위(상), 가속도(하))

과의 제어효과의 차이를 기대할 수 있다. 그림 9는 토글가새의 실제 설치형상을, 그림 10은 레퍼런스 윌을 사용하여 웨브론형태의 가새시스템과 같은 변위증폭비를 가지는 시스템의 설치형상을 보여준다. 증폭메커니즘의 효과를 비교하기 위하여 토글시스템과 웨브론타입의 시스템의 단자유도 실험을 수행하였다. 그림 11은 PGA 0.2 g의 가속도 백색잡음 하중을 주었을 때 측정된 토글가새의 전달함수와 웨브론타입 가새의 전달함수이다. Passive on 상태일 때는 충분한 제어력을 발휘하므로 증폭시스템과 제어효과가 별 차이가 없다. 그러나 passive off 상태일 때는 토글시스템의 제어효과가 더 좋음을 변위, 가속도 전달함수를 통하여 알 수 있다. 구조물이 공진 시 그 제어성능의 효과는 비제어시 보다 각각 57.04%,



[그림 12] 시간이력(변위(상), 가속도(하))

<표 1> 변위, 가속도의 최대값과 표준편차

	비제어	Passive off		Passive on	
		쉐브론	토글	쉐브론	토글
최대변위	16.77	13.34	13.30	8.43	7.88
변위표준편차	5.07	3.33	2.66	1.04	0.78
최대가속도	0.41	0.28	0.23	0.12	0.10
가속도표준편차	0.12	0.08	0.064	0.03	0.03

70.81%로 토글시스템이 쉐브론 타입의 가새시스템보다 13.76% 더 저감시킨다. 그림 12의 시간이력에서도 그 효과를 확인할 수 있다. 표 1은 변위와 가속도 시간이력의 최대값 및 표준편차를 표시한 것이다.

본고에서는 MR감쇠기 자체의 성능평가와 토글 시스템을 사용하여 설치된 MR 감쇠기의 지진응답제어 성능을 검토하였다. 상부 토글 시스템에서 감쇠기가 연결위치에 따른 응답증폭비의 변화를 알아본 결과 증폭비는 특정 위치에서 최대값을 가지는 것을 확인하였다. 그리고, 속도증폭비는 응답의 크기에 따라 변하는 비선형 특성을 가지고 있으며 MR 감쇠기의 제어력이 속도의 함수인 점을 고려할 때 이러한 비선형 속도증폭비가 MR감쇠기-토글 시스템의 설계에 고려되어야 함을 확인하였다. 수치해석 및 진동대 실험결과는 MR 감쇠기의 제어력이 가진 하중의 크기에 비하여 작아 기존의 가새 시스템으로는 충분한 제어 성능을 확보할 수 없는 경우에, 토글 시스템을 사용하여 유효한 제어력의 크기를 증폭시킴으로써 제어 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 보여준다. ㉔