	<h1>MR 감쇠장치를 이용한 5층 철골 구조물의 지진응답제어</h1>
	<p>이 상 현*</p> <p>(단국대학교 건축공학과)</p>

1. 머리말

국내의 경우 50층 이상의 초고층 거주 및 상업용 건물이 많이 건축되고 있으며 교량 또한 사장교 형식의 대형 교량이 건설되고 있는 추세이다. 이러한 초대형 구조물은 지진과 바람에 과도한 응답을 일으켜 구조물의 안정성은 물론 거주자 또는 사용자의 사용성에 큰 영향을 미친다. 이와 같은 이유로, 국내외 많은 연구기관에서는 지진과 바람 등 같은 동적 하중에 대해서 여러 감쇠장치를 이용한 진동제어 연구가 광범위하게 수행되어오고 있다.

초대형 구조물의 진동제어 연구는 최근 20년간 지진이나 바람에 의한 구조물의 동적응답에 대해서 뛰어난 제어 성능을 가지고 있는 능동제어장치(active control devices)를 중심으로 수행되어져왔다. 그러나 능동제어 장치는 실제 지진이 발생했을 때 안정적인 전력공급이 어렵다는 점을 감안하면 최적의 제어성능을 구현하기 위해서 부가적인 장치 및 엄청난 량의 전력을 필요로 한다는 단점이 있다. 자기유변유체(magnetherological)를 이용한 MR 감쇠장치와 같은 준능동제어장치(semi-active control devices)는 소량의 전력공급으로 큰 제어력을 발생시키는 특징을 지니기 때문에 능동제어를 대체할 방안으로 고려되고 있다. 외국의 경우 사장교 형식의 초대형 크기의 교량에 응용되기도 하였고, 또한 미국의 로드사(Lord Co.)와 Yang은 20 ton 크기의 대형 용량의 MR 감쇠장치를 개발하여 실험을 통해 다양한 이력모델을 제시하였다.

국내에서도 초대형 구조물에 과도한 동적응답을 저감시킬 수 있는 대용량 MR 감쇠장치를 개발하는 연구가 한국기계연구원을 중심으로 수행되고 있다. 대용량 MR 감쇠기의 성능실험은 일반적으로 실제 구조물에 적용하여 그 제어 성능을 검증한다는 것이 매우 어렵기 때문에 감쇠기 자체의 성능실험에 국한되고 있다. 특히 소유주가 국가가 아닌 일반적인 건물에 감쇠장치를 적용하고 성능검증을 한다는 것은 현실적으로 매우 어렵다.

(주)유니슨에는 실물크기 5층 철골 실험용 구조물을 제작하고 5층에 이 건물을 가진하고 제어할 수 있는 복합질량형 감쇠기가 설치되어 있기 때문에 감쇠장치의 성능을 검증하기에 적합하며, 점탄성감쇠기와 같은 수동형 감쇠장치가 설치되어 그 성능이 평가된바 있다.

그러나 이 건물도 다양한 실험을 반복적으로 수행하고 건물자체의 안전성을 유지하기 위해 일정 크기 이상으로 가진하는 것은 제한되어 있으며 탄성거동 내에서 성능이 검증되어야 하는 한계는 가지고 있다. 이 글은 앞으로 국내에서 개발될 혹은 개발된 MR 감쇠기의 대략적인 형상을 소개하고 MR 감쇠기가 설치될 5층 구조물의 지진응답제어성능을 평가할 수 있는 연구를 소개하고자 한다.

2. 대형 MR 감쇠장치 모델링

그림 1과 그림 2는 제작전 복합모드형 대형 MR 감쇠장치의 개략도 및 단면도를 보여준다. 이 MR 감쇠장치는 크게 피스톤헤드를 중심으로 상·하부의 자기회로,

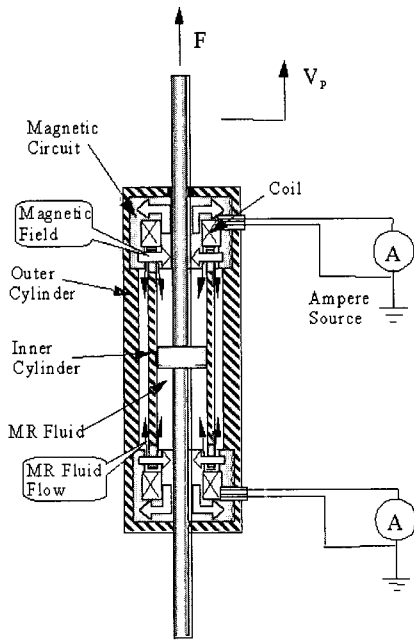


그림 1 대형 유동모드 MR 감쇠장치 개략도

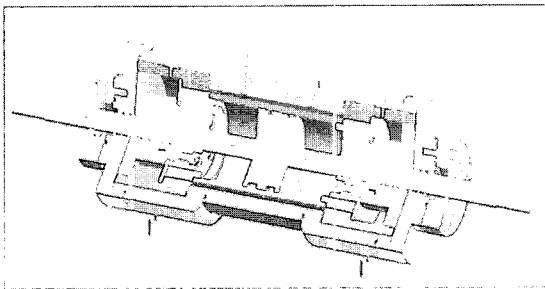


그림 2 대형 유동모드 MR 감쇠장치 단면도

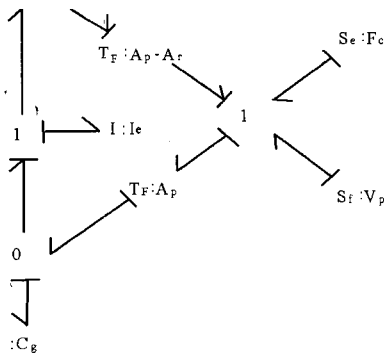


그림 3 MR 감쇠장치의 화학 결합도

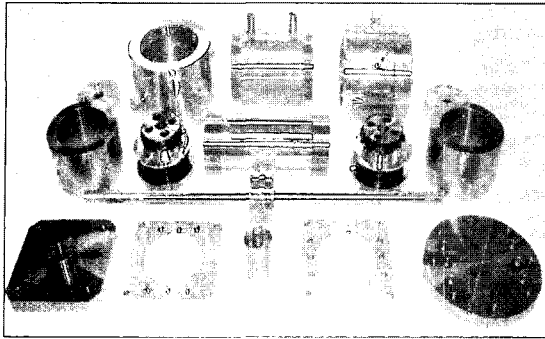
내측실린더, 외측실린더 그리고 피스톤으로 구분되며, 내·외측 실린더 사이에는 MR 유체의 유동을 위하여

원형 덕트가 구성되었다. 또한 원형 덕트의 양끝단은 자기회로로 이루어져 부하되는 자기장에 따라 MR 유체가 작동할 수 있게 하였으며, 내측실린더의 고정과 자극에서의 유로 형성을 위하여 스플라인 형태를 지닌 상자성체로 된 지그를 자기회로에 설치하였으며, 이것은 MR 유체가 코일이 감긴 곳으로 유입되는 것도 막아준다. 내측 실린더는 양끝부분에 상·하부의 슬레노이드와 같은 재료의 강자성체로 된 원형 관을 부착하여 MR효과가 발생하는 자극을 형성하게 된다. 중간부분은 상자성체로 되어있어 위쪽과 아래쪽 자극에서 발생한 자기장이 서로 간섭하는 것을 방지한다. 외부로의 자기장 손실을 막기 위해 외측실린더와 피스톤 로드 역시 상자성체로 구성하였다. 피스톤을 중심으로 위쪽을 상부챔버, 아래쪽을 하부챔버로 정의하고, 이 두 챔버에 MR 유체가 완전히 채워지게 된다. 상·하부 자기회로에 전류를 인가하면 각각의 자극에 자기장이 부하된다.

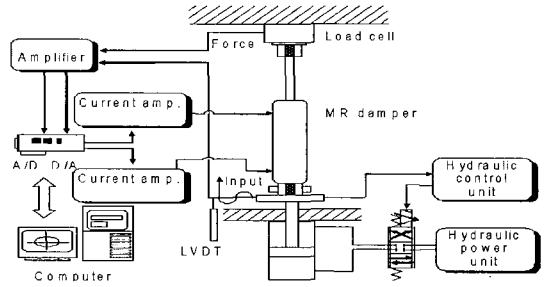
MR 감쇠장치의 해석을 위하여 MR 유체는 비압축성 유체로 가정하였고, 동일 공간에서의 내부압력은 모든 방향으로 균일하게 작용하며, 유로 형상에 따른 압력손실은 없다고 가정하였다. 시스템의 모델링 방법으로는 본드 그래프 방법(bond graph method)이 사용되었다. 본드 그래프 방법은 에너지 형태에 상관없이 시스템에 영향을 주는 인자들을 에너지 흐름(energy flow) 관점에서 서로 연결시켜 시스템의 상태방정식을 표현하는 방법으로, 제안된 MR 감쇠장치에 대한 본드 그래프 모델은 그림 3과 같다.

제안된 모델을 근거로 하여 중형 승용차량용 감쇠장치의 제원을 갖는 MR 감쇠장치를 설계·제작하였다. 그림 4는 제작된 MR 감쇠장치의 사진으로 행정거리는 ±50 mm로 하였고, 상부와 하부의 자기회로는 강자성체인 연강(mild steel)으로 이루어져있는 자로(flux guide)에 0.8 mm의 동선을 100회씩 2번 감아 구성했다. 내측 실린더와 자기회로 사이에 구성되어있는 자극의 간격은 1 mm이며, 상부와 하부에 30 mm의 길이를 갖는 자극이 챔버쪽과 원형덕트쪽으로 각각 2개씩 형성되어 있다.

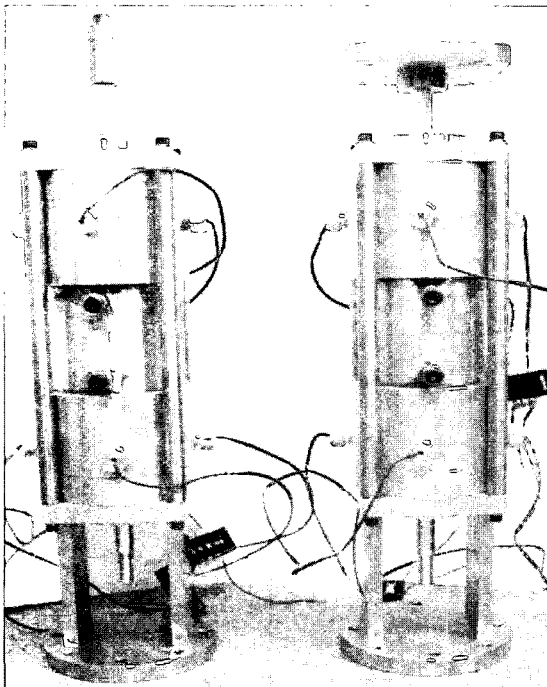
MR 감쇠장치의 성능을 시험하기 위해 유압서보밸브(J631-036, MOOG)로 구동되는 감쇠장치 시험기를 구성하여 감쇠장치를 가진시키며 자기장 변화에 따른 감쇠장치의 제어력 변화를 고찰하였다. 그림 5는 구성되었던 감쇠장치 시험기를 나타내고 있다.



(a) 대형 MR 감쇠장치 구성요소

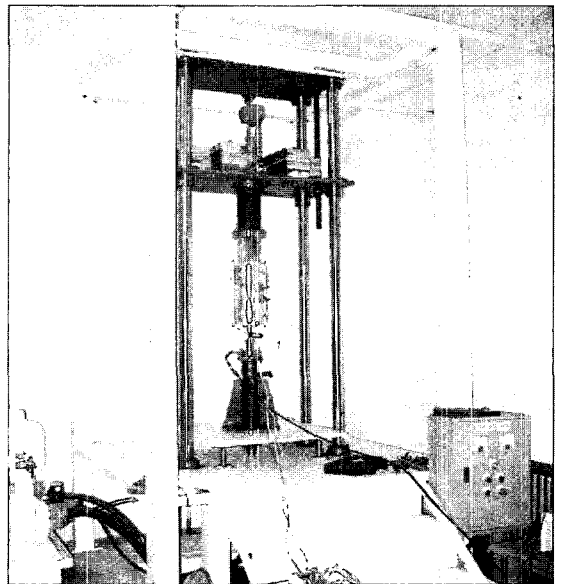


(a) 테스트기 상세도



(b) 조립된 대형 MR 감쇠장치

그림 4 대형 MR 감쇠장치 사진



(b) 테스트기사진

그림 5 MR 감쇠장치 테스트기

유압시스템의 가진 변위는 ± 75 mm의 측정범위를 갖는 LVDT(MVL-7, Sensotec)로 측정되고, MR 감쇠장치에 의하여 발생된 제어력은 피스톤 로드 끝단에 장착한 측정 범위 ± 2000 lb(± 8896.4 N)을 갖는 로드셀(Model 45, Sensotec)을 이용하여 측정한다. 각 센서를 통해 측정된 데이터는 A/D 변환기(ASC-35, Contec)를 통하여 컴퓨터에 저장되고, 컴퓨터의 계산에 의해 결정된 자기장의 크기는 D/A 변환기(NI)에 의하여 전기적 신호로 바뀐 뒤, 지령

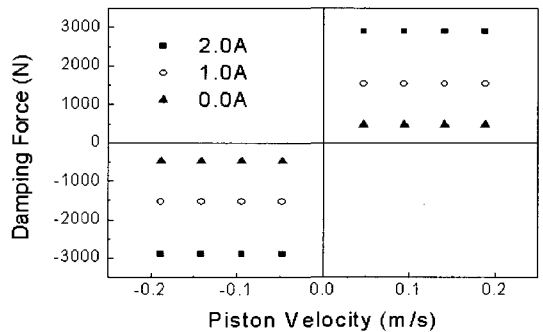


그림 6 대형 MR 감쇠장치의 제어 특성

된 신호는 1.0 A/V의 계인을 갖도록 자체제작한 2대의 전원공급장치를 거쳐 MR 감쇠장치의 상하부

슬레노이드에 부하되어 자기장을 형성하게 된다.

MR 감쇠장치가 발생시킬 수 있는 제어력을 예측하기 위하여 Bingham 모델로부터 얻어진 MR 유체의 항복 응력식을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6은 자기장의 크기를 0.0, 1.0, 2.0 A로 변화시켰을 때 발생한 MR 감쇠장치의 제어력에 대한 실험결과를 피스톤 속도영역에서 도시한 것이다. 자기장 무부하시 리바운드 운동에서 476 N의 제어력을 발생시켰으며, 자기장 2.0 A인 가 시 MR 유체의 항복전단응력에 의해 2890 N의 제어력을 발생하여 피스톤속도와 무관하게 자기장의 제어만으로도 넓은 제어 영역을 가짐을 확인하였다.

3. 구조물 모델

대상 실험구조물은 그림 7~8과 같이 실험규모의 5층 철골구조물이고 층고 6m, 슬래브 6m×6m, 층질량 20,000 kg을 가진다. 각층은 4개의 H형강(H-310×310×20×20) 기둥으로 구성되어져 있고, 5층에 설치된 HMD는 대용량 리니어 모터를 이용한 감쇠장치(linear motor damper, LMD)로서 코일이 고정되어 있고, 영구자석과 철심이 가동되어 제자부 역할과 가동질량(1,500 kg)의 역할을 동시에 함으로써 가진기 이외에 수동댐퍼로도 사용될 수 있도록 설계 제작 되었다. H형강 기둥은 약 축 및 강축 방향을 가지고 있으며 HMD는 약축방향으로 설치되었다.

5층에 설치된 HMD를 이용하여 MR 감쇠장치가 설치되기 전의 백색잡음 실험을 통해 구조물의 시스템 식별

이 수행되었다. 그 결과 구조물의 1차 모드 고유주기와 감쇠비는 각각 0.51 Hz, 1.98 %로 나타났다. 구조물은 층강성과 층전단력이 바닥판에 집중되어있는 전단형 구조물로 가정하였다. 이를 통해 각 층의 강성은 2440 kN/m로 고려되었다. 그림 9는 각 층의 가속도 값을 이용한 구조물의 시스템 식별을 위해 수행된 계측 실험 시스템을 나타낸다.

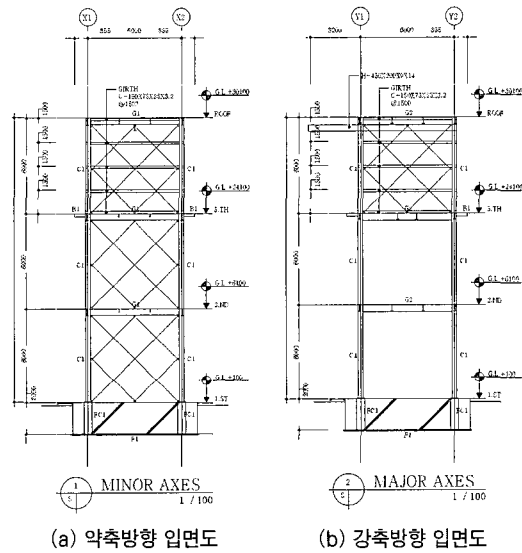


그림 8 대상 실험구조물의 입면도

표 1 부재 목록

MEMBER LIST	
C1	H-310×310×20×20
G1	H-400×200×8×13
G2	H-450×200×9×14
B1	H-200×100×5.5×8
B2	H-400×200×8×13
RB1	H-400×200×8×13
FC1	500×500

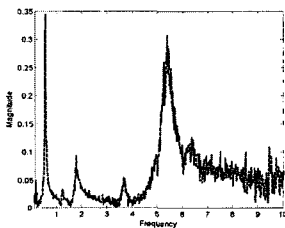
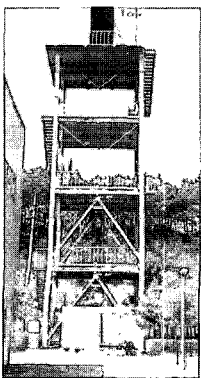


그림 7 대상 실험구조물의 모습과 전달함수 특성

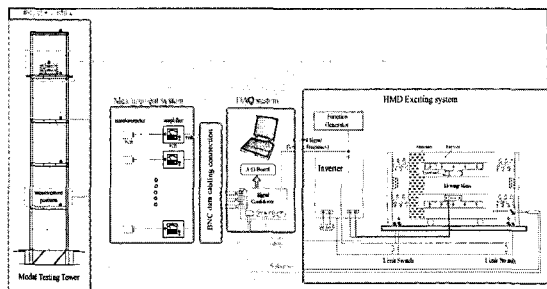


그림 9 계측, 데이터수집, 가진시스템 실험 개념도

4. 유사지진 구현을 위한 가진 시스템 설계

일반적으로 구조물의 감쇠장치를 설치하여 지진에 대한 제어성을 실험적으로 평가하기 위해서 진동대 실험이 수행되어오고 있다. 그러나 실물크기의 구조물을 진동대 실험으로 성능평가한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 구조물의 5층에 설치된 HMD를 이용하여 실제 지진과 가진시스템을 설계하였다. 1,500 kg의 질량의 HMD는 구조물의 5층에 설치되어 있으며 입력 전압 신호에 의한 HMD의 가속도 이외에 5층바닥의 절대가속도에 의존하여 가진력이 발생한다. 따라서 유사지진 가진시스템이 정확하게 구현되기 위해서는 구조물의 절대가속도에 따른 HMD의 동적특성을 보상하여야 한다. 백색잡음 실험을 통해 HMD의 입력 전압 신호에 대한 HMD의 절대가속도의 전달함수와 역전달함수를 구하였으며, 실험적으로 측정된 전달함수와 역전달함수를 Matlab 함수를 이용하여 곡선적합하였고

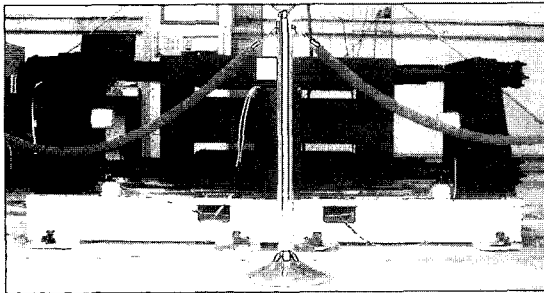
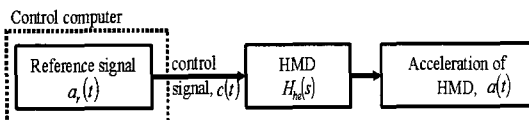
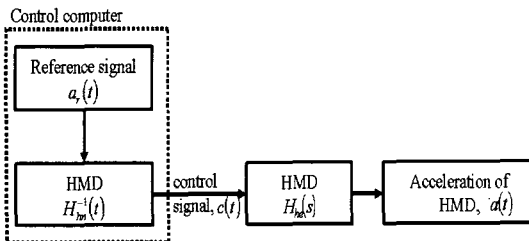


그림 10 5층 바닥에 설치된 HMD 모습



(a) HMD 전달함수의 정의



(b) HMD 역전달함수를 이용한 동적특성 보상

그림 11 HMD 제어기의 개념도

이를 필터화하여 HMD제어기에 반영하였다.

그림 10은 HMD의 모습을 보여주며 그림 11은 HMD 제어기의 개념도를 보여주고 있다. 여기서 $H_{he}(s)$ 는 입력신호에 대한 HMD 절대가속도의 전달함수이며 원하는 가속도응답 즉 참조신호 $a_r(t)$ 은 곡선적합한 HMD의 역전달함수 $H_{hm}^{-1}(s)$ 를 통해 HMD 제어신호가 생성되며 HMD의 실제계측된 가속도 $a(t)$ 는 HMD의 동특성이 보상됨을 보여준다.

그림 12는 HMD 역전달함수의 크기와 위상 그리고 커브피팅한 결과를 보여주고 있다. 그리고 그림 13은 El Centro 지진에 대한 HMD가속도의 참조신호와 실제 계측된 가속도를 보여준다.

5. 유사지진 실험결과

지진하중실험은 El Centro 지진데이터를 사용하였으며 HMD의 신호제어에 맞추어 0.05 g로 스케일을 줄인 지진데이터를 사용하였다. 지진하중 실험은 5층의 목표가속도응답에 따라 생성하였으며 HMD제어기를 통해 가진되었다.

그림 14는 El Centro 지진의 수치해석 모델 지진응답과 HMD 유사지진 가진시스템의 실험결과와 시간이력

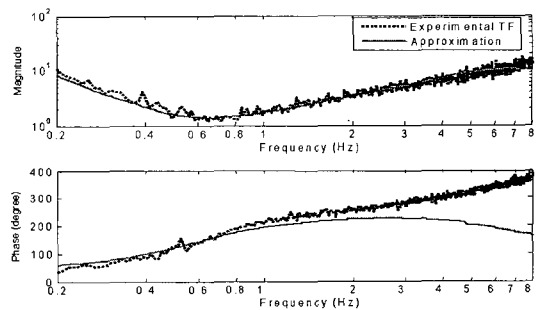


그림 12 HMD 역전달함수의 크기와 위상의 곡선적합 결과

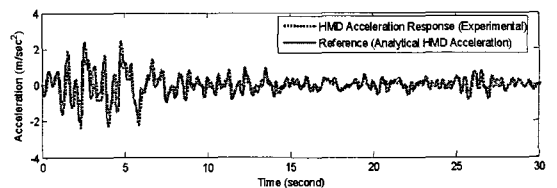


그림 13 유사 지진가진시스템으로 생성한 HMD가속도의 시간이력과 HMD 가속도의 측정결과 (HMD 동적특성 보상)

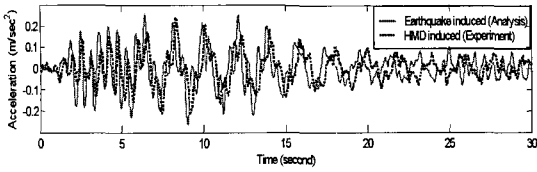


그림 14 5층의 EI Centro 지진 가속도 응답의 시간이력

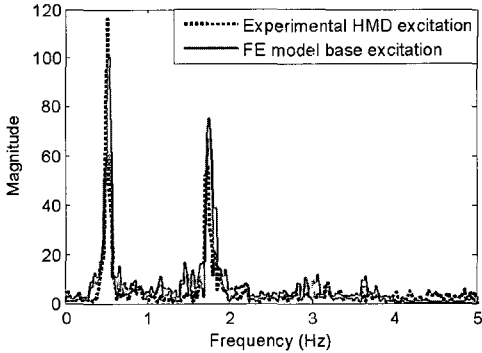


그림 15 EI Centro 지진의 수치해석모델 지진응답과 유사지진 가진시스템의 실험결과 비교 (목표응답 5층바닥 가속도)

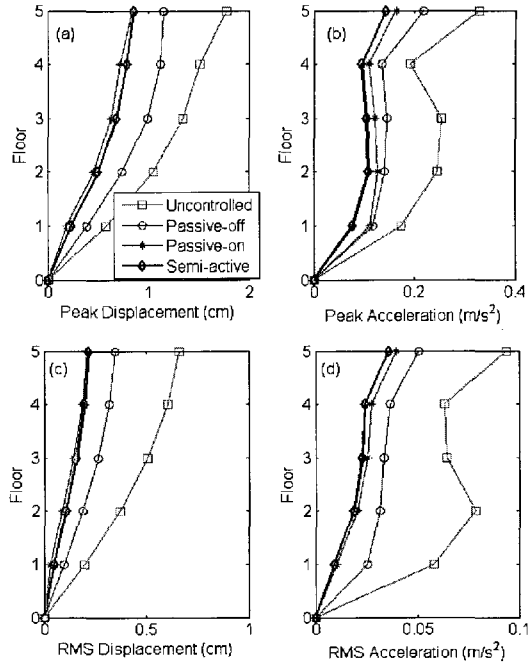


그림 16 각 층별 동적응답 제어성능

을 보여준다. 수치해석 모델의 응답과 초기응답에는 잘 일치하나 수치해석 결과와 20초 이후의 후반부에서 위상이 바뀌는 경향을 보인다. 이것은 지진하중을 받는 구조물에서는 위상보다는 최대응답이 중요하게 평가되므로 HMD제어기 설계에 있어서 위상을 최적화하는 조건보다는 제어기의 안정성과 증폭에 대한 구속조건을 적용한 결과라 사료된다.

그림 15는 EI Centro 지진의 수치해석 모델 지진응답과 HMD 유사지진 가진시스템의 실험결과의 주파수영역 결과를 보여준다. 실험결과는 대체적으로 일치하며, 1차 모드와 2차 모드 특성을 비교적 정확히 반영하고 있는 것을 보인다.

유사지진 가진시스템에 의해 생성된 EI Centro 지진에 대한 개발된 대형 MR 감쇠장치가 설치된 실물크기 5층 구조물의 지진응답제어 성능을 수치해석을 통해 수행되었다. 제어성능 평가를 위한 동적응답은 각 층의 최대상대변위, RMS상대변위, 최대절대가속도, RMS절대가속도이다. 앞에서 개발된 대형 MR 감쇠장치는 2.0 A의 전류가 공급될 때 2890 N의 제어력을 생성하는 것으로 나타났다. 항상 최대 제어력을 생성하는 passive-on과 전류가 공급되지 않을 때의 passive-off, MR 감쇠장치가 설치되지 않았을 때를 uncontrolled 그리고, MR 감쇠장치

가 구조물의 1층 속도에 의해 가변 제어력을 생성하는 semi-active에 의한 제어성능비교가 그림 16에 나타나 있다. 그 결과 passive-on은 변위응답제어에 있어서는 가장 좋은 제어성능을 보이며, semi-active 보다 근소한 차이로 제어성능이 좋은 것으로 나타났다. 그러나 가속도 응답제어에 있어서는 semi-active가 각층에 대해 우수한 제어성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

6. 맺음말

실물크기 5층 구조물에 적합하게 제작된 MR 감쇠장치의 성능 평가가 시스템 식별법을 통해 얻어진 실제 구조물의 데이터와 실제 구조물 5층에 설치된 HMD를 통해 구현된 EI Centro 지진에 기초하여 수치해석으로 수행되었다. MR 감쇠장치가 설치된 5층 구조물의 지진 제어성능이 유사지진 가진시스템에 의해 구현된 EI Centro 지진과 자체 제작된 MR 감쇠장치의 용량에 기초한 수치해석결과 효율적임을 확인할 수 있었다. 특히, 가속도 제어성능에 있어서는 semi-active가 가장 효율적이고, 변위제어성능에 있어서는 passive-on과 semi-active가 동등한 성능을 나타냈다. □