

지진특성에 따른 MR 감쇠기가 설치된 단자유도 구조물의 등가감쇠비

Equivalent damping ratio based on earthquake characteristics of a SDOF structure with an MR damper.

문병욱*·박지훈**·이성경***·민경원†

Byoung-Wook Moon, Ji-Hun Park, Sung-Kyung Lee and Kyung-Won Min

Key Words : MR damper(MR 댐퍼), equivalent damping ratio(등가감쇠비), earthquake(지진)

ABSTRACT

Seismic control performance of MR dampers, which have severe nonlinearity, differs with respect to the dynamic characteristics of an earthquake such as magnitude, frequency and duration. In this study, the effects of excitation characteristics on the equivalent linear system of a building structure with the MR damper are investigated through numerical analysis for artificial ground motions generated from different response spectrums. The equivalent damping ratio of the structure with the MR damper is calculated using Newmark and Hall's equations for ground motion amplification factors. It is found that the equivalent damping ratio of the structure with the MR damper is dependent on the ratio of the maximum friction force of the MR damper over excitation magnitude. Frequency contents of the earthquake ground motion affects the equivalent damping ratio of long-period structures considerably. Also, additional damping effect caused by interaction between the viscosity and friction of the MR damper is observed. Finally, response reduction factors for equivalent linear systems are proposed in order to improve accuracy in the prediction of the actual nonlinear response.

1. 서 론

1940년대 후반에 발견된 MR유체(magnetorheological fluid)는 자기장의 변화에 의해서 고체의 성질을 가질 수 있는 유체로서 다양한 분야의 제진 또는 충격흡수 장치에 적용되어 오고 있다. MR감쇠기는 자기장의 변화를 통해 제어력의 크기를 변화시킬 수 있다는 점과 자기장에 관계 없이 제어시스템의 안정성이 유지된다는 장점 때문에 유망한 준능동제어장치(semi-active control device)로서 최근 들어 건축토목 분야에서 연구와 적용이 증가하고 있다.⁽¹⁾ MR감쇠기는 기본적으로 마찰감쇠와 점성감쇠의 두 가지 성질을 모두 갖는 것으로 알려져 있다. MR감쇠기의 거동을 모사하기 위해 단순히 Coulomb 감쇠와 점성감쇠가 병렬로 연결된 Bingham 모델부터 미분방정식을 사용해 보다 정밀한 모델링이 가능한 Bouc-Wen 모델 및 수정 Bouc-Wen 모델에 이르기 까지 다양한 수치해석 모델이

개발되어 왔다.⁽²⁾ 또한 자기장이 없을 경우에는 점성감쇠의 성질만을 갖지만 자기장의 강도에 따라서 마찰력의 크기가 증가하는 성질을 이용해서 clipped optimal control, Lyapunov control, decentralized bang-bang control 등의 다양한 제어 알고리즘이 적용되어왔다.⁽³⁾

MR감쇠기는 강한 비선형성을 갖기 때문에 해석 및 설계에 있어서 상당히 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 따라서 MR감쇠기가 설치된 구조물의 등가감쇠비를 사용한다면 초기 설계 단계에서 드는 시간과 노력을 크게 절감할 수 있다. 즉 구조물에 요구되는 고유진동수와 감쇠를 찾고 이를 만족할 수 있는 MR감쇠기의 설계변수를 결정하는 것이다. 그러나 건축, 토목 구조물에 작용하는 동적하중은 그 확률적 특성으로 인해 정확한 예측이 불가능하므로 하중의 여러 특성에 대비한 설계가 필요하다고 할 수 있다. 특히 MR감쇠기는 그 비선형성으로 인해 하중의 특성에 따라서 상이한 제어효과를 나타내게 되며 그에 따라 등가감쇠비도 변화하게 된다. 본 연구에서는 지진하중의 특성을 크기와, 진동수 성분으로 나누고 수치해석을 통해 하중의 특성이 MR감쇠기가 설치된 구조물의 등가감쇠비에 미치는 영향을 분석한다. 구조물은 선형탄성으로 가정하며 MR감쇠기는 내재된 마찰감쇠와 점성감쇠의 상호작용 효과를 검토하기

† 교신저자, 단국대학교 건축공학과, 부교수
E-mail : kwmin@dankook.ac.kr
Tel : (031) 8005-3734, Fax : (031)8005-3741
* 단국대학교 건축공학과, 박사과정
*** 단국대학교 건축공학과, 연구전임강사
** 인천대학교 건축공학과, 전임강사

위해 가장 단순한 형태인 Bingham 모델을 사용한다. 구조물의 고유주기 별로 MR감쇠기의 효율성을 검토하고, 중요한 MR감쇠기 설계변수인 최대마찰력의 크기와 하중의 크기 및 진동수성분 사이의 상호관계를 고찰하도록 한다.

2. 수치해석 조건

MR감쇠기는 마찰과 점성을 모두 갖고 있으며 이를 모델링하기 위한 다양한 모델이 존재한다. 본 연구에서는 MR감쇠기의 여러 수치해석 모델 가운데 가장 간단한 형태인 Bingham 모델을 사용한다. Bingham 모델을 사용한 것은 그림 1과 같이 Coulomb감쇠와 점성감쇠가 병렬로 연결된 형태를 가지는 가장 단순한 모델이기 때문에 다른 복잡한 모델에 비해 마찰감쇠와 점성감쇠의 상호작용 결과를 검토하는데 적절한 것으로 판단되었기 때문이다.

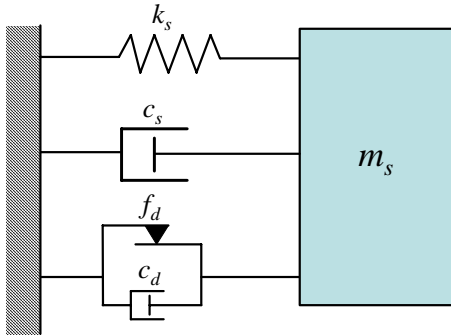


Fig. 1 SDOF system with MR damper

구조물과 MR감쇠기의 속성을 표1과 같이 결정하고 수치해석을 수행하였다. 여기서 MR감쇠기의 최대마찰력은 구조물이 강제운동 시에 발생하는 최대관성력을 기준으로 정규화 하였으며, 이를 0.1부터 0.8까지 0.1씩 증가시켜가며 해석하였고, 이후에는 R_f 로 표기하도록 한다. MR감쇠기의 점성감쇠는 각각의 고유주기에 대하여 대상구조물의 감쇠비 0%, 2% 및 5%에 해당되는 값을 사용하였다.

Table 1. Properties of structures and MR dampers for numerical analysis

	Mass [kgf]	1.0
Structure	Natural period, T_n [sec]	0.2, 0.4, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0
	Damping ratio, β_s [%]	5
MR damper	Normalized friction force, R_f	From 0.01 to 0.1: increasing by 0.01 From 0.1 to 0.2 @ 0.02
	Viscous damping, β_d [%]	0, 2, 5

3. 실험 구조물

본 연구에는 수치해석으로 계산된 등가감쇠비를 검증하기 위하여 그림 2와 같이 단자유도 구조물에 LORD사에서 제작한 소형MR 감쇠기를 설치하여 실험을 수행하였다. 실험에서는 구조물의 강성과 질량을 조절하여 표 2와 같이 3가지의 주기를 가지는 실험체를 이용하였다. 다만 주기 변화에 따른 감쇠비의 변화를 살펴보기 위해 다양한 고유주기를 갖는 구조물이 실험에 필요하지만, MR감쇠기의 최대 제어력 범위와 구조물의 강성 및 질량 등의 제한 조건에 의해 3가지 주기에 대하여 실험을 수행하였다.

본 실험에서 사용된 LORD사의 소형 MR감쇠기는 그림 3과 같이 일정 구간에서 전류에 따른 최대정지마찰력이 비례하도록 설계 되어있다. MR감쇠기는 전류가 공급되지 않는 상태인 passive off의 경우 9N이고 전류에 따라 최대 100N까지 나타나며 본 실험에서는 총 6가지(전류가 0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 일 때) 경우에 대하여 실험을 수행하였다.

Table 2. Properties of structures for experiment

No.	Mass [kgf]	Stiffness [N/m]	Natural period [sec]
1	157.8	648.3	9.8
2	125.5	747.9	0.81
3	58.2	912.0	0.5

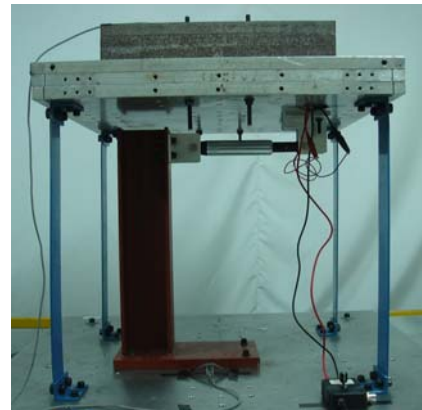


Fig. 2 Setup of a SDOF with the MR damper

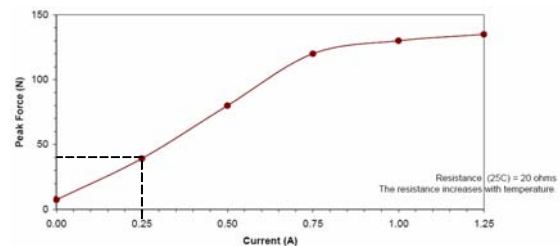


Fig. 3 Peak force and current of the MR damper

4. 지진하중

지진하중은 ATC-40에서 정의하고 있는 탄성응답스펙트럼을 기준으로 생성한 인공지진을 사용하였다.⁽⁴⁾ 사용된 응답스펙트럼은 다음 식과 같다.

$$S_a = \begin{cases} C_A(1 + 1.5T/T_A) & (T < T_A) \\ 2.5C_A & (T_A < T < T_S) \\ C_V/T & (T > T_S) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $T_S = C_V/(2.5C_A)$; $T_A = 0.2T_S$

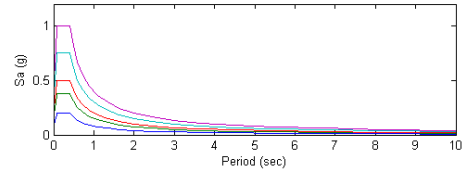
하중 크기는 EPA(effective peak acceleration)을 나타내는 지진계수 C_A 에 의해 결정되는 것으로 설정하였다. ATC-40에서는 진동강도(shaking intensity)가 0.4 이하인 지반에 대해서 C_A 가 0.08에서 0.44까지 정해져 있고 C_V 와 C_A 의 비율은 1.0과 2.67 사이의 값을 갖는다. 탄성응답스펙트럼에서 C_V 는 장주기구간의 크기를 C_A 는 단주기구간의 크기를 나타내므로 지진계수비 C_V/C_A 은 하중의 진동수특성을 나타내는 변수이다. ATC-40에서 C_V/C_A 가 1.0인 경우는 단단한 지반이면서 근거리 지진인 경우를, 2.67인 경우는 연약지반이면서 원거리 지진인 경우에 해당된다. 연구 사용된 지진계수의 조합을 정리하면 표 3과 같고 그림 4는 사용된 응답스펙트럼을 나타낸다. 인공지진생성 소프트웨어인 SIMQKE를 사용하여 응답스펙트럼으로부터 지반가속도를 생성하였으며 최대지반가속도는 C_A 와 동일한 값을 갖도록 설정하였다.⁽⁵⁾ 지반운동의 비정상성(non-stationarity)을 모델링하기 위해서 Jennings가 제시한 다음 포락곡선을 사용하였다.⁽⁶⁾

$$f_{env}(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & (t < t_1) \\ 1 & (t_1 \leq t < t_2) \\ e^{-c(t-t_2)^2} & (t_2 \leq t) \end{cases} \quad (2)$$

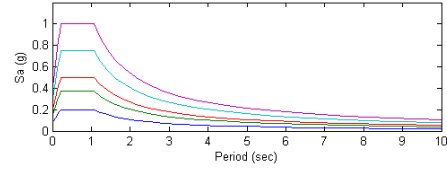
여기서 $t_1 = 4$ sec, $t_2 = 14$ sec, $c = 0.1$ 이며, 포락곡선과 지반가속도의 대표적인 시간이력은 그림 5와 같다. 표 3에 나타난 지진계수 조합에 대해서 각각 5개의 지반가속도를 생성하였다.

Table 3 Seismic coefficients for artificial earthquake

$C_A \backslash C_V/C_A$	0.08	0.15	0.20	0.30	0.40
1.0	0.08	0.15	0.20	0.30	0.40
2.67	0.21	0.40	0.53	0.80	1.07



(a) $C_V/C_A = 1.0$



(b) $C_V/C_A = 2.67$

Fig. 4 Elastic response spectra for pseudo acceleration

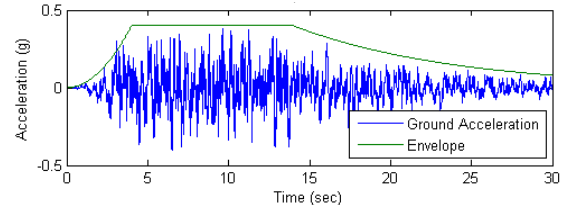


Fig. 5 Artificial ground acceleration and envelope function

진동대를 이용한 가진실험에서는 진동대의 최대가진 가속도와 최대변위를 넘지 않도록 지진파에 0.12를 곱하여 가속도 크기를 줄였다.

4. 등가감쇠비

설치용 부재가 강체이고 MR감쇠의 마찰력이 Coulomb의 법칙을 따른다면 MR감쇠기에 발생하는 힘은 양단의 상대속도에만 의존하게 되므로 원 구조물의 강성에 영향을 주지 않고 감쇠만을 증가시킨다. 따라서 MR감쇠기로 인한 구조물의 고유진동수에는 변화가 없는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 등가선형시스템을 구성하기 위해서는 등가감쇠비만을 필요로 하게 된다. 본 연구에서는 ATC-40의 능력스펙트럼법에서 사용하는 것과 마찬가지로, Newmark와 Hall이 제시한 지반운동 증폭계수를 사용해서 등가감쇠비를 계산하였다.⁽⁷⁾ 먼저 각각의 지진계수별로 생성된 5개의 지반가속도에 대해서 비선형시간이력해석을 수행하였다. 이로부터 평균최대변위를 계산하고 이에 상응하는 평균최대사속도와 평균최대사가속도를 계산하였다. 탄성설계스펙트럼의 가속도민감구간 및 속도민감구간과 비교하여 의사속도 및 의사가속도의 감소율을 계산한 뒤에 Newmark와 Hall에 의해 제시된 응답감소율에 기초한 다음 식(ATC-40, 1996)을 사용해서 감쇠비를 역으로 계산할 수 있다. 본 연구에서는 최소자승법을 이용한 회귀분석을 통해 인공지진파에 대한

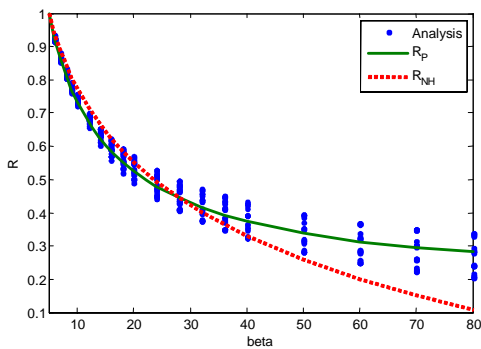
새로운 응답저감계수식을 다음과 같이 제안 하였다.

$$R = \alpha_0 + \alpha_1 \log \beta + \alpha_2 (\log \beta)^2 \quad (3)$$

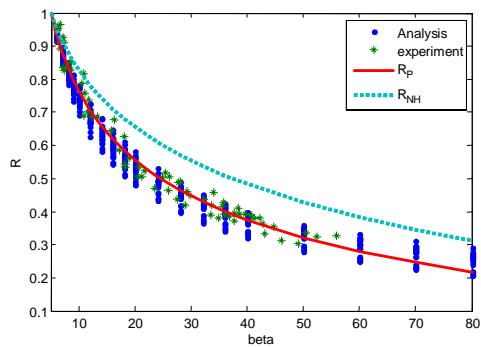
여기서 β 는 등가감쇠비이고 α_0 , α_1 그리고 α_2 는 표 4에 나타난 상수이다. 제안된 식에서는 2차항의 계수가 추가되었으며 C_V/C_A 에 따라 각각 다른 계수를 나타내고 있다. 등가감쇠비를 계산할 때 이용되는 응답저감계수는 가속도 민감구역, 속도 민감구역에 따라 2개의 식으로 제안되어져 있다. 본 연구에서는 식(3)에 의한 2개의 결과 중 작은값을 사용하여 등가감쇠비를 계산하였다.

Table 4. Constants in response reduction factors

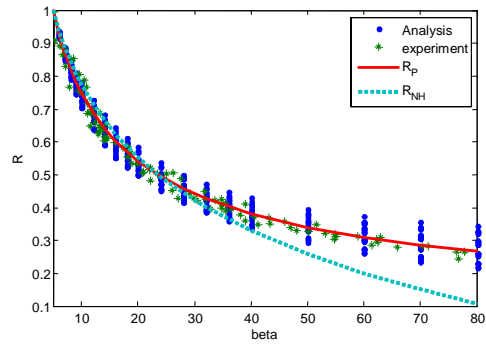
	Period Range	α_0	α_1	α_2
Newmark & Hall	Acceleration sensitive	1.51	-0.321	0
	Velocity sensitive	1.40	-0.249	0
This Study ($C_V/C_A = 1.00$)	Acceleration sensitive	1.84	-0.620	0.0603
	Velocity sensitive	1.65	-0.446	0.0273
This Study ($C_V/C_A = 2.67$)	Acceleration sensitive	1.76	-0.550	0.0477
	Velocity sensitive	1.58	-0.386	0.0172



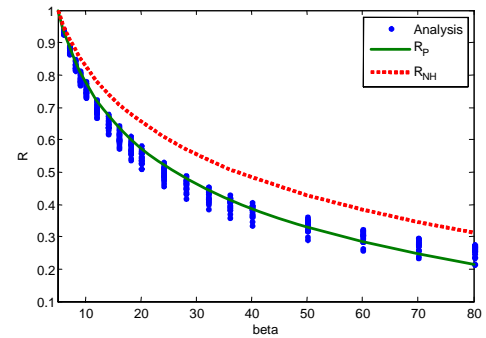
(a) For acceleration-sensitive period range ($C_V/C_A=1.00$)



(b) For velocity-sensitive period range ($C_V/C_A=1.00$)



(c) For acceleration-sensitive period range ($C_V/C_A=2.67$)



(d) For velocity-sensitive period range ($C_V/C_A=2.67$)

Fig. 6 Response reduction factors ($\beta_s = 0.00$, RNH: Newmark & Hall, RP: proposed)

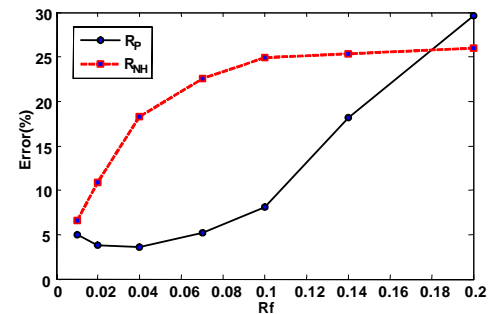


Fig. 7 Maximum peak displacement errors with respect to the normalized friction force

그림 6에서 R_{NH} 는 Newmark와 Hall이 제시한 식이고, R_P 는 본 연구를 통해 제안된 식이다. 그림 6에서 나타난바와 같이 속도민감구역에서는 Newmark와 Hall이 제시한 식의 오차가 매우 큰 것으로 나타났다. 반면에 실험과 해석에 의한 계산된 등가감쇠비는 제안된 식에 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

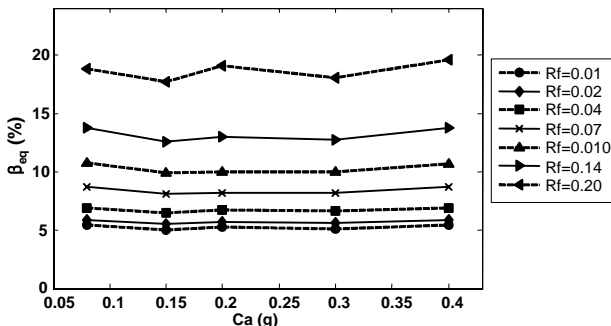
응답저감계수를 이용한 등가감쇠비 산정의 적합성을 확인하기 위하여 등가선형 시스템과 MR감쇠기가 설치된 구조물 즉 비선형 구조물의 최대변위응답의 오차를 비교하여 그림 7에 나타내었다. R_f 가 커짐에 따라 비선형성이 커지므로 오차가 증가하게 된다. 하지만 제안된 응답저감계수는 R_f 가

0.1이하 일 때는 오차율이 10% 미만으로 나타났다.

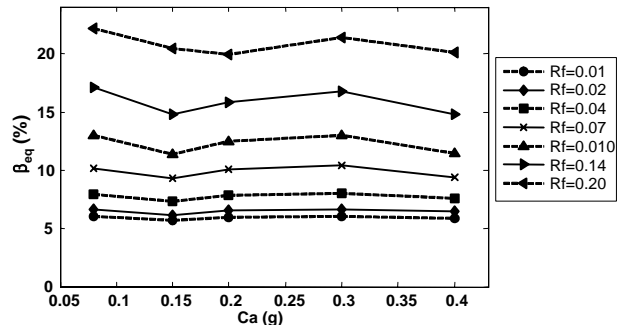
5. 가진하중 특성에 따른 등가감쇠비의 영향

먼저 등가감쇠비에 대한 가진크기의 영향을 살펴보기 위해서 지진계수 C_A 에 따른 등가감쇠비의 변화 양상을 그림 8에 나타내었다. 단, 여기서 MR 감쇠기의 점성감쇠는 0으로 가정하고 있다. 등가감쇠비는 지진계수 C_A 에 대해서는 거의 변화가 없고 정규화된 최대마찰력 R_f 에 의해서만 변화함을 볼 수 있다. 즉, MR감쇠기의 등가감쇠비는 가진하중과 최대마찰력의 상대적인 비율에 의해 결정되며 구조물의 중량과 가진하중의 비율에는 거의 영향을 받지 않는다. 그림 8(a)는 단주기 구조물($T_n = 0.2$ sec)의 지진계수비 $C_V/C_A = 1.0$ 인 지진에 대한 응답이며, (b)는 장주기 구조물($T_n = 2.0$ sec)의 지진계수비 $C_V/C_A = 2.67$ 인 지진에 대한 응답이나, 기타의 고유주기와 지진계수비의 조합에 대해서도 동일 경향이 나타남을 확인하였다.

다음으로는 MR감쇠기가 설치된 구조물의 고유주기에 따른 등가감쇠비의 차이를 살펴보기 위해서 지진계수 $C_A = 0.08$ 인 경우에 대한 등가감쇠비를 지진계수비 별로 그림 9에 나타내었다. 지진하중의 크기를 나타내는 C_A 가 0.08로 고정되어 있으므로 $C_V/C_A = 1.0$ 인 경우에는 동일한 최대마찰력 내지는 동일한 용량의 MR감쇠기에 대해서 단주기 구조물에 비해 장주기 구조물이 월등히 큰 등가감쇠비를 획득하게 된다고 할 수 있다. $C_V/C_A = 2.67$ 인 경우에도 장주기 구조물의 등가감쇠비가 단주기 영역에 비해서 상당히 증가하기는 하나 $C_V/C_A = 1.0$ 인 경우보다 훨씬 작은 수준임을 알 수 있다. 따라서 동일한 최대지반가속도를 갖는 지진이라고 하더라도 진동수 성분에 따라서 MR감쇠기의 성능에 차이가 발생함을 알 수 있다. 또한 단주기($T_n = 0.2$ sec) 영역으로 근접할수록 지진의 진동수 성분에 따른 등가감쇠비의 차이가 작아지는데 이는 기본적으로 단주기 영역에서 MR감쇠기가 큰 성능을 발휘하지 못하는데 원인이 있다고 사료된다. 그림 9에서는 $C_A = 0.08$ 인 경우를 나타내고 있으나 다른 C_A 값에 대해서도 동일한 경향을 얻을 수 있었다.

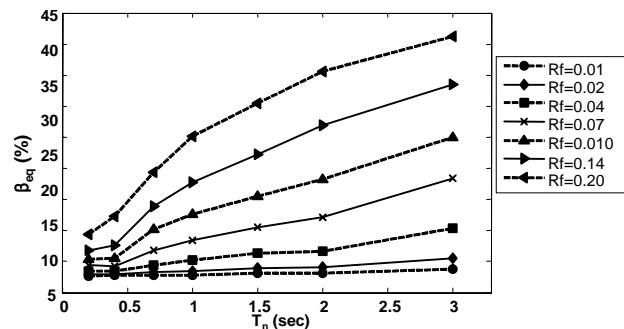


(a) $T_n = 0.2$ sec, $C_V/C_A = 1.0$

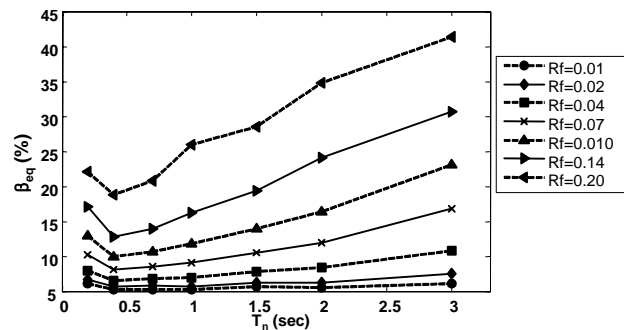


(b) $T_n = 2.0$ sec, $C_V/C_A = 2.67$

Fig. 8 Equivalent damping ratio with respect to the excitation magnitude ($\beta_d = 0$)



(a) $C_V/C_A = 1.0$



(b) $C_V/C_A = 2.67$

Fig. 9 Equivalent damping ratio with respect to the natural period ($C_A = 0.08$, $\beta_d = 0$)

앞에서는 MR감쇠기의 점성이 0인 것으로 가정하였으나 실제로는 MR감쇠기에 점성이 존재한다. 여기서는 MR감쇠기의 마찰감쇠와 점성감쇠가 동시에 작용하는 경우에 발생하는 감쇠비의 증가량이 각각에 의한 산술합과 동일한지를 알아본다. 이를 위해 MR감쇠기의 점성이 등가감쇠비 2% 및 5%에 해당하는 경우에 대해 수치해석을 수행하고 등가감쇠비를 구하여 점성이 0인 경우의 등가감쇠비와 비교하였으며 그림 10에 나타내었다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 단

주기 구조물에서는 점성에 의한 등가감쇠비 증가량이 단순히 점성만 작용할 경우의 등가감쇠비 증가량과 유사하다. 그러나 고유주기가 길어지면 점성에 의한 등가감쇠비 증가량이 단순히 점성만 작용할 경우의 등가감쇠비에 비해 크게 증가함을 볼 수 있다. 등가감쇠비의 증가량은 $T_n = 2.0$, $C_V/C_A = 1.0$ 인 경우를 제외하면 최대마찰력이 클수록 증가하는 경향이 있다. 또한 등가감쇠비 증가량이 가장 큰 고유주기는 지진계수비가 1.0 및 2.7인 경우에 각각 0.8 및 2.0 sec로 나타나서 마찰감쇠와 점성감쇠의 상호작용이 가진입력의 진동수 성분의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

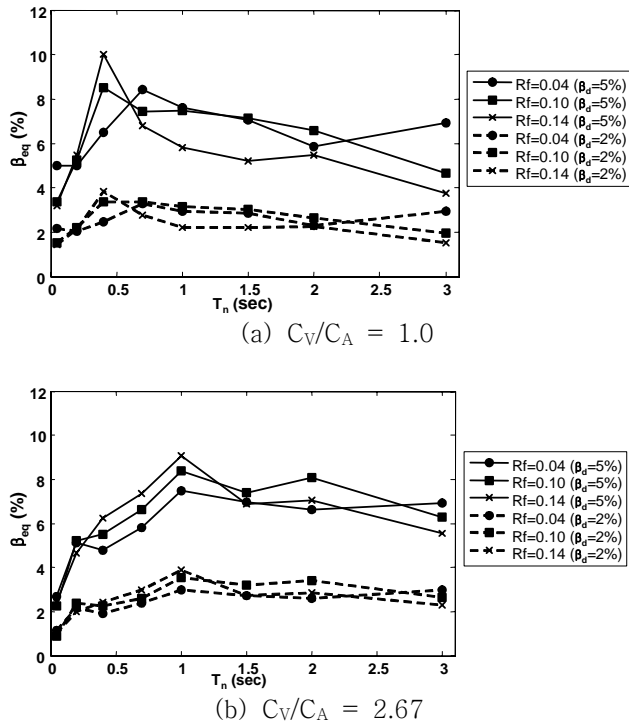


Fig. 10 Increment of equivalent damping ratio by the viscous damping in the MR damper ($C_V=0.08$)

4. 결론

본 연구에서는 가진하중의 특성이 MR감쇠기가 설치된 구조물의 등가선형 시스템에 미치는 영향을 연구하였다. 상이한 크기와 진동수성분을 갖는 인공지진을 대상으로 여러 가지 구조물의 고유주기와 MR감쇠기의 설계변수에 대해 수치해석과 실험을 수행하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) MR감쇠기의 등가감쇠비는 가진하중과 최대마찰력의 상대적인 비율에 의해 결정되며 구조물의 중량과 가진하중의 비율에는 큰 영향을 받지 않는다.

2) 동일한 최대지반가속도를 갖는 지진이라고 하더라도 진동수 성분에 따라서 MR감쇠기에 의한 등가감쇠비에 차이

가 발생한다.

3) 장주기 구조물의 경우에 공진 진동수성분의 비중이 큰 지진이 작용하면 변위응답의 증가로 인해 소산에너지 대비 변형에너지의 비중이 증가하여 등가감쇠비가 감소한다.

4) MR감쇠기의 점성은 마찰감쇠와의 상호작용에 의해 단순한 산술합 이상의 감쇠비 증가효과를 가져온다.

5) 등가선형 시스템의 최대응답 오차분석 결과에 기초하여 비선형해석에서 얻어진 등가감쇠비와 등가선형시스템의 응답저감계수간의 경험식을 제시하였으며 등가감쇠비 산출에 적용함으로써 응답예측 오차를 크게 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업(R11-2002-101-03004-0) 및 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(05산학연C103A2000010-05A0200-00510)에 의한 것으로서 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Jung, H.-J., Spencer, Jr, B.F., Ni, Y.Q., Lee, I.-W., "State-of-the-art of semiactive control systems using MR fluid dampers in civil engineering applications", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 17, No. 3-4, 2004, pp. 493-526.
- (2) Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K., Carlson, J.D., "Phenomenological model for magnetorheological dampers", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 3, 1997, pp. 230-238.
- (3) Jansen, L.M., Dyke, S.J., "Semiactive control strategies for MR dampers: Comparative study", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126, No. 8, 2000, pp. 795-803.
- (4) ATC, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
- (5) Vanmarcke, E.H., Gasparini, D.A., SIMQKE User's Manual and Document, Division of Advanced Environmental Research and Technology, MIT, 1976.
- (6) Clough, R.W., Penzien, J., Dynamics of Structures, McGraw-Hill, Singapore, 1993.
- (7) Newmark, N.M., Hall, W.J., Earthquake Spectra and Design, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, 1982.