

MR감쇠기가 설치된 구조물의 등가선형 시스템에 대한 가진 특성의 영향

Effects of excitation characteristics on the equivalent linear system of a building structure with MR dampers

박지훈*
Ji-Hun Park

민경원**
Kyung-Won Min

문병욱***
Byoung-Wook Moon

박은천****
Eun-Churn Park

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 an MR damper are investigated through numerical analysis for artificial ground motions generated from different response spectrums. The equivalent damping ratio of the structure with an 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.

1. 서론

MR유체(magnetorheological fluid)는 자기장의 변화에 의해서 고체의 성질을 가질 수 있는 유체로서 1940년대 후반에 발견되어 다양한 분야의 제진 또는 충격흡수 장치에 적용되어 오고 있다. MR감쇠기는 자기장의 변화를 통해 제어력의 크기를 변화시킬수 있다는 점과 자기장에 관계없이

* 단국대학교 리모델링연구소, 연구전임강사

** 단국대학교 건축공학과, 부교수

*** 단국대학교 건축공학과, 박사과정

**** 단국대학교 건축공학과, 석사과정

제어시스템의 안정성이 유지된다는 장점 때문에 유망한 준능동제어장치(semi-active control device)로서 최근들어 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 적용되어 왔다.⁽³⁾

MR감쇠기는 강한 비선형성을 갖기 때문에 해석 및 설계에 있어서 상당히 많은 시간과 노력이 필요로 한다. 따라서 MR감쇠기가 설치된 구조물의 등가선형 시스템을 사용한다면 초기설계 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 따라서는 상이한 제어효과를 나타내게 되며 그에 따라 등가선형 시스템도 변화하게 된다. 본 연구에서는 지진하중의 특성을 크기와, 진동수 성분으로 나누고 수치해석을 통해 하중의 특성이 MR감쇠기가 설치된 구조물의 등가선형시스템에 미치는 영향을 분석한다. 구조물은 선형탄성으로 가정하며 MR감쇠기는 내재된 마찰감쇠와 점성감쇠의 상호작용 효과를 검토하기 위해 가장 단순한 형태인 Bingham 모델을 사용한다. 구조물의 고유주기 별로 MR감쇠기의 효율성을 검토하고, 중요한 MR 감쇠기 설계변수인 최대마찰력의 크기와 하중의 크기 및 진동수성분 사이의 상호관계를 고찰하도록 한다.

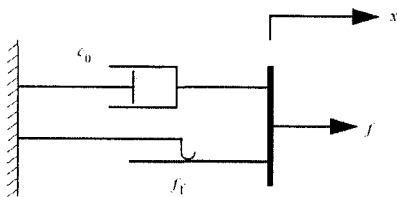


그림 1 MR 감쇠기의 Bingham 모델

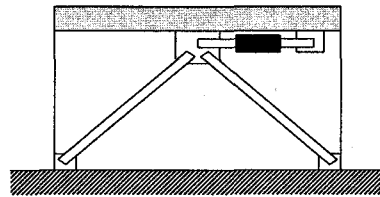


그림 2 MR 감쇠기가 설치된 단자유도 구조물

2. MR감쇠기의 모델링

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. 그림 2는 MR 감쇠기가 설치된 단자유도 구조물을 나타내며, 감쇠기 설치에 사용되는 가새는 강체이고 구조물의 거동은 선형탄성

인 것으로 가정하였다.

3. 지진하중

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

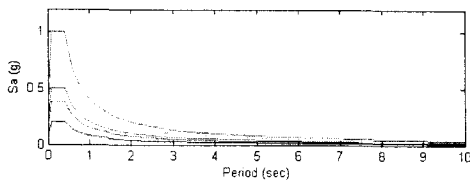
$$S_u = \begin{cases} C_A(1 + 1.5T/T_A) & (T < T_A) \\ C_A & (T_A < T < T_S) \\ C_V/T & (T > T_S) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{여기서 } T_S = C_V/(2.5C_A); \quad T_A = 0.2T_S$$

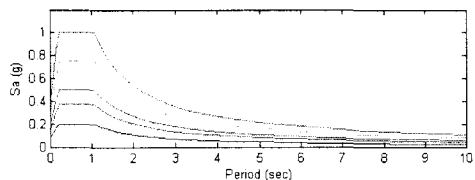
하중 크기는 EPA(effective peak acceleration)을 나타내는 지진계수 C_A 에 의해 결정되는 것으로 설정하였다. ATC-40에서는 진동강도(shaking intensity)가 0.4 이하인 지반에 대해서 C_A 가 0.08에서 0.44까지 정해져 있고 C_V 와 C_A 의 비율은 1.0과 2.67 사이의 값을 갖는다. 탄성응답스펙트럼에서 C_V 는 장주기구간의 크기를 C_A 는 단주기구간의 크기를 나타내므로 지진계수비 C_V/C_A 은 하중의 진동수특성을 나타내는 변수이다. ATC-40에서 C_V/C_A 가 1.0인 경우는 단단한 지반이면서 근거리 지진인 경우를, 2.67인 경우는 연약지반이면서 원거리 지진인 경우에 해당된다. 연구 사용된 지진계수의 조합을 정리하면 표 1과 같고 그림 3은 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 $t_1 = 4\text{sec}$, $t_2 = 14\text{sec}$, $c = 0.1$ 이며, 포락곡선과 하중의 시간이력은 그림 4와 같고 같다. 표 1에 나타난 지진계수 조합에 대해서 각각 5개의 지반가속도를 생성하였다.



(a) $C_V/C_A = 1.0$



(b) $C_V/C_A = 2.67$

그림 3 인공지진의 의사가속도 응답스펙트럼

표 1 지반가속도 생성에 사용된 지진계수 C_V

$C_V/C_A \backslash C_A$	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

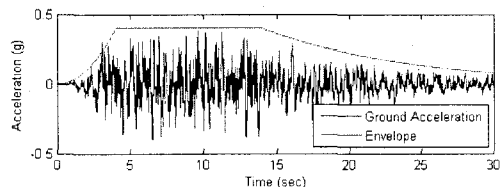


그림 4 인공지진과 포락곡선

4. 등가선형화

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 평균최대의사속도와 평균최대의사가속도를 계산하였다. 탄성설계스펙트럼의 가속도민감 구간 및 속도민감구간과 비교하여 의사속도 및 의사가속도의 감소율을 계산한 뒤에 다음 식(ATC-40, 1996)을 사용해서 감쇠비를 역으로 계산할 수 있다.

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.68 \ln(\beta_{eff})}{2.12} \quad (3)$$

$$SR_V = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}{1.65} \quad (4)$$

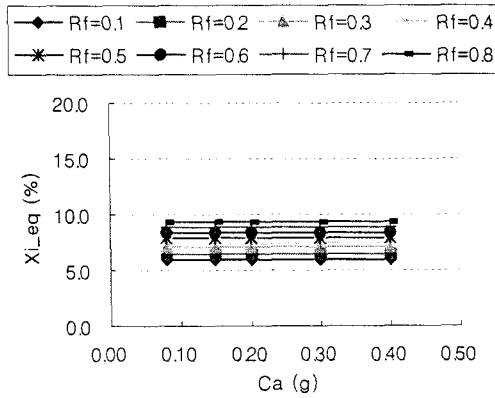
여기서 SR_A 는 의사가속도 감소율, SR_V 는 의사속도 감소율, β_{eff} 는 등가감쇠비이다. 단 ATC-40에서는 구조물의 노후도와 가진의 지속시간에 따라서 응답감소율을 제한하고 있다. 신축건물이면서 가진 지속시간이 짧은 경우에는 SR_A 및 SR_V 를 각각 0.33과 0.50 이상으로 제한하고 있으며, 본 연구에서는 대상 구조물의 탄성거동하는 것으로 가정하고 있으므로 식 (3) 및 (4)로부터 등가감쇠비 계산 시 이들 제한치를 적용하는 것이 타당하다. 결과적으로 식 (3) 및 (4)로부터 계산되는 등가감쇠비는 37.4% 이하로 제한되어야 하며, 이를 초과하는 등가감쇠비는 신뢰할 수 없음을 의미한다. 따라서 등가감쇠비가 이 값을 넘지 않도록 MR감쇠기의 최대마찰력과 점성감쇠의 범위를 결정하였다.

5. 수치해석 결과

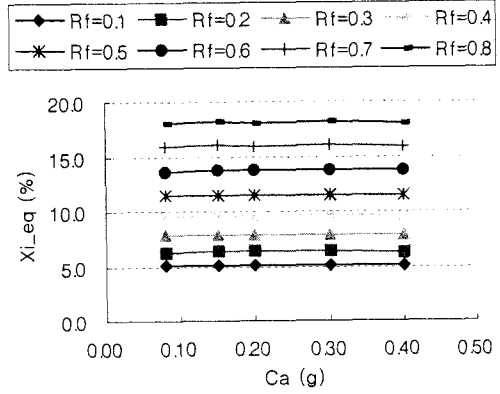
구조물의 고유주기는 0.2, 0.4, 0.8, 1.2 및 2.0 sec로, 감쇠비는 5%로 가정하였다. MR감쇠기의 최대마찰력은 구조물이 강체운동 시에 발생하는 최대판성력을 기준으로 정규화 하였으며, 이를 0.1부터 0.8까지 0.1씩 증가시켜가며 해석하였고, 이후에는 R_f 로 표기하도록 한다. MR감쇠기의 점성감쇠는 각각의 고유주기에 대하여 대상구조물의 감쇠비 0%, 2% 및 5%에 해당되는 값을 사용하였다.

먼저 등가감쇠비에 대한 가진크기의 영향을 살펴보기 위해서 지진계수 C_A 에 따른 등가감쇠비의 변화 양상을 그림 5에 나타내었다. 단, 여기서 MR 감쇠기의 점성감쇠는 0으로 가정하고 있다. 그림 5에서 알 수 있듯이 등가감쇠비는 지진계수 C_A 에 대해서는 거의 변화가 없고 정규화된 최대마찰력 R_f 에 의해서만 변화한다. 다시 말해서 MR감쇠기의 등가감쇠비는 가진하중과 최대마찰력의 상대적인 비율에 의해 결정되며 구조물의 중량과 가진하중의 비율에는 거의 영향을 받지 않는다.

그림 5(a)는 단주기 구조물($T_n = 0.2 \text{ sec}$)의 지진계수비 $C_V/C_A = 1.0$ 인 지진하중에 대한 응답을 나타내고 있으며, (b)는 장주기 구조물($T_n = 2.0 \text{ sec}$)의 지진계수비 $C_V/C_A = 2.67$ 인 지진하중에 대한 응답을 나타내고 있으나, 기타의 고유주기와 지진계수비의 조합에 대해서도 동일한 경향이 나타남을 확인하였다.

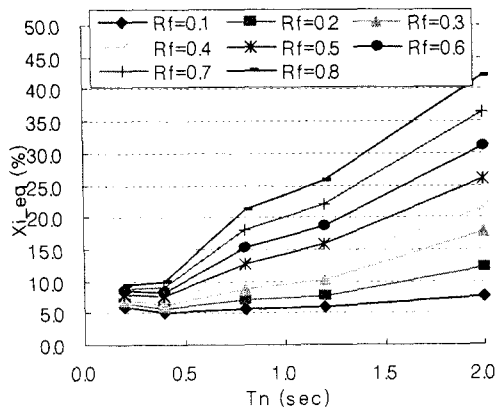


(a) $T_n = 0.2 \text{ sec}$, $C_V/C_A = 1.0$

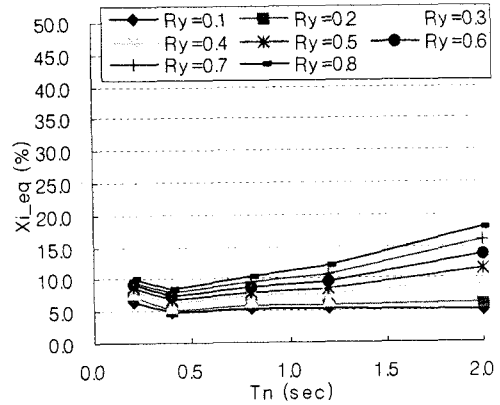


(b) $T_n = 2.0 \text{ sec}$, $C_V/C_A = 2.67$

그림 5 가진크기에 따른 등가감쇠비 변화 (MR감쇠기 점성=0)



(a) $C_V/C_A = 1.0$

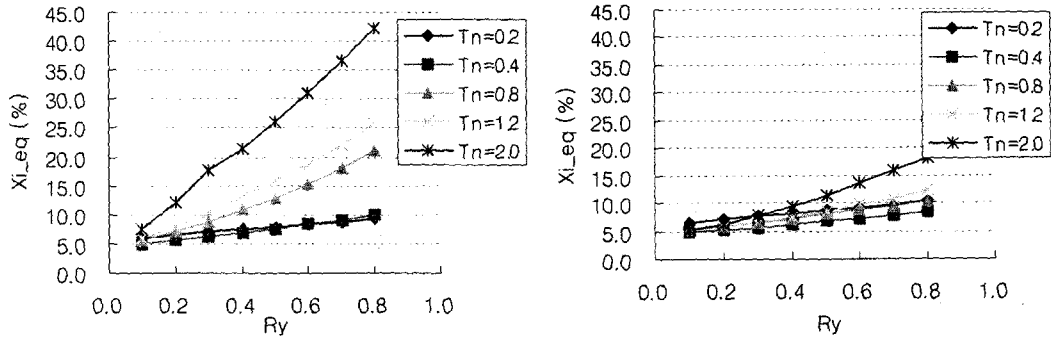


(b) $C_V/C_A = 2.67$

그림 6 고유주기에 따른 등가감쇠비 변화 ($C_A = 0.08$, MR감쇠기 점성 = 0)

다음으로는 MR감쇠기가 설치된 구조물의 고유주기에 따른 등가감쇠비의 차이를 살펴보기 위해서 지진계수 $C_A = 0.8$ 인 경우에 대한 등가감쇠비를 지진계수비 별로 그림 6에 나타내었다. 지진하중의 크기를 나타내는 C_A 가 0.8로 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($T_n=0.2$) 영역으로 근접할수록 지진의 진동수 성분에 따른 등가감쇠비의 차이가 작아지는데 이는 기본적으로 단주기 영역에서 MR감쇠기가 큰 성능을 발휘하지 못하는데 원인이 있다고 사료된다. 그림 6에서는 $C_A = 0.08$ 인 경우를 나타내고 있으나 다른 C_A 값에 대해서도 동일한 경향을 얻을 수 있었다.



(a) $C_V/C_A = 1.0$

(b) $C_V/C_A = 2.67$

그림 7 정규화된 최대마찰력에 따른 등가감쇠비 변화 ($C_A = 0.08$, MR감쇠기 점성 = 0)

다음으로는 MR감쇠기의 정규화된 최대마찰력에 따른 등가감쇠비의 변화를 살펴보기 위해서 지진계수 $C_A = 0.08$ 인 경우에 대해 등가감쇠비를 지진계수비별로 그림 7에 나타내었다. 고유주기가 상대적으로 길고 정규화된 최대마찰력이 큰 구조물에서는 지진계수비가 작을수록 더 큰 등가감쇠비를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 이는 장주기 구조물에서 지진계수비가 커진다는 것은 공진 진동수 영역의 성분이 커짐을 의미하기 때문에 그로인한 변위응답의 증가가 구조물의 변형에너지 증가를 가져오는 반면에 MR감쇠기의 최대마찰력은 제한되어 있으므로 소산에너지는 상대적으로 적게 증가하여 이들 두 에너지의 비에 의해 결정되는 등가감쇠비 증가량이 감소한 것으로 보인다.

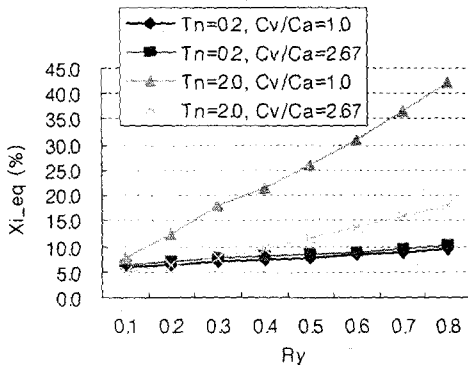


그림 8 진동수 성분에 따른 등가감쇠비 변화 ($C_A = 0.20$, MR감쇠기 점성 = 0)

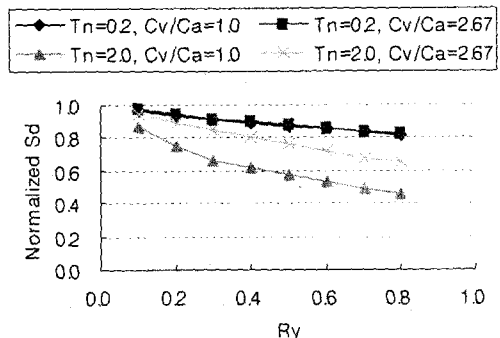


그림 9 정규화된 변위응답 ($C_A = 0.20$, MR감쇠기 점성 = 0)

그림 8는 단주기($T_n=0.2$)와 장주기($T_n=2.0$) 구조물에 대해서 정규화된 최대마찰력에 따른 증가감쇠비 변화양상을 나타내고 있다. 단주기 구조물에 대해서는 정규화된 최대마찰력의 증가가 큰 효과가 없음을 확인할 수 있다. 반면에 장주기 구조물에 대해서는 정규화된 마찰력이 증가할수록 증가감쇠비가 크게 증가하고 있으며, 증가의 정도는 지진계수비가 작을수록 더욱 커짐을 알 수 있다. 그림 9는 단주기($T_n=0.2$)와 장주기($T_n=2.0$) 구조물에 대해서 정규화된 최대마찰력에 따른 변위 응답 변화를 나타내고 있다. 이 그림에서 변위 응답은 MR감쇠기가 설치되지 않은 경우에 대해서 정규화 되었다. MR감쇠기에 의한 변위 응답의 저감효과는 주기가 클수록, 장주기성분이 클수록 더 큰 것으로 나타났다. 고유주기가 2.0 sec인 구조물의 경우에 지진계수비가 2.67배가 되면 동일한 최대변위응답을 얻기 위해서 필요한 최대마찰력은 약 2.5배가 됨을 알 수 있다.

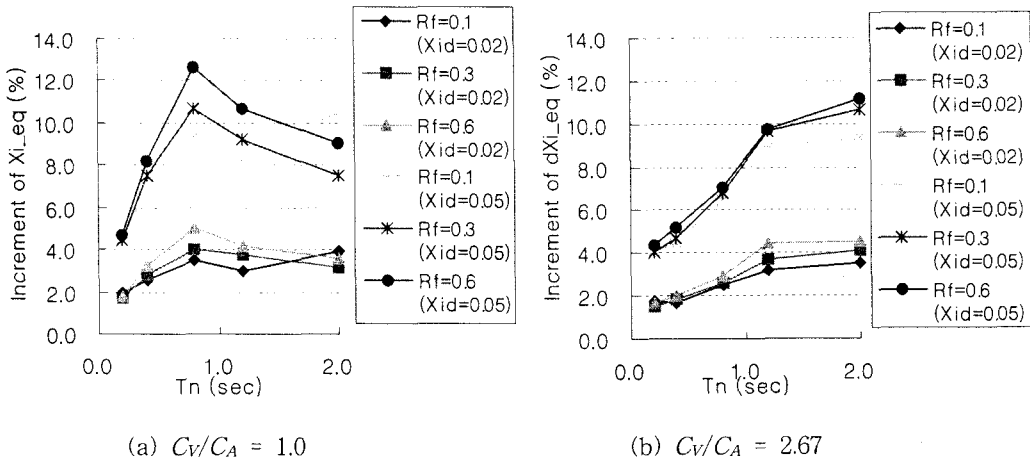


그림 10 MR감쇠기의 점성에 의한 증가감쇠비 증가량 ($C_A = 0.08$, MR감쇠기 점성 = 0)

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 증가감쇠비 2% 및 5%에 해당하는 경우에 대해 수치해석을 수행하고 증가감쇠비를 구하여 점성이 0인 경우의 증가감쇠비와 비교하였으며 그림 10에 나타내었다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 단주기 구조물에서는 점성에 의한 증가감쇠비 증가량이 단순히 점성만 작용할 경우의 증가감쇠비 증가량과 유사하다. 그러나 고유주기가 길어지면 점성에 의한 증가감쇠비 증가량이 단순히 점성만 작용할 경우의 증가감쇠비에 비해 크게 증가함을 볼 수 있다. 증가감쇠비의 증가량은 최대마찰력이 클수록 증가하는 경향이 있다. 또한 증가감쇠비 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.

결론

본 연구에서는 가진하중의 특성이 MR감쇠기가 설치된 구조물의 증가선형 시스템에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 이를 위해 최대지반가속도와 진동수성분이 상이한 인공지진을 생성하였

으며, 다양한 구조물의 고유주기와 MR감쇠기의 최대마찰력 및 점성감쇠의 조합에 대해 수치해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

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

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

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심 기술연구개발사업(C105A1050001-05A0505-00110 및 C103A2000010-03A0200-00910)에 의한 것으로서 지원에 감사드립니다.

참고문헌

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.