

# 지진하중 특성을 고려한 단자유도 구조물에 설치된 MR감쇠장치의 등가선형시스템

## Equivalent Linear System Considering Earthquake Characteristics of MR damper installed in a SDOF

문 병 옥\* · 민 경 원\*\*

Moon, Byoung-Woo · Ri · Min, Kyung-Won

### 요 약

본 논문에서는 MR 감쇠기의 비선형 특성을 등가의 선형감쇠로 치환하기 위한 방법으로 Newmark와 Hall이 제안한 감쇠계수를 이용하였다. 응답스펙트럼의 감쇠율을 나타내는 감쇠계수는 구조물의 최대변위를 이용하여 등가감쇠비를 추출할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 이러한 응답스펙트럼은 구조물에 작용하는 지진하중의 특성에 따라 경향이 달라진다. 본 논문에서는 기존의 등가감쇠비 산정식을 수정하여 제안하고, 지진하중 특성에 따른 등가감쇠비의 변화를 살펴보았다. MR 감쇠기의 등가감쇠비는 가진하중과 최대마찰력의 비율에 따라 결정되며, 장주기 구조물의 경우 등가감쇠비가 감소한다. MR 감쇠기의 점성은 마찰감쇠와의 상호작용에 의해 단순한 산술합 이상의 감쇠비 증가 효과를 가진다.

**keywords** : MR 감쇠기, 등가감쇠비, 가진 특성, 응답스펙트럼

### 1. 서 론

MR감쇠기는 강한 비선형성을 갖기 때문에 해석 및 설계에 있어서 상당히 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 따라서 MR감쇠기가 설치된 구조물의 등가선형 시스템을 사용한다면 초기설계 단계에서 드는 시간과 노력을 크게 절감할 수 있다. 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 등가선형 시스템도 변화하게 된다. 본 연구에서는 지진하중의 특성을 크기와, 진동수 성분으로 나누고 수치해석을 통해 하중의 특성이 MR 감쇠기가 설치된 구조물의 등가선형시스템에 미치는 영향을 분석한다. 구조물은 선형탄성으로 가정하며 MR 감쇠기는 내재된 마찰감쇠와 점성감쇠의 상호작용 효과를 검토하기 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.

\* 단국대학교 건축공학과 박사과정 jumbo13@unitel.co.kr

\*\* 정희원 · 단국대학교 건축공학과 교수 kwmin@dankook.ac.kr

## 2. MR 감쇠기가 설치된 구조물의 해석 모델

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 Coulomb감쇠와 점성감쇠가 병렬로 연결된 형태를 가지는 가장 단순한 모델이기 때문에 다른 복잡한 모델에 비해 마찰감쇠와 점성감쇠의 상호작용 결과를 검토하는데 적절한 것으로 판단되었기 때문이다. 감쇠기 설치에 사용되는 가새는 강체이고 구조물의 거동은 선형탄성인 것으로 가정하였다.

구조물과 MR감쇠기의 속성을 표1과 같이 결정하고 수치해석을 수행하였다. 여기서 MR감쇠기의 최대마찰력은 구조물이 강체운동 시에 발생하는 최대관성력을 기준으로 정규화 하였으며 이후에는  $R_f$ 로 표기하도록 한다.  $R_f$ 는 0.01부터 0.1까지 0.01씩 증가시키고 0.1부터 0.2까지는 0.02씩 증가시켜가며 해석하였다. MR감쇠기의 점성감쇠는 각각의 고유주기에 대하여 대상구조물의 감쇠비 0%, 2% 및 5%에 해당되는 값을 사용하였다.

표 1 해석에 사용된 구조물과 MR감쇠기의 속성

구조물	질량 [kg]	1.0
	고유주기, $T_n$ [sec]	0.2, 0.4, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0
	감쇠비, $\beta_s$ [%]	5
MR 감쇠기	정규화된 마찰력, $R_f$	0.01 ~ 0.1: 0.01 간격 0.1 ~ 0.2: 0.02 간격
	점성감쇠, $\beta_d$ [%]	0, 2, 5

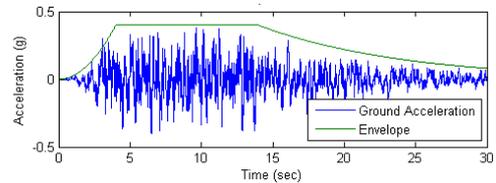


그림 1 인공지진과 포락곡선

## 3. 지진하중

지진하중은 ATC-40에서 정의하고 있는 탄성응답스펙트럼을 기준으로 생성한 인공지진을 사용하였다. 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  $C_V/C_A$ 는 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. 인공지진생성 소프트웨어인 SIMQKE를 사용하여 응답스펙트럼으로부터 지반가속도를 생성하였으며 최대지반가속도는  $C_A$ 와 동일한 값을 갖도록 설정하였다. 지반운동의 비정상성(non-stationarity)을 모델링하기 위해서 Jennings가 제시한 포락곡선을 사용하였다. 포락곡선과 하중의 시간 이력은 그림 1과 같다. 지진계수 조합에 대해서 각각 5개의 지반가속도를 생성하였다.

## 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. 먼저 각각의 지진계수별로 생성된 5개의 지반가속도에 대해서 비선형시간이력해석을 수행하였다. 이로부터 평균최대변위를 계산하고 이에 상응하는 평균최대의사속도와 평균최대의사가속도를 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.

$$R = \alpha_0 + \alpha_1 \log \beta + \alpha_2 (\log \beta)^2 \quad (1)$$

여기서 R은 응답저감계수이고,  $\beta$ 는 등가감쇠비,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  그리고  $\alpha_2$ 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(1)에 의한 2개의 결과 중 작은값을 사용하여 등가감쇠비를 계산하였다.

Table 2. 응답저감계수 식의 상수값

	고유주기 구간	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
Newmark & Hall	가속도 민감구역	1.51	-0.321	0
	속도 민감구역	1.40	-0.249	0
This Study ( $C_V/C_A = 1.00$ )	가속도 민감구역	1.84	-0.620	0.0603
	속도 민감구역	1.65	-0.446	0.0273
This Study ( $C_V/C_A = 2.67$ )	가속도 민감구역	1.76	-0.550	0.0477
	가속도 민감구역	1.58	-0.386	0.0172

## 5. 해석결과

먼저 등가감쇠비에 대한 가진크기의 영향을 살펴보기 위해서 지진계수  $CA$ 에 따른 등가감쇠비의 변화 양상을 분석하였다. 단, 여기서 MR 감쇠기의 점성감쇠는 0으로 가정하고 있다. 등가감쇠비는 지진계수  $CA$ 에 대해서는 거의 변화가 없고 정규화된 최대마찰력  $R_f$ 에 의해서만 변화하는 것으로 나타났다. 즉, MR감쇠기의 등가감쇠비는 가진하중과 최대마찰력의 상대적인 비율에 의해 결정되며 구조물의 중량과 가진하중의 비율에는 거의 영향을 받지 않는다.

다음으로는 MR감쇠기가 설치된 구조물의 고유주기에 따른 등가감쇠비의 차이를 살펴보기 위해서 지진계수  $CA = 0.08$ 인 경우에 대한 등가감쇠비를 지진계수비에 따른 변화 양상을 분석하였다. 지진하중의 크기를 나타내는  $CA$ 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.

MR감쇠기의 마찰감쇠와 점성감쇠가 동시에 작용하는 경우에 발생하는 감쇠비의 증가량이 각각에 의한 산술합과 동일한지를 검토한다. 이를 위해 MR감쇠기의 점성이 증가감쇠비 2% 및 5%에 해당하는 경우에 대해 수치해석을 수행하고 증가감쇠비를 구하여 점성이 0인 경우의 증가감쇠비를 기준으로 각각의 증가량을 비교하였다. 그 결과 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  $T_n = 2.0$ ,  $CV/CA = 1.0$  인 경우를 제외하면 최대마찰력이 클수록 증가하는 경향이 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 가진하중의 특성이 MR감쇠기가 설치된 구조물의 등가선형 시스템에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 이를 위해 최대지반가속도와 진동수성분이 상이한 인공지진을 생성하였으며, 다양한 구조물의 고유주기와 MR감쇠기의 최대마찰력 및 점성감쇠의 조합에 대해 수치해석을 수행하였다.

그 결과를 정리하면, 1) MR감쇠기의 증가감쇠비는 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 증가감쇠비에 차이가 발생한다. 3) 장주기 구조물의 경우에 공진 진동수성분의 비중이 큰 지진이 작용하면 변위응답의 증가로 인해 소산에너지 대비 변형에너지를 비중이 증가하여 증가감쇠비가 감소한다. 4) MR감쇠기의 점성은 마찰감쇠와의 상호작용에 의해 단순한 산술합 이상의 감쇠비 증가효과를 가져온다. 5) 등가선형 시스템의 최대응답 오차분석 결과에 기초하여 비선형해석에서 얻어진 증가감쇠비와 등가선형시스템의 응답저감계수간의 경험식을 제시하였으며 증가감쇠비 산출에 적용함으로써 응답예측 오차를 크게 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업(과제번호: 05 건설핵심 D06)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- Jung, H.-J., Spencer, Jr, B.F., Ni, Y.Q., Lee, I.-W (2004) State-of-the-art of semiactive control systems using MR fluid dampers in civil engineering applications, *Structural Engineering and Mechanics*, 17(3), pp. 493-526.
- Jansen, L.M., Dyke, S.J. (2000) Semiactive control strategies for MR dampers: Comparative study, *Journal of Engineering Mechanics*, 126(8), pp. 795-803.
- Vanmarcke, E.H., Gasparini, D.A. (1976) SIMQKE User's Manual and Document, Division of Advanced Environmental Research and Technology, MIT
- Newmark, N.M., Hall, W.J (1982) *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley