

마찰감쇠기-가새 시스템의 등가선형화 기법에 관한 연구

Equivalent linearization of a Friction Damper and Brace System

민경원* 박지훈** 김대현*** 김형섭**** 문병욱***** 강상훈*****
Kyung-Won Min Ji-Hun Park Dae Hyun Kim Hyung-Seop Kim Byoung-Wook Moon Sang Hoon Kang

Key Words : 마찰감쇠기(Friction Damper), 등가선형화(Equivalent Linearization)

ABSTRACT

An equivalent linearization technique based on Rayleigh peak distribution for friction damper and brace system (FDBS) under stochastic excitation is proposed. For verification, shaking table test of a small scale 3-story building model with the FDBS is conducted for various slip moment levels. Using experimental result, equivalent linearization of the FDBS is conducted based on Rayleigh peak distribution, which is compared with measured peak distribution. For comparative study, model updating technique is applied based on identified modal properties. Finally, complex modal analysis and time history analysis for the obtained equivalent linear systems are conducted and compared with experimental result

1. 서 론

건축, 토목 분야에서도 제진을 목적으로 다양한 감쇠장치 개발되어 실제 적용이 점차 증가하고 있는 추세이다 (Soong and Dargush 1997). 이 가운데 변위의존형 감쇠장치의 일종인 마찰감쇠기는 에너지 소산 메커니즘이 단순하고 설치 및 제작이 단순한 이점을 가지고 있다. 또한 반복 하중에 대한 이력거동이 안정적이고 마찰면에 가해지는 조임력에 의해 최대마찰력을 쉽게 조절할 수 있다. 그러나 마찰감쇠기는 힘-변위관계의 비선형성으로 인해 구조해석 및 설계를 용이하게 할 수 있는 등가선형시스템의 필요성이 대두된다. 마찰감쇠기의 거동은 교대로 발생하는 슬립(slip)과 잠김(lock) 상태가 전체 거동에서 차지하는 상대적인 비중에 따라서 제진효과가 달라지므로 지진, 바람 등의 무작위 하중에 대한 거동을 등가선형화하는데 있어서 확률통계적인 접근이 필요하다.

본 논문에서는 설치용 가새의 강성을 고려하여 마찰감쇠기-가새 시스템의 등가 선형화 기법을 제안한다. 이 방법은 마찰감쇠기-가새 시스템의 변형의 피크 분포를

Rayleigh 분포로 가정하여 유효강성과 유효감쇠를 계산한다. 실험적 검증을 위하여 회전형 마찰감쇠기를 설치한 3층 건물모형을 대상으로 진동대 실험을 수행하였으며 제안된 등가선형화 기법을 시스템 식별 및 모델갱신 기법과 비교한다.

2. 피크분포에 기초한 등가선형화

마찰감쇠기-가새 시스템의 힘-변형 관계는 그림 1과 같은 완전탄소성 시스템으로 모델링 할 수 있다. 완전탄소성 시스템의 등가선형 시스템은 등가강성과 등가감쇠를 모두 가지며 전자는 최대 변위 발생 시의 할선강성으로, 후자는 1사이클 동안 소산된 에너지로 정의할 수 있다(Comartin et al. 1996). 여기서 중요한 것은 최대변위의 예측법이다. 본 연구에서는 가진입력이 정상상태의 Gauss 분포 백색잡음이고 마찰감쇠기-가새 시스템이 설치된 구조물의 전체적인 거동은 선형에 가깝다고 가정한다. 따라서 구조물 응답은 정상상태의 Gauss 분포를 갖는 확률과정으로 가정할 수 있다. 또한 대상구조물의 응답은 최저차 모드의 성분이 지배적인 협대역 확률과정으로 가정한다. 따라서 마찰감쇠기-가새 시스템의 변형의 피크분포는 다음과 같이 정의되는 Rayleigh 분포에 가깝게 된다.

* 단국대학교 건축대학 부교수
** 단국대학교 내진리모델링센터, 연구전임강사
*** 주) A.V.T 차장
**** 서울대학교 건축공학과 박사과정
***** 단국대학교 건축대학 석사과정

$$P(x_p) = \frac{x_p}{\sigma_x^2} \exp\left(-\frac{x_p^2}{2\sigma_x^2}\right) \cdot U(x_p) \quad (1)$$

여기서 x_p 는 피크상대변위, σ_x 는 x 의 표준편차, $U(\cdot)$ 는 단위계단함수이다. 위 확률분포식으로부터 마찰감쇠기-가새 시스템의 평균등가강성 및 평균등가감쇠는 다음과 같다.

$$k_{eq} = \int_0^\infty \frac{f_s}{x_s} P(x_p) dx_p + \int_{-\infty}^0 \frac{f_s}{x_s} P(x_p) dx_p \quad (2)$$

$$c_{eq} = \frac{1}{w_n} \int_{-\infty}^\infty \frac{4(x_p - x_s) f_s}{\pi x_p^2} P(x_p) dx_p \quad (3)$$

여기서 $f(\cdot)$ 는 그림1과 같은 완전탄소성 이력법칙에 의해서 결정되는 마찰형 보강기구 시스템의 부재력이며 x_s 는 마찰형 보강기구의 슬립모멘트이다.

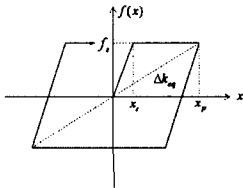


그림 1. 완전탄소성 모델

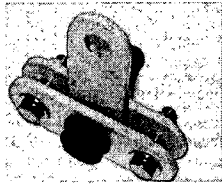


그림 2. 마찰형 감쇠기

3. 시스템식별에 기초한 모델갱신

3.1 시스템 식별

진동대 실험에 기초한 시스템 식별은 실험적으로 등가선형 시스템을 얻을 수 있는 방법이다. 본 연구에서는 Li와 Reinhorn의 연구를 바탕으로 하여 구조물의 전달함수로부터 고유진동수, 모드감쇠비, 모드형상을 추출하고 다음 식을 이용하여 강성 및 감쇠행렬을 구성하였다.

$$K = M\Phi\Omega\Phi^T M \quad (4)$$

$$C = M\Phi\Lambda\Phi^T M \quad (5)$$

여기서 M 은 질량행렬 Φ 는 질량에 대해 정규화된 모드형상 행렬이며 Λ 및 Ω 는 각 모드의 고유진동수 및 감쇠비에 의해 결정되는 대각 행렬이다.

3.2 모델갱신

시스템식별에 의해 얻어진 강성 및 감쇠행렬은 실제 부재의 연결구조에 대한 물리적 정보가 교란되어 명확히 나

타나지 않을 수 있다. 특히 식 (4)와 (5)는 고전적 감쇠를 가정하고 있다는 점에서 감쇠기가 설치된 실제 구조물과 괴리가 있을 수 있다. 이와 같은 문제점 해결을 위해 시스템식별에서 얻어진 고유진동수 및 모드감쇠비 변화에 대응되는 유한요소 모델의 특정 요소 강성 및 감쇠의 변화량을 구할 수 있으며 결과적으로 국부적으로 설치된 감쇠기의 특성을 파악할 수 있다. 먼저 고유진동수 및 감쇠비에 관한 오차함수는 다음과 같이 정의 할 수 있다

$$g_K(k) = \phi_i^T K \phi_i - \omega_i^2 \quad (6)$$

$$g_C(c) = \phi_i^T C \phi_i - 2\zeta_i \omega_i \quad (7)$$

여기서 k 는 갱신할 요소강성, K 는 강성행렬, C 는 감쇠행렬, ϕ_i 는 i 번째 모드형상, ω_i 는 i 번째 목표고유진동수, ζ_i 는 i 번째 모드감쇠비이다. 오차함수를 0으로 만드는 요소강성 및 요소감쇠의 증분은 다음과 같다.

$$\Delta k = -\left\{g_K(k) + 2(\Delta\phi_i)^T K \phi_i\right\} \left\{\phi_i^T \frac{\partial K}{\partial k} \phi_i\right\}^{-1} \quad (8)$$

$$\Delta c = -\left\{\Delta g_C(c) + 2(\Delta\phi_i)^T C \phi_i\right\} \left\{\phi_i^T \frac{\partial C}{\partial c} \phi_i\right\}^{-1} \quad (9)$$

4. 실험 결과

구조물은 3층의 1경간 철골조 전단건물 모형으로서 마찰감쇠기-가새 시스템은 1층에만 설치하였다. 마찰감쇠기는 DAMPTECH사에서 개발된 회전형 마찰감쇠기와 같은 형태로 그림2와 같이 2개의 수평강판과 1개의 수직강판 사이에 마찰패드 2개가 볼트로 조립된 형태이다. 마찰감쇠기의 볼트에 가해진 토크와 슬립모멘트의 관계는 그림4와 같으며 실험을 통해 구하였다. 실험은 마찰감쇠기-가새 시스템이 설치되지 않은 경우 및 마찰감쇠기 볼트에 가해준 토크가 5, 10, 15 kgf·cm인 경우에 대해 수행하였다.

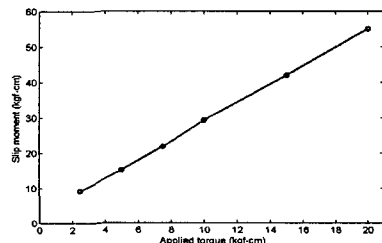


그림 4 회전형 마찰감쇠기의 슬립모멘트와 토크의 관계

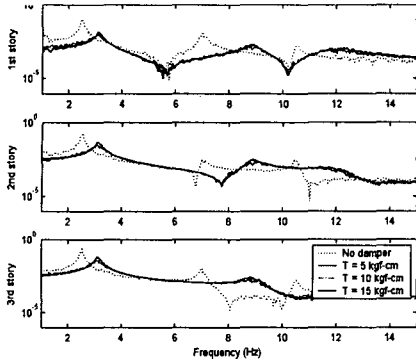


그림 6. 각 층 상대변위 전달함수

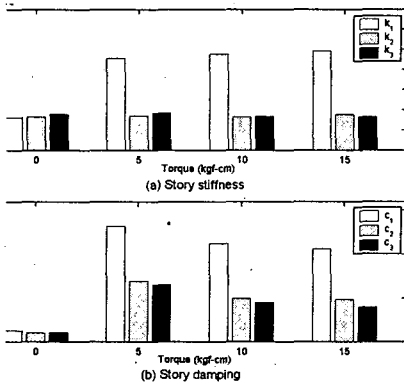


그림 7. 시스템 식별로부터 얻어진 층강성 및 감쇠

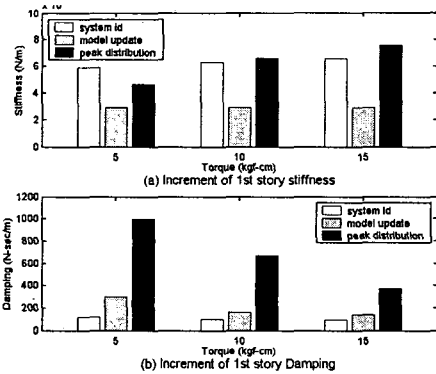


그림 8. 감쇠기 설치로 인한 1층 강성 및 감쇠의 증가량

4.1 등가선형화 결과

실험을 통해 얻어진 각 층의 변위 전달함수는 그림 6과 같으며 보강기구 설치 전후에 모두 1차 모드가 지배적인 구조물임을 알 수 있다. 특히 토크가 증가함에 따라 전달함수가 일정한 형태로 수렴하고 있으며 이는 조임력 증가로 인해 슬립의 발생이 감소하는데 따른 것으로 보인다.

각각의 시스템 식별결과로부터 식(4)과 식(5)에 의한 강

성과 감쇠 행렬을 구하여 추출한 층 강성 및 감쇠를 그림 7에 나타내었다. 구조물의 1층에만 마찰감쇠기-가새 시스템이 설치되었음에도 2층 및 3층의 감쇠가 상당히 증가하였다. 이는 마찰감쇠기-가새 시스템이 1층에만 설치되어 비고전적 감쇠로 인해 모드의 직교성을 상실하여 이로부터 구해진 감쇠행렬의 오차가 커지기 때문인 것으로 보인다.

마찰감쇠기-가새 시스템의 등가강성 및 등가감쇠는 1층의 강성 및 감쇠 증가량으로 생각할 수 있으며 그림8과 같다. 토크가 클수록 잠금상태가 증가하여 등가선형 강성은 증가하고 등가선형 감쇠는 감소한다. 그러나 각각의 등가선형화 방법 사이에 상당한 차이가 있음을 확인할 수 있다.

피크 변형의 확률분포에 기초한 등가선형화는 가정된 피크 변형의 확률분포의 정확성에 의해 좌우되므로 검증을 위해 실험을 통해 얻어진 층간변위의 통계적 피크분포를 Rayleigh 분포와 비교하였다 (그림9). 양자는 비교적 비슷한 양상을 보이고 있으나 전자는 후자에 비해 낮은 피크레벨의 비율이 큰 편이다.

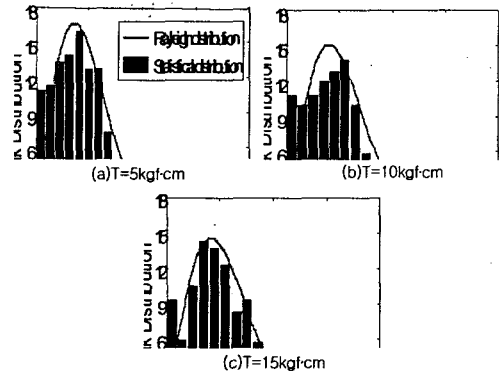


그림 9. 마찰감쇠기-가새 시스템 변형의 피크분포

4.3 등가선형 시스템의 비교평가

여기서는 모델갱신과 피크분포에 기초한 등가선형화 결과의 정확성을 평가한다. 먼저 각각에 의한 등가선형 모델의 1차 모드 고유진동수와 감쇠비를 복소모드해석을 통해 계산한 뒤 시스템식별 결과와 비교하였다 (그림 10). 고유진동수의 경우에는 두 가지 방법이 모두 유사한 정확도를 보유하고 있으나 모드감쇠비의 경우에는 모드의 직교성이 파괴되어 모델갱신이 30~40% 정도의 오차를 보인다. 피크 분포에 기초한 등가선형 모델은 상대적으로 정확도가 높지만 토크치 15 kgf-cm에 대해서는 상대적으로 오차가 큰 편

이며 동적 변형 시에는 토크를 증가시켜도 슬립모멘트가 충분히 증가하지 않기 때문인 것으로 보인다.

두 번째로는 등가선형 시스템의 시간이력 해석을 수행하여 마찰감쇠기-가새 시스템의 RMS 및 최대 변형을 실험치와 비교하였다 (표 2 및 3). 피크분포에 기초한 등가 선형 시스템은 RMS 응답이 실험치와 잘 일치하나 최대변형은 오차가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 그러나 다수의 실험치와 비교가 이루어진다면 평균오차는 낮아질 것으로 보인다. 반면에 모델갱신은 상대적으로 오차가 매우 크다.

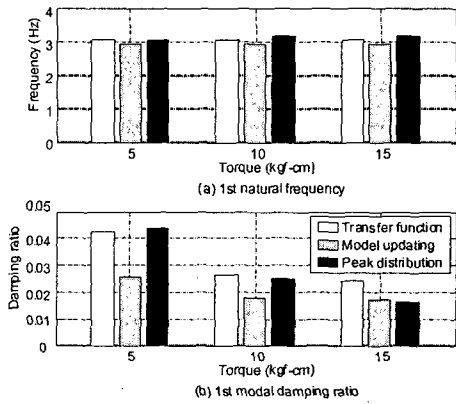


그림 10. 1차모드 고유주기와 감쇠비

표 2 마찰감쇠기-가새 시스템의 RMS 변형 (괄호는 오차율백분율)

Torque (kgf-cm)	Experiment (cm)	Equivalent linear system (cm)	
		Model updating	Peak distribution
5	0.0363	0.0691 (-90.5)	0.0379 (-4.6)
10	0.0403	0.0848 (-110.6)	0.0398 (1.2)
15	0.0419	0.0866 (-106.3)	0.0448 (-6.9)

표 3 마찰감쇠기-가새 시스템의 최대 변형 (괄호는 오차율백분율)

Torque (kgf-cm)	Experiment (cm)	Equivalent linear system (cm)	
		Model updating	Peak distribution
5	0.156	0.239 (-53.7)	0.126 (19.1)
10	0.149	0.287 (-92.2)	0.130 (13.0)
15	0.149	0.286 (-92.5)	0.139 (6.5)

5. 결론

본 논문은 피크분포에 기반한 등가선형화 기법을 제시하고 시스템 식별에 기초한 모델갱신 방법과 비교하였다. 마

찰감쇠기-가새 시스템을 구조물에 설치하면 고유진동수 및 감쇠비가 증가하는 경향을 보이며 증가량은 조임력을 부가하기 위한 토크의 크기에 따라 변화하였다. 비고전적 감쇠의 영향으로 인해 모델갱신 방법은 큰 오차를 보였으며, 그에 비해 피크분포에 기초한 등가선형화 기법은 상대적으로 우수한 감쇠비의 예측결과를 보여준다. 또한 시간이력 해석을 통한 RMS 및 최대 응답의 비교에서도 모델갱신 방법보다 피크 분포에 기초한 등가선형화의 결과가 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 확인되었다.

감사의 글

이 연구는 산학연구로써, (주)에이.브이.티의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Comartin, C. D., Niewiarowski, R., W., Rojahn, C. 1996. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Report ATC-40. Applied Technology Council.
- (2) Filiatrault A., Cherry S. 1990. Seismic design spectra for friction-damped structures. Journal of Structural Engineering. Vol. 116: 1334-1355.
- (3) Li, C., Reinhorn, A. M. 1995. Experimental and Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping: Part II - Friction Devices, Technical Report, NCEER-95-0009. National Center for Earthquake Engineering Research.
- (4) Lutes, L. D., Sarkani, S. 1997. Stochastic Analysis of Structural and Mechanical Vibrations, New Jersey: Prentice Hall.
- (5) Mualla, I. H., Belev, B. 2002. Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation. Engineering Structures. Vol. 24. 365-371.
- (6) Park, J. C., Jung, J. C., Song, J. B., and Nam Gung, J. G. 2001. Mechanical Design, Seoul: Chung-Moon-Gak.
- (7) Soong, T. T. and Dargush, G. F. 1997. Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering. John Wiley & Sons.