

마찰형 감쇠를 갖는 구조물의 응답 스펙트럼

Response Spectra of Structure Installed Frictional Damping System

이상현[†] · 박지훈* · 윤경조** · 민경원***

Lee, Sang-Hyun, Park, Ji-Hun, Youn, Kyung-Jo Min, Kyung-Won

Key Words : Frictional Damping(마찰형 감쇠), Normalized Response Spectrum(정규응답스펙트럼), Curve Fitting(곡선맞춤), Optimal Non-Dimensional Friction Force(최적 무차원 마찰력)

ABSTRACT

Structures with additional frictional damping system have strong nonlinearity that the dynamic behavior is highly affected by the relative magnitude between frictional force and excitation load. In this study, normalized response spectra of the structures with non dimensional friction force are obtained through nonlinear time history analyses of the mass-normalized single degree of freedom systems using 20 ground motion data recorded on rock site. The variation of the control performance of frictional damping system is investigated in terms of the dynamic load and the structural natural period, of which effects were not considered in the previous studies. Least square curve fitting equations are presented for describing those normalized response spectrum and optimal non-dimensional friction forces are obtained for controlling the peak displacement and absolute acceleration of the structure based on the derivative of the curve fitted design spectrum.

1. 서론

수동형 에너지 소산 시스템은 전 세계적으로 건축 및 토목 구조물의 내진설계 분야에 있어, 지진과 바람과 같은 자연적인 동적 하중 뿐 만 아니라 그 밖의 동적인 하중에 대해서 구조물의 동적응답을 감소시키기 위해 중요한 역할을 해왔으며, 많은 응용분야에 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 이러한 에너지 소산 시스템의 기본적인 원리는 구조물의 축적된 내부에너지의 일부를 흡수하고 소산시킴으로서 결국 구조적인 부재에 발생하는 에너지를 저감시키고, 구조물의 손상을 최소화시키는데 기인한다.^[1] 최근에는 건축 및 토목 구조물의 내진설계에 있어서 성능에 기초한 설계에 관심이 높아지고 있다. 이러한 요구와 함께 만일 구조물의 항복에너지의 일부가 지진이 끝난 후 필요에 따라서 쉽게 교체될 수 있는 특별한 장치를 통해 소산될 수 있다

면, 구조적 손상은 더욱 더 저감되고, 이 장치들은 새로운 구조물을 설계할 때 비용을 절감 하고, 지진 저항력이 부족한 기존 건물에 장치할 수도 있을 것이다. 이런 저감장치는 크게 점탄성 감쇠기(Viscoelastic dampers), 금속 감쇠기(Metallic dampers), 및 마찰 감쇠기(Friction dampers), 세 가지 범주로 분류된다. 이들 모두 구조물에 마찰형 시스템을 설치하여 구조물의 에너지 소산 능력을 현저히 증가시키면서도 고유주기에는 크게 영향을 미치지 않는다는 장점 때문에 현재에도 많이 이용되고 있으며, 연구도 활발히 진행 중이다.^[2] Lin(2003)등은 성능에 기초한 설계법의 하나인 직접변위 설계법을 적용하여 다양한 형태의 수동형 감쇠기 설계를 수행하였다.^[3] Mualla(2002)등은 경제적이고, 생산과정이 간단하며, 그리고 설치가 용이한 FDD(Friction Damper Device)를 개발하여 실물크기 실험용 구조물에 설치하여 여러 가지 지진하중으로부터 성능 실험이 수행되었다.^[4] 국내에서도 마찰형 감쇠를 갖는 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 민경원(2003)등은 능력 스펙트럼법을 이용하여 구조물의 성능을 평가한 후, 비선형 감쇠장치의 하나인 마찰감쇠기를 사용하여 구조물의 목표변위를 달성할 수 있는 방법을 제시하였다.^[5] 그러나 기존의 연구에서는 특정한 주기와 특정한 하중에 대한 마찰형 감쇠의 특성이 규명되었을 뿐, 여러 지진하중에 대하여 마찰형 감쇠가 설치된 시스템의 응답스펙트럼

† 책임저자, 단국대학교 건축공학과
E-mail : lshyun00@dankook.ac.kr
Tel : (02) 799-1439, Fax : (02) 799-8653

* 인천대학교 건축공학과

** 단국대학교 건축공학과

*** 단국대학교 건축공학과

특성이 평균적으로 평가되지는 못하였다. 마찰형 감쇠를 가지는 구조물의 응답스펙트럼에 대한 식이 제시될 수 있다면 마찰형 감쇠를 가지는 구조물의 초기설계에 쉽게 적용될 수 있다. 본 연구에서는 마찰형 갖는 구조물을 대상으로 단자유도의 비선형 해석을 통해 무차원 마찰력에 따른 정규응답스펙트럼(normalized response spectrum)을 조사하고 곡선맞춤을 통해 마찰형 감쇠를 갖는 구조물의 설계스펙트럼 식을 제시하였다. 또한 근사식의 미분을 통해 구조물의 상대변위와 절대가속도 응답에 대한 최적 무차원 마찰력을 제시하였다.

2. 마찰형 감쇠를 갖는 구조물의 모델링

마찰형 감쇠를 갖는 구조물의 비선형 이력거동을 모사하기 위해 본 논문에서는 다음과 같이 간단한 쿨롱 마찰력으로 구성된 모델을 사용한다. 이 모델을 사용한 마찰형 감쇠를 갖는 구조물의 질량정규화 단자유도 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_s \ddot{x} + c_s \dot{x} + k_s x = -m_s \ddot{x}_g - f_f \text{sgn}(\dot{x}) \quad (1)$$

여기서 구조물의 질량 m_s 는 1로, 감쇠비는 0.05, 강성 k_s 는 0.1초부터 2.0초까지 29개의 고유주기에 해당되는 값을 갖는 것으로 가정한다. 일반적으로 마찰형 감쇠를 갖는 구조물의 제진성능은 감쇠시스템에 가해지는 하중에 대한 마찰력의 상대적인 비율에 의해서 좌우된다. 따라서 본 논문에서는 감쇠시스템의 마찰력 f_f 를 구조물에 대하여 다음과 같은 무차원 변수를 사용하여 나타낸다.

$$\rho = f_f / f_s \quad (2)$$

여기서 f_s 는 구조물이 마찰형 감쇠시스템이 설치되지 않을 때의 최대 밀면전단력으로서 다음과 같이 주어진다.

$$f_s = k_s |x_o|_{\max} \quad (3)$$

여기서 x_o 는 마찰형 감쇠시스템이 설치되지 않을 때의 원구조물의 상대변위이다.

3. 마찰형 감쇠시스템

설계변수인 무차원 마찰력 ρ 에 대한 마찰형 감쇠를 갖는 구조물의 성능을 조사하고 최적 ρ 의 설계식을 도출하기 위해 $\rho=0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ 인 경우에 대하여 비선형 시

간이력해석을 수행하였다. 지반가속도는 암반지역에서 계측된 20개의 지반가속도를 사용하였다. 각각의 지진별로 마찰형 감쇠를 갖는 구조물의 응답을 마찰형 감쇠시스템이 설치되지 않은 원구조물의 응답으로 정규화하였으며, 20개 지진에 대한 평균정규응답을 구하여 스펙트럼을 작성하였다. 분석에 사용된 구조물의 응답은 상대변위 및 절대가속도의 최대 응답 및 RMS 응답이다.

3.1 정규응답스펙트럼

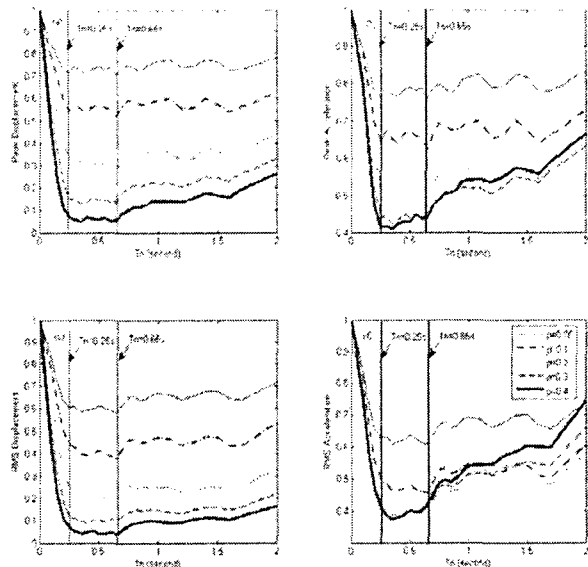


그림 1. 마찰형 감쇠를 갖는 단자유도 구조물의 정규응답스펙트럼 (a) 최대 상대변위 (b) 최대 절대가속도 (c) RMS 상대변위 (d) RMS 절대가속도

그림 1은 ρ 의 변화에 따른 최대 상대변위, 최대 절대가속도, RMS 상대변위, 그리고 RMS 절대가속도의 변화를 보여준다. 모든 수치는 비제어 응답에 대하여 정규화 되었다. 그림 1로부터 주기의 구간에 따른 ρ 의 증가에 따른 응답감소의 경향이 다음을 알 수 있다. $T_n \leq 0.25$ sec의 구조물의 경우 고유주기가 0.0 sec에 가까우면 응답저감 효과가 거의 없고, 주기가 증가함에 따라 동일한 ρ 에 대한 응답저감 효과는 선형적으로 증가한다. $0.25 \leq T_n \leq 0.65$ sec 구간에서는 주기에 따른 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 또한 $0.6 \leq T_n \leq 2.0$ sec인 구간에서는 주기가 증가함에 따라 동일한 ρ 에 대한 응답저감 효과가 대체적으로 선형 감소하는 경향을 가지며, 이 경향은 ρ 가 증가할수록 뚜렷해진다. 특히 이러한 경향은 상대변위 응답보다는 절대가속도 응답에 있어 더욱 두드러져, 장주기 구조물의 가속도 응답의 경우 특정값 이상으로 ρ 를 증가시키는 것은 오히려 가속도 응답을 증가시키는 결과를 가져온다. 이상의 결과로부터 $0.25 \leq T_n \leq 0.65$ sec의 구간과 2.0초에서의 응답을 알면 전체적인 응답스펙트럼의 경향을 파악할 수 있음을 알

수 있다.

3.2 정규응답스펙트럼의 선형곡선맞춤

본 절에서는 응답스펙트럼의 구간을 고유주기가 0.0~0.25 sec인 구간, 그리고 0.65~2.0sec인 세 구간으로 나누고 각각의 구간에 대하여 동일한 ρ 에 대하여는 직선 식으로 보간을 수행한다. 고유주기 0.25~0.65sec인 구조물 응답은 이 구간에 속하는 모든 주기의 응답을 평균하여 대표 값을 사용하며 이를 단주기 구간의 대표응답스펙트럼 $J_s(\rho)$ 라 하고, 주기 2.0초의 응답스펙트럼을 $J_L(\rho)$ 로 두면 다음과 같은 정규응답스펙트럼식을 사용할 수 있다.

$$J(\rho, T_n) = \begin{cases} 1 - \frac{J_s(\rho)}{0.25} T_n & T_n < 0.25 \text{ sec} \\ \frac{J_s(\rho)}{J_s(\rho)} & 0.25 \leq T_n \leq 0.65 \text{ sec} \\ \frac{J_L(\rho) - J_s(\rho)}{1.35} (T_n - 0.65) + J_s(\rho) & 0.65 < T_n \leq 2.0 \end{cases} \quad (4)$$

그림 2는 $0 \leq \rho \leq 0.5$ 인 구간에서의 $J_s(\rho)$ 와 $J_L(\rho)$ 를 보여준다. 그림 2로부터 알 수 있는 응답의 변화경향과 이 경향을 모사할 수 있는 곡선맞춤식은 다음과 같다.

1) 상대변위 응답 : 최대 상대변위, RMS 상대변위 응답은 $\rho = 0$ 일 때 1을 만족하면서 ρ 가 증가함에 따라 감소하는 특성을 가지고, ρ 에 대한 응답감소곡선의 기울기의 절대값은 ρ 가 증가함에 따라 감소하는 경향을 가진다. 이와 같은 $J_s(\rho)$ 와 $J_L(\rho)$ 의 경향을 모사하기 위한 식은 다음과 같다.

For displacement response $J_d = \frac{c_{d2}\rho + 1}{c_{d1}\rho + 1} \quad (5)$

여기서, c_{d1} , c_{d2} 는 상대변위 응답 감소곡선의 형태를 결정하는 상수이다.

2) 절대가속도 응답 : 최대 절대가속도, RMS 절대가속도 응답은 $\rho = 0$ 일 때 1을 만족하면서 ρ 가 작은 구간에서는 ρ 가 작은 구간에서는 ρ 가 증가함에 따라 감소하나, ρ 가 일정 크기이상으로 증가하는 것은 더 이상의 응답감소효과가 없거나 오히려 가속도 응답을 증가 시킨다. 이와 같은 $J_s(\rho)$ 와 $J_L(\rho)$ 의 경향을 나타내기 위해 다음과 같은 곡선의 형태를 가정한다.

For absolute acceleration response $J_a = c_{a1}\rho + \frac{1}{c_{a2}\rho + 1} \quad (6)$

여기서, c_{a1} , c_{a2} 는 상대변위 응답 감소곡선의 형태를 결정하는 상수이다.

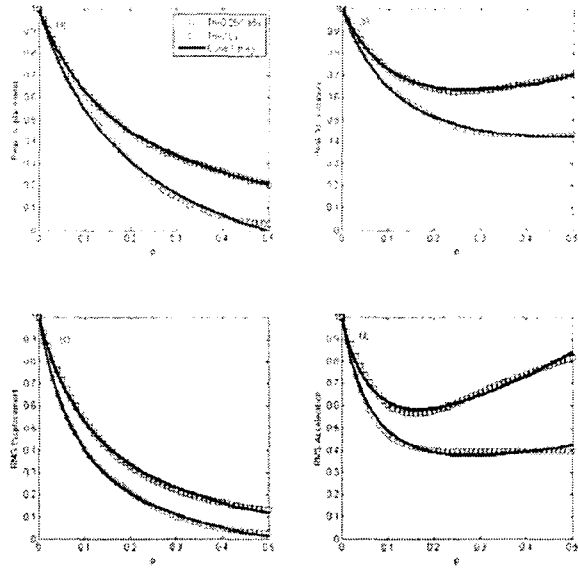


그림 2. $J_s(\rho)$ 와 $J_L(\rho)$ 의 곡선맞춤

(a) 최대 상대변위 (b) 최대 절대가속도 (c) RMS 상대변위 (d) RMS 절대가속도

표 1. $J_s(\rho)$ 와 $J_L(\rho)$ 의 곡선맞춤 식 계수

	Displacement J_d				Absolute Acceleration J_a			
	J_s		J_L		J_s		J_L	
	c_{d1}	c_{d2}	c_{d1}	c_{d2}	c_{a1}	c_{a2}	c_{a1}	c_{a2}
Peak	4.666	-2.030	5.092	-0.535	0.367	6.433	0.884	5.670
RMS	10.228	-1.856	7.162	-0.928	0.590	13.368	1.368	10.835

표 1은 Matlab 7.0 내장함수인 LSQCURVEFIT을 사용하여 구한 식 (5)와 (6)의 계수 c_{d1} , c_{d2} , c_{a1} 및 c_{a2} 의 값을 보여준다. 그림 2에서 표 1의 값과 식 (5), (6)을 사용하여 구한 곡선이 $0 \leq \rho \leq 0.5$ 인 구간에서의 $J_s(\rho)$ 와 $J_L(\rho)$ 를 정확하게 표현하고 있음을 알 수 있다. 그림 3은 식 (4),(5) 및 (6)을 이용하여 마찰형 감쇠를 갖는 구조물의 응답스펙트럼을 곡선맞춤한 결과를 보여준다. 그림 3을 통해 곡선맞춤한 식이 고유주기의 전구간에서 ρ 의 증가에 따른 최대 상대변위, 최대 절대가속도, RMS 상대변위, 그리고 RMS 절대가속도를 상당히 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

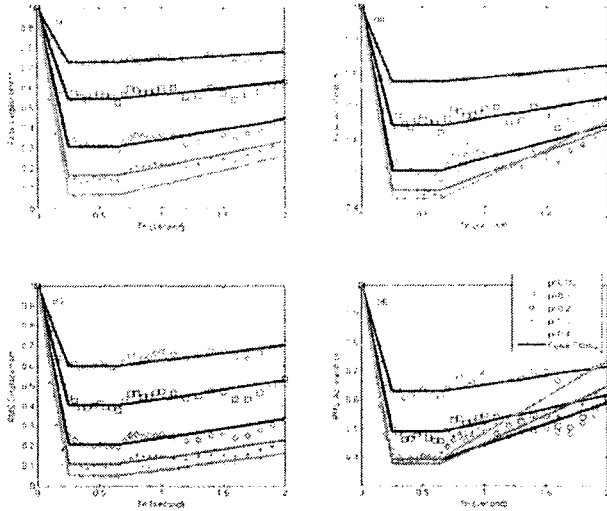


그림 3. 마찰형감쇠를 갖는 구조물의 정규응답스펙트럼의 곡선 맞춤
(a) 최대 상대변위 (b) 최대 절대가속도 (c) RMS 상대변위 (d) RMS 절대가속도

3.3 무차원 마찰력의 최적값

정규화된 상대변위 및 절대가속도의 곡선맞춤 식을 최소화 하는 ρ 는 다음 식으로 표현되는 정규응답 변화율을 0으로 만드는 값이다.

정규화된 상대변위 및 절대가속도의 곡선맞춤 식을 최소화 하는 ρ 는 다음 식으로 표현되는 정규응답 변화율을 0으로 만드는 값이다.

$$\frac{dJ_d}{d\rho} = \frac{c_{d2} - c_{d1}}{(c_{d1}\rho + 1)^2} \quad (7)$$

$$\frac{dJ_a}{d\rho} = c_{a1} - \frac{c_{a2}}{(c_{a2}\rho + 1)^2} \quad (8)$$

식 (7)은 표 1의 상수를 사용할 때 항상 음수이므로 ρ 가 증가함에 따라 항상 상대변위 응답은 감소하게 되어 최적의 ρ 는 존재하지 않는다. 반면에, 식 (8)을 0으로 만드는, 즉 가속도 응답을 최소화하는 최적의 ρ 는 존재한다. 그러나 그림 2에서 알 수 있듯이 단위 크기의 ρ 의 증가에 따른 응답감소의 폭은 상대변위 및 절대가속도 응답 모두 ρ 가 증가할수록 감소한다. 즉 ρ 의 변화에 따른 응답감소의 폭은 ρ 가 작은 구간에서 훨씬 크다. 일반적으로 $\rho=0$ 일 때의 가속도 성능지수의 순간변화율이 가장 크며, 이는 동일한 크기의 감쇠장치는 감쇠장치가 없는 구조물에 적용될 때에 가장 효과적임을 의미한다. 따라서 정규화된 응답을 최소화 하는 ρ 가 존재하지 않는 경우에는 제진 효율성 면에서 다음과 같이 최적의 ρ 를 정의할 수 있다. 즉, $\rho=0$ 일 때의 정규응답 감소율과 비교하여 일정한 절대크기 이상의 정규응답 변화율을 확보하는 최대의 ρ 를 최적값으로 정의하는 것이다.

$$\left| \frac{\partial J}{\partial \rho} \right| \geq \gamma \left| \frac{\partial J}{\partial \rho} \right|_{\rho=0} \quad (9)$$

여기서, γ 는 1보다 작은 양의 상수이다. 위 식을 풀면 다음과 같은 ρ 얻을 수 있으며 γ 에 따른 최적 값을 표 2에 정리하였다.

$$\rho_{opt} = \frac{1}{c_{d1}} \left(\sqrt{\frac{1}{\gamma} - 1} \right) \quad \text{for displacement} \quad (10)$$

$$\rho_{opt} = \sqrt{\frac{1}{c_{a1}c_{a2} + \gamma(c_{a2} - c_{a1})c_{a2}}} - \frac{1}{c_{a2}} \quad \text{for absolute acceleration} \quad (11)$$

표 2. 무차원 마찰력의 최적값

	Displacement J_d				Absolute Acceleration J_a			
	J_s		J_L		J_s		J_L	
	Peak	RMS	Peak	RMS	Peak	RMS	Peak	RMS
$\gamma=0$	-	-	-	-	0.495	0.281	0.270	0.167
$\gamma=0.1$	0.463	0.211	0.425	0.302	0.244	0.125	0.183	0.107
$\gamma=0.2$	0.265	0.121	0.243	0.173	0.158	0.079	0.133	0.076

표 2에서 $\gamma=0$ 인 경우는 정규응답 변화율에 관계없이 단순히 가장 작은 가속도 성능지수를 주는 ρ 를 의미하며, $\gamma=0.1$ 및 $\gamma=0.2$ 인 경우는 각각 정규응답 변화율의 절대크기가 =0일 때의 10% 및 20% 이상이 되는 ρ 의 최대값을 의미한다. 표 2에서 볼 수 있듯이, γ 가 증가함에 따라 최적의 ρ 는 감소하는 경향을 갖는다. 또한 전반적으로 상대변위 응답보다는 가속도 응답에 대하여, 최대응답보다는 RMS응답에 대하여, 그리고 가속도 응답의 J_s 보다는 J_L 에 대하여 작은 ρ 값이 최적의 성능을 보임을 알 수 있다. 결과적으로 상대변위 응답의 경우에도 이와 같이 무차원 마찰력의 증가에 대한 정규응답 변화율에 제한조건을 설정함으로써 최적의 ρ 를 구할 수 있으며, 보다 경제적이고 합리적인 설계가 가능하다.

4. 결론

본 연구에서는 암반지역에서 계측된 20개의 지진과 다양한 고유주기의 단자유도 구조물을 대상으로 마찰형 감쇠를 갖는 구조물의 무차원 마찰력 크기에 따른 응답스펙트럼에 대한 성능평가를 수행하였다. 이를 설계에 활용할 수 있도록 정규응답스펙트럼의 근사식을 곡선맞춤을 통해 주기와 무차원 마찰력의 함수로 제시하였다. 또한 정규응답의 미분

에 기초하여 최적의 무차원 마찰력을 제시하였다. 특히 상대변위 응답 제어성능은 무차원 마찰력의 크기가 증가할수록 향상되지만 그 제어성능의 증가율은 저하됨을 이용하여 정규응답 변화율이 초기치의 10% 및 20%가 되는 무차원 마찰력을 최적치로 산정하였다. 따라서 향후, 본 연구에서 제시된 마찰형 감쇠를 갖는 구조물의 설계응답스펙트럼 식을 발전시켜, 이 과정에서 구조물의 고유주기와 하중의 불확실성 및 경제성, 유지관리의 용이성 등에 대한 종합적인 고려가 반드시 필요하다.

후 기

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설핵심기술연구개발사업 과제번호(C105A1050001-05A0505-00210)와 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업(R11-2002-101-03004-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) T. T. Soong, G.F. Dargush, 1997, "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", John Wiley & Sons.
- (2) Anil K. Chopra., 2001, "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering; Second Edition", Prentice Hall.
- (3) Lin, Y. Y., Tsai, M. H., Hwang, J. S., and Chang, K. C., 2003, "Direct Displacement-Based Design for Building with Passive Energy Dissipation Systems", Engineering Structures, Vol. 25, pp. 25-37.
- (4) Imad H. Mualla, Borislav Blev, 2002, "Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation", Engineering Structures, Vol. 24, pp. 365-371.
- (5) 민경원, 김형섭, 2003, "지진하중을 받는 구조물의 성능에 기초한 마찰감쇠기 설계", 한국지진공학회 논문집, 제 7권, 6호, pp. 17-24