

생애주기비용 최소화에 의한 점탄성감쇠기장착
구조물의 통합최적설계
Integrated Optimal Design of Structure with Viscoelastic
Dampers by Minimizing Life-Cycle Cost

박관순¹⁾ 고현무²⁾ 함대기³⁾
Park, Kwan Soon Koh, Hyun Moo Hahm, Daegi

Abstract

이 연구에서는 점탄성감쇠기가 설치된 구조시스템의 통합최적설계 방법을 제시하였다. 최적화를 위한 목적함수로는 구조시스템이 유발하는 사회적 비용을 의미하는 총 생애주기비용을 사용함으로써, 구조제어 시스템의 성능에 기반한 경제적 유익을 극대화하도록 하였다. 구조물의 층별 기동강성 및 점탄성감쇠기의 사용량 등을 설계변수로 하여 생애주기비용함수를 정의하였으며, 통합시스템을 동시에 최적화하기 위한 방법으로 유전자 알고리즘을 적용하였다. 동일한 초기비용을 사용하며 통합최적설계를 수행하지 않은 설계를 통해 얻어진 지진응답과 비교한 결과, 제안하는 통합설계방법은 보다 우수한 진동제어효과를 발휘하는 것으로 나타났다

1. 서론

최근에 이르러 경제분야에서 이룩된 성과는 사회 각 분야에 대하여 보다 미래 지향적인 높은 수준을 요구하고 있다. 구조물의 경우에도 정적 또는 동적 하중에 대한 안전성뿐만 아니라 사용성에 대한 요구까지도 증대됨에 따라, 가까운 미래에 있어서 제어시스템의 설치는 더 이상 특정 국가의 특수 구조물에 국한되어지는 현상이 아닌, 주요한 구조물에 요구되어지는 일반적인 설계 항목으로 인식되어지게 될 것이다. 따라서 제어시스템을 구조물에 부가적으로 장착하여 응답을 개선시키기 위한 장치로서 인식하던 기존의 개념으로부터 탈피하여, 제어시스템 자체를 동적응답성능 향상을 위한 구조부재의 한 종류로서 인식하는 새로운 개념이 도입되어야 할 필요가 있다. 이러한 개념에 기초한다면, 구조물과 그에 설치될 제어장치를 하나의 통합된 시스템(integrated system)으로 간주함으로써, 구조물의 설계단계에서부터 제어장치의 특성과 설계 제한조건 등을 고려하여 제

1 서울대학교 지구환경시스템공학부, 계약조교수

2 정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

3 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정

어시스템과 구조물을 동시에 최적화 할 수 있다(박관순, 2001).

이 연구에서는 구조물의 설계단계에서부터 점탄성감쇠기 시스템의 장착을 가정하고, 두 시스템을 통합하여 동시최적설계를 수행함으로써, 구조제어시스템(structural control system)의 지진응답 제어성능을 극대화할 수 있는 새로운 설계방법을 제시하고자 한다. 이를 위하여 이 연구에서는, 구조물-점탄성감쇠기 통합시스템의 동시최적설계문제를 구성하는 데에 있어서의 목적함수로서 시스템이 생애주기를 통하여 사회에 유발하는 기대값인 전체생애주기비용을 사용하였다. 점탄성감쇠기는 건물의 점성을 증가시켜 진동에너지를 소산시킴으로서 진동을 효과적으로 제어할 수 있는 기술로, 현재 많은 연구결과에 의하여 그 효과가 입증되고 있다(Shen 등, 1995). 그러나, 기존의 연구는 점탄성감쇠기의 장착을 통하여 구조물의 응답을 최소화하기 위한 방법에 주로 그 초점이 맞추어져 있으며, 그 경제적 효율성에 대한 검증은 아직 이루어지지 않은 상태라고 할 수 있다. 이 연구에서와 같이 통합시스템의 최적설계를 위한 목적함수로서 생애주기비용 함수를 사용할 경우, 점탄성감쇠기가 장착된 시스템의 사회적 유익을 극대화하는 설계가 가능하다.

2. 점탄성감쇠기가 장착된 구조물의 파손확률 추정

2.1 점탄성감쇠기가 장착된 구조물의 모델링

지진에 의한 구조물의 운동방정식은 다음 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \mathbf{x} = -\mathbf{M} \mathbf{1} \ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서, \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} 는 각각 구조물의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬을 각각 나타내며, \mathbf{x} 는 각 층의 지반에 대한 상대변위를 나타내는 벡터이다. $\mathbf{1}$ 은 영향벡터이며, \ddot{x}_g 는 지반가속도이다. 그러나 그림 1과 같이 구조물의 제진을 위하여 점탄성감쇠기가 설치된 구조물의 경우, 이에 대한 영향을 고려하여야 한다.

점탄성감쇠기를 통하여 제공되는 강성은 외부입력 주파수의 함수인 전단저장계수(shear storage modulus)를 이용하여 다음의 식과 같은 등가강성 계수로서 나타낼 수 있다(Shen 등, 1995; Soong 등, 1997).

$$\overline{k} = \frac{AG'}{h} \quad (2)$$

여기서, A 와 h 는 각각 점탄성 재료의 전단면적과 높이를 나타내며, G' 은 한 사이클 당 저장되는 에너지의 양을 의미하는 점탄성 물질의 전단저장계수이다.

한편, 점탄성감쇠기가 장착된 구조물의 감쇠비는 모드변형에너지방법(modal strain energy method)에 의하여 산정할 수 있다(Shen 등, 1995; Chang 등, 1992). 점탄성감쇠기가 장착된 다자유도 구조물에 대하여 i 번째 모드의 추가되는 감쇠비는 감쇠기의 설치로 인하여 발생하는 모드형상의 변화를 무시하여도 좋다고 가정하면, 다음과 같이 표현할 수 있다(Chang 등, 1993).

$$\xi_i = \frac{\eta_D}{2} \left(1 - \frac{\omega_i^2}{\omega_i^2} \right) \quad (3)$$

여기서, ω_i 는 점탄성감쇠기가 장착되지 않은 구조물의 i 번째 모드의 진동수이며, $\overline{\omega}_i$ 는 점탄성감

쇠기의 기여를 고려한 강성행렬에 의하여 수정된 j 번째 모드의 진동수이다. 이제 식 (2)와 (3)을 이용하여 점탄성감쇠기가 장착된 구조물의 강성 및 감쇠행렬을 구할 수 있으며, 이를 각각

C_T 라 하면 점탄성감쇠기가 장착된 구조물의 지진에 의한 운동방정식을 다음의 식(4)와 같이 구성할 수 있다.

(4)

2.2 입력 지반운동 모델링

이 연구에서 사용하고자 하는 주파수영역의 스펙트럼해석을 통하여 지진으로 인한 구조물의 응답을 얻기 위해서는, 입력지반운동을 스펙트럼밀도함수의 형태로서 모델링하는 것이 필요하다(고현무 등, 1999). 이 연구에서는 미국 Uniform Building Code (UBC(1997)) 에서 규정하고 있는 응답스펙트럼을 사용하여(ICBO, 1997), 시방서 상의 응답스펙트럼에 상응하는 스펙트럼밀도함수를 생성하였다. 강진지역에 해당하는 지진구역 4의 경우에 대하여, 이 연구를 통하여 모델링 된 지반운동 스펙트럼밀도함수의 예를 도시하면 다음의 그림 2와 같다.

2.3 한계상태의 정의

구조물의 파손확률 산출을 위해서는 구조요소에 대한 한계상태의 정의가 선행되어야 한다. 수평 지반운동으로 인한 빌딩 구조물의 파손은 크게 전단력으로 인한 파손과 휨 모멘트 등에 의한 파손으로 나눌 수 있다. 각 층의 구조요소의 전단응력과 휨응력은 발생하는 상대변위에 의하여 크게 영향을 받으므로, 이에 대하여 한계상태를 정의하였다. $j-1$ 층과 j 층간의 상대변위를 u_j 라 하면, 다음 식(5)와 같이 UBC의 내진설계규정에서 제한하는 최대층간변위응답을 이용하여 한계상태를 정의할 수 있다.

$$\begin{cases} u_j \leq u_{lim} = \frac{0.025H_s}{0.7R} & \text{for } T_n \leq 0.7 \text{ sec} \\ u_j \leq u_{lim} = \frac{0.020H_s}{0.7R} & \text{for } T_n > 0.7 \text{ sec} \end{cases} \quad (5)$$

여기서, u_{lim} 은 UBC에서 제한하고 있는 최대층간변위이며, H_s 는 층간높이, R 은 구조물의 형식 및 재료에 따라 결정되는 계수, T_n 은 구조물의 고유주기를 각각 나타낸다.

2.4 스펙트럼해석을 통한 파손확률 추정

식(5)로 정의되는 구조요소의 파손을 판단하기 위한 파손확률의 산출을 위해서는 응답의 추계학적 추정이 필요하다. 이 연구에서는 스펙트럼해석을 통해 구조물의 층간변위의 분산값을 추정하고 이 값에 근거하여 앞서 정한 한계상태수준을 넘어서는 확률을 산출하는 방법을 사용하였다. 층간변위응답 및 층간상대속도응답의 분산값을 주파수영역에서의 적분에 의하여 추정하고, 그로부터 변위응답이 단위시간동안 한계상태를 넘어서는 빈도수(ν_j^+)를 계산하면, 지속시간 t_d 의 지진 발생시 파손이 발생하는 것으로 추정될 조건부 확률(P_j)은 다음의 식 (6)과 같이 표현된다(Newland, 1993; 박관순 등, 2002)

$$P_j = 1 - e^{(-\nu_j^+ t_d)} \quad (6)$$

3. 생애주기비용함수와 최적설계 문제의 구성

사회에 끼치는 이익을 극대화하여 구조시스템을 설계하기 위해서는 총 생애주기비용을 최소화할 필요가 있다. 빌딩 구조물의 총 생애주기비용에는 구조물의 계획단계에서부터 해체시점까지 소요되는 모든 비용이 포함되어야 하나, 구조적 부재의 건설비용을 제외한 기타 항목의 비용은 구조적 신뢰수준을 결정하는 데에 직접적으로 영향을 미치지 않으며(박순규 등, 1997), 비구조적 요소 등에 의해 민감한 영향을 받는다. 따라서, 생애주기비용 함수를 정의하는 데에 있어서는 실제 비용에 포함되는 모든 비용요소를 포함시킬 필요는 없다. 즉, 손상비용을 포함한 구조물의 생애주기비용에 큰 차이를 유발하는 설계변수 조합간의 최적화를 통해 상대적으로 최소비용을 유발하는 설계수준을 채택하는 것이 중요하다(고현무 등, 2000b). 이 연구에서는 설계변수로서 각 층에 대한 기둥의 강성 및 점탄성감쇠기의 단면적을 선택하고, 이를 이용하여 생애주기비용함수를 정의하였다. 이제 각 층의 기둥강성벡터(\mathbf{K}_c) 및 점탄성 재료의 단면적벡터(\mathbf{A}_d)를 식(7)과 같이 각각 정의하고, 이를 설계변수로 하여 기둥부재의 단위부피당 건설비용으로 정규화된 생애주기비용함수를 구성하면 다음의 식(8)와 같다.

(7)

$$E[\tilde{C}_T(t, \mathbf{K}_c, \mathbf{A}_d)] = V_s(\mathbf{K}_c) + r_{d/c} V_d(\mathbf{A}_d) + V_f P_{f_{\max}}(\mathbf{K}_c, \mathbf{A}_d) \frac{V}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{life}}) \quad (8)$$

여기서, V_s 와 V_d 는 각각 \mathbf{K}_c 및 \mathbf{A}_d 의 함수로 표현된 구조물의 부피와 점탄성 재료의 부피를 나타내며, ν , λ 와 t_{life} 는 각각 연간지진발생빈도와 할인율, 그리고 생애주기를 의미한다. $E[\tilde{C}_T(\cdot)]$ 는 구조시스템의 정규화된 생애주기비용 기대값, $r_{d/c}$ 는 동일부피의 기둥부재비용에 대한 점탄성감쇠기비용의 비, V_f 는 단위부피의 기둥부재비용으로 정규화된 손상비용을 나타낸다.

이제, 주어진 생애주기 내에서 최소의 사회적 비용을 유발하는 구조제어시스템의 통합설계문제는 식(8)을 최소화하는 \mathbf{K}_c 및 \mathbf{A}_d 를 찾는 것으로 정의되며, 다음 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } E[\tilde{C}_T(\mathbf{K}_c, \mathbf{A}_d)] \\ & \text{subject to } k_{c_{\min}} \leq k_{c,j} \leq k_{c_{\max}} \\ & \quad A_{d_{\min}} \leq A_{d,j} \leq A_{d_{\max}} \quad (j = 1, \dots, n) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $k_{c_{\min}}$, $k_{c_{\max}}$ 는 각각 j 층의 기둥강성 $k_{c,j}$ 의 최소 및 최대 허용값을 나타내며, $A_{c_{\min}}$, $A_{c_{\max}}$ 는 각각 j 층의 점탄성 재료 단면적 $A_{d,j}$ 의 최소 및 최대 허용값을 나타낸다.

4. 유전자 알고리즘을 이용한 통합시스템의 최적설계

이 연구에서는 설계변수들, 즉 각 층의 강성(\mathbf{K}_c)과 각 층에 사용되는 점탄성 재료의 단면적(\mathbf{A}_d)을 각각 n_k^b -bit, n_a^b -bit의 2진코드(binary code)로 변환하였다. 유전자 알고리즘에서는 이

러한 염색체를 미리 정한 개체수 (N_{gn})만큼 생성하여 하나의 개체군을 구성한 뒤, 각각의 개체에 대하여 적합도를 계산한다. 개체선택의 지표가 되는 적합도함수는 식(8)의 목적함수를 사용하여 다음 식(10)으로 정의하였다.

$$F'_i = \frac{[\max(E[\tilde{C}_T]'_i) - \min(E[\tilde{C}_T]'_i)] + E[\tilde{C}_T]'_i}{\frac{1}{N_{gn}} \sum_{j=1}^{N_{gn}} E[\tilde{C}_T]'_j}, \quad (i = 1, 2, \dots, N_{gn}) \quad (10)$$

여기서 $E[\tilde{C}_T]'^i$ 와 F'_i 는 각각 i 회 반복계산시 i 번째 개체에 따른 정규화된 생애주기비용 및 그때의 적합도를 의미한다. 적합도함수값은 각 세대별로 매 개체마다 산정되고, 선택, 교배, 변이, 재생산 등의 유전연산자(genetic operator)를 조합함으로써 더 나은 해를 찾기 위한 과정을 반복해 나간다. 이러한 과정을 통하여 산정된 최적적합도값이 동일한 값으로 일정횟수이상 반복될 때, 최적해가 결정된다. 이 연구에서는 개체의 선택에 있어서 룰렛휠방식(Roulette Wheel Rule)을 사용하였으며, 교배에 있어서는 2점교배방식을 적용하였다. 돌연변이의 생성에는 선택된 개체의 2진코드를 변이확률에 따라서 대립유전자로 역위(inversion)시키는 방식을 따랐다

5. 설계 예

지진하중에 대한 구조시스템의 통합최적설계 예로서 그림 1과 같이 점탄성감쇠기가 설치된 8층 ($n=8$) 철근콘크리트 빌딩구조물을 사용하였다. 식(5)에서 빌딩구조물의 층간변위응답 한계상태를 정의할 때, 구조물의 형식 및 재료에 따라 결정되는 계수(R)는 UBC에서 일반적인 모멘트저항 콘크리트 프레임에 대하여 지정된 3.5의 값을 사용하였다. 식(8)의 생애주기비용함수 구성시, 손상비용규모 V 는 ATC에서 연구된 자료에 근거하여 완전한 파손이 발생하였을 때 초기비용의 6.13배의 값을 가지는 것으로 결정하였으며, 그 밖의 계수들은 표 1의 값을 사용하였다.

표 1. 생애주기비용의 구성에 사용된 계수

연간지진발생빈도 (ν)	0.1
할인율 (λ)	5%
구조물 생애주기 (t_{life})	50년

최적화의 방법으로 사용되어진 유전자 알고리즘의 적용시, 교배확률은 0.85, 변이확률은 0.01, 각 세대의 개체수(N_{gn})는 50개로 하였으며, 설계변수의 기호화에는 모두 64bit($n_k^b=4, n_c^b=4$)를 사용하였다.

그림 3은 임의의 한 세대에서 가장 좋은 적합도를 갖는 것으로 선정된 설계변수벡터로부터 평가된 목적함수값, 즉 정규화된 생애주기비용의 최소값($E[\tilde{C}_T]_{\min}$)과 그 비용을 구성하는 초기비용 및 손상비용 기대값을 보여주는 그래프이다. 초기 세대에서는 초기비용을 적게 사용함으로써 손상이 상대적으로 크게 나타났으나, 5회 가량 세대가 진행된 이후에는 초기비용을 최적해의

경우와 거의 유사하게 사용함으로써, 점차 최적해에 근접한 값을 찾아가는 과정을 볼 수 있다. 한편, $E[\overline{C}_T]_{\min}$ 의 경우, 초기에 급격히 감소하나 15회를 넘어서면서 서서히 감소율이 떨어지며 40회 이후 수렴하는 양상을 보인다.

동일한 초기비용을 이용하여 점탄성감쇠기가 장착된 구조시스템을 설계하였을 때, 최적설계를 수행한 경우와 그렇지 않은 경우의 응답을 비교하기 위하여, 각 층별로 균일하게 기둥강성 및 점탄성감쇠기 단면적을 배치한 경우(case 1) 얻어진 응답과 비교하여 보았다. 또한 최적해에서와 동일한 초기비용을 가지도록 기둥강성을 각 층에 균일하게 분포시키고 점탄성감쇠기의 단면적에 대해서만 최적설계를 수행한 경우(case 2)에 얻어진 응답과도 비교하여 보았다. 정규화된 초기비용, 손상비용 기대값, 전체생애주기비용 등과 정규화된 기둥부재비용 및 점탄성감쇠기비용, 그리고 층간rms변위응답 중의 최대값을 비교한 결과는 표 2와 같다.

표 2. 생애주기비용 및 주요응답 비교

	This Study	Case 1	Case 2
초기비용(m ³)	20.36	20.36	20.84
손상비용 기대값(m ³)	0.67	95.85	40.13
전체생애주기비용(m ³)	21.03	116.22	60.97
기둥부재 비용(m ³)	17.69	17.69	17.69
점탄성감쇠기 비용(m ³)	2.67	2.67	3.15
층간 rms 변위중의 최대값(cm)	0.49	0.80	0.69

case 1과의 응답을 비교하여 볼 때, 동일한 초기비용을 사용하였음에도 층간rms변위응답의 최대값을 38%, 평균값은 9.3%가량 감소시키는 효과를 가져왔다. 응답이 감소함으로 인하여 손상비용의 기대값이 현저히 감소하는 것을 볼 수 있으며, 그에 따라 전체생애주기비용이 82% 감소하는 효과를 보인다. 그러므로, 동일한 양의 구조부재를 사용한 경우, 즉 동일한 초기비용이 사용된 경우 통합설계방법이 보다 우수한 진동제어효과를 가진다.

한편, case 2의 경우 구조물의 설계변수가 고정된 상태에서 점탄성감쇠기의 단면적만을 최적설계하여 배치한 결과, 통합최적설계를 수행한 경우에 비하여 상대적으로 감쇠기의 사용량이 증가하였으며, 그에 따라 초기비용이 증가하였다. 또한 더 많은 양의 점탄성감쇠기를 사용하였음에도 불구하고 구조시스템의 파괴에 직접적으로 영향을 미치는 층간rms변위응답의 최대값은 29% 크게 발생하였다. 이에 따라 전체생애주기비용은 약 2배 가까이 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 제시하는 통합설계방법은 더 적은 초기비용을 사용함에도 점탄성감쇠기만을 최적설계한 경우에 비하여 뛰어난 지진응답 제어효과를 가지는 동시에 경제적 효율성을 확보할 수 있다는 것을 알 수 있다.

6. 결론

점탄성감쇠기가 설치된 구조시스템의 통합최적설계 방법을 제시하였다. 이는 주어진 구조물에

대하여 그에 설치될 점탄성감쇠기를 설계하던 기존의 방법과는 달리 구조물과 점탄성감쇠기를 하나의 통합된 시스템으로 간주함으로써, 구조물의 설계단계에서부터 점탄성감쇠기의 특성과 구조물의 동적특성을 동시에 최적화하는 방법이다. 최적화를 위한 목적함수로서 구조시스템이 생애주기를 통하여 사회에 유발하는 비용인 전체생애주기비용함수를 사용함으로써, 구조물의 사회적 비용 효율성을 극대화하도록 하였다. 구조물의 층별 기동강성과 점탄성감쇠기 사용량을 설계변수로 하여 생애주기비용함수를 정의하였으며, 설계변수의 동시최적화를 위하여 유전자 알고리즘을 적용하였다.

예제로서 지진하중을 받는 8자유도의 빌딩구조물에 대하여 제안하고 있는 방법의 적용성 및 효율성을 검증하였다. 동일한 초기비용을 사용하는 기존 설계방법을 통해 얻어진 응답과 비교한 결과, 제안하는 통합설계방법이 보다 우수한 진동제어효과를 발휘하였다. 또한 점탄성감쇠기만을 최적배치한 결과와의 비교를 통하여, 제안하는 방법이 더 적은 초기비용을 사용함에도 우수한 비용 효율성과 제진성능을 가지는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 2001년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비와 서울대학교 지진공학 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 고현무, 박관순, 송준호 (2000) 유체-구조물 상호작용을 고려한 지진격리 수조구조물의 비용효율성 평가. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 20권, 제 2-A호, pp. 201-215.
2. 고현무, 송준호 (1999) 사용기간비용 최소화에 의한 지진격리교량의 경제성 평가. 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제 19권, 제 I-4호, pp. 539-550.
3. 박관순 (2001) Physical Programming 및 Genetic Algorithm을 이용한 통합구조-제어시스템의 동시최적설계. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 21권, 제 4-A호, pp. 455-466.
4. 박관순, 고현무, 함대기 (2002) 점탄성감쇠기가 설치된 구조물의 통합최적설계, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 2002년 3월 출판예정.
5. 박순규, Ang, A.H-S. (1997) 철근콘크리트구조의 경제적인 내진 신뢰성. 콘크리트학회지, 한국콘크리트학회, 제 9권, 제 5호, pp. 137-148
6. Chang, K.C., Soong, T.T., Oh, S.-T. and Lai, M.L. (1992) Effect of ambient temperature on a viscoelastically damped structure. Journal of Structural Engineering., ASCE, Vol. 118, No. 7, pp. 1955-1973.
7. Chang, K.C., Lai, M.L., Soong, T.T., Hao, D.S. and Yeh, Y.C. (1993) Seismic behavior and design guidelines for steel frame structures with added viscoelastic dampers. NCEER 93-0009, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
8. ICBO (1997) 1997 Uniform Building Code - Volume 2. International Conference of Building Officials, Whittier, CA.

9. Newland, D.E. (1993) An introduction to random vibrations, spectral & wavelet analysis. John Wiley & Sons, Inc., New York.
10. Shen, K.L., Soong, T.T., Chang, K.C. and Lai, M.L. (1995) Seismic behaviour of reinforced concrete frame with added viscoelastic dampers. Engineering Structures., Vol. 17, No. 5, pp. 372-380.
11. Soong, T.T. and Dargush, G.F. (1997) Passive energy dissipation systems in structural engineering. John Wiley & Sons, Inc., New York.

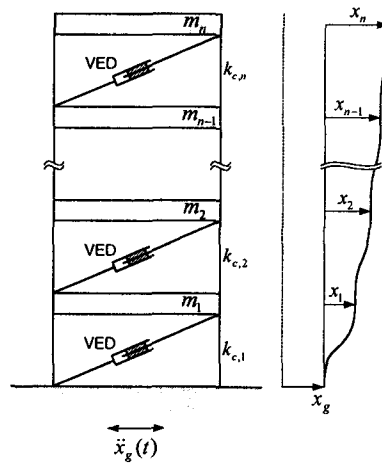


그림 1. 점탄성감쇠기가 장착된 구조물

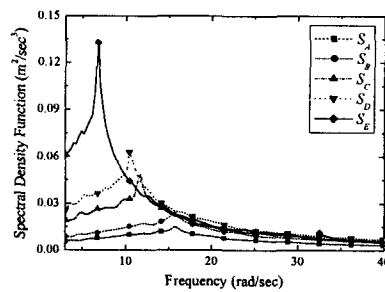


그림 2. 지반운동의 스펙트럼 밀도함수

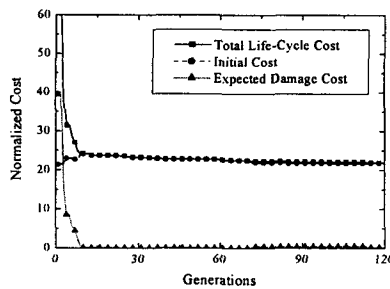


그림 3. 생애주기비용, 초기비용 및 손상비용의 반복이력