

점탄성 감쇠기와 설치용 가새의 최적설계

Optimal Design of Viscoelastic Dampers and Support Braces

박지훈*
Park, Ji Hun

이상현*
Lee, Sang Hyun

강경수**
Kang, Kyung Soo

황재승***
Hwang, Jae Seung

김진구****
Kim, Jin Koo

국문요약

본 연구는 점탄성 감쇠기의 최적설계에 관한 연구로서 기존에 독립적으로 설계되던 점탄성 감쇠기와 설치용 가새 강성의 동시 최적설계 방법을 제시하였다. 이를 위해 직렬 연결된 점탄성 감쇠기와 가새를 상태방정식으로 모델링하였으며 최대응답계수를 이용해서 각종 최대 층간변위를 구속조건으로 하여 최적화 문제를 구성하였다. 구속조건에 대한 기울기 정보를 계산하는 과정에서 구조물의 동적거동에 관한 구속조건을 포함시켜서 문제를 재구성함으로써 변수를 줄일 수 있었다. 설계예제를 통해 현실적으로 충분한 가새 강성이 제공될 수 없는 경우에는 층간변위 구속조건을 만족시키기 위해서 가새 강성을 고려한 감쇠기 설계가 필요함을 확인할 수 있었다. 또한 가새 강성을 최적화 변수에 포함시킴으로써 불필요한 가새 강성을 줄일 수 있었으며 이를 보상하기 위한 감쇠기 물량의 상대적인 증가는 크지 않다는 것을 확인할 수 있었다.

주요어 : 점탄성 감쇠기, 가새 강성, 최적설계, 최대층간변위, 최대응답계수

ABSTRACT

The purpose of this paper is to present the optimal design method of viscoelastic dampers and support brace stiffnesses. The dynamics of visco-elastic dampers and support braces connected in series is modeled by state equation. A constraint on maximum story drifts which are computed using RMS's of story drifts and peak factors is added to the optimization problem. The number of variables is reduced by including the constraint associated with the dynamic behavior of the structure in the procedure to compute the gradient of the inequality equation about constraint on the maximum story drifts. In the design example, it is confirmed that the design of dampers considering support brace stiffnesses is necessary when sufficient brace stiffnesses cannot be supplied. It is also found that unnecessary brace stiffnesses can be removed by adding brace stiffnesses to optimal design variables and that the increase of damper volumes to compensate for the variation of maximum story drifts is pretty small.

Key words : viscoelastic damper, support brace stiffness, optimal design, maximum story drift, peak factor

1. 서 론

지진, 바람과 같은 동적하중에 의한 구조물의 진동은 구조물의 강성, 질량, 감쇠, 또는 형태를 변화시키거나, 수동 또는 능동적인 제어력을 구조물에 부가함으로써 제어할 수 있다. 전자의 방법은 구조물의 안전성은 향상시키지만 비교적 작은 하중에 대해서는 비효율적인 설계가 될 수 있으며 큰 하중에 대해서는 구조물에 발생하는 영구변형으로 보수를 필요로 하게 되는 단점이 있다. 또한 사용성 측면에서 거주자의 안락함을 보장하는 데에는 한계가 있다. 이러한 경우 다양한 형태의 수동(passive), 능동(active), 준능동(semi-active), 혼용(hybrid) 제어기법들이 대안으로써 고려될 수 있다. 현재까지의 진동제어에 관한 많은 연구의 성과로 일부 방법은 실제 구조물에 적용되어 성공적으로 사용되고 있으며, 지속적인 연구 및 제안은 제어기법의 효율과 적용가능성을 향상시켜가고 있다.

그러나 이 가운데 능동, 준능동, 혼용제어 기법들은 외부 동력원과, 구조물의 응답에 대한 정확한 측정을 필요로

하며, 안정성 문제를 일으킬 수 있고 지속적인 유지관리를 필요로 하는 단점이 있다. 따라서 능동제어를 통해서만 제어의 목적이 달성 될 수 있는 특별한 경우가 아니라면 안정성, 경제성, 유지관리의 용이성 때문에 수동제어기를 설치하는 것이 적합한 경우가 많다. 본 연구는 여러 수동형 감쇠기가운데 비교적 제작과 설치가 용이한 점탄성 감쇠기의 최적설계를 목적으로 한다.

일반적으로 다층 건물에 수동형 감쇠기를 설치할 때에 문제가 되는 것은 감쇠기의 최적 설계가 된다. 감쇠기 최적 설계는 각층에 동일한 물량을 설치할 때에 목표 성능을 성취하기 위한 동일 감쇠기의 최적 파라미터 설계, 동일 감쇠기의 최적 위치 선정, 더 나아가 각층에 설치되는 감쇠기의 물량을 다르게 할 때의 최적 파라미터 설계 등이 연구되어 왔다. Zhang 등⁽¹⁾은 건물의 각층에 동일한 감쇠기가 설치될 때에 반복과정을 통해 모드변형도에너지법(modal strain energy method)에 의한 목표 감쇠비를 획득할 수 있는 점탄성 감쇠기의 구체적인 설계지침을 제시하였다. 또한 Zhang 등⁽¹⁾과 Shukla 등⁽²⁾은 층간변위를 가제어성 지수로 정의하여 이 값이 가장 큰 층에 순차적으로 설치해가는 최적위치 선정 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 각층의 감쇠기의 파라미터를 동일하게 고정시킨다는 제한점이 있기 때문에 많은 연구자들이 각층에 설치되는 감쇠기 파라미터의 최적 분포를 찾는 연구를 수행하였다. Tsuji 등⁽³⁾은 건물의

* 서울대학교 건축학과, 박사과정(대표저자 : vibcont@snu.ac.kr)

** 동명정보대학교 건축공학과, 전임강사

*** 현대건설기술연구소, 선임연구원

**** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과, 조교수

본 논문에 대한 토의를 2001년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2001. 2. 10 / 심사종료일 : 2001. 4. 20)

설계 단계에서부터 점성감쇠기와 층강성을 통합 설계함으로써 최대 층간변위에 대한 제한조건을 만족시킴과 동시에 건물의 층강성을 감소시키는 최적설계 방법을 제시하였고, Takewaki⁽⁴⁾는 건물의 각층 층간변위에 대한 1차 모드의 전달함수들의 크기의 합을 목적함수로 하는 점성감쇠기의 최적설계 방법을 제시하였으며, Gluck 등⁽⁵⁾과 Loh 등⁽⁶⁾은 능동제어 이론을 적용한 수동형 감쇠기의 최적설계 방법을 제시하였다. 국내에서는 황재승 등⁽⁷⁾에 의해 능동제어와 동일한 성능을 가지는 점성감쇠기의 최적설계에 관한 연구가 있었다.

그러나 기존의 연구들에서는 대부분 감쇠기와 구조물을 연결시켜 주는 설치용 가새와 감쇠기 간의 상호작용을 무시하고 가새의 강성이 무한대인 것으로 가정하고 있으며 Tsuji의 연구를 제외하면 층간변위에 대한 구체적인 구속조건을 도입하고 있지 않다. 그러나 현실적으로는 건물의 구조적 특징과 시공상의 문제 등으로 인해 설치 가능한 가새의 강성에는 제한이 있기 때문에 이를 고려한 설계법에 관한 연구가 필요하며 설계 기준으로서 층간변위에 대한 좀 더 구체적이고 명확한 구속조건을 도입할 필요가 있다. Fu 등⁽⁸⁾은 점탄성 감쇠기 및 점성 감쇠기와 가새 강성의 상호작용을 파라미터 스터디를 통해 규명하였으며 이를 통해 감쇠기 물량과 가새 강성의 적정 비율을 제시하였다. 그러나 이 연구는 단자유도계 모델의 파라미터 스터디를 근거로 하고 있으며 이를 다층 건물에 적용함에 있어서 각층 감쇠기의 물량을 동일한 것으로 가정하고 있다. 이후 가새의 강성을 고려한 감쇠기의 최적설계에 관한 연구는 Takewaki 등⁽⁹⁾에 의한 연구가 있었다. 이들은 모든 층의 가새 강성을 동일하다고 가정한 뒤 여러가지 가새 강성에 대하여 점성감쇠기의 점성계수를 최적설계하는 기법을 제시하였다. 그러나 이 연구는 가새 강성 자체는 설계변수에서 제외되어 있고 층간변위에 대한 1차 모드의 전달함수 크기의 총합만을 목적함수로 하였기 때문에 현실적으로 설계기준이 되기 어려운 점, 1차 모드만을 설계대상으로 하고 있다는 점, 각층의 전달함수 크기 간의 가중치 선정에 대한 명확한 기준이 없다는 단점이 있다. 본 연구에서는 점탄성 감쇠기와 가새의 상호작용을 고려하기 위하여 점탄성 감쇠기와 가새를 통합하여 상태방정식으로 모델링하고 두 가지 물리량을 모두 설계변수로 두고 최적설계를 수행하였다. 최적화 문제의 구성 및 비선형 구속조건 기율기 정보는 강경수^{(10),(11)}가 구조물의 평균진동에너지를 목적함수로 하여 다중동조질량감쇠기의 최적설계에 적용시킨 방법을 수정하여 감쇠기와 가새의 물량을 최소화하는 동시에 건축구조물의 구체적인 설계기준이 될 수 있는 각층 최대 층간변위에 대한 구속조건을 부가할 수 있도록 하였다. 목적함수와 구속조건 기율기 정보에 관한 수식을 유도하여 상용 최적화 프로그램에 적용함으로써 다양한 구속조건을 손쉽게 적용시켜 최적 설계를 할 수 있도록 하였으며 예제를 통해 감쇠기 물량과 가새 강성의 상호관계를 검토하였다.

2. 점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 상태 방정식 모델

2.1 건물의 상태방정식 모델

구조물의 수학적 모델은 백색잡음 가진에 대한 응답의 공분산을 대수적 방법으로 용이하게 구할 수 있는 상태방정식 모델을 사용하며 다음과 같이 구성된다.

$$\begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{I} \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{T}_y \ \mathbf{0}] \begin{Bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{q} 는 각층 상대변위, \mathbf{y} 는 각층 층간변위, \ddot{x}_g 는 지반 가속도, \mathbf{M} , \mathbf{D} , \mathbf{K} 는 각각 건물의 질량, 감쇠, 강성 행렬, \mathbf{I} 은 지진영향행렬, \mathbf{T}_y 는 각층 상대변위를 층간변위로 변환시켜 주는 변환 행렬이다.

2.2 상태방정식에 의한 점탄성 감쇠기와 설치용 가새의 상호작용 모델링

감쇠기는 층과 층 사이에 설치되며 그림 1과 같이 가새와 직렬 연결되는 것으로 가정하였다. 여기서 사용되는 점탄성 감쇠기의 물성은 Chang⁽¹²⁾의 실험적 연구에서 사용된 3가지 타입의 감쇠기 가운데 A-type에 해당되는 것으로서 다음 실험식을 통해 모델링하였다.

$$G'(\omega) = \frac{1}{492} e^{13.04} \cdot \left(\frac{\omega}{2\pi} \right)^{0.69} \cdot T^{-2.26} \quad (3)$$

$$G''(\omega) = \eta G'(\omega); \quad \eta = 1.12 \quad (4)$$

$$k_{di} = v_{di} G'(\omega) \quad (5)$$

$$c_{di} = \frac{v_{di} G''(\omega)}{\omega} \quad (6)$$

위 식에서 감쇠기의 두께는 1cm로 가정하였으며, $G'(\omega)$ 는 감쇠기의 저장계수(storage modulus, KN/cm²), $G''(\omega)$ 는 감쇠기의 손실계수(loss modulus, KN/cm²), η 는 감쇠기의 손실률(loss factor), v_{di} 는 i번째 감쇠기부피(cm³), k_{di} 는 i번째 감쇠기의 강성(KN/m), c_{di} 는 i번째 감쇠기의 감쇠상수(KN·sec/m), ω 는 가진 진동수(rad/sec), T 는 감쇠기의 온도(°C)이다. 따라서 감쇠기의 강성 및 감쇠상수는 가진 진동수에 지수적으로 비례 및 반비례하나 구조물의 응답은 일반적으로 1차 모드가 지배적이므로 1차 모드의 고유진동수를 사용하여 진동수에 무관한 강성 및 감쇠 상수로 모델링한다. 단 구조물에 점탄성 감쇠기를 설치하면 고유진동수가 증가하는 경향이 있으므로 최적설계 과정에서는 각 단계마다 반복과정을 통해

고유진동수를 수정해 주도록 하였으며 5회의 반복을 통해 충분히 수렴함을 확인할 수 있었다.

그림 1과 같이 설치된 점탄성 감쇠기와 가새는 그림 2와 같이 직렬 연결된 것으로 모델링할 수 있으며 층간변위와 제어력 사이의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{f}_i = -\left(\frac{k_{d_i} + k_{b_i}}{c_{d_i}}\right) f_i + \left(\frac{k_{d_i} k_{b_i}}{c_{d_i}}\right) y_i + (k_{b_i}) \dot{y}_i \quad (7)$$

$$y_i = p_{2_i} - p_{0_i} = (q_i - q_{i-1}) \cos \theta_i \quad (8)$$

여기서 f_i 는 i 번째 층에 설치된 감쇠기의 제어력, y_i 는 i 번째 층의 대각선 방향 층간변위, $(q_i - q_{i-1})$ 은 i 번째 층의 층간변위, θ_i 는 i 번째 층의 가새 설치각도이다. 각층에 설치되는 점탄성 감쇠기와 가새의 동적 특성을 설계변수인 감쇠기부피와 가새 강성을 이용해서 상태방정식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$\dot{\mathbf{f}} = [\mathbf{A}_f] \mathbf{f} + [\mathbf{B}_{f1} \ \mathbf{B}_{f2}] \begin{Bmatrix} \mathbf{y} \\ \dot{\mathbf{y}} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{T}_d \mathbf{q} \quad (10)$$

$$\mathbf{A}_f = -diag \left\{ \frac{\omega_i}{\eta} \left(1 + \frac{k_{b_i}}{v_{d_i} G'_i(\omega_i)} \right) \right\}$$

$$\mathbf{B}_{f1} = diag \left\{ \frac{\omega_i}{\eta} k_{b_i} \right\}, \quad \mathbf{B}_{f2} = diag [k_{b_i}]$$

$$\mathbf{T}_d = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\cos \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\cos \theta_n \cos \theta_n \end{bmatrix}$$

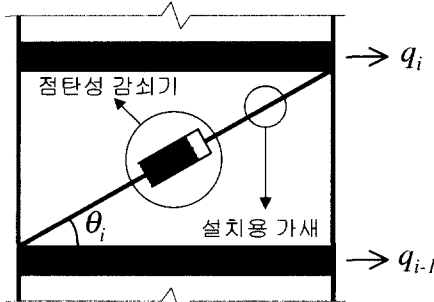


그림 1 감쇠기의 설치 형상

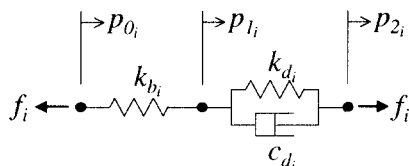


그림 2 점탄성 감쇠기와 가새의 직렬연결 모델

2.3 지반가속도의 상태방정식 모델

감쇠의 최적 분포는 가진 입력의 특성에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 지반가속도를 가진 입력으로 선정하였으며 그 진동수 특성을 모델링하기 위하여 Kanai-Tagimi 필터를 사용하였다. 이 때 지반가속도의 스펙트럼밀도함수 (power spectral density function)는 다음 식 (11)과 같이 표현된다.

$$H_{x_s}(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2}{\{1 - (\omega/\omega_g)^2\}^2 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2} S_w \quad (11)$$

여기서 필터의 고유진동수 ω_g 와 감쇠비 ξ_g 는 각각 단단한 지반에 대해서 Kanai가 제안한 15.6rad/sec와 0.6으로 가정하였다.⁽¹³⁾ S_w 는 입력인 백색잡음의 스펙트럼밀도함수의 크기이지만 출력에 대한 스케일링 역할도 겸하므로 입력을 대역폭이 25Hz이고 분산이 1인 제한대역폭 백색잡음으로 가정했을 때에 출력인 지반가속도의 최대값이 1g가 되도록 선정하였다. 이를 위해 분산이 1인 대역폭 25Hz의 100개의 임의의 Gaussian 백색 잡음에 대하여 100회의 수치해석을 통해 최대가속도의 평균값이 1g가 되는 S_w 를 산정하였다.

식 (11)과 같은 스펙트럼밀도함수를 가지는 필터는 지반가속도를 입력으로 하고 이에 대한 절대가속도 응답을 출력으로 하는 단자유도의 진동계와 동일하므로 다음과 같은 상태방정식으로 모델링하여 구조물-감쇠기 모델과 통합하였다.

$$\dot{\mathbf{q}}_w = \mathbf{A}_w \mathbf{q} + \mathbf{B}_w w \quad (12)$$

$$\ddot{x}_g = \mathbf{C}_w \mathbf{q} + \mathbf{D}_w w$$

$$\mathbf{A}_w = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_g^2 & -2\xi_g \omega_g \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_w = \begin{bmatrix} 0 \\ -S_w \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_w = [-\omega_g^2 \ -2\xi_g \omega_g], \quad \mathbf{D}_w = [0] \quad (13)$$

2.4 감쇠기가 설치된 건물의 확장된 상태방정식 모델

점탄성 감쇠기와 진동수영역 가중치 함수를 포함한 확장된 상태방정식은 다음 식 (14), (15)와 같이 모델링할 수 있다. 확장된 상태방정식의 상태변수는 n 개의 각층 상대변위, n 개의 각층 상대속도, n 개의 각층 감쇠기 제어력, 2개의 지반가속도 필터 상태변수로 구성되어 있다. 입력은 분산 1인 백색잡음이고 출력은 점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 각층 층간변위로 선정하였다. 건물의 층 수가 많아지는 경우에는 구조물의 상태변수의 수가 커지기 때문에 문제의 규모를 줄이기 위해서 참여율이 큰 주요한 모드만을 선택하여 상태변수의 갯수를 줄일 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_c \mathbf{x} + \mathbf{B}_c \ddot{x}_g \quad (14)$$

$$z = C_c x \tag{15}$$

$$x = [q^T \quad \dot{q}^T \quad f^T \quad q_w^T]^T$$

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D & -M^{-1}T_d^T & -IC_w \\ B_{f1}T_d & B_{f2}T_d & A_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_w \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ B_w \end{bmatrix}, \quad C_c = [T_y \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

3. 최대충간변위 예측

일반적으로 지진이나 바람 등의 동적하중의 특성은 명확한 시간이력 형태로 주어지지 않고 확률적으로만 주어지게 된다. 따라서 이와 같은 동적하중에 대한 구조물의 응답 역시 확률적으로만 얻어질 수 있다. 일반적으로 쉽게 대수적 방법으로 구해질 수 있는 구조물의 응답은 백색잡음 입력에 대한 RMS(root mean square) 값이며 구조물 최적설계에서 자주 사용되어 왔다.

그러나 극한하중을 받는 구조물의 설계에 있어서는 응답의 RMS값보다는 최대값이 중요한 변수가 된다. 따라서 확률적으로 응답의 최대값을 추정하는 방법에 대한 연구가 무작위진동(random vibration)이론을 통해 지속적으로 이루어져왔다.

Vanmarke⁽¹⁴⁾는 정상적 Gauss 확률과정의 최대응답의 누적 확률분포식을 제안하였으며, Kiureghian⁽¹⁵⁾은 이 식을 이용하여 Davenport가 제안한 최대응답계수를 수정하여 다음과 같은 최대응답계수 산정식을 유도하였다.

$$\mu_{y_{max}} = p \sigma_y \tag{16}$$

$$p = \sqrt{2 \ln v_e \tau} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln v_e \tau}} \tag{17}$$

$$v_e = \begin{cases} 1.63q^{0.43} - 0.38, & q < 0.69 \\ v, & q \geq 0.69 \end{cases} \tag{18}$$

$$v = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}} \tag{19}$$

$$q = \sqrt{1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_0 \lambda_2}} \tag{20}$$

여기서 p 는 최대응답계수, $\mu_{y_{max}}$ 는 평균 최대응답, σ_y 는 응답의 분산, $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ 는 각각 응답의 스펙트럼 밀도함수의 0, 1, 2차 모멘트이다. ν 는 평균영점교차율(mean zero-crossing rate)이고 v_e 는 수정된 평균영점교차율이며, 백색잡음의 지반 가속도 가진을 받는 단자유도 진동계(고유진동수 ω_0 , 감쇠비

ξ)의 변위 응답에 대한 ν_e 의 약산식은 다음과 같다.

$$v_e = \begin{cases} (1.90\xi^{0.15} - 0.73)\nu, & \xi < 0.54 \\ \nu, & \xi \geq 0.54 \end{cases} \tag{21}$$

$$\nu = \frac{\omega_0}{\pi} \tag{22}$$

또한 Kiureghian⁽¹⁶⁾은 Kanai-Tagimi 필터를 통과한 백색잡음에 대해서도 진동계의 고유진동수가 필터의 대역폭 안에 들어있는 경우에는 백색잡음에 대한 최대응답계수의 식을 사용할 수 있음을 보였다. 따라서 Kanai-Tagimi 필터를 사용하여 지반가속도를 모델링한 본 연구에서는 대부분의 구조물이 1차 모드가 지배적인 경우가 많고 예제 구조물의 고유진동수가 필터의 고유진동수보다 작기 때문에 식 (16), (17), (21), (22)를 이용하여 다자유도계 구조물의 최대변위를 예측할 수 있다고 가정하였다. 또한 1차 모드의 충간변위는 각층 상대변위의 1차 모드형상에서 구해진 충간변위의 1차 모드형상에 모드 좌표를 곱한 형태로 표현되므로 충간변위의 최대응답계수는 상대변위의 최대응답계수와 동일하다.

식 (17), (21), (22)에서 최대응답계수는 구조물의 고유진동수, 감쇠비 및 가진의 지속시간에 의해 결정되므로 최적화 과정에서 이를 고려할 필요가 있다. 그러나 설계과정에서 점탄성 감쇠기의 강성이 구조물 강성에 비해 그다지 크지 않으므로 구조물의 고유진동수의 변화는 크지 않고, 감쇠비와 가진의 지속시간이 일정할 때에 고유진동수 증가에 대하여 최대응답계수는 로그함수에 가까운 느린증가를 보이는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁶⁾ 또한 구조물의 감쇠비는 감쇠기가 설치되기 이전의 보다 크게 증가하나 감쇠비에 대한 최대응답계수의 변화 역시 비교적 완만한 것으로 알려져 있다.⁽¹⁶⁾ 따라서 최대응답계수를 최적화 변수에서는 제외하되 응답 구속조건식의 기울기 계산과정에서 구해진 구조물 1차 모드의 고유치에 따라 수정해 주었다. 가진의 지속 시간 τ 는 20초로 가정하였다.

4. 최적화문제의 구성

4.1 목적함수와 구속조건

본 연구에서는 구조물에 점탄성 감쇠기를 설치함으로써 충간변위를 제한치 이하로 줄이는 것을 목적으로 한다. 그러나 충간변위를 제한치 이하로 줄이는 점탄성 감쇠기와 가새 강성의 층별 분포는 무수히 많은 경우의 수를 가지고 있으므로 이 가운데에서 가장 적은 감쇠기의 부피와 가새 강성을 가지는 분포를 찾으려 한다. 이를 위해 최적설계의 목적함수로서는 감쇠기부피의 합의 제공과 가새 강성의 총합의 제공의 합을 선택하였고 각층 충간변위의 최대값에 관한 부등구속조건을 부가하였다. 최적화문제는 다음과 같이 정식화 된다.

$$\min f(\mathbf{v}_d, \mathbf{k}_b) \tag{23}$$

sub. to

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_c \mathbf{x} + \mathbf{B}_c w \quad (24)$$

$$z_i = \mathbf{C}_c \mathbf{x} \leq z_{\max}, \quad (i=1, \dots, n) \quad (25)$$

여기서,

$$\begin{cases} \mathbf{C}_c = i\text{-th row of } \mathbf{C}_c \\ \mathbf{v}_d = [v_{d_1}, \dots, v_{d_n}]^T \\ \mathbf{k}_b = [k_{b_1}, \dots, k_{b_n}]^T \end{cases}$$

여기서 z_{\max} 는 i 번째 층의 최대 층간변위 제한치이다. 설계 변수인 감쇠기부피와 가새의 강성에 관계된 목적함수 $f(\cdot)$ 는 초기 수렴성을 향상시키기 위해 다음 식 (26)과 같이 두 가지 설계변수의 개별합의 제곱에 상대적인 가중치를 둔 형태로 선택하였다.

$$f(\mathbf{v}_d, \mathbf{k}_b) = \left(\sum_{i=1}^n v_{d_i} \right)^2 + \alpha \left(\sum_{i=1}^n k_{b_i} \right)^2 \quad (26)$$

여기서 α 는 감쇠기부피와 가새 강성 사이의 상대적인 가중치를 결정하는 상수로서 v_{di} 와 k_{bi} 는 상이한 물리량이므로 두 변수 사이의 스케일링 역할도 하게 된다.

구조물의 동적 거동과 관계된 구속조건 (24)는 입력이 분산 1인 백색잡음이라는 가정 하에서 다음과 같은 Lyapunov 방정식으로 대체될 수 있으며 이때 행렬 \mathbf{P} 는 상태변수 \mathbf{x} 의 공분산 행렬을 의미한다.

$$\mathbf{A}_c \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_c^T + \mathbf{B}_c \mathbf{B}_c^T = \mathbf{0} \quad (27)$$

최대층간변위에 관계된 n 개의 부등 구속조건식 (25)는 층간변위의 RMS값과 최대응답치 계수 p 로부터 다음과 같은 한 개의 부등 구속조건식으로 바꿔 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} g(\mathbf{P}) &= \max_i \left(\frac{p \sqrt{E[z_i^2]}}{z_{\max}} \right)^2 - 1 \\ &= \max_i \left(\frac{p \sqrt{\mathbf{C}_c \mathbf{P} \mathbf{C}_c^T}}{z_{\max}} \right)^2 - 1 \leq 0 \end{aligned} \quad (28)$$

이 부등 구속조건식에서 각층의 층간변위의 RMS 값을 구하기 위해서는 식 (27)에서 구한 동일한 공분산을 이용하므로 추가적인 계산량은 거의 없고, 최적화 과정에서 이 부등 구속조건식과 관련된 라그랑지 멀티플라이어(Lagrange multiplier)를 n 개에서 1개로 줄일 수 있다.

상태변수의 공분산 행렬 \mathbf{P} 와 관련된 구속조건식 (27)은 상태변수의 제곱 개의 원소를 가지는 라그랑지 멀티플라이어 행렬을 추가시키게 되어서 최적화 과정에서 변수의 수를 크게 증가시키게 된다. 본 연구에서는 부등 구속조건식 $g(\cdot)$ 을 계산하는 과정에서 식 (27)의 해인 공분산 행렬 \mathbf{P} 를 사용

하고 $g(\cdot)$ 의 기울기를 계산하는 과정에서 연쇄법칙을 이용함으로써 최적화문제구성에서 구속조건식 (27)을 제거하였다. 이를 통해 라그랑지 멀티플라이어 불필요하게 됨으로써 변수의 규모가 줄어들어 최적화 과정의 수렴성을 향상시킬 수 있도록 문제를 재구성하였다. 결과적으로 부등 구속조건식 $g(\cdot)$ 의 독립변수 \mathbf{P} 는 감쇠기부피와 가새 강성으로부터 구성되는 식 (27)로부터 계산될 수 있기 때문에 최적화 변수는 v_d 와 k_b 만으로 줄어들고 최적화 문제는 다음과 같이 요약 정리 된다.

$$\min f(\mathbf{v}_d, \mathbf{k}_b) \quad (29)$$

$$\text{sub.to } g(\mathbf{v}_d, \mathbf{k}_b) \leq 0 \quad (30)$$

식 (29), (30)으로 정리된 최적화 문제의 라그랑지안(Lagrangian)은 다음 식 (31)과 같이 정의되고 Kuhn-Tucker 최적조건은 식 (32), (33), (34), (35)와 같다.

$$L(\mathbf{v}_d, \mathbf{k}_b) = f(\mathbf{v}_d, \mathbf{k}_b) - \phi \cdot g(\mathbf{v}_d, \mathbf{k}_b) \quad (31)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{v}_d} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}_d} - \phi \frac{\partial g}{\partial \mathbf{v}_d} = \mathbf{0} \quad (32)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{k}_b} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{k}_b} - \phi \frac{\partial g}{\partial \mathbf{k}_b} = \mathbf{0} \quad (33)$$

$$\phi \cdot g(\mathbf{v}_d, \mathbf{k}_b) = 0 \quad (34)$$

$$\phi \geq 0 \quad (35)$$

본 연구에는 감쇠기부피와 가새 강성의 상호작용을 살펴보는 것이 본 연구의 목적 가운데 하나이므로 가새 강성의 상한치를 구속조건으로 추가하여 최적설계를 수행하였으나 최적화 변수의 상한치 구속조건을 추가하는 문제는 상용 최적화 프로그램에서 쉽게 해결할 수 있는 문제이므로 수식적으로는 언급하지 않는다.

4.2 비선형 구속조건 기울기 계산

본 연구에서는 새로운 최적화 알고리즘을 제시하는 대신에 최적조건을 구성하는 목적함수 및 최대층간변위에 대한 구속조건식의 설계변수에 대한 기울기를 수식으로 제시하여 일반적인 상용 최적화 프로그램에 쉽게 적용할 수 있도록 하였다.

먼저 설계변수인 감쇠기부피와 가새 강성에 대한 목적함수의 기울기는 간단한 미분을 통해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial f}{\partial v_{d_i}} = 2 \sum_{i=1}^n v_{d_i} \quad (36)$$

$$\frac{\partial f}{\partial v_{d_i}} = 2\alpha \cdot \sum_{i=1}^n k_{b_i} \quad (37)$$

비선형 부등 구속조건식의 기울기는 연쇄법칙을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial g}{\partial v_{d_i}} = \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n \left(\left[\frac{\partial g}{\partial \mathbf{P}} \right] \otimes \left[\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial v_{d_i}} \right] \right)_{pq} \quad (38)$$

$$\frac{\partial g}{\partial k_{b_i}} = \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n \left(\left[\frac{\partial g}{\partial \mathbf{P}} \right] \otimes \left[\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial k_{b_i}} \right] \right)_{pq} \quad (39)$$

위 식에서 \otimes 는 동일 위치의 행렬 원소들 사이의 일대일 곱을 의미한다. 식 (38), (39)에서 구속조건식의 함수 $g(\cdot)$ 의 상태변수 공분산행렬 \mathbf{P} 에 대한 기울기행렬은 간단한 트레이스(trace) 미분법을 적용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\left[\frac{\partial g}{\partial \mathbf{P}} \right] = \left(\frac{p}{z_{\max}} \right)^2 \mathbf{C}_c^T \mathbf{C}_c \quad (40)$$

식 (38), (39)에서 상태변수의 공분산 행렬 \mathbf{P} 의 감쇠기부피 및 가새 강성에 대한 기울기 행렬은 구속조건식 (27)을 각각의 설계변수에 대해 미분해서 만들어지는 다음 Lyapunov방정식으로부터 계산될 수 있다.

$$\mathbf{A}_c \left[\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial v_{d_i}} \right] + \left[\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial v_{d_i}} \right] \mathbf{A}_c^T + \left\{ \left[\frac{\partial \mathbf{A}_c}{\partial v_{d_i}} \right] \mathbf{P} + \mathbf{P} \left[\frac{\partial \mathbf{A}_c}{\partial v_{d_i}} \right]^T \right\} = \mathbf{0} \quad (41)$$

$$\mathbf{A}_c \left[\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial k_{b_i}} \right] + \left[\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial k_{b_i}} \right] \mathbf{A}_c^T + \left\{ \left[\frac{\partial \mathbf{A}_c}{\partial k_{b_i}} \right] \mathbf{P} + \mathbf{P} \left[\frac{\partial \mathbf{A}_c}{\partial k_{b_i}} \right]^T \right\} = \mathbf{0} \quad (42)$$

여기서 행렬 \mathbf{A}_c 의 감쇠기부피에 대한 기울기 행렬과 가새 강성에 대한 기울기 행렬 및 계산에 필요한 부속 행렬들은 간단한 미분을 통해서 다음과 같이 계산된다.

$$\left[\frac{\partial \mathbf{A}_c}{\partial v_{d_i}} \right] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left[\frac{\partial \mathbf{A}_f}{\partial v_{d_i}} \right] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$\left[\frac{\partial \mathbf{A}_c}{\partial k_{b_i}} \right] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \left[\frac{\partial \mathbf{B}_{f1}}{\partial k_{b_i}} \right] \mathbf{T}_d & \left[\frac{\partial \mathbf{B}_{f2}}{\partial k_{b_i}} \right] \mathbf{T}_d & \left[\frac{\partial \mathbf{A}_f}{\partial k_{b_i}} \right] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$\left[\frac{\partial \mathbf{A}_f}{\partial v_{d_i}} \right]_{pq} = \begin{cases} \frac{\omega_i k_{b_i}}{\eta v_{d_i}^2 G'_i(\omega_i)} & (\text{if } p=q=i) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (45)$$

$$\left[\frac{\partial \mathbf{A}_f}{\partial k_{b_i}} \right]_{pq} = \begin{cases} -\frac{\omega_i}{\eta v_{d_i}^2 G'_i(\omega_i)} & (\text{if } p=q=i) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (46)$$

$$\left[\frac{\partial \mathbf{B}_{f1}}{\partial k_{b_i}} \right]_{pq} = \begin{cases} \frac{\omega_i}{\eta} & (\text{if } p=q=i) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (47)$$

$$\left[\frac{\partial \mathbf{B}_{f2}}{\partial k_{b_i}} \right]_{pq} = \begin{cases} 1 & (\text{if } p=q=i) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (48)$$

5. 예제

예제 구조물은 8층의 전단건물로서 각층 질량은 345.6ton, 각층 강성은 3,404,000KN/m로서 동일하고, 1차 모드의 고유진동수는 0.92Hz이며, 감쇠비는 모든 모드가 2%인 것으로 가정하였다. 감쇠기와 가새가 구조물에 설치된 형상은 앞의 그림 1과 동일하다. 또한 최적설계 가새 강성의 구속조건에 따른 최적설계 결과의 차이를 살펴보기 위해서 가새 강성의 상한치를 층강성의 2, 4, 8, 16, 32, 64배인 경우로 나누어 최적설계를 수행하였다.

최적설계는 크게 4가지 방법으로 나누어서 수행하였다. 먼저 최적설계 1, 2, 3은 모두 목적함수로 감쇠기부피의 총합만을 선택하였다. 이 가운데 최적설계 1은 가새 강성이 무한대라고 가정한 경우로 수치해석 상 가새 강성을 층강성의 1000배로 고정시키고 설계하였다. 최적설계 2는 가새 강성을 상한치에 고정시켜 놓고 설계하였다. 최적설계 3은 가새 강성을 설계변수에 포함시켰으며 상한치에 대한 부등구속 조건을 두고 설계하였다. 최적설계 4는 감쇠기부피 합과 가새 강성 합의 조합을 목적함수로 삼고 가새 강성의 상한치에 대한 부등구속 조건을 두고 설계하였다. 4가지 최적설계 과정에서 점탄성 감쇠기는 그림 1과 같은 형식으로 설치할 때에 여러 겹으로 설치함으로써 쉽게 부피를 증가시킬 수 있으므로 구속조건을 두지 않았다.

최적설계 4의 목적함수에서 식 (26)의 가중치 α 는 가새 강성 상한치가 층강성의 배수인 점과 최적설계 2에서 설계된 감쇠기부피의 차수를 고려하여 최적화 변수인 가새 강성을 스케일링하고, 설계결과 비교를 위해 최적설계 2, 3과 유사한 크기의 감쇠기가 설치될 수 있도록 시행착오를 통해 다음과 같이 선정하였다.

$$\alpha = \left(0.04 \times \frac{10^4}{3404000} \right)^2 = 1.3808 \times 10^{-8} \quad (49)$$

감쇠기와 가새의 상호작용은 가새 강성에 대한 감쇠기 물량의 상대적인 크기에 따라 달라지므로 상대적으로 감쇠기의 필요량이 많은 경우와 적은 경우로 구분하기 위해 각층 최대층간변위에 대한 구속조건을 감쇠기 설치 이전의 60%와 30%로 하여 최적설계를 수행하였다. 각각의 설계과정에 대해 목적함수, 설계변수, 가새 강성 및 응답에 대한 구속조건을 표 1, 2에 정리하였다

표 1 최적설계 조건

구분	목적함수 (α)	설계변수	구속조건
최적설계1	감쇠기부피 합 (0)	감쇠기부피	가새 강성 무한대
최적설계2	감쇠기부피 합 (0)	감쇠기부피	가새 강성 고정
최적설계3	감쇠기부피 합 (0)	감쇠기부피, 가새 강성	가새 강성 상한
최적설계4	감쇠기부피 합과 가새 강성 합의 조합 (1.3808×10^{-6})	감쇠기부피, 가새 강성	가새 강성 상한

표 2 응답 구속조건

구분	응답 구속조건 A	응답 구속조건 B
구속조건	최대 층간변위를 60%로 감소	최대 층간변위를 30%로 감소

본 연구에서 사용한 최적화 알고리즘은 sequential quadratic programming 방법으로서 상용프로그램인 MATLAB에서 제공하는 optimization toolbox를 이용하였다. 감쇠기부피와 가새 강성의 초기값은 모두 0으로 하는 것을 원칙으로 하였으나 감쇠기 모델링 식 (9)의 행렬 A_r 의 원소에서 감쇠기의 부피가 분모에 들어가기 때문에 0으로 나눠주는 것을 방지하기 위해서 $2cm^3$ 를 각층 감쇠기부피의 하한치로 하였다. 감쇠기부피의 초기값은 하한치와 동일하며, 가새 강성의 초기값은 0으로 하였다.

응답 구속조건 A(약한 응답 구속조건)에 대해서 가새 강성이 층강성의 64배인 경우와 2배인 경우의 감쇠기 설계결과는 그림 3과 같다. 쉽게 예상할 수 있듯이 감쇠기는 층간변위가 큰 저층부로 갈수록 많이 설치되고 상층부에는 설치되지 않는 것을 볼 수 있다. 가새 강성 상한치가 큰 경우에는 가새 강성을 고려한 최적설계 2, 3, 4와 그렇지 않은 최적설계 1의 감쇠기 분포에 큰 차이가 없으나 가새 강성의 상한치가 작은 경우에는 최적설계 1의 경우에 비해 최적설계 2, 3, 4의 설계결과가 더 많은 감쇠기부피를 요구하고 있음을 알 수 있다. 그러나 최적설계 2, 3, 4 사이에는 가새 강성 상한이 큰 경우에 최적설계 4가 약간 더 설치되었지만 전반적으로 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

응답 구속조건 A에 대한 가새 강성의 설계 결과는 각각 그림 4와 같다. 가새 강성의 상한치가 큰 경우인 그림 4(a)를 보면 가새 강성을 목적함수에 포함시킨 최적설계 4의 경우에

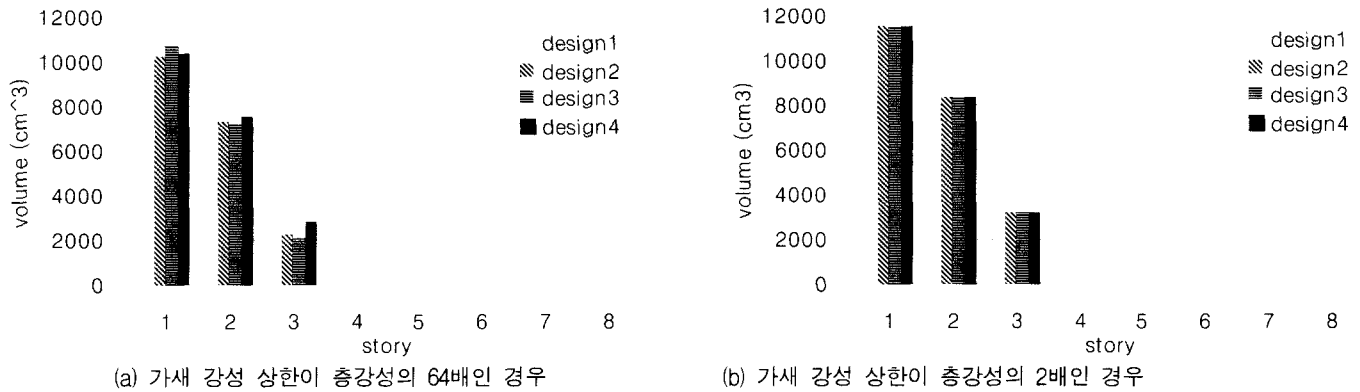


그림 3 응답 구속조건 A에 대한 감쇠기 설계결과

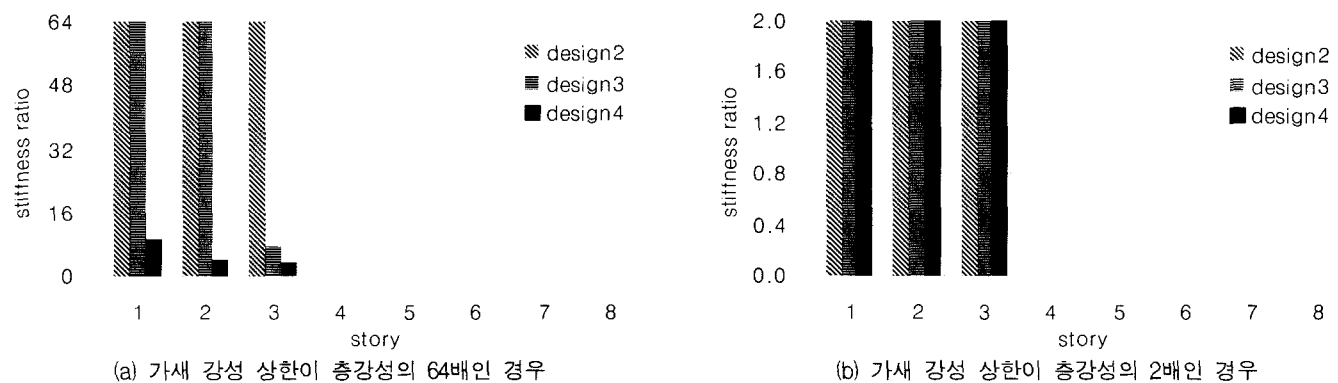
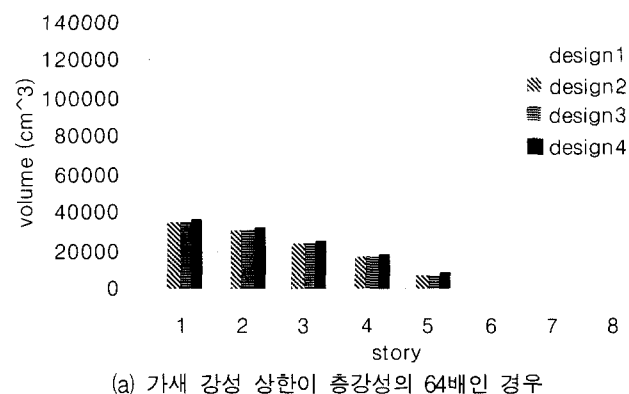


그림 4 응답 구속조건A에 대한 가새 강성 설계결과

가새 강성의 상한치 구속조건이 활성화되지 않은 상태에서 최대응답 구속조건을 만족시키고 있음을 알 수 있다. 목적함수에서 가새 강성과 감쇠기부피사이의 상대적인 가중치에 따라서 다른 설계결과가 나올 수 있으나 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이 최적설계 4에서 가새 강성의 감소에 대한 보상으로 증가한 감쇠기부피는 매우 작다는 것을 알 수 있다. 이는 일반적으로 감쇠기 물량이 일정한 경우에 가새 강성이 증가할수록 제어효과가 향상되지만 그 효율성은 줄어들기 때문에 적정 가새 강성비를 선택하는 것이 중요함을 의미하며 가새 강성을 목적함수에 포함시키면 불필요한 가새 강성을 크게 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다. 반면에 가새 강성의 상한치가 매우 작은 경우의 설계결과는 최적설계 2, 3, 4 모두 가새 강성이 상한치에 도달했음을 알 수 있다. 따라서 충분한 가새 강성이 제공될 수 없는 경우에는 가새 강성을 상한치에 놓고 단순히 감쇠기량에 대해서만 설계해도 같은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있으나 그 적정 경계선에 대한 충분한 검토가 필요하다.

응답 구속조건 B(강한 응답 구속조건)에 대해서 가새 강성이 층강성의 64배인 경우와 2배인 경우의 감쇠기 설계결과는 그림 5와 같다. 응답 구속조건이 강해졌지만 가새 강성을 무한대로 가정하고 설계한 최적설계 1의 경우에는 상층부에 감쇠기가 설치되지 않고 있다. 그러나 가새 강성에 대한 구속조건을 층강성의 2배로 두고 설계한 최적설계 2, 3, 4의 경우에는 모든 층에 감쇠기가 설치되고 있으므로 가새 강성에 따라 설치 층수에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 그림 5(a)에서



볼 수 있듯이 가새 강성에 대한 상한치가 큰 경우에는 최적설계 1, 2, 3, 4 사이에 큰 차이가 없다. 그러나 그림 5(b)에서 볼 수 있듯이 가새 강성에 대한 상한치가 작은 경우에는 가새 강성을 무한대로 놓고 설계한 경우와 그렇지 않은 경우의 설계결과 사이에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 그림 6은 이 경우에 각층 최대 층간변위 응답의 분포를 나타낸 것이며, 여기서 최적설계 1의 응답분포는 가새 강성이 무한대인 것으로 가정하고 설계한 감쇠기 설치량을 층강성의 2배에 해당되는 가새에 설치한 경우이다. 최적설계 1의 1층 응답감소율은 38.6%로서 응답구속조건 30%보다 8.6%를 초과하고 있다. 따라서 가새 강성이 충분히 제공되기 힘든 경우에 응답 구속조건을 만족시키기 위해서는 가새 강성을 고려한 설계가 필요하다고 할 수 있다.

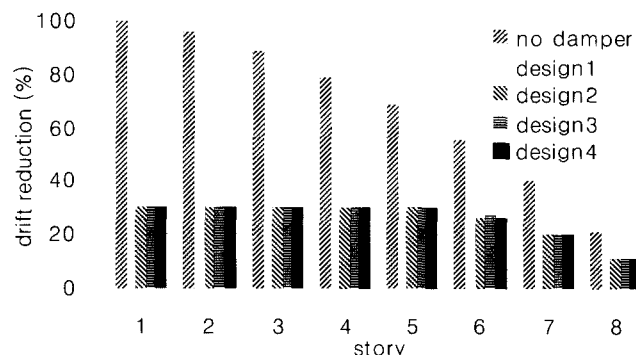


그림 6 최대층간변위 분포(응답구속조건 B, 가새 강성 상한 : 층강성의 2배)

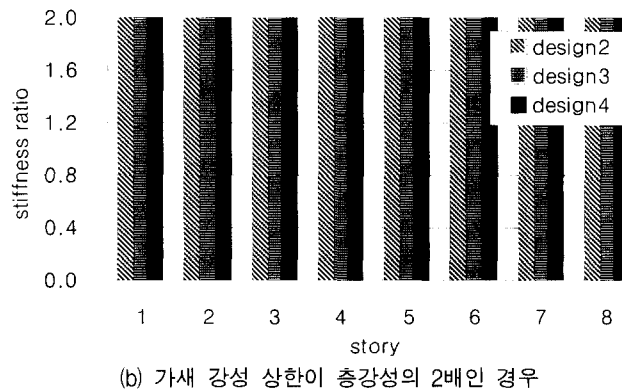
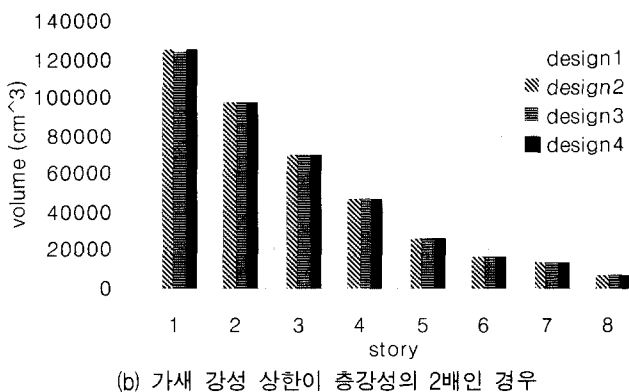
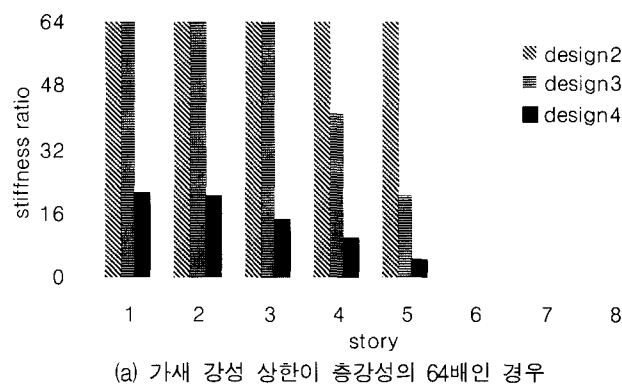


그림 5 응답구속조건 B에 대한 감쇠기 설계결과

그림 7 응답구속조건 B에 대한 가새 강성 설계결과

응답 구속조건B에 대하여 가새 강성의 설계 결과는 각각 그림 7과 같다. 가새 강성의 상한치가 큰 경우인 그림 7(a)를 보면 가새 강성을 목적함수에 포함시킨 최적설계 4의 경우에 가새 강성의 상한치 구속조건이 활성화되지 않은 상태에서 최대응답 구속조건을 만족시키고 있음을 알 수 있으며 그림 5(a)에서 확인할 수 있듯이 가새 강성의 감소에 대한 보상으로 증가한 감쇠기부피는 거의 없다는 것을 알 수 있다. 따라서 응답구속조건 A에 대한 설계결과와 마찬가지로 가새 강성을 설계변수에 포함시키면 불필요한 가새 강성을 크게 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다. 반면에 가새 강성의 상한치가 작은 경우의 설계결과는 그림 7(b)와 같으며 최적설계 2, 3, 4 모두 가새 강성이 상한치에 도달했고, 따라서 가새 강성을 상한치에 놓고 단순히 감쇠기량에 대해서만 설계해도 같은 설계결과를 얻을 수 있음을 예상할 수 있다.

가새 강성을 설계변수에 포함시켰을 때, 그 상한치에 따른 설계결과와 변화를 알아보기 위해 최적설계 4의 결과를 표 3, 4에 정리하였다. 여기서 감쇠기 총량과 가새 강성 총합의

증감률은 가새 강성을 상한치에 고정시킨 최적설계 2의 결과와 비교한 것이며 음영으로 나타낸 부분은 설계된 가새 강성이 상한치에 도달했음을 의미한다. 응답 구속조건 A, B 모두에 대해서 최적설계 4의 감쇠기의 총량은 최적설계 2의 최대 5% 이내에서 변동하였다. 따라서 본 예제에서와 같이 적절한 가중치를 선정한다면 가새 강성을 설계변수에 포함시키는가의 여부는 설계된 감쇠기량에 큰 영향을 주지 못한다. 그러나 응답 구속조건 A의 경우, 상한치가 증강성의 16배에 도달하면서부터 상한치보다 작은 가새 강성이 설계된 층이 발생하고 상한치가 증강성의 32배에 도달하면서부터 최적설계 4의 가새 강성 총합이 최적설계 2에 비해 급격히 줄어들기 시작하고 있다. 또한 응답 구속조건 B의 경우, 상한치가 증강성의 4배에 도달하면서부터 상한치보다 작은 가새 강성이 설계된 층이 발생하고 상한치가 증강성의 8배에 도달하면서부터 최적설계 4의 가새 강성 총합이 최적설계 2에 비해 급격히 줄어들기 시작하고 있다. 동일한 가새 강성 상한치에 대해서 응답 구속조건 A와 B의 가새 강성 총합의 증감률을 비교해보면 응답 구속조건이 강할수록 통합 최적화를 통해 상대적으로 경제적인 설계가 됨을 알 수 있다.

표 5는 구속조건 A, B에 대해서 가새 강성의 상한치를 증강성의 2배에서 64배까지 늘려가면서 설계한 결과를 토대로 각각 100회씩의 수치해석을 통해 최대응답의 평균치를 구하여 최대응답계수에 의한 예측치와 비교한 것이다. 수치해석에서는 지반가속도 입력으로서 식 (12), (13)의 Kanai-Tagimi 필터를 통과시킨 평균 최대값 1g, 지속시간 20초인 제한대역 백색잡음을 사용하였다. 표 5에서 수치해석 결과로 얻어진 평균 최대응답의 예측치에 대한 백분율을 정리한 것이다. 비제어시에는 최대응답 계수에 의한 예측치가 실제 평균치의 약 90%로서 과소평가한 반면에 제어시에는 평균적으로 100%에 가까운 적중률을 보이고 있다. 비제어시의 예측치가 부정확한 것은 본 설계 예제에서 사용된 최대응답치 계수가 단자유도계 구조물에 대한 것이기 때문에 실제로는 다자유도계인 건물의 응답과는 차이가 있기 때문이고 제어시에 예측치가 상대적으로 더 정확한 것은 고차모드가 감소되는 정도가 현저하여 1차모드의 영향이 커지기 때문인 것으로 보인다.

그림 8은 지반가속도 입력으로 사용한 필터 통과 백색

표 3 응답구속조건 A에 대한 가새 강성 상한치 별 최적설계4 결과

구분		가새 강성 상한치 (단위 : 증강성)					
		2.0	4.0	8.0	16.0	32.0	64.0
가새 강성 설계결과 (단위 : 증강성)	1층	20	40	80	160	20.4	20.9
	2층	21	40	80	160	19.2	20.7
	3층	20	40	80	15.1	14.9	14.5
	4층	.	.	.	.	.	.
	5층	.	.	.	.	.	.
	6층	.	.	.	.	.	.
	7층	.	.	.	.	.	.
	8층	.	.	.	.	.	.
	총합 (증감률)	6.0 (100%)	12.0 (100%)	24.0 (100%)	47.1 (98%)	54.5 (57%)	56.1 (29%)
감쇠기 설계결과 (증감률)	총합 23.1 (100%)	21.3 (101%)	20.6 (101%)	20.5 (103%)	20.5 (103%)	20.7 (105%)	

표 4 응답구속조건 B에 대한 가새 강성 상한치 별 최적설계4 결과

구분		가새 강성 상한치 (단위 : 증강성)					
		2.0	4.0	8.0	16.0	32.0	64.0
가새 강성 설계결과 (단위 : 증강성)	1층	20	40	80	160	20.4	20.9
	2층	21	40	80	160	19.2	20.7
	3층	20	40	80	15.1	14.9	14.5
	4층	20	40	80	10.8	9.4	9.8
	5층	20	40	5.8	4.8	4.5	4.5
	6층	21	3.5	.	.	.	.
	7층	21	.	.	.	.	.
	8층	20	.	.	.	.	.
	총합 (증감률)	16.0 (100%)	23.5 (98%)	37.8 (79%)	62.7 (78%)	68.4 (43%)	70.4 (22%)
감쇠기 설계결과 (증감률)	총합 402.7 (100%)	153.8 (100%)	127.8 (100%)	119.3 (101%)	118.3 (103%)	118.2 (105%)	

표 5 최적설계4의 1층 최대 층간변위의 수치해석 결과 비교

가새 강성 상한치 (단위 : 증강성)	비제어시 예측치=0.1238		응답구속조건A 예측치=0.0743		응답구속조건 B 예측치=0.0371	
	최대값 (cm)	정확도 (%)	최대값 (cm)	정확도 (%)	최대값 (cm)	정확도 (%)
2	0.1137	92	0.0740	99	0.0369	99
4	0.1100	89	0.0732	102	0.0377	102
8	0.1118	90	0.0721	101	0.0374	101
16	0.1116	90	0.0733	101	0.0374	101
32	0.1081	87	0.0731	97	0.0359	97
64	0.1083	88	0.0728	101	0.0375	101

잡음의 한 예이며, 그림 9는 응답 구속조건 A와 B에 대하여 가새 강성의 상한이 층강성의 64배인 최적설계 4에 의한 설계 결과를 토대로 한 수치해석 결과의 시간이력 곡선으로서 최대응답이 응답구속조건을 잘 만족함을 보이고 있다.

본 연구에서 제시한 최적화 과정 가운데 문제점은 최대응답치 계수를 기울기 계산 과정에서 상수로 가정하면서 최적화 단계마다 수정해 나가는 방법을 사용했다는 것인데 이는 이 계수의 변화가 완만하다는 가정에 근거한다. 그림 10은

최적화 과정에서 최대응답계수의 변화 추이를 나타내고 있다. 중간중간에 최대응답계수가 갑작스럽게 변화하는 부분이 몇 곳 있지만 전체적으로는 변화폭(초기값의 13%)이 크지 않기 때문에 완만한 변화를 보이면서 수렴해 간다고 할 수 있다. 그러나 초기에 최적해를 찾는 과정에서 국부최적으로 빠지게 될 가능성이 있기 때문에 이를 보완할 수 있는 방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 생각된다.

6. 결 론

본 연구는 점탄성 감쇠기의 최적설계에 관한 연구로서 기존에 독립적으로 설계되던 점탄성 감쇠기와 설치용 가새 강성의 동시 최적설계 방법을 제시하고 예제를 통해 감쇠기 물량과 가새 강성의 상호관계를 고찰하였다. 본 연구에서는 이를 위해 직렬연결된 점탄성 감쇠기와 가새를 상태방정식으로 모델링하여 구조물의 상태방정식과 통합하였다. 또한 일반적으로 최적설계에서 많이 이용되는 구조물의 평균응답 대신 최대응답계수를 이용해서 건축 구조물의 설계에서 중요시되는 최대응답을 구속조건으로 하여 최적화 문제를 구성하였다. 그리고 층간변위응답 구속조건에 대한 기울기 정보를 계산하는 과정에 구조물의 동적거동에 관한 구속조건을 포함시켜 문제를 재구성함으로써 최적화 문제의 변수를 줄일 수 있었다.

예제구조물에 대한 감쇠기-가새 동시 최적설계를 통해 현실적으로 충분한 가새 강성이 제공될 수 없는 경우에는 응답에 대한 구속조건을 만족시키기 위해서 가새 강성을 고려하여 감쇠기를 설계해야 함을 확인할 수 있었다. 또한 가새 강성을 최적화변수에 포함시킴으로써 불필요한 가새 강성을 줄일 수 있었으며 이를 보상하기 위한 감쇠기 물량의 상대적인 증가는 크지 않다는 것을 알 수 있었다. 따라서 점탄성 감쇠기와 가새 강성의 동시 최적설계를 통해 구조물의 안전성과 경제성을 모두 확보할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국 과학재단 특정기초연구 과제(과제번호: 1999-1-310-001-3)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Zhang, R. and Soong, T. T., "Seismic design of viscoelastic dampers for structural applications," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 5, 1992, pp. 1375-1392.
2. Shukla, A. K. and Datta, T. K., "Optimal use of viscoelastic dampers in building frames for seismic force," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No. 4, 1999, pp. 401-409.
3. Tsuji, M. and Nakamura, T., "Optimum viscous dampers for stiffness design of shear buildings," *Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 5, 1996, pp. 217-234.

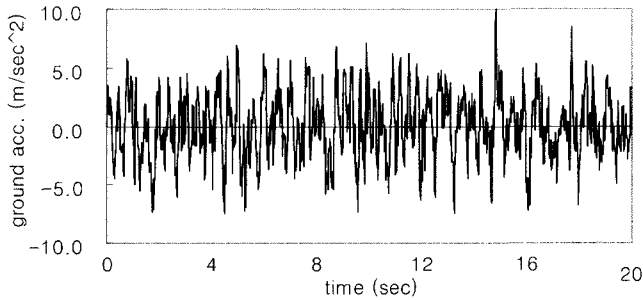
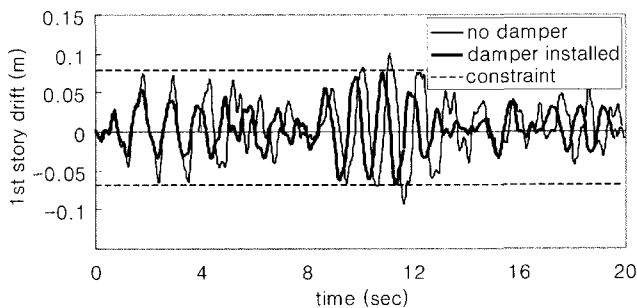
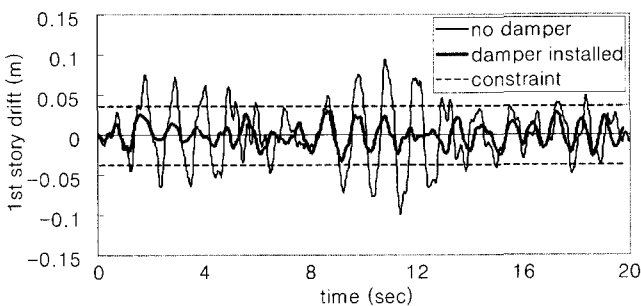


그림 8 가진 지반가속도(필터 통과 백색잡음)



(a) 응답 구속조건 A



(b) 응답 구속조건 B

그림 9 1층 층간변위 응답(최적설계4, 가새 강성 상한=층강성의 64배)

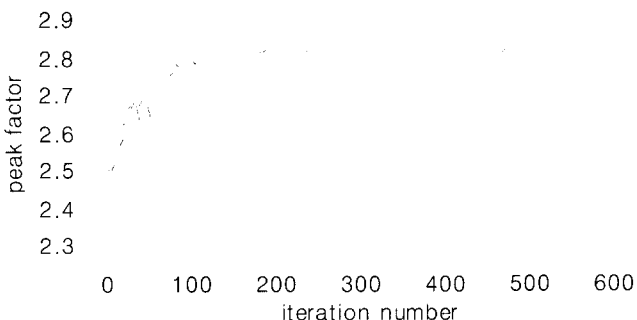


그림 10 최대응답계수의 변화 추이(최적설계4, 응답 구속조건 B, 가새 강성 상한=층강성의 64배)

4. Takewaki, I., "Optimal damper placement for minimum transfer functions," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, 1997, pp. 1113-1124.
5. Gluck, N., Reinhorn, A. M., Gluck, J., and Levy, R., "Design of supplemental dampers for control of structures," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 122, No. 12, 1996, pp. 1394-1399.
6. Loh, C. H., Lin, P. Y., and Chung, N. H., "Design of dampers for structures based on optimal control theory," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, 2000, pp. 1307-1323.
7. 황재승, 민경원, 홍성목, "건물 구조물을 위한 능동 제어 효과를 가지는 수동 점성감쇠기의 최적설계", 한국소음진동공학회지, 제5권, 제2호, 1995, pp. 225-234.
8. Fu, Y. and Kasai, K., "Comparative study of frames using viscoelastic and viscous dampers," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 5, 1998, pp. 513-522.
9. Takewaki, I. and Yoshitomi, S., "Effects of support stiffness on optimal damper placement for a planar building frame," *Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 7, 1998, pp. 323-336.
10. 강경수, "동적횡하중을 받는 고층건물의 횡변위제어를 위한 동조질량감쇠기의 최적설계에 관한 연구," 박사학위논문, 서울대학교, 1997, p. 135.
11. 강경수, 주석준, 홍성목, "다중동조질량감쇠장치의 최적설계에 관한 연구," 대한건축학회논문집, 제13권, 제4호, 1997, pp. 341-350.
12. Chang, K. C., Soong, T. T., Oh, S. T., and Lai, M. L., "Seismic behavior of steel frame with added viscoelastic dampers," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 10, 1995, pp. 1418-1426.
13. Clough, R. W. and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, 1993, p. 738.
14. Vanmarkcke, E. H., "Properties of spectral moments with applications to random vibration," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 98, No. EM2, 1972, pp. 425-446.
15. Kiureghian, A. D., "Structural response to stationary excitation," *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 106, No. EM6, 1980, pp. 1195-1213.
16. Kiureghian, A. D., "A response spectrum method for random vibration analysis of MDF systems," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 9, 1981, pp. 419-435.