

비구속형 점탄성 제진층을 갖는 보의 제진층 길이 최적화

Length Optimization for Unconstrained Visco-elastic Damping Layer of Beams

이 두 호[†] · 황 우 석*

Doo-Ho Lee and Woo-Seok Hwang

(2003년 10월 14일 접수 : 2003년 11월 14일 심사완료)

Key Words : Length Optimization(길이 최적화), Unconstrained Damping Layer(비구속 제진층), Loss Factor(손실계수), Viscoelastic Material(점탄성 물질), Fractional Derivative Model(유리미분모델)

ABSTRACT

Length of an unconstrained viscoelastic damping layer on beams is determined to maximize loss factor using a numerical search method. The fractional derivative model can describe damping characteristics of viscoelastic damping materials accurately, and is used to represent nonlinearity of complex modulus with frequencies and temperatures. Equivalent flexural rigidity of the unconstrained beam is obtained using Ross, Ungar, Kerwin[RUK] equation. The loss factors of partially covered unconstrained beam are calculated by a modal strain energy method. Optimal lengths of the unconstrained viscoelastic damping layer of beams are identified with ambient temperatures and thickness ratios of beam and damping layer by using a finite-difference-based steepest descent method.

기 호 설 명

$\alpha(T)$: 온도에 따른 이동계수(shift factor)
 b : 설계변수(제진층의 피복길이)
 E^* : 복소 계수(complex modulus)
 ϵ : 변형율(strain)
 e^* : 강성계수의 비($= E_2^*/E_1^*$)
 f : 주파수(frequency, Hz)
 H_1 : 보의 두께
 H_2 : 제진층의 두께
 h : 제진층과 보의 두께비($= H_2/H_1$)
 η : 손실계수(loss factor)
 i : 단위허수($= \sqrt{-1}$)
 K : 강성행렬(stiffness matrix)

M : 질량행렬(mass matrix)
 ρ : 밀도
 T : 온도(temperature)
 t : 시간(time)
 σ : 응력(stress)
 U : 탄성변형 에너지
 x : 변위(displacement)
 ω : 각속도

1. 서 론

구조물의 공진은 큰 진동을 일으키며, 구조물의 공진점 부근에서의 진동 진폭의 크기는 공진모드의 감쇠의 크기에 의해서 크게 영향을 받는다. 구조물 내부의 손실계수(loss factor)가 크지 않고, 공진을 피할 수 없는 경우에, 진동의 제어가 필요하며, 이러한 경우 손실계수가 매우 큰 점탄성 물질(viscoelastic material)을 구조물의 표면에 부착시켜 진동 진폭을

[†] 책임저자 : 정희원, 동의대학교 기계공학과
E-mail : dooho@deu.ac.kr
Tel : (051) 890-1658, Fax : (051) 890-2232
* 정희원, 대구대학교 자동차/산업/기계공학부

줄이는 수동적인 진동제어 방법이 많이 쓰이고 있다. 점탄성 물질을 이용한 수동적 진동제어 방법은 경제적으로 비용이 적게 들 뿐만 아니라, 신뢰성면에서도 우수하다는 장점이 있다.

구조물의 표면에 점탄성 층을 부착하여 진동을 저감시키는 방법은 구속제진층(constrained damping layer)을 이용하는 방법과 비구속 제진층(unconstrained damping layer)을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 구속 제진층은 모재에 점탄성 층을 부착하고 그 위에 얇은 구속층을 덮으로써 점탄성 층이 전단변형을 받을 때 진동에너지가 소산되는 것을 이용한 것이며, 비구속 제진층은 Fig. 1과 같이 구조물에 점탄성 재료를 피복하고 모재가 변형할 때 굽힘 변형을 하게 되고, 제진층의 굽힘변형시 에너지의 소산이 일어난다. 일반적으로 구속형 제진층이 에너지의 감쇠 효율이 크지만 비구속형 제진층이 저비용으로 제진처리를 할 수 있기 때문에 자동차의 플로어 등에 많이 쓰이고 있다.

제진층이 부착된 구조물을 해석하고 제진층부착 위치를 최적화하려는 노력은 적지 않은 연구자의 관심 영역으로 자리를 잡았다. 제진층을 구성하는 점탄성 물질의 감쇠특성은 복잡한 분자구조에 때문에 온도와 가진 주파수에 따라 크게 변하며 점탄성 제진층을 갖는 보의 운동해석시 이에 대해 고려는 필수적이라고 할 수 있다. 그러나 점탄성 제진층이 부착된 보에서 제진층의 부착길이와 위치를 최적화는 많은 연구는 점탄성 물질의 특성을 일정하다고 가정하거나^(1,2,4-9) 주파수에 따른 강성계수 및 감쇠의 변화를 고려하여도^(3,10,11) 온도의 변화에 따른 특성 변화를 고려한 경우는 거의 없다.

본 연구에서는 비구속 점탄성 제진층을 갖는 보의

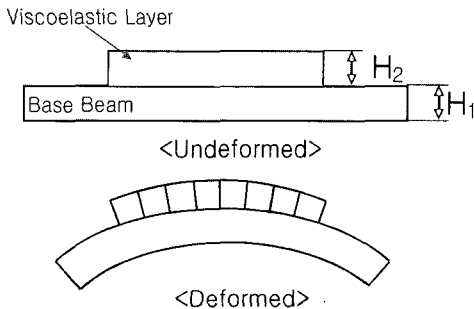


Fig. 1 Unconstrained viscoelastic damping layer on a beam

경우에 있어서 주파수와 온도의 영향을 고려하여 최대 손실계수를 갖도록 제진층의 길이를 최적화하는 방법을 제시한다.

2. 비구속 제진층 보의 해석

2.1 점탄성 물질의 모델링

천연고무, 합성수지, 접착제 등과 같은 점탄성 물질은 복잡한 구조의 폴리머로 이루어져 있다. 이러한 폴리머 계열의 물질들은 조화성분의 외력을 가하는 경우 발생된 응력과 변형은 시간 또는 위상 지연을 갖는 점탄성(visco-elastic)적인 성질을 갖는다. 점탄성 물질의 응력-변형을 관계는 다음과 같이 일반적으로 기술될 수 있다.

$$\sigma(t) + \sum_{i=1}^n b_i \frac{d^i \sigma}{dt^i} = a_0 \varepsilon(t) + \sum_{i=1}^m a_i \frac{d^i \varepsilon}{dt^i} \quad (1)$$

여기서 σ , ε 는 각각 응력, 변형률이고 t 는 시간이다. 또한 a_0 , a_i , b_i , m , n 은 물질의 특성을 표현하는 상수이다. 식 (1)은 여러 가지 점탄성 모델을 표현하며, 예를 들면, 표준모델로 불리는 Zener 모델의 경우는, 식 (1)에서 m 과 n 이 모두 1인 경우이다.

점탄성 물질의 동특성은 복소계수의 개념을 이용하여 주파수 영역에서 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{\sigma} = E^* \bar{\varepsilon} = E(1 + i\eta) \bar{\varepsilon} \quad (2)$$

여기서 $i = \sqrt{-1}$ 이며, $\bar{\sigma}$, $\bar{\varepsilon}$ 는 응력과 변형률을 푸리에 변환(Fourier transform)한 양이고, E^* , E , η 는 각각 복소계수(complex modulus), 저장계수(storage modulus)와 손실계수(loss factor)이다.

식 (2)로 표현되는 점탄성 물질의 복소계수와 손실계수는 많은 환경인자의 영향을 받는다. 많은 환경인자 중에서 점탄성 물질의 온도와 조화가진 주파수는 점탄성 물질의 저장계수와 손실계수에 크게 영향을 미쳐서 반드시 고려해야 할 인자이다. 온도와 주파수에 따른 저장계수와 손실계수의 일반적인 변화 경향은 Fig. 2와 같다. 온도와 주파수가 점탄성 물질의 감쇠 특성에 미치는 영향은 유사하여 온도의 영향은 주파수의 영향으로 환산하여 계산할 수 있다는 온

도-주파수 중첩원리(temperature-frequency superposition principle)가 성립하므로 다음과 같은 관계식이 성립한다.⁽¹⁴⁾

$$E^*(\varphi_1, T_1) = E^*(\varphi_2 a(T_2), T_2) \quad (3)$$

여기서 $\alpha(T)$ 는 이동계수(shift factor)이고 $f\alpha(T)$ 를 환산주파수(reduced frequency)라고 한다. 그러므로 점탄성 물질의 저장계수와 손실계수는 환산주파수, $f\alpha(T)$ 를 이용하면 온도 및 주파수에 따른 복소계수의 특성을 쉽게 표현될 수 있다. 대부분의 점탄성 물질에서 $\log \alpha(T)$ 와 $1/T$ 는 비례하는 관계를 보이는 것으로 알려져 있고 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽¹²⁾

$$\log(\alpha(T)) = d_1 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (4)$$

위식에서 d_1 은 비례상수이고 T_0 는 임의의 기준온도이다.

환산주파수의 변화에 따른 점탄성 물질의 복소계수

는 일차 유리미분모델(fractional derivative model)^(12, 16)을 이용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma(t) + c_1 D^\beta \sigma(t) = a_1 \varepsilon(t) + b_1 D^\beta \varepsilon(t) \quad (5)$$

여기서, $0 < \beta < 1$ 이며,

$$D^\beta s(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{s(\tau)}{(t-\tau)^\beta} dt$$

또, a_1, b_1, c_1, β 는 상수이고 $\Gamma(x)$ 는 감마함수(Gamma function)이다. 조화응답을 가정하면 식 (5)의 모델은 주파수영역에서 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다.

$$\bar{\sigma} = \frac{a_1 + b_1(i\omega)^\beta}{1 + c_1(i\omega)^\beta} \bar{\varepsilon} = E^* \bar{\varepsilon} \quad (6)$$

여기서 ω 는 각속도를 의미한다. 식 (6)에서 각속도, ω 를 환산주파수로 표시하면 점탄성 물질의 복소계수는 다음과 같이 일반적으로 표현될 수 있다.

$$E^* = E(1 + i\eta) = \frac{a_1 + b_1(i2\pi f\alpha(T))^\beta}{1 + c_1(i2\pi f\alpha(T))^\beta} \quad (7)$$

그러므로 상수 a_1, b_1, c_1, β 를 알고 있다면 점탄성 물질의 감쇠특성을 주파수 및 온도에 따라서 쉽게 기술할 수 있다. 식 (7)에 나타나는 네 개의 인자, a_1, b_1, c_1, β 는 보통 고정 지지된 규격보의 한면에 제진층을 피복하고 보를 가진하는 Oberst 보 감쇠특성시험⁽¹²⁾을 여러 환경에 대하여 행한 다음 커브 피팅을 통하여 결정할 수 있다.

2.2 제진층을 갖는 보의 해석

점탄성 층을 갖는 보의 해석방법은 많은 연구자들에 의해 개발되어 왔다. 그 중에서 간단하면서도 정확한 해석으로 가장 많이 쓰이는 방법이 Ross, Ungar, Kerwin(RUK)등에 의해 제안된 등가 강성법이다.^(12,14) RUK 식에 의하면 점탄성 층의 저장 계수, 손실계수가 각각 E_2, η_2 이고 보의 탄성계수, 손실계수, 이차면적모멘트가 각각 E_1, η_1, I_1 일 때, 등가의 복소 처짐 강성(flexural rigidity) $(EI)^*$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

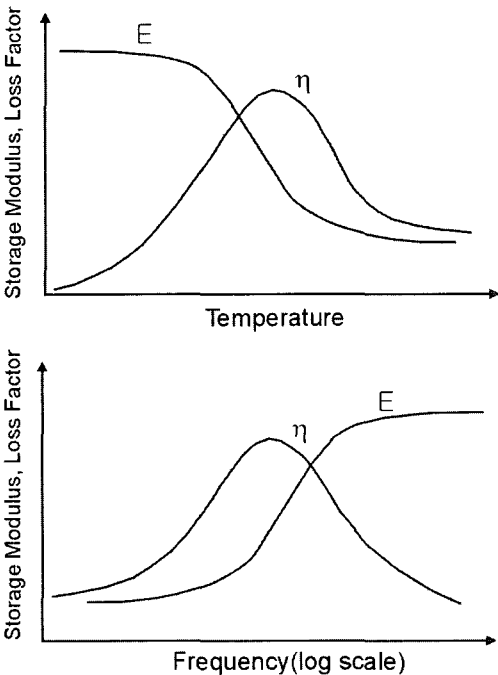


Fig. 2 Storage modulus and loss factor of a typical viscoelastic material with frequency and temperature

$$\frac{(EI)^*}{(EI_1)^*} = 1 + e^* h^3 + 3(1+h)^3 \frac{e^* h}{1+e^* h} \quad (8)$$

여기서 $h = H_2 / H_1$, $e^* = E_2^* / E_1^*$ 이다. 식 (8)의 실수부와 허수부를 취하면 점탄성 제진층이 부착된 보의 등가 저장계수(storage modulus)와 등가 손실계수를 계산할 수 있다.

Fig. 1과 같이 제진층을 포함하는 구조체를 유한요소(finite element)로 모델링하면, 점탄성 제진층을 갖는 부분은 식 (8)에 의해서 정의되는 등가 강성을 갖는 보 요소(beam element)로 모델링 되고, 점탄성 제진층을 갖지 않는 부분은 별도의 강성을 갖는 보로 모델링 할 수 있게 된다. Fig. 3와 같이 처짐과 회전 변위를 갖는 보요소를 고려하고 전단변형에너지를 무시하면 요소질량행렬과 요소강성행렬은 다음과 같이 쓸 수 있다.⁽¹⁵⁾

$$[M_e]_{ij} = \int_{x_1}^{x_2} \rho A N_i N_j dx \quad (9)$$

$$[K_e]_{ij} = \int_{x_1}^{x_2} E I N_i'' N_j'' dx \quad (10)$$

위식에서 N 은 보간함수(shape function)이고 ρ, A 는 각각 밀도와 보의 단면적이다.

유한요소법의 절차에 따라 구성된 계의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (11)$$

여기서 $[M], [K]$ 는 각각 질량행렬(mass matrix)과 강성행렬(stiffness matrix)이고, $\{x\}, \{f\}$ 는 각각 변위벡터와 외력벡터이다. 구조체가 등가강성을 갖는 보로 이루어져 있고 점탄성 층을 포함하는 경우 강성행렬, $[K]$ 는 복소수 값이 되며 손실계수와의 다음과 같은 관계식을 만족한다.

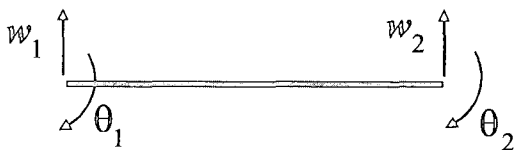


Fig. 3 Finite element of a beam

$$[K] = [K_{real}] + i[K_{imag}] = [K_{real}](1 + i\eta) \quad (12)$$

위식에서 $()_{real}, ()_{imag}$ 는 각각 실수부와 허수부를 의미한다. 조화운동을 가정하면 식 (11)로 표현되는 계의 고유값문제는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[K]\{X\} = \zeta[M]\{X\} \quad (13)$$

위식에서 $\{X\}$ 는 고유벡터(eigenvector)이고 $\zeta (= \omega^2)$ 는 고유값(eigenvalue)이다. 식 (13)으로 정의된 고유값 문제를 풀면 계의 고유진동수와 고유벡터를 알 수 있다. 식 (13)으로 표현된 고유값 문제는 점탄성 층의 영향으로, 구성된 강성행렬이 주파수의 함수가 되어 비선형 방정식이 된다. 그러나 점탄성 물질의 복소 강성계수가 변위에 무관하다고 가정하면, 주어진 온도에서 초기 주파수를 가정하고 제진층의 등가강성을 계산하여 선형 고유값문제를 풀고, 계산된 주파수의 차가 수렴할 때까지 반복하는 축차과정을

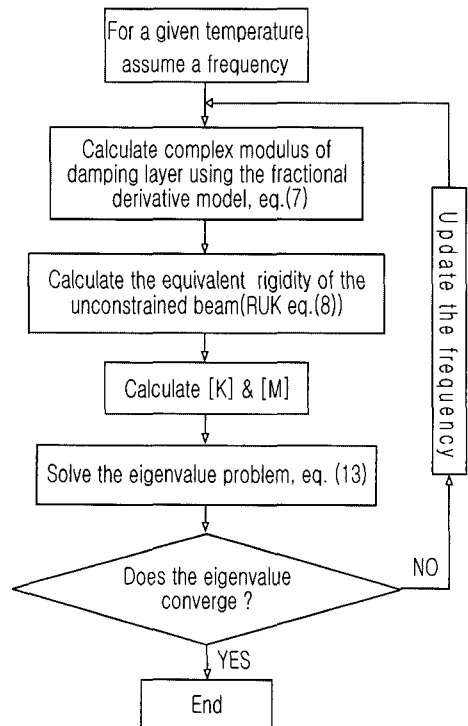


Fig. 4 Iteration procedure of the nonlinear eigenvalue problem

통하여 고유값 문제를 풀 수 있다. Fig. 4에 축차과정을 정리하였다.

Fig. 1과 같이 부분적인 부위에 제진층이 부착되어 있는 경우 제진층에서 얼마나 많은 에너지가 소산되는지에 대한 척도는 손실계수이다. 특정 고유모드에 대한 손실계수는 다음과 같이 정의 된다.

$$\eta^n = \frac{\sum_{j=1}^m \eta_j U_{ej}}{\sum_{j=1}^m U_{ej}} \quad (14)$$

위식에서 η^n 은 n 번째 고유모드의 손실계수이고, m 은 유한요소의 개수, η_j 은 j 번째 요소의 손실계수이고, U_{ej} 는 j 번째 요소의 최대 변형 에너지이다. 식 (14)의 최대 변형에너지를 정확히 구하기 위해서는 식 (13)의 복소 고유값 문제를 풀어야 한다. 하지만 복소 고유값 문제는 계산 비용이 크게 높아지게 된다. 그러나 감쇠가 크지 않은 경우, 감쇠계의 고유진동수와 고유모드는 비감쇠계의 고유진동수와 고유모드와 같다고 가정할 수 있다.⁽¹⁵⁾ 결과적으로 식 (13)의 고유값 문제에서 허수부의 강성행렬을 무시하고 실수 고유값 문제를 풀어 각 모드의 모드변형에너지(modal strain energy)를 사용하여 각 모드의 손실계수를 구하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 모드변형에너지법을 사용하여 모드의 손실계수를 계산한다.

3. 점탄성 제진층 길이 최적화

손실계수는 공진점 부근에서 계의 응답크기에 크게 영향을 미치므로 표면 제진층을 이용하여 진동을 제어하기 위해서는 진동 모드의 손실계수를 최대한 크게 하는 것이 필요하다. 본 장에서는 비구속 점탄성 제진층을 갖는 보에서 최대 손실계수가 최대가 되는 제진층의 길이를 제진층과 보의 두께비 및 온도에 따라 구한다.

3.1 비구속 감쇠층 보의 유한요소 해석

Fig. 5와 같은 비구속형 보를 고려한다. 보의 좌측은 고정지지(clamped)되어 있으며 우측은 자유단 상태이다. 점탄성 제진 물질은 LD-400⁽¹²⁾으로 구성되어 있고 보의 재질은 알루미늄이다. LD-400은 제진용 타일로 구성되어 표면에 부착하는 방식으로 제진층을 형성한다. LD-400 제진물질의 강성 및 손실계수의

특성은 Fig. 6과 같고⁽¹²⁾, 복소 강성계수와 이동계수는 유리미분모델을 이용하면 다음과 같이 표현될 수 있다.⁽¹²⁾

$$E^* = \frac{338.2 + 2485.0[i \cdot f\alpha(T)]^{0.47}}{1 + 0.12[i \cdot f\alpha(T)]^{0.47}} \text{MPa} \quad (15)$$

$$\log[\alpha(T)] = 12222 \left(\frac{1}{T(^{\circ}\text{C}) + 273} - \frac{1}{288.6} \right) \quad (16)$$

식 (15)과 (16)을 이용하면 특정주파수와 온도에 대하여 LD-400의 저장강성계수와 손실계수를 계산할 수 있고, 식 (8)에 의하여 비구속형 보의 등가 강성을 계산할 수 있다.

Table 1 Material properties of the beam problem

	Al	LD-400
E	69 GPa	Eqa. (15)
η	0.001	Eqa. (15)
$\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$	2760	1524
H[mm]	2	0.889
T0 [°C]	-	15.6

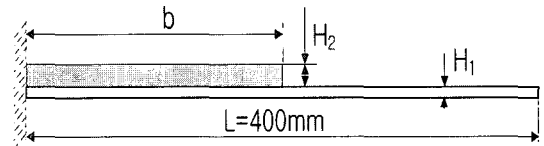


Fig. 5 An unconstrained damping layer problem

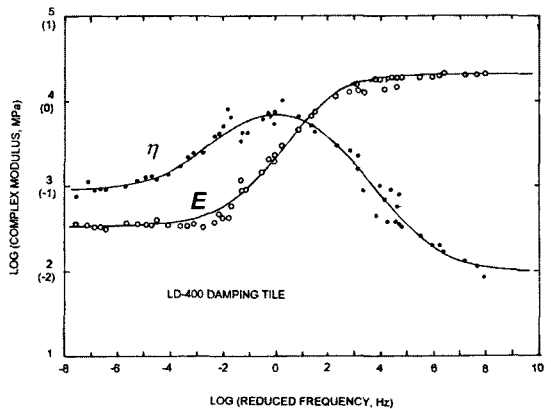


Fig. 6 Complex modulus and loss factor of LD-400 damping tile⁽¹²⁾

등가 강성을 갖는 보의 손실계수를 계산하기 위하여 Hermite 3차 보간함수를 갖는 이차원 유한요소 보 해석 프로그램을 개발하고, 제진층을 갖는 보를 20개의 등가 보요소를 사용하여 Fig. 7(a)와 같이 모델링하여 식 (13)의 고유값 문제를 축차과정을 반복하여 풀었다. 또 고유값 문제의 해를 이용하여 첫번째 모드에서 계의 손실계수를 식 (14)를 이용하여 계산하였다. 이 때 보의 물성값은 Table 1에 정리하였고, 제진재의 피복길이 b 는 200 mm였다. 해석 결과의 정확성을 확인하기 위하여 MSC/NASTRAN을 이용한 해석결과와 비교하였고, 결과를 Table 2에 정리하였다. NASTRAN의 경우 주파수에 대하여 비선형으

로 변화하는 탄성계수를 모델링하는 기능이 탑재되어 있지 않으므로 개발된 프로그램에서 결과로 출력된 고유주파수에서의 물성값을 입력으로 사용하였다. 또, Fig. 7(b)와 같이 점탄성 물질은 CQUAD4 사각형요소를 사용하고 보는 CBAR요소를 보의 두께의 1/2만큼 이동(offset)시켜 모델링 하였다. Fig. 8에 첫번째 모드의 형상에 대하여 두 결과를 비교하여 그렸다. 두 해석 결과는 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 손실계수의 계산에는 각 요소의 변형에너지를 중요하므로 Fig. 9에 각 요소에서의 변형에너지를 NASTRAN의 결과와 비교하였다. 변형에너지의 분포도 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

Table 2 Comparison of eigenvalues and loss factors

Model	Mode 1	
	Frequency (Hz)	Loss factor
Equiv. beam	11.005	9.163E-2
NASTRAN	10.971	9.035E-2
Ratio [%]	100.31	101.4

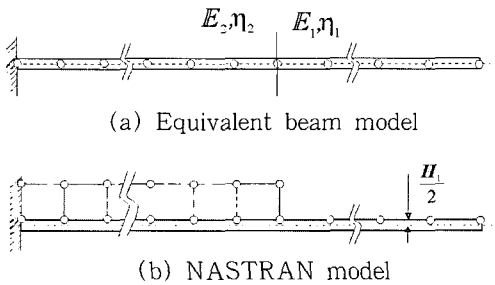


Fig. 7 Finite element models of beam

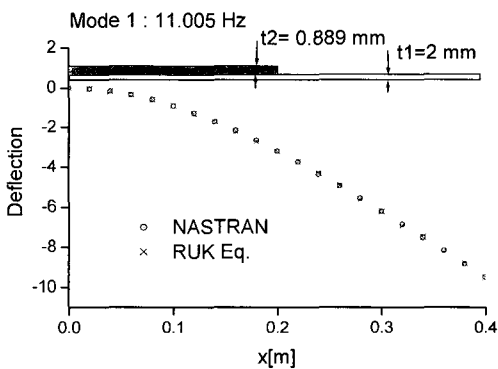


Fig. 8 The first mode shape of the beam problem

3.2 제진층 길이 최적화

공진점 근처에서 보 구조물의 진동을 최소화 하기 위해서는 손실계수를 최대로 하는 것이 좋다. 일반적으로 보 전체에 제진재를 처리하는 것이 가장 간단한 방법이지만 이는 최대의 손실계수를 주지 않는 경우가 많다.⁽¹³⁾ 점탄성 제진층의 두께가 타일 형태로 일정하다고 가정하고 최대의 손실계수를 주는 제진층의 피복 길이를 구하는 문제는 다음과 같은 최적화 문제로 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{maximize } \eta(b; f, T) \\ & \text{subject to } b_L \leq b \leq b_U \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 b 는 설계변수로 제진층의 피복 길이이고, b_L, b_U 는 각각 설계변수의 하한값과 상한값이다. 식 (17)로 정의된 최소화 문제는 수학적계획법에 기초한

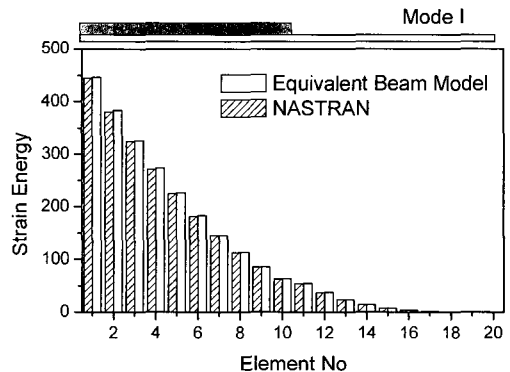


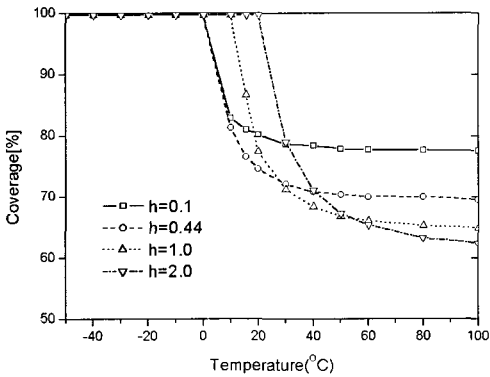
Fig. 9 Comparison of element strain energies in the first mode of the beam problem

수치적 탐색법으로 해를 구할 수 있다.

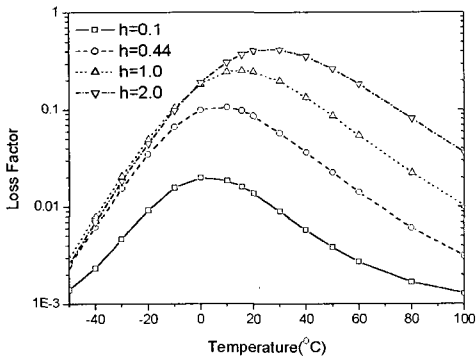
최대의 손실계수를 주는 점탄성 층의 부착 길이는 구조물의 공진주파수와 주변 공기의 온도에 따라 달라지게 되며 이에 대한 고려가 필요하다. Fig. 5와 같은 비구속형 점탄성 제진층을 갖는 보 구조물의 제진층 길이를 최소화하기 위하여 최속강하법(steepest descent method)⁽¹⁷⁾을 이용하여 식 (17)의 최적화 문제를 풀었다. 보의 유한요소모델은 3.1절의 등가 보 요소 모델과 동일하며 모든 물성값도 동일한 값을 사용하였다. 최속강하법을 구동하기 위한 목적함수의 설계변수에 대한 기울기는 다음과 같은 전진 유한차분법을 이용하여 계산하였다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial b} = \frac{\eta(b + \Delta b) - \eta(b)}{\Delta b} \quad (18)$$

위 식에서 Δb 는 설계변수의 섭동량을 의미한다.



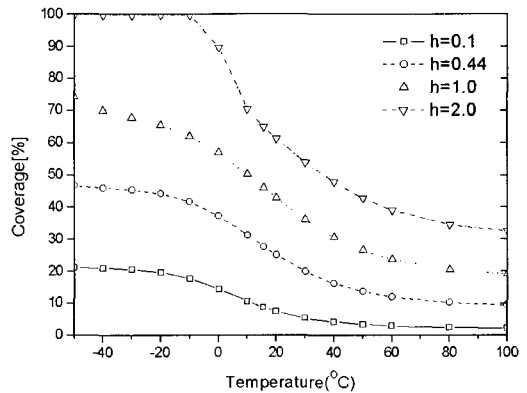
(a) Optimum coverage



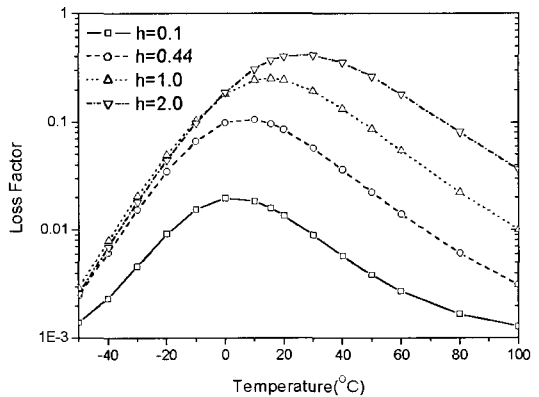
(b) Loss factor

Fig. 10 Optimum coverage and loss factor of the clamped-free beam problem for the first mode

고정지지-자유단 조건의 경계조건을 갖는 보의 두께를 2mm로 고정하고 제진층의 두께와 주변온도를 변화시켜가면서 최대 손실계수가 되는 제진층의 최적 길이를 첫번째 모드에 대하여 구하고 최적 제진층의 피복길이(coverage, %)와 그 때의 손실계수를 Fig. 10에 나타내었다. 이 경우 제진층의 두께는 제진층의 피복길이에 상관없이 일정하다고 가정하였으며 최적 제진층의 길이를 보의 길이에 대한 백분율로 나타내었다. 따라서 제진층의 피복길이가 길어지면 사용된 제진재의 양이 많아짐에 유의하여야 한다. Fig. 10을 살펴보면 최적의 제진층 피복길이는 제진층과 보의 두께 비와 제진층의 온도에 따라서 크게 달라짐을 알 수 있다. 점탄성 물질의 온도가 일정한 온도 이하로 떨어지는 경우 최대의 손실계수를 얻기 위해서는 보의 전 부위에 제진층을 피복하는 것이 최대 손실계수



(a) Optimum coverage



(b) Loss factor

Fig. 11 Optimum coverage and loss factor of the clamped-free beam problem with the constant- volume constraint

를 얻는 것으로 나타났으며, 또한 일정 천이온도 구간을 지나면 온도가 증가해도 최적의 점탄성층 피복 길이는 특정값에 수렴하는 경향을 보인다. 온도가 낮은 경우 제진층의 강성이 커서 주파수의 상승에 의한 손실계수의 상승폭이 커지지만 온도가 높아질수록 제진층의 강성은 낮아져 제진층 손실계수의 영향이 커지는 현상을 보이는 것으로 판단된다. 그러나 이와 같은 최적의 피복 길이는 점탄성 물질의 특성과 모드의 형상에 따라 바뀔 수 있음에 유의하여야 한다. 그러므로 진동을 최소화할 관심영역을 정의하고 피복될 점탄성 재료가 결정되면 본 연구에서 진행된 과정을 거쳐서 최적의 피복길이를 결정하는 과정의 반복이 필요하다.

제진층의 부피가 일정하고 동일한 두께로 제진층을 부착한다고 가정할 때 최대 손실계수를 갖는 제진층의 최적 부착길이를 비슷한 방법으로 계산하였다. 이

경우에는 제진층의 피복 길이가 늘어나면 제진층의 두께는 반비례하여 줄어드는 것에 주의하여야 한다. 고정지지-자유단 경계조건을 갖는 경우에 첫 번째 모드에 대한 결과를 Fig. 11에 나타내었고, 단순지지 경계조건의 보에 대한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 고정지지-자유단 경계조건을 갖는 보의 경우 완전 지지부에서부터 제진층을 피복한다고 가정하였고, 단순지지 경계조건을 갖는 보의 경우 모드형상을 고려하여 보의 중앙에서 대칭으로 동일한 두께의 제진층을 피복하는 것으로 가정하였다. 또, 그림에서 h 는 보에 제진층이 50%가 피복되었을 때의 값이다. 그림에서 보듯이 온도가 높아질수록 변형에너지 밀도가 높은 부분에 집중하여 제진층을 처리하면 높은 손실계수를 얻을 수 있는 경향을 볼 수 있다.

4. 결론

비구속형 점탄성 제진층을 갖는 보에 대하여 유리 미분모델을 사용하여 주파수 및 온도에 따른 점탄성 물질의 강성계수 및 손실계수를 표현하고 Ross, Ungar, Kerwin 등이 제안한 등가 강성법을 이용하여 등가 강성 및 손실계수를 갖는 보요소로 모델링하여 고유값 문제를 정의한 후 모드에너지법에 의하여 각 모드의 손실계수를 계산하였다. 점탄성 제진층의 길이를 설계변수로 하고, 손실계수를 최대가 되도록 하는 최적화 문제를 정의하고 유한차분법과 수치적 탐색 알고리즘을 이용하여 최적값을 구하였다. 손실계수를 최대로 하는 점탄성 제진층의 최적길이가 제진층의 두께 및 주변온도에 따라 크게 달라짐을 예제를 통하여 확인하였다.

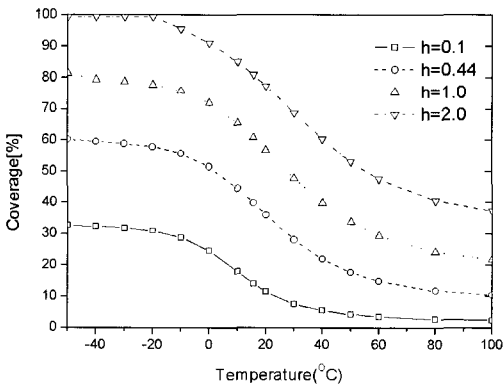
향후의 과제로 제안된 방법을 구속형 제진층을 갖는 보 문제에 대하여 확장하는 연구를 진행할 예정이며 해석적인 설계민감도 해석으로 최적화 과정의 효율을 높이는 작업이 필요하다.

후 기

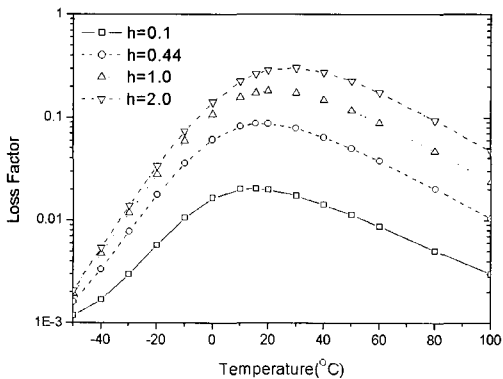
본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-00475-0)지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Plunkett, R. and Lee, C. T., 1970, Length



(a) Optimum coverage



(b) Loss factor

Fig. 12 Optimum coverage and loss factor of the simply-supported beam problem with the constant-volume constraint

Optimization for Constrained Viscoelastic Layer Damping, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 48, No.1, pp. 150~161.

(2) Lunden, R., 1979, Optimum Distribution of Additive Damping for Vibration Beams, Journal of Sound and Vibration, Vol. 66, No. 1, pp. 25~37.

(3) Lifshitz, J. M. and Leibowitz, M., 1987, Optimal Sandwich Beam Design for Maximum Viscoelastic Damping, Int. J. Solids Structures, Vol. 23, No. 7, pp. 1027~1034.

(4) Suweca, W. and Jezequel, L., 1992, Optimal Structural Design with Damping Constraint Limitations, Int. J. for Numer. Meth. In Engng., Vol. 35, pp. 21~35.

(5) Hajela, P. and Lin, C.Y., 1991, Optimal Design of Viscoelastically Damped Beam Structures, Appl. Mech. Rev., Vol. 44, No.11, pp. S96~S106.

(6) 유영훈, 양보석, 1995, "점탄성 제진계를 이용한 비구속형 제진강관의 최적설계에 관한 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 5 권, 제 4 호, pp. 493~501.

(7) Roy, P. K. and Ganesan, N., 1996, Dynamic Studies on Beams with Unconstrained Layer Damping Treatment, Journal of Sound and Vibration, Vol. 195, No. 3, pp. 417~427.

(8) Tropette, P. and Fatemi, J., 1997, Damping of Beams, Optimal Distribution of Cuts in the Viscoelastic Constrained Layer, Structural Optimization, Vol. 13, pp. 167~171.

(9) Nakra, B. C., 1998, Vibration Control in Machines and Structures Using Viscoelastic Damping, Journal of Sound and Vibration, Vol. 211, No. 3, pp. 449~465.

(10) Lumsdaine, A. and Scott, R. A., 1998, Shape Optimization of Unconstrained Viscoelastic Layers Using Continuum Finite Elements, Journal of Sound and Vibration, Vol. 216, No.1, pp. 29~52.

(11) Akanda, A. and Goerchius, G. M., 1999, Representation of Constrained/Unconstrained Layer Damping Treatments in FEA/SEA Vehicle System Models: A Simplified Approach, SAE Paper No. 1999-01-1680.

(12) Jones, D. I. G., 2001, Handbook of Viscoelastic Vibration Damping, John Wiley & Sons, New York.

(13) Mead, D. J., 2000, Passive Vibration Control, John Wiley & Sons, New York.

(14) Nashif, A. D., Jones, D. I. G. and Henderson, J. P., 1985, Vibration Damping, John Wiley & Sons, New York.

(15) Sun, C. T. and Lu, Y. P., 1995, Vibration Damping of Structural Elements, Prentice Hall, Inc., London.

(16) Tritz, T., 1996, "Analysis of Four-parameter Fractional Derivative Model of Real Solid Materials, Journal of Sound and Vibration, Vol. 195, No. 1, pp. 103~115.

(17) Arora, J. S., 198, Introduction to optimum design, McGraw-Hill Inc., New York.