

점탄성재료의 진동감쇠특성에 관한연구

이준근*, 박용석**, 이우식***

(On Damping Characteristics of Viscoelastic Material)

(Joon-Keun Lee, Yong-Suk Park, U-Sik Lee)

1. 서론

진동을 제어하는 방법의 하나로 널리 응용되고 있는 진동감쇠 제어기술은 급속한 산업화에 부수되는 불필요한 진동이나 소음을 효과적으로 줄이기 위하여 광범위하게 연구되어 오고 있다. 특히 수동감쇠제어는 기존의 구조물에 단지 표면처리등의 간단한 작업을 통해 큰 감쇠효과를 얻을 수 있을뿐 아니라 수명도 반영구적이고 사용장소의 구애를 거의 받지 않는다는 장점 때문에 그 수요가 증가하고 있는 실정이다[1]. 그러나 대표적인 수동감쇠재료인 점탄성재료는 우수한 감쇠성질을 가지고 있음에도 불구하고, 재료 자체가 주위환경에 따라 감쇠특성 및 물성치가 민감하게 변화하기 때문에 이 재료로 감쇠처리된 구조물에는 유한요소법과 같은 구조해석기법을 응용하는 것이 쉽지 않다는 단점이 있다[2]. 따라서 본 연구에서는 이러한 제약을 극복하기 위하여, 모우드해석법을 통해 유도된 점탄성재료의 주파수와 온도에 대한 특성치를 보여주는 Reduced Frequency Nomogram(RFN)을 전산화과정을 거쳐 그래프화 하여 미지의 온도와 주파수에서 특성치를 구할 수 있도록 하였다. 이 자료를 근거로 점탄성 재료를 포함한 실제 구조물의 이론적인 해석을 가능하게 함으로서 이 재료의 광범위한 활용을 도모하였다.

2. 실험이론

실험적으로 구조물을 해석하는 방법 중 가장 대표적인 것으로 모우드 해석법을 들 수 있다. 그러나 점탄성재료는 재료의 성질상 직접적인 모우드해석이 곤란하기 때문에 본 연구에서는 급속 Beam시편을 매개체로 하여 감쇠처리된 Beam시편의 Modal Parameter(고유진동수, 손실계수, 모우드 형상)를 추출하였고, 충구조로 구성된 Beam에 대한 해석적 방정식(RKU)을 이용하여 점탄성재료의 손실계수 및 탄성계수를 유도하였다. 전달함수로부터 Modal Parameter의 추출시 각 모우드간의 간섭 및 Noise의 영향을 배제하기 위하여 Nyquist Plot 형태로 전달함수를 Curve-Fitting하였

다. 실험결과 Beam시편 자체의 모우드가 잘 분리되어 있었기 때문에 전달함수의 분석은 단일모우드방법(Single Mode Method)으로 수행하였다. 구조감쇠(Structural Damping)을 포함하는 계의 일반적인 운동방정식은 다음과 같이 표현한다.

$$M\ddot{x} + i\eta\dot{x} + kx = f \quad (1)$$

식(1)을 전달함수(x/f)의 형태[4]로 표현하면

$$A_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{-\omega^2 r_{ajk}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i\eta_r \omega_r^2} \quad (2)$$

여기서, r_{ajk} , ω_r , η_r 은 각각 Modal Constant, 고유진동수, 손실계수를 의미한다. $r_{\hat{a}j}$ 는 r 번째 모우드의 j 번째점에서의 Modal Vector이며, $r_{ajk} = r_{\hat{a}j} \cdot r_{\hat{b}k}$ 의 관계를 갖게된다. 식(2)의 전달함수를 실수부(Re)와 허수부(Im)으로 나누어 각각 제공하여 더하면 다음과 같으며,

$$\begin{aligned} \text{Re}^2 + \text{Im}^2 = \\ \frac{\omega^4 r_{ajk}^2 [(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + (\eta_r \omega_r^2)^2]}{[(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + (\eta_r \omega_r^2)^2]^2} \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)의 양변에 ω_r^4/ω^4 을 곱하게 되면 식(3)는 다음과 같은 원의 방정식 형태를 갖게된다.

$$\left[\frac{\omega_r^2}{\omega^2} \text{Re} \right]^2 + \left[\frac{\omega_r^2}{\omega^2} \text{Im} + \frac{r_{ajk}}{2\eta_r} \right]^2 = \left[\frac{r_{ajk}}{2\eta_r} \right]^2 \quad (4)$$

즉, 실험을 통해 구조감쇠를 포함하는 구조물의 전달함수를 실수축과 허수축상에서 측정하면 식(4)와 같은 Nyquist Plot 형태로 나타나게 되므로 이 식으로부터 감쇠처리된 시편의 Modal Parameter를 결정할 수 있다.

3. 실험방법 및 결과

점탄성재료는 온도에 따라 그 특성이 민감하게 변화기 때문에 이 재료로 감쇠처리된 시편의 전달함수를 측정하기 위해서, 실험장치의 구성이 손쉽고 비교적

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

*** 정회원, 인하대학교 공과대학 기계공학과

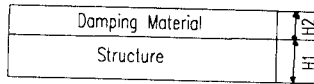


Fig. 1 Free-Layer Treatment

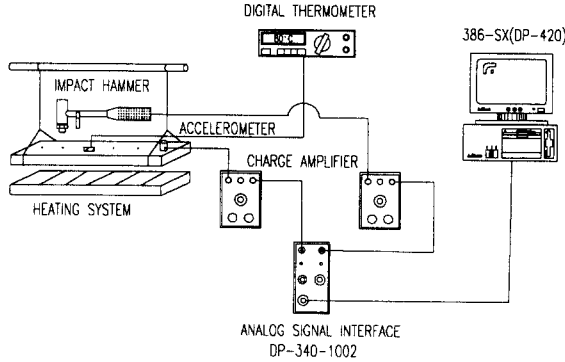


Fig. 2 Impact Excitation Test Apparatus

정확한 측정이 가능한 충격가진법[4]을 택하였다. 실험장치의 구성도는 Fig.2 와 같다. 여기서, 실험에 사용한 시편은 Stainless Steel(ASTM-A36)이며 점탄성 재료는 주식회사 한국 3M 주식회사에서 제공한 Vibration Damping Tape(SJ-2015 X)이다. Impact Hammer의 특성상 측정주파수의 범위는 2,500Hz로 한정시켰으며 시편의 온도를 20° C에서 80° C까지 10° C 간격으로 올리면서 전달함수를 측정하였다. Fig.4 는 측정된 전달함수이며 Fig.5는 정확한 Modal Parameter를 추출하기 위해, 측정된 전달함수로부터 유도된 Nyquist Plot이다. Table 2, 3는 Nyquist Plot으로부터 식(4)을 이용하여 구한 감쇠처리된 Beam시편의 Modal Parameter들이다. 이때, 순수한 점탄성 재료만의 물성치를 유도하기 위하여 (RKU) 방정식 [3]

$$\frac{EI}{E_1 I_1} = 1 + e_2 h_2^3 + 3(1 + h_2)^2 \left(\frac{e_2 h_2}{1 + e_2 h_2} \right) \quad (5)$$

을 이용하였다. 여기서, $e_2 = E_2 / E_1$, $h_2 = H_2 / H_1$ 이다. 점탄성 재료의 손실계수와 탄성계수를 구하기 위하여 강성항을 복소수 형태로 대치하여 실수부와 허수부로 나누면 식(6)과 식(7)의 형태를 얻게된다.

$$\frac{EI(1+\eta_1 \eta_2)}{E_1 I_1 (1+\eta_1^2)} = 1 + \frac{E_2(1+\eta_2 \eta_1)}{E_1(1+\eta_1^2)} h_2^3 + 3(1+h_2)^2 \frac{E_2(1+\eta_2 \eta_1)}{E_1(1+\eta_1^2)} h_2 \quad (6)$$

$$\frac{EI(\eta_2 - \eta_1)}{E_1 I_1 (1+\eta_1^2)} = \frac{E_2(\eta_2 - \eta_1)}{E_1(1+\eta_1^2)} h_2^3 + 3(1+h_2)^2 \frac{E_2(\eta_2 - \eta_1)}{E_1(1+\eta_1^2)} h_2 \quad (7)$$

여기서 η_1 , η_2 , η 는 각각 기존시편의 손실계수, 감쇠 재료의 손실계수, 감쇠처리된 구조물의 손실계수를 의미한다. Table 5, 6는 식(6), (7)으로부터 유도된 점탄성재료의 물성치이다.

4. Reduced-Frequency-Nomograph(RFN)의 전산화

본 연구에서 RFN의 전산화를 이루는데 개발된 Program은 크게 Data Shifting 과정과 Curve-Fitting 과정으로 구성되어 있으며 이 프로그램에 대한 흐름도는 Fig.5와 같다. 즉 실험가능한 각 온도에서 측정된 Data를 이용하여 그 형상들의 연계성을 찾아내는 Data Shifting과정과 식(8)에서 점탄성재료의 특성[3]을 대표하는 상수(E_{max} , E_{min} , β , n)의 값을 결정하는 과정으로 구성되어 있다.

$$E(\omega) = E_{min} + E_{max} \left[1 - \frac{1}{1 + (\beta \omega)^n} \right] \quad (8)$$

E_{min} = 최소탄성계수값

E_{max} = 최대탄성계수값

또한 $\eta(\omega)$ 는 $E(\omega)$ 와

$$\eta(\omega) = \frac{\pi d [\ln E(\omega)]}{2 d [\ln(\omega)]} \quad (9)$$

$$= \frac{n \pi E_{max} (\beta \omega)^n}{2 E(\omega) [1 + (\beta \omega)^n]^2}$$

과 같은 관계가 성립하므로, 식(8)로부터 주파수에 따른 손실계수(loss factor)의 곡선식을 얻을수 있다.

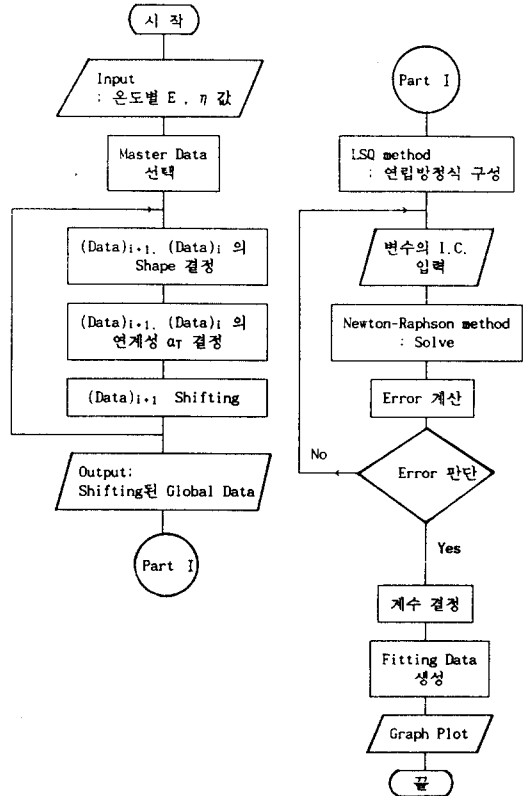


Fig.3 Flow Chart for RFN

3. 수치해석과 실험적 해석과의 비교

감쇠처리된 Beam의 진동해석을 F.E.M.으로 해석하기 위하여, 실험으로부터 얻어진 손실계수를 Table 8과 같이 주파수에 대해 Polynomial 형태로 바꾼 후, 감쇠처리 되기전의 Beam의 탄성계수(Young's Modulus)를 복소수형태 $E = E [1+i\eta(\omega)]$ 로 대체하여 특정한 온도에서의 진동해석을 수행하였다. Table 9는 특정온도 20° C, 80° C에서 감쇠처리된 Beam의 수치해석과 실험해석에 의한 결과의 비교이다. 비교결과 각 경우에서 고유진동수가 비교적 일치함을 볼 수 있다.

3. 결론

본 연구의 결과를 종합하면 다음과 같다.

- 범용적인 감쇠재료로 널리 사용되고 있는 점탄성 재료의 온도와 주파수에 따른 물성치를 모우드 해석법을 통해 구하고 점탄성재료의 진동감쇠 특성을 보다 폭넓은 온도와 주파수의 영역에서 사용하기 위해, 제한된 갯수의 실험 데이터로부터 RFN을 그릴 수 있는 전산프로그램을 개발하였다.
- RFN에 의해 제공되는 구조감쇠값을 기존의 유한요소법에 직접 적용하여 이론해석을 한 결과 실험적으로 구한 진동특성치와 비교적 일치함을 확인함으로써, RFN을 실제 구조물의 진동해석에도 응용할 수 있는 가능성을 확인하였다

참고 문헌

- Lee, U., 1984, "Thermal and Electromagnetic Damping Analysis and It's Application", Proc. AIAA 25th Structural Dynamics and Material Conf., Palm Springs, CA. May 14-16, 1984.
- Peter J. Torvik., 1980, "Damping Applications for Vibration Control", Air Force Institute of Technology. pp.27-51.
- Ahid D. Nashif, 1985, *Vibration Damping*, A Wiley-Interscience Publication.
- D.J. Ewin., *Modal Testing Theory and Practice*, Research Studies Press LTD.
- E. Oran Brigham, 1988, *The Fast Fourier Transform and It's Applications*, Prentice-Hall, Inc.
- Daniel J. Inman, 1989, *Vibration with Control Measurement and Stability*, Prentice-Hall, Inc., pp.183-208.
- R.B. Randall, 1987, *Frequency Analysis*, B & K Publication

Table 1. Steel 과 Damping Tape의 물성치

	Stainless Steel	Damping Tape [3M VEM(TYPE 113)]
Density	$7.88 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$9.8 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$
Volume	$8.736 \times 10^{-5} \text{ m}^3$	$8.74 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
Length	$3.64 \times 10^{-1} \text{ m}$	$3.64 \times 10^{-1} \text{ m}$
Thickness	$4.0 \times 10^{-3} \text{ m}$	$4.0 \times 10^{-4} \text{ m}$
Cross Area	$2.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	$2.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
Width	$6 \times 10^{-2} \text{ m}$	$6 \times 10^{-2} \text{ m}$

Table 2. 실험에 의한 고유진동수의 비교

Mode(Hz)	Damping Tape 미부착시	Damping Tape 부착시	
		20° C	80° C
1	156.24	155.01	154.46
2	425.41	424.11	422.11
3	836.34	833.92	831.35
4	1385.68	1380.68	1375.48
5	2070.23	2064.71	2059.71

Table 3. 감쇠처리된 Beam의 온도와 주파수변화에 따른 손실계수의 변화

Temp (° C)	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
20	0.0621	0.0222	0.0114	0.0076	0.0056
30	0.0670	0.0279	0.0101	0.0078	0.0059
40	0.0591	0.0226	0.0105	0.0072	0.0057
50	0.0582	0.0293	0.0104	0.0077	0.0056
60	0.0623	0.0326	0.0125	0.0075	0.0054
70	0.0590	0.0269	0.0139	0.0084	0.0055
80	0.0547	0.0309	0.0140	0.0105	0.0062

Table 4. 순수한 Beam시편의 고유진동수와 손실계수

Mode (Hz)	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
	156.24	425.41	836.34	1385.6	2070.23
Loss Factor	0.0518	0.0210	0.0087	0.0064	0.00508

Table 5. 주파수와 온도에 따른 VEM의 손실계수의 변화

Temp (°C)	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
20	0.8887	1.0932	0.9224	0.8554	0.7872
30	0.8773	1.0225	1.1525	0.0078	0.0059
40	0.0591	0.0226	0.0105	0.0072	0.0045
50	0.0582	0.0293	0.0104	0.0077	0.0056
60	0.0623	0.0326	0.0125	0.0075	0.0054
70	0.0590	0.0269	0.0139	0.0084	0.0055
80	0.0547	0.0309	0.0140	0.0105	0.0062

Table 6. 주파수와 온도에 따른 VEM의 탄성계수 (N/m²)의 변화

°C	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
20	2.73×10 ⁶	4.84×10 ⁶	6.41×10 ⁶	9.11×10 ⁶	1.26×10 ⁷
30	1.52×10 ⁶	2.75×10 ⁶	4.58×10 ⁶	6.32×10 ⁶	6.60×10 ⁶
40	7.53×10 ⁵	1.17×10 ⁶	1.68×10 ⁶	2.67×10 ⁶	3.27×10 ⁶
50	4.54×10 ⁵	7.80×10 ⁵	1.14×10 ⁶	1.62×10 ⁶	1.86×10 ⁶
60	3.51×10 ⁵	4.58×10 ⁵	7.26×10 ⁵	1.14×10 ⁶	1.26×10 ⁶
70	3.36×10 ⁵	6.39×10 ⁵	6.60×10 ⁵	9.60×10 ⁵	9.89×10 ⁵
80	2.77×10 ⁵	3.34×10 ⁵	4.52×10 ⁵	6.63×10 ⁵	7.89×10 ⁵

Table 8. 특정온도에서 주파수에 대한 손실계수의 함수

°C	$\eta(\omega) = a_1 + a_2 \omega + a_3 \omega^2 + a_4 \omega^3$			
	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
20	9.878×10 ⁻²	-4.293×10 ⁻⁵	5.315×10 ⁻⁹	2.101×10 ⁻¹²
80	7.511×10 ⁻²	-2.391×10 ⁻⁵	3.18×10 ⁻⁹	1.951×10 ⁻¹²

Table 9. F.E.M. 과 실험을 통한 고유진동수의 비교

Mode	20° C		80° C	
	실험해석	F.E.M. 해석	실험해석	F.E.M. 해석
1	155.01	154.25	154.46	153.42
2	424.11	425.12	422.11	423.03
3	833.92	833.02	831.35	832.75
4	1380.68	1379.56	1375.48	1376.55
5	2064.71	2062.47	2059.71	2058.59

Table 7. 한국 3M 주식회사에서 제공한 VEM의 손실계수와 실험을 통해구한 VEM의 손실계수의 비교

온도(°C) Hz	0	20	40	60	80
100	0.653 (0.682)	1.012 (0.951)	0.604 (0.625)	0.265 (0.281)	0.163 (0.175)
300	0.382 (0.412)	0.944 (1.024)	0.841 (0.904)	0.502 (0.533)	0.343 (0.372)
500	0.283 (0.264)	0.855 (0.815)	0.957 (0.912)	0.652 (0.682)	0.453 (0.477)
700	0.224 (0.218)	0.792 (0.772)	0.986 (1.05)	0.705 (0.738)	0.533 (0.564)
900	0.187 (0.195)	0.753 (0.782)	1.003 (0.954)	0.806 (0.832)	0.604 (0.625)
1000	0.172 (0.184)	0.705 (0.751)	1.003 (1.201)	0.807 (0.882)	0.643 (0.681)
1300	0.167 (0.179)	0.652 (0.701)	1.003 (0.955)	0.837 (0.875)	0.656 (0.692)
1500	0.154 (0.179)	0.617 (0.652)	1.004 (0.958)	0.857 (0.892)	0.704 (0.725)
1700	0.138 (0.116)	0.624 (0.602)	0.988 (1.056)	0.904 (0.882)	0.757 (0.782)
1900	0.115 (0.123)	0.548 (0.526)	1.003 (0.972)	0.907 (1.04)	0.754 (0.776)

주) ()안의 Data는 한국3M 주식회사에서 제공한 손실계수를 나타냄

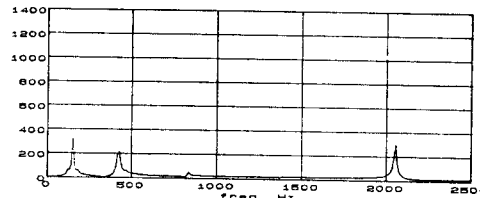
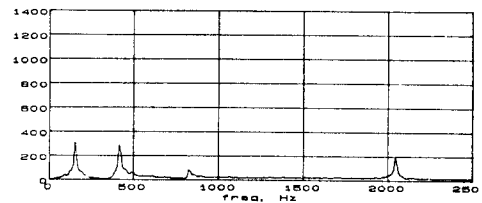


Fig. 4 Transfer Functions of Beam

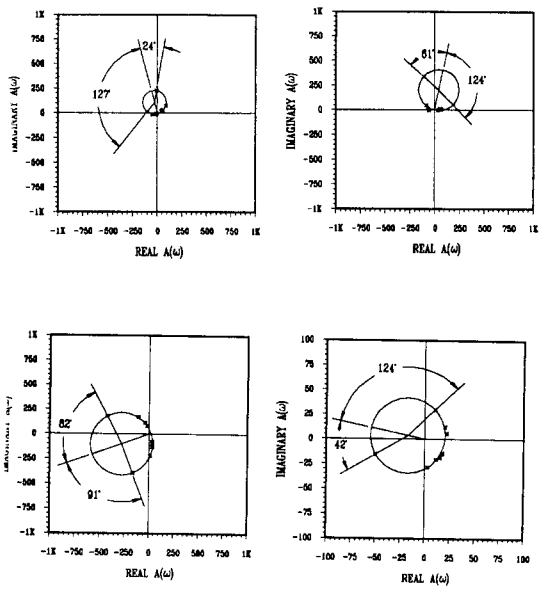


Fig. 5 Nyquist Plots of Beam

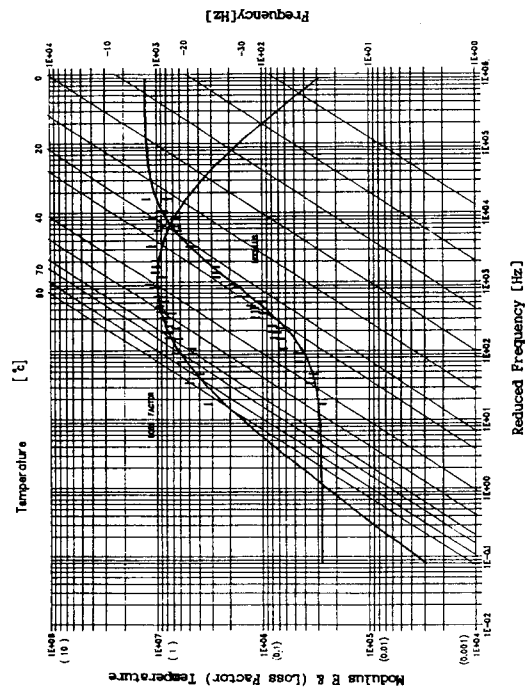


Fig. 6 Reduced-Frequency-Nomogram